科学研究費補助金 特定領域研究

新世代の計算限界
— その解明と打破 —

研究課題別成果報告書 分冊 C

平成 20 年 4 月

領域代表者　岩間 一雄
京都大学 大学院 情報学研究科　教授

目 次

C01: グラフ描画アルゴリズムとその Web 情報検索への応用
西関 隆夫，周 暁，三浦 一之，浅野 泰仁，伊藤 健洋 1
C02: 連続と離散の融合によるロバストアルゴリズム構築
杉原 厚吉，室田 一雄，今井 浩，松井 知己，岩田 覚，大石 泰章，寒野 善博，newline
西田 徹志，今堀 慎治，松浦 史郎 26
C03: ネットワーク上での社会的効用と個人的効用の対立問題に対するアルゴリズム的研究
浅野 孝夫，渡邉 敏正，今井 桂子 91
C04: 実践的な列挙アルゴリズムの理論構築
宇野 毅明，中野 眞一，松井 泰子，岡本 吉央，清見 礼 120
C05: 幾つかの画像関連問題の計算複雑度の解析と効率的な解決法の提案
浅野 哲夫，上原 隆平，元木 光雄，小保方 幸次，河村 泰之，Bishnu Arijit 156
C06: グラフ構造を有する問題に対する近似アルゴリズムの設計
永持 仁，軽野 義行，宇野 裕之，趙 亮，山崎 浩一 180
C07: Web コンテンツ活用に関連した離散最適化問題の研究
増山 繁，梅村 恭司，中山 慎一，本間 宏利，石井 利昌，相田 慎 239
C08: 高性能近似アルゴリズムの設計法に関する研究
平田 富夫，藤戸 敏弘，小野 孝男，和田 幸一 272
C09: ネットワーク問題のモデル化とアルゴリズムの研究
伊藤 大雄，岩間 一雄，増澤 利光，宮崎 修一，堀山 貴史 298
C10: 情報基盤アルゴリズムとしてのメタヒューリスティクスの研究
茨木 俊秀，藤重 悟，柳浦 睦憲，野々部 宏司，巳波 弘佳，梅谷 俊治，藤原 洋志，newline
千葉 英史，関口 良行 375
C11: 大量データ処理のための領域効率の良いアルゴリズム
定兼 邦彦，山下 雅史，小野 廣隆 414

文部科学省科学研究費補助金 特定領域研究 (課題番号 16092203)

C01: グラフ描画アルゴリズムとその Web 情報検索への応用

本研究では，平面グラフの凸描画，内部矩形描画，開矩形勢力描画，直交描画に対し，効率のよいアルゴリズムを多数与えた．これらグラフ描画アルゴリズムの多くは，線形時間で所望の描画を見つけることができる．また，“Web サイト” の概念を導入することで，Web 情報検索の品質を飛躍的に向上させた．この概念を用いて，日々増大し続けている Web リンクデータの効率的な圧縮にも成功している．これら得られた成果は，20 編の学術誌論文，20 編の国際会議論文として発表している．また，グラフ描画の理論とアルゴリズムを集大成した著書を出版した．

研究組織

研究代表者： 西関 隆夫　東北大学 大学院 情報科学研究科
研究分担者： 周 暁　東北大学 大学院 情報科学研究科
三浦 一之　福島大学 共生システム理工学類
浅野 泰仁　京都大学 大学院 情報学研究科
伊藤 健洋　東北大学 大学院 情報科学研究科 (平成 18–19 年度)

交付決定額 (配分額)

平成 16 年度	2,200,000 円
平成 17 年度	3,800,000 円
平成 18 年度	4,300,000 円
平成 19 年度	3,100,000 円
合　計	13,400,000 円

研究成果の概要

- 著書
  Md. S. Rahman and T. Nishizeki, “Planar Graph Drawing,” World Scientific, 2004 年.
- 学術誌
  J. Algorithms (2004 年), J. Combinatorial Optimization (2004 年), Combinatorica (2007 年), International J. Computational Geometry and Applications (2006 年) J. Discrete Algorithms (2005, 2006, 2007 年), International J. Foundations of Computer Science (2005, 2006 年), IEICE Trans. (2004, 2005, 2006, 2007 年)
- 国際会議
  ISAAC (香港 2004 年, 中国 2005 年, インド 2006 年), COCOON (韓国 2004 年, 中国 2005 年, 台湾 2006 年), WG (ドイツ 2004 年), APVIS (オーストラリア 2005 年), ISCAS (神戸 2005 年), IH (スペイン 2005 年), WISE (アメリカ 2005 年), GD (ドイツ 2006 年), iETA (イタリア 2006 年), WAAC (北海道 2006 年) APWeb and WAIM (中国 2007 年)

1　はじめに

本研究課題の研究成果の概要は以下の通りである.

(1) **著書**
Rahman, 西関らによって得られた研究成果を中心として，グラフ描画の理論とアルゴリズムを集大成した英文の成書 “Planar Graph Drawing” を執筆し，World Scientific 社から出版した.

(2) **平面グラフの凸描画**
平面グラフ G が凸描画を持つために必要な外凸多角形の頂点の最小個数は，G から新しく構成されるグラフの 3 連結成分分解木の葉の個数に等しいことを示すとともに，G の外頂点数最小の凸描画を線形時間で求めるアルゴリズムを与えた.

(3) **平面グラフの格子凸描画**
平面グラフの格子凸描画において，別個に研究されてきた標準分解，リアライザ，シュナイダーラベリング，順序つき全域木が全て等価であることを証明した.

(4) **4 連結平面グラフの格子凸描画**
4 連結平面グラフ G が外周上に 4 つ以上の点を持つならば，面積が $n^2/4$ 以下の平面格子に格子凸描画できることを証明した．ここで n は G の点数である．更に，G のそのような格子凸描画を求める線形時間アルゴリズムを与えた.

(5) **内部 3 連結平面グラフの格子凸描画**
平面グラフ G が内部 3 連結であり，3 連結成分分解木に葉がちょうど 4 個あるならば，G を多項式サイズの整数格子内に格子凸描画できることを示した．また，そのような描画を線形時間で求めるアルゴリズムを与えた.

(6) **平面グラフの内部矩形描画**
平面グラフ G が内部矩形描画を持つための必要十分条件を与えた．更に，G とその外面の概形が与えられたとき，G の内部矩形描画を求める多項式時間アルゴリズムを与えた.

(7) **平面グラフの開矩形勢力描画**
内部三角化平面グラフ G が開矩形勢力描画できるための十分条件を与えるとともに，与えられたグラフの開矩形勢力描画を求める多項式時間アルゴリズムを与えた.

(8) **直並列グラフの直交描画**
最大次数 3 以下の直並列グラフの直交描画で折れ曲り数最少なものを線形時間で求めるアルゴリズムを与えた.

(9) **Web サイトの抽出手法**
URL とリンクのデータに対し，“ディレクトリベースドサイト” というモデルと “フィルタ” という手法を用いて，サイトを近似的に抽出する手法を与えた．さらに，サイトを用いた枠組みがコミュニティ発見に役立つこと，特に個人サイトを含むコミュニティを多く見つけることに大きな効果があることを示した.

(10) **Max-flow based method の改良による Web 情報検索の品質向上**
Max-flow based method をサイト間グラフと従来のウェブグラフの両方に対して実行し，双方の性能を評価した．また，ウェブグラフ上で max-flow based method を実行する際に解の精度を落とす 4 つの問題を指摘し，サイト間グラフを用いることによって解決する方法を示した.

(11) **スパムリンクの自動除去による Web 情報検索の品質向上**
互いにリンクを張り合うように悪意を持って作成されたページの集合であるリンクファームを自動除去する手法を提案した．また，与えられたキーワードに対し，関連している度合いが高いページを発見するアルゴリズムを HITS の手法を基に構築した.

(12) **Web リンクデータの効率的な圧縮**
リンクの数はウェブの急速な発展に伴って非常に多くなっている．本研究では，サイトの概念を用いることで，効率の良いリンク情報の圧縮手法を構築することに成功した.

(13) **Web リンク描画ツール**
サイト間グラフのリンク，サイト内のリンク

を描画してコミュニティとリンクの関係をわかりやすく図示するためのツールをグラフ描画アルゴリズムを応用して開発した．

(14) **結託攻撃に対する電子透かしの安全性**
不正コピーを防ぐ目的で作成された電子透かしに対して，複数の犯罪者が結託して電子透かしの一部を発見・改ざんするという結託攻撃が問題になっている．本研究では，結託攻撃に対する電子透かしの安全性を評価する指標に対し，良い上界を与えた．

(15) **グラフの均一分割問題**
グラフの均一分割問題は選挙区割問題等に応用できる．本研究では，直並列グラフに対し，均一分割問題を擬多項式時間で解くアルゴリズムを与えた．さらに，このアルゴリズムが部分 k-木に拡張できることを示した．

(16) **グラフの最大分割の近似**
需要点と供給点があるグラフの最大分割問題は電力供給問題をモデル化しており，一般には強 NP 困難であることが知られている．この問題の近似可能性について研究した．また，直並列グラフや部分 k-木に対して完全近似スキーム (FPTAS) と呼ばれる近似アルゴリズムを提案した．

(17) **端子シュタイナー木問題**
グラフの端子シュタイナー木を求める問題は VLSI の配線問題に応用できる．この問題が固定パラメータ容易（Fixed Parametor Tractable）であることを示した．

(18) **リスト全彩色**
リスト全彩色では，グラフの隣接する点や辺が異なる色になるように，点や辺に予め与えた色候補リストの中から選んだ色で塗り分ける．直並列グラフがリスト全彩色を持つための十分条件を色候補リストのサイズを用いて与えた．

以下，各節において，上の (2)–(18) の各成果について述べる．

2　平面グラフの凸描画

平面グラフ G の各辺が互いに交わることのない直線分となり，各内面が凸多角形となるような描画を G の**凸描画**という．G の外閉路に対応する多角形を**外凸多角形**という．例えば図 1(a) の平面グラフ G は，外凸多角形が頂点を 4 つ以上持つならば図 1(b) のように凸描画を持つが，外凸多角形が三角形ならば図 1(c) のように凸描画を持たない．

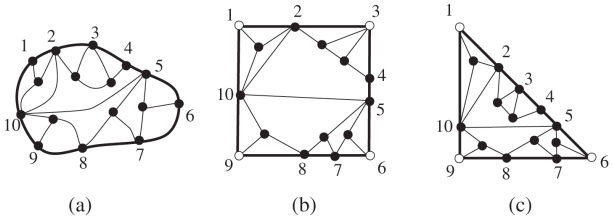


図 1: (a) 平面グラフ G，(b) G の凸描画，(c) 凸描画ではない G の描画．

平面グラフ G が凸描画を持つための必要十分条件は千葉らおよび Thomassen によりそれぞれ与えられており，G の凸描画を線形時間で求めるアルゴリズムも知られている．近年，三浦らは外凸多角形が三角形である凸描画を G が持つための必要十分条件を与えた．しかし，G の凸描画の外凸多角形が何個の頂点を持たねばならないかは知られていなかった．

本研究では，平面グラフ G が凸描画を持つために必要な外凸多角形の頂点の最小個数が，G から新しく構成されるグラフ G' の “3 連結成分分解木” の葉の個数に等しいことを示すとともに，G の外頂点数最小の凸描画が線形時間で求まることを示した．図 2は，(a) 平面グラフ G，(b) G を縮約して新しく構成されるグラフ G'，(c) G' の 3 連結成分, (d) G' の 3 連結成分分解木，(e) G' の凸描画および (f) G の凸描画の例である．

3　平面グラフの格子凸描画

平面グラフ G の各点を整数格子点上に配置し，各辺が互いに交わることのない直線分となり，各内面が凸多角形となるような描画を G の**格子凸**

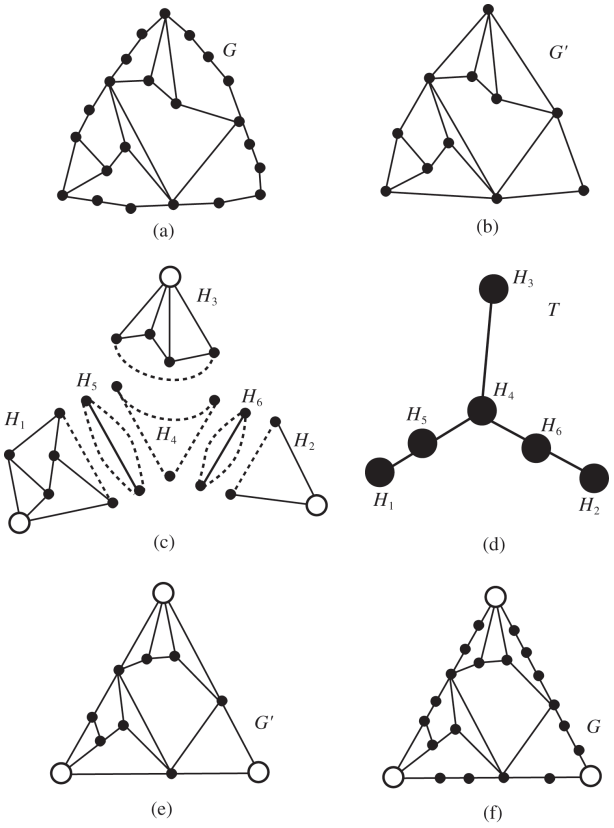


図 2: (a) 平面グラフ G，(b) G を縮約して新しく構成されるグラフ G'，(c) G' の 3 連結成分, (d) G' の 3 連結成分分解木，(e) G' の凸描画，(f) G の凸描画.

描画という．図 3は，外面を三角形とする格子凸描画の一例である．

2 連結平面グラフが外面を三角形とする格子凸描画をもつための条件としては，Chrobak, Kant によって提案された標準分解，Di Battista, Tamassia，Vismara によって提案されたリアライザ，Schnyder によって提案されたシュナイダーラベリング，Chiang，Lin，Lu によって提案された順序つき全域木がある．しかし，これらの概念は独立して研究されたもので，一部が等価であることは知られていたものの，すべてが等価であるかどうかは知られていなかった．本研究では，上記の全ての概念が等価，すなわち与えられたグラフが上記のいずれかを持てば，上記の全てを持つことを示した．

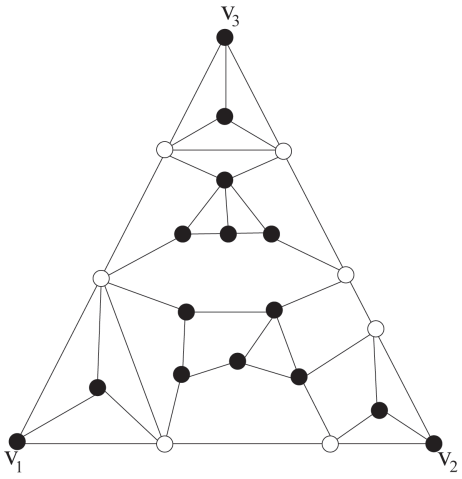


図 3: 平面グラフの外面を三角形とする格子凸描画.

4　4 連結平面グラフの格子凸描画

平面グラフ G の各点を整数格子点上に配置し，各辺が互いに交わることのない直線分となり，各内面が凸多角形となるような描画を G の**格子凸描画**という．任意の 3 連結平面グラフは $(n-2)\times(n-2)$ の大きさの整数格子に線形時間で格子凸描画できることが Chrobak らによって知られていた．グラフの制約を 3 連結から 4 連結により厳しくすれば，格子凸描画に必要な整数格子の大きさはさらに小さくできると予想されるが，どの程度小さくできるかは知られていなかった．

本研究では，4 連結平面グラフで外周上に 4 つ以上の点があるものは，$W+H \leq n-1$ なる整数格子に格子凸描画できることを証明し，そのような格子凸描画を求める線形時間アルゴリズムを与

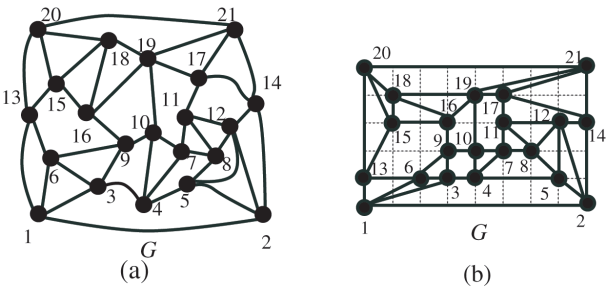


図 4: (a) 4 連結平面グラフ G，(b) G の格子凸描画.

えた．ここで W は平面格子の幅であり，H は高さである．$W+H \leq n-1$ なので，必要な整数格子の面積は高々$W \cdot H \leq \lceil (n-1)/2 \rceil \cdot \lfloor (n-1)/2 \rfloor$ である．また，$\lceil (n-1)/2 \rceil \cdot \lfloor (n-1)/2 \rfloor$ 以上の面積の整数格子が必要な 4 連結平面グラフが無限個存在するので，整数格子の面積に関する結果は最適である．図 4に 4 連結平面グラフとその格子凸描画の例を示す.

5　内部 3 連結平面グラフの格子凸描画

平面グラフの凸描画においては，全ての辺は交差しない直線分で描かれ，全ての面は凸多角形で描かれる．格子凸描画においては，全ての点は整数格子点上に配置しなければならない．図 5(a) の平面グラフの格子凸描画の一例を図 5(b) に示す．平面グラフ G は，内部 3 連結のとき，かつそのときに限り凸描画を持つ．また内部 3 連結平面グラフ G が 3 連結であるか，あるいは G の 3 連結成分分解木 $T(G)$ に葉が 2 個あるいは 3 個しかないならば，G は大きさ $n \times n$ の整数格子内に格子凸描画できる．

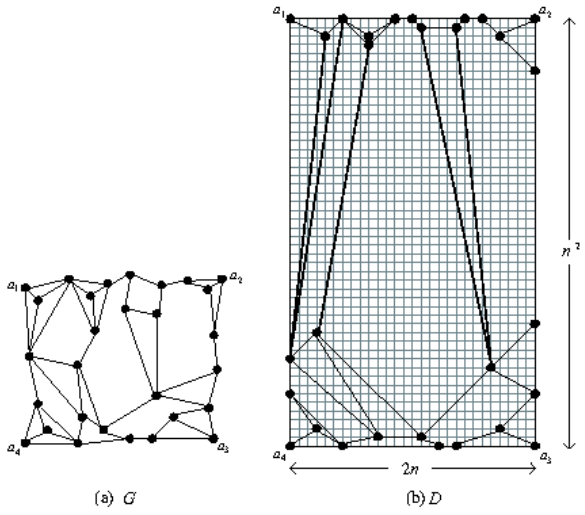


図 5: (a) 平面グラフ G，(b) G の格子凸描画 D.

本研究では，内部 3 連結平面グラフ G の分解木 $T(G)$ に葉がちょうど 4 個あるならば，G を大きさ $2n \times n^2$ の整数格子内に格子凸描画できることを示した．また，そのような描画を線形時間で求めるアルゴリズムを与えた.

図 5(a) の平面グラフを 3 連結成分に分解したものを図 6(a) に示し，3 連結成分分解木を図 6(b) に示す．(分解木にはちょうど 4 個の葉 l_1, l_2, l_3, l_4 がある.)

既知の格子描画アルゴリズムで得られる描画においては外周は三角形として描画されるのに対し，本研究の格子凸描画においては外周は長方形として描画される.

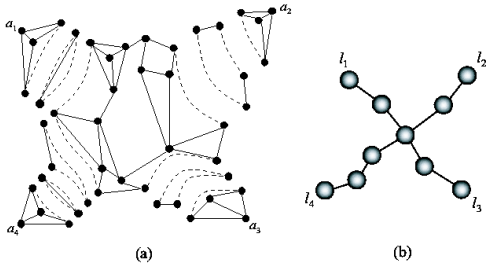


図 6: (a) G の 3 連結成分，(b) G の 3 連結成分分解木 $T(G)$.

6　平面グラフの内部矩形描画

平面グラフ G の**矩形描画**では，G の各面が矩形になるように各辺は水平線分あるいは垂直線分で描かれる．むろん G の外面も矩形である．矩形描画は VLSI のフロアプランに応用される．VLSI 回路の外面は矩形とは限らず L 字形や T 字形，X 字形等の軸平行多角形になるように描画したいことが多い．したがって，軸平行多角形の内部に，各 “ モジュール” が矩形となるような VLSI 回路のフロアプランを見つけたい．外面が矩形，L 字形，T 字形，U 字形，Z 字形，階段形の VLSI フロアプランの例を図 7に示す．このように G の外面を軸平行多角形で描き，内面を矩形で描いたものを，G の**内部矩形描画**と呼ぶ．本文ではグラフ G の最大次数を Δ と書くことにする．$\Delta \leq 3$ なる平面グラフ G が矩形描画を持つための必要十分条件は Thomassen により与えられており，矩形描画を求める線形時間アルゴリズムも知られている．しかし，$\Delta \leq 3$ とは限らない一般の平面グラフ G が矩形描画あるいは内部矩形描画を持つ

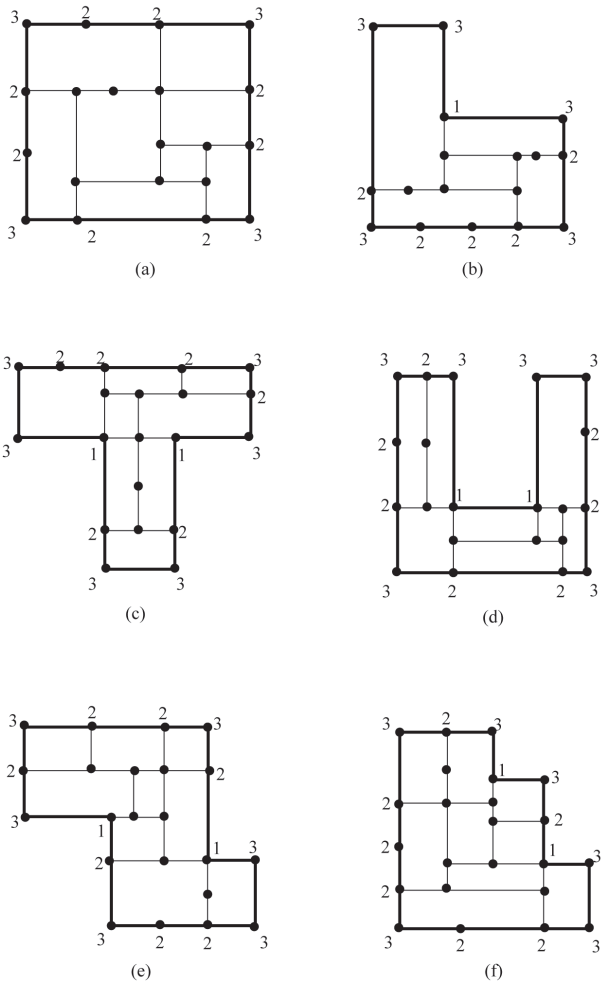


図 7: (a) 矩形描画，および (b)–(f) 内部矩形描画の例　(b) 外面が L 字形，(c) 外面が T 字形，(d) 外面が U 字形，(e) 外面が Z 字形，(f) 外面が階段形.

ための必要十分条件は知られていなかった．むろん，平面グラフ G が矩形描画や内部矩形描画を持つならば，$\Delta \leq 4$ である．

本研究では，平面グラフ G が内部矩形描画を持つための必要十分条件は G から新しく作られる二部グラフ G_d が完全マッチングを持つことであることを示した．更に，G とその外面の概形が与えられたとき，G の内部矩形描画 D を $O(n^{1.5}/\log n)$ 時間で求めるアルゴリズムを与えた．ここで n は G の点数である．図 8は，(a) 平面グラフ G，(b) 二部グラフ G_d および (c) G の内部矩形描画 D の例である．

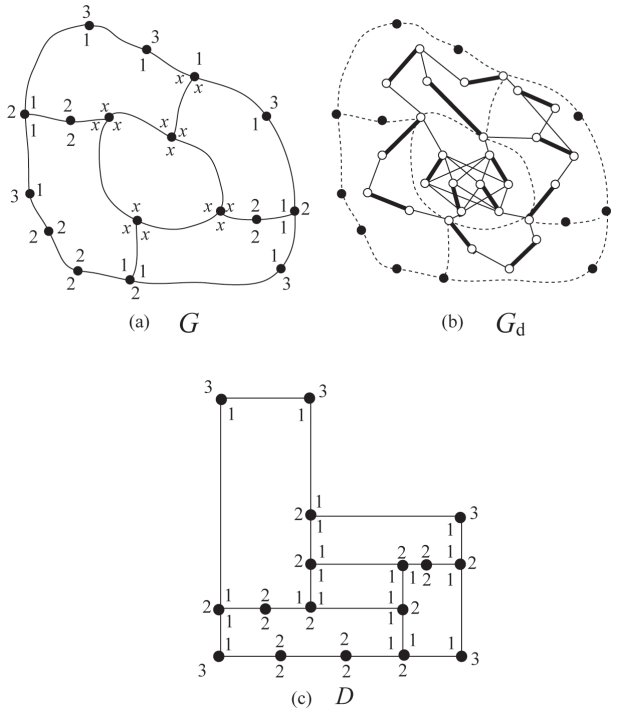


図 8: (a) 平面グラフ G，(b) 二部グラフ G_d，(c) G の内部矩形描画 D.

7　平面グラフの開矩形勢力描画

平面グラフ G の格子描画において，G の辺 e を対角線とする軸平行な長方形を e の**矩形勢力**と呼ぶ．G の各辺 (u, v) の勢力矩形領域内に u，v 以外の点が含まれないような G の格子描画を**矩形勢力描画 (Rectangle-of-Influence Drawing)** と呼ぶ．以下本文では矩形勢力描画のことを簡単のため **RI 描画**と表記する．RI 描画では，単なる格子描画よりも点と辺の距離が離れて描画されるので，同じグラフの描画でもより見やすくなる場合が多い (図 9(a) および図 9(b) 参照).

勢力矩形を矩形の境界線を含む閉領域とみなしたものを**勢力閉矩形**と呼び，そのときの RI 描画を**閉 RI 描画**という．同様に，勢力矩形を矩形の境界線を含まない開領域とみなしたものを**勢力開矩形**と呼び，そのときの RI 描画を**開 RI 描画**という．したがって，図 10(b) のように，閉 RI 描画では各辺の勢力矩形の内部はもちろん，境界上にもその辺の端点以外の点があってはいけない．一方，図 10(c) のように，開 RI 描画では辺の勢力矩形の境界上にその辺の端点以外の点があって

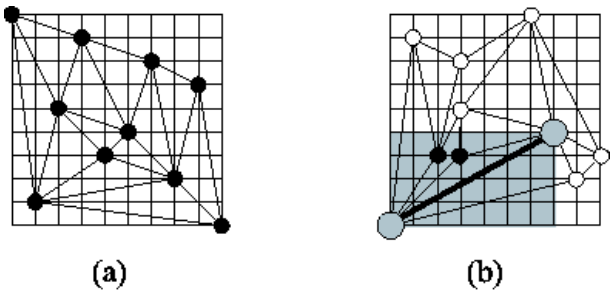


図 9: (a) G の RI 描画，(b) RI 描画ではない G の格子描画.

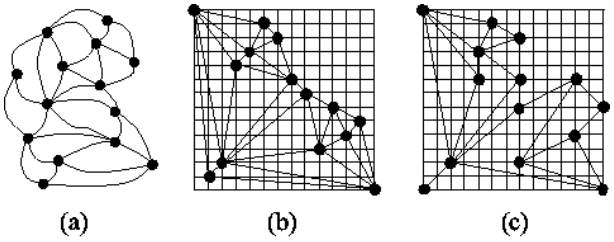


図 10: (a) 平面グラフ G，(b) G の閉 RI 描画，(c) G の開 RI 描画.

もよい．したがって，閉 RI 描画は開 RI 描画であるが，開 RI 描画は必ずしも閉 RI 描画ではない．平面グラフ G が閉 RI 描画を持つための必要十分条件は Biedl らによって与えられており，G がその条件を満足するならば G を $(n-1)\times(n-1)$ の整数格子上に線形時間で閉 RI 描画するアルゴリズムも与えられている．しかし，平面グラフが開 RI 描画を持つための必要十分条件は知られていない.

(外面も含めた) 全ての面が三角形である平面グラフを**三角化**平面グラフという．全ての内面が三角形である平面グラフを**内部三角化**平面グラフという．本研究では，三角化平面グラフ G が開 RI 描画を持つかどうかを判定し，もし持つならば $W+H=n$ なる整数格子に開 RI 描画する線形時間アルゴリズムを与えた．(図 11参照.) 更に内部三角化平面グラフ G が開 RI 描画を持つための十分条件を与えるとともに，もし G がその条件を満足するならば G を $(n-1)\times(n-1)$ の整数格子上に開 RI 描画する $O(n^{1.5}/\log n)$ 時間アルゴリズムを与えた．(図 12参照.)

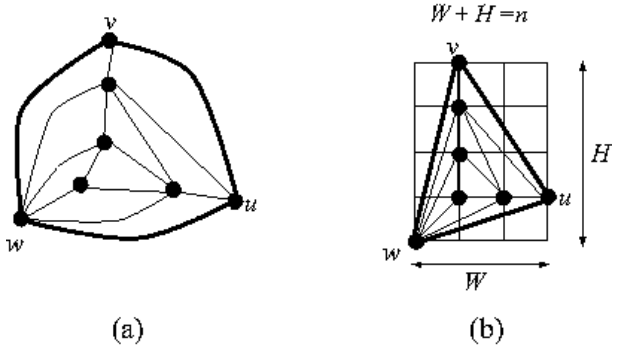


図 11: (a) 三角化平面グラフ G，(b) G の開 RI 描画.

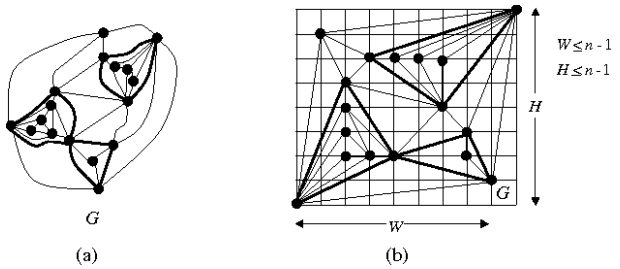


図 12: (a) 内部三角化平面グラフ G，(b) G の開 RI 描画.

8　直並列グラフの直交描画

平面的グラフの**直交描画**とは辺を水平線分および垂直線分からなる折線で描いた描画である．辺の描画で水平から垂直へあるいは垂直から水平に変化する部分は**折れ曲り**と呼ばれる．**平面的グラフ**とは，平面に辺を交わることなく描画可能なグラフであり，その描画は通常何通りもある．平面グラフとは，平面的グラフの点と辺で囲まれる面の位置関係をひとつに定めたものである．したがって，平面的グラフより可能な描画は少ない.

直並列グラフは平面的グラフである．本研究では，最大次数 3 以下の直並列グラフ G が与えられた時に，G の直交描画で折れ曲り数が最少なものを求める線形時間アルゴリズムを開発した．従来は多項式時間アルゴリズムしか知られていなかったが，本研究のアルゴリズムは線形時間であるだけでなく，より簡潔である．また，折れ曲り数が最少な直交描画において，その折れ曲り数の最良な上界を与えた.

9 Webサイトの抽出手法

近年，急速に発展しているウェブ (World Wide Web) は，情報を得る手段として日常に欠かせないものとなっている．ウェブから必要な情報を発見する手段としては，Google，Yahoo!，Goo，Infoseek などの検索エンジンが代表的なものである．これらの検索エンジンは，ユーザーが入力したキーワードを含んでいるページを見つける．すなわち，検索エンジンはテキストを用いた情報発見手法と考えられる．

これに対して，ウェブのハイパーリンク構造を利用した情報発見手法の研究も進められている．このリンクを用いた手法は，テキストを用いた手法のように同綴異義語やダミーキーワードなどの言語的問題に惑わされないという長所がある．リンクを情報発見に用いるための基本的な考えは，あるページ u からリンクされている ページ v は，u の作者にとって価値のある情報を含んでいる可能性が高いという仮定であり，これらの研究のほとんどは，以下のような枠組みに基づいている．

(1) ウェブ中のページ群の URL とリンクのデータを収集する．

(2) このデータからウェブグラフを作成する．

(3) ウェブグラフ中の特徴的な部分グラフ構造を互いに関連しているページまたはサイトの集合である**コミュニティ**として抽出する．

なお，点集合 V がウェブページの集合を表し，辺集合 E が V 中のページ間のリンクを表す有向グラフ $G = (V, E)$ を，**ウェブグラフ**と呼ぶ．

リンク構造を用いてコミュニティを求める手法の研究としてよく知られたものに，Kleinberg の提案した HITS，Kumar らの trawling，Flake らによる max-flow based method などがある．とくに，max-flow based method はユーザーが与えたページ群 (以下では**シードページ群**と呼ぶ) に関連するコミュニティを求めることができる手法である．

一方，近年浅野らがリンク構造を用いてコミュニティを求める手法のために，サイトを用いた新しい枠組みを提案し，trawling などを用いてこの枠組みの有効性を示した．この枠組みは，次のようになっている．

(1) ウェブ中のページ群の URL とリンクのデータを収集する．

(2) このデータから**フィルタ**手法を用いて**ディレクトリベースドサイト**を抽出する．

(3) ディレクトリベースドサイトを点とし，ディレクトリベースドサイト間のリンクを辺とする**サイト間グラフ**を作成する．

(4) サイト間グラフ中の特徴的な部分グラフ構造を**コミュニティ**として抽出する．

すなわち，従来の枠組みではページを単位として用いていたのに対して，この枠組みではサイト (正確にはその近似的なモデルであるディレクトリベースドサイト) を単位として用いているといえる．これは，あるサイト A から他のサイト B へのリンクが，そのサイト A の作者にとって価値のある情報への参照を表している可能性が高いのに対して，サイト内のリンクはサイト内のページを見やすく整理するというナビゲーション目的で作られていることが多いため，リンクを用いた情報発見には両者を区別して用いることが重要と考えられるからである．

もっとも，サイトという言葉は日常的に用いられているが，それ自体曖昧な概念であり，唯一の定義もない．たとえ，いくつかの研究で用いられている「ひとりの個人，ひとつの企業，ひとつの集団がつくるページの集合をそれぞれサイトとする」という定義を用いたとしても，ウェブのページには作者の情報は一般的には含まれていないので，サイトを計算することは困難であると考えられてきた．

これに対して，近年，浅野らによって，ある時点での URL とリンクのデータ (スナップショットと呼ぶ) からこの**ディレクトリベースドサイト**というモデルと**フィルタ**という手法を用いて，サイトを近似的ではあるが実用的には十分な精度で識別する方法が発表された．さらに，これらの研究では，trawling と彼らの提案した極大クリーク法を用いて，サイトを用いた枠組みがコミュニティ発見に役立つこと，とくに個人サイトを含むコミュニティを多く見つけることに大きな効果があることを示している．

10 max-flow based methodの改良によるWeb情報検索の品質向上

本研究では，前節で述べたサイト識別の方法と豊田，喜連川らによって収集・作成された2003年2月の.jpドメインを主体とした日本語ページからなるスナップショットを用いて，実際にサイトのデータとサイト間グラフのデータを構築した．そして，max-flow based methodをサイト間グラフとウェブグラフ両方の上で実行し，双方の性能を評価した．また，ウェブグラフ上でmax-flow based methodを実行する際に精度(コミュニティ内の実際に関連しているページの割合)を落とす次の4つの問題を指摘した．

(1) 同一サーバー内にあるページのリンクを無視していたため同一サーバー内にある複数のサイト間のリンクを活用できていなかったという問題

(2) サイト間の強い関連を表す相互リンクが十分に活用できていなかったという問題

(3) 本来使用すべきである場所にあるリンクがウェブグラフ上では数が少なかったため使用されていなかったという問題

(4) max-flow based methodで用いる各リンクの容量が同一であるためにコミュニティに偏りができてしまっていた問題

本研究では，サイトを用いることによって解決する方法を示し，その解決法がどのような効果があるかを詳しく解析した．結果として，本研究で提案した解決法を加えた改良max-flow based methodをサイト間グラフ上で実行することで，オリジナルのmax-flow based methodよりも遙かに大きなサイズのコミュニティが得られ，しかもその精度も大幅に向上することがわかった．この結果は，サイトを用いることがウェブ情報発見手法に大きく役立つことを示している．

11 スパムリンクの自動除去によるWeb情報検索の品質向上

Kleinbergは，あるトピックに関連した良質なページを発見するためのページのスコアリングアルゴリズムであるHITS（Hyperlink-Induced Topic Search）を提案している．また，HITSの改良版も数多く提案されてきた

しかし，HITSの提案から10年近く経過した現在，ウェブの規模は当時とは比べものにならないほど大きくなり，互いにリンクを張り合うよう悪意を持って作成されたページの集合であるリンクファームが増えたため，HITSや既存のHITS改良法では，与えられたキーワードに関連していないページに高いスコアを与えてしまうことが多々ある．

本研究では，現在あるいは将来のウェブにおいても，与えられたキーワードに関連している度合いが高いページを発見するアルゴリズムを，HITSを基にして構築した．提案した手法の1つ目は，同一のネームサーバを使用しているページの集合を近似的にリンクファームと見なして，それらのページ間のリンクを除去する手法である．2つ目は，Gyongyiらによって提案されたTrustRankを基に，新たに考案したトラストスコアである．HITSでは，検索エンジンで得られた200程度のページ集合を基礎集合として，基礎集合からウェブグラフ上で距離1にあるページを集めていた．トラストスコアでは基礎集合の複数のページにリンクしているページのトラストハブスコアを，その複数のページの数とし，各ページのトラストスコアは，そのページにリンクしているページのトラストハブスコアの合計とする．提案手法では，HITSのスコアの代わりに，トラストスコアとHITSのスコアの和を用いる．これらの手法を組み合わせることによって，KleinbergのHITSや各種のHITS改良法よりも，与えられたキーワードに関連したページを数多く見つけることができる新たなHITS改良法を与えることができた．

12 Webリンクデータの効率的な圧縮

前述の情報検索手法や，各種の検索エンジンは，すべてリンクのデータを操作している．リンクの数はウェブの急速な発展に伴って非常に多くなっているので，リンクのデータを圧縮する手法が必要となる．本研究では，これまで注目してきたサイトを用いて，効率の良い圧縮手法を構築することに成功した．本手法の特徴は，リンクの始点となるページが属するサイトによってリンクを分類し，その分類ごとに圧縮をかけることと，リンクの大部分はサイト内リンクであるという観察をもとに，サイト内リンクの特徴を最大限に活用していることである．既存の手法の中で最も優れているのは，Boldi と Vigna によって提案された手法であるが，提案手法は彼らの手法より圧縮率，全点解凍速度ともに優れていることが確かめられた．たとえば圧縮率においては，325,557 ページと 3,216,152 リンクからなるデータを，彼らの手法で圧縮すると 2.84 ビット/リンク が必要となるが，提案手法では 1.99 ビット/リンク しか必要としない．

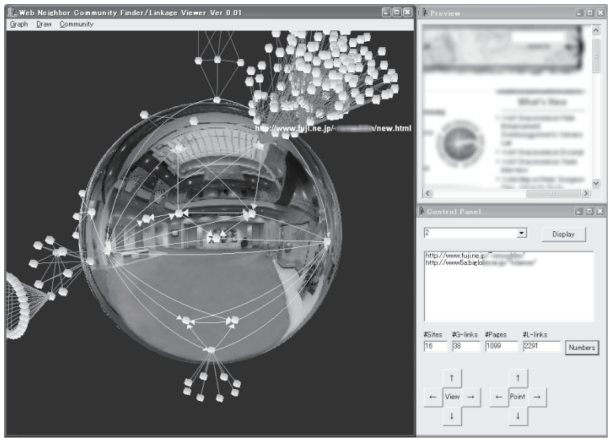


図 13: リンク描画ツール．

13 Webリンク描画ツール

サイト間グラフのリンク，サイト内のリンクを描画してコミュニティとリンクの関係をわかりやすく図示するためのツール (図 13 参照) をグラフ描画アルゴリズムを応用して開発した．このツールでは，サイト間グラフのリンクを球面上に描画し，各サイトを表す球面上の点から，そのサイト内のリンクを球面外へ放射状に描画することで，それぞれのリンクの持つ特徴を理解しやすいようにしてある．

14 結託攻撃に耐性のある電子透かし

デジタルデータはコピーが容易であるため，著作権侵害が問題になってきている．この問題に対処する手法の 1 つが，電子透かしである．電子透かしはデータの内部に埋め込まれるが，電子透かしが埋め込まれたデータを通常の手段で使用しても，電子透かしが埋め込まれていないデータと同様に扱える．例えば，電子透かしが埋め込まれた画像や動画は，表示または再生しても，電子透かしが埋め込まれていないものと見分けがつかないようになっている．電子透かしとして埋め込む情報は，著作者 ID またはユーザー ID が用いられるのが一般的である．前者の場合，データの制作者が，自分がそのデータを作成したことを証明するために使用される．後者は，そのデータの配布者が，そのデータを配布されたユーザーを識別するために用いられる．

ユーザーを識別するために用いられる電子透かしは，結託攻撃を受けることがある．すなわち，複数のユーザーが結託して，彼らが受け取ったデータを照合し，電子透かしが埋め込まれた部分を一部なりとも特定して，その部分を書き換えた後にデータを複製することである．こうすることによって，誰がデータを複製したのか特定することが難しくなるからである．

電子透かしの結託攻撃に対する安全性を計る指標として，結託するユーザーの人数の上限を c としたときに，“$(c, p/q)$-安全性” が知られている．$(c, p/q)$-安全である電子透かしは，結託攻撃によって改ざんされたデータを調べることで，q 人のユーザーの集合のうち，少なくともその中の p 人のユーザーが結託攻撃に参加しているという保証がある集合を必ず発見することができる．また，c を固定したときに，どのような電子透かしを用いても p/q の値をこれ以上大きくできないと

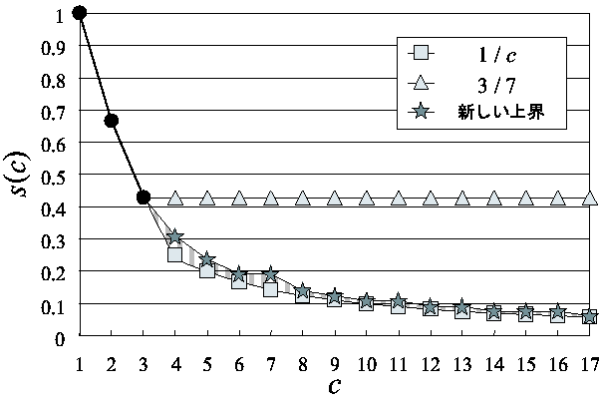


図 14: 安全度 $s(c)$ の上界と下界に関する結果

いう上限) を **安全度**と呼び，$s(c)$ で表す．安全度 $s(c)$ の上界と下界に関する既存の結果は少なく，$s(1) = 1/1$, $s(2) = 2/3$, $s(3) = 3/7$ であることは知られているが，$c \geq 4$ のときに関しては，図 14 のグラフで三角の点でプロットしてある上界と，四角の点でプロットしてある下界の結果しか得られておらず，上界と下界の値がかけ離れていた．

本研究では，安全度 $s(c)$ を達成する電子透かしの特徴付けを行った．さらに，ブロックデザインの性質を利用して，$s(c)$ の上界に関する結果，すなわち $s(c) \leq c/(c^2 - c + 1)$ を示した．図 14で表されているように，この上界は既知の下界ときわめて近く，既知の上界と下界のギャップを埋められたことが分かる．また，このことから，c を大きくしていけば，$s(c)$ は $1/c$ に収束していくということがわかる．この事実は，どのような電子透かしを用いても，データの配布者側が改ざんされたデータを調べたとき，c 人のうち 1 人しか犯人である保証がないようなユーザー集合しか発見できないということを示している．

15　グラフの均一分割問題

グラフ $G = (V, E)$ の各点 $v \in V$ には，定数 q 個の非負整数の重み $\omega_1(v), \omega_2(v), \cdots, \omega_q(v)$ が割当てられているとする．また，q 個の非負整数対 (l_i, u_i) が与えられているとする．ここで $1 \leq i \leq q$ である．本研究では，G から何本かの辺を取り除いて G をいくつかの連結成分に分割し，各連結成分に含まれる点重みの i 番目の合計それぞれがほぼ均一になるようにグラフを分割したい．すなわち，各連結成分に含まれる点重みの i 番目の合計が l_i 以上 u_i 以下になるようにグラフを分割したい．このような分割を G の**均一分割**と呼ぶ．例えば，図 15(a) は，グラフ G の均一分割の例である．ここで，$q = 2$ であり，$(l_1, u_1) = (10, 15)$ であり，$(l_2, u_2) = (10, 20)$ である．また，各点 v は丸で描かれ，2 つの点重み $\omega_1(v)$ と $\omega_2(v)$ は丸の中に描かれ，辺は直線分で描かれ，削除された辺は点線で描かれている．

グラフの均一分割を見つける問題は，選挙区割り問題に応用される．即ち，グラフの各点 v を都市に，点 v の 1 番目の点重み $\omega_1(v)$ を人口に対応させ，2 番目の点重み $\omega_2(v)$ を都市の面積に対応させる．グラフの各辺を都市間の隣接関係に対応させる．選挙区割では，各選挙区は飛び地がなく，かつ各選挙区の人口や面積がほぼ均一になるように，地域をいくつかの選挙区に分割したい．したがって，ある適切な (l_1, u_1) と (l_2, u_2) に対し，均一分割を見つければよい．例えば，図 15(b) は，図 15(a) の分割によって制定された選挙区割りである．

本研究では，与えられたグラフ G の均一分割を見つける以下の 3 つの問題を扱う．**最少分割問題**とは，最少の連結成分数を持つ G の均一分割を見つける問題である．**最大分割問題**は，同様に定義される．p-**分割問題**とは，与えられた整数 p に対し，ちょうど p 個の連結成分を持つ G の均一分割を見つける問題である．

3 つの分割問題は，$q = 1$ のときですら直並列グラフに対して NP 困難であり，直並列グラフに対して多項式時間で解けそうにない．また，直並列グラフに対する最少分割問題および最大分割問

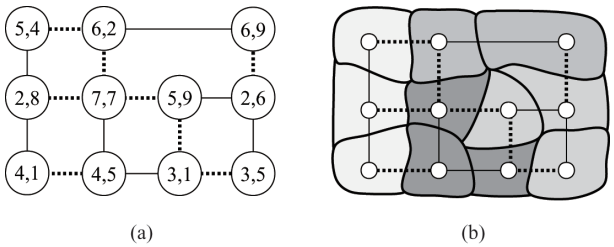


図 15: (a) グラフの均一分割の例，(b) 分割に対応する選挙区割.

題は，任意の定数 $c > 0$ に対し，c 倍近似多項式時間アルゴリズムを持ちそうにない．さらに，3つの分割問題は一般のグラフに対しては $q = 1$ のときでさえ強 NP 困難であり，擬多項式時間ですら解けそうにない．

本研究では，直並列グラフに対し，3つの分割問題を擬多項式時間で解くアルゴリズムを与えた．まず，直並列グラフの最少分割問題および最大分割問題が $O(u^{4q}n)$ 時間で解けることを示した．ここで，$u = \max\{u_i \mid 1 \leq i \leq q\}$ である．したがって，u が定数であるとき，アルゴリズムの計算時間は線形である．次に，直並列グラフの p-分割問題が $O(p^2u^{4q}n)$ 時間で解けることを示した．さらに，これら直並列グラフに対するアルゴリズムが，部分 k-木に拡張できることを示した．

16　グラフの最大分割の近似

本研究では，需要点と供給点があるグラフの分割問題を扱う．グラフ G の各点は供給点または需要点であるとする．各供給点には供給量と呼ばれる正の実数が割当てられており，各需要点には需要量と呼ばれる正の実数が割当てられている．各需要点は高々1 個の供給点からしか供給を受けることができないとする．したがって，G から何本かの辺を取り除いて G をいくつかの連結成分に分割し，各連結成分には供給点がちょうど 1 個だけあるようにしたい．むろん，その供給量はその連結成分にある需要点の需要量の合計以上でなければならない．

しかし，全てのグラフがこのような分割を持つわけではない．もしグラフ G に全ての需要点に供給できる分割が存在しない場合は，G から何本か辺を取り除いて G をいくつかの連結成分に分割し，各連結成分には供給点がないか，あるいはちょうど 1 個だけあるようにしたい．ただし，供給点のある各連結成分に対してはその供給量はその連結成分にある需要点の需要量の合計以上であるようにし，しかも供給点のある全ての連結成分に含まれる需要点の需要量の合計を最大にしたい．このような最大化問題を**最大分割問題**と呼ぶ．即ち，最大分割問題では供給を受けることができる需要点の需要量の合計を最大化する分割を見つけたい．図 16は，与えられたグラフに対する最大分割問題の解の一例を示している．この分割において，供給を受けている需要点の需要量の合計は $(2+7)+(8+7)+(6+3)+4 = 37$ であり，これがこのグラフに対しては最大である．ここで，各供給点は四角で描かれ，各需要点は丸で描かれ，供給量と需要量はそれぞれ点の中に書かれ，辺は直線分で描かれ，削除された辺は点線で描かれている．また，各連結成分は点線で囲まれている．

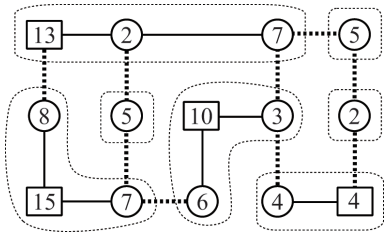


図 16: 直並列グラフの最大分割問題の解の一例．

最大分割問題は，木に対してさえ NP 困難であり，したがって木に対してすら多項式時間で解けそうにない．また，最大分割問題は一般のグラフに対しては強 NP 困難であり，擬多項式時間でさえ解けそうにない．しかし，現在までに，木に対しては任意の精度の近似解を多項式時間で求める完全近似スキーム（FPTAS）が知られている．

本研究では，最大分割問題の近似可能性について明らかにした．まず，一般のグラフに対する最大分割問題は MAXSNP 困難であることを示した．したがって，一般のグラフに対しては近似スキーム（PTAS) が存在しそうにない．次に，供給点が 1 個しかない直並列グラフに対し，完全近似スキームを与えた．この完全近似スキームは，部分 k-木に拡張することができる．

17　端子シュタイナー木問題

本研究では，各辺 e に非負実数のコスト $c(e)$ が与えられたグラフ $G = (V, E)$ を扱う．**端子**と呼ばれる点の集合 $K \subseteq V$ が与えられたとき，K に対する G の**端子シュタイナー木** T は，G の（全域木とは限らない）木であり，K に含まれる全ての点は T の葉である．与えられたグラフ G と端子の集合 K に対し，**端子シュタイナー木問題**では，辺コストの合計が最小である端子シュタイナー木を見つ

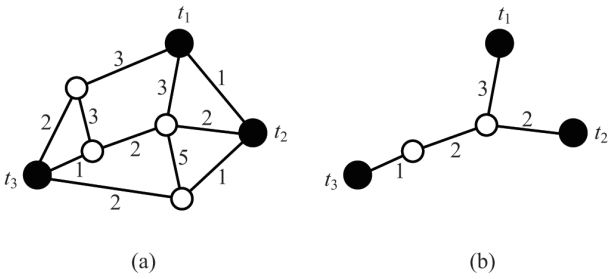


図 17: (a) グラフ G と端子の集合 $K = \{t_1, t_2, t_3\}$ (b) K に対する G の端子シュタイナー木.

けたい. 例えば, 図 17(b) は, 図 17(a) のグラフと端子の集合 $K = \{t_1, t_2, t_3\}$ に対する端子シュタイナー木の例である. ここで, 各端子は黒丸で描かれ, 端子でない点は白丸で描かれ, 各辺のコストはその辺の側に書かれている. 図 17(b) の端子シュタイナー木の辺コストの合計は $1+2+2+3=8$ である.

端子シュタイナー木問題は NP 困難であり, したがって多項式時間アルゴリズムは存在しそうになく, 近似の観点から多くの研究がなされてきた. 端子が必ずしも葉でなくてよい**シュタイナー木問題**に対しては, 古くから固定パラメータ容易性 (Fixed Parametor Tractability) が知られている. しかし, 端子シュタイナー木問題の固定パラメータ容易性は, 今まで知られていなかった.

本研究では, 端子シュタイナー木問題の固定パラメータ容易性を示した. より正確には, 端子シュタイナー木問題の厳密解を $O^*(3^k)$ 時間で見つけるアルゴリズムを与えた. ここで, k は端子の個数 $k = |K|$ であり, O^* 記法では多項式の項は無視される. したがって, パラメータ k に対して, 端子シュタイナー木問題は固定パラメータ容易であることがわかる.

18 リスト全彩色

点集合 V, 辺集合 E からなる単純グラフを $G = (V, E)$ と書く. グラフ $G = (V, E)$ の**全彩色**とは, 隣接する任意の 2 点や, 端点を共有する任意の 2 辺や, 任意の点とそれに接続する全ての辺が異なる色になるように, G の全ての点と辺に色を割り当てることである. したがって G の全彩色 f は $V \cup E$ から色集合 C への写像 $f : V \cup E \to C$ である. G の最大次数を $\Delta(G)$ と書く. グラフ G を全彩色するのに必要な最少色数を $\chi_t(G)$ とすると, 明らかに $\chi_t(G) \geq \Delta(G) + 1$ である. 写像 $L : E \cup V \to 2^C$ を G の**リスト**という. L に対するグラフ G の**リスト全彩色** $f : V \cup E \to C$ とは, 各要素 $x \in V \cup E$ に対して $f(x) \in L(x)$ なる G の全彩色である. このような G のリスト全彩色を G の L-**全彩色**ともいう. リスト全彩色は全彩色の一般化である. **リスト全彩色問題**とは, グラフ G がリスト全彩色をもつかどうかを判定する問題である. 図 18にグラフ G とリスト L が与えられたときのリスト全彩色の例を示す.

直並列グラフとは 4 点からなる完全グラフ K_4 の細分を部分グラフとしてもたないグラフである. 本研究では直並列グラフにおいてさえも, リスト全彩色問題が NP 完全であることを証明した. 更に, 直並列グラフがリスト全彩色をもつための十分条件を与えた. すなわち, 直並列グラフ G の各点 u に $|L(u)| \geq \Delta(u) + 2$ なるリスト $L(u)$ が与えられ, 各辺 $e = vw$ に $|L(e)| \geq \max\{d(v) + 1, d(w) + 1\}$ なるリスト $L(e)$ が与えられたとき, グラフ G はリスト全彩色を持つという定理を証明した. ここで $\Delta(u)$ は点 u とその隣接点の中での最大次数であり, $d(v)$, $d(w)$ は点 v, w の次数である. また, 直並列グラフ G に十分条件を満足するリストが与えられたとき, G のリスト全彩色を求める線形時間アルゴリズムを与えた.

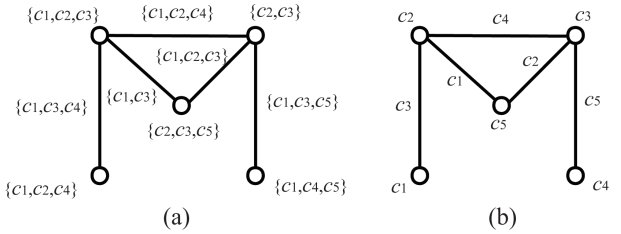


図 18: (a) グラフ G とリスト L (b) リスト全彩色の例

研究業績一覧

著書

1. Md. S. Rahman and T. Nishizeki:
"Planar Graph Drawing", World Scientific, 2004.

学術論文

1. Md. S. Rahman, T. Nishizeki and S. Ghosh:
"Rectangular drawings of planar graphs", Journal of Algorithms, 50 巻, pp. 62–78, 2004.
概要: A plane graph is a planar graph with a fixed embedding in the plane. In a rectangular drawing of a plane graph, each vertex is drawn as a point, each edge is drawn as a horizontal or vertical line segment, and each face is drawn as a rectangle. A planar graph is said to have a rectangular drawing if at least one of its plane embeddings has a rectangular drawing. In this paper we give a linear-time algorithm to examine whether a planar graph G of maximum degree three has a rectangular drawing or not, and to find a rectangular drawing of G if it exists.

2. S. Isobe, X. Zhou and T. Nishizeki:
"Cost total colorings of trees", IEICE Trans. Information and Systems, E87-D 巻, pp. 337–342, 2004.
概要: A total coloring of a graph G is to color all vertices and edges of G so that no two adjacent or incident elements receive the same color. Let C be a set of colors, and let ω be a cost function which assigns to each color c in C a real number $\omega(c)$ as a cost of c. A total coloring f of G is called an optimal total coloring if the sum of costs $\omega(f(x))$ of colors $f(x)$ assigned to all vertices and edges x is as small as possible. In this paper, we give an algorithm to find an optimal total coloring of any tree T in time $O(n^3)$ where n is the number of vertices in T.

3. T. Nishizeki, K. Miura and Md. S. Rahman:
"Algorithms for drawing plane graphs", IEICE Trans. Information and Systems, E87-D 巻, pp. 281–289, 2004.
概要: Graph drawing addresses the problem of constructing geometric representation of information and finds applications in almost every branch of science and technology. Efficient algorithms are essential for automatic drawings of graphs, and hence a lot of research has been carried out in the last decade by many researchers over the world to develop efficient algorithms for drawing graphs. In this paper we survey the recent algorithmic results on various drawings of plane graphs: straight line drawing, convex drawing, orthogonal drawing, rectangular drawing and box-rectangular drawing.

4. X. Zhou and T. Nishizeki:
"Algorithm for the cost edge-coloring of trees", Journal of Combinatorial Optimization, 8 巻, pp. 97–108, 2004.
概要: Let C be a set of colors, and let ω be a cost function which assigns a real number $\omega(c)$ to each color c in C. An edge-coloring of a graph G is to color all the edges of G so that any two adjacent edges are colored with different colors. In this paper we give an efficient algorithm to find an optimal edge-coloring of a given tree T, that is, an edge-coloring f of T such that the sum of costs $\omega(f(e))$ of colors $f(e)$ assigned to all edges e is minimum among all edge-colorings of T. The algorithm takes time $O(n^2)$ if n is the number of vertices.

5. Y. Asano, T. Ito, H. Imai, M. Toyoda and M. Kitsuregawa:
"Compact encoding of the Web graph exploiting various power distributions", IEICE Trans. Fundamentals, Special Section on Discrete Mathmatics and Its Applications, E87-A 巻, pp. 1183–1184, 2004.

概要: Compact encodings of the web graph are required in order to keep the graph on the main memory and to perform operations on the graph efficiently. In this paper, we propose a new compact encoding of the web graph. It is 10% more compact than Link2 used in the Connectivity Server of Altavista and 20% more compact than the encoding proposed by Guillaume et al. in 2002 and is comparable to it in terms of extraction time.

6. Y. Asano, H. Imai, M. Toyoda and M. Kitsuregawa:
"Finding neighbor communities in the Web using an inter-site graph", IEICE Trans. Information and Systems, E87-D 巻, pp. 2163–2170, 2004.
概要: In this paper, we present Neighbor Community Finder (NCF, for short), a tool for finding Web communities related to given URLs. While existing link-based methods of finding communities, such as HITS, trawling, and Companion, use algorithms running on a Web graph whose vertices are pages and edges are links on the Web, NCF uses an algorithm running on an *inter-site graph* whose vertices are sites and edges are *global-links* (links between sites). Since the phrase "Web site" is used ambiguously in our daily life and has no unique definition, NCF uses *directory-based sites* proposed by the authors as a model of Web sites. NCF receives URLs interested in by a user and constructs an inter-site graph containing neighbor sites of the given URLs by using a method of identifying directory-based sites from URL and link data obtained from the actual Web on demand. By computational experiments, we show that NCF achieves higher quality than Google's "Similar Pages" service for finding pages related to given URLs corresponding to various topics selected from among the directories of Yahoo! Japan.

7. Md. S. Rahman, N. Egi and T. Nishizeki:
"No-bend orthogonal drawings of subdivisions of planar triconnected cubic graphs", IEICE Trans. Information and Systems, E88-D 巻, pp. 23–30, 2005.
概要: A plane graph is a planar graph with a fixed embedding. In a no-bend orthogonal drawing of a plane graph, each vertex is drawn as a point and each edge is drawn as a single horizontal or vertical line segment. A planar graph is said to have a no-bend orthogonal drawing if at least one of its plane embeddings has a no-bend orthogonal drawing. In this paper we consider a class of planar graphs, called subdivisions of planar triconnected cubic graphs, and give a linear-time algorithm to examine whether such a planar graph G has a no-bend orthogonal drawing and to find one if G has.

8. X. Zhou, Y. Matsuo and T. Nishizeki:
"List total colorings of series-parallel graphs", Journal of Discrete Algorithms, 3 巻, pp. 47–60, 2005.
概要: A total coloring of a graph G is a coloring of all elements of G, i.e., vertices and edges, in such a way that no two adjacent or incident elements receive the same color. Let $L(x)$ be a set of colors assigned to each element x of G. Then a list total coloring of G is a total coloring such that each element x receives a color contained in $L(x)$. The list total coloring problem asks whether G has a list total coloring. In this paper, we first show that the list total coloring problem is NP-complete even for series-parallel graphs. We then give a sufficient condition for a series-parallel graph to have a list total coloring, that is, we prove a theorem that any series-parallel graph G has a list total coloring if $|L(v)| \geq \min\{5, \Delta + 1\}$ for each vertex v and $|L(e)| \geq \max\{5, d(v) + 1, d(w) + 1\}$ for each edge $e = vw$, where Δ is the maximum degree of G and $d(v)$ and $d(w)$ are the de-

grees of the ends v and w of e, respectively. The theorem implies that any series-parallel graph G has a total coloring with $\Delta + 1$ colors if $\Delta \geq 4$. We finally present a linear-time algorithm to find a list total coloring of a given series-parallel graph G if G satisfies the sufficient condition.

9. K. Miura, M. Azuma and T. Nishizeki:
"Canonical decomposition, realizer, Schnyder labeling and orderly spanning trees of plane graphs", International Journal of Foundations of Computer Science, 16 巻, pp. 117–141, 2005.
概要: A canonical decomposition, a realizer, a Schnyder labeling and an orderly spanning tree of a plane graph play an important role in straight-line grid drawings, convex grid drawings, floor-plannings, graph encoding, etc. It is known that the triconnectivity is a sufficient condition for their existence, but no necessary and sufficient condition has been known. In this paper, we present a necessary and sufficient condition for their existence, and show that a canonical decomposition, a realizer, a Schnyder labeling, an orderly spanning tree, and an outer triangular convex grid drawing are notions equivalent with each other. We also show that they can be found in linear time whenever a plane graph satisfies the condition.

10. T. Ito, X. Zhou and T. Nishizeki:
"Partitioning trees of supply and demand", International Journal of Foundations of Computer Science, 16 巻, pp. 803–827, 2005.
概要: Assume that a tree T has a number n_s of "supply vertices" and all the other vertices are "demand vertices." Each supply vertex is assigned a positive number called a supply, while each demand vertex is assigned a positive number called a demand. One wishes to partition T into exactly n_s subtrees by deleting edges from T so that each subtree contains exactly one supply vertex whose supply is no less than the sum of demands of all demand vertices in the subtree. The "partition problem" is a decision problem to ask whether T has such a partition. The "maximum partition problem" is an optimization version of the partition problem. In this paper, we give three algorithms for the problems. The first is a linear-time algorithm for the partition problem. The second is a pseudo-polynomial-time algorithm for the maximum partition problem. The third is a fully polynomial-time approximation scheme (FPTAS) for the maximum partition problem.

11. K. Banno, S. Orihara, T. Mizuki and T. Nishizeki:
"Best security index for digital fingerprinting", IEICE Trans. on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, E89-A 巻, pp. 169–177, 2006.
概要: Digital watermarking used for fingerprinting may receive a collusion attack; two or more users collude, compare their data, find a part of embedded watermarks, and make an unauthorized copy by masking their identities. In this paper, assuming that at most c users collude, we give a characterization of the fingerprinting codes that have the best security index in a sense of "$(c, p/q)$-secureness" proposed by Orihara et al. The characterization is expressed in terms of intersecting families of sets. Using a block design, we also show that a distributor of data can only find asymptotically a set of c users including at least one cluprit, no matter how good fingerprinting code is used.

12. T. Ito, X. Zhou and T. Nishizeki:
"Partitioning a graph of bounded tree-width to connected subgraphs of almost uniform size", Journal of Discrete Algo-

rithms, 4 巻, pp. 142–154, 2006.

概要: Assume that each vertex of a graph G is assigned a nonnegative integer weight and that l and u are nonnegative integers. One wishes to partition G into connected components by deleting edges from G so that the total weight of each component is at least l and at most u. Such an "almost uniform" partition is called an (l, u)-partition. We deal with three problems to find an (l, u)-partition of a given graph; the minimum partition problem is to find an (l, u)-partition with the minimum number of components; the maximum partition problem is defined analogously; and the p-partition problem is to find an (l, u)-partition with a fixed number p of components. All these problems are NP-complete or NP-hard, respectively, even for series-parallel graphs. In this paper we show that both the minimum partition problem and the maximum partition problem can be solved in time $O(u^4 n)$ and the p-partition problem can be solved in time $O(p^2 u^4 n)$ for any series-parallel graph with n vertices. The algorithms can be extended for partial k-trees, that is, graphs with bounded treewidth.

13. K. Miura, M. Azuma and T. Nishizeki: "Convex drawings of plane graphs of minimum outer apices", International Journal of Foundations of Computer Science, 17 巻, pp. 1115–1127, 2006.

    概要: In a convex drawing of a plane graph G, every facial cycle of G is drawn as a convex polygon. A polygon for the outer facial cycle is called an outer convex polygon. A necessary and sufficient condition for a plane graph G to have a convex drawing is known. However, it has not been known how many apices of an outer convex polygon are necessary for G to have a convex drawing. In this paper, we show that the minimum number of apices of an outer convex polygon necessary for G to have a convex drawing is, in effect, equal to the number of leaves in a triconnected component decomposition tree of a new graph constructed from G, and that a convex drawing of G having the minimum number of apices can be found in linear time.

14. K. Miura, H. Haga and T. Nishizeki: "Inner rectangular drawings of plane graphs", International Journal of Computational Geometry and Applications, 16 巻, pp. 249–270, 2006.

    概要: A drawing of a plane graph is called an inner rectangular drawing if every edge is drawn as a horizontal or vertical line segment so that every inner face is a rectangle. In this paper we show that a plane graph G has an inner rectangular drawing D if and only if a new bipartite graph constructed from G has a perfect matching. We also show that D can be found in time $O(n^{1.5}/\log n)$ if G has n vertices and a sketch of the outer face is prescribed, that is, all the convex outer vertices and concave ones are prescribed.

15. K. Miura, S. Nakano and T. Nishizeki: "Convex grid drawings of four-connected plane graphs", International Journal of Foundations of Computer Science, 17 巻, pp. 1031–1060, 2006.

    概要: A convex grid drawing of a plane graph G is a drawing of G on the plane such that all vertices of G are put on grid points, all edges are drawn as straight-line segments without any edge-intersection, and every face boundary is a convex polygon. In this paper we give a linear-time algorithm for finding a convex grid drawing of every 4-connected plane graph G with four or more vertices on the outer face. The size of the drawing satisfies $W + H \leq n - 1$, where n is the number of vertices of G, W is the width and H is the height of

the grid drawing. Thus the area $W \cdot H$ is at most $\lceil (n-1)/2 \rceil \cdot \lfloor (n-1)/2 \rfloor$. Our bounds on the sizes are optimal in a sense that there exist an infinite number of 4-connected plane graphs whose convex drawings need grids such that $W + H = n - 1$ and $W \cdot H = \lceil (n-1)/2 \rceil \cdot \lfloor (n-1)/2 \rfloor$.

16. Y. Asano, T. Nishizeki, M. Toyoda and M. Kitsuregawa:
"Mining communities on the Web using a max-flow and a site-oriented framework", IEICE Trans. on Information and Systems, E89-D 巻, pp. 2606–2615, 2006.
概要: There are several methods for mining communities on the Web using hyperlinks. One of the well-known ones is a max-flow based method proposed by Flake *et al.* The method adopts a page-oriented framework, that is, it uses a page on the Web as a unit of information, like other methods including HITS and trawling. Recently, Asano *et al.* built a site-oriented framework which uses a site as a unit of information, and they experimentally showed that trawling on the site-oriented framework often outputs significantly better communities than trawling on the page-oriented framework. However, it has not been known whether the site-oriented framework is effective in mining communities through the max-flow based method. In this paper, we first point out several problems of the max-flow based method, mainly owing to the page-oriented framework, and then propose solutions to the problems by utilizing several advantages of the site-oriented framework. Computational experiments reveal that our max-flow based method on the site-oriented framework is very effective in mining communities, related to the topics of given pages, in comparison with the original max-flow based method on the page-oriented framework.

17. T. Ito, K. Goto, X. Zhou and T. Nishizeki:
"Partitioning a multi-weighted graph to connected subgraphs of almost uniform size", IEICE Trans. on Information and Systems, E90-D 巻, pp. 449–456, 2007.
概要: Assume that each vertex of a graph G is assigned a constant number q of nonnegative integer weights, and that q pairs of nonnegative integers l_i and u_i, $1 \leq i \leq q$, are given. One wishes to partition G into connected components by deleting edges from G so that the total i-th weights of all vertices in each component is at least l_i and at most u_i for each index i, $1 \leq i \leq q$. The problem of finding such a "uniform" partition is NP-hard for series-parallel graphs, and is strongly NP-hard for general graphs even for $q = 1$. In this paper we show that the problem and many variants can be solved in pseudo-polynomial time for series-parallel graphs and partial k-trees, that is, graphs with bounded tree-width.

18. T. Ito, A. Kato, X. Zhou and T. Nishizeki:
"Algorithms for finding distance-edge-colorings of graphs", Journal of Discrete Algorithms, 5 巻, pp. 304–322, 2007.
概要: For a bounded integer ℓ, we wish to color all edges of a graph G so that any two edges within distance ℓ have different colors. Such a coloring is called a distance-edge-coloring or an ℓ-edge-coloring of G. The distance-edge-coloring problem is to compute the minimum number of colors required for a distance-edge-coloring of a given graph G. A partial k-tree is a graph with tree-width bounded by a fixed constant k. We first present a polynomial-time exact algorithm to solve the problem for partial k-trees, and then give a polynomial-time 2-approximation algorithm for planar graphs.

19. S. Isobe, X. Zhou and T. Nishizeki:
"Total colorings of degenerate graphs",

Combinatorica, 27 巻, pp. 167–182, 2007.

概要: A total coloring of a graph G is a coloring of all elements of G, i.e. vertices and edges, in such a way that no two adjacent or incident elements receive the same color. A graph G is s-degenerate for a positive integer s if G can be reduced to a trivial graph by successive removal of vertices with degree $\leq s$. We prove that an s-degenerate graph G has a total coloring with $\Delta + 1$ colors if the maximum degree Δ of G is sufficiently large, say $\Delta \geq 4s + 3$. Our proof yields an efficient algorithm to find such a total coloring. We also give a linear-time algorithm to find a total coloring of a graph G with the minimum number of colors if G is a partial k-tree, that is, the tree-width of G is bounded by a fixed integer k.

20. Y. Matsuo, X. Zhou and T. Nishizeki:
"List total colorings of series-parallel graphs", IEICE Trans. on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, E90-A 巻, pp. 907–916, 2007.

概要: A total coloring of a graph G is a coloring of all elements of G, i.e. vertices and edges, such that no two adjacent or incident elements receive the same color. Let $L(x)$ be a set of colors assigned to each element x of G. Then a list total coloring of G is a total coloring such that each element x receives a color contained in $L(x)$. The list total coloring problem asks whether G has a list total coloring for given L. In this paper, we give a sufficient condition for a series-parallel graph to have a list total coloring, and we present a linear-time algorithm to find a list total coloring of a given series-parallel graph G if G and L satisfy the sufficient condition.

研究会等

1. Md. S. Rahman, N. Egi and T. Nishizeki:
"No-bend orthogonal drawings of subdivisions of planar triconnected cubic graphs", Proc. of GD 2003, LNCS 2912, pp. 387–392, 2004.

概要: A plane graph is a planar graph with a fixed embedding. In a no-bend orthogonal drawing of a plane graph, each vertex is drawn as a point and each edge is drawn as a single horizontal or vertical line segment. A planar graph is said to have a no-bend orthogonal drawing if at least one of its plane embeddings has a no-bend orthogonal drawing. In this paper we consider a class of planar graphs, called subdividions of planar triconnected cubic graphs, and give a linear-time algorithm to examine whether such a planar graph G has a no-bend orthogonal drawing and to find one if G has.

2. Y. Asano and T. Nishizeki:
"Web-linkage viewer: Drawing links in the Web based on a site-oriented framework", Proc. of GD 2003, LNCS 2912, pp. 498–499, 2004.

概要: In recent years, link-based information retrieval methods from the Web are developed, such as HITS and Trawling. Since these methods utilize characteristic graph structures of links in the Web, analyzing the links by drawing them understandably will play an important role in the link-based information retrieval. Moreover, Asano et al. have shown that a framework using a site as a unit of information is more natural and useful for link-based information retrieval than the existing framework using a page as a unit. Therefore, we should distinguish links inside a site (called *local-links*) and links between sites (called *global-links*) and analyze their own graph structures. However, existing drawing tools, such as Gravis and H3Viewer, do not distinguish local-links and global-links, and hence they cannot draw graph structures of these links understandably. In this paper, we propose

a new drawing tool, named *Web-linkage Viewer*, in order to draw graph structures in the Web according to the site-oriented framework.

3. Md. S. Rahman, K. Miura and T. Nishizeki: "Octagonal drawings of plane graphs with prescribed face areas", Proc. of WG 2004, LNCS 3533, pp. 320–331, 2004.
   概要: An orthogonal drawing of a plane graph is called an octagonal drawing if each inner face is drawn as a rectilinear polygon of at most eight corners and the contour of the outer face is drawn as a rectangle. A slicing graph is obtained from a rectangle by repeatedly slicing it vertically and horizontally. A slicing graph is called a good slicing graph if either the upper subrectangle or the lower one obtained by any horizontal slice will never be vertically sliced. In this paper we show that any good slicing graph has an octagonal drawing with prescribed face areas, in which the area of each inner face is equal to a prescribed value. Such a drawing has practical applications in VLSI floorplanning. We also give a linear-time algorithm to find such a drawing. We furthermore present a sufficient condition for a plane graph to be a good slicing graph, and give a linear-time algorithm to find a tree-structure of slicing paths for a graph satisfying the condition.

4. T. Ito, X. Zhou and T. Nishizeki: "Partitioning a weighted graph to connected subgraphs of almost uniform size", Proc. of WG 2004, LNCS 3533, pp. 365–376, 2004.
   概要: Assume that each vertex of a graph G is assigned a nonnegative integer weight and that l and u are nonnegative integers. One wishes to partition G into connected components by deleting edges from G so that the total weight of each component is at least l and at most u. Such an "almost uniform" partition is called an (l, u)-partition. We deal with three problems to find an (l, u)-partition of a given graph. The minimum partition problem is to find an (l, u)-partition with the minimum number of components. The maximum partition problem is defined similarly. The p-partition problem is to find an (l, u)-partition with a fixed number p of components. All these problems are NP-complete or NP-hard even for series-parallel graphs. In this paper we show that both the minimum partition problem and the maximum partition problem can be solved in time $O(u^4 n)$ and the p-partition problem can be solved in time $O(p^2 u^4 n)$ for any series-parallel graph of n vertices. The algorithms can be easily extended for partial k-trees, that is, graphs with bounded tree-width.

5. K. Koizumi, T. Mizuki and T. Nishizeki: "Necessary and sufficient numbers of cards for the transformation protocol", Proc. of COCOON 2004, LNCS 3106, pp. 92–101, 2004.
   概要: The transformation protocol can make two players share a secret key using a random deal of cards. A sufficient condition on the number of cards for the transformation protocol to succeed was known. However, it has been an open problem to obtain a necessary and sufficient condition. This paper improves the transformation protocol and gives a necessary and sufficient condition for the improved transformation protocol to succeed.

6. K. Miura, M. Azuma and T. Nishizeki: "Canonical decomposition, realizer, Schnyder labeling and orderly spanning trees of plane graphs (extended abstract)", Proc. of COCOON 2004, LNCS 3106, pp. 92–101, 2004.
   概要: A canonical decomposition, a realizer, a Schnyder labeling and an orderly span-

ning tree of a plane graph play an important role in straight-line grid drawings, convex grid drawings, floor-plannings, graph encoding, etc. It is known that the triconnectivity is a sufficient condition for their existence, but no necessary and sufficient condition has been known. In this paper, we present a necessary and sufficient condition for their existence, and show that a canonical decomposition, a realizer, a Schnyder labeling, an orderly spanning tree, and an outer triangular convex grid drawing are notions equivalent with each other. We also show that they can be found in linear time whenever a plane graph satisfies the condition.

7. K. Miura, H. Haga and T. Nishizeki:
"Inner rectangular drawings of plane graphs", Proc. of ISAAC 2004, LNCS 3341, pp. 693–704, 2004.
概要: A drawing of a plane graph is called an inner rectangular drawing if every edge is drawn as a horizontal or vertical line segment so that every inner face is a rectangle. In this paper we show that a plane graph G has an inner rectangular drawing D if and only if a new bipartite graph constructed from G has a perfect matching. We also show that D can be found in time $O(n^{1.5}/\log n)$ if G has n vertices and a sketch of the outer face is prescribed, that is, all the convex outer vertices and concave ones are prescribed.

8. T. Ito, X. Zhou and T. Nishizeki:
"Partitioning graphs of supply and demand", Proc. of ISCAS 2005, pp. 160–163, 2005.
概要: Assume that each vertex of a graph G is either a supply vertex or a demand vertex and is assigned a positive integer, called a supply or a demand. Each demand vertex can receive "power" from at most one supply vertex. One thus wishes to partition G into connected components by deleting edges from G so that each component C has exactly one supply vertex whose supply is no less than the sum of demands of all demand vertices in C. If G has no such partition, one wishes to partition G into connected components so that each component C either has no supply vertex or has exactly one supply vertex whose supply is no less than the sum of demands in C, and wishes to maximize the sum of demands in all components with supply vertices. We deal with such a maximization problem, which is NP-hard even for trees and strong NP-hard for general graphs. In this paper, we give a pseudo-polynomial-time algorithm to solve the problem for series-parallel graphs. The algorithm can be easily extended for partial k-trees, that is, graphs with bounded treewidth.

9. K. Miura and T. Nishizeki:
"Rectangle-of-influence drawings of four-connected plane graphs (extended abstract)", Proc. of APVIS 2005, pp. 71–76, 2005.
概要: A rectangle-of-influence drawing of a plane graph G is a straight-line planar drawing of G such that there is no vertex in the proper inside of the axis-parallel rectangle defined by the two ends of any edge. In this paper, we show that any 4-connected plane graph G with four or more vertices on the outer face has a rectangle-of-influence drawing in an integer grid such that $W+H \leq n$, where n is the number of vertices in G, W is the width and H is the height of the grid. Thus the area $W \times H$ of the grid is at most $\lceil (n-1)/2 \rceil \cdot \lfloor (n-1)/2 \rfloor$. Our bounds on the grid sizes are optimal in a sense that there exist an infinite number of 4-connected plane graphs whose drawings need grids such that $W + H = n - 1$ and $W \times H = \lceil (n-1)/2 \rceil \cdot \lfloor (n-1)/2 \rfloor$. We also show that the drawing can be found in

linear time.

10. T. Ito, A. Kato, X. Zhou and T. Nishizeki: "Algorithms for finding distance-edge-colorings of graphs", Proc. of COCOON 2005, LNCS 3595, pp. 798–807, 2005.
概要: For a bounded integer ℓ, we wish to color all edges of a graph G so that any two edges within distance ℓ have different colors. Such a coloring is called a distance-edge-coloring or an ℓ-edge-coloring of G. The distance-edge-coloring problem is to compute the minimum number of colors required for a distance-edge-coloring of a given graph G. A partial k-tree is a graph with tree-width bounded by a fixed constant k. We first present a polynomial-time exact algorithm to solve the problem for partial k-trees, and then give a polynomial-time 2-approximation algorithm for planar graphs.

11. K. Banno, S. Orihara, T. Mizuki and T. Nishizeki:
"Best security index for digital fingerprinting (extended abstract)", Proc. of IH 2005, LNCS 3727, pp. 398–412, 2005.
概要: Digital watermarking used for fingerprinting may receive a collusion attack; two or more users collude, compare their data, find a part of embedded watermarks, and make an unauthorized copy by masking their identities. In this paper, assuming that at most c users collude, we give a characterization of the fingerprinting codes that have the best security index in a sense of "$(c, p/q)$-secureness" proposed by Orihara et al. The characterization is expressed in terms of intersecting families of sets. Using a block design, we also show that a distributor of data can only find asymptotically a set of c users including at least one culprit, no matter how good fingerprinting code is used.

12. Y. Asano, T. Nishizeki and M. Toyoda:
"Mining communities on the Web using a max-flow and a site-oriented framework", Proc. of WISE 2005, LNCS 3806, pp. 1–14, 2005.
概要: There are several methods for mining communities on the Web using hyperlinks. One of the well-known ones is a max-flow based method proposed by Flake *et al.* The method adopts a page-oriented framework, that is, it uses a page on the Web as a unit of information, like other methods including HITS and trawling. Recently, Asano *et al.* built a site-oriented framework which uses a site as a unit of information, and they experimentally showed that trawling on the site-oriented framework often outputs significantly better communities than trawling on the page-oriented framework. However, it has not been known whether the site-oriented framework is effective in mining communities through the max-flow based method. In this paper, we first point out several problems of the max-flow based method, mainly owing to the page-oriented framework, and then propose solutions to the problems by utilizing several advantages of the site-oriented framework. Computational experiments reveal that our max-flow based method on the site-oriented framework is significantly effective in mining communities, related to the topics of given pages, in comparison with the original max-flow based method on the page-oriented framework.

13. X. Zhou and T. Nishizeki:
"Orthogonal drawings of series-parallel graphs with minimum bends", Proc. of ISAAC 2005, LNCS 3827, pp. 166–175, 2005.
概要: In an orthogonal drawing of a planar graph G, each vertex is drawn as a point, each edge is drawn as a sequence of alternate horizontal and vertical line segments, and any two edges do not cross ex-

cept at their common end. A bend is a point where an edge changes its direction. A drawing of G is called an optimal orthogonal drawing if the number of bends is minimum among all orthogonal drawings of G. In this paper we give an algorithm to find an optimal orthogonal drawing of any given series-parallel graph of the maximum degree at most three. Our algorithm takes linear time, while the previously known best algorithm takes cubic time. Furthermore, our algorithm is much simpler than the previous one. We also obtain a best possible upper bound on the number of bends in an optimal drawing.

14. T. Ito, Y. Okamoto and T. Tokuyama: "Algorithms for the full Steiner tree problem", Proc. of ICALP2006 Affiliated Workshop iETA, pp. 39–45, 2006.
概要: Assume that each edge of a graph $G = (V, E)$ is assigned a nonnegative real number cost, and that a set $K \subseteq V$ of vertices, called terminals, is given. A full Steiner tree (or a terminal Steiner tree) of G with respect to K is a subtree T of G such that every vertex in K is a leaf of T. For a given graph G and a given set $K \subseteq V$ of terminals, the (minimum-cost) full Steiner tree problem is to find a full Steiner tree for K which has the minimum total cost of edges. In this paper we first give an exact algorithm to solve the problem for general graphs in time $O^*(3^k)$ where $k = |K|$ and O^*-notation means that polynomial factors are suppressed. Thus the problem is fixed-parameter tractable. We then show that the problem can be solved in polynomial time for plane graphs if all the terminals lie only on a fixed constant number of face boundaries.

15. Y. Matsuo, X. Zhou and T. Nishizeki: "Sufficient condition and algorithm for list total colorings of series-parallel graphs", Proc. of WAAC 2006, pp. 49–56, 2006.
概要: A total coloring of a graph G is a coloring of all elements of G, i.e. vertices and edges, such that no two adjacent or incident elements receive the same color. Let $L(x)$ be a set of colors assigned to each element x of G. Then a list total coloring of G is a total coloring such that each element x receives a color contained in $L(x)$. The list total coloring problem asks whether G has a list total coloring for given L. In this paper, we give a sufficient condition for a series-parallel graph to have a list total coloring, that is, we prove a theorem that a series-parallel graph G has a list total coloring if $|L(u)| \geq \Delta(u) + 2$ for each vertex u and $|L(e)| \geq \max\{d(v) + 1, d(w) + 1\}$ for each edge $e = vw$, where $\Delta(u) = \max\{d(x)|\text{vertex } x \text{ is either } u \text{ or adjacent to } u\}$ and, $d(v)$ and $d(w)$ are the degrees of the ends v and w of e, respectively. We finally present a linear-time algorithm to find a list total coloring of a given series-parallel graph G if G and L satisfy the sufficient condition.

16. T. Ito, K. Goto, X. Zhou and T. Nishizeki: "Partitioning a multi-weighted graph to connected subgraphs of almost uniform size", Proc. of COCOON 2006, LNCS 4112, pp. 63–72, 2006.
概要: Assume that each vertex of a graph G is assigned a constant number q of nonnegative integer weights, and that q pairs of nonnegative integers l_i and u_i, $1 \leq i \leq q$, are given. One wishes to partition G into connected components by deleting edges from G so that the total i-th weights of all vertices in each component is at least l_i and at most u_i for each index i, $1 \leq i \leq q$. The problem of finding such a "uniform" partition is NP-hard for series-parallel graphs, and is strongly NP-hard for general graphs even for $q = 1$. In this paper we show that the problem and many variants can be

solved in pseudo-polynomial time for series-parallel graphs. Our algorithms for series-parallel graphs can be extended for partial k-trees, that is, graphs with bounded treewidth.

17. K. Miura, T. Matsuno and T. Nishizeki:
"Open rectangle-of-influence drawings of inner triangulated plane graphs", Proc. of GD 2006, LNCS 4372, pp. 138–149, 2007.
概要: A straight-line drawing of a plane graph is called an open rectangle-of-influence drawing if there is no vertex in the proper inside of the axis-parallel rectangle defined by the two ends of every edge. In an inner triangulated plane graph, every inner face is a triangle although the outer face is not always a triangle. In this paper, we first obtain a sufficient condition for an inner triangulated plane graph G to have an open rectangle-of-influence drawing; the condition is expressed in terms of a labeling of angles of a subgraph of G. We then present an $O(n^{1.5}/\log n)$-time algorithm to examine whether G satisfies the condition and, if so, construct an open rectangle-of-influence drawing of G on an $(n-1)\times(n-1)$ integer grid, where n is the number of vertices in G.

18. A. Kamada, K. Miura and T. Nishizeki:
"Convex grid drawings of plane graphs with rectangular contours (extended Abstract)", Proc. of ISAAC 2006, LNCS 4288, pp. 131–140, 2006.
概要: In a convex drawing of a plane graph, all edges are drawn as straight-line segments without any edge-intersection and all facial cycles are drawn as convex polygons. In a convex grid drawing, all vertices are put on grid points. A plane graph G has a convex drawing if and only if G is internally triconnected, and an internally triconnected plane graph G has a convex grid drawing on an $n \times n$ grid if either G is triconnected or the triconnected component decomposition tree $T(G)$ of G has two or three leaves, where n is the number of vertices in G. In this paper, we show that an internally triconnected plane graph G has a convex grid drawing on a $2n \times n^2$ grid if $T(G)$ has exactly four leaves. We also present an algorithm to find such a drawing in linear time. Our convex grid drawing has a rectangular contour, while most of the known algorithms produce grid drawings having triangular contours.

19. T. Ito, E. D. Demaine, X. Zhou and T. Nishizeki:
"Approximability of partitioning graphs with supply and demand", Proc. of ISAAC 2006, LNCS 4288, pp. 121–130, 2006.
概要: Suppose that each vertex of a graph G is either a supply vertex or a demand vertex and is assigned a positive real number, called the supply or the demand. Each demand vertex can receive "power" from at most one supply vertex through edges in G. One thus wishes to partition G into connected components so that each component C either has no supply vertex or has exactly one supply vertex whose supply is at least the sum of demands in C, and wishes to maximize the fulfillment, that is, the sum of demands in all components with supply vertices. This maximization problem is known to be NP-hard even for trees having exactly one supply vertex and strongly NP-hard for general graphs. In this paper, we focus on the approximability of the problem. We first show that the problem is MAXSNP-hard and hence there is no polynomial-time approximation scheme (PTAS) for general graphs unless P = NP. We then present a fully polynomial-time approximation scheme (FPTAS) for series-parallel graphs having exactly one supply vertex. The FPTAS can be easily extended for partial k-trees, that is, graphs with bounded treewidth.

20. Y. Asano, Y. Tezuka and T. Nishizeki: "Improvements of HITS algorithms for spam links", Proc. of APWeb and WAIM 2007, LNCS 4505, pp. 479–490, 2007.

概要: The HITS algorithm proposed by Kleinberg is one of the representative methods of scoring Web pages by using hyperlinks. In the days when the algorithm was proposed, most of the pages given high score by the algorithm were really related to a given topic, and hence the algorithm could be used to find related pages. However, the algorithm and the variants including Bharat's improved HITS, abbreviated to BHITS, proposed by Bharat and Henzinger cannot be used to find related pages any more on today's Web, due to an increase of spam links. In this paper, we first propose three methods to find "linkfarms," that is, sets of spam links forming a densely connected subgraph of a Web graph. We then present an algorithm, called a trust-score algorithm, to give high scores to pages which are not spam pages with a high probability. Combining the three methods and the trust-score algorithm with BHITS, we obtain several variants of the HITS algorithm. We ascertain by experiments that one of them, named TaN+BHITS using the trust-score algorithm and the method of finding linkfarms by employing name servers, is most suitable for finding related pages on today's Web. Our algorithms take time and memory no more than those required by the original HITS algorithm, and can be executed on a PC with a small amount of main memory.

文部科学省科学研究費補助金 特定領域研究 (課題番号 16092204)

C02: 連続と離散の融合によるロバストアルゴリズム構築

本研究の目的は，計算の安定性の限界を乗り越えるロバストアルゴリズムの設計原理の確立をめざし，アルゴリズムの研究が，今までは連続計算の分野と離散計算の分野に分かれてそれぞれ独立になされてきたという反省の上に立って，連続と離散の両分野の知見・手法を融合・補完することによって，諸計算のロバスト性を確保することであった．この目的に沿って，組合せ計算，制御計算，幾何計算，確率計算，量子計算などの分野においてロバストアルゴリズムの開発を進めてきた．その結果，連続の知見を離散計算に利用する場面では，連続の世界の凸性のアナロジーを離散世界に導入した離散凸性の理論体系構築，連続計算の結果を離散化することによる離散最適化問題の近似アルゴリズムの設計法の開発などの成果が得られた．逆に，離散の知見を連続計算に利用する場面では，幾何計算の不安定性を，ディジタル画像のもつ離散正則構造を利用して回避する方法，流れの中での最適経路を求めるための独立粒子法と有限要素法の開発，計算対象の背景に存在する定性的・離散的性質を利用した量子計算・制御計算・構造計算などの安定化などの成果が得られた．以下にこれらの成果をまとめる．

研究組織

研究代表者：	杉原 厚吉	東京大学 大学院 情報理工学系研究科
研究分担者：	室田 一雄	東京大学 大学院 情報理工学系研究科
	今井 浩	東京大学 大学院 情報理工学系研究科
	松井 知己	中央大学 理工学部
	岩田 覚	京都大学 数理解析研究所
	大石 泰章	南山大学 数理情報学部
	寒野 善博	東京大学 大学院 情報理工学系研究科 (平成 18–19 年度)
	西田 徹志	東京大学 大学院 情報理工学系研究科
	今堀 慎治	東京大学 大学院 情報理工学系研究科 (平成 18–19 年度)
	松浦 史郎	東京大学 大学院 情報理工学系研究科 (平成 16 年度)

交付決定額 (配分額)

平成 16 年度	6,500,000 円
平成 17 年度	7,800,000 円
平成 18 年度	7,600,000 円
平成 19 年度	7,000,000 円
合　計	28,900,000 円

研究成果の概要

- 学術誌
  SIAM J. Disc. Math. (2005, 2006 2 件, 2007)，など
- 国際会議
  SODA (Vancouver 2005, Miami 2006 2 件, New Orleans 2007)，など

1　はじめに

本研究の目的は，今まで連続計算の分野と離散計算の分野に分かれて，それぞれ独立になされてきたアルゴリズム研究の知見を融合し，両者の手法の長所を補完し合うことによって，諸計算のロバスト性を確保するための計算原理を開拓することである．この目的に沿って，離散計算，代数計算，量子計算，幾何計算，組合せ計算，最適化計算，制御計算，微分方程式解法，構造最適設計の分野で，連続と離散の融合によるロバストアルゴリズムを追求してきた．以下にそれをまとめる．

2　ロバスト幾何アルゴリズムの開発

2.1　ディジタル位相優先法

私達の研究グループでは，以前から，位相構造の一貫性を数値情報より優先させることによってロバスト性を確保する幾何アルゴリズム設計法「位相優先法」を開発し，それを応用して多くのロバストソフトウェアを蓄積してきた．この設計法は，完全なロバスト性が確保でき，しかも処理速度が劣化しないという利点をもつ．しかし，設計の際に，扱う対象の位相的不変性を抽出しなければならないため，問題ごとの洞察が必要で，初心者には利用しにくいものであった．

本研究では，この位相優先法を，初心者でも使えるやさしいアルゴリズム設計法へ改良した．その基本的アイデアは次のとおりである．

位相優先法では，まず解きたい幾何問題の対象がもつ純粋に組合せ位相的性質を抽出しなければならなかった．そして，これが初心者にはむずかしかった．この難しさを回避するために，問題の解のディジタル画像近似を求め，次に，そこから位相構造を取り出し，最後にその位相構造に基づいて解を計算する．

このアイデアの有効性を確かめるために，2次元円ボロノイ図の構成アルゴリズムを実装した．円ボロノイ図は，境界が曲線となるために，点ボロノイ図などに比べてロバスト性を確保するのが難しい．位相構造の判定をいつも正しく行うのに必要な精度は，非常に高いものになり，計算コストが大きい．したがって，位相優先法による実装が望まれていたアルゴリズムの一つである．

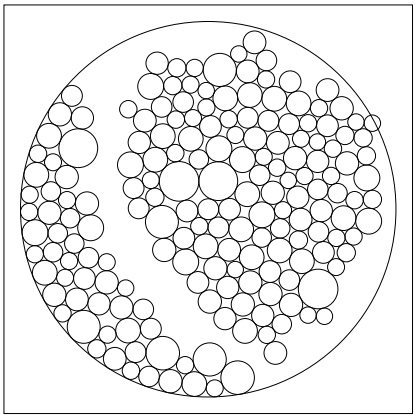


図 1(a)

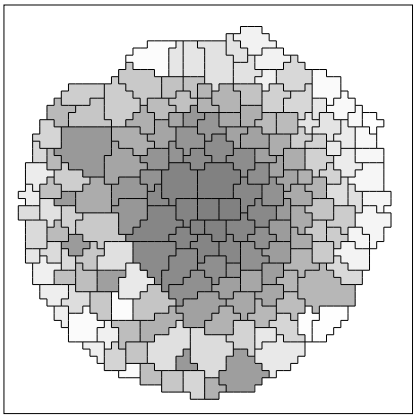


図 1(b)

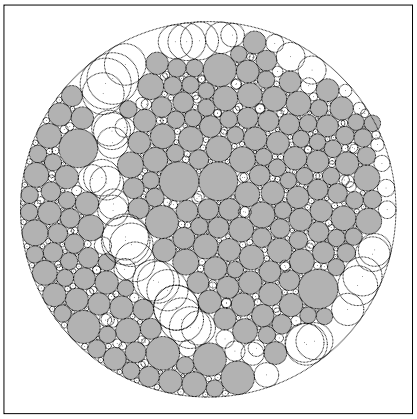


図 1(c)

図 1: ディジタル画像近似を利用した円ボロノイ図の計算例: (a) 円の配置，(b) 円ボロノイ図のディジタル画像近似，(c) ボロノイ点の計算結果

本実装では，まず与えられた円集合に対し，そのボロノイ図を近似的に表すディジタル画像を作る．

次に，このディジタル画像近似から，円ボロノイ図の領域・境界線・ボロノイ頂点の接続構造を抽出する．そして，これを真の円ボロノイ図の位相構造の近似とみなす．

最後に，抽出された位相構造に基づいて，ボロノイ点，ボロノイ辺を求めることによって，円ボロノイ図の近似図形を計算する．ディジタル画像近似によって位相構造の整合性は保証されているため，途中で矛盾が生じて破綻することを完全に防ぐことができる．

このアルゴリズムを円パッキング問題へ応用した例を図 1に示す．図の (a) は，包含円を振ることによって中の小円が移動する途中の状態を示し，(b) はそれに対する円ボロノイ図のディジタル画像近似を示す．そして，これから抽出した位相構造に従って，ボロノイ点の中心位置とそこでの極大空円を計算した結果である．これらの情報から円パッキング問題を高速に解くことができるようになった [52]．

これは，ディジタル画像のもつ離散世界の性質を連続世界の計算のロバスト化に利用した成果である．

2.2 細分割曲面の拡張

三角形メッシュという離散表現となめらかな曲面という連続表現をつなぐ細分割操作は，ロバストな曲面の設計・加工のための基本技術であるが，従来のものは頂点に対する操作であつた．これに対して本研究では，面に対する操作と辺に対する操作に基づいた二つの新しい細分割の方法を構成した．

第一の新手法である面に対する細分割操作は，3 次元空間における頂点と面の双対性を利用して構成できる [25]．すなわち，もとの世界での従来の細分割理論を双対世界へ移すことによって面に基づいた細分割理論を作った．ただし，この双対性の利用は自明ではない．なぜなら，点と双対な関係にあるのは，無限に広がった平面であって，ポリゴンメッシュに必要な有界多角形ではないからである．したがって，双対をとったとき形状が有界であることを保証しなければならない．本研究では，そのための必要十分条件を明らかにした．すなわち，双対形状が有界であるためには，もとの形状が星状形で，双対をとるときの原点がその核の中に含まれることが必要十分である．この結果は，双対操作が万能ではなく，限られた形状にしか適用できないことを示すものでもあるが，これが形状表現の大きな障害になるわけではない．なぜなら，理論の枠組は，双対性を通して従来の理論を移したが，具体的形状の表現には，必ずしも双対操作を施す必要はなく，はじめから双対空間で作ればよいからである．

第二の新手法は，辺に対する細分割操作である [24]．辺を含む直線の全体は，ブリュッカー座標を用いることによって，6 次元空間の中の 5 次元部分集合として特徴づけることができる．本研究では，その中で，辺の細分割操作によって閉じた代数系としての 4 次元部分空間を特徴づけることができた．

これは，三角形メッシュという離散世界の性質を，連続な曲面のロバスト計算に利用した成果である．

2.3 3 次元単体メッシュのロバスト生成

3 次元領域での物理現象シミュレーションのための有限要素法では，メッシュが必要である．最も基本的なのは四面体メッシュである．しかし，その計算法はいくつかの困難を伴う．困難の一つは，通常の摂動が使えないという事情である．

メッシュ生成に限らず幾何計算において，退化対策は重要課題の一つである．最近の研究により，厳密計算と記号摂動の組合せによって退化を自動回避することができるようになり，これが退化対策の定番となっている．

しかし，記号摂動は万能ではない．なぜなら，この手法はすべての退化を解消するため，意図に反した副作用をもたらすことがあるからである．

そこで，残したい退化はそのまま残し，回避したい退化のみを解消できる選択的退化回避の技術が望まれる場面も少なくない．

そのような場面の具体例の一つに，3 次元単体メッシュ生成問題がある．点の配置が与えられたとき，それらを頂点とする四面体メッシュで比較的よいものが得られる手法の一つがドロネー分割で

あるが，同一平面上に 4 点が乗るという退化を解消すると，体積が零の四面体（これはスリーバーとよばれる）が現れることがある．しかし，これが含まれるメッシュは有限要素法には使えない．

これを回避するために，スリーバーが発生する心配のない新しい摂動法を開発した [53]．この方法は，与えられた点を半径 0 の球とみなし，この半径に無限小の摂動を与えることによって，点のドロネー分割問題を，球に対するラゲールドロネー分割問題へ変更するものである．これによって，球の中心が同一平面に乗っているという退化はそのまま残るため，副作用のない摂動ができる．

これは，摂動という連続世界の概念を離散的なメッシュの生成へ持ち込んでロバスト性の確保に役立てたものである．

3 離散凸関数

3.1 離散ヘッセ行列

連続変数の凸解析において, 適当な微分可能性を仮定すると，関数 g に対して

g が凸関数
$\iff$ g のヘッセ行列が各点で半正定値
$\iff$ g の局所 2 次近似が各点で凸

が成り立つ． 本研究 [36] では, L 凸関数 [37, 38] に対して，この同値性の離散版を構築した．すなわち, 離散ヘッセ行列と局所 2 次展開を定義し, これらを用いて L 凸関数の特徴付けを行った．

一般に, 離散関数 g に関する離散ヘッセ行列 H に下記の性質を要請するのが自然である．

- H は g の局所的な情報により定義される対称行列.
- g がアフィン関数のとき H は零行列.
- H は g について線形.
- $g(x) = \frac{1}{2}x^\top Ax$ のとき H は A に一致.

離散関数のクラス $\mathcal{C}$ が与えられたとき, 離散ヘッセ行列を適当に定義し, さらに, 以下のような性質を持つ行列のクラス $\mathcal{H}$ を見出すことによって, 離散ヘッセ行列のクラスの特徴付けを試みる．

- 行列が $\mathcal{H}$ に属する $\iff$ その行列が, $\mathcal{C}$ に属する関数のある点における離散ヘッセ行列である．
- 関数が $\mathcal{C}$ に属する $\iff$ その関数の離散ヘッセ行列が各点で $\mathcal{H}$ に属する．
- 関数が $\mathcal{C}$ に属する $\iff$ その関数の離散ヘッセ行列による局所 2 次近似が, 各点で $\mathcal{C}$ に属する．

本研究で提案する L 凸関数に対する離散ヘッセ行列はこれらの性質を満たしている．

離散関数 $g : \mathbf{Z}^n \to \mathbf{R}$ と $p \in \mathbf{Z}^n$ に対して, 離散ヘッセ行列 $H(g;p)$ を以下で定義する:

$$\begin{aligned} H_{ij}(g;p) &= -\eta_{ij}(g;p) \quad (i \neq j), \\ H_{ii}(g;p) &= \eta_i(g;p) + \sum_{j \neq i} \eta_{ij}(g;p). \end{aligned}$$

ただし，χ_i を第 i 単位ベクトルとして,

$$\begin{aligned} \eta_{ij}(g;p) &= -g(p+\chi_i+\chi_j) + g(p+\chi_i) \\ &\quad + g(p+\chi_j) - g(p), \\ \eta_i(g;p) &= g(p) + g(p+\mathbf{1}+\chi_i) \\ &\quad - g(p+\mathbf{1}) - g(p+\chi_i). \end{aligned}$$

次の定理は L 凸関数の離散ヘッセ行列のクラスを特徴付ける．

定理 次の 3 条件は同値である．
(a) g は L 凸関数.
(b) 各 p に対して, $H_{ij}(g;p) \leq 0$ $(\forall i \neq j)$ かつ $\sum_j H_{ij}(g;p) = 0$ $(\forall i)$.
(c) 各 p に対して, $\hat{g}(q;p)$ は q に関する L 凸関数.

3.2 ジャンプシステム上の M 凸関数

M 凸関数 [37, 38] は，効率良く解ける非線形離散最適化問題の枠組を与えている．本研究 [39, 40] では M 凸関数の概念を定パリティジャンプシステム上の関数に一般化し，その最小化のための最急降下型アルゴリズムを提案した．これによって, Apollonio と Sebő [2] によって考察されたグラフの最小二乗因子問題に対するとい一般的枠組が与えられたことになる．

V を有限集合とする．ベクトル $s \in \mathbf{Z}^V$ は，ある $u \in V$ に対し $s = \pm\chi_u$（単位ベクトル）で, $\|x-y\|_1 = \|x+s-y\|_1 + 1$ を満たすとき (x,y)-増分と呼ばれる．その全体を $\mathrm{Inc}(x,y)$ と書く．

定義　$J \subseteq \mathbf{Z}^V$ を定パリティジャンプシステムとする．関数 $f : J \to \mathbf{R}$ が M 凸関数であるとは，f が次の交換公理を満たすことを言う．

(M-EXC[J]) $\forall x, y \in \mathrm{dom} f$, $\forall s \in \mathrm{Inc}(x, y)$,
$\exists t \in \mathrm{Inc}(x + s, y)$ s.t. $x + s + t \in J$, $y - s - t \in J$,
$f(x) + f(y) \geq f(x + s + t) + f(y - s - t)$.

この定義の下で，次の最適性条件が成り立つ．

定理　$f : J \to \mathbf{R}$ を定パリティジャンプシステム J 上の M 凸関数とし，$x \in J$ とする．このとき，$f(x) \leq f(y)$ $(\forall y \in J)$ であるための必要十分条件は $f(x) \leq f(y)$ $(\forall y \in J$ s.t. $\|x - y\|_1 \leq 2)$ である．

上の最適性条件により，次の形の最急降下法のアルゴリズムが自然に導かれる．

S0 ベクトル $x \in J$ を見出す．

S1 $f(x + s + t)$ を最小にする $s, t \in \{\pm\chi_u \mid u \in V\}$ $(s + t \neq 0)$ を見出す．

S2 $f(x) \leq f(x + s + t)$ となったら停止．このとき x が f の最小化元である．

S3 $x := x + s + t$ として S1 へ行く．

上のアルゴリズムの反復回数について，次の定理が成り立つ．

定理　f が唯一の最小化元 x^* を持つとする．このとき最急降下法の反復回数は $\|x^\circ - x^*\|_1/2$ で与えられる．ただし x° はステップ S0 で見出された初期ベクトルを表す．

なお，最小化元が複数ある一般の場合にも，最急降下法のステップ S1 において適当なタイブレークルールを設計すると，最急降下法の反復回数を $\max\{\|x - y\|_1 \mid x, y \in J\}/2$ で抑えられる．

3.3　M 凸関数の演算と変換

マトロイドやジャンプシステムに対しては，ミンコフスキー和やグラフによる変換などの演算が定義できる．さらに，これらの演算は付値マトロイドや基多面体上の M 凸関数などの離散関数にも定義されることが知られている．本研究 [32, 33] では，定パリティジャンプシステム上の M 凸関数に対しても合成積（畳み込み）やグラフによる変換が定義できることを示した．さらに，グラフによる変換の最も一般化された形として，M 凸関数がポリリンキングシステムによって変換できることを示した．リンキングシステムとは 2 部グラフのマッチングを抽象化した概念であり，ポリリンキングシステムはその更なる拡張である．

整数ポリリンキングシステムは, 有限集合 S, T と $\mathbf{Z}^S \times \mathbf{Z}^T$ の部分集合 L の組 (S, T, L) で, ある公理を満たすものとして定義されるが，ここでは, 整数ポリマトロイドの基多面体を用いた以下の等価な定義を与える．

定義　有限集合 S, T と $\mathbf{Z}^S \times \mathbf{Z}^T$ の部分集合 L の組 (S, T, L) が整数ポリリンキングシステムであるとは,

$$B = \{(x, y) \in \mathbf{Z}^S \times \mathbf{Z}^T \mid (-x, y) \in L\}$$

が整数ポリマトロイドの基多面体をなし，かつ $(\mathbf{0}, \mathbf{0}) \in B$ となることをいう．

2 部グラフによる変換の一般化として, 整数ポリリンキングシステムによる変換を考えることができる．定パリティジャンプシステム $J \subseteq \mathbf{Z}^S$ の整数ポリリンキングシステム (S, T, L) による変換とは,

$$\tilde{J} = \{y \in \mathbf{Z}^T \mid \exists x \in J,\ (x, y) \in L\}$$

と定義される集合 $\tilde{J}$ のことをいう．また, 関数 $f : \mathbf{Z}^S \to \mathbf{R} \cup \{+\infty\}$ と整数ポリリンキングシステム (S, T, L) が与えられたときに,

$$\tilde{f}(y) = \inf\{f(x) \mid x \in \mathbf{Z}^S,\ (x, y) \in L\} \quad (y \in \mathbf{Z}^T)$$

で定義される関数 $\tilde{f} : \mathbf{Z}^T \to \mathbf{R} \cup \{+\infty, -\infty\}$ を f の (S, T, L) による変換という．

以上の定義の下で，次の定理を示した．

定理　関数 $f : \mathbf{Z}^S \to \mathbf{R} \cup \{+\infty\}$ が定パリティジャンプシステム上の M 凸関数とするとき，関数 f の整数ポリリンキングシステム (S, T, L) による変換 $\tilde{f}$ は（$-\infty$ という値をとらない限り）M 凸関数である．

この定理は, “集約”, “分離”, “制限”, “グラフによる変換” といった基本的演算が M 凸性を保存するという事実を包含するものである．

4 量子情報科学での連続と離散の融合

量子情報処理においては，量子状態を用いて情報を表現・操作・伝送することによって情報処理を実現する．ここで重要なことは，これまでの情報処理が古典力学系に依存して展開されていたのに対して，量子状態を用いた場合の情報処理ではどのような新しいことができるかを解明することである．

本研究では，このような量子情報科学で本質的な連続的側面と離散的側面の融合について研究した．具体的問題としてまず，量子通信路容量計算という誤りがある通信路をロバスト化して最大限送ることができる情報量を求める問題について，連続と離散の融合を実現する研究を遂行した．また，古典力学系の状態では表現できない量子的相関について精緻に解析を行い，最適化の観点からの解析，計算量的アプローチを測った．これは，量子力学において真の量子性を示すための Bell 不等式の理論を現代の組合せ的凸多面体論と対話証明の枠組みを適用することによって研究を進めたものである．以下，この 2 点について簡単にまとめる．

4.1 量子通信路容量計算

量子通信路容量は，量子情報理論における基本的問題であり，量子状態を伝送する際の送信側・受信側の条件等によって様々な場合が解析されている．Holevo 容量 [13] はその中でも代表的な環境下での量子通信路の容量であり，量子相互情報量を送信量子状態とその上の確率に関して最大化した量である．古典通信路容量は，古典相互情報量を送信符号上の確率に関して最大化したもので，相互情報量がその確率に関して凹関数になっているため，降下法によって数値的に求めることができる．Holevo 容量は，確率について凹性が成り立つものの，量子状態の変数については逆に凸性が成り立ち，そのために局所最適解が必ずしも大域的最適解にならず，その計算は難しいものとなる．

古典通信路容量計算の Arimoto-Blahut アルゴリズムを Holevo 容量の場合に拡張したアルゴリズムが Nagaoka [41] により提案され，Osawa, Nagaoka [47] により実装されて，Holevo 容量の加法性に関する予備的実験がなされている．しかし，上述したことにより，降下法であるこの方法では，大域的最適解が得られるとは限らない．Shor [51] は，離散個の量子状態を用いて Holevo 容量計算の部分問題を線形計画問題で表し，無限にある量子状態から適当なものを部分最適化問題を解くことによって生成し，それを加える列生成法を用いたアルゴリズムを提案しているが，列生成での最適化や収束性に関する性質は与えられていない．

このような状況であったところへ，本研究では次のような展開を図った．まず，Hayashi, Imai, Matsumoto, Ruskai, Shimono [12] において，1 量子ビット通信路の場合，純粋状態に対応する Bloch 球面をメッシュ点で近似することにより，確率変数に関する凹関数最大化を非線形計画法で解くことにより，メッシュの粗さに応じた近似解が得られることを実験的に報告した．そして，Oto, Imai, Imai, Shimono [48] において，その近似精度が Taylor 展開により最適解に十分近い近傍では説明できることを述べた．また，そこでは，古典の場合と同様に，Holevo 容量計算が量子ダイバージェンスに関する最小包含球計算に帰着できること，および計算幾何アルゴリズムが適用できることについて触れている．これらの研究で，近似精度を保証するためには，Bloch 球面全体を均一に近似することが必要であり，具体的に与えられた通信路に対して通信路容量を達成するには明らかに不要な状態を考慮しないですむ仕組みは与えられていない．この点は，Shor の論文 [51] で，Holevo 容量よりも古典通信路に近い容量のアクセス情報量を計算する場合でも問題点として指摘されており，またそれが Shor が Holevo 容量計算で列生成法を提案する理由でもあった．

さらに，Hayashi, Imai, Matsumoto, Ruskai, Shimono [12] の方法が球をその球面上の均一な有限点集合の凸包で近似する内近似法であるのに対して，その球を含む凸多面体で近似する外近似法を示し，外近似法において平面切除法を用いると適応的に所望の近似精度で計算を行うのに必要な有限離散個の点を生成しながら近似解を求めることができることも示す．外近似のためには，球面上の点集合に対して，各点での接平面により構成される球を含む半空間の交わりとしての凸多面体

を利用する．内近似に比べ，外近似は実行可能でない点，また近似精度が対応する有限点集合の内近似解よりも悪いという欠点があるが，一方で最適解の上界を与える始めての方法になっている．外近似による方法は適応的に必要部分の点の詳細化が行え，それを理論的解析が可能な簡単な量子通信路の場合で解析的に示すことを行なった．

4.2 量子非局所性：量子相関の一般的解明

本年度の研究では，古典力学系の状態では表現できない量子的相関について精緻に解析を行い，それを情報処理方式へと発展させることに重点を置いた．具体的には，量子力学において真の量子性を示すためのBell不等式の理論を現代の組合せ的凸多面体論と対話証明の枠組みを適用することによって研究を進め，次のような2つの成果を出した．

(1) Avis, Imai, Ito, Sasaki [3] では，上述の分離可能状態の相関表全体が凸多面体が3部グラフのカット凸多面体であることを指摘し，組合せ的凸多面体論で詳細に調べられているカット凸多面体の結果をこのBell不等式の場合に適用することを試みた．具体的には，従来研究で完全グラフのカット凸多面体のファセットは完全グラフの場合で9点くらいまで調べ上げられていることに鑑み，それらファセットを完全3部グラフのファセットに変換する汎用的手法として3角消去を提案した．

3角消去のうちの「3角」は，カット凸多面体の理論が距離埋め込みとも直結していて，いわゆる距離の3角不等式に対応する不等式がカット凸多面体のファセットを定めることから来ている．3角消去の「消去」は凸多面体論での一般的技法であるFourier-Motzkin消去に由来している．3角消去はFourier-Motzkin消去を一方の不等式を3角不等式にして適用したものであるが，Fourier-Motzkin消去が単にファセットを表現する不等式を足し合わせただけではファセットを導出する不等式に必ずしもならないのに対し，3角消去では土台の完全グラフにはない点を絡ませた3角不等式を用いることで，導出された不等式が必ずファセットを定義することが保証できるようになっている．

この論文ではさらに3角消去により膨大な数のBell不等式が系統的に獲得できることを具体的に示し，またカット凸多面体の超幾何不等式クラス等に対応する無限個からなるBell不等式のクラスが構成できることを示した．またこの問題の背景にある対称性に関して，違う過程を経て得られる3角不等式同士が異なるものになっていることを示すことも行っている．

(2) Avis, Imai, Ito [4, 5, 16] はさらに上記の結果を発展させた．その中の1つでは，量子情報で有名なWerner状態等の量子特有の対称性を満たす量子状態について，これまではCHSH不等式より強力なものが知られていなかったが，この論文ではそのようなBell不等式が存在するかという未解決問題に対して肯定的な解決を与えることに成功した．具体的には，本研究の過程で得られたBell不等式を系統的に調べ，測定数が相対的に少ない89個の不等式に着目し，その上で精緻な数値計算を行うことによって，3準位系のisotropic状態という対称性をもつ量子状態に対して，5つのBell不等式がCHSH不等式より強力であることを示した．すなわち，その5つのBell不等式それぞれに対してisotropic状態なある量子状態が存在し，それに対してうまく測定して相関表を得るとそのBell不等式が破れるが，CHSH不等式に対してはどのような測定をしても決してCHSH不等式は破れないという状態が存在し得るということである．本研究で調査できたものはまだまだ限られているが，その中で本質的にCHSH不等式よりも強力なものが5つも発見できたということは，傾向としてどのようなBell不等式についてもそれが最強である量子状態が存在する可能性を提示されていると思われる．

一方で，大きな未解決問題としては上記肯定的結果は3準位系では得られたものの，2準位系に限った場合においては，同じ対象とした89個のBell不等式についてかなり詳細に数値計算したもののそのような結果については得ることができていないことが上げられる．

また，従来量子計算では2準位系量子状態を1量子ビットと呼び，ほぼこれに限ってアルゴリズムや情報量の理論を展開しているが，このように多準位系を基礎としてそのテンソル積空間を考えることが2準位系とそのテンソル積空間でのみ発想する場合と違った様相を示すことに繋がること

を示したことで，従来のアプローチ法に対する反省を促す知見を与えるものになっているかもしれない．

5 マルコフ連鎖を用いたパーフェクトサンプリング法

5.1 パーフェクトサンプリング法

マルコフ連鎖を用いたサンプリングは，MCMC 法（マルコフ連鎖モンテカルロ法）等における重要な問題である．従来のサンプリング法では，初期状態から十分な回数推移させることにより近似サンプリングを行っているが，その回数の算定は経験に基づくものであることが多い．本研究で対象とする「マルコフ連鎖を用いたパーフェクトサンプリング法」は，目的とする分布を極限分布に持つマルコフ連鎖から，極限分布に「厳密に」従うサンプルを得る手法である 1996 年に Propp と Wilson によって提案された coupling from the past 法 (以下 CFTP 法) は，マルコフ連鎖の極限分布に厳密に従うサンプリングを可能とする驚くべき手法である．日本においては CFTP 法の認知度は非常に低く，その研究を継続的に行っている研究者は，現時点で申請者達のグループ以外には存在しない．

世界における CFTP の研究は，理論的な拡張が中心であり，現実問題に出現する分布に対する CFTP 法の開発は立ち遅れている．本研究は，ゲノム解析や待ち行列ネットワーク等の応用分野に現れる分布に対する CFTP 法の開発を目指しており，これまでの理論的研究とは一線を画すものである．

5.2 マルコフ連鎖モンテカルロ法

マルコフ連鎖を用いたサンプリング法に基づく「マルコフ連鎖モンテカルロ法（MCMC 法）」は，待ち行列ネットワークの解析，ゲノム解析，金融におけるオプション計算等様々な分野において活用されている．しかしながら，MCMC 法は乱数を用いた計算法であるため再現性が無い．この性質は，社会上重要なコンピュータネットワークの解析や，食品の安全性に関わる遺伝子解析，公的な監査がある保険に関わる業務等では大きな問題点となる．これに対し，本研究において開発したパーフェクトサンプリングを用いたモンテカルロ法を構成することで，得られた解の近似精度を保証する正規化定数の計算（数値積分法）を構築する事が可能となる．乱数を用いた数値積分法で，精度保証の存在する解法への要求は，今後ますます重要になると予想される．この点から見ても本研究は，今までには無かった，新たな社会的な要請にこたえる新しい視点の研究であると言える．

5.3 本研究で得られた結果

本研究の結果は，下記の 3 分野にまたがっている．

第一の結果は， 医療統計等でしばしば用いられる分割表に関するものである．2004 年に論文 [35] において，$2 \times \cdots 2 \times 2 \times J$ という高次元の分割表に対する多項式時間近似サンプリング法の開発を行った．また同年の論文 [26] では，分割表の数え上げ問題に対する既存の解法 (多項式時間近似スキーム) で得られる解が偏る（不偏性を持たない）ことを示し，改良法の提案を行った．更にこの改良法で得られる解の期待値と真値の差が極めて小さいことを理論的に示した．2006 年には， 2 行分割表の CFTP を用いた多項式時間厳密サンプリング法の構築に世界で始めて成功した [29]．分割表に関して，多項式時間の厳密サンプリング法が得られているのは，現在でもまだ我々のケースのみである．

第 2 の結果は，ゲノム解析等にしばしば用いられる（離散化）ディリクレ分布に対するものである．我々は， 2003 年の時点で多項式時間近似サンプリング法をすでに提案していたが，2008 年に離散化ディリクレ分布に対する CFTP を用いた多項式時間厳密サンプリング法の構築に成功した [30]．

第 3 の結果は， 指数サーバーを持つ待ち行列ネットワーク (Jackson ネットワーク) に対し，その定常分布に従うサンプリング法と，正規化定数の近似計算法に関するものである．単一サーバーのモデルについては，2005 年に CFTP を用いた多項式時間厳密サンプリング法と，正規化定数を計算する多項式時間近似スキームの構築に成功し

ている [27]．また，より現実的な複数サーバーモデルについては，近似サンプリング法を用いた多項式時間近似スキームの構築にも成功しており，論文は掲載予定となっている [31]．

5.4 対数凹関数の離散化に関する結果

論文 [28] において，上記の 3 つの分野にまたがる厳密サンプリング法の一般論について議論している．上記の 3 つの分野で提案された厳密サンプリング法は，単体の整数格子点上に定義された (離散的な) 対数凹関数である分布関数からのサンプリング法となっている．連続な対数凹関数は，多次元正規分布関数等を特殊ケースとして持つ重要な (分布) 関数であり，それに従う高速なサンプリング法が存在することも多いことが知られている．これに対し論文 [28] では，分布の定義域を離散化した場合でも，定義域が高次元単体の整数格子点ならば，(離散的な) 対数凹関数となる分布関数が良い性質を保持していることを統一的な視点から示している．この議論により，単体の整数格子点上に定義された (離散的な) 対数凹関数となる分布関数に対しては，多項式時間の近似サンプリング法が常に存在することが示された．さらに厳密サンプリング法も常に構成できることを示したが，多項式性を持つものの存在及び構成法については，未解決問題として残されている．

6 数理計画法における符号可解性

社会現象を線形方程式系で記述する際には，選好順序や係数の正負などの情報は容易に知ることができるのに対し，係数の数値化が困難である場合が多い．定性的な情報のみが与えられた状況下で線形モデルを解析するには，係数行列が要素の絶対値によらず正則（符号正則）かどうかを知る必要が生じる．この符号正則性を判定する問題の計算複雑度は長い間未解決であったが，1999 年に Robertson, Seymour, Thomas [50] によって多項式時間解法が与えられた．

このような定性的行列理論の最新の成果を最適化手法に応用することを目指して，本研究では，対称行列の Sylvester 符号指数を各要素の符号情報から計算する手法を研究した [19]．さらに，最適化の分野で中心的な役割を果たしている線形計画法に注目し，入力の符号情報のみから最適解の符号情報が得られる条件を与え，その条件の下で，実際に最適基底解の符号を決定する効率的なアルゴリズムを開発した [17]．これらの研究成果は，いずれも本質的に連続系の問題において符号情報という離散的な部分情報を用いて，数値誤差の生じ得ない組合せ的計算を通じて，効率的に有用な情報を引き出そうとする試みである．

6.1 符号対称行列の Sylvester 指数

対称行列 A に対し，適当な正則行列 S による合同変換で

$$S^\top AS = \mathrm{diag}(1,\dots,1,-1,\dots,-1,0,\dots,0)$$

という対角行列に変換したときの $1,-1,0$ の個数が Sylvester 符号指数と呼ばれる．Sylvester 符号指数は, 2 次形式の概形を規定する基本的な不変量である．

対称行列 A の行列式の展開項で非零なものが存在する時，A は項別正則であると言う．正則な対称行列は項別正則である．また, 非ゼロ要素の絶対値によらず, 同じ符号要素の対称行列が全て正則であるとき, 符号正則であるという．

符号正則な対称行列に対しては，Sylvester 符号指数を行列要素の符号情報のみから一意に定まることが Hall, Li, Wang [11] によって明らかにされた．本研究では, 項別正則な対称行列の組合せ的構造を解析することによって, 符号指数を効率的に計算するアルゴリズムを設計した．

n 次正方行列 A を表現する 2 部グラフ $G(A) = (U, V; E)$ を，頂点集合 $U := \{u_1,\dots,u_n\}$,$V := \{v_1,\dots,v_n\}$，枝集合 $E := \{(u_i, v_j) \mid a_{ij} \neq 0, u_i \in U, v_j \in V\}$ で定める．

各頂点に高々一つの枝が接続している枝集合をマッチング, そして全ての頂点に接続している時を完全マッチングという．正方行列 A に対し，$G(A)$ が完全マッチングを持つ時，かつその時に限り A が項別正則である．

項別正則な対称行列 A に対応する 2 部グラフ $G(A) := G(U, V; E)$ の構造を調べる．項別正則性から $G(A)$ は完全マッチング M を持つ．枝集合 $X \subseteq E$ に対し，X の転置 $X^\top := \{(u_j, v_i) \mid$

$(u_i, v_j) \in X\}$ を定義する．すると対称性より完全マッチング M の転置 $M^\top$ は完全マッチングであり，サーキット $C \subseteq E$ の転置 $C^\top$ はサーキットである．$C^\top$ と C が等しい時対称なサーキットと呼ぶ．両端点がサーキット C 上にあり C に含まれない枝を C の弦と呼ぶ．この時次の定理が成り立つ．

定理 1 項別正則な対称行列 A に対し，$G(A)$ は以下のいずれかの条件を満たす．

- $a_{ii} \neq 0$ となる (u_i, v_i) を含む完全マッチングが存在する．
- $a_{ij} = a_{ji} \neq 0$ $(i \neq j)$ となる (u_i, v_j), (u_j, v_i) を含む完全マッチングが存在する．
- $G(A)$ は弦の無い対称なサーキットの直和．

この定理を用いて, 符号正則な n 次対称行列の符号指数を, 行列要素の符号情報のみから計算するアルゴリズムを設計した．その計算量は, 非零要素数を ℓ とするとき, $O(n\ell)$ である．

一方で, 項別正則とは限らない一般の対称行列に関しては, 行列要素の符号情報のみから符号指数が決定不可能かどうかを判定する問題は，NP 完全であることも明らかとなった．

6.2 線形計画問題の符号可解性

線形計画問題

$$\begin{array}{ll} \text{maximize} & cx \\ \text{subject to} & Ax = b \\ & x \geq 0 \end{array}$$

を $\mathrm{LP}(A, b, c)$ と書くことにする．同じ符号パタンの任意の $\tilde{A}$, $\tilde{b}$, $\tilde{c}$ に対して，$\mathrm{LP}(\tilde{A}, \tilde{b}, \tilde{c})$ の最適解の符号パタンの集合が常に一致するとき，$\mathrm{LP}(A, b, c)$ は符号可解であるという．一般に，与えられた線形計画問題が符号可解でないことを判定するのは NP 完全である．

そこで，線形計画問題が符号可解であるための十分条件を与えるために，完全符号正則の概念を導入する．まず，正方行列において，行列式の展開式の中に非零項が存在するとき，この正方行列を項別正則という．さらに，$m \times n$ 行列の全ての項別正則な m 次小行列が符号正則であるとき，この行列は完全符号正則であるという．与えられた行列が完全符号正則かどうかの判定は，符号正則性判定のアルゴリズムを用いて，多項式時間で可能である．線形計画問題 $\mathrm{LP}(A, b, c)$ は，

$$A_{\mathrm{p}} = \begin{pmatrix} A & b \end{pmatrix}, \qquad A_{\mathrm{d}} = \begin{pmatrix} c \\ A \end{pmatrix}$$

が共に完全符号正則であるときに，完全符号正則であるという．完全符号正則線形計画問題に対して，最適基底解の符号パタンを効率的に見出すアルゴリズムを開発した．このアルゴリズムの計算量は，入力の非零要素数を ℓ としたときに $O(m\ell)$ である．

7 独立偶因子問題の組合せ的解法

効率的に解くことのできる組合せ最適化問題として，無向グラフのマッチング問題とマトロイドの共通独立集合問題がよく知られている．両者の共通の一般化として，Cunnigham–Geelen [9] が, 独立パスマッチングという概念を導入し, 最大最小定理を示した．彼らは，その後，より一般的な枠組みとして, 有向グラフにおける独立偶因子を導入している [10].

有向グラフ中の偶因子とは，有向路と偶閉路の点素な集まりを意味する．枝数最大の偶因子を見出す偶因子問題は一般に NP 困難であるが，奇閉路対称と呼ばれる有向グラフのクラスにおいては, 最大最小定理が成立し，楕円体法や代数的手法を用いた多項式時間解法が存在することも示されている．しかし，これらの解法は，あまり効率的でなく，組合せ的な多項式時間解法の開発が望まれていた．最近，Pap [49] は，交互道を用いた新たなアルゴリズムを設計し，この問題を解決している．

有向グラフの点集合上に二つのマトロイド構造を付加し，偶因子の端点集合（偶因子の枝の始点の集合と終点の集合）が，それぞれのマトロイドにおいて独立集合であるときに，この偶因子を独立偶因子という．Cunningham–Geelen は，奇閉路対称よりも若干特殊な弱対称と呼ばれるクラスの有向グラフにおいて，最大枝数の独立偶因子を見出す独立偶因子問題を，マトロイド共通独立集合問題に帰着することで，多項式時間解法の存在

を示している．この解法では，マトロイドの独立性判定オラクルとして，偶因子問題のアルゴリズムを呼び出す形になっている．この部分にPapのアルゴリズムを採用すれば，純粋に組合せ的なアルゴリズムが構成できたことになるが，決して効率的ではない．ただし，n 有向グラフの点数, Q は付加されたマトロイドの独立判定に要する時間である．

本研究 [18] では，Papの手法を拡張することにより，独立偶因子問題に対する効率的なアルゴリズムを開発した．新しいアルゴリズムの計算量は，有向グラフの点数 n，付加されたマトロイドの独立性判定に要する時間 Q に対して，$O(n^4Q)$ であり，既存の解法よりも遥かに効率的である．同時に，このアルゴリズムは，マッチングに関するTutte–Berge公式とマトロイド共通独立集合に関するEdmondsの定理を拡張して，独立偶因子の枝数の最大値を特徴付ける新たな最大最小定理の構成的証明を与えてもいる．

8　ロバスト線形行列不等式の解法

8.1　はじめに

ロバスト線形行列不等式は，設計変数に対して1次の行列不等式であって，その係数が不確かなパラメータに依存するようなものである．興味の対象は，ある集合に属すすべてのパラメータ値について行列不等式を満足する設計変数の値を見つけることである．ロバスト制御やゲインスケジュールド制御など多くの制御の問題がロバスト線形行列不等式を解くことに帰着される．また，ロバスト線形行列不等式を条件として線形関数を最小化する問題はロバスト半正定値計画問題と呼ばれ，最適化においても重要である．

しかしロバスト線形行列不等式を解くことは，一般に無限本の線形行列不等式を同時に満たす解を求めることであり困難である．そこで本研究ではロバスト線形行列不等式を近似的に解く方法として，確率的解法と確定的解法の2つを考える．確率的解法ではパラメータのランダム抽出に基づき，与えられたロバスト線形行列不等式を必要条件の側から近似する．確率的解法が与える近似解の質は確率的な意味でしか保証されないが，計算量が小さいことが利点である．一方確定的解法では，不等式がパラメータに多項式的に依存するという仮定のもとに，与えられたロバスト線形行列不等式を十分条件の側から近似する．確定的解法が与える近似解の質は確定的な意味で保証されるが，しばしば計算量が大きくなってしまう．

このように2つの解法は相補的である．また，ランダムに抽出した離散的なパラメータを使う確率的方法に対して，パラメータの多項式構造を使う確定的方法は連続的である．この意味で本研究は離散と連続の融合の観点からロバスト線形行列不等式にアプローチするものだと言える．

8.2　確率的解法

本節では次の問題を考える：

$F(x,\theta) \succeq O \quad (\forall\theta \in \Theta)$
を満たす $x \in \mathbb{R}^n$ を求めよ．

ここで $x \in \mathbb{R}^n$ は設計変数であり，$\theta \in \Theta \subset \mathbb{R}^p$ は不確かなパラメータであってその定義域 Θ は有界で内点を持つ凸多面体である．関数 $F(x,\theta)$ は x については1次，θ については連続で一般に非線形である．その値は m 次の対称行列であり，不等式 $F(x,\theta) \succeq O$ は対称行列 $F(x,\theta)$ が半正定値であることを表す．

この問題は無限本の行列不等式を同時に満たす x を求めなくてはならないので難しく，$F(x,\theta)$ が θ の1次関数で Θ が p 次元の区間であるという簡単な場合ですらNP困難であることがわかっている．そこで本研究ではパラメータ集合 Θ に確率測度 P を導入し，これにしたがってパラメータをランダムに抽出することを考える．この場合有限個のパラメータ値だけしか扱わないので，与えられた不等式の必要条件を考えるにすぎないが，十分多くのパラメータを抽出すれば何らかの意味でよい近似解が得られるはずである．

以上のアイデアに基づいてロバスト線形行列不等式の近似解を求める確率的解法を構成した [45]. この解法を使うためにはまず3つのパラメータ $0 < \epsilon < 1$, $0 < \delta < 1$, $0 < \mu$ を選ぶ必要がある．いずれも零に近い値を選ぶほど近似解の質が良くなる．解法は “no” または “yes” と答えて終了し，“yes” の場合は近似解 x も出力する．この解法の性能に関して次のような確率的な保障ができる．

定理.
(a) 本解法は高々$(1/\epsilon)\log(1/\mu)[\log(1/\delta) + \log\log(1/\mu)]$ に比例する程度の量の計算の後に終了する.
(b) 本解法が "no" と答えるとき, $F(x,\theta) \succeq O$ $(\forall\theta \in \Theta)$ を満たす x の集合の体積は μ 以下である.
(c) 本解法が "yes" と答えるにも関わらず解法が与える x について

$$P\{\theta \in \Theta \,|\, F(x,\theta) \succeq O\} \leq 1-\epsilon$$

である確率は δ 以下である. □

本研究ではこの結果を拡張し, ロバスト半正定値計画問題に対する確率的解法の構成と, その性能保障も行なった.

8.3 確定的解法

本節では, ロバスト線形行列不等式を条件として線形関数を最小化する問題, すなわちロバスト半正定値計画問題:

$$\begin{aligned} P: \quad & \text{最小化} \quad c^{\mathrm{T}}x \\ & \text{条件} \quad F(x,\theta) \succeq O \quad (\forall\theta \in \Theta) \end{aligned}$$

を対象とする. ただし前節よりも強い仮定を置き, $F(x,\theta)$ は θ の多項式であるとする.

確定的解法では前節の確率的解法とは逆に $F(x,\theta) \succeq O$ $(\forall\theta \in \Theta)$ の十分条件を考える. 特に有限本の行列不等式で表される十分条件を考え, それで P の条件を置き換えて P の近似問題を作る. 近似問題は通常の半正定値計画問題であり, 内点法で解くことができる. 近似問題の最適値はもとの問題 P の最適値の上界になるが, 十分条件を工夫することにより近似誤差をいくらでも小さくすることができる. 以上のような解法を漸近的に厳密な近似解法と呼ぶ.

漸近的に厳密な近似解法はいくつか提案されているが, 本研究では行列拡大法なる解法を提案した [44]. まず, 適当な行列 $G(x)$ と $M(\theta)$ を使って $F(x,\theta) = (1/2)M(\theta)^{\mathrm{T}}G(x)M(\theta)$ と表し, さらに $[M(\theta)\ \ H(\theta)]$ が正則行列となり, $M(\theta)^{\mathrm{T}}H(\theta)$ が恒等的に零となり, かつ θ について 1 次であるような行列 $H(\theta)$ を構成できることに注目する. このとき, 多面体 Θ を凸多面体の集合 $\Delta = \{\Theta^{[1]}, \Theta^{[2]}, \ldots, \Theta^{[J]}\}$ に分割し, 凸多面体 $\Theta^{[j]}$ の頂点の集合を $\mathrm{ver}\,\Theta^{[j]}$ で表すことにすると, もとの問題 P の近似問題として次のものが構成できる:

$$\begin{aligned} & P(\Delta): \\ & \quad \text{最小化} \quad c^{\mathrm{T}}x \\ & \quad \text{条件} \quad G(x) + H(\theta)W^{\mathrm{T}} + WH(\theta)^{\mathrm{T}} \succeq O \\ & \qquad\qquad (\forall\theta \in \mathrm{ver}\,\Theta^{[j]},\ \forall j = 1,2,\ldots,J). \end{aligned}$$

ここで分割 Δ を細かくすると, 問題 $P(\Delta)$ の最適値 $\inf P(\Delta)$ はもとの問題 P の最適値 $\inf P$ に収束し, したがってこの解法は漸近的に厳密である.

行列拡大法の特長は, 近似誤差 $|\inf P(\Delta) - \inf P|$ が分割の細かさにどのように依存するか評価できることである. まず, 部分領域 $\Theta^{[j]}$ の半径を $\mathrm{rad}\,\Theta^{[j]}$ で表し, すべての部分領域に対する半径の最大値 $\max_j \mathrm{rad}\,\Theta^{[j]}$ を分割の最大半径 $\overline{\mathrm{rad}}\,\Delta$ と呼んで分割の細かさの指標とする. このとき次が成り立つ.

定理. ある条件のもとで,

$$|\inf P(\Delta) - \inf P| \leq C\,\overline{\mathrm{rad}}\Delta$$

が $\overline{\mathrm{rad}}\Delta \leq C'$ なるすべての分割 Δ について成り立つ. ただし C と C' は分割 Δ によらない正の定数である. □

他の漸近的に厳密な近似解法では, 特殊な場合を除いて対応する結果は得られていない.

この結果により, 最大半径を小さくするとき, 近似誤差は最大半径の高々1 次のオーダーで零に収束することがわかる. また, 係数 C, C' を計算することも可能である. さらに上の結果を改良することで, 少ない計算量で近似誤差を小さくするような効率的な分割を得ることも可能である.

行列拡大法の問題点は, 現実的な問題に適用すると近似問題のサイズが大きくなりすぎて, 計算量や計算精度の点で近似問題を解くことが難しくなるということである. そこで本研究では, $F(x,\theta)$ を θ の多項式とみたとき多くの項の係数は零であるという一種の疎構造を仮定することで, 近似問題のサイズを小さくすることを考えた [46]. 近似問題の構成で鍵になるのは行列 $H(\theta)$ の存在であるが, rectilinear Steiner arborescence とい

う特殊なグラフを使うことにより，疎構造を生かしつつ行列 $H(\theta)$ の存在を保証することができる．

9 不確定な外力に対する構造物の極限解析法

建築・土木・機械などの様々な分野における構造物は，実際には施工誤差や外乱の情報の不足など，種々の不確定なパラメータを含むことが普通である．従って，不確定なパラメータを含む構造系の応答のばらつきを適切に評価することは，極めて重要である．

構造系の非確率論的な不確定性解析の手法としては，凸モデル解析 (convex model) [7] や区間解析 (interval analysis) [1] がよく知られている．しかし，凸モデル解析は応答量の不確定パラメータに関する線形近似に基づくため，不確定パラメータのばらつきが十分小さい場合にしか適用できない．また，区間解析はしばしば，誤差が大きくて安全側すぎる解を与える．

極限解析により得られる崩壊荷重係数は，弾塑性構造物の設計における基本的な指標の 1 つとして広く用いられている．本研究では，構造物に作用する外力が非確率論的にばらつく場合の極限解析について，外力が大きくばらつく場合にも適用できる手法を提案した [21, 34].

9.1 最悪崩壊荷重係数

外力がばらつく場合に，崩壊荷重係数の最小値およびそれを与える外力として，最悪崩壊荷重係数およびクリティカル外乱を新たに定義した．最悪崩壊荷重係数を求める問題は，連続変数に関する非線形最適化問題として定式化できる．しかし，この問題の大域的最適解を直接求めることは困難である．そこで本研究では，この連続的最適化問題に離散変数を導入して，混合 0-1 計画問題と呼ばれる問題に変換した．混合 0-1 計画問題は，線形計画緩和に基づく分枝限定法により解くことができる．本研究ではさらに，離接カットと呼ばれるカット (1 次不等式) を生成し，線形計画緩和の精度を高める手法を提案した [21].

数値例題を通じ，提案手法が中規模の問題にも適用可能であることを例証した．また，不確定な外乱が存在することで，(i) 崩壊荷重係数が大きく低下する場合があること，(ii) 崩壊モードが変化する場合があること，を明らかにした．

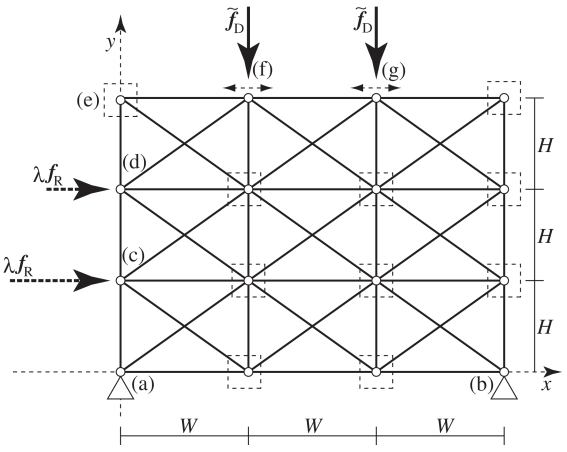


図 2: 3 × 3 トラス

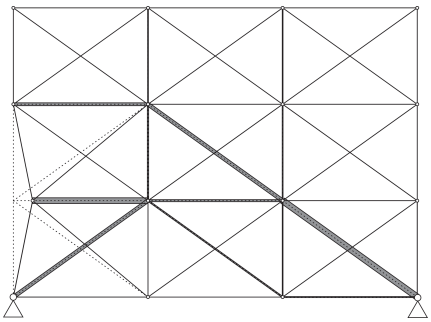


図 3: 3 × 3 トラスのロバスト最適解と崩壊モード

9.2 ロバスト性能の評価法

Ben-Haim [6] は不確定パラメータを含む系に対して，インフォ・ギャップ決定理論 (info-gap decision theory) と呼ばれる意思決定法を提案した．この理論において中心的な役割を果たすのが，ロバストネス関数 (robustness function) と呼ばれるロバスト性の定量的な指標である．インフォ・ギャップ理論を構造物の設計問題に適用すると，より大きなロバストネス関数を持つ構造物はより大きな変動 (ばらつき) に耐えることができることを意味する．つまり，ロバストネス関数が大きい構造物はロバスト性が大きいと考えられる．

一般の場合に，ロバストネス関数を求めることは困難である．これに対して本研究では，崩壊荷

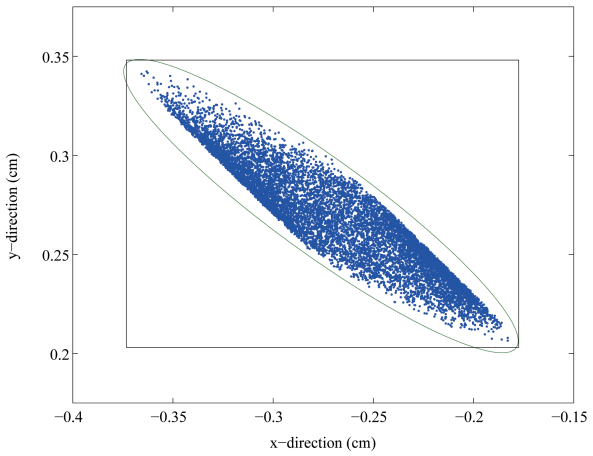


図 4: 節点変位 (構造物の応答量) と，その近似楕円体および近似長方形

重係数の下限値を制約とした場合のロバストネス関数を定義し，その値が線形計画問題を解くことで得られることを示した [34]．つまり，制約条件を崩壊荷重係数の下限制約に限定した場合には，ロバストネス関数は容易に求めることができることが明らかになった．また，崩壊荷重係数を制約とした構造物のロバスト最適設計問題を定式化し，これを線形計画問題に帰着した．

図 2に示す構造物を考える．節点 (f) および (g) には垂直方向に固定荷重を作用させる．また，節点 (c) および (d) には，λをパラメータとして水平方向に比例載荷荷重を作用させる．それ以外の節点に，図 2の破線で示す領域の内部を自由にばらつくような不確定な外力が作用することを仮定する．崩壊荷重係数は，力の釣り合いと降伏条件を満たす λ の最大値として定義される．このとき，崩壊荷重係数を制約条件とするロバスト最適設計問題を解いて得られた最適解を図 3に示す．

10　半正定値計画法を用いた構造物の不確定性解析法

本研究では，構造物の剛性と，構造物に作用する外力の双方が不確定である場合を考える．非確率論的な不確定性モデルを考え，剛性と外力のばらつく範囲は既知であると仮定する．このときに，構造物の静的な応答量 (変位や応力) のばらつく範囲を求めることを目的とする．特に，応答量のばらつきを予測する楕円体を求める問題を考える．

まず，解きたい問題は，応答量の集合を含む楕円体のうち最小のものを求めるという最適化問題として定式化できる．次に，$\mathcal{S}$-lemma と呼ばれる定理を用いることにより，この問題を近似する半正定値計画問題を導く．この半正定値計画問題の解として得られる楕円は，応答量の集合を外側から近似することが保証されている．つまり，応答量のばらつきの安全側の (保守的な) 評価であることが保証されるため，工学的に有用である．半正定値計画問題は，主双対内点法を用いると効率よく解くことができる．

以上の手法を，トラスと呼ばれる，伸び縮み変形のみが許容された部材で構成される構造物に対して適用した [20]．さらに，曲げ変形も許容された部材で構成される骨組構造物に対しても拡張した [22]．図 4は，ある構造物に対して，節点変位のばらつきの様子と，本手法で得られた近似楕円体・近似長方形を示している．このように，剛性と外力が同時に大きくばらつく状況でも，本手法を用いると，応答量のばらつきを精度よく近似する楕円体や長方形を求めることができる．

11　ボート航行距離ボロノイ図

平成 16 年度から 18 年度にかけて，新たなボロノイ図の提案およびその構成方法について研究を行った．もともとボロノイ図とは，平面に有限個の生成元と呼ばれる点が与えられたとき，ユークリッド距離で測って，どの母点に最も近いかで空間の点を分割した領域図のことであった．しかし，今では, 距離の一般化や生成元の一般化により多種多様なボロノイ図が提案されている．一方，我々はボート航行距離と呼ぶ新たな距離を導入し，ボート航行距離ボロノイ図を提案し，その構成方法を提案した．

流れを伴う 2 次元水面上に 2 点，始点と終点が与えられとき，ボートが始点から終点まで動くのにかかる最短時間をボート航行距離と呼び，その距離に基づくボロノイ図をボート航行距離ボロノイ図と呼ぶ．ボロノイ図を構成するとき，各領域の境界を解析的に求めることが一般的であるが，ボート航行距離の場合，与えられる流れが複雑であるとき，境界を解析的に求めることは困難であ

る．そこで，我々は，ボート航行距離を求める問題を常微分方程式および偏微分方程式に定式化し直し、それぞれに対して数値計算法を提案し，近似的なボート航行距離ボロノイ図を構成した．また，曲面上に拡張したボート航行距離ボロノイ図も構成した．

二次元平面の各点 $p = (x, y)$ に対して，流れベクトル $f(p) = (u(p), v(p))$ およびボートの速さ $F(p)$ が与えられているとする．ボートが時刻 0 に p_0 を離れ，点 p に最小到達時間すなわちボート航行距離 $T(p)$ で到達するとき，関数 T は，偏微分方程式

$$F\sqrt{T_x^2 + T_y^2} + T_x u + T_y v = 1$$

を満たす解となっている．すなわち，この方程式を境界条件 p_0 として，解くことにより領域の各点でのボート航行距離を得ることができる．従って，境界条件として有限個の点を与え，方程式を解けばボロノイ図（図 11）が得られるのである．

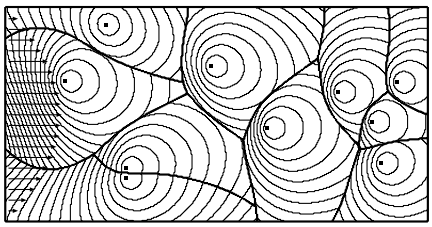


図 5: 流れの中のボロノイ図の例：左から右に流れがあり，中央に行くほど速い 流れがあるボロノイ図.

これは，曲面上のボート航行距離方程式に拡張される．ただし，その方程式は平面へ射影されたものとなっている．$f(p) = (u(p), v(p))$ を曲面上の流れを x-y 平面に射影したベクトルとし，$z = h(x, y),\ (x, y) \in \Omega$ を微分可能な曲面とする．この時，方程式は次のように得られる：

$$F\sqrt{\frac{(1+h_y^2)T_x^2 - 2h_x h_y T_x T_y + (1+h_x^2)T_y^2}{1+h_x^2+h_y^2}} = 1 - T_x u - T_y v.$$

この問題は，ボートの経路を直接，計算することでも求めることができる．それは，次のような位置の時間変化を表す微分方程式と方向の時間変化を表す方程式の組で書くことができる：

$$\begin{aligned} p_t(t) &= Fn(t) + f(p(t)), \\ n_t(t) &= -\left(I - n(t)n^{\mathrm{T}}(t)\right) \times \\ &\quad \left\{ \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} u_x & u_y \\ v_x & v_y \end{pmatrix} n(t) \right\}. \end{aligned}$$

同様に，曲面問題の場合も次のように x-y 平面上の方程式の組として書くことができて，

$$\begin{aligned} p_t(t) &= F(p(t))n(p(t))) + f(p(t)) \\ \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}_t &= -\left\{ \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} a^2 & ab \\ ab & b^2 \end{pmatrix} \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{1+h_x^2+h_y^2} \begin{pmatrix} h_x^2 & h_x h_y \\ h_x h_y & h_y^2 \end{pmatrix} \right\} \times \\ &\quad \left\{ \nabla F - F \begin{pmatrix} h_{xx} & h_{xy} \\ h_{xy} & h_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a^2 & ab \\ ab & b^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_x \\ h_y \end{pmatrix} \right. \\ &\quad \left. + \begin{pmatrix} u_x & v_x \\ u_y & v_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1+h_x^2 & h_x h_y \\ h_x h_y & 1+h_y^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} \right\} \end{aligned}$$

と表される．ただし，a は x 方向成分を，b は y 方向成分を表す.

12 円ボロノイ図の厳密計算

幾何アルゴリズムをプログラムし，実際にそのプログラムを走らせてみると破綻することがよくある．それは、幾何アルゴリズムには，退化が存在しない，あるいは計算は無限の精度で行えるといった仮定をおいているものが多いからである．ところが実際には退化や計算誤差があるので破綻するというわけである．

そのひとつの例として円ボロノイ図がある．円ボロノイ図とは生成元が円であるボロノイ図の総称であるが，ここでは，生成元が円で，点 p と円 $C = \{q, r\}$ の距離を

$$d(p, C) = ||q - p|| - r$$

によって測るボロノイ図とする．ただし，$||\cdot||$ はユークリッド距離を表し，q を円の中心，r をその半径とする．

この円ボロノイ図を安定に求めることは難しい．その一つの原因が退化や計算誤差である．図 7の

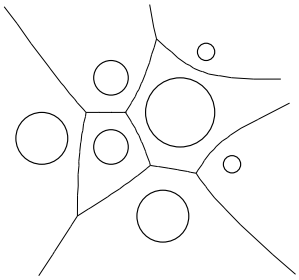
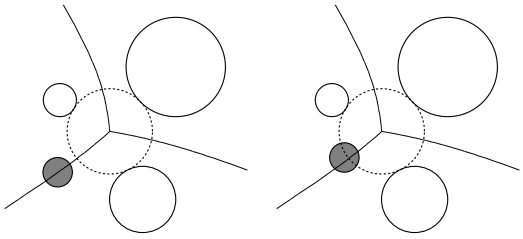


図 6: 円ボロノイ図の例.

状況を考える．三つの円（実線）に対して，それに共通に内接する円（点線）が存在する．内接円の中心はボロノイ頂点と呼ばれ，そこから出ている辺はボロノイ辺と呼ばれる．ここで４つめの円がこの内接円の近傍にある時を考えると，図7(a)のように離れていれば，ボロノイ頂点はそのまま残るが，7(b)のように交わっていれば頂点は消滅し，新たな頂点が形成されることになる．しかしながら，非常に接近している場合，この判定が計算誤差によって反対の結果を出力し、ボロノイ辺の接続関係に矛盾が生じ，破綻する．



(a) 交わらない場合.　　(b) 交わる場合.

図 7: 添加された円と共通内接円の位置関係.

これらに対して，Kim 等は，はじめに円の中心点の点ボロノイ図を構成し，次にその点をそれぞれ円に膨らましながら，ボロノイ辺の接続関係を更新し，円ボロノイ図を得る安定な方法を提案している．一方，我々は厳密計算を利用し，内接円と 4 番目の円の交差判定を直接計算することで，直接円ボロノイ図を得る方法を提案した [54, 42]. その方法は、三種類の判定関数を用意することにより，入力データ長の約八倍のデータ長を用意しておけば，厳密に交差判定ができるようになっている．また，その方法を多次元にも拡張している [43].

13　カッティング・パッキング問題

カッティング・パッキング問題は，入力として与えられた複数の図形を，与えられた領域に重なりなく，出来る限り密に配置する問題である．この問題は，製造業や配送業など様々な工学的応用を持つ組合せ最適化問題であることが認知されている．本研究では，(1) 与えられた長方形をなるべく密に配置する長方形詰込み問題，(2) 図形の配置が与えられたとき，それらを効率的に切り出すカッターパス生成問題を扱った．これらの問題に対し厳密な最適解を求めることは非常に困難なため，実用的な近似解法の構築を目的とした.

13.1　長方形詰込み問題に対する実用的解法

カッティング・パッキング問題の中で，最も盛んに研究が行われている問題の一つが長方形詰込み問題である．入力として，長方形の集合（長方形数を n とする）と，幅の定まった長方形の容器が与えられる．全ての長方形を互いに重ならないように容器の中に配置するとき，利用する容器の高さの最小化が目的となる．この問題に対して厳密な最適解を求めることは困難なため，実用的な近似解法の研究が盛んに進められてきた．Burke らによって 2004 年に提案された best-fit 法 [8] は，この流れの研究成果の一つであり，その高い性能が注目されている．best-fit 法の特徴として，長方形の配置順をあらかじめ決めることなく，状況に応じて，次に配置する長方形を決定しながら長方形を配置していくという点が挙げられる.

本研究 [14] では，まず best-fit 法の効率的な実現法を提案した．ヒープや二分探索木，線形リストといった基本的なデータ構造を効果的に組み合わせて用いることで，$O(n)$ の領域と，$O(n \log n)$ の計算量で best-fit 法を実現した．これは，オーダーの観点で最適な実現法である．提案した実現法のもう一つの特徴として，その実用性が挙げられる．提案手法の実装は容易であり，また計算機実験を用いた評価では，あらゆる入力に対して非常に高速に解を得られることを確認した．図 8は，best-fit 法を用いて 2008 個の長方形を配置した例である．高い充填率を実現していることが確認でき，またその計算時間は 0.01 秒と非常に高速であった.

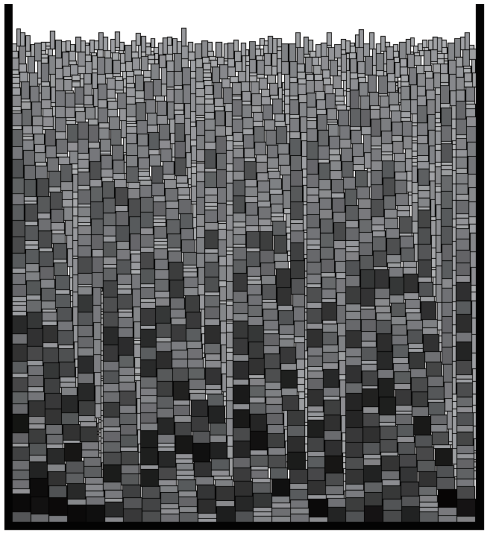


図 8: best-fit 法による配置例（長方形数 2008，計算時間 0.01 秒）

さらに，得られる解の精度に関する理論的・実験的解析を行った．得られた成果の一つとして，best-fit 法の近似精度を解析し，この手法の近似精度は定数とはならないことを示した．

13.2 カッターパス生成アルゴリズム

平面状の母材と様々な形の製品集合が与えられたとき，なるべく効率よく製品を切り出す問題を考える．この問題は，次の 2 つのフェーズからなる問題と考えることができる．(1) 様々な形の製品を母材上に重なりなく，できる限り隙間なく配置する問題．(2) 母材上に配置された製品集合を，カッターを用いて順に切り落とす問題．前者は多角形詰込み問題，後者はカッターパス生成問題と呼ばれる．本研究 [15] では，カッターパス生成問題に対する，実用的な近似解法の設計を行った．

カッターパス生成問題における目的は，なるべく短い時間で全ての製品を切り出すこと，すなわちカッターの移動距離の最小化である．本問題は，枝順回路問題の一種であり，単純な制約条件下では効率的に最適解を求めることができる．一方，実際の応用を念頭に置く場合は，複雑な制約条件を考慮する必要がある．まずはじめに，考慮すべき制約条件を，以下の通りまとめた．

第一の制約として，指定された辺におけるへそ残りの禁止という条件を与える．ワイヤカッターを用いて製品を切り出す際には，カッターの歯（ワイヤー）の太さによる影響で，各製品の最後に切断された辺の上にへそと呼ばれる突起が生じてしまう．カッターによって母材から切り出された製品は，この後の工程で他の部品と接合されるのだが，接合される辺上にへそがあると，十分な精度で接合を行うことができなくなってしまう．第二の制約として，最終形状での切り出しという条件を与える．複数の製品を一つの塊として母材から切り離し，この塊に対して再加工を行うことは，作業効率や製品の加工精度の観点から禁止される．よって，全ての製品は，その最終形状で母材から切り出されることが必要となる．第三の制約として，切り出す製品の周りに十分な空間をあけるという条件を与える．母材および製品は，一定の厚みを持つため，切り出す製品の周りに十分な空間（隙間）がない場合には，切り落としたつもりの製品が母材にひっかかるという現象が生じる．このとき，他の製品の切り出しのために動かしたカッターがひっかかった製品と接触し，その結果として，製品が傷つけられるという状況に陥る．第四の制約として，力を支えることのできる形状を母材が常に維持するという条件を与える．カッターで母材を切断する際には，摩擦による強い力が母材にかかる．(いくつかの製品が切り出された上での）母材の形状によっては，この力の影響で母材が振動し，切り出し加工精度の低下という結果が生じる．最後の制約として，第三の制約から副次的に得られる，製品以外の部分に関する条件を与える．第三の制約を満たすためには，母材上の非製品部分も切り出す必要が生じ，この部分も安定に切り出されなければならない．以上の制約条件のもとで，カッターパスを求める実用的な近似解法を提案した．我々の提案した手法は，以下に述べる 3 つのステップからなる．はじめに，母材の非製品部分を切り出しやすい形状に分割する．「切り出しやすい」とは，凸かそれに準ずる形状を意味する．次に，母材上の製品および分割された非製品を節点として，次の性質を満たす根付き木を構成する: 根付き木の葉から根に向けて製品を切り出すことにより，上で述べた第一，第二，第四の制約条件を自動的に満たす．最後に，根付き木の葉から根に向けて，第三，第五の制約条件を考慮しながら，できる限り距離の短いカッターパス

を求める．各ステップとも，選択の自由度が残されているが，本研究では欲張法などの発見的解法（ヒューリスティック）を用いることで，短時間で実用的に良いと思われるものを選択した．提案手法を実装し，いくつかのデータ，すなわち母材上の製品配置に対して，実際にカッターパスを求めることに成功した．

参考文献

[1] G. Alefeld and G. Mayer: Interval analysis: theory and applications. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, **121** (2000), pp. 421–464.

[2] N. Apollonio and A. Sebő: Minsquare factors and maxfix covers of graphs. in: D. Bienstock and G. Nemhauser, eds., *Integer Programming and Combinatorial Optimization*, Lecture Notes in Computer Science, **3064**, Springer-Verlag, 2004, pp. 388–400.

[3] D. Avis, H. Imai, T. Ito and Y. Sasaki: Two-Party Bell Inequalities Derived from Combinatorics via Triangular Elimination. *Journal of Physics A: Mathematical and General*, **38** (2005), pp. 10971–10987.

[4] D Avis, H Imai and T. Ito: On the Relationship between Convex Bodies Related to Correlation Experiments with Dichotomic Observables. J. Phys. A: Math. Gen., **39**-36 (8 September 2006), pp. 11283–11299.

[5] D. Avis, H. Imai and T. Ito: Generating Facets for the Cut Polytope of a Graph by Triangular Elimination. Mathematical Programming, in press, 23pp. (Online First: DOI 10.1007/s10107-006-0018-z)

[6] Y. Ben-Haim: *Information-gap Decision Theory: Decisions under Severe Uncertainty*, (2nd ed.). Academic Press, London, UK, 2006.

[7] Y. Ben-Haim and I. Elishakoff: *Convex Models of Uncertainty in Applied Mechanics*. Elsevier, Amsterdam, the Netherlands, 1990.

[8] E. K. Burke, G. Kendall, G. Whitwell: A New Placement Heuristic for the Orthogonal Stock-cutting Problem. *Operations Research*, **52** (2004), pp. 655–671.

[9] W. H. Cunningham and J. F. Geelen: The optimal path-matching problem, *Combinatorica*, 17 (1997), pp. 315–337.

[10] W. H. Cunningham and J. F. Geelen: Vertex-disjoint dipaths and even dicircuits, 2001.

[11] F. J. Hall, Z. Li, and D. Wang: Symmetric sign pattern matrices that require uniquie inertia, *Linear Algebra and Its Application*, 338 (2001), pp. 153–169.

[12] M. Hayashi, H. Imai, K. Matsumoto, M. B. Ruskai and T. Shimono: Qubit Channels which Require Four Inputs to Achieve Capacity: Implications for Additivity Conjectures. *Quantum Information and Computation*, **5** (2005), pp. 13–31.

[13] A. S. Holevo: The Capacity of the Quantum Channel with General Signal States. *IEEE Trans. Inf. Theory*, **44**-1 (1998), pp. 269–273.

[14] 今堀慎治, 柳浦睦憲: 長方形配置問題に対する best-fit 法の効率的な実現. *IPSJ SIG Technical Report*, **114** (2007), pp. 65–72.

[15] S. Imahori, M. Kushiya, T. Nakashima, K. Sugihara: Generation of Cutter Paths for Hard Material in Wire EDM. *Journal of Materials Processing Technology*, to appear.

[16] T. Ito, H. Imai and D. Avis: Bell Inequalities stronger than the Clauser-Horne-Shimony-Holt Inequality for Three-Level

Isotropic States. *Physical Review A*, **73**-042109 (2006), 9pp.

[17] S. Iwata and N. Kakimura: Solving linear programs from sign patters, *Mathematical Programming*, to appear.

[18] S. Iwata and K. Takazawa: The independent even factor problem, *Proc. 18th SODA* (2007), pp. 1171–1180.

[19] N. Kakimura and S. Iwata: Computing the Inertia from Sign Patterns, *Mathematical Programming*, 110 (2007), pp. 229–244.

[20] Y. Kanno and I. Takewaki: Confidence ellipsoids for static response of trusses with load and structural uncertainties. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, **196** (2006), pp. 393–403.

[21] Y. Kanno and I. Takewaki: Worst-case plastic limit analysis of trusses under uncertain loads via mixed 0-1 programming. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, **2** (2007), pp. 245–273.

[22] Y. Kanno and I. Takewaki: Ellipsoidal bounds for static response of framed structures against interactive uncertainties. *Interaction and Multiscale Mechanics: an International Journal*, **1** (2007), pp. 103–121.

[23] K. Kato, M. Oto, H. Imai, K. Imai: Voronoi Diagrams for 1-qubit Pure Quantum States. *Proceedings of the 2nd International Symposium on Voronoi Diagrams*, Seoul, Korea, October 2005, pp. 293–299.

[24] H. Kawaharada and K. Sugihara: Line Subdivision. *Mathematics of Surfaces* XI, Lecture Notes in Computer Science 3604 (Proceedings of the 11th IMA International Conference), July 2005, pp. 240–254.

[25] H. Kawaharada and K. Sugihara: Dual Subdivision—A New Class of Subdivision Scheme Using Projective Duality. *14th International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision 2005*, Plzen, Czech Republic, 2006.

[26] Shuji Kijima and Tomomi Matsui: Approximate Counting Scheme for mxn Contingency Tables. *IEICE Transactions on Information and Systems*, **E87–D** (2004), pp. 308–314.

[27] Shuji Kijima and Tomomi Matsui: Approximate/perfect samplers for closed Jackson networks. *The 2005 Winter Simulation Conference*, 2005, pp. 862–868, .

[28] Shuji Kijima and Tomomi Matsui: Rapidly Mixing Chain and Perfect Sampler for Logarithmic Separable Concave Distributions on Simplex. *Proceedings of the 2005 International Conference on the Analysis of Algorithms*, DMTCS Proceedings Series Volume AD, 2005, pp. 369–380.

[29] Shuji Kijima and Tomomi Matsui: Polynomial Time Perfect Sampling Algorithm for Two-Rowed Contingency Tables. *Random Structures and Algorithms*, **29** (2006), pp. 243–256.

[30] Shuji Kijima and Tomomi Matsui: Polynomial Time Perfect Sampler for Discretized Dirichlet Distribution. *The Grammer of Technology Development*, 2008, pp. 179–199.

[31] Shuji Kijima and Tomomi Matsui: Randomized Approximation Scheme and Perfect Sampler for Closed Jackson networks with Multiple Servers. to appear in *Annals of Operations Research*.

[32] Y. Kobayashi and K. Murota: Induction of M-convex functions by linking systems. *Discrete Applied Mathematics*, **155** (2007), pp. 1471–1480.

[33] Y. Kobayashi, K. Murota and K. Tanaka: Operations on M-convex functions on jump

systems. *SIAM Journal on Discrete Mathematics*, **21** (2007), pp. 107–129.

[34] Y. Matsuda and Y. Kanno: Robustness analysis of structures based on plastic limit analysis with uncertain loads. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, to appear.

[35] Tomomi Matsui, Yasuko Matsui, and Yoko Ono: Random Generation of $2 \times 2 \times \cdots \times 2 \times J$ Contingency Tables. *Theoretical Computer Science*, **326** (2004), pp. 117–135.

[36] S. Moriguchi and K. Murota: Discrete Hessian matrix for L-convex functions. *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, **E88-A** (2005), pp. 1104–1108.

[37] 室田一雄: 離散凸解析. 共立出版, 2001.

[38] K. Murota: *Discrete Convex Analysis*. SIAM, 2003.

[39] K. Murota: M-convex functions on jump systems: A general framework for min-square graph factor problem. *SIAM Journal on Discrete Mathematics*, **20** (2006), pp. 213–226.

[40] K. Murota and K. Tanaka: A steepest descent algorithm for M-convex functions on jump systems. *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, 0**E89-A** (2006), pp. 1160–1165.

[41] H. Nagaoka: Algorithms of Arimoto-Blahut Type for Computing Quantum Channel Capacity. *Proc. 1998 IEEE International Symposium on Information Theory*, 1998, p. 354.

[42] T. Nishida, Y. Tanaka and K. Sugihara: Evaluation of the precision for exact computation of a circle Voronoi diagram. *Technical Reports, METR 2007-57*, Department of Mathematical Informatics, The University of Tokyo, 2007.

[43] T. Nishida and K. Sugihara: Exact Computation of a Voronoi diagram for spheres in d-dimensional Euclidean Space. *Technical Reports, METR 2008-02*, Department of Mathematical Informatics, The University of Tokyo, 2008.

[44] Y. Oishi: A region-dividing approach to robust semidefinite programming and its error bound. *Proceedings of the 2006 American Control Conference*, Minneapolis, USA, June 2006, pp. 123–129.

[45] Y. Oishi: Polynomial-time algorithms for probabilistic solutions of parameter-dependent linear matrix inequalities. *Automatica*, **43**-3 (2007), pp. 538–545.

[46] Y. Oishi and Y. Isaka: Exploiting sparsity in the matrix-dilation approach to robust semidefinite programming. *Proceedings of the 2007 American Control Conference*, New York, USA, July 2007, pp. 6169–6176.

[47] S. Osawa and H. Nagaoka: Numerical Experiments on the Capacity of Quantum Channel with Entangled Input States. *IEICE Trans. Fundamentals*, **E84-A**-10 (October 2001), pp. 2583–2590.

[48] M. Oto, H. Imai, K. Imai and T. Shimono: Computational Geometry of Bloch Sphere. Proc. ERATO Conference on Quantum Information Science (EQIS 2004), 2004, pp. 156–157.

[49] G. Pap: Combinatorial algorithms for matchings, even factors and square-free 2-factors, *Mathematical Programming*, **110** (2007), pp. 57–69.

[50] N. Robertson, P. D. Seymour, and R. Thomas: Permanents, Pfaffian orientations, and even directed circuits, *Annals of Mathematics*, **150** (1999), pp. 929–975.

[51] P. W. Shor: Capacities of Quantum Channels and How to Find Them. Mathematical Programming, **97** (2003), pp. 311–335.

[52] K. Sugihara, “Robust Geometric Computation Based on Digital Topology”, Proceeding of the 10th Conference on Computing and Combinatorics, COCOON2004, Teju, Korea, Augurst 17–20, 2004, pp. 3–12.

[53] K. Sugihara: Sliver-Free Perturbation for the Delaunay Tetrahedrization. *Computer Aided Design*, **39** (2007), pp. 87–94.

[54] Y. Tanaka and K. Sugihara, Exact Computation of a Circle Voronoi Diagram, *International Symposium on Voronoi Diagrams in Sience and Engineering*, pp. 173–183, 2005.

[55] T. Yamasaki, H. Kobayashi and H. Imai: Quantum versus Deterministic Counter Automata. *Theoretical Computer Science*, **334**-Issues 1-3 (2005), pp. 275–297.

研究業績一覧

著書

1. 青本和彦, 上野健爾, 加藤和也, 神保道夫, 砂田利一, 高橋陽一郎, 深谷賢治, 俣野博, 室田一雄 編著:
“数学入門辞典”, 岩波書店, 2005.
概要: 本辞典は，高校から大学で学ぶ数学用語を中心に解説したものである．数学を学ぶために必要な概念の解説のみならず，数学の歴史や社会的な背景にも配慮して解説をつけた．項目の説明は，できる限り直観的な説明からはじめて，用語の持つ意味や，その用語が必要とされる目的がわかるようにした．小項目中心の辞典ではあるが，数学としての基本的な概念に関しては，詳しい解説を付けて大きな流れをつかむことができ，やや高度な概念についてはそのイメージが捉えられるように説明を加えて，さらに進んだ学習への手助けとなるようにした．全項目を９人の著者で執筆している．

2. 杉原厚吉:
“立体イリュージョンの数理”, 共立出版, 2006.
概要: この本は，人間の立体知覚にかかわるイリュージョンを，目の機能をコンピュータに代行させようとするコンピュータビジョンの立場から，数理的に眺めようとしたものである．その基礎にあるのは，光が直進することと，同一の投影図をもつ立体は無限に多く存在することという，二つの幾何学性質のみである．数理的アプローチを取ることによって，これらの出発点から，多様な知覚現象を統一的に理解できると同時に，新しい状況で起こるであろう知覚現象を予測することもできる．これを利用して，新しいイリュージョンの創作も試みる．

3. 杉原厚吉:
“形と動きの数理”, 東京大学出版会, 2006.
概要: ロバスト幾何計算の成果や知見をわかりやすく解説したものである．前半の第１部「形と動きを理解する」では，身のまわりで観察される形や動きがなぜそうなっているのかを理解するための代表的な数理技法を紹介する．後半の第２部「形と動きを作り出す」では，望みの形や動きを作り出すための技術を紹介する．前者は与えられた世界を理解しようとする数理科学の立場であり，後者は生活に役立つ形や動きを作り出そうとする数理工学の立場である．多様な内容を集めてあるが，その背景に一貫して流れているのは，安定な計算技術を伴ってはじめて理論的な結果を実際の問題の解決に利用できるという知見であり，それが，ロバストアルゴリズムの有用性である．

4. 来嶋秀治, 松井知己:
“確率的情報処理と統計力学３章４節「CFTPを用いたパーフェクトサンプリング」”, サイエンス社, 2006 年 9 月.
概要: マルコフ連鎖モンテカルロ法（MCMC法）の基本的なアイデアは非常に簡明で,「マルコフ連鎖の極限分布からサンプリングを行い，モンテカルロ法 (等) を行う.」というものである．MCMC 法を用いる上で，目標の分布を定常分布に持つマルコフ連鎖の設計は重要

である．これに関して，目標の分布を設計する方法として，M-H（Metropolice-Hastings）法やGibbsサンプラーがあげられる．目標の定常分布をもつマルコフ連鎖を手に入れた後の問題点は,「何回推移させれば定常分布 (極限分布) と言えるのか？」と言うことである．しかし，マルコフ連鎖を何回推移させても，有限回の推移で打ち切ってしまうとひずみは生じる．これに対し，1996 年に Propp and Wilson は「無限回のシミュレーションを有限時間で実現」する乱択アルゴリズムを提案した．このアルゴリズムはCFTP（coupling from the past：過去からのカップリング) と呼ばれる．本稿では CFTP について解説を行っている．

5. 室田一雄:
“離散凸解析の考えかた—最適化における離散と連続の数理”, 共立出版, 2007 年 12 月.
概要: 離散凸解析では「凸関数と類似した離散構造」（連続→離散）と「離散構造を兼ね備えた凸関数」（離散→連続）という問題意識の下に，L 凸関数と M 凸関数という二つの新しい概念を導入し，その数学的性質，計算理論的意味，分野横断的応用開拓を行う．本書では，離散世界と連続世界を双方向に往き来することの意義と面白さを中心軸として離散凸解析の考え方を紹介すると同時に，ゲーム理論，線形代数，組合せ論，距離空間，確率論，オペレーションズリサーチなど，いろいろな分野への応用を示した．

6. Y. Kanno and I. Takewaki:
“Maximum robustness design of trusses via semidefinite programming, Chapter 17 in *Structural Design Optimization Considering Uncertainties*, Y. Tsompanakis, N.D. Lagaros, and M. Papadrakakis (eds.)”, Taylor and Francis Publishers, 2007.
概要: This chapter discusses evaluation and maximization of the robustness function of trusses, which is regarded as one of measures of structural robustness under the uncertainties of member stiffnesses and external forces. By using quadratic embedding of the uncertainty and the $\mathcal{S}$-procedure, we formulate a quasiconvex optimization problem which provides a lower bound of the robustness function. We next formulate the maximization problem of the robustness function as a robust structural optimization scheme. An algorithm based on the semidefinite program is proposed to obtain the optimal truss design. Numerical examples are shown to demonstrate the validity of the algorithms presented.

7. M. Ohsaki and Y. Kanno:
“Semidefinite programming for engineering applications, Chapter 21 in *Optimization of Structural and Mechanical Systems*, J.S. Arora (ed.)”, World Scientific, 2007.
概要: Basic formulations of SemiDefinite Programming (SDP) are presented, and the properties including optimality conditions and duality are summarized. It is shown that structural optimization problems considering compliance, eigenvalue of vibration, etc. can be formulated by SDP problems. Interior-point methods for solving SDP are briefly introduced. Finally, it is shown that the analysis problem of a cable net can be formulated as a Second-Order Cone Programming (SOCP) problem that is a particular case of SDP.

8. S. Imahori, M. Yagiura, H. Nagamochi:
“Handbook of Approximation Algorithms and Metaheuristics (Chapter 36. Practical Algorithms for Two-dimensional Packing)”, Chapman & Hall/CRC in the Computer & Information Science Series, March 2007.
概要: Cutting and packing problem is the problem to place a given set of small items into one or many large objects without mutual overlap to minimize/maximize a given objective function. This problem is not only a representative combinatorial optimization problems, but also important for industrial applications; e.g., paper, wood,

glass, steel and leather industries, LSI and VLSI designing, newspaper paging. Among the numerous studies on cutting and packing problem, we denote practical algorithms for two-dimensional packing problem.

9. 室田一雄（杉原厚吉，杉原正顯編）：
“数理工学 最新ツアーガイド—応用から生まれつつある新しい数学，第２章「最適化の理論を創る：離散凸解析」”, 日本評論社, 2008（刊行予定）.
概要: 離散凸解析の基本的な成果を平易に簡潔に解説した．とりあげたテーマは，(i) L 凸関数と M 凸関数という二つの概念の自然な導入，(ii) 最適性の証拠の観点から見た扱いやすい問題と難しい問題の区別，(iii) 双対性における離散構造の精緻さ，などである．組合せ最適化の例として，最長片道切符の話題を取り上げるなどして，初学者にも親しみやすくなるように工夫した．

学術論文

1. Kokichi Sugihara:
“Hyperpolygons Generated by the Invertible Minkowski Sum of Polygons”, Pattern Recognition Letters, Vol. 25, pp. 551–560, 2004 年.
概要: The paper gives a new formulation of the Minkowski sum of polygons. In the conventional Minkowski sum, the inverse operation is not well defined unless the polygons are restricted to be convex. In the proposed formulation, on the other hand, the set of polygons is extended to the set of “hyperpolygons” and the Minkowski sum forms a commutative group. Consequently, every polygon has its unique inverse, and the sum and the inverse operations can be taken freely. An example of a physical interpretation of the hyperpolygon is also given.

2. Kokichi Sugihara:
“Mathematics of Pictures of Impossible Objects: Human Vision vs. Robot Vision”, SUGAKU EXPOSITIONS, Vol. 17, No. 125, pp. 37–49, 2004 年.
概要: This paper presents a mathematical method for interpreting line drawings as polyhedral objects, and compares it with human visual perception. One of the greatest differences between machine perception and human perception is that the machine perception recognizes inconsistency strictly while the human perception sometimes reject correct pictures according to predusice. Because of this difference, there are some pictures which are called “impossible objects” although the objects are actually reconstructible from the picture.

3. Kokichi Sugihara, Masayoshi Sawai, Hiroaki Sano, Deok-Soo Kim, Donguk Kim:
“Disk Packing for the Estimation of the Size of a Wire Bundle”, Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics, Vol. 21, No. 3, pp. 259–278, 2004 年.
概要: A heuristic method for packing disks in a circle is constructed, and is applied to the estimation of the sizes of holes through which given sets of electric wires are to pass. Modern intelligent machines such as planes and cars have a variety of electric systems, and consequently a lot of electric wires run in a complicated way. These wires should pass through holes opened in the walls of the body of a machine. Those wholes should be as small as possible because larger holes weaken the body. The problem of finding the smallest hole is reduced to the problem of finding the smallest circle containing all of given disks without overlap. In the proposed method, a sufficiently large circle is initially constructed, and it is shrunk step by step while keeping all the disks inside. For this purpose a Voronoi diagram for circles is used. Computational experiments show the validity and the efficiency of the method.

4. 藤村光，杉原厚吉:
“優勢領域に基づいたスポーツチームワークの定量的評価”，電子情報通信学会論文誌, Vol. J87-D-II, No. 3, pp. 818–828, 2004 年.
概要: 本研究では，選手が特定のフィールド上を自由に動き回り，目標に対して競い合うチームスポーツを対象にして，チームワークの定量的評価を行う．この種のスポーツでは，各選手が支配するフィールドを把握することがチームワーク評価への道となる．そのため，フィールドを支配関係によって分割する優勢領域図の概念を応用し，それによるチームワークの定量的評価手法を提案する．また本研究においてはこの優勢領域図の作成にあたって，実験に基づいたより現実的な運動モデルを採用している．

5. 神田毅, 杉原厚吉, 森本康彦:
“幾何アルゴリズム加速のための混合演算に関する研究”，日本応用数理学会論文誌, Vol. 14, No. 2, pp. 117–150, 2004 年.
概要: A widely used strategy to decrease the execution time of robust geometric algorithms using multiprecision integer arithmetic is the hybrid use of integer and floating-point arithmetic. In this strategy, multiprecision integer arithmetic is avoided if the sign decision in floating-point arithmetic used in advance is regarded as sufficiently reliable. It is important for this strategy to estimate the upper bound of the error calculated in floating-point arithmetic. However, the method of the estimation is not unique. The more tightly the error is estimated, the more frequently multiprecision integer arithmetic is avoided. However, a tight upper bound requires high computational cost. This paper investigates how the suitable estimation varies as the type and the scale of inputs vary. Experimental consideration is done using the incremental method for constructing the Voronoi diagram as an example of the geometric algorithm.

6. 室谷浩平, 杉原厚吉:
“大域的滑らかさを優先した標高データからの地形復元法の提案”，GIS-理論と応用, Vol. 12, No. 1, pp. 1–13, 2004 年.
概要: The purpose of this research is to construct a surface (1) passing through all unorganized data points, (2) with G1-continuity and (3) with the minimum square-sum of the principal curvatures ${\kappa_1}^2+{\kappa_2}^2$ over the surface. In order to construct surfaces with these three characteristics, we construct the triangular mesh spanning the data points, cover it with Bezier patches, achieve continuity between patches, and minimize the curvature to prevent the surfaces from having flat places and unnecessary undulations. The performance of the proposed method is evaluated by computational experiments using actual land height data.

7. Akira Fujimura, Kokichi Sugihara:
“Geometric Analysis and Quantitative Evaluation of Sport Teamwork”, International Symposium on Voronoi Diagrams in Science and Engineering, pp. 37–48, 2004 年 9 月.
概要: A quantitative method for evaluating sport teamwork is proposed. The sports considered here are team sports in which players can move freely in the field, and two teams compete against each other. For this kind of sports, each player's dominant region plays an important role to evaluate the teamwork. Therefore, here we propose some approaches to quantitative evaluation based on the concept of a generalized Voronoi diagram that divides space into dominant regions. We also construct a more realistic model of player's motion model based on experiments, and apply it to the evaluation.

8. Hisamoto Hiyoshi, Kokichi Sugihara:
“Improving the Global Continuity of the Natural Neighbor Interpolation”, Com-

putational Science and Its Applications-ICCSA-2004 (Lecture Notes in Computer Science), no. 3045, pp. 71–80, 2004年5月.
概要: The natural neighbor interpolation is a potential interpolation method for multidimensional data. However, only globally C^1 interpolants have been known so far. This paper proposes a globally C^2 interpolant, and write it in an explicit form. When the data are supplied to the interpolant from a third-degree polynomial, the interpolant can reproduce that polynomial exactly. The idea used to derive the interpolant is applicable to obtain a globally C^k interpolant for an arbitrary non-negative integer k. Hence, this paper gets rid of the continuity limitation of the natural neighbor interpolation, and thus leads it to a new research stage.

9. Deok-Soo Kim, Byunghoon Lee, Cheol Hyung Cho, Kokichi Sugihara:
"Plane-Sweep Algorithm of O(nlogn) for the Inclusion Hierarchy among Circles", Computational Science and Its Applications-ICCSA-2004 (Lecture Notes in Computer Science), no. 3045, pp. 53–61, 2004年5月.
概要: Suppose that we have a number of circles in a plane and some of them may contain some others. Then, finding the hierarchy among circles is of important for various applications such as the simulation of emulsion. In this paper, we present a plane-sweep algorithm which can identify the inclusion relationship among the circles in $O(n \log n)$ time in the worst-case. The algorithm uses a number of sweep-lines and a red-black tree for the efficient computation.

10. Shiro Matsuura, Kokichi Sugihara:
"Use of Discrete Topology for the Construction of Generalized Voronoi Diagrams", International Symposium on Voronoi Diagrams in Science and Engineering, pp. 153–163, 2004年9月.
概要: This paper presents a new scheme for robust computation of generalized Voronoi diagrams, in which the robustness is guaranteed on the basis of topological consistency. The topology-based approach is one of the most successful principles for designing robust algorithms to solve geometric problems, which the author's group has been developed for a long time. This approach generates efficient algorithms because the floating-point arithmetic can be used, but is not a beginners' technique because topological invariants for individual problems are required in the design of the algorithms. The new scheme presented here uses discrete topology obtained from a digital-picture approximation of the Voronoi diagram. Hence, deep insight is not necessary to extract individual invariants. The basic idea together with its application to wire bundling is presented.

11. Masaki Moriguchi, Kokichi Sugihara:
"Isotropic and Feature-Preserving Mesh Simplification Based on Constrained Centroidal Voronoi Diagrams", International Symposium on Voronoi Diagrams in Science and Engineering, pp. 83–93, 2004年9月.
概要: We propose an efficient method for simplifying triangular meshes to isotropic and feature-preserved meshes. We first construct the constrained centroidal Voronoi diagram on the surface by using the Lloyd iteration method, and then we make the dual graph of it, i.e. the Delaunay triangulation, to obtain a simplified mesh. The constrained centroidal Voronoi diagram, whose centroids are constrained to the surface, is an extension of the 2D centroidal Voronoi diagram to surfaces in higher dimensions. By the nature of the centroidal Voronoi diagram, simplified meshes are highly isotropic; non-uniform mesh sim-

plification (such as curvature-adapted one) can also be done by defining an appropriate density function over the surface. The distance is measured by the usual Euclidean distance, rather than the geodesic distance, and the constrained centroid is simply the closest point on the surface to the unconstrained centroid. This property makes it easier to construct the constrained centroidal Voronoi diagram. Finally further constraining some centroids to the surface features (sharp edges, user-defined edges, boundary edges, etc.), we could achieve feature-preserving mesh simplification.

12. Kohei Murotani, Kokichi Sugihara:
"Watermarking 3d Polygonal Meshes Using Generalized Singular Spectrum Analysis", NICOGRAPH International Conference 2004, pp. 121–126, 2004年.
概要: This paper presents a generalization of the singular spectrum analysis (SSA) and applies it to the construction of a new robust watermarking method that adds a watermark to a 3D polygonal mesh in the spectral domain. The basic SSA is a fundamental tool for analyzing one-dimensional sequence such as time series, and is not suitable for multi-dimensional data. In order to overcome this difficulty, we generalize the basic SSA in such a way that it can be used for the 3D polygonal meshes. Watermarks embedded by this method are resistant to similarity transformations and random noises.

13. Tetsushi Nishida, Kokichi Sugihara:
"Extended Fast Marching Method for the Boat-Sail Distance and Its Applications", Mathematical Aspects of Image Processing and Computer Vision 2004, 2004年11月.
概要: In this talk, we introduce a boat-sail distance. Suppose that we want to travel on the surface of water with a boat. If there is no flow of water, the boat can move in any direction at the same maximum speed. If the water flows, on the other hand, the speed of the boat is anisotropic; the boat can move faster in the same direction as the flow, while it move only slowly in the direction opposite to the flow direction. Thus, a boat-sail distance is defined as the smallest time necessary for the boat to move from one point to another. According to this distance, the surface of water is partitioned into regions. This partition is called a boat-sail Voronoi diagram.

14. Tetsushi Nishida, Kokichi Sugihara:
"Approximation of the Boat-Sail Voronoi Diagram and Its Application", International Symposium on Voronoi Diagrams in Science and Engineering, pp. 63–72, 2004年9月.
概要: A new generalized Voronoi diagram, called a boat-sail Voronoi diagram, is defined on the basis of the time necessary for a boat to reach on water surface with flow. The problem of computing this Voronoi diagram is reduced to a boundary value problem of a partial differential equation, and a numerical method for solving this problem is constructed. The method is a modification of a so-called fast marching method originally proposed for the eikonal equation. Computational experiments show the efficiency and the stableness of the proposal method. We also apply our equation to the simulation of the forest fire.

15. Tetsushi Nishida, Kokichi Sugihara:
"Boat-Sail Voronoi Diagram on a Curved Surface", International Symposium on Voronoi Diagrams in Science and Engineering, pp. 63–72, 2004年9月.
概要: We propose a new generalized Voronoi diagram, called a "boat-sail Voronoi diagram on a curved surface". This is an extention of the boat-sail Voronoi diagram. The boat-sail Voronoi diagram is

the partition of a two-dimensional plane, on the basis of the boat-sail distance. On the other hand, our new Voronoi diagram subdivides the curbed surface with flow into the regions. In this paper, we derive a partial differential equation to solve the boat-sail Voronoi diagram on a curved surface and show some numerical examples.

16. Kokichi Sugihara:
"Robust Geometric Computation Based on Digital Topology", Proceedings of the 10th International Computing and Combinatorics Conference (Computing and Combinatorics, Lecture Notes in Computer Science), No. 3106, pp. 3–12, 2004年8月.
概要: This paper present a new scheme for designing numerically robust geometric algorithms based on topological consistency. The topology-based approach is one of the most successful principle for designing robust algorithms to solve geometric problems, which the author's group has been developed for a long time. This approach generates efficient algorithms because the floating-point arithmetic can be used, but is not a beginners' technique because topological invariants for individual problems are required in the design of the algorithms. The new scheme presented here uses digital topology instead of individual invariants, and hence will change the topology-based approach from a middle-level technique to a beginners' level technique. The basic idea together with its application to wire bundling is presented.

17. Kokichi Sugihara:
"Realization of Impossible Objects and a New Type of Visual Illusion", Mathematical Aspects of Image Processing and Computer Vision 2004, 2004年11月.
概要: There is a class of line drawings called "pictures of impossible objects", which give us some impression of three-dimensional solid objects but at the same time give us impression that such objects cannot be realized. These pictures are familiar in the sense that famous artists such as Escher used these pictures for their artwork. It is usually believed that the solid structures represented in these pictures cannot be realized as three-dimensional objects. However, some of pictures of impossible objects actually represent three-dimensional solid objects. Those pictures can be identified by the theory of interpretation of line drawing, which has a long history in computer vision. In this talk we focus on the way of reducing the realizability of objects to the feasibility of linear constraints, together with some combinatorial aspects of the problem in order to reduce the time complexity as well as to circumvent numerical instability.

18. K. Murota, A. Shioura:
"Conjugacy relationship between M-convex and L-convex functions in continuous variables", Mathematical Programming, A101, No. 3, pp. 415–433, 2004年12月.
概要: By extracting combinatorial structures in well-solved nonlinear combinatorial optimization problems, Murota (1996,1998) introduced the concepts of M-convexity and L-convexity to functions defined over the integer lattice. Recently, Murota–Shioura (2000, 2001) extended these concepts to polyhedral convex functions and quadratic functions in continuous variables. In this paper, we consider a further extension to more general convex functions defined over the real space, and provide a proof for the conjugacy relationship between general M-convex and L-convex functions.

19. Tomomi Matsui, Yasuko Matsui, Yoko Ono:
"Random Generation of $2 \times 2 \times \cdots \times 2 \times J$ Contingency Tables", Theoretical Computer Science, Vol. 326, pp. 117–135, 2004.
概要: We propose two Markov chains for

sampling $(m+1)$-dimensional contingency tables indexed by $\{1,2\}^m \times \{1,2,\ldots,n\}$. Stationary distributions of our chains are the uniform distribution and a conditional multinomial distribution (which is equivalent to the hypergeometric distribution if $m = 1$). Mixing times of our chains are bounded by $(1/2)n(n-1)\ln(N/(2^m\varepsilon)) = (1/2)n(n-1)\ln(dn/\varepsilon)$, where d is the average of the values in the cells and ε is a given error bound. We use the path coupling method for estimating the mixing times of our chains and showed that our chains mix rapidly.

20. Ryuhei Miyashiro, Tomomi Matsui:
"A Polynomial Time Algorithm to Find an Equitable Home-away Assignment", Operations Research Letters, Vol. 33, pp. 235–241, 2004.
概要: We propose a polynomial time algorithm to find an equitable home-away assignment for a given timetable of a round-robin tournament. Our results give an answer to a problem raised by Elf, Jünger and Rinaldi which concerns the computational complexity of the break minimization problem in sports timetabling.

21. Shuji Kijima, Tomomi Matsui:
"Approximate Counting Scheme for mxn Contingency Tables", IEICE Transactions on Information and Systems, E87–D, pp. 308–314, 2004.
概要: In this paper, we propose a new counting scheme for $m \times n$ contingency tables. Our scheme is a modification of Dyer and Greenhill's scheme for two rowed contingency tables. We can estimate not only the sizes of error, but also the sizes of the bias of the number of tables obtained by our scheme, on the assumption that we have an approximate sampler.

22. Yuichiro Miyamoto, Tomomi Matsui:
"Linear Time Approximation Algorithm for Multicoloring Lattice Graphs with Diagonals", Journal of Operations Research Society of Japan, Vol. 47, pp. 123–128, 2004.
概要: Let P be a subset of 2-dimensional integer lattice points $P = \{1,2,\ldots,m\} \times \{1,2,\ldots,n\} \subseteq \mathrm{Z}^2$. We consider the graph G_P with vertex set P satisfying that two vertices in P are adjacent if and only if Euclidean distance between the pair is less than or equal to $\sqrt{2}$. Given a non-negative vertex weight vector $\boldsymbol{w} \in \mathrm{Z}_+^P$, a multicoloring of $(G_P, \boldsymbol{w})$ is an assignment of colors to P such that each vertex $v \in P$ admits $w(v)$ colors and every adjacent pair of two vertices does not share a common color. We show the NP-completeness of the problem to determine the existence of a multicoloring of $(G_P, \boldsymbol{w})$ with strictly less than $(4/3)\omega$ colors where ω denotes the weight of a maximum weight clique. We also propose an $\mathrm{O}(mn)$ time approximation algorithm for multicoloring $(G_P, \boldsymbol{w})$. Our algorithm finds a multicoloring with at most $(4/3)\omega+4$ colors Our algorithm based on the property that when $n = 3$, we can find a multicoloring of $(G_P, \boldsymbol{w})$ with ω colors easily, since an undirected graph associated with $(G_P, \boldsymbol{w})$ becomes a perfect graph.

23. S. Iwata and N. Zuiki:
"A network flow approach to cost allocation in rooted trees", Networks, Vol. 44, pp. 297–301, 2004.
概要: In the game theory approach to cost allocation, the main computational issue is an algorithm for finding solutions such as the Shapley value and the nucleolus. In this paper, we consider the problem of allocating the maintenance cost of a tree network that connects the supply source at the root to the users at the leaves. We show that the core of the game can be expressed in terms of network flows. Based on this observation, we present $O(n \log n)$ algorithms for computing the nucleolus and the egali-

tarian allocation.

24. Y. Oishi:
"Implementation of a randomized algorithm for solving parameter-dependent linear matrix inequalities", Proceedings of the 2004 IEEE Conference on Control Applications, pp. 1183–1188, September 2004.
概要: Difficulties and their fundamental resolutions are presented on a randomized algorithm for solving a parameterdependent linear matrix inequality. This algorithm in its original form has the following difficulties: (i) Appropriate choice of a step-size parameter or an initial ellipsoid is difficult; (ii) Detection of convergence is difficult; (iii) The expected number of necessary iterations is infinite. This paper resolves these difficulties by introducing a stopping rule into the algorithm. The resulting algorithm always stops in a bounded number of iterations and this bound is of polynomial order in the problem size. When the algorithm stops, it either gives a probabilistic solution with high confidence or detects that there is no deterministic solution in an approximated sense. The algorithm can be adapted for finding an optimal solution of a parameter-dependent linear matrix inequality. Usefulness of the proposed algorithm is illustrated by a numerical example.

25. T. Nishida and K. Sugihara:
"Approximation of the Boat-sail Voronoi Diagram and Its Application", Proceedings of the 4th International Conference on Computational Science and Its Applications (ICCSA 2004), Lecture Notes in Computer Science, no. 3045, Springer, pp. 227–236, 2004.
概要: A new generalized Voronoi diagram, called a boat-sail Voronoi diagram, is defined on the basis of the time necessary for a boat to reach on water surface with flow. The problem of computing this Voronoi diagram is reduced to a boundary value problem of a partial differential equation, and a numerical method for solving this problem is constructed. The method is a modification of a so-called fast marching method originally proposed for the eikonal equation. Computational experiments show the efficiency and the stableness of the proposal method. We also apply our equation to the simulation of the forest fire.

26. Tetsushi Nishida and Kokichi Sugihara:
"Boat-Sail Voronoi Diagram and Its Computation Based on a Cone-Approximation Scheme", Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics, Vol. 22, No. 3, pp. 367-383, 2005.
概要: A new concept called a boat-sail distance is introduced on the surface of water with flow, and it is used to define a generalized Voronoi diagram, in such a way that the water surface is partitioned into regions belonging to the nearest harbors with respect to this distance. The problem of computing this Voronoi diagram is reduced to a boundary value problem of a partial differential equation, and a numerical method for solving this problem is constructed. The method is a modification of a so-called fast marching method originally proposed for the eikonal equation. Computational experiments show the efficiency and the stableness of the proposed method.

27. Tetsushi Nishida and Kokichi Sugihara:
"Boat-Sail Voronoi Diagram on a Curved Surface", Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics, Vol. 22, No. 2, pp. 267-278, 2005.
概要: We propose a new generalized Voronoi diagram, called a "boat-sail Voronoi diagram on a curved surface". This is an extension of the boat-sail Voronoi diagram. The boat-sail Voronoi diagram is the partition of a two-dimensional flow field

according to the shortest arrival time of a boat. On the other hand, our new Voronoi diagram subdivides the curbed surface with flow into the regions. In this paper, we derive a partial differential equation to solve the boat-sail Voronoi diagram on a curved surface and show some numerical examples.

28. Takeshi Kanda and Kokichi Sugihara:
"Two-dimensional Range Search Based on the Voronoi Diagram", International Journal of Computational Geometry and Applications, Vol. 15, No. 2, pp. 151-166, 2005.
概要: This paper studies the two-dimensional range search problem, and constructs a simple and efficient algorithm based on the Voronoi diagram. In this problem, a set of points and a query range are given, and we want to enumerate all the points which are inside the query range as quickly as possible. In most of the previous researches on this problem, the shape of the query range is restricted to particular ones such as circles, rectangles and triangles, and the improvement on the worst-case performance has been pursued. On the other hand, the algorithm proposed in this paper is designed for a general shape of the query range in the two-dimensional space, and is intended to accomplish a good average-case performance. This performance is actually observed by numerical experiments. In these experiments, we compare the execution time of the proposed algorithm with those of other representative algorithms such as those based on the bucketing technique and the k-d tree. We can observe that our algorithm shows the better performance in almost all the cases.

29. Shiro Matuura and Kokichi Sugihara:
"Robust Construction of Sphere Voronoi Diagrams Using Digital Topology", Proceedings of the 2nd International Symposium on Voronoi Diagrams in Science and Engineering, pp. 125-133, 2005.
概要: This paper proposes the use of digital topology for constructing the sphere Voronoi diagram in a robust manner. This is a new version of the topology-oriented method. While the previous version requires a general description of the topological invariants, the proposed version uses topological structures that are automatically extracted from the digital approximation of geometric objects. So the implementation is simple and the resulting software runs fast, although the output is an approximation of the true Voronoi diagram.

30. Donguk Kim, Deok-Soo Kim and Kokichi Sugihara:
"Euclidean Voronoi Diagram for Circles in a Circle", International Journal of Computational Geometry and Applications, Vol. 15, No. 2, 209-228, 2005.
概要: Presented in this paper is an algorithm to compute a Euclidean Voronoi diagram for circles contained in a large circle. The radii of circles are not necessarily equal and no circle inside the large circle wholly contains another circle. The proposed algorithm uses the ordinary point Voronoi diagram for the centers of inner circles as a seed. Then, we apply a series of edge-flip operations to the seed topology to obtain the correct topology for the desired one. Lastly, the equations of edges are represented in a rational quadratic Bézier curve form.

31. Kohei Murotani and Kokichi Sugihara:
"New Spectral Decomposition Method for Three-dimensional Shape Models and Its Applications", Journal of Computing and Information Science in Engineering, Vol. 55, pp. 277-282, 2005.
概要: This paper presents a generalization of a data analysis technique called a singular

spectrum analysis (SSA). The original SSA is a tool for analyzing one-dimensional data such as time series, whereas the generalization presented in this paper is suitable for multi-dimensional data such as 3D polygonal meshes. The basic idea is to generalize the autocorrelation matrix so as to represent mutual relations of multi-dimensional data flexibly. Two applications of the proposed generalization are also shown briefly.

32. 谷口隆晴, 杉原厚吉:
"空間多次元 Navier-Stokes 方程式に対する無反射境界条件", ながれ, Vol. 24, No. 1, pp. 81-91, 2005.
概要: 空力学の諸問題を扱った数値シミュレーションにおいては，広大な現実の空間に比べ計算機の中で扱うことのできる領域は高々有限であるため，計算対象となる空間の打ち切りが必要となる．このとき，打ち切られた断面という人工的な境界が生じてしまうが，そのような人工的な境界上で特別な取り扱いをしなければ，現実的な解を得ることはできない．そこで，無反射境界条件，すなわち，人工的な境界上で反射が起こらないようにするための境界条件の設定が重要となる．無反射境界条件は既にいくつか提案されているが，特に Poinsot-Lele の境界条件は現在広く利用されている手法のひとつである．しかし，Poinsot-Lele の手法の基礎となった Thompson の境界条件においては，波が境界に対して垂直に入射する，という仮定がおかれており，この点の改善が望まれていた．本論文ではこの要望に答える．すなわち，数値計算時のデータを利用することによって，流れの向きに対する仮定をおかない Euler 方程式に対する無反射境界条件を提案し，その Navier-Stokes 方程式への拡張法について述べる．

33. Takaharu Yaguchi and Kokichi Sugihara:
"A New Characteristic Nonreflecting Boundary Condition for the Multidimensional Navier-Stokes Equations", AIAA Paper, pp. 2005-2868, 2005.
概要: A characteristic nonreflecting boundary condition for the Navier-Stokes equations is described. Because the computational resources are finite, one needs to truncate the computational domain when he/she simulates a physical problem. This truncation gives rise to non-physical artificial boundaries and one cannot obtain proper solutions without appropriate boundary conditions on such boundaries. Practically nonreflecting boundary conditions, which are boundary conditions that prevent the generation of reflections, are of great importance. One of the most popular methods for the Navier-Stokes equations right now is the PionsotLele boundary condition. Their boundary condition is based on Thompson 's boundary condition for the Euler equations, which is, however, theoretically one-dimensional, and hence is valid only when the flow is perpendicular to the boundary. Here we propose a boundary condition for the Euler equations which does not have the assumption for the direction of the flow. We also discuss its extension to the Navier-Stokes equations. Our basic idea is to estimate the direction of the flow from numerical data. Assuming that there are only simple waves, we derived a form of the ordinary differential system of the characteristic curves for the multi-dimensional Euler equations. By using this form we can apply flux vector splitting and calculate the velocity of each wave packet numerically.

34. Takaharu Yaguchi and Kokichi Sugihara:
"A New Characteristic Nonreflecting Boundary Condition for the Multidimensional Navier-Stokes Equations", AIAA Paper, pp. 2005-2868, 2005.
概要: A characteristic nonreflecting boundary condition for the Navier-Stokes equations is described. Because the computational resources are finite, one needs

to truncate the computational domain when he/she simulates a physical problem. This truncation gives rise to non-physical artificial boundaries and one cannot obtain proper solutions without appropriate boundary conditions on such boundaries. Practically nonreflecting boundary conditions, which are boundary conditions that prevent the generation of reflections, are of great importance. One of the most popular methods for the Navier-Stokes equations right now is the PionsotLele boundary condition. Their boundary condition is based on Thompson 's boundary condition for the Euler equations, which is, however, theoretically one-dimensional, and hence is valid only when the flow is perpendicular to the boundary. Here we propose a boundary condition for the Euler equations which does not have the assumption for the direction of the flow. We also discuss its extension to the Navier-Stokes equations. Our basic idea is to estimate the direction of the flow from numerical data. Assuming that there are only simple waves, we derived a form of the ordinary differential system of the characteristic curves for the multi-dimensional Euler equations. By using this form we can apply flux vector splitting and calculate the velocity of each wave packet numerically.

35. Kohei Murotani and Kokichi Sugihara:
"New Spectral Decomposition for 3D Polygonal Meshes and Its Application to watermarking", 13th International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision 2005, 2005.
概要: This paper present a generalization of a data analysis technique called a singular spectrum analysis (SSA). The original SSA is a tool for analyzing one-dimensional data such as time series, whereas our generalization is suitable for multi-dimensional data such as 3D polygonal meshes. One of applications of the proposed generalization are also shown. The application of the generalized SSA is a new robust watermarking method that adds a watermark to a 3D polygonal mesh. Watermarks embedded by our method are resistant to similarity transformations and random noises. Our method has the advantage in that it requires smaller calculation cost than other methods with nearly equal performance.

36. Hiroshi Kawaharada and Kokichi Sugihara:
"Line Subdivision", Mathematics of Surfaces XI, Lecture Notes in Computer Science (Proceedings of 11th IMA International Conference), No. 3604, pp. 240-254, 2005.
概要: This paper proposes a new subdivision scheme based on line geometry. We name the scheme "line subdivision". Line subdivision scheme acts on the line space, and generates two-dimensional manifolds contained in the Klein quadric. The two-dimensional manifolds are the Klein images of line congruences in P^3. So, this new subdivision scheme generates line congruences at the limit. Here, we define the line subdivision surface as an envelope surface which is made by the line congruence. Then, this paper derives basic properties of the surface. Moreover, we show that line subdivision contains ordinary subdivision and dual subdivision.

37. K. Murota:
"M-convex functions on jump systems: Generalization of minsquare factor problem", The 4th Japanese-Hungarian Symposium on Discrete Mathematics and Its Applications, pp. 217–223, 2005年4月.
概要: The concept of M-convex functions is generalized for functions defined on constant-parity jump systems. Such function arises from minimum weight perfect

b-matchings and from a separable convex function (sum of univariate convex functions) on the degree sequences of an undirected graph. As a generalization of a recent result of Apollonio and Sebő for the minsquare factor problem, a local optimality criterion is given for minimization of an M-convex function subject to a component sum constraint. The proposed framework leads to a polynomial-time algorithm for an edge-weighted extension of the minsquare factor problem.

38. S. Iwata, S. Moriguchi, K. Murota:
"A capacity scaling algorithm for M-convex submodular flow", Mathematical Programming, 103, No.1, pp. 181–202, 2005 年 5 月.
概要: This paper presents a faster algorithm for the M-convex submodular flow problem, which is a generalization of the minimum-cost flow problem with an M-convex cost function for the flow-boundary, where an M-convex function is a nonlinear nonseparable discrete convex function on integer points. The algorithm extends the capacity scaling approach for the submodular flow problem by Fleischer, Iwata and McCormick (2002) with the aid of a novel technique of changing the potential by solving maximum submodular flow problems.

39. S. Moriguchi, K. Murota:
"Discrete Hessian matrix for L-convex functions", IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, E88-A, pp. 1104–1108, 2005 年.
概要: L-convex functions are nonlinear discrete functions on integer points that are computationally tractable in optimization. In this paper, a discrete Hessian matrix and a local quadratic expansion are defined for L-convex functions. We characterize L-convex functions in terms of the discrete Hessian matrix and the local quadratic expansion.

40. T. Iimura, K. Murota, A. Tamura:
"Discrete fixed point theorem reconsidered", Journal of Mathematical Economics, Vol. 41, No. 8, pp. 1030–1036, 2005 年.
概要: The aim of this note is to indicate an example that demonstrates the incorrectness of Iimura's discrete fixed point theorem [J. Mathematical Economics, 39 (2003) 725] and to present a corrected statement using the concept of integrally convex sets.

41. K. Murota, A. Shioura:
"Substitutes and complements in network flows viewed as discrete convexity", Discrete Optimization, Vol. 2, pp. 256–268, 2005 年.
概要: We study combinatorial properties of the optimal value function of the network flow problem. It is shown by Gale–Politof (1981) that the optimal value function has submodularity and supermodularity w.r.t. problem parameters such as weights and capacities. In this paper we shed a new light on this result from the viewpoint of discrete convex analysis to point out that the submodularity and supermodularity are naturally implied by discrete convexity, called M-convexity and L-convexity, of the optimal value function.

42. K. Murota:
"Note on multimodularity and L-convexity", Mathematics of Operations Research, Vol. 30, No. 3, pp. 658–661, 2005 年 8 月.
概要: Multimodular functions and L-convex functions have been investigated almost independently, but they are, in fact, equivalent objects that can be related through a unimodular coordinate transformation. Some facts known for L-convex functions can be translated to new results for multimodular functions, and vice versa. In particular, the local

optimality condition for global optimality found in the literature of multimodular functions should be rectified, and a discrete separation theorem holds for multimodular functions.

43. Ryuhei Miyashiro and Tomomi Matsui:
"A Polynomial Time Algorithm to Find an Equitable Home-away Assignment", Operations Research Letters, Vol. 33, No. 3, pp. 235–241, May, 2005.
概要: We propose a polynomial time algorithm to find an equitable home-away assignment for a given timetable of a roundrobin tournament. Our results give an answer to a problem raised by Elf, Jünger and Rinaldi (Operations Research Letters 31 (2003) 343–349), which concerns the computational complexity of the break minimization problem in sports timetabling.

44. J. F. Geelen and S. Iwata:
"Matroid matching via mixed skew-symmetric matrices", Combinatorica, Vol. 25, pp. 187–215, 2005.
概要: Tutte associates a V by V skew-symmetric matrix T, having indeterminate entries, with a graph $G = (V, E)$. This matrix, called the Tutte matrix, has rank exactly twice the size of a maximum matching of G. Thus, to find the size of a maximum matching it suffices to compute the rank of T. We consider the more general problem of computing the rank of $T + K$ where K is a real V by V skew-symmetric matrix. This modest generalization of the matching problem contains the linear matroid matching problem and, more generally, the linear delta-matroid parity problem. We present a tight upper bound on the rank of $T + K$ by decomposing $T + K$ into a sum of matrices whose ranks are easy to compute.

45. S. Iwata, S. T. McCormick, and M. Shigeno:
"A strongly polynomial cut canceling algorithm for submodular flow", SIAM Journal on Discrete Mathematics, Vol. 19, pp. 304–320, 2005.
概要: This paper presents a new strongly polynomial cut canceling algorithm for minimum cost submodular flow. The algorithm is a generalization of our similar cut canceling algorithm for ordinary min-cost flow. The algorithm scales a relaxed optimality parameter and creates a seconf, inner relaxation that is a kind of submodular max flow problem. The outer relaxation uses a novel technique for relaxing the submodular constraints that allows our previous proof techiniques to work. The algorithm uses the min cuts from the max flow subproblem as the relaxed most positive cuts it chooses to cancel. We show that this algorithm needs to cancel only $O(n^3)$ cuts per scaling phase, where n is the number of nodes. Furthermore, we show how to slightly modify this algorithm to get a strongly polynomial running time. Finally, we briefly show how to extend this algorithm to the separable convex cost case and that the same technique can be used to construct a polynomial time maximum mean cut canceling algorithm for submodular flow.

46. S. Iwata, S. Moriguchi, and K. Murota:
"A faster capacity scaling algorithm for M-convex submodular flow", Mathematical Programming, Vol. 103, pp. 181–202, 2005.
概要: This paper presents a faster algorithm for the M-convex submodular flow problem, which is a generalization of the minimum-cost flow with an M-convex cost function for the flow-boundary, where an M-convex function is a nonlinear nonseparable discrete convex function on integer points. The algorithm extends the capacity scaling algorithm for the submodular flow problem by Fleischer, Iwata and McCormick (2002) with the aid of a novel technique of changing the potential by solving maximum submod-

ular flow problems.

47. 江本・大石:
"有理式で表される不確かさを持つ制御系の解析・設計法", 計測自動制御学会論文集, Vol. 41, No. 4, pp. 314–321, 2005 年 4 月.
概要: This paper provides a new point of view to the method of Masubuchi and Shimemura, which is useful for analysis and synthesis of uncertain control systems, and presents an improvement and an extension of the method. In particular, this paper shows some properties of a transformation used in this method and reformulates the transformation as a decomposition of a rational matrix function. Combination of this decomposition and a technique of matrix dilation clarifies how conservative the above method is and shows how this conservatism is attenuated. Furthermore, the proposed method is extended to a general parameter-dependent matrix inequality.

48. T. Ibaraki, S. Imahori, M. Kubo, T. Masuda, T. Uno, M. Yagiura:
"Effective Local Search Algorithms for Routing and Scheduling Problems with General Time Window Constraints", Transportation Science, Vol. 39, pp. 206–232, May 2005.
概要: We propose local search algorithms for the vehicle routing problem with soft time window constraints. The time window constraint for each customer is treated as a penalty function, which is very general in the sense that it can be non-convex and discontinuous as long as it is piecewise linear. The generality of time window constraints allows us to handle a wide variety of scheduling problems. As such an example, we mention in this paper an application to a production scheduling problem with inventory cost. In our algorithm, we use local search to assign customers to vehicles and to find orders of customers for vehicles to visit. It employs a new neighborhood, called the cyclic exchange neighborhood, in addition to standard neighborhoods for the vehicle routing problem. After fixing the order of customers for a vehicle to visit, we must determine the optimal start times of processing at customers so that the total penalty is minimized. We show that this problem can be efficiently solved by using dynamic programming, which is then incorporated in our algorithm. We also report computational results for various benchmark instances of the vehicle routing problem, as well as real world instances of a production scheduling problem.

49. S. Imahori, M. Yagiura, S. Umetani, S. Adachi, T. Ibaraki:
"Local Search Algorithms for the Two Dimensional Cutting Stock Problem with a Given Number of Different Patterns", in T. Ibaraki, K. Nonobe, M. Yagiura (eds.): Metaheuristics: Progress as Real Problem Solvers, Springer, pp. 181–202, May 2005.
概要: We consider the two-dimensional cutting stock problem that arises in many applications in industries. In recent industrial applications, it is argued that the setup cost for changing patterns becomes more dominant and it is impractical to use many different cutting patterns. Therefore, we consider the pattern restricted two-dimensional cutting stock problem, in which the total number of applications of cutting patterns is minimized while the number of different cutting patterns is given as a parameter n. For this problem, we develop local search algorithms. As the neighborhood size plays a crucial role in determining the efficiency of local search, we propose to use linear programming techniques for the purpose of restricting the number of solutions in the neighborhood. In this process, to generate a cutting pattern, it is required to place all the given products (rectangles) into the

stock sheet (two-dimensional area) without mutual overlap. For this purpose, we develop a heuristic algorithm using an existing rectangle packing algorithm with the sequence pair coding scheme. Finally, we generate random test instances of this problem and conduct computational experiments, to evaluate the effectiveness of the proposed algorithms.

50. S. Imahori, M. Yagiura, T. Ibaraki:
"Improved Local Search Algorithms for the Rectangle Packing Problem with General Spatial Costs", European Journal of Operational Research, Vol. 167, pp. 48–67, November 2005.
概要: The rectangle packing problem with general spatial costs is to pack given rectangles without overlap in the plane so that the maximum cost of the rectangles is minimized. This problem is very general, and various types of packing problems and scheduling problems can be formulated in this form. For this problem, we have previously presented local search algorithms using a pair of permutations of rectangles to represent a solution. In this paper, we propose speed-up techniques to evaluate solutions in various neighborhoods. Computational results for the rectangle packing problem and a real-world scheduling problem exhibit good prospects of the proposed techniques.

51. Yuichiro Miyamoto and Tomomi Matsui:
"Multicoloring Unit Disk Graphs on Triangular Lattice Points", SODA05, pp. 895–896, 2005年1月.
概要: We consider a subset of 2-dimensional triangular lattice points P. Let $T(d)$ be an undirected graph defined on vertex set P satisfying that two vertices are adjacent if and only if the Euclidean distance between the pair is less than or equal to d. This paper discusses a necessary and sufficient condition that $T(d)$ is perfect.

52. Yuichiro Miyamoto and Tomomi Matsui:
"Perfectness and Imperfectness of the kth Power of Lattice Graphs", The First International Conference on Algorithmic Applications in Management (Lecture Notes in Computer Science), No. 3521, pp. 233-242, 2005年6月.
概要: In this paper, we show necessary and sufficient conditions that the kth power of a lattice graph is perfect. The condition imply polynomial time approximation algorithms for multicoloring the kth power of a lattice graph.

53. Shuji Kijima and Tomomi Matsui:
"Rapidly Mixing Chain and Perfect Sampler for Logarithmic Separable Concave Distributions on Simplex", Proceedings of the 2005 International Conference on the Analysis of Algorithms, pp. 369–380, 2005年6月.
概要: In this paper, we are concerned with random sampling of an n dimensional integral point on an $n-1$ dimensional simplex according to a multivariate discrete distribution. We employ sampling via Markov chain and propose two" hit-and-run "chains, one is for approximate sampling and the other is for perfect sampling. We introduce an idea of alternating inequalities and show that a logarithmic separable concave function satisfies the alternating inequalities. If a probability function satisfies alternating inequalities, then our chain for approximate sampling mixes in $\mathrm{O}(n^2 \ln(K\varepsilon^{-1}))$, namely $(1/2)n(n-1)\ln(K\varepsilon^{-1})$, where K is the side length of the simplex and $\varepsilon (0 < \varepsilon < 1)$ is an error rate. On the same condition, we design another chain and a perfect sampler based on monotone CFTP (Coupling from the Past). We discuss a condition that the expected number of total transitions of the chain in the perfect sampler is bounded by

$O(n^3 \ln(Kn))$.

54. Ayami Suzuka, Ryuhei Miyashiro, Akiko Yoshise, Tomomi Matsui:
"Semidefinite Programming Based Approaches to Home-away Assignment Problems in Sports Scheduling", The First International Conference on Algorithmic Applications in Management (Lecture Notes in Computer Science), No. 3521, pp. 95–103, 2005年6月.
概要: For a given schedule of a roundrobin tournament and a matrix of distances between homes of teams, an optimal home-away assignment problem is to find a home-away assignment that minimizes the total traveling distance. We propose a technique to transform the problem to MIN RES CUT. We apply Goemans and Williamson's 0.878-approximation algorithm for MAX RES CUT, which is based on a positive semidefinite programming relaxation, to the obtained MIN RES CUT instances. Computational experiments show that our approach quickly generates solutions of good approximation ratios.

55. Shuji Kijima and Tomomi Matsui:
"Approximate/Perfect Aamplers for Closed Jackson Networks", The 2005 Winter Simulation Conference, pp. 862–868, 2005年12月.
概要: In this paper, we propose two samplers for the product-form solution of basic queuing networks, closed Jackson networks with multiple servers. Our approach is sampling via Markov chain, but it is NOT a simulation of behavior of customers in queuing networks. We propose two of new ergodic Markov chains both of which have a unique stationary distribution that is the product form solution of closed Jackson networks. One of them is for approximate sampling, and we show it mixes rapidly. To our knowledge, this is the first approximate polynomial-time sampler for closed Jackson networks with multiple servers. The other is for perfect sampling based on monotone CFTP (coupling from the past) algorithm proposed by Propp and Wilson, and we show the monotonicity of the chain.

56. Masashi Kiyomi, Takeaki Uno and Tomomi Matsui:
"Efficient Algorithms for the Electric Power Transaction Problem", Internet and Network Economics: First International Workshop (Lecture Notes in Computer Science), No. 3828, pp. 602–611, 2005年12月.
概要: . We present two efficient algorithms for solving the electric power transaction problem. The electric power transaction problem appears when maximizing the social benefit on electric power transactions among some private companies. The problem is a special case of the minimum cost flow problem defined on a network with many leaves, where each leaf corresponds to a (private) company who wants to sell or buy electric power. Our first algorithm is based on the minimum mean cycle canceling algorithm and the second algorithm uses a linear time median finding algorithm. The first algorithm finds an optimal solution in $O(n \log nk^5 \log(kC))$ time where n is the number of leaves, k is the number of nonleaf vertices and C is the highest electric power price per unit that companies may offer. The time complexity of the second algorithm is bounded by $O((n + k^3)2^k k!)$ time, which is linear in n. In many practical instances, k is small and n is very large, hence these algorithms solve the problem more efficiently than the ordinary network flow algorithms.

57. Donguk Kim, Deok-Soo Kim and Kokichi Sugihara:
"Apollonius Tenth Problem via Radius Adjustment and Möbius Transformation",

Computer-Aided Design, Vol. 38, 14-21, 2006.

概要: The Apollonius Tenth Problem, as defined by Apollonius of Perga circa 200 B.C., has been useful for various applications in addition to its theoretical interest. Even though particular cases have been handled previously, a general framework for the problem has never been reported. Presented in this paper is a theory to handle the Apollonius Tenth Problem by characterizing the spatial relationship among given circles and the desired Apollonius circles. Hence, the given three circles in this paper do not make any assumption regarding on the sizes of circles and intersection/inclusion relationship among them. The observations made provide an easy-to-code algorithm to compute any desired Apollonius circle which is computationally efficient and robust.

58. Hiroshi Kawaharada and Kokichi Sugihara: "Dual Subdivision", 14th International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision 2006, Vol. E-53, 2006.

概要: This paper proposes a new class of subdivision schemes. Previous subdivision processes are described by the movement and generation of vertices, and the faces are specified indirectly as polygons defined by those vertices. In the proposed scheme, on the other hand, the subdivision process is described by the generation of faces, and the vertices are specified indirectly as the intersections of these faces. In this sense, this paper gives a framework for a wide class of new subdivision methods. In short, the new subdivision is a dual framework of an ordinary subdivision based on the principle of duality in projective geometry. So, the new subdivision scheme inherits various properties of the ordinary subdivision schemes. In this paper, we define the dual subdivision and derive its basic properties.

59. Donguk Kim, Deok-Soo Kim and Kokichi Sugihara: "Apollonius tenth problem via radius adjustment and Mobius transformation", Computer-Aided Design, Vol. 38, pp. 14–21, 2006.

概要: The Apollonius Tenth Problem, as defined by Apollonius of Perga circa 200 B.C., has been useful for various applications in addition to its theoretical interest. Even though particular cases have been handled previously, a general framework for the problem has never been reported. Presented in this paper is a theory to handle the Apollonius Tenth Problem by characterizing the spatial relationship among given circles and the desired Apollonius circles. Hence, the given three circles in this paper do not make any assumption regarding on the sizes of circles and the intersection/inclusion relationship among them. The observations made provide an easy-to-code algorithm to compute any desired Apollonius circle which is computationally efficient and robust.

60. Deok-Soo Kim, Byunghoom Lee and Kokichi Sugihara: "A sweep-line algorithm for the inclusion hierarchy among circles", Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics, Vol. 23, No. 1, pp. 127–138, 2006.

概要: Suppose that there are a number of circles in a plane and some of them may contain several smaller circles. In this case, it is necessary to find the inclusion hierarchy among circles for the various applications such as the simulation of emulsion and diameter estimation for wire bundles. In this paper, we present a plane-sweep algorithm that can identify the inclusion hierarchy among the circles in O(n log n) time in the worst-case. Also, the proposed algo-

rithm uses the sweep-line method and a red-black tree for the efficient computation.

61. Deok-Soo Kim, Donguk Kim, Youngsong Cho and Kokichi Sugihara:
"Quasi-triangulation and interworld data structure in three dimensions", Computer-Aided Design, Vol. 38, pp. 808–819, 2006.
概要: It is well-known that the Voronoi diagram of points and the power diagram for weighted points, such as spheres, are cell complexes, and their respective dual structures, i.e. the Delaunay triangulation and the regular triangulation, are simplicial complexes. Hence, the topologies of these diagrams are usually stored in their dual complexes using a very compact data structure of arrays. The topology of the Voronoi diagram of three-dimensional spheres in the Euclidean distance metric, on the other hand, is stored in a radial edge data structure which is not as compact as the data structure used for the Voronoi diagram of points and the power diagram for weighted points. In this paper, we define a dual structure of the Voronoi diagram of three-dimensional spheres called a quasi-triangulation and present its important properties. Based on the properties of a quasi-triangulation, we propose a data structure, called an interworld data structure, based on arrays to compactly store the topology of the quasi-triangulation with a guaranteed query performance.

62. Takaharu Yaguchi and Kokichi Sugihara:
"On the Hedstrom nonreflecting boundary condition for C^2 solutions", Journal of Computational and Applied Mathematics, Vol. 197, pp. 150–155, 2006.
概要: This paper shows that Hedstrom's nonreflecting boundary condition works for some nonsimple-wave solutions in the case where the solution is C^2. Hedstrom's boundary condition is a pioneering work in the discipline of characteristic nonreflecting boundary conditions and Hedstrom gave a theoretical assurance of the nonreflectivity for simple-wave solutions. In this paper, we extend Hedstrom's theorem for C^2 solutions, that is, we prove that the Hedstrom boundary condition eliminates the reflection if the solution is C^2 and there do not exist ingoing waves generated by the nonlinear interactions near the boundary.

63. Masaki Moriguchi and Kokichi Sugihara:
"Out-of-core isotropic mesh simplification", Journal of Three Dimensional Images, Vol. 20, No. 3, pp. 47–50, 2006.
概要: In this paper, we present an out-of-core algorithm for simplifying huge meshes into isotropic meshes. Our method is based on k-means clustering, which can be computed by first generating an initial clustering and then by iteratively applying improvement methods. To operate in an I/O-efficient manner, the original mesh is converted to the streaming mesh format. Then we create an initial clustering by Ward ' s method through streaming edge collapse simplification. We use data swapping local search for iterative improvement since it can be implemented I/O-efficiently. After performing several passes of stream processing, we get a high quality mesh in a reasonable time.

64. K. Murota:
"M-convex functions on jump systems: A general framework for minsquare graph factor problem", SIAM Journal on Discrete Mathematics, 20, 213–226, 2006 年.
概要: The concept of M-convex functions is generalized for functions defined on constant-parity jump systems. M-convex functions arise from minimum weight perfect b-matchings and from a separable convex function (sum of univariate convex functions) on the degree sequences of an

undirected graph. As a generalization of a recent result of Apollonio and Sebő for the minsquare factor problem, a local optimality criterion is given for minimization of an M-convex function subject to a component sum constraint.

65. K. Murota, K. Tanaka:
"A Steepest Descent Algorithm for M-convex Functions on Jump Systems", IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, E89-A 巻 5 号, 1160–1165, 2006 年 5 月.
概要: The concept of M-convex functions has recently been generalized for functions defined on constant-parity jump systems. The b-matching problem and its generalization provide canonical examples of M-convex functions on jump systems. In this paper, we propose a steepest descent algorithm for minimizing an M-convex function on a constant-parity jump system.

66. Shuji Kijima and Tomomi Matsui:
"Polynomial Time Perfect Sampling Algorithm for Two-Rowed Contingency Tables", Random Structures and Algorithms, 29(3), pp. 243–256, 2006.
概要: This paper proposes a polynomial time perfect (exact) sampling algorithm for $2 \times n$ contingency tables. The algorithm is based on monotone coupling from the past (monotone CFTP) algorithm. The expected running time is bounded by $O(n^3 \ln N)$ where n is the number of columns and N is the total sum of all entries.

67. Greg Aloupis, Thomas Fevens, Stefan Langerman, Tomomi Matsui, Antonio Mesa, Yurai Nunez, David Rappaport, and Godfried Toussaint:
"Algorithms for Computing Geometric Measures of Melodic Similarity", Computer Music Journal, 30(3), pp. 67–77, 2006.
概要: Similarity measures for melodies find application in content-based retrieval methods for large music databases such as query by humming but also in other diverse applications such as helping prove music copyright infringement. We describe two algorithms to calculate similarity defined by the minimum area between two given orthogonal melodies. The algorithms may be used for cyclic melodies as well as in the context of retrieving short patterns from a database (open planar orthogonal chains).

68. Ryuhei Miyashiro and Tomomi Matsui:
"Semidefinite programming based approaches to the break minimization problem", Computers and Operations Research, 33(7), pp. 1975–1982, 2006.
概要: This paper considers the break minimization problem in sports timetabling. The problem is to find, under a given timetable of a round-robin tournament, a home-away assignment that minimizes the number of breaks, i.e., the number of occurrences of consecutive matches held either both at away or both at home for a team. We formulate the break minimization problem as MAX RES CUT and MAX 2SAT, and apply Goemans and Williamson's approximation algorithm using semidefinite programming. Computational experiments show that our approach quickly generates solutions of good approximation ratios.

69. Yuichiro Miyamoto and Tomomi Matsui:
"Approximation Algorithms for Minimum Span Channel Assignment Problems", Lecture Notes in Computer Science, 4041, pp. 334–342, 2006.
概要: We propose polynomial time approximation algorithms for the minimum span channel (frequency) assignment problems, which is known to be NP-hard. Let α be the approximation ratio of our algorithm

and $W \geq 2$ be the maximum of numbers of channels required in vertices. If an instance is define on a perfect graph G, then $\alpha \leq 1 + (1 + \frac{1}{W-1})\mathrm{H}_{\omega(G)}$, where H_i denotes the i-th harmonic number. For any instance defined on a unit disk graph G, α is less than or equal to $(1+\frac{1}{W-1})(3\mathrm{H}_{\omega(G)}-1)$. We also discuss a well-known practical instances called Philadelphia instances and propose an algorithm with $\alpha \leq 83/30$, which improves a trivial algorithm with $\alpha \leq 14/5$.

70. Ayami Suzuka, Ryuhei Miyashiro, Akiko Yoshise and Tomomi Matsui:
"Dependent Randomized Rounding to the Home-Away Assignment Problem in Sports Scheduling", IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, E89-A(5), pp. 1407–1416, 2006.
概要: Suppose that we have a timetable of a round-robin tournament with a number of teams, and distances among their homes. The home-away assignment problem is to find a home-away assignment that minimizes the total traveling distance. We propose a formulation of the home-away assignment problem as an integer program, and a rounding algorithm based on Bertsimas, Teo and Vohra's dependent randomized rounding method. Computational experiments show that our method quickly generates feasible solutions close to optimal.

71. Shu Yamada, Michiyo Matsui, Tomomi Matsui, Dennis K. J. Lin, and Takenori Takahashi:
"A General Construction Method for Mixed-level Supersaturated Design", Computational Statistics and Data Analysis, 50(1), pp. 254–265, 2006.
概要: In this paper, we show a general constructing method of mixed-level supersaturated design with small number of experimental runs while the constructing methods by the previous studies generate designs with large number of experimental runs. The method shown in this paper has advantages that it assures the maximum level of dependency of the resulting designs and generates small number of experimental runs.

72. S. Fujishige and S. Iwata:
"Bisubmodular function minimization", SIAM Journal on Discrete Mathematics, 19, 1065–1073, 2006.
概要: This paper presents the first combinatorial polynomial algorithm for minimizing bisubmodular functions, extending the scaling algorithm for submodular function minimization due to Iwata, Fleischer, and Fujishige. Since the rank functions of delta-matroids are bisubmodular, the scaling algorithm naturally leads to the first combinatorial polynomial algorithm for testing membership in delta-matroid polyheda.

73. Y. Oishi:
"A region-dividing approach to robust semidefinite programming and its error bound", Proceedings of the 2006 American Control Conference, pp. 123–129, June 2006.
概要: A new asymptotically exact approach is presented for robust semidefinite programming, where coefficient matrices polynomially depend on uncertain parameters. Since a robust semidefinite programming problem is difficult to solve directly, an approximate problem is constructed based on a division of the parameter region. The optimal value of the approximate problem converges to that of the original problem as the resolution of the division becomes finer. An advantage of this approach is that an upper bound on the approximation error is available before solving the approxi-

mate problem. This bound shows how the approximation error depends on the resolution of the division. Furthermore, it leads to construction of an efficient division that attains small approximation error with low computational complexity. Numerical examples show efficacy of the present approach. In particular, an exact optimal value is often found with a division of finite resolution.

74. M. Takamatsu, Y. Oishi, and K. Hirata:
"Analysis of a nonlinear system using interval arithmetic: computation of an output admissible set", 計測自動制御学会論文集, Vol. 42, No. 12, pp. 1320–1327, 2006 年 12 月.
概要: Interval arithmetic is applied to analysis of a nonlinear system, in particular, to computation of an output admissible set, which plays an important role in constrained control. A discrete-time system whose dynamics is expressed in polynomials is considered first. When the initial state of such a system is known to belong to some multi-dimensional interval, interval arithmetic enables us to compute an interval that includes all possible states after some time steps. This fact together with polynomial optimization is used to compute an output admissible set. Numerical examples show efficacy of the proposed approach. Extensions are considered to non-polynomial systems and continuous-time systems.

75. Y. Kanno and I. Takewaki:
"Robustness analysis of trusses with separable load and structural uncertainties", International Journal of Solids and Structures, 43, 2646–2669, 2006.
概要: In this paper, we discuss evaluation techniques of the robustness function of trusses, which is regarded as one of measures of structural robustness, under the uncertainties of member stiffnesses and external forces. By using quadratic embedding of the uncertainty and the $\mathcal{S}$-procedure, we formulate a quasiconvex optimization problem which provides the lower bounds of the robustness functions. A bisection method is proposed, where we solve a finite number of semidefinite programming problems in order to obtain a global optimal solution to the proposed quasiconvex optimization problem. The lower bounds of the robustness functions are computed for various trusses under several uncertain circumstances.

76. Y. Kanno and M. Ohsaki:
"Contact analysis of cable networks by using second-order cone programming", SIAM Journal on Scientific Computing, 27, 2032–2052, 2006.
概要: A method based on mathematical programming is proposed for large deformation and contact analysis of cable networks. By explicitly considering these nonsmooth behaviors, we formulate the linear complementarity problems over symmetric cones under some practically acceptable assumptions. We also present the equivalent Second-Order Cone Programming (SOCP) problems, which can be regarded as the minimization problem of total potential energy and complementary energy with the subsidiary constraints on the displacements and contact forces, respectively. By solving the presented SOCP problems by using the primal-dual interior-point methods, the equilibrium configurations and internal forces of several cable networks are obtained without any assumptions on stress states and contact conditions.

77. T. Ariga, Y. Kanno and I. Takewaki:
"Resonant behavior of base-isolated high-rise buildings under long-period ground motions", The Structural Design of Tall and Special Buildings, 15, 325–338, 2006.

概要: The resonant behavior of base-isolated high-rise buildings under long-period ground motions is investigated. The long-period ground motions are known to be induced by surface waves. While the acceleration amplitude of such long-period ground motion is small, the velocity amplitude is fairly large. It is expected that high-rise buildings and base-isolated buildings with long fundamental natural periods are greatly influenced by these long-period ground motions. Especially base-isolated high-rise buildings with friction-type bearings may have remarkable mechanical characteristics unfavourable for these long-period ground motions. The purpose of this paper is to reveal that the long-period ground motions recorded in Japan have the intensity to make base-isolated high-rise buildings in resonance with long-period components and that careful treatment is inevitable in the structural design of these base-isolated high-rise buildings. It is pointed out that the friction-type bearings are effective in general in avoiding the resonance with ground motions with a narrow-range frequency characteristic, but are dangerous for ground motions with a wide-range frequency characteristic in the long period range.

78. Y. Kanno and I. Takewaki:
"Confidence ellipsoids for static response of trusses with load and structural uncertainties", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 196, 393–403, 2006.
概要: This paper presents a semidefinite relaxation technique for computing a minimal bounding ellipsoid that contains the set of static responses of an uncertain truss. We assume that the parameters both of member stiffnesses and external forces are uncertain but bounded. By using a combination of the quadratic embedding technique of the uncertainty and the $\mathcal{S}$-procedure, we formulate a semidefinite programming (SDP) problem which provides an outer approximation of the minimal bounding ellipsoid. Our approach has polynomial computational complexity of the problem size, if the SDP problem presented is solved by using the primal-dual interior-point method. The minimum bounding ellipsoids are computed for various trusses under several uncertain circumstances.

79. Y. Kanno and I. Takewaki:
"Sequential semidefinite program for maximum robustness design of structures under load uncertainties", Journal of Optimization Theory and Applications, 130, 265–287, 2006.
概要: A robust structural optimization scheme as well as an optimization algorithm are presented based on the robustness function. Under the uncertainties of the external forces based on the info-gap model, the maximization of the robustness function is formulated as an optimization problem with infinitely many constraints. By using the quadratic embedding technique of uncertainty and the S-procedure, we reformulate the problem into a nonlinear semidefinite programming problem. A sequential semidefinite programming method is proposed which has a global convergent property. It is shown through numerical examples that optimum designs of various linear elastic structures can be found without difficulty.

80. Y. Kanno and J.A.C. Martins:
"Arc-length method for frictional contact problems using mathematical programming with complementarity constraints", Journal of Optimization Theory and Applications, 131, 89–113, 2006.
概要: A new formulation as well as a new solution technique is proposed for an

equilibrium path-following method in two-dimensional quasistatic frictional contact problems. We consider the Coulomb friction law as well as a geometrical nonlinearity explicitly. Based on a criterion of maximum dissipation of energy, we propose a formulation as a mathematical program with complementarity constraints (MPEC) in order to avoid unloading solutions in which most contact candidate nodes become stuck. A regularization scheme for the MPEC is proposed, which can be solved by using a conventional nonlinear programming approach. The equilibrium paths of various structures are computed in cases such that there exist some limit points and/or infinite number of successive bifurcation points.

81. 西田 徹志:
"ボート航行距離方程式とその解法", 応用数理, vol. 16, no. 3, pp. 31–43, 2006.
概要: A new concept called a boat-sail distance is introduced on the surface of water with flow. That concept is a mathematical model of the shortest time for a boat to move from one point to another against the flow of water. The problem of computing this distance is reduced to a boundary value problem of a partial differential equation, and a numerical method for solving this problem is constructed. The method is a modification of a so-called fast marching method originally proposed for the eikonal equation. Computational experiments show the efficiency and the stableness of the proposal method.

82. H. Hashimoto, T. Ibaraki, S. Imahori, M. Yagiura:
"The Vehicle Routing Problem with Flexible Time Windows and Traveling Times", Discrete Applied Mathematics, 154, 2271–2290, November 2006.
概要: We generalize the standard vehicle routing problem by allowing soft time window and soft traveling time constraints, where both constraints are treated as cost functions. With the proposed generalization, the problem becomes very general. In our algorithm, we use local search to determine the routes of vehicles. After fixing the route of each vehicle, we must determine the optimal start times of services at visited customers. We show that this subproblem is NP-hard when cost functions are general, but can be efficiently solved with dynamic programming when traveling time cost functions are convex even if time window cost functions are non-convex. We deal with the latter situation in the developed iterated local search algorithm. Finally we report computational results on benchmark instances, and confirm the benefits of the proposed generalization.

83. Hiroshi Kawaharada and Kokichi Sugihara:
"Dual subdivision—A new class of subdivision schemes using projective duality", 14th International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision 2006 (WSCG'2006), pp. 9–16, January 2006.
概要: This paper proposes a new class of subdivision schemes. Previous subdivision processes are described by the movement and generation of vertices, and the faces are specified indirectly as polygons defined by those vertices. In the proposed scheme, on the other hand, the subdivision process is described by the generation of faces, and the vertices are specified indirectly as the intersections of these faces. In this sense, this paper gives a framework for a wide class of new subdivision methods. In short, the new subdivision is a dual framework of an ordinary subdivision based on the principle of duality in projective geometry. So, the new subdivision scheme inherits various properties of the ordinary subdivision schemes. In

this paper, we define the dual subdivision and derive its basic properties.

84. Hideyuki Sakai and Kokichi Sugihara: "Stable and topology-preserving extraction of medial axes", Proceedings of the 3rd International Symposium on Voronoi Diagrams in Science and Engineering, pp. 40–47, July 2006.
概要: The paper presents a simple method for extracting global medial axes in a stable manner. A new index, called the normalized boundary distance, is introduced in order to measure the degree of importance of a point on the conventional medial axis. This index has a remarkable property that the set of points whose index values are greater than an arbitrarily chosen threshold is topologically equivalent to the original figure. In the proposed method, first the boundary of a given figure is replaced with a dense set of points, next the Voronoi diagram for these points is constructed, then the approximation of the medial axis is extracted from the Voronoi diagram, and finally the global medial axis is constructed by pruning the branches according to the new index. The performance of the proposed method is also shown by examples.

85. Masaki Moriguchi and Kokichi Sugihara: "A new initialization method for constructing centroidal Voronoi tessellations on surface meshes", Proceedings of the 3rd International Symposium on Voronoi Diagrams in Science and Engineering, pp. 159–165, 2006.
概要: Centroidal Voronoi tessellations can be constructed using iterative improvement methods such as Lloyd 's method. Using iterative improvement methods implies that the convergence speed and the quality of the results depend on the initialization methods. In this paper, we propose an efficient initialization method for constructing centroidal Voronoi tessellations on surface meshes. The proposed method tries to make initial tessellations mimic the properties of the centroidal Voronoi tessellations. We compare our method with other initialization methods: random sampling, farthest point sampling and Ward 's method. The results show that our method and Ward 's method have the faster convergence speed than random sampling and farthest point sampling, and create better tessellations than random sampling.

86. Hiroshi Kawaharada and Kokichi Sugihara: "Computation of normals for stationary subdivision surfaces", The Fourth International Conference on Geometric Modeling and Processing, pp. 585–594, 2006.
概要: This paper proposes a method for computing of normals for stationary subdivision surfaces. We derived a new necessary and sufficient condition for C^k-continuity of stationary subdivision schemes. First, we showed that tangent plane continuity is equivalent to the convergence of difference vectors. Thus, using "normal subdivision matrix", we derived a necessary and sufficient condition of tangent plane continuity for stationary subdivision at extraordinary points (including degree 6). Moreover, we derived a necessary and sufficient condition for C^1-continuity. Using the analysis, we show that at general points on stationary subdivision surfaces, the computation of the exact normal is an infinite sum of linear combinations of cross products of difference vectors even if the surfaces are C^1-continuous. So, it is not computable. However, we can compute the exact normal of subdivision surfaces at the limit position of a vertex of original mesh or of j-th subdivided mesh for any finite j even if the surfaces arc not regular.

87. Shuji Kijima and Tomomi Matsui:

"Randomized Approximation Scheme and Perfect Sampler for Closed Jackson Networks", Second Madrid Conference on Queueing Theory (MCQT), CD-ROM 版のためページ番号無し, 2006 年 7 月.
概要: We propose a polynomial-time randomized approximation scheme for calculating the normalizing constant of the product form solution of closed Jackson networks. Our algorithm is based on Markov chain Monte Carlo (MCMC) method. We also propose two efficient sampling algorithms for closed Jackson networks.

88. Ryuhei Miyashiro and Tomomi Matsui:
"Minimizing the Carry-over Effects Value in a Round-robin Tournament", The 6th international conference on the Practice And Theory of Automated Timetabling (PATAT 2006), pp. 460–463, 2006 年 8 月.
概要: In this paper, we consider the problem of minimizing the carry-over effects value in a round-robin tournament. The carry-over effects value is an index of quality of a round-robin tournament schedule. We propose an effective algorithm for generating schedules of small carry-over effects values. The proposed algorithm produces better schedules than the best ones previously known in short computational time.

89. Nobutomo Fujiwara, Shinji Imahori, Tomomi Matsui, and Ryuhei Miyashiro:
"Constructive Algorithms for the Constant Distance Traveling Tournament Problem", The 6th international conference on the Practice And Theory of Automated Timetabling (PATAT 2006), pp. 402–405, 2006 年 8 月.
概要: The traveling tournament problem is a problem that abstracts an important issue in sports scheduling, minimizing traveling distance. In this paper, we deal with the constant distance traveling tournament problem, which is a special class of the traveling tournament problem. We propose a lower bound of the optimal value of the constant distance traveling tournament problem, and two constructive algorithms that produce feasible solutions whose objective values are close to the proposed lower bound. For some size of instances, one of our algorithms yields optimal solutions.

90. Masaru Iwasa, Hiroo Saito and Tomomi Matsui:
"Approximation Algorithms for the Single Allocation Problem in Hub-and-Spoke Networks", Optimal Discrete Structures and Algorithms (ODSA), p. 24, 2006 年 9 月.
概要: Hub-and-spoke network arises in the airline industry, telecommunications and postal delivery systems. We consider a single allocation problem, which allocates each non-hub node to one of hub nodes, and minimizes the total transportation cost. We propose 2-approximation algorithm based on randomized rounding technique. When the number of hubs is three, we propose a specialized dependent rounding technique which gives a (5/4)-approximation algorithm.

91. Yusuke Kuroki and Tomomi Matsui:
"Randomized Approximation Algorithm for a Geometrical Multidimensional Assignment Problem", Optimal Discrete Structures and Algorithms (ODSA), p. 30, 2006 年 9 月.
概要: A multidimensional assignment problem have found applications as a technique to solve data association problems. This paper deals with a case that the weight of a clique is defined by the sum of given weights of its edges. Additionally, we assume that vertices are embedded in the d-dimensional space and a weight of an edge is defined by the square of the Euclidean distance. We propose a second-order cone programming relaxation of the problem and a polynomial

time randomized rounding procedure.

92. Y. Kanno and J.A.C. Martins:
"Arc-length method for frictional contact with a criterion of maximum dissipation of energy", The 3rd European Conference on Computational Mechanics (ECCM-2006), June 2006.
概要: An arc-length equilibrium path-following method is proposed for two-dimensional quasi-static frictional contact problems. We consider the Coulomb friction law as well as geometrical nonlinearity. Incorporating a criterion of maximum dissipation of energy, we propose a formulation as a mathematical program with complementarity constraints (MPCC) in order to avoid unloading solutions in which most contact candidate nodes become stuck. A regularization scheme for the MPCC is proposed, which can be solved by using the conventional nonlinear programming approach. The equilibrium paths of various structures are computed successfully in cases such that there exist some limit points and/or infinite number of successive bifurcation points.

93. Y. Kanno and I. Takewaki:
"Ellipsoidal bounds for static response of uncertain trusses by using semidefinite programming", The 4th China-Japan-Korea Joint Symposium on Optimization of Structural and Mechanical Systems (CJK-OSM4), November 2006.
概要: A semidefinite relaxation technique is proposed for computing a minimal bounding ellipsoid that contains the set of static responses of an uncertain truss. We assume that the parameters both of member stiffnesses and external forces are unknown but bounded. By using a combination of the quadratic embedding technique of the uncertainty and the $\mathcal{S}$-procedure, we formulate a semidefinite programming (SDP) problem which provides an outer approximation of the minimal bounding ellipsoid. Our approach has polynomial computational complexity of the problem size, if the SDP problem presented is solved by using the primal-dual interior-point method.

94. Tetsushi Nishida, Kokichi Sugihara and Masato Kimura:
"Stable marker-particle method for the Voronoi diagram in a flow field", Journal of Computational and Applied Mathematics, Vol. 202, pp. 377–391, 2007.
概要: The Voronoi diagram in a flow field is a tessellation of water surface into regions according to the nearest island in the sense of a " boat-sail distance ", which is a mathematical model of the shortest time for a boat to move from one point to another against the flow of water. The computation of the diagram is not easy, because the equi-distance curves have singularities. To overcome the difficulty, this paper derives a new system of equations that describes the motion of a particle along the shortest path starting at a given point on the boundary of an island, and thus gives a new variant of the marker-particle method. In the proposed method, each particle can be traced independently, and hence the computation can be done stably even though the equi-distance curves have singular points.

95. Kokichi Sugihara:
"Sliver-free perturbation for the Delaunay tetrahedrization", Computer-Aided Design, Vol. 39, pp. 87–94, 2007.
概要: This paper studies the symbolic perturbation scheme in the context of Delaunay meshing in the three-dimensional space. The symbolic perturbation is a general and powerful technique for removing geometric degeneracy. However, a straightforward application of this technique to Delaunay meshing does not work well, because the perturbation generates volume-zero tetra-

hedra, called slivers, which should not appear in the meshes for the finite element method. First we characterize the set of directions in which a point can be perturbed without generating slivers. Next, as an application of this characterization, we construct a graph-theoretic method for finding a sliver-free perturbation. We also show that an ordinary symbolic perturbation cannot avoid slivers for the integer-grid points, and point out that a kind of generalized perturbation can avoid slivers completely.

96. 長井超慧，杉原厚吉:
"滑らかな境界を表現する等方的四面体メッシュ生成法", 日本応用数理学会論文誌, Vol. 17, No. 3, pp. 347–361, 2007 年.
概要: We propose an algorithm to generate an isotropic tetrahedral mesh whose domain boundaries are smooth. First we get an isotropic mesh by optimal Delaunay triangulation, then select boundary vertices and move them to new positions for better expression of the domain boundaries as a post processing. In the second phase, we get new positions using quadric error metric. To prevent the isotropy from getting worse, we determine each distance between the current position and the new position based on the isotropy of incident elements.

97. 長井超慧，杉原厚吉，鈴木宏正:
"頂点追加による 2 次元 DistMesh の等方性向上", 日本応用数理学会論文誌, Vol. 17, No. 3, pp. 195–217, 2007 年.
概要: Expressing the analysis domains with meshes is common in simulations for fluid dynamics and structural mechanics. The times for calculations and precisions depend on the meshes, so suitable meshes are needed. For phenomena without proper directions of changes, isotropic meshes are preferable. Our aim is improving 2-dimensional triangular mesh isotropy for such simulations. We report inserting vertices into and optimizing meshes generated by an algorithm DistMesh proposed by Persson and Strang. Then we verify the improvements with smoothing after optimization comparing with some results for uniform and adaptive meshes respectively, and show the advantages of our proposed method.

98. Kokichi Sugihara:
"Artistic pattern generation by a model of territory competing", Proceedings of the 4th International Symposium on Voronoi Diagrams in Science and Engineering, pp. 205-211, July 2007.
概要: This paper presents a method for generating artistic patterns using the Voronoi diagram. In this method, we start with a few of seed points, generate new sites at random, and assign them to one of the seed points based on the Voronoi diagram of the sites. The resulting territory patterns are colored by choosing paths in a color space. The patterns generated by this method have been adopted for calendars and magazine covers.

99. Kokichi Sugihara and Tetsushi Nishida:
"Stable computation of the optimal path for a boat on a water stream and its applications", 8th Hellenic-European Conference on Computer Mathematics and Its Applications, September 2007.
概要: A stable method for computing the optimal path for a boat in a water stream is constructed, and is applied to the estimation of water contamination phenomena. The proposed method is a modification of a marker-particle method. The conventional marker-partical method is unstable for our problem because of singular points in the field of the shortest reachable time. To circumvent the instability, we modify the way of estimating the optimal direction of a par-

ticle in such a way that we do not use the locations and the motions of neighbor particles, and thus construct a robust version of the marker-particle method, which we call an *independent marker-particle method*. This method can also be used to trace the time backward from the future to the past, and hence can estimate the location of the contamination source.

100. Kokichi Sugihara:
"Spatial realization of Escher's impossible world", 8th Hellenic-European Conference on Computer Mathematics and Its Applications, September 2007.
概要: M. C. Escher, a Dutch artist, created a series of lithographs presenting "impossible" objects and "impossible" motions. Although they are usually called "impossible", some of them can be realized as solid objects and physical motions in the three-dimensional space. The basic idea for these realizations is to use the degrees of freedom in the reconstruction of solids from pictures. First, the set of all solids represented by a given picture is represented by a system of linear equations and inequalities. Next the distribution of the freedom is characterized by a matroid extracted from this system. Then, a robust method for reconstructing solids is constructed and applied to the spatial realization of the "impossible" world.

101. S. Iwata and K. Takazawa:
"The independent even factor problem", Proceedings of the 18th Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms (SODA), pp. 1171–1180, 2007.
概要: This paper deals with the independent even factor problem. For odd-cycle-symmetric digraphs, where any odd dicycle has the reverse cycle, a min-max formula is established as a common generalization of the Tutte-Berge formula for matchings and the matroid intersection theorem of Edmonds (1970). We devise an efficient combinatorial algorithm to find a maximum independent even factor in an odd-cycle-symmetric digraph accompanied with general matroids, which commonly extends Pap's even factor algorithm (2005) and the matroid intersection algorithms. The algorithm gives a proof of the min-max formula, and contains a new operation on matroids, which corresponds to shrinking factor-critical components in Edmonds' matching algorithm (1965). The algorithm runs in $O(n^4Q)$ time, where n is the number of vertices and Q is the time for an independence test. The algorithm also gives a common generalization of the Edmonds-Gallai decomposition for matchings and the principal partition for matroid intersection.

102. Y. Kanno and I. Takewaki:
"Global optimization algorithm for worst-case limit analysis of trusses under load uncertainties", The 4th International Conference on Computational Methods (ICCM 2007), April 2007.
概要: In this paper, we present a global optimization method to compute the minimum limit load factor of trusses subjected to loads that cannot be known precisely but is assumed to be bounded. We suppose that the external forces applied to a truss consist of a constant part and a part proportional to a load factor, where the former part possesses the uncertainty. Non-stochastic uncertainty model is used to represent the uncertainty of the external load, which is consistent with the *info-gap* uncertainty model. The worst-case limit load factor is introduced as the smallest limit load factor realized with some uncertain external loads.

103. Y. Kanno and M. Ohsaki:
"Maximization of minimal eigenvalue of structures by using sequential semidefinite

programming", The 7th World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization (WCSMO7), May 2007.
概要: This paper discusses the maximization problem of the lowest eigenvalue of a finite-dimensional structure. A sequential semidefinite programming (SDP) approach is proposed based on the bisection method for application to the cases in which the optimal design has the multiple lowest eigenvalues.

104. Y. Kanno and I. Takewaki:
"Confidence bounds for static response of braced frames with structural and load uncertainties", The 3rd Asian–Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM'07), December 2007.
概要: This paper discusses a numerical technique for computing a minimal bounding ellipsoid that contains the set of static responses of an uncertain braced frame. We assume that the parameters both of brace stiffnesses and external forces are uncertain and bounded. A brace member represents the sum of the stiffness of the actual brace and the contributions of non-structural elements. We formulate a convex optimization problem which provides an outer approximation of the minimal bounding ellipsoid. It is shown in the numerical examples that confidential bounding ellipsoids are obtained efficiently for static response of a braced frame.

105. T. Miyamura, Y. Kanno and M. Ohsaki:
"Combination of interior-point method and semismooth Newton method for solving frictionless contact problems", The 3rd Asian–Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM'07), December 2007.
概要: An approach combining the interior-point method and semismooth Newton method for solving frictionless contact problems is proposed. Some numerical examples of frictionless contact problem discretized by using node-to-node contact model, which are presented in this paper, are difficult to be solved by the semismooth Newton method or primal-dual active set method that is often used for solving the contact problem. It is shown that the present method converges within smaller number of iterations than the semi-smooth Newton method and interior-point method.

106. Y. Kanno and I. Takewaki:
"Ellipsoidal bounds for uncertainty analysis of structures by using semidefinite programming", The 7th International Conference on Optimization: Techniques and Applications (ICOTA7), December 2007.
概要: This paper presents a numerical method for finding a confidential bound for the solution set to the uncertain linear equations. Particularly, we aim at finding a bounding ellipsoid for static response of structures, where both external forces and elastic moduli of members are assumed to be imprecisely known and bounded. By using the $\mathcal{S}$-lemma, we formulate a semidefinite programming problem which provides an outer approximation of the minimal bounding ellipsoid.

107. Y. Kobayashi, K. Murota, K. Tanaka:
"Operations on M-convex Functions on Jump Systems", SIAM Journal on Discrete Mathematics, 21 巻 1 号, 107–129, 2007 年 1 月.
概要: A jump system is a set of integer points with an exchange property, which is a generalization of a matroid, a delta-matroid, and a base polyhedron of an integral polymatroid. Recently, the concept of M-convex functions on constant-parity jump systems is introduced as a class of discrete convex functions that admit a local criterion for global minimality. This paper shows that the class of M-convex func-

tions on constant-parity jump systems is closed under a number of natural operations such as splitting, aggregation, convolution, composition, and transformation by networks. The present results generalize hitherto-known similar constructions for matroids, delta-matroids, valuated matroids, valuated delta-matroids, and M-convex functions on base polyhedra.

108. 森口聡子，原辰次，室田一雄:
"連続/離散ハイブリッド $M^\natural$ 凸関数に関する一考察", システム制御情報学会論文誌, 20 巻 2 号, 84–86, 2007 年.
概要: ハイブリッドシステムのモデル予測制御などの文脈において，混合整数 2 次計画問題を短時間で解くアルゴリズムの構築が求められていることを背景として，高松・原・室田により連続／離散ハイブリッド凸性，ハイブリッド L 凸関数の概念が考察された．本論文では，ハイブリッド M 凸関数を導入し，整多面体的ハイブリッド M 凸関数に対する最小性規準を与える．L 凸関数に比べて，M 凸関数におけるハイブリッド凸性はより精細な議論を必要とし，理論的扱いが困難な状況にあることを指摘するのも本論文の一つの目的である．

109. Ayami Suzuka, Ryuhei Miyashiro, Akiko Yoshise and Tomomi Matsui:
"The Home-away Assignment Problems and Break Minimization/Maximization Problems in Sports Scheduling", Pacific Journal of Optimization, 3(1), pp. 113–133, 2007.
概要: The home-away assignment problem is to find a home-away assignment that minimizes the total traveling distance of the teams; the break minimization/maximization problem is to find a home-away assignment that minimizes/maximizes the number of breaks, i.e.,. the number of occurrences of consecutive matches held either both at away or both at home for a team. The aim of this paper is to give a unified view to the three problems. We see that optimal solutions of the break minimization/maximization problems are obtained by solving the home-away assignment problem. For these problems, we propose formulations and approximation preserving reductions, and report known approximation algorithms.

110. Nobutomo Fujiwara, Shinji Imahori, Tomomi Matsui, and Ryuhei Miyashiro:
"Constructive Algorithms for the Constant Distance Traveling Tournament Problem", Lecture Notes in Computer Science, 3867, pp. 135–146, 2007.
概要: The traveling tournament problem considers scheduling round-robin tournaments that minimize traveling distance, which is an important issue in sports scheduling. In this paper, we deal with the constant distance traveling tournament problem. We propose a lower bound of the optimal value of the constant distance traveling tournament problem, and two constructive algorithms that produce feasible solutions whose objective values are close to the proposed lower bound.

111. S. Iwata and R. Shimizu:
"Combinatorial analysis of singular matrix pencils", SIAM J. Matrix Anal. Appl., 29, 245–259, 2007.
概要: This paper investigates the Kronecker canonical form of matrix pencils under the genericity assumption that the set of nonzero entries is algebraically independent. We provide a combinatorial characterization of the sums of the row/column indices supported by efficient bipartite matching algorithms. We also give a simple alternative proof for a theorem of Poljak on the generic ranks of matrix powers.

112. N. Kakimura and S. Iwata:
"Computing inertia from sign patterns", Math. Programming, 110, 229–244, 2007.

概要: A symmetric matrix A is said to be sign-nonsingular if every symmetric matrix with the same sign pattern as A is nonsingular. Hall, Li, and Wang showed that the inertia of a sign-nonsingular symmetric matrix is determined uniquely by its sign pattern. The purpose of this paper is to present an efficient algorithm for computing the inertia of such symmetric matrices. The algorithm runs in $O(\sqrt{n}m \log n)$ time for a symmetric matrix of order n with m nonzero entries. In addition, it is shown to be NP-complete to decide whether the inertia of a given symmetric matrix is not determined by its pattern.

113. S. Iwata:
"Linking systems and matroid pencils", J. Oper. Res. Soc. Japan, 50, 315–327, 2007.
概要: A matroid pencil is a pair of linking systems having the same ground sets in common. It provides a combinatorial abstraction of matrix pencils. This paper investigates the properties of matroid pencils analogous to the theory of Kronecker canonical form. As an application, we give a simple alternative proof for a theorem of Murota on power products of linking systems.

114. 猪阪・大石:
"疎性の利用によるロバスト半正定値計画法の効率化", 計測自動制御学会論文集, Vol. 43, No. 2, pp. 93–101, 2007 年 2 月.
概要: A computaionally improved matrix-dilation approach is proposed for a robust semidefinite programming problem, whose constraint is a polynomial of uncertain parameters. This approach utilizes a sparse structure of the constraint polynomial and produces a small-size approximate problem to a given robust semidefinite programming problem. It is proved that the optimal value of the approximate problem converges to that of the given robust semidefinite programming problem as the used division of the parameter region becomes finer. In this sense, this approach is asymptotically exact. The size of the approximate problem is evaluated in the degree of the polynomial and is compared with the existing matrix-dilation approach. A numerical example is presented for illustration.

115. Y. Fujisaki and Y. Oishi:
"Guaranteed cost regulator design: a probabilistic solution and a randomized algorithm", Automatica, Vol. 43, No. 2, pp. 317–324, February 2007.
概要: This paper presents a gradient-based randomized algorithm to design a guaranteed cost regulator for a plant with general parametric uncertainties. The algorithm either provides with high confidence a probabilistic solution that satisfies the design specification with high probability for a randomly sampled uncertainty or claims that the feasible set of the design parameters is too small to contain a ball with a given radius. In both cases, the number of iterations executed in the algorithm is of polynomial order of the problem size and is independent of the dimension of the uncertainty.

116. Y. Oishi:
"Polynomial-time algorithms for probabilistic solutions of parameter-dependent linear matrix inequalities", Automatica, Vol. 43, No. 3, pp. 538–545, March 2007.
概要: A randomized approach is considered for a feasibility problem on a parameter-dependent linear matrix inequality. In particular, a gradient-based and an ellipsoid-based randomized algorithms are improved by introduction of a stopping rule. The improved algorithms stop after a bounded number of iterations and this bound is of polynomial order in the problem size. When the algorithms stop, either of the following two events occurs: (i) they find with high

confidence a probabilistic solution, which satisfies the given linear matrix inequality for most of the parameter values; (ii) they detect in an approximate sense the nonexistence of a deterministic solution, which satisfies the given linear matrix inequality for all the parameter values. These results are important because the original randomized algorithms have issues to be settled on detection of convergence, on the speed of convergence, and on the assumption of feasibility. The improved algorithms can be adapted for an optimization problem constrained by a parameter-dependent linear matrix inequality. A numerical example shows the efficacy of the proposed algorithms.

117. Y. Oishi and Y. Isaka:
"Exploiting sparsity in the matrix-dilation approach to robust semidefinite programming", Proceedings of the 2007 American Control Conference, pp. 6169–6176, July 2007.
概要: A computationally improved approach is proposed for a robust semidefinite programming problem whose constraint is polynomially dependent on uncertain parameters. By exploiting sparsity, the proposed approach gives an approximate problem smaller in size than the matrix-dilation approach formerly proposed by the group of the first author. Here, the sparsity means that the constraint of the given problem has only a small number of nonzero terms when it is expressed as a polynomial of the uncertain parameters. This sparsity is extracted with a special graph called a rectilinear Steiner arborescence, based on which a reduced-size approximate problem is constructed. The quality of the approximation can be evaluated quantitatively. This evaluation shows that the quality can be improved to any level by dividing the parameter region into small subregions.

118. Y. Oishi:
"Asymptotic exactness of parameter-dependent Lyapunov functions: an error bound and exactness verification", Proceedings of the 46th IEEE Conference on Decision and Control, pp. 5666–5671, December 2007.
概要: This paper provides an approximate approach to a robust semidefinite programming problem with a functional variable and shows its asymptotic exactness. This problem covers a variety of control problems including a robust stability/performance analysis with a parameter-dependent Lyapunov function. In the proposed approach, an approximate semidefinite programming problem is constructed based on the division of the set of parameter values. This approach is asymptotically exact in the sense that, as the resolution of the division becomes higher, the optimal value of the constructed approximate problem converges to that of the original problem. Our convergence analysis is quantitative. In particular, this paper gives an a priori upper bound on the discrepancy between the optimal values of the two problems. Moreover, it discusses how to verify that an optimal solution of the approximate problem is actually optimal also for the original problem.

119. Y. Kanno and I. Takewaki:
"Worst-case plastic limit analysis of trusses under uncertain loads via mixed 0-1 programming", Journal of Mechanics of Materials and Structures, Vol. 2, pp. 245–273, 2007.
概要: The paper presents a global optimization method to compute the minimum limit load factor of trusses under the unknown-but-bounded load uncertainty. We assume that the external forces consist of a part proportional to a load factor and a part that is uncertain around its nominal value.

The worst-case limit load factor is introduced as the smallest limit load factor realized with some uncertain parameters. By reformulating the worst-case determination problem as a mixed 0-1 programming problem, we propose a global optimization algorithm as a combination of a branch-and-boud method based on the linear programming relaxations and a cutting plane method based on the disjunctive or lift-and-project cuts. The worst-case limit loads, as well as the corresponding critical loading patterns, are computed to demonstrate that our method converges to the global optimal solutions successfully.

120. Y. Kanno and I. Takewaki:
"Ellipsoidal bounds for static response of framed structures against interactive uncertainties", Interaction and Multiscale Mechanics: an International Journal, Vol. 1, pp. 103–121, 2007.
概要: This paper presents an optimization-based method for computing a minimal bounding ellipsoid that contains the set of static responses of an uncertain braced frame. Based on a non-stochastic modeling of uncertainty, we assume that the parameters both of brace stiffnesses and external forces are uncertain but bounded. A brace member represents the sum of the stiffness of the actual brace and the contributions of some non-structural elements, and hence we assume that the axial stiffness of each brace is uncertain. By using the $\mathcal{S}$-lemma, we formulate a semidefinite programming (SDP) problem which provides an outer approximation of the minimal bounding ellipsoid. The minimum bounding ellipsoids are computed for a braced frame under several uncertain circumstances.

121. T. Nishida S. Ono and K. Sugihara:
"Direct Diffusion Method for the Construction of Generalized Voronoi Diagrams", Proceedings of the 4th International Symposium on Voronoi Diagrams in Science and Engineering, pp. 145–151, 2007.
概要: We propose a new method to construct discrete Voronoi diagrams, which we call the direct diffusion method. Once we implement it as software, we can easily modify it for various types of digital Voronoi diagrams by changing only the the distance function from a point to a generator represented by a general shape. Our method can construct discrete Voronoi diagrams even if the generator points are not at the centers of pixels. Furthermore, our method can construct the Voronoi diagrams without approximating general shapes by sets of pixels.

122. 西田 徹志:
"流れの中の航行シミュレーションと最適経路の探索", シミュレーション, Vol. 26, no. 2, pp. 10–14, 2007.
概要: Robust numerical methods for a boat-sail distance are reviewed. The boat-sail distance is a mathematical model of the shortest time for a boat to move from one point to another against a water flow. The problem of computing the distance is reduced to a boundary value problem of a partial differential equation and to an initial value problem of an ordinary differential equation, and we have proposed robust numerical methods corresponding to each problem.

123. N. Fujiwara, S. Imahori, T. Matsui, R. Miyashiro:
"Constructive Algorithms for the Constant Distance Traveling Tournament Problem", in Post-conference Revised and Selected Volume Papers of PATAT 2006, Lecture Notes in Computer Science, No. 3867, pp. 135–146, November 2007.
概要: The traveling tournament problem considers scheduling round-robin tourna-

ments that minimize traveling distance, which is an important issue in sports scheduling. Various studies on the traveling tournament problem have appeared in recent years, and there are some variants of this problem. In this paper, we deal with the constant distance traveling tournament problem, which is a special class of the traveling tournament problem. This variant is essentially equivalent to the problem of 'maximizing breaks' and that of 'minimizing breaks', which is another significant objective in sports scheduling. We propose a lower bound of the optimal value of the constant distance traveling tournament problem, and two constructive algorithms that produce feasible solutions whose objective values are close to the proposed lower bound. For some size of instances, one of our algorithms yields optimal solutions.

124. 澤井賢一，黒木裕介，松井知己:
"フルートの運指最適化と逆最適化を用いたパラメータチューニング", オペレーションズ・リサーチ, Vol. 53, No. 1, pp. 39–46, 2008.
概要: 本稿では「フルート演奏におけるなめらかな指使い」の探索を支援する手法を提案する．また，奏者に適応した指使いを出力するために，提案する手法のパラメータチューニングを逆最適化を用いて行う方法を提案する．

125. Shuji Kijima and Tomomi Matsui:
"Polynomial Time Perfect Sampler for Discretized Dirichlet Distribution", The Grammer of Technology Development, pp. 179–199, 2008.
概要: In this paper, we propose a perfect (exact) sampling algorithm according to a discretized Dirichlet distribution. Our algorithm is a monotone coupling from the past algorithm, which is a Las Vegas type randomized algorithm. We propose a new Markov chain whose limit distribution is a discretized Dirichlet distribution. Our algorithm simulates transitions of the chain $O(n^3 \ln \Delta)$ times where n is the dimension (the number of parameters) and $1/\Delta$ is the grid size for discretization.

126. Yusuke Kuroki and Tomomi Matsui:
"An Approximation Algorithm for Multidimensional Assignment Problems Minimizing the Sum of Squared Errors", Discrete Applied Mathematics, （掲載予定）.
概要: This paper deals with the k-dimensional minimum weight assignment problem. We assume that vertices are embedded in the d-dimensional space and a weight of an edge is defined by the square of the Euclidean distance between its two endpoints. We propose a second-order cone programming relaxation of the problem and a polynomial time randomized rounding procedure. We show that the expected objective value obtained by our algorithm is bounded by $(5/2 - 3/k)$ times the optimal value. Our result improves the previously known bound $(4 - 6/k)$ of the approximation ratio.

127. Shuji Kijima and Tomomi Matsui:
"Randomized Approximation Scheme and Perfect Sampler for Closed Jackson networks with Multiple Servers", Annals of Operations Research, （掲載予定）.
概要: In this paper, we propose a fully polynomial-time randomized approximation scheme (FPRAS) for a closed Jackson network. Our algorithm is based on the Markov chain Monte Carlo (MCMC) method. Thus our scheme returns an approximate solution, for which the size of the error satisfies a given bound. To our knowledge, this algorithm is the first polynomial time MCMC algorithm for closed Jackson networks with multiple servers. We propose two new ergodic Markov chains, both of which have a unique stationary distribution that is the product form solution for

closed Jackson networks. One of them is for an approximate sampler. The other is for a perfect sampler based on the monotone coupling from the past (CFTP) algorithm.

128. Hadas Shachnai, Lisa Zhang, and Tomomi Matsui:
"Exact Algorithms for the Master Ring Problem", Networks, （掲載予定）.
概要: We consider the master ring problem (MRP) which often arises in optical network design. Given a network which consists of a collection of interconnected K rings with nodes, respectively, we need to find an ordering of the nodes in the network that respects the ordering of every individual ring, if one exists. We show that MRP is NP-complete. Our main result is an algorithm which solves MRP. Our result is the first nontrivial improvement over the running time of the naive algorithm, which exhaustively enumerates all possible solutions.

129. S. Iwata:
"Submodular function minimization", Math. Programming, 112, 45–64, 2008.
概要: Submodular functions often arise in various fields of operations research including discrete optimization, game theory, queueing theory and information theory. In this survey paper, we give overview on the fundamental properties of submodular functions and recent algorithmic devolopments of their minimization.

130. S. Iwata and T. Matsuda:
"Finding coherent cyclic orders in strong digraphs", Combinatorica, to appear.
概要: A cyclic order in the vertex set of a digraph is said to be coherent if any arc is contained in a directed cycle whose winding number is one. This notion plays a key role in the proof by Bessy and Thomassé (2004) of a conjecture of Gallai (1964) on covering the vertex set by directed cycles. This paper presents an efficient algorithm for finding a coherent cyclic order in a strongly connected digraph, based on a theorem of Knuth (1974). With the aid of ear decomposition, the algorithm runs in $O(nm)$ time, where n is the number of vertices and m is the number of arcs. This is as fast as testing if a given cyclic order is coherent.

131. S. Iwata and N. Kakimura:
"Solving linear programs from sign patterns", Math. Programming, to appear.
概要: This paper is an attemp to provide a connection between qualitative matrix theory and linear programming. A linear program $\max\{cx \mid Ax = b, x \geq 0\}$ is said to be sign-solvable if the set of sign patterns of the optimal solutions is uniquesly determined by the sign patterns of A, b, and c. It turns out to be NP-hard to decide whether a given linear program is sign-solvable or not. We then introduce a class of sign-solvable linear programs in terms of totally sign-nonsingular matrices, which can be recognized in polynomial time. For a linear program in this class, we devise an efficient combinatorial algorithm to obtain the sign pattern of an optimal solution from the sign patterns of A, b, and c. The algorithm runs in $O(m\gamma)$ time, where m is the number of rows of A and γ is the number of all nonzero entries in A, b, and c.

132. Y. Matsuda and Y. Kanno:
"Robustness analysis of structures based on plastic limit analysis with uncertain loads", Journal of Mechanics of Materials and Structures, （掲載予定）.
概要: This paper presents a method for computing an info-gap robustness function of structures, which is regarded as one of measures of structural robustness under uncertainties, associated with the limit load factor. We assume that the external load in the plastic limit analysis is un-

certain around its nominal value. Various uncertainties are considered for the live, dead, and reference disturbance loads based on the non-stochastic info-gap uncertainty model. Although the robustness function is originally defined by using the optimization problem with infinitely many constraints, we show that the robustness function is obtained as an optimal value of a linear programming (LP) problem. Hence, we can easily compute the info-gap robustness function associated with the limit load factor by solving an LP problem. As the second contribution, we show that the robust structural optimization problems of trusses and frames can also be reduced to LP problems. In numerical examples, the robustness functions, as well as the robust optimal designs, are computed for trusses and framed structures by solving LP problems.

133. T. Nishida and K. Sugihara:
"Boat-Sail Voronoi Diagram and Its Application", International Journal of Computational Geometry and Applications, （発表予定）.
概要: A new generalized Voronoi diagram, called a boat-sail Voronoi diagram, is defined on the basis of the time necessary for a boat to reach on water surface with flow. A new concept called a boat-sail distance is introduced on the surface of water with flow, and it is used to define a generalized Voronoi diagram, in such a way that the water surface is partitioned into regions belonging to the nearest harbors with respect to this distance. The problem of computing this Voronoi diagram is reduced to a boundary value problem of a partial differential equation, and a numerical method for solving this problem is constructed. The method is a modification of a so-called fast marching method originally proposed for the eikonal equation. Computational experiments show the efficiency and the stableness of the proposal method. We also apply our equation to the shortest path problem and the simulation of the forest fire.

134. T. Ibaraki, S. Imahori, K. Nonobe, K. Sobue, T. Uno, M. Yagiura:
"An Iterated Local Search Algorithm for the Vehicle Routing Problem with Convex Time Penalty Functions", Discrete Applied Mathematics, (to appear).
概要: We propose an iterated local search algorithm for the vehicle routing problem with time window constraints. We treat the time window constraint for each customer as a penalty function, and assume that it is convex and piecewise linear. Given an order of customers each vehicle to visit, dynamic programming (DP) is used to determine the optimal start time to serve the customers so that the total time penalty is minimized. This DP algorithm is then incorporated in the iterated local search algorithm to efficiently evaluate solutions in various neighborhoods. The amortized time complexity of evaluating a solution in the neighborhoods is a logarithmic order of the input size (i.e., the total number of linear pieces that define the penalty functions). Computational comparisons on benchmark instances with up to 1000 customers show that the proposed method is quite effective, especially for large instances.

135. S. Imahori, M. Kushiya, T. Nakashima, K. Sugihara:
"Generation of Cutter Paths for Hard Material in Wire EDM", Journal of Materials Processing Technology, (to appear).
概要: A heuristic method for generating a cutter path for superhard material is presented. The cutter path should satisfy various constraints that come from physical reality in industry; for example, a constraint about undesired projections of the cut-off pieces, and that about vibration and defor-

mation generated by the cutter. A large portion of those constraints is represented by a rooted tree called "force-support tree" in direct and concise manner, and the remaining constraints are implemented in the manipulation of this tree. The resulting method achieves to find a good cutter path very quickly.

研究会等

1. Tetsushi Nishida, Kokichi Sugihara:
"Robust Numerical Method for the Boat-Sail Distance and Its Applications", 第 33 回数値解析シンポジウム, pp. 65–68, 2004 年 5 月.
概要: Suppose that we want to travel on the surface of water with a boat. If there is no flow of water, the boat can move in any direction at the same maximum speed. If the water flows, on the other hand, the speed of the boat is anisotropic; the boat can move faster in the same direction as the flow, while it move only slowly in the direction opposite to the flow direction. Modeling this situation, we can introduce the boat-sail distance. In order to construct a numerical method for computing the boat-sail distance, we reduce the problem to a boundary value problem of a partial differential equation. This idea is the same as the idea for reducing the problem of computing the Euclidean distance to a boundary value problem of the eikonal equation. Hence, our formulation can be considered a generalization of the eikonal equation. In the case of the eikonal equation, the fast marching method is well known as an efficient and stable computational technique. Therefore we applied the idea of the fast marching method to our equation, but we found that it did not work well. In this paper, we propose a new method by extending the scheme of the fast marching method and show the efficiency and the stableness of the proposal method by numerical experiments.

2. Tetsushi Nishida, Kokichi Sugihara:
"FEM-like Fast Marching Method for the Computation of the Boat-Sail Distance", 情報処理学会研究会研究報告, pp. 105–112, 2004 年 1 月.
概要: 流れのある水面上を航行するボートの振舞いをモデル化することによって，ボート航行距離という概念を導入する．そして，この距離を計算する問題を偏微分方程式の境界値問題に定式化し，得られた境界値問題を解く数値計算法を構成する．その方法は eikonal 方程式に対して提案された fast marching 法を改良したものである．数値実験により，提案した方法が効率性よく安定に動作することを示す．

3. 谷口隆晴，杉原厚吉:
"非粘性圧縮流体方程式に対する方向適合型無反射境界条件", 第 33 回数値解析シンポジウム講演予稿集, pp. 13–17, 2004 年.
概要: 数値流体力学をはじめとする現実問題を取り扱った数値計算では，広大な現実の空間に比べ計算機の中で扱うことのできる領域は高々有限であり，計算対象となる空間の打ち切りが必要となる．このとき，打ち切られた断面という人工的な境界が生じてしまうが，そのような人工的な境界上では特別な取り扱いをしない限り，現実には存在しない反射波が生成されてしまう．そこで，境界上で反射波をなくすような境界条件，すなわち無反射境界条件の設定が必要となる．無反射境界条件は既にいくつか提案されているが，既存の手法では波が境界に対して垂直に入射する，という仮定がおかれていた．本発表では，非粘性圧縮流体方程式 (Euler 方程式) を考え，解が境界付近で単純波として挙動する，という仮定をおくことによって，流れが垂直という仮定を持たない無反射境界条件を提案する．

4. 谷口隆晴，杉原厚吉:
"特性曲線法を用いた新しい無反射境界条件",

日本流体力学会年会 2004, G-221, 2004 年.
概要: Because the computational resources are finite, one needs to truncate the computational domain when he/she simulates a physical problem. This truncation gives rise to non-physical artificial boundaries. Practically nonreflecting boundary conditions, which are boundary conditions that prevent the generation of reflections, are of great importance. One of the most popular methods for the Navier-Stokes equations right now is boundary condition by Poinsot and Lele boundary conditions. However, their method is based on Thompson's boundary condition for the Euler equations, which is essentially one-dimensional, and hence is valid only when the flow is perpendicular to the boundary. Here we propose a boundary condition for the Navier-Stokes equations which does not require the assumption for the direction of flow. Our basic idea is to estimate the direction of the flow with numerical data.

5. 谷口隆晴，杉原厚吉:
"特性曲線法に基づく無反射境界条件の提案とその実装法", 第 18 回数値流体力学シンポジウム, B2-3, 2004 年.
概要: A characteristic nonreflecting boundary treatment is presented. Because the computational resources are finite, one needs to truncate the computational domain when he/she simulates a physical problem. This truncation gives rise to non-physical artificial boundaries. Practically nonreflecting boundary conditions are employed to eliminate non-physical reflections on such boundaries. One of the most often-used methods right now is Poinsot–Lele boundary conditions which, however, have an assumption that the incident waves are perpendicular to the boundaries. To overcome this restriction, we have proposed a characteristic boundary condition for the Navier-Stokes equations which does not have the assumption for the direction of the flow; however, how to implement this condition is not so trivial. Here we propose a method to implement our boundary condition. The method presented here is derived to guarantee the numerical robustness and the symmetric property of the solutions.

6. 森口 聡子，室田 一雄:
"L 凸関数に関する離散ヘッセ行列", 日本応用数理学会研究部会連合発表会, 2005 年 3 月.
概要: L 凸関数は, 整数格子点上で定義された関数のクラスとして, 離散凸解析において中心的な役割を担っている．本発表では, L 凸関数に対して離散ヘッセ行列と局所 2 次展開を定義し, これらを用いて L 凸関数の特徴付けを行った.

7. 小林佑輔, 室田一雄, 田中健一郎:
"ジャンプシステム上の M 凸関数に対する諸演算", 応用数理学会研究部会連合発表会, 2006 年 3 月.
概要: M 凸関数は, 整数格子点上で定義された関数のクラスとして, 離散凸解析において中心的な役割を担っている．本発表では, ジャンプシステム上の M 凸関数に対して，畳み込み（合成積）やネットワークによる変換が定義できることを示した.

8. 寒野 善博, 竹脇 出:
"剛性および外乱の変動に対するトラスのロバスト性能評価法",「新世代計算限界と地球環境問題」ミニシンポジウム, 2006 年 12 月.
概要: 構造物の力学的な耐用年数を評価する指標の 1 つとして，外部および内部環境の変動に対する構造物のロバスト性を定量的に評価する手法を提案する．特に，トラスの部材剛性および静的外力が不確定性を有することを仮定し，ロバスト性の指標として，変位の多項式で表される制約条件に関するロバストネス関数を定義する．さらに，ロバストネス関数の下解を与える準凸計画問題を定式化し，半正定値計画問題を繰り返し解くことで解を得る手法を提案する.

9. 寒野 善博, 松田 悠:
“崩壊荷重係数を基準とした構造物のロバスト性評価法”,「新世代計算限界と地球環境問題」ミニシンポジウム, 2007 年 12 月.
概要: 構造物の設計において，種々のパラメータの変動 (ばらつき) に対するロバスト性を評価することは重要な課題である．ロバストネス関数は，ロバスト性を定量的に評価できる指標の 1 つである．しかし，ロバストネス関数を計算することは，一般には容易ではない．本稿では，崩壊荷重係数と呼ばれる構造物の性能の指標を取り上げ，外力がばらつくことを仮定すると，ロバストネス関数を求める問題は線形計画問題に帰着されることを示す．また，崩壊荷重係数を制約条件とした構造物のロバスト最適設計問題を定式化し，この問題が線形計画問題に帰着できることを示す．

10. 今堀慎治，柳浦睦憲:
“長方形配置問題に対する best-fit 法の効率的な実現”, 情報処理学会 アルゴリズム研究会, 114, pp. 65–72, 2007 年 9 月.
概要: 長方形配置問題は, 与えられた長方形を重なりなく, できる限り密に配置することを目的とする問題である． 本問題に対する発見的解法の一つとして, Burke らによって提案された best-fit 法 [Operations Research 52 (2004) 655–671] があり, その性能が広く注目されている． 本研究では, best-fit 法の効率的な実現法を提案し, 計算量の観点での最適性を示す．我々の実現法は, 長方形数を n とすると, $O(n)$ の領域と, $O(n \log n)$ の計算量を必要とする．また, 数値実験を通して, best-fit 法の実用性について論じる．

11. 今堀慎治，梅谷俊治，柳浦睦憲:
“資源の有効利用—パッキング技法の貢献—”, ミニシンポジウム 新世代計算限界と地球環境問題, 2007 年 12 月.
概要: 地球環境保全のため，資源やエネルギーを無駄遣いせず，効率的に利用することが求められている．近年，資源の有効利用を通じて環境と経済の両立を図ることを目的とし，3R(廃棄物の発生抑制 (リデュース Reduce)，再使用 (リユース Reuse)，再生利用 (リサイクル Recycle)) をキーワードとする取り組みが始まった．この取り組みは，企業だけでなく個人も高い意識を持ち，社会全体として資源の有効利用を促すものである．本研究では，(古典的ではあるが) 製造段階における資源の有効利用に焦点をあて，廃棄物の発生抑制を狙う．近年提案・改善されてきたパッキング技法を様々な製造業で用いることで，資源の有効利用が可能となり，地球環境問題解決への一助となると考える．特に実用上重要と思われる，長方形詰込み問題と多角形詰込み問題を取り上げ，これらの問題に対する実用的手法を紹介する．

学会大会等

1. 宮本裕一郎, 松井知己:
“対角線付き格子グラフに対するマルチカラーリングの線形時間近似解法”, アルゴリズム研究会, 94, pp. 35–40, 2004 年 3 月.

2. 来嶋秀治, 松井知己:
“離散化 Dirichlet 分布のパーフェクトサンプリング”, アルゴリズム研究会, 94, pp. 65–72, 2004 年 3 月.

3. 宮本裕一郎, 松井知己:
“Linear Time Approximation Algorithm for Multicoloring Lattice Graphs with Diagonals”, 研究集会「最適化：モデリングとアルゴリズム」, 2004 年 3 月.

4. 宮本裕一郎, 松井知己:
“Weighted Lattice Graphs with Diagonals に対するマルチカラーリングの線形時間近似解法”, 日本オペレーションズリサーチ学会, pp. 4–5, 2004 年 3 月.

5. 来嶋秀治, 松井知己:
“Dirichlet 分布に従う perfect sampler”, 日本オペレーションズリサーチ学会, pp. 192-193, 2004 年 3 月.

6. 宮代隆平, 松井知己:
“The Break Minimization Problem”, 日本オペレーションズリサーチ学会, pp. 176–177, 2004 年 3 月.

7. 来嶋秀治, 松井知己:
“離散化 Dirichlet 分布に従うパーフェクトサンプリング”, 日本計算機統計学会, 18, pp. 101–104, 2004 年 5 月.

8. Ryuhei Miyashiro and Tomomi Matsui:
“The break minimization problem is solvable in polynomial time when the optimal value is less than the number of teams”, The 5th International Conference on the Practice and Theory of Automated Timetabling, pp. 535–538, 2004 年.

9. 松井知己, 来嶋秀治:
“離散化 Dirichlet 分布に従うパーフェクトサンプリング法”, 2004 年度統計関連学会連合大会, pp. 227–228, 2004 年 9 月.

10. 宮本祐一郎, 松井知己:
“Multicoloring unit disk graphs on trianglar lattice points”, 日本オペレーションズリサーチ学会, pp. 62–63, 2004 年 9 月.

11. 清見礼, 宇野毅明, 松井知己:
“電力取引における約定量決定問題の高速解法”, 日本オペレーションズリサーチ学会, pp. 220–221, 2004 年 9 月.

12. 宮本裕一郎, 松井知己:
“Multicoloring unit disk graphs on trianglar lattice points”, アルゴリズム研究会, 97, pp. 49–54, 2004 年 10 月.

13. 来嶋秀治, 松井知己:
“閉ジャクソンネットワークに対するパーフェクトサンプリング法”, アルゴリズム研究会, 97, pp. 55–60, 2004 年 10 月.

14. Shuji Kijima and Tomomi Matsui:
“Perfect sampler for closed Jackson network”, Joint Conference, The 2004 NZIMA 29th ACCMCC, 2004 年 12 月.

15. 藤崎・大石:
“コスト保証型レギュレータ設計：確率的解とランダマイズドアルゴリズム”, 第 4 回計測自動制御学会制御部門大会予稿集, pp. 11–14, 2004 年 5 月.

16. T. Nishida and K. Sugihara:
“Robust Numerical Method for the Boat-Sail Distance and Its Applications”, 第 33 回数値解析シンポジウム, pp. 65–68, 2004.

17. T. Nishida and K. Sugihara:
“Extended Fast Marching Method for the Boat-Sail Distance and Its Applications”, Mathematical Aspects of Image Processing and Computer Vision 2004 (MCAS Symposium), 2004.

18. 来嶋秀治, 松井知己:
“閉ジャクソンネットワークに対する多項式時間近似解法”, 待ち行列シンポジウム, pp. 10–15, 2005 年 1 月.

19. 宮本裕一郎, 松井知己:
“Perfectness and Imperfectness of Unit Disk Graphs on Triangular Lattice Points”, LA シンポジウム, 2005 年 2 月.

20. 鈴鹿順美, 宮代隆平, 吉瀬章子, 松井知己:
“リーグ戦の最適会場割当問題に対する SDP 緩和を用いた手法”, 日本オペレーションズリサーチ学会, pp. 110–111, 2005 年 3 月.

21. 鈴鹿順美, 宮代隆平, 吉瀬章子, 松井知己:
“リーグ戦の最適会場割当問題に対する SDP 緩和を用いた手法”, 研究集会「最適化：モデリングとアルゴリズム」, 2004 年 3 月.

22. Ryuhei Miyashiro and Tomomi Matsui:
“Semidefinite Programming Approximation for Combinatorial Optimization and Sports Management”, SIAM 2005 Optimization Conference, 2005 年 5 月.

23. Ayami Suzuka, Ryuhei Miyashiro, Akiko Yoshise, and Tomomi Matsui:
“Numerical Experiences with SDP Approximations for an Optimal Home-Away-Table Problem”, SIAM 2005 Optimization Conference, 2005 年 5 月.

24. 清見礼, 宇野毅明, 松井知己:
“電力取り引きにおける約定量決定問題の高

速解法”, 情報処理学会アルゴリズム研究会, 101, pp. 17–24, 2005 年 5 月.

25. Tomomi Matsui, Ayami Suzuka, Ryuhei Miyashiro and Akiko Yoshise:
“SDP Approximations for a HAT Optimization in Sports Scheduling”, IFORS 2005, 2005 年 7 月.

26. Shuji Kijima and Tomomi Matsui:
“Sampling from multivariate discrete distribution on a simplex”, Randomness and Computation, 2005 年 7 月.

27. 松井知己, 来嶋秀治:
“CFTP を用いた Perfect Sampling”, Randomness and Computation, pp. 27–36, 2005 年 7 月.

28. Shuji Kijima and Tomomi Matsui:
“Polynomial Time Perfect Sampler for Closed Jackson Networks with Single Servers”, ISORA2005, pp. 227–240, 2005 年 8 月.

29. Shuji Kijima and Tomomi Matsui:
“Sampling from Logarithmic Separable Concave Distribution on Simplex”, 日本オペレーションズリサーチ学会, pp. 106–107, 2005 年 9 月.

30. 来嶋秀治, 松井知己:
“閉ジャクソンネットワークに対する多項式時間近似スキームと完璧サンプリング法”, 待行列研究部会, 188, 2005 年 11 月.

31. N. J. A. Harvey, D. R. Karger, and K. Murota:
“Deterministic network coding by matrix completion”, ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms (SODA05), 489–498, 2005 年 1 月.

32. 森口 聡子, 室田 一雄:
“L 凸関数に対する離散ヘッセ行列”, 日本オペレーションズ・リサーチ学会 2005 年度春季研究発表会, 238–239, 2005 年 3 月.

33. 田中健一郎, 室田一雄:
“ジャンプシステム上の M 凸関数の最小化”, 日本応用数理学会 2005 年度年会, 2005 年 9 月.

34. 原辰次, 森口聡子, 室田一雄, 高松吉郎:
“連続・離散ハイブリッド凸関数”, 日本応用数理学会 2005 年度年会, 2005 年 9 月.

35. Y. Oishi:
“A region-dividing approach to robust semidefinite programming and its error bound”, 第 34 回計測自動制御学会制御理論シンポジウム予稿集, pp. 317–324, 2005 年 10 月–11 月.

36. 藤崎・大石・Tempo:
“固定次数コントローラによる安定化のための確率確定混合型アプローチ”, 第 34 回計測自動制御学会制御理論シンポジウム予稿集, pp. 281–284, 2005 年 10 月–11 月.

37. S. Imahori, M. Yagiura, T. Ibaraki:
“Variable Neighborhood Search for the Rectangle Packing Problem”, 6th Metaheuristics International Conference, August 2005.

38. S. Imahori, M. Kushiya, T. Nakashima, K. Sugihara:
“The Traveling Tournament Problem with a Constant Distance Matrix”, INFORMS International Conference, June 2006.

39. 小林佑輔, 室田一雄:
“リンキングシステムによる M 凸関数の変換”, 日本オペレーションズ・リサーチ学会 2006 年度秋季研究発表会, pp. 224–225, 2006 年 9 月.

40. 来嶋秀治, 松井知己:
“閉ジャクソンネットワークに対する MCMC 法”, 電子情報通信学会 2006 年総合大会, pp. S13–S14, 2006 年 3 月.

41. 鈴鹿順美, 宮代隆平, 吉瀬章子, 松井知己:
“スポーツのスケジューリングにおける会場

割当問題", 電子情報通信学会 2006 年総合大会, pp. S15–S16, 2006 年 3 月.

42. 宮代隆平, 松井知己:
"対戦日程計画における Carry-Over Effect 最小化問題", 日本オペレーションズリサーチ学会 2006 年春季研究発表会, pp. 14–15, 2006 年 3 月.

43. Ayami Suzuka, Ryuhei Miyashiro, Akiko Yoshise and Tomomi Matsui:
"Home-away Assignment Problems in Sports Scheduling", INFORMS International Hong Kong 2006 meeting, 2006 年 6 月.

44. Nobutomo Fujiwara, Shinji Imahori, Tomomi Matsui, and Ryuhei Miyashiro:
"The Traveling Tournament Problem with a Constant Distance Matrix", INFORMS International Hong Kong 2006 meeting, 2006 年 6 月.

45. Ryuhei Miyashiro and Tomomi Matsui:
"Minimizing Carry-Over Effects in a Round-Robin Tournament", INFORMS International Hong Kong 2006 meeting, 2006 年 6 月.

46. 宮代隆平, 松井知己:
"スポーツスケジューリングの近年の展開", 日本スポーツ産業学会, pp. 39–40, 2006 年 7 月.

47. Tomomi Matsui and Ryuhei Miyashiro:
"Combinatorial Optimization in Sports Scheduling", Asian Association for Sports Management, 巻号, p. 188, 2006 年 9 月.

48. 岩佐大, 齊藤廣大, 松井知己:
"ハブ空港配置問題の近似解法", 日本オペレーションズリサーチ学会 2006 年秋季研究発表会, pp. 66–67, 2006 年 9 月.

49. 澤井賢一, 黒木裕介, 松井知己:
"フルートの運指のモデル化とその最適化に関する研究", 日本オペレーションズリサーチ学会 2006 年秋季研究発表会, pp. 68–69, 2006 年 9 月.

50. Yusuke Kuroki and Tomomi Matsui:
"Approximation Algorithm for Multidimensional Assignment Problem Arising from Data Association Problem", 日本オペレーションズリサーチ学会 2006 年秋季研究発表会, pp. 74–75, 2006 年 9 月.

51. Yusuke Kuroki and Tomomi Matsui:
"Approximation Algorithm for Multidimensional Assignment Problem Arising from Data Association Problem", 情報処理学会アルゴリズム研究会, 108, pp. 49–56, 2006 年 9 月.

52. Shuji Kijima and Tomomi Matsui:
"Random Sampling via Markov Chain", The International Workshop on Data-Mining and Statistical Science (DMSS2006), 2006 年 9 月.

53. 来嶋秀治, 松井知己:
"多変量離散分布とマルコフ連鎖モンテカルロ法", 日本計算機統計学会第 20 回シンポジウム, pp. 81–84, 2006 年 10 月.

54. 澤井賢一, 黒木裕介, 松井知己, 合原一幸:
"フルートの運指のモデル化とその最適化に関する研究", 音楽情報科学研究会, 68, pp. 13–18, 2006 年 12 月.

55. Y. Oishi and Y. Isaka:
"Reduction of the size of constraints in the region-dividing approach to robust semidefinite programming", 第 35 回計測自動制御学会制御理論シンポジウム予稿集, pp. 321–326, 2006 年 9 月.

56. 藤崎・大石・Tempo:
"固定次数 H^∞ コントローラ設計のための確率確定混合型アプローチ", 第 35 回計測自動制御学会制御理論シンポジウム予稿集, pp. 311–314, 2006 年 9 月.

57. 伊藤 宰, 竹脇 出, 寒野 善博:
"建築骨組の塑性崩壊に対するロバスト性解

析”, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B1, pp. 301–302, 2006 年 9 月.

58. 寒野 善博, 竹脇 出:
“不確定な剛性および外力を有するトラスの静的応答量の楕円体による安全側評価法”, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B1, pp. 249–250, 2006 年 9 月.

59. 宮村 倫司, 寒野 善博, 大崎 純:
“内点法による接触問題の求解に関する検討”, 第 19 回計算力学講演会, 日本機械学会計算力学部門, pp. 69–70, 2006 年 11 月.

60. 寒野 善博, 竹脇 出:
“混合整数計画を用いた不確定外力を受けるトラスの極限解析法”, 第 7 回最適化シンポジウム (OPTIS 2006), pp. 197–202, 2006 年 12 月.

61. T. Nishida and K. Sugihara:
“Stable Marker-Particle Method in a Flow Field”, International Congress on Computational and Applied Mathematics (ICCAM 2006), 2006.

62. T. Nishida and K. Sugihara:
“A Numerical Method for a Shortest Time Problem on Curved Surface with Flow”, First Slovak-Japan Workshop on Computational Mathematics, 2006.

63. T. Nishida and K. Sugihara:
“Extended Fast Marching Method for the Sail Distance”, Czech-Japanese Seminar in Applied Mathematics 2006, 2006.

64. S. Umetani, M. Yagiura, T. Imamichi, S. Imahori, K. Nonobe, T. Ibaraki:
“A Guided Local Search Algorithm based on a Fast Neighborhood Search for the Irregular Strip Packing Problem”, Proceedings of International Symposium on Scheduling 2006, pp. 126-131, July 2006.

65. 黒木裕介, 松井知己:
“Approximation Algorithm for Multidimensional Assignment Problem Minimizing the Sum of Squared Errors”, 研究集会『統計的離散モデリング』, 2007 年 1 月.

66. 松井知己:
“CFTP を用いた厳密サンプリング”, 研究集会『スケールフリーネットワークとランダムグラフ』, 2007 年 1 月.

67. Yusuke KUROKI and Tomomi MATSUI:
“Approximation algorithm for multidimensional assignment problem minimizing the sum of squared errors”, Workshop on Advances in Optimization, 2007 年 4 月.

68. Hadas Shachnai, Lisa Zhang, and Tomomi Matsui:
“On Rank Aggregation of Multiple Orderings in Network Design”, International Network Optimization Conference, 2007 年 4 月 .

69. Ryuhei Miyashiro, Tomomi Matsui:
“Minimizing Carry-Over Effects Value in a Round-Robin Tournament”, 22nd European Conference on Operational Research, p. 221, 2007 年 7 月.

70. 松井知己，宮代隆平:
“ここまで解ける整数計画”, FIT2007 第 6 回情報科学技術フォーラム, 2007 年 9 月.

71. T. Jennawasin and Y. Oishi:
“A region-dividing technique for constructing the sum-of-squares approximations to robust semidefinite programs”, 第 7 回計測自動制御学会制御部門大会予稿集, 2007 年 3 月.

72. Y. Oishi:
“Asymptotic exactness of parameter-dependent Lyapunov functions: an error bound and exactness verification”, 第 36 回計測自動制御学会制御理論シンポジウム予稿集, pp. 391–396, 2007 年 9 月.

73. 寒野 善博, 竹脇 出:
“不確定な外力を受けるトラスの極限解析に対する大域的最適化手法”, 日本建築学会大会

学術講演梗概集, B1, pp. 327–328, 2007 年 8 月.

74. 宮村 倫司, 寒野 善博, 大崎 純:
“内点法と試行錯誤法の組み合わせ手法による摩擦のない接触問題の求解”, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B1, 223–224, 2007 年 8 月.

75. 寒野 善博, 竹脇 出:
“半正定値計画法を用いた構造物の不確定性解析”, 第 19 回 RAMP シンポジウム (日本オペレーションズ・リサーチ学会), pp. 193–207, 2007 年 10 月.

76. S. Imahori, M. Yagiura:
“Theoretical and Experimental Comparisons of Heuristic Algorithms for Rectangle Packing Problems”, 4th ESICUP Meeting, March 2007.

77. S. Umetani, M. Yagiura, T. Imamichi, S. Imahori, K. Nonobe, T. Ibaraki:
“A Local Search Algorithm based on Overlap Minimization for the Irregular Strip Packing Problem”, 7th Metaheuristics International Conference, June 2007.

78. 今堀慎治, 小原泰弘:
“インターネットにおける複数経路設計問題”, SSOR 2007, 2007 年 8 月.

79. S. Imahori, M. Yagiura:
“Improved Best-fit Heuristics for Rectangular Strip Packing and Bin Packing Problems”, International Symposium on Combinatorial Optimization 2008, March 2008.

文部科学省科学研究費補助金 特定領域研究 (課題番号 16092224)

C03: ネットワーク上での社会的効用と個人的効用の対立問題に対するアルゴリズム的研究

本研究は，集合カバー問題，施設配置問題，インターネットの回線利用問題，通信網 (道路網) の混雑による遅延対策問題，などの NP-困難な組合せ最適化問題に対して，利己的な利用者と全体の管理者との間の対立問題をアルゴリズムの観点から研究し，計算困難性・近似困難性のより良い下界と上界を得ることを目的としている．ネットワーク上での全体からの社会的効用の最適化と利己的な各利用者の納得できる個人的効用の達成という対立問題は，問題の下界を証明する際にもしばしば生じる問題で，情報科学の分野ではなじみの問題である．さらに，実際の現場で生じる全体と個との対立の観点からの問題は，NP-困難な組合せ最適化問題であり，整数計画問題として定式化できるものが多い．以上を踏まえて，システムの設計や通信のプロトコル記述と密接に関係してかつ情報科学の原点ともいえる問題の最大充足化問題を中心に数理計画法の有用性とその限界の解明に取り組んできた．そして，最大充足化問題に対して世界最高の高性能近似アルゴリズムを提案した．さらに，アルゴリズムの最近の研究動向を詳細に調査分類した原書の翻訳を通して，最先端の研究調査を行った．また，施設配置問題，インターネットフローの混雑最小化問題，ブロードキャストアルゴリズム，パケットルーティングに対する研究を行い，その成果を学会などで発表した．

研究組織

研究代表者： 浅野 孝夫　中央大学 理工学部
研究分担者： 渡邉 敏正　広島大学 大学院 工学研究科 (平成 17–19 年度)
今井 桂子　中央大学 理工学部 (平成 17–19 年度)

交付決定額 (配分額)

平成 16 年度	2,100,000 円
平成 17 年度	3,300,000 円
平成 18 年度	3,300,000 円
平成 19 年度	3,500,000 円
合　計	12,200,000 円

研究成果の概要

- 学術誌
  Theoretical Computer Science (2006 年), 日本応用数理学会論文誌 (2006), IEICE Transactions (2005,2006,2007,2008 年), など
- 国際会議
  Japanese-Hungarian Symposium (2005 年), IEEE ISCAS (2006 年), Voronoi Diagram Symposium (2005, 2006, 2007 年) など
- 翻訳・執筆
  組合せ最適化 (Combinatorial Optimization) (シュプリンガー東京, 2005 年) など

1 はじめに

本研究は，集合カバー問題，施設配置問題 (集合カバー問題と類似する問題であるが，各受益者はサービスを提供する施設の開設コストを負担するだけでなくサービスを受け取るための接続コストも支払うという問題)，インターネットの回線利用問題，通信網 (道路網) の混雑による遅延対策問題，などの NP-困難な組合せ最適化問題に対して，利己的な利用者と全体の管理者との間の対立問題をアルゴリズムの観点から研究し，計算困難性・近似困難性のより良い下界と上界を得ることを目的としている．

ネットワーク上での全体からの社会的効用の最適化と利己的な各利用者の納得できる個人的効用の達成という対立問題は，問題の下界を証明する際にもしばしば生じる問題で，情報科学の分野ではなじみの問題である．さらに，実際の現場で生じる全体と個との対立の観点からの問題は，NP-困難な組合せ最適化問題であり，整数計画問題として定式化できるものが多い．このような問題に対しては，近似アルゴリズムの理論が強力な道具である．以上を踏まえて，以下の研究を実行した．

1. インターネットや道路網などで社会的効用の最適化と利己的な各利用者の納得できる個人的効用の達成という対立問題の生じる実際の具体例とこれまでの研究を調査した．

2. ゲーム理論や社会学，経済学で扱われている全体と個の対立問題の Nash 均衡に基づく理論的研究を調査した．

3. 集合カバー問題，施設配置問題などの NP-困難な組合せ最適化問題に対して開発された近似アルゴリズムの設計と解析の技法が，本研究に有効であることが既に知られている．そこで，1,2 の調査においては，高性能近似アルゴリズムの分野で最先端の研究をしている内外の研究者と情報およびアイデアを交換した．

4. 1,2,3 の研究調査で得られた問題および集合カバー問題、施設配置問題、インターネットの回線利用問題、通信網 (道路網) の混雑による遅延対策問題などの、NP-困難な組合せ問題に対して、利己的な利用者と全体の管理者との間の対立問題を近似アルゴリズム、グラフ理論、計算幾何学の観点から研究した。また、近似アルゴリズムの設計と解析の技法の有効性を検討した。

具体的には，システムの設計や通信のプロトコル記述と密接に関係してかつ情報科学の原点ともいえる問題の最大充足化問題を中心に数理計画法の有用性とその限界の解明に取り組んできた．そして，最大充足化問題に対して世界最高の高性能近似アルゴリズムを提案した．その成果は Theoretical Computer Science 誌に掲載された．さらに，アルゴリズムの最近の研究動向を詳細に調査分類した原書（B. Korte and J. Vygen: Combinatorial Optimization, Springer, 2005 および J. Kleinberg and E. Tardos: Algorithm Design, Addison-Wesley, 2005）の翻訳を通して，最先端の研究調査を行った．また，施設配置問題，インターネットフローの混雑最小化問題，ブロードキャストアルゴリズム，パケットルーティングに対する研究を行い，その成果を学会や国際会議等で発表した．

以上の研究を通して得られた成果は，研究業績一覧に載せているが，その中の 3 つを以降の節で詳しく述べる．第一は，合流フローの混雑最小化アルゴリズムに対する実験的性能評価と貪欲改善であり、第二は，サービスを考慮した施設配置問題に対する近似アルゴリズムの実験評価であり、第三は、オンデマンドブロードキャスティングに対するアルゴリズムの実験的性能評価である。

2 合流フローの混雑最小化アルゴリズムに対する実験的性能評価と貪欲改善

2.1 序論

ネットワーク・フローの中で,「すべての点においてフローが出て行く辺が 1 本以下」という条件を満たすものを**合流フロー** (confluent flow) という．現実社会において，合流フローとなる例は数多く存在する．いくつかの例を以下に挙げる．

- **インターネット・ルーティング:** インターネットにおける多くのルータは，宛先の情報 (IP アドレスやネットワークアドレス) だけを利用してルーティングを行っている．そこで，

宛先が同一のパケットの流れを抜き出すと，合流フローになる．

- **CDN:** CDN (content delivery network, コンテンツ配信ネットワーク) におけるデータは，オリジナルの配信サーバから各 ISP (Internet service provider) のキャッシュサーバを経てクライアントへと送られる．このデータの流れを逆向きにすると，合流フローになる．
- **避難経路:** ビルやホテルなどの各フロアには非常口誘導灯があり，多くの場合，非常口までの最短経路を示す一方向の矢印がついている．建物内の人が一斉に避難するとき，人の流れは合流フローになる．

他の合流フローの例には，ブロードキャスト・マルチキャストにおけるデータの流れなどがある．

ここでは，まず問題定義を行い，Chen et al. の手法 [1] と提案手法について述べたあと，それらの手法に対する実験的性能評価を行う．

2.2 問題定義

$G = (V, E)$ を有向グラフとし，各点の**需要** (demand) を $d : V \to \mathbb{R}_+$ とする．本論文では G の点数 $|V|$ を n，辺数 $|E|$ を m と表す．また，k 個の**シンク** (sink(s)) を $S = \{s_1, \ldots, s_k\} \subset V$ とし，各シンクの出次数 (out-degree) は 0 であるとする．需要をシンクに流すフロー $f : E \to \mathbb{R}_+$ は，各点 $v \in V - S$ において，フロー保存則

$$\sum_{e=(v,w)\in E} f(e) - \sum_{e=(u,v)\in E} f(e) = d(v)$$

を満たす．また，各点 v において

$$\mathrm{in}(v) = \sum_{e=(u,v)\in E} f(e)$$

としたとき，フロー f の点 v における**混雑** (congestion) を

$$c(v) = d(v) + \mathrm{in}(v), \tag{2.1}$$

フロー f の混雑を

$$\max_{v\in V} c(v) \tag{2.2}$$

と定義する．

合流フローは連結成分 $\{T_1, \ldots, T_k\}$ からなる G の部分グラフになり，各連結成分 T_i は根 s_i に向かう有向木になる．T_i において混雑が最大となる点はシンク s_i であり，その混雑は T_i に含まれる点の需要の合計である (これを $d(T_i)$ と表す)．このとき，フローの混雑は

$$\max_{i=1,\ldots,k} d(T_i) \tag{2.3}$$

となる．

本論文で扱う**合流フローの混雑最小化問題** (congestion minimization confluent flow problem) の目的は，フローの混雑が最小となる合流フローを求めることである．この問題は，NP-困難な点素パス問題 (vertex-disjoint path problem) からのリダクションにより，近似率を $\frac{1}{2}\log_2 k$ より良くすることは NP-困難であることが証明されている [1].

合流フローの概念は 1999 年に発表された Kleinberg, Rabani and Tardos [5] の一部で述べられている．本論文で扱う合流フローの混雑最小化問題は，2003 年に Chen, Rajaraman and Sundaram [2] によって定義されたものであり，[2] ではランダム・ラウンディングを使用した $O(\log^3 n)$-近似アルゴリズム (最適な分割可能フローの混雑を 1 とおいて) が提案されている．また，2004 年には Chen et al. [1] によって $(1 + \log_2 k)$-近似，$(1 + \ln k)$-近似の決定性アルゴリズムが提案されている．合流フロー問題は新しい問題であり，今後，研究が進んでいくと思われる．

近似率の下界

合流フローに似た概念として，分割不可能フロー (unsplittable flow) がある．分割不可能フローとは，「各点の需要を 1 本のパスで流さなければならない」という制約がついたものである．分割不可能フローの混雑最小化問題に対しては Kleinberg [4] や Dinitz, Garg and Goemans [3] によって定数近似アルゴリズムが与えられている．また，これらの制約がなく，自由に分けて流してよいものを分割可能フロー (splittable flow) という．混雑が最小となる分割可能フローは，多項式時間で求めることができる．

本論文では，合流フローの混雑の下界として，分割可能フローを用いる．分割可能フローの最適解が，合流フローの最適解以下となるのは明らかである．Chen et al. [1] において，分割可能フローと合流フローの間のギャップが H_k となる例が示されている．

2.3 Chen et al. (2004) のアルゴリズム [1]

この節では，Chen et al. の $(1+\log_2 k)$-近似アルゴリズムと $(1+\ln k)$-近似アルゴリズムについて述べる．$(1+\ln k)$-近似アルゴリズムは，$(1+\log_2 k)$-近似アルゴリズムの一部を変更したものである．

準備: まず，混雑が最小となる分割可能フロー f を求め (容量を 2 分探索により変化させて最大フローアルゴリズムを適用し，すべての点の需要を流しきることができる最小の容量を求める)，その混雑が 1 となるように，各点の需要と各辺のフローを一様にスケーリングする．このとき，フローが流れない辺をグラフから削除する．最大フローは有向閉路が存在しないようにできるので，このグラフは有向無閉路グラフと仮定できる．この有向無閉路グラフにおいて，シンクに隣接する各点を**境界点** (frontier node) という．また，アルゴリズムが開始されるとき，すべてのシンクは活性であるとする．

$(1+\log_2 k)$-近似アルゴリズム

下記の 1, 2, 3 の条件を順に判定し，一番はじめに条件を満たした操作を行う．

main loop: $|V(G)| > k$ の間，以下を実行する．

1. **node aggregation:** 境界点 v を始点とするすべての辺の終点が同一のシンク s_i のとき，その中の 1 本をマークし，v を s_i に縮約する．さらに，$d(v)$ を $d(s_i)$ に加え，main loop に戻る．

2. **breaking sawtooth cycle:** グラフ G における境界点からシンクへの各辺 $e=(v,s)$ に対して，逆辺 $e_{\mathrm{rev}} = (s,v)$ を付加したグラフを $\hat{G}$ とする．$\hat{G}$ が長さ 3 以上の単純有向閉路 C を持つとき f を以下のように更新する．$C \cap E(G)$ の辺におけるフローの最小値を $f_{\min}$ とする．G の各辺 e について，$e \in C$ ならば $f(e) := f(e) - f_{\min}$ とし，$e_{\mathrm{rev}} \in C$ ならば $f(e) := f(e) + f_{\min}$ とする．フローが 0 の辺をすべて削除し，main loop に戻る．

3. **sink deactivation:** 隣接する境界点が 1 つであるシンクを s_j とする．s_j に隣接する境界点を v，v に隣接する s_j 以外の任意のシンクを s_ℓ とする．このとき，$c(s_j) + f(v,s_\ell) < c(s_\ell) - f(v,s_\ell)$ ならば辺 (v,s_ℓ) を削除し，そこを流れるフローを (v,s_j) に流す．そうでないとき，辺 (v,s_j) を削除し，そこを流れるフローを (v,s_ℓ) に流して，s_j を不活性にする．その後，main loop に戻る．

output: マークされた辺を出力する．

1, 2 の条件を満たさない場合，境界点とシンクを結ぶすべての辺で誘導される G の (単純) 部分グラフは，向きを無視すると森になる．辺がある限り，この森には次数 1 の点が存在し，それが 3 の条件を満たすシンク s_j となる．

$(1+\ln k)$-近似アルゴリズム

$(1+\log_2 k)$-近似アルゴリズムの sink deactivation を以下のように変更する．

3. **parsimonious sink deactivation:** 以下の条件を満たす $G_1 \subseteq G$ を求める:

   - G_1 の各辺は境界点とシンクを結ぶ (G_1 は 2 部グラフになる)．
   - 境界点 v が G_1 に含まれるとき，v を始点とする G の辺はすべて G_1 に含まれる (したがって v から他の境界点に向かう G の辺はない)．
   - シンク s が G_1 に含まれるとき，s を終点とする G の辺はすべて G_1 に含まれる．
   - 各境界点は 2 つ以上のシンクに隣接している．

   G_1 に含まれるシンクの集合を S_1 と表す．G_1 に対して以下の操作を行う．

i. **balancing:** G_1 において，$\sum_{s_i \in S_1} \mathrm{e}^{c(s_i)}$ が最小となるように各辺のフローを再分配し，フローが 0 となった辺を削除する．
ii. $\mathrm{in}(s)$ が最小となるシンク $s \in S_1$ を求める．s に隣接する各境界点 v に対して，辺 (v, s) を流れるフローを v が隣接する他の任意のシンクに流し，辺 (v, s) を削除する．s を不活性にし，$S_1 := S_1 - \{s\}$ とする．
iii. **balancing** を行い，main loop に戻る．

G_1 は以下のように求める．$\hat{G}$ を強連結成分分解し，各強連結成分を点とする有向無閉路グラフにおいて，出次数が 0 となる点集合が G_1 である．

次に，$\sum_{s_i \in S_1} \mathrm{e}^{c(s_i)}$ の最小化を考える．G_1 における境界点の集合を F_1 とする．また，辺 e を流れるフローを x_e と表すとき，balancing における $\sum_{s_i \in S_1} \mathrm{e}^{c(s_i)}$ の最小化は，以下の凸計画 (convex programming) 問題として定式化できる．ここで，y_s はシンク s の混雑を表す変数である．

$$\min \quad \sum_{s \in S_1} \mathrm{e}^{y_s} \tag{2.4}$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{e=(v,w) \in E(G_1)} x_e \geq c(v) \qquad (v \in F_1)$$

$$y_s \geq \sum_{e=(u,s) \in E(G_1)} x_e + d(s) \ (s \in S_1)$$

$$x_e \geq 0 \qquad (e \in E(G_1))$$

制約式中の $c(v)$ は，G における点 v の混雑を表す．また，凸計画問題は，多項式時間で最適解を求めることができる [6, 7].

解析の概要

node aggregation と breaking sawtooth cycle を行ったとき，どの点においても混雑が増加せず，少なくとも 1 本の辺が減少する．

sink deactivation と parsimonious sink deactivation の解析にはポテンシャル関数を用いる．シンク s_i のポテンシャルを

$$\phi(s_i) = 2^{c(s_i)} \tag{2.5}$$

とし，フローのポテンシャルを活性なシンクのポテンシャルの合計とする．このとき，sink deactivation を行ってもフローのポテンシャルは増加しない．アルゴリズムが開始されるとき，各シンクのポテンシャルは高々2 であり (各点の混雑は高々1 なので)，フローのポテンシャルは $2k$ 以下となる．sink deactivation を行ったあともこの値は増加しないので，アルゴリズム終了時の各シンクのポテンシャルは $2k$ 以下であり，各シンクの混雑が $1 + \log_2 k$ $(= \log_2(2k))$ 以下となる．

次にポテンシャル関数を

$$\phi(s_i) = \mathrm{e}^{c(s_i)} \tag{2.6}$$

と変更する．このとき，parsimonious sink deactivation を行ってもフローのポテンシャルは増加しない．よって各シンクのポテンシャルは $\mathrm{e}k$ 以下となるので，アルゴリズム終了時の各シンクの混雑は $1 + \ln k$ 以下となる．

2.4 提案手法

Chen et al. のアルゴリズムで得られた解に対して，貪欲改善を行うと性能が大きく向上する．この節では，本論文で提案する手法について述べる．提案手法は，与えられた合流フローに対して，フローを流す辺を 1 本変えたときの混雑を求め，それが最小となるように解を変更していくものである．

与えられた合流フローにおいて，$d(T_i)$ が最大となる連結成分の集合を $T_{\max} \subseteq \{T_1, \ldots, T_k\}$ と表す (混雑が最大となるものが複数存在する場合もある)．このとき，本論文において提案するアルゴリズムを以下に述べる．

1. $u \in T_{\max}$, $v \notin T_{\max}$ となる各辺 $e = (u, v) \in E(G)$ に対して，点 u からのフローを辺 e に流したときのフローの混雑 (これを $r(e)$ と表す) を計算する．
2. $r(e)$ が最小となる辺 $e_{\min}$ を求める．
3. 現在のフローの混雑を $cong$ としたとき，$cong > r(e_{\min})$ ならば，合流フローを辺 $e_{\min}$ に変更して，1 へ戻る．$cong \leq r(e_{\min})$ ならば現在のフローを出力する．

実験的性能評価

方法

本論文では，以下の 5 手法の比較を行った．

A. $(1+\log_2 k)$-近似アルゴリズム

B. $(1+\ln k)$-近似アルゴリズム

C. $(1+\log_2 k)$-近似アルゴリズムで得られた解を初期解として，提案手法を適用

D. $(1+\ln k)$-近似アルゴリズムで得られた解を初期解として，提案手法を適用

E. 各点の需要を最も近いシンクに流す合流フローを初期解として，提案手法を適用

近似率の下界には，混雑最小の分割可能フローを用いる (2.2節参照)．また，各点数，辺数，シンク数に対して，1,000 個のインスタンスを生成し，それらを A から E のすべての手法で解いた．実験で使用した計算機環境は以下の通りである．

CPU	Intel Pentium4 1.7 GHz
メモリ	1,024 MB RDRAM
OS	Red Hat Linux 7.3
コンパイラ	g++ 2.96

結果

シンク数を変化させた場合　まず，点数・辺数を固定し，シンク数を変化させた．図 1は，点数を 200，辺数を 1,000 として，シンク数を変化させた場合の近似率の平均である．各点の需要は一様乱数で与えた．どの手法を用いた場合にも，シンク数が 100 のときに最も悪い結果となった．シンクが少ない場合や多い場合には，提案手法の結果が非常に良くなったが，シンク数が 100 付近では，従来手法との差が小さくなった．点数を 100，300 として同様の実験を行ったところ，どちらの場合もシンク数が点数のちょうど半分のときに全手法で最悪の結果となり，従来手法と提案手法の性能差も小さくなった．

この原因を調べるために，最適解との比較を行った．大きなインスタンスに対して最適解を求めるのは困難なので，点数 10，辺数 20 のグラフに対してシンク数を変化させる．結果を図 2に示す．グラフは分割可能フローの混雑を 1 としたときの，最適解 (OPT)，手法 B, D の解の平均である．シンク数が点数の半分のときに，下界 (分割可能フロー) と最適解の間のギャップが大きくなっており，最適解と手法 B, D の間には，シンク数による混雑の変化は見られなかった．大きなインスタンスにおいても，同様のことが予想できる．また，点数に対するシンクの割合が等しい場合には，以下のように点数が多い (つまりシンク数が多い) 場合の方が近似率が悪くなる．

インスタンス			近似率 (平均)	
n	m	k	B	D
100	500	50	1.554324	1.527063
200	1,000	100	1.608197	1.564448
300	1,500	150	1.638836	1.588455

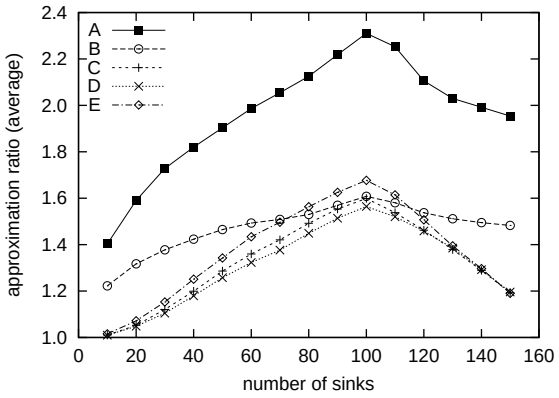


図 1: シンク数の変化

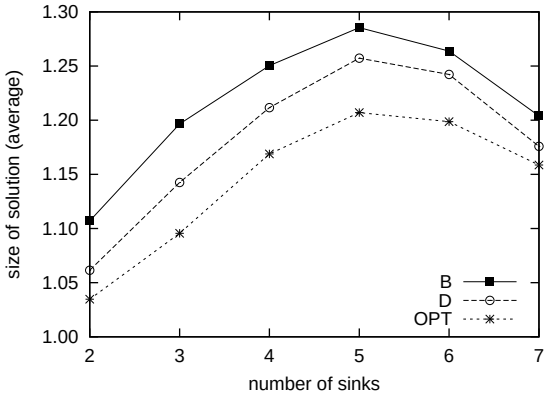


図 2: 最適解との比較

辺数を変化させた場合　次に，点数を 200，シンク数を 20 に固定して辺数 (辺の密度) を変化させた (図 3)．点数に対するシンクの割合が小さいので，提案手法の結果が非常に良くなった．辺数が増加すると，どの手法も得られる解が多少良くなるが，大きな変化はない．

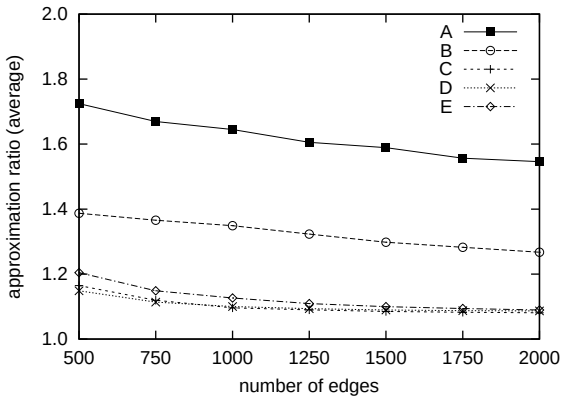


図 3: 辺数の変化

需要を変化させた場合　こんどは，各点の需要をシンクまでの距離によって定めた．各点 v から最も近いシンクまでの距離 (ホップ数) を $h(v)$ とする．このとき，各点の需要を $h(v)+1$ とした場合 (以下**昇順**) と，$1/(h(v)+1)$ とした場合 (以下**降順**) について，一様乱数との比較を行った．表 1 は，それぞれの需要の与え方と手法に対して，点数 200，辺数 1,000，シンク数 50 の 1,000 個のインスタンスにおける近似率の分布である．

手法 A, B は昇順に対してはあまり変化せず，降順の場合には一様乱数の場合より良い結果となった．Chen et al. の手法は，シンクに隣接した点 (境界点) からフローを決定するため，シンクに近い点の需要が大きい降順で良い結果が得られたと考えられる．

手法 C は，一様乱数と比べて昇順，降順ともに悪くなり，特に昇順の結果が悪くなった．C の初期解である A は，降順において一様乱数より良い結果となったが，C の解は悪くなったことから，提案手法の性能は必ずしも初期解の良さに依存するわけではないといえる．

手法 D は，昇順に対してやや悪くなり，降順に対しては一様乱数よりも良い結果になった．悪い結果になった昇順の場合でも，すべての手法の中では最も良い結果になっている．

手法 E は，一様乱数の場合には A, B よりも良い結果になったが，需要を昇順，降順とした場合には，非常に悪い結果になった．昇順では，近似率 4 を超える場合もあった．手法 E の反復回数は，需要を一様乱数で与えた場合には平均 57.8 回だったのに対して，昇順の場合には 3.1 回であり，初期解からの改善がほとんど行われていない (表 3)．

初期解に対する提案手法の解の変化　さらに，初期解に対する提案手法の解の分布を求めた．表 2 は，点数 200，辺数 1,000，シンク数 50，需要を一様乱数で与えたときの，初期解 (手法 B により得られる解) と提案手法の解 (手法 D により得られる解) の関係を表したものである．この例では，B の解の大きさによらず，D の解が $[1.2, 1.3)$ となったものが多かった．また，B の解が悪かったにもかかわらず D の解が良くなったもの (表の左下) や，B の解をほとんど改善できなかったもの (表の右側) もあった．

しかし，需要を昇順，降順としたときに手法 E の解が悪くなったように，提案手法は悪い初期解を与えた場合に必ずしも大きく改善できるわけではない．

計算時間と反復回数　最後に，計算時間と提案手法の反復回数について述べる．手法 C, D, E の計算時間には，初期解を求める時間も含まれる．いくつかの結果を表 3に示す．

提案手法の計算時間は反復回数に依存する．需要を昇順，降順で与えた場合には，一様乱数の場合に比べて，どの手法も反復回数が大きく減少している．これは，一様乱数に比べて局所解が多くなり，すぐに反復が停止してしまうためだと考えられる．また，辺数が多くなると提案手法の反復回数は増加する．

インスタンスが大きくなると，反復回数の少ない手法 D の計算時間が提案手法の中では最も短くなる．手法 D は，5,000 点のインスタンスに対して 3 分程度で解が求まっており，これは実用時間内であるといえる．

表 1: 需要の変化

	一様乱数					昇順					降順				
近似率	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
[1.0, 1.2)	0	0	96	205	24	0	0	0	5	0	0	22	0	227	0
[1.2, 1.4)	0	294	819	754	747	0	370	18	811	0	20	674	388	757	0
[1.4, 1.6)	35	597	79	40	207	53	524	392	170	0	355	291	523	16	20
[1.6, 1.8)	312	102	6	1	22	257	93	437	13	2	404	12	77	0	261
[1.8, 2.0)	379	7	0	0	0	441	13	130	1	26	178	1	12	0	344
[2.0, 2.2)	184	0	0	0	0	161	0	19	0	146	38	0	0	0	250
[2.2, 2.4)	67	0	0	0	0	70	0	4	0	250	4	0	0	0	102
[2.4, 2.6)	21	0	0	0	0	13	0	0	0	213	1	0	0	0	16
[2.6, 2.8)	1	0	0	0	0	5	0	0	0	188	0	0	0	0	5
[2.8, 3.0)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	92	0	0	0	0	2
[3.0, 3.2)	1	0	0	0	0	0	0	0	0	42	0	0	0	0	0
[3.2, 3.4)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21	0	0	0	0	0
[3.4, 3.6)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0
[3.6, 3.8)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0
[3.8, 4.0)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0
[4.0, 4.2)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0

表 2: 初期解と提案手法の解の関係

初期解	提案手法の解 (D の解)							
(B の解)	[1.1, 1.2)	[1.2, 1.3)	[1.3, 1.4)	[1.4, 1.5)	[1.5, 1.6)	[1.6, 1.7)	[1.7, 1.8)	計
[1.2, 1.3)	9	27	0	0	0	0	0	36
[1.3, 1.4)	63	151	44	0	0	0	0	258
[1.4, 1.5)	77	224	77	18	0	0	0	396
[1.5, 1.6)	41	116	35	5	4	0	0	201
[1.6, 1.7)	14	42	20	7	1	0	0	84
[1.7, 1.8)	1	10	3	3	0	0	1	18
[1.8, 1.9)	0	1	2	0	2	0	0	5
[1.9, 2.0)	0	1	1	0	0	0	0	2
計	205	572	182	33	7	0	1	1,000

表 3: 計算時間と反復回数

	インスタンス				A	B	C		D		E	
	n	m	k	需要	時間	時間	時間	反復	時間	反復	時間	反復
1	200	1,000	50	昇順	0.1017	0.2186	0.1130	1.75	0.2330	2.30	0.0115	3.14
2	200	1,000	50	降順	0.0961	0.2150	0.1068	2.04	0.2260	1.21	0.0114	3.59
3	200	1,000	50	乱数	0.0988	0.2279	0.1572	18.51	0.2492	5.67	0.1346	57.84
4	200	1,000	100	乱数	0.1441	0.4933	0.2087	15.79	0.5006	1.04	0.1718	60.97
5	200	2,000	50	乱数	0.1144	0.2421	0.3289	28.46	0.3355	10.12	0.5061	93.44
6	500	5,000	50	乱数	0.4182	0.5990	2.0120	75.10	1.6599	49.32	3.3198	203.6
7	1000	10,000	100	乱数	1.7189	2.2631	8.0462	138.2	6.3063	84.23	17.469	445.1
8	5000	50,000	500	乱数	78.564	73.333	286.20	574.3	187.95	307.3	646.03	2241

計算時間，反復回数ともに平均値である．また，計算時間の単位は秒である．

考察

本節では，Chen et al. の手法と提案手法に対して実験的性能評価を行った．Chen et al. の手法は，理論的に証明されている近似保証よりも良い結果になった．

シンク数が点数の 1/2 のときにはどの手法も悪い結果となったが，これは合流フローの最適解と，下界として用いている分割可能フローとのギャップが大きくなるためだと考えられる．

どのような入力に対しても，提案手法である手法 D の解が最も良くなった．点数 5,000，辺数 50,000，シンク数 500，需要を一様乱数で与えた場合 (表 3の 8)，手法 B の近似率の平均が 1.425 だったのに対して，手法 D では 1.065 に改善された．大きなインスタンスに対して，手法 D は提案手法の中で最も短い計算時間で解が求まり，従来手法と比較しても大きな増加にはなっていない．

初期解に近似保証が与えられていない手法 E は，需要が一様乱数の場合には良い結果が得られるが，昇順，降順とした場合には非常に悪い結果となるので，有用ではないといえる．

2.5 結論

本論文では，合流フローの混雑最小化問題に対する近似アルゴリズムの実験的性能評価を行った．本論文で提案した貪欲改善法は Chen et al. の手法 [1] に比べて，実際的性能が大きく向上した．

今後の課題としては，以下のことが挙げられる．

- 近似率・計算時間に関して，提案手法の理論的解析を行う．
- 新たな手法を提案する．
- モデルを拡張する (シンクの処理能力が異なる場合や多品種の問題など)．

参考文献

[1] J. Chen, R. D. Kleinberg, L. Lovasz, R. Rajaraman, R. Sundaram and A. Vetta: "(Almost) Tight Bounds and Existence Theorems for Confluent Flows", *Proceedings of the 36th Annual ACM Symposium on Theory of Computing*, Chicago, Illinois, pp. 529–538, June 2004.

[2] J. Chen, R. Rajaraman and R. Sundaram: "Meet and Merge: Approximation Algorithms for Confluent Flows", *Proceedings of the 35th Annual ACM Symposium on Theory of Computing*, San Diego, California, pp. 373–382, June 2003.

[3] Y. Dinitz, N. Garg and M. Goemans: "On the Single-Source Unsplittable Flow Problem", *Proceedings of the 39th Annual IEEE Symposium on Foundations of Computer Science*, Palo Alto, California, pp. 290–299, November 1998.

[4] J. Kleinberg: “Single-Source Unsplittable Flow”, *Proceedings of the 37th Annual IEEE Symposium on Foundations of Computer Science*, Burlington, Vermont, pp. 68–77, October 1996.

[5] J. Kleinberg, Y. Rabani and E. Tardos: Fairness in Routing and Load Balancing. *Proceedings of the 40th Annual IEEE Symposium on Foundations of Computer Science*, New York City, pp. 568–578, New York, October 1999.

[6] 小島政和・土谷隆・水野真治・矢部博：“内点法”, 朝倉書店，東京，2001.

[7] 田村明久・村松正和：“工系数学講座 17 最適化法”, 共立出版，東京，2002.

3 サービスを考慮した施設配置問題に対する近似アルゴリズムの実験評価

3.1 序論

施設配置問題は1960年代前半からオペレーションズ・リサーチ (OR) の分野で中心的な問題として幅広く研究されている問題であり, 工場, 倉庫, 学校, 病院などの設立地計画をモデル化した問題といえる. 応用問題としては, データやキャッシュなどのコンテンツ配置問題, ネットワークの安全性 (耐故障性) を考慮した様々なネットワーク設計問題が挙げられる. そのため, 近年のインターネット普及に伴い, ウェブのプロキシサーバーの設置計画などにも応用されており, より現実的な環境に対応させた様々な関連問題も広く研究されている.

本稿では, 施設配置問題の 1 つである**サービスを考慮した施設配置問題** (Facility Location Problem with Service Installation costs) についての研究を述べる [4] . この問題の応用として, 倉庫と小売店間の在庫管理やインターネット問題が挙げられる. 目的は, この問題に対して Shmoys et al. によって発表された 6 近似アルゴリズム [4] よりさらに性能の良いアルゴリズムを開発する事である. 具体的には, **容量制約なし施設配置問題** (Uncapacitated Facility Location Problem) に帰着させることによって得られる手法と, 容量制約なし施設配置問題において現在もっとも近似比率の良い 1.52 近似 [2] , 1.61 近似アルゴリズム [1] の考え方に基づく手法を提案する.

3.2 問題定義

最も有名な施設配置問題は容量制約なし施設配置問題と呼ばれるものである. これは, 入力として n_f 個の開設候補施設の集合 F と n_c 人の利用者集合 C が与えられる. 施設 i には施設を開設するための非負の開設コスト f_i が与えられ, 施設 i と利用者 j との間には非負の接続コスト c_{ij} が与えられる. なお, 接続コストは三角不等式を満たすものとする. この入力において, いくつかの施設を開設し, すべての利用者を適切な施設に接続することを考える.

これに対して, サービスを考慮した施設配置問題では, 入力として n_s 個のサービス集合 S が加えられ, 各利用者にはそれぞれが必要とするサービス $g(j)$ が決められている. また, 各施設 i にサービス l をインストールするためのサービスインストールコスト f_i^l が与えられる. このとき本問題の目的は, 総コスト (開設コストとサービスインストールコストと接続コストの合計) を最小とすることである. すなわち, いくつかの施設を開設し, 開設した施設に対してインストールするサービスを決定し, すべての利用者を必要としているサービスがインストールされている施設に接続させることである.

この問題は, 容量制約なし施設配置問題と同様, 以下のように整数計画問題として定式化することができる.

$$
\begin{aligned}
\min \quad & \sum_{i\in F} f_i y_i + \sum_{i\in F}\sum_{l\in S} f_i^l y_i^l + \sum_{i\in F}\sum_{j\in C} c_{ij} x_{ij} \\
\text{s.t.} \quad & \sum_{i\in F} x_{ij} = 1 \quad (j \in C), \\
& x_{ij} \le y_i^{g(j)} \quad (i \in F, j \in C), \\
& x_{ij} \le y_i \quad (i \in F, j \in C), \\
& x_{ij}, y_i, y_i^l \in \{0,1\} \quad (i \in F, j \in C, l \in S).
\end{aligned}
$$

3.3 Shmoys et al. の手法

ここでは, Shmoys, Swamy and Levi が提案した, 6 近似アルゴリズム [4] について述べる. このアルゴリズムは**施設の優先順位** $\mathcal{O}$ と呼ばれる仮定の下で, 6 近似を達成するアルゴリズムである. まず, 施設の優先順位について述べることにする.

施設の優先順位 $\mathcal{O}$

施設 i と i' を比べたとき, すべてのサービス $l \in S$ に対して,

$$f_i^l \leq f_{i'}^l$$

が成り立つならば, 施設の優先順位は $i \leq i'$ である.

次にアルゴリズムの概観を説明する. 6 近似アルゴリズムはフェイズ 1 とフェイズ 2 から構成される. フェイズ 1 では実行可能な双対問題の解と一時的に開設する (仮開設) 施設集合, 一時的にインストールする (仮インストール) 集合を求める. フェイズ 2 ではフェイズ 1 の仮開設施設, 仮インストール集合から正式に開設, インストールするものを決定し, すべての利用者を必要とするサービスがインストールされている施設に接続する.

アルゴリズム

フェイズ 1

各利用者 j に施設 i への費用 α_j を設ける. 費用 α_j は, 施設 i に接続するための費用, $g(j)$ をインストールするための費用 θ_{ij}, 施設 i を開設させるための費用 β_{ij} からなるものとする.

すべての利用者を未凍結の状態にする. 3 つの条件 (1. 利用者を接続, 2. $g(j)$ をインストール, 3. 施設を開設) が成立したら凍結する. 未凍結の利用者の費用 α_j をすべての割合で増加させながら以下の (a), (b), (c) を繰り返す. すべての利用者が凍結したら終了とする. なお, (a), (b), (c) の条件が同時に成立する場合は, 任意の順番で行なう.

(a) **if** (i, j に対して, $\alpha_j \geq c_{ij}$) **then**
利用者 j を施設 i へ仮接続する.
- **if** ($y_i^{g(j)} = 0$) **then**
θ_{ij} を増やし始める.
- **if** ($y_i^{g(j)} = 1$ かつ $y_i = 0$) **then**
β_{ij} を増やし始める.
- **if** ($y_i^{g(j)} = 1$ かつ $y_i = 1$) **then**
利用者 j を凍結する.

(b) **if** (i, l に対して, $\sum_{j \in G_l} \theta_{ij} = f_i^l$) **then**
施設 i にサービス l を仮インストールする.
- **if** ($y_i = 0$) **then**
β_{ij} を増やし始める.
- **if** ($y_i = 1$) **then**
利用者 j を凍結する.

(c) **if** (i に対して, $\sum_j \beta_{ij} = f_i$)**then**
施設 i を仮開設し, 3 つ条件が揃っている利用者 j を凍結する.

$\alpha_j, \theta_{ij}, \beta_{ij}$ は未凍結な利用者にのみ発生し, 凍結した利用者は各操作に参加しない.

フェイズ 2

フェイズ 2 では正式に開設する施設, インストールするサービス, 利用者の接続を決定する. ここで, F は仮開設した施設の集合を表し, $F_l \subseteq F$ はサービス l が仮インストールされた仮開設施設集合を表す. 施設 $i \in F$ に対して, 仮開設した時刻を t_i とする. また施設 $i \in F_l$ に対して, 施設 i にサービス l がインストールされた時刻を t_{il} とする.

開設施設の決定

仮開設施設集合 F から正式に開設施設集合を決定する. もし利用者 j において, β_{ij} と $\beta_{i'j}$ の両方が**活性** ($\beta_{ij}, \beta_{i'j} > 0$) であるとき, 施設 $i, i' \in F$ は**従属施設**と呼ばれる. このとき, 施設の優先順位 $\mathcal{O}$ をもとに, 仮開設した施設を考え, 極大独立集合 $F' \subset F$ を選ぶ. 集合 F' を開設施設集合とする.

サービスインストールの決定

サービス l と集合 F_l を考える. もし利用者 $j \in G_l$ において, θ_{ij} と $\theta_{i'j}$ の両方が活性 ($\theta_{ij}, \theta_{i'j} > 0$) であるとき, 施設 $i, i' \in F_l$ は**サービス-l-従属**と呼ばれる. このとき, 特定の順序によって集合 F_l から極大独立集合 F_l' を選ぶ. ここでいう特定の順序とは,

(1) 開設施設集合 $F_l \cap F'$ から t_{il} の早い順に考える.
(2) 開設されていない施設 $F_l - F'$ から t_i の早い順に考える.

である. 具体的には, まず特定の順序 (1) に該当される施設を調べていき, すべての施設にサービス l をインストールする (極大独立集合 F_l' に加える). その後, 特定の順序 (2) に該当する施設を調べていき, 施設の優先順位 $\mathcal{O}$ をもとに, 施

設 i と施設 i' が従属施設であるような施設 i' を見つけ, この施設 i' にサービス l をインストールする. この施設 i' は施設 i の隣接施設であり, $\mathbf{nbr}(i)$ と表す. ここで注意すべきことは, $\mathbf{nbr}(i)$ はサービス l ではなく施設 i でのみ決定されるという点である.

接続

すべての利用者 j を, 必要としているサービス $g(j)$ がインストールされているもっとも近い開設施設 i に接続する.

3.4 提案手法

この手法は容量制約なし施設配置問題に帰着させることによって解を得るものである. ポイントは与えられた入力に対して 1 つのサービスに絞って考えると, 容量制約なし施設配置問題と等価となる点である (図 1 参照). 本稿では現在もっとも近似率の良い 1.52 近似アルゴリズムを用いている. 具体的な手順を以下に示す.

1. 与えられた入力に対して, サービス l を必要としている利用者にのみ注目し, 新たに開設コストを $f_i + f_i^l$ とする. これにより, サービスの数 n_s だけ容量制約なし施設配置問題の入力を構築する.

2. 上記の入力に対して, 容量制約なし施設配置問題に対するアルゴリズムを適用する.

3. 得られた n_s 個の解を足し合わせ, 本問題の解とする.

3.5 1.61 近似に基づく提案手法

1.61 近似に基づく提案手法は Jain, Mahdian and Saberi の手法 [1] を本問題に拡張したものである.

アルゴリズムの流れとしては, Shmoys et al. の手法のフェイズ 1 と類似しているが, 利用者が凍結したら, 凍結する要因となった施設以外の施設への貢献を無効にし, 未接続の状態に戻す点が異

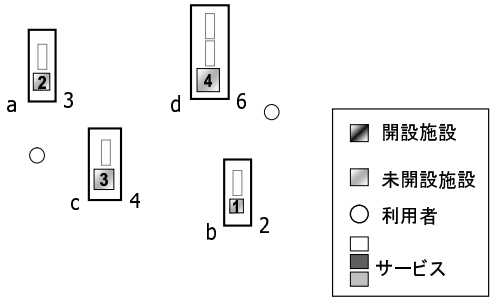


図 4: 帰着の様子

なる. この操作によってアルゴリズムの終了時には, 利用者は凍結する要因となった施設にのみ接続している. さらに, 1.61 近似に基づく提案手法の特徴として重要な点は, 凍結した利用者に対しても総コストが減少するならば接続を変更することである.

アルゴリズムの詳細を述べる前に, 1.61 近似に基づく提案手法で用いられる, 利用者 j による施設 i への貢献 β_{ij} を定義する.

貢献 β_{ij} の定義

- **if** (利用者 j が未凍結) **then**
  $\beta_{ij} = \max\{\alpha_j - c_{ij} - \theta_{ij}, 0\}$ とする.

- **if** (利用者 j が凍結) **then**
  $\beta_{ij} = \max\{c_{i'j} - c_{ij}, 0\}$ とする.

なお, 接続を変更することで, 施設 i' にインストールされているサービスが必要なくなったらアンインストールする. また, 接続している利用者がいなくなったら, 施設 i' は未開設に戻すことにする.

アルゴリズム

各利用者 j に施設 i への費用 α_j を設ける. 費用 α_j は, 施設 i に接続するための費用, $g(j)$ をインストールするための費用 θ_{ij}, 施設 i を開設させるための費用 β_{ij} からなるものとする. 以下詳しい手順を述べる.

すべての利用者を未凍結の状態する. 3 つの条件 (1. 利用者を接続, 2. $g(j)$ をインストール, 3.

施設を開設) が成立したら凍結する．未凍結の利用者の費用 α_j をすべての割合で増加させながら以下の (a), (b), (c) を繰り返す．すべての利用者が凍結したら終了とする．

(a) **if** (i, j に対して, $\alpha_j \geq c_{ij}$) **then**
利用者 j を施設 i に接続する．

- **if** ($y_i^{g(j)} = 0$) **then**
θ_{ij} を増やし始める．
- **if** ($y_i^{g(j)} = 1$ かつ $y_i = 0$) **then**
β_{ij} を増やし始める．
- **if** ($y_i^{g(j)} = 1$ かつ $y_i = 1$) **then**
利用者 j を凍結する．

(b) **if** (i, l に対して, $\sum_j \theta_{ij} = f_i^l$) **then**
施設 i にサービス l をインストールする．

- **if** ($y_i = 0$) **then**
β_{ij} を増やし始める．
- **if** ($y_i = 1$) **then**
利用者 j を凍結する．

(c) **if** (i に対して, $\sum_j \beta_{ij} = f_i$)**then**
施設 i を開設し, 3 つ条件が揃っている利用者 j を凍結する．

- **if** (j が既に i' に接続 かつ $c_{ij} < c_{i'j}$) **then**
利用者 j の接続を i' から i に変更し, 必要なければ施設 i' にインストールされているサービス $g(j)$ をアンインストールする．

3.6 1.52 近似に基づく提案手法

1.52 近似に基づく提案手法は Mahdian, Ye and Zhang の手法 [2] を本問題に拡張したものである．このアルゴリズムにおいて, 総コストが減少する値として $gain$ を用いる．

$gain(i,l)$ の定義
未開設施設 i を開設し, さらにその施設にサービス l をインストールして, 利用者を必要とするサービスがインストールされている最も近い開設施設に接続する．このとき, 接続コストが c から c' になるとすると,

$$gain(i,l) = c - c' - f_i - f_i^l$$

と定義する．

(初期解) スケーリングパラメータを $\delta = 1.504$ とする．このとき, 開設コストを一様に δ 倍した問題に対して, 1.61 近似に基づく提案手法を適用する．

(貪欲改善) 開設コストをもとに戻した問題に対して, 総コストが減少する ($gain(i,l) > 0$ である) かぎり以下を繰り返す．

- **if** (ある未開設施設 i, ある未インストールサービス l の $\frac{gain(i,l)}{f_i}$ が正かつ最大) **then**
施設 i を開設し, サービス l をインストールして, 利用者は必要とするサービスがインストールされている最も近い開設施設に接続を変更する．

3.7 計算機実験 1

実験の方法

今回の実験では,

A. Shmoys et al. が提案する 6 近似アルゴリズム
B. 容量制約なし施設配置問題に帰着させる提案手法 (以下, 提案手法と呼ぶ)
C. 1.61 近似に基づく提案手法 (以下, 1.61 近似ベースとも呼ぶ)
D. 1.52 近似に基づく提案手法 (以下, 1.52 近似ベースとも呼ぶ)

の 4 手法を Visual C++を用いて実装し, 実際的性能評価を行なう．最適解としては, IP を線形計画ソフト NUOPT で解くことで得られる整数解を用いることにする．実験で使用した計算機を表 4に示す．入力には次の入力データを用いこの入力データの一部を変化することで様々な実験を行なう．

標準入力データ 1

(1) 施設は, 整数格子点の座標 (0, 0) から (500,

表 4: 実験環境

CPU	Intel Pentium4 2.8 GHz
メモリ	512 MB RDRAM
OS	Microsoft windows XP
コンパイラ	Visual C++ 6.0

500) の間でランダムに 100 個ずつ発生

(2) 利用者は, 整数格子点の座標 (0, 0) から (500, 500) の間でランダムに 100 個ずつ発生

(3) サービスは 50 種類ずつ発生させ, 利用者が必要とするサービスはランダムに決定

(4) 開設コストは, 1 から 1000 の間のランダムな正整数

(5) サービスインストールコストは, 1 から 300 の間のランダムな正整数

(6) 施設と利用者の接続コストは, 施設と利用者のユークリッド距離

図と表の説明

図は, 実験を 20 回行ったときの平均の近似比率, 以下では特に明記しないかぎり簡略化して近似比率と呼ぶ, を表すもので, 縦軸にはこの近似比率を用いている.

実験 1 施設数 n_f, 利用者数 n_c を変化させた場合

標準入力データの施設数 n_f, 利用者数 n_c をそれぞれ同じ割合で増加した場合の計算機実験を行う. ここでは, 線形計画ソフト NUOPT で IP を解くことのできる $n_f = n_c = 200$ までの計算機実験を行う.

実験 2 サービス数 n_s を変化させた場合

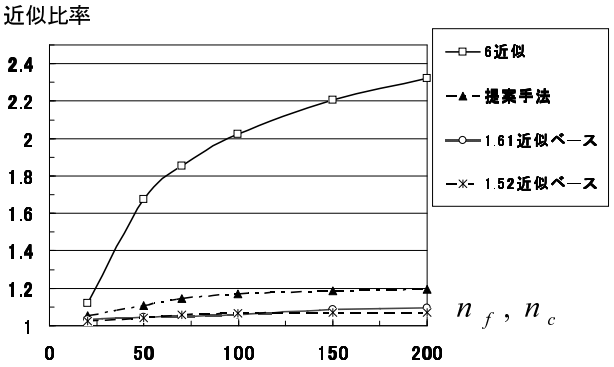
標準入力データのサービス数 n_s を増加した場合の計算機実験を行う.

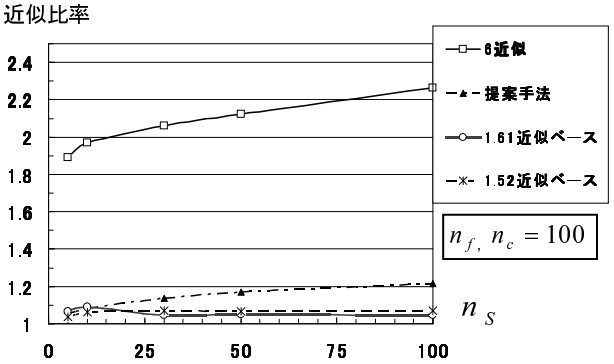
実験 3 計算時間 $(n = \frac{1}{3}(n_f + n_c + n_s))$

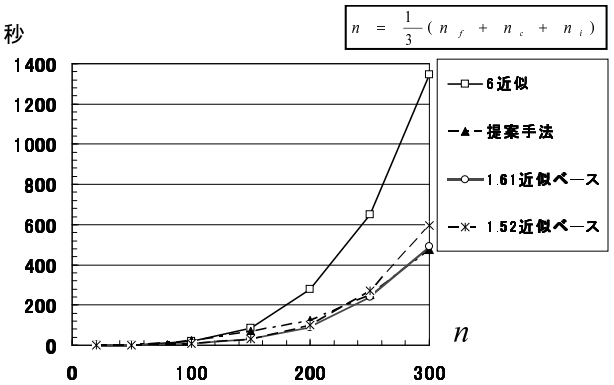
入力のサイズを n とし, 表 4に示した計算機を使用したときの計算時間を算出する.

計算機実験 1 のまとめ

実験 1 より, 提案する 3 つの手法は, Shmoys らによって提案された 6 近似アルゴリズムより, かなり良い値を出力することがわかる. 特に 1.61 近似, 1.52 近似に基づく提案手法はもっとも良い値







を出力している. これは 6 近似アルゴリズムは開設する施設数が極端に少なく, 逆に提案手法は開設する施設数が多いので, 余分なコストがかかってしまっているためと考えられる.

実験 2 より, サービス数 n_s が少ない場合, 提案手法, 1.61 近似, 1.52 近似に基づく手法の間に差がないことがわかる. これは, 提案手法はサービスの数だけ 1.52 近似アルゴリズムを再帰的に実行するので, サービスの数が少なければ, それらを足し合わせた時に生じる誤差が少なくなるためと考えられる.

実験 3 より, 提案する 3 つの手法は計算時間においても短縮できていることがわかる. したがって, 提案する 3 つの手法は近似比率と計算時間の両面で有効な手法であるといえる.

3.8 容量制約つきサービスを考慮した施設配置問題 (ソフト容量版)

サービスを考慮した施設配置問題では, 施設にインストールできるサービスの容量は設けていない. そこで, “容量制約つき” の場合に発展させた, 容量制約つきービスを考慮した施設配置問題 (ソフト容量版) を提唱し, この問題に対する解法を提案する.

問題定義

この問題は, サービスを考慮した施設配置問題の入力において, 各施設 i に整数 u_i が付随していて, 基本的に施設 i は u_i 個のサービスしかインストールできないというものである. ソフト容量版では, 各施設が (コピーして) 何回でも開設可能である.

問題の目的は, 容量制約を守りつつ, 総コスト (開設コストとサービスインストールコストと接続コストの合計) を最小とすることである. すなわち, いくつかの施設を複数回開設し, 開設した施設に対して容量制約を守りつつインストールするサービスを決定し, すべての利用者を必要としているサービスがインストールされている施設に接続させることである. この問題も, 以下のように整数計画問題 (IP) として定式化することができる.

$$
\begin{aligned}
\min \quad & \sum_{i\in F} f_i y_i + \sum_{i\in F}\sum_{l\in S} f_i^l y_i^l + \sum_{i\in F}\sum_{j\in C} c_{ij} x_{ij} \\
\text{s.t.} \quad & \sum_{i\in F} x_{ij} = 1 \quad (j \in C), \\
& x_{ij} \le y_i^{g(j)} \quad (i \in F, j \in C), \\
& x_{ij} \le y_i \quad (i \in F, j \in C), \\
& \sum_{l\in S} y_i^l \le u_i y_i \quad (i \in F), \\
& x_{ij},\ y_i^l \in \{0,1\} \quad (i \in F, j \in C, l \in S), \\
& y_i \text{は非負の整数} \quad (i \in F).
\end{aligned}
\tag{3.1}
$$

サービスを考慮した施設配置問題との違いは, 制約式 (1) が追加されたことである. この制約式は, 施設 i が k 個のサービスをインストールするとき, 施設を $\lceil k/u_i \rceil$ 回開設しなければならないことを表している.

提案手法 1

ここでは, 容量制約つきサービスを考慮した施設配置問題に対する解法を提案する. この提案手法 1 は Mahdian, Ye and Zhang [2] によって提案された 2.89 近似アルゴリズムの考え方も基にしている. 具体的には, サービスを考慮した施設配置問題に帰着させ, サービスを考慮した施設配置問題に対するアルゴリズムを適用するというものである.

---

1. 施設 i を開設するための開設コストを $(1-\lambda)f_i$, 施設 i にサービス l をインストールするためのサービスインストールコストを $f_i^l + \lambda_i \cdot \frac{f_i}{u_i}$ とするサービスを考慮した施設配置問題の入力を構築する.
2. 1 で作られた入力において, スケーリングパラメータを γ_c/γ_f とする. このとき, 開設コストを一様に γ_c/γ_f 倍する.
3. 上記の入力に対して, サービスを考慮した施設配置問題に対するアルゴリズムを適用する.
4. 結果を, 各施設 $i \in F$ に対して $\lceil \sum_{l\in S} y_i^l/u_i \rceil$ 回施設を開設した容量制約つきービスを考慮した施設配置問題の解として出力する.

提案手法 2

この節では, Mahdian, Ye and Zhang [3] によって提案された 2 近似アルゴリズムの考え方に基づく提案手法 2 を述べる.

---

1. 施設 i を開設するための開設コストを

$$f_i(k) = \begin{cases} 0 & (k = 0) \\ (1 + \frac{k-1}{u_i}) f_i & (k \geq 1) \end{cases}$$

とし, サービスを考慮した施設配置問題の入力を構築する. ここでいう k とは施設にインストールするサービス数を指す.

2. 上記の入力に対して, サービスを考慮した施設配置問題に対するアルゴリズムを適用する.

3. 結果を, 各施設 $i \in F$ に対して $\lceil \sum_{l \in S} y_i^l / u_i \rceil$ 回施設を開設した容量制約つきービスを考慮した施設配置問題の解として出力する.

3.9 計算機実験 2

実験の方法

今回の実験では,

A. 1.61 近似に基づく手法を適用した提案手法 1

B. 1.61 近似に基づく手法を適用した提案手法 2

の 2 手法を Visual C++を用いて実装し, 実際的性能評価を行なう. 最適解としては, IP を線形計画ソフト NUOPT で解くことで得られる整数解を用いることにする. 入力には次の入力データを用い, この入力データの一部を変化することで様々な実験を行なう.

標準入力データ 2

(1) 施設は, 整数格子点の座標 (0, 0) から (500, 500) の間でランダムに 100 個ずつ発生

(2) 利用者は, 整数格子点の座標 (0, 0) から (500, 500) の間でランダムに 100 個ずつ発生

(3) サービスは 50 種類ずつ発生させ, 利用者が必要とするサービスはランダムに決定

(4) 開設コストは, 1 から 1000 の間のランダムな正整数

(5) 施設の容量は, 1 から 10 の間のランダムな正整数

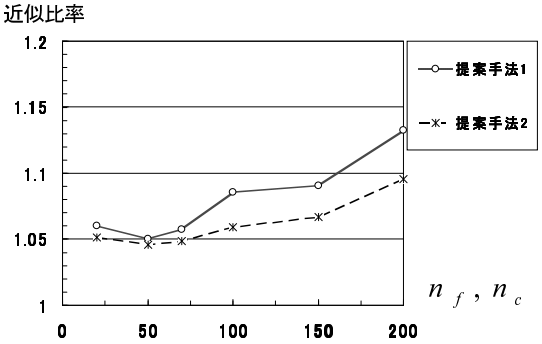
(6) サービスインストールコストは, 1 から 300 の間のランダムな正整数

(7) 施設と利用者の接続コストは, 施設と利用者のユークリッド距離

図と表の説明

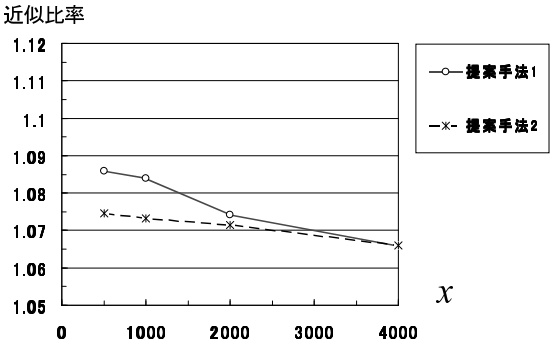
図は, 実験を 20 回行ったときの平均の近似比率, 以下では特に明記しないかぎり簡略化して近似比率と呼ぶ, を表すもので, 縦軸にはこの近似比率を用いている.

実験 1 施設数 n_f, 利用者数 n_c を変化させた場合



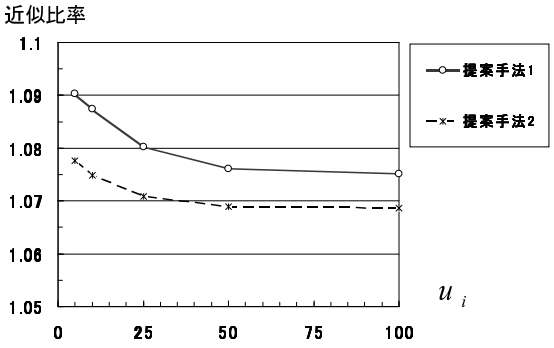
実験 2 接続コストを変化させた場合

座標範囲 (x, x) を広くすることで接続コストが増加した場合を考える.



実験 3 施設の容量 u_i を変化させた場合

施設の容量 u_i を一定とし, 標準入力データの施設の容量 u_i を増加した場合の計算機実験を行う.



計算機実験 2 のまとめ

実験 1 より, 提案手法 1 と提案手法 2 が共に良い近似比率を得ているといえる. これより, 容量制約つきサービスを考慮した施設配置問題に対する解法として, サービスを考慮した施設配置問題に帰着させる手法は有効であるといえる. また提案手法 2 の方が良い近似比率を得ている要因としては, 容量制約つきサービスを考慮した施設配置問題の場合においても, 2 近似アルゴリズムの考え方が優れているためと考えられる.

実験 2 より, 接続コストを増加させていくと, 提案手法 1 と提案手法 2 が共に近似比率が良くなっていることがわかる. これは提案手法 1 と提案手法 2 が共に, 1.61 近似に基づく提案手法に帰着させる際に, 開設コストの影響を受けやすいためと考えられる. つまり, 接続コストを増加することで開設コストの影響が少なくなり, 1.61 近似に基づく提案手法の本来の性能が発揮されるため, 近似比率がよくなっているといえる.

実験 3 より, 容量の制約を厳しくした場合, 提案手法 1 と提案手法 2 が共に近似比率が悪くなっていることがわかる. そして容量の制約を緩めていくにつれて, 1.61 近似アルゴリズムの本来の性能が発揮され, 近似比率が良くなっている.

3.10 結論

本論文では, Shmoys, Swamy and Levi が提唱したサービスを考慮した施設配置問題を扱った. この問題に対して, 3 つの手法を提案し, Shmoys et al. によって提案された 6 近似アルゴリズムと実験的性能を比較, 検討することによって, 提案手法が近似比率と計算時間の両面で高い性能を持つことを示すことができた. さらに, この問題をより現実に近い “容量制約つき” の場合に発展させ, 容量制約つきサービスを考慮した施設配置問題に対する手法も提案した. 計算機実験により, サービスを考慮した施設配置問題に帰着させるこの手法は有効であることを示すことができた.

今後の課題としては, これらの提案手法に対して理論的な近似保証を与えることが挙げられる. また, 計算機実験において結果が悪くなるような入力データを発見し, 実験を行うことも挙げられる.

参考文献

[1] K. Jain, M. Mahdian and A. Saberi: A new greedy approach for facility location problems. *ACM Symposium on Theory of Computing*, 2002, pp. 731–740.

[2] M. Mahdian, Y. Ye and J. Zhang: Improved approximation algorithms for metric facility location problems. *APPROX*, http://www.mit.edu/~mahdian/pub.html, 2002.

[3] M. Mahdian, Y. Ye and J. Zhang: A 2-Approximation Algorithm for the Soft-Capacitated Facility Location Problem. http://www.mit.edu/~mahdian/pub.html, *APPROX*, 2003.

[4] D. B. Shmoys, C. Swamy and R. Levi: Facility Location with Service Installation Costs. *Proceedings of the Fifteenth Annual ACM-SIAM Symposium on Disctrete Algorithms*, 2004, pp. 1081–1090.

4 オンデマンド・データ・ブロードキャスティング

4.1 はじめに

オンデマンド・データ・ブロードキャスティングに関する問題の 1 つに, 平均レスポンスタイム

最小化問題がある．この問題に対し，Bansal et al. によって 2005 年に $O(\sqrt{n})$ 近似アルゴリズムが提案され，2006 年には 2005 年の手法を発展させた $O((\log n)^2/\log\log n)$ 近似アルゴリズムが提案されている．

本稿では，この 2 つのアルゴリズムを実装し，計算機実験を行うことでその性能を評価した．また，2006 年の手法を改善することで，その計算時間を短縮できることを示す．

4.2 問題定義

オンデマンド・データ・ブロードキャスティング (on-demand data broadcasting) とは，サーバに n 種類のページが存在し，クライアントから受信したリクエストに対してサーバがページを送信するというものである．ここで，サーバは送信するページをブロードキャストすることにより，すべてのクライアントにページを送信することができる．

このオンデマンド・データ・ブロードキャスティングの中に，**平均レスポンスタイム最小化問題** (average response time minimization problem) がある．これは，サーバに存在するページ数 n と，時刻 t でのページ p に対するクライアントからのリクエストの量 r_t^p が入力として与えられる．リクエスト r_t^p は，サーバが時刻 $t'(t'>t)$ にページ p を送信することにより満たされ，この待ち時間 $t'-t$ を**レスポンスタイム** (response time) と呼ぶ．本問題の目的は，すべてのリクエストを満たし，平均のレスポンスタイムを最小化することである．

また，単位時間にサーバが送信できるページの数が k であるとき，k-スピードと呼ばれる．$k=1$ のとき，NP-困難であることが証明されており，本稿においてもこれを扱っていく．

この問題は，以下のように整数計画問題として定式化できる．なお T は，リクエストの最大到着時刻である．$x_{tt'}^p$ は時刻 t でのページ p に対するリクエストが時刻 t' に満たされたとき 1 となり，そうでないときは 0 である．また，$y_{t'}^p$ は時刻 t' でページ p を送信したとき 1 となり，そうでないときは 0 である．

$$
\begin{aligned}
\min \quad & \sum_p \sum_t \sum_{t'=t+1}^{T+n} (t'-t)\cdot r_t^p \cdot x_{tt'}^p \\
\text{s.t.} \quad & y_{t'}^p - x_{tt'}^p \geq 0, && \forall p,t,t'>t \\
& \sum_{t'=t+1}^{T+n} x_{tt'}^p \geq 1, && \forall p,t \\
& \sum_p y_{t'}^p \leq 1, && \forall t' \\
& x_{tt'}^p \in \{0,1\}, && \forall p,t,t' \\
& y_{t'}^p \in \{0,1\}, && \forall p,t'
\end{aligned}
$$

4.3 Bansal et al. (2005) の手法 [1]

2005 年の手法は，緩和した整数計画問題を解き，その解を利用して**暫定的スケジュール** (tentative schedule) を求め，キューを用いてこの暫定的スケジュールを実行可能なスケジュールにするというものである．

以下にアルゴリズムの詳細を示す．

1. 緩和した整数計画問題を解き LP 解を求める．
2. 各ページ p ごとに $\alpha_p \in [0,1]$ をランダムに定める．
3. $i=0,1,2,\cdots$ に対し，LP 解においてページ p が合計で $i+\alpha$ 送信された時刻を t_i^p とする．
4. $t_0^p, t_1^p, \cdots$ をページ p の暫定的スケジュールとする．
5. キューを使用して，暫定的なスケジュールを実行可能なスケジュールにする．

4.4 Bansal et al. (2006) の手法 [2]

本質的には，2005 年の手法の発展である．2006 年の手法における 2 つの改良点を以下に示す．

(改良点 1) 各ページ p ごとに**ブロック** (block) と呼ばれる時間枠 $B(p,i)$ を定め，そのブロック内で暫定的スケジュールを求める．

(改良点 2) 各ブロックごとに $\alpha \in [0,1]$ を定める．このとき，新たに線形計画問題を定義し α の値を決定する．

α の値は，$\delta = 1/(T+n)^2$ の j (j は正整数) 倍としてよいことが証明されている [2]．ここで，$B(p,i,j)$ を $B(p,i)$ 内で $\alpha = \delta \cdot j$ と決定したときの暫定的スケジュールであるとする．

以下の線形計画問題を解くことで，α の値を決定することができる．

$$\min \quad \sum_p \sum_i \sum_j R(B(p,i,j)) \cdot z_{pij}$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_j z_{pij} = 1, \qquad \forall p,i \tag{4.1}$$

$$\sum_p \sum_i \sum_j w(B(p,i,j),t) \cdot z_{pij} = 1, \ \forall t \tag{4.2}$$

$$z_{pij} \geq 0, \qquad \forall p,i,j \tag{4.3}$$

なお，$R(B(p,i,j))$ は $\alpha = \delta \cdot j$ を選んだときの $B(p,i)$ 内のレスポンスタイムであり，$w(B(p,i,j),t)$ は，$t \in B(p,i,j)$ であるとき 1 となり，それ以外は 0 となる．また，制約式 (2) は各時刻 t において，1 ページのみ送信するということを表している．

この式の整数解を求めるために，制約式 (2) を緩和する．具体的には $I = (t_1, t_2]$ とし，この時間枠内で送信するページをまとめて選択する．そして，線形計画問題を解き，$z_{pij} = 1$ となった変数を除き線形計画問題を再構築する．これを $O(\log(T+n))$ 回繰り返し，整数解を求める．

4.5 提案手法

(2005 年の手法に対する改善)

2005 年の手法では，まだ満たされていないリクエストがあるにも関わらず，サーバがどのページも送信しない時刻が存在する．そこで，その時刻に満たされていないリクエストが最も多いページを送信することで，解を改善する．

(2006 年の手法に対する改善)

2006 年の手法では，α の値を定めるために，線形計画問題を $O(\log(T+n))$ 回解く必要がある．また，j は 1 から $(T+n)^2$ の値をとるために，変数の数が膨大になってしまう．この 2 つの点から，2006 年の手法では，計算時間がかかってしまう．そこで，本稿では計算時間を減らすために，j の値を制限する．

具体的には，各 $B(p,i)$ に対しすべての j で暫定的スケジュールを求め，連続した同じ暫定的スケジュールを 1 つの j として考える．暫定的スケジュールが変わったときの j を新たな j と考え，同様に繰り返していく．これをすべての $B(p,i)$ について行い，j の値を制限していく．

4.6 実験的性能評価

2005 年，2006 年の手法とそれぞれに改善を加えたものを，近似率と計算時間の観点から比較した．実験のデータは，両実験共に 100 種類の入力に対し平均を取ったものであり，入力である各時刻のリクエスト数には 0 から 5 の一様乱数を与えている．また，両実験共にリクエストの最大到着時刻を 30 と固定し，ページ数を変化させている．なお，最適解としては整数計画問題を線形計画ソフト NUOPT で解くことにより得られる整数解を用いた．

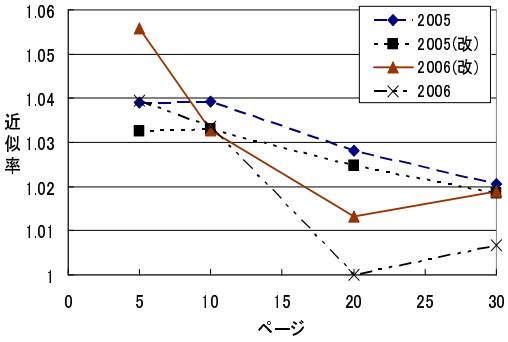


図 5: 近似率に対する比較

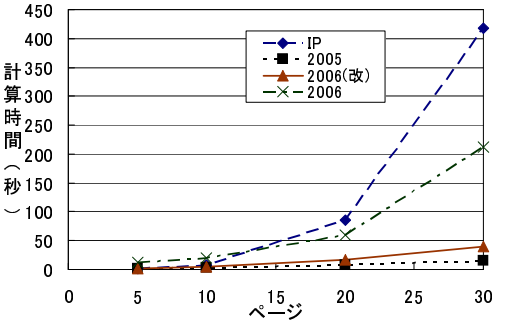


図 6: 計算時間に対する比較

図 5が近似率について比較したグラフである．ページ数が少ないときには 2006 年の手法は，改善前，改善後共にあまり有効ではないのがわかる．これは，ページ数やリクエストの最大到着時刻が

小さいときにはブロックの概念が効果的ではなくなってしまうためだと考えられる．ページ数が多くなるにつれて，2006 年の手法がよい近似率を求めていることがわかる．

図 6が計算時間について比較したグラフである．こちらに関しては，整数計画問題の計算時間についても比較した．また，2005 年の計算時間は，提案手法も合わせた計算時間である．このグラフを見ると，改善した 2006 年の手法が，改善していない 2006 年の手法よりかなり計算時間が短いことがわかる．

4.7 結論

2006 年の手法に対する改善は，もともとの手法の計算時間を大幅に短縮することができた．特に，ページ数やリクエストの最大到着時刻が大きいほど効果的である．2006 年の手法は，近似率に関する結果を見てもわかるように，大きな入力に対して有効である．大きな入力では計算時間が大きくなってしまうのを，改善を加えることで，短縮することができた．

以上のことから，2006 年の手法に対する改善は有用であるといえる．

参考文献

[1] N. Bansal, M. Charikar, S. Khanna, J. S. Naor: Approximating the Average Response Time in Broadcast Scheduling. *Proceedings of the 16th Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms*, Vancouver, January 2005, pp. 215–221.

[2] N. Bansal, D. Coppersmith, M. Sviridenko: Improved Approximation Algorithms for Broadcast Scheduling. *Proceedings of the 17th Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms*, Miami, January 2006, pp. 344–353.

研究業績一覧

著書

1. 浅野孝夫，平田富夫，小野孝男，浅野泰仁: “組合せ最適化：理論とアルゴリズム（B. Korte and J. Vygen: Combinatorial Optimization: Theory and Algorithm, Springer, 3rd edition, 2006 の日本語訳）”, シュプリンガー・フェアラーク東京, 2005 年 11 月.
概要: 組合せ最適化の全般を簡潔にまとめた本で最新の成果まで含む内容である。全部で 22 章 664 ページからなり、その詳細は以下の通りである。第 1 章 はじめに、第 2 章 グラフ、第 3 章 線形計画法、第 4 章 線形計画アルゴリズム、第 5 章 整数計画法、第 6 章 全点木と有向木、第 7 章 最短パス、第 8 章 ネットワークフロー、第 9 章 最小費用フロー、第 10 章 最大マッチング、第 11 章 重み付きマッチング、第 12 章 b-マッチングと T-ジョイン、第 13 章 マトロイド、 第 14 章 マトロイドの一般化、第 15 章 NP-完全性、第 16 章 近似アルゴリズム、第 17 章 ナップサック問題、第 18 章 ビンパッキング問題、第 19 章 多品種フローと辺素パス、第 20 章ネットワーク設計問題、第 21 章 巡回セールスマン問題、第 22 章 施設配置問題。

2. 浅野孝夫，浅野泰仁，小野孝男，平田富夫: “アルゴリズムデザイン（J. Kleinberg and E. Tardos: Algorithm Design, Addison-Wesley, 2005 の日本語訳）”, 共立出版, 2008 年 5 月出版予定.
概要: アルゴリズム設計のパラダイムを系統的に整理し、アルゴリズム研究の今後の指針を示す斬新な内容である。全部で 14 章 792 ページからなり、その詳細は以下の通りである。第 1 章 はじめに：いくつかの代表的問題、第 2 章 アルゴリズム解析の基礎、第 3 章 グラフ、第 4 章 グリーディアルゴリズム、第 5 章 分割統治法、第 6 章 動的計画法、第 7 章 ネットワークフロー、第 8 章 **NP** と計算困難性、第 9 章 **PSAPCE**：クラス **NP** を超える問題のクラス、第 10 章 計算容易性の拡大、第 11 章 近似アルゴリズム、第 12 章 局所探索、第 13 章 乱択アルゴリズム、 第 14 章 エピローグ：永遠に動作するアルゴリズム。

学術論文

1. Takao Asano:
“An Improvement of Yannakakis’ Algo-

rithm for MAX SAT", Journal of the Institute of Sceince and Engineering, Chuo University, 9, pp.57 – 77, 2004.
概要: MAX SAT (maximum satisfiability problem) is stated as follows: given a set of clauses with weights, find a truth assignment that maximizes the sum of the weights of the satisfied clauses. In this paper, we consider approximation algorithms for MAX SAT proposed by Yannakakis and Goemans-Williamson and present an approximation algorithm which is an improvement of Yannakakis' algorithm. Although Yannakakis' original algorithm has no better performance guarantee than Goemans-Williamson, our improved algorithm has a better performance guarantee and leads to a 0.770-approximation algorithm.

2. 浅野孝夫，九里史郎，上ヶ原誠:
"施設配置問題とスケジューリング問題に対する高性能近似アルゴリズムの実験的性能評価", 中央大学理工学研究所論文集, 9, pp.79 – 97, 2004.
概要: NP-困難な問題に対して多項式時間で最適解を求めるのは困難であるので，最適解に近い近似解を多項式時間で求めて使用することが多い．$\alpha \geq 1$ に対して，最小化問題ならば，いつも最適解の α 倍以下の解を入力サイズの多項式時間で求めるようなアルゴリズムを α-近似アルゴリズムという．最小化問題に対する α を近似率あるいは精度保証という．一方，実時間処理アルゴリズムでは，入力情報が得られた時点で，それ以降の情報がくる前に処理を実行 (確定) することが要求される．入力の情報がすべて得られてから処理を実行する通常のアルゴリズムに対して，このようなアルゴリズムはオンラインアルゴリズムと呼ばれる．最小化問題に対して，オンラインアルゴリズムによって得られる目的関数値が (オフライン環境における) 最適な目的関数値の ρ 倍以下であるとき，ρ を競合比という．精度保証付きの近似アルゴリズムやオンラインアルゴリズムの競合比の研究は近年精力的に実行され，様々なアルゴリズムが提案されてきている．本論文では，そのようなアルゴリズムから，施設配置問題とスケジューリング問題に対して理論面から最近提案された代表的アルゴリズムを選び，それらを実装して，その実際的性能評価を与える．さらに，実際の状況に適したヒューリスティクスを提案し，その有効性も検証する．

3. Takao Asano:
"An Improved Analysis of Goemans and Williamson's LP-relaxation for MAX SAT", Theoretical Computer Science, 354, 339–353, 2006.
概要: For MAX SAT, which is a well-known NP-hard problem, many approximation algorithms have been proposed. Two types of best approximation algorithms for MAX SAT were proposed by Asano and Williamson: one with best *proven* performance guarantee 0.7846 and the other with performance guarantee 0.8331 if the performance guarantee of the Zwick's algorithm for MAX SAT is as conjectured. Both algorithms are based on their sharpened analysis of Goemans and Williamson's LP-relaxation for MAX SAT. In this paper, we present an improved analysis which is simpler than the previous analysis. Furthermore, algorithms based on this analysis will play a role as a better building block in designing an improved approximation algorithm for MAX SAT. Actually we show an example that algorithms based on this analysis lead to approximation algorithms with performance guarantee 0.7877 and conjectured performance guarantee 0.8353 which are slightly better than the best known corresponding performance guarantees 0.7846 and 0.8331 respectively.

4. Satoshi Taoka, Masahiro Yamauchi, and Toshimasa Watanabe:
"Improved Heuristic Algorithms for Minimizing Initial Markings of Petri Nets", IEICE Trans. Fundamentals, Vol. E88-A, No.

11, pp. 3051–3061, November, 2005.

概要: The minimum initial marking problem MIM of Petri nets is described as follows: "Given a Petri net and a firing count vector X, find an initial marking M_0, with the minimum total token number, for which there is a sequence δ of transitions such that each transition t appears exactly $X(t)$ times in δ, the first transition is enabled at M_0 and the rest can be fired one by one subsequently." This paper proposes two heuristic algorithms AAD and AMIM+ and shows the following (1) and (2) through experimental results: (1) AAD is more capable than any other known algorithm; (2) AMIM+ can produce M_0, with a small number of tokens, even if other algorithms are too slow to compute M_0 as the size of an input instance gets very large.

5. Toshiya Mashima, Satoshi Taoka, and Toshimasa Watanabe:
"A 2-Approximation Algorithm to $(k+1)$-Edge-Connect a Specified Set of Vertices in a k-Edge-Connected Graph", IEICE Trans. Fundamentals, Vol. E88-A, No. 5, pp. 1290–1300, May, 2005.

概要: The $(k+\delta)$-edge-connectivity augmentation problem for a specified set of vertices ($(k+\delta)$ECA-SV) is defined as follows: "Given an undirected graph $G=(V,E)$, a specified set of vertices $\Gamma \subseteq V$, a subgraph $G'=(V,E')$ with $\lambda(\Gamma;G')=k$ of G and a cost function c: $E \rightarrow Z^+$ (nonnegative integers), find a set $E^* \subseteq E-E'$ of edges, each connecting distinct vertices of V, of minimum total cost such that $\lambda(\Gamma;G'') \geq k+\delta$ for $G''=(V,E' \cup E^*)$," where $\lambda(\Gamma;G'')$ is the minimum value of the maximum number of edge disjoint paths between any pair of vertices in Γ of G''. The paper proposes an $O(\Delta+|V||E|)$ time 2-approximation algorithm FSAR for $(k+1)$ECA-SV with a restriction $\lambda(V;G')=\lambda(\Gamma;G')$, where Δ is the time complexity of constructing a structural graph of a given graph G'.

6. Takanori Fukuoka, Toshiya Mashima, Satoshi Taoka, and Toshimasa Watanabe:
"A Linear Time Algorithm for Bi-Connectivity Augmentation of Graphs with Upper Bounds on Vertex-Degree Increase", IEICE Trans. Fundamentals, Vol. E88-A, No. 4, pp. 954–963, April, 2005.

概要: The 2-vertex-connectivity augmentation problem of a graph with degree constraints, 2VCA-DC, is defined as follows: "Given an undirected graph $G=(V,E)$ and an upper bound $a(v;G) \in Z^+ \cup \{\infty\}$ on vertex-degree increase for each $v \in V$, find a smallest set E' of edges such that $(V,E \cup E')$ has at least two internally-disjoint paths between any pair of vertices in V and such that vertex-degree increase of each $v \in V$ by the addition of E' to G is at most $a(v;G)$, that, for any $v \in V$, the set of nonnegative integers." In this paper we show that checking the existence of a feasible solution and finding an optimum solution to 2VCA-DC can be done in $O(|V|+|E|)$ time.

7. Akihiro Taguchi, Atsushi Iriboshi, Satoshi Taoka, and Toshimasa Watanabe:
"Siphon-Trap-based Algorithms for Efficiently Computing Petri Net Invariants", IEICE Trans. Fundamentals, Vol. E88-A, No. 4, pp. 964–971, April, 2005.

概要: A siphon-trap(ST) of a Petri net $N=(P,T,E,\alpha,\beta)$ is defined as a set S of places such that, for any transition t, there is an edge from t to a place of S if and only if there is an edge from a place of S to t. A P-invariant is a $|P|$-dimensional vector Y with $Y^t \cdot A = \bar{0}$ for the place-transition inc idence matrix A of N. The *Fourier-Motzkin* method is well-known for computing all such invariants. This method, however, has a critical deficiency such that, even

if a given Perti net N has any invariant, it is likely that no invariants are output because of memory overflow in storing intermediary vectors as candidates for invariants. In this paper, we propose an algorithm STFM_N for computing minimal-support nonnegative integer invariants: it tries to decrease the number of such candidate vectors in order to overcome this deficiency, by restricting computation of invariants to siphon-traps. It is shown, through experimental results, that STFM_N has high possibility of finding, if any, more existing algorithm.

8. Toshiya Mashima, Satoshi Taoka, and Toshimasa Watanabe:
"On Minimum k-Edge-Connectivity Augmentation for Specified Vertices of a Graph with Upper Bounds on Vertex-Degree", IEICE Trans. Fundamentals, Vol. E89-A, No. 4, pp. 1042–1048, April, 2006.
概要: The k-edge-connectivity augmentation problem for a specified set of vertices of a graph with degree constraints, kECA-SV-DC, is defined as follows: "Given an undirected multigraph $G = (V, E)$, a specified set of vertices $S \subseteq V$ and a function $g : V \to Z^+ \cup \{\infty\}$, find a smallest set E' of edges such that $(V, E \cup E')$ has at least k edge-disjoint paths between any pair of vertices in S and such that, for any $v \in V$, E' includes at most $g(v)$ edges incident to v, where Z^+ is the set of nonnegative integers." This paper first shows polynomial time solvability of kECA-SV-DC and then gives a linear time algorithm for 2ECA-SV-DC.

9. Satoshi Taoka, Kazuya Watanabe, and Toshimasa Watanabe:
"Experimental Evaluation of Maximum-Supply Partitioning Algorithms for Demand-Supply Graphs", IEICE Trans. Fundamentals, Vol. E89-A, No. 4, pp. 1049–1057, April, 2006.
概要: Let $G = (D \cup S, E)$ be an undirected graph with a vertex set $D \cup S$ and an (undirected) edge set E, where the vertex set is partitioned into two subsets, a demand vertex set D and a supply vertex set S. We assume that $D \neq \emptyset$ and $S \neq \emptyset$ in this paper. Each demand or supply vertex v has a positive real number $d(v)$ or $s(v)$, called the demand or supply of v, respectively. For any subset $V' \subseteq D \cup S$, the demand of V' is defined by $d(V') = \sum_{v \in V' \cap D} d(v)$ if $V' \cap D \neq \emptyset$ or $d(V') = 0$ if $V' \cap D = \emptyset$. Let $s(S) = \sum_{v \in S} s(v)$. Any partition $\pi = \{V_1, \ldots, V_r\}$ ($|S| \leq r \leq |D \cup S|$) of $D \cup S$ is called a feasible partition of G if and only if π satisfies the following (1) and (2) for any $k = 1, \ldots, r$: (1) $|V_k \cap S| \leq 1$, and (2) if $V_k \cap S = \{u_k\}$ then the induced subgraph $G[V_k]$ of G is connected and $d(V_k) \leq s(u_k)$. The demand $d(\pi)$ of π is defined by $d(\pi) = \sum_{V_k \cap S \neq \emptyset} d(V_k)$. The "Maximum-Supply Partitioning Problem (**MSPP**)" is to find a feasible partition π of G such that $d(\pi)$ is maximum among all feasible partitions of G. We implemented not only existing algorithms for obtainity heuristic or optimum solutions to **MSPP** but also those that are corrected or improved from existing ones. In this paper we show comparison of their capability based on computational experiments.

10. Toshiya Mashima, Takanori Fukuoka, Satoshi Taoka, and Toshimasa Watanabe:
"Bi-Connectivity Augmentation for Specified Vertices of a Graph with Upper Bounds on Vertex-Degree Increase", IEICE Trans. Information and Systems, Vol. E89-D, No. 2, pp. 751–762, February, 2006.
概要: The 2-vertex-connectivity augmentation problem for a specified set of vertices of a graph with degree constraints, 2VCA-SV-DC, is defined as follows: "Given an undirected graph $G = (V, E)$, a specified set of vertices $S \subseteq V$ with $|S| \geq 3$ and a

function $g : V \to Z^+ \cup \{\infty\}$, find a smallest set E' of edges such that $(V, E \cup E')$ has at least two internally-disjoint paths between any pair of vertices in S and such that vertex-degree increase of each $v \in V$ by the addition of E' to G is at most $g(v)$, where Z^+ is the set of nonnegative integers." This paper shows a linear time algorithm for 2VCA-SV-DC.

11. Satoshi Taoka, Dasisuke Takafuji, Takashi Iguchi, and Toshimasa Watanabe:
"Performance Comparison of Algorithms for the Dynamic Shortest Path Problem", IEICE Trans. Fundamentals, Vol. E90-A, No. 4, pp. 847–856, April, 2007.
概要: An edge-weighted directed graph is referred to as a *network* in this paper, and an edge operation is an operation that increases or decreases an edge weight. Decreasing an edge weight from the infinite to a finite value or increasing any edge weight from a finite one to the infinite corresponds to addition or deletion of this edge, respectively. The *dynamic shortest path problem* (**DSPP** for short) is defined by "Given any network with a specified vertex (denoted as s), and any sequence of edge operations, construct a shortest path tree of each network obtained by executing those edge operations one by one in the order of the sequence." As an application, fast routing for an interior network using link state protocols, such as OSPF and IS-IS, requires solving **DSPP** efficiently. In this paper, among as many existing algorithms as possible, including those which execute several edge operations simultaneously, fundamental and/or important algorithms are implemented and their capability is evaluated based on the results of computational experiments.

12. Dasisuke Takafuji, Satoshi Taoka, Yasunori Nishikawa, and Toshimasa Watanabe:
"Enhanced Approximation Algorithms for Maximum Weight Matchings of Graphs", IEICE Trans. Fundamentals, Vol. 91-A, No. 4, April, 2008, (掲載予定).
概要: The subject of this paper is *maximum weight matchings* of graphs. An edge set M of a given graph G is called a *matching* if and only if any pair of edges in M share no endvertices. A *maximum weight matching* is a matching whose total weight (total sum of edge-weights) is maximum among those of G. The *maximum weight matching* problem (**MWM** for short) is to find a maximum weight matching of a given graph. Polynomial algorithms for finding an optimum solution to **MWM** have already been proposed: for example, an $O(|V|^4)$ time algorithm proposed by J. Edmonds, and an $O(|E||V| \log |V|)$ time algorithm proposed by H. N. Gabow. Some applications require obtaining a matching of large total weight (not necessarily a maximum one) in realistic computing time. These existing algorithms, however, spend extremely long computing time as the size of a given graph becomes large, and several fast approximation algorithms for **MWM** have been proposed. In this paper, we propose six approximation algorithms $GRS+$, GRS_F+, GRS_R+, GRS_S+, LAM_a+, LAM_as+. They are enhanced from known approximation ones by adding some postprocessings that consist of improved search of weight augmenting paths. Their performance is evaluated through results of computing experiment.

13. Satoshi Taoka, Dasisuke Takafuji, and Toshimasa Watanabe:
"Enhancing PC Cluster-based Parallel Branch-and-Bound Algorithms for the Graph Coloring Problem", IEICE Trans. Fundamentals, Vol. 91-A, No. 4, April, 2008, (掲載予定).
概要: A branch-and-bound algorithm (BB

for short) is the most general technique to deal with various combinatorial optimization problems. Even if it is used, computation time is likely to increase exponentially. So we consider its parallelization to reduce it. It has been reported that the computation time of a parallel BB heavily depends upon node-variable selection strategies. And, in case of a parallel BB, it is also necessary to prevent increase in communication time. So, it is important to pay attention to how many and what kind of nodes are to be transferred (called sending-node selection strategy). In this paper, for the graph coloring problem, we propose some sending-node selection strategies for a parallel BB algorithm by adopting MPI for parallelization and experimentally evaluate how these strategies affect computation time of a parallel BB on a PC cluster network.

14. 大音真由美，今井桂子:
"Holevo 容量を求める外近似切除平面アルゴリズム", 電子情報通信学会論文誌, Vol.J88-A, No.8, pp.922-925, 2005 年 9 月.
概要: 量子通信路容量の代表的なものである Holevo 容量を計算する問題について，これまでのアルゴリズムと違い，近似精度および問題インスタンスの難しさに応じて計算時間が適応的に変わる外近似切除平面法に基づく近似アルゴリズムを与える.

15. Shigeki Toriumi, Hisao Endo and Keiko Imai:
"Label Size Maximization for Rectangular Node Labels", IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, Vol.E89-A, No.4, pp.1035-1041, April, 2006.
概要: The label placement problem is one of the most important problems in geographic information systems, cartography, graph drawing, and graphical interface design. In this paper, we considered the label size maximization problem for points with axes-parallel rectangular labels that correspond to character strings and have different widths based on the number of characters. We propose an algorithm for computing the optimum size for the label size maximization problem in the 2-position model and a polynomial time algorithm for the problem in the 4-position model. Our algorithm cannot obtain the maximum value in the 4-position model because the label size maximization problem in the 4-position model is NP-hard. However, our algorithm is efficient in practice, as shown by computational experiments. Further, computational results for JR trains, subways and major private railroads in Tokyo are presented.

16. 松本雄介，鈴木一平，今井桂子:
"多角形障害物のある領域における車両型ロボットの安全で滑らかな経路生成", 日本応用数理学会論文誌, Vol.16, No.4, pp.631-649, 2006 年 12 月.
概要: In this paper, we consider a path planning problem for a car-like robot with nonholonomic constraints in motion planning. The path should be smooth and the steering angle has to change continuously. Various techniques have been poposed. However, those methods vary the angular velocity or they do not give a consideration to obstacles in the work space. We propose a new method of finding a path by the Voronoi graph and the clothoid curve which has uniform angular velocity. By using the obtained path, the robot can move smoothly and avoid collision with the obstacles as far as possible.

研究会等

1. 二瓶浩一，浅野孝夫:
"合流フローの混雑最小化アルゴリズムに対する実験的性能評価と貪欲改善", 情報処理学

会アルゴリズム研究会報告, AL98-7, pp.41–48, 2004.
概要: ネットワーク・フローの中で,「すべての点においてフローが出て行く辺が 1 本以下」という条件を満たすものを合流フローという．インターネット・ルーティングをはじめとして，現実社会において合流フローとなる例は数多く存在する．入力として，有向グラフ・複数のシンク・各点の需要が与えられたとき，すべての点の需要をシンクに流す合流フローの中で混雑が最小になるものを求める問題を，合流フローの混雑最小化問題という．本論文では，この問題に対して 2004 年に Chen et al. によって提案された手法の実験的性能評価を行い，得られた解に貪欲改善を加えると性能が大きく向上することを示す．

2. 佐々木 浩高，浅野孝夫:
“Reverse-Fit を用いた単純な 2 次元ビンパッキングのアルゴリズム”, 情報処理学会アルゴリズム研究会報告, AL93-16, pp.113–120, 2004.
概要: 高さと幅が 1 以下の長方形を辺の長さが 1 の単位正方形に重ならないようにパッキングするとき, 必要な正方形の個数を最小にするという問題が 2 次元ビンパッキング問題である．この問題に対して, 2002 年に発表された Caprara のアルゴリズムは漸近近似率が良くなるように作られたものであり, 現実的な入力においては多くの場合良い結果とならない．本論文では現実的な入力において良い結果を出せるようなアルゴリズムを提案し, 計算機上に実装して実験的性能の比較評価を行う．

3. Koichi Nihei, Takao Asano:
“Congestion Minimization Confluent Flow Problem: Experimental Evaluation of Algorithms”, Proc. 4th Japanese-Hungarian Symposium on Discrete Mathematics and Its Applications, 16–24, June 2005.
概要: A flow is called confluent if, at every node, all the flow leaves along a single edge. The congestion minimization confluent flow problem is stated as follows: given a directed graph, sinks and nonnegative demands on nodes, find a minimum congestion confluent flow that routes all the demands to sinks. For this problem, a $(1+\ln k)$-approximation algorithm was proposed by Chen et al. in 2004, where k is the number of sinks. In this paper, we evaluate its experimental performance and show that a greedy post-processing works well.

4. 中塩 英良，浅野孝夫:
“サービスを考慮した施設配置問題に対する近似アルゴリズムの実験評価”, 情報処理学会アルゴリズム研究会報告, AL105-2, pp.9–16, 2006.
概要: 施設配置問題の 1 つとして, 2004 年に Shmoys, Swamy and Levi が提唱したサービスを考慮した施設配置問題がある．本論文ではこの問題に対して, 容量制約なし施設配置問題に帰着させることによって得られる手法, 容量制約なし施設配置問題において現在もっとも近似率の良い 1.52 近似に基づく手法と, 1.61 近似基づく手法を提案する．そして, Shmoys et al. によって提案された 6 近似アルゴリズムの実験的性能評価を行い, 提案手法が高い性能を持つことを示す．

5. M. Tamura, S. Taoka and T. Watanabe:
“Improving Performance Ratios by Repeatedly Executing Approximation Algorithms for Several Graph Connectivity Related Problems”, Proc. 4th Japanese-Hungarian Symposium on Discrete Mathematics and Its Applications, pp. 385–397, June 2005.
概要: 与えられた辺重み付きグラフの最小重み強連結グラフを求める問題と最小重み k 辺連結グラフを求める問題を考える．いずれの問題もネットワーク構成に関わる基礎的な問題であり、NP-困難であることが知られている。本稿では，これらの問題に対する $(2-2/|V|)$-近似アルゴリズムを提案する．また，与えられたグラフの辺連結度を 1 だけ増加させる最小重みの付加辺集合を求める問題を考え，この問題に対する $(2-2/|L|)$-近似アルゴリズムを提案する．ここで，L は与

えられたグラフから構成される木の葉集合である.

6. S. Shimada, S. Taoka, M. Yamauchi and Toshimasa Watanabe:
"An Improved Heuristic Algorithm FEIDEQ for the Maximum Legal Firing Sequence Problem of Petri Nets", Proc. 2006 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS 2006), pp. 4483–4486, May, 2006.
概要: The paper proposes a heuristic algorithm *FEIDEQ* for the Maximum Legal Firing Sequence problem of Petri nets (**MAX LFS** for short) and evaluates it based on experimental results. *FEIDEQ* is improved from *FSDC* that has been known to have the highest capability among the existing ones, by incorporating a new selection rule of transitions. In our experimental evaluation, *FEIDEQ* is applied to and, for each of 2040 of them, existence of an optimum solution is guaranteed. Among these 2040 test problems, *FEIDEQ* has produced an optimum solution to each of 1864(91.3%) test problems, showing about 2.57 times that of *FSDC*, the best one so far. Furthermore, by adopting improved backtracking, average CPU time is about 0.86 times that of *FSDC* for general nets.

7. H. Sumiyoshi, D. Takafuji, S. Taoka and T. Watanabe:
"Experiment-based Evaluation of Algorithm Performance for the 2- or 3-Vertex Connectivity Augmentation Problem", Tech. Rep. CAS2007 IEICE of Japan, 掲載ページ, January, 2007.
概要: The k-vertex-connectivity augmentation problem (kVCA, for short) is defined by "Given a graph $G = (V, E)$, a spanning subgraph $G_0 = (V, E')$ of G and a nonnegative weight function $c : E \to Z^+$, find a set $E'' \subseteq E - E'$ with the minimum total weight, such that $G_0 + E'' = (V, E' \cup E'')$ has at least k internally disjoint paths between any pair of vertices in V." Although these problems have wide application, such as constructing survivable networks, it is known to be NP-complete. So some approximation or heuristic algorithms have been proposed. In this paper, we propose heuristic algorithms for 2VCA or 3VCA, and evaluate them through computational experiments.

8. Kimikazu Kato, Mayumi Oto, Hiroshi Imai, Keiko Imai:
"Voronoi Diagrams for Pure 1-qubit Quantum States", Proceedings of the 2nd International Symposium on Voronoi Diagrams, pp.293-299, October, 2005.
概要: 1-qubit quantum states form a space called the three-dimensional Bloch ball. To compute Holevo capacity, Voronoi diagrams in the Bloch ball with respect to the quantum divergence have been used as a powerful tool. These diagrams basically treat mixed quantum states corresponding to points in the interior of the Bloch ball. Due to the existence of logarithm in the quantum divergence, the diagrams are not defined on pure quantum states corresponding to points on the two-dimensional sphere. This paper first defines the Voronoi diagrams for pure quantum states on the Bloch sphere by the Fubini-Study distance and the Bures distance. We also introduce other Voronoi diagrams on the sphere obtained by taking a limit of Voronoi diagrams for mixed quantum states by the quantum divergences in the Bloch ball. These diagrams are shown to be equivalent to the ordinary Voronoi diagram on the sphere.

9. Yusuke Yokosuka and Keiko Imai:
"Guaranteed-Quality Anisotropic Mesh Generation for Domains with Curves", 22nd European Workshop on Computational Geometry, pp.125-128, March 28,

2006.

概要: Anisotropic mesh generation is important for interpolation and numerical modeling. Recently, Labelle and Shewchuk proposed a two dimensional guaranteed-quality anisotropic mesh generation algorithm called Voronoi refinement. This algorithm treats only domains with straight lines as inputs. However, in many applications, input domains have many curves and the exact representation of curves is needed for efficient numerical modeling. In this paper, we extend the Voronoi refinement and propose it as a guaranteed-quality anisotropic mesh generation algorithm for domains with curves. Some experimental results are also shown.

10. Kimikazu Kato, Mayumi Oto, Keiko Imai, and Hiroshi Imai:
"On a Geometric Structure of Pure Multiqubit Quantum States and Its Applicability to a Numerical Computation", Proceedings of the 3rd International Symposium on Voronoi Diagrams in Science and Engineering, pp.48-53, July, 2006.
概要: For one-qubit pure quantum states, it is already proved that the Voronoi diagrams with respect to two distances – Euclidean distance and the quantum divergence – coincide. This fact is a support for a known method to calculate the Holevo capacity. To consider an applicability of this method to quantum states of a higher level system, it is essential to check if the coincidence of the Voronoi diagrams also occurs. In this paper, we show a negative result for that expectation. In other words, we mathematically prove that those diagrams no longer coincide in a higher dimension. That indicates that the method used in one-qubit case to calculate the Holevo capacity might not be effective in a higher dimension.

11. Kimikazu Kato, Mayumi Oto, Hiroshi Imai, Keiko Imai, :
"Voronoi Diagrams and a Numerical Estimation of a Quantum Channel Capacity", 2nd Doctoral Workshop on Mathematical and Engineering Methods in Computer Science, pp.69-76, October, 2006.
概要: We give a new geometric interpretation of quantum pure states. Using Voronoi diagrams, we reinterpret the structure of the space of pure states as a subspace of the quantum state space. In addition to the known coincidence of some Voronoi diagrams for one-qubit pure states, we will show that even for mixed one-qubit states, as far as sites are given as pure states, the Voronoi diagram with respect to some distances – the divergence, the Bures distance, and the Euclidean distance – are all the same. As to higher level pure quantum states, for the divergence, the Fubini-Study distance, and the Bures distance, the coincidence of the diagrams still holds, while the coincidence of the diagrams with respect to the divergence and the Euclidean distance no longer holds. That fact has a significant meaning when we try to apply the method used for a numerical estimation of a one-qubit quantum channel capacity to a higher level system.

12. Yusuke Matsumoto, Keiko Imai, and Hisashi Suzuki:
"Curved Voronoi Diagrams Consisting of Influence Areas with Differentiable Boundaries", Proceedings of the 4th International Symposium on Voronoi Diagrams in Science and Engineering, pp.270-275, July, 2007.
概要: We consider the influence area diagrams consisting of areas with differentiable boundaries. The diagram is called a curved Voronoi diagram. Any level of differentiability can be used in the definition of the curved Voronoi diagram depending on its applications. One of the applications is

path planning for car-like robots in an area with obstacles. Car-like robots can easily drive along a path consisting of clothoid curve segments, circular arcs, and line segments. Therefore, we discuss a method for constructing a clothoid curve, circle, and line (CCL) diagram.

13. Kimikazu Kato, Hiroshi Imai and Keiko Imai:
"Error Analysis of Numerical Calculation about One-Qubit Quantum Channel Capacity", Proceedings of the 4th International Symposium on Voronoi Diagrams in Science and Engineering, pp.276-281, July, 2007.
概要: Numerical estimation of quantum channel capacity is an important problem both theoretically and practically. Oto et al. showed an effective approximation algorithm to compute a capacity of a one-qubit quantum channel. In this paper, we show an explicit upper bound for the error of their algorithm. The algorithm might be repeatedly used in the verification of a certain equation or inequality. The bound of the error we give is a criterion to decide when to stop that iteration, and eventually it can improve the performance of the whole process of the calculation.

学会大会等

1. 浅野孝夫:
"高性能近似アルゴリズムの設計と解析—線形計画緩和からのアプローチ", 第 15 回 RAMP シンポジウム論文集, 日本オペレーションズ・リサーチ学会, pp.86 — 103, 2003.

2. 中塩英良, 浅野孝夫:
"施設配置問題に対する近似アルゴリズムの実験評価", 日本オペレーションズ・リサーチ学会 2004 年度秋季研究発表会アブストラクト集, pp.64 – 65, 2004 年 9 月.

3. 浅野孝夫:
"近似アルゴリズムの近似性能の改善とその限界 (特別講演)", 日本数学会 2004 年度年会応用数学分科会講演アブストラクト, pp.46 – 65, 2005 年 3 月.

文部科学省科学研究費補助金 特定領域研究 (課題番号 16092215)

C04: 実践的な列挙アルゴリズムの理論構築

列挙アルゴリズムとは，与えられた問題の解や特定のクラスに属する構造の全てを見つけ出力するアルゴリズムのことである．当研究課題では，列挙アルゴリズムに関する工学的な応用をふまえた列挙問題のモデル化と，実用的な意味でも高速であるアルゴリズムの設計手法の研究を行った．結果，データマイニングにおける中心的な問題である頻出パターン発見問題，木や順列などのクラス列挙問題，コーダルグラフや擬似クリークといった部分グラフ構造の列挙問題などいくつもの問題に対して高速な計算を実現するための理論を構築することができた．特に頻出集合発見問題に対するアルゴリズムは，国際的なプログラミングコンテストで優勝し，基礎理論が実用上も大きな力を発揮することを示した．また，列挙の技法を応用し，グラフ構造の総数数え上げのアルゴリズムや，組合せ最適化問題への高速アルゴリズムの開発も行った．

研究組織

研究代表者：	宇野 毅明	国立情報学研究所 情報学プリンシプル研究系
研究分担者：	中野 眞一	群馬大学 工学部
	松井 泰子	東海大学 理学部 (平成 17–19 年度)
	岡本 吉央	東京工業大学 情報理工学研究科 (平成 17–19 年度)
	清見 礼	北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 (平成 19 年度)

交付決定額 (配分額)

平成 16 年度	3,400,000 円
平成 17 年度	3,000,000 円
平成 18 年度	3,000,000 円
平成 19 年度	3,400,000 円
合　計	12,800,000 円

研究成果の概要

- T. Uno, M. Kiyomi, H. Arimura, LCM ver.2: Efficient Mining Algorithms for Frequent/Closed/Maximal Itemsets, *IEEE ICDM'04 Workshop FIMI'04*.
- S. Nakano, T. Uno, Constant Time Generation of Trees with Specified Diameter, *Lecture Notes in Computer Science* 3353.
- K. Makino, T. Uno, New Algorithms for Enumerating All Maximal Cliques, *Lecture Notes in Computer Science* 3111.
- M. Kiyomi, S. Kijima and T. Uno, Listing Chordal Graphs and Interval Graphs, *WG 2006, Lecture Notes in Computer Science* 4271.
- Y. Okamoto, R. Uehara, and T. Uno, Counting the Number of Independent Sets in Chordal Graphs, *Journal of Discrete Algorithms*, to appear.

1　はじめに

近年，データを中心とした研究が盛んに行われている．現実の問題解決を計算などの数理によって解決するという従来からの研究においては，研究の中で積極的に考慮される部分は現実に即しかつ理論的に意味のある構造を持ったモデルと，その構造を上手に利用する高速高精度な計算手法の開発であった．しかし，実際の運用においては，計算を行う作業より，むしろデータを収集する作業がボトルネックとなることが多い．一方で，IT 技術の発達により，データを簡単に大量に蓄積することが可能となっている．そのため，問題解決を行うとき，入手可能なデータを利用して，いかに問題を解くか，というような研究が行われるようになってきている．これは，いわばデータ中心の科学である．このような傾向は，当研究課題が計画された 2000 年当初から顕著になってきた．データ中心の科学では，基本的にデータは問題解決のために集められたものではなく，そのために不完全性，エラー，粒度の違いなど，多くの潜在的な問題を抱えている．そのため，従来の最適化によるアプローチのような，単一の，極みを表現する解のみを出力する，というアプローチは運用上好ましくなく，列挙のように，多くの解を出力するアプローチが求められている．

これらのデータ中心科学は，人工知能，データベースなどの情報学分野を中心に発達しており，物理・化学をはじめとする他の科学領域，および産業分野でも応用されている．これらの分野では，web データ，テキストデータ，実験データ，金融時系列データ，顧客データ，販売データ，事故・故障記録データ，ゲノム配列など，機械的に収集された巨大なデータがますます増加し，そこから有用な情報を探し出すためには，列挙のような網羅的なアプローチを高速に行うことが肝要となっている．このため，列挙を用いたモデル化とその解法は活発に研究されてきたが，複雑な構造の列挙は容易でないため，簡単な構造，あるいはその列挙手法に工夫を加えて構築したモデル・解法の研究が増加している．

中でも，機械学習やデータマイニングといった，数理的な対象を分析し，知識を発見する分野においては，従来の最適化的なアプローチは効果が小さいことが多い．これは，データにゆらぎやエラーがあること，および目的を数理的に表現することが困難であるため，直接的に設定された目的関数を良くすることが必ずしも現実での有用さにつながるとは限らないことに起因する．そのため，ある程度明らかな数理的条件を満たす解を列挙し，その中から有望な解を見つけるというアプローチが多くとられている．これは，評価関数が複雑で，評価関数の計算自体に時間がかかる場合にも有効である．また，その他にも，モデルの変化にともなう解法の設計変更に対しても柔軟に対応が可能である．そのため，このように条件を全て満たす解を列挙する計算手法である，列挙アルゴリズムの重要性が高まってきている．これが，当研究課題を計画した動機となっている．

列挙アルゴリズムは，非常に多くの解を出力することが多い．そのため，解の数に対する計算時間の高速性は，他のアルゴリズムよりも重要であることが多い．実用の場面では，解析を必要としているデータは日増しにそのサイズを大きくしている．このような巨大データの取り扱いのため，列挙アルゴリズムの高速化に対しては，高い要求がある．このような巨大なデータでは，解１つあたりに問題の大きさの線形時間がかかるようなアルゴリズムですら，実用に耐えうるものとはならない．１つあたり定数時間に近い時間で終了するようなアルゴリズムの開発が重要なのである．しかし，計算量理論の観点からは，解１つあたりの計算時間を線形より短くできる場合はそれほど多くなく，ここに計算量理論による計算時間の解析を用いたアルゴリズム理論の限界があった．そこで当研究課題では，従来の計算量理論の尺度のみにとらわれた高速化を目指すのではなく，広く実用的・理論的な尺度から高速化を行うアルゴリズム理論の研究を計画した．それが，実践的なアルゴリズム理論の開発というタイトルに表れている．

ここで，列挙問題の定義を正確に行おう．列挙問題とは，与えられた問題の条件を全て満たす解，つまり与えられた条件を全て満たす組合せ，順列などの構造を全て見つける問題の総称である．列挙アルゴリズムとは，列挙問題を解くアルゴリズムのことである．列挙アルゴリズムは計算機科学，特にアルゴリズムや最適化の分野において，基礎的な問題と考えられてきた．そのため，研究の歴

史は比較的古く，1950 年代にはすでに研究が始まっていた．しかし，当時はまだ多数の解を取り扱うだけの計算機の能力がなく，当時考えられていた問題は理論的，あるいは数学的な応用から考案された問題が多く，アルゴリズム自体も単純で効率がそれほど良くないものが多かった．特に，アルゴリズムの高速化に焦点を当てた研究はほとんどなく，90 年代に入りようやくいくつかの高速化に関する研究が行われるようになってきた．当研究課題では，この高速化研究の流れをさらに推し進め，新しい列挙手法の開発や各種列挙アルゴリズムの高速化を行うとともに，これらの技術を系統化して理論としての基盤を構築することにある．特に計算量的な観点からだけでなく，実用的な意味からも高速なアルゴリズムを開発するための技術に焦点を当てる．

既存研究においても，特にデータマイニングの分野において，実用的に有効なモデルやアルゴリズムの研究は盛んに行われている．列挙アルゴリズムの高速化のみに焦点をあてた研究も増えてきており，特に頻出パターン発見などの著名な問題においては，多くの研究が行われている．しかし，これらの研究はそれほど系統立てて行われているわけではなく，いくつもの技術が濫立している状況であった．この問題点を解決しようと，データマイニング分野において，プログラムのコンテストが 2003 年度，2004 年度と 2 回にわたって行われてきた．課題は，各項目がアイテム集合であるデータベースの，ある閾値以上の項目に含まれるような集合を列挙する，頻出集合発見問題とよばれるデータマイニングでもっとも基礎的な問題である．このコンテストには多くのアルゴリズムとその実装が投稿され，応用分野から取り出したデータセットに対して，計算効率の検証が行われた．結果，多くの技術が 1 箇所に集積され，参照されることとなり，頻出集合発見問題に関する応用研究の大きな助けとなっている．また，このコンテスト以降，頻出する集合の列挙アルゴリズムの開発研究は多少減少したようだが，これは技術の整理によって，無駄な開発が行われなくなったと見るべきであろう．当研究課題からも，このコンテストにプログラムの投稿を行った．このプログラムは，審査の結果，最優秀賞を収めることができた．これは，理論的なアルゴリズム研究に実践的な技術を付加し，応用上有用なアルゴリズムの設計理論を構築しようとする，本研究課題の方向性が世界的な舞台でも認められ，その有効性が実証されたといえるであろう．

当研究課題では，このような非常に実用的なアルゴリズムの開発以外にも多くの研究活動を行った．方向性としては，理論的な意味での効率的なアルゴリズムの開発，あるいは数理構造の解明，および実用への理論の応用，あるいは実用に特徴的に表れる構造を利用した高速化の理論研究といったことになる．当研究課題のメンバーは，情報学研究所の宇野，群馬大学の中野，東海大学の松井，東京工業大学の岡本，北陸先端科学技術大学院大学の清見という国内の列挙アルゴリズムの専門家の集団で構成されている．そのため，多角的に研究を行うことが可能となり，様々な成果を上げることができた．また，他の研究班との連携も，B05 班の牧野和久氏，C02 班の岩田覚氏，C05 班の上原隆平氏らと広く行ってきており，それも成果の要因となっている．

アルゴリズム研究の対象は，大きく分けて，４つのトピックに分かれる．１つ目は，部分構造列挙問題とよばれるもので，グラフやデータベースなどの，与えられた構造に含まれる，条件を満たす構造，あるいはパターンを全て見つけ出す問題である．特に，現実問題を意識した多少複雑な構造に対して，効率の良い列挙アルゴリズムを与えることを課題としている．ある程度複雑な構造は，単純な手法では列挙が困難であり，そのような構造に対して，効率化に必要な数理的な構造の解明や，効率良いアルゴリズムの開発を行う．このような効率良いアルゴリズムが存在すれば，それを利用して応用的なアルゴリズムが開発できるようになり，応用分野での効率良く解けるモデルの範囲を大きく広げることができる．

２つ目は，部分構造列挙問題の中でも，特にパターン発見問題とよばれる問題に対するアルゴリズムの研究である．パターンとは，ある種の制約を満たすグラフのクラスや列のクラスなど，条件を満たす構造のクラスのことであり，頻出パターンは，データベースの多くの項目に含まれるようなパターンのことを言う．データベースの種類やパターンの属するクラスの設定で多くの種類が存在し，データマイニング分野では中心的な問題と

なっている．実用上，巨大なデータベースを入力とすることが多く，そのために実践的な高速化が重要な分野でもある．このパターン発見問題に対する，理論面，および実用面での理論的高速化と高速アルゴリズムに対する知見を得ることを目的とした研究である．

３つ目は，クラス要素列挙問題とよばれる，グラフや順列といった構造自体を全て見つける問題である．データマイニングにおける，制約を与えずにある程度の大きさのパターンを全て見つける問題と考えてもよい．対象となるものは，平面グラフや一定の大きさの組合せなど，ある種の制約を満たす基礎的な構造の集合，あるいはクラスを考え，そのような基礎的な構造の列挙問題に対して，単純かつ効率の良いアルゴリズムを開発することである．単純さは，アルゴリズムを他分野に応用する際，あるいはより複雑な問題を解く基礎とする場合に利点となるため，基礎研究としては重要な要因である．特にデータマイニングにおいては，クラス列挙問題はパターン発見問題に対するアルゴリズムの中核をなすため，非常に重要な技術となっている．

４つ目は，列挙のアイディアを用いて，他の理論分野，特に組合せ最適化や組合せ数学の分野で，未解決とされている問題を解くというものである．この中には，離散アルゴリズム，特に最適化アルゴリズムや，マトロイド理論，数え上げアルゴリズムなどが含まれる．

以下では，これら４つのトピックごとに当研究課題の成果をまとめる．

2　部分構造列挙問題

グラフの頂点集合が A と B に分割され，グラフの任意の枝が A と B の頂点を結んでいる場合，そのグラフは2部グラフであるという．2部グラフは，2つの種類のデータの対応を表すため，多くの構造が2部グラフとして表現される．例えば行列や，項目の集合，論理式も2部グラフで表現される．2部グラフの頂点集合 S が，S の A に含まれる頂点と B に含まれる頂点の任意の組に対して，その間に枝が存在するとき，S は2部クリークとよばれる．2部クリークも，クリークと同様，2部グラフ上の特徴的な集合，つまり局所的に密な構造を表す構造である．クリークと2部クリークの例を図1に示した．

グラフのクリークを列挙する問題は，計算量的にはさほど難しくない．クリーク１つあたり，グラフの頂点数に比例する時間で見つけることができ，とくに疎なグラフにおいては，実験的に，1つあたりほぼ定数時間で見つけられることが確認されている．列挙手法も単純であり，プログラミング，つまり実装も容易である．しかし，極大なクリーク，つまり他のクリークに含まれないようなクリークのみを見つけようとすると，さほど自明な問題ではなくなる．

応用上，極大なクリークの発見は重要である．クラスタリングや知識発見など，多くの応用では，候補となる解数の本質的な減少が大きな課題である．その上，数の減少にともなう情報の損失を極力避けなければならない．任意のクリークは少なくとも１つの極大クリークに含まれ，かつこれらのクリークは極大クリークの部分集合として容易に生成できる．そのため情報の損失がない．また，極大クリークの数は一般的にクリークの数より小さく，場合によっては指数的に小さい．これらのことから，極大なクリークのみを列挙するという手法は，実用上極めて有効である．

極大クリークの列挙アルゴリズムは，古くから研究が行われている．1978年に築山らによって，極大クリーク１つあたりグラフの枝数と頂点数の積に比例する時間しかかからない，多項式時間アルゴリズムが提案されている．この後30年近く，計算量的な改善は行われてこず，計算量の改善が可能かどうかは列挙アルゴリズムの大きな未解決問題であった．

平成16年度の研究では，この極大クリーク列挙問題に対して，理論的な計算量の改善が可能であるかを検討し，新たなアルゴリズムの開発を目指した．その結果，アルゴリズムの各反復を行列積の計算に類似した処理で行うことにより，行列積で行われてきた計算量改善の結果を極大クリークの列挙に応用することに成功した．この結果，極大クリーク列挙の，極大クリーク１つあたりの計算量は，行数がグラフの頂点数に比例する正方行列の掛け算の計算量と等しくなった．この結果，ある程度密なグラフにおいては，既存のアルゴリズムよりも計算量の意味で改善が行われることと

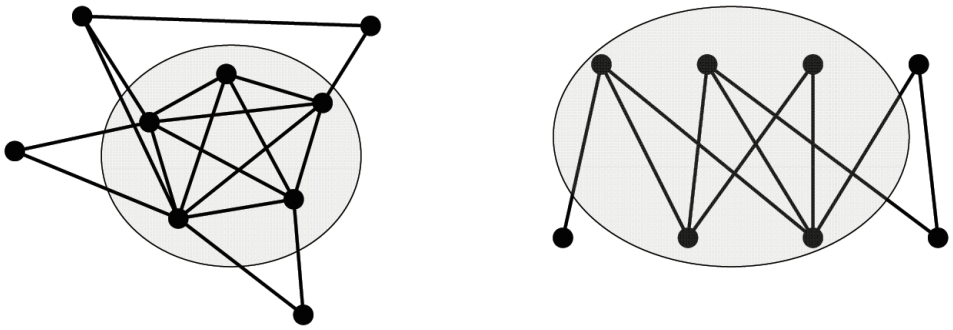


図 1: グラフの極大クリークと，2 部グラフの極大 2 部クリーク

なった．この研究は，B05 班の牧野和久氏との共同研究である．

また，疎なグラフに対する極大クリーク列挙アルゴリズムの計算量の改善についても研究を行った．この研究では，上記のアルゴリズムとは異なり，グラフの疎性を上手に利用したアルゴリズムの開発を中心に行った．その結果，極大クリーク１つあたりの計算量を，グラフの最大次数の 4 乗で抑えることに成功した．この結果は，グラフの最大次数が大きく，特に頂点数に比例する場合などは，計算量的な改善はないが，入力したグラフが疎であり，最大次数が小さい場合には計算量の改善を導く．また，計算実験の結果，ある程度ランダムなグラフや，実データのグラフにおける実験的な計算時間はグラフの平均次数にほぼ比例することがわかった．これは，入力グラフが疎であれば，計算時間が出力の大きさにほぼ比例することを示しており，近年研究されている疎なデータに対する分析や知識発見への応用としては，十分な結果といえるだろう．現在までに，このアルゴリズムと実装は多くの研究者に利用されており，特に，ソーシャルネットワークや web ネットワークでのコミュニティ発見や，ネットワーク構造を持つデータのクラスタリングなどに用いられている．当研究課題で目指している実践的なアルゴリズムという目標を，実用性の意味からも達成できていると考えてよいだろう．

また，この研究を発展させ，2 部グラフの極大 2 部クリークを高速に列挙するアルゴリズムの開発も行った．2 部グラフの極大 2 部クリークは，グラフに変換処理を行うことで，元のグラフの極大 2 部クリークが新しいグラフの極大クリークとなるようにすることができ，また逆も成り立つ (新しいグラフの極大クリークが元のグラフの極大 2 部クリークとなる)．よって，入力した 2 部グラフを変換して，極大クリークを列挙することにより，全ての極大 2 部クリークを列挙することができる．よって，計算量的には，極大 2 部クリークの列挙は容易に解ける問題である．しかし，この変換は，グラフに多量の枝を付加するため，疎なグラフを密なグラフに変換してしまう．そのため，上記の疎なグラフに対して有効なアルゴリズムを用いても，疎な 2 部グラフの極大 2 部クリークの列挙は効率良く行えない．そこで，このような変換を行うことなく極大 2 部クリークの列挙を行うため，極大クリーク列挙アルゴリズムの改良を行った．極大 2 部クリークは極大クリークにない良い特徴づけを持つため，結果として極大クリークの列挙よりも小さい計算量のアルゴリズムを開発することに成功した．極大 2 部クリーク 1 つあたりの計算量は最大次数の 3 乗となった．また，計算機実験によって，実データおよびランダムなグラフにおける計算時間は，極大クリーク列挙時のそれよりも 10 倍程度短くなっていることを確認した．

クリークは応用面で非常に頻繁に使われている．また研究により列挙も容易となり，ほぼ最適な速度で列挙できるようになった．しかし，その単純さゆえ，クリーク列挙では不十分であるような問題もまた見られる．そのため，17 年度以降は，クリークをより複雑にしたグラフクラス，コーダルグラフ，インターバルグラフ，擬似クリークの列挙アルゴリズムを開発した．クリークは，クリークの任意の部分集合はクリークである，という単調性を満たし，これが列挙の効率化に大きく寄与

しているが，これらの構造は，どれも単調性が成り立たず，単純なアイディアでは効率良く列挙できない．しかし，応用上は利用価値の高いモデルであり，効率良い列挙アルゴリズムの果たす役割は大きい．

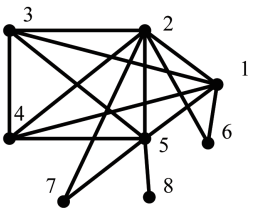


図 2: コーダルグラフの例

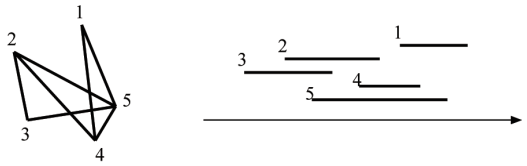


図 3: インターバルグラフの例

コーダルグラフとは，任意の長さ 4 以上の閉路が弦 (閉路の頂点同士を結ぶ閉路に属さない辺) を持つようなグラフのことであり，効率的なガウス消去法を実現する問題や，統計学におけるグラフィカルモデリングなど，多くの応用を持つグラフクラスである．インターバルグラフとは，直線上に置かれた線分のインターセクショングラフ，つまり，各線分が各頂点に対応し，線分と線分が交わりを持つときに対応する頂点間に枝を張って得られるグラフである．インターバルグラフは時系列や文字列上の構造間の関係性を表す自然なモデルとなっており，ゲノム情報学において多くの応用を持つ．図 2と図 3 に，コーダルグラフとインターバルグラフの例を示した．

平成 17 年度，および 18 年度の研究では，与えられた n 個の頂点のグラフに含まれるコーダルグラフを１つあたり $O(1)$ 時間で列挙するアルゴリズム，および，与えられた n 個の頂点のグラフを含むコーダルグラフを，出力するコーダルグラフ１つあたり $O(n^3)$ 時間で動く列挙アルゴリズムの開発を行った．コーダルグラフは，単なる山登り法やバックトラック法，あるいは分割法では効率よく列挙できない．この事実は，当研究課題の研究により証明された．そのため，コーダルグラフを効率良く列挙するためには，簡単な操作により移動できる探索路をコーダルグラフの族の上に構築する必要がある．この研究では，頂点の追加・削除による操作がコーダルグラフの族を張ることを証明した．つまり，任意のコーダルグラフ間は，頂点の追加削除だけを用いて，コーダルでないグラフを通ることなく行きあうことができる．この性質を用いて，多項式時間の列挙アルゴリズムを構築することができた．特に与えられたグラフに含まれるコーダルグラフを列挙する問題に関しては，さらなるアルゴリズム的な工夫をすることで，ひとつあたりの計算時間を $O(1)$ に減少させることに成功している．

さらにこの研究では，同様の困難さ，および隣接関係の全張性が，インターバルグラフに関しても証明できた．そのため，与えられた n 頂点のグラフを含む，あるいは与えられた n 頂点のグラフに含まれるインターバルグラフを列挙する，インターバルグラフ１つあたり $O(n^3)$ 時間のアルゴリズムが開発できた．

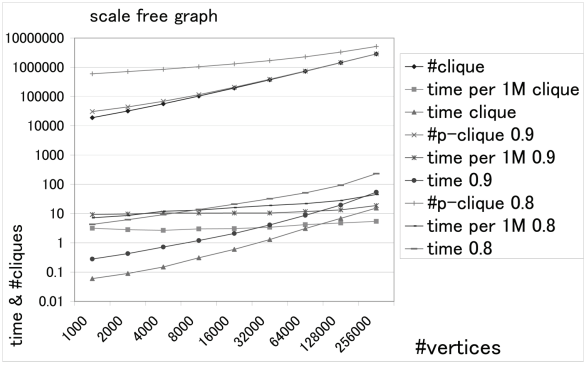


図 4: ランダムに生成したスケールフリーグラフに対する，擬似クリーク列挙の計算時間と個数

与えられたグラフの密な部分構造を見つけ出す問題は，データマイニングやデータ工学を始めとする情報学の分野での基礎的な問題である．密な構造をモデル化したものとしてクリーク（完全グラフとなっている部分グラフ）がある．これはモデルの単純さと解法の構築しやすさから重宝されており，今までに多くの研究でクリーク，あるいは極大クリーク列挙が使われてきた．その一方で，近年，本来の動機であるグラフの密な構造を見つ

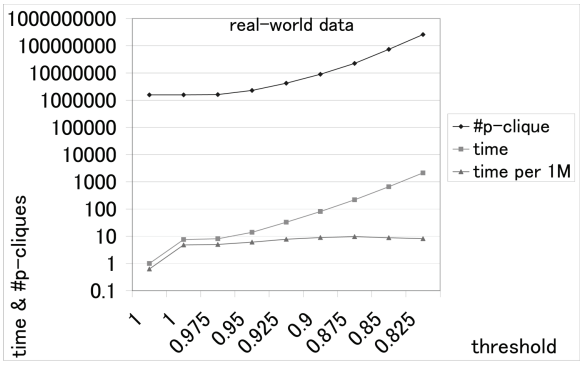


図 5: 頂点数約 3 万のソーシャルネットワークに対する計算時間

ける問題を，直接解こうという機運が高まりつつある．これは，クリークだけでなく，クリークから枝を少し抜いたような，擬似クリークを見つけようとするものである．擬似クリークの定義はいくつか考えられるが，ここでは枝数がクリークと比べて閾値以上の割合になっている部分グラフで定義する．平成 18 年度，および 19 年度の研究では，このように定義された擬似クリークを全て列挙する問題を考えた．この問題に対する分割統治法的アプローチが計算量的には絶望的であることを示し，その上で，逆探索法に基づくアルゴリズムを用いると，多項式時間で列挙可能であることを示した．さらに，計算実験から実用上の効率の良さを示した．計算実験の結果を図 4に示す．これは，ランダムに生成したスケールフリーグラフに対する結果で，横軸が入力したグラフの頂点数，縦軸が計算時間／擬似クリーク数／擬似クリーク 100 万個あたりの計算時間である．グラフの枝数は頂点数の 5 倍となっている．また，実データから得たグラフに対しても計算実験を行った．図 5 は，頂点数が 3 万ほどのソーシャルネットワークに対して擬似クリーク列挙を行った結果である．計算時間，個数，100 万個あたりの計算時間を，閾値を変化させて計測した．

また，最適化問題に関連して，多目的最適化問題に対するパレート最適解の列挙を行うアルゴリズムを開発した．多数目的最適化問題は，いくつかの目的関数を持つ最適化問題である．与えられた複数の目的関数を同時に最適化する解は通常存在しないため，目的関数の凸結合を最適化する解を最適解とみなす．凸結合のとり方は数多く存在するため，最適解も数多く存在する．それら最適解を全て列挙する問題が自然に定式化できるが，既存研究では発見的なアルゴリズムが多く，出力解の完全性を保証したものはほとんど存在しなかった．19 年度の研究では，全張木の多目的最適化問題が，逆探索を用いたアルゴリズムを用いて多項式時間で解けることを初めて証明した．また，シンプルな多面体上の多目的最適化問題，劣モジュラ多面体上の多目的最適化問題が，同様に多項式時間で解けることを初めて証明した．この研究で開発したアルゴリズムは比較的技巧的であるが，単純な手法を用いた場合には，各反復で NP 困難問題を解く必要が生じることを証明し，単純な手法がある意味で絶望的であることも，合わせて示した．

3　クラス要素列挙問題

グラフ構造を持つデータを分析するグラフマイニングの分野では，グラフの中に頻出するパターンを見つける研究が盛んに行われている．パターンとしては，例えばパスや木，サイクル，部分グラフなどが研究されている．頻出集合列挙やグラフの部分グラフを列挙する問題とは異なり，グラフの頻出パターン列挙には計算量的な困難が発生する．集合の場合，異なる 2 つのパターンが等しいかどうかは簡単に確認できるが，グラフの場合，2 つのパターンが等しいことを判定する作業はグラフが同型であるかどうかを判定する問題を含むため，計算量的に困難になることが多い．このため，グラフパターンの効率的な列挙が難しく，メモリの意味でも計算時間の意味でも，効率的なアルゴリズム，および高速なプログラムを作ることは難しい．

現在までに行われている研究は，同型性の判定，および列挙が効率的に行えるようなグラフクラスに属するパターンのみに対象を限定した列挙問題が研究されている．例えば，パスやサイクルは同型性の判定が自明であるし，木も線形時間で同型性の判定が可能である．パスやサイクルであるパターン，つまり長さが n であるようなパスやサイクルの列挙は容易であるが，木の列挙はそれほど自明ではない．既発見解をメモリに蓄えずに重複を避けるような，メモリ効率と計算効率の良い

アルゴリズムを構築するためには，全ての木を効率良くたどれるような探索ルートを用いた列挙手法が必要である．単純な方法で探索ルートを生成すると，重複や見つけそこないを回避できない．

このような，単純な手法での列挙が難しい構造を列挙する際に威力を発揮するのが逆探索である．逆探索では，列挙しようとしている構造の間に非閉路的な親子関係を定める．非閉路的な親子関係は木型の探索ルートを導出する．逆探索は，この探索ルートをたどることで，全ての列挙対象を発見するという手法である．列挙を行う際には，根となる木を出発し，親から子への移動を繰り返すことにより，深さ優先的に探索を行う．この際，現在訪れている解の子供を効率良く発見できるようにするため，親子関係の定義を工夫することと，アルゴリズムの開発が重要となる．

当研究課題では，16 年度に逆探索を利用して木を効率良く列挙するアルゴリズムの開発を行った．木を根付き木とみなすと，根の位置の変更や子供の順番の変更で１つの木から様々な根付き木が生成される．そこでまず，木に対して唯一的に定まるような根の定め方を定義し，子供の順番もグラフの構造のみに依存して唯一的に定まるような定め方を定義した．この方法で定義した根と子供の順番は木に対する唯一的な標準型を与える．標準型の形状は唯一的に定まっているため，通常の木よりも取り扱いが簡単になる．次に，標準型と標準型の間に親子関係を定めることで，木の間にも親子関係を定めた．

この親子関係では，親に 1 つ頂点を追加することによって子供が得られ，また，子供を生成するような，頂点の追加場所は，木の右端部分に連続して存在する．そのため，子供を 1 つあたり定数時間で生成することができ，全体として木を 1 つあたり定数時間で列挙するようなアルゴリズムを導くこととなった．図 6に，直径 4 の木の親子関係を例として示した．

データマイニングの問題では，データベースの木の各頂点にはラベルが付加されていることが多い．そのような場合，見つけ出すパターンとしては，ラベルが付いた木が要求されている．このようなラベル付きの木を列挙するためのアルゴリズムも開発した．単にラベルが付いた木を列挙するのであれば，木を列挙した後，それにラベルを付ければよい．しかし，頻出するパターンを見つける場合には，このような列挙手法を用いると効率が悪くなる．そのため，ラベル付きの木を直接，小さいものから大きいものへと成長させるような手法で生成する必要がある．16 年度の研究で開発したアルゴリズムは，このような列挙手法に基づいて構築されており，頻出するパターンの発見に応用した場合に効率良いアルゴリズムを導くことができる．また，このアルゴリズムの計算時間は１つあたり定数時間であり，効率が良い．

近年は様々な場面で列挙アルゴリズムが使われるようになり，そのため，様々な構造に対する効率の良い列挙法が求められている．簡単な構造であれば，効率良い列挙法の構築は容易なのだが，複雑で取り扱いの難しい構造となると，計算効率を考えずに単純に構築された列挙法に基づくアルゴリズムは，ときに効率の良いアルゴリズムに比べて何千倍も余計に計算時間を費やすこともある．特に，幾何学的な構造は列挙が難しいことが多い．そのため，当研究課題では幾何学的な構造に対する効率的な列挙手法の研究も行った．以下にそれらの概要を示す．

16 年度に研究を行ったのが，根付き三角形分割の列挙手法である．与えられた平面上の点集合に対して，その点同士を結んで平面を分割することを平面分割とよぶ．特に全ての面が三角形であるとき，三角形分割とよぶ．三角形分割の一本の枝が根として指定されたとき，それを根付き三角形分割とよぶ．三角形分割はグラフ描画や数値計算に多数の応用がある重要な幾何構造である．本年度は，n 個以下の点から作られる三角形分割を，同型であり，かつ根が等しいような三角形分割を同一視した上で列挙する問題を研究した．

三角形分割の同型性判定はそれほど困難ではないが，重複を効率良く避けて列挙を行うことはそれほど容易ではない．単純な手法ではすぐに重複が発生するか，あるいは見つけそこないがでてしまう．そこで，三角形分割の間を移動する関係を定め，三角形分割の上に探索木を定義した．この結果，効率良く全ての解を探索できるようになり，根付き三角形分割１つあたり定数時間しかかからないようなアルゴリズムを構築することに成功した．

また，このアルゴリズムを拡張することにより，

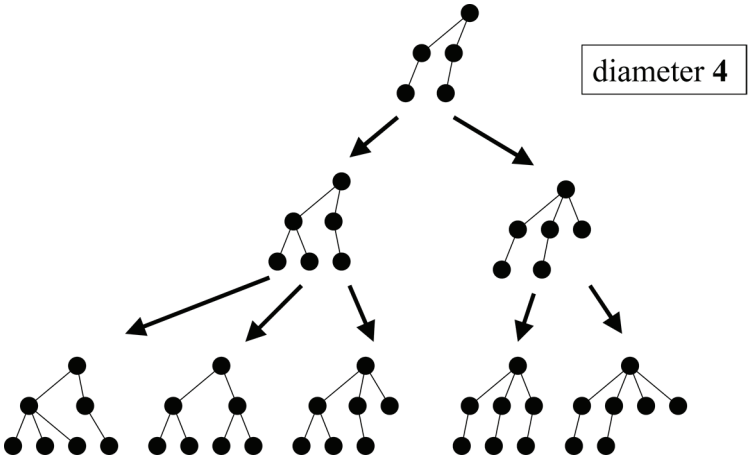


図 6: 直径が 4 で頂点数が 7 以下である木の集合上に定義された探索ルート

ちょうど n 個の点からなる三角形分割 (根付きではないことに注意) を 1 つあたり $O(n)$ 時間で列挙するアルゴリズムを得た．このアルゴリズムは，外周上の点の数がちょうど r 個である三角形分割の列挙も可能であり，この場合の計算時間は出力される三角形分割 1 つあたり $O(r)$ 時間である．これらのアルゴリズムのメモリ使用量は $O(n)$ であり，メモリ使用量の意味で最適である．

点の個数が n 個であり，面の個数が f 個であるような，異なる 3 次元多面体の個数を求めることは，幾何学における有名な未解決問題の 1 つである．また多面体の効率的な数え上げアルゴリズムもこれまで知られていなかった．全ての面が三角形であるような 3 次元の多面体は，平面の三角形分割に対応するため，上記の三角形分割列挙アルゴリズムを用いると，各面が三角形であるような 3 次元の多面体の列挙が行える．このアイディアに基づき，16 年度の研究では効率的なアルゴリズムを開発した．さらに，このアルゴリズムの実装を行い，$4 \leq n \leq 15$ なる各 n について，点の個数が n であり全ての面が三角形であるような多面体の個数を数え上げた．また列挙した多面体の全てをグラフの形でデータベース化し，WWW 上のホームページにて公開している．

平面の三角形分割はリアライザとよばれる，ある特徴を持った内辺の分割を持つ．リアライザは平面グラフの描画アルゴリズム等に応用がある．与えられたグラフのリアライザの列挙は，自明でなく，既存の研究は存在しない．17 年度の研究では, 左優先順序という極大平面グラフの点の順序づけを定義し, 左優先順序とリアライザ間の 1 対 1 関係を導くことにより，リアライザの標準形を定義した．さらに，標準形の集合上に効率良くたどれる探索木を定義することで，高速にリアライザを列挙するアルゴリズムを与えた．このアルゴリズムは, n 点からなる極大平面グラフのリアライザを, リアライザ 1 つあたり $O(n)$ 時間で列挙する．

グラフを, 各面が L 字形 (退化した L 字形として長方形を含む) であるように, かつ, 辺が交差することのないように, 平面に描画したものを, グラフの L 字形描画とよぶ．L 字形描画はグラフをある種の規則にしたがって平面に描画したものである．グラフ描画の応用の観点からは，L 字形描画のような基礎的な構造を列挙して最善の描画を選ぶような手法は基礎的な事項である．このような応用を鑑み，本年度の研究では, 全ての底辺付き L 字形描画を, 重複も抜けもなく列挙する高速なアルゴリズムの開発を行った．ただし，底辺付き L 字形描画とは，L 字形描画の外周上の辺の 1 つが底辺として指定されたものであり，ここでの列挙問題では，平面描画として同型であり，かつ底辺が等しいものは同一視している．16 年度の研究では, 内面の個数がちょうど n 個である底辺つき L 字形描画の全てを, 1 つあたり $O(1)$ 時間で生成するアルゴリズムを提案した．また，メモリ使用量に関しても $O(n)$ であり，最適である．

17 年度の研究では，木の列挙アルゴリズムを，

色付き木の列挙問題に発展させた．色付き木とは，各頂点に色集合の中から選ばれた色が 1 つ塗られているような木のことをいう．色がラベルだと考えれば，ラベル付きの木と考えてもよい．通常，アルゴリズム理論やグラフアルゴリズムの研究では，ラベルは無視されることが多いが，現実のデータでは，各ノードに情報が付加され，ラベル付きの木となっていることが多い．例としては，環構造を含まない化合物のデータや，XML のデータなどがある．このようなデータベースを解析する際に，しばしば列挙的なアプローチがとられる．例えば特徴的な，あるいは頻出する木構造を列挙して知識発見のベースとしたり，分類，あるいはクラスタリングのため，仮説となる木構造を列挙したりするものである．これらの列挙的なアプローチは，ラベル付きの木の効率的な列挙手法を必要とする．しかし，列挙自体はそれほど単純な問題ではなく，直接的な手法では重複を回避するためにメモリを大量に使用することになり，また，1 つの解を複数回探索することによる計算時間の増大も問題となる．

17 年度の研究では，このラベル付きの木を効率良く列挙する列挙手法の開発を行った．このアルゴリズムは，すべての色付き木の上に木構造型の探索ルートを暗に構築し，それを深さ優先探索することにより列挙を行う．そのため，重複の回避が容易である．また，探索ルート上での色付き木の隣接構造が数学的に良い構造を持っているため，一回の移動を定数時間で行うことができる．このため，色付き木を 1 つあたり定数時間で列挙することができる．

この探索ルート上では，根から葉のほうへと進むにつれ，色付き木の大きさが 1 つずつ増えるようになっている．そのため，知識発見や仮説の列挙などで重要な,「ある種の単調な性質を満たす木のみを見つける」という作業にも適している．実際，このアルゴリズムを用いることで，データマイニングの分野で未解決であった，データベースの中で頻出するラベル付き木を列挙する問題に対する多項式時間アルゴリズムを与えることができる．図 7 に色付き木の親子関係の例を示す．

上記の色付き木列挙アルゴリズムは効率が良く，計算量の観点からも最適となっている．しかし，データマイニングなどの応用分野を考えた場合，必ずしもこのアルゴリズムを用いることが最良の選択とはなりえない．なぜなら，いくつもの色付き木が同じような意味合いを持つのであれば，それらはひとまとまりとして考えられ，まとまりの中からいくつもの解が出力されるべきではないからである．このようなまとまりを考慮したモデルを用いることで，解が大量に生成され，次の操作に多大な影響を与えるような事態を回避することができる．

この他にも，17 年度の研究ではいくつかの基礎的な構造に対する列挙アルゴリズムの研究を行っている．いわゆるコンピュータサイエンスや人工知能などの分野では，基礎的な列挙問題に対するツール的なアルゴリズムの欠落があり，これが研究を阻害するひとつの要因となっていると思われる．この欠落を埋めるべく，いくつかの基礎的な構造に対して構造が単純であり，かつ効率のよいアルゴリズムを開発した．

1 つ目は，集合の分割を列挙する問題である．集合 $\{1, 2, \cdots, n\}$ が与えられたとき，これを k 個の集合へ分割する方法を列挙する問題を考える．単純な問題ではあるが，ごく単純な総当り的な手法では効率よく列挙できない．すでに既存のアルゴリズムが存在し，1 つの分割あたり「平均」定数時間で生成できるのだが，今回の研究では，より効率的な探索ルートを構築することで，各分割を，分割 1 つあたり真に定数時間で生成できるようにした．ここでいう真の定数時間とは，任意の出力から次の出力までの時間が定数時間で抑えられるというものである．このような探索ルートの構築がシンプルな定義から行えるということは，計算理論や組合せ数学の見地から興味深い．

2 つ目は，正の整数 n の整数分割を列挙するアルゴリズムである. 整数分割とは，n をいくつかの数 $a_1, ..., a_k$ に，$a_1 + \cdots + a_k = n$ となるように分割するものである．この問題は, 組合せ論において基本的な問題の 1 つであり, 長い間, 広く研究されてきた．これまで, 整数分割を 1 つ当たり平均定数時間で列挙する方法しか知られていなかったが，17 年度の研究において，整数分割を 1 つあたり真に定数の時間で列挙するアルゴリズムを開発した．これにおいてもやはり，整数分割の集合上に効率よい木型の探索ルートを構築できたことが大きく貢献した．

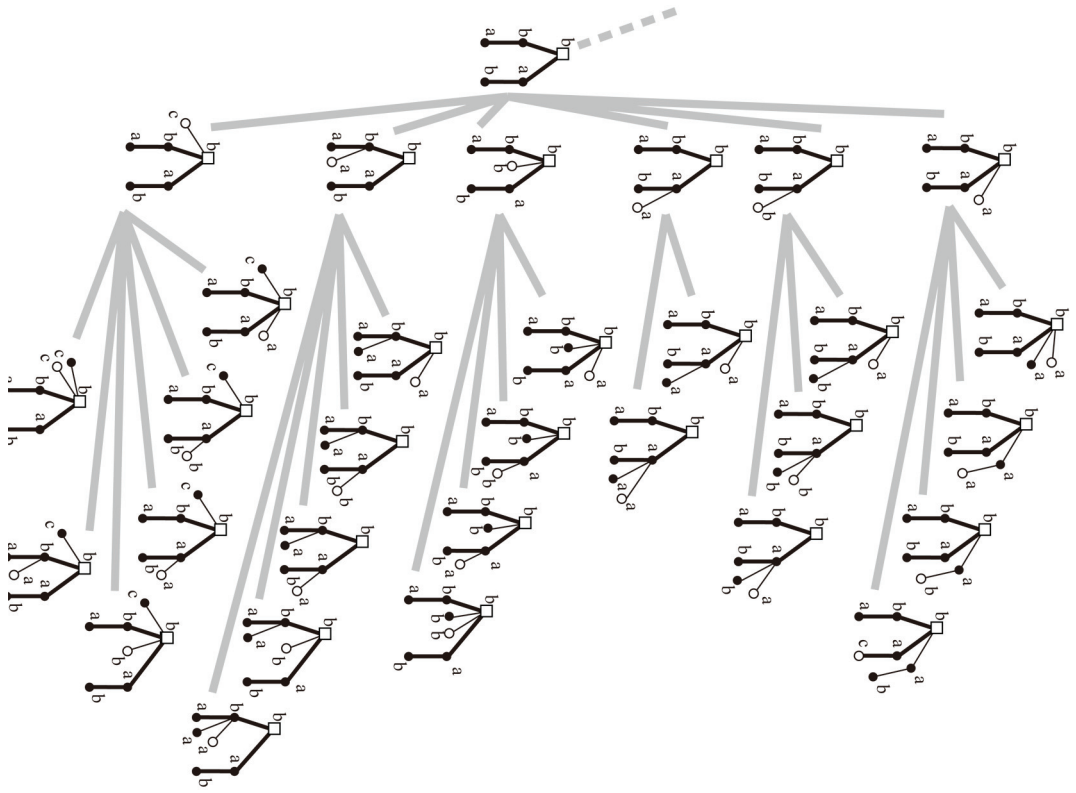


図 7: 色付き木の集合上に定義された探索ルート (一部)

18 年度の研究では，方形描画に対して，効率的な列挙アルゴリズムを開発した．さらに，応用上の観点から，それまでの年度に開発したフロアプランの列挙アルゴリズムの解を効率的に蓄えるための，圧縮技術について，シンプルかつ効率の良い手法を開発した．

全ての面が方形である平面描画を方形描画とよぶ. 方形描画の外面と隣接している内面を窓つき部屋とよび, 外面と隣接していない内面を窓なし部屋とよぶ．18 年度の研究では，内面の個数がちょうど n である方形描画を, 描画ひとつあたり $O(1)$ 時間で, 重複も抜けもなく 列挙するアルゴリズムを開発した．さらに，内面の個数が n であり, 窓なし部屋の個数が高々k である底辺つき方形描画を, 描画ひとつあたり $O(1)$ 時間で, 重複も抜けもなく, 列挙するアルゴリズムも開発した．方形描画は，単純な場合分けなどで列挙するのは簡単ではないため，技術的な革新が行われた．アルゴリズムのアイディアは，各方形描画に親を定義することで，方形描画間に親子関係とよばれる連結な非巡回的関係を定義し，それを探索ルートにして探索を行うことにより，全ての方形描画を重複なく列挙する．親子関係の例を図 8に示す．これまではそのような描画を平均 $O(1)$ 時間で列挙するアルゴリズムしか知られていなかったが，18 年度に開発したアルゴリズムは，任意の 2 つの出力の間の時間 (遅延時間とよばれる) が $O(1)$ 時間である．

また，方形描画に対しては，m 本の辺からなる方形描画を $2m$ ビットを用いてコード化する簡単な方法が知られている．18 年度の研究では, よりコンパクトなコード化を提案した. 我々の方法は, 実装が容易であり, 各フロアプランを $5m/3$ ビットでコード化する.

クラス列挙問題に対する 19 年度の成果は，連結性を持った平面グラフ，根付き三角形分割，distance hereditary とよばれるグラフクラスの列挙アルゴリズムを構築したこと，および，前年度に開発した圧縮技術を発展させ，平面の三角形分割，および distance hereditary グラフを小さいビット数で表現する方法を開発した．

平面上に与えられた点集合に対して，その点集

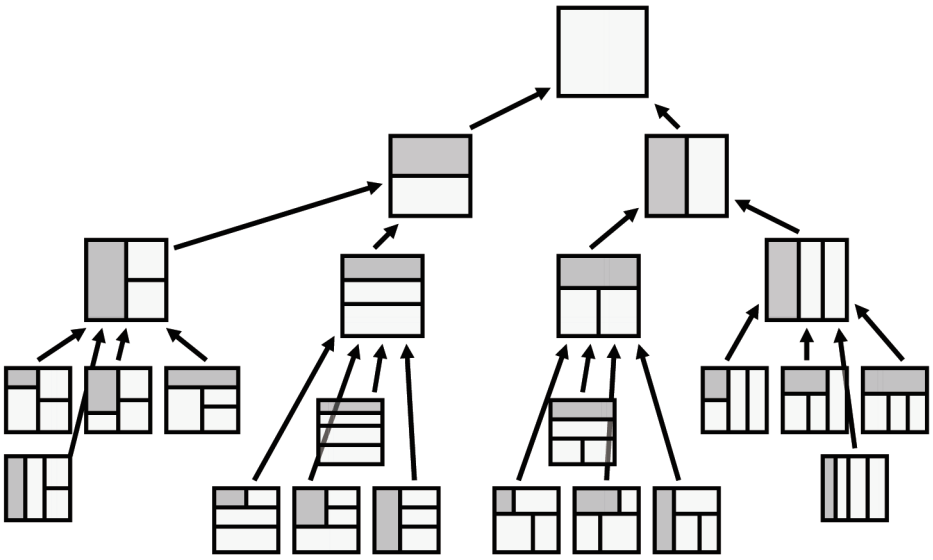


図 8: 大きさ 4 以下の方形描画に対して定義された親子関係

合を頂点集合とし，枝集合が平面上で非交差的であるようなグラフのことを平面埋め込みグラフとよぶ．平面埋め込みグラフの中で，非交差性を崩さずに枝を追加することができないようなグラフを，各面が三角形になることから，三角形分割とよぶ．今回の研究では，三角形分割を少ないビットで表現する手法を研究し，任意の三角形分割は $6m$ ビットで表現可能であることを証明した．これは，列挙アルゴリズムの研究で培ってきた，重複なくグラフを列挙するためのグラフの標準形の利用によるところが大きく，列挙アルゴリズム研究の成果と考えられる．また，このコードに非常に少ないビット情報を追加することで，隣接性，次数，時計回り順の隣接頂点のクエリに対して定数時間で回答することが可能となることも証明した．これは，通常の記憶手法と計算量的に等しい手間で，グラフに対する操作が行えることを示しており，実用上，データの圧縮法として効果的であることを示している．

根付き三角形分割とは，三角形分割の外辺の 1 つが根として指定されたものである．今年の研究では，前年度までに開発した根付き三角形分割を列挙するアルゴリズムを改良することで，4 連結である高々n 頂点の根付き三角形分割のみを列挙するアルゴリズムを構築することに成功した．これは，同問題に対する初めての多項式時間アルゴリズムとなっている．4 連結性を保持したグラフ間の隣接性を明らかにし，その上に探索路を構築することで，1 つあたり $O(n)$ という高速なアルゴリズムを構築することに成功した．

また，平面グラフに対するアルゴリズムを改良することで，高々 m 本の枝を持つ根付き平面グラフを列挙する 1 つあたり定数時間のアルゴリズムも開発した．根付き平面グラフとは，平面に埋め込まれたグラフの外辺の 1 つが根として指定されたものである．これも，平面グラフに対して根を用いて標準形を定義し，枝の除去・追加による隣接性を明らかにしたことで列挙が可能となった．また，根が指定されていない通常の平面に埋め込まれたグラフの列挙問題に対しても，このアルゴリズムを用いることで，1 つあたり $O(m^3)$ 時間のアルゴリズムを構築することに成功した．

グラフの任意の連結な頂点誘導部分グラフにおいて，2つの頂点間の距離が等しいとき，そのグラフは distance hereditary とよばれる．これは，頂点誘導部分グラフにおける距離の保存性を持つ，ということである．distance hereditary グラフは，同型性判定が多項式時間でできるグラフクラスの中で極大なもののうちの1つである．同型性判定ができるということは，効率的な列挙や圧縮が可能となる可能性を示唆している．19 年度の研究では，まず distance hereditary グラフにラベル付きの木構造からなる標準形を定義した．これにより，同型性判定が容易にできることとなった．続いて prefix tree を用いたデータ構造を提案し，これを用いることで，簡単な操作のみで distance hereditary グラフの標準形が線形時間で構築できることを示した．これにより，distance hereditary グラフの同型性判定は線形時間でできることとなり，長年の未解決問題に肯定的な解答を得た．また，標準形がラベル付きの木であることから，制約をつけたラベル付きの木を列挙することで，distance hereditary グラフの標準形を全て列挙するアルゴリズムを構築した．これにより，高々n 頂点の distance hereditary グラフは，1つあたり $O(n)$ 時間で列挙できることが示された．また，ラベル付きの木に対する圧縮アルゴリズムを改良し，n 頂点の distance hereditary グラフを $\lceil 3.59n \rceil$ ビットで表現する手法を開発した．これは同時に，distance hereditary グラフの個数が $2^{\lceil 3.59n \rceil}$ 個であることを示唆しており，既存研究の上界である $2^{O(n \log n)}$ 個を大きく改善するものである．標準型の定義から同型性の判定，列挙，圧縮手法，数の算定という流れは，ある意味でクラス列挙研究の技術的応用を含めた典型的な成功例となっているだろう．この研究は C05 班の上原隆平氏との共同研究である．

4　頻出パターン発見問題

データマイニングの基礎的な問題の1つに，頻出集合列挙問題がある．各項目がアイテムの集合となっているようなデータベースをトランザクションデータベースという．トランザクションデータベースは，商品売り上げデータ，アンケートデータ，辞書データ，グラフデータなど，多くのデータを取り扱うことのできる基礎的な構造である．

トランザクションデータベースの，サポートとよばれるある定数個以上の項目に含まれるようなアイテムの集合を頻出集合とよぶ．頻出集合はそれ自体が知識を発見するためのモデルとなるばかりでなく，データベースを分析する際の特徴の1つとなる．そのため，与えられたデータベースとサポートに対して，頻出集合を全て見つけるという問題は，データマイニングの分野でも非常に基礎的な問題であり，多くの研究と，アルゴリズムの実装が存在する．

サポートが小さくなるにつれ，頻出集合の数は指数的に大きくなる．興味深い集合を発見しそこなうことがないようにするためには，サポートの値を小さく設定する必要があるのだが，その結果非常に多くの頻出集合を見つける必要が発生する．このため，意味的な情報を失わずに，頻出集合の集合から代表を選びだし，それのみを列挙するモデルが考案されている．1つは極大頻出集合であり，もう1つは頻出飽和集合である．極大頻出集合は，他の頻出集合に真に含まれないような頻出集合のことであり，飽和集合とは，頻出度が等しい，つまり同数のトランザクションに含まれるような他の頻出集合に真に含まれないような集合のことである．図 9に頻出集合と飽和集合の例を示した．

トランザクションデータベースを 2 部グラフとみなすと，飽和集合と極大 2 部クリークが 1 対 1 に対応することが知られている．そのため，極大 2 部クリークの列挙アルゴリズムを頻出度順に出力するよう改良することにより，頻出飽和集合列挙アルゴリズムを得ることができる．しかし，既存の極大 2 部クリーク列挙アルゴリズムは疎で巨大なデータを取り扱うことができなかったため，頻出飽和集合列挙に理論的なアルゴリズムを適用することはできなかった．そのため，既存の頻出飽和集合列挙アルゴリズムは，ヒューリスティックな枝刈を中心とした実用的な側面のみに注目していた．本研究課題の研究により，理論的なアプローチに基づき，かつ疎で巨大なデータも扱えるようなアルゴリズムが誕生することとなった．

データマイニング分野では，実装の有効性に関する議論にも重きが置かれている．そのため，頻出集合列挙問題においても，単なる手法の理論の

データベース	
1,2,5,6,7,9	**3つ以上の項目に**
2,3,4,5	**含まれるアイテム集合**
1,2,7,8,9	{1} ***{2}*** {7} {9}
1,7,9	{1,7} {1,9}
2,7,9	{2,7} {2,9} ***{7,9}***
2	***{1,7,9} {2,7,9}***

図 9: トランザクションデータベースと，サポートが 3 である場合の頻出集合，太字は頻出飽和集合

研究にとどまらず，実際のデータに対してどの程度有効な実装が行えるかという点についても研究が進められている．16 年度，17 年度と実装の有効性に関するコンテストが行われた．世界の研究者がプログラムを投稿し，それぞれの有効性を計算実験により検証するというものである．15 種類程度の実際のデータから得たトランザクションデータベースそれぞれに対し，いくつかのサポートに対する計算時間を計測することで比較が行われた．

我々も，極大 2 部クリーク列挙アルゴリズムに実装上の工夫を追加したプログラムを作成し，投稿した．我々のプログラムでは，理論的に裏づけされた列挙手法を用いているため，他のプログラムに比べて計算の無駄が少なく，また，メモリの使用量も少ない．計算実験による検証の結果，我々のプログラムは 6 割以上の例題で一番の成績を収め，結果最優秀賞を受賞した．

このコンテストでは，頻出飽和集合列挙プログラムの他，頻出集合・極大頻出集合の列挙に関するプログラムのコンテストも合わせて行われた．両者ともに，頻出飽和集合の列挙手法を用いると，効率的に列挙できる．今回我々は，この列挙手法をベースに実装上の工夫を加えたプログラムを開発し，投稿した．計算実験の結果，これらのプログラムも優秀な成績を収めた．

このアルゴリズムは，19 年度に項目に重みのついたデータベースに対応できるよう，改良が加えられた．項目が負の重みを持つ場合でも対応できるよう，枝刈のロジックを改良し，短時間で含まれる項目の重みの合計が閾値以上となるアイテム集合を列挙するアルゴリズムを得た．そして，このアルゴリズムを，サポートベクターマシンを用いて，アイテムセットを用いた分類規則の生成に応用した．さらに，分類規則を生成する際の属性を選ぶ作業を，重み付きの項目を持つデータベースの頻出集合列挙問題として定式化し，それを子問題として複数回解くことで，列生成法を用いた最適化を行い，精度の高い分類規則を得ることに成功している．応用として，画像の特徴をグラフとして表現し，そのグラフの部分グラフをアイテム集合に変換することで，画像認識を行った．VOC2005 データセットにおいて，オートバイを含む画像とそうでない画像を，非常に高い精度で分類することに成功した．これは高度な処理を短時間で行うアルゴリズムがあって初めて実現したものであり，当研究課題の成果の重要性を認識することができる．

近年，まとまりを考慮したモデルとして，飽和パターンが注目されている．ここで，データベースに頻出するパターンを列挙する問題を考える．いくつかのパターンがデータベース上の全く同じ位置に現れるとしよう．このとき，これらのパターンの持つ情報はある意味で同じだと考えられる．そのため，このなかから代表を 1 つ選び，代表となっているパターンのみを列挙することで，ある意味で冗長なパターンを，意味の損失なく抽出することができる．ある種の問題では，パターンが出現している位置の集合に関してある種の演算を施すと，その位置に出現するパターンの中で極大なものが得られる．これを飽和パターンとよぶ．頻出アイテム集合列挙における飽和パターンの列挙は著名な問題であり，当研究課題においても，いくつかの研究を行って効率の良いアルゴリズムを得ている．特に当研究課題で開発したアルゴリズム LCM は，頻出飽和集合列挙問題に対する初の多項式時間アルゴリズムであるとともに，上記のプログラミングコンテストの飽和集合列挙

問題の部門で圧倒的な強さを見せた．

LCM における最も重要なアイディアは，prefix 保存飽和拡張 (ppc 拡張) とよばれるパターン生成法である．通常，飽和集合は，アイテム１つに追加・削除による隣接関係では全ての飽和集合を探索することができない．そのため，既存研究では飽和集合でないパターンも探索しつつ，不要な探索を省略すべく，ヒューリスティックな枝刈法を用いている．対して我々は，飽和集合にアイテムを追加し，それを含む極小な飽和集合へ移動する，という手法で全ての飽和集合が列挙できることを示し，さらに，移動先の飽和集合を得る際に，追加したアイテムより添え字が小さいアイテムが追加されない場合のみ，両者が隣接する，とした隣接関係が，飽和集合の族を張る全張木を導出することを示した．この関係が prefix 保存飽和拡張である．prefix 保存飽和拡張を行って得られる飽和集合は，元の飽和集合よりも真に頻出度が小さいため，空集合から出発し，prefix 保存飽和拡張を繰り返すだけで，全ての頻出飽和集合を列挙できることが示された．これにより，飽和集合列挙に対する初めての多項式時間アルゴリズムを構築することができた．さらに，prefix 保存飽和拡張を実用的な意味でも高速に実行できるようにするために，prefix の保存性を高速でチェックできるようなデータベース縮約法を開発した．データベースの縮約技法は頻出集合列挙問題における中心的な技術であり，それを飽和集合列挙に対応させた初めての技術となっている．この技術により，飽和集合は既存のアルゴリズムよりもはるかに高速で列挙できることとなった．

17 年度の研究では，この飽和パターンの概念をラベル付きの木構造に拡張した．通常のラベル付き木では，飽和パターンが上手に定義できないため，今回は任意の頂点は，同じラベルを持つ子供を持たない，という仮定をおいた．このような性質を満たす木は rank tree とよばれ，論理などの分野で研究されている．rank tree に対しては，パターンの出現位置の共通部分をとることで飽和パターンを定義することができ，数学的にも安定したモデルとなっている．この飽和 rank tree を列挙する問題は直接的には効率よく解けないが，17 年度に開発した prefix 保存飽和拡張とよばれる，飽和パターンを列挙するための一般的な手法を用いることで，効率よく列挙できる．今回開発したアルゴリズムは，飽和 rank tree をひとつ当たり $O(n^2)$ 時間で列挙することができる．ここで n は入力したデータベースの大きさである．このような多項式時間アルゴリズムが存在することはアルゴリズム理論の側面からすると非常に興味深いことである．

また，同様なデータマイニングの問題に，文字列データの中から頻出する極大モチーフを全て発見するというものがある．モチーフとはワイルドカード (任意の文字と対応できる) を含められる文字列パターンであり，多少の変化が意味的な変化を起さないゲノム列の解析などに有効なモデルである．図 10に例を示した．既存の研究にて開発されたアルゴリズムは，時間的に高速性の保証がなく，また多大なメモリを使うという欠点があり，実用的な実装を行うことは難しかった．今回，近傍の大きさが多項式で抑えられるような，極大モチーフの隣接性を明らかにし，それを用いて，ppc 拡張とよばれる極大モチーフから極大モチーフを生成する手法を開発し，それを用いて多項式時間のアルゴリズムを開発した．また少ないメモリしか使用しないようになった．隣接性の例を図 11 に示した．実用的な実装の開発も可能である．また，長さの制限や，冗長性の排除などの改良を行った．

頻出パターン発見問題は，幾何的なデータベースに適用することも可能である．各項目がグラフであるようなデータベースを考える．ただし，各頂点には 2 次元の座標が付加されている，つまり各項目は平面に埋め込まれたグラフになっているとする．このようなグラフを幾何グラフとよぶ．2 つの幾何グラフが，平行移動・拡大縮小・回転の 3 つの操作によって行きあえるとき，両者は同型であるとみなすことにする．すると，頻出パターン発見問題を，多くの項目の部分グラフと同型である幾何グラフを見つける問題として自然に定義できる．19 年度の研究では，頻出幾何グラフ列挙問題に対して，高速な列挙アルゴリズムを与えた．これは，このような幾何データベースに対する最初の多項式時間アルゴリズムとなっている．幾何グラフの頂点は座標を持つため，一般に同型な幾何グラフは無限個存在する．そのため，この研究では，幾何グラフに対する標準型を定義し，標準

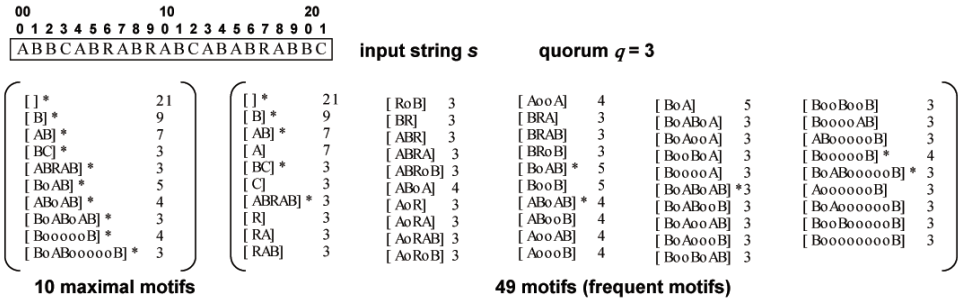


図 10: 文字列に対するモチーフと極大モチーフ

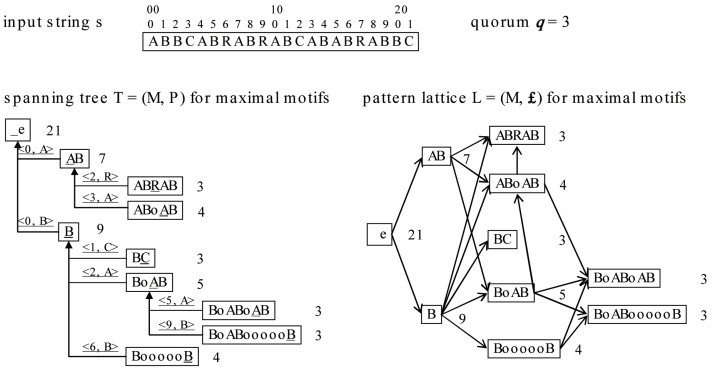


図 11: 極大モチーフが作る木構造（列挙木）

型を列挙する問題を解くことで，頻出幾何グラフを効率よく列挙できるようにした．また，標準型を唯一的にコード化する方法を考案し，そのコードを拡張しながら列挙することで，重複を簡潔かつ効率良く排除する計算手法を開発した．また，幾何グラフのクラスでは，飽和集合が唯一的に定まることを示し，また，LCM に使用した ppc 拡張を適用することで，多項式時間で飽和頻出幾何グラフが 1 つ当たり多項式時間で列挙できることを示した．幾何的なパターンに飽和パターンの概念が導入できることは，非常に興味深い結果となっている．このアルゴリズムは，枝や頂点にラベルが付いたモデルに簡単に拡張することができ，同様に多項式時間アルゴリズムを得ることができる．

19 年度は，系列マイニングの問題に対しても，飽和パターンの概念を拡張した．データベースの項目が文字やアイテムなどの列からなるとき，そのデータベースを系列データベースという．系列であるパターンの各要素が，他の系列の中に順番を崩さずに現れているとき，その系列パターンは，その系列に含まれるという．今回の研究では，系列パターンの一番最初の要素に着目し，系列データベースの各項目の中で，最初の要素に対応できる要素をもって，そのパターンの出現位置と解釈した．これは，計算の効率面とモデルの妥当性の折り合いの意味では，バランスの取れたモデルとなっている．そして，出現位置が同じパターンを等価と考えると，自然に飽和パターンを定義することができる．さらに，17 年度までに開発した ppc 拡張を用いると，全ての系列飽和パターンを探索できることを示し，飽和系列パターンを 1 つあたり多項式時間で列挙するアルゴリズムを提案した．これは，系列パターンに対するある種の極大パターンを列挙する，初めての多項式時間アルゴリズムとなっている．

同じくデータマイニングの分野で，実験結果の中からモデルを説明できるような項目の組合せを見つける問題がある．この問題に対して，18 年度の研究で，そのような項目の組合せの中から，極小なものを列挙するアルゴリズムを開発した．双対化というアルゴリズムを用いて無駄な探索を省き，高速に列挙することに成功した．同様のアル

ゴリズムは，UML とよばれるプログラム設計システム上の矛盾点を発見し，矛盾を無くすための最小の改良手段を見つける目的にも使える．

5　列挙アルゴリズムの応用

列挙アルゴリズムは，組合せアルゴリズムの中でも比較的基礎的な問題を扱うことが多い．そのため，他のアルゴリズムの部分問題を解く手段として，あるいは数理的な証明を行う際のツールとして用いられることも多い．この節では，本研究課題から派生的に発生した，そのような応用上の成果をまとめる．

1 つ目の成果は，いくつかの多面体を，共通部分が最大になるように，向きを変えずに重ね合わせる問題に対する多項式時間のアルゴリズムである．d 次元の多面体 $P_1, ..., P_n$ があるときに，これらを平行移動して重ね合わせ，その際の共通部分の体積を考える．この体積が最大になるような，平行移動の方法を考える問題は，目的関数が凸にも凹にもならず，一見難しい問題のように見える．しかし，この体積の d 乗根は，凸であることが証明できる．そのため，楕円体法による，体積計算をオラクルとした多項式時間アルゴリズムが設計できる．また，次元が低い場合，多面体の和集合で表されるような，非凸な集合の共通部分を最大化することもできる．そして，実行可能領域を，多面体の重なり方のトポロジーが等価な領域に分割することが可能であること，およびその領域の数がそれほど大きくないことが証明できる．図 5に例を示す．各領域内では，問題が多項式時間で解けるため，領域を列挙することで効率的な計算ができる．非凸な集合の個数が指数部にかかるオーダーとなるが，多項式時間アルゴリズムとなる．

2 つ目の成果は，最小重み三角形分割問題に関するアルゴリズムである．最小重み三角形分割問題とは，平面上に与えられた n 個の点からなる集合の凸包を三角形に分割する方法の中で辺長の総和が最も小さくなるものを求める問題であり，多項式時間で解けるかどうか 30 年もの間未解決であった重要な計算幾何の問題である．この問題に対して凸包の境界上にない点に着目し，そのような点の個数が k であるとき，$O(6^k n^5 \log n)$ 時間で最適解を求めるアルゴリズムを考案した．そのアルゴリズムの主要な部分では解くべき部分問題の列挙を行っているが，その数を巧みに減らすことで上記の計算量を得ている．

3 つ目の研究では，協力ゲーム理論におけるコア安定性問題という未解決問題に組合せ最適化ゲームの観点から接近を試みた．特に，理想グラフ上の最小彩色ゲームとよばれる協力ゲームに注目し，そのようなゲームに対してはコア安定性の判定が多項式時間で行え，また，関連するコア厳密性，コア拡張性，コア広大性の判定問題が coNP 完全であることを示した．また，後者の問題に対しては列挙アプローチに基づく $O(1.443^n n^{2.376})$ 時間厳密アルゴリズムを構築した．

線型相補性問題に対する組合せ的アプローチを模索する中で，Stickney と Watson は「3 次元以上の PLCP 超立方体において，出次数が偶数の頂点が 1 つのファセットに集まることはない」という予想を掲げた．この研究では，Moriyama によって単体的複体のシェラビリティー判定のために考案された h-割当という概念をこの問題に適用し，5 次元非巡回 PLCP 超立方体の中から予想の反例となりえるものを全て列挙し，それら反例候補を調べることで，5 次元非巡回 PLCP 超立方体に関して Stickney と Watson の予想が成立することを示した．

与えられた無向グラフの中に閉路を含まない部分グラフ (森とよばれる) がいくつあるか数える問題はネットワークの信頼性計算などと関連し，多く研究がなされている．しかし，大抵そのような問題は# P 完全，すなわち，多項式時間で解ける望みのない問題であることが証明されている．この研究では与えられるグラフをどこまで制限しても ＃ P 完全のままであるのか議論し，平面的 3 正則グラフやコーダルグラフに対しても＃ P 完全であることを証明した．また，3 正則グラフに対して $O^*(1.8494^m)$ 時間，単位区間グラフに対して $O^*(1.9706^m)$ 時間の厳密アルゴリズムを構築した (ただし，m は入力グラフの辺数で，O^* という記法は定数だけではなく多項式因子も無視したものである)．これらのアルゴリズムは解くべき部分問題の列挙に基づいているが，その数を巧みに抑えることで上記の計算量を達成している

グラフマイニングのアルゴリズムの効率化には，グラフの重複を簡潔にチェックするための，グラ

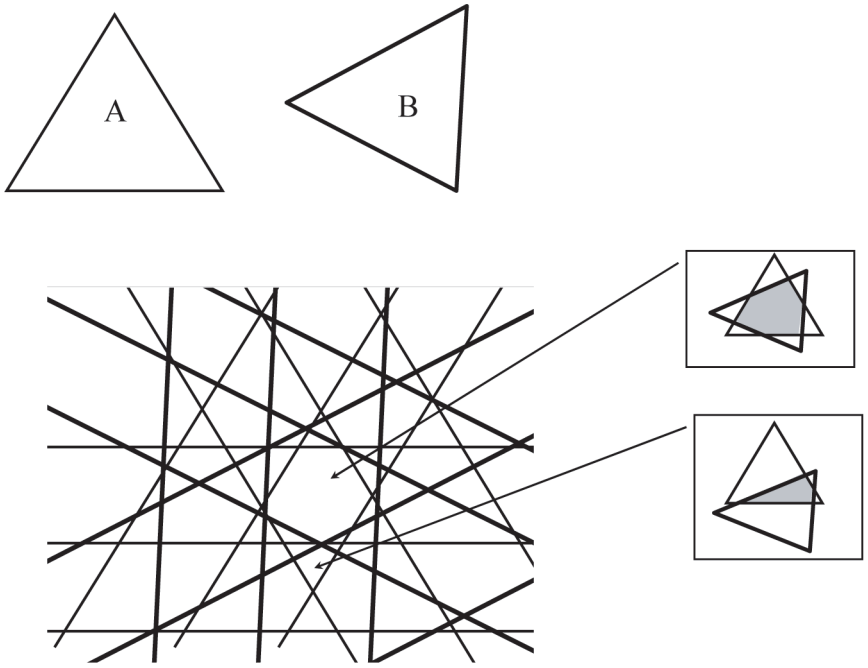


図 12: 2 次元の多面体の重なり方が等しい領域への分割

フのコード化の手法と，グラフの包含関係をチェックする技法が重要である．本研究課題でも，これらの手法に対する研究を行ってきている．一方で，グラフを項目とするデータベースにおいては，検索を効率よく行うために，これらの手法は中核の課題となっている．当研究課題では，化学情報のデータベースに対して，当研究課題で培ってきた技術を適用することで，検索条件として指定した部分グラフを含む項目を効率良く見つけられるようになった．これにより，既存の検索手法を大幅に上回る速度で検索が行えるようになったとことに加え，理論的に誤りのない検索手法を実現することができた．この研究は、C02 班の岩田覚氏との共同研究である。

列挙アルゴリズム設計のためには，列挙する構造の隣接性を明らかにする必要がある．隣接性が明らかになると，構造の上を効率よく探索できるようになるからである．列挙の他にも，隣接性が明らかになることで効率化が行えるアルゴリズムが存在する．ランダム生成のアルゴリズムはその一例である．19 年度の研究では，これまでに行った木の列挙アルゴリズムでの成果を応用することで，根付き木のランダム生成を行うアルゴリズムを提案した．各点の子に順序がある根付き木を, 順序木とよぶ. 点の個数が整数 $n \geq 2$ である順序木は, カタラン数 ${}_{2n-2}C_{n-1}/n$ 個ある．また, 点の個数が $n \geq 3$ であり, 葉の個数が $k \leq n-1$ である順序木は, Narayana 数 $({}_{n-2}C_{k-1})({}_{n-1}C_{k-1})/k$ 個ある．点の個数が n である順序木を, 一様ランダムに生成するアルゴリズムがいくつも知られているが, 点の個数が n であり葉の個数が k である順序木を, 一様ランダムに生成するアルゴリズムは知られていない．この研究では, 整数 n と k が与えられたとき, 点の個数が n であり, 葉の個数が k である順序木を, 効率的に, 一様ランダムに生成する簡単なアルゴリズムを与えた.

研究業績一覧

学術論文

1. Takeaki Uno, Masashi Kiyomi, Hiroki Arimura:
“LCM ver.2: Efficient Mining Algorithms for Frequent/Closed/Maximal Itemsets”, Proceedings of IEEE ICDM’04 Workshop

FIMI'04, 2004年11月.

概要: For a transaction database, a frequent itemset is an itemset included in at least a specified number of transactions. A frequent itemset P is maximal if P is included in no other frequent itemset, and closed if P is included in no other itemset included in the exactly same transactions as P. The problems of finding these frequent itemsets are fundamental in data mining, and from the applications, fast implementations for solving the problems are needed. In this paper, we propose efficient algorithms LCM (Linear time Closed itemset Miner), LCMfreq and LCMmax for these problems. We show the efficiency of our algorithms by computational experiments compared with existing algorithms.

2. Shin-ichi Nakano, Takeaki Uno:
"Constant Time Generation of Trees with Specified Diameter", Lecture Notes in Computer Science, 3353, 33-45, 2004年5月.

概要: Many algorithms to generate all trees with n vertices without repetition are already known. The best algorithm runs in time proportional to the number of trees. However, the time needed to generate each tree may not be bounded by a constant, even though it is "on average". In this paper we give a simple algorithm to generate all trees with exactly n vertices and diameter d, without repetition. Our algorithm generates each tree in constant time. It also generates all trees so that each tree can be obtained from the preceding tree by at most three operations. Each operation consists of a deletion of a vertex and an addition of a vertex. By using the algorithm for each diameter $2, 3, \cdots, n-1$, we can generate all trees with n vertices.

3. Kazuhisa Makino, Takeaki Uno:
"New Algorithms for Enumerating All Maximal Cliques", Lecture Notes in Computer Science, 3111, 260-272, 2004年7月.

概要: In this paper, we consider the problems of generating all maximal (bipartite) cliques in a given (bipartite) graph $G = (V, E)$ with n vertices and m edges. We propose two algorithms for enumerating all maximal cliques. One runs with $\mathrm{O}(M(n))$ time delay and in $\mathrm{O}(n^2)$ space and the other runs with $\mathrm{O}(\Delta^4)$ time delay and in $\mathrm{O}(n+m)$ space, where Δ denotes the maximum degree of G, $M(n)$ denotes the time needed to multiply two $n \times n$ matrices, and the latter one requires $\mathrm{O}(nm)$ time as a preprocessing. For a given bipartite graph G, we propose three algorithms for enumerating all maximal bipartite cliques. The first algorithm runs with $\mathrm{O}(M(n))$ time delay and in $\mathrm{O}(n^2)$ space, which immediately follows from the algorithm for the non-bipartite case. The second one runs with $\mathrm{O}(\Delta^3)$ time delay and in $\mathrm{O}(n+m)$ space, and the last one runs with $\mathrm{O}(\Delta^2)$ time delay and in $\mathrm{O}(n+m+N\Delta)$ space, where N denotes the number of all maximal bipartite cliques in G and both algorithms require $\mathrm{O}(nm)$ time as a preprocessing. Our algorithms improve upon all the existing algorithms, when G is either dense or sparse. Furthermore, computational experiments show that our algorithms for sparse graphs have significantly good performance for graphs which are generated randomly and appear in real-world problems.

4. Shin-ichi Nakano:
"Efficient Generation of Triconnected Plane Triangulations", Computational Geometry Theory and Applications, 27, 109-122, 2004.

概要: A "rooted" plane triangulation is a plane triangulation with one designated vertex on the outer face. A simple algorithm to generate all triconnected rooted plane triangulations with at most n vertices is presented. The algorithm uses $O(n)$ space and generates such triangulations in $O(1)$ time

per triangulation without duplications. The algorithm does not output entire triangulations but the difference from the previous triangulation. By modifying the algorithm all triconnected rooted plane triangulations having exactly n vertices including exactly r vertices on the outer face in $O(r)$ time per triangulation can be generated without duplicates, while the previous best algorithm generates such triangulations in $O(n^2)$ time per triangulation. All triconnected (non-rooted) plane triangulations having exactly n vertices including exactly r vertices on the outer face can also be generated without duplicates in $O(r^2n)$ time per triangulation, and all maximal planar graphs can be generated in $O(n^3)$ time per graph.

5. 高木正博, 中野眞一:
"L 字形描画の列挙", 電子情報通信学会論文誌 DI, J87-D-I, 1-11, 2004 年.
概要: グラフを, 各面が L 字形 (退化した L 字形として長方形を含む) であるように, かつ, 辺が交差することなく, 平面に描画したものを, グラフの L 字形描画とよぶ. 本文は, 全ての底辺つき L 字形描画を, 重複も抜けもなく列挙する高速なアルゴリズムを与える. 本文のアルゴリズムは, 内面の個数がちょうど n 個である底辺つき L 字形描画の全てを, 重複も抜けもなく, 描画 1 つあたり $O(1)$ 時間で生成する. このアルゴリズムが使用する作業用記憶領域はアルゴリズム全体で $O(n)$ である.

6. H. Tanaka and S. Nakano:
"Efficient Generation of Plane Triangulations with Specified Maximum Degree", 電子情報通信学会英文論文誌 Special issue on Foundations of Computer Science, Vol.E87-D, 330-336, 2004 年.
概要: A "based" plane triangulation is a plane triangulation with one designated edge on the outer face. In this paper we give a simple algorithm to generate all biconnected based plane triangulations having exactly n vertices and with the maximum degree exactly D. The algorithm uses $O(n)$ space and generates such triangulations in $O(1)$ time per triangulation without duplications.

7. 佐藤広幸, 金子雄一, 中野眞一:
"多面体の数え上げ", 電子情報通信学会論文誌 A, J87-A, 1419-1424, 2004 年.
概要: 点の個数が n 個であり, 面の個数が f 個であるような, 異なる 3 次元多面体の個数を求めることは, 幾何学における有名な未解決問題の 1 つである. また多面体の効率的な数え上げアルゴリズムもこれまで知られていなかった. 最近, 底辺つき極大平面的グラフを, 効率良く列挙するアルゴリズムが, 我々によって設計された. 本文では, このアルゴリズムを基にして, 全ての面が三角形であるような多面体の効率的な数え上げアルゴリズムを設計する. また, このアルゴリズムを実装し, $4 \leq n \leq 15$ なる各 n について, 点の個数が n であり全ての面が三角形であるような多面体の個数を数え上げたので報告する. また列挙したグラフの全てを WWW 上で公開したので報告する.

8. 山中克久, 中野眞一:
"リアライザの列挙", 電子情報通信学会論文誌 DI, 87, 1043-1050, 2004.
概要: 極大平面グラフ (全ての面が三角形である平面グラフ) が与えられたとき, ある条件を満たすような内辺の分割をそのグラフのリアライザとよぶ. リアライザは平面グラフの描画アルゴリズム等に応用がある. グラフ G が与えられたとき, G のリアライザを列挙するアルゴリズムは, これまで知られていなかった. 本文は, まず, 左優先順序という極大平面グラフの点の順序づけを定義し, そして, 左優先順序とリアライザには 1 対 1 の対応関係があることを示す. このことを利用して, リアライザを重複も抜けもなく高速に列挙するアルゴリズムを与える. 本文のアルゴリズムは, n 点からなる極大平面グラフのリアライザを, 重複も抜けもなく, リアライザ 1 つあたり $O(n)$ 時間で生成する.

9. Shin-ichi Nakano, Takeaki Uno:
"Generating Colored Trees", 31st International Workshop on Graph-Theoretic Concepts in Computer Science, Lecture Notes in Computer Science, 3787, 249-260, 2005年12月.
概要: A c-tree is a tree such that each vertex has a color c in $\{c_1, c_2, ..., c_m\}$. The problem of enumerating all c-trees with at most n vertices without repetition has an application to data mining problem of tree structured patterns, however no efficient algorithm, which generates each tree in constant time on average, is known. In this paper we give a simple algorithm for enumerating c-trees with at most n vertices and diameter d. Our algorithm generates each c-tree in constant time on average. By using the algorithm for each diameter $2, 3, ..., n-1$, we can generate all c-trees with at most n vertices.

10. Yoshio Okamoto, Takeaki Uno, Ryuhei Uehara:
"Linear-Time Counting Algorithms for Independent Sets in Chordal Graphs", 31st International Workshop on Graph-Theoretic Concepts in Computer Science, Lecture Notes in Computer Science, 3787, 433-444, 2005年12月.
概要: We study some counting and enumeration problems for chordal graphs, especially concerning independent sets. We first provide the following efficient algorithms for a chordal graph: (1) a linear-time algorithm for counting the number of independent sets; (2) a linear-time algorithm for counting the number of maximum independent sets; (3) a polynomial-time algorithm for counting the number of independent sets of a fixed size. With similar ideas, we show that enumeration (namely, listing) of the independent sets, the maximum independent sets, and the independent sets of a fixed size in a chordal graph can be done in constant amortized time per output. On the other hand, we prove that the following problems for a chordal graph are #P-complete: (1) counting the number of maximal independent sets; (2) counting the number of minimum maximal independent sets. With similar ideas, we also show that finding a minimum weighted maximal independent set in a chordal graph is NP-hard, and even hard to approximate.

11. Hiroki Arimura, Takeaki Uno:
"An Output-Polynomial Time Algorithm for Mining Closed Frequent Ranked Tree Patterns", Lecture Notes in Artificial Intelligence, 3625, 1-19, 2005年8月.
概要: Frequent closed pattern discovery is one of the most important topics in the studies of the compact representation for data mining. In this paper, we consider the frequent closed pattern discovery problem for a class of structured data, called attribute trees (AT), which is a subclass of labeled ordered trees and can be also regarded as a fragment of description logic with functional roles only. We present an efficient algorithm for discovering all frequent closed patterns appearing in a given collection of attribute trees. By using a new enumeration method, called the prefix-preserving closure extension, which enables efficient depth-first search over all closed patterns without duplicates, we show that this algorithm works in polynomial time both in the total size of the input database and the number of output trees generated by the algorithm. To our knowledge, this is one of the first results for output-sensitive algorithms for frequent closed substructure disocvery from trees and graphs.

12. Yasuko Matsui, Takeaki Uno:
"On the Enumeration of Bipartite Minimum Edge Colorings", Trends in Mathematics, 271-285, 2005年.

概要: For a bipartite graph $G = (V, E)$, an edge coloring of G is a coloring of the edges of G such that any two adjacent edges are colored in different colors. In this paper, we consider the problem of enumerating all edge colorings with the fewest number of colors. We propose a simple polynomial delay algorithm whose amortized time complexity is $O(|V|)$ per output, whereas the previous fastest algorithm took $O(|E| \log |V|)$ time per output. Although the delay of the algorithm is $O(|E||V|)$, the delay of our algorithm can be reduced to $O(|V|)$ by using a simple modification with a queue of polynomial size. We show an improvement to reduce the space complexity from $O(|V||E|)$ to $O(|E|+|V|)$. Furthermore, we obtain a lower bound $(|E| - |\hat{V}| + 1) \max\{2^{\Delta-3}, 2(|\hat{V}|/2 + 1)^{\Delta-3}/(\Delta - 1)\}/\Delta$ of the number of edge colorings included in G, where Δ is the maximum degree and $\hat{V}$ is the set of vertices of the maximum degree.

13. 高木正博, 中野眞一:
"L 字形描画の列挙", 電子情報通信学会論文誌 DI, J87-D-I, 1-11, 2004 年.
概要: グラフを, 各面が L 字形 (退化した L 字形として長方形を含む) であるように, かつ, 辺が交差することなく, 平面に描画したものを, グラフの L 字形描画とよぶ. 本文は, 全ての底辺つき L 字形描画を, 重複も抜けもなく列挙する高速なアルゴリズムを与える. 本文のアルゴリズムは, 内面の個数がちょうど n 個である底辺つき L 字形描画の全てを, 重複も抜けもなく, 描画 1 つあたり $O(1)$ 時間で生成する. このアルゴリズムが使用する作業用記憶領域はアルゴリズム全体で $O(n)$ である.

14. Komei Fukuda and Takeaki Uno:
"Polynomial Time Algorithms for Maximizing the Intersection Volume of Polytopes", Pacific Journal of Optimization, Vol 3, no. 1, 37-52, 2007.
概要: Suppose that we have several polytopes in R^d and we can translate them without rotation. Here we consider the intersection maximization problem, which asks the positions of the polytopes which maximizes the volume of their intersection. In this paper, we address this problem, and show that the problem can be solved in oracle polynomial time by an ellipsoid method, exploiting two important facts. Namely, the objective function is a continuous piecewise-polynomial function and its dth root is concave. We further study the structure of the problem in depth for the two dimensional case, and propose an algorithm which solves it in $O(n^4)$ time for two non-convex polygons, where n is the total number of vertices.

15. Hiroki Arimura and Takeaki Uno:
"An Efficient Polynomial Space and Polynomial Delay Algorithm for Enumeration of Maximal Motifs in a Sequence", Journal of Combinatorial Optimization, 13, 243-262, 2006.
概要: In this paper, we consider the problem of enumerating all maximal motifs in an input string for the class of repeated motifs with wild cards. A maximal motif is such a representative motif that is not properly contained in any larger motifs with the same location lists. Although the enumeration problem for maximal motifs with wild cards has been studied in (Parida et al., CPM '01), (Pisanti et al.,MFCS '03) and (Pelfrene et al., CPM '03), its output-polynomial time computability has been still open. The main result of this paper is a polynomial space polynomial delay algorithm for the maximal motif enumeration problem for the repeated motifs with wild cards. This algorithm enumerates all maximal motifs in an input string of length n in $O(n^3)$ time per motif with $O(n)$ space, in particular $O(n^3)$ delay. The key to the algorithm is depth-first search on a tree-shaped search route

over all maximal motifs based on a technique called prefix-preserving closure extension. We also show an exponential lower bound and a succinctness result on the number of maximal motifs, which indicate the limit of a straightforward approach. The results of the computational experiments show that our algorithm can be applicable to huge string data such as genome data in practice, and does not take large additional computational cost compared to usual frequent motif mining algorithms.

16. Kevin Buchin, Andreas Razen, Takeaki Uno and Uli Wagner:
"Transforming Spanning Trees: A Lower Bound", 23nd European Workshop on Computational Geometry, 2007.
概要: For a planar point set we consider the graph of crossing-free straight-line spanning trees where two spanning trees are adjacent in the graph if their union is crossing-free. An upper bound on the diameter of this graph implies an upper bound on the diameter of the flip graph of pseudo-triangulations of the under- lying point set. We prove a lower bound of $O(\log n/\log(\log n))$ for the diameter of the graph of spanning trees on a planar set of n points. This nearly matches the known upper bound of $O(\log n)$. If we measure the diameter in terms of the number of convex layers k of the point set, our lower bound construction is tight, i.e., the diameter is in $\log k$ which matches the known upper bound of $O(\log k)$. So far only constant lower bounds were known

17. Ken Satoh, Ken Kaneiwa and Takeaki Uno:
"Contradiction Finding and Minimal Recover for UML class diagrams", ASE2006, Lecture Notes in Computer Science, 4092, 354-365, 2006.
概要: UML (Unified Modeling Language) is the de facto standard model representation language in software engineering. We believe that automated contradiction detection and repair of UML becomes very important as UML has been widely used. In this paper, we propose a debugging system using logic programming paradigm for UML class diagram with class attributes, multiplicity, generalization relation and disjoint relation. We propose a translation method of a UML class diagram into a logic program, and using a meta-interpreter we can find minimal sets of rules which leads to contradiction. Then, we use a minimal hitting set algorithm developed by one of the authors to show minimal sets of deletion of rules in order to avoid contradiction.

18. Marc Benkert, Martin Noellenburg, Takeaki Uno and Alexander Wolff:
"Minimizing Intra-Edge Crossings in Wiring Diagrams and Public Transport Maps", GD2006, Lecture Notes in Computer Science, 4372, 270-281, 2006.
概要: In this paper we consider a new problem that occurs when drawing wiring diagrams or public transportation networks. Given an embedded graph $G = (V, E)$ (e.g., the streets served by a bus network) and a set L of paths in G (e.g., the bus lines), we want to draw the paths along the edges of G such that they cross each other as few times as possible. For esthetic reasons we insist that the relative order of the paths that traverse a node does not change within the area occupied by that node. Our main contribution is an algorithm that minimizes the number of crossings on a single edge $(u, v) \in E$ if we are given the order of the incoming and outgoing paths. The difficulty is deciding the order of the paths that terminate in u or v with respect to the fixed order of the paths that do not end there. Our algorithm uses dynamic programming and takes $O(n^2)$ time, where n is the number of terminating paths.

19. Ken Satoh and Takeaki Uno:
"Enumerating Minimal Explanations by Minimal Hitting Set Computation", KSEM 2006, Lecture Notes in Computer Science, 4092, 354-365, 2006.
概要: We consider the problem of enumerating minimal explanations in propositional theory. We propose a new way of characterizing the enumeration problem in terms of not only the number of explanations, but also the number of unexplanations. Maximal unexplanations are a maximal set of abducible formulas which cannot explain the observation given a background theory. In this paper, we interleavingly enumerate not only minimal explanations but also maximal unexplanations. To best of our knowledge, there has been no algorithm which is characterized in terms of such maximal unexplanations. We propose two algorithms to perform this task and also analyze them in terms of query complexity, space complexity and time complexity.

20. Masashi Kiyomi, Shuji Kijima and Takeaki Uno:
"Listing Chordal Graphs and Interval Graphs", WG 2006, Lecture Notes in Computer Science, 4271, 68-77, 2006.
概要: We propose algorithms for enumeration problems; given a graph G, to find every chordal supergraph (in K^n) of G, to find every interval supergraph (in K^n) of G, and to find every interval subgraph of G in K^n. The algorithms are based on the reverse search method. A chordal graph is a graph which has no induced chordless cycle of length more than three. An interval graph is a graph which has an interval representation. To the best of our knowledge, these are the first results about the enumeration problems of them that can find each graph in polynomial time. The time complexities of the former two algorithms are $O(n^3)$ for each output graph, and that for the latter is $O((n+m)^2)$ for each output graph, where m is the number of edges of input graph G. We also show that a straightforward depth-first search type algorithm works badly for these problems.

21. Katsuhisa Yamanaka and Shin-ichi Nakano:
"Coding Foorplans with Fewer Bits", IEICE TRANS. FUNDAMENTALS, Vol.E89-A, no. 5, 1181-1185, 2006 年 5 月.
概要: m 本の辺からなるフロアプランを, $2m$ ビットを用いてコード化する簡単な方法が知られている. 本文では, よりコンパクトなコード化を提案する. 我々の方法は, 実装が容易であり, 各フロアプランを $5m/3$ ビットでコード化する.

22. Satoshi Yoshii, Daisuke Chigira, Katsuhisa Yamanaka and Shin-ichi Nakano:
"Constant Time Generation of Rectangular Drawings with Exactly n Faces", IEICE TRANS. FUNDAMENTALS, Vol.E89-A, no. 9, 2445-2450, 2006 年 9 月.
概要: 全ての面が方形である平面描画を方形描画とよぶ. 本論文は, 内面の個数がちょうど n である方形描画を, 描画ひとつあたり $O(1)$ 時間で, 重複も抜けもなく, 列挙するアルゴリズムを与える.

23. 千明大介, 中野眞一:
"窓なし部屋の個数が高々k の方形描画の高速列挙アルゴリズム", 電子情報通信学会論文誌 A, Vol.J90-A, no. 2, 122-130, 2007 年 2 月.
概要: 全ての面が方形である平面描画を方形描画とよぶ. 方形描画の外面と隣接している内面を窓つき部屋とよび, 外面と隣接していない内面を窓なし部屋とよぶ. 本論文は, 内面の個数が n であり, 窓なし部屋の個数が高々k である底辺つき方形描画を, 描画ひとつあたり $O(1)$ 時間で, 重複も抜けもなく, 列挙するアルゴリズムを与える. これまではそのような描画を平均 $O(1)$ 時間で列挙するアルゴリズムしか知られていなかった.

24. Katsuhisa Yamanaka, Shin-ichiro Kawano,

Yosuke Kikuchi and Shin-ichi Nakano: "Constant Time Generation of Integer Partitions", Proc. of WAAC06, The 9th Japan-Korea Joint Workshop on Algorithms and Computation, 57-64, 2006年7月.
概要: 整数 n の整数分割を列挙するアルゴリズムを与える. この問題は, 組合せ論において基本的な問題の1つであり, 長い間, 広く研究されてきた. これまで, 整数分割を1つ当たり平均定数時間で列挙する方法しか知られていなかった. 我々は, 与えられた整数の整数分割を, 最悪でも1つ当たり定数時間で重複なく列挙するアルゴリズムを提案する. また, 条件付きの整数分割を定数時間で列挙するアルゴリズムをいくつか与える.

25. Michael Hoffmann and Yoshio Okamoto: "The minimum weight triangulation problem with few inner points", Computational Geometry: Theory and Applications, 34, 149-158, July 2006.
概要: We look at the computational complexity of 2-dimensional geometric optimization problems on a finite point set with respect to the number of inner points (that is, points in the interior of the convex hull). As a case study, we consider the minimum weight triangulation problem. Finding a minimum weight triangulation for a set of n points in the plane is not known to be NP-hard nor solvable in polynomial time, but when the points are in convex position, the problem can be solved in $O(n^3)$ time by dynamic programming. We extend the dynamic programming approach to the general problem and describe an exact algorithm which runs in $O(6^k n^5 \log n)$ time where n is the total number of input points and k is the number of inner points. If k is taken as a parameter, this is a fixed-parameter algorithm. It also shows that the problem can be solved in polynomial time if $k = O(\log n)$. In fact, the algorithm works not only for convex polygons, but also for simple polygons with k inner points.

26. Thomas Bietenhader and Yoshio Okamoto: "Core stability of minimum coloring games", Mathematics of Operations Research, 31, 418-431, May 2006.
概要: In cooperative game theory, a characterization of games with stable cores is known as one of the most notorious open problems. We study this problem for a special case of the minimum coloring games, introduced by Deng, Ibaraki & Nagamochi, which arise from a cost allocation problem when the players are involved in conflict. In this paper, we show that the minimum coloring game on a perfect graph has a stable core if and only if every vertex of the graph belongs to a maximum clique. We also consider the problem on the core largeness, the extendability, and the exactness of minimum coloring games. As a consequence, we show that it is coNP-complete to decide whether a given game has a large core, is extendable, or is exact.

27. Sonoko Moriyama and Yoshio Okamoto: "The even outdegree conjecture for acyclic PLCP-cubes in dimension five", IEICE Transactions on Information and Systems, E89-D, 2402-2404, August 2006.
概要: The behavior of Bard-type pivoting algorithms for the linear complementarity problem with a P-matrix is represented by an orientation of a hypercube. We call it a PLCP-cube. In 1978, Stickney and Watson conjectured that such an orientation has no facet on which all even outdegree vertices appear. We prove that this conjecture is true for acyclic PLCP-cubes in dimension five.

28. Heidi Gebauer and Yoshio Okamoto: "Fast exponential-time algorithms for the forest counting in graph classes", Proceedings of 13th Computing: The Australasian Theory Symposium (CATS 2007), Confer-

ences in Research and Practice in Information Technology, 65, 63-69, January 2007.
概要: We prove #P-completeness for counting the number of forests in regular graphs and chordal graphs. We also present algorithms for this problem, running in $O^*(1.8494^m)$ time for 3-regular graphs, and $O^*(1.9706^m)$ time for unit interval graphs, where m is the number of edges in the graph and O^*-notation ignores a polynomial factor. The algorithms can be generalized to the Tutte polynomial computation.

29. Takehiro Ito, Yoshio Okamoto, and Takeshi Tokuyama:
"Algorithms for the full Steiner tree problem", Proceedings of ICALP'06 Affiliated Workshop "Improving Exponential Time Algorithms", 39-45, July 2006.
概要: Assume that each edge of a graph $G = (V, E)$ is assigned a nonnegative real number cost, and that a set $K \subseteq V$ of vertices, called *terminals*, is given. A *full Steiner tree* (or a *terminal Steiner tree*) of G with respect to K is a subtree T of G such that every vertex in K is a leaf of T. For a given graph G and a given set $K \subseteq V$ of terminals, the (minimum-cost) *full Steiner tree problem* is to find a full Steiner tree for K which has the minimum total cost of edges. In this paper we first give an exact algorithm to solve the problem for general graphs in time $O^*(3^k)$ where $k = |K|$, and hence it shows the fixed-parameter tractability of the problem. We then show that the problem can be solved in polynomial time for plane graphs if all the terminals lie only on a fixed constant number of face boundaries.

30. Heidi Gebauer and Yoshio Okamoto:
"Fast exponential-time algorithms for the forest counting in graph classes", Proceedings of ICALP'06 Affiliated Workshop "Improving Exponential Time Algorithms", 25–30, July 2006.
概要: We prove #P-completeness for counting the number of forests in regular graphs and chordal graphs. We also present algorithms for this problem, running in $O^*(1.8494^m)$ time for 3-regular graphs, and $O^*(1.9706^m)$ time for unit interval graphs, where m is the number of edges in the graph and O^*-notation ignores a polynomial factor. The algorithms can be generalized to the Tutte polynomial computation.

31. Yoshio Okamoto, Ryuhei Uehara, and Takeaki Uno:
"Counting the Number of Independent Sets in Chordal Graphs", Journal of Discrete Algorithms, to appear, 2007.
概要: We study some counting and enumeration problems for chordal graphs, especially concerning independent sets. We first provide the following efficient algorithms for a chordal graph: (1) a linear-time algorithm for counting the number of independent sets; (2) a linear-time algorithm for counting the number of maximum independent sets; (3) a polynomial-time algorithm for counting the number of independent sets of a fixed size. With similar ideas, we show that enumeration (namely, listing) of the independent sets, the maximum independent sets, and the independent sets of a fixed size in a chordal graph can be done in constant amortized time per output. On the other hand, we prove that the following problems for a chordal graph are #P-complete: (1) counting the number of maximal independent sets; (2) counting the number of minimum maximal independent sets. With similar ideas, we also show that finding a minimum weighted maximal independent set in a chordal graph is NP-hard, and even hard to approximate.

32. Kenji Kashiwabara, Yoshio Okamoto, and Takeaki Uno:

"Matroid Representation of Clique Complexes", Discrete Applied Mathematics, 155, 1910-1929, 2007.

概要: In this paper, we approach the quality of a greedy algorithm for the maximum weighted clique problem from the viewpoint of matroid theory. More precisely, we consider the clique complex of a graph (the collection of all cliques of the graph) and investigate the minimum number k such that the clique complex of a given graph can be represented as the intersection of k matroids. This number k can be regarded as a measure of "how complex a graph is with respect to the maximum weighted clique problem" since a greedy algorithm is a k-approximation algorithm for this problem. For any $k > 0$, we characterize graphs whose clique complexes can be represented as the intersection of k matroids. Moreover, we determine the necessary and sufficient number of matroids for the representation of all graphs with n vertices. This number turns out to be $n = 1$. Other related investigations are also given.

33. Toshihide Ibaraki, Shinji Imahori, Koji Nonobe, Kensuke Sobue, Takeaki Uno, and Mutsunori Yagiura:
"An Iterated Local Search Algorithm for the Vehicle Routing Problem with Convex Time Penalty Functions", Discrete Applied Mathematics, 2007.

概要: The vehicle routing problem with time windows (VRPTW) is the problem to minimize the sum of the distances traveled by a fixed number of vehicles, which visit every customer exactly once under capacity and time window constraints. This problem is a well-known combinatorial optimization problem and has a wide range of applications such as bank deliveries, postal deliveries, school bus routing and so on. Since it is known to be NP-hard, no exact algorithm for VRPTW exists unless P = NP, and a number of heuristics have been proposed in the literature. The problem VRPTW usually allows only one time window for each customer. In this paper, we allow a general time window constraint (VRPGTW), in the sense that one or more time windows are allowed for each customer. In our formulation, the time window constraint for each customer is treated as a penalty function, which can be non-convex and discontinuous as long as it a piecewise linear function. Hence, after fixing the order of customers for a vehicle to visit, we must determine the optimal start times to serve the customers so that the total time penalty of the vehicle is minimized. We show that this problem can be efficiently solved by using dynamic programming. This dynamic programming is incorporated in the local search algorithms. In our local search, in addition to standard neighborhoods, we use a new type of neighborhood called the cyclic exchange neighborhood, whose size generally grows exponentially with the input size. To overcome this difficulty, we propose an efficient heuristic to find an improved solution in the cyclic exchange neighborhood via the improvement graph. The computational results for various benchmark instances exhibit good prospects of the proposed algorithms.

34. Shungo Koichi, Satoru Iwata, Takeaki Uno, Hiroyuki Koshino and Hiroko Satoh:
"Algorithm for Advanced Canonical Coding of Planar Chemical Structures That Considers Stereochemical and Symmetric Information", Journal of Chemical Information and Modeling, 47, 1734-1746, 2007.

概要: We describe a rigorous and fast algorithm for advanced canonical coding of planar chemical structures based on the algorithm of Faulon et al. (J. Chem. Inf. Comput. Sci. 2004, 44, 427-436). Our algorithm works well even for highly sym-

metric structures; moreover, an advantage of our algorithm includes providing a rigorous canonical numbering of atoms with a consideration of stereochemistry and recognizing symmetric moieties. The planar structural line notation with the canonical numbering is also fit for use with stereochemical line notation. These capabilities are usable for general purposes in chemical structural coding and are particularly essential for detecting equivalent atoms in NMR studies. This algorithm was implemented on a 13C NMR chemical shift prediction system CAST/CNMR. Applications of the algorithm to several organic compounds demonstrate the practical efficiency of the rigorous coding.

35. Yoshio Okamoto and Takeaki Uno:
"A Polynomial-Time-Delay and Polynomial-Space Algorithm for Enumeration Problems in Multi-Criteria Optimization", Proceedings of ISAAC 2007, Lecture Notes in Computer Science, 4835, 609-620, 2007.
概要: We propose a polynomial-time-delay polynomial-space algorithm to enumerate all efficient extreme solutions of a multi-criteria minimum-cost spanning tree problem, while only the bi-criteria case was studied in the literature. The algorithm is based on the reverse search framework due to Avis & Fukuda. We also show that the same technique can be applied to the multi-criteria version of the minimum-cost basis problem in a (possibly degenerated) submodular system. As an ultimate generalization, we propose an algorithm to enumerate all efficient extreme solutions of a multi-criteria linear program. When the given linear program has no degeneracy, the algorithm runs in polynomial-time delay and polynomial space. To best of our knowledge, they are the first polynomial-time delay and polynomial-space algorithms for the problems.

36. Takeaki Uno:
"An Efficient Algorithm for Enumerating Pseudo Cliques", Proceedings of ISAAC 2007, Lecture Notes in Computer Science, 4835, 402-414, 2007.
概要: The problem of finding dense structures in a given graph is quite basic in informatics including data mining and data engineering. Clique is a popular model to represent dense structures, and widely used because of its simplicity and ease in handling. Pseudo cliques are natural extension of cliques which are subgraphs obtained by removing small number of edges from cliques. We here define a pseudo clique by a subgraph such that the ratio of the number of its edges compared to that of the clique with the same number of vertices is no less than a given threshold value. In this paper, we address the problem of enumerating all pseudo cliques for given a graph and a threshold value. We first show that it seems to be difficult to obtain polynomial time algorithms using straightforward divide and conquer approaches. Then, we propose a polynomial time, polynomial delay in precise, algorithm based on reverse search. Computational experiments show the efficiency of our algorithm for both randomly generated graphs and practical graphs.

37. Sebastian Nowozin, Koji Tsuda, Takeaki Uno, Taku Kudo, and Goekhan Bakir:
"Weighted Substructure Mining for Image Analysis", CVPR 2007, 2007.
概要: In web-related applications of image categorization, it is desirable to derive an interpretable classification rule with high accuracy. Using the bag-of-words representation and the linear support vector machine, one can partly fulfill the goal, but

the accuracy of linear classifiers is not high and the obtained features are not informative for users. We propose to combine item set mining and large margin classifiers to select features from the power set of all visual words. Our resulting classification rule is easier to browse and simpler to understand, because each feature has richer information. As a next step, each image is represented as a graph where nodes correspond to local image features and edges encode geometric relations between features. Combining graph mining and boosting, we can obtain a classification rule based on subgraph features that contain more information than the set features. We evaluate our algorithm in a web-retrieval ranking task where the goal is to reject outliers from a set of images returned for a keyword query. Furthermore, it is evaluated on the supervised classification tasks with the challenging VOC2005 data set. Our approach yields excellent accuracy in the unsupervised ranking task compared to a recently proposed probabilistic model and competitive results in the supervised classification task.

38. Shin-ichi Nakano, Ryuhei Uehara and Takeaki Uno:
"Efficient Algorithms for Airline Problem", Lecture Notes in Computer Science (Proceedings of TAMC 2007), 4484, 428-439, 2007.
概要: The airlines in the real world form small-world network. This implies that they are constructed with an ad hoc strategy. The small-world network is not so bad from the viewpoints of customers and managers. The customers can fly to any destination through a few airline hubs, and the number of airlines is not so many comparing to the number of airports. However, clearly, it is not the best solution in either viewpoint since there is a trade off. In this paper, one of the extreme cases, which is the standpoint of the manager, is considered; we assume that customers are silent and they never complain even if they are required to transit many times. This assumption is appropriate for some transportation service and packet communication. Under this assumption, the airline problem is to construct the least cost connected network for given distribution of the populations of cities with no a priori connection. First, we show an efficient algorithm that produces a good network which is minimized the number of vacant seats. The resultant network contains at most n connections (or edges), where n is the number of cities. Next we aim to minimize not only the number of vacant seats, but also the number of airline connections. The connected network with the least number of edges is a tree which has exactly $n-1$ connections. However, the problem to construct a tree airline network with the minimum number of vacant seats is NP-complete. We also propose efficient approximation algorithms to construct a tree airline network with the minimum number of vacant seats.

39. Shin-ichi Nakano, Ryuhei Uehara and Takeaki Uno:
"A New Approach to Graph Recognition and Applications to Distance Hereditary Graphs", Lecture Notes in Computer Science (Proceedings of TAMC 2007), 4484, 115-127, 2007.
概要: Algorithms used in data mining and bioinformatics have to deal with huge amounts of data efficiently. In many applications, the data are supposed to have some explicit or implicit structures. To develop efficient algorithms for such data, we have proposed models of possible structures. One of the way to efficiently solve problems formulated in the model is an enumeration of all possible structures in the given instance. This gives a complete so-

lution to the problem. Hence, it is important to make a compact and simple model for structured data, and efficient algorithms for basic graph operations such as isomorphism test, enumeration and compression. For optimization, data mining, etc., models on combinatorial objects and string objects are widely developed. However, from this viewpoint, there are few graph classes beside trees that are used as a model. In this paper, we investigate distance-hereditary graphs. The graph class consists of isometric graphs and hence contains trees and cographs. First, a canonical and compact tree representation of the class is proposed. The tree representation can be constructed in linear time using prefix trees. Usually, prefix trees are used to maintain a set of strings. In our algorithm, the prefix trees are used to maintain the neighborhood of vertices, which is a new approach unlike to the lexicographically breadth-first search used in the other studies. Based on the canonical tree representation, efficient algorithms for distance-hereditary graphs are proposed; including linear time algorithms for graph recognition and graph isomorphism and an efficient enumeration algorithm. An efficient coding for the tree representation is also presented, which requires $\lceil 3.59n \rceil$ bits for a distance-hereditary graph of n vertices, and $3n$ bits for a cograph. The results improve previously known upper bounds (both are $2^{O(n \log n)}$) of the number of distance-hereditary graphs and cographs to $2^{\lceil 3.59n \rceil}$ and 2^{3n}, respectively.

40. Hiroki Arimura, Takeaki Uno, and Shinichi Shimozono:
"Time and Space Efficient Discovery of Maximal Geometric Graphs", Lecture Notes in Artificial Intelligence, (Proceeding of Discovery Science 2007), 4755, 42-55, 2007.

概要: A geometric graph is a labeled graph whose vertices are points in the 2D plane with an isomorphism invariant under geometric transformations such as translation, rotation, and scaling. While Kuramochi and Karypis (ICDM2002) extensively studied the frequent pattern mining problem for geometric subgraphs, the maximal graph mining has not been considered so far. In this paper, we study the maximal (or closed) graph mining problem for the general class of geometric graphs in the 2D plane by extending the framework of Kuramochi and Karypis. Combining techniques of canonical encoding and a depth-first search tree for the class of maximal patterns, we present a polynomial delay and polynomial space algorithm, MaxGeo, that enumerates all maximal subgraphs in a given input geometric graph without duplicates. This is the first result establishing the output-sensitive complexity of closed graph mining for geometric graphs. We also show that the frequent graph mining problem is also solvable in polynomial delay and polynomial time.

41. Hiroki Arimura, and Takeaki Uno:
"Mining Maximal Flexible Patterns in a Sequence", LLLL2007, to appear in Lecture Notes in Artificial Intelligence, 2007.
概要: We consider the problem of enumerating all maximal flexible patterns in an input sequence database for the class of flexible patterns, where a maximal pattern (also called a closed pattern) is the most specific pattern among the equivalence class of patterns having the same list of occurrences in the input. Since our notion of maximal patterns is based on position occurrences, it is weaker than the traditional notion of maximal patterns based on document occurrences. Based on the framework of reverse search, we present an efficient depth-first search algorithm MaxFlex

for enumerating all maximal flexible patterns in a given sequence database without duplicates in $O(||\mathcal{T}|| \times |\Sigma|)$ time per pattern and $O(||\mathcal{T}||)$ space, where $||\mathcal{T}||$ is the size of the input sequence database $\mathcal{T}$ and $|\Sigma|$ is the size of the alphabet on which the sequences are defined. This means that the enumeration problem for maximal flexible patterns is shown to be solvable in polynomial delay and polynomial space.

42. Katsuhisa Yamanaka, Shin-ichiro Kawano, Yosuke Kikuchi and Shin-ichi Nakano:
"Constant Time Generation of Integer Partitions", 電子情報通信学会英文論文誌, 離散数学とその応用小特集号 IEICE TRANS. FUNDAMENTALS, Vol.E90-A, no. 5, 888–895, 2007.
概要: In this paper we give a simple algorithm to generate all partitions of a positive integer n. The problem is one of the basic problems in combinatorics, and has been extensively studied for a long time. Our algorithm generates each partition of a given integer in constant time for each without repetition, while best known algorithm generates each partition in constant time on "average." Also, we propose some algorithms to generate all partitions of an integer with some additional property in constant time.

43. 高埜博典, 中野眞一:
"連結極大平面グラフの列挙", 日本応用数理学会論文誌, Vol.17, no. 4, 363–397, 2007.
概要: A "based" plane triangulation is a plane triangulation with one designated edge on the outer face. In this paper we give a simple algorithm to generate all 4-connected based plane triangulation with at most n vertices. This is the first algorithm to generate such triangulations. The algorithm uses $O(n)$ space and generates such triangulations in $O(n)$ time per triangulation without duplications.

44. 村松丘親, 中野眞一:
"葉の個数を指定した順序木の一様ランダム生成", 電子情報通信学会論文誌 A, Vol.J90-A, no.12, 940–947, 2007.
概要: 各点の子に順序がある根付き木を, 順序木とよぶ. 点の個数が整数 $n \geq 2$ である順序木は, カタラン数 ${}_{2n-2}C_{n-1}/n$ 個ある. また, 点の個数が $n \geq 3$ であり, 葉の個数が $k \leq n-1$ である順序木は, Narayana 数 $({}_{n-2}C_{k-1})({}_{n-1}C_{k-1})/k$ 個ある. 点の個数が n である順序木を, 一様ランダムに生成するアルゴリズムが幾つも知られているが, 点の個数が n であり葉の個数が k である順序木を, 一様ランダムに生成するアルゴリズムは知られていない. 本論文は, 整数 n と k が与えられたとき, 点の個数が n であり, 葉の個数が k である順序木を, 効率的に, 一様ランダムに生成する簡単なアルゴリズムを与える.

45. Katsuhisa Yamanaka and Shin-ichi Nakano:
"A Compact Encoding of Rectangular Drawings with Efficient Query Support", AAIM 2007, Lecture Notes in Computer Science, 4508, 68–81, 2007.
概要: A rectangular drawing is a plane drawing in which every face is a rectangle. In this paper we give a simple encoding scheme for rectangular drawings. Given a rectangular drawing R with maximum degree 3, our scheme encodes R with $\frac{5}{3}m+o(n)$ bits for each n-vertex rectangular drawing R, where m is the number of edges of R, and supports a rich set of queries, including adjacency and degree queries on the faces, in constant time.

46. Katsuhisa Yamanaka and Shin-Ichi Nakano:
"Compact Encoding of Plane Triangulations with Efficient Query Support", WALCOM 2008, Lecture Notes in Computer Science, 4921, 120–131, 2008.
概要: In this paper we give a coding scheme for plane triangulations. The coding scheme is very simple, and needs only $6n$ bits for each plane triangulation with n vertices.

Also with additional $o(n)$ bits it supports adjacency, degree and clockwise neighbour queries in constant time. Our scheme is based on a realizer of a plane triangulation. The best known algorithm needs only $4.35n + o(n)$ bits for each plane triangulation, however, within $o(n)$ bits it needs to store a complete list of all possible triangulations having at most $(\log n)/4$ nodes, while our algorithm is simple and does not need such a list. The second best known algorithm needs $2m + (5 + 1/k)n + o(m + n)$ bits for each (general) plane graph with m edges and $7n + o(n)$ bits for each plane triangulation, while our algorithm needs only $6n + o(n)$ bits for each plane triangulation.

47. Katsuhisa Yamanaka and Shin-Ichi Nakano:
"Listing All Plane Graphs", WALCOM 2008, Lecture Notes in Computer Science, 4921, 210–221, 2008.
概要: A "rooted" plane graph is a plane graph with one designated edge on the outer face. In this paper we give a simple algorithm to generate all connected rooted plane graphs with at most m edges. The algorithm uses $O(m)$ space and generates such graphs in $O(1)$ time per graph on average without duplications. The algorithm does not output the entire graph but the difference from the previous graph. By modifying the algorithm we can generate all connected (non-rooted) plane graphs with at most m edges in $O(m^3)$ time per graph.

48. Yota Otachi, Yoshio Okamoto and Koichi Yamazaki:
"Relationships between the class of unit grid intersection graphs and other classes of bipartite graphs", Discrete Applied Mathematics, 155, 2383–2390, 2007.
概要: We show that the class of unit grid intersection graphs properly includes both of the classes of interval bigraphs and of P_6-free chordal bipartite graphs. We also demonstrate that the classes of unit grid intersection graphs and of chordal bipartite graphs are incomparable.

49. Komei Fukuda, Sonoko Moriyama and Yoshio Okamoto:
"The Holt-Klee condition for oriented matroids", European Journal of Combinatorics, (掲載予定).
概要: Holt and Klee have recently shown that every (generic) LP orientation of the graph of a d-polytope satisfies a directed version of the d-connectivity property, i.e. there are d internally disjoint directed paths from a unique source to a unique sink. We introduce two new classes HK and HK* of oriented matroids (OMs) by enforcing this property and its dual interpretation in terms of line shellings, respectively. Both classes contain all representable OMs by the Holt-Klee theorem. While we give a construction of an infinite family of non-HK* OMs, it is not clear whether there exists any non-HK OM. This leads to a fundamental question as to whether the Holt-Klee theorem can be proven combinatorially by using the OM axioms only. Finally, we give the complete classification of OM(4, 8), the OMs of rank 4 on 8-element ground set with respect to the HK, HK*, Euclidean and Shannon properties. Our classification shows that there exists no non-HK OM in this class.

50. Yoshio Okamoto:
"Local topology of the free complex of a two-dimensional generalized convex shelling", Discrete Mathematics, (掲載予定).
概要: A generalized convex shelling was introduced by Kashiwabara et al. for their representation theorem of convex geometries. Motivated by the work by Edelman and Reiner, we study local topology of the free complex of a two-dimensional separa-

ble generalized convex shelling. As a result, we prove a deletion of an element from such a complex is homotopy equivalent to a single point or two distinct points, depending on the dependency of the element to be deleted. Our result resolves an open problem by Edelman and Reiner for this case, and it can be seen as a first step toward the complete resolution from the viewpoint of a representation theorem for convex geometries by Kashiwabara et al.

51. Yoshio Okamoto:
"Fair cost allocations under conflicts — a game-theoretic point of view —", Discrete Optimization, (掲載予定).
概要: Optimization theory resolves problems to minimize total costs when the agents are involved in some conflicts. In this paper, we consider how to allocate the minimized total cost among the agents. To do that, the allocation is required to be fair in a certain sense. We use a game-theoretic point of view, and provide algorithms to compute fair allocations in polynomial time for a certain conflict situation. More specifically, we study a minimum coloring game, introduced by Deng, Ibaraki and Nagamochi [X. Deng, T. Ibaraki, H. Nagamochi, Algorithmic aspects of the core of combinatorial optimization games, Math. Oper. Res. 24 (1999) 751–766], and investigate the core, the nucleolus, the τ-value, and the Shapley value. In particular, we provide the following four results. (1) The characterization of the core for a perfect graph in terms of its extreme points. This leads to polynomial-time algorithms to compute a vector in the core, and to determine whether a given vector belongs to the core. (2) A characterization of the nucleolus for some classes of the graphs, including the complete multipartite graphs and the chordal graphs. This leads to a polynomial-time algorithm to compute the nucleolus for these classes of graphs. (3) A polynomial-time algorithm to compute the τ-value for a perfect graph. (4) A polynomial-time algorithm to compute the Shapley value for a forest. The investigation of this paper gives several insights to the relationship of algorithm theory with cooperative games.

52. Heidi Gebauer and Yoshio Okamoto:
"Fast exponential-time algorithms for the forest counting and the Tutte polynomial computation in graph classes", International Journal of Foundations of Computer Science, (掲載予定).
概要: We prove #P-completeness for counting the number of forests in regular graphs and chordal graphs. We also present algorithms for this problem, running in $O^*(1.8494^m)$ time for 3-regular graphs, and $O^*(1.9706^m)$ time for unit interval graphs, where m is the number of edges in the graph and O^*-notation ignores a polynomial factor. The algorithms can be generalized to the Tutte polynomial computation.

53. Xavier Goaoc, Jan Kratochvil, Yoshio Okamoto, Chan-Su Shin, and Alexander Wolff:
"Moving vertices to make drawings plane", Proceedings of 15th International Symposium on Graph Drawing (GD 2007), Lecture Notes in Computer Science, 4875, 101–112, 2008.
概要: A straight-line drawing δ of a planar graph G need not be plane, but can be made so by moving some of the vertices. Let $\mathrm{shift}(G, \delta)$ denote the minimum number of vertices that need to be moved to turn δ into a plane drawing of G. We show that $\mathrm{shift}(G, \delta)$ is NP-hard to compute and to approximate, and we give explicit bounds on $\mathrm{shift}(G, \delta)$ when G is a tree or a general planar graph. Our hardness results extend to 1BendPointSetEmbeddability, a well-known graph-drawing problem.

研究会等

1. 中野 眞一, 宇野 毅明:
“On the Enumeration of Colored Trees”, 情報処理学会アルゴリズム研究会, 95, 17-24, 2004 年 5 月.
概要: A c-tree is a tree such that each vertex has a color $c \in \{c_1, c_2, \cdots, c_m\}$. The problem of enumerating all c-trees with at most n vertices without repetition has an application to data mining problem of tree structured patterns, however no efficient algorithm, which generates each tree in constant time on average, is known. In this paper we give a simple algorithm for enumerating c-trees with at most n vertices and diameter d. Our algorithm generates each c-tree in constant time on average. By using the algorithm for each diameter $2, 3, \cdots, n-1$, we can generate all c-trees with at most n vertices.

2. 宇野 毅明:
“擬似クリークを列挙する多項式時間遅延アルゴリズム”, 情報処理学会アルゴリズム研究会, 第 111 回, 2007 年 3 月.
概要: 与えられたグラフの密な部分構造を見つけ出す問題は，データマイニングやデータ工学を始めとする情報学の分野での基礎的な問題である．密な構造をモデル化したものとしてクリーク（完全グラフとなっている部分グラフ）があり，これはモデルの単純さと解法の構築しやすさから重宝されており，今までに多くの研究でクリーク，あるいは極大クリーク列挙が使われてきた．その一方で，近年，本来の動機であるグラフの密な構造を見つける，という問題を直接解こうという機運が高まりつつある．クリークだけでなく，クリークから枝を少し抜いたような，擬似クリークを見つけようというものである．擬似クリークの定義はいくつか考えられるが，ここでは枝数がクリークと比べて閾値以上の割合になっている部分グラフで定義する．本稿では，このように定義された擬似クリークを全て列挙する問題を考える．まず，この問題に対する分割統治法的アプローチが計算量的には絶望的であることを示し，続いて逆探索法に基づく多項式時間アルゴリズムを提案する．さらに，計算実験から実用上の効率の良さを示す.

3. Shuji Kijima, Masashi Kiyomi, Yoshio Okamoto, and Takeaki Uno:
“On listing, sampling, and counting the chordal graphs with edge constraints”, RIMS Preprint, Kyoto University, RIMS-1610, 2007.
概要: We discuss the problems to list, sample, and count the chordal graphs with edge constraints. The edge constraints are given as a pair of graphs one of which contains the other and one of which is chordal, and the objects we look at are the chordal graphs contained in one and containing the other. This setting is a natural generalization of chordal completions and deletions. For the listing problem, we give an efficient algorithm running in amortized polynomial time per output with polynomial space. For the sampling problem, we give an instance for which a natural Markov chain suffers from an exponential mixing time. For the counting problem, we show some #P-completeness results. These results provide a unified viewpoint from algorithms theory to problems arising from various areas such as statistics, data mining, and numerical computation.

学会大会等

1. 清見礼, 宇野毅明, 松井知己:
“電力取り引きにおける約定量決定問題の高速解法”, 日本オペレーションズリサーチ学会秋季研究発表会, 2004 年 9 月.

2. 宇野毅明:
“頻出パターンの高速列挙”, 電気通信情報学会コンピューテーション研究会, (招待講演), 2004 年 12 月 10 日.

3. 宇野毅明:
“大規模データ処理に対する列挙アルゴリズムの活用”, データ工学ワークショップ, (招待講演), 2005 年 2 月 28 日.

4. 松井 泰子:
“On the Groebner walks”, International conference on Theoretical Effectivity and Practical Effectivity of Groebner Bases, 2005 年 8 月.

5. 松井 泰子:
“On Junction Tree Algorithms”, 2nd Pacific Workshop on Discrete Mathmatics, 2005 年 12 月.

6. 松井 泰子:
“An Algorithm for Enumerating All Tree Matchings for Ordered Trees”, 37th Southeastern International Conference on Combinatorics, Graph Theory and Computing, 2006 年 3 月.

7. 清見 礼, 宇野 毅明, 松井 知己:
“電力取引における約定量決定問題の高速解法”, 日本オペレーションズ・リサーチ秋季研究発表会, 2005 年 9 月.

8. 岡本吉央:
“最小費用全域木ゲームにおけるシャープレイ値計算の困難性”, 日本オペレーションズ・リサーチ学会 2008 年春季研究発表会, 2008 年 3 月. We prove that computing the Shapley value of a minimum-cost spanning tree game is NP-hard even if the cost of every edge is zero or one. This is the first intractability result for the Shapley value computation of a transferable utility game arising from a polynomial-time solvable combinatorial optimization problem.

9. 松井泰子:
“整数計画問題とグレブナー基底”, 京都大学数理解析研究所研究集会「グレブナー基底 夏の学校」, (招待講演). 2006 年 8 月

10. Toshiki Saitoh, Masashi Kiyomi, and Ryuhei Uehara:
“Simple efficient algorithm for MPQ-tree of an interval graph”, Japan-Korea joint Workshop on Algorithms and Computation, 第 10 回, 2007 年 8 月. 区間グラフは, スケジューリングや遺伝子工学等の幅広い分野に応用を持つ, 有用なグラフクラスである. 区間グラフ上の高速なアルゴリズムにおいて, しばしば, PQ-tree およびその改良版である MPQ-tree とよばれるデータ構造が用いられる. これらのデータ構造を与えれらた区間グラフから求める, 線形時間アルゴリズムが既に知られているが, 既存のアルゴリズムは複雑で扱いにくいものであった. 我々は区間グラフからこれらのデータ構造を構築するより簡単な線形時間アルゴリズムを提案した. さらに, このアルゴリズムは, 区間グラフが区間表現とよばれるコンパクトな表現形式で入力された場合, 与えられたグラフの頂点数のオーダー (枝数は必要無い) で MPQ-tree を得ることができ, これは既存の結果よりも高速である.

11. 松井泰子:
“組合せ構造の列挙とサンプリング”, 京都大学数理解析研究所研究集会「代数, 形式言語, 計算システム理論とその応用」, (招待講演). 2007 年 2 月

12. 松井泰子:
“An algorithm for generating all perfect sequences of a chordal graph”, 38th Southeastern International Conference on Combinatorics, Graph theory and Computing (Florida Atlantic University), , , . 2007 年 3 月

13. 宇野毅明, 松井泰子, 上原隆平:
“コーダルグラフと perfect sequence -列挙解法の観点からの効率の良い構成法-”, 科研費「計算代数統計」研究集会 (ホテル日航豊橋), 2007 年 10 月.

14. 宇野毅明, 松井泰子, 上原隆平:
“コーダルグラフのクリーク木と perfect sequence の列挙”, 第 19 回位相幾何学的グラフ理論研究集会 (横浜国立大学みなとみらい

キャンパス), 2007 年 11 月.

15. 宇野毅明，松井泰子，上原隆平:
“環境科学の統計モデルのための完全列の高速列挙法”, ミニシンポジウム　新世代計算限界と地球環境問題 (京都大学桂キャンパス), 2007 年 12 月.

16. 宇野毅明，松井泰子，上原隆平:
“A fast algorithm for generating perfect sequences”, 応用数学合同研究集会 (龍谷大学), 2007 年 12 月.

文部科学省科学研究費補助金 特定領域研究 (課題番号 16092215)

C05: 幾つかの画像関連問題の計算複雑度の解析と効率的な解決法の提案

最近の画像入力装置の高度化に伴って大規模画像を扱う機会が増えたために，従来からの素朴なアルゴリズムでは計算時間に重大な問題が生じてきた．このような観点から，本研究では，アルゴリズム理論の立場から画像に関連する諸問題に取り組んだ．学術的にはコンピュータビジョンやコンピュータグラフィックスの分野がこれに密接に関連しているが，これらの分野では問題を数学的に定式化して，その計算複雑度を解析することは余り一般的ではない．むしろ，計算機実験を通して人間の目視による判断が優先される傾向にある．本研究では画像に関連する様々な問題について，その本質を数学的に定式化することから始めて，計算複雑度を解析し，最終的には効率の良いアルゴリズムを開発した．

研究組織

研究代表者：	浅野 哲夫	北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科
研究分担者：	上原 隆平	北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科
	元木 光雄	北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科
	小保方 幸次	一関工業高等専門学校 制御情報工学科 (平成 17–19 年度)
	河村 泰之	愛媛大学 教育学部 (平成 17–19 年度)
	Bishnu Arijit	北陸先端科学技術大学院大学 (平成 16 年度)

交付決定額 (配分額)

平成 16 年度	3,300,000 円
平成 17 年度	3,500,000 円
平成 18 年度	3,600,000 円
平成 19 年度	3,900,000 円
合　計	14,300,000 円

研究成果の概要

- 学術誌

  Theory of Computing System, Advances in Mathematics, SIAM J. on Computing (以上は採録決定), Inform. Proc. Letters (2007), Int. J. of Pattern Recognition and Artificial Intelligence (2007), Int. J. on Computational Geometry and Applications (2006), Theoretical Computer Science (2004), Computational Geometry: Theory and Applications (2005), Discrete and Computational Geometry(2004) など.

- 国際会議

  IWCIA (Buffalo, USA, 2008), ISAAC (Sendai, Japan, 2007), SIAM-ACM Symposium on Discrete Algorithms (New Oreleans, USA, 2007), Intl. Conf. on Pattern Recognition, (Hong Kong, 2006), ACM Symposium on Computing Theory, (Seatle, USA, 2006) など.

1　はじめに

最近のディジタルカメラに代表される画像入力装置の普及は目を見張るものがある．それに伴って計算機で画像を処理する機会が飛躍的に増大しているが，入力装置の性能向上は必然的にデータ量増大を招き，従来からの素朴なアルゴリズムでは妥当な時間内に処理することが困難になりつつあるのが現状である．将来を展望したとき，データ量の爆発により処理不能に陥る危険性があり，今のうちに計算量の理論に基づいて計算困難度を数学的に解析し，それに基づいてアルゴリズムを開発することが急務である．

このような観点から，本研究では，アルゴリズム理論の立場から画像に関連する諸問題に取り組んだ．学術的にはコンピュータビジョンやコンピュータグラフィックスの分野がこれに密接に関連しているが，これらの分野では問題を数学的に定式化して，その計算複雑度を解析することは余り一般的ではない．むしろ，計算機実験を通して人間の目視による判断が優先される傾向にある．本研究では画像に関連する様々な問題について，その本質を数学的に定式化することから始めて，計算複雑度を解析し，最終的には効率の良いアルゴリズムを開発することを目指している．

本グループでは「画像関連問題の計算複雑度の解析と効率的な解決法の提案」という点に焦点を合わせながらも，本特定研の他のグループとの共同研究にも力を注いだ．その結果として，計算幾何とグラフの領域で様々な新発見を得ることができた．それらの成果は異なる国際ジャーナルに発表しているが，SIAM Journal on Computing, Avdances in Mathematics, Algorithmica, Thoery of Computing System など国際的にも評価の高いジャーナルに発表している．国際会議の論文も多数あるが，いずれも査読のある国際会議であり，世界的なレベルで評価を得ている．

以下では，指紋同定に関する研究について詳しく述べた後，その他の業績について概要を述べる．

2　指圧の変化に対して頑健な指紋同定法の開発

画像に関連する問題としてメインに取り組んできたのが現在ではかなり実用化が進んでいる指紋同定の問題である．指紋同定に関しては研究課題が残っていないという印象もあるが，現実には未だに様々な問題を抱えている．その最大の問題は，指紋が柔らかい（すなわち，剛体ではない）人間の指の表面にあることから生じるものである．指紋を採取するとき，何らかの形で指が物体（こちらは普通は剛体）に接触して指紋が残る．しかし，剛体ではないため，指にかかる圧力によって変形が生じる．指紋認識を行う際には当然このような圧力による変化をどこかで吸収しなければならない．従来から使われてきた方法は，指紋から特徴点を採取した後，それぞれの特徴点について許容範囲を定め，その範囲内に照合すべき指紋の特徴点が存在すればマッチング成立とみなしてきた．許容範囲としては，どの特徴点についても一律に同じ円を用いることが多かったが，その方法は指紋の力学的変形をうまくモデル化できていないことから頑健性の面で劣っていた．今回の研究で開発した方法は，特徴点を検出した後，三角形分割を適用する．三角形分割にも多様な方法があるが，ここでは出来上がった三角形の内部に含まれる内角の最小値を最大にすることで知られているデローネイ三角形分割を用いている．最小角最大化という基準を満たしているため，同じ点集合を平行移動と回転で変形しても同じ結果が得られるというのも一つの利点である．また，この三角形分割は，他の基準に基づく三角形分割と異なり，ボロノイ図という名前で知られている点の勢力圏図の双対グラフとして得られること，ボロノイ図はほぼ点数に比例する時間で計算できること，などの利点がある．実際，特徴点の数を n とすれば，O(n log n) の時間でデローネイ三角形分割を求めることができる．ただ，デローネイ三角形分割だけでは，その他の変形に対してトポロジーが変化してしまうので，０次と１次のデローネイ三角形分割を考えているところも特徴の一つである．

2.1 特徴抽出

指紋同定には様々な方法が提案されているが，大多数は特徴点を用いたマッチングに基づくものである．特徴点とは，指紋を構成する模様の中で端点になっている部分と，線が分かれる分岐点のことを言う．これらをどのように構成するかは申請者らの従来の研究で確立されているので，ここでは触れない．図 1は特徴点の一つである分岐点における状況を示したものである．図に示すように，分岐点は，点の座標 p，入射辺の直線近似 a，２本の出射辺の直線近似 b_1, b_2 により表現できるものと考える．この４つ組を $\mathcal{B}(p, a, b_1, b_2)$ と表現する．

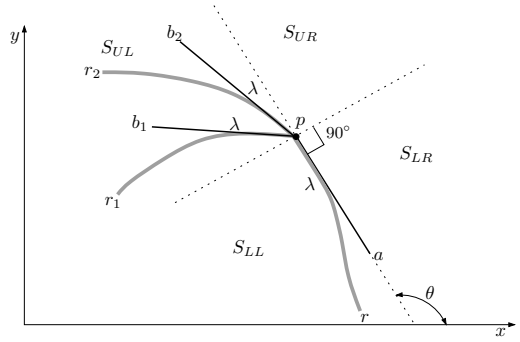


図 1: 分岐点の特徴.

このとき，様々な状況を考えることができるが，注意深く場合わけを考えると下の表に示すものに限定することができる．ただし，SLL, SUL, SLR, SUR はそれぞれ Lower Left, Upper Left, Lower Right, Upper Right の領域を示すものとする．

これを図で示したのが図 2である．

提案アルゴリズム

提案するアルゴリズムは以下の通りである．

特徴点の生成
入力：指紋画像
出力：指紋の特徴点の記述
アルゴリズム：
for(それぞれの特徴点 p) do
  for(p の各分岐) do
    while(現在の点が指紋の稜線上の５番目の
        点ではない)
      次の点へ移動
    endwhile
    p を５番目の点と結ぶ線分を生成
  endfor
  b_1 と b_2 の相互の位置を計算し，特徴点の記述を出力.
endfor

表 1: 分岐点の場合わけ

場合	$b_1 \in$	$b_2 \in$	条件
1	S_{LL}	S_{LL}	
2 (a)	S_{LL}	S_{UL}	$x[b_1] \leq x[b_2]$
2 (b)	S_{LL}	S_{UL}	$x[b_1] > x[b_2]$
3	S_{LL}	S_{UR}	
4	S_{LL}	S_{LR}	
5	S_{UL}	S_{UL}	
6 (a)	S_{UL}	S_{UR}	$y[b_1] \leq y[b_2]$
6 (b)	S_{LL}	S_{UR}	$y[b_1] > y[b_2]$
7	S_{UL}	S_{LR}	
8	S_{UR}	S_{UR}	
9 (a)	S_{UR}	S_{LR}	$x[b_1] \leq x[b_2]$
9 (b)	S_{UR}	S_{LR}	$x[b_1] > x[b_2]$
10	S_{LR}	S_{LR}	

2.2 低次のデローネイ三角形分割

デローネイ三角形分割は点集合に対して唯一に定まるという特徴があり，平行移動と回転に対しても頑健であるという優れた性質をもっているが，ここでは指にかかる圧力による特徴点の移動を考慮しなければならない．そのためにデローネイ三角形分割だけではなしに，少し条件を緩めた三角形分割も求めて候補の一つとしている．デローネイ三角形分割は空円によってうまく特徴づけることができる．

点集合に対して様々な三角形分割が考えられるが，どの三角形をとっても，その三角形の外接円の内部に他の点が含まれないとき，すなわち，三角形の外接円が空円であるとき，その三角形分割はデローネイ三角形分割になっている．これが定義であるが，この条件を少し緩めて，少数の点が円内になることを許したものが低次のデローネイ

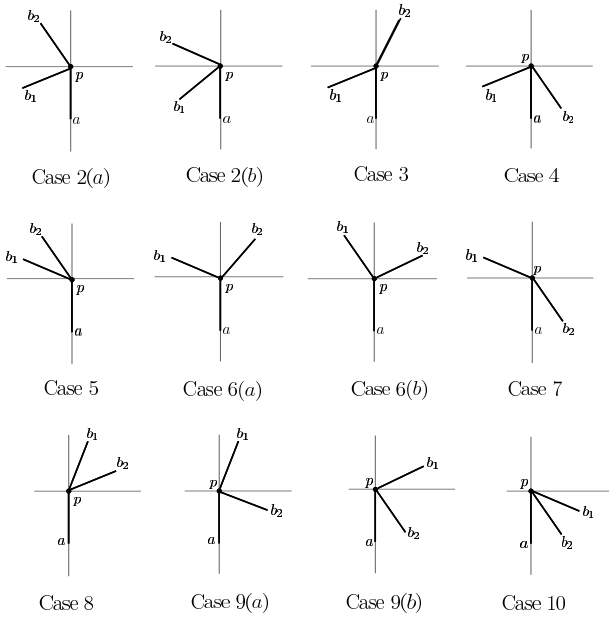


図 2: 分岐点の分類.

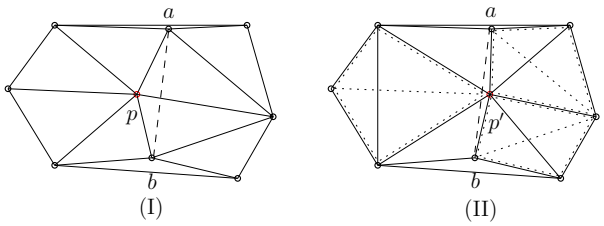


図 3: ２つのデローネイ三角形の比較.

三角形分割である.

ここでの判断基準は次の通りである．まず，入力の指紋画像から特徴点を取り出し，デローネイ三角形分割を求める．これを照合用の指紋に対するデローネイ三角形分割と比較し，それぞれの三角形に対してマッチングを取る．ここでうまくマッチングを取ることができれば問題がないが，特徴点の移動による変形によって三角形どうしのマッチングがうまく取れない場合には，低次のデローネイ三角形分割の三角形もマッチングの候補に加える．さらに，三角形のマッチングにおいても，３つの内角に注目し，それらがうまくマッチするものを選ぶのも実際には効果的である．これを三角形ラベルと呼んでいる．図 4参照.

図 5と図 6は，大規模な指紋データベース上で行った実験結果を示したものである．横軸は変形の程度を表している．すべての三角形を用いた場

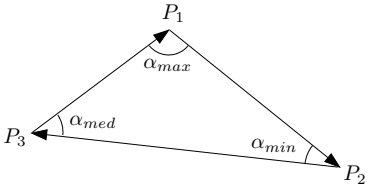


図 4: 三角形ラベルの定義.

合とデローネイ三角形だけを用いた場合に比べて，低次のデローネイ三角形を用いた本手法の優位性が明確に示されている.

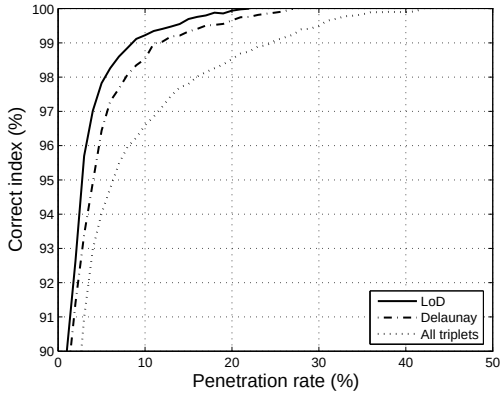


図 5: 指紋データベース FVC2002 上での効率測定結果.

参考文献

[1] X. F. Liang, A. Bishnu, and T. Asano, “A combinatorial approach to fingerprint binarization and minutiae extraction using euclidean distance transform,” *Intermnational Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, In press*, 2007.

[2] Xuefeng Liang, Arijit Bishnu and Tetsuo Asano, “ A Robust Fingerprint Indexing Scheme Using Minutia Neighborhood Structure and Low-order Delaunay Triangles, ” to appear in IEEE Transactions on Information Forensics and Security.

[3] X. Liang and T. Asano, “ A Linear Time Algorithm for Binary Fingerprint Image De-

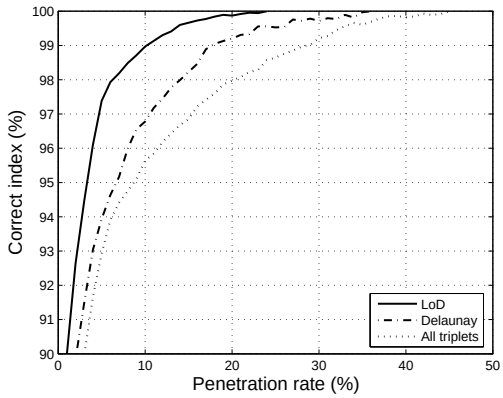


図 6: 指紋データベース FVC2004 上での効率測定結果.

noising Using Distance Transform, ” IEICE Trans. on e89-D, 4, pp.1534-1542, 2006.

[4] X. Liang and, A. Bishnu, and T. Asano, “ Fingerprint Matching Using Minutia Polygons, ” Proc. ICPR: 18th Intl. Conf. on Pattern Recognition, Hong Kong, August, pp.1046-1049, 2006

[5] X. Liang, T. Asano, and H. Zhang, “ A Combined Radial Basis Function Model for Fingerprint Distortion, ” Proc. ICIAR: Intel. Cnf. on Image Analysis and Recognition, Portugal, September, pp.286-296, 2006.

[6] X. Liang, A. Bishnu, and T. Asano, “Distorted Fingerprint Indexing Using Minutia Detail and Delaunay Triangle,” Proc. International Symposium on Voronoi Diagram in Science and Engineering, July, Banff, Canada, pp.8-17, 2006.

[7] Xuefeng Liang, Kazunori Kotani and Tetsuo Asano: “Automatically Choosing Appropriately-Sized Structuring Elements to Eliminate Useless Components in Fingerprint Image,” Proc. Visual Communications and Image Processing 2005, July, Beijing, edited by Shipeng Li, Fernando Pereira, Heung-Yeung Shum, Andrew G. Tescher, Proc. Of SPIE Vol.5960, pp. 284-293, 2005.

[8] Xuefeng Liang, Arijit Bishnu, and Tetsuo Asano “A Near-Linear Time Algorithm for Binarization of Fingerprint Images Using Distance Transform,” Proc. 10th International Workshop, IWCIA 2004, December, Auckland, Lecture Notes in Computer Science LNCS 3322, edited by R. Klette and J. Zunic, “Combinatorial Image Analysis,” pp.197-208, 2004.

[9] Xuefeng Liang and T. Asano “A Fast Denoising Method for Binary Fingerprint Image,” Proc. IASTED Conference on Visualization, Imaging, and Image Processing, Paper No. 452-168, pp. 309-313, Marbella, Spain, September, 2004.

研究業績一覧

著書

1. 浅野哲夫:
“アルゴリズムサイエンス：計算幾何：理論の基礎から実装まで”, 共立出版, 2007 年 1 月.
概要: 計算幾何学とは，幾何的な計算問題を計算機を用いて効率よく解くための算法を開発するとともに，幾何的な計算問題の本質的な計算困難度を数学的に解析するための学問分野である．本書では，計算幾何学の代表的な問題の紹介から始めて，効率の良い算法の開発図式をわかりやすく解説することを主たる目標とした．また，幾何データを取り扱うためのデータ構造についても触れている．実用に供するために，多数のプログラムを掲載していることも特徴の一つである．

2. 浅野哲夫:
“アルゴリズムサイエンス：入口からの超入門”, 共立出版, 2006 年 10 月.
概要: 本特定研究のグループでアルゴリズム・サイエンス・シリーズと題してシリーズ本を出版することになったが，本書はその第 1 弾である．この研究プロジェクトには様々な目標があるが，特に重視しているのが「社会的評価基準」である．数学的に高度な結果を導

くだけではなく，分かりやすさと実用性も備えた成果を出すことも重要な目標としている．その一環として，アルゴリズムの重要性とアルゴリズム研究の楽しさを世の中に伝えるというのが本書の役割である．

学術論文

1. Tetsuo Asano, Naoki Katoh, Kurt Mehlhorn, and Takeshi Tokuyama:
"Some Generalizations of Least-Squares Algorithms", ISI-Computer Science Monograph edited by Bhargab B. Bhattacharya, World Scientific Publishers, to appear.
概要: Least-squares method is often used for solving optimization problems such as line fitting of a point sequence obtained by experiments. This paper describes some extensions of the method and presents an application to some completely different geometric optimization problem. Given a sorted sequence of points $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \ldots, (x_n, y_n)$, a line $y = ax + b$ that optimally approximates the sequence can be computed by determining the constants a and b that minimizes the sum of squared distances to the line, which is given by $\sum_{i=1}^{n}(ax_i + b - y_i)^2$. It suffices to solve a system of linear equations derived by differentiating the sum by a and b. In this paper we extend the problem of approximating a point sequence by a 1-joint polyline. Another problem we consider is a geometric optimization problem. Suppose we are given a set of points in the plane. We want to insert a new point so that distances to existing points are as close as those distances specified as input data. If the criterion is to minimize the sum of squared errors, an application of the same idea as above combined with a notion of arrangement of lines leads to an efficient algorithm.

2. Xuefeng Liang, Arijit Bishnu and Tetsuo Asano:
"A Robust Fingerprint Indexing Scheme Using Minutia Neighborhood Structure and Low-order Delaunay Triangles", to appear in IEEE Transactions on Information Forensics and Security, pp., .
概要: Fingerprint indexing is a key technique in Automatic Fingerprint Identification Systems (AFIS). However, handling fingerprint distortion still remains a problem. This paper concentrates on a more accurate fingerprint indexing algorithm that efficiently retrieves the top $\mathcal{N}$ possible matching candidates from a huge database. To this end, we design a novel feature based on minutia neighborhood structure (we call this *minutia detail*; and it contains richer minutia information) and a more stable triangulation algorithm (*low-order Delaunay triangles* consisting of order 0 and 1 Delaunay triangles), which are both insensitive to fingerprint distortion. The indexing features include minutia detail and attributes of low-order Delaunay triangle (its handedness, angles, maximum edge, and related angles between orientation field and edges). Experiments on databases FVC2002 and FVC2004 show that the proposed algorithm considerably narrows down the search space in fingerprint databases, and is stable for various fingerprints. We also compared it with other indexing approaches, and the results show our algorithm has better performance, especially on fingerprints with distortion.

3. T. Asano, N. Katoh, H. Tamaki, and T. Tokuyama:
"Voronoi Diagrams with Respect to Criteria on Vision Information", to appear Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics, pp., .
概要: Voronoi diagram for a set of geometric objects is a partition of the plane (or space in higher dimensions) into disjoint regions

each dominated by some given object under a predetermined criterion. This paper defines a new Voronoi diagram called an angular Voronoi diagram for a set of line segments in the plane and investigate its combinatorial and structural properties. Given a set of line segments, an angular Voronoi diagram partitions the plane into regions so that a point belongs to a Voronoi region of a line segment if the visual angle of the line segment from the point is smallest (or largest) among all line segments. For simplicity we assume that given line segments are transparent when computing their visual angles. In other words, the visual angle of a line segments from a point is defined without considering other line segments.

4. B. Aronov, T. Asano, Y. Kikuchi, S. C. Nandy, S. Sasahara, and T. Uno:
"A Generalization of Magic Squares with Applications to Digital Halftoning", Theory of Computing System, 採録決定.
概要: A semimagic square of order n is an $n \times n$ matrix containing the integers $0, ..., n^2?1$ arranged in such a way that each row and column add up to the same value. We generalize this notion to that of a zero $k \times k$ discrepancy matrix by replacing the requirement that the sum of each row and each column be the same by that of requiring that the sum of the entries in each $k \times k$ square contiguous submatrix be the same. We show that such matrices exist if k and n are both even, and do not if k and n are are relatively prime. An application to digital halftoning is also mentioned.

5. T. Asano, J. Matousek, and T. Tokuyama:
"Zone diagrams: Existence, Uniqueness and Algorithmic Challenge", SIAMJ. on Computing, to appear.
概要: A *zone diagram* is a new variation of the classical notion of Voronoi diagram. Given points (sites) $p_1, \ldots, p_n$ in the plane, each p_i is assigned a region R_i, but in contrast to the ordinary Voronoi diagrams, the union of the R_i has a nonempty complement, the *neutral zone*. The defining property is that each R_i consists of all $x \in R^2$ that lie closer (non-strictly) to p_i than to the union of all the other R_j, $j \neq i$. Thus, the zone diagram is defined implicitly, by a "fixed-point property," and neither its existence nor its uniqueness seem obvious. We establish existence using a general fixed-point result (a consequence of Schauder's theorem or Kakutani's theorem); this proof should generalize easily to related settings, say higher dimensions. Then we prove uniqueness of the zone diagram, as well as convergence of a natural iterative algorithm for computing it, by a geometric argument, which also relies on a result for the case of two sites in an earlier paper. Many challenging questions remain open.

6. T. Asano, J. Matousek, and T. Tokuyama:
"The distance trisector curve", Advances in Mathematics, to appear.
概要: Given points p and q in the plane, we are interested in separating them by two curves C_1 and C_2 such that every point of C_1 has equal distance to p and to C_2, and every point of C_2 has equal distance to C_1 and to q. We show by elementary geometric means that such C_1 and C_2 exist and are unique. Moreover, for $p = (0, 1)$ and $q = (0, -1)$, C_1 is the graph of a function $f : R \to R$, C_2 is the graph of $-f$, and f is convex and analytic (i.e., given by a convergent power series at a neighborhood of every point). We conjecture that f is not expressible by elementary functions and, in particular, not algebraic. We provide an algorithm that, given $x \in$ and $\epsilon > 0$, computes an approximation to $f(x)$ with error at most ϵ in time polynomial in $\log \frac{1+|x|}{\epsilon}$. The separation of two points by two "trisector" curves considered here is a special

(two-point) case of a new kind of Voronoi diagram, which we call the zone diagram and which we investigate in a companion paper.

7. B. Aronov, T. Asano, Y. Kikuchi, S. C. Nandy, S. Sasahara, and T. Uno:
"A Generalization of Magic Squares with Applications to Digital Halftoning", , Theory of Computing System, to appear.
概要: A semimagic square of order n is an $n \times n$ matrix containing the integers $0, \ldots, n^2 - 1$ arranged in such a way that each row and column add up to the same value. We generalize this notion to that of a zero $k \times k$-discrepancy matrix by replacing the requirement that the sum of each row and each column be the same by that of requiring that the sum of the entries in each $k \times k$ square contiguous submatrix be the same. We show that such matrices exist if k and n are both even, and do not if k and n are are relatively prime. Further, the existence is also guaranteed whenever $n = k^m$, for some integers $k, m \geq 2$. We present a space-efficient algorithm for constructing such a matrix. Another class that we call constant-gap matrices arises in this construction. We give a characterization of such matrices. An application to digital halftoning is also mentioned.

8. Bishal Prasad, Arijit Bishnu, and Tetsuo Asano:
"Linear Boundary and Corner detection using limited number of sensor rows", to appear in Proc. IWCIA 2008, Buffalo, USA, 2008.
概要: Linear boundary detection and corner detection are major challenges in computer vision. There exist many solutions for these problems based either on edge detection or interpolation methods but they are inexact in the sense that they do not talk of bounds. The basic objective of the study in this paper is to find out how exactly we can locate or restore linear boundaries or corners in the real plane, rather than pixel domain, described by continuous parameters by observation at discrete pixels. This paper devises new algorithms for linear boundary detection and corner detection using computational and digital geometric techniques.

9. T. Asano:
"Aspect-Ratio Voronoi Diagram and Its Complexity Bounds", Information Processing Letters, volume, 105, Issue 1, 31, pp.26-31, December 2007.
概要: This paper considers a problem of finding an optimal point within a polygon P in the sense that when we connect the point to every vertex of P by straight line then the worst aspect ratio among all resulting triangles is optimized. This problem has an important application to triangular mesh improvement. We propose three different approaches toward this problem. The first one is based on some new Voronoi diagram defined by an aspect ratio, which is interesting in itself. The second approach is essentially a binary search defined by geometric intersection. The third one is grid-based heuristic, which might be practically best but has no theoretical guarantee on its performance.

10. Boris Aronov, Tetsuo Asano and Stefan Funke:
"Optimal Triangulation with Steiner Points", Proc. ISAAC 2007, Sendai, pp.681-691, 2007.
概要: It is rather easy to triangulate a simple n-gon even under some optimization criterion, such as maximization of the smallest internal angle. A problem we address in this paper is just a simple extension. Given a simple polygon P and one point p in its interior, we can again find an optimal triangulation maximizing

the smallest internal angle just by applying a constrained Delaunay triangulation algorithm. We can associate the smallest angle with the point p. Now, our problem is to find a point that optimizes the evaluation. It looks easy, but no straightforward dynamic programming works. We present a polynomial-time algorithm for the problem. We also show that the result can be extended to a problem of finding where to insert two points to optimize the resulting triangulation in polynomial time in n.

11. Tetsuo Asano, Shinnya Bitou, Mitsuo Motoki and Nobuaki Usui:
"In-Place Algorithm for Image Rotation", Proc. ISAAC 2007, Sendai, pp.704-715, Dec. 2007.
概要: This paper presents an algorithm for rotating a subimage in place without using any extra working array. Due to this constraint, we have to overwrite pixel values by interpolated values. Key ideas are *local reliability test* which determines whether interpolation at a pixel is carried out correctly without using interpolated values, and *lazy interpolation* which stores interpolated values in a region which is never used for output images and then fills in interpolated values after safety is guaranteed. It is shown that linear interpolation is always safely implemented. An extension to cubic interpolation is also discussed.

12. T. Asano:
"Dissimilarity Preserving Embedding of Objects on the Plane", Invited Talk at International Xu Guangqi Conference, pp.14-19, 2007.
概要: A problem of embedding objects in the plane or low-dimensional space so that the distance between points is as close as the dissimilarity between corresponding objects as possible often arises in many situations including biology. In this paper we consider a special case: when n objects are already embedded into points in the plane with dissimilarity equal to the Euclidean distance, we are requested to add a new point corresponding to a new object so that the distances from the point to the existing points are approximately equal to the dissimilarities between the new object and corresponding objects. The hardness of the problem heavily depends on how we evaluate difference or error between dissimilarity and the Euclidean distance. It is hard if it is defined by just the difference between them, but it is easy if evaluation is based on difference of squared values. For the latter case we present an efficient algorithm using techniques in computational geometry.

13. T. Asano and S. Teramoto:
"On-line uniformity of points", Book of Abstracts for 8th Hellenic-European Conference on Computer Mathematics and its Applications, pp.21-22, 2007.
概要: This paper presents a new scheme for generating a good point sequence such that for each subsequence from the beginning of the sequence gives uniformly distributed points in the sense that the discrepancy is small.

14. T. Asano, P. Bose, P. Carmi, A. Maheshwari, C. Shu, M. Smid, and S. Wuhrer:
"Linear-Space Algorithms for Distance Preserving Embedding", Canadian Conference on Computational Geometry, pp.185-188, August, 2007.
概要: This paper considers a distance preserving graph embedding problem: Given a weighted graph, embed vertices into points in d-space so that for each edge the distance between their corresponding endpoints is as close as the weight for the edge. This paper first proves NP-hardness of the problem. If it is known that there is an exact embedding (without any error) for a full matrix

for all pairs of vertices, then the exisiting algorithm known as Principal Coordinate Analysis (PCO) can find such an exact embedding in polynomial time. Although it is believed that PCO almost always gives a good solution, it is not true. We show a worst example for PCO and compare it with a heuristic algorithm. Another problem considered in this paper is to add one point so that the distances to existing points are as close as given distances.

15. T. Asano, N. Katoh, H. Tamaki, and T. Tokuyama:
"Voronoi Diagram with Respect to Criteria on Vision Information", Proc. the 4th International Symposium on Voronoi Diagrams in Science and Engineering, pp.25-32, July 2007.
概要: Voronoi diagram for a set of geometric objects is a partition of the plane (or space in higher dimensions) into disjoint regions each dominated by some given object under a predetermined criterion. This paper defines a new Voronoi diagram called an angular Voronoi diagram for a set of line segments in the plane and investigate its combinatorial and structural properties. Given a set of line segments, an angular Voronoi diagram partitions the plane into regions so that a point belongs to a Voronoi region of a line segment if the visual angle of the line segment from the point is smallest (or largest) among all line segments. For simplicity we assume that given line segments are transparent when computing their visual angles. In other words, the visual angle of a line segments from a point is defined without considering other line segments.

16. X. Liang and T. Asano:
"Combinatorial Approach to Fingerprint Binarization and Minutiae Extraction Using Euclidean Distance Transform", International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, vol. 27, no. 7, 1141 - 1158, 2007.
概要: Most of the fingerprint matching techniques require extraction of minutiae that are ridge endings or bifurcations of ridge lines in a fingerprint image. Crucial to this step is either detecting ridges from the gray-level image or binarizing the image and then extracting the minutiae. In this work, we firstly exploit the property of almost equal width of ridges and valleys for binarization. Computing the width of arbitrary shapes is a non-trivial task. So, we estimate the width using Euclidean distance transform (EDT) and provide a near-linear time algorithm for binarization. Secondly, instead of using thinned binary images for minutiae extraction, we detect minutiae straightaway from the binarized fingerprint images using EDT. We also use EDT values to get rid of spurs and bridges in the fingerprint image. Unlike many other previous methods, our work depends minimally on arbitrary selection of parameters.

17. T. Asano, J. Matousek, and T. Tokuyama:
"Zone diagrams: Existence, Uniqueness and Algorithmic Challenge", Proc. SIAM-ACM Symposium on Discrete Algorithms, 2007.
概要: A *zone diagram* is a new variation of the classical notion of Voronoi diagram. Given points (sites) $p_1, \ldots, p_n$ in the plane, each p_i is assigned a region R_i, but in contrast to the ordinary Voronoi diagrams, the union of the R_i has a nonempty complement, the *neutral zone*. The defining property is that each R_i consists of all $x \in R^2$ that lie closer (non-strictly) to p_i than to the union of all the other R_j, $j \neq i$. Thus, the zone diagram is defined implicitly, by a "fixed-point property," and neither its existence nor its uniqueness seem obvious. We establish existence using a general fixed-point result (a consequence of Schauder's

theorem or Kakutani's theorem); this proof should generalize easily to related settings, say higher dimensions. Then we prove uniqueness of the zone diagram, as well as convergence of a natural iterative algorithm for computing it, by a geometric argument, which also relies on a result for the case of two sites in an earlier paper. Many challenging questions remain open.

18. T.Asano:
"Computational Geometric and Combinatorial Approaches to Digital Halftoning", Proc. Computing: The Australasian Theory Symposium, 2006.
概要: Digital halftoning is a technique to convert a continuous-tone image into a binary image consisting of black and white dots. It is an important technique for printing machines and printers to output an image with few intensity levels or colors which looks similar to an input image. In this talk I will explain how computational geometry and combinatroial optimization can contribute to digital halftoning or what geometric and combinatorial problems are related to digital halftoning (refer to the references).

19. X. Liang, T. Asano:
"Linear Time Algorithm for Binary Fingerprint Image Denoising using Distance Transform", IEICE Trans. D, e89-D, 4, 1534-1542, 2006.
概要: Fingerprints are useful for biometric purposes because of their well known properties of distinctiveness and persistence over time. However, owing to skin conditions or incorrect finger pressure, original fingerprint images always contain noise. Especially, some of them contain useless components, which are often mistaken for the terminations that are an essential minutia of a fingerprint. Mathematical Morphology (MM) is a powerful tool in image processing. In this paper, we propose a linear time algorithm to eliminate impulsive noise and useless components, which employs generalized and ordinary morphological operators based on Euclidean distance transform. There are two contributions. The first is the simple and efficient MM method to eliminate impulsive noise, which can be restricted to a minimum number of pixels. We know the performance of MM is heavily dependent on structuring elements (SEs), but finding an optimal SE is a difficult and nontrivial task. So the second contribution is providing an automatic approach for choosing appropriate SEs to eliminate useless components. We have developed a novel algorithm for the binarization of fingerprint images. The information of distance transform values can be obtained directly from the binarization phase. The results show that using this method on fingerprint images with impulsive noise and useless components is faster than existing denoising methods and achieves better quality than earlier methods.

20. S. Teramoto T. Asano, N. Katoh, and B. Doerr:
"Inserting Points Uniformly at Every Instance", , IEICE Trans. on Info. and Systems, E89-D, 8, pp.2348-2356, 2006.
概要: Arranging a predetermined number n of points over a unit cube in the d-dimensional space or over a polyhedral region is frequently asked in many applications. What is required is a set of points that are uniformly distributed over the region. In this paper we would like to insert n points in a given region in such a way that points are distributed as uniformly as possible at every instance of inserting a point. Our criteria on uniformity is to minimize the gap ratio (which is the maximum gap over the minimum gap) at every point insertion. We present a preliminary result

for this problem, that is, we give a linear time algorithm for finding an optimal n-point sequence with the maximum gap ratio bounded by $2^{\lfloor n/2 \rfloor/(\lfloor n/2 \rfloor+1)}$ in the 1-dimensional case. We describe how hard the same problem is for a point set in the plane and propose a simple local search heuristics for finding a good solution.

21. B. Aronov, T. Asano, N. Katoh, K. Mehlhorn, and T. Tokuyama:
"Polyline fitting of planar points under min-sum criterion", , International Journal on Computational Geometry and Applications, 16(2-3), pp.97-116, 2006.
概要: Fitting a curve of a certain type to a given set of points in the plane is a basic problem in statistics and has numerous applications. We consider fitting a polyline with k joints under the min-sum criteria with respect to L_1- and L_2-metrics, which are more appropriate measures than uniform and Hausdorff metrics in statistical context. We present efficient algorithms for the 1-joint versions of the problem, and fully polynomial-time approximation schemes for the general k-joint versions.

22. T. Asano, P. Evans, R. Uehara, G. Valiente:
"Site consistency in phylogenetic networks with recombination", , Iliopoulos, C.S., Park, K., Steinh ¨ ofel, K., eds.: Algorithmics in Bioinformatics. Volume 6 of Texts in Algorithmics. College Publications, 2006.
概要: Perfect phylogeny is a fundamental model for the study of evolution. Given a set of binary sequences of the same length, perfect phylogeny is the problem of fitting the sequences as leaves of a rooted tree such that no site mutates more than once, and site consistency is the problem of finding a largest subset of sites that can fit a perfect phylogeny. The site consistency problem is known to be NP-hard, but polynomial-time solvable if the set of sequences can be derived on a particular form of phylogenetic network with recombination, called a galled-tree. In this paper, we introduce the problem dual to site consistency, called sequence consistency, provide a linear-time algorithm for site consistency when the set of sequences can be derived on a galled-tree, and study the parameterized complexity of both site and sequence consistency.

23. X. Liang and, A. Bishnu, and T. Asano:
"Fingerprint Matching Using Minutia Polygons", , Proc. ICPR: 18th Intl. Conf. on Pattern Recognition, Hong Kong, pp.1046-1049, 2006.
概要: Fingerprint distortion changes both the geometric position and orientation of minutiae, and leads to difficulties in establishing a match among multiple impressions acquired from the same finger. In this paper, minutia polygons are used to match distorted fingerprints. A minutia polygon describes not only the minutia type and orientation but also the minutia shape. This allows the minutia polygon to be bigger than the conventional tolerance box without losing matching accuracy. In other words, a minutia polygon has a higher ability to tolerate distortion. Furthermore, the proposed matching method employs an improved distortion model using a Multi-quadric basis function with parameters. Adjustable parameters make this model more suitable for fingerprint distortion. Experimental results show the proposed method is two times faster and more accurate (especially, on fingerprints with heavy distortion) than the exisiting method.

24. X. Liang, T. Asano, and H. Zhang:
"A Combined Radial Basis Function Model for Fingerprint Distortion", , Proc. ICIAR: Intel. Conf. on Image Analysis and Recognition, Portugal, September, 2006.

概要: Most fingerprint recognition techniques are based on minutiae matching and have been well studied. However, this technology still suffers from problems associated with the handling of poor quality impressions. One problem besetting fingerprint matching is *distortion*. Distortion changes both geometric position and orientation, and leads to difficulties in establishing a match among multiple impressions acquired from the same finger tip. In this paper, according to the particularity of fingerprint distortion, we propose a combined radial basis function (RBF) model, which separately builds rigid and nonrigid transformations, for attacking the distortion problem. Combined RBF model provides more accurate mapping function between a possible matched-pair. Experiments on real data demonstrate the efficacy of the proposed method in improving the compensation of fingerprint distortion.

25. T. Asano, N. Katoh, H. Tamaki, T. Tokuyama:
"Angular Voronoi Diagram with Applications", , Proc. International Symposium on Voronoi Diagram in Science and Engineering, July, Banff, Canada, 2006.
概要: Given a set of line segments in the plane, we define an angular Voronoi diagram as follows: a point belongs to a Voronoi region of a line segment if the visual angle of the line segment from the point is smallest among all line segments. The Voronoi diagram is interesting in itself and different from an ordinary Voronoi diagram for a point set. After introducing interesting properties, we present an efficient algorithms for finding a point to maximize the smallest visual angle. Some applications to mesh improvement are also mentioned.

26. T. Asano:
"Aspect-ratio Voronoi Diagram with Applications", , Proc. International Symposium on Voronoi Diagram in Science and Engineering, July, Banff, Canada, 2006.
概要: This paper considers a problem of finding an optimal point within a polygon P in the sense that when we connect the point to every vertex of P by straight line then the worst aspect ratio among all resulting triangles is optimized. This problem has an important application to triangular mesh improvement. We propose three different approaches toward this problem. The first one is based on some new Voronoi diagram defined by an aspect ratio, which is interesting in itself. The second approach is essentially a binary search defined by geometric intersection. The third one is grid-based heuristic, which might be practically best but has no theoretical guarantee on its performance.

27. X. Liang, A. Bishnu, and T. Asano:
"Distorted Fingerprint Indexing Using Minutia Detail and Delaunay Triangle", , Proc. International Symposium on Voronoi Diagram in Science and Engineering, July, Banff, Canada, 2006.
概要: This paper is concentrated on an accurate and efficient fingerprint indexing algorithm, which efficiently retrieves the top $\mathcal{N}$ possibly matched candidates from a huge database. In order to have ability of coping with distorted fingerprints, the proposed algorithm uses novel features, which are insensitive to distortion, formed by the Delaunay triangulation of minutiae set as the representation unit. These features include minutia detail and Delaunay triangle (its handedness, angles, maximum edge, and related angle between orientation field and edges). Experiments on database FVC 2000 and scanned fingerprints with heavy distortion show our algorithm considerably narrows down the search space in fingerprint databases and is also available for distorted

fingerprints. We also compared with other indexing approaches, and results show our algorithm has a better performance, especially on fingerprints with heavy distortion. This algorithm has another significant advantage that is it provides the control points for fingerprint distortion compensation.

28. T. Asano and D. Kirkpatrick:
"Distance Trisector Curves in Regular Convex Distance Metrics", , Proc. International Symposium on Voronoi Diagram in Science and Engineering, July, Banff, Canada, 2006.
概要: Given two points A and B in the plane, we are interested in separating them by two curves C_A and C_B such that C_A is equidistant from A and C_B, and C_B is equidistant from B and C_A. Such curves generalize the familiar notion of a bisector curve, and form the basis of a new kind of Voronoi diagram called a Zone diagram. These curves, which are referred to as distance trisector curves, have been studied in the Euclidean metric where they exist, are unique, and admit efficient approximations. Nevertheless, they have no known expression in terms of elementary functions and are conjectured to be non-algebraic. In this paper, we study distance trisector curves with respect to a parameterized family of distance metrics that provide arbitrarily close approximations to the Euclidean distance. The advantage of studying distance trisectors in this setting is that they have a simple piecewise-linear description and an efficient (exact) construction.

29. T. Asano, J. Matousek, and T. Tokuyama:
"The Distance Trisector Curve", , Proc. ACM Symposium on Computing Theory, 2006.
概要: Given points p and q in the plane, we are interested in separating them by two curves C_1 and C_2 such that every point of C_1 has equal distance to p and to C_2, and every point of C_2 has equal distance to C_1 and to q. We show by elementary geometric means that such C_1 and C_2 exist and are unique. Moreover, for $p = (0, 1)$ and $q = (0, -1)$, C_1 is the graph of a function $f : R \to R$, C_2 is the graph of $-f$, and f is convex and analytic (i.e., given by a convergent power series at a neighborhood of every point). We conjecture that f is not expressible by elementary functions and, in particular, not algebraic. We provide an algorithm that, given $x \in R$ and $\epsilon > 0$, computes an approximation to $f(x)$ with error at most ϵ in time polynomial in $\log \frac{1+|x|}{\epsilon}$. The separation of two points by two "trisector" curves considered here is a special (two-point) case of a new kind of Voronoi diagram, which we call the Voronoi diagram with neutral zone and which we investigate in a companion paper.

30. T. Asano, F. Rosselló, G. Valiente:
"Template Matrices for Perfect Phylogeny Haplotyping and Site Consistency", , RECOMB, 2006.
概要: The problem of inferring haplotype phase from a population of genotypes has received much attention recently, especially on the light of current large-scale efforts to characterize populations in terms of hyplotypes. The site consistency problem in perfect phylogeny has also received much attention lately, motivated in part by the characterization of a particular form of phylogenetic networks under mutation and constrained recombination that admit a polynomial-time solution to the site consistency problem. Perfect phylogeny haplotyping is the problem of resolving a given set of n diploid sequences into a set of $2n$ haploid sequences that form a perfect phylogeny. The bottleneck of current algorithms for the perfect phylogeny haplotyping problem lies in the efficient computation

of the genotype graph, and the usual algorithm for computing the genotype graph for a given $n \times m$ genotype matrix takes $O(nm^2)$ time. However, the genotype graph for a given genotype matrix can be obtained by a simple combination of eight template matrices over the alphabet $\Sigma = \{0, 1, 2\}$.

31. S. Sasahara and T. Asano:
"New Dispersed-dot halftoning technique by elimination of unstable pixels for electrophotography", Journal of Electronic Imaging, 023006, pp.1-9, 2005.
概要: In this paper, we propose an algorithm that adaptively arranges or grows clusters according to tone slope of the cluster-dot halftoning by bubble packing. This technique locates small cluster regions to increase effective resolution on the portion of rapid tone change, and locates large cluster regions to increase effective tone scale on the portion of mild tone change to achieve a good balance between effective resolution and effective tone scale. Since the clusters are arranged irregularly, our technique has an effect of suppressing interference with regular patterns, such as Moire, and produces a good tone reproduction without occurring artifacts.

32. T. Asano, M. de Berg, O. Cheong, H. Everett, H. Haverkort, N. Katoh, and A. Wolff:
"Optimal Spanners for Axis-Aligned Buildings", Computational Geometry: Theory and Applications, 30, 1, pp.59-77, January 2005.
概要: Given a set of axis-parallel buildings (rectangles) in the plane, we connect them with tunnels so that we don't get cold while walking from one to the other. This paper presents an efficient algorithm for choosing the bridges such that their dilation is optimal.

33. T.Asano, S. Choe, S. Hashima, Y. Kikuchi, and S.-C. Sung:
"Distributing Distinct Integers Uniformly over a Square Matrix with Application to Digital Halftoning", Invited Talk at 7th Hellenic European Conference on Computer Mathematics and its Applications, 2005.
概要: In this talk we generalize the notion of a semimagic square by replacing the requirement that all row and column sums be the same by the analogous requirement for all $k \times k$ contiguous square submatrices; we call such $n \times n$ matrices *zero $k \times k$-discrepancy matrices* of order (k, n). Let $N(k, n)$ be the set of all such matrices. In this talk we show that $N(k, n)$ is non-empty if k and n are both even, and empty if they are relatively prime. Further, we show by an explicit construction that $N(k, k^m) \neq \emptyset$ for any integers $k, m \geq 2$.

34. Xuefeng Liang, Kazunori Kotani and Tetsuo Asano:
"Automatically Choosing Appropriately-Sized Structuring Elements to Eliminate Useless Components in Fingerprint Image", Proc. Visual Communications and Image Processing, pp.284-293, 2005.
概要: Fingerprints are useful for biometric purposes because of their well known properties of distinctiveness and persistence over time. However, owing to skin condition or incorrect finger pressure, some fingerprint images contain useless components. They are often mistaken for the terminations that are an essential minutia of a fingerprint. Mathematical Morphology (MM) is one powerful tool in image processing. The performance of MM is heavily dependent on structuring elements (SEs), but finding an optimal SE is a difficult and nontrivial task. In this work, we focus on automatically choosing an appropriate SE for eliminating useless components of fingerprint images using linear time Euclidean distance transform algorithm. We exploit the property that these useless components

are thinner than fingerprint ridges. So, we estimate the width of useless components and fingerprint ridges using Euclidean distance transform values, and then provide a linear time algorithm to eliminate the useless components. We have developed a novel algorithm for the binarization of fingerprint images. The information of distance transform values can be obtained directly from the binarization phase. The results show that using this method on fingerprint images with useless components is faster than existing methods and achieves better quality than earlier methods.

35. T. Asano:
"Computational Geometric and Combinatorial Approaches to Digital Halftoning", Prenary Talk at International Conference on Computational Science and Its Applications, Singapore, May, 2005.
概要: We present different schema for digital halftoning to achieve low discrepancy for a family of square regions. More concretely, we prove that the discrepancy for a family of 2×2 regions can be 0 if and only if the matrix size is even. For families of larger regions we have a result that the discrepancy of a $k^2 \times k^2$ matrix for $k \times k$ regions can be 0 while it cannot be 0 if the matrix size n and region size k are relatively prime.

36. T.Asano, S. Choe, S. Hashima, Y. Kikuchi, and S.-C. Sung:
"Distributing Distinct Integers Uniformly over a Square Matrix with Application to Digital Halftoning", 7th Hellenic European Conference on Computer Mathematics and its Applications, 2005.
概要: This paper considers how to distribute n^2 integers between 0 and $n^2 - 1$ as uniformly as possible over an $n \times n$ square matrix. We introduce a discrepancy-based measure to evaluate the uniformity. More precisely, we take a sum of matrix elements over every $k \times k$ contiguous submatrix and define the discrepancy of the matrix as the largest difference among those sums. It is known that if n and k are both even integers then we can construct zero-discrepancy matrices. In this paper we present a scheme for achieving a new discrepancy bound $2n$ when n is odd and k is 2. This is an improvement from the previous bound $4n$. We borrow basic ideas behind orthogonal Latin squares and semi-magic squares. An n-ary number system also plays an important part. This problem is closely related to digital halftoning. Low discrepancy matrices would improve the quality of commonly used Ordered Dither Algorithm.

37. X. Liang, K. Kotani and T. Asano:
"Automatically Choosing Appropriately-Sized Structuring Elements to Eliminate Useless Components in Fingerprint Image", Proc. Visual Communications and Image Processing 2005, 5960, 2005.
概要: Fingerprints are useful for biometric purposes because of their well known properties of distinctiveness and persistence over time. However, owing to skin condition or incorrect finger pressure, some fingerprint images contain useless components. They are often mistaken for the terminations that are an essential minutia of a fingerprint. Mathematical Morphology (MM) is one powerful tool in image processing. The performance of MM is heavily dependent on structuring elements (SEs), but finding an optimal SE is a difficult and nontrivial task. In this work, we focus on automatically choosing an appropriate SE for eliminating useless components of fingerprint images using linear time Euclidean distance transform algorithm. We exploit the property that these useless components are thinner than fingerprint ridges. So, we estimate the width of useless components and fingerprint ridges using Euclidean dis-

tance transform values, and then provide a linear time algorithm to eliminate the useless components. We have developed a novel algorithm for the binarization of fingerprint images. The information of distance transform values can be obtained directly from the binarization phase. The results show that using this method on fingerprint images with useless components is faster than existing methods and achieves better quality than earlier methods.

38. S. Teramoto, T. Asano, B. Doerr, and N. Katoh:
"Inserting Points Uniformly at Every Instance", Proc. 2005 Korea Japan Joint Workshop on Algorithms and Computation, 2005.
概要: A problem of arranging n points as uniformly as possible, which is equivalent to that of packing n equal and non-overlapping circles in a unit square, is frequently asked. In this paper we generalize this problem in such a way that points be inserted one by one with uniformity preserved at every instance. Our criteria on uniformity is to minimize the gap ratio (which is the maximum gap over the minimum gap) at every point insertion. We present a linear time algorithm for finding an optimal n-point sequence with the maximum gap ratio bounded by $2^{\lfloor n/2 \rfloor/(\lfloor n/2 \rfloor+1)}$ in the 1-dimensional case. We describe how hard the same problem is for a point set in the plane and propose a local search heuristics for finding a good solution.

39. T. Asano, N. Katoh, H. Tamaki and T. Tokuyama:
"The structure and number of global roundings of a graph", Theoretical Computer Science, Vol.325, pp.425-437, 2004.
概要: Given a connected weighted graph $G = (V, E)$, we consider a hypergraph H_G corresponding to the set of all shortest paths in G. For a given real assignment $\mathbf{a}$ on V satisfying $0 \leq \mathbf{a}(v) \leq 1$, a global rounding α with respect to H_G is a binary assignment satisfying that $|\sum_{v \in F} \mathbf{a}(v) - \alpha(v)| < 1$ for every $F \in P_G$. We conjecture that there are at most $|V|+1$ global roundings for H_G, and also the set of global roundings is an affine independent set.

40. T. Shimamoto and T. Asano:
"Arranging Fewest Possible Probes to Detect a Hidden Object with Industrial Application", IEICE Trans. Fundamentals, 87-A (5), pp.1053-1058, May 2004.
概要: 光通信用デバイスの製造工程の中で重視されている光軸調芯工程を例に、不可視物体を計算幾何学的視点から効率良く検知する手法を紹介する。本研究の特徴は、センサの計測点を物体の形状を考慮し配置することにより計測点の総数を減らすことにある。本手法の適用により、従来法に比較して検知時間の短縮が期待できる。

41. T. Asano, D.G. Kirkpatrick, and C.K. Yap:
"Pseudo-approximation algorithm with applications to optimal motion planning", Discrete and Computational Geometry, 31, 1, pp.139-171, 2004.
概要: This paper presents a polynomial-time approximation algorithm for finding shortest collision-free motions of a rod in the presence of polygonal obstacles, under an optimality criterion based on minimizing the orbit length of a fixed but arbitrary point (called the *focus*) on the rod. Based on a new characterization of an optimal motion, we present two approximation algorithms for finding an approximate motion. One of them finds an approximate motion $\tilde{P}_d$ under the constraint that it does not go beyond the distance d from the starting point in strongly polynomial time such that $|\tilde{P}_d| \leq |P_d^*| + \epsilon d$ for any given $\epsilon > 0$ where P_d^* is an optimal motion under the same constraint. The running time is quadratic in n

and $1/\epsilon$ where n is the number of vertices of polygonal obstacles. The other algorithm finds an approximate solution whose length is bounded by $(1+\epsilon)|P_{opt}|$ for any given $\epsilon > 0$ where P_{opt} is an optimal motion between two specified placements. Unfortunately the second algorithm runs in weakly polynomial time depending on the diameter of the obstacle space.

42. Boris Aronov, Tetsuo Asano, Naoki Katoh, Kurt Mehlhorn, and Takeshi Tokuyama:
"Polyline Fitting of Planar Points Under Min-sum Criteria", Proc. of 15th International Symposium on Algorithms and Computation, ISAAC 2004, pp.77-88, 2004.
概要: Fitting a curve of a certain type to a given set of points in the plane is a basic problem in statistics and has numerous applications. We consider fitting a polyline with k joints under the min-sum criteria with respect to L_1- and L_2-metrics, which are more appropriate measures than uniform and Hausdorff metrics in statistical context. We present efficient algorithms for the 1-joint versions of the problem, and fully polynomial-time approximation schemes for the general k-joint versions.

43. Xuefeng Liang, Arijit Bishnu, and Tetsuo Asano:
"A Near-Linear Time Algorithm for Binarization of Fingerprint Images Using Distance Transform", Proc. 10th International Workshop, IWCIA 2004, pp.197-208, 2004.
概要: Automatic Fingerprint Identification Systems (AFIS) have various applications to biometric authentication, forensic decision, and many other areas. Fingerprints are useful for biometric purposes because of their well known properties of distinctiveness and persistence over time. Fingerprint images are characterized by alternating spatial distribution of gray-level intensity values of ridges and ravines/valleys of almost equal width. Most of the fingerprint matching techniques require extraction of minutiae that are the terminations and bifurcations of the ridge lines in a fingerprint image. Crucial to this step, is either detecting ridges from the gray-level image or binarizing the image and then extracting the minutiae. In this work, we focus on binarization of fingerprint images using linear time euclidean distance transform algorithms. We exploit the property of almost equal widths of ridges and valleys for binarization. Computing the width of arbitrary shapes is a non-trivial task. So, we estimate width using distance transform and provide an $O(N^2 \log M)$ time algorithm for binarization where M is the number of gray-level intensity values in the image and the image dimension is $N \times N$. With M for all purposes being a constant, the algorithm runs in near-linear time in the number of pixels in the image.

44. Xuefeng Liang and T. Asano:
"A Fast Denoising Method for Binary Fingerprint Image", Proc. IASTED Conference on Visualization, Imaging, and Image Processing, pp.309-313, 2004.
概要: This document is an example of what your camera-ready manuscript to ISCIT 2004 should look like. Authors are asked to conform to the directions reported in this document.

45. T. Asano, Naoki Katoh, Hisao Tamaki, and Takeshi Tokuyama:
"On Geometric Structure of Global Roundings for Graphs and Range Spaces", Proc. of the Scandinavian Workshop on Algorithm Theory (SWAT 04), pp.455-467, 2004.
概要: Given a connected weighted graph $G = (V, E)$, we consider a hypergraph H_G corresponding to the set of all shortest paths in G. For a given real assignment $\mathbf{a}$ on

V satisfying $0 \leq \mathbf{a}(v) \leq 1$, a global rounding α with respect to H_G is a binary assignment satisfying that $|\sum_{v \in F} \mathbf{a}(v) - \alpha(v)| < 1$ for every $F \in P_G$. We conjecture that there are at most $|V|+1$ global roundings for H_G, and also the set of global roundings is an affine independent set.

46. T. Asano, P. Brass, S. Sasahara:
"Disc Covering Problem with Application to Digital Halftoning", Proc. of the Workshop on Computational Geometry and Applications (CGA 04) as a part of International Conference on Computational Science and Its Applications – ICCSA 2004, pp.11-2, 2004.
概要: This paper considers the following geometric optimization problem: Input is a matrix $R = (r_{ij})$. Each entry r_{ij} represents a radius of a disc with its center at (i, j) in the plane. We want to choose those disc in such a way that the total area covered by exactly one disc is maximized. This problem is closely related to digital halftoning, a technique to convert a continuous-tone image into a binary image for printing. An exact algorithm is given for the one-dimensional version of the problem and approximation algorithms are given for the two-dimensional one. The approximation algorithms are verified to be satisfactory in practice through experiments in applications to digital halftoning.

47. Yoshihiro Takahara, Sachio Teramoto, and Ryuhei Uehara:
"Longest Path Problems on Ptolemaic Graphs", IEICE Transactions, to appear.
概要: Longest path problem is a problem for finding a longest path in a given graph. While the graph classes in which the Hamiltonian path problem can be solved efficiently are widely investigated, there are few known graph classes such that the longest path problem can be solved efficiently. Polynomial time algorithms for finding a longest cycle and a longest path in a Ptolemaic graph are proposed. Ptolemaic graphs are the graphs that satisfy the Ptolemy inequality, and they are the intersection of chordal graphs and distance-hereditary graphs. The algorithms use the dynamic programming technique on a laminar structure of cliques, which is a recent characterization of Ptolemaic graphs.

48. Yoshio Okamoto, Takeaki Uno, and Ryuhei Uehara:
"Counting the Number of Independent Sets in Chordal Graphs", Journal of Discrete Algorithms, to appear.
概要: We study some counting and enumeration problems for chordal graphs, especially concerning independent sets. We first provide the following efficient algorithms for a chordal graph: (1) a linear-time algorithm for counting the number of independent sets; (2) a linear-time algorithm for counting the number of maximum independent sets; (3) a polynomial-time algorithm for counting the number of independent sets of a fixed size. With similar ideas, we show that enumeration (namely, listing) of the independent sets, the maximum independent sets, and the independent sets of a fixed size in a chordal graph can be done in constant amortized time per output. On the other hand, we prove that the following problems for a chordal graph are #P-complete: (1) counting the number of maximal independent sets; (2) counting the number of minimum maximal independent sets. With similar ideas, we also show that finding a minimum weighted maximal independent set in a chordal graph is NP-hard, and even hard to approximate.

49. Ryuhei Uehara:
"Simple Geometrical Intersection Graphs (Invited Talk)", Proc. Workshop on

Algorithms and Computation (WALCOM 2008), Lecture Notes in Computer Science Vol. 4921, 25-33, 2008.

概要: A graph $G = (V, E)$ is said to be an intersection graph if and only if there is a set of objects such that each vertex v in V corresponds to an object O_v and $\{u, v\} \in E$ if and only if O_v and O_u have a nonempty intersection. Interval graphs are typical intersection graph class, and widely investigated since they have simple structures and many hard problems become easy on the graphs. In this paper, we survey known results and investigate (unit) grid intersection graphs, which is one of natural generalized interval graphs. We show that the graph class has so rich structure that some typical problems are still hard on the graph class.

50. Ryuhei Uehara and Yushi Uno:
"On Computing Longest Paths in Small Graph Classes", International Journal of Foundations of Computer Science, 18, pp.911-930, 2007.

概要: The longest path problem is the one that finds a longest path in a given graph. While the graph classes in which the Hamiltonian path problem can be solved efficiently are widely investigated, few graph classes are known to be solved efficiently for the longest path problem. Among those, for trees, a simple linear time algorithm for the longest path problem is known. We first generalize the algorithm, and show that the longest path problem can be solved efficiently for some tree-like graph classes by this approach. We next propose two new graph classes that have natural interval representations, and show that the longest path problem can be solved efficiently on these classes.

51. Ryuhei Uehara and Gabriel Valiente:
"Linear Structure of Bipartite Permutation Graphs with an Application", Information Processing Letters, 103, pp.71-77, 2007.

概要: The class of bipartite permutation graphs is the intersection of two well known graph classes: bipartite graphs and permutation graphs. A complete bipartite decomposition of a bipartite permutation graph is proposed in this note. The decomposition gives a linear structure of bipartite permutation graphs, and it can be obtained in $O(n)$ time, where n is the number of vertices. As an application of the decomposition, we show an $O(n)$ time and space algorithm for finding a longest path in a bipartite permutation graph.

52. Andreas Brandstädt, Feodor F. Dragan, Hoang-Oanh Le, Van Bang Le, and Ryuhei Uehara:
"Tree Spanners for Bipartite Graphs and Probe Interval Graphs", Algorithmica, 47, pp.27-51, 2007.

概要: A tree t-spanner T in a graph G is a spanning tree of G such that the distance between every pair of vertices in T is at most t times their distance in G. The tree t-spanner problem asks whether a graph admits a tree t-spanner, given t. We first substantially strengthen the known results for bipartite graphs. We prove that the tree t-spanner problem is NP-complete even for chordal bipartite graphs for $t \geq 5$, and every bipartite ATE–free graph has a tree 3-spanner, which can be found in linear time. The best known before results were NP-completeness for general bipartite graphs, and that every convex graph has a tree 3-spanner. We next focus on the tree t-spanner problem for probe interval graphs and related graph classes. The graph classes were introduced to deal with the physical mapping of DNA. ¿From a graph theoretical point of view, the classes are natural generalizations of interval graphs. We show that these classes are tree 7-spanner admissible, and a tree 7-spanner can be constructed in

$O(m \log n)$ time.

53. Toshiki Saitoh, Masashi Kiyomi, and Ryuhei Uehara:
"Simple Efficient Algorithm for MPQ-tree of an Interval Graph", Proc. KOREA-JAPAN Joint Workshop on Algorithms and Computation (WAAC 2007), pp.121-126, 2007.
概要: MPQ-tree is an informative data structure for an interval graph. We propose a simple algorithm that constructs an MPQ-tree for an interval graph $G = (V, E)$ given in interval representation. If the interval representation is already sorted, the algorithm runs in $O(|V|)$ time and space, which improves the previously known time complexity. Further, our algorithm is much simpler than previously known algorithms.

54. Shin-ichi Nakano, Ryuhei Uehara and Takeaki Uno:
"Efficient Algorithms for Airline Problem", Proc. 4th Annual Conference on Theory and Applications of Models of Computation (TAMC 07), Lecture Notes in Computer Science Vol.4484, pp.428-439, 2007.
概要: The airlines in the real world form small-world network. This implies that they are constructed with an ad hoc strategy. The small-world network is not so bad from the viewpoints of customers and managers. The customers can fly to any destination through a few airline hubs, and the number of airlines is not so many comparing to the number of airports. However, clearly, it is not the best solution in either viewpoint since there is a trade off. In this paper, one of the extreme cases, which is the standpoint of the manager, is considered; we assume that customers are silent and they never complain even if they are required to transit many times. This assumption is appropriate for some transportation service and packet communication. Under this assumption, the airline problem is to construct the least cost connected network for given distribution of the populations of cities with no a priori connection. First, we show an efficient algorithm that produces a good network which is minimized the number of vacant seats. The resultant network contains at most n connections (or edges), where n is the number of cities. Next we aim to minimize not only the number of vacant seats, but also the number of airline connections. The connected network with the least number of edges is a tree which has exactly $n-1$ connections. However, the problem to construct a tree airline network with the minimum number of vacant seats is NP-complete. We also propose efficient approximation algorithms to construct a tree airline network with the minimum number of vacant seats.

55. Shin-ichi Nakano, Ryuhei Uehara and Takeaki Uno:
"A New Approach to Graph Recognition and Applications to Distance Hereditary Graphs", Proc. 4th Annual Conference on Theory and Applications of Models of Computation (TAMC 07), Lecture Notes in Computer Science Vol.4484, pp.115-127, 2007.
概要: Distance-hereditary graphs consist of the isometric graphs, and hence contain trees and cographs. First, a canonical and compact tree representation of the class is proposed. The tree representation can be constructed in linear time using two prefix trees. Usually, the prefix trees are used to maintain a set of strings. The prefix trees in our algorithm are used to maintain the neighbors for each vertex, which is new approach comparing to the other known results based on the lexicographically bread first search. Several efficient algorithms for the distance-hereditary graphs

based on the canonical tree representation are proposed; linear time algorithms for graph recognition and graph isomorphism, and efficient enumeration algorithm. An efficient coding for the tree representation is also presented, which requires $4n$ bits for a distance-hereditary graph of n vertices, and $3n$ bits for a cograph. The results improve previously known upper bounds of the number of distance-hereditary graphs and cographs.

56. Ryuhei Uehara and Sachio Teramoto:
"The complexity of a Pop-up book", Proc. 18th Canadian Conference on Computational Geometry (CCCG 2006), pp.3-6, 2006.
概要: Origami is the centuries-old art of folding paper, and recently, it is investigated as science. In this paper, another hundreds-old art of folding paper, a pop-up book, is studied. A model for the pop-up book design problem is given, and its complexity is investigated. We show that both of the opening book problem and the closing book problem are NP-hard.

57. Sachio Teramoto, Erik D. Demaine, and Ryuhei Uehara:
"Voronoi game on graphs and its complexity", Proc. 2nd IEEE Symposium on Computational Intelligence and Games (CIG 2006), pp.265-271, 2006.
概要: The Voronoi game is a two-person game which is a model for a competitive facility location. The game is done on a continuous domain, and only two special cases (1-dimensional case and 1-round case) are well investigated. We introduce the *discrete* Voronoi game of which the game arena is given as a graph. We first show the best strategy when the game arena is a large complete k-ary tree. Next we show that the discrete Voronoi game is intractable in general. Even in 1-round case, and the place occupied by the first player is fixed, the game is NP-hard in general. We also show that the game is $PSPACE$-complete in general case.

58. Ryuhei Uehara and Yushi Uno:
"Laminar Structure of Ptolemaic Graphs and Its Applications", Proc. 16th Annual International Symposium on Algorithms and Computation (ISAAC 2005), Lecture Notes in Computer Science Vol.3827, pp.186-195, 2005.
概要: Ptolemaic graphs are graphs that satisfy the Ptolemaic inequality for any four vertices. The graph class coincides with the intersection of chordal graphs and distance hereditary graphs, and it is a natural generalization of block graphs (and hence trees). In this paper, a new characterization of ptolemaic graphs is presented. It is a laminar structure of cliques, and leads us to a canonical tree representation, which gives a simple intersection model for ptolemaic graphs. The tree representation is constructed in linear time from a perfect elimination ordering obtained by the lexicographic breadth first search. Hence the recognition and the graph isomorphism for ptolemaic graphs can be solved in linear time. Using the tree representation, we also give an $O(n)$ time algorithm for the Hamiltonian cycle problem.

59. 上原隆平:
"グラフクラスとアルゴリズム (解説)", 電子情報通信学会誌, 88, pp.118-122, 2005.
概要: 計算機で扱う問題は，多くの場合グラフ上の問題として定式化できる．計算量の理論により，これまで多くの問題が "手に負えない" ことが示されてきた．一方でこうした問題に対する現実的なアプローチがいくつか提案されてきた．本稿ではグラフに制限を加えるアプローチについて解説した．DNA の切片間の関係などは， モデル化すると特別なグラフになる．こうしたグラフ上では， こ

れまで手に負えないとされてきた問題が効率良く解けることがある．本稿では，代表的なグラフクラスと，関連したアルゴリズムの最近の研究動向を解説した．

60. Ryuhei Uehara, Seinosuke Toda and Takayuki Nagoya:
"Graph Isomorphism Completeness for Chordal Bipartite Graphs and Strongly Chordal Graphs", Discrete Applied Mathematics, 145, pp.479-482, 2005.
概要: This paper deals with the graph isomorphism (GI) problem for two graph classes: chordal bipartite graphs and strongly chrdal graphs. It is known that GI problem is GI complete for some special graph classes including regular graphs, bipartite graphs, chordal graphs, comparability graphs, split graphs, and k-trees for unbounded k. On the other side, the relative complexity of the GI problem for the above classes was unknown. We prove that deciding isomorphism of the classes are GI complete.

61. Peisen Zhang, Huitao Sheng, and Ryuhei Uehara:
"A Double Classification Tree Search Algorithm for Index SNP Selection", BMC Bioinformatics (Electric Journal), 5:89, 2004.
概要: In population-based studies, it is generally recognized that single nucleotide polymorphism (SNP) markers are not independent. Rather, they are carried by haplotypes, groups of SNPs that tend to be coinherited. It is thus possible to choose a much smaller number of SNPs to use as indices for identifying haplotypes or haplotype blocks in genetic association studies. We refer to these characteristic SNPs as index SNPs. In order to reduce costs and work, a minimum number of index SNPs that can distinguish all SNP and haplotype patterns should be chosen. Unfortunately, this is an NP-complete problem, requiring brute force algorithms that are not feasible for large data sets. We have developed a double classification tree search algorithm to generate index SNPs that can distinguish all SNP and haplotype patterns. This algorithm runs very rapidly and generates very good, though not necessarily minimum, sets of index SNPs, as is to be expected for such NP-complete problems. A new algorithm for index SNP selection has been developed. A webserver for index SNP selection is available at http://cognia.cu-genome.org/cgi-bin/genome/snpIndex.cgi/ .

62. Ryuhei Uehara:
"Canonical Data Structure for Interval Probe Graphs", Proc. 15th Annual International Symposium on Algorithms and Computation (ISAAC 2004), Lecture Notes in Computer Science Vol.3341, pp.859-870, 2004.
概要: The class of interval probe graphs is introduced to deal with the physical mapping and sequencing of DNA as a generalization of interval graphs. The polynomial time recognition algorithms for the graph class are known. However, the complexity of the graph isomorphism problem for the class is still unknown. In this paper, extended MPQ-trees are proposed to represent the interval probe graphs. An extended MPQ-tree is canonical and represents all possible permutations of the intervals. The extended MPQ-tree can be constructed from a given interval probe graph in polynomial time. Thus we can solve the graph isomorphism problem for the interval probe graphs in polynomial time. Using the tree, we can determine that any two nonprobes are independent, overlapping, or their relation cannot be determined without an experiment. Therefore, we can heuristically find the best nonprobe that would be probed in the next experiment. Also, we

can enumerate all possible affirmative interval graphs for any interval probe graph.

文部科学省科学研究費補助金 特定領域研究 (課題番号 16092212)

C06: グラフ構造を有する問題に対する近似アルゴリズムの設計

通信網，電力網，交通網，VLSI の配線，スケジューリング，地理情報システム等の多くのシステム工学的，情報工学的諸問題に対するアルゴリズムを設計する場合には，これらを離散最適化問題として定式化することで，問題の持つ計算の複雑さの解明や高度な数学的解法の適用が可能となる．しかし，一般には，複雑な要求条件を含む現実の問題をそのまま離散最適化問題として定式化し，分枝限定法や整数計画法といった離散最適化の汎用アルゴリズムを単純に適用するだけでは，計算効率のよいアルゴリズムを得ることはできない．そこで，問題の本質的な構造を抽出し，この構造を利用した効率の良いアルゴリズムの設計が重要となる．本研究では，特にグラフ構造に焦点を置き，離散数学，数理計画法の成果を応用した厳密解法，理論保障付き近似アルゴリズム，発見的手法の設計，理論的基盤の確立を目指し，それらの目標に対して一定の成果を収めた．

研究組織

研究代表者：	永持　仁	京都大学 大学院 情報学研究科
研究分担者：	軽野 義行	京都工芸繊維大学 大学院 工芸科学研究科
	宇野 裕之	大阪府立大学 大学院 理学系研究科 (平成 17–19 年度)
	趙　亮	京都大学 大学院 情報学研究科 (平成 18–19 年度)
	山崎 浩一	群馬大学 大学院 工学研究科 (平成 19 年度)

交付決定額 (配分額)

平成 16 年度	2,100,000 円
平成 17 年度	1,600,000 円
平成 18 年度	1,600,000 円
平成 19 年度	1,600,000 円
合　計	6,900,000 円

研究成果の概要

- 学術誌　Algorithmica (2006), Discrete Applied Mathematics (2004, 2006, 2007), Discrete Optimization (2006, 2007), Information Processing Letters (2004, 2005, 2007), Journal of Algorithms (2005), Mathematical Programming (2005), SIAM J. Computing (2006), Theoretical Computer Science (2005, 2007), etc.
- 国際会議　AWOCA 2006 (Australia, 2006), COCOON 2006 (Taiwan, 2006), ESA 2006 (Switzerland, 2006), EURO XXI (Iceland, 2006), WG 2006 (Norway, 2006), IPCO 2007 (New York, 2007), ISAAC 2007 (Japan, 2007), TAMC07 (China, 2007), etc.
- 受賞　社団法人日本オペレーションズ・リサーチ学会，第 34 回 OR 学会文献賞，永持　仁 (2006 年).

1　はじめに

本研究では，グラフ構造を持つ離散最適化問題を中心として図形充填問題，スケジューリング問題などの問題に対して厳密解法（多項式時間アルゴリズム，分枝限定法，動的計画法），数理計画法に基づいたアルゴリズム，理論保障付き近似アルゴリズムの開発を行ってきた．

通信網，電力網，交通網，VLSI の配線，スケジューリング，地理情報システム等の多くのシステム工学的，情報工学的諸問題に対するアルゴリズムを設計する場合には，これらを離散最適化問題として定式化することで，問題の持つ計算の複雑さの解明や高度な数学的解法の適用が可能となる．しかし，一般には，複雑な要求条件を含む現実の問題をそのまま離散最適化問題として定式化し，分岐限定法や整数計画法といった離散最適化の汎用アルゴリズムを単純に適用するだけでは，計算効率のよいアルゴリズムを得ることはできない．そこで，問題の本質的な構造を抽出し，この構造を利用した効率の良いアルゴリズムの設計が重要となる．本研究では，特にグラフ構造に焦点を置き，離散数学，数理計画法の成果を応用した厳密解法，理論保障付き近似アルゴリズム，発見的手法の設計，理論的基盤の確立を目指してきた．対象とする問題は，グラフの問題に限らず，グラフ論的手法の適用できる種々の問題を含む．

初年度は，グラフ連結度問題，スケジューリング問題などにおいて近似アルゴリズムの開発や理論的基盤に関する研究を中心に行い，２年目においては，これらの研究課題をについて研究を進展させると同時に，最近重要性が高まっている情報の可視化において有用な技術となるグラフの描画問題の研究成果を加えた．３年目においては，これまでの研究課題に対して結果をさらに改良させるとともに，グラフ連結度に関する近似アルゴリズムに対する統一的なアプローチの確立やデタッチメント操作の化学グラフ推定問題への新しい応用などの発見をすることができた．このほか，ファイアウォール高速化のためのデータ構造や食品の袋詰め問題など応用に直結する課題についても成果を収めることができた．今年度は，これまで得られた種々の結果において，アルゴリズムがうまく設計されているメカニズムを詳細に検討し，アルゴリズムの一般化や新しい問題への適用を行った．

以下，得られた研究成果をつぎの九つのカテゴリーに分類して報告する．

- グラフ連結度問題
- 図形処理に関する問題
- IP ネットワーク最適化
- 時間依存最短路問題
- 最長路問題
- グラフのランキング問題
- グラフクラスとグラフパラメータ
- 配送スケジューリング問題
- 食品の袋詰め問題

2　グラフ連結度問題

2.1　グラフ連結度を計算するアルゴリズムの高速化

グラフの連結度を求めるアルゴリズムの研究はグラフアルゴリズムにおいて最も基本的な課題であり，その計算量は他の多くのグラフアルゴリズムの計算量に影響を与えている．

最小 (s,t)-カット　グラフにソース，シンクと呼ぶ２点 s，t が与えられたとき，ソースシンク間の最大 (s,t)-フローあるいは最小 (s,t)-カットは，グラフアルゴリズムの理論的な観点のみならず，広範囲な用途を持つことからもこれらを計算する高速なアルゴリズムの開発は非常に重要な研究課題である．過去２０年にわたって最大フローアルゴリズムの開発が続き，大きな成果をもたらしている．しかし，枝の容量が１である場合の最大流問題はグラフの辺素なパス集合を求める問題であり，この場合に対してさらに高速に作動するアルゴリズムの開発が行われている．この単位容量の場合には，有向グラフに対する Dinits のアルゴリズムの計算時間は $O(\min\{\nu, n^{2/3}, m^{1/2}\}m)$ である（ここで ν は最大流の値である）．その後，有向グラフに対して

は研究の進展がないが，Goldberg と Rao は，グラフが単位容量でありかつ無向であれば Dinits のアルゴリズムにおいて各ブロックフローを計算した残余ネットワークに対して最大隣接順序 (MA orderings) によるグラフ疎化法を適用することで計算量を $O(\min\{m, n^{3/2}\}m^{1/2})$ に減らすことができることを示した．Karger と Levine はグラフ疎化法をさらに巧妙に用いて $O(m + \nu^{3/2}n)$ 時間のアルゴリズムと $O(\nu^{1/6}nm^{2/3})$ 時間のアルゴリズムを得ている．しかし，有向グラフに対して直接有効なグラフ疎化法は現在知られておらず，有向グラフに対する最大フロー，最小カットの計算時間を改善することは未解決問題である．本研究では，有向グラフに対し，無向グラフへの「近さ」を表す尺度を導入し，無向グラフに近い有向グラフに対しては無向グラフに対するグラフ疎化法を用いた高速最大流アルゴリズムが適用できることを示した．有向グラフ $D = (V, E)$ の無向グラフへの近さの指標 μ は $\sum_{u \in V-\{s,t\}}$(点 u に入る枝数−点 u から出る枝数) で定義される．このとき提案するアルゴリズムは有向グラフ D の最小 (s,t)-カットを $O(\min\{m + \nu(\nu+\mu)^{1/2}n,\ (\nu+\mu)^{1/6}nm^{2/3}\})$ 時間で計算する．この計算量は小さな μ を持ちかつ密であるような有向グラフに対しては従来法よりも優れた性能を発揮する．

グラフの点連結度　グラフの枝連結度は比較的高速に計算することができるようになり，重み付きグラフの枝連結度 λ は $O(mn+n^2\log n) = O(n^3)$ 時間で求められるようになっている．ここで，n, m はそれぞれグラフの点数，枝数である．これに対し，グラフの点連結度 κ を計算するには Gabow による現在最良のアルゴリズムを用いても $O(m + \min\{\kappa^{7/2}n, \kappa^2n^{7/4}\})$ の計算時間がかかり，これは最悪 $\kappa = \Omega(n)$ のとき $O(n^{15/4})$ の計算量になることを意味する．そこで小さな計算量で点連結度を評価するアルゴリズムが開発されている．Henzinger は，グラフの最小次数を δ としたときに $\kappa \leq \delta$ の不等式が成立することを利用して，κ の 2 倍近似の値を求める $O(n^2 \min\{\kappa, \sqrt{n}\})$ 時間，$O(n^2)$ 領域のアルゴリズムを与えている．正確には，このアルゴリズムは $\kappa \leq \lfloor\delta/2\rfloor$ の場合に正しい κ の値を出力し，そうでない場合には $\kappa > \lfloor\delta/2\rfloor$ というメッセージを出力する．Gabow は，固定された値 $\alpha < 1$ に対して $\kappa \leq \alpha\delta$ のとき最小点カット（点連結度を達成している点カット）を出力し，そうでない場合は $\kappa > \alpha\delta$ というメッセージを出力する $O(\kappa^2n^{3/2} + \kappa n^2)$ 時間，$O(m)$ 領域のアルゴリズムを与えている．

本研究では，最大隣接順序によるグラフ疎化法を Henzinger のアルゴリズムに適用することにより計算時間，計算領域を縮めることに成功した．我々のアルゴリズムは $O(n^2(1 + \min\{\kappa^2, \kappa\sqrt{n}\}/\delta))$ 時間，$O(n + m)$ 領域の計算量で，$\kappa \leq \lfloor\delta/2\rfloor$ の場合に最小点カット（点連結度を達成している点カット）を出力し，そうでない場合は $\kappa > \lfloor\delta/2\rfloor$ というメッセージを出力する．提案するアルゴリズムは δ が κ と比べて大きい場合には従来よりも高い性能を発揮する．

2.2　グラフの分割問題

最小コスト k-カット問題に対する厳密アルゴリズム　正整数 k が与えられ，グラフの節点集合を k 個の部分集合に分割したとき，異なる部分集合間にまたがる辺の集合を k-分割カット (k-way cut, k-cut) と呼ぶ．目的関数は，k-分割カットに含まれる辺の本数，あるいは，辺に重みが付与されている場合には，k-分割カット内の辺の重み和とし，これを最小にすることが問題の目的である．最小 k-分割を求める問題は，VLSI の設計，ページメモリ問題，系統樹問題並列処理におけるタスク割付問題，巡回セールスマン問題の解法，グラフの強度計算，ネットワーク信頼性解析などにおいて重要な応用を持つ．

一般に 2^V を定義域とする実数値関数 f を V 上の集合関数といい，f が次の不等式を満足するとき劣モジュラ (submodular) と呼ばれる．

$$f(X)+f(Y) \geq f(X\cap Y)+f(X\cup Y), \quad \forall X, Y \subseteq V.$$

また，任意の $S \subseteq V$ に対し $f(S) = f(V-S)$ を満たすとき f は対称 (symmetric) であると言う．f を V 上の劣モジュラ集合関数としたとき，(V, f) を劣モジュラシステムといい，

$$cost_f(\pi) = f(V_1) + f(V_2) + \cdots + f(V_k)$$

を最小にする V の k-分割 π を求める問題を劣モジュラシステム上の k-分割問題 (the k-partition

problem in submodular systems) と呼び k-PPSS と略す．特に，f が対称劣モジュラである場合には，対称劣モジュラシステム上の k-分割問題 (the k-partition problem in symmetric submodular systems) と呼び k-PPSSS と略す．明らかに問題のクラスの包含関係として k-PPG $\subset$ k-PPH $\subset$ k-PPSSS $\subset$ k-PPSS が成り立つ．ただし，k-PPSSS, k-PPSS について問題を解く計算の手間には，通常の基本演算以外に，指定された $S \subseteq V$ に対する $f(S)$ の値を評価する手続き（オラクル）の手間が含まれる．以下では，$f(S)$ の値を得るためにかかる手間を θ と書くことにする．f 値を評価するオラクルを呼び出す回数が多項式回であるようなアルゴリズムをオラクル多項式アルゴリズムと呼ぶ．

グラフのカットに関する問題を解く上で重要な道具は最大流アルゴリズムである．有向グラフ上でソース s とシンク t の 2 節点が指定されたとき，s から t への有向パスをなくすために取り除くべき辺集合の最小の重み和は，s から t への流れの最大値に等しいことが最大流最小カットの定理として知られている．この s から t への最大流と s と t を分離するカットは多項式時間で求めることができる．この計算量を $F(n,m)$ で表す．現在，$F(n,m) = O(mn\log(n^2/m))$ が知られている．従って，無向グラフの最小 2-端子カットを $F(n,m)$ 時間で求めることができる．

グラフの最小 2-端子カット問題は最大流アルゴリズムを 1 回使えば解くことができる．グラフの最小カットを計算する問題 2-PPG は，$V = \{v_1, v_2, \ldots, v_n\}$ としたとき，最小 2-端子カット問題を二つの端子 s,t を $s = v_1, t \in \{v_2, v_3, \ldots, v_n\}$ の $n-1$ 通りに対して解き，その中の費用最小のカットを出力することで解くことができる．Hao と Orlin は最大流アルゴリズムを 1 回適用する間に，2-PPG を解くための情報を取り出すことで 2-PPG を解く計算時間を $O(nm\log(n^2/m))$ に減らした．Nagamochi と Ibaraki は最大隣接順序と呼ばれる別の手続きを利用して 2-PPG に対する $O(mn + n^2\log n)$ 時間アルゴリズムを与えた．重みの重い辺ほど「その辺は最小 2-分割カットには使われない」と高い確率で判断し，その辺を縮約してグラフを小さくしていくというアイディアに基づき，Karger や Karger と Stein はそれぞれ，2-PPG に対する $\tilde{O}(n^2)$ 時間，$\tilde{O}(m)$ 時間のモンテカルロ型確率アルゴリズムを与えた（$\tilde{O}$ は対数多項式 $\log^c n$ を省略した表記である）．一般の k に対し，k-PPG は，分割数 k を入力変数とみると NP-困難な問題になることが Goldschmidt と Hochbaum により示された（よって，k,n,m の多項式時間で k-PPG を解くことは望めない）．Karger と Stein は，確率的縮約の考え方を使い，k-PPG に対する $O(n^{2(k-1)}(\log n)^3)$ 時間モンテカルロ型確率アルゴリズムを与えた．

$C_k(n,m)$ を k-PPG を決定性アルゴリズムにより解く計算量の上界とする．Goldschmidt と Hochbaum は k を固定したときには k-PPG が多項式時間で解けることを示した．この計算量は，$C_k(n,m) = O(n^{k^2/2-3k/2+4}F(n,m))$ であり，一般の k に対しては現在最良の結果である．このアルゴリズムのおおまかなアイディアは以下の通りである．与えられたグラフの最小 k-分割カットを $\pi_k^* = \{V_1^*, V_2^*, \ldots, V_k^*\}$ とする．ただし，添え字は $cut_G(V_1^*) \leq cut_G(V_2^*) \leq \cdots \leq cut_G(V_k^*)$ を満たすとする．まず，最小 k-分割カット $\pi_k^* = \{V_1^*, V_2^*, \ldots, V_k^*\}$ の最初のカット V_1^* を見つけ，そこを固定する（すなわちグラフから V_1^* を除く）ことで問題を $G[V-V^*]$ 上の $(k-1)$-PPG に帰着させる．そのような V_1^* を特定することは難しいが，いくつか 2-分割カット $\{X, V-X\}$ を選び出し，その中に $\{V_1^*, V-V_1^*\}$ が含まれるようにするのは可能である．Goldschmidt と Hochbaum は，必ず V_1^* を拾い上げることのできる $O(n^k)$ 個の 2-分割カットの選び方を見つけ，k-PPG を $O(n^k)$ 個の $(k-1)$-PPG に帰着できることを示した．

分割数 k が小さい場合には，問題の構造が詳しく調べられ，帰着に必要な 2-分割カットの数を減らすことで計算時間が改善されている．3-PPG に対する計算量 $C_3(n,m)$ としては，Kapoor, Kamidoi らよる $O(n^3F(n,m)) = \tilde{O}(mn^4)$，Burlet と Goldschmidt による $\tilde{O}(mn^3)$ が知られている．4-PPG に対しては，Kapoor，Kamidoi らによる $O(n^4F(n,m)) = \tilde{O}(mn^5)$ が知られている．最近，$k \in \{3,4,5,6\}$ に対して，Nagamochi らによる $C_k(n,m) = O(mn^k\log(n^2/m))$ が示された．この方法に確率的縮約を組合せることで Levine は $k \in \{3,4,5,6\}$ に対し $O(mn^{k-2}\log^3 n)$ 時間のモンテカルロ型確率アルゴリズムを与えた．

我々は，さらに，一般の $k > 6$ に対しても最小 k-カットを厳密に求めるためのアルゴリズムの計算量の改善について研究を行った．これまで，計算量が $O(n^{O(k)})$ であるアルゴリズムとしては答えに誤りを許すモンテカルロ型の確率アルゴリズムが設計されているが，決定性アルゴリズムの計算量としては $O(n^{O(k^2)})$ が最良であり，両者の大きな隔たりは長い間埋められなかった．本研究では，初めて最小 k-カットを厳密に求める決定性アルゴリズムの計算量を $O(n^{O(k)})$ に軽減することに成功した (Y. Kamidoi, N. Yoshida and H. Nagamochi, A deterministic algorithm for finding all minimum k-way cuts, SIAM J. Computing, vol. 36, no. 5 (2006) 943–955)．我々は，与えられた最小 k-カットの問題例を高々 $O(n^{2k-5})$ 個の最小 $(\lfloor (k+\sqrt{k})/2 \rfloor + 1)$-カットの問題例に帰着できることを証明し，この事実に基づく分割統治法型のアルゴリズムを設計した．提案したアルゴリズムの計算量は，$O(n^{4k/(1-1.71/\sqrt{k})-31})$ であり，すべての最適解を求めることもできるのが特徴である．

最小コスト k-カット問題に対する近似アルゴリズム　以下では分割数 k に関しても多項式時間で作動するような最小 k-分割カット問題に対する近似アルゴリズムについて紹介する．

k-PPG の最適解の $(2-\frac{2}{k})$ 倍以内の近似解を与える簡便な方法が Saran と Vazirani や Kapoor により与えられている．この方法では，1-分割 V (つまり，全体の点集合) から始め，分割数を一つ増やすような最小費用の 2-分割カットを計算し，これを繰り返すことで k-カットを構成する．得られた k-カットは最小とは限らないが，最適解の高々 $(2-\frac{2}{k})$ 倍以内であることが証明されている．また，このアルゴリズムは対称劣モジュラシステムに対しても作動するように拡張でき，k-PPSSS についても同様に $(2-\frac{2}{k})$ 倍近似の性能が得られることが Queyranne により指摘されている．しかし，以上のアルゴリズムの正当性に関する証明は Gomory-Hu 木の構造に頼った複雑なものであり，カット関数の一般化である劣モジュラ集合関数においてはもはや Gomory-Hu 木型の構造が得られないことも知られている．

本研究では最小 2-分割の追加による k-分割の生成アルゴリズムの簡潔な正当性の証明を示し，これに基づき劣モジュラ集合関数への一般化を行った．さらに，このアルゴリズムの近似性能を改善するために，最小 2-分割ではなく，最小 3-分割を計算しながら分割数を二つずつ増やすアルゴリズムについて研究した（$k \geq 4$ が偶数のときは 1 回目のみ最小 2-分割で分割数を一つだけ増やす）．彼らはこのアルゴリズムの近似性能が $(2-\frac{3}{k})$（k が奇数のとき），$(2-\frac{3k-4}{k^2-k})$（k が偶数のとき）であることを証明した．グラフの最小 k-分割カットの多項式近似としてはこれが現在最良である．

さらに，本研究では，与えられた劣モジュラシステム (V, f) に対し，最小 2-分割を計算しながら分割数を k にまで増やすアルゴリズムを貪欲分離アルゴリズム (Greedy Splitting Algorithm，以下 GSA と略す) を提案し，その近似性能について解析を行った．このアルゴリズム GSA は $k-1$ 回反復を行い，第 i 回目の反復では V の $(i+1)$-分割 π_{i+1} を構築する．まず $\pi_1 = \{V\}$ と初期設定し，その後，π_i の一つの部分集合 $W \in \pi_i$ を最小費用で分割することで $(i+1)$-分割 π_{i+1} を得る．正確には，$f(S) + f(W-S) - f(W)$ (π_i から π_{i+1} を得るための費用の増加分) を最小にするような $W \in \pi_i$ とその 2-分割 $\{S, W-S\}$ を計算する．この最小 2-分割を $\{S_i, W_i - S_i\}$ と書くと，$(i+1)$-分割 π_{i+1} は，π_i において W_i を S_i と $W_i - S_i$ に入れ替えることで得られる．従って，各 $\ell = 1, 2, \ldots, k$ に対し $cost_f(\pi_\ell) = f(V) + \sum_{i=1}^{\ell-1} (f(S_i) + f(W_i - S_i) - f(W_i))$ が成り立つ．明らかに π_k は V の k-分割である．各 $W \in \pi_i$ に対し $f(S) + f(W-S) - f(W)$ を最小にする W の空でない真部分集合 S を $O(|W|^3\theta)$ 時間で見つけることができるので GSA の計算量は $\sum_{W \in \pi_i} O(|W|^3\theta) = O(|V|^3\theta)$ となる．

V 上の集合関数 f に対し，α_f を V の任意の k-分割 $\{V_1, \ldots, V_k\}$ に対して $\sum_{i=1}^{k} f(V - V_i) \leq \alpha \sum_{i=1}^{k} f(V_i)$ を満す最小の数 α とする．

このとき，非負劣モジュラシステム (V, f) に対し GSA は最適解の $(1+\alpha_f)(1-\frac{1}{k})$ 倍以内の V の k-分割を出力することを証明することができる．

対称な劣モジュラ集合関数 f に対しては $\alpha_f \leq 1$ であるので，従来から知られていた Saran と Vazirani，Kapoor による k-PPG に対する結果や Queyranne による k-PPSSS に対する結果は，本研究で得られた結果の系として得られる．ま

た，一般の劣モジュラシステム (V, f) の任意の k-分割 $\{V_1, \ldots, V_k\}$ に対し，$\sum_{i=1}^{k} f(V - V_i) \leq (k-1)\sum_{i=1}^{k} f(V_i) - k(k-2)f(\emptyset)$ が成り立つ．さらに，非負劣モジュラシステムでは $f(\emptyset) \geq 0$ より，$\alpha_f \leq k-1$ であるので k-PPSS は $(k-1)$ 倍近似可能である．

重み付きグラフの場合に，最小 k-分割の 2 倍近似解を求める計算時間を extreme set を計算することで $O(mn + n^2 \log n)$ に減らすことを示した (H. Nagamochi and Y. Kamidoi, Minimum cost subpartitions in graphs, Information Processing Letters, vol. 102, 2007, pp.79-84)．グラフ $G = (V, E)$ の extreme set とは節点の部分集合 $X \subset V$ で，そのカットの値 $d(X)$ が X の任意の真部分集合 Y のカット値 $d(Y)$ よりも小さいという性質を持つものである．カット関数 d の持つ正モジュラ性 (posi-modularity) からグラフの extreme sets は laminar 構造を持つことが示される．最近，extreme sets は最小次数順序をという節点の順序づけにより効率よく計算できることが，グラフの場合も含め，一般の対称劣モジュラ関数に対しても示された (H. Nagamochi, Minimum degree orderings, Lecture Notes in Computer Science 4835, pp. 17-28)．この方法ですべての extreme sets を $O(mn+n^2 \log n)$ 時間で求めておくことができ，この extreme sets を組み合わせてできる k-分割のうちコスト最小のものは，laminar 構造の持つ木構造を利用した動的計画法を使って容易に求めることができる．この結果，特定の k に対する近似解だけでなく，すべての $k = 2, 3, \ldots, n$ に対する最小 k-分割の 2 倍近似解を $O(mn+n^2 \log n)$ 時間で求められるようになった．

グラフ上の資源集合分割問題　以下では，グラフ上の資源集合分割問題に対して得られた結果を紹介する．この問題は，連結なグラフ $G = (V, E)$ といくつかの互いに素な節点の部分集合 $T_1, T_2, \ldots, T_k$（資源集合と呼ぶ）を入力とし，出力としては，節点 V を 2 分割した部分集合 V_1，V_2 で次の 2 条件を満たすものを求めることである．

(1) V_1, V_2 はいずれも G から連結な部分グラフを誘導する（すなわち，V_1, V_2 間の枝を削除してもグラフは連結である）．

(2) 各資源集合 T_j, $j = 1, 2, \ldots, k$ は均等分割される．つまり，$|V_1 \cap T_j| = |V_2 \cap T_j| = |T_j|/2$ が成立する（簡単のため各 $|T_j|$ は偶数と仮定する）．

この問題は $k = 1$ であっても NP-困難であることが知られているが，我々の研究では，グラフ G にある程度高い点連結度 $f(k)$ が仮定されていれば常に条件 (1),(2) を同時に満たす均等分割が存在すると予想されている．実際，$k = 2$ の場合には，グラフが 3 点連結であれば必ず条件 (1),(2) を満たす均等分割が存在することを我々の先行研究で証明している (H. Nagamochi, T. Jordan, Y. Nakao and T. Ibaraki, Convex embeddings and bisections of 3-connected graphs, Combinatorica, vol.22, no.4 (2002) 537–554)．この証明では，幾何学的な手法を用いる点が特徴である．与えられたグラフをいったん平面に埋め込み，そこで組み合わせ幾何の手法であるハムサンドイッチカットを用いて，平面に埋め込まれた資源集合を均等分割する．ここでの要点は，平面に埋め込まれたグラフを直線でどう分割しても，分割されたいずれの領域内においてもグラフが連結であるようにうまく埋め込むことである．我々の先行研究では，3 点連結グラフであれば「凸埋め込み」という直線分割に対し連結性を保持できる埋め込み方法の存在を証明し，これに基づく $O(|V|^2 \log |V|)$ 時間，$O(|V| + |E|)$ 領域のアルゴリズムを提案した．しかし，これは計算モデルとして理想的な数値計算ができることを仮定しており，実際に計算機上で実装した場合には丸め誤差により計算が破綻する可能性がある．実際にこのアルゴリズムを素朴な方法で実装した場合に，ある程度の規模の問題例になると計算が正常に進行しなくなることを確認した．本研究では，計算誤差をまったく伴わない新しいアルゴリズムとそのためのデータ構造を開発した (H. Nagamochi, K. Iwata, T. Ishii, A Robust Algorithm for Bisecting a Triconnected Graph with Two Resource Sets, Theoretical Computer Science A, vol. 341, pp. 364–378, 2005)．提案する方法は，座標位置に基づく平面幾何の情報を管理する代わりに，均等分割に必要な 2 点の間の相対位置の情報を順序集合のみで管理することで，座標を維持する必要をなくし，高々$|V|$ 程度までの整数値のみで計算の進行が制御可能になった．提案法の計算時間，計算領域は，ともに $O(|V|^2)$

である．計算時間は改良されているが，計算領域は，先行結果の $O(|V|+|E|)$ よりも一見悪く見える．先行結果では，モデルとして無限精度の数値が維持できることを仮定しており，改良した方法では，高々$|V|$ 程度までの整数値のみで十分であるので，計算機上での計算領域としては，改善されていると考えられる．

資源集合をもつグラフの均等分割問題については $k \geq 3$ の場合には未解決であり，k に対して，入力グラフ G が $(k+1)$-点連結であれば条件 (1),(2) を満たす均等分割が存在することが予想されていた．本研究では，において，$k = 3$ の場合には一般にはこの予想は正しくないことを反例を構成して証明し，一方で，$k = 3$ の場合には，入力グラフ G が 4-点連結であり，かつ 4 点の完全グラフ K_4 を部分グラフとして含む場合には，必ず条件 (1),(2) を満たす均等分割が存在し，そのような分割を求める $O(|V|^3 \log |V|)$ 時間のアルゴリズムを与えた (T. Ishii, K. Iwata, H. Nagamochi, Bisecting a Four-Connected Graph with Three Resource Sets, Discrete Applied Mathematics, 155, pp. 1441-1450, 2007)．さらに，この結果が枝集合版の資源集合の均等分割問題に拡張できることも示した．枝集合の資源集合の均等分割問題は以下のように定義される．入力として，連結なグラフ $G = (V, E)$ といくつかの互いに素な枝の部分集合 $F_1, F_2, \ldots, F_k$ （資源集合と呼ぶ）が与えられ，出力は，次の 2 条件を満たす枝集合 E の 2 分割集合 E_1，E_2 である．

(1) E_1, E_2 はいずれも G から連結な部分グラフを誘導する．

(2) 各資源集合 F_j, $j = 1, 2, \ldots, k$ は均等分割される．つまり，$|E_1 \cap F_j| = |E_2 \cap F_j| = |F_j|/2$ が成立する（簡単のため各 $|F_j|$ は偶数と仮定する）．

枝集合の資源集合の均等分割問題に対しては，$k = 1, 2, 3$ のときは，グラフが $(k+1)$-枝連結であることが十分条件であることを証明した．

2.3 ネットワーク設計

与えられた連結度要求を満たすネットワークを構築する問題は，代表的なネットワーク設計問題の一つであり，これまでも活発に研究されている．本研究では，いくつかのネットワーク設計問題に対して精度保証付き近似アルゴリズムを開発した．

グラフの局所２点連結増大問題　グラフの連結度増大問題 (graph augmentation problem) とは，与えられたグラフにいくつかの辺を新たに加えることでその辺連結度あるいは点連結度を指定された目標の値に増大させる問題であり，このとき加える辺の本数を最小にすることが目的となる．この問題は，信頼性ネットワーク設計問題，フロアプランにおける矩形双対問題，フレームの剛体問題，データセキュリティ問題，グラフ描画問題等に応用を持つ．グラフの連結度増大問題は 1976 年の Eswaran と Tarjan の論文によって最初に論じられ，この論文ですでにグラフの 2-辺連結化あるいは 2-点連結化問題，および有向グラフの強連結化問題が多項式時間で解けることが示されている．任意の正整数 k に対してグラフの k-辺連結化問題が多項式時間で解けることを初めて示したのは atanabe と Nakamura である．現在この問題は，辺連結度を求めるのとほぼ同程度の計算時間で解けることが Nagamochi と Ibaraki により示されている．一方，点連結度を局所的に増大させる問題はＮＰ困難問題であることが示されている．本研究では局所 2 点連結化問題に対して 4/3-近似アルゴリズムが設計できることを示した．与えられた単純連結グラフ $G = (V, E)$ および 2 点対の集合 R に対して，何本かの新しい枝をグラフ G に付与して R の各 2 点対間の局所点連結度を 2 以上にする問題を考える．このとき加える枝の本数を最小にすることが目的である．この問題に対しては 3/2-近似アルゴリズムが知られていたが本研究では問題に対する下界の導き方を精密化することで最適な付加枝集合の大きさの高々4/3 倍の解を求める線形時間アルゴリズムの設計に成功した．

次数制限付きネットワーク設計問題　我々は，2 節点間の枝連結度要求 $r : \binom{V}{2} \to \mathbb{Z}_+$ と節点の次数の上下限 $a, b : V \to \mathbb{Z}_+$ を満たすコスト最小多重グラフを構築するネットワーク設計問題を考え，r, a, b がある条件を満たすいくつかの場合に対して近似アルゴリズムを与えた．ただし，ここでコストは各枝に対して定義されており，三角不

等式を満たすとしている．

具体的には，任意の $u, v \in V$ に対し $r(u,v) \geq 2$ が成立し，さらに，次数上限 a が常に一定値であるか，もしくは次数下限が $b(v) = 0$, $v \in V$ を満たすときに対し，我々は $(2+2/\min_{u,v} r(u,v))$-近似アルゴリズムを与えた．また，任意の $u, v \in V$ に対し $r(u,v) = k$ であり，$a(v) = b(v)$, $v \in V$ の場合に対しては，k が偶数の場合近似度 2.5，k が奇数の場合近似度 $2.5 + 1.5/k$ を達成するアルゴリズムを提案した (T. Fukunaga, H. Nagamochi, Network design with edge-connectivity and degree constraints, Proceedings of Fourth Workshop on Approximation and Online Algorithms, Lecture Notes in Computer Science, vol. 4368, pp. 188-201, 2006)．

これらのアルゴリズムでは，枝遊離操作と呼ばれるグラフ変形法が使用されている．これは，巡回セールスマン問題や枝連結度増大問題などのネットワーク設計問題において従来より広く応用されている操作であり，遊離される枝が接続する節点を除く 2 節点間の枝連結度を保存するための条件が，Lovasz や Mader らによって得られている．我々は，この結果をさらに強め，任意の 2 節点間の局所枝連結度を保存するための条件について考察し，それに基づいて，上記のアルゴリズムを設計している．また，この枝遊離操作に関する結果を元に，ディタッチメントと呼ばれる枝遊離操作を一般化した操作が，局所枝連結度を保存するための新たな条件を求めることにも成功した．

集合連結グラフ　より柔軟なネットワーク設計を行う上で，従来の連結度を拡張することは重要である．我々は，従来は 2 節点間に対して定義されるこのが多い枝連結度を，節点集合族 $\mathcal{V} \subseteq 2^V$ に対して拡張した定義を与えた．その上で，無向グラフ $G = (V, E)$ 上の節点集合族 $\mathcal{V}_1, \ldots, \mathcal{V}_m \subseteq 2^V$ を連結にする G の部分グラフ（集合連結グラフ）のうちコスト最小のものを求める問題を提案した．この問題はシュタイナー森問題，集合シュタイナー木問題，1-NA-連結度増大問題などを含んでいる．我々は，Chekuri, Shepherd によって得られたシュタイナー森の詰め込み定理を集合連結グラフの詰め込みへと一般化することで，上記の問題に対して，2α-近似アルゴリズムを導いた (T. Fukunaga, H. Nagamochi, The set connector problem in graphs, Proceedings of the 12th Conference on Integer Programming and Combinatorial Optimization, Lecture Notes in Computer Science, 4513, 2007, 484-498.)．ここで，$\alpha = \max_{1 \leq i \leq m} (\sum_{X \in \mathcal{V}_i} |X|) - 1$ である．

ミニマックス部分木被覆問題　複数台の配送車両が与えられた搬送経路ネットワーク上の配送業務を分担して処理する際に，車両に与えられる最大の負荷を最小にする問題を考え，グラフ理論的なアプローチを行う．まず，搬送経路ネットワークを各枝と点に非負重みを持つ連結グラフ $G = (V, E)$ によりモデル化する．枝 $e \in E$ および点 $v \in V$ の重みをそれぞれ $w(e)$，$h(v)$ と表す．ここで $w(e)$ は枝 e を通過するときの移動コスト（移動時間）を意味し，$h(v)$ は点において行う作業に対するコスト（作業時間）を表す．デポの役割をする点を r とし，車両台数を表す整数を p とする．このとき，ミニマックス部分木カバー問題 (the minmax subtree cover problem: MSC) とは，点集合 V の p 分割 $\mathcal{X} = \{X_1, X_2, \ldots, X_p\}$ と p 個の部分木 $T_1, T_2, \ldots, T_p$ （ただし，各 T_i は $X_i \subseteq V(T_i)$ を満たすもの）を実行可能解とし，部分木の最大コストを最小にすることを目的関数とする．ここで，部分木 T_i のコストは T_i の枝の重み和と X_i の点の重み和の合計として定義される．この問題にデポを考慮することで定義されるミニマックス根付き部分木カバー問題 (the minmax rooted-subtree cover problem: MRSC) とは，点集合 V の p 分割 $\mathcal{X} = \{X_1, X_2, \ldots, X_p\}$ と p 個の部分木 $T_1, T_2, \ldots, T_p$（ただし，各 T_i は $X_i \cup \{r\} \subseteq V(T_i)$ を満たすもの）を実行可能解とし，部分木の最大コストを最小にすることを目的関数とする．さらに，ミニマックス根付き閉路カバー問題 (the minmax rooted-cycle cover problem: MRCC) とは，点集合 V の p 分割 $\mathcal{X} = \{X_1, X_2, \ldots, X_p\}$ と p 個のサイクル $C_1, C_2, \ldots, C_p$ （ただし，各 C_i は $X_i \cup \{r\} \subseteq V(C_i)$ を満たすもの）を実行可能解とし，サイクルの最大コストを最小にすることを目的関数とする．以上の問題は枝重みに三角不等式が成立している場合や G が木に限定されている場合でもＮＰ困難であることが示されている．以下，n，m をそれぞれ与えられたグラフ G の点の

数，枝の数とする．

本研究ではまず与えられたグラフ G が木である場合に対して近似アルゴリズムを設計した．MSC に対しては従来，$O(p^{p-1}n^{p-1})$ 時間の $(2-\frac{2}{p+1})$ 近似アルゴリズムが知られていたが，分割すべき点の集合を木 G の節点部分集合に変更できるよう拡張した上で，問題の $(2-\frac{2}{p+1})$ 近似解を求めるアルゴリズムの計算量を $O((p-1)!\cdot n)$ に軽減した．この計算量は p に関しては指数的であるが固定された p に対しては線形時間である．木 G に対する MSC に対しては，さらに木に対する点分割のアルゴリズムを利用することで $(2-\frac{2}{p+1})$ 近似解を求める $O(p^2n)$ 時間のアルゴリズムを設計した．ここでは枝集合分割問題を点集合分割問題へ変換する方法を新たに開発した点が特徴である．

次に木 G に対する MRSC に対しては，木 G に対する MSC に対する上記の結果を用いた 3 倍近似の線形時間アルゴリズムをまず設計し，これに基づきさらに近似精度の高い $(2+\varepsilon)$ 近似解を構築する $O(n\log\frac{1}{\varepsilon})$ 時間アルゴリズムを設計した（ε はパラメータとして入力される整数である）．

本研究では G が一般の連結グラフである場合の MRSC に対して $O(m+n\log n)$ 時間の $(3-2/(p+1))$ 近似アルゴリズムが構築できることを示した．この結果に基づきグラフ G の枝重みが三角不等式を満たす場合には MRCC に対する $(6-4/(p+1))$ 近似アルゴリズムが設計できることを証明した．以上の結果は後述する配送スケジューリングにおける近似アルゴリズムの設計において重要な役割を果たしている．

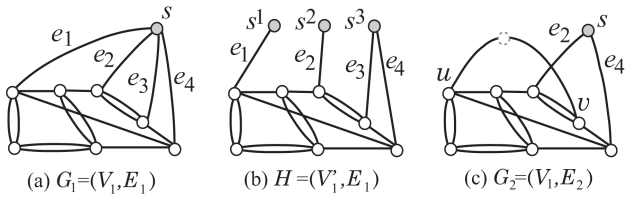
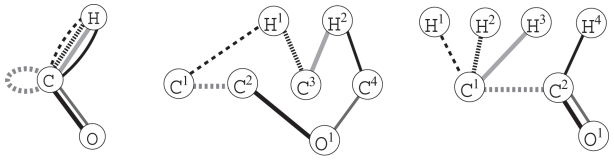


図 1: (a) 多重グラフ $G=(V,E)$; (b) s における デタッチメント H; (c) s における枝遊離操作.

2.4 デタッチメントを利用した化学グラフの推定アルゴリズム

多重グラフ G のある節点 s におけるデタッチメント (detachment) とは，節点 s をいくつかの複製に分離し，s の接続枝は複製のどれかに付け直す操作，あるいはそうして得られたグラフを指す．複製節点をすべて 1 点に縮約すれば元のグラフ G に戻る．例えば，図 1(a) のグラフ G の節点 s を 3 個の節点 s^1, s^2, s^3 に分離して得られたデタッチメント H を図 1(b) に示す．デタッチメントは通常，節点数を増やしてしまう．連結度に関する定理を帰納法で証明する場合に，連結度を保存したままグラフを小さくする変形操作が望まれる．図 1(c) のように，s を次数 2 の節点と次数 $d_G(s)-2$ の節点の二つに分離するデタッチメントにおいて，この次数 2 の節点を無視して接続する 2 本の枝を 1 本の枝に置き換える (図 1(c) では e_1, e_3 を uv を直結する 1 本の枝と見る)．枝遊離 (edge-splitting) と呼ばれるこの変形操作では，節点数は変わらず枝のみが 1 本減る．s の接続枝の対をうまく選ぶと枝対の枝遊離後も $V-\{s\}$ 上の枝連結度が保持されることが知られており，s の次数が偶数ならそのような枝遊離を $d_G(s)/2$ 回行い，次数 0 となった s を削除することで，枝連結度を保持したまま 1 節点減らす帰着が得られる．s の接続枝を完全に枝遊離する問題も MAO のみを使い $O(mn+n^2\log n)$ 時間で解くことを示した (Hiroshi Nagamochi, A fast edge-splitting algorithm in edge-weighted graphs, Inst. Electron. Inform. Comm. Eng. Trans. Fundamentals, E89-A, pp. 1263-1268, 2006)．枝遊離問題が解けると $2k$ 枝連結グラフの k 弧連結有向グラフへの向き付け問題も効率よく解くことができる．

以下では，連結性を保存するデタッチメントを考える．よく知られているように多重グラフ G が一筆書きを持つ必要十分条件は「各節点の次数が偶数であり，かつ連結であること」である (起点に戻る一筆書きとする)．一筆書きは枝を 1 度のみ通過するが各節点 v は $d_G(v)/2$ 回通過する．よって一筆書きの定理は次のようにも述べることができる．「各次数が偶数である連結グラフ G には，各節点 v を $d_G(v)/2$ 個の次数 2 の複製に分離するデタッチメント H の中で，連結性を保存するものが存在する (故に単純閉路になるものが存



(a) G=(V,E) (b) H'=(W',E) (c) H=(W,E)

図 2: (a) 多重グラフ $G = (V, E)$; (b) 単純閉路のデタッチメント $H' = (W', E)$; (c) 次数制約を満たし自己ループを持たない連結なデタッチメント $H = (W, E)$.

在する).」例えば，図 2(a) のグラフ G の一筆書きに対応する単純閉路のデタッチメントが図 2(b) の H' ように得られる．一般に，k 枝連結性を保存するデタッチメントが存在する必要十分条件は Nash-Williams (1985) により与えられている (ただし，次数の指定も可能であるが自己ループを含み得る).

本研究では，連結性を保存するデタッチメントが化合物の構造推定へ応用できることを示した (Hiroshi Nagamochi, A detachment algorithm for inferring a graph from path frequency, The Twelfth Annual International Computing and Combinatorics Conference (COCOON'06) Taipei, Taiwan, August 15-18, 2006, Lecture Notes in Computer Science, Editors: Danny Z. Chen, D. T. Lee, vol. 4112, pp. 274–283, 2006). 元素の組成のみを表す化学式から異性体を列挙する問題は Pólya らにより既に研究されているが，ここでは，結合の組合せまで指定された次のような問いを考える.「C2 個，O1 個，H4 個の 7 個の原子からなり，原子間の結合が CH 結合 4 通り，CO 結合 2 通り，CC 結合 1 通りと指定された化合物が (組合せの意味で) 存在するか？」

この種のグラフ推定問題は最近，創薬への応用等から研究が盛んとなっている．一般的に 3 原子以上の結合列の指定も扱うと問題は NP 困難になるが，幸いにも 2 原子の結合列の問題はデタッチメントの概念を使って解けることを示した．上の例を解く場合には，元素の種類 C,O,H ごとにひとつの節点を用意し，結合を指定する 7 本の枝でこれらを結んだ「種グラフ」を図 2(a) の G のように構成する．すると，問題は，C を 2 個に，H を 4 個に分離する G のデタッチメント H の中で，連結で自己ループがなく，かつ，節点の次数が対応する元素の原子価となっているものを求めることと等価になる．図 2(c) に条件を満たすデタッチメント H の例を示す．Nash-Williams の結果は自己ループを許すものなので直接は利用できないため，自己ループを禁止する設定で連結なデタッチメントが存在するための必要十分条件を導いた．これに基づきグラフ推定問題を解く $O(n^{3.5} + m)$ 時間アルゴリズムを得ることができる．

3 図形処理に関する問題

3.1 グラフ描画問題

2 項関係の数学的な表現であるグラフを平面に埋め込む研究は，古くは Fáry (1948) の直線描画や Tutte (1960) の凸描画に起源を持ち，1970 年代には VLSI の設計への応用に関して，グラフの矩形描画に関する研究が盛んに進められてきた．その後，計算機の普及に伴い，有限要素法における曲面の三角形分割，建築物における部屋の間取設計，フローチャートの図示，地理情報の表現などあらゆる分野において情報を効率よく分かりやすく可視化することが要求されてきており，その中でグラフの自動描画はコア技術として大変重要な役割を果たしている．可視化の目的も含めたグラフの自動描画に関する研究は 1980 年頃から始まり，様々描画表現法とその数学的構造，計算の複雑さの研究が押し進められている．特に，平面上に枝を交差なく埋め込めることのできるグラフは平面グラフと呼ばれ，その描画問題は最も基本的な研究課題であり，本研究でもこの問題を取り扱う．平面グラフ $G = (V, E, F, c_0)$ は，節点集合 V，枝集合 E，内面集合 F および外面 c_0 により定められる．

2 階層描画問題 非閉路的有向グラフを平面内に描画する方法として Sugiyama 法がよく知られている．この方法では，平行な直線をいくつか用意し，グラフの節点集合を直線の数の部分集合に分離して，各部分集合の節点を対応させる直線上に配置し，枝をその両端点をつなぐ直線分で描くことで階層状のグラフ描画を得ることができる．このとき，線分同士が交差する点の個数が得られた

描画の質を決める尺度として用いられる．通常，各階層内での節点の配列順は自由に変えることができるので，描画全体での交差点数を最小にするように各階層において最適となる節点の配列を求めることが望まれる．しかし，一般に，多層の問題を一度に取り扱うことは計算量的に困難な問題であり，２階層問題における数学的な構造が現在研究されている．２階層の描画であっても，２層内の節点の配列をどちらも自由に変更することが許されている問題設定の場合には最適解の $O(\log n)$ 程度の近似精度しか得られていない．これに対し，２層のうち１層内の節点の配置順を固定した場合には，３倍近似アルゴリズムが [P. Eades and N. C. Wormald, Edge Crossing in Drawing Bipartite Graphs, Algorithmica, vol. 11, pp. 379-403, 1994] により 10 年前に提案されていた．本研究では，１層固定の２階層描画に対して近似精度を 1.4664 に大きく改善することに成功した (H. Nagamochi, An Improved Bound on the One-Sided Minimum Crossing Number in Two-Layered Drawings, Discrete and Computational Geometry, vol. 33, pp. 569–591, 2005)．提案法は，交差点数最小化問題に対する確率的なアルゴリズムの設計を平面上のある種の図形の最適設計問題に変換するという独特な議論に基づいている．提案法は $O(n \log n)$ 時間で実行できるラスベガス型確率アルゴリズムであるが，これを脱ランダム化し決定性の 1.4664 近似アルゴリズムが得られることも示している．

描画に使われる階層の基盤として平行な直線群の代わりにいくつかの同心円の円周群を用いる方法もよく用いられる．特に，外側の円に向かって密度が高くなるようなグラフを配する場合に描画の混雑度を低く保てる利点がある．しかし，２階層（２同心円）の場合に，すべての節点の位置が固定されているとき，交差点数を最小化する枝の描画を求める問題は，２円で囲まれたドーナツ状の内部で各枝に対しその両端点を結ぶ曲線をどのように描くかを問うだけになるが，現時点でこの問題が NP －困難かどうか知られていない．我々，この問題に対しては３倍近似アルゴリズムが存在することを示し，さらにひとつの円の周上の節点の位置のみ変更を許す問題の場合には 15 倍近似アルゴリズムを設計することに成功している (S.-H. Hong and H. Nagamochi, Approximating crossing minimization in radial layouts, The 8th Latin American Theoretical Informatics Symposium (LATIN08) April 7-11, 2008, Rio de Janeiro, Brazil (発表決定))．

非凸直線描画　任意の平面グラフが直線描画を持つことは 1940 年代には知られており，その後，1980 年代にすべての面が凸多角形で描かれた直線描画（凸描画）が存在する必要十分条件が見つけられた．これによれば，平面グラフが３点連結であれば，外周面を任意の凸多角形 P に固定してもこのグラフの凸描画が存在することがわかる．しかし，外周を非凸多角形に固定した場合に，内面を多角形とする直線描画（内部凸描画）を持つグラフの特徴付けに関してはこれまで何も知見がなかった．我々は，平面グラフが３点連結であれば外周面を星型多角形に固定しても内部凸描画が存在することを示し，そのような描画を線形時間で構築するアルゴリズムを設計した．星型多角形とは内部のある１点から他のすべての内部の点へ多角形に交わらずに線分が引ける図形のことである．よって，これは凸多角形の外周を持つ３点連結の結果の拡張である．さらに，平面グラフが４点連結であれば外周面を王冠型多角形に固定しても内部凸描画が存在することを示し，その線形時間描画アルゴリズムを設計した．王冠型多角形とは，星型多角形を１度だけ直線で２分割して得られる図形である（少なくとも一方は星型図形になる）．星型多角形，王冠型多角形のいずれのばあいにも連結度の設定は下げることができないことを示す例が存在する (S.-H. Hong and H. Nagamochi, Convex drawings with non-convex boundary, Lecture Notes in Computer Science, vol. 4271, pp. 113–124 (2006))．

平面グラフ，あるいは平面的グラフが３点連結でない場合には，凸描画を持ちえないことがあるが，その場合に，凸描画に準じる直線描画の研究はこれまで行われていなかった．我々は，凹コーナーを持つ多角形を使うことを許す直線描画について研究を行った．非凸多角形となる面の数を最小にする直線描画を求める問題は Kant により NP －困難であることが既に知られている．そこで，我々は，外周は凸多角形，内面は星型多角形であるよ

うな直線描画（星型描画）を定義し，星型描画の中で凹コーナーの数を最小にするものを見つける問題が線形時間で求められることを示した．ここで，問題の入力は平面的グラフであり，このグラフをどのように平面的に埋め込むかも凹コーナー数の最小化において考慮されている (S.-H. Hong and H. Nagamochi, Star-shaped drawings of planar graphs, 18th International Workshop on Combinatorial Algorithms, Lake Macquarie, Newcastle, NSW, Australia, 5-9 November 2007).

クラスタ付き平面グラフ描画問題　入力として，平面グラフと節点の部分集合の作るクラスタを考え，グラフの描画の中に，クラスタを不必要な枝交差なしに描く問題はさらに広い用途を持つ．与えられるクラスタの集合は，どの二つのクラスタも交差しないと仮定する（すなわちクラスタ集合はラミナ族）．クラスタ集合を持つ平面グラフをクラスタ付きグラフを呼ぶ．このとき，次の条件を満足する直線描画の存在を議論するのが基本的な問題設定である．

(i) グラフの各枝を直線分で，各クラスタを多角形で描く．

(ii) 枝同士の交差はない．

(iii) クラスタを表現する多角形同士は交差しない．

(iv) 多角形と枝は必要なら１度だけ交差を許す．

さらに，グラフの内面やクラスタを表す多角形を凸にできればさらに望ましい．クラスタ付きグラフに対する直線描画で各クラスタを凸多角形で表現できるかという問題に対して，本研究では各クラスタが連結部分グラフを誘導する場合，これを肯定的に解決した (P. Eades, Q. Feng, X. Lin, H. Nagamochi, Straight-Line Drawing Algorithms for Hierarchical Graphs and Clustered Graphs, Algorithmica, vol. 44, pp. 1-32, 2006)．この研究では，クラスタ付きグラフの研究に先立って，階層型平面グラフに対する直線描画の存在について議論を行っている．それは，クラスタ付きグラフの凸描画問題は，階層型平面グラフの非交差直線描画問題に帰着すれば解けることを示したからである．階層型平面グラフとは，グラフの節点集合の分割を持ち，それぞれの節点集合は x, y-平面において同じ y 座標を持つことが指定され，同じ部分集合内での節点の持つ x-座標は未決定であるがそれらの大小関係は（グラフ全体が枝交差を生じないように）定められている．ここでの研究課題は，各部分集合内の節点の x-座標をうまく固定し，グラフの枝をその両端点をつなぐ直線分で描いたときに，枝同士の交差を発生させないことである．この問題に対して $c-st-$ 番号付けという節点のラベル付けを考案し，階層型平面グラフは必ず非交差直線描画を持つことを証明し，線形時間のアルゴリズムを与えた．この結果に基づき，クラスタ付きグラフの凸描画問題もまた線形時間で解くことができることを示した．

我々は，さらにクラスタ付きグラフの凸描画についても研究を行った．クラスタだけでなく台グラフ自体も古典的な意味での凸描画で描くことができるための特徴付けを明らかにした．クラスタ付きグラフは，各クラスタに対し，その補集合が連結な部分グラフを誘導するとき，完全連結と呼ばれる．完全連結なクラスタ付きグラフに対しては，台グラフ自体も凸描画となるようなクラスタ付きグラフの凸描画が存在することを証明した (S.-H. Hong and H. Nagamochi, Fully convex drawings of clustered planar graphs, 2007 Korea-Japan Joint Workshop on Algorithms and Computation, August 9-10, 2007, Chonnam National University, Gwangju, Korea, pp. 32–39)．完全連結性は特別な場合を除き，台グラフも凸描画となるクラスタ付きグラフの凸描画が存在するための必要条件でもある．この結果を導くために，階層型平面グラフが凸描画を持つための必要十分条件は，階層に基づく拘束条件を持たない通常の平面グラフが凸描画を持つための必要十分条件と等価であることを示した (S.-H. Hong and H. Nagamochi, Convex drawings of hierarchical plane graphs, 17th Australasian Workshop on Combinatorial Algorithms (AWOCA 2006) Uluru, NT, Australia, July 13-16, 2006).

我々は，クラスタ付きグラフに対して，各クラスタが連結部分グラフを誘導する場合，クラスタの多角形を凸する直線描画が存在することを示したが，クラスタが誘導する部分グラフの境界自体は凸多角形になるとは限らない．もし，クラスタが誘導する部分グラフの境界自体を常に凸にすること

ができれば，クラスタ自体の多角形を特別に計算する必要がなくなる．そこで，そのような描画の存在について研究を行った．明らかな必要条件としては，各クラスタが誘導する部分グラフは，単に連結であるだけでなく，２点連結であることが必要である．この必要な仮定の下で，クラスタ付きグラフに対する直線描画でクラスタが誘導する部分グラフの境界に凸にするものが存在することを示した (H. Nagamochi, K. Kuroya, Drawing c-Planar Biconnected Clustered Graphs, Discrete Applied Mathematics, vol.155, 2007, pp.1155-1174).

面積付き平面グラフの直交描画問題　ここで，本研究で扱う平面グラフのクラスを３通り与えておく．分割グラフとは，長方形を垂直または水平な直線で再帰的に分割することで得られる分割図において，各交点と四隅に節点を置いて作られる平面グラフ（この再帰的な分割過程を表す2分木Tを分割木という）．長方形グラフとは，外周と内面をすべて長方形で描くことのできる平面グラフ，平面3連結グラフとは，任意の２節点とそれらに接続する枝を取り除いても連結である平面グラフと定義される．

平面グラフ $G = (V, E, F, c_0)$ の直交描画 (orthogonal drawing) とは，外面 c_0 は長方形で，各枝が垂直直線分，水平直線分の系列で描かれたものである．特に，自然数 k に対し，各内面 $c \in F$ の持つ多角形の角の個数が高々k 個であるとき k 角形直交描画という．例えば，長方形描画（各内面が長方形であるもの）は，どの面の角数も４個以下であるので, 4 角形直交描画とみなせる．さらに，G の各内面 $c_i \in F$ に面積 $a_i > 0$ が与えられた平面グラフを面積付き平面グラフと呼ぶ．面積付き平面グラフ G に対する直交描画とは，さらに，各内面 c_i の面積を a_i と等しくさせるものである．

本研究では，各内面に描画において実現すべき面積が指定されている平面グラフに対する直交描画法を取り扱う．これまで面積付き平面グラフの描画法については，Rahman らが分割グラフのある特別な場合に対して示した 8 角形直交描画の結果しか知られていなかったが，本研究では上記で示した三つのクラスすべてに対して面積付きの描画に関する以下の結果を導いた (Akifumi Kawaguchi, Hiroshi Nagamochi, Orthogonal drawings for plane graphs with specified face areas, Lecture Notes in Computer Science, vol. 4484, 2007, 584-594.).

1. 面積付き分割グラフは必ず 10 角形直交描画を持つ．分割木と外周の長方形およびその 4 頂点に対応する節点が与えられたとき，描画を線形時間で求めることができる．
2. 面積付き長方形グラフは必ず 18 角形直交描画を持つ．外周の長方形およびその 4 頂点に対応する節点が与えられたとき，描画を $O(|V| \log |V|)$ 時間で求めることができる．
3. 最大次数が 3 である面積付き 3 連結グラフは必ず 46 角形直交描画を持つ．描画を $O(|V| \log |V|)$ 時間で求めることができる．

結果１の証明の概略を示す．入力として面積付き分割グラフ G，四隅の節点が定められた G の外周となる長方形 P_r，および G を与える再帰的分割を記述する分割木 T が与えられている．分割木 T に対する深さ優先探索順に，P_r を再帰的に分割して分割線上の節点を適切な位置に固定していくことで G 全体の描画を構築する．ここで，指定された面積を実現するためには，分割部分で直線分かあるいは縦・横・縦または横・縦・横の直交線分列を用いる必要が生じる．しかし，適当に分割部分を固定したのでは後で処理する内面の角数が定数個に収まらなくなる．これを回避するために，用いる線分の長さを適切な範囲に制御することが必要になるが，これを再帰的に正しく実行させるために２０種類に上る動作ルールを抽出することで解決した．その結果，計算の進行中に決して 10 角形を超える内面が形成されないことを示すことができた．

結果 2,3 については，適当なグラフの変形を導入することで分割グラフに変換して，結果１を利用することで導かれる．

3.2　図形パッキング問題

本研究では，平面図形を矩形の容器内にパッキングする問題に対して，厳密解法とヒューリスティックの両方のアプローチからアルゴリズムの設計を進めている．

矩形パッキング問題　以下では，本研究で得られた矩形を容器内に最適に配置する厳密解法の結果について報告する (T. Imamichi, M. Kenmochi, K. Nonobe, M. Yagiura, H. Nagamochi, Branch-and-bound Algorithms for Rectangular Strip Packing and Perfect Packing Problems, ESICUP (EURO Special Interest Group on Cutting and Packing) 2nd Meeting, 2005)．矩形パッキング問題 (two dimensional rectangle packing problem) は, 与えられた複数の矩形を, 互いに重なり合うことなく目的関数値が最小となるように平面上に配置する問題である．この種の問題に対する解法は鉄鋼業や繊維産業で素材の切断を効率よく行うために応用されているだけでなく, スケジューリング問題など, 現実の世界において広く応用されている．通常, 矩形の辺が垂直か水平となるような配置のみを考え, 矩形の 90 度回転を許可するか否か, 詰め込む容器の幅が予め決められているか否かなど, パッキングの規則についていくつか選択肢がある．目的関数としても様々な種類が考えられ, 与えられたすべての矩形を, 幅の固定された容器に高さが最小となるように詰め込む問題を特にストリップパッキング問題 (two dimensional strip packing problem) と呼ぶ．ストリップパッキング問題は NP 困難であることが知られており, 今日までに多くの研究がなされている．

ストリップパッキング問題に対する発見的アルゴリズムとして有名なものの一つとして, 1980 年に Baker らが提案した bottom-left (BL) 法が挙げられる．1983 年には Chazelle が bottom-left-fill (BLF) 法について研究をしている．また, 近年では 1996 年に Jakobs が, 1999 年に Liu と Teng がそれぞれ BL 法と遺伝アルゴリズムを用いたメタ解法の研究を行っており, BL 法はこれまで多くの研究の基となっている．また, 2004 年に Burke らによって, best-fit と呼ばれる新たな発見的アルゴリズムも開発された．メタ解法の研究も盛んであり, 先に挙げたに加え, Hopper と Turton による研究, 今堀らによる研究などが挙げられる．厳密解法に対しては, 2003 年の Martello らによる, 矩形の回転を許可しない場合に対する分枝限定法の研究がある．現実の応用においては, 矩形数が数十程度までの中小規模の問題例が対象となる事例が多数存在し, 問題規模が小さいときには近似解法よりも厳密解法の方が優れた性能を示す傾向が強いことが多くの問題に対して確認されている．厳密解法に対しては, 2003 年の Martello らによる, 矩形の回転を許可しない場合に対する分枝限定法の研究がある．本研究では, 矩形数が中規模までのストリップパッキング問題に焦点を置き, 厳密解を求めることを目的とした．矩形の向きに関しては, 90 度回転を許可する場合と許可しない場合の両方を考える．

まず, より制限のある問題として完全パッキング (perfect packing) と呼ばれる問題を扱う．完全パッキング問題とは, 与えられたすべての矩形を幅と高さの決まった容器に隙間なく敷き詰めることができるか否かを判定する問題である．完全パッキング問題に対しては, 2004 年に Lesh らが回転を許可しない場合に対して矩形数 29 までの問題例を解いている．本研究では, 完全パッキング問題に分枝限定法を適用することを考え, BL 法の考え方を用いた分枝規則と, 矩形の配置が常に階段状となるように配置していく分枝規則の 2 種類を試みた．さらに, 限定操作として, 動的計画法 (dynamic programming, DP) を用いる方法を提案した．次に, 一般のストリップパッキング問題に対して, そのアルゴリズムを適用する方法として, 完全パッキング問題への変換と階段状を維持する分枝の拡張を与えた．

計算実験を行い, 完全パッキング問題に対しては, 階段上を維持する分枝と動的計画法による限定操作を用いて従来の研究を改善する矩形数 49 までの問題例が解けることを確認した．また, 一般のストリップパッキング問題に対して, 無駄なスペースを小さくできる (すなわち完全パッキングに近い) 問題例が効果的に解けることを示すことができた．

多角形パッキング問題　以下では，本研究で得られた非凸多角形を容器内に最適に配置する解法について報告する (Takashi Imamichi, Hiroshi Nagamochi, Mutsunori Yagiura, An iterated local search algorithm based on nonlinear programming for the irregular strip packing problem, Proc. of International Symposium on Scheduling 2006 (ISS2006) July 18-20, 2006 in Arcadia

Ichigaya, Tokyo, Japan, pp. 132–137, 2006).

多角形の詰め込み問題とは, 平面図形の配置問題の一つであり，与えられた複数の多角形を長方形の形状をした容器の内部に互いに重複しないように配置する問題である．ここで，容器の幅は固定で長さだけが可変であり，問題の目的は多角形を重複なく配置するために必要な容器の長さを最小にすることである．本研究では, 多角形としては非凸であるものを許し，各多角形の配置の仕方においてはいくつかの決められた方向への回転も取り扱う．この非凸多角形の詰め込み問題は, 紙や布などのロール状の材料を用いる産業などにおいて広い応用をもつ問題であるが, 凸形状のみの多角形で回転がない場合でも NP 困難であることが知られている.

非凸多角形を取り扱う問題に対しては比較的最近になり研究成果が報告されている．Gomes と Oliveira は, 線形計画法に基づく多角形の圧縮操作と分離操作を焼き鈍し法と組合せた手法を提案している．Burke 他は, bottom-left-fill というヒューリスティクスとタブー探索法を組合せた手法を提案した. Egeblad 他は, 1 枚の多角形を他の多角形との重複面積が最小となる場所を効率的に見つけるアルゴリズムを考案し, それと誘導反復局所探索法を組合せた手法を提案した. 非凸多角形の詰め込み問題に対する代表的なベンチマークの問題例に対しては, 現在 Gomes と Oliveira や Egeblad 他が最良の解を与えている.

本研究では, 従来手法よりも高性能なアルゴリズムの開発を目指し，容器の長さを変化させる部分と, 固定された容器の中で多角形を再配置する部分に分け，再配置の問題の解決に非線形計画法の最適化手法を取り入れることを考えた．再配置に対しては，重複多角形の分離操作と多角形の配置交換操作を用意し，ここで，重複多角形の分離問題を制約なし非線形計画問題として解く点が特徴である．再配置に対する 2 種類の操作に基づく反復局所探索法を提案し，最終的には, その反復局所探索法のアルゴリズムと容器の長さを変化させるアルゴリズムを組み合せることで, 詰め込み問題に対するアルゴリズムを構築した. 代表的なベンチマーク問題例に対して計算実験を行い，いくつかの問題例に対して最良解を更新するなど提案法の高い性能を確認することができた.

多角形の再配置では, 容器の幅と長さをともに固定した容器の中で, 多角形同士の重複と容器からの突出の度合を最小化することを考える. 本研究では, 与えられた多角形の配置に対して, 各多角形を同時に微小に動かすことで重複を減らす分離操作を提案している．この分離操作は, 与えられた配置を初期解として, 重複度最小化問題を準ニュートン法で解き, 局所解を得ることで実現している．重複度最小化問題は, 各多角形の容器からの突出度と多角形同士の重複度の総和を目的関数して, この目的関数を最小化する制約なし非線形計画問題として定式化した．さらに, 突出度を表す関数を多角形と容器の外部領域の最小分離距離の 2 乗, 重複度を表す関数を 2 枚の多角形の最小分離距離の 2 乗としてやることで, 効率的に目的関数とその勾配を計算できることを示した. 最小分離距離とは, 2 枚の重複する多角形を平行移動させて分離する際に必要となる最小の距離である.

目的関数と勾配の計算には No-fit polygon という多角形の詰め込み問題でしばしば用いられるデータ構造を利用している. 多角形 A に対する多角形 B の No-fit polygon は, 多角形 A の参照点を原点に固定した時に, 多角形 B が A と重なるか接するような多角形 B の参照点の位置の集合で定義される．No-fit polygon を用いることで, 面と面が重複するかどうかの判定を, 点が面の中に入っているかを判定することで行うことができ効率的である．また, 最小分離距離が, 多角形の参照点から No-fit polygon の境界までの最小の距離に等しく, その性質を利用して目的関数とその勾配の計算を行う.

多角形の交換操作は, 他の多角形が固定されているとする条件の下で, 1 枚の多角形を他の多角形との重複度および容器からの突出度が最小となる点を探すヒューリスティクスを用いて実現した. このヒューリスティクスは No-fit polygon を用いて実現していて, 一般には重複度最小の点は見つけられないが, 重複度と突出度の総和が 0 になる点がある場合には, 必ずその点を見つけることができることを示した.

準ニュートン法に基づく分離操作と, 多角形の交換操作を組合せて, 重複度最小化問題に対する反復局所探索法のアルゴリズムを構築した. 反復局所探索法とは, 過去の探索で得られた最も良い

解を暫定解として持ち, この暫定解にランダムな摂動を加えたものを初期解として局所探索を行い, 得られた局所解が暫定解よりも良ければ暫定解の更新を行うという一連の操作を繰り返すメタ戦略である. 提案手法の重複度最小化問題に対する反復局所探索法のアルゴリズムは, 多角形の交換操作を暫定解に対する摂動として, 多角形の分離操作を局所探索として用いた.

そして, 重複度最小化問題に対する反復局所探索法のアルゴリズムを用いて, 詰め込み問題に対するアルゴリズムを構築した. 実行可能な配置に対して, まず容器の長さを短縮する. そうすると, いくつかの多角形が容器から突出するので, 重複度最小化問題に対する反復局所探索法のアルゴリズムを呼んで重複を減少させる. もしも, 多角形の重複や突出が全くない配置が得られた場合は, さらに容器の長さを短かくし, さもなければ, 容器の長さを伸ばして実行可能解を探索する. 以上を繰り返すというのが, 提案手法の概要である.

計算実験では, まず, パラメータがアルゴリズムに与えている影響を調べている. 容器の長さを変化させる割合や方向, 初期解の生成法, 反復局所探索法の終了条件などについて計算実験を行い, これらのパラメータがアルゴリズムに与える影響はあまり大きくなく, 提案手法が比較的ロバストであることを確認した. そして, この実験からアルゴリズムのパラメータを決めてやり, 代表的なベンチマークの問題例に対して実験を行った. 現在最良の解を与えている Gomes と Oliveira や Egeblad 他と比べて, 全体の計算時間は同等もしくは短くなるようにして実験を行い, 提案手法がいくつかの問題例で新しい最良解を与え, また残りの問題例に対しても同等の結果を得ていることを観察した.

提案手法は 15 題の問題例の中の 5 題のベンチマーク問題例に対して最良解を与えている.

本研究では, 重複度最小化問題に対して, 非線形計画法に基づく多角形の分離操作を構成し, さらに分離操作を多角形の交換操作と組合せることで反復局所探索法のアルゴリズムを構築した. このアルゴリズムを基に, 容器の長さを最小化する詰め込み問題のアルゴリズムを作り, 体表的なベンチマーク問題例に対する計算実験を通して有効性を示した.

Multi-sphere Scheme 我々は，さらに自由回転を許した 2 次元または 3 次元の物体同士のパッキング問題を解く汎用的なアルゴリズムの開発に取り組み，Multi-sphere Scheme と呼ぶパッキングアルゴリズム設計スキームを提案した (T. Imamichi, H. Nagamochi, A multi-sphere scheme for 2D and 3D packing problems, Lecture Notes in Computer Science, 4638, pp. 207–211, 2007)．2 次元図形を平行移動するだけであれば，No-fit polygon を用いて事前に二つの物体の重なりを高速に判定するデータ構造を準備しておくことが可能であるが，これは 3 次元物体になるとデータ構造のサイズが非常に大きくなり，自由回転を許す場合には 2 次元であっても No-fit polygon を効果的に利用することが困難になる．そこで，我々は，2 次元物体が円，3 次元物体が球の場合には，物体同士の重なりは相対距離のみにより決まることに着目し，与えられた物体を円 (または球) の集合で近似し，得られた円集合をパッキングする問題に変換するアプローチを見出した．この考えに基づき，種々のパッキング問題に対応してパッキングアルゴリズムが設計できるスキームとして Multi-sphere Scheme を提案した．このスキームでは，適当な方法を用いて，与えられた物体を円 (または球) の集合で近似し，異なる集合に属している円同士の間に重なりがあるときにペナルティを加えるようなコスト関数を導入する．円集合の間に重なりがないときに，この関数は 0 の値をとる．これで，問題を制約無し最適化問題として扱うことができ，このコスト関数を準ニュートン法で最小化することにより，円集合の局所的に最適な配置解を得ることができる．

提案する Multi-sphere Scheme は非常に汎用的であり，剛体でない物体にも対応できる．以下では剛体の場合の定式化について説明する．

まず，d 次元空間で，m 個の物体からなる集合 $\mathcal{O} = \{O_1, \ldots, O_m\}$ のパッキング問題ペナルティ付き剛体球集合充填問題 (penalized rigid sphere set packing problem) の定式化を行う．ここで，各 O_i は n_i 個の球の集合 $\{S_{i1}, \ldots, S_{in_i}\}$ である．$\boldsymbol{c}_{ij}$ を球 S_{ij} の中心を指すベクトル，r_{ij} を球 S_{ij} の半径，$N = \sum_{i=1}^{m} n_i$ は球の総数を表す．$\boldsymbol{r}_i = \sum_{j=1}^{n_i} \boldsymbol{c}_{ij}/n_i$ はO_iの重心を指すベクトルである．ある点の集合 $S \subseteq \mathbb{R}^d$ に対し，∂S を S の境界と

し，$\mathrm{int}(S) = S \setminus \partial S$ を S の内部と呼ぶ．

物体 O をベクトル $\boldsymbol{v} \in \mathbb{R}^d$ により移動させた物体を $O \oplus \boldsymbol{v} = \{\boldsymbol{x} + \boldsymbol{v} \mid \boldsymbol{x} \in O\}$ で表す．二つの物体 S と T の貫通深度 (*penetration depth*) は

$$\delta(S,T) = \min\{\|\boldsymbol{x}\| \mid \mathrm{int}(S) \cap (T \oplus \boldsymbol{x}) = \emptyset,\ \boldsymbol{x} \in \mathbb{R}^d\}$$

で定義される．ここで，$\|\cdot\|$ はユークリッドノルムを表す．

特に二つの球 S_{ij} と S_{kl} に対する貫通深度は次のように与えられる．

$$\delta(S_{ij}, S_{kl}) = \max\{r_{ij} + r_{kl} - \|\boldsymbol{c}_{ij} - \boldsymbol{c}_{kl}\|, 0\}.$$

λ_i 個の変数 $\boldsymbol{v} \in \mathbb{R}^{\lambda_i}$ により点 $\boldsymbol{x} \in \mathbb{R}^d$ を動かす移動関数を $\Lambda_i(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{v}) : \mathbb{R}^{d \times \lambda_i} \to \mathbb{R}^d$ $(i = 1, \ldots, m)$ と書く．点の集合 $S \subseteq \mathbb{R}^d$ に対しては，$\Lambda_i(S, \boldsymbol{v}) = \{\Lambda_i(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{v}) \mid \boldsymbol{x} \in S\}$ と定義する．簡単のため，$\boldsymbol{c}_{ij}(\boldsymbol{v}) = \Lambda_i(\boldsymbol{c}_{ij}, \boldsymbol{v})$ と $S_{ij}(\boldsymbol{v}) = \Lambda_i(S_{ij}, \boldsymbol{v})$ の表記を用いる．

これらの表記を用いるとペナルティ付き剛体球集合充填問題は次のように定式化される．

$$\begin{aligned} \text{minimize} \quad & F_{\mathrm{pen}}(\boldsymbol{v}) = \sum_{1 \le i < k \le m} \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{l=1}^{n_k} f_{ijkl}^{\mathrm{pen}}(\boldsymbol{v}) \\ \text{subject to} \quad & \boldsymbol{v} = (\boldsymbol{v}_1, \ldots, \boldsymbol{v}_m) \in \mathbb{R}^{\sum_{i=1}^m \lambda_i} \\ & \boldsymbol{v}_i \in \mathbb{R}^{\lambda_i}, \quad i = 1, \ldots, m. \end{aligned}$$

但し，

$$\begin{aligned} f_{ijkl}^{\mathrm{pen}}(\boldsymbol{v}) &= [\delta(S_{ij}(\boldsymbol{v}_i), S_{kl}(\boldsymbol{v}_k)]^2 \\ &= [\max\{r_{ij} + r_{kl} - \|\boldsymbol{c}_{ij}(\boldsymbol{v}_i) - \boldsymbol{c}_{kl}(\boldsymbol{v}_k)\|, 0\}]^2 \end{aligned}$$

は二つの球 S_{ij} と S_{kl} の貫通深度を表す．

ペナルティ付き剛体球集合充填問題は制約無し非線型問題となり，目的関数 F_{pen} は微分可能となるように選ぶ．もし，$S_{ij}(\boldsymbol{v}_i)$ と $S_{kl}(\boldsymbol{v}_k)$ が互いに重なっていれば，次の式が成り立つ．

$$\frac{\partial f_{ijkl}^{\mathrm{pen}}(\boldsymbol{v})}{\partial \boldsymbol{v}_i} = -2 \frac{\delta(S_{ij}(\boldsymbol{v}_i), S_{kl}(\boldsymbol{v}_k))}{\|\boldsymbol{c}_{ij}(\boldsymbol{v}_i) - \boldsymbol{c}_{kl}(\boldsymbol{v}_k)\|} \cdot \frac{\partial \boldsymbol{c}_{ij}(\boldsymbol{v}_i)^{\mathsf{T}}}{\partial \boldsymbol{v}_i} \cdot [\boldsymbol{c}_{ij}(\boldsymbol{v}_i) - \boldsymbol{c}_{kl}(\boldsymbol{v}_k)].$$

ここで，^{T} はベクトルや行列の転置を表す．二つの球が重なっていないときは次式が成り立つ．

$$\frac{\partial f_{ijkl}^{\mathrm{pen}}(\boldsymbol{v})}{\partial \boldsymbol{v}_i} = \boldsymbol{0}.$$

この問題に対し，局所探索アルゴリズムを設計することができる．円集合で近似した物体と容器の初期配置から始め，コスト関数を準ニュートン法で最小化することにより，重なりを除去した新しい配置を探索する．さらに，この局所探索アルゴリズムに基づき，二つの物体の配置交換などの操作を使った大域的な解の探索アルゴリズムを設計した．提案するアルゴリズムを実装し，計算機実験を行ったところ，複雑な 3 次元物体に対しても高速にパッキングすることが可能であることが分かっている．

4 IP ネットワーク最適化

4.1 最小深さ根付き生成木についての研究

根付き生成木のうち深さを最小にするものを求める問題は，P2P ネットワークで（テレビ）放送を行うことに関連している．P2P ネットワークは，視聴者同士で放送コンテンツを中継することにより，放送を行うサーバの負荷を軽減でき，ネットワーク障害につよい方法とされている．しかし，あらゆる可能性の中，どのように中継すればよいかが問題になる．特に中継を行うノードには，一般に中継できる数（子ノードの数）に上限がある．この問題をグラフの用語を用いてモデル化すると，次のようになる．すなわち,「枝に重み付きの完全有向グラフ，その中にあるソースノード，及び各ノードの次数制約が与えられた時に，このソースノードを根とする有向生成木の中で，各ノードにおいて出次数制約を満たして，深さ深さ（根から葉への最長路長）が最小となるものを見つけよ」．この問題について，重み無しの場合や次数制約が無限大の場合は簡単に解けるが，一般に実行可能解を探すのも NP 完全である．そこで近似アルゴリズムの適用が考えられるが，本研究では，いくつかの戦略を提案し，性能を考察してみた．

戦略 1 は，ダイクストラ法の改造版と言え，根からスタートし，ラベルを更新する際に次数制約もチェックする．満たしていたら問題ないが，満たさなかったら次善のノートを採用する．戦略 2 は，次数制約が 1 以上のノードだけで部分木を欲張り法で作り，最後に次数 0 のノードを欲張り法

で加える．戦略３は，次数制約の大きい順にノードをグループに分けて,（同じ次数制約のノードが同じグループになる,）順に欲張り法で適用する．ランダムなグラフでテストしてみた結果，多くの場合は戦略２のほうがよい結果を出していることが確認できた．しかし，時間の関係でその理由の究明までは至らず，今後厳密解を求め，さらにグラフの密度，欲張り法の精度などとの関係を考察して予定である．

4.2 ファイアウォール高速化のためのデータ構造

ファイアウォールは，通信ネットワーク上に流れるパケット（宛先と送信元のアドレス等のような制御情報を付加されたデータ通信の単位）に対し，与えられたルール（パケットの特徴とそれに対応する動作の対を記述したもの）に従って通過させたり破棄したりするようなネットワーク機器またはソフトウェアのことを言う．このようなファイアウォールは，インターネットなど，安全な通信を必要とするネットワークにとって必須なものになっており，Unix/Linux はもちろん，Windows でも XP SP2 から有効になった．また，専用装置や商用ソフトウェアも開発されている．

一方，通信中のパケットに対して照合作業（フィルタリングともいう）を行うため，ファイアウォールの導入によって通信の遅延が増大してしまう問題がある．従って，ファイアウォールの最適化，すなわち平均処理時間の最小化が望まれる．特に近年，物理的に高速な通信が可能になった一方，ファイアウォールによる遅延が目立つようになった．そのため，ここ数年ファイアウォールの高速化に関する研究が注目されるようになった．本研究は，従来の研究成果を踏まえ，ファイアウォールの処理に適したルール集合の構造（線形木と呼ぶ）を提案する．以下具体的に説明する．

ファイアウォールのルールは,「パターン」部と「アクション」部からなっており，パターン部はパケットの特徴（アドレスやサービスなど）を記述し，アクション部は，パターン部に合致するパケットに対して行なわれる操作（通過や破棄など）を規定している．現行のファイアウォールは，合致するパターンが見つかるまで与えられたルールの線形リストを順番に調べていく，という単純な線形探索法を採用している．従って，リストの後ろにあるルールほど，それに合致するパケットの処理時間が長い．容易にわかるように，ルール間に先行制約（順番を変えたら異なる機能を持つファイアウォールになってしまうようなルール集合）がなければ，合致パケットの出現確率の高い順にルールを並べ変えると平均処理時間が最小化されるが，先行制約がある場合は，最適なルールの順番を求めるのが NP 困難となる．さらに後者に対して，いくつのヒューリスティックが提案されている．実データを用いてシミュレーション実験をした結果，おおむね数十パーセントの改善が報告されている．

先行研究は，ルールの記述を変えないという前提において行われている．本研究は，さらに平均処理時間を短縮するために，機能を壊さずにルールの記述を変える方法を検討してみた．その結果として階層的なルールの記述法を提案する．すなわち，従来の線形リストの代わりに「木構造」を用いて，木のノードは，あるグループのパケットの特徴（例えばアドレス空間やサービス番号等）を表し，各ルールは，木の根ノードからある葉までのパスに対応する．ただし，一つのノードは複数個の部分ルールを含むことが可能とし，その場合は，含まれる部分ルールの集合に対して従来通りの線形探索を行う．これは，単語を調べる辞書の構造に似ていて，線形リストより効率がよい．

今回の成果として，実際のファイアウォールを調べ，サービス番号によって第一レベルの木ノードを作るのが有効であることが分かった．さらに本学情報学科の場合をシミュレーションし，従来提案された高速化の手法で改善できないが，二レベルの木構造を組み合わせることにより平均処理時間が大幅に短縮できることを示した (L. Zhao, A. Shimae, H. Nagamochi, Linear-tree rule structure for firerewall optimization, 6th IASTED Intl. Conf. on Communications, Internet, and Information Technology, July 2-4, 2007)．ただし，シミュレーションでは先行制約なしの場合のみを考えたが，今後の課題として，先行制約ありの場合についてさらに詳しく考察していくことが考えられる．

4.3 インターネット観測のためのビーコン問題について

本研究は，インターネットにおける全リンクを観測するために必要最小のビーコン（観測を行うノード）の集合を計算し，観測するためのプロトコルを提案するものである．

現在，インターネットにおいて，あるノードから遠隔ノードを観測する方法として，ICMP プロトコルがある．これは，送信者から受信者への往復時間を測ることにより，経路の混み具合を測定するものである．一方，遠隔からリンクを観測するための方法は確立されておらず，両端ノードを ICMP によって観測し，その結果から対象リンクの通過時間を推定しようとする方法が使われている．その際，グラフの構造と観測を行うノード（ビーコンという）の場所によって，正しく推定できないことがあり，全リンクを正しく観測するために，ビーコン集合を決定する必要がある．必要最小のビーコン集合を計算する問題はビーコン問題と呼ぶ．先行研究は，この問題の NP 困難性を示し，さらに set cover 問題に帰着し，欲張り法で近似解を計算するアルゴリズムを提案している．

本研究は，まず整数計画に基づく厳密解法を提案し，CPLEX を用いて実験した結果，これまで近似解しか得られなかった現実問題（最大約 1 万節点）に対し，短時間で厳密解を得ることができた．さらに，先行研究の一般化を行い，L-ビーコンの概念を提案し，観測とセキュリティ保護のトレードオフを図る．この枠組においては，先行研究が L= 0 の場合に当たる．(L が大きいほど観測範囲も大きいが，セキュリティの観点から小さいほうが望ましいとされている.)

スケールフリーなネットワークを用いて実験した結果，10 万節点のグラフにおいて，従来法なら 4 万以上のビーコンが必要であるのに対し，提案法は，例えば 5-ビーコンなら，500 程度で足りることが分かった．L< 10 ならセキュリティ性もよいため，以上の結果は実用的と思われる．今後国際会議で発表する予定である．さらにインターネットのプロトコルとして提案してみたいと考えている．

5 時間依存最短路問題

最短路問題は古くから研究されている問題であり，Dijkstra 法をはじめ数多くの方法が提案されている．本研究は，枝長（通過時間）が時間依存関数である場合の最短路問題を考える．特に関数が FIFO 性質を満たす問題を考える．ただし FIFO とは，到着時刻（出発時刻＋通過時間）が単調非減少のことをいう.（FIFO 性質がなければこの問題は NP 困難となる.）

この問題に対し，Orda-Rom (1990) は，出発点，行き先と出発時刻が与えられた時に，Dijkstra 法をそのまま拡張したアルゴリズムを提案している．本研究は，従来の静的最短路問題に対する A* search アルゴリズムの（自明ではない）動的版を開発し，さらに前処理データを記憶しておくことによって，Orda-Rom のアルゴリズムより高速になる方法を提案する．ただし n は節点数である．前処理には，Goldberg-Harrelson (2003) が提案した静的最短路問題に対する ALT アルゴリズムの（自明ではない）時間依存版の開発に成功した．

実在する最大数百万節点の地図データと人為的に作った線形区分枝長関数（区分数 10 以下）を用いて実験した結果，Orda-Rom 法より数倍速くなっていることが確認できた．今後学会発表を行う予定である．

6 最長路問題

最長路 (閉路) 問題とは, 無向グラフ G と, その枝集合 $E(G)$ に対する実数値の重みが与えられたときに, 重みの和が最大となる路 (閉路) およびその長さを求める最適化問題である. 過去の多くの研究には, 最短の経路を対象にしたものが多い. たとえば, グラフにハミルトン性を仮定して最短のハミルトン閉路を求める問題は, 代表的な NP 困難問題として知られる巡回セールスマン問題であり, 近似可能性や, ある程度大規模な問題に対する実用的に高速な厳密アルゴリズムなど, 数多くの結果が知られている.

これに対して, 巡回セールスマン問題の一部を特別な場合として含み, いくつもの実用的な応用を持つことが知られている最長路問題は, 理論的

にも非常に興味深いにもかかわらず, 過去にあまり多くの関連研究が見られないのが現状である.

本研究課題のテーマは近似アルゴリズムの設計であるが, この問題に対しては, 必ずしも近似解法だけに限定することはせず, 厳密解法の開発をも目指した.

6.1 入力を限定するアプローチ

一般の入力に対して NP 困難な組合せ最適化問題においては, 精度の保証はないが実用的には十分な精度の解を与えるヒューリスティクスの開発や, 精度が保証された近似アルゴリズムの設計などの対策が考えられる. 他方, 実際には限られたグラフや重みのみが入力として出現することも多く, ここでは, 入力として与えられるグラフクラスを制限することによって厳密解を得ることを目指す. このためには, さまざまなグラフクラスやその応用を熟知した上で, アルゴリズム設計に有用な性質や特徴づけを得る必要がある. この方向の研究としてはこれまで, わずかに木に対する線形時間の厳密アルゴリズムが知られる程度であり, これ以外に主たる先行研究は見当たらなかった. そこでわれわれは, それ以外にも自明でないグラフクラスに対して効率的に (たとえば多項式時間で) 最長路を計算するアルゴリズムの開発を試みた.

まずはじめに, 木の最長路を求める線形時間アルゴリズムである Dijkstra のアルゴリズムを一般化し, その正当性を示した上で, 木と同様の構造を持ついくつかのグラフクラスに対して, 効率的な最長路計算アルゴリズムを提案した. 具体的には, 点・枝重みつき木, ブロックグラフ, カクタスに対するそれぞれ $O(n), O(n+m), O(n^2)$ 時間アルゴリズムなどである (ただし n は点数, m は枝数). このとき, これらのアルゴリズムのうちの一部は, 必ずしも理論上達成可能な最速のアルゴリズムであるとは限らないが, ここでは Dijkstra のアルゴリズム (の一般化) の適用を目的としている.

さらに, 最長路問題が自明ではないグラフクラスとして, 自然な交モデルを持ついくつかのクラスを対象とし (あるいは提案し), それらに対する最長路問題を解決している. 具体的には, 包含関係の意味で interval graph と threshold graph の中間に位置する proper interval biconvex graph ならびに interval biconvex graph とよぶクラスを新たに導入し, 前者に対する $O(n^3(m + n \log n))$ 時間の計算量を持つアルゴリズムを設計している.

つづいて, Ptolemaic グラフと呼ばれるクラスを対象とし, その性質を調査した. Ptolemaic グラフとは, グラフの任意の 4 点 x, y, z, w 間の距離に, トレミーの不等式 (ptolemaic inequality) $d(x, y)d(z, w) \leq d(x, z)d(y, w)$ が成り立つグラフをいい, このグラフクラスは, コーダルグラフと距離遺伝グラフの交わりと一致することが知られている. また Ptolemaic グラフは, われわれが前述したブロックグラフを特別な場合として含む.

われわれは, この Ptolemaic グラフに対する新しい特徴づけを与えた. それは, クリークのラミナー構造にもとづくものであり, グラフ G の極大クリークの空でない交わりの集合族を $\mathcal{C}(G)$ として, $\mathcal{C}(G)$ 上に定義されるあるグラフを $T(\mathcal{C}(G))$ としたとき, G が Ptolemaic グラフであるための必要十分条件は $T(\mathcal{C}(G))$ が木であるというものである. この結果から, Ptolemaic グラフに対する正準木表現 (クリークラミナー木) $T(\mathcal{C}(G))$ が得られる. このクリークラミナー木は, Ptolemaic グラフの交モデルにもなっており, 辞書式幅優先探索 (LexBFS) によって得られる完全点消去順序 (perfect elimination ordering) から, 線形時間で構築することができる.

したがって, このクリークラミナー木を用いることにより, Ptolemaic グラフの認識問題および同型性判定問題を線形時間で解くことができる. さらに, ハミルトン閉路問題も線形時間で解くことに成功した. このことは, Ptolemaic グラフに対する最長路問題を解く大きな手がかりとなるものであり, 近年このアイデアにもとづいた多項式時間のアルゴリズムが提案されている. また, これらの結果ならびに考察は, いまだに未解決である interval graph に対する最長路問題を解く大きな手がかりにもなり得ると考える.

上記以外にも, いくつかのグラフクラスに対する最長路問題を肯定的に解決しており, 今後順次公表予定である.

6.2 分枝限定法によるアプローチ

同じく, 困難な組合せ最適化問題に対する厳密解法の一つに, 分枝限定法がある. 分枝限定法は, 本質的には実行可能解の全探索であり, 理論的には必ずしも指数時間の計算量を改善できるものではないが, その探索を効果的に行うことにより, 計算時間を劇的に減少できる場合がある.

いま最長路問題は組合せ最適化問題 (整数計画問題) として定式化することができ, 厳密解法としての分枝限定法を適用することができる. このとき, もちろん汎用の整数計画問題ソルバを用いて解くアプローチもあり得るが, 本研究では入力のグラフが, たとえば平面的グラフのように疎であるとき, そのグラフの構造的な特徴を利用して最長路を効率的に求める専用解法の開発を目指した.

より具体的には, われわれはまず最長路問題を始点固定最長路問題に帰着する. すなわち, 始点固定最長路問題とは路の始点を制約条件に加えたものであり, 最長路問題の最適解は, すべての点を始点とする始点固定最長路問題を解くことで求められる. そこで本研究では, 始点固定最長路問題の厳密解を, 分枝限定法を用いて計算する方法の設計・実装を試みた.

分枝限定法を効率的にするためのアイデアの一つとして, はじめに, 入力となるグラフの 2 連結成分分解を行い, 2 連結成分とカット点を利用して部分的な最長路の情報 (最適値および最適解) を点の情報として集約・保持することを行った. この処理により, 対象とするグラフの規模を縮小させるだけではなく, 分枝の際に重複して現れる最長路計算を省略することができ, それらによる分枝限定法の効率化を達成することが期待できる. その結果, CPU: Celeron 1GHz, メモリ: 256MB の計算機環境で, 100 枝 (58 点) 程度の比較的疎なグラフに対して, 約 1 秒程度の計算時間で最長路を計算することが可能となっている.

さらなる効率化のためのアイデアとして, 部分問題となるグラフが最長路を容易に計算できるようなグラフクラス (たとえば固定木幅のような) に属することが判定できたときには, 計算の上ただちにその問題を終端させることが挙げられる. この特殊な場合として, 隣接点数が 2 以下の点を効率的に処理した上で最長路を計算する方法を考案し, これにより生成される部分問題数を激減させることができ, 全体の計算の高速化を達成した. 具体的には, 上記と同様の計算機環境で, 190 枝 (102 点) 程度の比較的疎なグラフに対して, 約 3,000 秒程度の計算時間で最長路を計算することが可能となっている.

7 グラフのランキング問題

グラフの点ランキングとは, グラフの点に対して整数値を割り当てるラベリング $r : V \to Z_+$ で, 同じラベル i を持つ 2 点間の任意の路には, i より大きなラベル j を持つ点が必ず存在するという条件を満たすものである. これは, 互いに干渉しあう仕事は同時に実行できないという制約のもとに, その仕事の完了時刻 (ステップ数) を最小にするという問題を定式化している. しかしながら, それればかりではなく, 点彩色問題の一般化にもなっており, 理論的にも非常に興味深い問題であり, 過去に多数の研究がある. またすべての定義において, 点を枝で置き換えた枝ランキング問題も同様に定義され, これも並列処理ステップ最小化に応用がある.

われわれは過去に, この枝ランキング問題に対して, より自然な形で並列処理ステップを最小化する問題を表現するモデルとなる「最小枝ランキング全域木問題 (MERST)」を定義し, これに対してさまざまな理論的な解析や, 近似アルゴリズムの提案などを行ってきている. それらは例えば, MERST の NP 困難性や, 近似比 $\frac{\min\{(\Delta^*-1)\log n/\Delta^*, \Delta^*-1\}}{\log(\Delta^*+1)-1}$ (ただし, n は点数, Δ^* は最大次数最小全域木の最大の次数) を持つ近似アルゴリズムなどである. また, 入力となるグラフクラスを制限することによる厳密アルゴリズムとして, 入力がしきい値グラフである場合の MERST に対して, 線形時間のアルゴリズムを提案している.

この問題に対して, 新たに split グラフと呼ばれるクラスに対する厳密アルゴリズムを提案した. Split グラフとは, グラフの点集合 V が, クリーク K と独立点集合 S に分割可能なグラフとして定義される. このグラフの全域木を考えるとき, クリーク K 内の点は任意の順序で連続して接続できることを利用すると, 問題 MERST の解は, 最大流問題 (の変種) を解くことで導かれることが判明し, その結果, MERST に対する多項式時間

アルゴリズムを得た.

この点/辺ランキング問題に対しては, われわれが提案した最小ランク全域木問題以外にも, さまざまなバリエーションを考えることができ, それらが将来の課題となる.

8 グラフクラスとグラフパラメータ

一般のグラフに対しては効率的な解法を得ることが困難なグラフ上の問題でも、グラフクラスを限定することで効率的な解法が得られることがしばしばある. グラフクラスを限定する方法はいくつか存在するが、広く用いられる方法として、グラフパラメータをバウンドすることでクラスを限定する方法がある. この方法の一つの利点として、グラフ全体のクラスをそのパラメータにより階層的に分割できる点が挙げられる. このとき、ある問題を解く効率が、あるグラフパラメータの大きさに比例するケースがよく見かけられる. これはその問題が持つ本質的な難しさとそのグラフパラメータとが深く関係していることを示している. これらのことからわかるように、効率の良いグラフアルゴリズムの設計とグラフクラスやグラフパラメータの研究には深い関係がある.

本研究では主に 3 つの研究を行った：1) unit grid intersection graphs (UGIG) と呼ばれるグラフクラスと他のグラフクラスの関係を調べた研究; 2) 完全 k-分木に対する vertex boundary-width (VBW) と呼ばれるグラフパラメータの研究; 3) chordality と呼ばれるグラフパラメータと最長誘導パスを求める問題の関係を調べた研究; である.

UGIG の研究では、既に知られていて深く研究されている他の二つのグラフクラス、interval bigraphs (IB) および chordal bipartite graphs (CBG) との比較を行った. UGIG は自然に定義されるグラフクラスではあるが、どの程度広いクラスかは知られていなかった. 本研究で、UGIG が IB を真に含み、CGB とは比較不能であることを示し、これにより UGIG がどの程度広いグラフクラスかを示すことができた.

VBW の研究では、今まではグラフの積で表されるグラフクラスに対してしか研究が行われていなかった. 今回我々の研究ではグラフの積とは関係のないグラフクラス、完全 2 分木に対して、数え上げの手法を用いて、下界を示した. VBW は他の重要なグラフパラメータ、例えば bandwidth や pathwidth などの下界を与えており、研究価値が十分高いグラフパラメータと言える.

chordality の研究では、Gavril の先行研究を改善した. Gavril は chordality がある定数 k でバウンドされているグラフクラスに対し、最長誘導パスを求める問題が $O(n^k m)$ 時間で解けることを示した. ここで、n と m はそれぞれ頂点と辺のサイズである. 我々は、chordality が k でバウンドされているグラフクラス上で最長誘導パスを求める問題を考える際に DAG 構造が潜んでいることを発見し、その構造に注目することにより、$O(n^k)$ 時間で解けることを示した.

9 配送スケジューリング

配送スケジューリング問題は，与えられたグラフの各節点に置かれたジョブの集合からなる．例えば，収集すべき品物や検査すべき施設のような，作業を受ける対象がジョブに相当する．各ジョブは準備時間，処理時間および納期によって特徴づけされる．一台あるいは複数台の搬送車が，与えられたグラフ上を移動しながら，ジョブの処理をおこなう．なお，複数の搬送車を扱う場合，理論モデルではそれらの性能は等しいとされることが多い．問題の目的は，定められた目的関数に対して，その値を最小化（あるいは最大化）するような搬送車のジョブ処理スケジュールを求めることである．

配送スケジューリング問題は，製造業やサービス業において解決されなければならない最重要課題の一つである．実際，エレベータ搭乗機能を備えた自律的搬送ロボットや，海岸線に沿って移動する輸送船など，グラフをパス構造グラフや木構造グラフに限っても，配送スケジューリング問題はさまざまな場面に現れる．そのため，この十数年，パス構造グラフや木構造グラフにおける配送スケジューリングについて，問題の計算の複雑さや近似可能性などの理論研究が精力的に続けられている．当然のことながら，優れたアルゴリズムを実現するためには，その設計においてグラフ構造の特徴を十分に考慮することが必要である．

9.1 容量制約問題

複数台の搬送車が，与えられた走行経路上の配送作業（すなわち，ジョブ）を分担して処理する際に，各車両への負荷があらかじめ定められた上限値（以下，容量という）を超えないようにしながら，使用する車両数を最小にする問題を考え，グラフ理論的なアプローチを行ってきた．ここでは，枝と節点に非負重みを持つ連結グラフ $G = (V, E)$ を用いて，走行経路をモデル化している．枝 $e \in E$ および節点 $v \in V$ の重みをそれぞれ $w(e)$，$h(v)$ と表す．ここで，$w(e)$ は車両が枝 e を通過するときの移動コスト（移動時間）を意味し，$h(v)$ は節点において行う作業に対するコスト（作業時間）を表す．各車両の容量を d，デポの役割をする節点を r とし，車両数を表す整数を p とする．

前述の内容と重複する部分があるが，配送スケジューリング問題を置き換える部分木被覆問題を説明する．部分木被覆問題とは，与えられたグラフをいくつかの部分木に分割する問題であり，いくつかのバリエーションがある．容量制約付き部分木被覆問題 (the capacitated subtree cover problem: CSC) とは，節点集合 V の p 分割 $X = \{X_1, X_2, \ldots, X_p\}$ と p 個の部分木 $T_1, T_2, \ldots, T_p$（ただし，各 T_i は $X_i \subseteq V(T_i)$ および $w(T_i) + h(X_i) \leq d$ を満たすもの）を実行可能解とし，部分木の数 p を最小にすることを目的とする．ここで，部分木 T_i のコストは，T_i の枝の重み和 $w(T_i)$ と X_i の点の重み和 $h(X_i)$ の合計として定義される．この問題にデポを考慮することで定義される容量制約付き根付き部分木被覆問題 (the capacitated rooted-subtree cover problem: CRSC) とは，節点の集合 V の p 分割 $X = \{X_1, X_2, \ldots, X_p\}$ と p 個の部分木 $T_1, T_2, \ldots, T_p$（ただし，各 T_i は $X_i \cup \{r\} \subseteq V(T_i)$ および $w(T_i) + h(X_i) \leq d$ を満たすもの）を実行可能解とし，部分木の数 p を最小にすることを目的とする．なお，部分木に容量制約がない代わりに，与えられた整数 p に対して，部分木の最大コストを最小にすることを目的とした問題は，ミニマックス部分木被覆問題 (the minmax subtree cover problem: MSC) と呼ばれる．デポを考慮する場合は，ミニマックス根付き部分木被覆問題 (the minmax rooted-subtree problem: MRSC) と呼ばれる．

部分木被覆問題への置き換えは，各車両の行う配送作業（が存在する節点の集合）に誘導される部分グラフを一つの部分木で近似できないか，という考えに動機づけられている．実際，走行経路が木構造グラフで与えられるとき，問題 MSC に対する定数倍近似アルゴリズムを用いることによって，デポなしメイクスパン最小化配送スケジューリング問題に対しては 5 倍近似アルゴリズムを構成でき，また，問題 MRSC に対する定数倍近似アルゴリズムを用いることによって，デポありメイクスパン最小化配送スケジューリング問題に対しては 3 倍近似アルゴリズムを構成できる．

問題 CSC と CRSC は，車両数最小化問題と関連が深い．本研究では，与えられたグラフが木構造を持つ場合，問題 CSC に対するひとつの下界値計算法を与えた．この下界値は，木構造グラフにおける問題 MSC の上界値計算法をサブルーチンとして用いる．この結果から，木構造グラフにおける問題 CSC に対して，3 倍近似アルゴリズムが導かれる (Y. Karuno, H. Nagamochi, Scheduling vehicles on trees, Pacific Journal of Optimization, vol. 1, 2005, pp. 527–543)．また，一般グラフにおける問題 CSC に対する近似アルゴリズムの設計にも取り組み，結論から言えば，ある定数倍近似アルゴリズムを提案した．この近似アルゴリズムでは，一般グラフの問題 MSC に対する $(4+\varepsilon)$ 倍近似アルゴリズム [G. Even, N. Garg, J. Kaonemann, R. Ravi and A. Sinha, Oper. Res. Lett. vol. 32, 2004, pp. 309–315] の前処理を活用している (ここで，ε はあらかじめ定められる任意の正数であり，この大きさによってアルゴリズムの計算手間が変化する)．提案アルゴリズムでは，与えられたグラフが木構造を持たない場合，それをいくつかの成分に分け，各成分における最小木を求めることによって，一般グラフの問題を木構造グラフの問題に帰着させるアプローチを取っている．前処理は，容量 d を超える重みの枝を取り除き，与えられたグラフをいくつかの成分に分ける．これは，問題 CSC の最適解において，そのような枝が使われることは有り得ないからである．木構造グラフにおける問題 MSC の上界値計算法をサブルーチンとして用いると，各成分に割り当てられるべき最小の部分木数の高々7 倍で，すべての部分木のコストが容量以下に収まることが言える．最終的に，一般グラフの問題 CSC に対する

7倍近似アルゴリズムが得られる (Y. Karuno, H. Nagamochi, Minimizing capacitated tree covers of graphs, Proceedings of the 3rd Asian Applied Computing Conference, CD-ROM, 2005)．各車両の負荷として移動時間と作業時間をカウントする場合には，この部分木被覆問題に対する結果が車両数最小化問題における近似アルゴリズムの設計に重要な役割を果すと考えられる．

なお，一般グラフにおける問題CRSCに対しても，問題CSCと同様のアプローチで近似アルゴリズムを設計した．すべての部分木がデポを含まなければならないという厳しい制約条件のため，こちらは定数倍近似とはならなかったが，データ依存の近似比は得ることができた．

9.2 納期制約問題

パス構造グラフを直進する一台の搬送車の選択的配送スケジューリング問題を中心に考察した．グラフの節点に置かれた各ジョブには，処理時間と納期が定められている．ジョブの準備時間はすべて0である．車両が与えられたパス構造グラフの一方の端点を出発し，各枝をちょうど一度だけ訪れるならば，すなわち，単純に一方の端点からもう一方の端点まで移動するならば，そのスケジュールは直進スケジュールと呼ばれる．本研究では，車両が直進スケジュールに従って移動する場合の配送スケジューリング問題を取り扱った．この問題における車両は，任意の節点でそのジョブの処理を行わずに，次の節点に進むことを許される．ただし，処理しなかったジョブについては違反コストα (≥ 1)が要求される．よって，各ジョブに対して，車両にそれを処理させるかどうか，を決めるという選択が必要である．車両によって処理を受けたジョブに対しては，その処理完了時刻が納期より早ければ，違反コストは要求されない．しかし，処理完了時刻が納期を越えたならば，単位違反コスト（すなわち，違反コスト1）を支払わなければならない．最小化すべき目的関数は，すべてのジョブについての総違反コストである．これを納期違反コストと呼ぶ．本研究では，この配送スケジューリング問題に対して，動的計画法に基づく厳密アルゴリズムを与えた (軽野・永持・内田，パス構造グラフにおける納期違反コスト最小化選択的配達スケジューリング，日本機械学会論文集（C編），vol. 73, 2007, pp. 911-918)．違反コストαが正整数で与えられるならば，このアルゴリズムは$O(n^2 \min\{\alpha, n\})$で動作する．

なお，この問題は，納期遵守ジョブ数最大化の一般化になっている．なぜならば，$\alpha = 1$のとき，納期違反コストの最小化と納期遵守ジョブ数の最大化は等価だからである．納期遵守ジョブ数最大化問題を解くことにより，直面する納期制約がどれくらい厳しいのかについて，一つの数値指標が得られる．また，鉛直方に延びるパスやループ状経路（デポを仮想的に二つの端点に分けることで，パス構造グラフに置き換え可能となるケースは珍しくない）を移動する車両（あるいは人）にとっては，駆動系の能力特性（あるいは安全性の確保，運転者の負担軽減）のために，与えられた経路を双方向に移動することがしばしば困難である．

この成果の一つの応用例として，固定された台数の車両に対して，走行区間分離型の直進スケジュールを求めるということが挙げられる．これには，先行研究の成果である二段構え動的計画法 [Y. Karuno, H. Nagamochi, Discrete Applied Mathematics, vol. 129, 2003, pp. 433-447] を適用し，提案アルゴリズムを内側に組み込めばよい．

また，車両数最小化問題に対しては，単一車両問題の厳密解法を貪欲的に適用するということが考えられる．その観点から，直進車両台数最小化問題に対する近似アルゴリズムを設計したところ，計算手間は$O(n^3)$，近似比は$O(\log n)$という結果を得ている (J.Uchida, Y. Karuno, H. Nagamochi, Heuristics for a scheduling problem of minimizing the number of one-way vehicles on paths with deadlines, SICE 2007 Annual Conference, 2007, pp. 2633-2638)．

これまでの配送スケジューリング問題に対する理論研究で，納期違反規準の目的関数を扱ったものは多くない．燃料費や移動距離の削減よりも，販売の機会損失を削減する方が，企業の競争力の強化にとって重要である場合も少なくない．納期違反規準の配送スケジューリング問題に対して，実用的なアルゴリズムの開発だけでなく，理論研究のさらなる進展が望まれる．

10　食品の袋詰め問題

ピーマン，スナック菓子，冷凍食品，漬物などの食品を袋詰めするために，数十台程度のホッパからなる自動組合せ計量装置がしばしば用いられる．n 台の計量ホッパを備えた自動組合せ計量装置の仕組みはつぎのように説明することができる．なお，ここでいう品物とは，ピーマン 1 個や一掴みのポテトチップスなど，一つのホッパに一回あたり投入される食品を指す．まず，未計量の品物がベルトコンベヤなどによって自動組合せ計量装置まで運ばれてくる．運ばれてきた品物は，一つずつ空いているホッパに投入され，その重量が測定される．なお，すべてのホッパが埋まっているとき，品物の投入は中断される．測定値は，自動組合せ計量装置の演算部へ送られる．演算部は，ホッパに入っている n 個の品物からいくつかを選んで，一袋あたりの目標重量を下回らない範囲で (倫理的な観点から，実際に袋に詰められた品物の合計重量が，袋の表示量より少なくなることがあってはならない)，それらの合計重量を目標重量にできるだけ近づけなければならない．選ばれた品物はホッパから排出され，袋に詰められて自動組合せ計量装置から搬出される．空となったホッパには新たな品物が投入され，それらの重量が測定される．そして，演算部によって再びいくつかの品物が選ばれて，次の袋詰めがおこなわれる．

毎回の袋詰めにおける品物の選択の問題は，0-1 変数 x_i $(i = 1, 2, \ldots, n)$ によって，ホッパ i の品物が袋に入れられるのか，あるいはそうでないのかを表せば，一つの離散最適化問題として定式化できる．問題の最も重要な目的は，前述の通り，選んだ品物の合計重量が目標重量を下回らず，かつ，最もそれに近くなるようにすることである．しかし，ここでは合計重量を目標重量に近づけるだけではない．品物の重量のみを考慮して袋詰めをおこなった場合，いつまでも選ばれないで長期間ホッパに滞留する品物を発生させる可能性がある．自動組合せ計量装置では品物として食品を扱っているので，例えば，空気に触れている時間が短ければ短いほど良いといった食品を扱うような場合は，合計重量を目標重量に近づける過程で，ホッパにおける滞留期間に対しても何らかの最適化を図ることが望ましい．

本研究では，ホッパ内の品物に対して，それが選ばれなかった袋詰めの回数に応じて，品物の優先度というパラメータを定義した．そして，合計重量が目標重量を下回らない範囲で，最もそれに近くなる品物の組合せを計算するが，そのような組合せが複数あるときには，それらのうちで優先度の合計値が最も大きくなる品物の組合せを最適解とする袋詰め最適化問題を考察した．本研究では，まず，この問題を 0-1 変数を用いた辞書式二目的離散最適化問題として定式化し，動的計画法に基づいた厳密アルゴリズムを提案した（軽野・永持・大嶋，食品の袋詰め最適化問題に対する動的計画法，日本機械学会論文集（C 編），vol. 72，pp. 1390-1397，2006）．また，計算実験を行って，繰り返し行われる一連の袋詰め操作における提案アプローチの滞留期間短縮効果を確かめた．この動的計画法は，袋詰め最適化問題における二つの目的関数を辞書式に限らないで，ある非劣解を計算するように拡張できる (Y. Karuno, H. Nagamochi, X. Wang, Bi-criteria food packing by dynamic programming, Journal of the Operations Research Society of Japan, vol. 50, pp. 376–389, 2007)．理論的な計算手間は，元のアルゴリズムと同じ擬似多項式時間である．

さらに，ホッパ構成が計量ホッパとブースタの二層からなる自動組合せ計量装置のモデリングも行った (X. Wang, Y. Karuno, H. Nagamochi, DP approaches to 0-1 integer programming in double-layered food packing systems, スケジューリング・シンポジウム 2007 講演論文集，2007, pp. 121–126)．二層式自動組合せ計量装置は，アスパラガスの若芽の結束システムで用いられている．

11　おわりに

本研究では，グラフ構造を有する離散最適化問題に対する近似アルゴリズムの開発を行った．対象とする問題は，グラフの問題に限らず，スケジューリング問題，図形処理問題，ファイアウォール問題など多岐にわたる．成果の具体例として，以下を挙げることができる．グラフ連結度に関する近

似アルゴリズムに対し，set connector を定義し，広いクラスの問題を統一的に扱える理論的な基盤を得ることができた．また，これまでグラフ連結度を保存するグラフ変形操作として知られていたデタッチメント操作が化学グラフ推定問題を解くアルゴリズムの設計へ利用できることを発見した．デタッチメント操作は理論的には興味深い結果であったが，これまで実用的な問題への応用は知られていなかったことから今回の結果により，今後，さらにグラフ理論の実用問題への新しい適用が期待される．図形処理に関する問題としては，グラフ描画問題，図形の充填問題を取り扱った．前者では，面 (face) の面積が指定された問題を取り扱い，必要な描画の複雑度に対する理論的な解析を行った．後者においては，これまでの矩形ピースの配置問題を拡張した非凸図形の配置問題を取り扱い，非線形最適化問題を利用するアルゴリズムを設計した．また，最長路問題，グラフのランキング問題，配送スケジューリング問題についても新たな知見を積み重ねることができた．この他，食品の袋詰め問題やファイアウォール高速化のためのデータ構造など応用に直結する課題についても研究を行い，一定の成果を収めることができた．さらに，これまで得られた種々の結果において，アルゴリズムがうまく設計されているメカニズムを詳細に検討し，多角形パッキング問題や食品の袋詰め問題などいくつかの問題について，アルゴリズムの一般化や新しい問題への適用が可能となった．

研究業績一覧

著書

1. Yoshiyuki Karuno, Hiroshi Nagamochi (分担執筆):
   “Vehicle scheduling problems in graphs, in: Teofilo F. Gonzalez (ed.), Handbook of Approximation Algorithms and Metaheuristics, Chapman & Hall/CRC Computer and Information Science Series, Chapter 46”, Chapman & Hall/CRC, Taylor & Francis Group, 2007.
   概要: We are given a simple connected graph $G = (V, E)$ with a vertex set V and an edge set E, and a set J of jobs. This chapter surveys approximation algorithms for scheduling a set of identical vehicles that move in the given graph to process jobs (such as items to be picked up or facilities to be inspected) located at the vertices. Each job is characterized by a release time, a handling time and a due date (or a deadline). The handling times are represented by vertex-weights in the graph. The travel times are represented by edge-weights. Each job must be processed without interruption, and processed by exactly one vehicle. However, any number of vehicles may visit any number of times a vertex without processing its job. When the graphs are restricted to trees, we denote the problem by VSP-TREE. We refer to the VSP-TREE with a single vehicle as the 1-VSP-TREE. We overview known approximation algorithms for the VSP-TREE and 1-VSP-TREE. We also discuss an important relationship between the vehicle scheduling problem and the subtree cover problem.

学術論文

1. H. Nagamochi, K. Suzuki, T. Ishii:
   “A Simple Recognition of Maximal Planar Graphs”, Information Processing Letters, 89, 223-226, 2004.
   概要: In this paper, we propose a linear time algorithm for checking whether a given graph is a maximal planar graph or not and for delivering a planar embedding if it is so. Our algorithm is based on a canonical ordering, which was first introduced by de Fraysseix et al. to draw a maximal planar graph in the plane so that each edge is depicted by a straight line segment. We show that an algorithm for computing a canonical ordering can be used to test whether or

not an arbitrarily given graph is a maximal planar graph. Our algorithm needs no sophisticated data structure and considerably easy to implement.

2. H. Nagamochi, K. Okada:
"A Faster 2-Approximation Algorithm for the Minmax p–Traveling Salesmen Problem on a Tree", Discrete Applied Mathematics, 140, 103-114, 2004.
概要: Given an edge-weighted tree T and an integer $p \geq 1$, the minmax p–traveling salesmen problem on a tree T asks to find p tours such that the union of the p tours covers all the vertices. The objective is to minimize the maximum of length of the p tours. It is known that the problem is NP-hard and has a $(2 - \frac{2}{p+1})$-approximation algorithm which runs in $O(p^{p-1}n^{p-1})$ time for a tree with n vertices. In this paper, we consider an extension of the problem in which the set of vertices to be covered now can be chosen as a subset S of vertices and weights to process vertices in S are also introduced in the tour length. For the problem, we give an approximation algorithm that enjoys the same approximation ratio, but runs in $O((p-1)! \cdot n)$ time.

3. H. Nagamochi, N. Yamada:
"Counting Edge Crossings in a 2-Layered Drawing", Information Processing Letters, 91, 221-225, 2004.
概要: Given a bipartite graph $G = (V, W, E)$ with a bipartition $\{V, W\}$ of a vertex set and an edge set E, a 2-layered drawing of G in the plane means that the vertices of V and W are respectively drawn as distinct points on two parallel lines and the edges as straight line segments. We consider the problem of counting the number of edge crossings. In this paper, we design two algorithms to this problem based on the dynamic programming and divide-and-conquer approaches. These algorithms run in $O(n_1 n_2)$ time and $O(m)$ space and in $O(\min\{n_1 n_2, |E| \log(\min\{|V|, |W|\})\})$ time and $O(m)$ space, respectively. Our algorithms outperform the previously fastest $\Theta(|E| \log(\min\{|V|, |W|\}))$ time algorithm for dense graphs.

4. L. Zhao, H. Nagamochi, T. Ibaraki:
"On Generalized Greedy Splitting Algorithms for Multiway Partition Problems", Discrete Applied Mathematics, 143, 130-143, 2004.
概要: Given a system (V, T, f, k), where V is a finite set, $T \subseteq V$, $f : 2^V \to \mathbf{R}$ is a submodular function and $k \geq 2$ is an integer, the general *multiway partition problem* (MPP) asks to find a k-partition $\mathcal{P} = \{V_1, V_2, \ldots, V_k\}$ of V that satisfies $V_i \cap T \neq \emptyset$ for all i and minimizes $f(V_1) + f(V_2) + \cdots + f(V_k)$, where $\mathcal{P}$ is a k-partition of V if (i) $V_i \neq \emptyset$, (ii) $V_i \cap V_j = \emptyset$ $(i \neq j)$, and (iii) $V_1 \cup V_2 \cup \cdots \cup V_k = V$ hold. MPP formulation captures a generalization in submodular systems of many NP-hard problems. Previously, the authors gave a simple framework for approximating MPP problems by greedily increasing the size of partition one by one. In this paper, we show that improved factors are available by increasing the size by two. We also provide polynomial time implementations for some MPP problems. Our approach, however, does not help for the variant of increasing the size by three (or more).

5. H. Nagamochi:
"Graph Algorithms for Network Connectivity Problems", J. Operations Research Society of Japan, 47, 199-223, 2004.
概要: This paper surveys the recent progress on the graph algorithms for solving network connectivity problems such as the extreme set problem, the cactus representation problem, the edge-connectivity augmentation problem and the source location

problem. In particular, we show that efficient algorithms for these problems can be designed based on maximum adjacency orderings.

6. H. Nagamochi:
"On 2-Approximation to the Vertex-Connectivity in Graphs", Inst. Electron. Inform. Comm. Eng. Trans. Information and Systems, E88-D, 12-16, 2005.
概要: Given a graph G, we give a fast algorithm for approximating the vertex connectivity κ of G. Our algorithm delivers a minimum vertex cut of G if $\kappa \leq \lfloor \delta/2 \rfloor$, and returns a message "$\kappa > \lfloor \delta/2 \rfloor$" otherwise, where δ denotes the minimum degree of G. The algorithm runs in $O(n^2(1 + \min\{\kappa^2, \kappa\sqrt{n}\}/\delta))$ time and $O(n+m)$ space, where n and m denote the numbers of vertices and edges in G, respectively.

7. L. Zhao, H. Nagamochi, T. Ibaraki:
"A Greedy Splitting Algorithm for Approximating Multiway Partition Problems", Mathematical Programming, 102, 167-183, 2005.
概要: Given a system (V, T, f, k), where V is a finite set, $T \subseteq V$, $f : 2^V \rightarrow \mathbf{R}$ is a submodular function and $k \geq 1$ is an integer, the general *multiway partition problem* (MPP) asks to find a k-partition $\mathcal{P} = \{V_1, V_2, \ldots, V_k\}$ of V that satisfies $V_i \cap T \neq \emptyset$ for all i and minimizes $f(V_1) + f(V_2) + \cdots + f(V_k)$, where $\mathcal{P}$ is a k-partition of V if (i) $V_i \neq \emptyset$, (ii) $V_i \cap V_j = \emptyset$ $(i \neq j)$, and (iii) $V_1 \cup V_2 \cup \cdots \cup V_k = V$ hold. MPP includes NP-hard problems *k-way cut*, *multiterminal cut*, *target split* and their generalizations in hypergraphs. We present a simple and unified framework for developing and analyzing approximation algorithms for MPPs. It starts at $\{V\}$ and greedily increases the size of partition by one in each of $k-1$ iterations. We prove some interesting properties and derive performance guarantees for many MPPs.

8. H. Nagamochi:
"On Computing Minimum (s,t)-Cuts in Digraphs", Information Processing Letters, 93, 231-237, 2005.
概要: Let $D = (V, E)$ be a simple digraph with n vertices and m edges, and s and t be vertices designated as a source and a sink. The currently fastest algorithm that computes a minimum (s,t)-cut in D runs in $O(\min\{\nu, n^{2/3}, m^{1/2}\}m)$ time, where ν is the size of a minimum (s,t)-cut. In this paper, we define the non-eulerianness μ as the sum of $|\#\text{incoming edges at } u - \#\text{outgoing edges at } u|$ over all $u \in V - \{s,t\}$, and prove that a minimum (s,t)-cut in D can be obtained in $O(\min\{m + \nu(\nu+\mu)^{1/2}n,\ (\nu+\mu)^{1/6}nm^{2/3}\})$ time. This outperforms the previous algorithm when D is a dense digraph with small μ.

9. H. Nagamochi:
"On the One-Sided Crossing Minimization in a Bipartite Graph with Large Degrees", Theoretical Computer Science, 332, 417-4467, 2005.
概要: Given a bipartite graph $G = (V, W, E)$, a 2-layered drawing consists of placing nodes in the first node set V on a straight line L_1 and placing nodes in the second node set W on a parallel line L_2. For a given ordering of nodes in W on L_2, the one-sided crossing minimization problem asks to find an ordering of nodes in V on L_1 so that the number of arc crossings is minimized. A well known lower bound LB on the minimum number of crossings is obtained by summing up $\min\{c_{uv}, c_{vu}\}$ over all node pairs $u, v \in V$, where c_{uv} denotes the number of crossings generated by arcs incident to u and v when u precedes v in an ordering. In this paper, we prove that there always exits a solution whose crossing number is at most $(1.2964 + 12/(\delta - 4))LB$

if the minimum degree δ of a node in V is at least 5.

10. H. Nagamochi:
"An Improved Bound on the One-Sided Minimum Crossing Number in Two-Layered Drawings", Discrete and Computational Geometry, 33, 569-591, 2005.
概 要: Given a bipartite graph $G = (V, W, E)$, a 2-layered drawing consists of placing nodes in the first node set V on a straight line L_1 and placing nodes in the second node set W on a parallel line L_2. The one-sided crossing minimization problem asks to find an ordering of nodes in V to be placed on L_1 so that the number of arc crossings is minimized. In this paper, we a 1.4664-approximation algorithm for this problem. This improves the previously best bound 3 due to P. Eades and N. C. Wormald [Edge crossing in drawing bipartite graphs, Algorithmica 11 (1994), 379-403].

11. Y. Karuno, H. Nagamochi:
"Scheduling Vehicles on Trees", Pacific Journal of Optimization, 1, 527-543, 2005.
概要: The vehicle scheduling problem consists of a set of n jobs which are located at different vertices in a given graph. Each job is characterized by a release time, a handling time and a due date (or a deadline). There are m ($1 \leq m \leq n$) identical vehicles on the graph to process the jobs. The problem asks to find a routing schedule of the m vehicles that minimizes a given objective function. Graphs are restricted to paths or trees in some applications, and thus the problem on these graphs has been studied extensively. In this paper, we give a brief review of approximation algorithms to the problem on paths or trees obtained by the previous work. As a closely related topic, we also discuss the subtree cover problem where a given edge-weighted tree with n weighted vertices is partitioned into a number of subtrees so as to minimize a given objective. In this paper, we propose an $O(n^3 \log n)$ time 3-approximation algorithm to the problem of minimizing the number of subtrees, where the weight of each subtree must not exceed a specified capacity.

12. H. Nagamochi:
"A $\frac{4}{3}$-Approximation for the Minimum 2-Local-Vertex-Connectivity Augmentation in a Connected Graph", J. Algorithms, 56, 77-95, 2005.
概要: Given a simple connected graph $G = (V, E)$ and a set R of pairs of vertices, we consider the problem of augmenting G by a smallest set F of new edges such that the resulting graph $G + F$ remains simple and has at least two internally disjoint paths between u and v for each pair $(u, v) \in R$. The problem is known to be NP-hard, and a 3/2-approximation algorithm has been obtained so far. In this paper, we introduce new stronger lower bounds on the optimal value, and propose an $O(|E|+|R|)$ time 4/3-approximation algorithm to the problem.

13. H. Nagamochi:
"Approximating the Minmax Rooted-Subtree Cover Problem", IEICE Transactions, E88-A, 1335-1338, 2005.
概要: Let $G = (V, E)$ be a connected graph such that each edge $e \in E$ and each vertex $v \in V$ are weighted by nonnegative reals $w(e)$ and $h(v)$, respectively. Let r be a vertex designated as a root, and p be a positive integer. The minmax rooted-subtree cover problem (MRSC) asks to find a partition $\mathcal{X} = \{X_1, X_2, \ldots, X_p\}$ of V and a set of p subtrees $T_1, T_2, \ldots, T_p$ such that each T_i contains $X_i \cup \{r\}$ so as to minimize the maximum cost of the subtrees, where the cost of T_i is defined to be the sum of the weights of edges in T_i and the weights of vertices in X_i. Similarly, the minmax

rooted-cycle cover problem (MRCC) asks to find a partition $\mathcal{X} = \{X_1, X_2, \ldots, X_p\}$ of V and a set of p cycles $C_1, C_2, \ldots, C_p$ such that C_i contains $X_i \cup \{r\}$ so as to minimize the maximum cost of the cycles, where the cost of C_i is defined analogously with the MRSC. In this paper, we first propose a $(3 - 2/(p+1))$-approximation algorithm to the MRSC with a general graph G, and we then give a $(6 - 4/(p+1))$-approximation algorithm to the MRCC with a metric (G, w).

14. 石井 利昌, 永持 仁, 高橋 健吾, 西垣 豊, 武田 真人:
"タンク繰りにおける経路探索法", システム制御情報学会誌, 18, 213-221, 2005.
概要: 石油化学事業において, 石油化学プラントを効率的に運用するための生産計画の最適化が要求されている．生産計画の最適化を考慮する際, プラントへ原料をいかに効率よく供給するかは, 重要な課題の一つである．通常, 購入された原料は, まず，港から一時的に複数の貯蔵用タンクに受け入れられ, その後生産計画に従って, プラントへ供給される．この際，配管網上で，港-タンク間，タンク-タンク間，またはタンク-プラント間において，互いに途中の配管を共有しない 2 本以上の経路を見つけることが求められる．本研究では, この配管網上での経路探索問題に対し, 配管網をグラフに置き換えることで，グラフ理論を用いた解法を提案する．我々の解法では，効率的に問題を解くために，要求されうる全ての経路をあらかじめ木状のデータ構造に蓄える．提案アルゴリズムの有効性については, 昭和電工 (株) における事例を基に, 計算機実験により検証する．

15. H. Nagamochi:
"Packing Unit Squares in a Rectangle", The Electronic Journal of Combinatorics, 12, R37, 2005.
概要: For a positive integer N, let $s(N)$ be the side length of the minimum square into which N unit squares can be packed. This paper shows that, for given real numbers $a, b \geq 2$, no more than $ab - (a + 1 - \lceil a \rceil) - (b + 1 - \lceil b \rceil)$ unit squares can be packed in any $a' \times b'$ rectangle R with $a' < a$ and $b' < b$. From this, we can deduce that, for any integer $N \geq 4$, $s(N) \geq \min\{\lceil \sqrt{N} \rceil, \sqrt{N - 2\lfloor \sqrt{N} \rfloor + 1} + 1\}$. In particular, for any integer $n \geq 2$, $s(n^2) = s(n^2 - 1) = s(n^2 - 2) = n$ holds.

16. H. Nagamochi, K. Iwata, T. Ishii:
"A Robust Algorithm for Bisecting a Triconnected Graph with Two Resource Sets", Theoretical Computer Science A, 341, 364-378, 2005.
概要: Given two disjoint subsets T_1 and T_2 of nodes in a 3-connected graph $G = (V, E)$ with a node set V and an arc set E, where $|T_1|$ and $|T_2|$ are even numbers, it is known that V can be partitioned into two sets V_1 and V_2 such that the graphs induced by V_1 and V_2 are both connected and $|V_1 \cap T_j| = |V_2 \cap T_j| = |T_j|/2$ holds for each $j = 1, 2$. An $O(|V|^2 \log |V|)$ time and $O(|V| + |E|)$ space algorithm for finding such a bipartition has been proposed based on a geometric argument, where G is embedded in the plane $\Re^2$ and the node set is bipartitioned by a ham-sandwich cut on the embedding. A naive implementation of the algorithm, however, requires high precision real arithmetic to distinguish two close points in a large set of points on $\Re^2$. In this paper, we propose an $O(|V|^2)$ time and space algorithm to the problem. The new algorithm, which remains to be based on the geometric embedding, can construct a solution purely combinatorially in the sense that it does not require computing actual embedded points in $\Re^2$ and thereby no longer needs to store any real number for embedded points. Although the new algorithm seems to need more space complexity, it can be implemented only with $|V|$ linked lists such that each element stores an integer in $[1, |V|]$.

17. Peter Eades, Qingwen Feng, Xuemin Lin, Hiroshi Nagamochi:
"Straight-line drawing algorithms for hierarchical graphs and clustered graphs", Algorithmica, 44, 1-32, 2006.
概要: Hierarchical graphs and clustered graphs are useful nonclassical graph models for structured relational information. Hierarchical graphs are graphs with layering structures; clustered graphs are graphs with recursive clustering structures. Both have applications in CASE tools, software visualization, and VLSI design. Drawing algorithms for hierarchical graphs have been well investigated. However, the problem of straight-line representation has not been solved completely. In this paper, we answer the question: does every planar hierarchical graph admit a planar straight-line hierarchical drawing? We present an algorithm that constructs such drawings in linear time. Also, we answer a basic question for clustered graphs, that is, does every planar clustered graph admit a planar straight-line drawing with clusters drawn as convex polygons? We provide a method for such drawings based on our algorithm for hierarchical graphs.

18. Toshimasa Ishii, Hiroshi Nagamochi, Toshihide Ibaraki:
"Augmenting a $(k-1)$-vertex-connected multigraph to an ℓ-edge-connected and k-vertex-connected multigraph", Algorithmica, 44, 257-280, 2006.
概要: For two integers $k, \ell > 0$ and an undirected multigraph $G = (V, E)$, we consider the problem of augmenting G by the smallest number of new edges to obtain an ℓ-edge-connected and k-vertex-connected multigraph. In this paper, we show that a $(k-1)$-vertex-connected multigraph G can be made ℓ-edge-connected and k-vertex-connected by adding at most $\max\{\ell+1, 2k-4\}$ surplus edges over the optimum in $O(\min\{k, \sqrt{n}\}kn^3 + n^4)$ time, where $n = |V|$.

19. Hiroshi Nagamochi:
"Increasing the edge-connectivity by contracting a vertex subset", IEICE Transactions on Information and Systems, E89-D, 744-750, 2006.
概要: Let $G = (V, E)$ be an edge weighted graph with n vertices and m edges. For a given integer p with $1 < p < n$, we call a set $X \subseteq V$ of p vertices a p-maximizer if X has a property that the edge-connectivity of the graph obtained by contracting X into a single vertex is no less than that of the graph obtained by contracting any other subset of p vertices. In this paper, we first show that there always exists an ordering $v_1, v_2, \ldots, v_n$ of vertices in V such that, for each $i = 2, 3, \ldots, n-1$, set $\{v_1, v_2, \ldots, v_i\}$ is an i-maximizer. We give an $O(mn + n^2 \log n)$ time algorithm for finding such an ordering and then show an application to the source location problem.

20. Toshimasa Ishii, Shigeyuki Yamamoto, Hiroshi Nagamochi:
"Augmenting forests to meet odd diameter requirements", Discrete Optimization, 3, 2006, 154-164.
概要: Given a graph $G = (V, E)$ and an integer $D \geq 1$, we consider the problem of augmenting G by the smallest number of new edges so that the diameter becomes at most D. It is known that no constant approximation algorithms to this problem with an arbitrary graph G can be obtained unless $P = NP$. For a forest G and an odd $D \geq 3$, it was open whether the problem is approximable within a constant factor. In this paper, we give the first constant factor approximation algorithm to the problem with a forest G and an odd D; our algorithm delivers an 8-approximate solution in $O(|V|^3)$ time. We also show that a 4-

approximate solution to the problem with a forest G and an odd D can be obtained in linear time if the augmented graph is additionally required to be biconnected.

21. Hiroshi Nagamochi, Taizo Kawada:
"Minmax subtree cover problem on cacti", Discrete Applied Mathematics, 154, 1254-1263, 2006.
概要: Let $G = (V, E)$ be a connected graph such that edges and vertices are weighted by nonnegative reals. Let p be a positive integer. The minmax subtree cover problem (MSC) asks to find a pair $(\mathcal{X}, \mathcal{T})$ of a partition $\mathcal{X} = \{X_1, X_2, \ldots, X_p\}$ of V and a set $\mathcal{T}$ of p subtrees $T_1, T_2, \ldots, T_p$, each T_i containing X_i so as to minimize the maximum cost of the subtrees, where the cost of T_i is defined to be the sum of the weights of edges in T_i and the weights of vertices in X_i. In this paper, we propose an $O(p^2 n)$ time $(4-4/(p+1))$-approximation algorithm for the MSC when G is a cactus.

22. 軽野義行, 永持仁, 大嶋芳行:
"食品の袋詰め最適化問題に対する動的計画法", 日本機械学会論文集 (C 編), 72, 1390-1397, 2006.
概要: In this paper, we deal with a food packing problem in an automated food packing system. The packing system has n hoppers, where an item is thrown into each hopper. An integer weight w_i and a priority γ_i are associated with each item i, where any w_i is assumed to be bounded by an integer w_{max}. Given a set I of n items in the hoppers, the packing system chooses a subset I' $(\subseteq I)$ of items, and puts them into a package with a specified target weight B. After that, the packing system updates the set I by taking the union of the remaining items in $I - I'$ and new items thrown into empty hoppers. Repeating these operations, it makes a large number of packages one by one. In the packing system, an item may be left in a hopper for a long time until it is chosen. The priority γ_i is introduced to avoid such a situation, if possible. The packing problem is formulated as a lexicographic bi-criteria discrete optimization problem, where the first objective is to minimize $\sum_{i \in I'} w_i$ such that $\sum_{i \in I'} w_i \geq B$ must be satisfied, and the second is to maximize $\sum_{i \in I'} \gamma_i$. In this paper, we propose an $O(n^2 w_{max})$ time algorithm based on dynamic programming to the packing problem. We also examine the performance of the proposed approach by means of numerical experiments, and report the results.

23. Hiroshi Nagamochi:
"A fast edge-splitting algorithm in edge-weighted graphs", Inst. Electron. Inform. Comm. Eng. Trans. Fundamentals, E89-A, 1263-1268, 2006.
概要: Let H be a graph with a designated vertex s, where edges are weighted by nonnegative reals. Splitting edges $e = \{u, s\}$ and $e' = \{s, v\}$ at s is an operation that reduces the weight of each of e and e' by a real $\delta > 0$ while increasing the weight of edge $\{u, v\}$ by δ. It is known that all edges incident to s can be split off while preserving the edge-connectivity of H and that such a complete splitting is used to solve many connectivity problems. In this paper, we give an $O(mn + n^2 \log n)$ time algorithm for finding a complete splitting in a graph with n vertices and m edges.

24. Hiroshi Nagamochi:
"Sparse connectivity certificates via MA orderings in graphs", Discrete Applied Mathematics, 154, 2411-2417, 2006.
概要: For an undirected multigraph $G = (V, E)$, let α be a positive integer weight function on V. For a positive integer k, G is called (k, α)-connected if any two vertices $u, v \in V$ remain connected after removal of any pair (Z, E') of a vertex sub-

set $Z \subseteq V - \{u, v\}$ and an edge subset $E' \subseteq E$ such that $\sum_{v \in Z} \alpha(v) + |E'| < k$. The (k, α)-connectivity is an extension of several common generalizations of edge-connectivity and vertex-connectivity. Given a (k, α)-connected graph G, we show that a (k, α)-connected spanning subgraph of G with $O(k|V|)$ edges can be found in linear time by using MA orderings. We also show that properties on removal cycles and preservation of minimum cuts can be extended in the (k, α)-connectivity.

25. Hiro Ito, Hiroshi Nagamochi:
"Two equivalent measures on weighted hypergraphs", Discrete Applied Mathematics, 154, 2330-2334, 2006.
概要: Let H be a hypergraph with a node set $N = \{0, 1, \ldots, n-1\}$. Given an n-gon P with a vertex set $\{x_0, x_1, \ldots, x_{n-1}\}$ in the plane, we define a projection of H on P by mapping each node $i \in N$ to the vertex x_i and drawing each hyperedge e in H by the convex hull of the vertices x_j such that j is an end node of e, where we say that e covers every point p in the interior of the convex hull. We say that H *covers* P if any point in the interior of P is covered by at least one hyperedge of H. In this paper, we consider the problem of determining whether or not a given hypergraph H with an ordered node set covers *every* convex polygon and give a polynomial time algorithm to the problem. We also consider the problem of computing the smallest thickness of a point p (i.e., the smallest number of hyperedges that cover p) in a projection of H on all n-gons P, and solve the problem by a reduction to the maximum flow problem.

26. Hiroshi Nagamochi:
"Packing soft rectangles", International Journal of Foundations of Computer Science, 17, 1165-1178, 2006.
概要: Let R be a rectangle with given area $a(R)$, height $h(R)$ and width $w(R)$, and $r_1, r_2, \ldots, r_n$ be n soft rectangles, where we mean by a soft rectangle a rectangle r whose area $a(r)$ is prescribed but whose aspect ratio $\rho(r)$ is allowed to be changed. In this paper, we consider the problem of packing n soft rectangles $r_1, r_2, \ldots, r_n$ into R. We prove that, if $a(R) \geq \sum_{1 \leq i \leq n} a(r_i) + 0.10103 a_{max}$ and $a_{max} \leq 3(\min\{h(R), w(R)\})^2$ hold for $a_{max} = \max_{1 \leq i \leq n} a(r_i)$, then these n soft rectangles can be packed inside R so that the aspect ratio of each rectangle r_i is at most 3.

27. Yoko Kamidoi, Noriyoshi Yoshida, Hiroshi Nagamochi:
"A deterministic algorithm for finding all minimum k-way cuts", SIAM J. Computing, 36, 943-955, 2006.
概要: Let $G = (V, E)$ be an edge-weighted undirected graph with n vertices and m edges. We present a deterministic algorithm to compute a minimum k-way cut of G for a given k. Our algorithm is a divide-and-conquer method based on a procedure that reduces an instance of the minimum k-way cut problem to $O(n^{2k-5})$ instances of the minimum $(\lfloor (k + \sqrt{k})/2 \rfloor + 1)$-way cut problem, and can be implemented to run in $O(n^{4k/(1-1.71/\sqrt{k})-31})$ time. With a slight modification, the algorithm can find all minimum k-way cuts in $O(n^{4k/(1-1.71/\sqrt{k})-16})$ time.

28. Hiroshi Nagamochi, Yuusuke Abe:
"An approximation algorithm for dissecting a rectangle into rectangles with specified areas", Discrete Applied Mathematics, 155, 523-537, 2007.
概要: Given a rectangle R with area α and a set of n positive reals $A = \{a_1, a_2, \ldots, a_n\}$ with $\sum_{a_i \in A} a_i = \alpha$, we consider the problem of dissecting R into n rectangles r_i with area a_i $(i = 1, 2, \ldots, n)$ so that the

set $\mathcal{R}$ of resulting rectangles minimizes an objective function such as the sum of the perimeters of the rectangles in $\mathcal{R}$, the maximum perimeter of the rectangles in $\mathcal{R}$, and the maximum aspect ratio of the rectangles in $\mathcal{R}$, where we call the problems with these objective functions PERI-SUM, PERI-MAX and ASPECT-RATIO, respectively. We propose an $O(n \log n)$ time algorithm that finds a dissection $\mathcal{R}$ of R that is a 1.25-approximate solution to PERI-SUM, a $\frac{2}{\sqrt{3}}$-approximate solution to PERI-MAX, and has an aspect ratio at most $\max\{\rho(R), 3, 1 + \max_{i=1,\ldots,n-1} \frac{a_{i+1}}{a_i}\}$, where $\rho(R)$ denotes the aspect ratio of R.

29. Hiroshi Nagamochi, Yoko Kamidoi:
"Minimum cost subpartitions in graphs", Information Processing Letters, 102, 79-84, 2007.
概要: Given an edge-weighted graph $G = (V, E)$, a subset $S \subseteq V$, an integer $k \geq 1$ and a real $b \geq 0$, the minimum subpartition problem asks to find a family of k nonempty disjoint subsets $X_1, X_2, \ldots, X_k \subseteq S$ with $d(X_i) \leq b$, $1 \leq i \leq k$ so as to minimize $\sum_{1 \leq i \leq k} d(X_i)$, where $d(X)$ denotes the total weight of edges between X and $V - X$. In this paper, we show that the minimum subpartition problem can be solved in $O(mn + n^2 \log n)$ time. The result is then applied to the minimum k-way cut problem and the graph strength problem to improve the previous best time bounds of 2-approximation algorithms for these problems to $O(mn + n^2 \log n)$.

30. Takuro Fukunaga, Hiroshi Nagamochi:
"Approximating minimum cost multigraphs of specified edge-connectivity under degree bounds", J. Operations Research Society of Japan, 50, pp. 339–349, 2007.
概要: In this paper, we consider the problem of constructing a minimum cost graph with a specified edge-connectivity under a degree constraint. For a set V of vertices, let $r : \binom{V}{2} \to \mathbb{Z}_+$ be a connectivity demand, $a : V \to \mathbb{Z}_+$ be a lower degree bound, $b : V \to \mathbb{Z}_+$ be an upper degree bound, and $c : \binom{V}{2} \to \mathbb{Q}_+$ be a metric edge cost. The problem (V, r, a, b, c) asks to find a minimum cost multigraph $G = (V, E)$ with no self-loops such that $\lambda(u, v) \geq r(u, v)$ holds for each vertex pair $u, v \in V$ and $a(v) \leq d(v) \leq b(v)$ holds for each vertex $v \in V$, where $\lambda(u, v)$ (resp., $d(v)$) denotes the local-edge-connectivity between u and v (resp., the degree of v) in G. We reveal several conditions on functions r, a, b and c for which the above problem admits a constant-factor approximation algorithm. For example, we give a $(2 + 2/k)$-approximation algorithm to (V, r, a, b, c) with $r(u, v) \geq 2$, $u, v \in V$ and a uniform $b(v)$, $v \in V$, where $k = \min_{u,v \in V} r(u, v)$. To design the algorithms in this paper, we derive new results on splitting and detachment, which are graph transformations to split vertices into several copies of them while preserving edge-connectivity.

31. Hiroshi Nagamochi, Katsutoshi Kuroya:
"Drawing c-planar biconnected clustered graphs", Discrete Applied Mathematics, 155, pp. 1155–1174, 2007.
概要: In a graph, a cluster is a set of vertices, and two clusters are said to be non-intersecting if they are disjoint or one of them is contained in the other. A clustered graph C consists of a graph G and a set of non-intersecting clusters. In this paper, we assume that C has a compound planar drawing and each cluster induces a biconnected subgraph. Then we show that such a clustered graph admits a drawing in the plane such that (i) edges are drawn as straight line segments with no edge crossing, and (ii) the boundary of the biconnected subgraph induced by each cluster is a convex polygon.

32. Hiroshi Nagamochi, Kohei Okada:
"Approximating the minmax rooted-tree cover in a tree", Information Processing Letters, 104, pp. 173–178, 2007.
概要: Given an edge-weighted rooted tree T and a positive integer p ($\leq n$), where n is the number of vertices in T, we cover all vertices in T by a set of p subtrees each of which contains the root r of T. The minmax rooted-tree cover problem asks to find such a set of p subtrees so as to minimize the maximum weight of the subtrees in the set. In this paper, we propose an $O(n)$ time $(2+\varepsilon)$-approximation algorithm to the problem, where $\varepsilon > 0$ is a prescribed constant.

33. Hiroshi Nagamochi:
"Computing a minimum cut in a graph with dynamic edges incident to a designated vertex", Inst. Electron. Inform. Comm. Eng. Trans. Fundamentals, E90-D, pp. 428–431, 2007.
概要: We consider an edge-weighted graph G with a designated vertex v_0 such that weights of edges incident to v_0 may increase or decrease. We show that, with an $O(mn+n^2 \log n)$ time preprocessing, a minimum cut of the current G can be computed in $O(\log n)$ time per update of weight of any edge $\{v_0, u\}$.

34. Takuro Fukunaga, Hiroshi Nagamochi:
"Approximating a generalization of metric TSP", Inst. Electron. Inform. Comm. Eng. Trans. Fundamentals, E90-D, pp. 432–439, 2007.
概要: We consider a problem for constructing a minimum cost r-edge-connected multigraph in which degree $d(v)$ of each vertex $v \in V$ is specified. In this paper, we propose a 3-approximation algorithm for this problem under the assumption that edge cost is metric, $r(u,v) \in \{1,2\}$ for each $u, v \in V$, and $d(v) \geq 2$ for each $v \in V$. This problem is a generalization of metric TSP. We also propose an approximation algorithm for the digraph version of the problem.

35. Takuro Fukunaga, Hiroshi Nagamochi:
"Generalizing the induced matching by edge capacity constraints", Discrete Optimization, 4, pp. 198–205, 2007.
概要: Given an edge-weighted graph, the induced matching problem is an edge packing problem, which asks to find a maximum weight edge set such that every edge in the graph is adjacent to at most one edge in the set. In this paper, we generalize this problem by introducing edge capacities and propose an approximation algorithm to the problem. The analysis of this algorithm is based on a relationship between two polytopes for an LP relaxation of the above problem and the capacitated b-matching problem.

36. Ehab Morsy, Hiroshi Nagamochi:
"Approximation algorithms for multicast routings in a network with multi-sources", Inst. Electron. Inform. Comm. Eng. Trans. Fundamentals, E90-A, pp. 900–906, 2007.
概要: We consider the capacitated multi-source multicast tree routing problem (CMMTR) in an undirected graph $G = (V, E)$ with a vertex set V, an edge set E and an edge weight $w(e) \geq 0$, $e \in E$. We are given a source set $S \subseteq V$ with a weight $g(e) \geq 0$, $e \in S$, a terminal set $M \subseteq V - S$ with a demand function $q : M \to R^+$, and a real number $\kappa > 0$, where $g(s)$ means the cost for opening a vertex $s \in S$ as a source in a multicast tree. Then the CMMTR asks to find a subset $S' \subseteq S$, a partition $\{Z_1, Z_2, ..., Z_\ell\}$ of M, and a set of subtrees $T_1, T_2, ..., T_\ell$ of G such that, for each i, $\sum_{t \in Z_i} q(t) \leq \kappa$ and T_i spans $Z_i \cup \{s\}$ for some $s \in S'$. The objective is

to minimize the sum of the opening cost of S' and the constructing cost of $\{T_i\}$, i.e., $\sum_{s\in S'} g(s) + \sum_{i=1}^{\ell} w(T_i)$, where $w(T_i)$ denotes the sum of weights of all edges in T_i. In this paper, we propose a $(2\rho_{\mathrm{UFL}} + \rho_{\mathrm{ST}})$-approximation algorithm to the CMMTR, where ρ_{UFL} and ρ_{ST} are the best achievable approximation ratios for the uncapacitated facility location and Steiner tree problems, respectively. When all terminals have unit demands, we give a $((3/2)\rho_{\mathrm{UFL}} + (4/3)\rho_{\mathrm{ST}})$-approximation algorithm.

37. Toshimasa Ishii, Hitoshi Fujita, Hiroshi Nagamochi:
"Minimum cost source location problem with local 3-vertex-connectivity requirements", Theoretical Computer Science A, 372, pp. 81–93, 2007.
概要: Let $G = (V, E)$ be a simple undirected graph with a set V of vertices and a set E of edges. Each vertex $v \in V$ has a demand $d(v) \in Z_+$ and a cost $c(v) \in R_+$, where Z_+ and R_+ denote the set of nonnegative integers and the set of nonnegative reals, respectively. The source location problem with vertex-connectivity in a given graph G asks to find a set S of vertices minimizing $\sum_{v\in S} c(v)$ such that there are at least $d(v)$ pairwise vertex-disjoint paths from S to v for each vertex $v \in V - S$. It is known that if there exists a vertex $v \in V$ with $d(v) \geq 4$, then the problem is NP-hard even in the case where every vertex has a uniform cost. In this paper, we show that the problem can be solved in polynomial time.

38. Yoshitaka Nakao, Hiroshi Nagamochi:
"A DP-based heuristic algorithm for the discrete split delivery vehicle routing problem", Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 1, pp. 217–226, 2007.
概要: We propose a fast and effective algorithm for a discrete-type split delivery vehicle routing problem. The feature of this problem is that a demand for each customer is large and each demand consists of a set of items whose sizes are various. A demand of a customer can be serviced by more than one vehicle, while each item is serviced by exactly one vehicle. We propose a DP-based construction algorithm to solve the problem. The effectiveness of our algorithm is supported by elaborated route evaluation scheme to select a route. We report computational results for real-world instances and also artificial instances. The results show that our algorithm is fast and highly effective comparing to representative construction algorithms and representative improvement heuristics for the VRP and the SDVRP algorithm.

39. André Berger, Takuro Fukunaga, Hiroshi Nagamochi, Ojas Parekh:
"Approximability of the capacitated b-edge dominating set problem", Theoretical Computer Science A, 385, pp. 202–213, 2007.
概要: In this paper, we discuss the approximability of the capacitated b-edge dominating set problem, which generalizes the edge dominating set problem by introducing capacities and demands on the edges. We present an approximation algorithm for this problem and show that it achieves a factor of 8/3 for general graphs and a factor of 2 for bipartite graphs. Moreover, we discuss the relationships of the edge dominating set problem and the vertex cover problem. The results show, that improving the approximation factor beyond 8/3 using our approach of adding valid inequalities to a natural linear programming relaxation is as hard as improving the approximation factor for vertex cover beyond 2. We also introduce some useful related problems and present approximation algorithms for them.

40. Kouji Hirata, Takahiro Matsuda, Hiroshi Nagamochi, Tetsuya Takine:
"Contention-free λ-planes in optically burst-switched WDM networks", IEICE Transactions on Communications, E90-B, pp. 2524-2531, 2007.
概要: This paper proposes a contention-free burst scheduling scheme in optically burst-switched WDM networks. We construct contention-free wavelength planes (λ-planes) by assigning dedicated wavelengths to each ingress node. Bursts are transmitted to their egress nodes on λ-planes, along routes forming a spanning tree. As a result, contention at intermediate core nodes is completely eliminated, and contention at ingress nodes is resolved by means of electric buffer. This paper develops a spanning tree construction algorithm, aiming at balancing input loads among output ports at each ingress node. Further a wavelength assignment algorithm is proposed, which is based on the amount of traffic lost at ingress nodes. We show that the proposed scheme can decrease the burst loss probability drastically, even if traffic intensities at ingress nodes are different.

41. Toshimasa Ishii, Kengo Iwata, Hiroshi Nagamochi:
"Bisecting a four-connected graph with three resource sets", Discrete Applied Mathematics, 155, pp. 1441-1450, 2007.
概要: Let $G = (V, E)$ be an undirected graph with a node set V and an arc set E. G has k pairwise disjoint subsets $T_1, T_2, \ldots, T_k$ of nodes, called resource sets, where $|T_i|$ is even for each i. The partition problem with k resource sets asks to find a partition V_1 and V_2 of the node set V such that the graphs induced by V_1 and V_2 are both connected and $|V_1 \cap T_i| = |V_2 \cap T_i| = |T_i|/2$ holds for each $i = 1, 2, \ldots, k$. The problem of testing whether such a bisection exists is known to be NP-hard even in the case of $k = 1$. On the other hand, it is known that if G is $(k+1)$-connected for $k = 1, 2$, then a bisection exists for any given resource sets, and it has been conjectured that for $k \geq 3$, a $(k+1)$-connected graph admits a bisection. In this paper, we show that for $k = 3$, the conjecture does not hold, while if G is 4-connected and has K_4 as its subgraph, then a bisection exists and it can be found in $O(|V|^3 \log |V|)$ time. Moreover, we show that for an arc-version of the problem, the $(k+1)$-edge-connectivity suffices for $k = 1, 2, 3$.

42. Toshimasa Ishii, Hitoshi Fujita, Hiroshi Nagamochi:
"Source location problem with local 3-vertex-connectivity requirements", Discrete Applied Mathematics, 155 , pp. 2523–2538 , 2007.
概要: Let $G = (V, E)$ be a simple undirected graph with a set V of vertices and a set E of edges. Each vertex vV has an integer valued demand $d(v) \geq 0$. The source location problem with vertex-connectivity requirements in a given graph G asks to find a set S of vertices with the minimum cardinality such that there are at least $d(v)$ vertex-disjoint paths between S and each vertex $v \in V - S$. In this paper, we show that the problem with $d(v) \leq 3$, $v \in V$ can be solved in linear time. Moreover, we show that in the case where $d(v) \geq 4$ for some vertex $v \in V$, the problem is NP-hard.

43. Ryuhei Uehara, Yushi Uno:
"On Computing Longest Paths in Small Graph Classes", International Journal of Foundations of Computer Science, 18 (5), 911–930, 2007.
概要: The longest path problem is the one that finds a longest path in a given graph. While the graph classes in which the Hamiltonian path problem can be solved ef-

ficiently are widely investigated, few graph classes are known to be solved efficiently for the longest path problem. Among those, for trees, a simple linear time algorithm for the longest path problem is known. We first generalize the algorithm, and show that the longest path problem can be solved efficiently for some tree-like graph classes by this approach. We next propose two new graph classes that have natural interval representations, and show that the longest path problem can be solved efficiently on these classes.

44. Yushi Uno, Yoshinobu Ota, Akio Uemichi:
"Web Structure Mining by Isolated Cliques", IEICE Transactions on Information and Systems, E90-D (12), 1998–2006, 2007.
概要: The link structure of the Web is generally viewed as the webgraph. Web structure mining is a research area that mainly aims to find hidden communities by focusing on the webgraph, and communities or their cores are supposed to constitute dense subgraphs. Therefore, structure mining can actually be realized by enumerating such substructures, and Kleinberg's biclique model is well-known among them. In this paper, we some candidate substructures, including conventional bicliques, and attempt to find useful information from the real web data. Especially, we newly exploit isolated cliques for our experiments of structure mining. As a result, we discovered that isolated cliques that lie over multiple domains can stand for useful communities, which implies the validity of isolated clique as a candidate substructure for structure mining. On the other hand, we also observed that most of isolated cliques on the Web correspond to menu structures and are inherent in single domains, and that isolated cliques can be quite useful for detecting harmful link farms.

45. Yota Otachi, Yoshio Okamoto, Koichi Yamazaki:
"Relationships between the class of unit grid intersection graphs and other classes of bipartite graphs", Discrete Applied Mathematics, 155, 2383-2390, 2007.
概要: We show that the class of unit grid intersection graphs properly includes both of the classes of interval bigraphs and of P_6-free chordal bipartite graphs. We also demonstrate that the classes of unit grid intersection graphs and of chordal bipartite graphs are incomparable.

46. Yoshiyuki Karuno, Hiroshi Nagamochi, Jun Uchida:
"Selective vehicle scheduling on paths with a due date involving criterion (in Japanese)", 日本機械学会論文集 (C 編), 73, pp. 911–918, 2007.
概要: In this paper, we consider a selective scheduling problem of minimizing a due date involving criterion for a single uncapacitated vehicle. Let $G = (V, E)$ be a path with a set $V = \{v_i \mid i = 1, 2, \ldots, n\}$ of vertices and a set $E = \{\{v_i, v_{i+1}\} \mid i = 1, 2, \ldots, n-1\}$ of edges. The vehicle is initially situated at v_1. There is a job i at each vertex $v_i \in V$, which has its own handling time h_i and due date d_i. Travel times $w_{i,i+1}$ of the vehicle are associated with edges $\{v_i, v_{i+1}\} \in E$. A schedule of the vehicle is called *1-way* if it visits every edge $\{v_i, v_{i+1}\}$ exactly once, that is, it simply moves from v_1 to v_n on G. In this paper, the vehicle is assumed to move according to a 1-way schedule. But a choice still remains for each job whether it is processed at the time of the visit, since a certain penalty α (≥ 1) is required if some job is not processed by the vehicle. If a processed job i is completed by its due date d_i, no penalty is required. Othewise, the unit

penalty is paid. The objective is to minimize the total penalty over all n jobs. We show that, if α is given as a positive integer, the selective vehicle scheduling problem can be solved in polynomial time by a dynamic programming approach.

47. Yoshiyuki Karuno, Hiroshi Nagamochi, Xiaoming Wang:
"Bi-criteria food packing by dynamic programming", Journal of the Operations Research Society of Japan, 50, pp. 376–389, 2007.
概要: In this paper, we deal with a certain type of automated food packing system with n hoppers. The system repeats throwing some amount of foods into empty hoppers to make all hoppers full of foods, and collecting the foods from several hoppers to pack them into a single package. We treat foods thrown into each hopper as an item i with an integer weight w_i. Given a set I of n items in the hoppers, the packing system chooses a subset I' ($\subseteq I$) of items, and puts them into a package so that the total weight of items is at least a specified target weight B. The packing system then throws new items into the empty hoppers, and the set I is updated to be the union of the remaining items in $I-I'$ and the new items. Repeating such packing operations, it produces a large number of packages one by one. In the packing system, an item may stay for a long time in some hopper until it is chosen for packing. To avoid such a situation, we introduce a priority γ_i for each item i, and formulate the problem of choosing a subset I' as a bi-criteria discrete optimization problem in which one objective is to minimize $\sum_{i\in I'} w_i$ such that $\sum_{i\in I'} w_i \geq B$ must be satisfied, and the other is to maximize $\sum_{i\in I'} \gamma_i$. In this paper, we propose an $O(n^2 w_{max})$ time algorithm based on dynamic programming to obtain a nondominated solution, where w_{max} is an upper bound on the weight of an item. We also report the results on computational experiments conducted to examine the performance of the proposed approach.

48. Yushi Uno, Yoshinobu Ota, Akio Uemichi:
"Web Structure Mining by Isolated Stars", Lecture Notes in Computer Science, 4936, 149–156, 2008.
概要: The link structure of the Web is generally viewed as the webgraph, and web structure mining is a research area that mainly aims to find hidden communities in the Web by focusing on the webgraph. In this paper, we identify a common frequent substructure by observing the webgraph, and newly define it as an isolated star (i-star). We propose an efficient enumeration algorithm of i-stars, and try structure mining by enumerating them from the real web data. As a result, we observed that most of i-stars correspond to index structures in single domains, while some of them are verified to stand for useful communities, which implies the validity of i-stars as candidate substructure for structure mining. We also suggest that the notion of i-star can be a helpful tool for preprocessing the webgraph to have its succinct representation for further structure mining.

49. Hiroshi Nagamochi, Takaharu Ohnishi:
"Approximating a vehicle scheduling problem with time windows and handling times", Theoretical Computer Science A, (掲載決定).
概要: In this paper, we study a problem of finding a vehicle scheduling to process a set of n jobs which are located in an asymmetric metric space. Each job j has a positive handling time $h(j)$, a time window $[r(j), d(j)]$, and a benefit $b(j)$. We consider the following two problems: MAX-VSP asks to find a schedule for a single vehicle to process a subset of jobs with the maximum benefit; The MIN-VSP asks to

find a schedule to process all given jobs with the minimum number of vehicles. We first give an $O(\rho n^{3+\gamma})$ time algorithm that delivers a 2-approximate solution to MAX-VSP, where $\rho = \max_{j,j'}(d(j) - r(j))/h(j')$ and γ is the maximum number of jobs that can be processed by the vehicle after processing a job j and before visiting the processed job j again by deadline $d(j)$. We then present an $O(\rho n^{4+\gamma})$ time algorithm that delivers a $2H(n)$-approximate solution to MIN-VSP, where $H(n)$ is the nth harmonic number.

50. Seok-Hee Hong, Hiroshi Nagamochi:
"Convex drawings of graphs with non-convex boundary constraints", Discrete Applied Mathematics, (掲載決定).
概要: In this paper, we study a new problem of convex drawing of planar graphs with *non-convex* boundary constraints, and call a drawing in which every inner facial cycle is drawn as a convex polygon an *inner-convex drawing*. It is proved that every triconnected plane graph with the boundary fixed with a star-shaped polygon whose kernel has a positive area admits an inner-convex drawing. We also prove that every four-connected plane graph whose boundary is fixed with a crown-shaped polygon admits an inner-convex drawing. We present linear time algorithms to construct inner-convex drawings for both cases.

51. Ehab Morsy, Hiroshi Nagamochi:
"An improved approximation algorithm for capacitated multicast routings in networks", Theoretical Computer Science A, (掲載決定).
概要: Let $G = (V, E)$ be a connected graph such that each edge $e \in E$ is weighted by nonnegative real $w(e)$. Let s be a vertex designated as a source, k be a positive integer, and $S \subseteq V$ be a set of terminals. The *capacitated multicast tree routing problem* (CMTR) asks for a minimum Steiner tree, rooted at s, spanning the vertices in $S \cup \{s\}$, in which the number of terminals in each subtree hanging off s is at most k. In this paper, we propose a $(3/2 + (4/3)\rho)$-approximation algorithm to the CMTR, where ρ is the best achievable approximation ratio for the Steiner tree problem.

52. Morihiro Hayashida, Tatsuya Akutsu, Hiroshi Nagamochi:
"A clustering method for analysis of sequence similarity networks of proteins using maximal components of graphs", IPSJ Transactions on Bioinformatics, (掲載決定).
概要: This paper proposes a novel clustering method for analyzing biological networks. In this method, each biological network is treated as an undirected graph and edges are weighted based on similarities of nodes. Then, maximal components, which are defined based on edge connectivity, are computed and the nodes are partitioned into clusters by selecting disjoint maximal components. The proposed method was applied to clustering of protein sequences and was compared with conventional clustering methods. The obtained clusters were evaluated using P-values for GO (GeneOntology) terms. The average P-values for the proposed method were better than those for other methods.

53. Yota Otachi, Koichi Yamazaki:
"A lower bound for the vertex boundary-width of complete k-ary trees", Discrete Mathematics, (掲載予定).
概要: *Vertex Boundary-Width Problem* (for short VBWP) is to determine the value of $vbw(G) = \max_{1 \le \ell \le |V|} \min_{S \subseteq V, |S| = \ell} |N(S)|$ for a given graph $G = (V, E)$, where $N(S) = \{v \notin S \mid v \text{ is a neighbor of } u \text{ for some } u \in S\}$. In this paper, we give a lower bound for vertex boundary-width of complete k-ary trees.

54. Tetsuya Ishizeki, Yota Otachi, Koichi Yamazaki:
"An improved algorithm for longest induced path problem on k-chordal graphs", Discrete Applied Mathematics, (掲載予定).
概要: In [F.Gavril, Algorithms for maximum weight induced paths, Information Processing Letters 81 (2002) 203-208], Gavril showed that the length of a longest induced path for graphs having no induced cycles on more than k vertices can be computed in $O(n^k m)$ time where n and m denote the number of vertices and edges, respectively. In this paper, we present an $O(n^k)$ time algorithm for the same problem.

研究会等

1. H. Nagamochi and T. Kawada:
"Approximating the minmax subtree cover problem in a cactus", The 15th Annual International Symposium on Algorithms and Computation (ISAAC2004), Lecture Notes in Computer Science, 3341, 705-716, December 2004.
概要: Let $G = (V, E)$ be a connected graph such that edges and vertices are weighted by nonnegative reals. Let p be a positive integer. The minmax subtree cover problem (MSC) asks to find a partition $\mathcal{X} = \{X_1, X_2, \ldots, X_p\}$ of V and a set of p subtrees $T_1, T_2, \ldots, T_p$, each T_i containing X_i so as to minimize the maximum cost of the subtrees, where the cost of T_i is defined to be the sum of the weights of edges in T_i and the weights of vertices in X_i. In this paper, we propose an $O(p^2 n)$ time $(4 - 4/(p+1))$-approximation algorithm for the MSC when G is a cactus. This is the first constant factor approximation algorithm for the MSC.

2. T. Ishii, H. Fujita, H. Nagamochi:
"Minimum cost source location problem with local 3-vertex-connectivity requirements", Computing: The Australasian Theory Symposium (CATS) Australasian Computer Science Week, 97-105, 30 January - 3 February, 2005.
概要: Let $G = (V, E)$ be a simple undirected graph with a set V of vertices and a set E of edges. Each vertex $v \in V$ has a demand $d(v) \in Z_+$ and a cost $c(v) \in R_+$, where Z_+ and R_+ denote the set of nonnegative integers and the set of nonnegative reals, respectively. The source location problem with vertex-connectivity requirements in a given graph G asks to find a set S of vertices minimizing $\sum_{v \in S} c(v)$ such that there are at least $d(v)$ pairwise vertex-disjoint paths from S to v for each vertex $v \in V - S$. It is known that if there exists a vertex $v \in V$ with $d(v) \geq 4$, then the problem is NP-hard even in the case where every vertex has a uniform cost. In this paper, we show that the problem can be solved in $O(|V|^4 (\log |V|)^2)$ time if $d(v) \leq 3$ holds for each vertex $v \in V$.

3. Ryuhei Uehara, Yushi Uno:
"Laminar Structure of Ptolemaic Graphs with Applications", Lecture Notes in Computer Science, Springer, 3827, 186–195, 2005.
概要: Ptolemaic graphs are graphs that satisfy the Ptolemaic inequality for any four vertices. The graph class coincides with the intersection of chordal graphs and distance hereditary graphs. The graph class can also be seen as a natural generalization of block graphs (and hence trees). In this paper, a new characterization of ptolemaic graphs is presented. It is a laminar structure of cliques, which leads us to a canonical tree representation. The tree representation gives a simple intersection model for ptolemaic graphs. The tree representation is constructed in linear time from a perfect elimination ordering obtained by the

lexicographic breadth first search. Hence the recognition and the graph isomorphism for ptolemaic graphs can be solved in linear time. Using the tree representation, we also give an efficient algorithm for the Hamiltonian cycle problem.

4. T. Ishii, K. Iwata, H. Nagamochi:
"Bisecting a Four-Connected Graph with Three Resource Sets", 4th Japanese-Hungarian Symposium on Discrete Mathematics and Its Applications, 107-113, 2005.
概要: Let $G = (V, E)$ be an undirected graph with a node set V and an arc set E. G has k pairwise disjoint subsets $T_1, T_2, \ldots, T_k$ of nodes, called resource sets, where $|T_i|$ is even for each i. The partition problem with k resource sets asks to find a partition V_1 and V_2 of the node set V such that the graphs induced by V_1 and V_2 are both connected and $|V_1 \cap T_i| = |V_2 \cap T_i| = |T_i|/2$ holds for each $i = 1, 2, \ldots, k$. The problem of testing whether such a bisection exists is known to be NP-hard even in the case of $k = 1$. On the other hand, it is known that if G is $(k+1)$-connected for $k = 1, 2$, then a bisection exists for any given resource sets, and it has been conjectured that for $k \geq 3$, a $(k + 1)$-connected graph admits a bisection. In this paper, we show that for $k = 3$, the conjecture does not hold, while if G is 4-connected and has K_4 as its subgraph, then a bisection exists and it can be found in $O(|V|^3 \log |V|)$ time.

5. K. Haraguchi, H. Nagamochi, T. Ibaraki:
"Compactness of Classifiers by Iterative Compositions of Features", 4th Japanese-Hungarian Symposium on Discrete Mathematics and Its Applications, 92-98, 2005.
概要: Classification is one of the most important issues in machine learning. In an n-dimensional binary space $\{0, 1\}^n$, we are given a set of examples $x \in \{0, 1\}^n$, where each example x is labeled as $y(x)$ by a Boolean function $y : \{0, 1\}^n \mapsto \{0, 1\}$, called an oracle, and the classification problem asks to find a classifier c, a Boolean function $c : \{0, 1\}^n \mapsto \{0, 1\}$ that is (approximately) identical to y. We assume that y is a compact concept in the spirit of Occam's Razor. For constructing classifiers on computers, we use a representation model L which provides forms for classifiers that can be implemented on computers, where the complexity of representation is determined as its length on a computer. From our assumption on oracles, we wish to construct a classifier c with small complexity. In this paper, we discuss two representation models, iteratively composed features and decision trees, and prove that, for any classifier c, the former has a representation which is at least as compact as that by the latter.

6. T. Fukunaga, H. Nagamochi:
"Edge Packing Problem with Edge Capacity Constraints", 4th Japanese-Hungarian Symposium on Discrete Mathematics and Its Applications, 69-75, 2005.
概要: The edge dominating set problem is one of the fundamental covering problems in the field of combinatorial optimization. In this paper, we consider a packing version of this problem. Given a graph with an edge cost, the problem asks to find a maximum cost edge set such that each edge in the graph is adjacent to at most one edge in the set. We show inapproximability of the problem by a reduction from the independent set problem. We also consider a capacitated case of this problem and propose an approximation algorithm based on a relation between two polytopes for an LP relaxation of the problem and the capacitated b-matching problem.

7. Y. Kamidoi, N. Yoshida, H. Nagamochi:
"A Deterministic Algorithm for Finding All Minimum k-Way Cuts", 4th Japanese-

Hungarian Symposium on Discrete Mathematics and Its Applications, 224-233, 2005.
概要: Let $G = (V, E)$ be an edge-weighted undirected graph with n vertices and m edges. We present a deterministic algorithm to compute a minimum k-way cut of G for a given k $(5 \leq k \leq n-1)$. Our algorithm is a divide-and-conquer method which consists of a procedure that reduces an instance of the minimum k-way cut problem to $O(n^{2k-5})$ instances of the minimum $(\lfloor (k+\sqrt{k})/2 \rfloor + 1)$-way cut problem, and can be implemented to run in $O(n^{4k/(1-1.71/\sqrt{k})-31})$ time.

8. T. Imamichi, M. Kenmochi, K. Nonobe, M. Yagiura, H. Nagamochi:
"Branch-and-bound Algorithms for Rectangular Strip Packing and Perfect Packing Problems", ESICUP (EURO Special Interest Group on Cutting and Packing) 2nd Meeting, 2005.
概要: The rectangular strip packing problem asks for a placement of given rectangles without any overlap into a container of a fixed width, where the objective is to minimize the height of the container. The perfect packing problem, a special case of the strip packing, asks to determine whether given rectangles can be packed into a container of a fixed width and height without any waste space. We consider various types of branch-and-bound algorithms for these problems with and without rotations. We first develop a branch-and-bound algorithm to the strip packing problem based on sequence pair coding scheme, which represents the relative placement relations of rectangles. This scheme is general, but the resulting algorithm could solve small instances with up to 11 rectangles in practical time. We then consider the perfect packing problem and examine various branching rules and bounding operations. As for branching rules we consider two strategies called bottom-left and staircase placement. Bottom-left placement is to place rectangles one by one at the bottom-left point in the available space, where each branch corresponds to a rectangle. Staircase placement is to place rectangles keeping the entire shape of placed rectangles forming a staircase, where each branch corresponds to a corner on the stairs. As for bounding operations we consider three methods called dynamic programming (DP) cut, linear programming (LP) cut and active node combination (ANC) cut. DP cut examines whether we can fill all gaps of the empty space with dynamic programming. LP cut solves the LP relaxation problem of an integer programming formulation of the packing problem to check its feasibility. ANC cut combines the current node with other active nodes to tighten the feasibility test by DP cut. We conducted computational experiments on benchmark instances to examine all combinations of the above operations and observed the following. (1) Feasible instances are in many cases much easier than infeasible ones, because we can stop the search immediately after a feasible solution is found, while as to infeasible instances we must conclude infeasibility for entire search space. (2) Effective method is different depending on the feasibility of instances. (3) Our algorithm outperforms existing algorithms for the perfect packing problem without rotation, solving almost all benchmark instances with up to 49 rectangles within reasonable computation time.

9. M. Kenmochi, T. Imamichi, K. Nonobe, M. Yagiura, H. Nagamochi:
"Exact Algorithms for the 2-Dimensional Strip Packing Problem with Rotations", The IFORS Triennial 2005 Conference, 2005.
概要: We examine various strategies for exact approaches to the 2-dimensional strip

packing problem (2SP) with rotations and propose a new branching rule in branch-and-bound algorithms for the perfect packing problem (PP), which is a special case of 2SP. This rule is very effective especially for feasible instances of PP.

10. M. Nishihara, M. Yagiura, T. Ibaraki, H. Nagamochi:
"The Relation Between Option Pricing and Optimization Problems", The IFORS Triennial 2005 Conference, 2005.
概要: We investigate the option pricing problem based only on the no-arbitrage assumption, without assuming any stochastic model. We theoretically extend Bertsimas and Popescu's results that the problem can be solved efficiently via convex programming. Furthermore we confirm that our results are practical from computational results using real data.

11. H. Nagamochi:
"Heuristics for the Minmax Subtree Cover in Graphs", The IFORS Triennial 2005 Conference, 2005.
概要: Given an edge-weighted graph and an integer k, the minmax tree cover problem asks to find a set of k subtrees of the graph such that the union of the subtrees covers all vertices and the maximum weight of the subtrees is minimized. This talk surveys constant factor approximation algorithms for this problem.

12. T. Fukunaga, H. Nagamochi:
"Approximation Algorithms for the b-Edge Dominating Set Problem and Its Related Problems", The Eleventh International Computing and Combinatorics Conference (COCOON 2005), Lecture Notes in Computer Science, Springer-Verlag, 3595, 747-756, 2005.
概要: The edge dominating set problem is one of the fundamental covering problems in the field of combinatorial optimization. In this paper, we consider the b-edge dominating set problem, a generalized version of the edge dominating set problem. In this version, we are given a simple undirected graph $G = (V, E)$ and a demand vector $b \in Z_+^E$. A set F of edges in G is called a b-edge dominating set if each edge $e \in E$ is adjacent to at least $b(e)$ edges in F, where we allow F to contain multiple copies of edges in E. Given a cost vector $w \in R_+^E$, the problem asks to find a minimum cost of a b-edge dominating set. We first show that there is a $\frac{8}{3}$-approximation algorithm for this problem. We then consider approximation algorithms for other related problems.

13. T. Ishii, K. Iwata, H. Nagamochi:
"Bisecting a Four-Connected Graph with Three Resource Sets", The The 16th Annual International Symposium on Algorithms and Computation (ISAAC 2005), Lecture Notes in Computer Science, Springer-Verlag, 3827, 176-185, 2005.
概要: Let $G = (V, E)$ be an undirected graph with a node set V and an arc set E. G has k pairwise disjoint subsets $T_1, T_2, \ldots, T_k$ of nodes, called resource sets, where $|T_i|$ is even for each i. The partition problem with k resource sets asks to find a partition V_1 and V_2 of the node set V such that the graphs induced by V_1 and V_2 are both connected and $|V_1 \cap T_i| = |V_2 \cap T_i| = |T_i|/2$ holds for each $i = 1, 2, \ldots, k$. It is known that if G is $(k+1)$-connected for $k = 1, 2$, then a bisection exists for any given resource sets, and it has been conjectured that for $k \geq 3$, a $(k+1)$-connected graph admits a bisection. In this paper, we show that for $k = 3$, the conjecture does not hold, while if G is 4-connected and has K_4 as its subgraph, then a bisection exists and it can be found in $O(|V|^3 \log |V|)$ time. Moreover, we show that for an arc-version of the problem, the $(k+1)$-edge-connectivity

suffices for $k = 1, 2, 3$.

14. Y. Karuno, H. Nagamochi:
"Minimizing Capacitated Tree Covers of Graphs", Third International Conference on Innovative Applications of Information Technology for the Developing World (Asian Applied Computing Conference (AACC 2005)), 2005.
概要: Let $G = (V, E)$ be a simple connected graph such that each vertex $v \in V$ and each edge $e \in E$ are weighted by non-negative reals $h(v)$ and $w(e)$, respectively. The capacitated subtree cover problem asks to find a partition $\mathcal{X} = \{X_1, X_2, \ldots, X_p\}$ of V and a set $\mathcal{T} = \{T_1, T_2, \ldots, T_p\}$ of p subtrees such that each T_i contains X_i so that the cost of each T_i must not exceed a specified capacity d (> 0), where the cost of each T_i is defined by the sum of weights of edges in T_i and weights of vertices in X_i. The objective is to minimize the number p ($= |\mathcal{X}| = |\mathcal{T}|$) of subtrees. In this paper, we propose a constant factor approximation algorithm to the problem.

15. Y. Koga, M. Yagiura, K. Nonobe, T. Imamichi, H. Nagamochi, T. Ibaraki:
"Efficient Branch-and-bound Algorithms for Weighted MAX-2-SAT", Third International Conference on Innovative Applications of Information Technology for the Developing World (Asian Applied Computing Conference (AACC 2005)), 2005.
概要: Given a set of m clauses on n propositional variables, where each clause contains at most two literals and is weighted by a positive real, MAX-2-SAT asks to find a truth assignment that maximizes the total weight of satisfied clauses. In this paper, we propose two branch-and-bound algorithms for MAX-2-SAT. Our algorithm features two new transformation rules and two efficient algorithms for computing lower bounds. Computational comparisons on benchmark instances disclose that these algorithms are highly effective in reducing the number of search tree nodes as well as computation time of a branch-and-bound algorithm to MAX-2-SAT.

16. K. Haraguchi, H. Nagamochi, T. Ibaraki:
"Experimental Studies on Representation Complexity and Error Rates of Iteratively Composed Features", Third International Conference on Innovative Applications of Information Technology for the Developing World (Asian Applied Computing Conference (AACC 2005)), 2005.
概要: We consider constructing a classifier $c : \{0, 1\}^n \mapsto \{0, 1\}$ from a training set of n-dimensional binary vectors. A classifier is usually represented by a representation model such as decision tree (DT) and iteratively composed feature (ICF). In this paper, we discuss the following issues through computational experiments: 1) relation between the representation complexity γ, the error on the training set e and the expected error E of an ICF classifier and 2) comparison between ICF and DT. For 1), we observe that a simpler ICF is more likely to attain a small E, among the ICFs having the same e. For 2), we see that DTs generated by C4.5 and ICFs generated by our algorithm are competitive in terms of E.

17. Y. Uno:
"An experimental study on the Web graph", The IFORS Triennial 2005 Conference, 2005.
概要: The Web graph is a digraph induced by the hyperlink structure of WWW, and a large amount of research has revealed its complex topology. We present some new experimental observations on the topological structure of the Web graph that have not been reported so far. These results will give suggestions for designing web algorithms.

18. Takuro Fukunaga, Hiroshi Nagamochi:
"Some theorems on detachments preserving local-edge-connectivity", Proceedings of 5th Cracow Conference on Graph Theory, Electronic Notes in Discrete Mathematics, 24, pp. 173-180, 2006.
概要: A detachment operation transforms a given graph by splitting some vertices into several their copies while maintaining the original set of edges, whose end vertices may change after the operation. A graph obtained by such an operation is called a detachment of the graph. Although necessary and sufficient conditions for a graph to have a k-edge-connected detachment are known, it is left open to derive a necessary and sufficient condition for a graph to admit a detachment which has a specified local-edge-connectivity. In this paper, we show our recent results on related problems such as the problem of finding an Eulerian detachment of a graph that maximizes the local-edge-connectivity, and the problem of splitting a vertex s into two vertices of degree 3 and $d(s) - 3$ preserving the local-edge-connectivity.

19. Takuro Fukunaga, Hiroshi Nagamochi:
"Network design with edge-connectivity and degree constraints", Proceedings of Fourth Workshop on Approximation and Online Algorithms, Lecture Notes in Computer Science, 4368, pp. 188-201, 2006.
概要: We consider the following network design problem; Given a vertex set V with a metric cost c on V, an integer $k \geq 1$, and a degree specification b, find a minimum cost k-edge-connected multigraph on V under the constraint that the degree of each vertex $v \in V$ is equal to $b(v)$. This problem generalizes metric TSP. In this paper, we propose that the problem admits a ρ-approximation algorithm if $b(v) \geq 2$, $v \in V$, where $\rho = 2.5$ if k is even, and $\rho = 2.5 + 1.5/k$ if k is odd. We also prove that the digraph version of this problem admits a 2.5-approximation algorithm and discuss some generalization of metric TSP.

20. Takashi Imamichi, Mutsunori Yagiura, Hiroshi Nagamochi:
"An iterated local search algorithm based on nonlinear programming for the irregular strip packing problem", The 19th conference of the European Chapter on Combinatorial Optimization (ECCO XIX) and the International Symposium on Combinatorial Optimisation 2006 (CO 2006), 2006.
概要: The irregular strip packing problem is a combinatorial optimization problem that asks to place a set of 2-dimensional polygons within a rectangular container so that no two polygons overlap each other and no polygon protrudes from the container, where each polygon is not necessarily convex. The container has a fixed width, while its length can change so that all polygons are placed in it. The objective is to find a layout that minimizes the length of the container. This problem has many applications in material industry such as paper and textile industries, where raw materials are usually given in rolls. We propose a new separation algorithm based on nonlinear programming, which moves all polygons simultaneously and minimizes the total amount of overlap and protrusion. We formulate the overlap minimization problem as an unconstrained nonlinear programming problem in which we define the amount of overlap by using the penetration depth. We show that it is possible to compute the amount of overlap and its gradient efficiently, and applies the quasi-Newton method to the overlap minimization problem as our separation algorithm. We also propose an algorithm that swaps two polygons in a sophisticated way; it tries to find their positions with the least overlap among the vertices and the edge intersections of the no-fit polygons

21. Seok-Hee Hong, Hiroshi Nagamochi:
"Convex drawings with non-convex boundary", 32nd International Workshop on Graph-Theoretic Concepts in Computer Science (WG 2006) Bergen, Norway June 22-24, 2006, Lecture Notes in Computer Science, 4271, pp. 113–124, 2006.
概要: In this paper, we study a new problem of finding a convex drawing of graphs with a *non-convex* boundary. It is proved that every triconnected plane graph whose boundary is fixed with a star-shaped polygon admits a drawing in which every inner facial cycle is drawn as a convex polygon. Such a drawing, called an *inner-convex drawing*, can be obtained in linear time.

22. Mutsunori Yagiura, Toshihide Ibaraki, Takashi Imamichi, Y. Koga, Hiroshi Nagamochi, K. Nonobe:
"Efficient branch-and-bound algorithms for weighted MAX-2-SAT", The 21st European Conference on Operational Research (EURO XXI) Reykjavik, Iceland, July 2-5, 2006, 2006.
概要: Given a set of clauses on propositional variables, where each clause contains at most two literals and is weighted by a positive real, MAX-2-SAT asks to find a truth assignment that maximizes the total weight of satisfied clauses. We propose branch-and-bound algorithms for solving weighted MAX-2-SAT exactly. Our algorithms feature two new transformation rules and two efficient algorithms for computing lower bounds. Computational comparisons on benchmark instances disclose that these algorithms are highly effective in reducing the number of search tree nodes as well as computation time.

23. Takuro Fukunaga, Hiroshi Nagamochi:
"Approximating minimum cost multigraphs of specified edge-connectivity under degree bounds", Proceedings of the 9th Japan-Korea Joint Workshop on Algorithm and Computation (WAAC06) July 4-5, 2006, Hokkaido University, Sapporo, Japan, pp. 25–32, 2006.
概要: In this paper, we consider the problem of constructing a minimum cost graph with a specified edge-connectivity under a degree constraint. For a set V of vertices, let $r : \binom{V}{2} \to \mathbb{Z}_+$ be a connectivity demand, $a : V \to \mathbb{Z}_+$ be a lower capacity, $b : V \to \mathbb{Z}_+$ be an upper capacity and $c : \binom{V}{2} \to \mathbb{Q}_+$ be a metric edge cost. The problem (V, r, a, b, c) asks to find a minimum cost multigraph $G = (V, E)$ with no self-loops such that $\lambda(u, v) \geq r(u, v)$ for each pair $u, v \in V$ and $a(v) \leq d(v) \leq b(v)$ for each $v \in V$, where $\lambda(u, v)$ (resp., $d(v)$) denotes the local-edge-connectivity between u and v (resp., the degree of v) in G. We reveal several conditions on functions r, a, b and c for which the above problem admits a constant-factor approximation algorithm. For example, we give a $(2 + 1/\lfloor k/2 \rfloor)$-approximation algorithm to (V, r, a, b, c) with $r(u, v) \geq 2$, $u, v \in V$ and a uniform $b(v)$, $v \in V$, where $k = \min_{u,v \in V} r(u, v)$. To design the algorithms in this paper, we use our new results on edge-splitting and detachment, which are graph transformations to split vertices while preserving edge-connectivity.

24. Seok-Hee Hong, Hiroshi Nagamochi:
"Convex drawings of hierarchical plane graphs", 17th Australasian Workshop on Combinatorial Algorithms (AWOCA 2006) Uluru, NT, Australia, July 13-16, 2006, 2006.
概要: This paper proves that every internally triconnected hierarchical plane graph with the outer facial cycle drawn as a convex polygon admits a *convex* drawing. We present an algorithm which constructs such a drawing. This extends the previous known result that every hierarchical plane graph admits a *straight-line* drawing.

25. Takashi Imamichi, Hiroshi Nagamochi, Mutsunori Yagiura:
"An iterated local search algorithm based on nonlinear programming for the irregular strip packing problem", Proc. of International Symposium on Scheduling 2006 (ISS2006) July 18-20, 2006 in Arcadia Ichigaya, Tokyo, Japan, pp. 132–137, 2006.
概要: The irregular strip packing problem is a combinatorial optimization problem that asks to place a set of 2-dimensional polygons within a rectangular container so that no two polygons overlap each other and no polygon protrudes from the container, where each polygon is not necessarily convex. The container has a fixed width, while its length can change so that all polygons are placed in it. The objective is to find a layout that minimizes the length of the container. This problem has many applications in material industry such as paper and textile industries, where raw materials are usually given in rolls. We propose a new separation algorithm based on nonlinear programming, and an algorithm that swaps two polygons in a sophisticated way; it tries to find their positions with the least overlap. We incorporate these algorithms as components in an iterated local search algorithm for the overlap minimization problem and then develop an algorithm for the irregular strip packing problem using the iterated local search algorithm. Computational comparisons on representative instances disclose that our algorithm is competitive with other existing algorithms. Moreover, our algorithm updates several best known results.

26. Toshihide Ibaraki, Akihiro Ishikawa, Hiroshi Nagamochi, Koji Nonobe, Mutsunori Yagiura:
"An iterated local search algorithm for the multi-resource generalized assignment problem with flexible assignment cost", Proc. of International Symposium on Scheduling 2006 (ISS2006) July 18-20, 2006 in Arcadia Ichigaya, Tokyo, Japan, pp. 160–165, 2006.
概要: We propose an iterated local search algorithm for the multi-resource generalized assignment problem (MRGAP) with flexible assignment cost. This problem generalizes the MRGAP so that the assignment cost function defined for each agent can be in any form. While this flexibility achieves a wide applicability, the computation of the assignment cost can be computationally expensive, Our algorithm features two types of oracles to evaluate this cost approximately; i.e., quick-evaluation oracle and accurate-evaluation oracle. In our computational experiments on the parallel machine scheduling and the capacitated vehicle routing, the algorithm combining two oracles performs well and is sometimes competitive with other existing algorithms tailored for the specific problem.

27. Yashitaka Nakao, Hiroshi Nagamochi:
"A DP-based heuristic algorithm for the discrete split delivery vehicle routing problem", Proc. of International Symposium on Scheduling 2006 (ISS2006) July 18-20, 2006 in Arcadia Ichigaya, Tokyo, Japan, pp. 42–47, 2006.
概要: We propose a construction algorithm for a discrete-type split delivery vehicle routing problem. In this problem, delivery goods for a customer consist of a set of items. Each customer can be visited more than once, while each item is serviced by exactly one vehicle. This algorithm builds routes sequentially by iterating constructing routes by dynamic programming and selecting one. In order to select a route, this algorithm uses an elaborate evaluate function that estimates residual distance of routes to service all unrouted items. Experimental results on real-world and artificial instances are reported.

28. Ehab Morsy, Hiroshi Nagamochi:
"An improved approximation algorithm for capacitated multicast routings in networks", Proc. of International Symposium on Scheduling 2006 (ISS2006) July 18-20, 2006 in Arcadia Ichigaya, Tokyo, Japan, pp. 12–17, 2006.
概要: Let $G = (V, E)$ be a complete graph such that each edge $e \in E$ is weighted by nonnegative real $w(e)$. Let s be a vertex designated as a source, k be a positive integer, and $S \subseteq V$ be a set of terminals. The capacitated multicast routing problem (CMRP) asks to find a partition $\{Z_1, Z_2, ..., Z_\ell\}$ of the terminal set S and a set of subtrees $T_1, T_2, ..., T_\ell$ of G such that Z_i consists of at most k terminals and each T_i spans $Z_i \cup \{s\}$. The objective is to minimize $\Sigma_{i=1}^{\ell} w(T_i)$, where $w(T_i)$ is defined to be the sum of weights of all edges in T_i. In this paper, we propose a $(3/2 + (4/3)\rho)$-approximation algorithm to the CMRP, where ρ is the best achievable approximation ratio for the Steiner tree problem. Our approximation improves the previous best ratio for the case of $S = V$ from 2.9 to $17/6 \simeq 2.83$.

29. Hiroshi Nagamochi:
"A detachment algorithm for inferring a graph from path frequency", The Twelfth Annual International Computing and Combinatorics Conference (COCOON'06) Taipei, Taiwan, August 15-18, 2006, Lecture Notes in Computer Science, Editors: Danny Z. Chen, D. T. Lee, 4112, pp. 274–283, 2006.
概要: Inferring a graph from path frequency has been studied as an important problem which has a potential application to drug design. Given a multiple set g of strings of labels with length at most K, the problem asks to find a vertex-labeled graph G that attains a one-to-one correspondence between g and the set of sequences of labels along all paths of length at most K in G. In this paper, we prove that the problem with $K = 1$ can be reduced to a problem of finding a connected and loopless detachment, based on which an efficient algorithm for solving the problem is derived. Our algorithm also solves the problem even for the case where any vertex with the same label is required to have a degree specified for the label.

30. Mariko Sakashita, Kazuhisa Makino, Hiroshi Nagamochi, Satoru Fujishige:
"Minimum transversals in posi-modular systems", ESA 2006 14th Annual European Symposium on Algorithms 11-13 September 2006 ETH Zurich, Zurich, Switzerland, Lecture Notes in Computer Science, 4168, pp. 576–587, 2006.
概要: Given a system (V, f, d) on a finite set V consisting of two set functions $f : 2^V \to \mathbb{R}$ and $d : 2^V \to \mathbb{R}$, we consider the problem of finding a set $R \subseteq V$ of the minimum cardinality such that $f(X) \geq d(X)$ for all $X \subseteq V - R$, where the problem can be regarded as a natural generalization of source location problems and external network problems in (undirected) graphs and hypergraphs. We give an interesting structural characterization of minimal deficient sets of (V, f, d). We show that all such sets form a tree hypergraph if f is posi-modular and d is modulotone (i.e., each nonempty subset X of V has an element $v \in X$ such that $d(Y) \geq d(X)$ for all subsets Y of X that contain v), and that conversely any tree hypergraph can be represented by minimal deficient sets of (V, f, d) for a posi-modular function f and a modulotone function d. By using this characterization, we present a polynomial-time algorithm if f is in addition submodular and d is given by either $d(X) = \max\{p(v) \mid v \in X\}$ for a function $p : V \to \mathbb{R}_+$ or $d(X) = \max\{r(v, w) \mid v \in X, w \in V - X\}$ for a

function $r : V^2 \to \mathbb{R}_+$. Our result provides first polynomial-time algorithms for source location problem in hypergraphs and external network problems in graphs and hypergraphs. We also show that the problem is intractable, even if f is submodular and $d \equiv \mathbf{0}$.

31. Kouji Hirata, Takahiro Matsuda, Hiroshi Nagamochi, Tetsuya Takine:
"Contention-Free λ-Planes in Optically Burst-Switched WDM", IEEE GLOBECOM 2006 Advanced Technologies and Protocols for Optical Networks, 27 November - 1 December 2006, San Francisco, California, USA, 2006.
概要: This paper proposes a contention-free burst scheduling scheme in optically burst-switched WDM networks. We construct contention-free wavelength planes (λ-planes) by assigning dedicated wavelengths to each ingress node. Bursts are transmitted to their egress nodes on λ-planes, along routes forming a spanning tree. As a result, contention at intermediate core nodes is completely eliminated, and contention at ingress nodes is resolved by means of electric buffer. This paper develops a spanning tree construction algorithm, aiming at balancing input loads among output ports at each ingress node. Further a wavelength assignment algorithm is proposed, which is based on the amount of traffic lost at ingress nodes. We show that the proposed scheme can decrease the burst loss probability drastically, even if traffic intensities at ingress nodes are different.

32. 上道 明生, 宇野 裕之, 永持 仁:
"最長路問題に対する 2 連結成分分解にもとづく分枝限定法による厳密解法", 日本オペレーションズ・リサーチ学会 秋季研究発表会 アブストラクト集, 2006.
概要: 最長路問題とは, 枝に重みのあるグラフを入力とし, グラフのすべての単純路の中で最長のものを出力する問題であり, NP 困難な問題として知られている. 類似の問題に巡回セールスマン問題 (TSP) があり, 現実の問題への応用も多く盛んに研究されているが, 一般に実行可能解であるハミルトン閉路が必ず存在する完全グラフのような密なグラフを対象にすることが多い. これに対して, 必ずしもハミルトン閉路が存在するとは限らない疎なグラフでは, 現実にはできる限り多くの点を通るような路 (最長路) が代替の解として必要になることも多い. 本稿では, 分枝限定法を用いて最長路問題を解く. とくに, 入力のグラフが疎であるとき, その特性を利用して最長路を効率的に求める方法を示している.

33. Yushi Uno, Yoshinobu Ota, Akio Uemichi and Motohide Umano:
"Mining communities and detecting link farms in the Web by isolated cliques", Proc. 2nd International Conference on Knowledge Engineering and Decision Support (ICKEDS06), pp. 179–187, 2006.
概要: Web structure mining is a research area that aims to find hidden communities that share common interests in specific topics in the Web, clustering the Web, and so on, by focusing on the link structure among web pages. The structure of the Web is generally viewed as the webgraph, and communities or their cores are supposed to constitute dense subgraphs. Thus, structure mining can be realized by enumerating those substructures. As an example of such substructures, a biclique model proposed by Kleinberg is well-known, however, not so many effective results have been seen so far that found useful information. In this paper, we afresh pick up some candidate substructures, including bicliques, and attempt to find useful information from the real web data. Especially, we exploit isolated cliques for our experiments of structure mining. As a result, we discovered that most of isolated cliques in the Web corre-

spond to menu structures and are inherent in single domains, and that isolated cliques can be quite useful for detecting harmful link farms. On the other hand, although the number is not necessarily large, we discovered that isolated cliques that lie over multiple domains sometimes imply useful communities. By these observations, we can confirm the validity of isolated clique as candidate substructure for structure mining. We also propose, through our experiments, the undirected webgraph and the isolated clique contracted webgraph.

34. Yushi Uno, Yoshinobu Ota, Akio Uemichi and Motohide Umano:
"Web Structure Mining by Isolated Stars", Proc. 4th WAW Conference, 2006.
概要: Web structure mining is a research area that aims to find hidden communities in the Web, and so on, by focusing on the webgraph. In this paper, by observing the webgraph, we newly identify a frequent substructure and define it as an isolated star (i-star). We propose an efficient enumeration algorithm of i-stars, and try structure mining by enumerating them from the real web data. As a result, we observed that most of i-stars correspond to index structures in single domains, while some of them are verified to stand for useful communities, which implies the validity of i-stars as candidate substructure for structure mining.

35. Morihiro Hayashida, Tatsuya Akutsu, Hiroshi Nagamochi:
"A novel clustering method for analysis of biological networks using maximal components of graphs", The Fifth Asia-Pacific Bioinformatics Conference, APBC2007, Hong Kong, pp. 257–266, 2007.
概要: This paper proposes a novel clustering method for analyzing biological networks. In this method, each biological network is treated as an undirected graph and edges are weighted based on similarities of nodes. Then, maximal components, which are defined based on edge connectivity, are computed and the nodes are partitioned into clusters by selecting disjoint maximal components. The proposed method was applied to clustering of protein sequences and was compared with conventional clustering methods. The obtained clusters were evaluated using P-values for GO (GeneOntology) terms. The average P-values for the proposed method were better than those for other methods.

36. Akifumi Kawaguchi, Hiroshi Nagamochi:
"Orthogonal drawings for plane graphs with specified face areas", The 4th Annual Conference on Theory and Applications of Models of Computation (TAMC07) Shanghai, China, May 22 to 25, 2007, Lecture Notes in Computer Science, 4484, pp. 584–594, 2007.
概要: We consider orthogonal drawings of a plane graph G with specified face areas.For a natural number k, a k-gonal drawing of G is an orthogonal drawing such that the outer cycle is drawn as a rectangle and each inner face is drawn as a polygon with at most k corners whose area is equal to the specified value. In this paper, we show that several classes of plane graphs have a k-gonal drawing with bounded k; A slicing graph has a 10-gonal drawing, a rectangular graph has an 18-gonal drawing and a 3-connected plane graph whose maximum degree is 3 has a 34-gonal drawing. Furthermore, we showed that a 3-connected plane graph G whose maximum degree is 4 has an orthogonal drawing such that each inner facial cycle c is drawn as a polygon with at most $10p_c + 34$ corners, where p_c is the number of vertices of degree 4 in the cycle c.

37. Takuro Fukunaga, Hiroshi Nagamochi:
"The set connector problems in graphs",

The Twelfth Conference on Integer Programming and Combinatorial Optimization, IPCO 2007, Cornell University, Ithaca, New York, June 25-27, Lecture Notes in Computer Science, 4513, pp. 484–498, 2007.

概要: Given a graph $G = (V, E)$ with an edge cost and families $\mathcal{V}_i \subseteq 2^V$, $i = 1, 2, \ldots, m$ of disjoint subsets, an edge subset $F \subseteq E$ is called a set connector if, for each $\mathcal{V}_i$, the graph $(V, F)/\mathcal{V}_i$ obtained from (V, F) by contracting each $X \in \mathcal{V}_i$ into a single vertex x has a property that every two contracted vertices x and x' are connected in $(V, F)/\mathcal{V}_i$. In this paper, we introduce a problem of finding a minimum cost set connector, which contains several important network design problems such as the Steiner forest problem, the group Steiner tree problem, and the NA-connectivity augmentation problem as its special cases. We derive an approximate integer decomposition property from a fractional packing theorem of set connectors, and present a strongly polynomial 2α-approximation algorithm for the set connector problem, where $\alpha = \max_{1 \le i \le m}(\sum_{X \in \mathcal{V}_i} |X|) - 1$.

38. Hiroshi Nagamochi:
"Minimum degree orderings", The 18th International Symposium on Algorithms and Computation (ISAAC 2007) December 17-19, 2007 Sendai, Japan, Lecture Notes in Computer Science, 4835, pp. 17–28, 2007.

概要: It is known that, given an edge-weighted graph, a maximum adjacency ordering (MA ordering) of vertices can find a special pair of vertices, called a *pendent pair*, and that a minimum cut in a graph can be found by repeatedly contracting a pendent pair, yielding one of the fastest and simplest minimum cut algorithms. In this paper, we provide another ordering of vertices, called a minimum degree ordering (MD ordering) as a new fundamental tool to analyze the structure of graphs. We prove that an MD ordering finds a different type of special pair of vertices, called a *flat pair*, which actually can be obtained as the last two vertices after repeatedly removing a vertex with the minimum degree. By contracting flat pairs, we can find not only a minimum cut but also all extreme subsets of a given graph. These results can be extended to the problem of finding extreme subsets in symmetric submodular set functions.

39. Ehab Morsy, Hiroshi Nagamochi:
"Approximation to the minimum cost edge installation problem", The 18th International Symposium on Algorithms and Computation (ISAAC 2007) December 17-19, 2007 Sendai, Japan, Lecture Notes in Computer Science, 4835, pp. 292–303, 2007.

概要: We consider the *minimum cost edge installation problem* (MCEI) in a graph $G = (V, E)$ with edge weight $w(e) \ge 0$, $e \in E$. We are given a vertex $s \in V$ designated as a sink, an edge capacity $\lambda > 0$, and a source set $S \subseteq V$ with demand $q(v) \in [0, \lambda]$, $v \in S$. For any edge $e \in E$, we are allowed to install an integer number $h(e)$ of copies of e. The MCEI asks to send demand $q(v)$ from each source $v \in S$ along a single path P_v to sink s. A set of such paths can pass through a single copy of an edge in G as long as the total demand along the paths does not exceed the edge capacity λ. The objective is to find a set $\mathcal{P} = \{P_v \mid v \in S\}$ of paths of G that minimizes the installing cost $\sum_{e \in E} h(e)w(e)$. In this paper, we propose a $(15/8 + \rho_{\mathrm{ST}})$-approximation algorithm to the MCEI, where ρ_{ST} is any approximation ratio achievable for the *Steiner tree problem*.

40. Takuro Fukunaga, Magnús M. Halldórsson, Hiroshi Nagamochi:
"Rent-or-buy scheduling and cost coloring problems", Foundations of Software Tech-

nology and Theoretical Computer Science, FSTTCS 2007, New Delhi during 12-14 December 2007, Lecture Notes in Computer Science, 4855, pp. 84–95, 2007.
概要: We study several *cost coloring problems*, where we are given a graph and a cost function on the independent sets and are to find a coloring that minimizes the function costs of the color classes. The "Rent-or-Buy" scheduling/coloring problem (RBC) is one that captures e.g., job scheduling situations involving resource constraints where one can either pay a full fixed price for a color class (representing e.g., a server), or a small per-item charge for each vertex in the class (corresponding to jobs that are either not served, or are farmed out to an outside agency). We give exact and approximation algorithms for RBC and three other cost coloring problems (including the previously studied Probabilistic coloring problem), both on interval and on perfect graphs. The techniques rely heavily on the computation of maximum weight induced k-colorable subgraphs (k-MCS). We give a novel bicriteria approximation for k-MCS in perfect graphs, and extend the known exact algorithm for interval graphs to some problem extensions.

41. Seok-Hee Hong, Hiroshi Nagamochi:
"Star-shaped drawings of planar graphs", 18th International Workshop on Combinatorial Algorithms, Lake Macquarie, Newcastle, NSW, Australia, 5-9 November 2007, 2007.
概要: A star-shaped drawing of a plane graph is a straight-line drawing such that each inner facial cycle is drawn as a star-shaped polygon and the our facial cycle is drawn as a convex polygon. Given a biconnected *planar* graph, we consider the problem of finding a star-shaped drawing of the graph with the minimum number of concave corners. We derive an effective lower bound on the number of concave corners, and prove that the problem can be solved in linear time.

42. Takashi Imamichi, Hiroshi Nagamochi:
"A multi-sphere scheme for 2D and 3D packing problems", Stochastic local search (SLS) algorithms, Universite Libre de Bruxelles, Brussels, Belgium, 6-8 September 2007, Lecture Notes in Computer Science, 4638, pp. 207–211, 2007.
概要: In this paper, we deal with a packing problem that asks to place a given set of objects such as non-convex polytopes compactly in 2D or 3D, where we treat translation, rotation and deformation as possible motions of each object. We propose multi-sphere scheme that approximates each object with a set of spheres to find a compact layout of the original objects. We focus on the case that all objects are rigid, and develop an efficient local search algorithm based on a nonlinear program formulation.

43. Seok-Hee Hong, Hiroshi Nagamochi:
"Fully convex drawings of clustered planar graphs", 2007 Korea-Japan Joint Workshop on Algorithms and Computation, August 9-10, 2007, Chonnam National University, Gwangju, Korea, pp. 32–39, 2007.
概要: In this paper, we prove that every internally triconnected clustered plane graph with completely connected clustering structure admits a "fully convex drawing," a planar straight-line drawing such that both clusters and facial cycles are drawn as convex polygons.

44. Takashi Imamichi, Hiroshi Nagamochi:
"An iterated local search algorithm in a multi-sphere scheme for 2D and 3D packing problems", 2007 Korea-Japan Joint Workshop on Algorithms and Computation, August 9-10, 2007, Chonnam National University, Gwangju, Korea, pp. 72–79, 2007.

概要: In this paper, we deal with a packing problem that asks to place a given set of objects such as non-convex polytopes or objects with curved surfaces compactly in a small space in 2D and 3D, where, for each object, translation, rotation and deformation are allowed as its motions. We propose multi-sphere scheme that approximates objects by sphere sets and finds a layout with no penetration of the objects and protrusion of the objects from the container. We focus on the case that all objects are rigid, and develop an iterated local search algorithm combining a local search algorithm based on nonlinear programming and perturbation that swaps two objects. Computational experiments disclose our algorithm can find a layout with nearly no penetration and protrusion quickly.

45. Hiroki Fujiwara, Liang Zhao, Hiroshi Nagamochi, Tatsuya Akutsu, Wang Jiexun: "Enumerating tree-like chemical structures from feature vector", 2007 Korea-Japan Joint Workshop on Algorithms and Computation, August 9-10, 2007, Chonnam National University, Gwangju, Korea, pp. 48–55, 2007.
概要: Inferring chemical structures from a given partial structure is one of the fundamental problems in the field of chemoinformatics and bioinformatics. This paper considers the problem of enumerating all tree-like chemical graphs from a given feature vector that represents the occurrences of vertex-labeled paths with length at most K. We proposes an exact algorithm based on the branch-and-bound method. We also introduce a new variant of the problem by adding a specification of the number of multiple bonds as part of its input, and designs an exact enumeration algorithm to this variant. Our computational experiments conducted on feature vectors of known chemical compounds reveal that all tree-like solutions with up to 61 atoms can be enumerated efficiently for $2 \leq K \leq 7$.

46. Kazuya Haraguchi, Hiroshi Nagamochi: "Extension of ICF classifiers to real world data sets", IEA/AIE 2007: The 20th International Conference on Industrial, Engineering & Other Applications of Applied Intelligent Systems, June 26-29, 2007 Kyoto (Japan) Kyoto University Clock Tower Hall, Proc. 20th IEA/AIE, LNAI, 4570, pp. 776–785, 2007.
概要: For a given data set, classification problem asks to construct a classifier, a function on the data space, which is required to capture the hidden structure of the data space. Recently we introduced a new class of classifiers, called ICF, which is based on iteratively composed features for $\{0, 1, *\}$-valued data sets, and proposed an algorithm ALG-ICF* to construct ICF classifiers with a high performance. In this paper, we extend ICF so that it can also process such real world data sets consisting of numerical and/or categorical attributes. For this purpose, we incorporate a discretization scheme into ALG-ICF* as its preprocessor, by which an input real world data set is transformed into $\{0, 1, *\}$-valued one. We first examine two conventional discretization schemes: domain based partition (DP) and space based partition (SP). Based on the experimental studies on these schemes, we propose an algorithm ALG-ICF$^*_{IP}$, which is equipped with a new discretization scheme, integrated partition (IP). Our computational experiments reveal that ALG-ICF$^*_{IP}$ outperforms C4.5 designed for real world data in many cases.

47. Seok-Hee Hong, Hiroshi Nagamochi: "A linear time algorithm for symmetric convex drawings of triconnected planar graphs", The Kyoto International Conference on Computational Geometry and

Graph Theory (KyotoCGGT2007), Kyoto, Japan, June 11-15, 2007, 2007.

概要: Symmetry is one of the most important aesthetic criteria in Graph Drawing which can reveal the hidden structure in the graph. *Convex drawing* is a straight-line drawing where every facial cycle is drawn as a convex polygon. In this paper, we prove that given an *internally triconnected* plane graph with symmetries, there exists a convex drawing of the graph which displays the given symmetries. We present a *linear time* algorithm for constructing *symmetric convex* drawings of internally triconnected planar graphs. This is an extension of a classical result due to Tutte who proved that every *triconnected* plane graph with a given convex polygon as a boundary admits a convex drawing. Note that Tutte's *barycenter mapping* method can be implemented in $O(n^{1.5})$ time and $O(n \log n)$ space at best. Our divide and conquer algorithm explicitly exploits the fundamental properties of symmetric drawing, which consists of congruent drawings of isomorphic subgraphs. We first find an isomorphic subgraph of a given symmetric plane graph, and compute an *angle-constrained convex drawing* of the subgraph. Finally, a symmetric convex drawing of the given graph is constructed by merging repetitive copies of the congruent drawings of isomorphic subgraphs. For this purpose, we define a new problem of *angle-constrained convex drawing* of plane graphs, where some of outer vertices have angle constraints. Our results also imply that there is a linear time algorithm that constructs maximally symmetric convex drawings of triconnected planar graphs. Previous algorithm constructs symmetric drawings of triconnected planar graphs with *straight-lines*.

48. Shunsuke Ota, Hiroshi Nagamochi:
"A plane graph representation for tripartitions of a triconnected graph", The Kyoto International Conference on Computational Geometry and Graph Theory (KyotoCGGT2007), Kyoto, Japan, June 11-15, 2007, 2007.

概要: Given a graph $G = (V, E)$, k distinct vertices $s_1, s_2, \ldots, s_k \in V$, and k natural numbers $n_1, n_2, \ldots, n_k$ such that $\sum_{i=1}^{k} n_i = |V|$, we wish to find a partition $V_1, V_2, \ldots, V_k$ of the vertex set V such that $|V_i| = n_i$ and V_i induces a connected subgraph containing s_i for each $i = 1, 2, \ldots, k$. Such a partition is called a k-partition of G. The problem of finding a k-partition of a given graph appears in the traffic load balancing and the fault-tolerant routing. This problem is known to be NP-hard even if $k = 2$. But every k-connected graph has a k-partition. There are a linear-time algorithm to find a bipartition of a biconnected graph, an $O(|V|^2)$ time algorithm to find a tripartition of a triconnected graph and a linear-time algorithm to find a four partition of a 4-connected planar graph. On the other hand, no polynomial-time algorithm to find a k-partition of a k-connected graph is known for the case of $k \geq 4$. We first prove that we can get a tripartition of a given graph by using a directional embedding, which is an embedding of graphs proposed by Annexstein and Berman to get 3-independent trees of triconnected graphs. We then show that, from a directional embedding for three vertices $s_1, s_2, s_3 \in V$ specified in a given graph $G = (V, E)$, we can obtain a tripartition of G for any natural numbers n_1, n_2 and n_3 with $n_1 + n_2 + n_3 = |V|$. In this paper, we propose a new data structure called a *region graph*, which enables us to find a tripartition of a given graph in linear time. We show that a region graph for a given triconnected graph can be constructed in $O(|V|^2)$ time.

49. Ehab Morsy, Hiroshi Nagamochi:
"Approximating capacitated tree-routings in networks", The 4th Annual Conference on Theory and Applications of Models of Computation (TAMC07) Shanghai, China, May 22 to 25, 2007, Lecture Notes in Computer Science, 4484, pp. 342–353, 2007.
概要: The capacitated tree-routing problem (CTR) in a graph $G = (V, E)$ consists of an edge weight function $w : E \to R^+$, a sink $s \in V$, a terminal set $M \subseteq V$ with a demand function $q : M \to R^+$, a routing capacity $\kappa > 0$, and an integer edge capacity $\lambda \geq 1$. The CTR asks to find a partition $\mathcal{M} = \{Z_1, Z_2, \ldots, Z_\ell\}$ of M and a set $\mathcal{T} = \{T_1, T_2, \ldots, T_\ell\}$ of trees of G such that each T_i spans $Z_i \cup \{s\}$ and satisfies $\sum_{v \in Z_i} q(v) \leq \kappa$. A subset of trees in $\mathcal{T}$ can pass through a single copy of an edge $e \in E$ as long as the number of these trees does not exceed the edge capacity λ; any integer number of copies of e are allowed to be installed, where the cost of installing a copy of e is $w(e)$. The objective is to find a solution $(\mathcal{M}, \mathcal{T})$ that minimizes the installing cost $\sum_{e \in E} \lceil |\{T \in \mathcal{T} \mid T \text{ contains } e\}| / \lambda \rceil w(e)$. In this paper, we propose a $(2+\rho_{\mathrm{ST}})$-approximation algorithm to the CTR, where ρ_{ST} is any approximation ratio achievable for the Steiner tree problem.

50. 三輪直樹，趙亮，永持仁:
"P2P システムのための深さ最小木の構築について", 電気学会 通信研究会, Vol. CMN-07, No. 27-60, 101-106, 2007 年 9 月.
概要: リアルタイムの配信を目的とする P2P システムにおいて，各中継ノードの能力を超えないで遅延を最小にする必要がある．本論文は，この問題を有向グラフにおける出次数制約つき深さ最小木問題として定式化する．この問題は一般的に NP 困難であるので，近似アルゴリズムとして集中型アルゴリズムと分散型アルゴリズムを提案する．これらのアルゴリズムを用いて実験した結果，CPLEX を用いた厳密解法に比べ，短時間で質の高い解が得られることが確認できた．

51. Jun Uchida, Yoshiyuki Karuno, Hiroshi Nagamochi:
"Heuristics for a scheduling problem of minimizing the number of one-way vehicles on paths with deadlines", SICE Annual Conference 2007, September 17-20, 2007, Kagawa University, Japan, pp. 2633-2638, 2007.
概要: In this paper, we deal with a vehicle scheduling problem on paths with handling times and deadlines. Let $G = (V, E)$ be a path with a set $V = \{v_i \mid i = 1, 2, ..., n\}$ of vertices and a set $E = \{\{vi, vi + 1\} \mid i = 1, 2, ..., n-1\}$ of edges. Vehicles are initially situated at v_1. There is a job i at each vertex $v_i \in V$, which has its own handling time h_i and deadline d_i. With each edge $\{v_i, v_i + 1\} \in E$, a travel time $w_{i,i+1}$ is associated. A routing of a vehicle is called one-way if the vehicle visits every edge $\{v_i, v_{i+1}\}$ exactly once (i.e., it simply moves from v_1 to v_n on G). Any vehicle is assumed to move on G under the one-way routing constraint. The problem asks to find a schedule of one-way vehicles that minimizes the number of vehicles, meeting the deadline constraints for all jobs. In this paper, we propose a greedy heuristic algorithm to the problem, and show that it runs in $O(n^3)$ time and the approximation ratio is $O(\log n)$.

52. Xiaoming Wang, Yoshiyuki Karuno, Hiroshi Nagamochi:
"DP approaches to 0-1 integer programming in double-layered food packing systems", スケジューリング・シンポジウム 2007 講演論文集, pp. 121–126, 2007.
概要: In this paper, we deal with automated food packing systems with weighing and booster layers. The former layer consists of n weighing hoppers, and the latter consists of n boosters. The boosters are just

hoppers without weighing function. The double-layered packing system throws some amount of foods into each of empty hoppers. The foods thrown into each hopper can be regarded as an item with an integer weight. Given a set I of $2n$ items in all hoppers, the packing system chooses a subset I' ($\subseteq I$) of items, and puts them into a package so that the total weight of items is as close to a specified target weight T as possible. The choice of I' is constrained by the structural feature that each booster follows a weighing hopper settled over it. The packing system then brings new items to fill the resulting empty hoppers, and the set I is updated by taking the union of the remaining items in $I - I'$ and the new items. The packing system repeats the packing operation to produce a large number of packages one by one. We introduce a priority into each item secondarily for avoiding the situation that an item would be left in a hopper for a long time until it is chosen. In this paper, we formulate the food packing problem of choosing I' at each packing operation as a lexicographic bi-criteria optimization problem, and propose $O(n^2 w_{max})$ time algorithms based on dynamic programming, where w_{max} is an upper bound on the weight of an item.

53. 青木 一正，大舘 陽太，山崎 浩一:
“d-claw free graph の重み付き最大独立集合問題に対するタブーサーチ法の提案”, 情報処理学会研究報告, 2008-AL-116, 1-8, 2008 年 1 月 23 日.
概要: d-claw とは，完全 2 部グラフ $K_{1,d}$ と同型な誘導部分グラフである．d-claw free グラフとは，d-claw を持たないグラフである．d-claw free グラフに対する重み付き最大独立集合問題に対しては，いくつかの近似アルゴリズムが提案されている．良い近似率を保証するアルゴリズムは，d が小さく，かつ頂点数が少ないグラフに対しては，良い解を得られる．本論文では，Berman と Krysta の Optimizing Misdirection [P. Berman and P. Krysta, Optimizing Misdirection, Proc. of SODA 2003, pp.192–201.] を基としたタブーサーチ法を提案し，より良い解が得られることを実験的に示す．比較のために，Pullan 等が提案した（一般のグラフにおける）重み付き最大クリーク問題に対するメタヒューリスティックアルゴリズムを実装し，実験を行った．

54. Seok-Hee Hong, Hiroshi Nagamochi:
“Approximating crossing minimization in radial layouts”, The 8th Latin American Theoretical Informatics Symposium (LATIN08) April 7-11, 2008, Rio de Janeiro, Brazil, (発表決定).
概要: We study a crossing minimization problem of drawing a bipartite graph with a radial layout of two orbits. Radial layouts have strong application in social network visualization, displaying *centrality* of actors. The problem is called the one-sided crossing minimization if the positions of vertices in one of the two orbits are fixed, and is known to be NP-hard. We present the *first approximation* algorithm, proving that the one-sided crossing minimization in a radial layout is 15-approximable.

55. Takuro Fukunaga, Magnús M. Halldórsson, Hiroshi Nagamochi:
“Robust cost colorings”, ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms, January 20-22, 2008 Holiday Inn Golden Gateway San Francisco, California, (発表決定).
概要: We consider here coloring problems, where the cost of a color class is a function of the weight of the color class and the cost of a coloring is a sum of the costs of the color classes. When given an interval graph, this corresponds to an interval schedule where the cost of a resource is a function of the total weights of jobs assigned to that resource. We are interested in *concave* cost functions: the more we use a resource, the less each use of it costs. This corre-

sponds to the economic principle of volume discounts. A common weaker assumption is for a function to be *sub-additive*, which is when the cost of a whole is never more than the sum of its parts; i.e., breaking a set into pieces will not make it cheaper. This correspond to purchasing in chunks, i.e. "cheaper by the dozen". Cost coloring can apply to many of the innumerable practical applications For instance, the cost of a classroom in a timetabling application is not really a unit; different classrooms may have different costs, depending on size, and depending on the amount of use. The cost of a frequency in frequency allocation may depend on time- or space-limitations of the usage. The cost of fulfilling server requests, e.g., for bandwidth allocation in networks, may depend on the willingness to deploy servers, outsource some of the traffic (at a volume-dependent cost), or to pay the indirect cost of refusing service. Our main result is algorithm that finds an interval schedule that approximates any concave cost function within a factor of 4. More generally, we obtain a constant factor for all perfect graphs, under any sub-additive cost function. We actually get a *simultaneous* approximation: the algorithm is oblivious of the cost function, and approximates all sub-additive cost functions simultaneously. For graphs with uniform weights, we can modify the colorings (in a function-specific way, necessarily) to approximate any monotone cost function.

56. 趙亮，大嶋達也，永持仁:
"On the time-dependent shortest path problem", Chinese Academy of Sciences - Kyoto University Joint Workshop on Mathematical Methods for Informatics, Engineering and Management, March 2008.
概要: We review the time-dependent shortest path problem and give a generalization of the ALT algorithm proposed by Goldberg and Harrelson (2003) for the static shortest path problem.

57. Kazumasa Aoki, Kyohei Kozawa, Yota Otachi, Kazuyuki Ukegawa, Koichi Yamazaki:
"On the path distance width of the complete k-ary trees", 2007 年度 冬の LA シンポジウム, (発表予定).
概要: The *path distance width* of a connected graph $G = (V, E)$, denoted by $\mathrm{pdw}(G)$, is the minimum integer w satisfying that there is a nonempty subset of $S \subseteq V$ for which the number of the vertices with distance i from S is at most w for any nonnegative integer i. In this paper, we show lower and upper bounds for path distance width of complete k-ary trees such that the ratio between the upper bound and the lower bound does not depend on the depth of complete k-ary trees.

58. Kyohei Kozawa, Yota Otachi, Koichi Yamazaki:
"Security number for outerplanar graphs", 電子情報通信学会コンピュテーション研究会, (発表予定).
概要: Let $G = (V, E)$ be a graph and $S = \{s_1, s_2, \ldots, s_k\}$ be a subset of V. An *attack* on S is any k mutually disjoint sets $\mathcal{A} = \{A_1, A_2, \ldots, A_k\}$ such that $A_i \subseteq N[s_i] - S$ for $1 \leq i \leq k$, and a *defense* of S is any k mutually disjoint sets $\mathcal{D} = \{D_1, D_2, \ldots, D_k\}$ such that $D_i \subseteq N[s_i] \cap S$ for $1 \leq i \leq k$, where $N[v]$ denotes the closed neighborhood of v. Then $\mathcal{A}$ is said to be *defendable* if there exists a defense $\mathcal{D}$ such that $|D_i| \geq |A_i|$ for $1 \leq i \leq k$, and S is *secure* if every attack on S is defendable. In this paper, we show that any outerplanar graph has a secure set of size at most 3 and that for any given k there is a planar graph whose secure set has size at least k.

学会大会等

1. Wang Jiexun, Zhao Liang, Hiroshi Nagamochi, Akutsu Tatsuya:
   "An Efficient Algorithm for Generation Colored Outerplanar Graphs", TAMC 2007 (Shanghai, China), LNCS 4484, 573 – 583, May 2007.

2. Liang Zhao, Akira Shimae, Hiroshi Nagamochi:
   "Linear-tree Rule Structure for Firewall Optimization", CIIT 2007 (Banff Canada), 67 – 72, July 2007.

文部科学省科学研究費補助金 特定領域研究 (課題番号 16092215)

C07: Web コンテンツ活用に関連した離散最適化問題の研究

Web コンテンツ活用に関連して，1. 要約，検索など，Web コンテンツを知的活動において活用するのを支援するための技術に対する基本アルゴリズムの確立，2. Web コンテンツ配信方法を求める問題のグラフ理論的定式化とその解法，に重点をおいて研究を実施してきた．1 に関するおもな成果は以下のとおりである．自動要約の重要な要素技術である文圧縮において，エントロピー等をもちいて，名詞の修飾の必要性を推定することで，削除可能な動詞連体修飾節の認定を行う手法を考案した．また，交通事故事例に含まれる事故原因表現や企業業績要因表現の新聞記事からの統計的手法による学習によらない抽出法を考案した．2 に関するおもな成果は以下のとおりである．外平面グラフ上での最小枝ランキング問題に対する多項式時間アルゴリズムを考案した．また，最小節点ランキング全域木問題が NP 困難であることを証明し，また、外平面グラフ上での多項式時間アルゴリズムを開発した．

研究組織

研究代表者：	増山 繁	豊橋技術科学大学 知識情報工学系
研究分担者：	梅村 恭司	豊橋技術科学大学 情報工学系 (平成 17–19 年度)
	中山 慎一	徳島大学 総合科学部
	本間 宏利	釧路工業高等専門学校 情報工学科
	石井 利昌	小樽商科大学 商学部 (平成 17–19 年度)
	相田 慎	豊橋技術科学大学 知識情報工学系

交付決定額 (配分額)

平成 16 年度	4,000,000 円
平成 17 年度	3,100,000 円
平成 18 年度	2,900,000 円
平成 19 年度	3,800,000 円
合　計	13,800,000 円

研究成果の概要

- 学術誌
  Discrete Applied Mathematics (2006 年)(2007 年), Information Processing Letters (2007 年), Theoretical Computer Science (2005 年)(2007 年), Algorithmica (2006 年), Discrete Optimization (2006 年), IEICE Trans. Fundamentals (2008 年), IEICE Trans. Information and Systems (2005 年)(2006 年)(2008 年), Systems and Computers in Japan (2006 年) など
- 国際会議
  ISAAC2005 (Sanya, Hainan, 2005 年), ISAAC2007 （Sendai, 2007 年) The 4th Japanese-Hungarian Symposium Discrete Mathematics and its Applications (Budapest, 2005 年), CATS07 (2007 年), Coling2004 (Jeneva, 2004), International Symposium on Scheduling (Awaji-Island, 2004) など

1 はじめに

本グループでは、Web 上に存在する膨大な量の情報を活用するための技術的問題を離散最適化問題として定式化し、それに対し、実用的観点からみて有効かつ適切なアルゴリズムを開発することを目的とする。特に、以下の 2 つの項目に重点をおいて研究を実施してきている。

1. 要約、検索などの、Web コンテンツを知的活動において活用するのを支援するための基本技術の確立
2. Web コンテンツ配信方法を求める問題のグラフ理論的定式化とその解法

得られた主な成果は以下のとおりである。

1.1 Web コンテンツ活用に関連したテキストからの情報抽出及びテキスト自動要約

- 自動要約の重要な要素技術である文圧縮において，エントロピー等をもちいて，名詞の修飾の必要性を推定することで，削除可能な動詞連体修飾節の認定を行う手法を考案した．
- 交通事故事例に含まれる事故原因表現の新聞記事からの抽出
- ユーザの要約要求を反映するためにユーザとのインタラクションを導入した複数文書要約システム
- 論文 LaTeX 原稿からのプレゼンテーションスライド自動生成
- 文章閲覧における読者の操作行動からの興味の推定

テキストマイニングに関しては，新聞記事コーパスから交通事故原因表現を抽出する手法を提案した．

テキストマイニングでは，従来，人手で作成したルールに基づくか、または，学習データを人手で用意し，教師あり学習を用いて情報を抽出していた。

本研究では、「が原因」などの少数の手がかり表現を修飾している、「居眠り運転」などの事故原因表現を獲得する．次に，これらの時小原因表現が多く修飾してい表現を手がかり表現として取得するというプロセスをくり返す．ブートストラップ的手法を提案した．この手法は，最初に極少数の手がかり表現を人手で用意するだけで，後は，自動的に実行されるので，人間の労力をほとんど要しないのが特徴である．ここで開発した手法は，事象の原因表現抽出にかなり汎用的に応用できるものと思われる．

テキスト自動要約に関する研究では，検索結果から成る文書集合を対象として，ユーザの興味に適合するため，文書集合から抽出したキーワードをユーザに提示し選択させることでユーザとのインタラクションを導入した複数文書要約システムを開発した．更に，テキスト自動要約の応用として，論文からの発表用スライド自動生成の研究でも各セクションをひとつの文書と見ることで，上述の複数文書要約手法を応用し，更に，箇条書きの自動生成を試みるなどの成果を得た．

1.2 Web コンテンツ配信と関連した問題、および、その基盤としての高度情報通信網に関連した問題

- 外平面グラフ上での最小枝ランキング問題に対する多項式時間アルゴリズム
- 最小節点ランキング全域木問題の計算複雑度
- 外平面グラフ上での最小節点ランキング全域木問題に対する多項式時間アルゴリズム
- コンテンツ配信の基盤となる高度情報通信網上での非同期分散分枝限定法を定義し、その正当性と有限時間停止性を証明した。また、それのもつ可能性を論じた。
- モバイルエージェント実行計画問題について

最小枝ランキング問題とは，与えられたグラフに，同じラベルを持つ枝どおしを結ぶ任意の路上に少なくともひとつそれより大きいラベルをもつ枝が存在するような辺へのラベル付けの中で，最大ラベルを最小にする問題であ理，一般のグラフに対しては，NP-hard であることが知られている．

２連結外平面グラフに対して，多項式時間のアルゴリズムを考案した．

一方、節点ランキングとは，与えられたグラフに，同じラベルを持つ節点どおしを結ぶ任意の路上に少なくともひとつそれより大きいラベルをもつ節点が存在するような節点へのラベル付けをいう。最小節点ランキング問題とは，グラフ G で節点ランキングで付されたラベルの最大値を最小にする問題であり, その値を $\chi(G)$ とする。最小節点ランキング全域木問題 (MVRST) とは，グラフ G の全域木 T の中で $\chi(T)$ が最小となるものを求める問題である。本研究では，MVRST が NP 困難であることを証明し，また、置換グラフ，外平面グラフに対して効率の良いアルゴリズムを得た．

その他、他グループのメンバーとの共同研究として以下の成果を得た。

1. 2 種類の資源集合を持つ 3 連結グラフを 2 分割する頑健なアルゴリズム [学術論文 8]
2. タンク繰りにおける経路探索法 [学術論文 9]
3. 最小数の枝付加による $(k-1)$ 節点連結多重グラフから 1 枝連結かつ k 節点連結多重グラフへの変換 [学術論文 10]
4. 森への枝付加により奇数長の直径 D を実現する 8 近似アルゴリズムの考案 [学術論文 11]

次章以下では，Web コンテンツ配信と関連した問題、および、その基盤としての高度情報通信網に関連した問題，ならびに、Web コンテンツ配信と関連した問題、および、その基盤としての高度情報通信網に関連した問題のそれぞれに対して，おもな成果を紹介する．

2 Web コンテンツ活用に関連したテキストからの情報抽出及びテキスト自動要約

2.1 可読性の向上を目的とした片仮名表記外来語の換言知識獲得 [学術論文 2]

外来語である片仮名語、特に英語を語源とした片仮名語の和語または漢語への換言のための知識獲得に関する研究を行なった。近年、公的文書等における難解な片仮名語の乱用が問題視されている。片仮名語の大部分は英単語に基づく外来語であり、従来日本語で用いられてきた語彙に換言可能な場合も多い。換言とは、ある言語表現の意味内容を保持したまま別の表現へと言い替えることであり、自然言語処理のための要素技術として今後ますます重要になると認識されている。換言するための知識は人手で作成することもできるが、実用的な質と量を満たすためには多大な労力を要する。そのため、換言知識は可能な限り自動的に獲得することが望ましい。以上より、本研究では、難解な片仮名語をより理解し易い語へと言い替えるための換言知識を自動的に獲得することを目的としている。手順としては、まず、片仮名語の元になった英単語を復元する。そして、得られた英単語の日本語訳を辞書によって獲得し、候補を絞り込む。実験の結果、英単語復元は再現率 82.2%、精度 81.1%を得、換言候補獲得については再現率 14.6%、精度 70.8%となった。

近年、日本語の公的文書において片仮名語が多用されるようになり、文書可読性の低下が問題となっている。国立国語研究所は、自治体の広報紙等で用いられることの多い難解な外来語である片仮名語に対して、より理解しやすい語への換言例を作成し、文書可読性の向上を推奨している。換言とは、ある言語表現の意味内容を保持したまま、別の表現へと言い替えることであり、その有用性が最近注目されている。同所は、今後も半年に５０語程度ずつ換言例を追加するとしている。このような手順をとっている理由としては、一度にすべての換言知識を整備することが困難であること、外来語である片仮名語には新語が多いため、ある時点で換言知識を十分に整備したとしても、次の年には知識の追加や更新が必要になること等があげられている。２００４年１２月現在で提案されている語は１４１語であり、日常的に用いられている片仮名語に比べると、はるかに少ない。より大量の換言知識を整備するために、全ての換言規則を人手で作成するのではなく、ある程度自動的に取得することが望ましい。

本研究では、片仮名語からの換言知識を自動獲得するための手法を考案した。その際に、片仮名語の性質に特化した手法を用いることで性能の向上を試みた。

換言知識の自動獲得の研究としては、他にも、パラレルコーパスを用いたものがある。しかし、一般に大量のパラレルコーパスを利用することは

困難であり、獲得された換言知識の量は少ない。特に、片仮名語に関しては、パラレルコーパス自体が入手困難であるため、本研究では考慮していない。また、久光らは、括弧表現を利用して換言事例を自動獲得している。この方法も、獲得される知識の量は多くないが、単一のコーパスから知識獲得が可能であることや、獲得された知識の正解率が高いこと等の利点もある。そのため、本研究では、この研究に基づく手法も併用している。

換言の必要がある片仮名語の大部分は、英語に基づく外来語である。つまり、その片仮名語が日本語の語彙中では新語・未知語だったとしても、元となった英単語は、英語の語彙中で既知の場合が多い。そのため、日英翻訳のための辞書を用いて、英単語から日本語訳を獲得することができる。そこで、片仮名語から元になった英単語を復元する。一般に、ひとつの英単語に相当する日本語訳は、数十語程度獲得されるので、その中から最もふさわしい一語に絞り込むために、統計的手法を併用する。英単語が復元できなかった場合の換言候補はコーパス中の全名詞とする。以上が、本手法の主要部分の概要である。また、難解な片仮名語は新聞記事中で補足説明されている場合がある。本手法では、これらの情報も利用し、換言知識獲得の手助けとした。

実験の結果、英単語復元は再現率 82.2%，精度 81.1%を得、換言候補獲得については再現率 14.6%、精度 70.8%となった。

2.2 略語とその原型語との対応関係のコーパスからの自動獲得手法の改良 [学術論文 3]

日本語には，ある名詞から一部の文字を省略することで意味内容を保ったまま別の表現に変換する事例が多く存在し，一般に略語と定義される．例えば,「原発」は,「原子力発電所」の略語であり,「原子力発電所」からいくつかの文字が省略されているにもかかわらず，同一の意味を持つ．また，複合名詞から一部の名詞が省略されても意味が変わらない，あるいは，読み手が省略された名詞を推定できる場合が存在する．例えば「バブル経済崩壊」から「経済」が省略されて「バブル崩壊」と表記されても，一般知識から「経済」を推定することができる．このような名詞と略語との対応も要約や検索において有用な知識であるため，抽出対象とする．そのため，本稿では，複合名詞から名詞が省略された場合も同じく略語と定義し，略語とそれに対応した元の語との対応関係をコーパスから自動的に獲得する手法を提案する．(以降，略語に対応した元の語を原型語と定義する．)

略語とその原型語との対応関係を取得できれば，情報検索や文書要約において有用である．

- 検索：検索キーワードとして略語を入力した場合でも，その略語に対応する原型語を含む文書も検索できるようになる．新しい略語は常に発生し続けるため，人手による登録では多大な労力が必要となる．本手法はコーパスに含まれている略語とその原型語との対応を自動的に取得できるので，インターネットのニュース記事等をコーパスに使用すれば，最新の略語と原型語との対応も獲得可能である．

- 要約： 名詞の略語は元の名詞から一部の文字が削除された表現であるので，文字数が少なくなるにもかかわらず同一の意味をもつ名詞である．そのため，文中の名詞を略語に置き換えることによる文内要約に利用できる．また，複数文書要約においては異った文書中で略語とその原型語が混在している場合があり，冗長性の削除のために略語とその原型語を認識できる必要がある．

略語とその原型語との対応関係の獲得は言い換え知識獲得の一種である．なぜなら，略語と原型語は表記が異なるにもかかわらず同じ意味を持つからである．

言い換え知識獲得は，例えばシソーラスの構築や語のクラスタリングといった研究とは同じ意味を持つ表現を獲得しなければならないという点で異なる．言い換え知識獲得の研究としてさまざまな手法が提案されている．例えば，原著に対する複数の翻訳本から言い換え知識を獲得する手法,「サ変名詞+する」から動詞相当句へ言い換える手法,「A が V する B」のような動詞連体修飾表現を「A の B」へ言い換える手法などがある．本手法は略語と原型語との対応関係をコーパスから獲得する手法であり，それに対応した手法を開発する必要がある．

関連研究として，括弧表現から語の対応を自動抽出する手法が提案されている．例えば「朝鮮民主主義人民共和国（北朝鮮）」から「朝鮮民主主義人民共和国」と「北朝鮮」との語の対応を獲得している．この手法により本稿で述べる手法では獲得できない対応を獲得することができるが，コーパスに括弧表現として記載されている対応しか獲得できない．例えば，コーパスに「原子力発電所(原発)」という文字列が出現しないと,「原子力発電所」とその略語「原発」との対応は獲得できない．しかし，その略語が一般的に知られている表現であれば，名詞 (略語) の表現はコーパス中に出現しないと考える．それに対して，本手法では括弧表現のような特別な文構造を必要としないため,「原子力発電所」とその略語「原発」との対応を獲得できる．

英語の略語復元に関する関連研究として，プログラムソースに出現する略語を規則に基づいて復元する手法が提案されている．日本語の略語復元に関する関連研究として，入力された略語を復元規則に基づいて復元する手法が提案されている．また，入力されたカタカナ語の省略形を WEB 文書を使用して推定する手法が提案されている．それらに対して，本手法は日本語の略語とそれに対応する元の語との対応をコーパスから取得する手法であり，入力された略語を元の語へ復元する研究ではない．そのため，コーパスに出現する各名詞が略語か原型語であるかどうかの情報は与えられていないことを手法の前提としている．また，本手法ではカタカナ語の省略形以外にも，漢字による略語と原型語との対応も取得する．しかし，3.1 節でも述べるが，表層的な文字情報による規則のみで不適切な略語候補と原型語候補との対応を排除し，略語とその原型語との対応を取得することは困難であると考える．そのため，本手法では，コーパスに含まれる名詞対から規則を適用して略語候補と原型語の候補との対応を取得し，その後，略語候補と原型語候補の類似度を統計情報を使用して計算し，類似度が高い略語候補と原型語候補との対応を略語と原型語との対応として取得する．

英語における略語と原型語との対応のコーパスからの取得の先行研究としては，一方は略語を多く含み，もう一方は略語が少ない同一ドメインの文書群を 2 つ用意し，略語を多く含む文書における未知語は何かの略語である可能性があるとして，もう一方の文書群から対応する名詞を抽出する手法が提案されている．しかし，この手法では同一ドメインの略語を多く含むコーパスと含まないコーパスを共に用意しなければならない．そのため，そのようなコーパス対の入手が必ずしも可能であるとは限らない上，ドメインが限定されるため，そのドメインにおける略語と原型語との対応しか抽出できない．

それらの先行研究に対して，我々は，以前に単一のコーパスから略語と原型語との対応を抽出する試みを行なった．この手法は，日本語における名詞の文字情報による規則を用いて，略語候補と原型語候補との対応をコーパスから探索する．そして，略語候補と原型語候補の名詞間類似度を計算し，ある閾値より名詞間類似度が高い対応を略語と原型語との対応として取得する．我々の既提案手法は，単一のコーパスから名詞と略語との対応を抽出することを試みるため，ドメインに依存しない略語を抽出可能であった．また，文内の構造は用いないため，例えば括弧表現のような特殊な構造をしていなくても，略語と原型語との対応を抽出可能である．本稿で提案する手法は，我々の既提案手法を改良し，既提案手法に比べて同一の再現率において高い精度を目指したものである．

本手法と既提案手法とでは，名詞間類似度の計算手法が異なる．既提案手法は，正しい略語と原型語の対応でも低い類似度が割り当てられることがある．既提案手法では略語候補，原型語候補が出現する文に含まれる全ての名詞を取得し，それを意味属性に汎化する．そして，その意味属性に付与された重みを要素としたベクトルを生成し，ベクトル間の余弦を略語候補と原型語候補の類似度とする．しかし，略語候補や原型語候補と関連が低い名詞の意味属性をも要素とするため，多くの非零要素を持つベクトルが生成される．そのため，たとえ正しい略語と原型語の対応でも低い類似度が割り当てられることがある．それに対して，本手法は，略語候補や原型語候補に対するベクトルを生成する際に，略語候補や原型語候補を含む文書から名詞を取得する．そして，略語候補や原型語候補に関連のある名詞を抽出する処理を行い，無関係な名詞によるベクトル成分への悪影響を抑

制する．評価の結果，既提案手法より同一の再現率において高い精度を達成した．また，提案した手法のより詳細な実験を行い，本手法の有効性を確認した．

2.3 交通事故事例に含まれる事故原因表現の新聞記事からの抽出 [学術論文]

自動車の保有台数は，年々増加の一途をたどり，平成 13 年には 8,972 万台と，国民 1.4 人に 1 台の割合となった．それに伴い，交通事故が大きな社会問題となっている．事故統計によれば，道路交通事故発生件数は昭和 45 年の 720,880 件を最高に，一旦は減少した．しかし，昭和 50 年代半ばから再び増加傾向を示し，平成 5 年には昭和 45 年の件数を上回る．その後，増加の一途をたどり，平成 16 年には，952,191 件に達している．

交通事故低減に向けた効果的な対策のために，事故原因の分析が重要であることに疑問の余地はない．そのためのデータとして代表的なものは交通事故統計年報である．同事故統計は，発生時間帯別や当事者の年齢別など事故を様々な角度から集計しており，マクロ分析と呼ばれている．その中で，上記目的にあった集計には，道路形状別・昼夜別・事故類型別全事故件数，法令違反別・当事者別全事故件数，当事者別・行動類型別死亡事故件数などがある．例えば，事故類型別の集計では，事故を「出会い頭」,「追越・追抜時」等，36 種類の類型に分類して集計している．しかし，なぜ，出会い頭あるいは追越・追抜で事故になったかという原因は，このデータだけでは分からない．マクロ分析に対してミクロ分析がある．資料は，出会い頭事故をミクロ事故調査により，詳細に分析したものである．事故原因をドライバの「認知エラー」,「判断・予測エラー」で大別し，それぞれの原因を数項目に分類して分析している．このようなミクロ分析は，当事者の聞き取り調査によって初めて可能となった分析であり価値の高いものである．しかし，交通事故防止に関する研究のため，自分の研究テーマに沿った観点で分析したくても，同資料に開示された以上のことは不明である．しかし，同資料は公的な組織による交通事故現場での詳細な調査に基づくものであり，このようなデータを追加収集することは容易ではない．

一方，近年のインターネットの普及などにより大量の電子テキストが利用可能となった．その中にあるニュース記事や Web ページなどに，膨大な交通事故のテキスト情報が含まれている．そこで，情報検索・情報抽出などの言語処理技術を利用して，交通事故に関する大量のテキスト情報を抽出し，さらに，事故原因に関する情報を抽出できれば，従来のマクロ分析，ミクロ分析を補完する有用な情報になり得ると期待できる．本論文では，新聞記事の電子テキストデータに含まれる交通事故を扱った記事[1]から，事故原因に関する情報として事故原因を表す表現（例えば,「ハンドル操作を誤った」）を自動的に抽出する手法を提案する．

ここで開発した手法は，事象の原因表現抽出にかなり汎用的に応用できるものと思われる．

2.4 Cause Information Extraction from Financial Articles Concerning Business Performance

We propose a method of extracting cause information from Japanese financial articles concerning business performance. Our method acquires cause information, e.g. “自動車の売上げが好調 (*zidousya no uriage ga koutyou*: Sales of cars were good)”. Cause information is useful for investors in selecting companies to invest. Our method extracts cause information as a form of causal expression by using statistical information and initial clue expressions automatically. Our method can extract causal expressions without predetermined patterns or complex rules given by hand, and is expected to be applied to other tasks for acquiring phrases that have a particular meaning not limited to cause information. We compared our method with our previous one originally proposed for extracting phrases concerning traffic accident causes and experimental results showed that our new method outperforms our previous one.

[1] なお，本論文における交通事故事例は道路交通事故に限る．

2.5 An Informative DOM Subtree Identification Method from Web Pages in Unfamiliar Web Sites

We propose a method of informative DOM subtree identification from a Web page in an unfamiliar Web site. Our method uses layout data of DOM nodes generated by a generic Web browser. The results show that our method outperforms a baseline method, and was able to identify informative DOM subtrees from Web pages robustly.

2.6 動詞連体修飾節の省略可能性に関するコーパスからの 知識獲得

テキスト自動要約における文内要約の一要素技術として、動詞連体修飾節の省略可能性に関する知識をコーパスから獲得する手法を提案した。具体的には、動詞連体修飾節が修飾している名詞に対して、修飾されやすさ、修飾多様性をコーパスから調べ、修飾される頻度が低い、若しくは、修飾する動詞の種類が限定されている名詞に係る動詞連体修飾節を省略可能と認定する。同時に、重要な内容を持つ名詞に係り、かつ、重要な内容を持たない動詞連体修飾節を省略可能と認定する。なお、修飾多様性を計るのにエントロピーを用いた。本手法によって省略可能と認定された動詞連体修飾節を評価したところ、再現率 69.4%において, 精度 77.3%との結果を得た。

近年のコンピュータと情報通信技術の進歩により、多くの情報を得ることができるようになった。しかし、それは同時に情報の氾濫を招き、その結果、文書情報を要約するテキスト自動要約の必要性が高まってきている。要約とは、人間がテキスト内容の理解、取捨選択をより容易にできるようにするために、元のテキストを短く表し直したものをいう。これまでの研究で提案されてきた要約手法は、ある文書集合に対して重要な文を抽出し文書を再構成する重要文抽出型の要約や、一文毎に不要箇所を認定し、その不要箇所を省略することで要約を行なう文内要約などがある。しかし、どのような使用目的の要約でも作成できる万能な手法は存在しないため、要約の使用目的に応じた手法を選択し、時には、複数の手法を併用して要約を作成することが必要となる。基本的には、ある文書集合に対して重要文抽出を行ない、その文に対していくつかの文内要約の手法を適用することで、要約文書を作成する要約システムを構築する。例えば、国立情報学研究所主催の情報検索、質問応答、文書要約の評価のためのワークショップ、NTCIR2 における要約タスク TSC 1 で好成績を収めた我々のシステム YELLOW もこのような構成をしている。

テキスト自動要約における文内要約の目的は、重要文抽出で抽出された文を更に短縮し、要約率を下げることである。重要文抽出のみのテキスト自動要約システムでは、長い文が頻出する文書を要約する場合において、低い要約率が達成できない、もしくは、低い要約率を達成するために抽出可能な文数が少なくなり、要約文書に入れることができる情報が減少する。テキスト自動要約において、文内の情報欠落の少ない部分を削除することで重要文を更に短くし、なるべく多くの情報を入れるために、長い文を短くする文内要約技術が必要である。

本研究では、文内要約の一要素技術として、不要箇所省略による要約を実現するための一手法である、文中の省略可能な動詞連体修飾節を認定するために必要な知識をコーパスから獲得する手法を提案した。省略可能と認定された動詞連体修飾節を文中から削除することで、重要文抽出された文を、更に短い文にすることができる。よって、本手法を重要文抽出型の要約システムに組み込むことで、要約率を更に下げることができる。本研究における目標は、省略可能な動詞連体修飾節をできるだけ多く、かつ、高い精度で認定することである。そして、本研究で提案する手法によって、この目標は概ね達成可能である。

本研究では、形態素情報などのタグが付与されていない一般のコーパスから不要箇所省略による要約において利用できる言語知識を自動的に獲得し、それを用いて要約を行なう一手法を提案した。ここで、不要箇所の単位として連体修飾節の動詞連体修飾節（以降、動詞連体とする）に着目する。動詞連体とは、名詞を修飾している連体修飾の中で、動詞を含み、かつ、その動詞が名詞を修飾している連体修飾節と定義する。例えば、「大舞台

で演技するスター」の「大舞台で演技する」は、名詞「スター」を修飾している動詞連体である。本手法では、動詞連体が修飾している名詞に対して、修飾され易さ、修飾多様性をコーパスから調べる。そして、修飾される頻度が低い、もしくは、修飾する動詞の種類が限定されている名詞に係る動詞連体を省略可能と認定する。また、動詞連体の内容、および、前後の文脈を考慮して、以下のような工夫を行なっている。

(1) その動詞連体に含まれている情報が以前の文にも含まれている情報である場合には、省略可能と認定され易くする。

(2) 重要な情報が含まれている場合には、省略可能と認定されにくくする。

なお, 修飾多様性を計るのに, エントロピーを用いる。本手法によって省略可能と認定された動詞連体修飾節を評価したところ、再現率 69.4%において、精度 77.3%との結果を得た。

2.7 ユーザとのインタラクションを導入した複数文書システム

近年のコンピュータと情報通信技術の進歩により、多くの情報を得ることができるようになった。しかし、それは情報の氾濫を招き、そのことにより、文書情報を要約するテキスト自動要約の必要性が高まってきている。その中でも、複数の文書を自動要約する研究は、検索結果等の大規模な文書集合を大幅に縮めてひとつの文書として提供することにより迅速な理解を可能にする。そのため、その技術の確立が強く望まれており、近年、盛んに研究されている。複数文書要約とは、検索質問に適合する文書集合から指定された長さの要約を生成するタスクと定義される。ところが、検索質問に適合する複数の文書を要約するとはいえ、文書集合中や文書中の話題は一様ではない。たとえば、ソニーの AIBO の発売に関するものや販売方法に関するものなど様々な話題が含まれている。要約された文書は、これらの話題をすべて盛り込んでいることが望ましいが、少ない文字数では、すべてに対応することは困難である。そこで、多様な要約要求に対応するために、ユーザとのインタラクションを導入した複数文書要約システムを開発する。まず、要約対象となる文書集合から検索質問と関連したキーワードを自動的に抽出し、ユーザに指示する。次に、ユーザが情報要求に適したキーワードを選択、もしくは、適さないキーワードを削除し、選択したキーワードによって生成される要約文書を制御する。

本要約システムは、検索と要約の評価のためのワークショップ NTCIR4 における要約タスクに参加し、良好な評価結果を得た。但し、参加の際は、本システムで付されたスコアの上位から一定数キーワードを選択することで、インタラクションを導入せず自動要約システムとして参加し、評価を受けた。

2.8 ユーザの要約要求を反映するためにユーザとのインタラクションを導入した複数文書要約システム [学術論文]

近年のコンピュータ，および，情報通信技術の進歩により，膨大な量の機械可読な情報を簡単に得ることができるようになった．しかしながら，それは情報の爆発を招き，不必要な情報や冗長な情報も多く含まれるようになった．この情報爆発の問題を解決するために，文書中の不必要な情報を除去し，重要な情報のみを取り出す文書自動要約の必要性が高まっている)．従来，文書自動要約とは，主として 1 つの文書から 1 つの要約を自動的に生成する技術であった．しかしながら，人間が知的な活動を行うためには 1 つの文書の要約を生成するよりも，ある事柄に関連した複数の文書から 1 つの要約を生成する技術 (すなわち，複数文書要約技術) の方がより重要である．なぜなら，人間の限られた情報処理能力では，検索結果などで得られた関連した多くの文書を読むのに多大な時間が必要であり，それらを 1 つの要約にまとめることで読む時間の大幅な削減が可能になるからである．特に，ある検索要求の検索結果として得られた文書集合に対する複数文書要約を生成することで，ユーザの負担もなく素早く検索結果の内容を確認できることから，実用性，将来性ともに期待できる技術である．そのため，複数文書要約技術の確立が強く望まれており，近年，盛んに研究されている．

本論文では，複数文書要約とは，検索要求に適合する文書集合から，指定された長さの 1 つの要

約を作成するタスクと定義する．そのため，要約対象となる文書集合は1つの検索要求の話題に関連している文書集合である．(例えば，天体望遠鏡「すばる」の試験観測開始に関する文書集合，タンザニア，ケニアでの米国大使館爆破事件に関する文書集合など．) ところが，検索要求に適合する文書集合から1つの要約を生成するとはいえ，その文書集合には多くの内容が含まれており，文書集合に含まれる各文書の内容は一様ではない．例えば,「ソニーのＡＩＢＯ発売に関する文書集合」には，ＡＩＢＯの動作に関するものや販売方法に関するものなど，様々な内容が含まれている．この文書集合から生成される要約は，これらの内容を全て盛り込んでいることが望ましいが，全ての内容を含む要約を少ない文字数で生成することは困難である．さらに，重要な情報として認識される内容は，ユーザによって異なる．これは，検索要求に適合する文書集合に含まれるいくつかの情報の中で，ユーザが知りたい情報がユーザごとに異なることが1つの原因である．例えば,「ソニーのＡＩＢＯ発売に関する文書集合」を要約する場合,「アイボの機能」に関する情報が知りたいユーザと「アイボの販売方法」に関する情報が知りたいユーザでは，そのユーザにとって生成される要約に含まれるべき情報が異なる．

本論文では，複数文書要約において，ユーザが知りたい情報を「要約要求」と定義し，要約要求を反映した要約 (すなわち，ユーザが知りたい情報を含む要約) を生成するために，ユーザとのインタラクションを導入した複数文書要約システムを提案する．具体的には，まず，要約対象となる文書集合から，検索要求の話題と関連した k 個のキーワードを自動的に抽出し，ユーザに提示する．ユーザは提示されたキーワードの中から自分の要約要求に適したキーワードを選択する．本複数文書要約システムは，ユーザが選択したキーワードを使用して要約を生成することで，ユーザの要約要求を反映した要約を生成する．本複数文書要約システムは，次の4つの処理で構成される．

キーワード抽出： 要約対象である，ある検索要求に適合する文書集合から，その検索要求の話題と関連したキーワードを抽出する．(抽出されたキーワードをユーザに提示する．)

重要文抽出： ユーザによって選択されたキーワードを使用して，要約対象の文書集合から重要文を抽出する．

冗長情報除去： 文書集合から抽出された重要文の集合には同じ内容を含む文が含まれている．そのため，抽出された重要文集合に含まれている，冗長な情報を含む文を削除する．

文圧縮： 抽出された重要文の中に含まれる不要な部分 (動詞連体修飾節) を除去し，1文の文字数を減らすことで，文を圧縮する．

複数の文書が含まれる1つの文書集合に対して，キーワード抽出，重要文抽出，冗長情報除去，文圧縮を行い，1つの要約が生成される．

本複数文書要約システムは，検索と要約の評価のためのワークショップNTCIR4 [2] における要約タスク (以降，TSC3) に参加し，複数文書要約タスクにおいて良い成績を達成したことを示す．

2.9 文章閲覧における読者の操作行動からの興味の推定

文章情報を対象とし、「興味の程度」を推定することを試みた．推定の手がかりとして，文章閲覧時のユーザの挙動データ、具体的には画面を送るためのスクロール操作の時間情報、を用い，ユーザの興味を推定する問題として設定した．従来，興味の程度と閲覧時間が相関することから，閲覧時間によって興味を推定していた（この特徴量を速度指標と呼ぶ)。しかし、文の難易度などによっても閲覧時間が影響されるため，速度指標のみでは推定精度と安定性の面で不十分と考え，それを補間する新たな指標として，文の言語情報から標準的な閲覧時間を推定し，それと実測閲覧時間の乖離の程度を指標化（乖離指標）した．その結果，興味の推定における正解率に関し，乖離指標単体で速度指標と同等の性能を示した．また、乖離指標と速度指標の相関が低いことも確認した．

[2] http://research.nii.ac.jp/ntcir/workshop/work-ja.html

2.10 LaTeX 原稿からのプレゼンテーションスライド自動生成

研究のプレゼンテーションでは、限られた時間の中で，聴衆に研究成果をよく理解してもらうためにプレゼンテーションスライドの作成が必要不可欠である．しかし、スライドの作成には多くの時間と手間を擁する．そのため、多くの研究者がスライド作成を望んでいる．本研究では，研究者の負担を軽減することを目的として，論文 LaTeX 原稿からスライドを自動生成する手法を提案する．本手法では，LaTeX ファイルの解析，スライドへの内容の割り当て，接続詞を利用した箇条書き生成を行う．LaTeX ファイルの解析では，スライド生成に必要な情報は残し，不要な情報の削除を行う．LaTeX ファイルの定型的な性質を利用すれば，必要な情報を特定することが可能である．スライド割り当てにおいては，論文中の名詞の出現頻度，エントロピー、idf 値に基づいて名詞の重要度を計算する．その重要度に基づいて，各セクションに対して，スライド枚数の割り当て，重要文の抽出を行う．接続詞を利用した箇条書き生成においては、並列関係表す接続詞を利用する．なぜなら、並列関係を表す接続詞を含む文には，その文と対になる文が存在することが多いからである．評価の結果，本手法は，論文に忠実なスライド生成に有効であることが分かった．

2.11 仕事文推敲支援に向けた連体修飾部不足に対する受容性判定法

文章推敲に関する従来研究では，主に，タイプミス，構文構造の複雑さ，表記の揺れを指摘する手法など，表記レベルと統語レベルの手法に重点がおかれていた．それに対して，本研究では，読みやすさを向上させるために，説明が不足していて論理展開が読み取りにくいと感じられる箇所を検出する技術を扱う．文章としては，情報を正確に伝達するための仕事文（仕事用の文）を対象としていて，文単位での情報不足を推敲対象とする．この課題は意味処理に踏み込むため，これまで十分研究が行われてこなかった．なお，語用論の「協調の原理」によれば，量の格率と呼ばれる情報不足と情報過多に関する遵守すべき原則がある．このうち情報過多を扱わない理由は，情報過多が冗長な情報を無視するのに基づく読者の負担を増やすだけであるのに対し，情報不足は理解困難という深刻な事態を招き，重要性が高いためである．実験準備から解析に至る流れは次のとおりである．まず，原文から連体修飾部を欠落させた課題文を生成し，次に，被験者にその箇所に情報不足を感じるかどうかを判定させ正解判定データを作成した．次に，正解判定データの一部から機械学習を行い，残りのデータを機械判定させる．機械判定に用いるおもな素性として，修飾部の欠落箇所におけるつながりの滑らかさに関係した語の連鎖に関する統計量を取り上げた．

3 Web コンテンツ配信と関連した問題、および、その基盤としての高度情報通信網に関連した問題

3.1 最小節点ランキング全域木問題の計算複雑度

グラフ G の節点ランキングとは、同じラベルをもつ任意の 2 節点を結ぶ路上に必ず両端の節点のラベルより大きなラベルをもつ節点が存在するように節点にラベルを振ることである。グラフ G の節点ランキングのうち、最大ラベルが最小となるものを最小節点ランキングという。与えられたグラフの全域木のうち、最小節点ランキングが最小となるものを求める問題を最小節点ランキング全域木問題 (MVRST: minimum vertex ranking spanning tree) という。この問題は、VLSI 設計、データ配信におけるサーバの配置問題、センサネットワークにおけるデータ処理プロセッサの配置等への応用が考えられる。

まず、3 次元マッチング問題が決定問題版の MVRST へ多項式時間帰着可能であることを示すことにより、MVRST が NP 困難であることを示した。また、グラフ G の、直径が最小となる全域木を求めるというアイデアに基づいた近似率 $\frac{\lfloor \frac{1}{2}(\ell+3) \rfloor}{\lceil \log_2(\ell+2) \rceil}$ の近似アルゴリズムを提案した。

一方、置換グラフに対し、長さ 4 以上の単純閉路を含まないなどの性質を用いることで、動的計画法に基づく $O(n^3)$ 時間のアルゴリズムを開発した。

3.2 外平面グラフ上で最小節点ランキング全域木問題を解く多項式時間アルゴリズム

前節で示したように最小節点ランキング全域木問題が一般にはNP困難であるが、グラフのクラスを外平面グラフに限定することで多項式時間のアルゴリズムをえた。本アルゴリズムは動的計画法に基づいている。

3.3 外平面グラフ上で最小辺ランキング問題を解く多項式時間アルゴリズム

An edge ranking of a graph G is a labeling r of its edges with positive integers such that every path between different edges e_u, e_v with the same rank $r(e_u) = r(e_v)$ contains an intermediate edge e_w) with rank $r(e_w) > r(e_u)$. An edge ranking of G is *minimum* if the largest rank k assigned is the smallest among all rankings of G. The *edge ranking problem* is to find a minimum edge ranking of given graph G. This problem is NP-hard and no polynomial time algorithm for solving it is known for non-trivial classes of graphs other than than the class of trees. In this paper, we first show, on a generaql graph G, a relation between a minimum edge ranking of G and its minimal cuts, which ensures that we can obtain a polynomial time algorithm for obtaining minimum edge ranking of a given graph G if minimal cuts for each subgraph of G can be found in polynomial time and the number of those is polynomial. Based on this relation, we develop a polynomial time algorithm for finding a minimum edge ranking on a 2-connected outerplanar graph.

3.4 Inequalities on the number of connected spanning subgraphs in a multigraph

Consider an undirected multigraph $G = (V; E)$ with n vertices and m edges, and let N_i denote the number of connected spanning subgraphs with $i(m \geq i \geq n)$ edges in G. Recently, we showed in [3] the validity of $(m-i+1)N_{i-1} > (i - n + \lfloor\frac{3+\sqrt{9+8(i-n)}}{2}\rfloor)N_i$ for a simple graph and each $i(m \geq i \geq n)$. Note that, from this inequality, $\frac{(m-n)N_n}{2N_{n+1}} + \frac{N_n(m-n+1)}{N_{n-1}} \geq 2$ is easily derived. In this paper, for a multigraph G and all $i(m \geq i \geq n)$, we prove $(m - i + 1)N_i - 1 \geq (i - n + 2)N_i$, and give a necessary and sufficient condition by which $(m - i + 1)N_i - 1 = (i - n + 2)N_i$. In particular, this means that $(m - i + 1)Ni - 1 > (i - n + \lfloor\frac{3+\sqrt{9+8(i-n)}}{2}\rfloor)N_i$ is not valid for all multigraphs, in general. Furthermore, we prove $\frac{(m-n)N_n}{2N_{n+1}} + \frac{Nn}{(m-n+1)Nn-1} \geq 2$, which isnot straightforwardly derived from $(m - i + 1)N_{i-1} \geq (i - n + 2)N_i$,and also introduce a necessary and sufficent condition by which $\frac{(m-n)N_n}{2N_{n+1}} + \frac{N_n}{(m-n+1)N_{n-1}} = 2$. Moreover, we show a sufficient condition for a multigraph to have $N_n^2 > N_{n-1}N_{n+1}$. As special cases of the sufficient condition, we show that if G contains at least $\lceil\frac{2}{3}(m - n)\rceil + 1$ multiple edges between some pair of vertices, or if its underlying simple graph has no cycle with length more than 4, then $N_n^2 > N_{n-1}N_{n+1}$.

3.5 On Optimal Parallel Algorithm for Finding all Hinge Vertices of a Circular-arc Graph

Let $G = (V; E)$ be an undirected simple graph with $u \in V$. If there exist any two vertices in G whose distance becomes longer when a vertex u is removed, then u is defined as a hinge vertex. Finding the set of hinge vertices in a graph is useful for identifying critical nodes in an actual network. A number of studies concerning hinge vertices have been made in recent years. In a number of graph problems, it is known that more efficient sequential or parallel algorithms can be developed by restricting classes of graphs. In this paper, we shall propose a parallel algorithm which runs in $O(\log n)$ time with $O(n/logn)$ processors on EREW PRAM for finding all hinge

vertices of a circular-arc graph.

3.6 モバイルエージェント実行計画問題について

モバイルエージェント実行計画問題を定式化し、各エージェントの通信するエージェント数を２に制限した場合ですら強NP完全であることを証明した。また、NP完全である範囲や、近似アルゴリズムについての検討を行なった。

マルチエージェントシステムは、特に人工知能の分野で精力的に研究されてきた。エージェントとはプロセスなどのような動作主体(computational entity)のことである。モバイルエージェントとは、任意のホストに移動可能なエージェントのことで、分散環境におけるプロセスマイグレーションの概念とほぼ同じである。マルチエージェントシステムにおけるモバイルエージェントの移動性に関する研究は、通信コストの削減を目的としている。しかし、あるホストに膨大な数のエージェントが集中すればそのホストは過負荷となることより、CPUコストと通信コストの両方のバランスをとるようにホストにエージェントを配置することによって、効率的な実行を目指すことが必要になる。通常、CPUコストの最大値を最小にするように設計されたこの種の配置最適化は、マルチプロセッサ上でのタスクスケジューリングの形式で表される。よって、よって、モバイルエージェントタスクに対応させ、ホストをプロセッサに対応されることにより、モバイルエージェントの負荷分散を達成することを、マルチプロセッサにおけるタスクスケジューリングの拡張とみなすことができる。しかし、従来のタスクスケジューリング問題では、モバイルエージェントの相互通信と移動について考慮することはできない。そこで、新たにこのような問題をモバイルエージェント実行計画問題として定義して、その計算複雑度を解析する。

マルチプロセッサ上のタスクスケジューリングは３０年以上の間研究されている。従来の研究では、CPUコストのバランスをとることや、タスク間の関係（半順序関係など）が着目されてきた。また、従来の研究により、タスクがpreemptiveでなければ問題はマルチプロセッサスケジューリングとなり、強NP完全となることが知られている。なお、タスクがpreemptiveの場合は、多項式時間で最適なスケジュールを得ることができる。

その一方で、モバイルエージェントシステム上でのシステム全体の観点からの負荷分散の研究は全くされてこなかった。この理由はエージェントが自律的存在であるためだと推察される。エージェントの移動の最適化に関して従来からいくつかの研究がなされているが、それらはすべて個々のエージェント移動に焦点を当てて研究したもので、システム全体の性能に関する研究ではない。例えば、データのリモートアクセス、メッセージ交換、プロセスマイグレーションの性能比較、一連のタスクのためのエージェント移動スケジュールタスクとエージェントの旅程(itinerary)を考慮したモバイルエージェントの選択などである。これらは、モバイルエージェントの相互通信を考えずに、エージェントとホストとの相互通信のみを考え、エージェントの移動スケジュールのみを最適化しようとしたものである。システム管理エージェントに関しては、そのような定式化は適切であり有用であるが、実際の多くのエージェントシステム（たとえば、情報交換や契約など）では、エージェントの相互通信を必要とする。もちろん、エージェント間での通信に関する研究（たとえば、契約ネットなど）は多く行なわれているが、これらの研究は負荷分散に焦点を合せていない。

システム全体の性能向上を目指すのは、個々のエージェント利益を平均的に良く保つと予想できることより妥当である。そこで、システム全体の仕事の完了時間を最小にすることを目的とする、モバイルエージェントの相互通信に関する要素を定式化に取り込む。

モバイルエージェントはpreemptiveタスクとみなすことができる。よって、エージェント間に通信が全くないなら、多項式時間で最適な配置を得ることができる。しかし、エージェントが互いに通信するとき、これを得ることができるかどうかは分かっていない。本研究では、エージェントがお互いに通信する場合には、時間最適な配置を求めることは強NP完全であることを証明した。具体的には、CPUコストと実行途中のエージェントの移動の考慮を不要にし、さらに、各エージェントの通信相手が丁度二つのエージェントになるように制限した問題が強NP完全であることを証

明した。通常、エージェントは限られた数 ($O(1)$) のエージェントとのみ通信するため、この制限は現実のモバイルエージェントシステムの環境を反映している。この成果は、エージェントがお互いに通信する必要があるほぼすべての実際の状況に対し、最適なエージェントの配置を与えるどのような効率的なアルゴリズムもないであろうということを示したことになる。

3.7 グラフの連結度増大問題と供給点配置問題

I. 連結度増大問題 $(k-1)$ 枝連結グラフ G が、最適な場合に比べて $maxf\{\ell+1; 2k-4\}$ 個の余分な枝を付加することで ℓ 枝連結、かつ、k 節点連結に、$O(min\{k, \sqrt{n}\}kn^3 + n^4)$ 時間，但し，$n = |V|$，でできることを示した．

グラフ $G = (V; E)$ と整数 $D \geq 1$ が与えられたとき，G に最小個数の枝を付加して， 直径が高々 D と成るようにする問題を考える．任意のグラフ G に対して定数近似アルゴリズムは，$P = NP$ でない限り存在しないことが知られている．森 G と奇数 $D \geq 3$ に対して, 定数近似アルゴリズムが存在するかどうかは未解決であったが、それを肯定的に解決した．考案したアルゴリズムは，$O(|V|^3)$ 時間で 8-近似解を求める．さらに，与えられたグラフが 2 連結のときは，4-近似解が与えられたグラフ G と奇数 D に対し，線形時間で求まることを示した [文献 9].

無向多重グラフ $G = (V, E)$, 節点集合 $W \subseteq V$ の族, 及び, 要求関数 $r : \mathcal{W}$ (ここで、Z^+ は非負整数の集合), が与えられたとき，得られるグラフが任意の v, W 間, 但し, $v \in V, W \in \mathcal{W}$ に少なくとも $r(W)$ 個の枝素な路を持つように最小個数の枝を G に付加する問題を考える．任意の $W \in \mathcal{W}$ に対し $r(W) = 1$ である場合に NP 困難であること，また、任意の $W \in \mathcal{W}$ に対し $r(W) = r \geq 2$ である場合に対し多項式時間で解けることが知られていた．今回，任意の $W \in \mathcal{W}$ に対し $r(W) = r2$ であっても $O(m + pn^4(r^* + \log n))$ 時間で解けることを示した．但し，$n = |V|, m = |\{\{u, v\}|(u, v) \in E\}|$，$|p = ||\mathcal{W}|$，かつ $r^* = max\{r(W)|W \in \mathcal{W}\}$ である．

有限台集合 V，に対し，集合関数 $r : 2^V \rightarrow Z^+$ がが単調であるとは，$r(X') \geq r(X)$ が任意の $X' \subseteq X \subseteq V$, に対して成り立つことである．但し，$Z^+$ は非負集合である．無向多重グラフ $G = (V, E)$ と単調要求関数 $r : 2^V \rightarrow Z^+$ が与えられたとき, G に最小個数の枝を付加して、得られたグラフ G_0 が任意の $\emptyset \neq X \subset V$ に対して $d_{G'}(X) \geq r(X)$ を満たすようにする問題を考える．但し，$d_G(X)$ は G の節点集合 X を表す．この問題は，枝連結集合増大問題を含み，一般には，r に対する多項式時間オラクルが利用可能な場合でも NP 困難である. 任意の $\emptyset \neq X \subset V$ が，$r(X) \geq 2$ ならばいつでも $r(X) > 0$ を満たすならば，$O(n^4(m + n \log n))$ 時間で解けることを示した．但し，$n = |V|$ $m = |\{\{u, v\} \mid (u, v) \in E\}|$ であり，q は各 $X \subseteq V$ に対し $br(X)$ を計算する時間である．

II. 供給点配置問題等

$G = (V, E)$ を節点集合 V と枝集合 E をもつ単純無向グラフとする．各節点 $v \in V$ は要求 $d(v) \in Z_+$ とコスト $c(v) \in R_+$, 但し，Z_+ と R_+ は、それぞれ、非負整数の集合と非負実数の集合である．与えられたグラフ G の節点連結要求を持つ供給点配置問題とは、S から任意の節点 $v \in V - S$ まで少なくとも $d(v)$ 個の枝素な路が存在するような S で $\sum_{v \in S} c(v)$ を最小にするものを見つける問題である。もし $d(v) \geq 4$ であるような節点 $V \in V$ が存在するならば，すべての節点が一様なコストを持つ場合でも NP 困難であることが知られている．

任意の $V \in V$ に対して $d(v) \leq 3$ が成り立つならば，この問題が $O(|V|^4(\log |V|)^2)$ 時間で解けることを示した．

$G = (V, E)$ を節点集合 V と辺集合 E をもつ有向グラフとする．. G は k 個のお互いに素な，資源集合と呼ばれる節点集合 $T_1, T_2, \ldots, T_k$ を持つ．但し，$|T_i|$ は各 i に対し偶数である．k 個の資源集合を持った 2 分割問題とは，節点集合 V の分割 V_1, V_2 で V_1 と V_2 によって誘導される部分グラフはそれぞれ連結であり，かつ，任意の $i = 1, 2, \ldots, k$ に対して $|V_1 \cap T_i| = |V_2 \cap T_i| = |T_i|/2$ が成り立つことをいう．2 分割問題は，$k = 1$ でも NP 完全であることが知られている．一方，G が $(k+1)$-連結（$k = 1, 2$）なら，任意の与えられた資源集合に対して G の 2 郡活が存在することが知られて

いる．また，$k \geq 3$ に対して $(k+1)$-連結グラフが 2 分割を持つという仮説が知られている．そこで，$k = 3$ ではこの仮説が成り立たないこと，また，G が 4-連結で K_4 をその部分グラフとして持つときに 2 分割を持ち、しかも $O(|V|^3 \log |V|)$ 時間で求まることを示した．更に $(k+1)$-辺連結性が $k = 1, 2, 3$. に対して十分であることを示した．

参考文献

[1] Atsushi Sasaki, Tadashi Araragi, Shigeru Masuyama, Keizo Miyata, Formulation of Mobile Agents Allocation and its Strong NP-Completeness, IEICE Trans. Inf. and Systems, Vol.E88-D, No.5, pp.1060-1063, 2005 年 5 月.

[2] 吉田辰巳, 遠間　雄二, 増山 繁, 酒井 浩之, 可読性の向上を目的とした片仮名表記外来語の換言知識獲得, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J88-D-II, No.7, pp.1060-1063, 2005 年 5 月

[3] 酒井 浩之, 増山 繁, 略語とその原型語との対応関係のコーパスからの自動獲得手法の改良, 自然言語処理, Vol.12, No.5, pp.207-231, 2005 年 10 月

[4] Hiroshi Nagamochi, Kengo Iwata, and Toshimasa Ishii, A robust algorithm for bisecting a triconnected graph with two resource sets, Theoretical Computer Science A, vol. 341, 364-378, 2005 年 6 月

[5] 石井利昌，永持仁，高橋健吾, 西垣豊, 武田真人, タンク繰りにおける経路探索法, システム制御情報学会論文誌, vol.18, no.6, 213-221, 2005 年 6 月

[6] Hiroyuki Sakai, Shigeru Masuyama, Knowlege Acquisition about the Deletion Possibility of Adnominal Verb Phrases, Systems and Computers in Japan, Vol.37, No.2, pp.25-36, 2006 年.

[7] 酒井 浩之, 梅村 祥之, 増山 繁, 交通事故事例に含まれる事故原因表現の新聞記事からの抽出, 自然言語処理, 13 巻 2 号, pp.99-123, 2006 年 4 月

[8] 酒井 浩之， 増山 繁, ユーザの要約要求を反映するためにユーザとのインタラクションを導入した複数文書要約システム, 知能と情報 (日本知能情報ファジィ学会誌), Vol.18, No.2, pp.265-279, 2006 年 4 月

[9] 宮本　雅人, 酒井　浩之, 増山　繁, 論文 LaTeX 原稿からのプレゼンテーションスライド自動生成, 知能と情報 (日本知能情報ファジィ学会誌), Vol.18, No.5, pp.752-760, 2006 年 10 月

[10] Keizo Miyata, Shigeru Masuyama, Shin-ichi Nakayama, Liang Zhao, NP-hardness proof and an approximation algorithm for the maximum vertex ranking spanning tree problem, Discrete Applied Mathematics, Vol.154, Issue 16, pp.2402-2410, 2006 年 11 月

[11] Shin-ichi Nakayama， shigeru Masuyama, A Polynomial Time Algorithm for Obtaining a Minimum Vertex Ranking Spanning Tree in Outerplanar Graphs(invited paper), IEICE Trans. Information and Systems, Vol.E89-D, No.8, pp.2357-2363, 2006 年 8 月.

[12] 梅村祥之, 増山 繁, 文章閲覧における読者の操作行動からの興味の推定, ヒューマンインターフェース学会誌, Vol.3, No.3, pp.435-444, 2006 年 8 月.

[13] Toshimasa Ishii, Hiroshi Nagamochi, and Toshihide Ibaraki, Augmenting a (k-1)-vertex-connected multigraph to an l-edge-connected and k-vertex-connected multigraph, Algorithmica, vol.44, no.3, pp.257-280, 2006 年 4 月.

[14] . Toshimasa Ishii, Shigeyuki Yamamoto and Hiroshi Nagamochi, Augmenting Forests to Meet Odd Diameter Requirements, Discrete Optimization, vol.3, pp.154-164, 2006 年 6 月.

[15] Toshimasa Ishii, Masayuki Hagiwara, Minimum augmentation of local edge-connectivity between vertices and vertex subsets in undirected graphs, Discrete Applied Mathematics, vol.154, issue 16, pp.2307-2329, 2006 年 11 月.

[16] Toshimasa Ishii, Hitoshi Fujita, Hiroshi Nagamochi, Minimum cost source location problem with local 3-vertex-connectivity requirements, Theoretical Computer Science, vol.372, pp.81-93, 2007 年 3 月.

[17] Hirotoshi Honma, shigeru Masuyama, On Optimal Parallel Algorithm for Finding all Hinge Vertices of a Circular-arc Graph, IEICE Trans. Fundamentals, Vol.E91-A No.1, pp.383-391, January, 2008.

[18] Peng Cheng, shigeru Masuyama, Inequalities on the number of connected spanning subgraphs in a multigraph, IEICE Trans. Computer and Systems, Vol.E91-D,. No.2, pp.178-186, February, 2008.

[19] 梅村 祥之, 増山 繁, 仕事文推敲支援に向けた連体修飾部不足に対する受容性判定法, 自然言語処理, Vol.14, No.14, pp.43-65, July, 2007.

[20] Shin-ichi Nakayama, Shigeru Masuyama, A Polynomial Time Algorithm for Obtaining Minimum Edge Ranking on Two-connected Outerplanar Graphs, Information Processing Letters, Vol.103, pp.216-221, 2007.

[21] Toshimasa Ishii, Kengo Iwata and Hiroshi Nagamochi, Bisecting a four-connected graph with three resource sets, Discrete Applied Mathematics, vol.155, 1441-1450, 2007 年 6 月.

[22] Toshimasa Ishii, Hitoshi Fujita and Hiroshi Nagamochi, Source location problem with local 3-vertex-connectivity requirements, Discrete Applied Mathematics, vol.155, 2523-2538, 2007 年 11 月.

[23] Masanobu Tsuruta, Hiroyuki Sakai, Shigeru Masuyama, An Informative DOM Subtree Identification Method from Web Pages in Unfamiliar Web Sites, IEICE Trans. Information and Systems, 掲載予定.

[24] Hiroyuki Sakai, Shigeru Masuyama, Cause Information Extraction from Financial Articles Concerning Business Performance, IEICE Trans. Information and Systems, 掲載予定.

[25] Shin-ichi Nakayama, Shigeru Masuyama, n $O(n^3)$ Time Algorithm for Obtaining the Minimum Vertex Ranking Spanning Tree on Permutation Graphs, Proc. of the 4th Japanese-Hungarian Symposium on Discrete Mathematics and its Applications, pp.250-256, 2005 年 6 月.

[26] Toshimasa Ishii, Kengo Iwata and Hiroshi Nagamochi, Bisecting a four-connected graph with three resource sets, Proc. of the 4th Japanese-Hungarian Symposium on Discrete Mathematics and Its Applications, 107-113, 2005 年 6 月.

[27] Toshimasa Ishii, Kengo Iwata and Hiroshi Nagamochi, Bisecting a four-connected graph with three resource sets, The The 16th Annual International Symposium on Algorithms and Computation (ISAAC 2005), 176-185, 2005 年 12 月.

[28] Shigeru Masuyama, Minimum Vertex Ranking Spanning Tree Problem(Invited Tutorial Paper), Proc. International Symposium on Scheduling 2004, pp.49-56, April, 2004.

[29] Hiroyuki Sakai, Shigeru Masuyama, A Multiple-Document Summarization System with User Interaction, Proc. of Coling2004, Vol.II, pp.1001-1007, August, 2004.

[30] Toshimasa Ishii, Minimum augmentation of edge-connectivity with monotone requirements in undirected graphs, Proc. of

the 13th Computing Theory: The Australian Theory Symposium (CATS'07), 91-100, 2007 年 1 月.

[31] Toshimasa Ishii, Greedy approximation for source location problem with vertex-connectivity requirements in undirected graphs, The 18th Annual International Symposium on Algorithms and Computation (ISAAC 2007), 29-40, 2007 年 12 月.

[32] Hiroyuki Sakai, Shigeru Masuyama, Extraction of Cause Information from Newspaper Articles Concerning Business Performance, Proc. of the 4th IFIP Conference on Artificial Intelligence Applications & Innovations (AIAI2007), pp.205-212, September, 2007.

研究業績一覧

学術論文

1. Atsushi Sasaki, Tadashi Araragi, Shigeru Masuyama, Keizo Miyata:
"Formulation of Mobile Agents Allocation and its Strong NP-Completeness", IEICE Trans. Inf. and Systems, Vol.E88-D, No.5, pp.1060-1063, 2005 年 5 月.
概要: We formally define the mobile agent allocation problems from a system-wide viewpoint and then prove that it is strongly NP-complete even if each agent communicates only with two agents. This is the first formal definition for acheduling mobile agents from the viewpoint of load balancing, which enables us to discuss its properties on a rigorous basis. The problem is recognized as preemptive scheduling with independent tasks that require mutual communication. The result implies that almost all subproblems of mobile agent allocation, which require mutual communication agents, are strongly NP-complete.

2. 吉田辰巳, 遠間　雄二, 増山 繁, 酒井 浩之:
" 可読性の向上を目的とした片仮名表記外来語の換言知識獲得", 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J88-D-II, No.7, pp.1060-1063, 2005 年 5 月.
概要: 本論文では, 外来語である片仮名語, 特に英語を語源とした片仮名語の和語または漢語への換言のための知識獲得に関する研究を行なった結果を報告した. 近年, 公的文書等における難解な片仮名語の乱用が問題視されている. 片仮名語の大部分は英単語に基づく外来語であり, 従来日本語で用いられてきた語彙に換言可能な場合も多い. 換言とは, ある言語表現の意味内容を保持したまま, 別の表現へと言い替えることである. 自然言語処理のための要素技術として, 今後ますます重要になると認識されている. 換言するための知識は人手で作成することもできるが, 実用的な質と量を満たすためには多大な労力を要する. そのため, 換言知識は可能な限り自動的に獲得することが望ましい. 以上より, 本研究では, 難解な片仮名語をより理解し易い語へと言い替えるための換言知識を自動的に獲得することを目的としている. 手順としては, まず, 片仮名語の元になった英単語を復元する. そして, 得られた英単語の日本語訳を辞書によって獲得し, 候補を絞り込む. 実験の結果, 英単語復元は再現率 82.2%, 精度 81.1%を得, 換言候補獲得については再現率 14.6%, 精度 70.8%となった.

3. 酒井 浩之, 増山 繁:
"略語とその原型語との対応関係のコーパスからの自動獲得手法の改良", 自然言語処理, Vol.12, No.5, pp.207-231, 2005 年 10 月.
概要: 略語とその略語に対する元の語 (原型語と定義) との対応関係を，コーパスから自動的に獲得する手法を提案する．本手法は，同一の再現率においてより高い精度を達成できるように，我々の既提案手法を改良したものである．このような知識は，情報検索や文書要約などにおいて有用である．本手法は，まず，略語候補とそれに対応した原型語の候補を，それらを構成している文字情報から獲得する．そして，略語候補と原型語の候補の

名詞間類似度を計算することで，略語とその原型語との対応関係を取得する．例えば，略語「原発」に対して，原型語「原子力発電所」のような対応関係を取得できる．なお、本手法はコーパスに出現する各名詞が略語か原型語であるかどうかの情報が与えられていることを前提としていない。評価の結果，名詞間類似度の閾値を 0.4 に設定した場合，精度 73.4% の結果を得た．本手法と既提案手法とを比較した結果，同一の再現率においてより高い精度を達成し，既提案手法よりも有効な手法であることを確認した．

4. Hiroshi Nagamochi, Kengo Iwata, and Toshimasa Ishii:
"A robust algorithm for bisecting a triconnected graph with two resource sets", Theoretical Computer Science A, vol. 341, 364-378, 2005 年 6 月.
概要: Given two disjoint subsets T_1 and T_2 of nodes in an undirected 3-connected graph $G = (V, E)$ with a node set V and an arc set E, where $|T_1|$ and $|T_2|$ are even numbers, it is known that V can be partitioned into two sets V_1 and V_2 such that the graphs induced by V_1 and V_2 are both connected and $|V_1 \cap T_j| = |V_2 \cap T_j| = |T_j|/2$ holds for each $j = 1, 2$. An $O(|V|^2 \log |V|)$ time and $O(|V|+|E|)$ space algorithm for finding such a bipartition has been proposed based on a geometric argument, where G is embedded in the plane $\Re^2$ and the node set is bipartitioned by a ham-sandwich cut on the embedding. A naive implementation of the algorithm, however, requires high precision real arithmetic to distinguish two close points in a large set of points on $\Re^2$. In this paper, we propose an $O(|V|^2)$ time and space algorithm to the problem. The new algorithm, which remains to be based on the geometric embedding, can construct a solution purely combinatorically in the sense that it does not require computing actual embedded points in $\Re^2$ and thereby no longer needs to store any real number for embedded points. Although the new algorithm seems to need more space complexity, it can be implemented only with $|V|$ linked lists such that each element stores an integer in $[1, |V|]$.

5. 石井利昌，永持仁，高橋健吾, 西垣豊, 武田真人:
"タンク繰りにおける経路探索法", システム制御情報学会論文誌, vol.18, no.6, 213-221, 2005 年 6 月.
概要: 石油化学事業においては, 石油化学プラントを最適な生産計画に従って効率的に運用することが要求されている．最適な生産計画を立案するためには，原料を貯蔵タンクを介しプラントへ効率よく供給するための経路取りの計算が必要である．通常, 購入された原料は, まず，港から一時的に複数の貯蔵用タンクに受け入れられ, その後生産計画に従って, プラントへ供給される．この際，配管網上で，港-タンク間，タンク-タンク間，またはタンク-プラント間において，互いに途中の配管を共有しない複数本の経路を見つけることが求められる．本研究では, この配管網上での経路探索問題をグラフモデルにより表現し，グラフアルゴリズムに基づいた解法を提案する．我々の解法では，要求されうる全ての経路をあらかじめ木状のデータ構造に蓄えておき，経路生成時にこのデータ構造を参照することにより計算時間の短縮を図る．提案アルゴリズムの有効性については, 昭和電工 (株) における事例を基に, 計算機実験により検証した.

6. Hiroyuki Sakai, Shigeru Masuyama:
"Knowlege Acquisition about the Deletion Possibility of Adnominal Verb Phrases", Systems and Computers in Japan, Vol.37, No.2, pp.25-36, 2006 年.
概要: We propose a method of acquiring Knowlege about the deletion possibility of adnominal verb phrases from a corpus. Our method acquires "frequency of modification of the noun by adnominal verb phrases", "variety of adnominal verb

phrases modifying the nown" etc., from a news paper corpus, and yields knowlege about the deletion possibility of adnomial verb phrases by using their statistical information. Our method also identifies adnominal verb phrases modifying nouns with important contents as deletable ones. Experimental results show that the precision and the recall attained 77.3% and 69.4%, respectively.

7. 酒井 浩之，梅村 祥之, 増山 繁:
"交通事故事例に含まれる事故原因表現の新聞記事からの抽出", 自然言語処理, 13 巻 2 号, pp.99-123, 2006 年 4 月.
概要: 新聞記事に含まれる交通事故事例の記事から事故原因を表す表現 (例えば,「ハンドル操作を誤った」) を自動的に抽出する手法を提案する．抽出結果に基づき交通事故事例の原因を分析することで，例えば交通事故防止装置の開発に役立てることができる．本手法では，まず，前処理として Support Vector Machines(SVM) を用いて新聞記事コーパスから交通事故事例の記事を抽出し，抽出された交通事故事例の記事から事故原因を表す表現を，新聞記事コーパスから得られる統計的な情報を使用して抽出する．具体的には，事故原因を表す表現がいくつか係る表現を種表現と定義して人手で 1 つ与え，種表現に係っている事故原因表現を自動的に取得する．そして，取得したいくつかの事故原因表現から自動的に種表現を取得し，さらに，取得した種表現から再び事故原因表現を取得する．このプロセスを繰り返すことで，事故原因表現，および，その種表現を取得していく．本手法を評価したところ，事故原因表現抽出の精度は 77.2% であり，再現率は 38.6% であった．また，事故原因表現，および，種表現を共に含んでいる文，もしくは，事故原因表現に「らしい」が追加された表現を含む文を原因文と定義し，その抽出精度，再現率を求めたところ，精度が 87.2%，再現率が 40.8% であった．

8. 酒井 浩之， 増山 繁:
"ユーザの要約要求を反映するためにユーザとのインタラクションを導 入した複数文書要約システム", 知能と情報 (日本知能情報ファジィ学会誌), Vol.18, No.2, pp.265-279, 2006 年 4 月.
概要: ユーザの要約要求を反映させるためにユーザとのインタラクションを導入した複数文書要約手法を提案する．従来，文書自動要約とは，主として単一文書からひとつの要約を自動的に生成する技術であった．しかしながら、人間が知的な活動を行うためには，ある事柄に関連した複数の文書からひとつの要約を生成する技術（すなわち、複数文書要約技術）の方がより重要である．なぜなら、人間の限られた情報処理能力では，検索結果等で得られた多くの文書を読むのに多大な時間が必要であり，それらをひとつの要約に，まとめることで読む時間の大幅な削減が可能となるからである．しかしながら、ユーザによって興味等が異なるため，ユーザごとに必要な要約は異なる．本論文では，ユーザにキーワードを提示し，それらの中からキーワードを選択させることでユーザ適合した要約の生成を実現した．

9. 宮本　雅人、酒井　浩之，増山　繁:
"論文 LaTeX 原稿からのプレゼンテーションスライド自動生成", 知能と情報 (日本知能情報ファジィ学会誌), Vol.18, No.5, pp.752-760, 2006 年 10 月.
概要: 研究のプレゼンテーションでは、限られた時間の中で，聴衆に研究成果をよく理解してもらうためにプレゼンテーションスライドの作成が必要不可欠である．しかし、スライドの作成には多くの時間と手間を擁する．そのため、多くの研究者がスライド作成を望んでいる．本研究では，研究者の負担を軽減することを目的として，論文 LaTeX 原稿からスライドを自動生成する手法を提案する．本手法では，LaTeX ファイルの解析，スライドへの内容の割り当て，接続詞を利用した箇条書き生成を行う．LaTeX ファイルの解析では，スライド生成に必要な情報は残し，不要な情報の削除を行う．LaTeX ファイルの定型的な性質を利用すれば，必要な情報を特定す

ることが可能である．スライド割り当てにおいては，論文中の名詞の出現頻度，エントロピー、idf 値に基づいて名詞の重要度を計算する．その重要度に基づいて，各セクションに対して，スライド枚数の割り当て，重要文の抽出を行う．接続詞を利用した箇条書き生成においては、並列関係表す接続詞を利用する．なぜなら、並列関係を表す接続詞を含む文には，その文と対になる文が存在することが多いからである．評価の結果，本手法は，論文に忠実なスライド生成に有効であることが分かった．

10. Keizo Miyata, Shigeru Masuyama, Shin-ichi Nakayama, Liang Zhao:
"NP-hardness proof and an approximation algorithm for the maximum vertex ranking spanning tree problem", Discrete Applied Mathematics, Vol.154, Issue 16, pp.2402-2410, 2006 年 11 月.
概要: The minimum vertex spanning tree problem (MVRST) is to find a spaning tree of G whose vertex ranking is minimum. In this paper, we show that MVRST is NP-hard. To prove this, we polynomially reduce the 3-dimensional matching problem to MVRST. More over, we present a $(\lceil D_s/2 \rceil + 1)/(\lfloor \log_2(D_s+1) \rfloor + 1)$-approximation algorithm for MVRST where D_s is the minimum diameter of spanning trees of G.

11. Shin-ichi Nakayama, shigeru Masuyama:
"A Polynomial Time Algorithm for Obtaining a Minimum Vertex Ranking Spanning Tree in Outerplanar Graphs(invited paper)", IEICE Trans. Information and Systems, Vol.E89-D, No.8, pp.2357-2363, 2006 年 8 月.
概要: The minimum vertex ranking spanning tree is to find a spanning tree of G whose vertex ranking is minimum. This problem is NP-hard and no polynomial time algorithm for solving it is known for nontrivial classes of graphs other than the class of interval graphs. This paper proposes a polynomial time algorithms for solving the minimum vertex ranking spanning tree problem on outerplanar graphs.

12. 梅村祥之, 増山 繁:
"文章閲覧における読者の操作行動からの興味の推定", ヒューマンインターフェース学会誌, Vol.3, No.3, pp.435-444, 2006 年 8 月.
概要: A number of methods of user profiling for imformation recommendation and information filtering are studied that assist users to read many documents in the Web. It is considered that the methods to estimate user's interest are important and difficult. Most previously proposed methods simply focus on reading time to estimate user's interest based on the hypothesis that reading time correlates interest. This paper presents a method to estimate user's interest by user's time lapse data to page in reading documents. Our method focuses on the relation of reading time and the language information of the reading sentance. We developed an index that reflects the degree of the difference between actual reading time and estimated reading time based on language information of the sentence. We collected subjective ratings of interest about 300 articles from 6 subjects, and we measured the accuracies of estimation of interest. As a result, our index performed about the same of the previous index. Moreover, the accuracy of estimation using indices combined our index and previous index exceeded accuracy of extimation by previous index.

13. Toshimasa Ishii, Hiroshi Nagamochi, and Toshihide Ibaraki:
"Augmenting a (k-1)-vertex-connected multigraph to an l-edge-connected and k-vertex-connected multigraph", Algorithmica, vol.44, no.3, pp.257-280, 2006 年 4 月.
概要: For two integers $k, \ell > 0$ and an undirected multigraph $G = (V, E)$, we con-

sider the problem of augmenting G by the smallest number of new edges to obtain an ℓ-edge-connected and k-vertex-connected multigraph. In this paper, we show that a $(k-1)$-vertex-connected multigraph G can be made ℓ-edge-connected and k-vertex-connected by adding at most $\max\{\ell+1, 2k-4\}$ surplus edges over the optimum in $O(\min\{k, \sqrt{n}\}kn^3 + n^4)$ time, where $n = |V|$.

14. Toshimasa Ishii, Shigeyuki Yamamoto and Hiroshi Nagamochi:
"Augmenting Forests to Meet Odd Diameter Requirements", Discrete Optimization, vol.3, pp.154-164, 2006年6月.
概要: Given a graph $G = (V, E)$ and an integer $D \geq 1$, we consider the problem of augmenting G by the smallest number of new edges so that the diameter becomes at most D. It is known that no constant approximation algorithms to this problem with an arbitrary graph G can be obtained unless $P = NP$. For a forest G and an odd $D \geq 3$, it was open whether the problem is approximable within a constant factor. In this paper, we give the first constant factor approximation algorithm to the problem with a forest G and an odd D; our algorithm delivers an 8-approximate solution in $O(|V|^3)$ time. We also show that a 4-approximate solution to the problem with a forest G and an odd D can be obtained in linear time if the augmented graph is additionally required to be biconnected.

15. Toshimasa Ishii, Masayuki Hagiwara:
"Minimum augmentation of local edge-connectivity between vertices and vertex subsets in undirected graphs", Discrete Applied Mathematics, vol.154, issue 16, pp.2307-2329, 2006年11月.
概要: Given an undirected multigraph $G = (V, E)$, a family $\mathcal{W}$ of sets $W \subseteq V$ of vertices (areas), and a requirement function $r : \mathcal{W} \to Z^+$ (where Z^+ is the set of nonnegative integers), we consider the problem of augmenting G by the smallest number of new edges so that the resulting graph has at least $r(W)$ edge-disjoint paths between v and W for every pair of a vertex $v \in V$ and an area $W \in \mathcal{W}$. So far this problem was shown to be NP-hard in the uniform case of $r(W) = 1$ for each $W \in \mathcal{W}$, and polynomially solvable in the uniform case of $r(W) = r \geq 2$ for each $W \in \mathcal{W}$. In this paper, we show that the problem can be solved in $O(m + pn^4(r^* + \log n))$ time, even if $r(W) \geq 2$ holds for each $W \in \mathcal{W}$, where $n = |V|$, $m = |\{\{u, v\} | (u, v) \in E\}|$, $p = |\mathcal{W}|$, and $r^* = \max\{r(W) \mid W \in \mathcal{W}\}$.

16. Toshimasa Ishii, Hitoshi Fujita, Hiroshi Nagamochi:
"Minimum cost source location problem with local 3-vertex-connectivity requirements", Theoretical Computer Science, vol.372, pp.81-93, 2007年3月.
概要: Let $G = (V, E)$ be a simple undirected graph with a set V of vertices and a set E of edges. Each vertex $v \in V$ has a demand $d(v) \in Z_+$ and a cost $c(v) \in R_+$, where Z_+ and R_+ denote the set of nonnegative integers and the set of nonnegative reals, respectively. The source location problem with vertex-connectivity requirements in a given graph G asks to find a set S of vertices minimizing $\sum_{v \in S} c(v)$ such that there are at least $d(v)$ pairwise vertex-disjoint paths from S to v for each vertex $v \in V - S$. It is known that if there exists a vertex $v \in V$ with $d(v) \geq 4$, then the problem is NP-hard even in the case where every vertex has a uniform cost. In this paper, we show that the problem can be solved in $O(|V|^4(\log|V|)^2)$ time if $d(v) \leq 3$ holds for each vertex $v \in V$.

17. Hiroyuki Sakai, Shigeru Masuyama:
"Cause Information Extraction from Finan-

cial Articles Concerning Business Performance", IEICE Trans. Information and Systems, (掲載予定).

概要: We propose a method of extracting cause information from Japanese financial articles concerning business performance. Our method acquires cause information, e.g. "自動車の売上げが好調 (*zidousya no uriage ga koutyou*: Sales of cars were good)". Cause information is useful for investors in selecting companies to invest. Our method extracts cause information as a form of causal expression by using statistical information and initial clue expressions automatically. Our method can extract causal expressions without predetermined patterns or complex rules given by hand, and is expected to be applied to other tasks for acquiring phrases that have a particular meaning not limited to cause information. We compared our method with our previous one originally proposed for extracting phrases concerning traffic accident causes and experimental results showed that our new method outperforms our previous one.

18. Hirotoshi Honma, shigeru Masuyama:
"On Optimal Parallel Algorithm for Finding all Hinge Vertices of a Circular-arc Graph", IEICE Trans. Fundamentals, Vol.E91-A No.1, pp.383-391, January, 2008.

概要: Let $G = (V; E)$ be an undirected simple graph with $u \in V$. If there exist any two vertices in G whose distance becomes longer when a vertex u is removed, then u is defined as a hinge vertex. Finding the set of hinge vertices in a graph is useful for identifying critical nodes in an actual network. A number of studies concerning hinge vertices have been made in recent years. In a number of graph problems, it is known that more efficient sequential or parallel algorithms can be developed by restricting classes of graphs. In this paper, we shall propose a parallel algorithm which runs in $O(\log n)$ time with $O(n/logn)$ processors on EREW PRAM for finding all hinge vertices of a circular-arc graph.

19. Peng Cheng, shigeru Masuyama:
"Inequalities on the number of connected spanning subgraphs in a multigraph", IEICE Trans. Computer and Systems, Vol.E91-D,. No.2, pp.178-186, February, 2008.

概要: Consider an undirected multigraph $G = (V; E)$ with n vertices and m edges, and let N_i denote the number of connected spanning subgraphs with $i(m \geq i \geq n)$ edges in G. Recently, we showed in [3] the validity of $(m - i + 1)N_{i-1} > (i - n + \lfloor\frac{3+\sqrt{9+8(i-n)}}{2}\rfloor)N_i$ for a simple graph and each $i(m \geq i \geq n)$. Note that, from this inequality, $\frac{(m-n)N_n}{2N_{n+1}} + \frac{N_n(m-n+1)}{N_{n-1}} \geq 2$ is easily derived. In this paper, for a multigraph G and all $i(m \geq i \geq n)$, we prove $(m-i+1)N_i - 1 \geq (i-n+2)N_i$, and give a necessary and sufficient condition by which $(m-i+1)N_i - 1 = (i-n+2)N_i$. In particular, this means that $(m - i + 1)Ni - 1 > (i-n+\lfloor\frac{3+\sqrt{9+8(i-n)}}{2}\rfloor)N_i$ is not valid for all multigraphs, in general. Furthermore, we prove $\frac{(m-n)N_n}{2N_{n+1}} + \frac{Nn}{(m-n+1)Nn-1} \geq 2$, which isnot straightforwardly derived from $(m - i+1)N_{i-1} \geq (i-n+2)N_i$,and also introduce a necessary and sufficent condition by which $\frac{(m-n)N_n}{2N_{n+1}} + \frac{N_n}{(m-n+1)N_{n-1}} = 2$. Moreover, we show a sufficient condition for a multigraph to have $N_n^2 > N_{n-1}N_{n+1}$. As special cases of the sufficient condition, we show that if G contains at least $\lceil\frac{2}{3}(m - n)\rceil + 1$ multiple edges between some pair of vertices, or if its underlying simple graph has no cycle with length more than 4, then $N_n^2 > N_{n-1}N_{n+1}$.

20. 梅村 祥之, 増山 繁:
"仕事文推敲支援に向けた連体修飾部不足に対する受容性判定法", 自然言語処理, Vol.14,

No.14, pp.43-65, July, 2007.
概要: 文章推敲に関する従来研究では，主に，タイプミス，構文構造の複雑さ，表記の揺れを指摘する手法など，表記レベルと統語レベルの手法に重点がおかれていた．それに対して，本研究では，読みやすさを向上させるために，説明が不足していて論理展開が読み取りにくいと感じられる箇所を検出する技術を扱う．文章としては，情報を正確に伝達するための仕事文（仕事用の文）を対象としていて，文単位での情報不足を推敲対象とする．この課題は意味処理に踏み込むため，これまで十分研究が行われてこなかった．なお，語用論の「協調の原理」によれば，量の格率と呼ばれる情報不足と情報過多に関する遵守すべき原則がある．このうち情報過多を扱わない理由は，情報過多が冗長な情報を無視するのに基づく読者の負担を増やすだけであるのに対し，情報不足は理解困難という深刻な事態を招き，重要性が高いためである．実験準備から解析に至る流れは次のとおりである．まず，原文から連体修飾部を欠落させた課題文を生成し，次に，被験者にその箇所に情報不足を感じるかどうかを判定させ正解判定データを作成した．次に，正解判定データの一部から機械学習を行い，残りのデータを機械判定させる．機械判定に用いるおもな素性として，修飾部の欠落箇所におけるつながりの滑らかさに関係した語の連鎖に関する統計量を取り上げた．

21. Shin-ichi Nakayama, Shigeru Masuyama:
"A Polynomial Time Algorithm for Obtaining Minimum Edge Ranking on Two-connected Outerplanar Graphs", Information Processing Letters, Vol.103, pp.216-221, 2007.
概要: An edge ranking of a graph G is a labeling r of its edges with positive integers such that every path between different edges e_u, e_v with the same rank $r(e_u) = r(e_v)$ contains an intermediate edge e_w) with rank $r(e_w) > r(e_u)$. An edge ranking of G is *minimum* if the largest rank k assigned is the smallest among all rankings of G. The *edge ranking problem* is to find a minimum edge ranking of given graph G. This problem is NP-hard and no polynomial time algorithm for solving it is known for non-trivial classes of graphs other than than the class of trees. In this paper, we first show, on a generaql graph G, a relation between a minimum edge ranking of G and its minimal cuts, which ensures that we can obtain a polynomial time algorithm for obtaining minimum edge ranking of a given graph G if minimal cuts for each subgraph of G can be found in polynomial time and the number of those is polynomial. Based on this relation, we develop a polynomial time algorithm for finding a minimum edge ranking on a 2-connected outerplanar graph.

22. Masanobu Tsuruta, Hiroyuki Sakai, Shigeru Masuyama:
"An Informative DOM Subtree Identification Method from Web Pages in Unfamiliar Web Sites", IEICE Trans. Information and Systems, （掲載予定）.
概要: We propose a method of informative DOM subtree identification from a Web page in an unfamiliar Web site. Our method uses layout data of DOM nodes generated by a generic Web browser. The results show that our method outperforms a baseline method, and was able to identify informative DOM subtrees from Web pages robustly.

23. Toshimasa Ishii, Kengo Iwata and Hiroshi Nagamochi:
"Bisecting a four-connected graph with three resource sets", Discrete Applied Mathematics, vol.155, 1441-1450, 2007 年 6 月.
概要: Let $G = (V, E)$ be an undirected graph with a node set V and an arc set E. G has k pairwise disjoint subsets $T_1, T_2, \ldots, T_k$ of nodes, called resource sets, where $|T_i|$ is

even for each i. The partition problem with k resource sets asks to find a partition V_1 and V_2 of the node set V such that the graphs induced by V_1 and V_2 are both connected and $|V_1 \cap T_i| = |V_2 \cap T_i| = |T_i|/2$ holds for each $i = 1, 2, \ldots, k$. The problem of testing whether such a bisection exists is known to be NP-hard even in the case of $k = 1$. On the other hand, it is known that if G is $(k+1)$-connected for $k = 1, 2$, then a bisection exists for any given resource sets, and it has been conjectured that for $k \geq 3$, a $(k+1)$-connected graph admits a bisection. In this paper, we show that for $k = 3$, the conjecture does not hold, while if G is 4-connected and has K_4 as its subgraph, then a bisection exists and it can be found in $O(|V|^3 \log |V|)$ time. Moreover, we show that for an arc-version of the problem, th.e $(k+1)$-edge-connectivity suffices for $k = 1, 2, 3$.

24. Toshimasa Ishii, Hitoshi Fujita and Hiroshi Nagamochi:
"Source location problem with local 3-vertex-connectivity requirements", Discrete Applied Mathematics, vol.155, 2523-2538, 2007 年 11 月.
概要: Let $G = (V, E)$ be a simple undirected graph with a set V of vertices and a set E of edges. Each vertex $v \in V$ has an integer valued demand $d(v) \geq 0$. The source location problem with vertex-connectivity requirements in a given graph G asks to find a set S of vertices with the minimum cardinality such that there are at least $d(v)$ vertex disjoint paths between S and each vertex $v \in V - S$. In this paper, we show that the problem with $d(v) \leq 3$, $v \in V$ can be solved in linear time. Moreover, we show that in the case where $d(v) \geq 4$ for some vertex $v \in V$, the problem is NP-hard.

研究会等

1. 宮田敬三, 増山繁, 中山慎一:
"最小節点ランキング全域木問題の計算複雑度", 第 17 回 回路とシステム軽井沢ワークショップ論文集, 2004 年 4 月, pp.645-650.
概要: グラフ G の節点ランキングとは, 同じラベルをもつ任意の 2 節点を結ぶ路上に必ず両端の節点のラベルより大きなラベルをもつ節点が存在するように節点にラベルを振ることである. グラフ G の節点ランキングのうち, 最大ラベルが最小となるものを最小節点ランキングという. 与えられたグラフの全域木のうち, 最小節点ランキングが最小となるものを求める問題を最小節点ランキング問題（MVRST と略称する）という. 本稿では MVRST の NP 困難性を証明した。更に、近似率 $\frac{\lfloor \frac{1}{2}(\ell+3) \rfloor}{\lceil \log_2(\ell+2) \rceil}$ の近似アルゴリズムを提案した.

2. Yasuo Nii, Keizo Kawata, Tatsumi Yoshida, Hiroyuki Sakai, Shigeru Masuyama:
"Question Answering System QUARK", Working Notes of NTCIR Workshop 4 Meeting, pp.367-372, 2004 年 6 月.
概要: Recently, we can acquire immence amount of information thanks to the spread of a computer and internet. Therefore, technology for finding the information that a user desires becomes more and more important. A question answering (QA) system answers a question written by natural language in contrast to conventional information retrieval systems where a user expresses his information need by keywords. Therefore, a QA system can provide more user-friendly information access environment to a user. We developed a QA system QUARK(QUestion AnsweRing system using a large corpus as a Knowledger source) that finds answer words from large newspaper article corpora and was evaluated by participating in NTCIR4 QAC2, an evaluation workshop of Japanese QA sytems.

3. Hiroyuki Sakai, Shigeru Masuyama:

"A Multiple-Document Summarization System introducing User Interface for reflecting User's Summarization Need", Working Notes of NTCIR Workshop 4 Meeting, pp.444-451, 2004 年 6 月.
概要: We propose a multiple-document summarization system with user interaction. Our system extracts keywords from sets of documents to be summarized and shows the keywords to a user on the screen. Among them, the user selects some keywords reflecting his/her needs. Our system controls the produced summary by using these selected keywords. For evaluartion of our method, we participated in TSC3 of NTCIR4 workshop by letting our system select 12 best keywords as scored by our system. Our entered system attained the best performance in content evaluation among systems not using sets of questions. Moreover, evaluation of user interaction shoed that the interaction is effective.

4. Masanobu Tsuruta, Yoshiyuki Umemura, Hiroyuki Sakai, Shigeru Masuyama:
"A Web Search Result Classification System based on the Degree of Suitability for Specialists ", Working Notes of NTCIR Workshop 4 Meeting (Supplement), Vol.1, pp.45-50, 2004 年 6 月.
概要: We propose a search result classification system based on the degree of suitability for specialists. Our system classifies documents based on whether a document is "for specialists" or "not for specialists", respectively. This classification is done by ranking each document using the density of keywords and by a threshold. For evaluation od our system, we participated in NTCIR4 WEB Topical Classification Task. Only a part of "evaluation based on distribution of relevant documents" has executed on this occasion. As a result, our system exhibits good performance for some data set. We also independently conducted experiments for evaluation based on classification errors. Experimental results show that the precision of classification of our system attains value close to that of average by human evaluators'.

5. 佐々木淳, 櫟粛之, 増山繁:
" An Asynchronous Distributed Branch and Bound for Load Balancing(負荷分散のための非同期分散分枝限定法)", 電子情報通信学会技術研究報告, COMP2004-63, pp.23-32, 2005 年 1 月.
概要: We propose a new asynchronous distributed branch and bound algorithm for a load balancing problem in which each variable corresponds to each task and indicates a host,where the corresponding task is assigned, in a geographically distributed system. This is the first algorithm to provide the exact optimum solution, not an approximation, for NP-hard discrete optimization problems in a distributed context without any centralized control. Moreover, this algorithm has more flexibility and greater robustness than the conventional distributed algorithms. The idea behind the algorithm is a complex consisting of branch and bound, divide and conquer, and λ-Opt neighborhood in local search. This algorithm has a possibility to be useful in an actual huge dynamic distributed system.

6. 佐々木淳, 宮田敬三, 櫟粛之, 増山繁:
" モバイルエージェント実行計画問題について", 京都大学数理解析研究所 数理科学講究録 (2004 年度冬の LA シンポジウム), 2005 年 2 月発表, 講究録掲載予定.
概要: モバイルエージェント実行計画問題を定義し, 各エージェントの通信するエージェント数を 2 に制限した場合ですら強 NP 完全であることを証明した. また, NP 完全である範囲や, 近似アルゴリズムについての検討を行なった.

7. 佐々木淳, 櫟粛之, 増山繁:
" 非同期分散分枝限定法の基本構造と可能

性”, 第 18 回 回路とシステム軽井沢ワークショップ論文集, pp.259-264, 2005 年 4 月.
概要: 分散システムにおいて, 各変数がタスクに対応し, その値がそのタスクの割り当て先ホストを示すような負荷分散問題を解くための新しい非同期分散分枝限定法を提案する. これは, NP 困難な離散最適化問題に対して非同期完全分散システムで近似解でない厳密な最適解を求める最初の最適化分散アルゴリズムである. これは従来の分散最適化アルゴリズムに比べて高い柔軟性と頑健性をもつ. そのアイデアには, 分枝限定法, 分割統治法, および, 局所探索法における λ-Opt 近傍の考え方を複合させている. 本手法は, 今後の拡張により, 大規模動的分散システムにおいて有用になり得る.

8. Shin-ichi Nakayama, Shigeru Masuyama: “n $O(n^3)$ Time Algorithm for Obtaining the Minimum Vertex Ranking Spanning Tree on Permutation Graphs”, Proc. of the 4th Japanese-Hungarian Symposium on Discrete Mathematics and its Applications, pp.250-256, 2005 年 6 月.
概要: The minimum vertex ranking spanning tree problem is to find a spanning tree of G whose vertex ranking is minimum. This paper proposes an $O(n^3)$ time algorithm for solving the minimum vertex ranking spanning tree problem on a permutation graph.

9. 酒井 浩之, 梅村祥之, 増山 繁:
“ 新聞記事からの交通事故事例および事故原因表現の抽出”, 情報処理学会研究報告, 2005-FI-80 2005-NL-169, pp.85-92. 2005, 2005 年 9 月.
概要: 新聞記事から交通事故事例の記事を抽出し, さらに, その中から事故原因を表す表現 (例えば,「ハンドル操作を誤った」) を自動的に抽出する手法を提案する. 本手法では, まず, Support Vector Machine(SVM) を用いて新聞記事コーパスから交通事故事例の記事を抽出する. そして, 抽出された交通事故事例の記事から事故原因を表す表現を抽出する. 具体的には, 事故原因を表す表現がいくつか係る表現を種表現と定義して人手で 1 つ与え, 種表現に係っている事故原因表現を自動的に取得する. つぎに, 取得したいくつかの事故原因表現から自動的に種表現を取得し, さらに, 取得した種表現から再び事故原因表現を取得する. このプロセスを繰り返すことで, 事故原因表現, および, その種表現を取得していく. 本手法を評価したところ, 交通事故事例抽出は精度 82.0%, 再現率 84.3% であった. また, 事故原因表現, および, 種表現を共に含んでいる文を原因文と定義し, その抽精度, 再現率を求めたところ, 精度が 77.7%, 再現率が 39.8% であった.

10. 松田耕史, 山本悠二, 酒井浩之, 増山繁:
“Weblog 内のリンクに対する感情推定の試み ー Web コミュニティ発見法改善の基礎としてー”, 電子情報通信学会技術研究報告, NLC2005, pp.85-92, 2006 年 2 月.
概要: Web 上の情報量の増加と Weblog などの簡易な情報発信手段の普及によって、Web 上のリンクを単に「リンク先ページへの信頼」と解釈することはできなくなってきた。Web 上のリンクに込められた感情を知ることによって、より密に連携した Web コミュニティを発見することが可能になると考えられる。そこで本研究では、Weblog 内のリンクに対して、教師付き学習によって感情スコアを推定することを試みた。肯定的文書、否定的文書間の表現の偏りや、Weblog 特有の文書構造を考慮した結果、ピアソンの相関係数で 0.45 程度と、かなりの相関をもって推測可能であることがわかった。

11. 太田貴久, 増山繁:
“学生レポート採点支援のためのレポート類似部分発見手法”, 電子情報通信学会技術研究報告, NLC2005, pp.37-42, 2006 年 2 月.
概要: 近年の情報技術の発達により, レポートの剽窃が非常に容易なものとなり問題となっている. 本研究では Smith-Waterman アルゴリズムを基礎とした, さまざまな「類似」を検出できるレポート類似部分発見法を考案した. そして, 現実に提出されたレポートを

含めた文書集合に対して実験を行った結果，F 値 = 1 となり，完全に剽窃レポートを検出することに成功した．

12. 尾田晃，梅村恭司:
“文書頻度計数の線形時間アルゴリズムの実装と評価”, 情報処理学会　バイオ情報学研究会, 2005-BIO-3, 95-98, 2005/12/22.
概要: 統計的自然言語処理において，文字列を特徴付ける統計量として，文字列の出現頻度や文字列の現れる文書の総数などが用いられる。しかし，単純な方法では文書集合中のすべての任意文字列に対して，これらの統計量を計算するには $O(N^2)$ のメモリを必要とし，大規模なコーパスに対しては実際的でない。本稿では，Range Minimum Query のアルゴリズムを用いて $O(N)$ のメモリ空間と $O(N)$ の時間で，すべての任意文字列の重複条件付き文書頻度を求めるアルゴリズムを実装し，評価する

13. Toshimasa Ishii, Kengo Iwata and Hiroshi Nagamochi:
“Bisecting a four-connected graph with three resource sets”, Proceedings of the 4th Japanese-Hungarian Symposium on Discrete Mathematics and Its Applications, 107-113, 2005 年 6 月.
概要: Let $G = (V, E)$ be an undirected graph with a node set V and an arc set E. G has k pairwise disjoint subsets $T_1, T_2, \ldots, T_k$ of nodes, called resource sets, where $|T_i|$ is even for each i. The partition problem with k resource sets asks to find a partition V_1 and V_2 of the node set V such that the graphs induced by V_1 and V_2 are both connected and $|V_1 \cap T_i| = |V_2 \cap T_i| = |T_i|/2$ holds for each $i = 1, 2, \ldots, k$. The problem of testing whether such a bisection exists is known to be NP-hard even in the case of $k = 1$. On the other hand, it is known that if G is $(k+1)$-connected for $k = 1, 2$, then a bisection exists for any given resource sets, and it has been conjectured that for $k \geq 3$, a $(k+1)$-connected graph admits a bisection. In this paper, we show that for $k = 3$, the conjecture does not hold, while if G is 4-connected and has K_4 as its subgraph, then a bisection exists and it can be found in $O(|V|^3 \log |V|)$ time. Moreover, we show that for an arc-version of the problem, the $(k+1)$-edge-connectivity suffices for $k = 1, 2, 3$.

14. Toshimasa Ishii, Kengo Iwata and Hiroshi Nagamochi:
“Bisecting a four-connected graph with three resource sets”, The The 16th Annual International Symposium on Algorithms and Computation (ISAAC 2005), 176-185, 2005 年 12 月.
概要: Let $G = (V, E)$ be an undirected graph with a node set V and an arc set E. G has k pairwise disjoint subsets $T_1, T_2, \ldots, T_k$ of nodes, called resource sets, where $|T_i|$ is even for each i. The partition problem with k resource sets asks to find a partition V_1 and V_2 of the node set V such that the graphs induced by V_1 and V_2 are both connected and $|V_1 \cap T_i| = |V_2 \cap T_i| = |T_i|/2$ holds for each $i = 1, 2, \ldots, k$. The problem of testing whether such a bisection exists is known to be NP-hard even in the case of $k = 1$. On the other hand, it is known that if G is $(k+1)$-connected for $k = 1, 2$, then a bisection exists for any given resource sets, and it has been conjectured that for $k \geq 3$, a $(k+1)$-connected graph admits a bisection. In this paper, we show that for $k = 3$, the conjecture does not hold, while if G is 4-connected and has K_4 as its subgraph, then a bisection exists and it can be found in $O(|V|^3 \log |V|)$ time. Moreover, we show that for an arc-version of the problem, the $(k+1)$-edge-connectivity suffices for $k = 1, 2, 3$.

15. Toshimasa Ishii:
“Minimum augmentation of edge-connectivity with monotone requirements

in undirected graphs", 電子情報通信学会報告書, vol. 106, no. 63, COMP2006-10, pp. 1-8, 2006 年 5 月.

概要: For a finite ground set V, we call a set-function $r : 2^V \to Z^+$ monotone, if $r(X') \geq r(X)$ holds for each $X' \subseteq X \subseteq V$, where Z^+ is the set of nonnegative integers. Given an undirected multigraph $G = (V, E)$ and a monotone requirement function $r : 2^V \to Z^+$, we consider the problem of augmenting G by a smallest number of new edges so that the resulting graph G' satisfies $d_{G'}(X) \geq r(X)$ for each $\emptyset \neq X \subset V$, where $d_G(X)$ denotes the degree of a vertex set X in G. This problem includes the edge-connectivity augmentation problem, and in general, it is NP-hard even if a polynomial time oracle for r is available. In this paper, we show that the problem can be solved in $O(n^4(m + n \log n))$ time under the assumption that each $\emptyset \neq X \subset V$ satisfies $r(X) \geq 2$ whenever $r(X) > 0$, where $n = |V|$ and $m = |\{\{u, v\} \mid (u, v) \in E\}|$.

16. 石井利昌:
"連結度要求を持つネットワーク構成問題", オペレーションズリサーチ学会北海道支部研究会, 2006 年 7 月.

概要: グラフ理論における連結度の概念は, 種々のネットワークの制御・設計において, 耐故障性に関する基本的な評価尺度として用いられる. 所望の連結度を保証するネットワークを最適構成する問題の一つである, 連結度増大問題を中心に最近の研究結果を紹介する.

17. 石井利昌:
"連結度要求を持つネットワーク構成問題", 第 18 回ＲＡＭＰシンポジウム論文集, pp.13-27, 2006 年 10 月.

概要: グラフ理論における連結度の概念は, 種々のネットワークの制御・設計において, 耐故障性に関する基本的な評価尺度として用いられる. 所望の連結度を保証するネットワークを最適構成する問題として, 連結度増大問題と供給点配置問題を取り上げる. 近年, これらの問題に対し, 効率的なアルゴリズムの研究が盛んに行われており, また劣モジュラ関数を用いて一般化された離散最適化問題の研究もされてきている. 本稿では, これらの問題に対する最近の研究結果を紹介する.

18. 太田貴久, 酒井浩之, 増山繁:
"書き言葉を対象とした言語処理のための音声ドキュメントの文境界推定", 第 1 回音声ドキュメント処理ワークショップ講演論文集, pp.159-166, 2007 年 2 月.

概要: 書き言葉を対象とした言語処理の研究では, 既に文章が文に分割されていることを前提としている場合が多い. しかしながら, 文境界があいまいな話し言葉において, このような研究で提案されている手法をそのまま適用することは出来ない. そこで, 本研究では, 話し言葉により記述されたドキュメントを対象とした文境界の認定手法を新たに提案する. 提案手法は従来の手法と比較して人手によって事前に準備する必要のあるデータが非常に少なく, また, 形態素解析や構文解析を用いない, 汎用性の高い手法となっている. 提案手法を大学講義の書き起こしドキュメントに対して適用した結果を報告する.

19. Shigeru Masuyama:
"Minimum Vertex Ranking Spanning Tree Problem(Invited Tutorial Paper)", Proc. International Symposium on Scheduling 2004, pp.49-56, April, 2004.

概要: The minimum vertex spanning treeproblem is to find a spanning tree of a simple connected undirected graph G whose vertex ranking is minimum. Here vertex tanking is labelng of vertices of a graph by positive integers where the maximum label is minimum among labelings satisfying that any path between two vertices with the same label has a vertex with greater label. This problem has applications e.g., to planning efficient assembly of products in manufacturing systems, communication network

design and VLSI layout design. We have recently proved that this problem is NP-complete(Miyasta, et al 2003. In this paper, $O(n^3)$ time algorithms for interval graphs (Nakayama and Masuyama 2003) and permutation graphs(Nakayama and Masuyama 2003) are introduced, respectively, which we hope may provide useful insight on what structural features of graphs enable us to develop efficient algorithms.

20. Hiroyuki Sakai, Shigeru Masuyama:
"A Multiple-Document Summarization System with User Interaction", Proc. of Coling2004, Vol.II, pp.1001-1007, August, 2004.
概要: We propose a multiple-document summarization system with user interaction. Our system extracts keywords from sets of documents to be summarized and shows the keywords to a user on the screen. Among them, the user selects some keywords reflecting his/her needs. Our system controls the produced summary by using these selected keywords. For evaluation of our method, we participated in TSC3 of NTCIR4 workshop by letting our system select 12 best keywords regarding scoring by the system. Our participated system attained the best performance in content evaluation among systems not using sets of questions. Moreover, we evaluated effectiveness of user interaction in our system. With user interaction, our system attained both higher coverage and precision than that without user interaction.

21. Toshimasa Ishii:
"Minimum augmentation of edge-connectivity with monotone requirements in undirected graphs", Proceedings of the 13th Computing Theory: The Australian Theory Symposium (CATS'07), 91-100, 2007年1月.
概要: For a finite ground set V, we call a set-function $r : 2^V \to Z^+$ monotone, if $r(X') \geq r(X)$ holds for each $X' \subseteq X \subseteq V$, where Z^+ is the set of nonnegative integers. Given an undirected multigraph $G = (V, E)$ and a monotone requirement function $r : 2^V \to Z^+$, we consider the problem of augmenting G by a smallest number of new edges so that the resulting graph G' satisfies $d_{G'}(X) \geq r(X)$ for each $\emptyset \neq X \subset V$, where $d_G(X)$ denotes the degree of a vertex set X in G. This problem includes the edge-connectivity augmentation problem, and in general, it is NP-hard even if a polynomial time oracle for r is available. In this paper, we show that the problem can be solved in $O(n^4(m + n \log n + q))$ time, under the assumption that each $\emptyset \neq X \subset V$ satisfies $r(X) \geq 2$ whenever $r(X) > 0$, where $n = |V|$, $m = |\{\{u, v\} \mid (u, v) \in E\}|$, and q is the time required to compute $r(X)$ for each $X \subseteq V$.

22. Toshimasa Ishii:
"Greedy approximation for source location problem with vertex-connectivity requirements in undirected graphs", The 18th Annual International Symposium on Algorithms and Computation (ISAAC 2007), 29-40, 2007年12月.
概要: Let $G = (V, E)$ be a simple undirected graph with a set V of vertices and a set E of edges. Each vertex $v \in V$ has a demand $d(v) \in Z_+$, and a cost $c(v) \in R_+$, where Z_+ and R_+ denote the set of nonnegative integers and the set of nonnegative reals, respectively. The source location problem with vertex-connectivity requirements in a given graph G asks to find a set S of vertices minimizing $\sum_{v \in S} c(v)$ such that there are at least $d(v)$ pairwise vertex-disjoint paths from S to v for each vertex $v \in V - S$. It is known that the problem is not approximable within a ratio of $O(\ln \sum_{v \in V} d(v))$, unless NP has an

$O(N^{\log\log N})$-time deterministic algorithm. Also, it is known that even if every vertex has a uniform cost and $d^* = 4$ holds, then the problem is NP-hard, where $d^* = \max\{d(v) \mid v \in V\}$. In this paper, we consider the problem in the case where every vertex has a uniform cost. We propose a simple greedy algorithm for delivering a $\max\{d^*, 2d^*-6\}$-approximate solution to the problem in $O(\min\{d^*, \sqrt{|V|}\}d^*|V|^2)$ time. Especially, in the case of $d^* \leq 4$, we give a tight analysis to show that it achieves an approximation ratio of 3. We also show the APX-hardness of the problem even restricted to $d^* \leq 4$.

23. Toshimasa Ishii:
"Minimum augmentation of edge-connectivity with monotone requirements in undirected graphs", 電子情報通信学会報告書, vol. 106, no. 63, COMP2006-10, 1-8, 2006 年 5 月.
概要: For a finite ground set V, we call a set-function $r : 2^V \to Z^+$ monotone, if $r(X') \geq r(X)$ holds for each $X' \subseteq X \subseteq V$, where Z^+ is the set of nonnegative integers. Given an undirected multigraph $G = (V, E)$ and a monotone requirement function $r : 2^V \to Z^+$, we consider the problem of augmenting G by a smallest number of new edges so that the resulting graph G' satisfies $d_{G'}(X) \geq r(X)$ for each $\emptyset \neq X \subset V$, where $d_G(X)$ denotes the degree of a vertex set X in G. This problem includes the edge-connectivity augmentation problem, and in general, it is NP-hard even if a polynomial time oracle for r is available. In this paper, we show that the problem can be solved in $O(n^4(m + n\log n))$ time under the assumption that each $\emptyset \neq X \subset V$ satisfies $r(X) \geq 2$ whenever $r(X) > 0$, where $n = |V|$ and $m = |\{\{u, v\} \mid (u, v) \in E\}|$.

24. 石井利昌:
"連結度要求を持つネットワーク構成問題", 第 18 回ＲＡＭＰシンポジウム, 13-27, 2006 年 10 月.
概要: グラフ理論における連結度の概念は, 種々のネットワークの制御・設計において, 耐故障性に関する基本的な評価尺度として用いられる. 所望の連結度を保証するネットワークを最適構成する問題として, 連結度増大問題と供給点配置問題を取り上げる. 近年, これらの問題に対し, 効率的なアルゴリズムの研究が盛んに行われており, また劣モジュラ関数を用いて一般化された離散最適化問題の研究もされてきている. 本稿では, これらの問題に対する最近の研究結果を紹介する.

25. 増山繁, 中山慎一:
"最小節点ランキング全域木問題の環境モニタリングのためのセンサネットワークへの応用の試み", ミニシンポジウム「新世代計算問題と地球環境問題」講演論文集, 89-95, 2006 年 12 月.
概要: 次世代の環境モニタリングシステムを想定し, 大量のセンサが野外に広域に設置されている状況の下でノイズなどによって汚染されていないデータのみを利用するための方法への最小節点ランキング全域木問題の応用を試みる.

26. Hiroyuki Sakai, Shigeru Masuyama:
"Extraction of Cause Information from Newspaper Articles Concerning Business Performance", Proc. of the 4th IFIP Conference on Artificial Intelligence Applications & Innovations (AIAI2007), pp.205-212, .
概要: 2007 年 9 月 We propose a method of extracting cause information from Japanese newspaper articles concerning business performance. Cause information is useful for investors in selecting companies to invest. Our method extracts cause information as a form of causal expression by using statistical information and initial clue phrases automatically. Our method can extract causal expressions without pre-

determined patterns or complex rules given by hand, and is expected to be applied to other tasks or language for acquiring phrases that have a particular meaning not limited to cause information. We compared our method with our previous method originally proposed for extracting phrases concerning traffic accident causes and experimental results showed that our new method outperforms our previous one.

27. Toshimasa Ishii:
"Greedy approximation for source location problem with vertex-connectivity requirements in undirected graphs", , 日本応用数理学会 2007 年度年会, 306-307.
概要: 2007 年 10 月 Let $G = (V, E)$ be a simple undirected graph with a set V of vertices and a set E of edges. Each vertex $v \in V$ has a demand $d(v) \in Z_+$, and a cost $c(v) \in R_+$, where Z_+ and R_+ denote the set of nonnegative integers and the set of nonnegative reals, respectively. The source location problem with vertex-connectivity requirements in a given graph G asks to find a set S of vertices minimizing $\sum_{v \in S} c(v)$ such that there are at least $d(v)$ pairwise vertex-disjoint paths from S to v for each vertex $v \in V - S$. It is known that the problem is not approximable within a ratio of $O(\ln \sum_{v \in V} d(v))$, unless NP has an $O(N^{\log \log N})$-time deterministic algorithm. Also, it is known that even if every vertex has a uniform cost and $d^* = 4$ holds, then the problem is NP-hard, where $d^* = \max\{d(v) \mid v \in V\}$.

In this paper, we consider the problem in the case where every vertex has a uniform cost. We propose a simple greedy algorithm for delivering a $\max\{d^*, 2d^* - 6\}$-approximate solution to the problem in $O(\min\{d^*, \sqrt{|V|}\}d^*|V|^2)$ time. Especially, in the case of $d^* \leq 4$, we give a tight analysis to show that it achieves an approximation ratio of 3. We also show the APX-hardness of the problem even restricted to $d^* \leq 4$.

28. 坂地泰紀，酒井浩之，増山繁:
"景気動向を示す根拠表現の抽出と分析", 信学技報, Vol.107, No.158, pp.151-156, 2007 年 7 月.
概要: 本研究では, 新聞記事から景気動向を示す「根拠となる表現」を統計的手法を用いて自動的に抽出する手法を提案する. また, 抽出された景気動向を示す「根拠となる表現」を景気が回復することを示す Positive 表現と悪化することを示す Negative 表現に分類する手法も併せて提案する. 企業や投資家にとって, 株価や商品の売行きを予測するために, 景気動向を知ることは重要なことである. そこで, 我々は景気動向に関する記事から景気動向を示す「根拠となる表現」を抽出し, それを用いることにより, 景気動向の予測が可能ではないかと考えた. 今回, 景気動向を予測するための材料として, 景気動向の根拠となる表現を抽出し, それが景気が回復することを示すのか, 悪化することを示すのかを判定する. 我々は 1990 年から 2005 年の日経新聞を用いて実験し, 景気動向を示す「根拠となる表現」の抽出手法と分類手法をそれぞれ評価した. その結果, 景気動向を示す「根拠となる表現」の抽出手法に関しては適合率が 71.43 が 0.849 となった.

29. 中村純哉， 櫟粛之，増山繁:
"Techniques to Accelerate Request Processing for Byzantine Fault Tolerance", 信学技報, Vol. 107 No. 219, pp.13-20, 2007 年 9 月.
概要: A number of implementations have been proposed for State Machine Replication, a replication technique. The agreement-based approach has the following advantages: decentralized procedure, easy implementation, and fewer timers. But, it also has a disadvantage: less efficient request processing. In this paper, we propose to overcome that disadvantage with a technique composed of two methods, parallel executions of agreement protocols and request

execution without agreement.

30. 山本　悠二，増山　繁:
“係り先候補の相対的な距離を反映した統計的日本語係り受け解析”, 情報処理学会研究報告, Vol.2007, No.113, pp.15-22, 2007 年 11 月.
概要: 本稿では，係り先候補の相対的な距離を反映した統計的日本語係り受け解析手法を提案する．統計的係り受け解析手法は，文節間の係りやすさを訓練データから推定する．その際，従来手法では，文節間の距離はいくつかのカテゴリに分けられ，推定に用いられる素性として明示的に与えられる．しかし，複数の文節間候補が同一の距離カテゴリに属する場合，距離による弁別ができないため，最尤の係り先を決定することが困難である場合が多い．そこで提案モデルでは，文節候補集合中の二つの文節候補を逐次的に取り出し，どちらが係り元に近いかを明示させて係りやすさの推定を行う．京都大学コーパスを用いて実験を行った結果，係り受け正解率 91.60 法と比べて有意に改善していることが確認された.

31. 太田貴久，増山繁:
“統計的手法に基づく講義音声書き起こし文書の文境界推定”, 第 2 回音声ドキュメント処理ワークショップ, （発表予定）.
概要: 話し言葉には，言い直しや方言といった書き言葉には存在しない現象が多く含まれ，何らかのコーパスから学習したパラメータを用いる形態素解析などは，これらの現象の影響を受け，書き言葉を対象としたときほどの精度を達成できない．さらに，既存の言語処理の多くは文章が文に分割されていることを前提としている．そこで，本研究では，教師あり学習を使用した形態素解析などを用いない話し言葉を対象とした文境界推定法を提案する．提案手法は，日本語ではモダリティが文末に集中することに着目して文境界の推定を行う．本研究では，多くの統計情報を得ることが出来る講義音声書き起こした文書を対象とした．提案手法を実際の大学における講義音声書き起こし文書に適用した結果を報告する.

学会大会等

1. Atsushi Sasaki, Tadashi Araragi, Shigeru Masuyama:
“Proposal of Asynchronous Distributed Branch and Bound”, Workshop on New Horizons in Computing, 2005 年 3 月.

2. 梅村祥之, 辻貞治, 増山繁:
“文書読解時視点移動パターンからの興味に関する感性情報の抽出の試み”, 言語処理学会第 11 回年次大会発表論文集, pp.141-144, 2005 年 3 月.

3. 太田貴久, 増山繁:
“模倣レポート判定支援システムの開発”, 言語処理学会第 11 回年次大会発表論文集, pp.141-144, 2005 年 3 月.

4. 鶴田雅信, 梅村祥之, 酒井浩之, 増山繁:
“Web 検索結果の専門家に対する適合度によるランキング手法について”, 言語処理学会第 11 回年次大会発表論文集, pp.1018-1021, 2005 年 3 月.

5. Shigeru Masuyama:
“On the minimum vertex ranking spanning tree problem”, IFORS2005, 2005 年 7 月.

6. 横田隼, 酒井浩之, 増山繁:
“質問応答システムのための Web 掲示板からの質問記事抽出”, 言語処理学会第 12 回年次大会発表論文集, pp.332-335, 2006 年 3 月.

7. 宮本雅人, 酒井浩之, 増山繁:
“論文 LATEX 原稿からのプレゼンテーション資料自動生成”, 言語処理学会第 12 回年次大会発表論文集, pp.640-643, 2006 年 3 月.

8. 山本悠二, 増山繁, 増山繁:
“小説自動要約のための隣接文間の結束性判定手法”, 言語処理学会第 12 回年次大会発表論文集, pp.1083-1086, 2006 年 3 月.

9. 石井利昌，岩田健吾，永持仁:
“資源節点集合を持つグラフを均等分割する

問題について", 日本オペレーションズ・リサーチ学会アルゴリズム研究部会, 2005 年 11 月.

10. 石井利昌，岩田健吾，永持仁:
"3 つの資源節点集合を持つ 4 点連結グラフを均等分割する問題について",「特定領域研究」新世代の計算限界 平成 17 年度 第 2 回全体会議, 2005 年 11 月.

11. Shin-ichi Nakayama, Shigeru Masuyama:
"A Polynomial Time Algorithm for Obtaining the Minimum Vertex Ranking Spanning Tree on Outerplanar Graphs", INFORMS International Meeting Hong Kong 2006, 2006 年 6 月.

12. Toshimasa Ishii and Masahiro Oshita:
"Augmenting Cacti to Meet Diameter Requirements", INFORMS International Meeting Hong Kong 2006, 2006 年 6 月.

13. 鈴木　琢也，関根　聡，増山　繁:
"百科事典を対象とした属性値抽出", 言語処理学会第 13 回年次大会発表論文集, pp.123-126, 2007 年 3 月.

14. 酒井　浩之、増山　繁:
"企業の業績発表記事からの業績要因の抽出", 言語処理学会第 13 回年次大会発表論文集, pp.436-439, 2007 年 3 月.

15. 山本悠二、増山　繁:
"構文木情報を用いた機械可読辞書からの類義語および上位・下位語の抽出", 言語処理学会第 13 回年次大会ワークショップ「言語的オントロジーの構築・連携・利用」
論文集, pp.39-42, 2007 年 3 月.

16. 小泉　賢司，増山　繁:
"AGV システムのデッドロックに関する研究", 日本オペレーションズ・リサーチ学会春季研究発表会アブストラクト集, pp.12-13, 2007 年 3 月.

17. 増山　繁:
"招待講演：最小節点ランキング全域木問題について　　増山繁 (豊橋技科大)", 科研費特定領域「新世代の計算限界－その解明と打破－」平成 18 年度第 1 回全体集会, 2006 年 6 月.

論文の題名大会名または論文集名巻号掲載ページ発表年月巻号がない論文集に載った論文の題名大会名または論文集名 掲載ページ発表年月大会名　発表年月

18. 石井利昌，岩田健吾，永持仁:
"資源節点集合を持つグラフを均等分割する問題について", 日本オペレーションズ・リサーチ学会アルゴリズム研究部会, 2005 年 11 月.

19. 石井利昌，岩田健吾，永持仁:
"3 つの資源節点集合を持つ 4 点連結グラフを均等分割する問題について",「特定領域研究」新世代の計算限界 平成 17 年度 第 2 回全体会議, 2005 年 11 月.

20. Toshimasa Ishii and Masahiro Oshita:
"Augmenting cacti to meet diameter requirements", INFORMS International Meeting Hong Kong 2006, 2006 年 6 月.

21. 石井利昌:
"連結度要求を持つネットワーク構成問題", オペレーションズリサーチ学会北海道支部研究会, 2006 年 7 月.

22. 石井利昌:
"無向グラフにおける節点と節点集合間の辺連結度を増大させる問題について", オペレーションズリサーチ学会北海道支部第一回講演会, 2007 年 10 月.

23. 中村純哉、櫟粛之，増山繁:
"レプリカ手法を対象とした高速な randomized 耐ビザンチン故障方式", 平成 19 年 電気学会 電子・情報・システム部門大会 講演論文集, pp.102, 2007 年 9 月.

24. 小泉　賢司，増山　繁:
"ラダー型走行経路を用いた AGV システムのデッドロックからの回復手法", 日本オペレーションズ・リサーチ学会秋季研究発表会アブストラクト集, pp.106-107, 2007 年 9 月.

25. 坂地　泰紀，酒井　浩之，増山　繁:
“景気動向を示す根拠表現の抽出と分類”, 日本オペレーションズ・リサーチ学会秋季研究発表会アブストラクト集, pp.194-195, 2007年9月.

26. 坂地　泰紀, 関根　聡，増山繁:
“構文パターンを用いた因果関係の抽出”, 言語処理学会第14回年次大会発表論文集, 2008年3月.

27. 鶴田雅信, 増山繁:
“未知のサイトに含まれるWebページからの主要部分抽出手法”, 言語処理学会第14回年次大会発表論文集, 2008年3月.

文部科学省科学研究費補助金 特定領域研究 (課題番号 16092215)

C08: 高性能近似アルゴリズムの設計法に関する研究

本研究の目的は，グラフの彩色問題と集合被覆問題を中心とした代表的離散最適化問題に対して高性能近似アルゴリズムを開発することと, これまでに提案されている近似アルゴリズムを設計手法の立場から調査・分類し一般的設計法を構築することである. 平成１６年度より, 平田，藤戸，小野の３名で研究を開始した．１７年度からは，研究対象をインターネットにおけるグラフ問題まで広げるため名古屋工業大学の和田が加わり精力的に研究を進めた.

研究組織

研究代表者： 平田 富夫　名古屋大学 大学院 情報科学研究科
研究分担者： 藤戸 敏弘　豊橋技術科学大学 情報工学系
小野 孝男　名古屋大学 大学院 情報科学研究科
和田 幸一　名古屋工業大学 大学院 工学研究科 (平成 17–19 年度)

交付決定額 (配分額)

平成 16 年度	2,900,000 円
平成 17 年度	4,800,000 円
平成 18 年度	4,900,000 円
平成 19 年度	2,800,000 円
合　計	15,400,000 円

研究成果の概要

- 学術誌
  IPL (2004 年), JCO (2004 年), 電子情報通信学会英文及び和文論文誌 (2004 年, 2005 年，2006 年，2007 年), 計測自動学会論文誌 (2005 年), DAM (2006 年), TCS (2007 年)，JAHSWN (2007 年) など
- 国際会議
  AACC (Kathmandu 2005 年), IEEE PRCCCSP (Victoria, 2005), WG (Metz, 2005 年), AWOCA(Ballarat, Australia, 2005 年)，HICSS (Hawaii, 2006 年)，IPDPS（Long Beech, 2006 年），SIROCCO（Castigliocello, Italy, 2007 年)，ISMP (Rio de Janeiro, 2006 年), LION (Trento, 2007 年), HERCMA (Athen, Greece,2007 年)，DISC（Lemesos, Cyprus, 2007 年），SSS(Paris, 2007 年) など
- 受賞
  Best Ppaper Award at LION 2007
  FIT 2007 論文賞
- 国際会議開催
  IWOCA 2008 (Nagoya, Japan, 2008 年)

1　はじめに

グラフ問題や組合せ問題のような離散構造をもつ問題のほとんどはNP完全（最適化問題の場合はNP困難）であり, 現在の計算機では計算時間が膨大になり手に負えない問題である．しかし, たとえNP困難であっても, 計算機を用いてなんとか解かなければならない離散最適化問題が情報処理の現場ではますます増えている．たとえば, OR の分野では, より大規模なネットワーク上での資源割当て問題やスケジューリング問題を解かなければならない．また, 人工知能の分野では推論処理のような高度な計算を要求する問題がつぎつぎと発生している．このような現実を踏まえ, たとえ求まる解が最適ではなくとも, それに十分近いことを保証できる近似アルゴリズムの設計論が今日の重要な研究テーマとなっている．本研究の目的は, グラフの彩色問題と集合被覆問題を中心とした代表的離散最適化問題に対する高性能近似アルゴリズムを開発することと, これまでに提案されている近似アルゴリズムを設計手法の立場から調査・分類し一般的設計法を構築することである．

主な研究成果は以下のようである．グラフ問題に関しては，最小重み木状被覆問題や一般化された彩色問題に対し近似アルゴリズムを与えた．重み付き独立集合問題に関し新たな尺度を導入することで平均次数を用いた近似性能解析を行った．また，頂点彩色問題に対して高性能の発見的アルゴリズムを設計した．グラフの辺縮約問題に関して近似困難性を示した．集合被覆問題に関しては, 重みつき集合被覆問題および集合多重被覆問題に関して成果を得た．この他，センサーネットワークのプロトコルや無線ネットワークの初期化アルゴリズムについて研究を行った．また, 画像処理で有用な距離変換を効率よく求めるシストリックアルゴリズムの提案や, 公開鍵暗号系において重要な演算であるスカラー倍計算の効率的なアルゴリズムを与えた．以下ではこれらに関して詳細を述べる．

2　グラフ問題

2.1　頂点被覆と木状被覆 (連結辺支配集合) の近似アルゴリズム

グラフの基本問題としてよく知られている**頂点被覆問題**では，頂点はそれに接続する辺を**被覆する**といい，グラフ $G = (V, E)$ の任意の辺が頂点集合 $C \subseteq V$ のある頂点により被覆されるとき，C は G の頂点被覆であるという．このとき最小頂点被覆問題とは，位数が最小な頂点被覆を求める問題である．より一般的には，各頂点に非負重み $c : V \to \mathbb{R}_+$ が割り当られたグラフ G が与えられ，頂点集合 U の重みを U 内の頂点の重みの総和 $\sum_{v \in U} c(v)$ とするとき，最小重みの頂点被覆を求める問題を**最小重み頂点被覆問題**という．

被覆という概念が，頂点と辺の接続関係に関するものであるのに対し，辺同士（もしくは頂点同士）の隣接関係には支配が用いられる．辺はそれに隣接する他の辺を**支配する**といい，辺集合 $F \subseteq E$ に属さない G の任意辺が F のある辺に支配されるとき，F を G の**辺支配集合**という．頂点被覆問題と同様に，各辺に非負重み $c : E \to \mathbb{R}_+$ が割り当られたグラフ G が与えられたとき，最小重みの辺支配集合を求める問題を**最小重み辺支配集合問題**という．

これらのグラフ問題が様々な応用分野で現れるとき，求める解が “連結性” をも有していることが望まれる局面がある．つまり，単に頂点被覆であるだけでなく，連結部分グラフを誘導するような頂点集合を必要とする**連結頂点被覆問題**や，連結な辺支配集合をその解とする**連結辺支配集合問題**の解決が求められる．当然ながら，非負重みは連結頂点被覆問題では頂点に，そして連結辺支配集合問題では辺に割り当てられ，それぞれ最小重みの解を求めることをその目的とする．連結グラフ G における**木状被覆**とは，頂点集合が G の頂点被覆となるような木のことをいうが，連結辺支配集合問題が重み最小の木状被覆を求める問題に他ならないため，同問題は**木状被覆問題** (*Tree Cover* 問題) とも呼ばれる．また，木には常に頂点数＝辺数＋1の関係があるため，“重みなし” 木状被覆問題と “重みなし” 連結頂点被覆問題が等価であることも見てとれる．

これまでに挙げた問題はいずれもNP困難であ

ることが知られており，そのためこれまでにも様々な効率的近似手法が研究されてきた．多項式時間近似精度保証に関する主な既知結果は，以下の通りである．まず，基本問題である頂点被覆問題については，早くから 2 倍近似が知られており，現在最良の近似保証は $2-\Theta(1/\sqrt{\log n})$ である．辺支配集合問題に対しても，簡単なアルゴリズムにより 2 倍近似が可能であることが，重みなしの場合に以前から知られていたが，任意重みの場合も 2 倍近似できることが最近示されている [7]. 元々グラフの木状被覆問題（即ち連結辺支配集合問題）は，グラフの各頂点に隣接するように施設を木状配置する問題との関連から，Arkin らによって導入された問題である．と同時に彼らは，一様コストの場合に 2 倍近似保証アルゴリズムを，一般コストの場合に 3.55 倍近似保証をを提示している．実のところ一様コストの場合には，より早くからより簡単な 2 倍近似アルゴリズムが，Savage により開発されている（もっとも，同アルゴリズムは頂点被覆問題用として提案されたものである）．一方，一般コストの場合は，その後アルゴリズムの改善が見られ，近似保証は $3+\epsilon$ まで下げられた [2]．この時点では，頂点被覆問題や辺支配集合問題，更にそれらの関連問題の多くが，付随コストの何如んによらず 2 という近似保証が得られている [7] のに対し，木状被覆問題では，一様コストと一般コストの場合で，保証できる近似精度に差があることを意味する．更に悪いことには，上述の $(3+\epsilon)$ 倍近似アルゴリズム [2] は，多項式時間とはいえとても実用的であるとはいえない代物である．というのも，そこでは指数関数オーダーの規模をもつ線形計画問題を厳密に解く必要があり，そのためには楕円体法に頼らざるを得ないからである．

一方，近似困難性については，基本指標となる頂点被覆問題の近似度を，$10\sqrt{5}-21 \approx 1.36067$ 以下に保証することが NP 困難であることが知られている．連結頂点被覆の NP 困難性は，頂点被覆からの多項式時間還元により示されるが，それが近似保証を保存することも知られており, よって前者の（多項式時間）近似は後者のそれと同等以上に難しいといえる．更に前述の通り，重みなしの場合で連結頂点被覆と木状被覆とが等価であることから，木状被覆問題の近似も頂点被覆のそれと同等以上に困難である．

このような状況を背景に，一般コストをもつ木状被覆問題に対し，より良い近似アルゴリズムを開発し，近似保証ならびに計算時間をともに向上させることを本研究の目標とした．得られた成果を要約すると，以下の通りである：

主双対法による木状被覆の近似

まず，与えられるコストは 2 倍以上の開きがある 2 種類だけの場合に制限して検証した．その結果，線形計画の主双対法に基づいて設計された近似アルゴリズムにより，最大フロー問題の解法と同じ計算量で，2 倍近似保証することが可能であることを示した [1].

主双対法と局所比定理の組み合わせによる木状被覆の近似

上記制限下での成功を基に，一般の場合について検討した結果，高速な組合せアルゴリズムにより，この場合も 2 倍近似保証することが可能であることを示した [4]．一般コスト用にこれまでに開発された，いずれのアルゴリズムもが，まず頂点被覆 C を計算してから，C の頂点をシュタイナー木で連結させるという方法をとっていたのに対し，同アルゴリズムの特徴は，最小全域木に枝刈りを施すことで木状被覆を構成するところにある．

更に，頂点被覆を一般化した問題に対する近似アルゴリズムの開発，および，連結頂点被覆ならびに木状被覆に対する近似アルゴリズムの効率的並列化を行った．

被覆容量／要求量付き部分頂点被覆問題の 2 倍近似解法

これまで頂点被覆問題には, 各頂点が被覆できる辺数に制限を加えたり, ある決められた割合いの辺数だけ被覆することを要求するなどの一般化が個々に考えられてきた．本研究では, 辺や頂点に関するこれらの被覆条件を併せもつ一般化問題を新たに導入し, 劣モジュラ集合被覆アルゴリズムを拡張することで, この問題に対して多項式時間で近似度 2 が保証できることを示した [11].

連結頂点被覆問題と木状被覆問題に対する NC アルゴリズム

頂点被覆問題には, いくつかの 2 倍近似 NC アルゴリズムが知られているのに対し, 連結頂点被覆には, 近似保証のある並列アルゴリズムが存在しない．しかも, 既存の 2 倍近似逐次アルゴリズムを

並列化しても, 高計算量のRNCアルゴリズムにしかならない. 本研究では, 連結頂点被覆ならびに木状被覆に対し, 2倍近似NCならびにRNCアルゴリズムを開発した [5]. 入力グラフの頂点数 n, 辺数 m, 最大次数 Δ とすると, このNCアルゴリズムはEREW-PRAM上で $O(\Delta^2(m+n)/\log n)$ 個のプロセッサを用いて $O(\log^2 n)$ 時間で並列実行でき, RNCアルゴリズムは, CRCW-PRAM上で $O(m+n)$ 個のプロセッサを用いて期待値 $O(\log n)$ の時間で並列実行できる.

2.2 均等辺彩色問題の高性能アルゴリズム

均等辺彩色問題とは，多重グラフ $G=(V,E)$ と色数 k が与えられたとき，G の辺に色を塗る問題で，各頂点において接続する辺の色はどの2色も本数の差が高々2であるように色を塗る．この問題はコンピュータネットワークにおけるファイル転送スケジューリングなどに応用がある．この問題は1982年にHiltonとde Werraによって紹介され，同時に任意のグラフについてその均等辺彩色が存在することも証明された．彼らの証明から，任意の多重グラフを $O(km^2)$ 時間で均等辺彩色するアルゴリズムが得られる．1995年，中野らは新しいアルゴリズムを提案し，実行時間を $O(m^2/k+mn)$ に改良した．ここで，m と n は与えられたグラフの辺数と頂点数, k は与えられた色数である．本研究では，多重グラフを均等辺彩色する3種類のアルゴリズムを提案した [12, 13, 14].

最初のアルゴリズムは $O(n^2/k)$ 時間で均等辺彩色を実行する．このアルゴリズムのアイデアは, 彩色の途中で使用する色数を各色とも常にほぼ同数にするという**平衡条件** (balanced condition) にある [12]. このアルゴリズムは以下の二つのアルゴリズムでも用いられるためBALCOLと名前を付ける．このアルゴリズムは平衡条件を満たす初期辺彩色を与え，次に，オイラー閉路のテクニックを用いて正しい均等辺彩色になるまで彩色を修正する．この修正部分のアルゴリズムをCHKREC (Check and Recolor) と呼ぶ.

次に，ランダムアルゴリズムRANCOLを提案した．RANCOLは高い確率で多重グラフを $O(m^{3/2}n^{1/2}/k^{1/2})$ 時間で均等辺彩色し，かつ平衡条件も満たす．RANCOLはランダムにほぼ平均の m/k 本の辺を選びひとつの色で塗るという手順で初期辺彩色を行い，次に，アルゴリズムCHKRECを呼び，辺彩色を修正する．このランダムな初期辺彩色では，どの色で塗られた辺の本数も $O(m/k)$ であり，ポテンシャルは少なくとも $1-1/c$ の確率で $O((kmn)^{1/2})$ であることを示した（ここで，$c>1$ は定数である.）.

さらに，再帰アルゴリズムRECCOLを提案した．RECCOLは多重グラフを $O(mn\log(m/(kn)+1))$ 時間で均等辺彩色し，同時に平衡条件も満たす．まず，与えられたグラフの辺のサイズが $|E| \le k|V|$ なら，上で提案したアルゴリズムBALCOLで辺彩色する．$|E| > k|V|$ の場合は次の手順で処理する．辺集合 E を同じサイズの二つの集合に分割する．それぞれの辺集合で構成されるグラフに対してRECCOLを呼ぶ．得られた辺彩色をマージする．CHKRECを呼び出して辺彩色を修正する．このアルゴリズムの計算時間を解析するために, CHKRECが呼ばれる前の辺彩色について，どの色で塗られた辺の本数も $O(m/k)$ であり，ポテンシャルは $O(kn)$ であることを示した．これにより，$O(mn\log(m/(kn)+1))$ 時間のアルゴリズムを得た.

与えられた色数 k が定数の場合，既存のアルゴリズムと提案したBALCOLの実行時間は全て $O(m^2)$ になる．即ち，この場合にはHiltonとde Werraの結果が最良であった．RECCOLはその結果を越えた初めてのアルゴリズムである．たとえば，m/n が大きくなる場合（例えば:$m=n^\theta, \theta>1$），RECCOLは従来のアルゴリズムと比較して本質的によい性能を示す.

2.3 頂点彩色問題の発見的アルゴリズム

無向グラフ $G=(V,E)$（$n=|V|$, $m=|E|$）に対し，関数 $c\colon V\to\{1,2,\ldots\}$ は全ての $(i,j)\in E$ に対して $c(i)\neq c(j)$ ならば G の**頂点彩色**と呼ぶ. 全ての $i\in V$ に対して $c(i)\le k$ ならこの c は G の k **彩色**であり，k 彩色が存在するとき G は k **彩色可能**といわれる．グラフ G が与えられたときに, 色数 k が最小となる k 彩色を求める問題を**頂点彩色問題**と呼ぶ．可能な色数の最小値を G の**彩色数**と呼び $\chi(G)$ で表す.

頂点彩色問題はNP-困難であることが知られており，さらに，P $\neq$ NP を仮定すると，一般のグラフに対し多項式時間で $O(n^{1/7-\epsilon}) \cdot \chi(G)$ 彩色を見付けることはできない（$\epsilon > 0$ は任意）[15]. 一般の場合に対して現在知られている最良の結果は，$O(n(\log\log n)^3/(\log n)^2) \cdot \chi(G)$ 彩色 [16] である．ここで，グラフ G の彩色数を制限するとより良い結果が得られており，例えば半定値計画法を用いることにより3彩色可能なグラフに対する $\tilde{O}(n^{3/14})$ 彩色 [17] や4彩色可能なグラフに対する $\tilde{O}(n^{7/19})$ 彩色 [18] は多項式時間で求まることが知られている（$\tilde{O}()$ は $\log n$ の多項式を無視することを示す）．但し，このようにグラフを制限しても定数倍での近似は困難であり，k 彩色可能なグラフに対する $5k/3-1$ 彩色を見つけることはNP-困難 [19] である．

一方この問題はコンパイラにおけるレジスタ割当や無線基地局に対する周波数割当など，多くの資源配分問題に適用することができるため，発見的手法に基づくアルゴリズムについても研究されている．DIMACS 2nd Implementation Challenge では，高性能なアルゴリズムとして**繰り返し貪欲法**（iterated greedy）[20] や**タブー分枝限定法**（tabu branch-and-bound）[21] などが挙げられている．

本研究では，頂点彩色問題を2次元に制限した半定値計画法に変換して解く発見的アルゴリズムを提案した [29]．半定値計画法に基づく従来のアルゴリズムでは，各頂点に対して n 次元の単位ベクトルを割当てて半定値計画法に変換し，これを解いて得られたベクトル配置から頂点彩色を求めている．これに対し，本手法では各頂点に2次元の単位ベクトルを割当て2次元上でのベクトル配置問題に変換し，これを解いて得られるベクトル配置を頂点彩色に変換する．

半定値計画法を用いるアルゴリズムは，理論上は多項式時間で実行できるが，半定値計画法を解くために多くの時間とメモリが必要であるため，大規模な問題に対しては実用的ではない．また，半定値計画法の解を元のグラフに対する彩色に変換するときにも，得られる結果が良い彩色であることを保証するのは簡単ではない．これに対し，本手法で用いた，2次元に制限した半定値計画法そのものは頂点彩色問題と等価であることがわかり，従って（P $\neq$ NP を仮定すると）多項式時間で最適解を求めることはできない．しかし，得られる解は元のグラフに対する彩色に容易に変換することができる．特に，各頂点に対応するベクトルが与えられたときに，これらのベクトルに対し最適な頂点彩色は**円弧グラフのクリークカバー問題**[22] を通して $O(m+n\log n)$ 時間で見付けることができる．

今回提案したアルゴリズムでは，ランダムなベクトル配置から始め，各ベクトルに対し「現在の配置のもとでそのベクトルにとって最適な位置」へ移動させるという探索を繰り返すことによって良いベクトル配置を求めることとした．このアルゴリズムをいくつかのグラフに対し実行したところ，密なランダムグラフに対してはDSATUR[23] や単純なタブー探索 [24] よりも性能が良いことがわかった．

本研究で用いた「半定値計画法を2次元に制限する」手法は，2次元の単位ベクトルが偏角のみで定まることから「新しい解の表現方法を与えている」と解釈することもできる．このように考えた場合，隣接する頂点に対応するベクトル同士が全く同じベクトルにならない限り必ず正しい頂点彩色になっている．頂点彩色問題に対して遺伝的アルゴリズムを適用すると，単純な方法では遺伝的操作を行ったときに頂点彩色にならないことがあるため修正を加えなければならないが，本研究で用いた解の表現を遺伝子として用いればそのような修正はほぼ不要である．そのため，遺伝的アルゴリズムを含め，他の発見的手法に応用することでより良いアルゴリズムを与えるものと考えている．

2.4 重み付き独立集合問題に対する近似アルゴリズム

グラフの**独立集合**とは頂点の部分集合でどの2点も辺で結ばれていないものをいう．**独立集合問題**では与えられたグラフ中の最大サイズの独立集合を見つける．この問題はNP困難なため近似アルゴリズムの研究がなされており，頂点数のほかに最大次数や平均次数を用いて近似率が解析されてきた．しかし，重み付きの問題では平均次数をパラメータとした近似率の解析はなされていなかっ

た．重み付きの場合, 入力のグラフに対し重みの小さい頂点を多数加えて, 最適解を変えずに平均次数を任意に小さくすることができてしまうためである．これを回避するために, 本研究では, 平均次数を拡張した重み付き平均次数を提案し, それを用いて近似率を解析した [31, 25].

頂点集合 X に対し，$w(X)$ で X の頂点の重みの和を表す．$N_G(v)$ はグラフ G における頂点 v の隣接頂点の集合を表す．G における頂点 v の**重み付き次数** $d_w(v,G)$ を

$$d_w(v,G) = \frac{w(N_G(v))}{w_v}$$

で定義する．さらに, G の**重み付き平均次数** $\bar{d}_w(G)$ を

$$\bar{d}_w(G) = \frac{\sum_{v\in V} w_v d_w(v,G)}{W}$$

で定義する．ここで，W は G の頂点の重みの総和である．グラフ G が明らかなときは $\bar{d}_w(G)$ を $\bar{d}_w$ と表す．これらの定義を用いて，貪欲アルゴリズムによって重さが $W/(\bar{d}_w+1)$ の独立集合が得られることを示した．これより，近似比が $\bar{d}_w+1$ のアルゴリズムが得られたことになる．貪欲アルゴリズムを線形計画アルゴリズムと組み合わせて近似比 $(\bar{d}_w+1)/2$ のアルゴリズムが得られることを示した．さらに, **重み付き** *inductiveness* というパラメータを定義し, それを用いた解析も行った.

2.5 その他のグラフアルゴリズム

{2,3}-EC-SNDP に対する近似アルゴリズム

ネットワーク設計問題のひとつに Survival Network Design Problem(SNDP) がある．{2,3}-EC-SNDP は, グラフと, その各頂点対に対し 2 または 3 の確保すべき枝連結度が与えられたとき, その要求を満たすような最小の部分グラフを得る問題である．この問題に対しては線形計画法を繰り返し用いた 2 近似アルゴリズムが知られているが, その時間計算量は多項式時間とはいえ実用的なものではない．本研究では深さ優先探索と極大全域森を組み合わせたグラフ論的手法によるアルゴリズムを提案した．その近似比率が $\frac{7}{3}$ となることを示し, さらに, このアルゴリズムを改良し近似比率が 2 となることを示した [32].

一般化彩色問題の近似アルゴリズム

通常の頂点彩色問題に対するアルゴリズムと **defective coloring** に対するアルゴリズムとの関係について，以下の問題が提起されている：n 頂点のグラフを $O(n^\epsilon)$ 色で彩色可能な頂点彩色アルゴリズムが与えられたとする．このアルゴリズムに基づいて $(O((n/d)^\epsilon), d)$-defective coloring を行うことは常に可能だろうか．ここで，(k,d)-**defective coloring** とは，与えられたグラフの頂点の，k 個の d-**defected 独立集合**（最大次数が高々 d の部分グラフを誘導するような頂点の部分集合）への分割である．0-defected 独立集合とは通常の独立集合のことであり，従って (k,d)-defective coloring は通常の k 彩色を一般化した概念である．(k,d)-**defective coloring 問題**，すなわちグラフが与えられたときに (k,d)-defective coloring が存在するかどうかを判定する問題は，$k \geq 3$ かつ $d \geq 0$ ならば NP-完全であることが知られている．

本研究では，先の問題に対する解答の一部として,「最大次数 Δ のグラフに対する $O(\Delta^\alpha)$ 彩色アルゴリズムが存在すれば，同じく最大次数 Δ のグラフに対して $(O((\Delta/d)^\alpha), d)$-defective 彩色可能である」ことを示した．これは,「($\Delta+1$ 色で彩色可能である) 最大次数 Δ のグラフが $(\lceil \Delta/d \rceil, d)$-defective 彩色可能である」という Lovász の結果を一般化するものである．さらに，通常の頂点彩色問題に対しては「頂点数 n，最大次数 Δ，彩色数 k のグラフに対し $O(\Delta^{1-x/k})$ 色で彩色可能なら $O(n^{\epsilon(k)})$-彩色可能」であることがわかっているが，これを defective 彩色に拡張可能である，つまり同じ $\epsilon(k)$ により「頂点数 n，最大次数 Δ，彩色数 k のグラフに対し $O(\Delta^{1-x/k})$ 色で彩色可能なら $(O(n^{\epsilon(k)}), d)$-defective 彩色可能」であることを示した [26].

辺縮約問題の近似困難性

グラフのある性質 P に対し，その性質を満たさないグラフから，P を満たすグラフを構成することを考える．そのためには，頂点の削除，辺の削除，または辺の縮約が考えられる．最小個数の頂点，辺を削除して P を満たすグラフを構成する問題はそれぞれ（性質 P に関する）頂点削除問題，辺削除問題と呼ばれ，性質 P が non-trivial で hereditary である場合，どちらの近似困難比率も明らかになっている．

一方，縮約しなければならない辺の最小個数を求める問題を（性質 P に関する）辺縮約問題と呼ぶ．性質 P が縮約に対し hereditary であり，3-connected グラフによって決定される場合，この問題は NP 完全であることがわかっているが，その近似困難な比率に関しては今まで知られていなかった．

本研究では，MAX E3-SAT の問題例から，ギャップ保存リダクションにより連結点被覆問題の問題例を構成し，さらに辺縮約問題の問題例にリダクションを行うことにより，辺縮約問題の近似困難な比率を求めた [27].

3 集合問題

3.1 集合被覆問題の近似アルゴリズム

実用上様々な応用をもつ**集合被覆問題（*SC*）**は，よく知られた組合せ最適化問題で，これまでに多くの研究成果が得られている．ここでは，n 個の要素から成る台集合 U，U の部分集合の族 $\mathcal{F}$，各部分集合 $S \in \mathcal{F}$ に割り当てられた非負コスト c_S とが与えられ，$\bigcup_{S\in\mathcal{F}'} S = U$ となるような部分集合族 $\mathcal{F}'$ の中で最小コストのもの，つまり，含まれる部分集合のコスト和 $\sum_{S\in\mathcal{F}'} c_S$ が最小であるもの，が求められる．また，与えられた部分集合の位数がいずれも k 以下であるとき，それを k **集合被覆問題（*k-SC*）**と呼ぶ．同問題は $k \geq 3$ であれば NP 困難であり，APX 困難でもある．

SC に対するヒューリスティックの中で，貪欲法は直感的に最も自然かつ単純である．U の要素 u は，u を含んだ部分集合をもつ集合族により**被覆される**というが，貪欲法は部分集合を集合族に順次追加することで，すべての要素を被覆するような集合族を最終的に構成する．部分集合 S の選択基準は**コスト効率**で，新たに被覆するのに要する 1 要素当りのコスト（つまり，S 内で未被覆な要素数で c_S を割ったもの）が最小なものが選ばれる．一様コストのもと（つまり $c_S = 1, \forall S \in \mathcal{F}$），この手法の SC に対する近似保証が $H(n) = \sum_{i=1}^{n}(1/i)$ であり，k-SC に対しては $H(k)$ であることを最初に示したのは Johnson である．Lovász は小数被覆を用いて同じ結果を導いているが，線形計画の双対性を利用することで，任意重み k-SC に対しても同じ近似保証 $H(k)$ が成り立つことが，Chvátal により後に示された．更に一様コストの SC の場合，より精密な近似保証の $\ln n - \ln\ln n + \Theta(1)$ が示されている．その一方で，対話証明による近似困難性の結果より，SC に対し多項式時間内に保証できる近似精度が，貪欲法の与える近似保証にほぼ一致することもわかっており，SC に対しては貪欲法が漸近的に最良の近似アルゴリズムであるといえる．

一方 k-SC に対し，Goldschmidt らは貪欲法を改良することで，一様コストの場合に $H(k) - 1/6$ の近似保証が示した．更に様々な局所探索の手法を取り入れることで，$H(k) - 11/42, H(k) - 1/3$ へと改善され，現在のところ $H(k) - 1/2$ まで知られている．残念ながら，一様コスト k-SC における，これらの改良方法は，一般コストの場合には通用せず，貪欲法の $H(k)$ を改善できるか否かは未解決問題として残されていた．本研究では，この未解決問題に対する最初の回答を，次のように条件付ながら，肯定的に与える [8]：一般コスト 3-SC において，異なる部分集合コストには 2 倍以上の開きがある場合には，貪欲法を改良することで $H(3) - 1/6$ の近似保証が得られる．アルゴリズムは，Goldschmidt らによる貪欲法の変形版を一般化したものである．ただし，彼らのものを含め，貪欲法より優れたアルゴリズムがすべて組合せ論的に解析されているのに対し，本研究では k-SC の線形計画緩和とその双対計画を用いた Chvátal のアプローチを踏襲している．特に，解析だけでなくアルゴリズム設計においても，Galai と Edmonds によるグラフの分割定理がキーとなっている．

その後，同未解決問題には更なる進展が見られ，Hassin と Levin により，一般コスト k-SC に対して $H(k) - \frac{k-1}{8k^9}$ の近似保証を有し，貪欲法よりも真に高精度な近似アルゴリズムの存在が初めて確認された．

3.2 集合多重被覆問題に対する近似アルゴリズム

前出の集合被覆問題の自然な一般化である**集合多重被覆問題（*MC*）**とは，SC を次のように拡張した問題である．台集合 U の各要素 u には入

力時に**被覆要求**と呼ばれる非負整数 r_u が割り当てられ，各 u を（少なくとも）r_u 回被覆する解（部分集合族）が求められる．どの部分集合の位数も k 以下であるとき，同問題は k **集合多重被覆（**k*-MC*）と呼ばれる．通常の SC は，MC において $r_u \equiv 1$ $(\forall u \in U)$ と制限した場合に相当するが，これを任意の $r_u \geq 0$ に拡張すると，許される被覆の仕方によって，MC には二通りの問題設定が考えられる. つまり，どの部分集合も一度だけしか使えないもの（**制約付き** *MC*) と，何度使っても構わないもの（**制約なし** *MC*）とである．SC に対する貪欲法は，いずれの MC に対しても SC に対するのと同等の近似性能を発揮することが知られているが，一方，それを凌駕する近似手法は k-MC に対しても知られていない. しかしながら，制約なし k-MC の場合，k-SC へ “非多項式的” に還元することができ，例えば Goldschmidt らの変形版貪欲法を適用し，$H(k)$ より良い近似保証を得ることもできる．これに対し，制約付き k-MC にはそのような還元が知られていず，k-SC に関する既知結果をどのように利用できるかは不明である.

本研究では，集合多重被覆問題の近似に関する上述の状況を背景に，制約付き k-MC に対し，貪欲法よりも優れた近似アルゴリズムの開発を目指した．その方法として，まず k-SC に対する Goldschmidt らの変形版貪欲法を，制約付き k-MC 用に一般化した．その中で，制約付き k-MC は最終的に制約付き 2-MC まで還元されるのであるが，この問題は次の二点から多項式時間可解であることがいえる：1) 制約付き 2-MC は**単純** b **辺被覆（***simple b-edge cover, SbEC*）というグラフ問題と等価である，2)SbEC は $O(mn \log n)$ 時間で解ける．双対フィット法による，k-MC に対する通常の貪欲法の解析は，Vazirani の教科書に詳しいが，我々も双対フィット法により変形版貪欲法を解析した．そのため，SbEC の線形計画による記述と，その双対計画の最適解が有する構造特性を詳細に調べた．これらの特性を利用してある変数値を丸め，SbEC の双対最適解を k-MC の双対解へフィットさせることで，k-MC に対する変形版貪欲法の近似保証として $H(k) - 1/6$ が得られることを示した [6].

3.3 その他の問題

被覆型 0-1 整数計画問題と部分集合被覆問題

被覆型 0-1 整数計画問題と部分集合被覆問題, およびそれらの特別な場合に対し, 線形計画丸め法や半正定値計画丸め法といった, 高計算量を要する手法を用いた近似アルゴリズムが近年数多く開発されている．本研究では, より高効率で純粋に組合せ的なアルゴリズムについて, その近似性能を検証した. 丸め法を用いて得られた最良結果と比較すると, その性能はいくつかの特別な場合で劣るものの, 一般には同等以上の性能を有し, 重み付き多重被覆, 部分集合被覆, および更なる一般化問題では, その性能が優っていることを示した [3].

重みつき集合充填問題に対する局所改善法

互いに素な部分集合からなる集合族をパッキングというが, 重みつき集合パッキング問題とは, 重みつき部分集合の族が与えられたとき, それに含まれる部分集合の重み和を最大化するパッキングを計算するという, よく知られた NP 困難な最適化問題である. 特に与えられた部分集合の最大サイズが k であるとき, k 集合パッキング（k-SP）という．k-SP に対する貪欲法の近似保証は k であるが，上述の k-SC の場合と異なり，重みなしの場合で $k/2 + \epsilon$，重みありの場合でも $(k+1)/2$ という，貪欲法より良い近似保証が知られている. 本研究では, 部分集合の重みが 1 と w に制限された k-SP（但し, $w \geq 2.5$）に対し, 局所探索法の一種であり, 重みなし集合パッキング問題に対し有効であることが知られている t-local search アルゴリズムを拡張して適用し, 近似度 $\frac{k(k-1)^s-2}{2(k-1)^s-2}$（但し, $t = 2s$）が保証できることを示した [10].

劣モジュラ整数被覆問題の近似と生産計画問題への応用

本研究では, 生産計画問題のひとつとして, 容量つき需要-供給問題（CSD）を新たに導入し, その問題構造を解析するため, 従来の劣モジュラ集合被覆問題（SSC）の部分集合に関する制約を整数ベクトルに関するものに拡張した, 劣モジュラ整数被覆問題（SIC）の検討を提案した．主双対法に基づく SSC に対する近似アルゴリズムを SIC に対するものに発展させ, その性能解析を CSD に適用することで, CSD のネットワーク構造のみに依存し, 数値データに依存しない近似保証が得ら

れることを示した [9].

4 ネットワークに関するアルゴリズム

平成 17 年度より名古屋工業大学の和田教授を分担者に加え，アルゴリズムを考える対象を自律分散ロボットの制御やインターネット上の問題まで広げた．その成果は以下のようなものがある．

4.1 自律分散ロボット群に対する協調アルゴリズム

自律性を持つ複数のロボットが協調的に動作することにより全体で一つの目的を達成する自律分散ロボット群に関する協調的アルゴリズムについて研究した．

自律分散ロボット群においては，各ロボットは固有の識別子を持たず，共通の座標系をもたない．また，すべてのロボットは同じアルゴリズムで制御され，その動作は非同期である．本研究では，これらのロボットがある指定された幾何パターンを描くように配置する問題に対するアルゴリズムを考察した．具体的には，あらかじめ決められた形状を形成（形状形成問題）したり，あらかじめ指定されていない点に集合（一点集合問題）に対して，ロボットの能力とこれらの問題の可解性などを明らかにした．特に，ロボットのもつコンパスに故障が起こった場合を想定したモデルを提案し，それらモデルとアルゴリズムに関する存在性の関係を明らかにした．

4.2 無線アドホックネットワークに対する効率的なアルゴリズム

自己組織化可能で自律的なセンサー網システムは，さまざまな種類のセンサーから得られた大量のセンサー情報に対して適切な処理を行ない，網自ら意志決定を下すものでなければならない．国全体の環境調査などの規模を考慮すると，(a) スケーラビリティが高く，(b) 自律的な対応が可能で，(c) 必然的に階層構造をもつアーキテクチャでなければならない．また，センサー情報に対する的確な意志決定を行なうためにはセンサー同士が協調しなければならない．さらに，センサーが自律的にバッテリーで駆動することを考えるとセンサーの動作に関しては省エネルギーが最優先課題であり，そのためにはセンサー間および網間のプロトコルはイベント駆動型である必要がある．本研究では，以上のような要請に対して（1）インテリジェントな情報収集と通信を自律的に可能とする網を構築し，（2）センサーから得られた情報に対して分散的かつ効率的な統合法（分散センサーフュージョン）を開発し，（3）小規模であるが，現実規模に対処できるような実験環境を実現し，網のアーキテクチャやアルゴリズムに対する評価を行なった．階層的で動的なセンサー網のモデルを構築し，その上でデータのブロードキャストやセンサーノードの追加と削除に対して，効率的なアルゴリズムを与えている．分散センサーフュージョンに関する有効な方法を与えた．

4.3 証明書分散問題に対する近似アルゴリズム

アドホックネットワーク上で各ユーザが安全に通信をするために，どれだけの証明書を保持すれば良いかという問題を研究した．証明書は二人のユーザの順序対で表現されることに着目し，証明書の発行されている状況を証明書グラフと呼ばれる有向グラフ $G = (V, E)$ でモデル化した．この証明書グラフを用いて分散配置される証明書総数が最小となる分散配置を求める問題 Minimum Certificate Dispersal Problem(MCD) を定式化し，その計算複雑度を明らかにした．結果としては，一般には MCD は NP 完全であることを示した．また，入力グラフがある条件を満足する場合に対する 2 近似アルゴリズムを示し，そのアルゴリズムは木，リング，超立方体やメッシュに対しては最適解が得られることを示した．

5 その他の成果

この他, 公開鍵暗号系において重要な演算であるスカラー倍計算の効率的なアルゴリズムを与えた．また，3 次元離散ボロノイ図を効率よく求め

るアルゴリズムとそのハードウェアアルゴリズムを提案した.

スカラー倍計算の効率的なアルゴリズム

楕円曲線上のスカラー倍計算の基本演算は加算 $P+Q$ と2倍算 $2P$ である. ここで, P, Q は楕円曲線上の点である. スカラー倍計算の基本的な計算法として Window 法があり, その中では 2^kP+Q という形の計算が反復される. 本研究では, この 2^kP+Q を効率良く計算する方法 (直接計算) を提案し, これを Window 法に適用することで, 従来よりも計算時間を削減した [28]. さらに, 直接計算に座標の切り替えというアイデアを適用して計算時間の改良をおこなった [33]. また, モンゴメリのトリックを用いて計算時間を改善した [35, 36].

3次元離散ボロノイ図を求めるアルゴリズム

3次元離散ボロノイ図とは3次元2値画像のボロノイテセレーションのことである. つまり, 3次元空間内に何個かの生成点が与えられたとき, 各画素についてそこからもっとも近い生成点を見つける問題である. 本研究ではこれに対し $O(N^3)$ 時間の最適アルゴリズムをあたえた. ただし, 画像サイズは $N \times N \times N$ である. さらに, これをハードウェアアルゴリズムとして実現した. これは $O(N^3)$ 個のセルアレーを用い $O(N^2)$ 時間で3次元離散ボロノイ図を求める [30].

参考文献

[1] T. Doi, T. Fujito, "A primal-dual method for approximating tree cover with two weights," *Proc. 3rd CTW Workshop on Graphs and Combinatorial Optimization*, pp. 119–123, 2004.

[2] T. Fujito, "On approximability of the independent/connected edge dominating set problems," *Inform. Process. Lett.*, Vol. 79, No. 6, pp. 261–266, 2001.

[3] T. Fujito, "On combinatorial approximation of covering 0-1 integer program and partial set cover", *J. Combinatorial Optimization*, Vol. 8, No. 4, pp. 439–452, 2004.

[4] T. Fujito, "How to trim an MST: A 2-approximation algorithm for minimum cost tree cover," *Lecture Notes in Computer Science (Proc. 33rd ICALP)*, Vol. 4051, pp. 431–442, 2006.

[5] T. Fujito, T. Doi, "A 2-Approximation NC Algorithm for Connected Vertex Cover and Tree Cover," *Information Processing Letters*, Vol. 90, No. 2, pp. 59–63, 2004.

[6] T. Fujito, H. Kurahashi, "A better-than-greedy algorithm for k-set multicover," *Lecture Notes in Computer Science (Proc. 3rd WAOA)*, Vol. 3879, pp. 176–189, 2006.

[7] T. Fujito, H. Nagamochi, "A 2-approximation algorithm for the minimum weight edge dominating set problem," *Discrete Appl. Math.*, Vol. 118, pp. 199–207, 2002.

[8] T. Fujito, T. Okumura, "A modified greedy algorithm for dispersively weighted 3-set cover," *Discrete Applied Mathematics*, Vol. 154, No. 9, pp. 1392–1400, 2006.

[9] T. Fujito, T. Yabuta, "Submodular integer cover and its application to production planning," *Lecture Notes in Computer Science (Proc. 2nd WAOA)*, Vol. 3351, pp. 154–166, 2005.

[10] 大竹将知, 藤戸敏弘, "重みつき集合充填問題に対する局所改善法について", 電子情報通信学会 コンピュテーション研究会技術研究報告 COMP2004-62, pp. 17–22, 2005.

[11] 藪田隆俊, 藤戸敏弘, "被覆容量／要求量付き部分頂点被覆問題の2倍近似解法", 電子情報通信学会論文誌 D-I, Vol. J87-D-I, No. 11, pp. 1–8, 2004.

[12] X. Xie, T. Ono, T. Hirata, "An improved algorithm for the nearly equitable edge-coloring proble" *Trans. of IEICE on Fundamentals*, Vol. E87-A, No. 5, pp. 1029–1033, 2004.

[13] X. Xie, M. Yagiura, T. Ono, T. Hirata, "Analysis of an Edge Coloring Algorithm Using Chernoff Bounds" *Information Technology Letters*, pp. 13–16, 2007.

[14] X. Xie, M. Yagiura, T. Ono, T. Hirata, U. Zwick, "New Bounds for the Nearly Equitable Edge Coloring Problem" *18th International Symposium on Algorithms and Computation (ISAAC)*, LNCS 4835, pp. 280–291, 2007.

[15] M. Bellare, O. Goldreich, M. Sudan, "Free bits, PCPs and non-approximability — towards tight results," *SIAM J. Comput.*, Vol. 27, pp. 804–915, 1998.

[16] M.M. Halldórsson, "A still better performance guarantee for approximate graph coloring," *Inform. Process. Lett.*, Vol. 45, pp. 19–23, 1993.

[17] A. Blum, D. Karger, "An $\tilde{O}(n^{3/14})$-coloring Algorithmfor 3-colorable Graphs," *Information Processing Letters*, Vol. 61, pp. 49–53, 1997.

[18] E. Halperin, R. Nathaniel, U. Zwick, "Coloring k-colorable graphs using smaller palettes," in *Proceedings of the 12th Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms*, pp. 319–326, 2001.

[19] S. Khanna, N. Linial, S. Safra, "On the hardness of approximating the chromatic number," *Proc. Israel Symposium on Theory of Computing Systems*, pp. 250–260, 1993.

[20] J. C. Culberson and F. Luo, "Exploring the k-colorable landscape with iterated greedy," In David S. Johnson and Michael A. Trick, editors, *Cliques, Coloring, and Satisfiability: Second DIMACS Implementation Challenge*, Vol. 26 of *DIMACS Series in Discrete Mathematics and Theoretical Computer Science*, pp. 245–284. American Mathematical Society, 1993.

[21] F. Glover, M. Parker and J. Ryan, "Coloring by Tabu Branch and Bound," In David S. Johnson and Michael A. Trick, editors, *Cliques, Coloring, and Satisfiability: Second DIMACS Implementation Challenge*, Vol. 26 of *DIMACS Series in Discrete Mathematics and Theoretical Computer Science*, pp. 285–307. American Mathematical Society, 1993.

[22] W.L. Hsu and K.H. Tsai, "Linear time algorithms on circular-arc graphs," *Information Processing Letters*, Vol. 40, pp. 123–129, 1991.

[23] D. Brélaz, "New methods to color vertices of a graph," *Communications of the ACM*, Vol. 22, pp. 251–256, 1979.

[24] A. Hertz and D. de Werra, "Using tabu search techniques for graph coloring," *Computing*, Vol. 39, pp. 345–351, 1987.

[25] A. Kako, T. Ono, T. Hirata and M. M. Halldórsson, "Approximation Algorithms for the Weighted Independent Set Problem," *Proc. of WG 2005*, LNCS3787, pp. 341–350, 2005.

[26] X. Xuzhen, T. Ono, T. Hirata, "An Argument on Approximate Defective Coloring for k-colorable Graphs," *Proc. of the 9th Japan-Korea Joint Workshop on Algorithms and Computation*,pp. 41–48 ,2006.

[27] H. Otsuki, T. Hirata, "Inapproximability of the Edge Contraction Problem" *Proc. of 2005 Korea-Japan Joint Workshop on Algorithms and Computation*, pp. 84–88, 2005.

[28] 安達大亮, 蒲生真之, 平田富夫, "直接計算による楕円曲線上のスカラー倍計算の効率化", 電子情報通信学会論文誌, Vol. J88-A, No. 1, pp. 54–61, 2005.

[29] T. Ono, M. Yagiura, T. Hirata "A Vector Assignment Approach for the Graph Coloring Problem," Proc. of Learning and Intel-

ligent OptimizatioN (LION 2007), Trento, 2007.

[30] Hirata, T., "3-D Voronoi tessellation algorithms" *Japan Journal of Indusatrial and Applied Mathematics*, Vol. 22, No. 2, 2005. A preliminary version has appeared in *Proc. of International Symposium on Voronoi Diagrams in Science and Engineering*, Tokyo, pp. 173–178, 2004.

[31] 加古明久, 小野孝男, 平田富夫, M. Halldórsson, "重み付き独立集合問題に対する近似アルゴリズム", 情報処理学会アルゴリズム研究会研究報告, AL99, pp. 55–62, 2005.

[32] 勝谷裕樹, 小野孝男, 平田富夫, "グラフ論的手法を用いた {2,3}-EC-SNDP に対する近似アルゴリズムの研究" 電子情報通信学会コンピュテーション研究会技術研究報告, comp2004-60, pp. 1–8, 2005.

[33] 安達大亮, 平田富夫, "座標系の切替えと直接計算によるスカラー倍計算の効率化", 電子情報通信学会暗号と情報セキュリティシンポジウム (SCIS2004), pp. 1013-1018, 2004.

[34] 安達大亮, 平田富夫, "楕円曲線上のスカラー倍計算の効率化", 京都大学数理解析研究所講究録 1375, pp. 195-200, 2004.

[35] 安達大亮, 平田富夫, "モンゴメリのトリックを用いた 2^kP 倍点の改良計算法", 情報処理学会アルゴリズム研究会, AL98, pp. 33-40, 2004.

[36] 安達大亮, 平田富夫, "Refined Computations for Points of the form 2^kP Based on Montgomery Trick", 電子情報通信学会暗号と情報セキュリティシンポジウム (SCIS2005), pp. 1117-11122, 2005.

研究業績一覧

著書

1. 情報システムと情報技術事典編集委員会編:
"情報システムのための情報技術辞典", 培風館, 2006 年 7 月.
概要: 近似アルゴリズムに関する 5 中項目（近似アルゴリズム，近似精度保証の近似アルゴリズム，近似アルゴリズムの設計法，線形計画緩和に基づく方法，半正定値計画緩和に基づく方法）を執筆担当.

2. 浅野，平田，小野，浅野共訳:
"組合せ最適化–理論とアルゴリズム–", Springer, 2005 年 11 月.
概要: 翻訳

3. 平田富夫著:
"データ構造の基礎", サイエンス社, 2007 年 12 月.
概要: データ構造を基本情報構造に基づいて紹介・解説している．学部生向け教科書.

4. 和田，増澤，元木共訳:
"計算困難問題に対するアルゴリズム理論", Springer, 2006 年 12 月.
概要: 訳

5. 浅野，岩野，梅尾，山下，和田共訳:
"アルゴリズムイントロダクション改定 2 版, 第 1 巻 数学的構造とデータ構造", 近代科学社, 2007 年 2 月.
概要: 訳

6. 浅野，岩野，梅尾，山下，和田共訳:
"アルゴリズムイントロダクション改定 2 版, 第 2 巻 アルゴリズムの設計と解析手法", 近代科学社, 2007 年 2 月.
概要: 訳

学術論文

1. T. Fujito, T. Doi:
"A 2-Approximation NC Algorithm for Connected Vertex Cover and Tree Cover", Information Processing Letters, Vol. 90,

No. 2, pp. 59–63, 2004.

概要: The connected vertex cover problem is a variant of the vertex cover problem, in which a vertex cover is additional required to induce a connected subgraph in a given connected graph. The problem is known to be NP-hard and to be at least as hard to approximate as the vertex cover problem is. While several 2-approximation NC algorithms are known for vertex cover, whether unweighted or weighted, no parallel algorithm with guaranteed approximation is known for connected vertex cover. Moreover, converting the existing sequential 2-approximation algorithms for connected vertex cover to parallel ones results in RNC algorithms of rather high complexity at best. In this paper we present a 2-approximation NC (and RNC) algorithm for connected vertex cover (and tree cover). The NC algorithm runs in $O(\log^2 n)$ time using $O(\Delta^2(m+n)/\log n)$ processors on an EREW-PRAM, while the RNC algorithm runs in $O(\log n)$ expected time using $O(m+n)$ processors on a CRCW-PRAM, when a given graph has n vertices and m edges with maximum vertex degree of Δ.

2. 藪田隆俊, 藤戸敏弘:
"被覆容量／要求量付き部分頂点被覆問題の 2 倍近似解法", 電子情報通信学会論文誌, Vol. J87-D-I, No. 11, pp. 1–8, 2004, 11.

概要: グラフの頂点被覆問題はよく知られた NP-困難な組合せ最適化問題である．ここでは, 無向グラフが与えられたとき，全ての辺について少なくともどちらか一方の端点を含むような頂点部分集合のうち, 含まれる頂点の重みの合計が最小であるものが求められる．これまで同問題には，各頂点が被覆できる辺数に制限を加えたり，ある決められた割合の辺数だけ被覆することを要求するなどの一般化が個々に考えられてきた．本稿では辺や頂点に関するこれらの被覆条件を併せもつ一般化問題を新たに導入し，劣モジュラ被覆アルゴリズムを拡張することで, この問題に対して近似率 2 が多項式時間で保証できることを示す.

3. T. Fujito:
"On Combinatorial Approximation of Covering 0-1 Integer Program and Partial Set Cover", J. Combinatorial Optimization, Vol. 8, No. 4, pp. 439–452, 2004.

概要: The problems dealt with in this paper are generalizations of the set cover problem, $\min\{cx \mid Ax \geq b, x \in \{0,1\}^n\}$, where $c \in Q_+^n, A \in \{0,1\}^{m\times n}, b \in \vec{1}$. The covering 0-1 integer program is the one, in this formulation, with arbitrary nonnegative entries of A and b, while the partial set cover problem requires only $m-K$ constrains (or more) in $Ax \geq b$ to be satisfied when integer K is additionally specified. While many approximation algorithms have been recently developed for these problems and their special cases, using computationally rather expensive (albeit polynomial) LP-rounding (or SDP-rounding), we present a more efficient purely combinatorial algorithm and investigate its approximation capability for them. It will be shown that, when compared with the best performance known today and obtained by rounding methods, although its performance comes short in some special cases, it is at least equally good in general, extends for partial vertex cover, and improves for weighted multicover, partial set cover, and further generalizations.

4. T. Doi, T. Fujito:
"A Primal-Dual Method for Approximating Tree Cover with Two Weights", Proc. 3rd CTW Workshop on Graphs and Combinatorial Optimization, pp. 119–123, 2004.

概要: The *tree cover (TC)* problem is to compute a minimum weight edge set, given a connected and edge-weighted graph G, s.t. its vertex set forms a vertex cover for G. Unlike related problems of vertex cover or edge dominating set, weighted TC is not

yet known to be approximable in polynomial time as good as the unweighted version is. Moreover, the best approximation algorithm known so far for weighted TC is far from practical in its efficiency. In this paper we consider a restricted version of weighted TC, as a first step towards better approximation of general TC, where only two edge weights differing by at least a factor of 2 are available. It will be shown that a factor 2 approximation can be attained efficiently (in the complexity of max flow) in this case by a primal-dual method. Even under the limited weights as such, the primal-dual arguments used will be seen quite involved, having a nontrivial style of dual assignments as an essential part in it, unlike the case of uniform weights.

5. T. Fujito, T. Yabuta:
"Submodular Integer Cover and its Application to Production Planning", Lecture Notes in Computer Science, Vol. 3351, pp. 154–166, pp. 154–166, 2005.
概要: Suppose there are a set of suppliers i and a set of consumers j with demands b_j, and the amount of products that can be shipped from i to j is at most c_{ij}. The amount of products that a supplier i can produce is an integer multiple of its capacity κ_i, and every production of κ_i products incurs the cost of w_i. The *capacitated supply-demand (CSD)* problem is to minimize the production cost of $\sum_i w_i x_i$ such that all the demands (or the total demand requirement specified separately) at consumers are satisfied by shipping products from the suppliers to them. To capture the core structural properties of CSD in a general framework, we introduce the *submodular integer cover (SIC)* problem, which extends the *submodular set cover (SSC)* problem by generalizing submodular constraints on subsets to those on integer vectors. Whereas it can be shown that CSD is approximable within a factor of $O(\log(\max_i \kappa_i))$ by extending the greedy approach for SSC to CSD, we first generalize the primal-dual approach for SSC to SIC and evaluate its performance. One of the approximation ratios obtained for CSD from such an approach is the maximum number of suppliers that can ship to a single consumer; therefore, the approximability of CSD can be ensured to depend only on the network (incidence) structure and not on any numerical values of input capacities κ_i, b_j, c_{ij}. The CSD problem also serves as a unifying framework for various types of covering problems, and any approximation bound for CSD holds for set cover generalized *simultaneously* into various directions. It will be seen, nevertheless, that our bound matches (or nearly matches) the best result for each generalization *individually*. Meanwhile, this bound being nearly tight for standard set cover, any further improvement, even if possible, is doomed to be a marginal one.

6. T. Fujito, H. Kurahashi:
"A Better-than-Greedy Algorithm for k-Set Multicover", Lecture Notes in Computer Science, 3879, 176–189, 2006.
概要: The set multicover (MC) problem is a natural extension of the set cover problem such that each element requires to be covered a prescribed number of times (instead of just once as in set cover). The k-set multicover (k-MC) problem is a variant in which every subset is of size at most k. Due to the multiple coverage requirement, two versions of MC have been studied; the one in which each subset can be chosen only once (*constrained MC*) and the other in which each subset can be chosen any number of times (*unconstrained MC*). For both versions the best approximation algorithm known so far is the classical greedy heuristic, whose performance ratio is $H(k)$, where $H(k) = \sum_{i=1}^{k}(1/i)$. It is no hard, however,

to come up with a natural modification of the greedy algorithm such that the resulting performance is never worse, but could also be strictly better. This paper will verify that this is indeed the case by showing that such a modification leads to an improved performance ratio of $H(k) - 1/6$ for both versions of k-MC.

7. T. Fujito, T. Okumura:
"A Modified Greedy Algorithm for Dispersively Weighted 3-Set Cover", Discrete Applied Mathematics, 154(9), 1392–1400, 2006.
概要: The set cover problem is that of computing a minimum weight subfamily $\mathcal{F}'$, given a family $\mathcal{F}$ of weighted subsets of a base set U, such that every element of U is covered by some subset in $\mathcal{F}'$. The k-set cover problem is a variant in which every subset is of size at most k. It has been long known that the problem can be approximated within a factor of $H(k) = \sum_{i=1}^{k}(1/i)$ by the greedy heuristic, but no better bound has been shown except for the case of unweighted subsets. In this paper we consider approximation of a restricted version of the weighted 3-set cover problem, as a first step towards better approximation of general k-set cover problem, where any two distinct subset costs differ by a multiplicative factor of at least 2. It will be shown, via LP duality, that an improved approximation bound of $H(3) - 1/6$ can be attained, when the greedy heuristic is suitably modified for this case. A key to our algorithm design and analysis is the Gallai-Edmonds structure theorem for maximum matchings .

8. T. Fujito:
"How to trim an MST: A 2-approximation algorithm for minimum cost tree cover", Lecture Notes in Computer Science (Proc. 33rd ICALP), 4051, 431–442, 2006.
概要: The *minimum cost tree cover* problem is to compute a minimum cost tree T in a given connected graph G with costs on the edges, such that the vertices of T form a vertex cover for G. The problem is supposed to arise in applications of vertex cover and edge dominating set when connectivity is additionally required in solutions. Whereas a linear-time 2-approximation algorithm for the unweighted case has been known for quite a while, the best approximation ratio known for the weighted case is 3. Moreover, the known 3-approximation algorithm for such case is far from practical in its efficiency. In this paper we present a fast, purely combinatorial 2-approximation algorithm for the minimum cost tree cover problem. It constructs a good approximate solution by trimming some leaves within a minimum spanning tree (MST), and to determine which leaves to trim, it uses both of the primal-dual schema and the local ratio technique in an interlaced fashion.

9. T. Doi, T. Fujito:
"A Primal-Dual Method for Approximating Tree Cover with Two Weights", Discrete Optimization, 3(3), 230–237, 2006.
概要: The *tree cover (TC)* problem is to compute a minimum weight connected edge set, given a connected and edge-weighted graph G, such that its vertex set forms a vertex cover for G. Unlike related problems of vertex cover or edge dominating set, weighted TC is not yet known to be approximable in polynomial time as good as the unweighted version is. Moreover, the best approximation algorithm known so far for weighted TC is far from practical in its efficiency. In this paper we consider a restricted version of weighted TC, as a first step towards better approximation of general TC, where only two edge weights differing by at least a factor of 2 are available. It will be shown that a factor 2 approxi-

mation can be attained efficiently (in the complexity of max flow) in this case by a primal-dual method. Even under the limited weights as such, the primal-dual arguments used will be seen quite involved, having a nontrivial style of dual assignments as an essential part in it, unlike the case of uniform weights.

10. X. Xie, T. Ono, T. Hirata:
"An improved algorithm for the nearly equitable edge-coloring problem", Trans. of IEICE on Fundamentals, Vol. E87-A, No. 5, pp. 1029–1033, 2004, 5.
概要: A nearly equitable edge-coloring of a multigraph is a coloring such that edges incident to each vertex are colored equitbly in number. this problem is solved in $O(kn^2)$ time, where n and k are the numbers of the edges and the colors, respectively. The running time was improved to be $O(n^2/k + n|V|)$ later. We present a more efficient algorithm for this problem that runs in $O(n^2/k)$ time.

11. 安達大亮, 蒲生真之, 平田富夫:
"直接計算による楕円曲線上のスカラー倍計算の効率化", 電子情報通信学会論文誌, Vol. J88-A, No. 1, pp. 54–61, 2005, 1.
概要: 楕円曲線上のスカラー倍計算の基本演算は加算 $P+Q$ と 2 倍算 $2P$ である. ここで, P, Q は楕円曲線上の点である. スカラー倍計算の基本的な計算法として Window 法があり, その中では 2^kP+Q という形の計算が反復される. 本論文では, この 2^kP+Q を効率良く計算する方法を提案し, これを Window 法に適用することで, 従来よりも計算時間を削減する.

12. T. Hirata:
"3-D Voronoi tessellation algorithms", Japan Journal of Indusatrial and Applied Mathematics, Vol. 22, No. 2, 2005.
概要: We consider the discrete Voronoi diagram in the three-dimensional space, that is, the Voronoi tessellation of a 3-D binary image. The input to the tessellation algorithm is a 3-D image containing a set of pixels of value 0 (generators). The goal is to classify the rest of the pixels to the nearest generator. This paper gives a simple algorithm for computing the Voronoi tessellation map of a 3-D binary image. It runs in $O(N^3)$ time for an $N \times N \times N$ input image. A hardware algorithm is also presented, which computes the 3-D Voronoi tessellation map in $O(N^2)$ time on an $O(N^3)$-cell array.

13. A. Kako,T. Ono, T. Hirata, M. Halldórsson:
"Approximation Algorithms for the Weighted Independent Set Problem", Lecture Notes in Computer Science, 3787, 341–350, 2005.
概要: In the unweighted case, approximation ratio for the independent set problem has been analyzed in terms ofthe graph parameters such as the number of vertices, maximum degree, and average degree. In the weighted case, no corresponding results are possible for average degree, since inserting the vertices with small weight decreases the average degree arbitrarily without significantly changing the approximation ratio. In this paper, we introduce weighted measures, namely "weighted" average degree and "weighted" inductiveness, and analyze algorithms for the weighted independent set problem in terms of these parameters.

14. 勝谷裕樹, 小野孝男, 平田富夫:
"グラフ論的手法を用いた {2,3}-EC-SNDP に対する近似アルゴリズム", 電子情報通信学会論文誌, J86-D-I, 11, 1679–1686, 2005.
概要: ネットワーク設計問題のひとつに Survival Network Design Problem(SNDP) と呼ばれる問題がある. 本研究では, {2,3}-EC-SNDP に対し, 深さ優先探索と極大全域森を組み合わせたアルゴリズムを提案し, その近似比率が $\frac{7}{3}$ となることを示す. また, このア

ルゴリズムを改良し近似比率が 2 となることを示す.

15. D. Adachi, T. Hirata:
"Refined Computation for Points of the form 2^kP Based on Montgomery Trick", IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, E89-A, 1, 334–339, 2006.
概要: This paper focuses on algorithms for an efficient scalar multiplication. We propose two algorithms for computing points of the form 2^kP in affine coordinates. One works for $k = 2$, and the other works for arbitrary natural number k. The efficiency of these algorithms is based on a trade-off between a field inversion and several field multiplications. We apply Montgomery trick to implement this trade-off. Since a field inversion is usually more expensive than 10 field multiplications, our algorithms are efficient in comparison with existing ones.

16. T. Ono, M. Yagiura, T. Hirata:
"A Vector Assignment Approach for the Graph Coloring Problem", Proc. of Learning and Intelligent OptimizatioN (LION 2007) , Lecture Notes in Computer Science, 2007.
概要: We consider the relationship between the graph coloring problem (GCP) and the vector assignment problem (VAP). Given an undirected graph, VAP asks to assign a vector to each vertex so as to maximize the minimum angle between the vectors corresponding to adjacent vertices. We show that any solution to the VAP in the 2-dimensional space, which we call the 2-dimensional VAP (2VAP), gives a feasible coloring, and that such transformation can be computed efficiently. We also show that any optimal solution to 2VAP gives an optimal coloring for GCP. Based on this fact, we propose a heuristic algorithm for GCP, whose search space is the set of solutions for 2VAP. The algorithm is quite simple and can be considered as a variant of the threshold accepting. The experiments show that our algorithm works well for graphs with relatively low degree.

17. X. Xie, M. Yagiura, T. Ono, T. Hirata:
"Analysis of an Edge Coloring Algorithm Using Chernoff Bounds", Information Technology Letters (Proc. of FIT), pp. 13–16, 2007.
概要: Givn a multigraph $G = (V, E)$ with n vertices and m edges and a color sct $C = \{1, 2, \ldots, k\}$, the nearly equitable edge ooloring is an assignment of given colors to edges in G such that anmong the edges incident to each vertex, the number of edges colored with any two colors differ by at most two. The notion of the nearly equitable edge coloring was introduced in 1982 by Hilton and de Werra, who also provod that any graph has a nearly equitable edge coloring. Their proof is constructive and easily leads to an algorithm for finding such a coloring in $O(km^2)$ time. Later, Nakano et al. showed an algorithm that rurs in $O(m^2/k + mn)$ time. In 2004, Xie et al. presented a more efficient algorithm, which improved the running time to $O(m^2/k)$ and moreover satisfied the following balanced constraint: Tbe numbers of the edges colored with any two oolors differ bv at most one. Tbe previous algorithm presented by Xie et al. works as follows. Initially assign k colors $1, 2, \ldots, k$ to k uncolored edges repeatedly until all the edges are colored, and then invoks an algorithm called RECOLOR to modify the current edge coloring whenever it is not nearly equitable. Hence, tbe ruuning time of the algorithrn is decided by the runuing time of RECOLOR and the number of calls to RECOLOR. To analyze the munber of calls to RECOLOR, they introduced a potential Φ_π and showed that RECOLOR always runs

in $O(|E_\pi(i) \cup E_\pi(j)|)$time for relevant colors i and j and decreases Φ_π by at least one, where π is the initial edge coloring and $E_\pi(i)$ is the set of edges colored with i. In this paper, we investigate the runuing time of a modified version of their algorithm in which the initial edge coloring is generated randomly according to the following rule: Randomly pick a color $i \in C$ to assign an edge $e \in E$ until all the edges are colorod. Using Chernoff bound, we show that for arbitrary constants $\gamma \in (0, l)$ and $\epsilon \in (0, l/2)$, with high probability for sufficiently large n, such a random color assignment π satisfies $|E_\pi(i)| \leq 2m/k$ for all colors $i \in C$ and $\Phi_\pi = O(kn^{1/2}m^{1/2+\epsilon})$ if $k = O(m^{1-\gamma})$. Hence, by repeatedly using RECOLOR, the random color assignment can be modified to a nearly equitable edge coloring in $O(n^{1/2}m^{3/2+\epsilon})$ time with high probability for sufficiently large n. This time complexitv is better than Xie at al.'s original aigorithm when the graph is dense and k is small.

18. X. Xie, M. Yagiura, T. Ono, T. Hirata, U. Zwick:
"New Bounds for the Nearly Equitable Edge Coloring Problem", Proc. 18th International Symposium on Algorithms and Computation (ISAAC), LNCS 4835, pp. 280–291, 2007.
概要: An edge coloring of a multigraph is nearly equitable if, among the edges incident to each vertex, the numbers of edges colored with any two colors differ by at most two. It has been proved that this problem can be solved in $O(m^2/k)$ time, where m and k are the numbers of edges and given colors, respectively. In this paper, we present a recursive algorithm that runs in $O\left(mn \log\left(m/(kn) + 1\right)\right)$ time, where n is the number of vertices. This algorithm is always faster than the existing algorithms. When $k = O(1)$, the time complexity of all existing algorithms is $O(m^2)$, which implies that this time complexity remains to be the best for more than twenty years since 1982 when Hilton and de Werra gave a constructive proof for the existence of a nearly equitable edge coloring for any graph. Our result is the first that improves this time complexity when m/n grows to infinity; e.g., $m = n^\vartheta$ for an arbitrary constant $\vartheta > 1$. We also propose a randomized algorithm that runs in $O\left(m^{3/2}n^{1/2}/k^{1/2}\right)$ time with probability at least $1 - 1/c$ for any constant $c > 1$. This algorithm is very simple, and its time complexity is better than $O(m^2/k)$ when the graph is dense and k is small.

19. 山中，伊藤，片山，犬塚，和田:
"軸の方向に関する共有知識を持たない自律分散ロボット群に対する形状形成アルゴリズム", 信学論（D－I）, J88-D-I, 4, 739-750, 2005 年 4 月.
概要: 自律分散ロボット群とは，各ロボットが自律的，協調的に動作することにより，全体として一つの問題を解決するロボット群である．これまでに自律分散ロボットを理論的なモデルで抽象化し，一点集合問題，形状形成問題など様々な問題に適用する研究が行なわれている．本論文で扱う形状形成問題とは，任意の位置に配置されたロボット群が特定の形状を形成する問題である．形状を形成するとは，入力形状を平行移動して，回転，拡大縮小，反転させたものとロボットの配置が一致することをいう．形状形成問題に関する研究してしては，ロボットに与える共通知識の量による，任意の形状に対する形成可能性について議論されている．本研究では，以前の動作で得られた情報を記憶できないロボットを対象にし，ロボット間で共有する座標系に関する知識が従来よりも少ない場合において任意の形状を形成することができるアルゴリズムを提案し，その正当性を証明する．

20. H.Zheng, S.Omura, J.Uchida, K.Wada:
"An optimal certificate dispersal algorithm for mobile ad hoc networks", IEICE Trans-

actions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, E88-A, 5, 1267-1273, 2005年5月.

概要: In this paper, we focus on the problem that in an ad hoc network, how to send a message securely between two users using the certificate dispersal system. In this system, special data called certificate is issued between two users and these issued certificates are stored among the network. Our final purpose on this certificate dispersal problem is to construct certificate graphs with lower dispersability cost which indicates the average number of certificates stored in each node in an ad hoc network. As our first step, when a certificate graph is given, we construct two efficient certificate dispersal algorithms for strongly connected graphs and directed graphs in this paper. We can show that for a strongly connected graph $G = (V, E)$ and a directed graph $H = (V', E')$, new upper bounds on dispersability cost on the average number of certificates stored in one node are $O(D_G + |E|/|V|)$ and $O(p_G d_{max} + |E'|/|V'|)$ respectively, where D_G is the diameter of G, d_{max} is the maximum diameter of strongly connected components of H and p_G is the number of strongly connected components of H. Furthermore, we give some new lower bounds for the problem and we also show that our algorithms are optimal for several graph classes.

21. H. Zheng, S. Omura, K. Wada:
"A 2-approximation algorithm for minimum certificate dispersal problems", Proceedings of the 16th Australasian Workshop on Combinatorial Algorithms, 381-394, 2005年7月.

概要: We consider a network, where a special data called certificate is issued between two users, and all certificates issued by the users in the network can be represented by a directed graph. For any two users u and v, when u needs to send a message to v securely, v's public-key is needed. The user u can obtain v's public-key using the certificates stored in u and v. We need to disperse the certificates to the users such that when a user wants to send a message to the other user securely, there are enough certificates in them to get the reliable public-key. In this paper, when a certificate graph and a set of communication requests are given, we consider the problem to disperse the certificates among the nodes in the network, such that the communication requests are satisfied and the total number of certificates stored in the nodes is minimized. We formulate this problem as MINIMUM CERTIFICATE DISPERSAL (MDC for short). We show that MDC is NP-complete, even if its input graph is restricted to a strongly connected graph. We also present a polynomial 2-approximation algorithm MinPivot for strongly connected graphs, when the communication requests satisfy some restrictions. We introduce some graph classes for which MinPivot can compute optimal dispersals, such as trees, rings, some Cartesian products of graphs.

22. 伊藤，浅井，江崎，犬塚，和田:
"グループ形成によるレスキューエージェントの協調モデルについて", 計測自動制御学会論文誌, 41，12, 964-973, 2005年12月.

概要: 近年，大規模災害に対する取り組みの一つとしてロボカップレスキューに対する注目が集まっている．ロボカップレスキューにおけるマルチエージェントシステムには，単独では解決できない問題が同時に複数発生するなどの特徴をもつ環境において協調行動を実現することが求められている．そこで本研究では，グループを導入して，効率的に協調行動をおこなうことができる協調モデルを提案する．本モデルにはグループを形成することで，エージェント単体では解決できない問題が解決でき，また問題のサイズに応じたグループを作成できる利点がある．グルー

プは，グループを形成する権限をもつリーダエージェントとそれ以外のメンバエージェントにより構成される．これらのエージェントが協力しあって，共通の目標達成を目指して活動していく．なお，本モデルはすべてのエージェントがリーダとなることができ柔軟なグループ構成が可能である．本研究ではロボカップレスキューシミュレーションにおける消防隊エージェントに提案手法を適用して実験をおこなった．その結果，提案手法が与えたグループ化アルゴリズムが必要なサイズのグループを形成し，そのグループが正しく機能していることを示すことができた．

23. J.Uchida, I.A.K.M.Muzaidal, Y.Katayama, W.Chen, K.Wada:
"Construction and maintenamce of a cluster-based architecture for sensor networks", 39th Hawaii International Conference on System Science, 1-10, 2006 年 1 月.
概要: A sensor network is a collection of transmitter-receiver devices (referred to as nodes). We assume that each node synchronizes and performs transmission or reception per round. In this paper, we consider the construction and maintenance of a cluster-based architecture for a sensor network, with two atomic operations node-move-in and node-move-out which are performed by appearance and disappearance of a node. In our proposed architecture, a deterministic broadcasting can be done in $O(p)$ rounds, where p is the number of clusters. We present a randomized algorithm for a node-move-in and a deterministic algorithm for a node-move-out, which work in $O(q)$ expected rounds and $O(|T|)$ rounds, respectively, where q is the number of neighbors in the network of the joining node and T is a subtree of the architecture whose root is the leaving node. We also provide some alternative algorithms for the operations.

24. H.Zheng, S.Omura, K.Wada:
"An approximation algorithm for minimum certificate dispersal problems", IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, , E89-A, 2, 551-558, 2006 年 2 月.
概要: We consider a network, where a special data called certificate is issued between two users, and all certificates issued by the users in the network can be represented by a directed graph. For any two users u and v, when u needs to send a message to v securely, v's public-key is needed. The user u can obtain v's public-key using the certificates stored in u and v. We need to disperse the certificates to the users such that when a user wants to send a message to the other user securely, there are enough certificates in them to get the reliable public-key. In this paper, when a certificate graph and a set of communication requests are given, we consider the problem to disperse the certificates among the nodes in the network, such that the communication requests are satisfied and the total number of certificates stored in the nodes is minimized. We formulate this problem as MINIMUM CERTIFICATE DISPERSAL (MDC for short). We show that MDC is NP-complete, even if its input graph is restricted to a strongly connected graph. We also present a polynomial 2-approximation algorithm MinPivot for strongly connected graphs, when the communication requests satisfy some restrictions. We introduce some graph classes for which MinPivot can compute optimal dispersals, such as trees, rings, some Cartesian products of graphs.

25. A.K.M.M. Islam, Y.Katayama, W.Chen, K.Wada:
"Routing protocols on a novel cluster-based architecture for dynamic ad hoc radio networks", 5th International Information and Telecommunication Technologies Symposium(I2TS2006), 35-42, 2006 年 12 月.

概要: In this paper, we propose a time and energy efficient loop-free, on-demand routing protocol for a dynamic ad hoc radio network G. In order to support the protocol we propose a novel cluster-based architecture for G, denoted as CBNet(G). The construction and reconfiguration of the architecture are performed through two atmic operations: node-move-in and node-move-out. In this architecture, a route can be established from a source node to a destination node in $O(r+\ell)$ rounds, where r and ℓ are the numbers of nodes in the communication super highway of CBNet(G) and in the communication highway of the destination node's cluster in CBNet(G), respectively.

26. W. Chen, A.K.M.M. Islam, M. Malkani, A. Shirkhodaie, K. Wada, M. Zein-Sabatto: "Novel broadcast/multicast protocols for dynamic sensor networks", 9th Workshop on Advances in Parallel and Distributed Computational Models(in 21st IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium), APDCM-4(8 pages), 2007年3月.
概要: In this paper, we propose time efficient, energy saving and robust broadcast/multicast protocols in a reconfigurable cluster-based network sensor network. In our broadcast protocol, a broadcast can be executed in $O(hd^2 + D^2)$ rounds and each node needs to be awake in $O(D^2)$ rounds, where D and d are the degrees of the sensor network G and the sub-network induced by G's backbone, respectively, and h is the height of the backbone. When k channels are available, a broadcast can be executed in $O((hd^2 + D^2)/k)$ rounds and each node needs to be awake only in $O(D^2/k)$ rounds. We show that our broadcast protocol can be easily modified for multicast. The cluster-based architecture used in this paper is self-constructible and reconfigurable by using two topology management operations: node-move-in and node-move-out. We also show the algorithms for these two operations.

27. Jiro Uchida, Wei Chen, Koichi Wada: "Acknowledged Broadcasting and Gossiping in ad hoc radio networks", Theoretical Computer Science, 377, 1-3, 43-54, 2007年5月.
概要: A radio network is a collection of transmitter-receiver devices (referred to as nodes). Acknowledged Radio Broadcasting(ARB) means transmitting a message from one special node called source to all other nodes and informing the source about its completion. In our model each node takes a synchronization per round and performs transmission or reception at one round. Each node does not have a collision detection capability and knows only own ID. In [B.S. Chlebus, L. Ga, sieniec, A.M. Gibbons, A. Pelc, W. Rytter, Deterministic broadcasting in ad hoc radio networks, Distributed Computing 15 (2002) 27.38], it is proved that no ARB algorithm exists in the model without collision detection. In this paper, we show that if $n \geq 2$, where n is the number of nodes in the network, we can construct ARB algorithms in $O(n)$ rounds for bidirectional graphs and in $O(n^{4/3}\log^{10/3} n)$ rounds for strongly connected graphs and construct Acknowledged Radio Gossiping(ARG) algorithms in $O(n\log^3 n)$ rounds for bidirectional graphs and in $O(n^{4/3}\log^{10/3} n)$ rounds for strongly connected graphs without collision detection.

28. Naoki Inaba, Koichi Wada: "Efficient Initialization Algorithms on Single-hop Radio Networks", IEICE Transactions on Information and Systems, E90-D, 6, 915-922, 2007年6月.
概要: We consider an initialization problem in single-hop radio networks. The initial-

ization is the task of assigning distinct ID numbers to nodes in a network. We have greatly improved the previous results for the initialization in an n-node network. We propose randomized initialization algorithms in two cases. The first case is that n is known to all the nodes and the second case is that n is unknown to all the nodes. The algorithm for the first case completes in $en + \ln n + O(1)$ expected time slots, and the algorithm for the second case completes in $en + O(\sqrt{n})$ expected slots.

29. Y. Katayama, Y. Tomida, H. Imazu, N. Inuzuka, K. Wada:
"Dynamic Compass Models and Gathering Algorithms for Autonomous Mobile Robots", 14th Colloquium on Structural Information and Communication Complexity, LNCS 4474, 274-288, 2007年6月.
概要: This paper studies a gathering problem for a system of asynchronous autonomous mobile robots that can move freely in a two-dimensional plane. We consider robots equipped with an inaccurate (incorrect) compass which may point a different direction from other robots' compasses. A gathering problem is that the robots are required to eventually gather at a single point which is not given in advance from any initial configuration. In this paper, we propose several inaccurate compass models and give two algorithms which solve a gathering problem on these models. One algorithm is the very first result treating the compass whose indicated direction may change in every beginning of execution cycles of robots. It solves the problem when compasses have difference at most $\pi/8$ from the (absolute) north. The other one solves the problem when the difference is at most $\pi/3$ relatively to each other robot where the compasses are never changed.

30. T. Izumi, K. Wada:
"A crash-toleraant consensus algorithm in presence of probabilistic mesage omission", 8th Hellenic European Conference on Computer Mathematics and its applications(HERCMA2007), 57-58, 2007年9月.
概要: This paper newly proposes a novel round-based synchronous system suffering crash and probabilistic ommision failures. In this model, a novel class of adversaries, called /em p-probabilistic omission adversary(p-POA) is introduced. In addition to the ability of complete control of the crash-failure behavior, p-POA can select any subset of all transmitted messages as omission candidates. Then, each message in the omission candidates is lost with probability p. This paper investigates the feasibility and complexity of the consensus problem under p-POA.

31. T. Izumu, K. Katayama, N. Inuzuka, K. Wada:
"Gathering autonomous mobile robots with dynamic compasses: An optimal result", 21st International Symposium on Distributed Computing, LNCS 4731, 298-312, 2007年9月.
概要: Let consider n autonomous mobile robots that can move in a two dimensional plane. The gathering problem is one of the most fundamental tasks of autonomous mobile robots. In short, given a set of robots with arbitrary initial locations, gathering must make all robots meet in finite time at a point that is not predefined. In this paper, we study about the feasibility of gathering by mobile robots that have ϕ-*absolute error dynamic compasses*. While the direction of each local coordinate system is fixed in usual systems, the dynamic compass model allows the angle difference between a local coordinate system anf the global coordinate system to vary with time in the range of $[0, \phi]$. This paper proposes a semi-synchronous gathering algorithm for

n robots with $(\pi/2 - \epsilon)$-absolute error dynamic compasses, where ϵ is an arbitrary small constant larger than zero. We also show the optimality of our algorithm.

32. T. Izumi, K. Wada:
"On the probabilistic omission adversary", 9th International Symposium of Stabilization, Safety, and Security of Distribbuted Systems(SSS 2007), LNCS 4838, 357-371, 2007年11月.
概要: This paper newly proposes a novel round-based synchronous system suffering crash and probabilistic ommision failures. In this model, a novel class of adversaries, called /em p-probabilistic omission adversary(p-POA) is introduced. In addition to the ability of complete control of the crash-failure behavior, p-POA can select any subset of all transmitted messages as omission candidates. Then, each message in the omission candidates is lost with probability p. This paper investigates the feasibility and complexity of the consensus problem under p-POA.

33. J. Uchida,A.K.M.M. Islam, Y. Katayama,W. Chen, K. Wada:
"Construction and maintenance of a novel cluster-based architecture for ad hoc sensor networks", the Journal of Ad Hoc and Sensor Wireless Networks, (掲載予定).
概要: In this paper, we consider the construction and maintenance of a cluster-based architecture for a sensor network, with two atomic operations node-move-in and node-move-out which are performed by appearance and disappearance of a node. In our proposed architecture, a deterministic broadcasting can be done in $O(p)$ rounds, where p is the number of clusters. We present a randomized algorithm for a node-move-in, and a deterministic algorithm for a node-move-out operations. When nodes in the network are organized with total 1-hop data, these operations work in expected $O(q)$ and $O(|T|)$ rounds, respectively, where q is the number of neighbors in the network of the joining node, and T is a subtree of the architecture whose root is the leaving node. We also show that if nodes in the network know partial 1-hop data (i.e., incomplete knowledge about the neighbors in the network), node-move-in can be done in expected $O(\log q)$ rounds and node-move-out can have a similar performance as the case of the total 1-hop data. Finally, we demonstrate some simulation results for the operations, where we show that in our proposed design the number of clusters increases very slowly w.r.t the increasing number of nodes in the network.

34. 宮永, 片山, 和田, 高橋, 小林, 森田:
"動的アドホックネットワークでの効率の良い統合・分離が可能なクラスタネットワーク構築アルゴリズム", 信学論（D）, (掲載予定).
概要: 無線で通信を行なうセンサーノードによって構成されるネットワークを無線ネットワークと呼ぶ. 本論文では, 無線センサーネットワーク上に構築するクラスタ構造（クラスタネットワーク）と, それを構築・維持するアルゴリズムを提案する. 既知のクラスタ構造とアルゴリズムがクラスタ構造の統合や分割に対応していなかったのに対し, 提案アルゴリズムは効率良く統合や分割が行なえる.

研究会等

1. 倉橋秀和, 藤戸敏弘:
"集合多重被覆問題に対する貪欲法の改良", 電子情報通信学会コンピュテーション研究会技術研究報告, COMP2004-61, pp. 9–16, 2005, 1.
概要: 集合多重被覆問題は組合せ最適化問題の一種であり, NP 困難な問題として知られている. この問題は台集合 U の部分集合の族 $\mathcal{S}$ が与えられたとき, すべての要素につ

いて前もって与えられた要求カバー数 r_u 以上を含むような部分族 C でサイズが最小のものを求める問題である．部分集合の最大サイズを k とすると，この問題は貪欲法によって $H_k = \sum_{i=1}^{k}(1/i)$ 倍以内で近似できることが知られている．本稿では貪欲法の改良を提案し，近似率 $H_k - 1/6$ が保証できることを示す．

2. 大竹将知, 藤戸敏弘:
“重みつき集合充填問題に対する局所改善法について”, 電子情報通信学会コンピュテーション研究会技術研究報告, COMP2004-62, pp. 17–22, 2005, 1.
概要: 重みつき集合充填問題とは，重みのついた部分集合の族が与えられたとき，互いに素な部分集合からなる族のうち重み最大のものを見つける問題である．特に部分集合の最大サイズが k である問題を k-set packing problem（k-SP）という．本稿では，局所探索法の一種である t-local search アルゴリズムを利用し，部分集合の重みが 1 と w に制限された k-SP（但し，$w \geq 5/2$）に対し，近似比率が $\frac{k(k-1)^s-2}{2(k-1)^s-2}$（但し，$t = 2s$）の近似アルゴリズムを提案する．

3. 藤戸敏弘:
“最小コスト木状被覆問題の 2 倍近似アルゴリズム”, 情報処理学会 アルゴリズム研究会, 2006-AL-107, pp. 13–20, 2006, 7.
概要: 辺コストをもつ連結グラフ G において，その頂点集合が G の頂点被覆を成す木を木状被覆，そのような木の中からコスト最小のものを計算する問題を木状被覆問題という． NP 困難である同問題に対し，辺コストが一定の場合，線形時間 2 倍近似アルゴリズムが従来から知られていたが，任意コストの場合，3 倍近似アルゴリズムがベストで，しかもそれらは（多 項式時間とはいえ）非効率的である．本稿では，最小スパンニング木の葉を刈ることで，高速な 2 倍近似アルゴリズムが得られることを示す．

4. 加古明久, 小野孝男, 平田富夫, M. Halldórsson:
“重み付き独立集合問題に対する近似アルゴリズム”, 情報処理学会アルゴリズム研究会研究報告, AL99, 55–62, 2005, 1.
概要: 重みなし最大独立集合問題の近似アルゴリズムの近似率は, 頂点数, 最大次数, 平均次数などをパラメータとして解析されている．しかし, 重み付きの問題では平均次数をパラメータとした近似率の解析はなされていない．本論文では, 平均次数を拡張した重み付き平均次数と重み付き inductiveness というパラメータを導入し, それを用いて近似率を解析する．

5. 勝谷裕樹, 小野孝男, 平田富夫:
“グラフ論的手法を用いた {2,3}-EC-SNDP に対する近似アルゴリズムの研究”, 電子情報通信学会コンピュテーション研究会技術研究報告, comp2004-60, 1–8, 2005, 1.
概要: ネットワーク設計問題のひとつに Survival Network Design Problem(SNDP) と呼ばれる問題がある． 本研究では, {2,3}-EC-SNDP に対し, 深さ優先探索と極大全域森を組み合わせたアルゴリズムを提案し, その近似比率が $\frac{7}{3}$ となることを示す．また, このアルゴリズムを改良し近似比率が 2 となることを示す．

6. 安達 大亮，平田 富夫:
“モンゴメリのトリックを用いた 2^kP 倍点の改良計算法”, 情報処理学会アルゴリズム研究会研究報告, AL98, pp. 33–40, 2004, 11.
概要: この論文では素体上で定義された楕円曲線に注目する．我々は，アフィン座標系において，楕円曲線上の点 P からその 2^k 倍の点 2^kP を求めるアルゴリズムを 2 つ提案する．1 つは $k = 2$ の場合に有効であり，もう 1 つは任意の自然数 k に対して有効である．これらのアルゴリズムは，素体上の逆元計算 1 回を素体上の乗算数回と置き換えることに基礎を置いている．我々は，逆元計算の置き換えにモンゴメリのトリックと呼ばれる技法を用いた．妥当な仮定の下で，我々のアルゴリズムは既存のアルゴリズムよりも効率良く動作する．

7. 安達 大亮，平田 富夫:
“Refined Computations for Points of

the form 2^kP Based on Montgomery Trick", 暗号と情報セキュリティシンポジウム（SCIS2005）, pp. 1117–1122, 2005, 1.
概要: This paper focuses on algorithms for an efficient scalar multiplication. We propose two algorithms for computing points of the form 2^kP in affine coordinates. One works for $k = 2$, and the other works for arbitrary natural number k. The efficiency of these algorithms is based on a trade-off between a field inversion and several field multiplications. We apply Montgomery trick to implement this trade-off. Since a field inversion is usually more expensive than 10 field multiplications, our algorithms are efficient in comparison with existing ones.

8. H. Otsuki, T. Hirata:
"Inapproximability of the Edge Contraction Problem", 2005 Korea-Japan Joint Workshop On Algorithms and Computation, 84–88, 2005, 8.
概要: For a property π on graphs, the edge-contraction problem with respect to π is defined as a problem of finding a set of edges of minimum cardinality whose contraction results in a graph satisfying the property π. This paper gives a lower bound for the approximation ratio for the problem for any property π that is hereditary on contractions and determined by biconnected components.

9. Xuzhen Xie, Takao Ono, Tomio Hirata:
"An Argument on Approximate Defective Coloring for k-colorable Graphs", The 9th Japan-Korea Joint Workshop on Algorithms and Computation, 41–48, 2006 年 7 月.
概要: David Karger has asked the following question: Is there a universal argument that shows for a class of approximation algorithms using $O(n^\epsilon)$ colors for proper vertex coloring, we can always achieve an $(O((n/d)^\delta), d)$-defective coloring? We partially answer his quetion by assuming that there were an algorithm that properly colors an graph with maximum degree Δ using $O(\Delta^\alpha)$ colors. Specifically, we will prove that for any k-colorable graphs with $k \geq 3$, most of the known approximation algorithms using $O(n^\epsilon)$ colors can be used to derive an $(O((n/d)^\epsilon), d)$-defective coloring as David Karger asked.

10. N. Inaba, J. Uchida, Y. Katayama, W. Chen, K. Wada:
"Efficient broadcasting and gathering algorithms on dynamic sensor networks", 電子情報通信学会コンピュテーション研究会, 106, 29, COMP2006-4, 25-32, 2006 年 4 月.
概要: In [11], we have proposed a novel clustering on a flat sensor n-node-network G and provides fast communication between clusters. The proposed cluster-based structure consists of p clusters and backbone tree has at most $2p - 1$ nodes, where p is the smallest number of complete subgraphs in G. In usual setting, $p << n$. In this structure, a broadcast can be done in $O(p)$ rounds and two structure reconfiguration operations, a node-move-in and node-move-out are incorporated. In this paper, we improve the performance of broadcasting into $O(h_{BT})$ rounds, and incorporate gathering operation, and it can be performed in $O(h_{BT}+\Delta)$ rounds, where h_{BT} is the height of the backbone tree and Δ is the maximum degree of G, if G is a unit disk graph. We also show these two operations can be performed efficiently with almost preserving the performance of the node-move-in and node-move-out.

11. S. Omuraa, N. Inaba, Y. Katayama, K. Wada:
"A self-staabilizing protocol for k-hop clustering with solid-discs on sensor networks", 電子情報通信学会コンピュテーション研究会, 106, 405, COMP2006-46, 37-44, 2006 年 12

月.

概要: In this paper, we study a clustering that oartitions a multi hop wireless sensor network into non-overlapping and approximately equal-sized clusters, called a k-hop solid-disc. This clustering makes it possible to provide efficient communication control, and construction of robust and reliable sensor networks. When a cluster is viewed as a virtual sensor, the $k/2$-hop solid-disc requirement guarantees robustness and reliability of the virtual sensor. This property also realizes for cluster-head to aggregate sensor data from all directions and collect geometrically meaningfull dataa. We propose a memory-efficient self-stabilizing protocol for the k-hop clustering with $k/2$-hop solid-disc property.

12. 宮永，片山，和田，高橋，小林，森田:
“MANET 上でのクラスタを利用した通信路構築自己安定アルゴリズムについて”, 情報処理学会アルゴリズム研究会, 2007, 23, 2007-AL-111-2, 9-16, 2007 年 3 月.

概要: 無線で通信を行なう無線端末のみで構成されるネットワークを無線アドホックネットワークと呼ぶ．本稿では，無線アドホックネットワーク上にクラスタを自己安定に構築するクラスタリングアルゴリズムと構築されたクラスタ間の効率の良い通信手法を提案する．既存のクラスタリングアルゴリズムでは端末の移動に対してクラスタ構造の変化を少なくすることができる．

文部科学省科学研究費補助金 特定領域研究 (課題番号 16092215)

C09: ネットワーク問題のモデル化とアルゴリズムの研究

グラフは接続関係を表現する抽象モデルとして有用であり，古くから盛んに研究されている数学的対象である．特に近年は，計算機やインターネットの急速な発展に伴い，これらを対象としたグラフ問題に対するアルゴリズム研究が盛んになってきている．例えば，ネットワークの信頼性やルーティングの効率化，論理回路の最小化や基盤への埋め込みと言った問題はその典型例である．本特定領域研究では，ネットワークや計算機上での問題をグラフ問題としてモデル化し，そのアルゴリズム開発の研究を行った．ただし，本研究では，例えばルーティング問題を取り扱う場合にはルータの構造を特徴付けるグラフのみを考えるなど，入力を現実的なものに絞ることにより，アルゴリズムの効率化を目指した．本稿では，それぞれの成果に対する概要と，対外発表等の業績について報告する．

研究組織

研究代表者： 伊藤 大雄　京都大学 大学院 情報学研究科
研究分担者： 岩間 一雄　京都大学 大学院 情報学研究科
増澤 利光　大阪大学 大学院 情報科学研究科
宮崎 修一　京都大学 学術情報メディアセンター
堀山 貴史　埼玉大学 大学院 理工学研究科

交付決定額 (配分額)

平成 16 年度	2,800,000 円
平成 17 年度	4,000,000 円
平成 18 年度	4,000,000 円
平成 19 年度	3,300,000 円
合　計	14,100,000 円

研究成果の概要

- 学術誌発表　37 件（16 年度 11 件, 17 年度 0 件, 18 年度 16 件, 19 年度 10 件）
- 国際会議発表　78 件（16 年度 13 件, 17 年度 18 件, 18 年度 26 件, 19 年度 21 件）
- 国際会議開催　9 件（JCDCG 2004, NHC 2005, NHC Spring School and Workshop on Discrete Algorithms 2006, Bio-ADIT 2006, SSS 2006, KyotoCGGT 2007, AQIS 2007, SSS 2007, APIS 2008）
- 国際会議等のプログラム委員　17 件（SACSIS 2004, PODC 2004, OPODIS 2004, SIROCCO 2005, ICDCS 2006, ICPADS 2006, SSS 2006, ICALP 2006, WAAC 2006, SASIMI 2006/2007, SIROCCO 2007, ISAAC 2007, TAMC 2007, WG 2007, MFCS 2007, WAAC 2007, STACS 2008）
- 受賞等　2 件（Best Paper Award, DEXA International Workshop, 2005; 電子情報通信学会 平成 18 年度 猪瀬賞）

1　はじめに

グラフは接続関係を表現する抽象モデルとして有用であり，古くから盛んに研究されている数学的対象である．特に近年は，計算機やインターネットの急速な発展に伴い，これらを対象としたグラフ問題に対するアルゴリズム研究が盛んになってきている．例えば，ネットワークの信頼性やルーティングの効率化，論理回路の最小化や基盤への埋め込みと言った問題はその典型例である．

我々C09 班は，ネットワークや計算機上での問題をグラフ問題としてモデル化し，そのアルゴリズム開発の研究を行った．ただし，本研究では，例えばルーティング問題を取り扱う場合にはルータの構造を特徴付けるグラフのみを考えるなど，入力を現実的なものに絞ることにより，アルゴリズムの効率化を目指した．以下では，本特定領域研究における成果を年度別に述べる．

2　平成 16 年度

平成 16 年度は，ネットワーク上のルーティング，孤立した集団の発見問題，供給点配置問題，自己安定プロトコル等について結果を得た．また，グラフ問題においては，各種制限を設けた上，彩色問題，頂点被覆問題等様々な問題に対する効率の良いアルゴリズムの開発を行った．

2.1　平坦なネットワークに対するルーティングアルゴリズム

本研究では，コンパクトルーティング問題と最大伸張度削減問題の二つを扱った．前者は一般的なルーティングに対して条件を緩和する事でコストを改善するアルゴリズムを構築する問題であるのに対して，後者は枝追加により効率的な全域木を構築する問題である．

コンパクトルーティングとは，基本的なネットワークルーティング問題のひとつであり，必ずしも最短経路でルーティングしない事によって必要とするテーブルサイズを削減する手法である．迂回経路とその最短経路の比を伸張係数と呼ぶが，近年，簡単かつ現実的なネットワークモデル下で伸張係数 3 かつテーブルサイズ $O(n^{2/3}\log^{4/3} n)$ を実現するコンパクトルーティングアルゴリズムが Cowen によって提案され，後に $O(\sqrt{n\log n})$ に改善された．この伸張係数 3 は一般的な場合の下限に一致する．しかし，平均的なネットワークが持っているような性質を考慮に入れると状況が変わって来る．我々はそのような性質を表すものとして平坦性と言う概念を導入し，与えられたネットワークが擬似平坦であるならば，伸張係数を大幅に改善でき伸張係数 $s < 3$ かつテーブルサイズ $O(\sqrt{n\log n})$ のアルゴリズムが存在する事を示した．

二つ目の最大伸張度削減問題はグラフの全域木を対象としている．全域木の計算は非常に一般的な問題でありネットワークルーティングに加えて様々な応用が存在するが，一般のグラフでは全域木が元のグラフの性質をほとんど表せないような都合の悪いグラフが考えられる．この近似度を最大伸張度として表現し，我々はグラフに新たに枝を追加した場合にどれだけ最大伸張度を削減できるかについて考察した．本研究では，(i) リンググラフに対して k 本枝追加で最適な最大伸張度削減アルゴリズム，(ii) 格子グラフに対して格子構造を保ったまま，最大伸張度を削減できるほぼ最適なアルゴリズム，(iii) 一般のグラフに対してグラフの最大伸張度 s の全域木が与えられていても，1 本枝追加で最大伸張度を 1 でも削減可能かどうかの判定が NP 困難である事，またその近似度について，(iv) 一方で比較的多くの枝を追加した場合，最大伸張度を少なくとも 1 つ削減できるような多項式時間アルゴリズムが存在する事を示した．

2.2　孤立したクリーク発見問題

Web から情報を得る手法には，Yahoo!　や Google のようにテキストに基づく検索手法と，HITS や PageRank などのようにリンクの構造に基づく手法がある．リンク構造に基づく検索手法は，あるページ u から v へのリンクがあるならば u の作者にとって v の内容が有用であろうという予想に基づいている．このようなリンク構造に基づいた情報検索手法としてグループ内で密にリンクされている Web ページのグループを見つけるというものがある．

この問題のアイデアは，そのようなWebページ群は互いに類似した内容を扱うページ群なのではないかというものである．リンク構造に基づく手法は，Webページを頂点，Webリンクを枝に対応させたWebグラフと呼ばれるグラフを用いて議論されるが，密にリンクされているWebページ群のWebグラフ上での例としてクリーク（完全部分グラフ）が挙げられる．しかしクリークを求める問題（最大のものを求める，極大のものを列挙する）のほとんどは難しく，良い近似方法も知られていない．

本研究では「孤立した」クリークを定義し，その発見問題を議論する．部分グラフが「孤立している」とは，内部で密にリンクされているだけでなく，その部分グラフと外部とのリンクが少ないことをいう．例えばサイズkのクリークは，外部への枝が$k-1$本以下であるとき孤立しているという．また，cを定数とすると，外部への枝が$ck-1$本以下であるようなクリークをc-孤立クリークという．本研究では，このような孤立条件により多くの問題が簡単になり，孤立したクリークを列挙する問題を多項式時間で解くことができることを示した．また，孤立したクリークよりやや密度の低い擬クリークについても，平均次数が$k-\log k$以上でかつ最小次数が$\frac{k}{\log k}$以上である擬クリークを多項式時間で列挙できることを示した．

さらに，孤立したクリークを列挙するアルゴリズムを実装し，サイト間グラフと呼ばれる実際のWebから得られたグラフを用いて実験を行った．サイト間グラフとは，サイトを頂点，サイト間のリンクを枝に対応させたグラフである．これによりサイト内リンクを無視でき，Webのより巨視的な部分構造を調べることができる．我々はこのサイト間グラフから6,974個の孤立したクリークを発見し，類似した内容を扱うページ群であることを確認した．

2.3 最大被覆供給点配置問題に対する近似アルゴリズム

kを正整数とする．グラフにおいて供給点と呼ばれる節点の集合を定めたときに，$k-1$本の辺を任意にグラフから除去しても供給点集合と節点vとの間にパスが必ず確保されるとき，供給点は節点vをカバーすると呼ぶ．この概念はネットワークの耐故障性を計る尺度として重要であり，この尺度を用いた問題として供給点配置問題が知られている．供給点配置問題とは，与えられたグラフの全ての節点をカバーするような最小要素の供給点配置を決定する問題であり，耐故障性に優れたネットワークを実現する上で重要な問題である．

本研究では，この問題と深い関係を持つ最大被覆供給点配置問題という問題を提案した．この問題は，与えられたグラフに対し，限られた数の供給点を配置して最大数の節点をカバーする問題である．本問題は，配置可能なサーバ数に制限がある場合での耐故障性に優れたネットワーク設計に重要となる．これら二つの問題は，集合被覆問題と最大被覆問題という二つのNP困難問題と同様の関係を持っており，前者には供給点配置問題，後者には最大被覆供給点配置問題が対応する．なお，集合被覆問題と最大被覆問題では近似困難性が異なる．

供給点配置問題では多項式時間アルゴリズムが既に知られている．研究の目標は，最大被覆供給点配置問題に対する多項式時間アルゴリズムの発見，もしくはNP困難性の証明である．本研究では，本問題にある制限を施すことで種々の多項式時間アルゴリズムを与えた．まず$k=2$という制限の下で，連結グラフに対する多項式時間アルゴリズムを与えた．次に，非連結グラフに対する多項式時間アルゴリズムが連結グラフに対するものに還元できることを一般的に示し，その結果の一つとして，$k=2$の場合の非連結グラフに対する多項式時間アルゴリズムを得た．また，入力を木と高連結なグラフに制限した本問題に対しそれぞれ多項式時間アルゴリズムを与えた．

さらに本研究では，本問題を一般化した二つの問題がNP完全であることを示した．一つは入力を有向グラフとした問題である．もう一つは，供給点の配置コストが各節点に与えられているとして，配置できる供給点を数ではなくコストによって制限した問題である．なお，これらと同様の一般化を供給点配置問題に施した場合においては多項式時間アルゴリズムの存在が示されている．

2.4 直径が制限された単位円グラフ上の様々な問題に対する多項式時間アルゴリズム

単位円グラフとは2次元平面上に配置された半径の等しい複数の円がグラフの頂点と一対一で対応し，2つの円が交わる (あるいは接する) とき，またそのときに限りそれらの円と対応する2頂点が枝で連結されることによって得られるグラフである．グラフの直径とはそのグラフに含まれる頂点間の最大距離を指す．本研究ではグラフの直径が制限された単位円グラフにおける最小支配集合問題，最小連結支配集合問題，最大独立集合問題 (最小節点被覆問題)，孔発見問題，定数彩色問題に対する多項式時間アルゴリズムを与えた．

単位円グラフにおいてグラフの直径を制限することは単位円グラフを構築する領域のサイズを制限することを意味する．このような制限された領域は例えば災害などによって基地局が破壊されたような場で構築されるアドホックネットワークのモデルとして考えることができる．そのため本研究では円形の領域に配置された単位円集合をモデルとする単位円グラフについて議論したが，いずれの結果も一般的な領域に拡張するのは容易である．

また，このような直径への制限がグラフの入力パターン数をも制限してしまうことがないことも示した．つまり定数サイズの領域から得られる単位円グラフは直感的には座標が近い単位円に対応する頂点を一つの重みつき頂点として，有限個のグラフに置き換えることが出来そうであるが，それが不可能であることを証明した．

直径が制限された単位円グラフの頂点集合 V は，それぞれの頂点集合からなる誘導部分グラフが完全グラフとなるような，定数個 (例えば p 個とする) の部分集合へ分割することができる．そのため，最小支配集合，最小連結支配集合はそれぞれ $O(n^{p+1})$，$O(n^{2p-1})$ で発見できる．

最大独立集合問題に関しては単位円詰め込み問題と関係が深く，面積が a である円に重なりなく (円全体を領域の内部へ) 内包できる単位円の数は高々 $\frac{a}{2\pi}$ であることから，面積が a である領域から得られた任意の単位円グラフの最大独立集合は $O(n^{\frac{a}{2\pi}+1})$ で求めることができる．

孔 (弦のない閉路) 発見問題は，k が定数として与えられている場合には，サイズ k 以上の弦のない閉路をグラフが含むかどうかを判定する多項式時間アルゴリズムが知られている．しかし，k が問題の入力である場合，例えば最大孔発見問題などはNP完全となる．単位円グラフにおける孔発見問題も一般にはNP完全であるが，グラフの直径を制限することによって多項式時間で解けるようになる．本研究では単位円グラフにおけるこの問題のNP完全性の証明を与えた後，直径が制限された単位円グラフの場合に最大独立集合のサイズが弦のない閉路のサイズをおさえられることを利用し，$O(n^{\frac{a}{\pi}+0.376})$ で面積が a であるモデルから得られた任意の単位円グラフの孔を発見するアルゴリズムも与えた．

単位円グラフにおける彩色問題は，3-彩色の場合でもNP完全となることが知られている．しかし，直径を制限した場合には領域の面積によって k-彩色可能な場合の頂点数が抑えられることから，領域の面積が定数でかつ k が定数として与えられている場合，定数時間での彩色が可能となる．また，領域の面積が $\log n$ で制限されている場合には，ある定数 k に対して多項式時間でグラフを k-彩色するアルゴリズムが存在することも同様に言える．しかし，直径が制限された単位円グラフの最小彩色数を求める多項式時間アルゴリズムはまだ知られていない．

2.5 H-彩色問題の計算複雑さの階層

H-彩色問題とは，色同士の彩色時の規則をグラフ H で表すことで従来の点彩色問題に自然な一般化を施した問題である．同問題はチャネルの割当て問題やスケジューリング問題，文法形式との関係など多方面で点彩色問題に比べより実用的な応用が可能であり，幅広い視点から積極的に研究がなされている．一般の H-彩色問題は特殊な場合を除きNP困難であることが知られており，実用的な時間で厳密な解を得るアルゴリズムは存在しがたい．H-彩色問題に制限を与えた様々な問題についてもそれらの計算複雑さは明らかにされており，そのほとんどがNP困難である．一方，平面グラフの H-彩色問題に関してはその計算複雑さは未解決である．

このような状況を踏まえ，本研究では平面グラフの H-彩色問題についての計算複雑さの解明に主眼を置き，任意の平面グラフが 4-彩色可能であるにも関わらず 3-彩色が NP 困難になるという，従来の点彩色問題における計算時間のギャップに着目し，その中間に相当する H-彩色問題の計算複雑さの解析を行った．Circulant graphs の部分クラスを用い，従来の n-彩色と $n+1$-彩色の間をより細かく分ける階層構造を示し，その階層構造について 2-彩色と 4-彩色の間にあたるいくつかの彩色問題の NP 困難性を証明した．特に 2-彩色に極めて近く，真に強力な彩色であるが，NP 困難である問題の存在を明らかにした．また，3- 彩色と 4-彩色の中間に位置する長さ 7 の閉路の補グラフによる平面彩色問題についてはその NP 困難性の証明とともに，3-彩色できないが長さ 7 の閉路の補グラフでは彩色できる平面グラフのクラスを定義し，そのクラスを長さ 7 の閉路の補グラフで彩色する線形時間アルゴリズムも与えた．

2.6 NP 完全問題に対する例題生成法

理論計算機科学の分野において，P=NP 問題は最も重要な未解決問題のひとつである．30 年にわたってこの困難な問題に対して，多方面から研究が行われている．NP 完全問題はその中でも中心的な位置を占めており，下限の研究，確率的手法，近似アルゴリズムなどの様々な成果が上げられている．ここでは，例題生成という観点からこの問題について研究した．

まず初めに，基本的な NP 完全問題のひとつである充足可能性問題について考察した．我々は，与えられた論理式 f に対して，充足可能性を保存しつつ解の密度を濃縮した論理式 g を生成することを目標とし，3-CNF 式の充足可能性判定アルゴリズムに基づき，解密度の濃縮アルゴリズムを 3 つ提示した．また，各アルゴリズムの濃縮度に関する議論を行った．評価手法として論理式の解の密度 d と比 $|g|/d$ を用い，充足可能性問題に対する良いアルゴリズムが必ずしも解の濃縮につながるとは限らないことを示した．

次に，グラフの彩色可能性問題について考察した．k-彩色不能なグラフをすべて網羅的に生成可能なグラフ算法として，Hajós calculus が知られている．任意の 3 彩色不能なグラフが多項式回の規則の適用で生成できるならば，NP = co-NP となる．しかし，現在のところ多項式回の規則の適用では生成できないようなグラフは知られていない．この問題に対するアプローチとして，我々は平面グラフ上の算法に着目し，$\mathcal{PHC}$ と $\mathcal{PHC}^*$ の 2 つを提示した．平面グラフ上の算法とは，生成するグラフの系列がすべて平面グラフであるものをいう．我々は，$\mathcal{PHC}$ と $\mathcal{PHC}^*$ が 3 彩色不可能な平面グラフを生成する健全かつ完全な系であることを証明し，それらがグラフを構成するのにかかるステップ数に関する評価を行った．また，$\mathcal{PHC}^*$ が $\mathcal{PHC}$ を多項式倍の規則の適用で模倣できることを示した．

2.7 最小頂点被覆問題に対する近似アルゴリズム

最小頂点被覆問題 (以下 VC) は古くから知られている NP 困難問題の中の一つである．この問題が $2-\epsilon$ 近似のアルゴリズムを持つか否かは極めて重要性の高い未解決問題であり，そのようなアルゴリズムは存在しないであろうと強く信じられている．我々は以下のように VC の入力に制限を加えた部分問題を考え，2 を大きく下回る近似度のアルゴリズムを与えることに成功した．

2.8 密なグラフ上の VC

MAX-SNP に含まれる多くの問題は入力を密なインスタンスに制限すると PTAS を持つことが知られているが，VC にはこれは当てはまらず，VC は密なグラフ上でも PTAS を持たない．しかしながら，密なグラフ上では 2 を大きく下回る近似度を与えることができる．我々は密なグラフ上の VC に対し，以下の様な確率的近似アルゴリズムを与えた．

(i) 我々のアルゴリズムは Karpinski と Zelikovsky による近似アルゴリズムを改良し，$2/(1+\Delta/d)$ の近似度を与えた．ここで δ はグラフの最大次数，d は平均次数を表す．

(ii) Karpinski らのアルゴリズムは d が $O(n)$ のときのみ動作するが，我々のアルゴリズムは

$O(n \log\log n / \log n)$ の場合にも同様の近似度を与えることができる．

(iii) 我々の結果は以下の意味で最適である：もしより良い結果が存在するならば，一般の場合に $2-\epsilon$ の近似度が得られる．

2.9 完全マッチングを持つグラフ上の VC

マッチングと頂点被覆の間には強い関連があることが古くから知られている．Chen と Kanj は完全マッチングを持つグラフ上での VC(以下 VC-PM) を考え，(i) $1.069 + 0.069d$ (d は入力グラフの平均次数) の近似アルゴリズム，(ii) VC-PM は一般の VC と同程度に近似困難であること，を示した．我々は Chen らのアルゴリズムを改良し，近似度が $2 - 6.74/(d + 6.28)$ のアルゴリズムを与えることに成功した．このアルゴリズムはより広い範囲の d で 2 を下回る近似度を与えることができている．

2.10 安定結婚問題に対する近似アルゴリズム

安定結婚問題とは，Gale と Shapley によって提唱されたマッチング問題である．この問題では，N 要素同士の 2 つの集合 (例えば，男性と女性) と，各個人の異性に対する希望リストが与えられる．男性 m が女性 w_2 よりも w_1 の方を好む時，$w_1 \succ_m w_2$ と表記する．また，マッチング M に対して男性 m とマッチしている相手の女性を $M(m)$ と表記する．ここで，あるマッチング M において，$w \neq M(m)$ であり，$w \succ_m M(m)$ かつ $m \succ_w M(w)$ であるような (m, w) を M の blocking pair と呼ぶ．blocking pair の存在しないマッチングを安定マッチングといい，安定マッチングを求める問題を安定結婚問題という．安定結婚問題の任意の例題に対して，安定マッチングが存在することは Gale と Shapley によって 1962 年に示されており，安定マッチングを $O(N^2)$ 時間で求めるアルゴリズム (Gale-Shapley アルゴリズム) も示されている．

安定結婚問題の現実世界での応用として，アメリカでは研修医を病院に割り当てる NRMP というマッチングシステムにこの問題が使われている．同様のシステムはカナダやスコットランドでも取り入れられており，日本でも 2004 年度の研修医配属から安定結婚問題が利用され始めた．

安定結婚問題の拡張として，希望リスト内に全員の名前を含まなくても良い不完全リストと，希望リスト内での同順位を許す同順位リストの二つの拡張が考えられるが，片方の拡張の下では，安定マッチングは全て同サイズであり，安定マッチングは多項式時間で求めることができる．ところが，これらの両方の拡張を同時に施すと，一つの例題に対して異なったサイズの安定マッチングが存在する可能性があり，その最大サイズの安定マッチングを見つける問題 (MAX SMTI) は APX 完全であることが知られている．MAX SMTI に対して，近似度 2 を達成するアルゴリズムの存在は自明である．近年，近似度 $2 - c\frac{\log N}{N}$ (N は入力における男性の数，c は任意の正定数) のアルゴリズムが示された．本研究ではこのアルゴリズムを改良し，近似度 $2 - c\frac{1}{N^{\frac{2}{3}}}$ (c は $c \leq \frac{1}{2\sqrt[3]{6}}$ を満たす正定数) を与えた．

2.11 グラフ上のゲームの必勝法

本研究では，チョンプとニムという，グラフ上で定式化できる二人ゲームについて，その必勝法を考察した．チョンプでは，最初に $m \times n$ の盤面状の長方形のチョコレート板が与えられる．左上の四角は毒チョコである．このチョコレート板を交互に 1 つずつ食べていく．あるチョコを食べる際は，その右と下にある全てのチョコも食べなければならない．こうして，最後に毒チョコを食べてしまった方が負け，というゲームである．

このゲームは，先手必勝手順が存在することが証明されている．具体的な先手必勝手順は，$1 \times n$, $2 \times n$, $n \times n$ のチョコレート板に関しては発見されているが，それ以外の場合には知られていない．現段階では $3 \times n$ のチョコレート板での先手必勝手順が研究されている．この研究の中で，必敗の盤面（「負け型」と呼ぶ）が膨大に列挙され，その中でいくつか法則が見つかっているものの，未だ先手必勝手順の発見には至っていないのが現状である．

チョンプにおいては，$m \times n$ のチョコレート板でチョコ (a, b) を食べる操作と，$n \times m$ のチョコ

レート板で四角 (b, a) を食べる操作とは等価である．この対称性に注目して，$3 \times n$ のチョコレート板に限定せずに負け型を列挙し，法則を発見するという方法も考えられる．本研究では，計算機を用いて 9×9 までの全ての負け型（438 個）を列挙した．

また，チョンプに類似した，チョンプより簡単なゲームの必勝法から，チョンプの必勝法を導く方法が考えられる．そのようなゲームとして，ニムおよび木型のニムがあげられる．木型のニムは，木構造のグラフから，交互に 1 つの節点とその子孫を除いていき，根節点を除いた方が負け，というゲームである．ニムは，その木構造の分岐が根節点でのみ生じているものである．ニム，木型のニムについては，既に必勝法が知られている．

これらのゲームにおける根節点を，取ってはならない節点なので毒節点とおく．これらのゲームでは毒節点は根に一つだけあるが，本研究ではこれらのゲームを拡張し，毒節点の数と配置場所に制限を加えないものを扱った．この場合，毒節点を取れば即座に負ける場合と，毒節点を数回（これを「体力」と呼ぶ）までなら取ることができる場合とが考えられるが，本研究では，木型のニムの必勝法を応用することで，前者の必勝法を示した．後者においては，体力が多い方が必勝するということと，その具体的必勝法を示した．また，体力が同じ場合の必勝法も示した．

さらに，チョンプの拡張として，任意の場所に任意数の毒チョコが与えられるものが考えられる．この場合も，毒節点を複数持つ木型のニムと同様に，体力が多い方が必勝法を持つことを示した．体力が同じ場合は，右下のチョコが毒である場合は後手が，そうでない場合は先手が必勝法を持つことを示した．

2.12 論理回路の計算量の階層

論理回路の計算量とは，その論理関数を計算するのに必要な段数や素子数における最小値のことをいう．回路計算量における長年の研究の結果，様々な階層構造が証明されている．本研究ではクラス AC^0 というクラス内における階層構造を示した．クラス AC^0 とは，n 変数論理関数を計算する回路を作成するときに，入力制限のない AND, OR，NOT 素子を用いて定数段数，多項式サイズで実現可能な関数のクラスである．

この階層内において，線形サイズでは実現できないが多項式サイズでは実現できる関数の存在は最近まで示されていなかったが，昨年，$Size(s)$ では実現できないが $Size(s \log^{2+\varepsilon} s)$ で実現できる関数の存在が示された．しかし，これは存在を示しただけであり，具体的な関数を示したものではない．本研究では，パリティ関数を利用することにより，具体的な関数に対して上記の階層を示した．

2.13 家系図推定問題

進化系統樹とは，地球上の生物が共通の祖先から進化したと考えた時の，種間の進化的な関係を表現した木構造である．遺伝的な情報から進化系統樹を推定する方法に対する研究はさかんに行われてきた．また系統樹の一部に修正を加えたデータ構造を推定する研究も近年行われきている．

これに対し，家系図は進化系統樹をさらに詳しくしたものと考えることができる．進化系統樹をグラフで表現すれば有向木になるのに対し，家系図は入次数が 2 以下の非閉路的有向グラフとなる．本研究では，与えられた 2 節点間の遺伝的距離を満足する家系図を全て列挙する問題を考え，所望の家系図の全てが，節点数を増やすことなく一つの有向グラフで表現できることを示し，それを得る $O(n^3)$ 時間アルゴリズムを与えた．

2.14 通信遅延が大きな並列計算環境に対するタスクスケジュールのためのクラスタリングアルゴリズム

並列計算環境で効率よく計算を行うには，計算を構成する各タスク（部分計算）について，それを実行するプロセサと実行開始のタイミングを適切に調整することが重要である．各タスクを実行するプロセサと実行開始のタイミングを決定することはタスクスケジューリングとよばれ，これまでに多くの研究が行われている．これまでの研究のほとんどは，プロセサが密結合された並列計算環境を対象としており，プロセサがタスク処理に

要する時間に比べ，プロセサ間通信の時間は十分に小さいと仮定している．

しかし，近年，PC クラスタなどプロセサ間の通信遅延の大きな並列計算環境の利用が広まっている．そこで本研究では，通信遅延の大きな並列計算環境において，高速な並列計算を実現するタスクスケジューリングを行うためのクラスタリングアルゴリズムについて考察した．

タスクの実行順序制約を規定するタスクグラフが与えられたときに，まず各プロセサに割り当てるタスクの集合を決定し（クラスタリング），次に各プロセサ内でのタスクの実行開始時間を決定することによって，タスクスケジューリングを行うことができる．本研究では，タスクスケジューリングの第１段階であるクラスタリングのみを対象としている．

本研究では，まずクロスクラスタリングというクラスタリングのクラスを提案し，このクラス内に 1.5-近似スケジュールを導くクラスタリングが存在することを示した．さらに，タスクの複製を認めないという制約のもとでクロスクラスタリングを行う発見的アルゴリズムを提案し，提案するアルゴリズムが通信遅延の大きな並列計算環境において，効率的なタスクスケジュールを導くことをシミュレーションによって示した．

2.15 木ネットワークにおけるビザンチン故障耐性を有する自己安定辺彩色プロトコル

自己安定分散プロトコルは，計算機の故障によって分散システムがどのような状況に陥っても，故障が十分に長い間存在しなければ，いずれ正しい動作に復帰することを保証する分散システムである．つまり，自己安定分散システムは計算機の一時的な故障に対する高度な故障耐性を有する．

しかし，計算機の一部が断続的に故障する分散環境では，自己安定分散プロトコルの動作について何も保証できない．インターネットのような大規模な分散システムでは，故障が十分に長い間存在しないと仮定することは非現実的である．そのため，永久的な故障が存在する分散環境においても，正しい動作に復帰することを保証する自己安定分散システムの開発が重要である．

本研究では，永久故障としてビザンチン故障を対象とし，永久ビザンチン故障に対する故障耐性を有する木ネットワークの辺彩色プロトコルを設計した．このプロトコルでは，プロセスの並行性を決めるスケジューラとして，同時に動作するプロセスが１つである C デーモンを仮定している．このプロトコルは，木ネットワークの $\Delta+1$-彩色（Δ は木の最大次数）を行うが，各正常プロセスは距離 2 以内にビザンチン故障プロセスが存在しなければ子への辺を正しく彩色して安定することが保証される．つまり，ビザンチン故障に対して，半径 2 の故障封じ込めを実現している．

また，色数を Δ に制限した場合は，故障封じ込め半径が $\Omega(\log n)$（n は木ネットワークのノード数）になることを証明した．さらに，同時に複数のプロセスの動作を許す D デーモンを仮定する場合は，故障封じ込め半径が $\Omega(n)$ になることを証明した．故障封じ込め半径に関するこれらの下界から，提案したプロトコルの色数とスケジューラに関する仮定が必要であることが示せた．

2.16 モバイルエージェントシステムのための自己安定基盤アルゴリズム

大規模・複雑化し，多様なダイナミクスを内包する分散環境において，効率的に正しく動作する分散システムの設計はますます困難になってきている．このようなダイナミクスを有する分散環境での分散システム設計の効果的なパラダイムとして，モバイルエージェントを活用した分散システム設計が有望視されている．ここでモバイルエージェントとは，ネットワークを移動しながら自律的に動作するプログラムのことである．

ダイナミクスへの高度な適応性を実現するには，分散システムの自己安定化が重要である．そこで本研究では，高度な適応性を有するモバイルエージェントシステムの開発の基盤となる，自己安定アルゴリズムの設計を行った．

まず，木ネットワークにおけるエージェントの自己安定巡回アルゴリズムを開発した．本研究では，n ノードからなる木ネットワークにおいて，n 個のモバイルエージェントが，各ノードに同時に２つ以上のエージェントが存在しないという制約の下でネットワークを巡回する問題を考察し，こ

の問題に対する自己安定アルゴリズムを設計した．提案したアルゴリズムでは，各エージェントが木ネットワークの巡回に要する時間は $O(\Delta n)$ （Δ は木の最大次数）である．さらに，この巡回時間がオーダ的に最適であることを示した．

次に，モバイルエージェント数を制御する自己安定アルゴリズムを開発した．モバイルエージェントを利用した分散システムでは，ネットワーク中のエージェント数が多いほど処理に要する時間が減少するが，システムの負荷は増加する．従って，ネットワーク中のエージェント数をネットワークの規模に対して適切に維持することが重要である．そこで本研究では，動的に変化するネットワークにおいて，エージェント数をノード数の一定割合に保つ問題について考察し，生態系パラダイムに基づいた手法を提案した．また，提案手法がエージェント数をノード数に対して所定の比に保つことをランダムネットワーク，スケールフリーネットワークなどのさまざまな種類のネットワークに対するシミュレーションによって示した．

3　平成 17 年度

平成 17 年度は，平成 16 年度のテーマに加えて，行商人問題やネットワーク上でのバッファ管理アルゴリズム，彩色問題の計算複雑さ，消費電力最小化，オークション，量子ネットワークコーディング等についての結果を得た．

3.1　各種グラフの平均ストレッチ

我々が日々通信に使用している様々な情報伝達ネットワークの性能は，単に拠点間を結ぶ回線の性能だけでなく，そのネットワークの形状に深く依存している．そのため，たとえ拠点間の回線が高い性能を有していたとしても，ネットワークの構成法によりその性能を十分に発揮できない場合がある．多数のネットワークを接続して通信を行う場合には端末間で情報を伝達する経路を定めるためにルーティングテーブルが必要であるが，ネットワーク上には物理的な閉路が存在する場合が数多く存在し，これがルーティングテーブルを作成する上で障害となる．

そこで予めネットワーク上に閉路の存在しないスパニングツリー（全域木）を設定し，ネットワーク上の最短経路ではなく閉路の存在しない全域木を既定の経路として定めることにより前述した問題を回避することができる．しかしながら，閉路の存在するネットワーク中に全域木を設定することにより端末間の距離は明らかに以前より増加してしまい，ネットワークの性能が低下してしまう．本研究では，ネットワークの性能を評価する指標に平均ストレッチを用いた．あるグラフ G について G の全頂点を含む部分グラフ H を考えるとき，G における各頂点間の距離と H における各頂点間の距離の比をストレッチと呼ぶ．平均ストレッチとはこれらを平均したものである．ストレッチは “グラフ H 上ではグラフ G 上の何倍遠回りしなくてはいけないのか” ということに対応するため，G に対する H の性能を表現する指標として重要視されている．

本研究では平均ストレッチの特徴，特に定数上限の存在性を扱った．閉路を含むグラフのうち最も単純な重みなしリング状グラフと完全グラフについて，グラフのサイズに関わらず平均ストレッチの上限を定数で抑えることのできる全域木の構成法を示した．また，より多くの閉路を含むグラフの例として格子状グラフを扱い，我々は二次元格子状グラフについて，そのサイズに関わらず平均ストレッチの上限が定数であるような全域木の構成法およびその上限値を示した．さらに，d 次元に拡張した格子状グラフについて，そのサイズに対して対数関数的に増加する平均ストレッチの上限を示した．

3.2　孤立 2 部クリークの列挙

Web から情報を得る手法には，テキストに基づく検索方法と，HITS や PageRank のようにリンクの構造に基づく手法がある．リンク構造に基づいた情報検索手法とはグループ内で密にリンクされている Web ページのグループを見つけるというものであり，このアイデアはそのような Web ページ群はお互いに類似した内容を扱うページ群なのではないだろうかというものである．リンク構造に基づく手法は，Web ページを頂点，Web リンクを枝に対応させた Web グラフと呼ばれるグ

ラフを用いて議論される．

密にリンクされたWebページ群のWebグラフ上での表現の例として，クリーク（完全グラフ）や2部クリーク（完全2部グラフ）などが挙げられる．しかし，このようなものを求める問題（最大のもの，極大のものを列挙する）のほとんどは難しく，良い近似方法もない．

本研究では「孤立した」2部クリークを扱った．部分グラフが「孤立している」とは，内部で密にリンクされているだけでなく，その部分グラフと外部とのリンクが少ないことをいう．この孤立しているという条件を用いることで多くの問題が簡単になり，孤立した2部クリークを枝数の線形時間で列挙することが可能になることを示した．また，この孤立条件を少し変えるだけで問題は難しくなり，線形時間での列挙は不可能となることも示した．

3.3 3-正則グラフ上の行商人問題に対するアルゴリズムの改良

本研究では入力を次数3の正則グラフに限定した形での行商人問題に対するアルゴリズムの改良を行った．行商人問題 (巡回セールスマン問題) は最も有名なNP完全問題の一つである．一般のグラフに対する行商人問題のアルゴリズムとしては，1962年に発表された動的計画法による$O(n^2 2^n)$時間アルゴリズムが知られているが，それ以降改善されたアルゴリズムは見つかっていない．

一方，一般の行商人問題に対して各種制限を加えた問題に対しても広く研究されている．本研究の対象である，与えられるグラフを次数3の正則グラフに限定した行商人問題もその一つである．本問題も一般の行商人問題と同じくNP完全問題であり，Eppsteinによる$2^{n/3} \approx 1.2599^n$時間アルゴリズムが知られている．本研究ではこれを1.2569^nに改良した．

3.4 単位円盤グラフ上の高速アルゴリズム

単位円盤グラフは平面上で大きさの等しい円盤によってできる交差グラフであり，円盤がグラフの頂点に対応し，円盤の対が交わるか接するとき，またそのときに限りそれらの円盤に対応する頂点の対を辺で接続することによって得られる．単位円盤グラフは通信可能領域がすべて等しい無線端末で構成されるネットワークと自然な対応があり，実用的にも重要である．本研究では，単位円盤グラフ上の最大独立集合問題を解く多項式時間近似スキーム (PTAS) を示した．

3.5 最大被覆供給点配置問題に対する多項式時間アルゴリズム

kを正整数とする．グラフにおいて供給点と呼ばれる節点の集合を定めたときに，$k-1$本の辺を任意にグラフから除去しても供給点集合と節点vとの間にパスが必ず確保されるとき，供給点は節点vをカバーすると呼ぶ．この概念はネットワークの耐故障性を計る尺度として重要であり，この尺度を用いた問題として供給点配置問題が知られている．供給点配置問題とは，与えられたグラフの全ての節点をカバーするような最小個数の供給点配置を決定する問題であり，耐故障性に優れたネットワークを実現する上で重要な問題である．

本研究では，この問題と深い関係を持つ最大被覆供給点配置問題という問題を提案した．この問題は，与えられたグラフに対し，限られた数の供給点を配置して最大数の節点をカバーする問題である．本問題は，配置可能なサーバ数に制限がある場合での耐故障性に優れたネットワーク設計に重要となる．これら二つの問題は，集合被覆問題と最大被覆問題という二つのNP困難問題と同様の関係を持っており，前者には供給点配置問題，後者には最大被覆供給点配置問題が対応する．なお，集合被覆問題と最大被覆問題では近似困難性が異なる．

供給点配置問題では多項式時間アルゴリズムが既に知られている．研究の目標は，最大被覆供給点配置問題に対する多項式時間アルゴリズムの発見，もしくはNP困難性の証明である．本研究では，まず連結グラフに対し$k=2$の場合と$k=3$の場合に対する多項式時間アルゴリズムをそれぞれ与えた．次に非連結グラフに対する多項式時間アルゴリズムが連結グラフに対するものに還元できることを一般的に示し，その結果の一つとして，$k=2$，$k=3$それぞれの場合について非連結グラフに対する多項式時間アルゴリズムを得た．また，

入力を木と高連結なグラフに制限した本問題に対してそれぞれ多項式時間アルゴリズムを与えた．

さらに本研究では，本問題を一般化した二つの問題がNP完全であることを示した．一つは入力を有向グラフとした問題である．もう一つは，供給点の配置コストが各節点に与えられているとして，配置できる供給点を数ではなくコストによって制限した問題である．なお，これらと同様の一般化を供給点配置問題に施した場合においては多項式時間アルゴリズムの存在が示されている．

3.6 平面グラフ上の Hajós Calculus

3彩色不能なグラフの族を構成する非決定性手続きとしてHajós Calculusが知られている．このグラフ構成法によって任意の3彩色不能なグラフが多項式ステップで構成可能ならばNP=co-NPとなる．しかし，現在に至るまで多項式ステップで構成されないグラフの族は知られていない．我々はこの問題を考えるにあたり，平面グラフにおける3彩色不能なグラフの構成法，すなわち構成される過程のすべてのグラフが平面的である構成法を提案した．

3.7 分散データ構造スキップグラフの探索頻度偏りを考慮した拡張

スキップグラフは資源の検索・挿入・削除を$O(\log n)$(nは資源数)で実行可能な分散データ構造であり，故障耐性，負荷分散特性に優れている．スキップグラフでは全資源を対等に扱っているため，各資源に対するアクセス頻度に偏りのあるシステムにおける検索時間は最適ではない．そこで，本研究ではアクセス頻度の偏りに対応するため，各資源に対して検索頻度に応じた重みを付加し，重みの大きい資源に対しては高速にアクセス可能となるようにスキップグラフを拡張した．

本研究では，ある資源iの重みを$w(i)$，全資源の重み総和をWとした際に，資源iの検索時間が$O(\log(W/w(i)))$となるような重み付け手法を提案した．また，資源の検索頻度が既知の場合に重みを割り当てる際，各資源の重みの比を検索頻度の比と同じに設定する事で検索時間が最小となることを示した．この方法は理論的に最適であるが，メンテナンスコストの観点からは実用的ではない．そこで，メンテナンスコストを考慮した重み付け手法もあわせて提案し，その有効性をシミュレーションにより評価した．

3.8 根付き木ネットワーク上において局所情報のみで負荷分散を実現する自己安定アルゴリズム

自己安定アルゴリズムとは，任意のネットワーク状況からアルゴリズムの実行を開始したとしても，やがてあらかじめ与えられたネットワーク状況に到達する（解を求める）アルゴリズムである．本研究では，木ネットワーク中の各プロセスに任意の負荷（整数）が与えられると，やがて任意のプロセス間の負荷の差が高々1（1-balancing）になる自己安定アルゴリズムを提案した．また，提案アルゴリズムは負荷を表す情報のみで1-balancingを実現している．

3.9 無線ネットワークにおける距離2の彩色を利用したTDMAスケジュール手法

無線ネットワークにおける通信方式として，衝突なし通信を実現するTDMA（時分割多重）通信がよく用いられている．効率的なTDMA通信を実現するには，各ノードが送受信するタイミングを決めるTDMAスケジューリングが重要である．これまでにいくつかのTDMAスケジューリングが提案されているが，それらの手法は，帯域の利用率が低い，各ノードの送信帯域の最小保証値が示されていないなどの問題を有している．そこで本研究では，距離2の彩色結果を利用した帯域の利用率の高いTDMAスケジューリングを提案した．また，提案手法における各ノードの送信帯域の最小保証値を示した．さらに，シミュレーションによって，既存のTDMAスケジューリングに比べ，提案手法が帯域の高い利用率を達成していることを示した．

3.10 共有メモリ型スイッチにおけるオンラインバッファ管理アルゴリズムの競合比の改良

近年，ネットワークの運用においてQoS(Quality of Service) の保証が主要な論点となっている．これを実現するために定式化した問題がオンラインバッファ管理問題であり，スイッチなどのキュー管理をオンライン問題として定式化したものである．本問題には様々なモデルが考案されている．本研究ではその中の1つである共有メモリ型スイッチを扱ったモデルを取り上げた．このモデルの目的はスループットの最大化であり，本研究の成果として，グリーディアルゴリズムの競合比の上限を 2 から $2 - 1/N$ に改良した．ここで，N はスイッチの出力ポート数である．

3.11 オンラインアルゴリズムにおける競合比の自動解析

将来の入力が未知の状況をモデル化したオンライン問題において，アルゴリズムの性能を評価する手法として，競合比解析が用いられる．この解析は，一般に人手による証明という形でなされるが，ある種の問題に対しては，よりタイトな競合比を得るために膨大な数の場合分けを必要とし，全ての場合を列挙するのは事実上困難となる．本研究では，そのような問題に対し，競合比解析の計算機による自動化手法を提案し，実際にオンラインナップザック問題と k- サーバ問題に対して解析を行う．

オンラインナップザック問題は，サイズ1以下のアイテムが次々と与えられ，各段階でアイテムをナップザックに保持するか捨てるかを決めることを繰り返し，入力の終了時点でのアイテムサイズを最大化する問題である．本稿では，オンラインナップザック問題の，特にナップザックの数が2で，ナップザック間のアイテムの入れ替えを許したモデルについて考察する．このモデルの競合比は，従来の結果では上限が 1.3334，下限が 1.2808 であり，上下限に開きがあった．この上下限の差を縮めるためには，解析に膨大な数の場合分けが必要となるアルゴリズムを設計しなければならない．本研究では，この問題に対して計算機による競合比の自動解析を提案した．自動解析の主なアイデアは次の通りである．第一に，そのアルゴリズムの実行中の，ビンの中身やアイテムサイズに関する条件式等の途中経過の情報を「状態」として表す．そして，基礎となるアルゴリズムを元に，状態遷移図を作成する．次に，生成した状態遷移図の各状態について，次の性質を持った不等式の組を生成する．その不等式の組は，もし解を持たなければ競合比はある値以下である．この不等式の組の解が存在しないことを Mathematica を用いて確認する．この手法により，このモデルの競合比の上限と下限が 1.3012 で一致することを証明した．

3.12 2種類の商品を扱う正直なオークション

本研究においては，入札を一回だけ行い，ある入札者の入札額は他の入札者にはわからない秘密入札であるオークションを扱う．オークションのアルゴリズムを考案するに当たって，正直なオークションという概念を導入する．正直なオークションとは，入札者が商品に対して思っている真実の利用価値を自分の入札として「正直に」入札したときに，その入札者の利益が最も大きくなるようなオークションのことである．また，あるオークションが正直であることとオークションが入札独立であることは同値であることが示されている．オークションが入札独立であるということは，ある入札者が落札に成功したとき，落札額がその入札者の入札額に依存せずに決定されるということである．

ここでは，オークションを競売人の立場に立って設計することを考える．すなわち，オークションの売上を最大化することが目的となる．また販売する商品としては，複製に手間やコストのかからないデジタル商品，例えば有料テレビ番組やインターネットからダウンロードできる音楽ファイルのようなものを仮定する．競売人側は商品を無限に供給できるが，各入札者が購入する商品は1種類につき高々1個までとする．

最近の研究では，競合比の下界が 2.42 であることが示されている．また，現在のところ最良の競

合比 3.39 を実現する CORE オークションというアルゴリズムが発表されている．しかしながら，これらの研究成果はいずれも 1 種類の商品を扱うオークションについてのものであり，同じ前提条件における複数種類の商品を扱ったオークションに関する研究は少ない．

そこで，本研究においては既存の 1 種類の商品を扱う正直なオークションを 2 種類の商品を扱えるよう拡張した．加えて，それぞれのモデルにおいて競合比を新たに定義し，新しく考案したオークションの評価を行った．その結果，どちらのモデルにおいても定数の競合比を持つオークションを得ることができた．

3.13 消費電力抑制のためのジョブスケジューリング

モバイル情報機器の電池駆動時間向上のため，プロセッサ速度の効率的な動的制御が求められている．従来のモデルでは各ジョブには完了期限が設定されてきたが，モバイル機器上で完了期限は通常与えられない．我々は完了期限を無くした上で，ジョブの滞在時間と消費電力量の和をコストとするモデルを提案する．そしてフェーズ制の均衡アルゴリズムを設計した．解析の結果，このアルゴリズムが有界な競合比を持つことを示した．またオフラインの場合に対して，最適スケジュールを出力する多項式時間アルゴリズムを与えた．

3.14 組合せ二段回路の最大動作率

回路の消費電力には回路への入力変化あたりの平均消費電力と最大消費電力とが存在するが，前者の測定と比べ後者を正確に測定することは困難である．これは考慮すべきパラメータが多いこと，またパラメータ自身が取る値域の広さが故に全域的，網羅的な探索が事実上不可能であるためである．

この困難さに対して回路モデルおよび電力消費モデルを高度に抽象化し，近年発展が著しい分野であるグラフ理論や SAT の問題に還元するアプローチが存在する．これはその問題に対して解の品質が保証された近似アルゴリズムを適用することによりある程度の誤差を許し，実用的な時間で最大消費電力を見積もろうというものである．しかしながら，高度に抽象化されたモデルにおいても回路の最大消費電力を高い精度で求めることは依然として困難である．

その一方で，回路規模に対する回路の最大消費電力に非自明な下限の存在が言えるならば，それにより最大消費電力の見積もりに際して確実なバイアスを考えることが可能となる．本研究ではこのような考えに基づき，回路の最大消費電力を回路規模に対する比で表現し，回路の入力 n をパラメータとしてその下限を示す．

本研究で扱ったのは各頂点の入り次数が 0，1，2 のいずれかに制限された有向グラフ $G = (V, E)$ で表現される n 入力二段の組合せ論理回路で，2 入力の AND ゲートと NOT ゲートから構成される．回路の電力消費モデルはゲートの出力変化によるもののみに単純化し，各ゲートの消費電力の和と等しいとする．また各ゲートの消費電力は等しいとする．そのような回路モデル，電力消費モデルの下で回路の最大電力消費率を定義し，まず 4 入力の回路について上下段，および回路全体での最大電力消費率の最小値の下限を示した．またその下限を実現する回路も併せて示し，各下限がタイトであることを示した．次いでこの結果を一般化し，n 入力回路における最大電力消費率の最小値の上限を与える回路の構成法と，それにより構成される回路が与える最大電力消費率を示した．その後 n 入力回路における最大電力消費率の最小値の下限を示した．

3.15 否定数を限定した回路計算量の下界

回路計算量とは，ある論理関数を計算する論理回路を考えたときに，最も小さい回路に含まれる素子の個数のことである．回路計算量は，P 対 NP 問題に対する有力なアプローチであると考えられており，NP に含まれる論理関数に対して多項式を越えるサイズの回路計算量の下界を示すことができれば，$\mathrm{P} \neq \mathrm{NP}$ を示したことになるが，特に制限を加えない一般の回路においては現在のところ線形サイズの下界しか示されていない．そのような現状の中で，否定素子数を $\lceil \log(n+1) \rceil$ に限定した回路において $\omega(n \log(n))$ の下界を示すことができれば，一般の回路における同等の下界を

示したことになることが知られており，本研究では，否定数を $\log(n+1)$（ただし，$n+1$ は 2 の累乗）に限定した回路計算量の下界に関する研究を行なった．

否定数を $\lceil\log(n+1)\rceil-1$ に限定した回路については既に指数サイズの下界が示されているが，ここでの否定素子一つの差は大きく $\lceil\log(n+1)\rceil$ に限定した回路では線形サイズの下界しか示されていない．本研究では，否定数を $\log(n+1)$（ただし，$n+1$ は 2 の累乗）に限定した回路における n 入力 2 出力論理関数 (PARITY, ¬PARITY) の回路計算量の下界が $5n-c$ であることを示した．否定数を $\log(n+1)-1$ に限定した回路では，パリティ関数の回路計算量の下界が $4n+3\log(n+1)-c$ となることが既に知られているが，これを元にさらに改良を加えることで証明を行なった．

3.16 3SAT の計算時間の改良に向けて

CNF 論理式の充足可能性問題（SAT）は和積形のブール式が与えられた時，全ての節を真にする，つまり式全体を真にする様な変数への真理値割り当てが存在するかどうかを問う問題である．典型的な NP 問題で，答えが yes であることを示すのは式全体を真にする真偽値の割り当て（証拠）を示せば良いが，no であることを示すのは一般には困難である．NP 完全性が最初に証明された問題としても有名である．LSI の設計検証等多くの実用的応用があり，人工知能分野だけでなく，計算量理論，離散アルゴリズム，設計自動化の分野で最も活発に研究されている問題の一つである．各節に含まれるリテラルの数が高々 k 個である CNF 論理式 (k-CNF 論理式) の充足可能性問題は k-SAT と呼ばれる． 特に NP 完全性が成立する最小の $k=3$ の場合が重要であり，3SAT の計算時間の改善を目指して活発な研究が行なわれている． 我々は 3SAT に対するアルゴリズムを提案し最悪の場合の解析を行なった． 現在，最高速のアルゴリズムは我々が提案したもので，その計算時間は 1.323^n である．本研究では，この計算時間のさらなる改良を目指し，新たなアルゴリズムを提案・解析した．改良のアイデアを以下に述べる．本研究では高速なアルゴリズムのひとつである PPSZ アルゴリズムの性質に着目した．一般に SAT アルゴリズムは n 個の変数に対する真偽値の割り当てを求める必要があるが，PPSZ においてはおよそ $0.4n$ 個の変数に対する正しい割り当てを求めることができれば，多項式時間で n 個の変数全ての割り当てに拡張できるという性質がある．この $0.4n$ 個の変数に対する割り当てを高速に求めることができれば，現在最速のアルゴリズムを改良できる．元の PPSZ ではこの部分を総当り探索で求めており，その計算時間がボトルネックとなっていた．本研究では総当りの代わりに Schoening のアルゴリズムを用いた探索を提案した．提案したアルゴリズムをある仮定の下で解析した結果，3SAT の最悪計算時間の改良を達成することができた．

3.17 論理式の解密度の濃縮

与えられた論理式 f に対して，次の条件を満たす論理式 g を考える．(i) もし f が充足不能ならば g は充足不能である．(ii) もし f が充足可能ならば g は充足可能で，f よりも “易しい” 式である．易しさの尺度として，我々は論理式の解密度を用いる．解密度は，n を論理式の変数の個数として，(論理式の充足解の個数)$/2^n$ で定義される．我々は，与えられる論理式 f が 3-CNF，出力すべき論理式 g が AND, OR, NOT で構成される論理式である問題を扱う．この問題にはふたつの方法が考えられる．g を得るために変数を減らす方法と，変数を増やす方法である．それらの方法は SAT アルゴリズムに基づいているが，よりよい SAT アルゴリズムが必ずしもよりよい解密度を濃縮するアルゴリズムではないことを示した．

3.18 量子ネットワークコーディング

量子情報は連続であるため，古典情報と比べて取り扱いが非常に難しいことがしばしばある．その典型例は情報の複製である．古典のディジタル情報を複製することは容易だが，量子においては情報の完全な複製は不可能であることが知られている．本研究では量子ネットワークコーディングが可能かどうか議論した．ネットワークコーディングとは近年 Ahlswede らにより導入された概念である．これは，いわゆる液体をネットワークに

流す場合と異なり，(古典) 情報をネットワークに流す場合は適切なコーディングを行うことによりボトルネックとなる枝容量を越えた情報を送ることが可能となるというものである．本研究では量子情報の複製の場合と同様，情報の近似を許せば量子ネットワークコーディングが可能であることを示した．対象としたネットワークモデルはバタフライと呼ばれるものである．このネットワークには2つのパス s_1 から t_1 と s_2 から t_2 が存在し，これらのパスはボトルネックとなる容量1の枝を共有している．古典情報の場合，ネットワークコーディングにより我々はそれぞれのパスに1ビットずつ流すことができる．本研究では量子情報の場合に，それぞれのパスに任意の量子状態を流しそれぞれの受信者が得る量子状態と送られた状態のフィデリティが1/2より大きくできることを示した．ここでフィデリティとは2つの量子状態の距離を測る単位で1のとき2つは同じ状態，1/2のとき2つはランダムな関係にあるようなものである．また片方のパスには古典情報を流す場合，得られる量子状態のフィデリティは2/3に改良されること，あるいはそれぞれの量子状態が有限の状態数のときも同様の改良ができることを示した．この結果を利用して s_1 から t_1(s_2 から t_2 も同様)に2ビットの古典情報を送ったとき，片方のビットのみなら復元できるというプロトコルを設計することも可能となった．

3.19 安定結婚問題に対する近似アルゴリズム

安定結婚問題とは，GaleとShapleyによって提唱されたマッチング問題である．この問題では，N 要素同士の2つの集合 (例えば，男性と女性) と，各個人の異性に対する希望リストが与えられる．男性 m が女性 w_2 よりも w_1 の方を好む時，$w_1 \succ_m w_2$ と表記する．また，マッチング M に対して男性 m とマッチしている相手の女性を $M(m)$ と表記する．ここで，あるマッチング M において，$w \neq M(m)$ であり，$w \succ_m M(m)$ かつ $m \succ_w M(w)$ であるような (m, w) を M のblocking pairと呼ぶ．blocking pairの存在しないマッチングを安定マッチングといい，安定マッチングを求める問題を安定結婚問題という．安定結婚問題の任意の例題に対して安定マッチングが存在することは，GaleとShapleyによって1962年に示されており，安定マッチングを $O(N^2)$ 時間で求めるアルゴリズム (Gale-Shapleyアルゴリズム) も示されている．

安定結婚問題の現実世界での応用として，アメリカでは研修医を病院に割り当てるNRMPというマッチングシステムにこの問題が使われている．同様のシステムはカナダやスコットランドでも取り入れられており，日本でも2004年度の研修医配属から安定結婚問題が利用され始めた．

安定結婚問題の拡張として，希望リスト内に全員の名前を含まなくても良い不完全リストと，希望リスト内での同順位を許す同順位リストの二つの拡張が考えられるが，片方の拡張の下では，安定マッチングは全て同サイズであり，安定マッチングは多項式時間で求めることができる．ところが，これらの両方の拡張を同時に施すと，一つの例題に対して異なったサイズの安定マッチングが存在する可能性があり，その最大サイズの安定マッチングを見つける問題 (MAX SMTI) はAPX完全であることが知られている．MAX SMTIに対して，近似度2を達成するアルゴリズムの存在は自明である．現在知られている最良の近似アルゴリズムは，近似度 $2 - c\frac{\log N}{N}$ (N は入力における男性の数，c は任意の正定数) のアルゴリズムである．本研究ではこの近似度を $2 - c\frac{1}{\sqrt{N}}$ (c は $c \leq \frac{1}{4\sqrt{6}}$ を満たす正定数) に改良した．

3.20 半順序付き集合ゲームの必勝法

組み合わせゲームの1つに，Poset(半順序付き集合) Gameと呼ばれるものが知られている．このゲームは以下のようなものである．まず，半順序付き集合が入力として与えられる．(1) 2人のプレイヤーは交互に集合の要素を1つずつ選んでいく．(2) 選んだ要素と，その要素より大きい要素を全て消さなくてはならない．(3) 選ぶ要素の無くなったプレイヤーの負け．Poset Gameは単一の祖先 (毒節点) を持つdag（非閉路的有向グラフ）で表現できる．このゲームは有名なNimから未解決のChompまで多様なゲームを含み，これらの研究からは様々な興味深い結果が得られている．本研究ではPoset Gameを拡張し，毒節点が複数あり，しかも毒に重みを持たせ，与えられ

た体力を越えて毒を取った競技者が負けるとしたゲームを扱った．この拡張したゲームの必勝手順を多項式時間で得る方法について考察した．

3.21 FDB を用いた接続ポート固有の IP アドレスリースが可能な DHCP サーバの設計と実装

ネットワーク障害の解析のため，あるホストの IP アドレスや MAC アドレスからそれが存在する場所を探す必要が生じることがある．しかし，DHCP を用いた情報コンセントでは IP アドレスは物理的な端末の位置と無関係に割り当てられるためこの作業は困難である．そこで，本研究では個々の情報コンセントに対して固定的に IP アドレスを割り当てる DHCP サーバを開発した．この DHCP サーバは SNMP を用いてスイッチングハブの MAC アドレスフォワーディングテーブル (FDB) を取得し，割り当て対象端末の接続したポートを知る．本システムでは，ネットワーク管理者は容易に特定の DHCP クライアントの設置場所に到達することが可能となる．

4 平成 18 年度

平成 18 年度は，引き続き過去のテーマを継続的に行っているが，特に論理式の充足可能性問題や，量子アルゴリズム，論理関数の複雑さ等について，多くの結果を得た．また，グラフの性質検査やクラスタリングにおける合意問題等の，新たなテーマも行った．

4.1 安定結婚問題に対する近似アルゴリズムの改良とその厳密な解析

安定結婚問題とは，N 人の男性と N 人の女性と各個人が持つ希望リストが与えられたときに安定なマッチングを求める問題である．希望リストとは，異性全員の全順序である．この問題に対して，不完全リストと同順位リストという拡張を許した場合の問題を考える．この場合，異なるサイズの安定マッチングが存在する可能性があり，その中で最大サイズの安定マッチングを求める問題 (MAX SMTI) は NP 困難であることが知られている．

この問題では，最大サイズと最小サイズの安定マッチングでは比が高々2 倍しか違わない．また，サイズを考慮しなければ，安定マッチングは多項式時間アルゴリズムで求めることができる．従って，2-近似アルゴリズムは自明である．これまで知られている最良の近似度は $2 - c\frac{1}{\sqrt{N}}$ であったが，我々は初めて 2 よりも厳密によい近似度である 1.8-近似アルゴリズムを達成した．このアルゴリズムは局所探索に基づくもので，局所探索により改善が可能な領域をより厳密に解析することにより得られたものである．

4.2 クラスタリングにおける合意最大化問題の近似アルゴリズム

合意最大化問題は，相関クラスタリング上で定義された最適化問題であり，クラスタリング後の合意数を最大にするようなクラスタリングを求める問題である．この問題は NP 困難であることが知られているため，近似アルゴリズムによる解法の研究がされてきた．半正定値計画法への緩和を利用した近似アルゴリズムにより近似比 0.7666 が Swamy らにより得られている．

本研究では既知の近似アルゴリズムよりもよい近似比を得られるアルゴリズムを提案した．我々の手法は，半正定値計画問題への緩和の方法を改善することによって，近似比を 0.777 に改善できることを十分な精度の数値実験に基づいて示した．緩和の方法は，Frieze らにより考案されたランダムな k 個のベクトルを利用する手法を用い，4 つのランダムなベクトルによる緩和と 5 つのランダムなベクトルによる緩和を合わせるというものである．我々の手法によって得られるクラスタの数は高々5 個である．また，クラスタを k 個以下に制限した合意最大化問題に対しても近似比の改善を行った．

4.3 頂点被覆問題に対するリストヒューリスティックの解析

本研究では，頂点被覆問題に対する一種の貪欲アルゴリズムであるリストヒューリスティックに

ついて近似度の解析を行った．リストヒューリスティックは，特にジョブスケジューリング問題に対して良い性能を発揮するアルゴリズムである．このアルゴリズムでは，まず頂点の操作順序を頂点次数に基づいて決定し，その後その順序に従って頂点を処理していく．本研究の結果，次数が非減少となるように並べた頂点順序に対し，リストヒューリスティックの近似度が高々$\sqrt{\Delta}/2+3/2$となることを示した．ただし，Δは入力グラフの最大次数である．また，どんな頂点順序でも近似度は$\sqrt{\Delta}/2$より小さくならないことを示した．

4.4 目標枝連結度3の最大被覆供給点配置問題

グラフが与えられたとき，ある節点の組v,wの枝連結度がkであるとは，どの$k-1$本の枝を削除してもvとwの間にパスが存在し，かつこのようなkの中で最大なものを言う．また，ある節点集合Sとある節点vの枝連結度がk以上である場合に，Sがvを被覆すると呼び，このSのことを供給点集合と呼ぶ．最大被覆供給点配置問題は，被覆できる節点集合(の重みの和)が最大となるようなp個以下の供給点集合を求める問題である．本問題は，配置可能なサーバ数に制限がある場合での耐故障性に優れたネットワーク設計に重要な問題である．

本研究では，本問題に対して$k=3$の場合における多項式時間アルゴリズムを与えた．また本問題が，入力グラフの節点重みと枝容量が全ての節点や枝で一定の場合でも，NP完全問題となることを示した．

4.5 有向グラフにおけるk枝連結性の検査

有向グラフ$G=(V,E)$がk枝連結であるとは，任意の$u,v\in V$に対してuからvへのk本の辺素な道が存在することをいう．本研究では，次数の上限がdの有向グラフがk枝連結であるか，またはk枝連結からϵ-farであるかを検査する$O(\frac{k2^k\log^2(k/(\epsilon d))}{\epsilon})$時間アルゴリズムを示した．本アルゴリズムの計算量はグラフの頂点数および辺の数によらない．

頂点数がn，頂点次数の上限がdの有向グラフGがk枝連結からϵ-farであるとは，次数の上限を保ったままGをk枝連結にするのに少なくともϵdn本の辺の追加および削除が必要であることをいう．

本研究で示した検査アルゴリズムは，Property Testingと呼ばれる検査手法に従っている．これは入力グラフがk枝連結であれば2/3以上の確率で受理し，k-枝連結からϵ-farであれば2/3以上の確率で拒否するアルゴリズムとして定義される．

頂点次数を制限した無向グラフにおけるk枝連結の検査については既に結果が知られているが，この手法を有向グラフにそのまま適用することはできない．無向グラフにおいて成り立つカットに関する性質の多くが，有向グラフでは成り立たないからである．よって本研究では，新しいアイデアを用いてアルゴリズムを構築した．実際の計算機実験においても，nが十分に大きければ，決定性の$O(kn^2d)$アルゴリズムに比べて本アルゴリズムが十分に実用的であるという結果が得られた．

4.6 3次元strip パッキング問題に対するHarmonic アルゴリズム

3次元stripパッキング問題では，3次元直方体のアイテム$I=\{(x_i,y_i,z_i):i=1,\ldots,n\}$と3次元の箱$B$が与えられる．制約は重なることなしに全てのアイテムを箱Bにパッキングすることであり，目的はパッキングされた部分の高さを最小にすることである．本研究では，最も基本的な問題である，アイテムを回転させることなくアイテムの辺と箱Bの辺とが並行になるようにパッキングする場合について扱う．本研究では，2次元ビンパッキングに対するCapraraのアルゴリズムを改良して，同様の性能保証である$T_\infty\approx 1.69$の近似アルゴリズムを得た．ただし，T_∞はよく知られているHarmonic数という値であり，ビンパッキング問題において自然に現れる数である．これまで知られていた近似アルゴリズムは$2, 2.64, 2.67, 2.89, 3.25$の最悪近似保証であった．また本研究では，全てのアイテムの底面が正方形の場合に漸近的PTASを得た．

4.7 2 点同時要求 k-サーバ問題

k-サーバ問題は Mark Manasse, Lyle A. McGeoch, Daniel Sleator によって提起された有名なオンライン問題のひとつである．距離空間上に k 個のサーバが存在し，要求点が順に与えられたときにいずれかのサーバが要求点に移動する．移動距離の総和をなるべく小さくすることが問題の目的となる．

従来の k-サーバ問題では要求点は常に 1 点であり，要求点にサーバが移動するまで次の要求点は与えられない．しかし，実用上の問題では要求点が 1 つずつ来るとは限らない．本研究では要求点が同時に 2 つ与えられる問題を対象に解析を行い，この問題の下界が $k-1$ であることを示した．また，2 点同時要求 m 点 k サーバ問題の競合比が $\binom{m}{k}-1$ であることを証明した．

4.8 正直なオークションにおける入札者の談合

一般的に知られているオークションは，ある商品を購入する権利を複数の買い手が競い合うものである．本研究では，音楽ファイルやコンピュータ・ソフトウェアのように複製により無限に供給可能な商品を扱う 1 回秘密入札オークションを議論の対象とする．1 回秘密入札オークションとは，次のようなものである．入札は 1 度だけ行われ，その入札額は公開されない．競売人は全員の入札額から落札者と落札価格を決定する．このオークションで最も重要なのは，落札者が複数存在し得て，落札額がそれぞれ異なるということである．すべての入札者は落札者と落札価格の決定方法を知っており，それに合わせて自信の利得が最大になるような入札をする．

本研究ではオークションに談合の概念を定義し，既存のオークションであるコストシェアリング (CS)，サンプルコストシェアリング (SCS) における談合者の行動について解析し，どちらのオークションにおいても決定性の支配戦略が得られないことを示した．

4.9 入札額の範囲が制限された正直なオークション

本研究では，1 回のみの秘密入札で行われる正直なオークションについて扱う．ここでのオークションは競売人の立場に立って構成し，その利得の最大化を目的とする．また，販売する商品は複製にコストがかからず無限に供給できるものとし，入札者はそれぞれの商品を 1 個購入したいと考えているとする．正直なオークションとは，正直に入札することが入札者にとってそれぞれの最良の利得が得られるようなオークションのことである．設計する正直なオークションの評価には，正直ではないが単一価格全知のオークションとの利得の比で定義される競合比を用いる．任意の正直なオークションの競合比の下界は 2.42 であることが示されており，CORE オークションが競合比 3.39 を達成することが知られている．

本研究では，入札額の最大値が最小値の高々 r 倍という条件の下で，オークションのアルゴリズムを提案し，競合比の改善を図った．入札者に対する提示額の種類を確率分布に従って決定する手法と，入札者をランダムに 2 つの集合に分割する手法を組み合わせ，競合比 $\ln r+1$ を達成した．これは $r<10$ の範囲において，従来の CORE オークションの競合比の上界を改善している．

4.10 誤りを含むパリティ関数の量子アルゴリズムにおけるクエリ計算量

ブラックボックスモデルにおいて論理関数 OR や AND のクエリ計算量は $\Theta(N)$ である．一方，量子計算においては，Grover の探索アルゴリズムを用いることで $O(\sqrt{N})$ で実現できる．また，OR や AND の量子アルゴリズムの下界は $\Omega(\sqrt{N})$ であることも証明されている．しかし，すべての論理関数でクエリ計算量の減少が見込める訳ではない．多数決関数とパリティ関数は古典・量子ともにクエリ計算量が $\Theta(N)$ であることが証明されており，OR や AND のような高速化は期待できない．

本研究では，パラメータを持つ誤りを含むパリティ関数を定義し，クエリ計算量の上界が下がることを示した．また，この上界が下界と一致することを示し，アルゴリズムが最適であることを証明した．

4.11 いくつかのグラフにおける離散時間量子ウォークについて

量子計算とは，量子力学に基づいた量子ビットの特性を利用して考えられた計算機である．量子計算モデルにより，Shor の因数分解や Grover のデータベース探索などで，従来の計算機よりも高速に問題を解くことができるアルゴリズムが考案されている．

ランダムウォークを利用したアルゴリズムは古典計算モデルにおいて有用であり，様々な探索問題において使用されている．このことから，量子計算モデルにおいてもランダムウォークを利用した有効なアルゴリズムを設計できる可能性が高い．実際に，量子ウォークを用いて一部の探索問題については古典計算より指数的に高速なものも見つかっている．

本研究では，代表的な NP 完全問題である 3-SAT を離散時間量子ウォークアルゴリズムによって解くことを目標に，いくつかのグラフ上での量子ウォークの性質とその有効性を調べた．対象としたグラフは，Clever らの Glued-graph, n 次元 Hypercube グラフ，3-SAT の古典ランダムウォークを利用して作った 3-SAT グラフの 3 種類である．計算機シミュレーションによって，これらのウォークの分布や解に到達するまでの様子を確認した．

4.12 (4,1)-量子ランダムアクセス符号化の非存在性について

$(n, 1, p)$-量子ランダムアクセス符号化 (QRA) とは，Ambainis らによって導入された次のような通信システムである．送信者は n ビットの情報を 1 量子ビットに符号化し，受信者に送る．このとき受信者は，ある種の正作用素値測度を用いて，元の n ビットのうち任意の 1 ビットを確率 p で復元できる．Ambainis らは (2,1,0.85)-QRA が存在することを示し，古典ビットでは同じ符号化は行えないことを示した．Chuang はこの結果を拡張して (3,1,0.79)-QRA の存在を示した．それ以来，さらなる拡張である (4,1,p)-QRA ($p > 1/2$) が存在するかは未解決であった．本研究では，この未解決問題を否定的に解決した．すなわち $p > 1/2$ について (4,1,p)-QRA は存在しないことを示した．さらに，より一般的な複数量子ビットへの符号化に関しても，否定的な結果を導いた．

4.13 MAX-2SAT 問題の平均時間計算量の解析

2CNF 論理式の最大充足可能性問題 (MAX-2SAT) とは，和積形のブール論理式で各節に含まれるリテラルの数が高々2 個であるものが与えられた時，できるだけ多くの節を真にする真理値割り当てを求める最適化問題である．本研究では MAX-2SAT の平均時間計算量を解析するために，入力例題を生成する確率分布として，埋め込み解モデルを提案した．節数の密度をパラメータに取ると，パラメータの広い範囲で生成された例題は埋め込まれた解を最適解として持つ確率が高いことを示した．また，メッセージ伝播法に基づく線形時間アルゴリズムの解析を行い，このモデルに対して高い確率で最適解が得られることも示した．

4.14 SAT 充足解の偏りを利用した局所探索の高速化

CNF 論理式の充足可能性問題（SAT）は和積形のブール式が与えられた時，全ての節を真にする，つまり式全体を真にする様な変数への真理値割り当てが存在するかどうかを問う問題である．各節に含まれるリテラルの数が高々k 個である CNF 論理式 (k-CNF 論理式) の充足可能性問題は k-SAT と呼ばれる．特に NP 完全性が成立する最小の $k = 3$ の場合が重要であり，3SAT の計算時間の改善を目指して活発な研究が行なわれている．Schöning は 3SAT に対して時間計算量が 1.334^n である単純な局所探索アルゴリズムを与えた．本研究では，充足解にある種の偏りがあるときにアルゴリズムを修正して高速化できることを示した．修正されたアルゴリズムは，充足解の 0 の個数と 1 の個数が偏っている場合，すなわち解が $p_0 n$ の 0 と $p_1 n$ の 1 を含む場合，例えば $p_0 = 1/3$ ならば 1.260^n 時間で，$p_0 = 0.1$ ならば 1.072^n 時間で解を見つけることができる．そのような偏りは他の組合せ問題から SAT に還元した例題によく見られるため，この種の改良は実用的であると言え

る．本研究では具体例として，3次元マッチングから変換した例題を取り上げ，修正されたアルゴリズムが，総当たり法よりも高速に動作することを示した．また，いくつかのベンチマーク例題に対して計算機実験を行い，既存のアルゴリズムと比較した．

4.15 対称関数を実現する定数段数回路について

計算量理論は理論計算機科学分野において重要な研究のひとつである．計算機を用いて問題を解くときに，計算量理論は必要な時間やメモリの領域量の重要な指標となる．この分野においては様々な研究がなされているが，本研究ではその中でも回路計算量に焦点をあてる．

回路計算量とは，具体的な論理関数を計算する回路の段数や素子数に関する研究である．回路計算量の研究を行うことはその具体的な論理関数を計算する回路の効率のよい構築法を考えることを暗に意味している．しかし，それが全てではなく，さらに重要な意義が存在している．

回路計算量は Turing 機械における計算複雑さと密接に関係している．Turing 機械における計算量の分野には長年にわたる大きな未解決問題として，P 対 NP 問題がある．ある明示的な論理関数における回路計算量の下限の研究は，P 対 NP 問題の解決のための有望な手段のひとつである．

本研究では，対称関数，特に閾値関数や多数決関数を計算する定数段数回路の構成法を考える．最近まで，n 変数多数決関数を計算する 3 段回路について，素子数が高々$2^{O(\sqrt{n \log n})}$ となる構成法が知られていた．これに対して，G.Wolfovits は 2006 年に，素子数が $2^{O(\sqrt{n})}$ の 3 段回路の存在を示した．しかし，彼の証明には致命的な誤りが含まれていた．本研究ではまず，これらの誤りを指摘し，その構成法の修正と解析をおこない，その構成法で構成される対称関数を実現する回路の素子数を示した．また，この構成法を元に新たな構成法を与えることで，任意の対称関数について素子数 $2^{O(\sqrt{n \log n})}$ の回路が存在することを示した．さらに段数 d の定数段数回路において，任意の対称関数について素子数 $2^{O(n^{\frac{1}{d-1}} (\log n)^{\frac{d-2}{d-1}})}$ の回路が存在することを示した．

4.16 単調論理回路における還元

0-1 ソートや 0-1 マージ等のブール関数を含む大きな計算量クラスである NLOG は，単調回路のサイズに対して $O(n \log n)$ の上界が示されている．つまり，NLOG が含む関数は，$O(n \log n)$ 個のファンイン数 2 の AND/OR ゲートで構成される回路を持つ．今，AND/OR 以外に r (≥ 2) 個の入力と r' (≥ 1) 個の出力をもち，単調ブール関数 F を実現する “F-ゲート” を使えると仮定する．ただし，AND/OR ゲートのコストを 1 とするのに対し，F-ゲートのコストは r であるとする．NLOG に属す関数 f を，合計コスト $o(n \log n)$ の AND/OR/F ゲートからなる回路で計算可能なとき，F-容易と呼ぶことにする．本研究では，0-1 マージが $r' \leq r/\log r$ となる任意の F に対して F-容易とはならないことを証明した．

4.17 論理式における非線形下界証明手法の回路への拡張

論理関数の回路計算量とは，その関数を計算する論理回路を構成するのに必要な素子数のことである．明示的な関数に対して良い回路計算量の下界を示すことは，計算機科学における重要な研究の一つである．一般的な回路に対して，ほぼ全ての関数は非常に大きい下界 (超多項式程度の下界) を持つことが示されている．この事実の証明は数え上げ論法によるもので，明示的な関数に対して良い下界を示すのは非常に難しく，現在知られている最も良い下界は線形程度 $(5n - o(n))$ である．従って，回路に様々な制約を付けて下界を考えるのは自然なアプローチである．そのような制約の代表例として論理式がある．論理式においてはある程度良い非線形の下界 $(\Omega(n^{3-o(1)}))$ が得られている．本研究では，論理式における非線形下界証明手法を回路に拡張することを目的として，一般の回路と論理式の間のモデルとなるカクタス回路を定義し，このカクタス回路に対して非線形下界証明手法を拡張した．カクタス回路とは，どの二つの閉路も高々一つの接点しか共有しないような回路のことである．カクタス回路においては，出力 3 以上の素子は存在せず，また一度出力 2 の素子が表れると，閉路が閉じるまで再び出力 2 の素子が表れることは無い．また論理回路では各素子

が一つの論理関数を計算するが，ここで使える論理関数の種類 (基底) によってその性質が大きく異なる．本研究では，基底が任意の有限基底である場合と，U_2 である場合の二つの場合について考察を行った．結果として，基底が全ての有限基底である場合では $\Omega(n^2/\log n)$ の下界を証明し，基底が U_2 である場合には $\Omega(n^{13/6-o(1)})$ の下界を証明した．

4.18 無線ネットワークにおける距離 2 の彩色を利用した TDMA スケジュール法

無線ネットワークにおける通信方式として，衝突なし通信を実現する TDMA（時分割多重）通信が多く用いられている．効率的な TDMA 通信を実現するには，各ノードが送受信するタイミングを決める TDMA スケジューリングが重要である．これまでにいくつかの TDMA スケジューリングが提案されているが，それらの手法は，帯域の利用率の低い，各ノードの送信帯域の最小保証値が示されていないなどの問題を有していた．

本研究では，距離 2 の彩色の結果を利用した，帯域の利用率が高い TDMA スケジューリングを提案した．また，提案手法における，各ノードの送信帯域の最小保証値を示した．さらに提案手法の帯域利用率について，シミュレーションにより既存の TDMA スケジューリングである Ramanathan の手法に対しては 38.9 ～ 9.2% の改善，神崎らの手法に対しては 7.4 ～ 3.9% の改善を実現し，これにより既存手法に対して帯域の高い利用率を達成していることを示した．

4.19 P2P システムの適応乱択探索プロトコル

P2P のファイル共有システムにおいて，目標となるファイルを持つピアを探す問題は重要である．P2P システムは巨大で動的なピアを維持するため，探索プロトコルはスケーラブルで適応性のあることが望まれる．

本研究では，適応乱択探索プロトコル（ARSP）と呼ばれる新しい P2P 探索プロトコルを提案した．本プロトコルは，コーラムベースプロトコルの効率的な拡張である．ARSP では，対象の人気度次第で通信コストが最小となる．また興味深いことに，ARSP は自己適応性をもち，ネットワーク環境の動的変化に自動的に適応することができる．

5 平成 19 年度

平成 19 年度も，これまでと同様のテーマを継続的に行った．特に，安定マッチング問題や，ゲームにおける必勝手順の研究で多くの結果を得た．また，分散環境におけるゴシップ問題やネットワークの経路多重化において，新たな結果を得た．

5.1 男女平等安定結婚問題に対する近似アルゴリズム

安定結婚問題とは，N 人の男性，N 人の女性，各個人が持つ希望リストが与えられたときに安定なマッチングを求める問題である．希望リストとは，異性全員の全順序である．どのような例題にも安定マッチングは存在し、Gale と Shapley により提唱された Gale-Shapley アルゴリズムにより、$O(N^2)$ 時間で計算可能である。Gale-Shapley アルゴリズムにより得られる安定マッチングは，男性最適安定マッチングと呼ばれ、男性にとって有利であり、逆に女性にとっては不利であるという特徴を持つ。したがって、平等な安定マッチングを求める研究が以前から行われてきた。安定マッチングの良さの指標としては、各人が自分の希望リストの何番目の人とマッチしているか（以下、ランクと呼ぶ）を用いて、主に以下の 3 つが考えられている。(1) 全員のランクの和を最小化するもの。(2) 最大のランクを最小化するもの。(3) 男性のランクの和と女性のランクの和の差の絶対値を最小化するもの。この中で、(1) と (2) は多項式時間で解けるが、(3) は NP 困難であることが知られている。

本研究では、(3) に対する近似アルゴリズムを開発した。(3) の指標は 0 に近ければ近いほど良いのであるが、本研究で与えたアルゴリズムは、正数 A を与えて、指標が $-A$ から A の範囲にある安定マッチングが存在するか、また、存在すればそのマッチングを求める多項式時間アルゴリズムを与えた。また、(3) の指標が同じでも (1) の

指標が大きく異なる2つの安定マッチングが存在することを示した。そして、(3) の指標が指定した範囲内にあるうち、(1) の指標が最適なものを求める問題がNP困難であることを示し、その問題に対して近似度が2よりも小さい近似アルゴリズムを開発した。

5.2 3次元安定ルームメイト問題の複雑さの解析

安定ルームメイト問題は、安定結婚問題の拡張で、男女の違いを区別しないものである。$2n$ 人の学生の各々が、他の $2n-1$ 人に対する希望リストを持っており、安定なマッチング（n 組のペア）を求めるのが目的である。安定マッチングの存在しない例題もあるが、存在性を判定し、存在するならそれを出力する多項式時間アルゴリズムが知られている。

本研究では、安定ルームメイト問題を3次元に拡張した。すなわち、$3n$ 人の学生を、安定条件を満たす n 組のトリプルに分割する問題を定義した。また、その問題の解の存在性を判定する問題がNP困難であることを示した。

5.3 半順序集合ゲームの必勝法

本研究では，半順序集合ゲーム (Poset Game) というものを扱った．半順序集合ゲームの盤面としてDAG(非閉路的有向グラフ) が与えられる．2人のプレイヤーが交互に節点を1つずつ選んでいく．選ばれた節点とその子孫が消え，最後の節点を選んだプレイヤーが勝ちというゲームである．Nim, Hackenbush, Chompなど有名な多くのゲームがこの部分ゲームとして定義でき，うちいくつかについては多項式時間必勝手順が見つかっているが，計算量の下界についてはPoset Gameに関してすらほとんど知られていない．

今回我々はDAGの節点に整数値の重みをつけるという拡張を行った．この拡張において，両プレイヤーは非負整数値の体力を持つ．そして消した節点の重み和の分体力が減少し，体力が負になったプレイヤーの負けとする．これを重み付き半順序集合ゲームと呼ぶ．半順序集合ゲームはこれの部分ゲームとして定義できる．

重み付き半順序集合ゲームにおいて重みが $\{0,1\}$ のケース，DAGが1本のpathのケース，一般のケースとそれぞれについて結果を出した．

まず重みが $\{0,1\}$ のケースについて，(1) 両プレイヤーの体力が異なっているならば体力の大きいプレイヤーが必勝手順を持つ，(2) 両プレイヤーの体力が等しく，かつ子を持たない節点が全て重み1であれば後手が勝つ，(3) そうでなければ，一般の半順序集合ゲームに問題を帰着できる，という結果を得た．

次に，DAGが1本のpathのケースについて，多項式時間必勝手順を得た．

最後に，一般のケースがPSPACE完全であることを証明した．これは，(1) DAGが最大経路長2の二部グラフ，(2) 両プレイヤーの体力が0，(3) 重みは $\{-1,1\}$ のみ，という制限をおいても成り立つ．

5.4 置き石1のスネーキーに対する必勝法

フランク・ハラリイの提案した一般化三並べとは，碁盤状の盤面に二者が交互に石を一つずつ置き，予め定められた，連結した石で定義されるある形を，回転と反転を許して，先に作った方が勝ちというゲームである．両者が最善を尽くしたとき，先手必勝である形を「勝ち型」，無限に続けても決着がつかない形を「負け型」と呼ぶ．なおゲームの性質上，後手必勝ではありえない．これまでの研究でスネーキーと呼ばれる図形のみ，勝ち型か負け型か未解明である．さらにスネーキーのハンディキャップ数（勝ち型になる必要最小限の置き石数）についても，2以下であることが分かっているのみであった．ハンデキャップとは先手がゲーム開始前に，盤面に置き石をすることで，先手が勝利可能なゲームになる．この置き石の最小の個数である．本研究では，スネーキーの置き石1の先手必勝手順を示す．この結果，スネーキーのハンディキャップ数が0または1であることが分かった．

5.5 効率的な罫線の描画

MS Excel に代表される表計算ソフトは PC ユーザにとって最も一般的なソフトウェアの1つ

であり，表を作成するために非常に有用である．表を作成する際に，表の可読性を高めるために，しばしば罫線を利用することになる．そこで，罫線を描画する際に最少回数で罫線を描画することを目的とした罫線描画問題 (the Border Drawing Problem) を定義した．例題として，罫線のレイアウトが与えられ，予め用意された罫線のスタイルの集合を用いて，アルゴリズム的な視点から効率的に罫線を描画することを目的とする．

初めに，(i) MS Excel を基に一般的と考えられる罫線のスタイル集合を作成し，罫線描画問題の複雑さを解析した．結果として，MS Excel の罫線のスタイル集合，あるいは，どのような妥当と考えられる部分集合をもちいても罫線描画問題が NP 困難な問題となることがわかった．また，(ii) 新しい簡易な罫線のスタイル集合を提案し，そのスタイル集合により効率的に描画できる罫線のレイアウトの必要十分条件を示した．

5.6 有向グラフにおける k 枝連結性の検査

グラフ $G = (V, E)$ が k 枝連結であるとは，任意の $u, v \in V$ に対して u から v への k 本の辺素な道が存在することを言う．本研究では，次数に上限のある有向グラフが k 枝連結であるか，または k 枝連結から ϵ 遠隔であるかを検査する，グラフの頂点と枝の数によらない定数時間アルゴリズムを示した．頂点数 n，次数の上限 d の有向グラフ G が k 枝連結から ϵ 遠隔であるとは，次数の上限を保ったまま G を k 枝連結にするのに，少なくとも ϵdn 本の辺の追加及び削除が必要であることを言う．本研究で示した検査アルゴリズムは，性質検査（Property Testing）と呼ばれる概念に基づいている．これは入力グラフが k 枝連結であれば 2/3 以上の確率で受理し，k 枝連結から ϵ 遠隔であれば 2/3 以上の確率で拒否するものとして定義される．どちらでもないグラフに対しては，何を出力してもかまわない．我々は，k-1 枝連結なグラフに対して $O\left(d\left(\frac{c}{\epsilon d}\right)^k \log \frac{1}{\epsilon d}\right)$($c > 1$ は定数) 時間，一般のグラフに対して $O\left(d\left(\frac{ck}{\epsilon d}\right)^k \log \frac{k}{\epsilon d}\right)$($c > 1$ は定数) 時間の検査アルゴリズムを得た．

5.7 3 正則グラフ巡回セールスマン問題に対する厳密アルゴリズムの改良

巡回セールスマン問題とは与えられたグラフの全節点を一巡する最短経路を見つける問題である．巡回セールスマン問題は非常に有名な NP 困難問題の 1 つであり，与えられたグラフのサイズの多項式時間で解を見つけるアルゴリズムは存在しないと考えられている．また，巡回セールスマン問題の解を見つける厳密アルゴリズムとしては，Held と Karp の $O(2^n)$ 時間アルゴリズムが 40 年以上前に開発されて以来，改良がなされていない．一方，Eppstein はグラフの各節点の最大次数が 3 である 3 正則グラフが例題として与えられた時に，$O(1.260^n)$ 時間で解を返す厳密アルゴリズムを開発した．

本研究では，上記の Eppstein の厳密アルゴリズムを改良し，3 正則グラフが例題として与えられる巡回セールスマン問題に対する $O(1.251^n)$ 時間厳密アルゴリズムを開発した．

5.8 ストリップパッキング問題 v.s. ビンパッキング問題

ストリップパッキング問題では，例題として幅，高さが 1 以下に制限された長方形の集合が与えられる．目的は，与えられた長方形の集合を，幅が 1，高さが無限大の長方形に詰めて高さを最小化することである．長方形を回転させることは許されない．与えられる長方形の高さが全て 1 の場合，ストリップパッキング問題はビンパッキング問題として考えられることから，ストリップパッキング問題はビンパッキング問題を一般化した問題であることがわかる．

本研究では，アルゴリズムの性能を保ったままで，ビンパッキング問題のアルゴリズムをストリップパンキング問題に適用するアルゴリズム的フレームワークを構築した．具体的には，(1) どんなオフラインのビンパッキング問題のアルゴリズムも，近似度の上限を（漸近的に）保ったまま，ストリップパッキング問題に適用することができる．そのため，サブルーティーンとして FFD (First Fit Decreasing Height) を用いることで，上限が 11/9 であるストリップパッキング問題に対する

単純で, 且つ, 高速なアルゴリズムを得ることが出来る. (2) 漸近的競合比を落とさずに, ビンパッキング問題に対する Harmonic-based のアルゴリズムを, オンラインストリップパッキング問題に適用することができる. つまり, オンラインストリップパッキング問題に対し, 1.58889 という漸近的な競合比を持ったアルゴリズムが存在することがわかる. これにより, 以前の 1.6910 という上限を改良することができる.

5.9 資源増大を許した除去可能ナップザック問題

オンラインナップザック問題の競合比は有限ではないことが知られている. この否定的な結果は, アイテムが除去可能だとしても成り立つ. 本論文では, 資源増大を許した除去可能ナップザック問題を扱う. すなわち, 袋の容量が $R \geq 1.0$ で, 詰められたアイテムの総量を最大にするために, 余分にアイテムを保持することを可能とする. 袋に入れられたアイテムは, 別のアイテムが与えられたときに除去できる. 一度除去されたアイテムは再び袋に入れることはできない. 我々はこの問題に対するアルゴリズムを, 袋の容量が 1.0 の場合と比較することで評価する. アイテムに重みがある（アイテムが任意の重みを持つ）場合と重みがない（重みがサイズと同じ）場合の両方について最適なアルゴリズムが得られた.

5.10 最小入札額と最大入札額の比が与えられたときの正直なオークション

本研究では無限に供給可能な商品を扱う, 単一で秘密入札の正直なオークションについて研究した. 具体的には, 最小入札額と最大入札額の比 r が与えられたときの正直なオークションの振る舞いについて解析した. 最小入札額と最大入札額の値を用いた, 5 つの正直なオークションに対するアルゴリズムを提案する. 我々のアルゴリズムによって, 従来の SCS アルゴリズムの競合比 r よりも良い値 $\ln r + 1$ が得られた. また r に関する競合比の下界の値も与えた. 入札人が 2 人のオークションでは, 任意の正直なオークションで競合比が少なくとも $2 - \frac{1}{r}$ となる. 一般の場合についても同様の下界が得られた.

5.11 対称なオークションの基本的な性質

我々は誘因両立オークションの基本的な性質の研究のため, 対称なオークションを定式化した. 我々はそのようなオークションで, アイテムの種類を固定した場合を考え, 売ったアイテムの個数が不定の場合についていくつかの重要な性質について研究する. ビックレーオークションなど様々な種類のオークションが持つ性質とその間の関連性を調べた.

5.12 誤りを許した量子および古典の通信複雑さ

量子情報処理における研究目標のひとつに古典とのギャップを示すことが挙げられる. 本研究では, 誤りを許した量子および古典プロトコルの通信複雑さをさまざまな設定において解析しその能力を比較した. 誤りを許したプロトコルとは, 乱数を使用しその値に応じて出力が異なってもよいもので, かつ正しい答えを出力する確率が 1/2 より真に大きいものである. 本研究の第一の結果は, 一方向通信における量子通信複雑さは古典のちょうど 1/2 になる, というものである. この古典と量子の関係は同時に量子ランダムアクセス符号の存在に関する強い限界を与えている. (m, n, p)-QRAC とは, m ビットを n 量子ビットに符号化したもので, 元の任意の 1 ビットを確率 p 以上で復元できるものである. 上記の関係から $(m, n, > 1/2)$-QRAC が存在する必要十分条件は $m \leq 2^{2n} - 1$ であることが示された. 第二の結果は, 第一の結果を二方向通信および同時メッセージの場合に拡張したものである. すなわち, それぞれのモデルにおいて通信複雑さの厳密な評価を与えることができた. いずれの結果も配置の論法を利用して証明されている. さらにこの論法を用いることで, 弱い誤りを許したプロトコルでは, 量子および古典の差は高々3 であることも示された.

5.13 ビザンチン故障耐性を有する自己安定辺彩色プロトコル

自己安定分散プロトコルは，計算機の故障によって分散システムがどのような状況に陥っても，故障が十分に長い間存在しなければ，いずれ正しい動作に復帰することを保証する分散システムである．つまり，自己安定分散システムは計算機の一時的な故障に対する高度な故障耐性を有する．

しかし，計算機の一部が断続的に故障する分散環境では，自己安定分散プロトコルの動作について何も保証できない．インターネットのような大規模な分散システムでは，故障が十分に長い間存在しないと仮定することは非現実的である．そのため，永久的な故障が存在する分散環境においても，正しい動作に復帰することを保証する自己安定分散システムの開発が重要である．

本研究では，永久故障としてビザンチン故障を対象とし，永久ビザンチン故障に対する故障耐性を有する辺彩色自己安定プロトコルについて検討した．まず，スケジューラに制約を設けなければ，匿名リングでの自己安定リンク彩色が不可能であることを示した．次に，隣接プロセスが同時に動作しないというスケジューラ制約の下で，任意の匿名ネットワークでのビザンチン故障耐性を有する自己安定リンク彩色プロトコルを示した．このプロトコルでは，$2\Delta - 1$ 色（Δ は最大次数）を使用するが，正常プロセス間のすべてのリンクの色は，いずれビザンチン故障の影響を受けずに安定することを保証している．

5.14 モバイルエージェントの最適ゴシップ

モバイルエージェントシステムにおいて，各エージェントが初期状況で所有する情報を他のすべてのエージェントに伝達することは，モバイルエージェントシステムの基本的な通信パタンであり，さまざまなモバイルエージェントシステムの基盤として活用できる．本研究では，この通信を実現することをエージェントゴシップとして定式化し，エージェントの総移動数が最小となるエージェントゴシップの手法について検討した．

リング，木，完全ネットワーク，および，任意のネットワークに対し，エージェントゴシップの手法を提案し，それらのエージェントの総移動数がオーダ的に最適であることを示した．これらの結果は，エージェントゴシップのエージェント移動数とプロセスリーダ選出のメッセージ数との関係を示すことにより，プロセスリーダ選出のメッセージ数に関する既知の結果から導出している．

5.15 構造化オーバレイネットワークの経路多重化法

P2P ネットワークでは，効率的な資源探索を可能にするために，実ネットワーク上に規則的な論理ネットワーク（構造化オーバレイネットワーク）を構成している．構造化オーバレイネットワークでは，任意のノードへ効率的にメッセージを配送するために，その規則的構造を利用しているが，その経路上に故障ノードが存在すると，メッセージを配送できなくなる．この問題を解決するために，マルチパス，ワイドパスなどの経路の多重化法が提案されている．マルチパスは低コストで実現できるが故障耐性が十分でなく，一方，ワイドパスは高い故障耐性を有する反面，高コストである．

そこで本研究では，これらの手法を組み合わせた手法（マルチワイドパス）を提案した．さらに，代表的な DHT である Chord に対し，マルチパス，ワイドパス，マルチワイドパスをそれぞれ適用し，各手法の故障耐性とコストを解析とシミュレーションにより評価した．その結果，提案手法は既存手法に比べて同程度の故障耐性を低コストで実現できることを示した．

研究業績一覧

著書

1. 岩間一雄:
   “アルゴリズム・サイエンス: 出口からの超入門”, 共立出版, 2006 年 10 月.

2. 伊藤大雄:
   “離散数学のすすめ 01 離散数学へのいざない, 理系への数学”, 第 40 巻第 4 号通巻 484 号, pp.8–14, 2007 年 4 月.

3. 伊藤大雄:
   “離散数学のすすめ 02 最短路問題, 理系への

数学”, 第 40 巻 5 号通巻 485 号, pp.46–51.
概要: 2007 年 5 月

4. 宮崎修一:
“離散数学のすすめ 06 安定結婚問題, 理系への数学”, 第 40 巻第 9 号通巻 489 号, pp.49–54, 2007 年 9 月.

5. 伊藤大雄:
“離散数学のすすめ 12 ケーキ分割問題, 理系への数学”, 第 40 巻第 12 号通巻 492 号, pp.47–53, 2007 年 12 月.

学術論文

1. A. Uejima, H. Ito, and T. Tsukiji:
“$\overline{C_7}$-coloring problem”, IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, Vol. E87-A, No. 5, pp. 1243-1250, 2004 年 5 月.
概要: *H-coloring problem* is a coloring problem with restrictions such that some pairs of colors cannot be used for adjacent vertices, where H is a graph representing the restrictions of colors. We deal with the case that H is the complement graph $\overline{C_{2p+1}}$ of a cycle of odd order $2p+1$. This paper presents the following results: (1) chordal graphs and internally maximal planar graphs are $\overline{C_{2p+1}}$-colorable if and only if they are p-colorable ($p \geq 2$), (2) $\overline{C_7}$-coloring problem on planar graphs is NP-complete, and (3) there exists a class that includes infinitely many $\overline{C_7}$-colorable but non-3-colorable planar graphs.

2. A. Uejima, and H. Ito:
“Subdivision of the hierarchy of H-colorable graph classes by circulant graphs”, CTW04 Workshop on Graphs and Combinatorial Optimization, pp. 232-236, 2004 年 5 月.
概要: For any integer $p \geq 2$, p-colorable graphs are $\overline{C_{2p+1}}$-colorable and $\overline{C_{2p+1}}$-colorable graphs are $p+1$-colorable, where $\overline{C_{2p+1}}$ is the complement graph of a cycle of order $2p+1$. The converse statements are however incorrect. This paper presents that the above inclusion can be subdivided by a subset of circulant graphs $H(n,k)$ ($n,k \in \boldsymbol{N}$, $k \leq \lfloor n/2 \rfloor$). The subdivided hierarchy of inclusion contains the well-known inclusion of C_{2p+1}-colorable graphs. Moreover, we prove some NP-complete problems for planar $H(n,k)$-colorings, including the $\overline{C_5}$-coloring.

3. K. Iwama, and K. Yonezawa:
“The Orthogonal CNN Problem”, Information Processing Letters, vol.90, no.3, pp.115–120, 2004 年 5 月.
概要: The online CNN Problem had no known competitive algorithms for a long time. Sitters, Stougie and de Paepe showed that there exists a competitive online algorithm for this problem. However, both their algorithm and analysis are quite complicated, and above all, their upper bound for the competitive ratio is 10^5. In this paper, we examine why this problem seems so difficult. To this end we introduce a nontrivial restriction, orthogonality, against this problem and show that it decreases the competitive ratio dramatically, down to at most 9.

4. 野口智史, 大下福仁, 増澤利光:
“通信遅延が大きな並列計算環境に対するタスクスケジューリングのためのクラスタリングアルゴリズム”, 第 2 回先進的計算基盤システムシンポジウム論文集 (SACSIS 2004), pp.197-206, 2004 年 5 月.
概要: 近年, PC クラスタなどプロセッサ間の通信遅延の大きな並列計算環境が用いられている．本論文では，通信遅延の大きな並列計算環境において，高速な並列計算を実現するタスクスケジューリングをおこなうためのクラスタリングアルゴリズムについて考察する．本論文では，まずクロスクラスタリングというクラスタリングのクラスを提案し，このクラス内に 1.5-近似スケジュールを導くクラスタリングが存在することを示す．さらに，タ

スクの複製を認めないという制約のもとでクロスクラスタリングをおこなう発見的アルゴリズムを提案し，提案するアルゴリズムが通信遅延の大きな並列計算環境において，効率的なタスクスケジュールを導くことをシミュレーションによって示す.

5. Taisuke Izumi, Akinori Saitoh, Toshimitsu Masuzawa:
"Timed uniform consensus resilient to crash and timing faults", Proceedings of the International Conference on Dependable Systems and Networks (DSN 2004), pp.243-252, 2004年6月.
概要: Δ-timed uniform consensus is a stronger variant of the traditional consensus and it satisfies the following additional property: The correct process terminates its execution within a constant time Δ (Δ-timeliness), and no two processes decide differently (Uniformity). In this paper, we consider the Δ-timed uniform consensus problem in presence of f_t crash processes and f_c timing-faulty processes. This paper proposes a Δ-timed uniform consensus algorithms. The proposed algorithm is adaptive in the following sense: It solves the Δ-timed uniform consensus when at least f_t+1 correct processes exist in the system. If the system has less than f_t+1 correct processes, the algorithm cannot solve the Δ-timed uniform consensus. However, as long as f_t+1 processes are non-crashed, the algorithm solves (non-timed) uniform consensus. We also investigate the maximum number of faulty processes that can be tolerated. We show that any Δ-timed uniform consensus algorithm tolerating up to f_t timing-faulty processes requires that the system has at least f_t+1 correct processes. This impossibility result implies that the proposed algorithm attains the maximal resilience about the number of faulty processes. We also show that any Δ-timed uniform consensus algorithm tolerating up to f_t timing-faulty processes cannot solve the (non-timed) uniform consensus when the system has less than f_t+1 non-crashed processes. This impossibility result implies that our algorithm attains the maximum adaptiveness.

6. Iwama, K.:
"Automated competitive analysis of online algorithms", Workshop on On-Line Algorithms (OLA 2004), 2004年7月.
概要: The main objective of this paper is to present a rather general framework for automated competitive analysis, i.e., for using computers to prove a competitive ratio of online algorithms. As an example, we use the Exchangeable Online Knapsack problem and prove an upper bound of 1.3334 for its competitive ratio using our system. There are two features: (i) Our system automatically generates different "states" of the game, the entire size of which is usually much larger than the size of the algorithm description. (ii) For claiming a concrete value for the competitive ratio, our system can use formula expression or does not have to depend on numerical analysis. For this purpose our system includes Mathematica as a part of the system.

7. Iwama, K., Miyazaki, S. and Okamoto, K.:
"A $(2 - c \log N/N)$-Approximation Algorithm for the Stable Marriage Problem", Proceedings of the 9th Scandinavian Workshop on Algorithm Theory (SWAT 2004), Lecture Notes in Computer Science 3111, pp. 349-361, 2004年7月.
概要: We propose an approximation algorithm for the problem of finding a maximum stable matching when both ties and unacceptable partners are allowed in preference lists. Our algorithm achieves the approximation ratio $2 - c\frac{\log N}{N}$ for an arbitrarily positive constant c, where N denotes the number of men in an input. This improves the trivial approximation ratio of two.

8. Iwama, K.:
"Worst-case upper bounds for kSAT", EATCS Bulletin, No. 82, pp. 61-71, 2004.
概要:

9. Hiro Ito, Kazuo Iwama, and Takeyuki Tamura:
"Imperfectness of Data for STS-Based Physical Mapping", IFIP World Computer Congress, pp. 279–292, 2004年8月.
概要: In the STS-based mapping, we are requested to obtain the correct order of probes in a DNA sequence from a given set of fragments or equivalently a hybridization matrix A. It is well-known that the problem is formulated as the combinatorial problem of obtaining a permutation of A's columns so that the resulting matrix has the consecutive-one property. If the data (the hybridization matrix) is error free and includes enough information, then the above column order determines the correct order of the probes uniquely. Unfortunately this is no longer true if the data include errors, which has been one of the popular research targets in computational biology. Even if there is no error, ambiguities in the probe order may still remain. This in fact happens by the lack of some information of the data, but almost no further investigation was made previously. In this paper, we define a measure of such imperfectness of the data as a minimum amount of additional fragments which are needed to fix the probe order uniquely. Several polynomial-time algorithms to compute such additional fragments of minimum cost are presented.

10. Tomokazu Imamura, Kazuo Iwama and Tatsuie Tsukiji:
"Approximated Vertex Cover for Graphs with Perfect Matchings", Proc. 10th Annual International Conference (COCOON 2004), pp.132–142, 2004年8月.
概要: Chen and Kanj considered the Vertex Cover problem for graphs with perfect matchings (VC-PM). They showed that: (i) There is a reduction from general Vertex Cover to VC-PM, which guarantees that if one can achieve an approximation factor of less than two for VC-PM, then one can do so for general Vertex Cover as well. (ii) There is an algorithm for VC-PM whose approximation factor is given as $1.069 + 0.069d$ where d is the average degree of the given graph. In this paper we improve (ii). Namely we give a new VC-PM algorithm which greatly outperforms the above one and its approximation factor is roughly $2 - \frac{6.74}{d+6.28}$. Our algorithm also works for graphs with "large" matchings although its approximation factor is degenerated.

11. Halldorsson, M., Iwama, K., Miyazaki, S. and Yanagisawa, H.:
"Randomized Approximation of the Stable Marriage Problem", Theoretical Computer Science, Vol. 325, No. 3, pp. 439-465, 2004年10月.
概要: While the original stable marriage problem requires all participants to rank all members of the opposite sex in a strict order, two natural variations are to allow for incomplete preference lists and ties in the preferences. Either variation is polynomially solvable, but it has recently been shown to be NP-hard to find a maximum cardinality stable matching when both of the variations are allowed. It is easy to see that the size of any two stable matchings differ by at most a factor of two, and so, an approximation algorithm with a factor two is trivial. In this paper, we give a randomized approximation algorithm RandBrk and show that its expected approximation ratio is at most $10/7 (< 1.4286)$ for a restricted but still NP-hard case, where ties occur in only men's lists, each man writes at most one tie, and the length of ties is two. We also show that our analysis is nearly tight by giving a lower

bound 32/23(> 1.3913) for RandBrk. Furthermore, we show that these restrictions except for the last one can be removed without increasing the approximation ratio too much.

12. 野口智史, 大下福仁, 増澤利光:
"通信遅延が大きな並列計算環境に対するタスクスケジュールのためのクラスタリングアルゴリズム", 情報処理学会論文誌コンピューティングシステム, 第 45 巻, No.SIG11(ACS7), pp.257-268, 2004年10月.
概要: 近年, PC クラスタなどプロセッサ間の通信遅延の大きな並列計算環境が用いられている. 本論文では, 通信遅延の大きな並列計算環境において, 高速な並列計算を実現するタスクスケジューリングをおこなうためのクラスタリングアルゴリズムについて考察する. 本論文では, まずクロスクラスタリングというクラスタリングのクラスを提案し, このクラス内に 1.5-近似スケジュールを導くクラスタリングが存在することを示す. さらに, タスクの複製を認めないという制約のもとでクロスクラスタリングをおこなう発見的アルゴリズムを提案し, 提案するアルゴリズムが通信遅延の大きな並列計算環境において, 効率的なタスクスケジュールを導くことをシミュレーションによって示す.

13. Taisuke Izumi, Toshimitsu Masuzawa:
"Synchronous condition-based consensus adapting to input-vector legality", Proceedings of the 18th International Symposium on Distributed Computing (DISC 2004), LNCS 3274, pp.16-29, 2004年10月.
概要: This paper proposes a novel condition-based algorithm for the uniform consensus in synchronous systems. The proposed algorithm is *adaptive* in the sense that its execution time depends on actual difficulty of input vectors, *legality level*, which is newly formalized in this paper. On the assumption that majority of processes are correct, the algorithm terminates within $\min\{f+2-l, t+1\}$ rounds if $l < f$, where f and t is the actual and the maximum numbers of faults respectively, and l is the legality level of input vectors. Moreover, the algorithm terminates in 1 round if $l \geq t$ and $f = 0$, and terminates within 2 rounds if $l \geq f$ holds. Compared with previous algorithms, for the case of $t < n/2$, the algorithm achieves the best time complexity in almost all situations.

14. Yoshihiro Nakaminami, Toshimitsu Masuzawa, Ted Herman:
"Self-stabilizing agent traversal on tree networks", IEICE Transactions on Information and Systems (Special Section on New Technologies and their Applications of the Internet), Vol. E87-D, No. 12, pp. 2773-2780, 2004年12月.
概要: This paper introduces the problem of n mobile agents that repeatedly visit all n nodes of a given network, subject to the constraint that no two agents can simultaneously occupy a node. This paper first presents a self-stabilizing phase-based protocol for a tree network on a synchronous model. The protocol realizes agent traversal with $O(\Delta n)$ time where n is the number of nodes and Δ is the maximum degree of any vertex in the communication network. The phase-based protocol can also be applied to an asynchronous model and a ring network. This paper also presents a self-stabilizing link-alternator-based protocol with agent traversal time of $O(\Delta n)$ for a tree network on an asynchronous model. The protocols are proved to be asymptotically optimal with respect to the agent traversal time.

15. Iwama, K., and Kawachi, A.:
"Approximated Two Choices in Randomized Load Balancing", Proceedings of the Fifteenth International Symposium on Algorithms and Computation (ISAAC2004), Lecture Notes in Computer Science 3341,

p.545-557, 2004年12月.

概要: This paper studies the maximum load in the *approximated* d-choice balls-and-bins game where the current load of each bin is available only approximately. In the model of this game, we have r thresholds $T_1, ..., T_r$ $(0 < T_1 < \cdots < T_r)$ for an integer r (≥ 1). For each ball, we select d bins and put the ball into the bin of the lowest range, i.e., the bin of load i such that $T_k \leq i \leq T_{k+1} - 1$ and no other selected bin has height less than T_k. If there are two or more bins in the lowest range (i.e., their height is between T_k and $T_{k+1} - 1$), then we assume that those bins cannot be distinguished and so one of them is selected uniformly at random. We then estimate the maximum load for n balls and n bins in this game. In particular, when we put the r thresholds at a regular interval of an appropriate Δ, i.e., $T_r - T_{r-1} = \cdots = T_2 - T_1 = T_1 = \Delta$, the maximum load $L(r)$ is given as $(r + O(1)) \sqrt[r+1]{\frac{r+1}{(d-1)^r} \ln n / \ln\left(\frac{r+1}{(d-1)^r} \ln n\right)}$. The bound is also described as $L(\Delta) \leq \{(1+o(1)) \ln \ln n + O(1)\}\Delta / \ln((d-1)\Delta)$ using parameter Δ. Thus, if Δ is a constant, this bound matches the (tight) bound in the original d-choice model given by Azar et al., within a constant factor. The bound is also tight within a constant factor when $r = 1$.

16. Yusuke Sakurai, Fukuhito Ooshita, Toshimitsu Masuzawa:
"A self-stabilizing link-coloring protocol resilient to Byzantine faluts in tree networks", Proceedings of the 8th International Conference on Principles of Distributed Systems (OPODIS 2004), pp.196-206, 2004年12月.
概要: Self-stabilizing protocols can tolerate any type and any number of transient faults. But self-stabilizing protocols have no guarantee of their behavior against permanent faults. Thus, investigation concerning self-stabilizing protocols resilient to permanent faults is important. This paper proposes a self-stabilizing link-coloring protocol resilient to (permanent) Byzantine faults in tree networks. The protocol assumes the central daemon, and uses $\Delta + 1$ colors where Δ is the maximum degree in the network. This protocol guarantees that, for any nonfaulty process v, if v has no Byzantine ancestor with the distance of two or less and has no crash parent, v reaches its desired states within three rounds and never changes its states after that. Thus, it achieves fault containment with radius of two. Moreover, we prove that the containment radius becomes $\Omega(\log n)$ when we use only Δ colors, and prove that the containment radius becomes $\Omega(n)$ under the distributed daemon. These lower bound results prove necessity of $\Delta + 1$ colors and the central daemon to achieve fault containment with a constant radius.

17. Hiroyoshi Miwa and Hiro Ito:
"NA-edge-connectivity augmentation problems by adding edges", Journal of the Operations Reserch Society of Japan, Vol. 47, No. 4, pp. 224–243, 2004年.
概要: In a recent communication network, some mirror servers that provide the same service as an original server are often used. From the view of the network reliability, it is important that a client can access to at least one of the original or its mirror servers, even if some links or nodes fail. Therefore, it is necessary to design a network so that it ensures some independent routes between a client and a set of servers that provide the same service. When a communication network is modeled by a graph, the connectivity between a client and some mirror servers can be measured by NA(Node-to-Area)-edge(resp. vertex)-connectivity between a vertex and a vertex subset (an area), which is equal to the number of edge(resp. vertex)-independent

paths between a vertex and an area. In this paper, we focus on the network design problem to increase the reliability of a current network by adding the smallest number of links. This problem can be formulated as the problem of augmenting a graph by adding the smallest number of new edges to meet NA-edge(vertex)-connectivity requirement. First, we prove the NP-completeness of the problem to determine whether a graph can be 1-NA-edge-connected by adding the given number or less of edges. Next, we show that the problem of augmenting a graph to be 2-NA-edge-connected by adding the smallest edges can be solved in polynomial time.

18. T. Imamura and K. Iwama:
"Approximating Vertex Cover on Dense Graphs", Proc. 16th Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms (SODA 2005), pp. 582–589, 2005 年 1 月.
概要: Although many problems in MAX-SNP admit a PTAS for dense graphs, that is not the case for Vertex Cover, which is MAX-SNP hard even for dense graphs. This paper presents a randomized approximation algorithm for Vertex Cover on dense graphs, i.e., graphs whose average degree d is $\Omega(n)$. (i) Our algorithm improves the best-known bound for the approximation factor by Karpinski and Zelikovsky. For example, our bound is $\frac{2}{1+\frac{d}{2\Delta}}$ for dense graphs such that $|E| \leq \Delta(n-\Delta)$ where Δ is the maximum degree. The improvement is especially large when $d \approx \Delta$; if $d \geq \frac{2}{3}\Delta$ for instance, our bound is at most 1.5 while the previous bound approaches to 2.0 as $\frac{n}{\Delta}$ increases. (ii) It achieves the same factor for a wider range of graphs, i.e., for the graphs whose Δ is $\Omega(n\frac{loglogn}{logn})$. (iii) It is probably optimal in the sense that if we can achieve a better approximation factor by $\delta > 0$ for the above range of graphs, then we can achieve a factor of $2-\delta$ for general graphs.

19. Iwama, K., Kawachi, A., and Yamashita, S.:
"Quantum Sampling for Balanced Allocations", IEICE transactions on Information and Systems, Vol.E88-D No.1, p.47-52, 2005 年 1 月.
概要: It is known that the original Grover Search (GS) can be modified to use a general value for the phase θ of the diffusion transform. Then, if the number of answers is relatively large, this modified GS can find one of the answers with probability one in a single iteration. However, such a quick and error-free GS can only be possible if we can initially adjust the value of θ correctly against the number of answers, and this seems very hard in usual occasions. A natural question now arises: Can we enjoy a merit even if GS is used without such an adjustment? In this paper, we give a positive answer using the balls-and-bins game in which the random sampling of bins is replaced by the quantum sampling, i.e., a single round of modified GS. It is shown that by using the quantum sampling: (i) The maximum load can be improved quadratically for the static model of the game and this improvement is optimal. (ii) That is also improved to $O(1)$ for the continuous model if we have a certain knowledge about the total number of balls in the bins after the system becomes stable.

20. Iwama, K., and Kawachi, A.:
"Compact Routing with Stretch Factor of Less Than Three", IEICE transactions on Information and Systems, Vol.E88-D No.1, p.39-46, 2005 年 1 月.
概要: Cowen gave a universal compact routing algorithm with a stretch factor of three and table-size of $O(n^{2/3}\log^{4/3} n)$ based on a simple and practical model. (The table-size is later improved to $O(n^{1/2}\log^{3/2} n)$.) This paper considers, using the same model, how the necessary table-size differs if the

stretch factor must be *less than* three. It is shown that: (i) There is a routing algorithm with a stretch factor of two whose table-size is $(n-\sqrt{n}+2)\log n$. (ii) There is a network for which any routing algorithm that follows the model and with a stretch factor of less than three needs a table-size of $(n-2\sqrt{n})\log n$ in at least one node. Thus, we can only reduce roughly an *additive* $\sqrt{n}\log n$ (i.e., $\sqrt{n}$ table-entries) from the trivial table-size of $n\log n$ which obviously enables shortest-path routing. Furthermore it turns out that we can reduce only an additive $\log n$ (i.e., only one table-entry) from the trivial $n\log n$ if we have to achieve a stretch factor of less than *two*. Thus the algorithm (i) is (roughly) tight both in its stretch factor and in its table-size.

21. Hiroshi Fujiwara and Kazuo Iwama:
"Average-Case Competitive Analyses for Ski-Rental Problems", Dagstuhl Seminar 05031 (Algorithms for Optimization with Incomplete Information), 2005年1月.
概要: Let s be the ratio of the cost for purchasing skis over the cost for renting them. Then the famous result for the ski-rental problem shows that skiers should buy their skis after renting them $(s-1)$ times, which gives us an optimal competitive ratio of $2-1/s$. In practice, however, it appears that many skiers buy their skis before this optimal point of time and also many skiers keep renting them forever. In this paper we show that this behavior of skiers is quite reasonable by using an *average-case competitive ratio*. For an exponential input distribution $f(t)=\lambda e^{-\lambda t}$, optimal strategies are (i) if $1/\lambda \leq s$, then skiers should rent their skis forever and (ii) otherwise they should purchase them after renting approximately $s^2\lambda$ $(<s)$ times. Thus average-case competitive analyses give us the result which differs from the worst-case competitive analysis and also differs from the traditional average cost analysis. Other distributions and related problems are also discussed.

22. Kazuo Iwama, Akinori Kawachi, Rudy Raymond. H. P. and Shigeru Yamashita:
"Robust Quantum Algorithms for Oracle Indentification", The 8th Workshop on Quantum Information Processing (QIP 2005), 2005年1月.
概要: The oracle identification problem (OIP) was introduced by Ambainis et. al., which is given as a set S of M oracles and a hidden oracle f. Our task is to figure out which oracle in S is equal to the hidden f by doing queries to f. OIP includes several problems such as Grover Search as special cases. In this paper, we design *robust* algorithms, i.e., those which are tolerant against noisy oracles, for OIP. Our results include: (i) For any oracle set S such that $|S|$ is polynomial in N, $O(\sqrt{N})$ queries are enough to identify the hidden oracle, which is obviously optimal since this OIP includes Grover Search as a special case. (ii) For the case that $|S| \leq 2^{N^d}(d<1)$, we design an algorithm whose query complexity is $O(\sqrt{N\log M/\log N})$ and matches the lower bound proved before. (iii) We can furthermore design a robust algorithm whose complexity changes smoothly between the complexity of (ii) and the complexity of recovering all information about the hidden oracle whose complexity is O(N) as showed by Buhrman et. al. Thus our new algorithms are not only robust but also their query complexities are even better than the previous noiseless case.

23. Taisuke Izumi, Toshimitsu Masuzawa:
"Timed uniform atomic broadcast in presence of crash and timing faults", IEICE Transactions on Information and Systems (Special issue on Foudations of Computer

Science), Vol. E88-D, No. 1, pp.72-81, 2005 年 1 月.

概要: Δ-Timed Atomic Broadcast is the broadcast ensuring that all correct processes deliver the same messages in the same order, and that delivery latency of any message broadcast by any correct process is some predetermined time Δ or less. In this paper, we propose a Δ-timed atomic broadcast algorithm in a synchronous system where communication delay is bounded by a known constant d and processes suffer both crash faults and timing faults. The proposed algorithm can tolerate f_c crash faults and f_t timing faults as long as at least $f_t + 1$ processes are correct, and its maximum delivery latency Δ is $(2f' + 7)d$ where f' is the actual number of (crash or timing) faulty processes. That is, the algorithm attains the *early-delivery* in the sense that its delivery latency depends on the actual number of faults rather than the maximum number of faults that the algorithm can tolerate. Moreover, the algorithm has a distinct advantage of guaranteeing that timing-faulty processes also deliver the same messages in the same order as the correct processes (Uniformity). We also investigate the maximum number of faulty processes that can be tolerated. We show that no Δ-timed atomic broadcast algorithm can tolerate f_t timing faults, if at most f_t processes are correct. The impossibility result implies that the proposed algorithm achieves the maximum fault-resilience with respect to the number of faulty processes.

24. 宮崎修一:
"安定結婚問題", 電子情報通信学会会誌, Vol.88, No.3, pp. 195-199, 2005 年 3 月.

概要: 安定結婚問題は二部グラフにおけるマッチング問題の一種である．複数の男女がおり，各人は異性を自分の好みで順序づけした希望リストを持っている．その希望リストに基づいて「安定性」を満たすマッチング (結婚) を求めるのが，安定結婚問題である．この問題は，アメリカの研修医配属への応用が有名であるが，近年日本の研修医配属でも利用し始められた．本稿では，安定結婚問題の基本的性質や応用例を紹介する．

25. Hiro Ito, Kazuo Iwama, Yasuo Okabe, and Takuya Yoshihiro:
"Single-backup-table schemes for shortest-path routing", Theoretical Computer Science, Vol. 333, pp. 347–353, 2005 年 3 月.

概要: For networks employing shortest-path routing, we introduce a new recovery scheme that needs only one extra backup routing table. By precomputing this backup table, the network recovers from any single link-failure immediately after the failure occurs. To compute the backup routing table for this scheme, we use the almost-linear-time algorithm to solve r, v-problem, which is a variation of the best swap problem, presented by Nardelli, et al. We further show that the same solution can be computed in exactly linear time if the underlying graph is unweighted.

26. H. Fujiwara, K. Iwama:
"Average-Case Competitive Analyses for Ski-Rental Problems", Algorithmica, Vol.42, No.1, pp. 95–107, 2005 年 3 月.

概要: Let s be the ratio of the cost for purchasing skis over the cost for renting them. Then the famous result for the ski-rental problem shows that skiers should buy their skis after renting them $(s - 1)$ times, which gives us an optimal competitive ratio of $2 - \frac{1}{s}$. In practice, however, it appears that many skiers buy their skis before this optimal point of time and also many skiers keep renting them forever. In this paper we show that these behaviors of skiers are quite reasonable by using an *average-case competitive ratio*. For an exponential input distribution $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$, optimal strategies are (i) if $\frac{1}{\lambda} \leq s$, then

skiers should rent their skis forever and (ii) otherwise should purchase them after renting approximately $s^2\lambda$ $(< s)$ times. Thus average-case competitive analyses give us the result which differs from the worst-case competitive analysis and also differs from the traditional average cost analysis. Other distributions and related problems are also discussed.

27. Taisuke Izumi, and Toshimitsu Masuzawa: "An improved algorithm for adaptive condition-based consensus", Proceedings of the 12th Colloquium on Structural Information and Communication Complexity (SIROCCO 2005), LNCS 3499, pp.170-184, 2005 年 5 月.
概要: Condition-Based Approach studies restrictions on the inputs of a distributed problem, called conditions, to circumvent several impossibility results. Especially, for the synchronous consensus problem, the relation between conditions and time complexity bounds has been studied. In our previous work, we introduced the adaptiveness on time complexity of the condition-based approach, and established the adaptive condition-based approach: It classifies all possible input vectors into the hierarchical sequence of conditions according to their difficulty called legality level. For such hierarchy, adaptive algorithms achieve time complexity depending on the legality level of input vectors. In this paper, we propose an improved version of the adaptive condition-based algorithms for synchronous consensus that achieves better time complexity than the previous one. On the assumption that majority of processes are correct, the proposed algorithm terminates within $\min\{f+2, t+1\} - l$ rounds if $l < f$, where f and t is the actual and the maximum numbers of faults respectively, and l is the legality level of input vectors. Moreover, the algorithm terminates in 1 round if $l \geq t$ and $f = 0$, and terminates within 2 rounds if $l \geq f$ holds. Compared with our previous algorithm, the proposed algorithm improves time complexity by one round in the case of $f = t$ and $l > f$.

28. Y. Hanatani, T. Horiyama, and K. Iwama: "Hajós Calculus on Planar Graphs", Proc. the 4th Japanese-Hungarian Symposium on Discrete Mathematics and Its Applications, pp.76–83, 2005 年 6 月.
概要: The Hajós calculus is a nondeterministic procedure which generates the class of non-3-colorable graphs. If all non-3-colorable graphs can be constructed in polynomial steps by the calculus, NP = co-NP holds. Up to date, however, it remains open whether there exists a family of graphs that can be generated in polynomial steps. To attack this problem, we propose two graph calculi PHC and PHC* that generate non-3-colorable planar graphs, where intermediate graphs in the calculi are also restricted to be planar. Then we prove that PHC and PHC* are sound and complete. We also show that PHC* can polynomially simulate PHC.

29. H. Ito, G. Nakamura, and S. Takata: "Chomp with Poison-Strewn Chocolates", Proc. the 4th Japanese-Hungarian Symposium on Discrete Mathematics and Its Applications, pp.336–343, 2005 年 6 月.
概要:

30. Tomoko Suzuki, Taisuke Izumi, Fukuhito Ooshita, and Toshimitsu Masuzawa: "Self-adaptation of mobile agent population in dynamic networks: a biologically inspired approach", Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Autonomic Computing (ICAC-05), pp.374-375, 2005 年 6 月.
概要: Mobile agent is one of the most promising paradigms to support autonomic computing in a large scale ofdistributed system with diversity: mobile agents traverse the distributed system and carry out

a sophisticated task at each node adaptively. In mobile-agent-based systems, a larger number of agents generally require shorter time to complete the whole task but consume more resources. Therefore, it is indispensable to keep an appropriate number of agents for its application. In this paper, we consider the mobile agent population control problem in dynamic networks: it requires to adjust the number of agents to a constant fraction of the current network size.We propose algorithms inspired by a biological paradigm and show by simulations that the proposed algorithms realizeself-adaptation of mobile agent population in dynamic networks.

31. Tomoko Suzuki, Taisuke Izumi, Fukuhito Ooshita, and Toshimitsu Masuzawa:
"Biologically inspired self-adaptation of mobile agent population", Proceedings of the 3rd Workshop on Self-adaptive and Autonomic Computing (DEXA International Workshop), pp.170-174, 2005 年 8 月.
概要: Mobile agent is one of the most promising paradigms to support autonomic computing in a large scale of distributed system with diversity: mobile agents traverse the distributed system and carry out a sophisticated task at each node adaptively. In mobile-agent-based systems, a larger number of agents generally require shorter time to complete the whole task but consume more resources (e.g., processing power and network bandwidth). Therefore, it is indispensable to keep an appropriate number of agents for its application. In this paper, we consider the mobile agent population control problem in dynamic networks: it requires to adjust the number of agents to a constant fraction of the current network size. We propose algorithms inspired by a biological paradigm and show by simulations that the proposed algorithms realize self-adaptation of mobile agent population in dynamic networks.

32. W. W. Bein, K. Iwama, L. L. Larmore, and J. Noga:
"The Delayed k-Server Problem", Proc. the 15th International Symposium on Fundamentals of Computation Theory (FCT 2005), pp.281–292, 2005 年 8 月.
概要: We introduce a new version of the server problem: the delayed server problem. In this problem, once a server moves to serve a request, it must wait for one round to move again, but could serve a repeated request to the same point. We show that the delayed k-server problem is equivalent to the $(k-1)$-server problem in the uniform case, but not in general.

33. K. Iwama, A. Lingas, and M. Okita:
"Max-stretch Reduction for Tree Spanners", Proc. the 9th International Workshopon Algorithms and Data Structures (WADS 2005), pp.122–133, 2005 年 8 月.
概要: A tree t-spanner T of a graph G is a spanning tree of G whose max-stretch is t, i.e., the distance between any two vertices in T is at most t times their distance in G. If G has a tree t-spanner but not a tree $(t-1)$-spanner, then G is said to have max-stretch of t. In this paper, we study the Max-Stretch Reduction Problem: for an unweighted graph $G=(V,E)$, find a set of edges not in E originally whose insertion into G can decrease the max-stretch of G. Our results are as follows: (i) For a ring graph, we give a linear-time algorithm which inserts k edges improving the max-stretch optimally. (ii) For a grid graph, we give a nearly optimal max-stretch reduction algorithm which preserves the structure of the grid. (iii) In the general case, we show that it is NP-hard to decide, for a given graph G and its spanning tree of max-stretch t, whether or not one-edge insertion can decrease the max-stretch to $t-1$. (iv)

Finally, we show that ! the max-stretch of an arbitrary graph on n vertices can be reduced to $s' \geq 2$ by inserting $O(n/s')$ edges, which can be determined in linear time, and observe that this number of edges is optimal up to a constant.

34. Toshimitsu Masuzawa, and Hirotsugu Kakugawa:
"Self-stabilization in spite of frequent changes of networks: Case study of mutual exclusion on dynamic rings", Proceedings of the 7th International Symposium on Self-Stabilizing Systems (SSS), LNCS 3764, pp.183-197, 2005 年 10 月.
概要: It is generally said that a self-stabilizing protocol is inefficient in distributed systems with frequent faults or topological changes and, what is worse, it might never converge to its intended behavior forever. Its main reason is that a new fault or topological change brings the system into an unexpected configuration, and thus, the system restarts convergence to its intended behavior *from scratch*. But the reasoning seems too pessimistic. This paper provides a novel observation about self-stabilization on frequently changing networks: by quantifying influence of steps of a self-stabilizing protocol and that of a topological change, efficiency of the convergence can be estimated with considering topological changes that occur during the convergence. To show the feasibility and effectiveness of the approach, this paper presents a simple self-stabilizing mutual exclusion protocol on a dynamic ring where processes can join and leave the ring at any time. This paper clarifies what restrictions on frequency of joins and leaves are sufficient to guarantee the convergence and to guarantee the intended behavior after the convergence. The restrictions are not strict and thus the protocol can complete convergence and can continue its intended behavior on a frequently changing ring.

35. X. Han, K. Iwama, and G. Zhang:
"On-line Removable Square Packing", Proc. the 3rd International Workshop on Approximation and Online Algorithms (WAOA 2005), LNCS 3879, pp.216–229, 2005 年 10 月.
概要: The online removable square packing problem is a two-dimensional version of the online removable Knapsack problem. For a sequence of squares with side length at most 1, we are requested to pack a subset of them into a unit square in an online fashion where the online player can decide whether to take the current square or not and which squares currently in the unit square to remove. The goal is to maximize the total packed area. Our results include: (i) Any online algorithm cannot achieve a better competitive ratio than 2.618. (ii) The matching upper bound is achieved by a relatively simple online algorithm if repacking is allowed. (iii) Without repacking, we can achieve an upper bound of 3.0 by using the concept of bricks by Januszewski and Lassak. (iv) The offline version of the problem admits a PTAS.

36. H. Ito, K. Iwama, and T. Osumi:
"Linear-Time Enumeration of Isolated Cliques", Proc. the 13th Annual European Symposium on Algorithms (ESA 2005), LNCS 3669, pp.119–130, 2005 年 10 月.
概要: For a given graph G of n vertices and m edges, a clique S of size k is said to be c-isolated if there are at most ck outgoing edges from S. It is shown that this parameter c is an interesting measure which governs the complexity of finding cliques. In particular, if c is a constant, then we can enumerate all c-isolated maximal cliques in linear time, and if $c = O(\log n)$, then we can enumerate all c-isolated maximal cliques in polynomial time. Note that there is a graph

which has a superlinear number of c-isolated cliques if c is not a constant, and there is a graph which has a superpolynomial number of c-isolated cliques if $c = \omega(\log n)$. In this sense our algorithm is optimal for the linear-time and polynomial-time enumeration of c-isolated cliques.

37. J. Akiyama, H. Fukuda, H. Ito, and G. Nakamura:
"Infinite Series of Generalized Gospher Space Filling Curves", Abstracts of the China-Japan Conference on Discrete Geometry, Combinatorics, and Graph Theory (CJCDGCGT) 2005, pp.6–8, .
概要: 2005 年 11 月

38. H. Ito:
"Transformation of Simple Graphs Preserving Cut-Size Order and Their Simpleness", Abstracts of the China-Japan Conference on Discrete Geometry, Combinatorics, and Graph Theory (CJCDGCGT) 2005, pp.12–14, .
概要: 2005 年 11 月

39. Toshimitsu Masuzawa, and Sebastien Tixeuil:
"A self-stabilizing link-coloring protocol resilient to unbounded byzantine faults in arbitrary networks", Proceedings of the 9th International Conference on Principles of Distributed Systems (OPODIS 2005), pp.283-298, 2005 年 12 月.
概要: Self-stabilizing protocols can tolerate any type and any number of transient faults. However, in general, self-stabilizing protocols provide no guarantee about their behavior against permanent faults. This paper proposes a self-stabilizing link-coloring protocol resilient to (permanent) Byzantine faults in arbitrary networks. The protocol assumes the central daemon, and uses $2\Delta - 1$ colors where Δ is the maximum degree in the network. This protocol guarantees that any link (u, v) between non faulty processes u and v is assigned a color within $2\Delta + 2$ rounds and its color remains unchanged thereafter. Our protocol is Byzantine insensitive in the sense that the subsystem of correct processes remains operating properly in spite of unbounded Byzantine faults.

40. K. Iwama, S. Miyazaki, and N. Yamauchi:
"A $(2 - c\frac{1}{\sqrt{N}})$-Approximation Algorithm for the Stable Marriage Problem", Proc. the 16th Annual International Symposium on Algorithms and Computation (ISAAC 2005), LNCS 3827, pp.902–914, 2005 年 12 月.
概要: We consider the problem of finding a stable matching of maximum size when both ties and unacceptable partners are allowed in preference lists. This problem is NP-hard and the current best known approximation algorithm achieves the approximation ratio $2 - c\frac{\log N}{N}$, where c is an arbitrary positive constant and N is the number of men in an input. In this paper, we improve the ratio to $2 - c\frac{1}{\sqrt{N}}$, where c is a constant such that $c \leq \frac{1}{4\sqrt{6}}$.

41. Tomoko Suzuki, Taisuke Izumi, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa, and Toshimitsu Masuzawa:
"Bio-inspired replica density control in dynamic networks", Proceedings of the 2nd International Workshop on Biologically Inspired Approaches to Advanced Information Technology (Bio-ADIT 2006), LNCS 3853, pp.281-293, 2006 年 1 月.
概要: Resource replication is a crucial technique for improving system performance of distributed applications with shared resources. A larger number of replicas require shorter time to reach a replica of the requested resource, but consume more storage of hosts. Therefore, it is indispensable to adjust the number of replicas appropriately for its application. This paper

considers the problem for controlling the density of replicas adaptively in dynamic networks. The goal of the problem is to adjust the number of replicas to a constant fraction of the current network size. This paper proposes algorithm inspired by the single species population model, which is a well-known population ecology model. The simulation results show that the proposed algorithm realize self-adaptation of the replica density in dynamic networks.

42. Taisuke Izumi and Toshimitsu Masuzawa:
"An interest-based peer clustering algorithm using ant paradigm", Proceedings of the 2nd International Workshop on Biologically Inspired Approaches to Advanced Information Technology (Bio-ADIT 2006), LNCS 3853, pp.379-386, 2006 年 1 月.
概要: The interest-based clustering is one of promising approaches to achieve low-cost search in peer-to-peer file sharing. It organizes the logical overlay network where peers having similar interests are closely located. In this paper, we propose an interest-based peer clustering algorithm using ant paradigm. Our algorithm is inspired by the ant-based clustering algorithm, which is one of heuristic methods to categorize many data items. We also evaluate this algorithm by simulations.

43. M. Hayashi, K. Iwama, H. Nishimura, R. Raymond, and S. Yamashita:
"Quantum Network Coding", Proc. the 9th Workshop on Quantum Information Processing (QIP2006), 2006 年 1 月.
概要: Since quantum information is continuous, its handling is sometimes surprisingly harder than the classical counterpart. A typical example is cloning; making a copy of digital information is straightforward but it is not possible exactly for quantum information. The question in this talk is whether or not "quantum" network coding is possible. Its classical counterpart is another good example to show that digital information flow can be done much more efficiently than conventional (say, liquid) flow. Our answer to the question is similar to the case of cloning, namely, it is shown that quantum network coding is possible if approximation is allowed, by using a simple network model called Butterfly. In this network, there are two flow paths, s_1 to t_1 and s_2 to t_2, which shares a single bottleneck channel of capacity one. In the classical case, we can send two bits simultaneously, one for each path, in spite of the bottleneck. Our results for quantum network coding include: (i) We can send any quantum state $|\psi_1\rangle$ from s_1 to t_1 and $|\psi_2\rangle$ from s_2 to t_2 simultaneously with a fidelity strictly greater than 1/2. (ii) If one of $|\psi_1\rangle$ and $|\psi_2\rangle$ is classical, then the fidelity can be improved to 2/3. (iii) Similar improvement is also possible if $|\psi_1\rangle$ and $|\psi_2\rangle$ are restricted to only a finite number of (previously known) states. This allows us to design an interesting protocol which can send two classical bits from s_1 to t_1 (similarly from s_2 to t_2) but only one of them should be recovered.

44. Hirotsugu Kakugawa, and Toshimitsu Masuzawa:
"A self-stabilizing distributed algorithm for 5-spanner", Proceedings of the IASTED International Conference on Networks and Communication Systems (NCS), 2005 年 3 月.
概要: Self-stabilization is a theoretical framework of non-masking fault-tolerant distributed algorithms. A self-stabilizing system tolerates any kind and any finite number of transient faults, such as message loss, memory corruption, and topology change. Because message loss and topology change occur so frequently in mobile ad hoc networks, distributed algorithms on them should tolerate such events. In this paper,

we propose a self-stabilizing distributed algorithm for computing a 5-spanner, which can be used, for example, as a basis for computing virtual backbone or routing in mobile ad hoc networks.

45. H. Kakugawa, and T. Masuzawa:
"A Self-Stabilizing Minimal Dominating Set Algorithm with Safe Convergence", Proc. the 8th Workshop on Advances on Parallel and Distributed Processing Symposium (APDCM) (Workshop of the 20th IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium), no.103, pp.8, 2006 年 4 月.
概要: A self-stabilizing distributed system is a fault-tolerant distributed system that tolerates any kind and any finite number of transient faults, such as message loss and memory corruption. In this paper, we formulate a concept of safe convergence in the framework of self-stabilization. An ordinary self-stabilizing algorithm has no safety guarantee while it is in converging from any initial configuration. The safe convergence property guarantees that a system quickly converges to a safe configuration, and then, it gracefully moves to an optimal configuration without breaking safety. Then, we propose a minimal independent dominating set algorithm with safe convergence property. Especially, the proposed algorithm computes the lexicographically first minimal independent dominating set according to the process identifier as a priority. The priority scheme can be arbitrarily changed such as stability, battery power and/or computation power of node.

46. Y. Nakaminami, H. Kakugawa, and T. Masuzawa:
"An Advanced Performance Analysis of Self-Stabilizing Protocols: Stabilization Time with Transient Faults During Convergence", Proc. the 8th Workshop on Advances on Parallel and Distributed Processing Symposium (APDCM) (Workshop of the 20th IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium), no.106, pp.8, 2006 年 4 月.
概要: A self-stabilizing protocol is a brilliant framework for fault tolerance. It can recover from any number and any type of transient faults and eventually converge to its intended behavior. Performance of a self-stabilizing protocol is usually measured by stabilization time: the time required to complete the convergence to its intended behavior under the assumption that no new fault occurs during the convergence. But a self-stabilizing protocol has no guarantee to complete the convergence if faults are frequently occurred. This paper brings new light to efficiency analysis of stabilization. The efficiency is evaluated with consideration for faults occurring during the convergence. To show the feasibility and effectiveness of the approach, this paper applies the approach to the maximal matching protocol.

47. H. Ito, K. Iwama, and T. Tamura:
"Efficient Methods for Determining DNA Probe Orders", IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, vol.E89-A, no.5, pp.1292–1298, 2006 年 5 月.
概要: In STS-based mapping, it is necessary to obtain the correct order of probes in a DNA sequence from a given set of fragments or an equivalently a hybridization matrix A. It is well-known that the problem is formulated as the combinatorial problem of obtaining a permutation of A's columns so that the resulting matrix has a consecutive-one property. If the data (the hybridization matrix) is error free and includes enough information, then the above column order uniquely determines the correct order of the probes. Unfortunately this does not hold if

the data include errors, and this has been a popular research target in computational biology. Even if there is no error, ambiguities in the probe order may still remain. This in fact happens because of the lack of some information regarding the data, but almost no further investigation has previously been made. In this paper, we define a measure of such imperfectness of the data as the minimum amount of the additional fragments that are needed to uniquely fix the probe order. Polynomial-time algorithms to compute such additional fragments of the minimum cost are presented. A computer simulation using genes of human chromosome 20 is also noted.

48. K. Sugihara, and H. Ito:
"Maximum-Cover Source-Location Problems", IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, vol.E89-A, no.5, pp.1370–1377, 2006 年 5 月.
概要: Given a graph $G = (V, E)$, a set of vertices $S \subseteq V$ covers $v \in V$ if the edge connectivity between S and v is at least a given number k. Vertices in S are called sources. The source location problem is a problem of finding a minimum-size source set covering all vertices of a given graph. This paper presents a new variation of the problem, called maximum-cover source-location problem, which finds a source set S with a given size p, maximizing the sum of the weight of vertices covered by S. It presents an $O(np + m + n \log n)$-time algorithm for $k = 2$, where $n = |V|$ and $m = |E|$. Especially it runs linear time if G is connected. This algorithm uses a subroutine for finding a subtree with the maximum weight among p-leaf trees of a given vertex-weighted tree. For the problem we give a greedy-based linear-time algorithm, which is an extension of the linear-time algorithm for finding a longest path of a given tree presented by E. W. Dijkstra around 1960. Moreover, we show some polynomial solvable cases, e.g., a given graph is a tree or $(k-1)$-edge-connected, and NP-hard cases, e.g., a vertex-cost function is given or G is a digraph.

49. S. Kato, S. Miyazaki, Y. Nishimura, and Y. Okabe:
"Cheat-Proof Serverless Network Games", 5th International Conference on Computers and Games (CG 2006), 2006 年 5 月.
概要: We consider playing online games on peer-to-peer networks, without assuming servers that control the execution of a game. In such an environment, players may cheat the opponent by, for example, illegally replacing the cards in their hands. The aim of this paper is to examine a possibility of excluding such cheatings. We show that by employing cryptographic techniques, we can exclude some types of cheating at some level. Finally, based on our discussion, we implement cheat-proof network "Gunjin-Shogi", which is a variant of Japanese Chess.

50. H. Ito:
"Harary's Generalized Ticktacktoe", IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, vol.J89-A, no.6, pp.458–469, 2006 年 6 月.
概要: The generalized ticktacktoe, presented by F. Harary, is a game that two players put a stone on a given square grid board alternately and one who make a given animal (figure) by his or her stones first is the winner. For any animal, if the both players play optimally, the first player wins (the animal is a winner) or the game is brought to a draw (the animal is a loser). The problem which animals are winners or losers have been investigated and have been solved for many animals. This paper sur-

veys the results, techniques, and open problems of the game, and discusses directions of feature work.

51. F. Ooshita, S. Matsumae, and T. Masuzawa:
"Scheduling Independent Tasks on Heterogeneous Parallel Computing Environments under the Unidirectional One-Port Model", Proc. the 2006 International Conference on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications (PDPTA'06), vol.2, pp.690–696, 2006年6月.
概要: For execution of computation-intensive applications, one of the most important paradigms is to divide the application into a large number of small independent tasks and execute them on heterogeneous parallel computing environments (abbreviated by HPCEs). In this paper, we aim to execute independent tasks efficiently on HPCEs. We consider the problem to find a schedule that maximizes the throughput of task execution for a huge number of independent tasks. First, we show that we can find, in polynomial time, a schedule that attains the optimal throughput. This algorithm, however, uses the ellipsoid method, hence it is very time-consuming. Therefore, secondly, we propose a fast $(3/2+\epsilon)$-approximation algorithm for any constant ϵ $(0 < \epsilon < 1)$. In addition, we also show that the framework of our approximation algorithm can be applied to other collective communications such as the gather operation.

52. K. Sugihara, and H. Ito:
"Maximum-Cover Source-Location Problem with Object Edge-Connectivity Three", Proc. Cologne-Twente Workshop on Graphs and Combinatorial Optimization (CTW 2006), pp.131–136, 2006年6月.
概要:

53. X. Han, K. Iwama, R. Klein, and A. Lingas:
"Approximating the Maximum Independent Set and Minimum Vertex coloring on box graphs", Proc. the 9th Japan-Korea Joint Workshop on Algorithms and Computation (WAAC 2006), pp.33–60, 2006年6月.
概要: A box graph is the intersection graph of a finite set of orthogonal rectangles in the plane. The problem of whether or not the maximum independent set problem (MIS for short) for box graphs can be approximated within a substantially sublogarithmic factor in polynomial time has been open for several years. We show that for box graphs on n vertices which have an independent set of size $\Omega(n/\log^{O(1)} n)$ the maximum independent set problem can be approximated within $O(\log n/\log\log n)$ in polynomial time. Furthermore, we show that the chromatic number of a box graph on n vertices is within an $O(\log n)$ factor from the size of its maximum clique and provide an $O(\log n)$ approximation algorithm for minimum vertex coloring of such a box graph. More generally, we can show that the chromatic number of the intersection graph of n d-dimensional orthogonal rectangles is within an $O(\log^{d-1} n)$ factor from the size of its maximum clique and obtain an $O(\log^{d-1} n)$ approximation algorithm for minimum vertex coloring of such an intersection graph.

54. K. Iwama:
"Classic and Quantum Network Coding (Invited Talk)", Proc. 10th Scandinavian Workshop on Algorithm Theory (SWAT 2006), LNCS 4059, pp.3–4, 2006年6月.
概要:

55. A. Ambainis, K. Iwama, A. Kawachi, R. Raymond, and S. Yamashita:
"Improved Algorithms for Quantum Identification of Boolean Oracles", Proc. 10th Scandinavian Workshop on Algorithm The-

ory (SWAT 2006), LNCS 4059, pp.280–291, 2006年6月.

概要: The oracle identification problem (OIP) was introduced by Ambainis et al. [3]. It is given as a set S of M oracles and a blackbox oracle f. Our task is to figure out which oracle in S is equal to the blackbox f by making queries to f. OIP includes several problems such as the Grover Search as special cases. In this paper, we improve the algorithms in [3] by providing a mostly optimal upper bound of query complexity for this problem: (i) For any oracle set S such that $|S| \leq 2^{N^d}$ $(d < 1)$, we design an algorithm whose query complexity is, $O(\sqrt{N \log N / \log N})$ matching the lower bound proved in [3]. (ii) Our algorithm also works for the range between 2^{N^d} and $2^{N/\log N}$ (where the bound becomes $O(N)$), but the gap between the upper and lower bounds worsens gradually. (iii) Our algorithm is robust, namely, it exhibits the same performance (up to a constant factor) against the noisy oracles as also shown in the literatures [2, 11, 18] for special cases of OIP.

56. M. Hayashi, K. Iwama, H. Nishimura, R. Raymond, and S. Yamashita:
"(4,1)-Quantum Random Access Coding Does Not Exist", Proc. of IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT 2006), pp.446–450, 2006年6月.

概要: An $(n, 1, p)$-Quantum Random Access (QRA) coding, introduced by Ambainis, Nayak, Ta-shma and Vazirani in ACM Symp. on Theory of Computing 1999, is the following communication system: The sender which has n-bit information encodes his/her information into one qubit, which is sent to the receiver. The receiver can recover any one bit of the original n bits correctly with probability at least p, through a certain decoding process based on positive operator-valued measures. Actually, Ambainis et al. shows the existence of a (2,1,0.85)-QRA coding and also proves the impossibility of its classical counterpart. Chuang immediately extends it to a (3,1,0.79)-QRA coding and whether or not a $(4, 1, p)$-QRA coding such that $p > 1/2$ exists has been open since then. This paper gives a negative answer to this open question.

57. Y. Nakaminami, T. Masuzawa, and T. Herman:
"Linear-State-Transition Protocols: Asynchronous Protocols with Ease of Efficiency Evaluation", Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication (JACIC), vol.3, no.6, pp.281–293, 2006年6月.

概要: Distributed systems are commonly modeled by asynchronous models where no assumption is made about process execution speed. The asynchronous model is preferable to the synchronous one because the model reflects the fact that a distributed system consists of heterogeneous computers and their performance varies with time depending on their loads. However, the asynchrony of the system makes it difficult to evaluate efficiency (performance) of distributed protocols.To diminish the difficulty, this paper introduces a class of distributed protocols called linear-state-transition protocols (LST protocols) in the shared-state model and shows that efficiency of the LST protocols in the asynchronous distributed model can be derived from analysis of their synchronous execution where all processes are synchronized in the lock-step fashion. This provides an effective method for evaluating efficiency of the LST protocols in the asynchronous distributed model. The paper also demonstrates the effectiveness of the method by applying it to the self-stabilizing alternator.

58. T. Izumi, and T. Masuzawa:
"Condition Adaptation in Synchronous Consensus", IEEE Transactions on Computers, vol.55, issue 7, pp.843–853, 2006年7月.
概要: The condition-based approach is one of the sophisticated methods used to overcome several impossibility results in the distributed consensus problem (e.g., impossibility of fault tolerance in asynchronous consensus or time complexity lower bounds in synchronous consensus). It introduces conditions on input vectors to specify subsets of all possible input vectors to consensus algorithms and condition-based algorithms can circumvent the impossibility if actual input vectors satisfy a particular condition. In this paper, we present a new condition-based paradigm for synchronous consensus. We introduce the new concept of adaptation on the time complexity of condition-based algorithms and present the adaptive condition-based approach to synchronous consensus. In our approach, all possible input vectors are classified into hierarchical conditions according to their difficulty called the legality level. The execution time of adaptive condition-based algorithms depends on the legality level of input vectors. We propose two adaptive condition-based algorithms for synchronous consensus. The first algorithm requires that the majority of processes be correct, and terminates within $\min\{f+2, t+1\}-l$ rounds if $l < f$, where f and t are the actual and the maximum numbers of faults, respectively, and l is the legality level of the input vector. Moreover, the algorithm terminates in one round if $l \geq t$ and $f = 0$ and terminates within two rounds if $l \geq f$ holds. Compared with previous algorithms, this algorithm achieves the best time complexity. The second algorithm can tolerate any number of faults, and terminates within $\max\{3, \min\{f+3, t+2\}-l\}$ rounds if $l < f$ holds, terminates in one round if $l \geq t$ and $f = 0$, and terminates within three rounds if $l \geq f$ holds.

59. Y. Kiyonari, E. Miyano, and S. Miyazaki:
"Computational Complexity Issues in University Interview Timetabling", Proc. the 6th International Conference on the Practice and Theory of Automated Timetabling (PATAT 2006), pp.448–453, 2006年8月.
概要: This paper introduces a new timetabling problem on universities, called interview timetabling. In this problem, some constant number, say, three, of referees are assigned to each of $2n$ graduate students. It requires to assign these students to an $n \times 2$ array, consisting of n timeslots and two rooms, so that two students sharing the same referee must be assigned to different timeslots. Furthermore, we want to minimize the total number of movements of all referees between two rooms. This is a problem actually having arisen in the interview timetabling in Kyoto University. We propose two restricted models of this problem, and investigate their time complexities.

60. K. Iwama, and H. Morizumi:
"Reductions for Monotone Boolean Circuits", Proc. the 31st International Symposium on Mathematical Foundations of Computer Science (MFCS 2006), LNCS 4162, pp.540–548, 2006年8月.
概要: The large class, say *NLOG*, of Boolean functions, including 0-1 Sort and 0-1 Merge, have an upper bound of $O(n \log n)$ for their monotone circuit size, i.e., have circuits with $O(n \log n)$ AND/OR gates of fan-in two. Suppose that we can use, besides such normal AND/OR gates, any number of more powerful "F-gates" which realize a monotone Boolean function F with $r(\geq 2)$ inputs and $r'(\geq 1)$ outputs. Note that the cost of each AND/OR gate is one and we

assume that the cost of each F-gate is r. Now we define: A Boolean function f in NLOG is said to be F-Easy if f can be constructed by a circuit with AND/OR/F gates whose total cost is $o(n \log n)$. In this paper we show that 0-1 Merge is not F-Easy for an arbitrary monotone function F such that $r' \leq r/\log r$.

61. M. Hayashi, K. Iwama, H. Nishimura, R. Raymond, and S. Yamashita:
"(4,1)-Quantum Random Access Coding does not Exist — One Qubit is not Enough to Recover One of Four Bits", New Journal of Physics, vol.8, no.129, 2006 年 8 月.
概要: An $(n, 1, p)$-quantum random access (QRA) coding, introduced by Ambainis et al (1999 *ACM Symp. Theory of Computing* p 376), is the following communication system: the sender which has n-bit information encodes his/her information into one qubit, which is sent to the receiver. The receiver can recover any one bit of the original n bits correctly with probability at least p, through a certain decoding process based on positive operator-valued measures. Actually, Ambainis et al shows the existence of a (2,1,0.85)-QRA coding and also proves the impossibility of its classical counterpart. Chuang immediately extends it to a (3,1,0.79)-QRA coding and whether or not a (4,1,p)-QRA coding such that $p > 1/2$ exists has been open since then. This paper gives a negative answer to this open question. Moreover, we generalize its negative answer for one-qubit encoding to the case of multiple-qubit encoding.

62. K. Iwama, S. Miyazaki, and K. Okamoto:
"A $(2 - c \log N/N)$-Approximation Algorithm for the Stable Marriage Problem", IEICE Transactions on Information and Systems, vol.E89-D, no.8, pp.2380–2387, 2006 年 8 月.
概要: An instance of the classical stable marriage problem requires all participants to submit a strictly ordered preference list containing all members of the opposite sex. However, considering applications in real-world, we can think of two natural relaxations, namely, incomplete preference lists and ties in the lists. Either variation leaves the problem polynomially solvable, but it is known that finding a maximum cardinality stable matching is NP-hard when both variations are allowed. It is easy to see that the size of any two stable matchings differ by at most a factor of two, and so, an approximation algorithm with a factor two is trivial. A few approximation algorithms have been proposed with approximation ratio better than two, but they are only for restricted instances, such as restricting occurrence of ties and/or lengths of ties. Up to the present, there is no known approximation algorithm with ratio better than two for general inputs. In this paper, we give the first nontrivial result for approximation of factor less than two for general instances. Our algorithm achieves the ratio $2 - c\frac{\log N}{N}$ for an arbitrarily positive constant c, where N denotes the number of men in an input.

63. T. Imamura, K. Iwama, and T. Tsukiji:
"Approximated Vertex Cover for Graphs with Perfect Matchings", IEICE Transactions on Information and Systems, vol.E89-D, no.8, pp.2405–2410, 2006 年 8 月.
概要: Chen and Kanj considered the VERTEX COVER problem for graphs with perfect matchings (VC-PM). They showed that: (i) There is a reduction from general VERTEX COVER to VC-PM, which guarantees that if one can achieve an approximation factor of less than two for VC-PM, then one can do so for general VERTEX COVER as well. (ii) There is an algorithm for VC-PM whose approximation factor is given as $1.069 + 0.069d$ where d is the average degree of the given graph. In this paper we improve

(ii). Namely we give a new VC-PM algorithm which greatly outperforms the above one and its approximation factor is roughly $2-6.74/d+6.28$. Our algorithm also works for graphs with "large" matchings, although its approximation factor is degenerated.

64. T. Izumi, and T. Masuzawa:
"One-Step Consensus Solvability", Proc. the 20th International Symposium on Distributed Computing (DISC 2006), LNCS 4167, pp.224–237, 2006 年 9 月.
概要: While any fault-tolerant asynchronous consensus algorithm requires two communication steps even in failure-free executions, it is known that we can construct an algorithm terminating in one step for some good inputs (e.g. all processes propose a same value). In this paper, we present the necessary and sufficient constraint for the set of inputs for which we can construct an asynchronous consensus algorithm terminating in one step. Our investigation is based on the notion of the condition-based approach: it introduces conditions on input vectors to specify subsets of all possible input vectors and condition-based algorithms can circumvent some impossibility if the actual input vector satisfy a particular condition. More interestingly, conditions treated in this paper are adaptive. That is, we consider hierarchical sequences of conditions whose k-th condition is the set of input vectors for which the consensus can be solved in one step if at most k processes crash. The necessary and sufficient constraint we propose in this paper is one for such condition sequences. In addition, we present an instance of the sufficient condition sequences. Compared with existing constraints for inputs this instance is more relaxed.

65. Y. Sakurai, F. Ooshita, and T. Masuzawa:
"A Self-Stabilizing Link-Coloring Protocol in Tree Networks with Permanent Byzantine Faults", Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication (JACIC), Vol.3, No.9, pp.424–437, 2006 年 9 月.
概要: Self-stabilizing protocols can tolerate any type and any number of transient faults. But self-stabilizing protocols have no guarantee of their behavior against permanent faults. Thus, investigation concerning self-stabilizing protocols resilient to permanent faults is important. This paper proposes a self-stabilizing link-coloring protocol resilient to permanent Byzantine faults in tree networks. The protocol assumes the central daemon, and uses $\Delta+1$ colors where Δ is the maximum degree in the network. This protocol guarantees that, for any non-faulty process v, if the distance from v to any Byzantine ancestor of v is greater than two, v reaches its desired states within three rounds and never changes its states after that. Thus, it achieves fault containment with radius of two. Moreover, we prove that the containment radius becomes $\Omega(\log n)$ when we use only Δ colors, and prove that the containment radius becomes $\Omega(n)$ under the distributed daemon. These lower bound results prove necessity of $\Delta+1$ colors and the central daemon to achieve fault containment with a constant radius.

66. Y. Asahiro, T. Horiyama, K. Makino, H. Ono, T. Sakuma, and M. Yamashita:
"How to Collect Balls Moving in the Euclidean Plane", Discrete Applied Mathematics, vol.154/16, pp.2247–2262, 2006 年 11 月.
概要: In this paper, we study how to collect n balls moving with a fixed constant velocity in the Euclidean plane by k robots moving on straight track-lines through the origin. Since all the balls might not be caught by robots, differently from Moving-target TSP, we consider the following 3 problems

in various situations: (i) deciding if k robots can collect all n balls; (ii) maximizing the number of the balls collected by k robots; (iii) minimizing the number of the robots to collect all n balls. The situations considered in this paper contain the cases in which track-lines are given (or not), and track-lines are identical (or not). For all problems and situations, we provide polynomial time algorithms or proofs of intractability, which clarify the tractability-intractability frontier in the ball collecting problems in the Euclidean plane.

67. Y. Hanatani, T. Horiyama, and K. Iwama: "Density Condensation of Boolean Formulas", Discrete Applied Mathematics, vol.154/16, pp.2263–2270, 2006 年 11 月.
概要: We consider problems of reasoning with a knowledge-base, which is represented by an ordered binary decision diagram (OBDD), for two cases of general and Horn knowledge-bases. Our main results say that both finding a model of a knowledge-base and deducing from a knowledge-base can be done in linear time for a general knowledge-base, but that abduction is NP-complete even for a Horn knowledge-base. Then, we consider abduction when its assumption set consists of all propositional literals (i.e., an answer for a given query is allowed to include any positive literals), and show that it can be done in polynomial time if the knowledge-base is Horn, while it remains NP-complete for the general case. Some other solvable cases are also discussed.

68. H. Ito, and H. Nagamochi: "Two Equivalent Measures on Weighted Hypergraphs", Discrete Applied Mathematics, vol.154/16, pp.2330–2334, 2006 年 11 月.
概要: Let $H = (N, E, w)$ be a hypergraph with a node set $N = \{0, 1, \ldots, n-1\}$, a hyperedge set $E \subseteq 2^N$, and real edge-weights $w(e)$ for $e \in E$. Given a convex n-gon P in the plane with vertices $x_0, x_1, \ldots, x_{n-1}$ which are arranged in this order clockwisely, let each node $i \in N$ correspond to the vertex x_i and define the area $A_P(H)$ of H on P by the sum of the weighted areas of convex hulls for all hyperedges in H. For $0 \leq i < j < k \leq n-1$, a convex three-cut $C(i,j,k)$ of N is $\{\{i, \ldots, j-1\}, \{j, \ldots, k-1\}, \{k, \ldots, n-1, 0, \ldots, i-1\}\}$ and its size $c_H(i,j,k)$ in H is defined as the sum of weights of edges eE such that e contains at least one node from each of $\{i, \ldots, j-1\}$, $\{j, \ldots, k-1\}$ and $\{k, \ldots, n-1, 0, \ldots, i-1\}$. We show that the following two conditions are equivalent:
· $A_P(H) \leq A_P(H')$ for all convex n-gons P.
· $c_H(i,j,k) c'_H\ (i,j,k)$ for all convex three-cuts $C(i,j,k)$.
From this property, a polynomial time algorithm for determining whether or not given weighted hypergraphs H and H' satisfy "$A_P(H) \leq A_P(H')''$ for all convex n-gons P'' is immediately obtained.

69. T. Masuzawa, and S. Tixeuil: "Bounding the Impact of Unbounded Attacks in Stabilization", Proc. the 8th International Symposium on Stabilization, Safety and Security of Distributed Systems (SSS 2006), LNCS 4280, pp.440–453, 2006 年 11 月.
概要: As a new challenge of containing the unbounded influence of Byzantine processes in self-stabilizing protocols, this paper introduces a novel concept of strong stabilization. The strong stabilization relaxes the requirement of strict stabilization so that processes beyond the containment radius are allowed to be disturbed by Byzantine processes, but only a limited number of times. A self-stabilizing protocol is (t, c, f)-strongly stabilizing if any process more than c hops away from any Byzantine process is disturbed at most t times in a distributed

system with at most f Byzantine processes. Here c denotes the containment radius and t denotes the containment times. The possibility and the effectiveness of the strong stabilization is demonstrated using tree orientation. It is known that the tree orientation has no strictly stabilizing protocol with a constant containment radius. This paper first shows that the problem has no constant bound of the containment radius in a tree with two Byzantine processes even when we allow processes beyond the containment radius to be disturbed any finite number of times. Then we consider the case of a single Byzantine process and present a $(1, 0, 1)$-strongly stabilizing protocol, which achieves optimality in both containment radius and times.

70. T. Masuzawa, and S. Tixeuil:
"On Bootstrapping Topology Knowledge in Anonymous Networks", Proc. the 8th International Symposium on Stabilization, Safety and Security of Distributed Systems (SSS 2006), LNCS 4280, pp.454–468, 2006 年 11 月.
概要: In this paper, we quantify the amount of " practical " information (i.e. views obtained from the neighbors, colors attributed to the nodes and links) to obtain " theoretical " information (i.e. the local topology of the network up to distance k) in anonymous networks. In more details, we show that a coloring at distance $2k + 1$ is necessary and sufficient to obtain the local topology at distance k that includes outgoing links. This bound drops to $2k$ when outgoing links are not needed. A second contribution of this paper deals with color bootstrapping (from which local topology can be obtained using the aforementioned mechanisms). On the negative side, we show that (i) with a distributed daemon, it is impossible to achieve deterministic color bootstrap, even if the whole network topology can be instantaneously obtained, and (ii) with a central daemon, it is impossible to achieve distance m when instantaneous topology knowledge is limited to m . 1. On the positive side, we show that (i) under the k-central daemon, deterministic self-stabilizing bootstrap of colors up to distance k is possible provided that k-local topology can be instantaneously obtained, and (ii) under the distributed daemon, probabilistic self-stabilizing bootstrap is possible for any range.

71. Y. Yamauchi, S. Kamei, F. Ooshita, Y. Katayama, H. Kakugawa, and T. Masuzawa:
"Composition of Fault-Containing Protocols Based on Recovery Waiting, Fault-Containing Composition Framework", Proc. the 8th International Symposium on Stabilization, Safety and Security of Distributed Systems (SSS 2006), LNCS 4280, pp.516–532, 2006 年 11 月.
概要: Self-stabilizing protocols provide autonomous recovery from finite number of transient faults. Fault-containing self-stabilizing protocols promise not only self-stabilization but also quick recovery from and small effect of a small number of faults. However, existing composition techniques of self-stabilizing protocols (e.g. fair composition) cannot preserve the fault-containment property when composing fault-containing protocols. In this paper, we present *Recovery Waiting Fault-containing Composition* (*RWFC*) framework that preserves the fault-containment property of the composed protocol. We show an example of fault-containing composition of a minimum spanning tree protocol on arbitrary weighted graphs and a median finding protocol on trees via *RWFC*.

72. Y. Wu, T. Izumi, F. Ooshita, H. Kakugawa,

and T. Masuzawa:
"An Adaptive Randomised Searching Protocol in Peer-to-Peer Systems Based on Probabilistic Weak Quorum System", Proc. the 8th International Symposium on Stabilization, Safety and Security of Distributed Systems (SSS 2006), LNCS 4280, pp.586–587, 2006 年 11 月.
概要: In this paper we propose a new Peer-to-peer searching protocol called Adaptive Randomised Searching Protocol (ARSP) which is an efficient extension of the searching protocol based on Probabilistic Weak Quorum System (PWQS). ARSP has good characteristics such as scalability, load balance and self-stabilization inherited from the original protocol. In addition, it achieves better message complexity which is self-optimized to the minimum according to network environment.

73. K. Iwama:
"Stable Matching Problems (Invited Talk)", Proc. International Symposium on Symbolic and Algebraic Computation (ISAAC 2006), LNCS 4288, pp.1, 2006 年 12 月.
概要:

74. T. Horiyama, K. Iwama, and J. Kawahara:
"Finite-State Online Algorithms and Their Automated Competitive Analysis", Proc. the 17th Annual International Symposium on Algorithms (ISAAC 2006), LNCS 4288, pp.71–80, 2006 年 12 月.
概要: In this paper we study the Revocable Online Knapsack Problem (ROKP) which is an extension of the Online Knapsack Problem. We prove an optimal upper bound of $1/t$ for the competitive ratio of ROKP, where t is a real root of $4x^3+5x^2-x-4=0$ ($t \approx 0.76850$ and $1/t \approx 1.3012$). To prove this result, we made a full use of computer programs as follows: For the base algorithm that is designed in a conventional manner, we first construct an equivalent finite state diagram with about 300 states. Then for each state, we generate a finite set of inequalities such that the competitive ratio at that state is at most $1/t$ if the set of inequalities do not have a real solution. The latter can be checked by Mathematica. The number of inequalities generated was approximately 600 in total, and our computation time was 30 minutes using Athlon XP 2600+.

75. K. Iwama, H. Morizumi, and J. Tarui:
"Negation-Limited Complexity of Parity and Inverters", Proc. the 17th Annual International Symposium on Algorithms (ISAAC 2006), LNCS 4288, pp.223–232, 2006 年 12 月.
概要: We give improved lower bounds for the size of negation-limited circuits computing Parity and for the size of negation-limited inverters. An inverter is a circuit with inputs $x_1, \ldots, x_n$ and outputs $\neg x_1, \ldots, \neg x_n$. We show that (1) For $n = 2^r - 1$, circuits computing Parity with $r-1$ NOT gates have size at least $6n - \log_2(n+1) - O(1)$ and (2) For $n = 2^r - 1$, inverters with r NOT gates have size at least $8n - \log_2(n+1) - O(1)$. We derive our bounds above by considering the minimum size of a circuit with at most r NOT gates that computes Parity for *sorted* inputs $x_1 \geq \cdots \geq x_n$. For an *arbitrary* r, we completely determine the minimum size. For odd n, it is $2n-r-2$ for $\lceil \log_2(n+1) \rceil - 1 \leq r \leq n/2$, and it is $\lfloor 3/2\, n \rfloor - 1$ for $r \geq n/2$. We also determine the minimum size of an *inverter for sorted inputs* with at most r NOT gates. It is $4n - 3r$ for $\lceil \log_2(n+1) \rceil \leq r \leq n$. In particular, the negation-limited inverter for sorted inputs due to Fischer, which is a core component in all the known constructions of negation-limited inverters, is shown to have the minimum possible size. Our fairly simple lower bound proofs use gate elimination

arguments.

76. T. Izumi, and T. Masuzawa:
"A Weakly-Adaptive Condition-Based Consensus Algorithm in Asynchronous Distributed Systems", Information Processing Letters, vol.100, issue 5, pp.199–205, 2006年12月.
概要: The condition-based consensus is one of sophisticated approaches to circumvent the insolvability of the consensus problem in asynchronous distributed systems prone to crash faults. It is specified by conditions on input vectors, and condition-based consensus algorithms can correctly solves the consensus if actual input vectors satisfy a particular condition. In this paper, we study about the feasibility of the adaptive condition-based consensus in asynchronous systems. In the adaptive condition-based consensus, all possible input vectors are classified into hierarchical conditions according to their difficulty. We consider consensus algorithms as the following form: They are instantiated by a condition sequence of $t+1$ hierarchical conditions, where t is the maximum number of crash faults, and guarantee to solve the consensus problem if the input vector belongs to the k-th class in the hierarchy and at most k processes crash. This paper proposes the notion of legality, which completely characterinzes the property of condition sequences for which adaptive condition-based consensus algorithms exist. In addition, we also show an instance of legal condition sequences. It is defined for a threshold value k. If the actual number of crash faults is smaller than k, the example for this condition sequence solves the consensus problem for a larger set of input vectors than the non-adaptive algorithm. However, if more than k processes crash, this algorithm solves the consensus only for a small set of input vectors than the existing one. In this sense, this algorithm is weakly-adaptive.

77. T. Suzuki, T. Izumi, F. Ooshita, and T. Masuzawa:
"Self-Adaptive Mobile Agent Population Control in Dynamic Networks Based on the Single Species Population Model", IEICE Transactions on Information and Systems, vol.E90-D, no.1, pp.314–324, 2007年1月.
概要: Mobile-agent-based distributed computing is one of the most promising paradigms to support autonomic computing in a large-scale of distributed system with dynamics and diversity: mobile agents traverse the distributed system and carry out a sophisticated task at each node adaptively. In mobile-agent-based systems, a larger number of agents generally require shorter time to complete the whole task but consume more resources (e.g., processing power and network bandwidth). Therefore, it is indispensable to keep an appropriate number of agents for the application on the mobile-agent-based system. This paper considers the mobile agent population control problem in dynamic networks: it requires adjusting the number of agents to a constant fraction of the current network size. This paper proposes algorithms inspired by the single species population model, which is a well-known population ecology model. These two algorithms are different in knowledge of networks each node requires. The first algorithm requires global information at each node, while the second algorithm requires only the local information. This paper shows by simulations that the both algorithms realize self-adaptation of mobile agent population in dynamic networks, but the second algorithm attains slightly lower accuracy than the first one.

78. 山内由紀子，中南良浩，大下福仁，増澤利光
:

“無線ネットワークにおける距離 2 の彩色を利用した TDMA スケジュール法”, 情報処理学会論文誌, 第 48 巻, no.1, pp.327–341, 2007 年 1 月.

概要: 無線ネットワークにおける通信方式として，衝突なし通信を実現する TDMA（時分割多重）通信がよく用いられている．効率的な TDMA 通信を実現するには，各ノードが送受信するタイミングを決める TDMA スケジューリングが重要である．これまでにいくつかの TDMA スケジューリングが提案されているが，それらの手法は，帯域の利用率が低い，各ノードの送信帯域の最小保証値が示されていないなどの問題を有する．そこで，本稿では，距離 2 の彩色結果を利用した，帯域の利用率が高い TDMA スケジューリングを提案する．また，提案手法における，各ノードの送信帯域の最小保証値を示す．さらに，シミュレーションにより，提案手法の帯域利用率についても測定し，既存の TDMA スケジューリングである Ramanathan の手法に対しては 38.9 ∼ 9.2% の改善，神崎らの手法に対しては 7.4 ∼ 3.9% の改善を実現し，既存手法に対して帯域の高い利用率を達成していることを示す.

79. N. Bansal, X. Han, K. Iwama, M. Sviridenko, and G. Zhang:
“Harmonic Algorithm for 3-Dimensional Strip Packing Problem”, Proc. 18th Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms (SODA 2007), pp.1197–1206, 2007 年 1 月.

概要: In the three dimensional strip packing problem, we are given a set of three-dimensional rectangular items $I = \{(x_i, y_i, z_i) : i = 1, \ldots, n\}$ and a three dimensional box B. The goal is to pack all the items in the box B without any overlap, such that the height of the packing is minimized. We consider the most basic version of the problem, where the items must be packed with their edges parallel to the edges of B and cannot be rotated. Building upon Caprara's work for the two dimensional bin packing problem we obtain an approximation algorithm with a similar performance guarantee of $T_\infty \approx 1.69$ where T_∞ is the well known Harmonic number that occurs naturally in the context of bin packing. The previously known approximation algorithms for this problem had worst case performance guarantees of 2, 2.64, 2.67, 2.89 and 3.25. Our second algorithm is an asymptotic PTAS for the case in which all items have *square* bases.

80. K. Iwama, S. Miyazaki, and N. Yamauchi:
“A 1.875-Approximation Algorithm for the Stable Marriage Problem”, Proc. 18th ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms (SODA 2007), pp.288–297, 2007 年 1 月.

概要: We consider the problem of finding a stable matching of maximum size when both ties and unacceptable partners are allowed in preference lists. This problem is known to be APX-hard, and the current best known approximation algorithm achieves the approximation ratio $2 - c\frac{1}{\sqrt{N}}$, where c is some positive constant. In this paper, we give a 1.875–approximation algorithm, which is the first result on the approximation ratio better than two.

81. Y. Asahiro, E. Miyano, S. Miyazaki, and T. Yoshimuta:
“Weighted Nearest Neighbor Algorithms for the Graph Exploration Problem on Cycles”, Proc. 33rd Conference on Current Trends in Theory and Practice of Informatics (SOFSEM 2007), LNCS 4362, pp.164–175, 2007 年 1 月.

概要: In the graph exploration problem, a searcher explores the whole set of nodes of an unknown graph. The searcher is not aware of the existence of an edge until he/she visits one of its endpoints. The searcher's task is to visit all the nodes and go back to the starting node by traveling as

a short tour as possible. One of the simplest strategies is the nearest neighbor algorithm (NN), which always chooses the unvisited node nearest to the searcher's current position. The weighted NN (WNN) is an extension of NN, which chooses the next node to visit by using the weighted distance. It is known that WNN with weight 3 is 16-competitive for planar graphs. In this paper we prove that NN achieves the competitive ratio of 1.5 for cycles. In addition, we show that the analysis for the competitive ratio of NN is tight by providing an instance for which the bound of 1.5 is attained, and NN is the best for cycles among WNN with all possible weights. Furthermore, we prove that no online algorithm is better than 1.25-competitive.

82. F. Ooshita, S. Matsumae, and T. Masuzawa:
"Scheduling for Independent-Task Applications on Heterogeneous Parallel Computing Environments under the Unidirectional One-Port Model", IEICE Transactions on Information and Systems, vol.E90-D, no.2, pp.403–417, 2007年2月.
概要: For execution of computation-intensive applications, one of the most important paradigms is to divide the application into a large number of small independent tasks and execute them on heterogeneous parallel computing environments (abbreviated by HPCEs). In this paper, we aim to execute independent tasks efficiently on HPCEs. We consider the problem to find a schedule that maximizes the throughput of task execution for a huge number of independent tasks. First, for HPCEs where the network forms a directed acyclic graph, we show that we can find, in polynomial time, a schedule that attains the optimal throughput. Secondly, for arbitrary HPCEs, we propose an $(3/2 + \epsilon)$-approximation algorithm for any constant $\epsilon(\epsilon > 0)$. In addition, we also show that the framework of our approximation algorithm can be applied to other collective communications such as the gather operation.

83. H. Fujiwara, K. Iwama, and K. Yonezawa:
"Online Chasing Problems for Regular n-Gons", The 5th International Conference on Research, Innovation and Vision for the Future (RIVF2007), pp.36–41, 2007年3月.
概要:

84. Y. Wu, T. Izumi, F. Ooshita, H. Kakugawa, and T. Masuzawa:
"An Adaptive Randomized Searching Protocol in Peer-to-Peer Systems", Proc. the 22nd Annual ACM Symposium on Applied Computing, 2007年3月.
概要: Search problem, which is to identify the peer that has a target resource object, is an important problem in Peer-to-Peer (P2P) file sharing systems. Since P2P systems maintain large and dynamic sets of peers, the search protocol is desired to be scalable and adaptive. In this paper we propose a new Peer-to-peer search protocol, called Adaptive Randomized Search Protocol (ARSP), which is an efficient extension of the Quorum-Based Protocol for Searching Objects in Peer-to-Peer Networks. ARSP minimizes the communication cost of the protocol according to objects' popularity. Interestingly, the protocol works in the self-adaptive manner: it can automatically adapt to the dynamics of network environments.

85. J. Akiyama, H. Fukuda, H. Ito, and G. Nakamura:
"Infinite series of generalized Gospher space filling curves", Proc. the China-Japan Joint Conference on Discrete Geometry and Graph Theory (CJCDGCGT2005), pp.1–9, 2007年3月.
概要:

86. H. Ito:
"Impossibility of transformation of vertex labeled simple graphs preserving the cut-size order", Proc. the China-Japan Joint Conference on Discrete Geometry and Graph Theory (CJCDGCGT2005), pp.59–69, 2007年3月.
概要:

87. M. Hayashi, K. Iwama, H. Nishimura, R. Raymond, and S. Yamashita:
"Quantum Network Coding", Proc. 24th International Symposium on Theoretical Aspects of Computer Science (STACS 2007), pp. 610–621, 2007年.
概要:

88. T. Horiyama, K. Iwama, and D. Sumita:
"Truthful Auctions with Limited Range of Bids", Proc. of the 5th Hungarian-Japanese Symposium on Discrete Mathematics and Its Applications, pp.53–61, 2007年4月.
概要: We study single-round and sealed-bid truthful auctions with unlimited supply of goods.] In this paper, we propose to analyze the behavior of truthful auctions by introducing a parameter r that indicates the ratio between the minimum and the maximum bid values. By making use of the minimum and the maximum bid values, five truthful auction algorithms are proposed. We can achieve the competitive ratio $\ln r+1$, which gives better results than the conventional sampling cost sharing auction for small r. Lower bound analysis is also given. For the two bidders auction, the competitive ratio is at least $2-\frac{1}{r}$ for any truthful auctions. Similar bound holds for general case.

89. W. Bein, J. Correa, and X. Han:
"A Fast Asymptotic Approximation Scheme for Bin Packing with Rejection", Proc. the First International Symposium on Combinatorics, Algorithms, Probabilistic and Experimental Methodologies (ESCAPE 2007), LNCS 4614, 2007年4月.
概要: The bin packing with rejection problem is the following: Given a list of items with associated sizes and rejection costs, find a packing into unit bins of a subset of the list such that the number of bins used plus the sum of rejection costs of unpacked items is minimized. In this paper, we first show that bin packing with rejection can be reduced to n multiple knapsack problems. Then, based on techniques for the multiple knapsack problem we give a fast asymptotic polynomial time approximation scheme with time complexity $O(n^{O(\epsilon^{-2})})$. This improves a recent approximation scheme given by Epstein, which has time complexity $O(n^{O((\epsilon^{-4})^{\epsilon^{-1}})})$. Finally, we show that our algorithm can be extended to variable-sized bin packing with rejection and give an asymptotic polynomial time approximation scheme for it.

90. X. Han, K. Iwama, D. Ye, and G. Zhang:
"Strip Packing vs. Bin Packing", The Third International Conference on Algorithmic Aspects in Information and Management (AAIM 2007), LNCS 4508, 2007年6月.
概要: In this paper we establish a general algorithmic framework between bin packing and strip packing, with which we achieve the same asymptotic bounds by applying bin packing algorithms to strip packing. More precisely we obtain the following results: (1) Any offline bin packing algorithm can be applied to strip packing maintaining the same asymptotic worst-case ratio. Thus using FFD (First Fit Decreasing Height) as a subroutine, we get a practical (simple and fast) algorithm for strip packing with an upper bound 11/9. (2) A class of Harmonic-based algorithms for bin packing can be applied to online strip packing maintaining the same asymptotic competitive ratio. It implies online strip packing

admits an upper bound of 1.58889 on the asymptotic competitive ratio. This significantly improves the previously best bound of 1.6910 and affirmatively answers an open question.

91. K. Iwama, E. Miyano, and H. Ono:
"Drawing Borders Efficiently", Proc. 4th International Conference on Fun with Algorithms (FUN 2007), LNCS 4475, pp.213–226, 2007年6月.
概要:

92. S. Bereg, and H. Ito:
"Transformating Graphs with the Same Graphic Sequences", Kyoto International Conference on Computational Geometry and Graph theory — in honor of Jin Akiyama and Vašek Chvátal on their 60th birthdays (KyotoCGGT2007), 2007年6月.
概要:

93. H. Ito, G. Nakamura, and S. Takata:
"Winning Ways of Weighted Poset Games", Kyoto International Conference on Computational Geometry and Graph theory — in honor of Jin Akiyama and Vašek Chvátal on their 60th birthdays (KyotoCGGT2007), 2007年6月.
概要:

94. K. Kobayashi, S. Miyazaki, and Y. Okabe:
"A Tight Bound on Online Buffer Management for Two-port Shared-Memory Switches", Proc. 19th ACM Symposium on Parallelism in Algorithms and Architectures (SPAA 2007), pp.358–364, 2007年6月.
概要: The online buffer management problem formulates the problem of queueing policies of network switches supporting QoS (Quality of Service) guarantee. For this problem, several models are considered. In this paper, we focus on shared memory switches with preemption. We prove that the competitive ratio of the Longest Queue Drop (LQD) policy is $\frac{4M-4}{3M-2}$ in the case of $N = 2$, where N is the number of output ports in a switch and M is the size of the buffer. This matches the lower bound given by Hahne, Kesselman and Mansour. Also, in the case of arbitrary N, we improve the competitive ratio of LQD from 2 to $2 - \frac{1}{M}\min_{K=1,2,\ldots,N}\{\lfloor\frac{M}{K}\rfloor + K - 1\}$.

95. Taisuke Izumi, Akinori Saitoh, Toshimitsu Masuzawa:
"Adaptive timeliness of consensus in presence of crash and timing faults", Journal of Parallel and Distributed Computing, Vol. 67, No. 6, pp.648-658, 2007年6月.
概要: The Δ-timed uniform consensus is a stronger variant of the traditional consensus and it satisfies the following additional property: Every correct process terminates its execution within a constant time Δ (Δ-timeliness), and no two processes decide differently (Uniformity). In this paper, we consider the Δ-timed uniform consensus problem in presence of f_c crash processes and f_t timing-faulty processes, and propose a Δ-timed uniform consensus algorithm. The proposed algorithm is adaptive in the following sense: It solves the Δ-timed uniform consensus when at least $f_t + 1$ correct processes exist in the system. If the system has less than f_t+1 correct processes, the algorithm cannot solve the Δ-timed uniform consensus. However, as long as $f_t + 1$ processes are non-crashed, the algorithm solves (non-timed) uniform consensus. We also investigate the maximum number of faulty processes that can be tolerated. We show that any Δ-timed uniform consensus algorithm tolerating up to f_t timing-faulty processes requires that the system has at least $f_t + 1$ correct processes. This impossibility result implies that the proposed algorithm attains the maximum resilience about the number of faulty processes. We also show that any Δ-timed uniform consensus

algorithm tolerating up to f_t timing-faulty processes cannot solve the (non-timed) uniform consensus when the system has less than $f_t + 1$ non-crashed processes. This impossibility result implies that our algorithm attains the maximum adaptiveness.

96. Tomoko Suzuki, Taisuke Izumi, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa, Toshimitsu Masuzawa:
"Optimal moves for gossiping among mobile agents", Proc. 14th International Colloquium on Structual Information and Communication Complexity (SIROCCO 2007), LNCS 4474, pp.151–165, 2007年6月.
概要: In mobile-agent-based systems, gossip is the most fundamental scheme supporting cooperation among mobile agents. It requires to accomplish all-to-all information exchange over all agents so that each agent can obtain the all information each agent initially has. Rendezvous algorithms, which require that all the agents rendezvous on a node at a time, can achieve this requirement, however it takes excessive cost for our objective. In this paper, we newly introduce the mobile agent gossip problem. In this problem, an agent can obtain the information of another agent by meeting the agent itself or the agent that has already got the information. The gossip scheme is expected to accomplish the all-to-all information exchange with a smaller number of agents' moves than the rendezvous algorithms. We propose mobile agent gossip algorithms on several network topologies, and prove that all proposed algorithms are asymptotically optimal in term of the number of moves.

97. H. Ito, M. Kobayashi, and G. Nakamura:
"Semi-Distance Codes and Steiner Systems", Akiyama-Chvátal Festschrift, Supplement of Graphs and Combinatorics, vol.23, pp.283–290, 2007年6月.
概要:

98. H. Ito, G. Nakamura, and S. Takata:
"Winning Ways of Weighted Poset Games", Akiyama-Chvátal Festschrift, Supplement of Graphs and Combinatorics, vol.23, pp.291–306, 2007年6月.
概要: In this paper, we introduce the *weighted poset game*, which is defined as an extension of the poset (partially-ordered set) game by adding a weight on every element of the poset. Each player has their own non-negative number of lives, and loses as many lives as the sum of the element weights they took. The player whose lives become negative first is the loser. We consider winning ways of this problem. First, for the problem with $\{0, 1\}$-weights, we find that (1) if the number of lives are different, then the player who has the large number of lives is the winner, (2) if the number of lives are the same and all maximal elements have positive weights, then the second player is a winner, and (3) otherwise, the game is reduced to an (unweighted) poset game. Next, for general weights, we consider the case where the partial order is a total order, and derive a polynomial-time algorithm for calculating who is the winner and the winning way for the winner.

99. A. Ambainis, K. Iwama, A. Kawachi, R. Raymond, and S. Yamashita:
"Improved Algorithms for Quantum Identification of Boolean Oracles", Theoretical Computer Science, vol.378, no.1, pp.41–53, 2007年6月.
概要:

100. K. Iwama, and S. Tamaki:
"Exploiting Partial Knowledge of Satisfying Assignments", Discrete Applied Mathematics, vol.155, no.12, pp.1596–1603, 2007年6月.
概要: Recently Schoning has shown that a simple local-search algorithm for 3SAT achieves the currently best upper bound,

i.e., an expected time of 1.334^n. In this paper, we show that this algorithm can be modified to run much faster if there is some kind of imbalance in satisfying assignments and we have a (partial) knowledge about that. Especially if a satisfying assignment has imbalanced 0's and 1's, i.e., $p_1 n$ 1's and $(1-p_1)n$ 0's, then we can find a solution in time 1.260^n when $p_1 = 1/3$ and 1.072^n when $p_1 = 0.1$. Such an imbalance often exists in SAT instances reduced from other problems. As a concrete example, we investigate a reduction from 3DM and show our new approach is nontrivially faster than its direct algorithms. Preliminary experimental results are also given.

101. K. Iwama, and T. Nakashima:
"An Improved Exact Algorithm for Cubic Graph TSP", Proc. the 13th Annual International Computing and Combinatorics Conference (COCOON 2007), LNCS 4598, pp.108–117, 2007年7月.
概要: It is shown that the traveling salesman problem for graphs of degree at most three with n vertices can be solved in time $O(1.251^n)$, improving the previous bound $O(1.260^n)$ by Eppstein.

102. X. Deng, K. Iwama, Q. Qi, A. W. Sun, and T. Tasaka:
"Properties of Symmetric Incentive Compatible Auctions", Proc. the 13th Annual International Computing and Combinatorics Conference (COCOON 2007), LNCS 4598, pp.264–273, 2007年7月.
概要: We formalize the definition of symmetric auctions to study fundamental properties of incentive compatible auction protocols. We characterize such auction protocols for those with a fixed number of items to sell and study some important properties of those with an indefinite number of sales.

103. K. Iwama, H. Nishimura, R. Raymond, and S. Yamashita:
"Unbounded-Error One-Way Classical and Quantum Communication Complexity", Proc. 34th International Colloquium on Automata, Languages and Programming (ICALP 2007), LNCS 4596, 2007年7月.
概要:

104. M. M. Halldorsson, K. Iwama, S. Miyazaki, and H. Yanagisawa:
"Improved Approximation Results for the Stable Marriage Problem", ACM Transactions on Algorithms, vol.3, 3/30, 2007年8月.
概要: The stable marriage problem has recently been studied in its general setting, where both ties and incomplete lists are allowed. It is NP-hard to find a stable matching of maximum size, while any stable matching is a maximal matching and thus trivially we can obtain a 2-approximation algorithm. In this paper, we give the first nontrivial result for approximation of factor less than two. Our algorithm achieves an approximation ratio of $2/(1+L^{-2})$ for instances in which only men have ties of length at most L. When both men and women are allowed to have ties, but the lengths are limited to two, then we show a ratio of 13/7. We also improve the lower bound on the approximation ratio to 21/19.

105. K. Iwama, S. Miyazaki, and K. Okamoto:
"Stable Roommates Problem with Triple Rooms", Proc. the 10th Japan-Korea Joint Workshop on Algorithms and Computation (WAAC 2007), pp.105–112, 2007年8月.
概要: In the stable roommates problem, we are given 2N men and each person 's preference list. We are asked to find a stable matching, namely, a set of N pairs satisfying the stability condition. This problem is known to be solved in polynomial time; more precisely, there is a polynomial-time algorithm to find a stable matching for a

given instance, or to report that a given instance has no stable matching. In this paper, we extend this problem into three-dimension, i.e., a matching is defined to be a set of triples, and show that this problem is NP-complete.

106. K. Iwama, S. Miyazaki, and H. Yanagisawa: "Approximation Algorithms for the Sex-Equal Stable Marriage Problem", Proc. 10th Workshop on Algorithms and Data Structures (WADS 2007), LNCS 4619, pp.201–213, 2007年8月.
概要: The stable marriage problem is a classical matching problem introduced by Gale and Shapley. It is known that for any instance, there exists a solution, and there is a polynomial time algorithm to find one. However, the matching obtained by this algorithm is man-optimal, that is, the matching is preferable for men but unpreferable for women, (or, if we exchange the role of men and women, the resulting matching is woman-optimal). The sex-equal stable marriage problem, posed by Gusfield and Irving, asks to find a stable matching "fair" for both genders, namely it asks to find a stable matching with the property that the sum of the men's score is as close as possible to that of the women's. This problem is known to be strongly NP-hard. In this paper, we give a polynomial time algorithm for finding *a near optimal* solution in the sex-equal stable marriage problem. Furthermore, we consider the problem of optimizing additional criterion: among stable matchings that are near optimal in terms of the sex-equality, find a minimum egalitarian stable matching. We show that this problem is NP-hard, and give a polynomial time algorithm whose approximation ratio is less than two.

107. K. Iwama, and G. Zhang:
"Optimal Resource Augmentations for Online Knapsack", Proc. 10th International Workshop on Approximation Algorithms for Combinatorial Optimization Problems (APPROX 2007), 2007年8月.
概要:

108. H. Ito, and H. Miyagawa:
"Snaky is a Winner with One Handicap", Proc. 8th Hellenic European Conference on Computer Mathematics and its Applications (HERCMA 2007), pp.25–26, 2007年9月.
概要: Harary's generalized ticktacktoe, a kind of achievement games, have been investigated in many literatures. All animals (polyominos) except for "Snaky" have been decided whether they are winners orlosers, i.e., Snaky is a unique unsolved animal. Moreover the handicap number, which is the minimum number of stones preset by the first player before starting the play for winning the game, of the Snaky have been known only at most two. That the handicap number of an animal is zero means it is a winner. In this paper we show a winning strategy of Snaky with one handicap. From this result we can see that the handicap number of Snaky is zero or one.

109. Shay Kutten, Toshimitsu Masuzazwa:
"Output stability versus time till output", Proc. the 21st International Symposium on Distributed Computing (DISC 2007), LNCS 4731, pp. 343–357, 2007年9月.
概要: Consider a network whose inputs change rapidly, or are subject to frequent faults. This is expected often to be the case in the foreseen huge sensor networks. Suppose, that an algorithm is required to output the majority value of the inputs. To address such networks, it is desirable to be able to stabilize the output fast, and to give guarantees on the outputs even before stabilization, even if additional changes occur. We bound the instability of the outputs (the

number of times the output changes) of majority consensus algorithms even before the final stabilization. We show that the instability can be traded off with their time adaptvity (how fast they are required to stabilize the output if f faults occurred). First, for the extreme point of the trade-off, we achieve instability that is optimal for the class of algorithms that are optimal in their output time adaptivity. This is done for various known versions of majority consensus problem. The optimal instability for this case is $\Omega(\log f)$ and is shown to be $O(\log f)$ for most versions and $O(\log n)$ in some cases. Previous such algorithms did not have such a guarantee on the behaviour of the output before its final stabilization (and their instability was $\Omega(n)$). We also explain how to adapt the results for other points in the trade off. The output stabilization in previous algorithms was adaptive only if the faults ceased for $O(\mathbf{Diam})$ time. An additional result in this paper uses adaptations of some previous tools, as well as the new tools developed here for bounding the instability, in order to remove this limitation that is undesirable when changes are frequent.

110. W. Bein, K. Iwama, J. Kawahara, L. Larmore, and J. Oravec:
"A Randomized Algorithm for Two Servers in Cross Polytope Spaces", Proc. 5th Workshop on Approximation and Online Algorithms (WAOA 2007), LNCS 4927, pp.246–259, 2007年10月.
概要: It has been a long-standing open problem to determine the exact randomized competitiveness of the 2-server problem, that is, the minimum competitiveness of any randomized online algorithm for the 2-server problem. For deterministic algorithms the best competitive ratio that can be obtained is 2 and no randomized algorithm is known that improves this ratio for general spaces. For the line, Bartal et al. give a $\frac{155}{78}$ competitive algorithm, but their algorithm is specific to the geometry of the line. We consider here the 2-server problem over Cross Polytope Spaces $M_{2,4}$. We obtain an algorithm with competitive ratio of $\frac{19}{12}$, and show that this ratio is best possible. This algorithm gives the second non-trivial example of metric spaces with better than 2 competitive ratio. The algorithm uses a design technique called the knowledge state technique - a method not specific to $M_{2,4}$.

111. K. Iwama, H. Nishimura, R. Raymond, and S. Yamashita:
"Unbounded-error classical and quantum communication complexity", Proc. the 18th International Symposium on Algorithms and Computation (ISAAC 2007), LNCS 4835, pp.100 – 111, 2007年12月.
概要:

112. Toshimitsu Masuzawa, Sebastien Tixeuil:
"Stabilizing link-coloration of arbitrary networks with unbounded Byzantine faults", International Journal of Principles and Applications of Information Science and Technology, Vol. 1, No. 1, pp.1–13, 2007年12月.
概要: Self-stabilizing protocols can tolerate any type and any number of transient faults. However, in general, self-stabilizing protocols provide no guarantee about their behavior against permanent faults. This paper considers self-stabilizing link-coloring resilient to (permanent) Byzantine faults in arbitrary anonymous networks. First, we show that stabilizing link-coloring is impossible in anonymous cycles when there is no constraint on the spatial scheduling of processes. Then, given the assumption that no correct neighbors execute their actions simultaneously, we present a self-stabilizing link-coloring protocol that is also resilient to Byzantine faults in arbitrary anonymous

networks. The protocol uses $2\Delta - 1$ colors where Δ is the maximum degree in the network. This protocol guarantees that any link (u, v) between non faulty processes u and v is assigned a color within $2\Delta + 2$ rounds and its color remains unchanged thereafter. Our protocol is Byzantine insensitive in the sense that the subsystem of correct processes remains operating properly in spite of unbounded Byzantine faults.

113. H. Ito, M. Paterson, and K. Sugihara:
"Multi-Commodity Source Location Problems and Price of Greed", Proc. the 2nd Workshop in Algorithms and Computation (WALCOM 2008), LNCS 4921, 2008 年 2 月.
概要: Given a graph $G = (V, E)$, we say that a vertex subset $S \subseteq V$ covers a vertex $v \in V$ if the edge-connectivity between S and v is at least a given integer k, and also say that S covers an edge $vw \in E$ if v and w are covered. We propose the multi-commodity source location problem, which is such that given a vertex- and edge-weighted graph G, r players each select p vertices, and obtain a profit that is the total weight of covered vertices and edges. However, vertices selected by one player cannot be selected by the other players. The goal is to maximize the total profits of all players. We show that the *price of greed*, which indicates the ratio of the total profit of cooperating players to that of selfish players, is tightly bounded by $\min\{r, p\}$. Also when $k = 2$, we obtain tight bounds for vertex-unweighted trees.

114. 西川元, 山内由紀子, 大下福仁, 角川裕次, 増澤利光:
"モバイルアドホックネットワークにおける公平性の高い自己安定相互排除プロトコル", 電子情報通信学会論文誌 (A), (研究速報), 掲載予定, .
概要: 本稿ではモバイルアドホックネットワークにおける自己安定相互排除プロトコルについて考察し，既存の Chen らの手法に対し，公平性を改善したプロトコルを提案する．シミュレーション実験により，Chen らの手法に比べ，提案手法では，全体の性能を維持したまま公平性が向上することを示す.

115. Tomoko Suzuk, Taisuke Izumi, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa, Toshimitsu Masuzawa:
"Move-optimal gossiping among mobile agents", Theoretical Computer Science, 掲載予定, .
概要: In this paper, we introduce the mobile agent gossip problem, in which each agent must obtain the information all other agents have. Each agent p_i can obtain the information of p_j ($\neq p_i$) by meeting p_j itself or any agent that already has information of p_j. Thus, the gossip is expected to accomplish the all-to-all information exchange with a smaller number of agents' moves than the rendezvous algorithms. In this paper, we investigate the complexity of the mobile agent gossip problem in terms of the total number of moves performed by agents. For several network topologies, we show the asymptotically tight upper and lower bounds for move complexity. This result is obtained from the fact that the mobile agent gossip problem and the node leader election problem is reducible to each other.

116. 乾広二, 鈴木朋子, 大下福仁, 角川裕次, 増澤利光:
"構造化オーバレイネットワークにおける故障耐性向上のための経路多重化法", 電子情報通信学会論文誌 (DI) , 掲載予定, .
概要: オーバレイネットワークとは実ネットワーク上に構成される論理的ネットワークである．特に，構造化オーバレイネットワークとはノード間の隣接関係に規則性があるオーバレイネットワークであり，その代表例として分散ハッシュテーブル (DHT) がある．多くの構造化オーバレイネットワークでは，その

規則的構造から任意のノードへ効率的にメッセージを配送可能である．しかしメッセージを配送する経路上に故障ノードが存在する場合，メッセージを配送することができない．この問題を解決する手法として，マルチパス，ワイドパスなどの経路の多重化がある．マルチパスは低コストで実現できるが故障耐性が十分でなく，ワイドパスは高い故障耐性を有する反面，高コストである．そこで本論文では，これらの手法を組み合わせた手法 (マルチワイドパス) を提案する．さらに，代表的な DHT である Chord に対し，マルチパス，ワイドパス，マルチワイドパスをそれぞれ適用し，各手法の故障耐性とコストを解析とシミュレーションにより評価する．結果，提案手法は既存手法に比べて同程度の故障耐性を低コストで実現できることを示す．

117. Yukiko Yamauchi, Doina Bein, Toshimitsu Masuzawa,:
"Ring embedding preserving the fault-containment", Proc. the 7th International Conference on Applications and Principles of Information Science (APIS2008), 掲載予定, .
概要: We present a new method, called causal simulation, that enables fault-containing ring protocols to be executed in rooted trees while the fault containing property is preserved. Causal simulation is a weaker notion than simulation, defined by Lynch over the set of configurations of two different protocols, but is strong enough to guarantee that the simulating protocol can execute the same task as the original protocol.

118. Yusuke Takahashi, Taisuke Izumi, Hirotsugu Kakugawa, Toshimitsu Masuzawa:
"The deterministic decay bloom filter", Proc. the 7th International Conference on Applications and Principles of Information Science (APIS2008), 掲載予定, .
概要: Using bloom filters is one of popular and efficient lookup methods in P2P networks. In this paper, we propose an efficient extension of the bloom filter, called a Deterministic Decay Bloom Filter (DDBF). While index dissemination based on a standard bloom filter suffers performance degradation by containing information of too many data items when its dissemination radius is large, the DDBF can circumvent such degradation by limiting information according to the distance between the filter holder and the items holders. Interestingly, the construction of DDBFs is assessed no extra cost compared with that of standard filters. We also show by simulation that our method can achieve better lookup performance than existing ones.

研究会等

1. 岡本和也，宮崎修一，岩間一雄:
"局所探索法による安定結婚問題の近似", 信学技報 COMP2004-8 (電子情報通信学会コンピュテーション研究会), Vol.104, No.16, pp.53-60, 2004 年 4 月.
概要: 安定結婚問題の例題では，各個人の希望リストは異性全員を含み，完全に順位付けされている必要がある．しかし，実世界での応用を考えると，ペアになりたくない相手は希望リストに書かない不完全リストや，好みが同じ程度の人は優劣をつけなくて良い同順位リストという 2 つの自然な拡張が考えられる．どちらか一方の拡張のみを許した問題は多項式時間で解くことができるが，両方の拡張を許した場合，最大サイズの安定マッチングを見つける問題は NP 困難になることが知られている．任意の 2 つの安定マッチングのサイズは最大でも 2 倍しか異ならないということは簡単にわかるため，近似度が 2 の近似アルゴリズムは自明である．2 よりも良い近似度を実現する近似アルゴリズムを与える結果はいくつか知られているが，それらは，例えば同順位の長さや出現数などの制限を加えられた下でのものだけである．現在まで一般的な入力に対し，近似度が 2 未満となる近似

アルゴリズムは知られていない．本論文では，一般的な例題に対し，近似度が 2 未満となる非自明な結果を初めて示した．我々のアルゴリズムの近似度は $2 - c\frac{\log N}{N}$ である．(ここで，c は任意の正定数で，N は入力中の男性の数である．)

2. Taisuke Izumi, Akinori Saitoh, Toshimitsu Masuzawa:
"Timed uniform consensus protocol tolerating crash and timing faults", 電子情報通信学会技術研究報告 DC2004-7, Vol. 104, No. 13, pp.33-38, 2004 年 4 月.
概要: Δ-timed uniform consensus is a stronger variant of the traditional consensus and it satisfies the following additional property: The correct process terminates its execution within a constant time Δ (Δ-timeliness), and no two processes decide differently (Uniformity). In this paper, we consider the Δ-timed uniform consensus problem in presence of f_t crash processes and f_c timing-faulty processes. This paper proposes a Δ-timed uniform consensus algorithms. The proposed algorithm is adaptive in the following sense: It solves the Δ-timed uniform consensus when at least $f_t + 1$ correct processes exist in the system. If the system has less than $f_t + 1$ correct processes, the algorithm cannot solve the Δ-timed uniform consensus. However, as long as $f_t + 1$ processes are alive, the algorithm solves (non-timed) uniform consensus. We also investigate the maximum number of faulty processes that can be tolerated. We show that any Δ-timed uniform consensus algorithm tolerating up to f_t timing-faulty processes requires that the system has at least $f_t + 1$ correct processes. This impossibility result implies that the proposed algorithm attains the maximal resilience about the number of faulty processes. We also show that any Δ-timed uniform consensus algorithm tolerating up to f_t timing-faulty processes cannot solve the (non-timed) uniform consensus when the system has less than $f_t + 1$ non-crashed processes. This impossibility result implies that our algorithm attains the maximum adaptiveness.

3. 中塚裕之, 堀山貴史, 岩間一雄, :
"逆算法に基づく詰将棋の列挙", 信学技報 COMP2004-20 (電子情報通信学会コンピュテーション研究会), Vol.104, pp.11-18, 2004 年 6 月.
概要: 近年の計算機の高速化や大容量化， 洗練されたアルゴリズム設計法の発展により，与えられた条件を満たす解を 1 つだけでなくすべて列挙することが，実用上要請されるようになってきている． 本研究では，逆算法による詰将棋の列挙アルゴリズムを提案する．従来手法では，詰将棋となる可能性のある局面を数え挙げ， これを順に詰将棋解答プログラムに解かせて それぞれが詰将棋として成立していることを確認しているため， 実行時間が長くなりがちである．本手法では，逆算法により詰め手数の少ないものから順に詰将棋を列挙することで，詰将棋解答プログラムを用いることなく， 与えられた条件下で可能な詰将棋を高速に列挙することができる． また，提案アルゴリズムを C 言語で実装し， 桂図式等の複数の条件において列挙を行う． 生成可能なものをすべて数え挙げられるため，例えば桂図式は最長手数が 9 手である等， 各図式の最長手数を証明したことになる．

4. 河内亮周, 山下茂, 岩間一雄:
"オラクル同定問題に対する頑健な量子アルゴリズム", 情報処理学会 アルゴリズム研究会, 情処研報, 2004-AL-96, pp.1–8, 2004 年 7 月.
概要: オラクル同定問題とは n ビット入力 1 ビット出力のオラクルの集合 $S = \{f_1, ..., f_M\}$ と S に属する未知のオラクル f_i が与えられたとき， 未知のオラクル f_i を S の中から同定する問題であり，数多くの問題の一般化になっている．本稿では， 与えられた未知のオラクルクエリーの結果が 正しい値と誤った値が重ね合わせ状態として出力され

る場合の オラクル同定問題（但し，誤った計算結果が得られる確率は 1/2 より小さい定数確率，例えば 1/10 以下とする.）に対して以下を示す． (i) 与えられたオラクル集合のサイズが $N = 2^n$ の場合（すなわち $M = N$.），エラー付きオラクル同定問題をクエリー回数 $O(\sqrt{N})$ で少なくとも 定数確率で解く量子アルゴリズムが構成できる． (ii) 与えられたオラクル集合のサイズが N の場合， 各 $x \in \{0,1\}^n$ で $f_i(x) = 1$ を満たす i の数に関するパラメータ K に関して ある条件を満たすとき，エラー付きオラクル同定問題を クエリー回数 $O(\sqrt{N/K})$ で 少なくとも定数確率で解く量子アルゴリズムが構成できる．

5. 川原 純，堀山貴史，岩間一雄:
“オンラインアルゴリズムの競合比証明の自動化について”, 2004 年夏の LA シンポジウム, pp.22.1–22.4, 2004 年 7 月.
概要: 種々のオンライン問題では，オンラインアルゴリズムを設計し， 競合比を計算するが，しばしば場合分けが膨大な数に及ぶことがある．今回はそのような問題の代表としてオンラインナップザック問題を考える．オンラインナップザック問題はプレイヤはアイテムが一つずつ順番に与えられ， そのたびにそのアイテムをナップザックの中に入れるか捨てるかを決める オンライン問題である．この問題の競合比上限を証明するとき，アイテムのサイズによる場合分けが 20 種類以上にも及ぶことが分かった [1]． そこで，この場合分けを計算機を用いて自動的に生成し，競合比の証明を行う．本稿では交換可能オンラインナップザック問題 (EOK) での $k = 2$ の場合の上限が 1.3334 であることを計算機を用いて証明を行った．

6. Xin Han, Kazuo Iwama. Guochuan Zhang:
“On-line Removable Square Packing”, 夏の LA シンポジウム, 2004 年 7 月.
概要: In this paper, we consider an on-line square packing problem: Given a list of squares with side length of at most 1, we are asked to pack a subset of them, in an on-line manner and without any overlap, into a unit square bin so that the packed area (the total area of squares packed) is as large as possible. We assume that removal is allowed. It means that a packed square can be removed from the square bin. However, once a square is rejected or removed it will never been considered again. We first show a lower bound of 2.618 for any on-line algorithm. Then we propose an on-line algorithm based on partitioning the square bin into bricks and show a competitive ratio of 3. As a byproduct it is proved that any list of squares with total area no more than 1/3 can be on-line packed in a unit square, which improves the previous best known result by Januszewski and Lassak.

7. Taisuke Izumi, Toshimitsu Masuzawa:
“Synchronous condition-based consensus algorithm adapting to input-vector legality”, 電子情報通信学会技術研究報告 COMP2004-31, Vol. 104, No. 314, pp.41-48, 2004 年 9 月.
概要: This paper proposes a novel condition-based algorithm for the uniform consensus in synchronous systems. The proposed algorithm is *adaptive* in the sense that its execution time depends on actual difficulty of input vectors, *legality level*, which is newly formalized in this paper. On the assumption that majority of processes are correct, the algorithm terminates within $\min\{f+2-l, t+1\}$ rounds if $l < f$, where f and t is the actual and the maximum numbers of faults respectively, and l is the legality level of input vectors. Moreover, the algorithm terminates in 1 round if $l \geq t$ and $f = 0$, and terminates within 2 rounds if $l \geq f$ holds. Compared with previous algorithms, for the case of $t < n/2$, the algorithm achieves the best time complexity in almost all situations.

8. 鈴木朋子, 泉泰介, 大下福仁, 増澤利光:
“動的ネットワークにおける生態系パラダイ

ムに基づくモバイルエージェント数制御", 情報処理学会数理モデル化と問題解決研究会 2004-MPS-52 (17) 資料, Vol.2004, No.130, pp.65-68, 2004 年 12 月.
概要: 分散システムの効果的な実現法として, モバイルエージェントを利用した設計法への期待が高まっている. モバイルエージェントを利用した分散システムでは, ネットワーク中の　エージェント数が多いほど処理に要する時間が減少するが, システムの負荷は増加する. 従って, ネットワーク中のエージェント数をネットワークの規模に対して適切に設定することが重要である. 本研究では, 動的に変化するネットワークにおいて, エージェント数をノード数の一定割合に保つ問題について考察し, 生態系パラダイムに基づいた手法を提案する. また, 提案手法がエージェント数をノード数に対して所定の比に保つことをシミュレーションによって示す.

9. 田村武幸, 伊藤大雄, 岩間一雄:
"遺伝的な距離に基づいた家系図推定問題", 電子情報通信学会 コンピュテーション研究会, 信学技報 Vol.104, No.642, pp33-39, 2005 年 1 月.
概要: 進化系統樹とは地球上の生物が, 共通の祖先から進化したと考えた時の, 種間の進化的な関係を表現した木構造である. 遺伝的な情報から進化系統樹を推定する方法に対する研究はさかんに行われてきた. また系統樹の一部に修正を加えたデータ構造を推定する研究も近年行われきている. これに対し, 家系図は進化系統樹をさらに詳しくしたものと考えることができる. 進化系統樹をグラフで表現すれば有向木になるのに対し, 家系図は入次数が 2 以下の非閉路的有向グラフとなる. 本稿では, 与えられた 2 節点間の遺伝的距離を満足する家系図を全て列挙する問題を考え, 所望の家系図の全てが, 節点数を増やすことなく一つの有向グラフで表現できることを示し, それを得る $O(n^3)$ 時間アルゴリズムを与える.

10. Yoichi Hanatani, Takashi Horiyama, Kazuo Iwama:
"Hajós Calculus on Planar Graphs", 冬の LA シンポジウム, 2005 年 1 月.
概要: The Hajós calculus is a nondeterministic procedure which generates the class of non-3-colorable graphs. Unless NP $\neq$ co-NP, there must exist graphs which need exponential steps to be constructed in the Hajós calculus, however it is not known. In this paper, we propose new systems of graph calculus which generate the class of non-3-colorable planar graphs and show its upper bound.

11. 添田祐司, 泉泰介, 増澤利光:
"分散環境における順位つき資源への部分探索法の提案", 情報処理学会マルチメディア通信と分散処理研究会資料, 2005 年 3 月.
概要: 分散システム内に分散配置された資源の検索にかかるコストを小さくする方法 として部分検索法が提案されている. 部分検索法とは, 検索条件を満たす資源すべてではなく, その部分集合を検索結果とする手法である. しかし, 既知の部分検索法では, 利用者の要求に対して検索結果の精度が保証されていない. 本稿では, 順位つき資源に対して, 利用者が得る検索結果の精度を保証する部分検索法を定式化する. また, 効率のよい部分検索法を実現する方法として, 各サーバが資源を, その順位に基づく保持確率で保持する確率的配置法を提案する. 確率的配置法において, 順位の高い資源ほど保持確率を高くすることで小さい検索コストを実現できることを示す. また, 保持確率関数が与えられたとき, 保持確率関数をステップ型の関数に変換することで, 検索にかかるコストを悪化させることなく, 順位の変動等によるシステム更新にかかるコストを改善できることを示す.

12. 角田大輔, 堀山貴史, 岩間一雄:
"入札額の範囲が制限された正直なオークション", 電子情報通信学会 コンピュテーション研究会, 信学技報, vol.105, COMP2005-6, pp.39–47, 2005 年 4 月.
概要: 1 回入札, 秘密入札 (入札額が他人には分からない入札) の 正直なオークション

(truthful auction) を扱う．正直なオークションでは，正直に入札すること，すなわち自分にとっての真の利用価値を自分の入札値とすることで，最良の利得を得ることが保証される．正直なオークションを実現するアルゴリズムの性能評価には競合比が用いられ，これまでに下界が 2.42 であることが知られている． また，CORE アルゴリズムが提案されており，競合比 3.39 を達成している． 本報告では，入札額の最大値と最小値の比が高々 r 倍以内である時に，競合比 $\ln r + 1$ を達成するオークションアルゴリズムを提案する．最初に，基本となるアルゴリズムとして，他の入札者の最低入札額を提示額とする最低入札額オークションを示す． このアルゴリズムを拡張することで，最低入札額またはその定数倍の複数の提示額をもつオークションを提案する． 提示額の種類を増化させることで競合比は改善され，確率分布により提示額を決定することで競合比 $\ln r + 1$ を達成する

13. 山内直哉, 宮崎修一, 岩間一雄:
“安定結婚問題に対する局所探索近似アルゴリズムの改良”, 電子情報通信学会 コンピュテーション研究会, 信学技報, vol.105, no.72, COMP2005-15, pp.45–51, 2005 年 5 月.
概要: 安定結婚問題において，同順位リストと不完全リストの存在を許した問題に対して最大サイズの安定マッチングを見つける問題を考える． この問題は NP 困難であり，現在知られている最良の近似アルゴリズムは，$(2 - c\frac{\log N}{N})$-近似アルゴリズムである．(ここで，c は任意の正定数であり，N は入力中の男性の数である．) 本論文では，この近似度を $2 - c\frac{1}{N^{\frac{2}{3}}}$ に改良した．(c は $c \leq \frac{1}{2\sqrt[3]{6}}$ を満たす正定数である．)

14. Taisuke Izumi, and Toshimitsu Masuzawa:
“On solvability of one-step consensus”, 電子情報通信学会技術研究報告 DC2005-8, Vol.105, No.123, pp.7-12, 2005 年 6 月.
概要: While any fault-tolerant asynchronous consensus algorithm requires two communication steps even in failure-free executions, it is known that we can construct the algorithm terminating in one step for some good inputs (e.g. all processes propose a same value). In this paper, we present the necessary and sufficient constraint for the set of inputs for which we can construct the asynchronous consensus algorithm terminating in one step. Our investigation is based on the notion of the condition-based approach: it introduces conditions on input vectors to specify subsets of all possible input vectors and condition-based algorithms can circumvent some impossibility if the actual input vector satisfy a particular condition. More interestingly, conditions treated in this paper are adaptive. That is, we consider hierarchical sequences of conditions whose k-th condition is the set of input vector for which the consensus can be solved in one step even if at most k processes crash. The necessary and sufficient constraint we propose in this paper is one for such condition sequences. In addition, we present several instances of the sufficient condition sequences. Compared with existing constraint for inputs (i.e. all processes propose a same value), all of these instances are more relaxed.

15. 山内由紀子, 中南良浩, 大下福仁, 増澤利光:
“無線ネットワークにおける距離 2 の彩色を利用した TDMA スケジュール手法”, 情報処理学会研究報告（マルチメディア通信と分散処理, 2005-DPS-123), Vol.2005，No.58, pp.69-74, 2005 年 6 月.
概要: 無線ネットワークにおける通信方式として，衝突なし通信を実現する TDMA（時分割多重）通信がよく用いられている．効率的な TDMA 通信を実現するには，各ノードが送受信するタイミングを決める TDMA スケジューリングが重要である．これまでにいくつかの TDMA スケジューリングが提案されているが，それらの手法は，帯域の利用率が低い，各ノードの送信帯域の最小保証値が示されていないなどの問題を有する．そこで，本稿では，距離 2 の彩色結果を利用した，帯

域の利用率の高い TDMA スケジューリングを提案する．また，提案手法における，各ノードの送信帯域の最小保証値を示す．さらに，シミュレーションによって，既存の TDMA スケジューリングに比べ，提案手法が帯域の高い利用率を達成していることを示す．

16. 小林浩二, 宮崎修一, 岡部寿男:
“共有メモリ型スイッチにおけるオンラインバッファ管理アルゴリズムの競合比の改良”, 電子情報通信学会 コンピュテーション研究会, 信学技報, vol.105, no.144, COMP2005-21, pp.17–22, 2005 年 6 月.
概要: オンラインバッファ管理問題は，近年のネットワーク運用における主要な論点となっている QoS (Quality of Service) 保証実現のための，スイッチなどの キュー管理をオンライン問題として定式化した問題であり，様々なモデルが考案されている．本論文ではその中の 1 つである 共有メモリ型スイッチを扱ったモデルを取り上げる． 我々は，アルゴリズム Longest Queue Policy (LQD) の競合比の既知の上限を $2 - 1/N$ に改良した．ここで，N はスイッチの出力ポート数である．

17. 杉原堅也, 伊藤大雄:
“最大被覆供給点配置問題に関する考察”, 2005 年夏の LA シンポジウム, pp.25.1–25.12, 2005 年 7 月.
概要: 供給点配置問題とは，グラフ $G = (V, E)$ が与えられたとき，全ての節点を被覆する最小要素の供給点集合 $S \subseteq V$ を見つける問題である．ただし，節点部分集合 $S \subseteq V$ が節点 $v \in V$ を被覆するとは，S と v の枝連結度が与えられた整数 k 以上となっていることを言う．本稿では，この問題を変形した最大被覆供給点問題を提案し，本問題について考察を行う．本問題は，グラフ G と各節点の重みが与えられたとき，被覆される節点の重みの和が最大となるような要素数が p 個の供給点集合 $S \subseteq V$ をみつける問題である．本稿では，$k = 2$ の場合における $O(np+n\log n+m)$ 時間アルゴリズムを示し，特に G が連結グラフの場合には線形時間アルゴリズムが存在することを示す．このアルゴリズムは，与えられた節点重みの付いた木から葉が p 個の最大重み部分木をみつけるというサブルーチンを用いており，このサブルーチンはダイクストラによる木の最長路を求めるアルゴリズムの拡張となっている．さらに本稿では，G が $(k-1)$-枝連結グラフの場合や木の場合における多項式時間アルゴリズムを示す．また，G が有向グラフの場合，もしくは節点に供給点を配置するコストを与えた場合に本問題が NP-困難となることを示す．

18. 森住大樹, 岩間一雄:
“否定数を $\log(n+1)$ に限定した回路計算量の下界について”， 夏の LA シンポジウム, pp.30.1–30.4, 2005 年 7 月.
概要: 本稿では，否定数を $\log(n+1)$ に限定した回路における n 入力 2 出力論理関数 (PARITY, ¬PARITY) の 回路計算量の下界が $5n - c$ であることを示す． 否定数を限定しない場合の現在知られている最高の下界は $5n - o(n)$ であるが，否定数を限定することによって それより上の下界が得られることも期待できる． 本稿の内容は，$5n - o(n)$ を越えることには至っていないが，より単純な関数を用いてほぼ同等の下界を得るものである． また，否定数を $\lceil\log(n+1)\rceil$ に限定した回路において $\omega(n\log(n))$ の下界を示すことができれば，一般の回路における 同等の下界を示したことになることが知られており，否定数を $\lceil\log(n+1)\rceil$ に限定した回路の回路計算量を 調べることは特別な意味を持つ．

19. 堀山貴史, 中塚裕之, 岩間一雄:
“逆算法に基づく詰将棋の列挙”, 特定領域研究 新世代の計算限界 ミニ研究集会 (組合せゲーム・パズル), 2005 年 9 月.
概要: 近年の計算機の高速化やメモリ量の増加，洗練されたアルゴリズム設計法の発展により，与えられた条件を満たす解を 1 つだけでなく すべて列挙することが，実用上要請されるようになってきている． 本発表では，逆算法による詰将棋の列挙アルゴリズムを提案する． 逆算法により詰め手数の少ないものから順に詰将棋を列挙することで，詰将棋解答プログラムを用いることなく，与えられ

た条件下で可能な詰将棋を 高速に列挙することができる.

20. Taisuke Izumi, Toshimitsu Masuzawa:
"A weakly-adaptive condition-based consensus algorithm in asynchronous distributed systems", 電子情報通信学会技術研究報告 COMP2005-34, Vol.105, No.273, pp.43-48, 2005 年 9 月.
概要: While the (uniform) consensus problem is one of fundamental and important problems for designing fault-tolerant distributed systems, it cannot be solved in failure-prone asynchronous distributed systems. To circumvent this impossibility, the condition-based approach is recently introduced. It introduces conditions, which is a subset of all possible inputs, and condition-based algorithms can circumvent the impossibility if actual input belongs to the condition. In existing condition-based consensus algorithms, the size of conditions depends on the maximum number of crash faults. In this paper, we propose the condition-based consensus algorithm whose condition depends on the actual number of crash faults. This algorithm is weakly-adaptive in the following sense: it has a parameter k. The algorithm solves the consensus for more inputs than the existing one if at most k processes actually crash. On the other hand, if more than k processes crash, it solves the consensus only for less inputs.

21. Tomoko Suzuki, Taisuke Izumi, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa, and Toshimitsu Masuzawa:
"A biologically inspired approach to replica control in dynamic networks", 情報処理学会研究報告 (アルゴリズム, 2005-AL-102), Vol.2005, No.91, pp.51-58, 2005 年 9 月.
概要: Resource replication is a crucial technique for improving system performance of distributed application with shared resources. A larger number of replicas require shorter time to reach a replica of the requested resource, but consume more storage of hosts. Therefore, it is indispensable to adjust the number of replicas appropriately for its application. This paper considers the problem for controlling the density of replicas adaptively in dynamic networks. The goal of the problem is to adjust the number of replicas to a constant fraction of the current network size. This paper proposes algorithm inspired by the single species population model, which is a well-known population ecology model. The simulation results show that the proposed algorithm realize self-adaptation of the replica density in dynamic networks.

22. T. Horiyama, K. Iwama, and J. Kawahara:
"Automated Competitive Analysis of Online Problems", 電子情報通信学会 コンピュテーション研究会, 信学技報, vol.105, no.344, COMP2005-45, pp.5–12, 2005 年 10 月.
概要: In this paper we study the 2-Bin Exchangeable Online Knapsack Problem (2EOK) which is an extension of the 2-Bin Removable Online Knapsack Problem. We prove an optimal upper bound of $1/t$ for the competitive ratio of 2EOK, where t is a real root of $4x^3 + 5x^2 - x - 4 = 0$ ($t \approx 0.76850$ and $1/t \approx 1.3012$). To prove this result, we made a full use of computer programs as follows: For the algorithm we wish to prove the upper bound, we first construct an equivalent finite state diagram with about 300 states. Then for each state we generate a finite set of inequalities such that the competitive ratio at that state is at most $1/t$ if the set of inequalities do not have a real solution. The latter can be checked by Mathematica. The number of inequalities generated was approximately 600 in total, and our computation time was 30 minutes using Athlon XP 2600+.

23. 宮崎修一, 久保浩史, 高見好男, 四方敏明, 櫻

井恒正, 山元伸幸, 河野典, 江原康生, 高倉弘喜, 沢田篤史, 中村素典, 岡部寿男, 北野正雄: “KUINS 接続機器登録データベースの概要”, 全国共同利用情報基盤センター 研究開発論文集, no.27, pp.47–51, 2005 年 10 月.
概要: 京都大学のキャンパスネットワーク KUINS では，利用されているネットワークやホスト情報を管理するためのデータベースを運用している．本稿では，データベースの仕様，データベースの運用方法，データベースを利用した業務の効率化，データベースの今後の拡張計画などを紹介する．

24. 片山喜章, 増澤利光, 和田幸一:
“根付き木ネットワーク上において局所情報のみで負荷分散を実現する自己安定アルゴリズムについて”, 情報処理学会研究報告（アルゴリズム, 2005-AL-103), Vol.2005，No.110, pp.35-40, 2005 年 11 月.
概要: 自己安定アルゴリズムとは，任意のネットワーク状況からアルゴリズムの実行を開始しても，やがてあらかじめ与えられたネットワーク状況に到達する（解を求める）アルゴリズムである．本稿では，木ネットワーク中の各プロセスに任意の負荷（整数）が与えられると，やがて任意のプロセス間の負荷の差が高々１（1-balancing）になる自己安定アルゴリズムを提案する．また，提案アルゴリズムは負荷を表す情報のみで 1-balancing を実現した．

25. K. Iwama, H. Nishimura, R. Raymond, and S. Yamashita:
“Transmitting Classical Information on the Quantum Network Efficiently”, 電子情報通信学会 コンピュテーション研究会, 信学技報, vol.105, no.499, COMP2005-51, pp.15–20, 2005 年 12 月.
概要: The question in this paper is whether the quantum random access (QRA) coding, given by Ambainis et al., on the *network* is possible. This question is motivated by the network coding introduced by Ahlswede et al., which enables us to send classical information much more efficiently on the network by coding at intermediate nodes. We demonstrate that quantum network coding is possible for the QRA coding, by using a simple network model called the Butterfly network. In this network, there are two flow paths, s_1 to t_1 and s_2 to t_2, which shares a single bottleneck channel of capacity one. In the classical case, we can send two bits simultaneously, one for each path, in spite of the bottleneck. However, the quantum case makes this bottleneck much more severe than in the classical case because of the non-orthogonality of quantum states. We resolve this bottleneck and design a protocol which can send two classical bits from s_1 to t_1 (similarly from s_2 to ! t_2) but only one of them should be recovered.

26. S. Miyazaki, and Y. Okabe:
“Cheat-proof Serverless Network Games”, Proc. the 4th International Symposium on Computing and Media Studies, pp.94–101, 2006 年 1 月.
概要: We consider playing online games on peer-to-peer networks, without assuming servers that control the execution of game. In such an environment, players may cheat the opponent by, for example, replacing the cards in hands illegally. The aim of this paper is to examine a possibility of excluding such cheatings. We show that by employing cryptographic techniques such as multi-party protocols, we can exclude some type of cheatings in some level. Finally, based on our discussion, we implement a cheat-proof network “Gunjin-Shogi”, which is a kind of Japanese chess.

27. 阿武孝文, 堀山貴史, 岩間一雄:
“二段組合せ回路の最大動作率について”, 冬の LA シンポジウム, 京都大学数理解析研究所講究録, pp.29.1–29.7, 2006 年 1 月.
概要: 回路の消費電力は 回路が消費する平均電力と最大電力の二つの観点から問題視される． 本稿では後者の最大電力に注目し，2 入

力の AND ゲートと NOT ゲートから構成される 一般の n 入力の二段組合せ回路について，ゲート出力が変化したときのみ電力消費が発生するとして単純にモデル化を行った．更に入力変化に対応する消費電力の指標として回路の動作率を定義し，回路入力 $n > 4$ の場合について回路ごとに異なる最大動作率の下限を n の関数の形で示した． また $n = 4$ の場合には下限を実現する回路を提示し 下限がタイトであることを示した．

28. M. Hayashi, K. Iwama, H. Nishimura, R. Raymond, and S. Yamashita:
"Efficient Transmission of the Information on the Quantum Network", 冬の LA シンポジウム, 京都大学数理解析研究所講究録, 2006 年 2 月.
概要:

29. 原口高裕, 泉泰介, 角川裕次, 増澤利光:
"分散データ構造スキップグラフの探索頻度偏りを考慮した拡張について", 情報処理学会研究報告（アルゴリズム, 2005-AL-105）, Vol.2006, No.30, pp.33-40, 2006 年 3 月.
概要: スキップグラフは資源の検索・挿入・削除を $O(\log n)$(n は資源数) で実行可能な分散データ構造であり，故障耐性，負荷分散特性に優れている．スキップグラフでは全資源を対等に扱っているため，各資源に対するアクセス頻度に偏りのあるシステムにおける検索時間は最適ではない．そこで本論文ではアクセス頻度の偏りに対応するため，各資源に対して検索頻度に応じた重みを付加し，重みの大きい資源に対しては高速にアクセス可能となるようにスキップグラフを拡張する．本論文では，ある資源 i の重みを $w(i)$，全資源の重み総和を W とした際に，資源 i の検索時間が $O(\log(W/w(i)))$ となるような重み付け手法を提案する．また，資源の検索頻度が既知の場合に重みを割り当てる際，各資源の重みの比を検索頻度の比と同じに設定する事で検索時間が最小となることを示す．この方法は理論的に最適であるが，メンテナンスコストの観点からは実用的ではない．そこで，メンテナンスコストを考慮した重み付け手法もあわせて提案し，その有効性をシミュレーションにより評価する．

30. Yu Wu, Taisuke Izumi, Fukuhito Oosita, Hirotsugu Kakugawa, and Tosimitsu Masuzawa:
"An adaptive searching protocol in peer-to-peer systems based on probabilistic weak quorum system", 情報処理学会研究報告（アルゴリズム, 2005-AL-105）, Vol.2006, No.30, pp.41-48, 2006 年 3 月.
概要: In this paper, we propose a new P2P searching protocol: Adaptive Probabilistic Searching Protocol (APSP). It is an efficient extension of the original searching protocol based on Probabilistic Weak Quorum System (PWQS). APSP has much lower message complexity, which is proved the minimum, than the original protocol. And it is adaptive to network dynamics by estimating system parameters with an estimation algorithm we present in this paper. The estimation algorithm require small additional message cost and the simulation result proves its efficiency. With the estimation algorithm, APSP keeps the minimum message cost when network environment changes.

31. Kenya Sugihara, and Hiro Ito:
"Maximum-Cover Source-Location Problem with Objective Edge-Connectivity Three", 電子情報通信学会技術研究報告書 CAS2005-122, Vol. 105, No. 634, pp.25-29, 2006 年 3 月.
概要: Given a graph $G = (V, E)$, a set of vertices $S \subseteq V$ covers a vertex $v \in V$ if the edge-connectivity between S and v is at least a given number k. Vertices in S are called sources. The maximum-cover source-location problem, which is a variation of the source location problem, is to find a source set S with a given size at most p, maximizing the sum of the weight of vertices covered by S. In this paper, we show a polynomial-

time algorithm for this problem in the case of $k = 3$ when a vertex-weighted and edge-capacitated undirected graph is input.

32. 高田智史, 伊藤大雄, 中村義作:
"毒まみれ半順序付き集合ゲームの必勝法", 電子情報通信学会技術研究報告書 CAS2005-120, Vol. 105, No. 634, pp.13-18, 2006 年 3 月.
概要: 組み合わせゲームの 1 つに，Poset(半順序付き集合) Game と呼ばれるものがある．Poset Game は有名な Nim から未解決の Chomp まで多様なゲームを含み，この研究から様々な面白い結果が得られている．Poset Game は単一の祖先 (毒節点) を持つ dag で表現できる．これの拡張として，毒節点が複数あり，しかも毒に重みを持たせ，与えられた体力を越えて毒を取った競技者が負けるというゲームが考えられる．我々はこのゲームの多項式時間で必勝手順を得る方法について考察する．

33. X. Han, K. Iwama, and G. Zhang:
"Packing Squares with Profits into a Rectangle", 電子情報通信学会総合大会講演論文集, 2006 年 3 月.
概要: In this paper, we study the following packing problem: Given a list of squares with profits, we are requested to pack a sublist of them into a rectangular bin to make profits in the bin as large as possible. The problem is strongly NP-hard and the best worst case ratio is $2 + \epsilon$ by Jansen and Zhang. Our results are as below: i) we give a simple approximation algorithm with the worst case ratio $\frac{m+1}{m} + \epsilon$, where m is the number of big items in the optimal packing. ii) and further improve the worst case ratio into $\frac{5}{4} + \epsilon$ which is better than the current best result $2 + \epsilon$ by Jansen and Zhang.

34. K. Iwama, and S. Tamaki:
"Increasing the Success Probability of PPSZ-type Satisfiability Testing", 電子情報通信学会 コンピュテーション研究会, 信学技報, vol.105, no.680, COMP2005-63, pp.1–6, 2006 年 3 月.
概要: Recently, [Iwama, Tamaki, SODA04] gave a new worst-case upper bound for 3SAT by modifying the PPSZ-type algorithm in [Paturi et. al., FOCS98] by making use of the local-search-type one in [Schoning, Algorithmica 02]. We propose a different kind of modification in this paper. Recall that the analysis of the first algorithm (denoted by **PPSZ**) assumes that each bit of the initial assignment coincides that of a satisfying assignment with probability one half. Our idea is that if we can increase this probability, i.e., if we can use a "better" initial assignment, then the success probability of **PPSZ** should increase. To get this better assignment we use the second algorithm (denoted by **SCH**). Note that the local search starts with a random assignment and gradually approaches to a satisfying assignment z. In the middle of this process, there should be the moment that the current assignment a^* is close to z and to use **PPSZ** with this assig! nment a^* has a better success probability than to continue **SCH**. In this paper we prove that this conjecture is true under some assumption on the uniformity of probability.

35. 高橋佑典，泉泰介，増澤利光:
"P2P ネットワークにおけるブルームフィルタを利用したインデックス情報散布法の改良", 電子情報通信学会技術研究報告（ネットワークシステム，NS2006-21），vol.106, no.41, pp.1–4, 2006 年 5 月.
概要: ブルームフィルタは，データアイテム集合のインデックス情報を効果的に表現するための一つの手法である．ブルームフィルタは誤検出を生じる可能性があるが，一方で少ないメモリ領域で実現可能という利点がある．そのため，P2P ネットワークにおいて，各ノードが自分の所持するデータアイテム集合に対するブルームフィルタを近隣ノードに散布することで，検索効率を上げる手法が提案されている．本稿では，従来のブルーム

フィルタを改良した，決定性減衰型ブルームフィルタ，および，それに基づく検索手法を提案する．従来のブルームフィルタでは，散布半径の増加に伴い，1 フィルタが表すデータアイテム数が増えるため，誤検出確率が増加するという問題が存在するが，決定性減衰型ブルームフィルタでは，ノードが散布するフィルタ構成のための情報量を距離に応じて減衰させることで，1 ノードが収集する情報の量を削減し，誤検出確率の増加を抑える．また，提案手法が従来手法よりも効率的な検索が実現できていることを，シミュレーションにより示す．

36. K. Iwama, and H. Morizumi:
"Reductions for Monotone Boolean Circuits", 電子情報通信学会 コンピュテーション研究会, 信学技報, vol.106, no.128, COMP2006-19, pp.15–19, 2006 年 6 月.
概要: The large class, say *NLOG*, of Boolean functions, including 0-1 Sort and 0-1 Merge, have an upper bound of $O(n \log n)$ for their monotone circuit size, i.e., have circuits with $O(n \log n)$ AND/OR gates of fan-in two. Suppose that we can use, besides such normal AND/OR gates, any number of more powerful "F-gates" which realize a monotone Boolean function F with $r(\geq 2)$ inputs and $r'(\geq 1)$ outputs. Note that the cost of each AND/OR gate is one and we assume that the cost of each F-gate is r. Now we define: A Boolean function f in NLOG is said to be F-Easy if f can be computed by a circuit with AND/OR/F gates whose total cost is $o(n \log n)$. In this paper we show that 0-1 Merge is not F-Easy for an arbitrary monotone function F such that $r' \leq r/\log r$.

37. 清成悠貴，宮野英次，宮崎修一:
"試問予定表作成問題の計算複雑さ", 電子情報通信学会 コンピュテーション研究会, 信学技報, vol.106, no.128, COMP2006-18, pp.7–14, 2006 年 6 月.
概要: 本稿では，試問予定表作成問題と呼ばれる大学における時間割表作成問題を導入する．この問題では，ある決まった数の審査員，例えば 3 人の審査員が $2n$ 人の学生にそれぞれ割り当てられる．それらの学生と担当審査員の組は，n 個の時刻と 2 つの部屋から成る $n \times 2$ 行列に割り当てられる必要がある．ここで，同じ審査員が担当する異なる 2 人の学生は異なる時刻に 割り当てられなければならない．さらに，すべての審査員が 2 つの部屋を移動する回数の合計をできるだけ少なくした．これは，実際に京都大学の試問予定表作成において発生した問題である．この問題について 2 つの制約付きモデルを提案し，それらの計算複雑さについて調査する．

38. T. Horiyama, K. Iwama, and K. Seto:
"Constant Depth Circuits for Symmetric Boolean Functions", 夏の LA シンポジウム, pp.20.1–20.4, 2006 年 8 月.
概要: We consider Σ_d circuits of unbounded fan-in, whose depth is constant d and the top gate is an OR. We prove that any symmetric Boolean function has a Σ_d circuit of size at most $2^{O(n^{1/(d-1)})}$ where n is the number of the variables. This result is obtained by showing the upper bound $2^{k^{1/(d-2)}}(1+1/k)^{n+O(\log n)}$ on Σ_d^k circuits, in which the bottom fan-in is bounded by k.

39. 吉牟田拓朗, 宮野英次, 宮崎修一:
"オンライン TSP アルゴリズムに対する下限について", 平成 18 年度 第 59 回電気関係学会九州支部連合大会, 10-2A-07, pp.342, 2006 年 9 月.
概要: 本稿では，代表的な最適化問題の 1 つである巡回セールスパーソン問題（Traveling Salesperson Problem，以下 TSP）のオンライン版であるオンライン TSP を考える．通常の TSP は，入力であるグラフ $G = (V, E, w)$（V は頂点集合，E は辺集合，w は辺重み）が予め与えられたとき，全ての頂点を最低一回ずつ訪問し，出発点に戻る巡回路で辺重みの総和を最小にするものを求めることを目的とする．オンライン TSP では，新しい頂点を訪れると，その頂点と隣接する全ての頂点間の

辺とそれらの辺重みの情報が新たに分かる．このような条件の下で巡回路の辺重みの総和をできるだけ小さくすることを目的とする．オンラインアルゴリズムは競合比によって評価される．任意の入力 G に対するオンラインアルゴリズム ALG の出力を $ALG(G)$，オフラインアルゴリズムの最適解を $OPT(G)$ としたとき，$\frac{ALG(G)}{OPT(G)} \leq \alpha$ が成り立つとき，ALG の競合比が α であると言う．すなわち，α の値が 1 に近いほど良いアルゴリズムになる．オンライン TSP に対しては，競合比が 16 のアルゴリズム（ShortCut）が知られているが，下限例に関してはあまり議論されていない．本稿では，ShortCut に対する 6 競合比の下限例を示し，さらにはオンライン TSP に対する 1.25 競合比の下限例を示す．

40. 高橋佑典，泉泰介，増澤利光:
“P2P ネットワークにおける決定性減衰型ブルームフィルタの提案と検索効率の評価”, 電子情報通信学会技術研究報告 (ネットワークシステム, NS2006-133) (奨励講演), vol.106, no.355, pp.55–60, 2006 年 11 月.
概要: ブルームフィルタは，データアイテム集合のインデックス情報を効果的に表現するための一つの手法である．ブルームフィルタは誤検出を生じる可能性があるが，一方で少ないメモリ領域で実現可能という利点がある．そのため，P2P ネットワークにおいて，各ノードが自分の所持するデータアイテム集合に対するブルームフィルタを近隣ノードに散布することで，検索効率を上げる手法が提案されている．我々は以前の報告において，従来のブルームフィルタを改良した，決定性減衰型ブルームフィルタ (DDBF)，および，それに基づく検索手法を提案した．従来のブルームフィルタでは，散布半径の増加に伴い，1 フィルタが表すデータアイテム数が増えるため，誤検出確率が増加するという問題が存在するが，DDBF では，ノードが散布するフィルタ構成のための情報量を距離に応じて減衰させることで，1 ノードが収集する情報の量を削減し，誤検出確率の増加を抑えることができる．本稿では，従来の DDBF による検索手法において，データアイテムの検索頻度に応じて散布半径を変更する手法を併せて用いることで，更なる検索効率の向上を達成することが可能であることをシミュレーションにより示す．

41. 乾広二，鈴木朋子，大下福仁，角川裕次，増澤利光:
“分散ハッシュテーブル Chord における故障耐性向上のための経路の多重化手法”, 電子情報通信学会技術研究報告 (ネットワークシステム, NS2006-146) , vol.106, no.418, pp.39–44, 2006 年 12 月.
概要: P2P システムにおいて資源の効率的な配置と検索を実現する手法として，分散ハッシュテーブル (DHT) がよく用いられている．DHT の故障耐性を高める方法としてマルチパスおよびワイドパスと呼ばれる経路の多重化がある．マルチパスは低コストで実現できるが故障耐性が十分でなく，ワイドパスは高い故障耐性を有する反面，高コストである．そこで本研究では，これらの手法を組み合わせた手法を提案し，DHT の一種である Chord に対して適用する．また，解析とシミュレーションによる性能評価を行い，提案手法では既存手法に比べて低コストで故障耐性が向上することを示す．

42. 朝廣雄一, 宮野英次, 宮崎修一, 吉牟田拓朗:
“サイクルグラフ上での地図作成問題に対する重み付き最近傍アルゴリズム”, 電子情報通信学会コンピュテーション研究会, 信学技報, vol.106, no.405, COMP2006-43, pp.15–22, 2006 年 12 月.
概要: グラフ上での地図作成問題とは，探索者が未知のグラフの全ての頂点を訪問することによりグラフ構造を調査する問題である．探索者は辺の存在とその長さをその端点を訪れるまで判らないとする．探索者は，できるだけ短い経路を通ることにより全ての頂点と辺を調査して，出発点まで戻って来なければならない． 本問題に対する最も単純な方法の一つは，最近傍アルゴリズム (NN) であり，まだ訪れていない頂点の中で探索者の現在の場所から最も近い場所に移動す る戦略である．重み付き最近傍アルゴリズム (WNN) は，

NN の拡張であり，ある重み付きの距離により次の移動場所を決める．平面グラフにおいては，重み 3 である WNN が 16 競合であることが知られている．本稿ではサイクルグラフについては，NN の競合比が 1.5 となること，その解析が厳密であることを示す．また，サイクルグラフに対しては WNN の中で NN が最適であることを示す．さらに，本問題に対しては，1.25 競合よりも良いアルゴリズムが存在しないことを示す．

43. 山内直哉, 宮崎修一, 岩間一雄:
"安定結婚問題に対する 1.875-近似アルゴリズム", 電子情報通信学会コンピュテーション研究会, 信学技報, vol.106, no.405, COMP2006-48, pp.49–56, 2006 年 12 月.
概要: 安定結婚問題において，同順位リストと不完全リストの存在を許した問題に対して最大サイズの安定マッチングを見つける問題を考える．この問題は NP 困難であり，現在知られている中で最も良い近似アルゴリズムは, $(2-c\frac{1}{\sqrt{N}})$ -近似アルゴリズムである．(ここで，c は $c \leq \frac{1}{4\sqrt{6}}$ を満たす正定数であり，N は入力中の男性の数である．) 本論文では，この近似度を 1.875 に改良した．

44. H. Morizumi, and J. Tarui:
"Linear-Size Log-Depth Negation-Limited Inverter for k-tonic 0/1 Sequences", 電子情報通信学会コンピュテーション研究会, 信学技報, vol.106, no.405, COMP2006-49, pp.57–60, 2006 年 12 月.
概要: A binary sequence $x_1, \ldots, x_n$ is called k-tonic if for $1 \leq i \leq n-1$ the number of i's such that $x_i \neq x_{i+1}$ is at most k. In this paper, we give the construction of a circuit inverting k-tonic sequences, which has size $O((\log k) \cdot n)$ depth $O((\log k) \cdot \log\log n + \log n)$ and contains $\log_2 n + O(\log\log n)$ NOT gates. Our construction improves all parameters of the construction by Sato, Amano and Maruoka, whose size is $O(kn)$ and depth is $O(k \log^2 n)$ using $O(k \log n)$ NOT gates. If $k = O(1)$, the previous construction needs $O(\log^2 n)$ depth, but our inverter has linear size and log depth using $O(\log n)$ NOT gates. Beals, Nishino and Tanaka have shown the construction of a size $O(n \log n)$ depth $O(\log n)$ inverter for all sequences with $\lceil \log_2(n+1) \rceil$ NOT gates. If $k = n^{o(1)}$, our construction reduces the size to $o(n \log n)$ with the same depth and only $O(\log\log n)$ increase of the number of NOT gates. Our idea on the construction of an inverter for k-tonic sequences also give an improvement for a circuit sorting k-tonic sequences from the construction by Sato, Amano and Maruoka.

45. 森住 大樹, 垂井 淳, 岩間 一雄:
"Negation-Limited Complexity of Parity and Inverters", 冬の LA シンポジウム, 京都大学数理解析研究所講究録, pp.21.1–21.9, 2007 年 1 月.
概要: In *negation-limited* complexity, one considers circuits with a limited number of NOT gates, being motivated by the gap in our understanding of monotone versus general circuit complexity, and hoping to better understand the power of NOT gates. We give improved lower bounds for the size (the number of AND/OR/NOT) of negation-limited circuits computing Parity and for the size of negation-limited inverters. An *inverter* is a circuit with inputs $x_1, \ldots, x_n$ and outputs $\neg x_1, \ldots, \neg x_n$. We show that (a) For $n = 2^r - 1$, circuits computing Parity with $r-1$ NOT gates have size at least $6n - \log_2(n+1) - O(1)$, and (b) For $n = 2^r - 1$, inverters with r NOT gates have size at least $8n - \log_2(n+1) - O(1)$. We derive our bounds above by considering the minimum size of a circuit with at most r NOT gates that computes Parity for *sorted* inputs $x_1 \geq \cdots \geq x_n$. For an *arbitrary* r, we completely determine the minimum size. It is $2n - r - 2!$ for odd n and $2n - r - 1$ for even n for $\lceil \log_2(n+1) \rceil - 1 \leq r \leq n/2$, and it is $\lfloor 3/2\, n \rfloor - 1$ for $r \geq n/2$. We also determine the minimum size of an *inverter*

for sorted inputs with at most r NOT gates. It is $4n - 3r$ for $\lceil \log_2(n+1) \rceil \leq r \leq n$. In particular, the negation-limited inverter for sorted inputs due to Fischer, which is a core component in all the known constructions of negation-limited inverters, is shown to have the minimum possible size. Our fairly simple lower bound proofs use gate elimination arguments in a somewhat novel way.

46. 中島拓也, 岩間一雄:
"Improvement of the Algorithm for the Traveling Salesman Problem on Cubic Graphs", 冬の LA シンポジウム, 京都大学数理解析研究所講究録, pp.23.1–23.8, 2007 年 1 月.
概要: 本発表では, n 頂点の cubic graphs, あるいは次数 3 以下のグラフにおいて巡回セールスマン問題が $O(1.2569^n)$ 時間で解く事ができることを示す. これは同じく n 頂点 cubic graphs における TSP が $O(2^{n/3}) \approx 1.2599^n$ で解けることを示した Eppstein の論文の改良である. 探索中における内部の状態を考慮にいれ, 最悪の場合が高々$7n/24$ 回しかおきないように Eppstein のアルゴリズムを変更することで計算量を改善した.

47. 伊藤亮太, 長瀧寛之, 大下福仁, 角川裕次, 増澤利光:
"アルゴリズム学習における誤りからの学習を実現する演習課題の自動生成手法", 電子情報通信学会技術研究報告 (教育工学, ET2006-97), vol.106, no.507, pp.81–86, 2007 年 1 月.
概要: 本研究では,「誤りからの学習」に基づくアルゴリズム学習のための演習問題の自動生成手法を提案する. ここでの演習問題とは, あるアルゴリズムを実装したソースコードに誤りを含ませたものであり, 誤りの修正及び考察を通じてアルゴリズムの理解を深める形式を想定している. 演習問題の自動生成においては, 演習を通じてアルゴリズムの理解を深められるような誤りの自動挿入を実現することを目標とし, これを実現するシステムを試作した. また, 提案手法の評価として, 教員等が学習効果を考えて挿入した誤りと提案手法で自動的に挿入される誤りを比較した結果, 高い割合で学習効果のある誤りを自動挿入できていることがわかった. 加えて, 実際の講義において演習を実施した結果も報告する.

48. 西川元, 山内由紀子, 大下福仁, 角川裕次, 増澤利光:
"トポロジ変化の影響を抑えたモバイルアドホックネットワーク向け自己安定相互排除プロトコル", 情報処理学会研究報告 (マルチメディア通信と分散処理, 2007-DPS-130(30)), vol.2007, no.16, pp.177–182, 2007 年 3 月.
概要: 自己安定プロトコルとは, 任意の初期状況から実行を開始し, いずれ正しい状況に収束するという性質を持つ故障耐性に優れたプロトコルである. しかし, モバイルアドホックネットワークのようなトポロジ変化が頻発する環境においては, 正しい状況に収束する前に新たな状況変化が発生し, プロトコルが永久に安定できなくなる可能性が存在する. そのため, モバイルアドホックネットワークに自己安定プロトコルを適用するには, トポロジ変化に対する対応が必要となる. モバイルアドホックネットワーク上での自己安定相互排除プロトコルの既存研究に Chen らの手法が存在する. この手法はノードの移動によるトポロジ変化に対して優れた適応性を持つが, ノードの離脱によるトポロジ変化に対する適応能力は十分ではない. 本論文では Chen らの手法を改善し, ノードの移動, 離脱の両方に対して優れた適応性を持つ自己安定相互排除プロトコルを提案する.

49. 森川雅和, 鈴木朋子, 大下福仁, 角川裕次, 増澤利光:
"領域被覆のためのセンサネットワークアルゴリズム", 情報処理学会研究報告 (マルチメディア通信と分散処理, 2006-DPS-130(61)), vol.2007, no.16, pp.357–362, 2007 年 3 月.
概要: センサネットワークの利用例の多くに, ある特定の領域の監視を行い, 得られた情報を収集したいという要求がある. 各センサの検知領域で監視を行いたい領域 (要求領域) を被覆する連結なセンサの集合を連結センサ

カバーとよび，センサ数が最小の連結センサカバーを求めることはNP 困難であると知られている．分散環境において，少数のセンサで構成される連結センサカバーを求める手法が既に提案されているが，既存手法ではアルゴリズムを開始するのはただ 1 つのセンサであり，広大な要求領域に対し連結センサカバーを求めるには非常に長い時間を要する．そこで本研究では，分散環境において要求領域の被覆を複数センサで平行に行う手法を提案する．また実験により，提案手法を用いて短時間で十分に少ないセンサ数の連結センサカバーが得られることを示す．

50. 古川正広，鈴木朋子，大下福仁，角川裕次，増澤利光:
“類似実行に基づく耐故障分散アルゴリズム理解支援システムの提案”, 情報処理学会研究報告（数理モデル化と問題解決，2007-MPS-63(10)）, vol.2007, no.19, pp.37–40, 2007 年 3 月.
概要: f-耐故障分散アルゴリズムとは，高々 f 個の計算機が故障しても正しく問題を解くアルゴリズムである．本研究では，f-耐故障分散アルゴリズムの理解を支援するために，$f+1$ 個の故障のもとで正しい解を出力しない実行と，その実行に類似した f 個または $f+1$ 個の故障のもとで正しい解を出力する実行を生成するシステムを提案する．これらの実行を比較することで，故障が問題を解けなくした原因を利用者は考察でき，f-耐故障分散アルゴリズムの理解に繋がる．さらに，本研究では，２つの実行の生成に必要な計算時間を削減する仕組みについて考察と実験を行なう．その結果，類似度の高い２つの実行を実用的な時間で生成できることを示す．

51. Y. Yamauchi, T. Masuzawa, and D. Bein:
“Emulation of Ring Protocols on Trees Preserving Fault-Containment”, 電子情報通信学会 コンピュテーション研究会, 信学技報, vol.106, no.566, COMP2006-52, pp.13–20, 2007 年 3 月.
概要: A desired property of a distributed, self-stabilizing protocol is to minimize the impact of faults that can corrupt the data stored locally at some process(es), called *fault-containment*. We consider emulation of fault-containing ring protocols on tree networks. We propose a novel ring embedding on an arbitrary tree in which each process in the tree appears on the virtual ring as a single virtual process. We also propose a self-stabilizing protocol RET that emulates ring protocols on the embedded ring with preserving the fault-containment property. The notion of emulation is more general than the notion of simulation, defined by Lynch over the set of configurations of two different protocols.

52. T. Suzuki, T. Izumi, F. Ooshita, H. Kakugawa, and T. Masuzawa:
“Move Complexity of Gossiping among Mobile Agents”, 電子情報通信学会 コンピュテーション研究会, 信学技報, vol.106, no.566, COMP2006-54, pp.29–36, 2007 年 3 月.
概要: Mobile-agent-based distributed systems are attracting widespread attention as the adaptive and flexible systems: mobile agents traverse the distributed system and carry out a task at each node. In such mobile-agent-based systems, *gossip* is the most fundamental scheme supporting cooperation among mobile agents. It requires to accomplish all-to-all information exchange over all agents so that each agent can obtain the all informations each agent initially has. Rendezvous algorithms, which require that all the agents rendezvous on a node at a time, can achieve this requirement, however it takes excessive cost for our objective. In this paper, we newly introduce the mobile agent gossip problem. In this problem, an agent can obtain the information of another agent by meeting the agent itself or the agent that has already got the information. The gossip scheme is expected to accomplish the all-to-all information exchange with a smaller number of agents'

moves than the rendezvous algorithms. We propose mobile agent gossip algorithms on several network topologies, and prove that all proposed algorithms are asymptotically optimal in term of the number of moves.

53. 宮川博光, 伊藤大雄, 岩間一雄:
"部の大きさの比が高々定数倍の孤立 2 部クリークの列挙", 電子情報通信学会 コンピュテーション研究会, 信学技報, vol.107, no.127, COMP2007-19, pp.9–16, 2007 年 6 月.
概要: グラフ $G = (V, E)$ の最大の 2 部クリークを求める問題や極大の 2 部クリークを列挙する問題は難しい．クリークでも同様に難しいが，極大孤立クリークの列挙は線形時間ですべて列挙できることが分かっている．本稿では極大孤立 2 部クリークを列挙する問題を扱う．しかし，極大孤立 2 部クリークは指数個存在する場合があることが示せるので，二つの部の大きさの比が定数である様な極大孤立 2 部クリークについて扱う．それらが線形個しか存在しないことを示し，それらをすべて列挙する線形時間アルゴリズムを提案する．

54. 吉田悠一, 伊藤大雄:
"有向グラフにおける k 枝連結性の検査", 電子情報通信学会 コンピュテーション研究会, 信学技報, vol.107, no.127, COMP2007-20, pp.17–23, 2007 年 6 月.
概要: 本報告では、次数に上限のある有向グラフが k 枝連結であるか、または k 枝連結から ϵ 遠隔であるかを検査する、グラフの頂点と枝の数によらない定数時間アルゴリズムを示す。頂点数 n、次数の上限 d の有向グラフ G が k 枝連結から ϵ 遠隔であるとは、次数の上限を保ったまま G を k 枝連結にするのに、少なくとも ϵdn 本の辺の追加及び削除が必要であることを言う。本報告で示す検査アルゴリズムは、性質検査（Property Testing）と呼ばれる概念に基づいている。これは入力グラフが k 枝連結であれば 2/3 以上の確率で受理し、k 枝連結から ϵ 遠隔であれば 2/3 以上の確率で拒否するものとして定義される。どちらでもないグラフに対しては、何を出力してもかまわない。我々は、k-1 枝連結なグラフに対して $O\left(d\left(\frac{c}{\epsilon d}\right)^k \log \frac{1}{\epsilon d}\right)$ ($c > 1$ は定数) 時間、一般のグラフに対して $O\left(d\left(\frac{ck}{\epsilon d}\right)^k \log \frac{k}{\epsilon d}\right)$ ($c > 1$ は定数) 時間の検査アルゴリズムを得た。

55. 小林浩二, 宮崎修一, 岡部寿男:
"A Tight Upper Bound on Online Buffer Management for Two-port Shared-Memory Switches", 電子情報通信学会 コンピュテーション研究会, 信学技報, vol.107, no.127, COMP2007-26, pp.63–70, 2007 年 6 月.
概要: オンラインバッファ管理問題は, 近年のネットワーク運用における主要な論点となっている QoS (Quality of Service) 保証実現のための, スイッチなどのキュー管理をオンライン問題として定式化した問題であり, 様々なモデルが考案されている. 本論文ではその中の 1 つである共有メモリ型スイッチを扱ったモデルを取り上げる. 我々は, スイッチの出力ポートの数 N が 2 であるときに、アルゴリズム Longest Queue Policy (LQD) の競合比が $\frac{4M-4}{3M-2}$ であることを示した。ここで, M はスイッチのバッファのサイズである. これは、Hahne らによって示された下限に一致する. また、任意の N の場合に、LQD の競合比を 2 から $2 - \frac{1}{M}\min_{K=1,2,\ldots,N}\{\lfloor \frac{M}{K} \rfloor + K - 1\}$ に改良した.

56. Y. Hanatani, T. Horiyama, K. Iwama, and S. Tamaki:
"The Complexity of the Hajós Calculus on Planar Graphs", 夏の LA シンポジウム, pp.8.1–8.20, 2007 年 7 月.
概要: The planar Hajós calculus is the Hajós calculus with the restriction that all the graphs that appear in the construction (including a final graph) must be planar. We prove that the planar Hajós calculus is polynomially bounded iff the Hajós calculus is polynomially bounded.

57. 森本尚之, 宮崎修一, 岡部寿男:
"サイクルグラフ上での地図作成問題に対する最適なオンラインアルゴリズム", 夏の LA シンポジウム, pp.9.1–9.11, 2007 年 7 月.

概要: オンライン地図作成問題における目的は，探索者が未知のグラフの全ての頂点を訪問することによりグラフ構造を調査し，最後に出発点に戻ることである．ある辺の存在ならびにその長さは，探索者がその端点を訪れるまで未知である．目的達成に要した総移動距離を探索者のコストとして定める．探索対象を平面グラフとする場合，16 競合のアルゴリズムが知られている．朝廣らは，探索対象をサイクルグラフとする場合において，1.5 競合のアルゴリズムを与えるとともに，$(1.25-\epsilon)$ 競合のアルゴリズムは存在しないことを示した（ここで ϵ は任意の正定数である）．本稿では，サイクルグラフに対する最適なオンラインアルゴリズムを与える．すなわち，$\frac{1+\sqrt{3}}{2}(\simeq 1.366)$ 競合のアルゴリズムを与えるとともに，$(\frac{1+\sqrt{3}}{2}-\epsilon)$ 競合のアルゴリズムは存在しないことを証明する（上記と同様，ϵ は任意の正定数である）．

58. Y. Hanatani, T. Horiyama, K. Iwama, and S. Tamaki:
"The Complexity of the Hajós Calculus on Planar Graphs", 電子情報通信学会 コンピュテーション研究会, 信学技報, vol.107, no.219, COMP2007-38, pp.43–50, 2007 年 9 月.
概要:

59. 森本尚之, 宮崎修一, 岡部寿男:
"サイクル上でのグラフ探索問題に対する最適なオンラインアルゴリズム", 電子情報通信学会 コンピュテーション研究会, 信学技報, vol.107, no.219, COMP2007-39, pp.51–57, 2007 年 9 月.
概要:

60. 岡本和也, 宮崎修一, 岩間一雄:
"3 人部屋安定ルームメイト問題の NP 完全性", 電子情報通信学会 コンピュテーション研究会, 信学技報, vol.107, no.258, COMP2007-41, pp.1–6, 2007 年 10 月.
概要: 安定ルームメイト問題は，希望リストに基づいて「安定性」を満たすように，$2N$ 人の人間を N 組のペアに分割する問題である．安定ルームメイト問題は解を持たない場合もあるが，解を持つか否かを判定し，持つ場合には解を見つける多項式時間アルゴリズムが知られている．本研究ではこの問題を拡張し，$3N$ 人の人間を N 組のトリプルに分割する問題を提案する．そして，この問題において解の存在を判定する問題が NP 完全であることを示す．

61. 伊藤大雄, 笠原正治:
"待機電力問題", ミニシンポジウム 新世代計算限界と地球環境問題, 2007 年 12 月.
概要:

62. 市場孝之, 岩間一雄:
"正直なオークションにおける談合の影響", 冬の LA シンポジウム, 京都大学数理解析研究所講究録, pp.38.1–38.8, 2008 年 1 月.
概要:

63. 角野大輔, 鈴木朋子, 大下福仁, 角川裕次, 増澤利光:
"モバイルアドホックネットワークにおける GPS を用いた ACO ルーティング", 情報処理学会研究報告（数理モデル化と問題解決, 2007-MPS-67(50)）, Vol.2007, No.128, pp.227–230, 2007 年 12 月.
概要: モバイルアドホックネットワーク環境におけるルーティングアルゴリズムの一つに Ant Colony Optimization(ACO) ルーティングがある．ACO ルーティングとは，蟻の働きを模倣したエージェントを用いて各ノード間の経路の質をフェロモン量で表現し，フェロモン量に応じてパケット送信経路を確率的に選択するアルゴリズムである．既存の ACO ルーティングでは，経路の質を測る指標として経路長 (ホップ数) と通信遅延を用いている．本論文では，既存の指標に加え，GPS で得られる各ノードの位置情報，速度情報に基づき経路の頑健性を計算し，経路の質を測り，経路を構築，維持する手法を提案する．またシミュレーションにより，提案手法が既存手法に比べ，制御パケット数が少ないにもかかわらずパケット送信成功確率が高いことを示す．

64. 西川元, 鈴木朋子, 大下福仁, 角川裕次, 増澤利光:

“無線 LAN 環境におけるアトラクター選択を用いた経路選択手法”, 情報処理学会研究報告（数理モデル化と問題解決, 2007-MPS-67(51)）, Vol.2007, No.128, pp.231–234, 2007 年 12 月.
概要: 経路選択問題は無線 LAN 環境における重要な問題の 1 つである．無線 LAN 環境における経路選択問題は，各無線端末が接続先アクセスポイントとアクセスポイントから目的端末までの有線経路を選択する問題である．本稿では無線 LAN 環境における，アトラクター選択を用いた経路選択手法を提案する．アトラクター選択とは生体系パラダイムに基づくアプローチの 1 つであり，現在の環境に対して適応的にシステムの状態を選択する能力を有する．アトラクター選択を適用することにより，提案手法は局所的な情報のみを用いて，高い通信スループットを実現するアクセスポイントと有線経路を適応的に選択する．また，提案手法の有効性をシミュレーションにより示す.

65. 高橋佑典, 泉泰介, 角川裕次, 増澤利光:
“P2P システムにおけるブルームフィルタを利用したトポロジ構築手法の提案”, 情報処理学会研究報告（マルチメディア通信と分散処理）, 発表予定, .
概要: ブルームフィルタは，データアイテム集合のインデックス情報を効果的に表現するための一つの手法である．P2P ネットワークはオーバレイ上で構成されるため，ピアのリンク先をある程度自由に決定することが可能であるが，ブルームフィルタを利用した既存手法においては，検索に適したネットワークを構築することに関してはあまり考慮されていない．そこで本研究では，既存手法には改良の余地があると考え，更なる検索効率の向上を達成するために，検索に適したオーバレイネットワークを構築する手法，および，構築したネットワークの構造を利用した問合せ転送手法を提案する．提案手法においては，各ピアが構成するブルームフィルタを問合せ転送の手掛かりに利用するだけでなく，ブルームフィルタの情報を元にリンクを張ることでトポロジに構造を持たせる．そして問合せ転送時には，ブルームフィルタの情報と構築したトポロジの構造を利用することによって，目的ピアの存在位置におおよその見当をつけ，探索効率を向上させる．また，本研究で提案した手法を用いることで，トポロジ構築を考慮しない従来の検索手法よりも効率的な検索が実現できていること，および，トポロジを構築する際に，大域的な情報を参照せずに，局所的な情報を参照するだけでも十分効率的な検索が実現できることをシミュレーション実験により示す.

66. 小林正幸, 呉エキ, 大下福仁, 角川裕次, 増澤利光:
“モバイル P2P におけるレーン構造を用いた資源探索手法”, 情報処理学会研究報告（マルチメディア通信と分散処理）, 発表予定, .
概要: 近年，無線技術の発達や無線端末の急速な普及から，モバイルアドホックネットワーク上での P2P システムであるモバイル P2P が注目されている．モバイル P2P では，端末の移動によりトポロジが動的に変化するため，有線における有効な資源探索手法を適用することはできない．本研究では通信コストの削減を目的とし，動的なレーン状構造を利用した資源情報管理手法と資源探索手法を提案する．提案手法は，GPS を用いて，フィールドの x 軸方向に各資源の位置を把握する端末で構成されたレーンを作成する．x 軸方向に構築したレーンに対し，探索クエリを y 軸方向に伝送すると，必ず資源の位置を把握している端末にたどりつくことができるため，効率的な探索が可能である．また，本研究は端末の位置情報や速度情報を利用し，相対速度の小さい端末をレーン内端末として選択する手法を考案しており，動的な環境においても通信コストを抑えつつ，効率的な探索が期待できる．さらに，シミュレーション実験を行い，既存手法との比較により提案手法の有効性を確認した.

67. Yu Wu, Fukuhito Oosita, Hirotsugu Kakugawa, Tosimitsu Masuzawa:
“Building dynamic random peer-to-peer overlays”, 情報処理学会研究報告（マルチメ

ディア通信と分散処理）, 発表予定, .
概要: Random networks are applicable for P2P overlays because of robustness, balanced degree of edges and small world characteristics. Our objective is to build a network that each node i is adjacent from any other node by a given probability pi. A distributed framework, which outputs 81 kinds of different networks, are analyzed by experimental approaches. Several outputs are proved very close to our objective.

学会大会等

1. 宮崎修一:
“ルータ上のバッファ管理問題に対するオンラインアルゴリズム”, 電子情報通信学会誌, vol.89, no.4, pp.299–303, 2006 年 4 月.

2. 堀山貴史:
“3 彩色不能な平面グラフの構成”, 列挙アルゴリズム合宿, 2006 年 9 月.

3. H. Ito, M. Paterson, and K. Sugihara:
“Multicommodity Source Location Problems and Price of Greed”, Research Seminar on Connectivity of Graphs and Its Applications, 2007 年 1 月.

4. 山内直哉, 宮崎修一, 岩間一雄:
“安定結婚問題に対する 1.8-近似アルゴリズム”, 電子情報通信学会 総合大会, DS-1-3, 2007 年 3 月.

5. 清成悠貴, 宮野英次, 宮崎修一:
“試問予定表作成問題の制約付きモデルに対する NP 困難性”, 平成 19 年度 第 60 回電気関係学会九州支部連合大会, vol.09-1A-04, pp.87, 2007 年 9 月.

6. H. Ito, M. Paterson, K. Sugihara:
“Multi-Commodity Source Location Problems and Price of Greed”, 情報科学技術フォーラム;FIT, 2007 年 9 月.

文部科学省科学研究費補助金 特定領域研究 (課題番号 16092216)

C10: 情報基盤アルゴリズムとしてのメタヒューリスティクスの研究

本研究では, 現実社会で解決を求められているさまざまな問題に対するメタヒューリスティクスのアルゴリズムを開発することを主目的とし, それに役立つ問題構造の切り出しと理論的基盤の構築を進めた. 具体的なテーマとしては, 種々のタイプの図形詰込み問題, 資材切出し問題, 一般化割当問題, 配送計画問題, 集合および図形の被覆問題, ロボット動作計画問題, 種々の生産計画およびスケジューリング問題, 現実の大規模ネットワーク, オンラインアルゴリズム, 貪欲アルゴリズムおよび不等式系などを取り上げた.

研究組織

研究代表者：	茨木 俊秀	関西学院大学 理工学部
研究分担者：	藤重 悟	京都大学 数理解析研究所
	柳浦 睦憲	名古屋大学 大学院 情報科学研究科
	野々部 宏司	法政大学 工学部
	巳波 弘佳	関西学院大学 理工学部
	梅谷 俊治	大阪大学 大学院 情報科学研究科 (平成 17–19 年度)
	藤原 洋志	関西学院大学 理工学部 (平成 18–19 年度)
	千葉 英史	関西学院大学 理工学部 (平成 18–19 年度)
	関口 良行	関西学院大学 理工学部 (平成 19 年度)

交付決定額 (配分額)

平成 16 年度	5,300,000 円
平成 17 年度	5,900,000 円
平成 18 年度	5,500,000 円
平成 19 年度	4,300,000 円
合　計	21,000,000 円

研究成果の概要

- 受賞
  - 日本オペレーションズ・リサーチ学会 第 33 回文献賞，2005 年 3 月受賞 (柳浦)
  - スケジューリング学会 学会賞 (学術部門), 2006 年 10 月受賞 (柳浦, 野々部, 他)
  - RIVF2007 (5th International Conference on Research, Innovation and Vision for the Future) Best Paper Award, 2007 年 3 月受賞 (藤原, 他)
  - FIT 論文賞，2007 年 9 月受賞 (柳浦, 他)
  - 日本オペレーションズ・リサーチ学会 第 1 回近藤賞, 2007 年 9 月受賞 (茨木)
  - LION (Learning and Intelligent OptimizatioN Conference) II Best Paper Award, 2007 年 12 月受賞 (柳浦, 他)
- 論文発表

  著書 7 編（分担執筆を含む), 学術論文 29 編など.

1 はじめに

現在社会は, 情報と通信技術に支えられた高度情報化社会と呼ばれているが, さらに成熟を加えて, 知識社会へ変貌していくと言われている. そのためには, 数々の課題を解決し, 克服していかねばならない. その過程で生ずる多くの問題が, 数理的にはいわゆる組合せ問題, 組合せ最適化問題の形に記述されることから, それらの解決を図るためのアルゴリズム研究が求められている.

我々の研究グループは,

1. 組合せ最適化問題を解決するためのアルゴリズムの研究,
2. 社会のさまざまな現象を数理的にモデル化する研究,
3. 効果的なアルゴリズムを開発するための理論的基礎研究,

を行ってきた. 第 1 のタイプの研究は柳浦, 野々部, 梅谷が重点的に進めており, 第 2 のタイプは, 巳波, 千葉が中心になり, 第 3 のタイプは藤重, 藤原, 関口が主に担当した. 茨木はこのグループ全体の総括とともに, 主に第 1 のタイプの研究に参加した.

多くの組合せ問題あるいは組合せ最適化問題は, 計算的に困難な問題であって, 理論的には NP 完全問題あるいは NP 困難問題のクラスに属する. これらの問題を現実的な意味で解決するには, 効果的なアルゴリズムを可能にする数学的構造を見つけ出し, そのような問題へのモデル化を行うか, 厳密な最適解の導出を目指すのではなく, 良質の近似解を高速に求めるという目標に切り替えて, そのための近似アルゴリズムを開発する, という二つのアプローチが考えられる. 近似アルゴリズムの研究は, 近年きわめて盛んになっているが, 我々のグループでは, メタヒューリスティクスの枠組みで, 局所探索に立脚した種々のアルゴリズムに重心をおき, 実用的な利用に耐えるようなアルゴリズムの開発を行ってきた.

本報告では, 上記の方針に沿って行った過去 4 年間の研究の成果を簡単に紹介する. 現実問題からの具体的なテーマとしては, 種々のタイプの図形詰込み問題, 資材切出し問題, 一般化割当問題, 配送計画問題, 集合および図形の被覆問題, ロボット動作計画問題, 種々の生産計画およびスケジューリング問題, 現実の大規模ネットワークなどをあげることができる. これらの問題に対して, 問題がもつ特殊構造を明らかにするとともに, それらを利用して効率のよい近似アルゴリズム, とくにメタヒューリスティクスのアルゴリズムを開発を行った. さらに, アルゴリズムの理論的考察も進め, オンラインアルゴリズム, 貪欲アルゴリズムおよび不等式系などを取り上げ, 研究を行った.

これらの成果を以下にまとめる. 研究成果は, 学術誌の論文として出版すると同時に, 国際会議および国内会議において積極的に発表した.

2 長方形詰込み問題

長方形詰込み問題は, 与えられた n 個の長方形を互いに重なりなく配置し, それに伴う種々の目的関数の最適化を図る問題である. 目的関数としては, 例えば

- 全ての長方形を囲む面積の最小化,
- 幅の決まった容器に全ての長方形を詰め込むときの高さの最小化,
- 大きさの決まった容器に長方形を詰め込むときに利用した容器の数の最小化

など, 様々なものがある. 本研究ではとくに配置の位置に伴うコストを導入した汎用化を考えた. このようなコストを導入することで, 各仕事に最早開始時刻や納期のあるスケジューリング問題の一種などを扱うことができる. この問題において, 我々は以前配置コストの最小化に対する高速アルゴリズムの開発に成功していた. これを基に, 局所探索における探索解とその近傍内の解の構造が近いことを利用し, 配置コストの最小値の変化量の計算をさらに高速化することに成功した. これを反復局所探索法に組み込むことで, 従来の詰込み問題に対するベンチマーク問題例に対してよりよい成果を上げるとともに, スケジューリング問題に対しても一定の成功を収めることができた. 最後に, 面積最小化問題の問題例 (長方形数 100) に対する計算結果の例を図 1に示しておく.

また, strip packing 問題に対する best-fit 法というアルゴリズムの効率的実現を可能にするデータ構造を検討し, 長方形の数が 100 万程度の超大

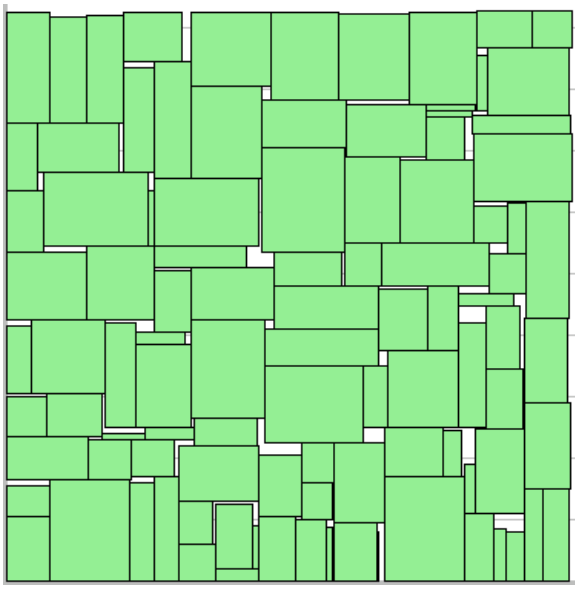


図 1: 面積最小化問題に対する計算結果の例（長方形数 100，充填率 96%）

規模な問題例に対しても適用可能なアルゴリズムを開発中であり，一定の成果を得ている．

3 可変形状長方形詰込み問題

与えられた n 個の長方形をできるだけ小さな領域に重ならないように詰め込む問題はこれまで詳しい研究がある．本研究では, これらの長方形の形状 (高さと幅) があらかじめ決まっているのではなく, 指定された範囲内で可変であるという想定の下で詰め込み問題を考えた．この種の問題は VLSI のフロアプランや建築設計に応用がある．本論文で開発した局所探索法のアルゴリズムは, 順列対によって長方形の相対位置を定めたのち，具体的な配置を数理計画法を用いて決定する．長方形の形状に周長一定という制約を加える場合は線形計画問題に, 面積一定の場合は非線形計画問題となる．良い解を与える順列対は，局所探索によって探索するが，効果的な近傍を計算実験によって定めた．計算実験の結果, 長方形の個数が数十程度ならば実用的に十分使えることが判明した．

n 個の長方形の相対位置関係を順列対 $\sigma = (\sigma_+, \sigma_-)$ で表すことができる．σ_+, σ_- はそれぞれ集合 $\{1, 2, \ldots, n\}$ の順列である．ただし，n 個の長方形からなる順列対は全部で $(n!)2$ 通り存在し，全探索により厳密解を求めるのは困難であるため, 良い結果を与える順列対を局所探索を用いて近似的に求める．

長方形 i の横幅と高さを w_i, h_i とする．ただし，w_i, h_i はそれぞれ下限値，上限値の区間で可変とする．長方形 i の幅と高さの合計値を L_i (すなわち $L_i = w_i + h_i$), 各長方形の配置を決定するため長方形 i の左下隅の座標を (x_i, y_i) とする．また，これらの長方形を詰め込む長方形領域の幅と高さを W, H とする．順列対 σ が定める相対位置制約の下で，周長条件を考慮した長方形詰め込み問題は以下の線形計画問題に定式化される．

$$
\begin{aligned}
P(\sigma): \quad & \text{minimize } H + W \\
& \text{subject to } 0 \le x_i \le W - w_i, \forall i \\
& 0 \le y_i \le H - h_i, \forall i \\
& w_i + h_i = L_i, \forall i \\
& (\sigma\text{によって下の一つが定まる}) \\
& x_i + w_i \le x_j,\ x_j + w_j \le x_i, \\
& y_i + h_i \le y_j,\ y_j + h_j \le y_i, \forall i, j
\end{aligned}
$$

同様に, 長方形 i の面積を A_i 以上に制限し, 詰め込む領域の高さを H^* と固定し, 横幅 W を最小化する長方形詰め込み問題は非線形計画問題 $Q(\sigma)$ に定式化される．制約条件の形から, 凸形計画問題である．線形計画問題も凸形計画問題も適当なアルゴリズムを用いて効率よく解くことができる．本論文ではソフトウエア NUOPT を用いて, 前者はシンプレックス法で, 後者は直線探索法により解を求めた．

上記の $P(\sigma)$ あるいは $Q(\sigma)$ を解くと一つの長方形配置が求まるが，その良さは σ によって変化する．良い配置を与える σ を局所探索法を用いて求める．標準的な局所探索では, 注目する順列対数も多く, 計算時間もその分多くかかってしまう．そのため，探索の際に注目する長方形を限定して近傍サイズを下げる工夫を行った．

一つの配置が決まると, 左右関係 (あるいは上下関係) によって最長路を構成する臨界路が定まる．臨界路を短くすることが詰め込む領域を小さくすることに繋がるため，臨界路上に位置する長方形に注目する．その中でも下限値をとる長方形はこれ以上短くできないため，その移動は大きな影響を与える．また, 縦と横の両軸の臨界路の交

差点に位置する長方形は，両方の軸から押し込まれるため下限値を取ることは難しいが，解の改良の鍵を握っている場合がある．そこで，そのような長方形を移動させることも考える．さらに, 大きな隙間の近くにある長方形に注目し, 微小に変化させることで隙間を埋める動作を通して, 全体の領域を詰めることを考える．

以上のアイデアに基づいて, 数種類の近傍を定義し, 計算実験によって, 妥当な近傍を選択した．

最終的に, 得られた近傍に基づく局所探索のアルゴリズムを構築し, 実験した結果, 長方形の数が 50 程度までならば数分の計算で高い品質の配置が得られることが分かった．下図は, 同じ方法で，長方形数 100 個のベンチマーク rp100 を解いた結果であるが, 3 時間程度もかかった．計算時間を短縮するために更なるアルゴリズムの改良が必要である．

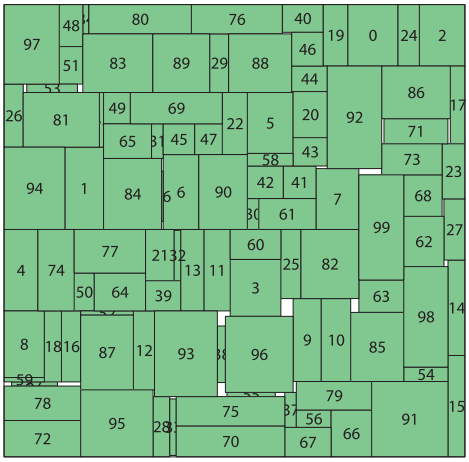


図 2: 面積最小化の例 rp100 ($H^* = 450$)

4　重量付モジュール詰込み最適化

従来からの 2 次元，3 次元詰め込みは複数の長方形，直方体モジュールを重なりなく配置するときに必要な面積，体積の最小化を目的とするものが多い．各モジュールが持つ情報には重量がなく，配置したときの全体の重量の偏り，ばらつきなどは考慮されていなかった．しかし，配置した複数のモジュールを運搬することを考えると，全体の重心が中央にありかつ慣性モーメントが小さければ，持ちやすく，運びやすく，回転させやすいなどのメリットがある．応用例として，自動車の車体上の部品配置などが考えられる．本研究では 2 次元の長方形詰め込み問題をベースに重量付モジュールの配置問題を扱った．

モジュール集合 $M = \{m_1, m_2, \ldots, m_n\}$ が与えられ，それぞれのモジュール $m_i \in M$ には幅，高さの 2 種類の寸法 s_i, t_i がある．各モジュールは配置する方向が決まったとき，その幅を w_i，高さを h_i とする．つまり，初期状態で s_i が幅であり，t_i が高さのとき，最終的に 90 度回転された状態で配置されたとすると $h_i = s_i,\ w_i = t_i$ となる．また，各モジュールの重さを g_i とする．すべてのモジュールを収めるべき領域の大きさを幅 W と高さ H とする．出力として，m_i の配置されたときの中央座標 (x_i, y_i) と配置の方向を示す (w_i, h_i) を得る．

このとき以下の問題を考える．

$$\text{minimize } \alpha \sum_{i=1}^{n} g_i(x_i^2 + y_i^2) + \beta \sum_{i=1}^{n} P_i + \gamma G_x^2 + \delta G_y^2 \tag{4.1}$$

$$\text{subject to } \begin{pmatrix} x_i + w_i/2 & \le & x_j - w_j/2 & \text{or} \\ x_i - w_i/2 & \ge & x_j + w_j/2 & \text{or} \\ y_i + h_i/2 & \le & y_j - h_j/2 & \text{or} \\ y_i - h_i/2 & \ge & y_j + h_j/2 & \end{pmatrix} \quad \forall (m_i, m_j) \tag{4.2}$$

ただし，

$$\begin{aligned} P_i =& \max(x_i - w_i/2 + W/2, 0) \\ &+ \max(x_i + w_i/2 - W/2, 0) \\ &+ \max(y_i - h_i/2 + H/2, 0) \\ &+ \max(y_i + h_i/2 + H/2, 0) \\ G_x =& \frac{\sum_{i=1}^{n} g_i x_i}{\sum_{i=1}^{n} g_i} \\ G_y =& \frac{\sum_{i=1}^{n} g_i y_i}{\sum_{i=1}^{n} g_i} \end{aligned}$$

ここで，目的関数は，慣性モーメント，領域からのはみ出し，重心の領域中心からのずれに対するペナルティの和である．

制約式 (4.2) は or 条件であるため，順列対を用いて，この部分を任意の 2 モジュール間で一意的に決定する．つまり，一つの順列対 σ を決めると，

上記の問題 $P(\sigma)$ は非線形計画問題となるために解くことができ，すべてのモジュールの座標が決定する．

そこで，アルゴリズムの枠組みとして，局所探索によって順列対を探索することにする．その際，各順列対 σ に対する目的関数値は，非線形計画問題 $P(\sigma)$ を解くことで得る．

本研究では，まず，非線形計画問題 $P(\sigma)$ に対する近似アルゴリズムを設計し，その近似解を用いても解の質は大きく落とさずに計算時間は大幅に短縮できることを示した．

次に，局所探索における様々な近傍の違いにおける性能の違いを評価し，近傍の探索能力を調べた．

これらの結果に基づき，複数の近傍を組み合わせ，かつ $P(\sigma)$ の近似解を用いるアルゴリズムを提案し，良好な性能が得られることを確認した．

図 3，図 4は，重量無し詰込問題のベンチマークである ami33，rp100 に対して，提案アルゴリズムを適用した配置である．黒いモジュールほど重く，白いモジュールほど軽いことを表している．外側の枠がすべてのモジュールを収めるべき領域を表しており，中央の縦線と横線の交点が領域の中心であり，中央付近の白点が全体の重心を表している．

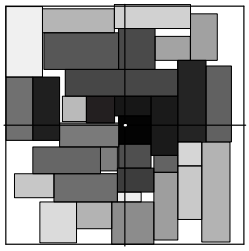


図 3: ami33

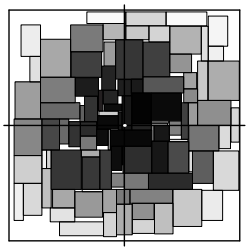


図 4: rp100

5　多角形詰込み問題

多角形詰込み問題は，長方形状の母材に与えられた複数の多角形を重なりなく配置する問題であり，本研究では多角形詰込み問題のバリエーションの 1 つである母材の幅を最小化する多角形ストリップ詰込み問題を考える．

本研究では，多角形ストリップ詰込み問題の核となる部分問題として，与えられた複数の多角形を幅を固定した母材上に重なり度が最小となるように配置する重なり度最小化問題を用いたアプローチを提案した．ここで，各多角形対に対する重なり度に，重なりをなくすために必要な水平もしくは垂直方向への移動距離 (近似貫通深度) を用いて，ある多角形を与えられた方向に移動した際に重なり度が最小となる配置を効率良く求めるアルゴリズムを開発した．そして，重なり度最小化問題に対して，ある多角形を水平・垂直方向に交互に繰返し移動する手続きを用いた誘導局所探索法を提案した．

提案解法の性能を評価するため，いくつかの有名なベンチマーク問題例に対して数値実験を行い，これまで知られていた最良の解よりもよい解を発見するなど，大きな成功を収めることができた．図 5–8に数値実験結果の一部を示す．

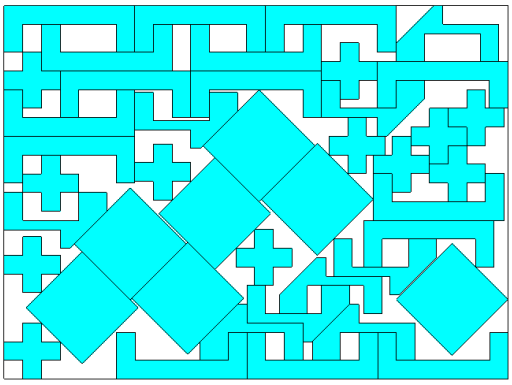


図 5: 実行例 (製品数 43，充填率 73.86%)

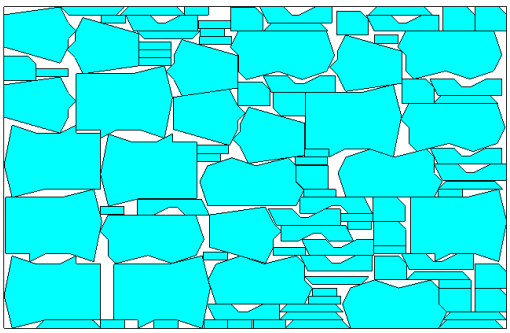


図 6: 実行例 (製品数 99，充填率 86.13%)

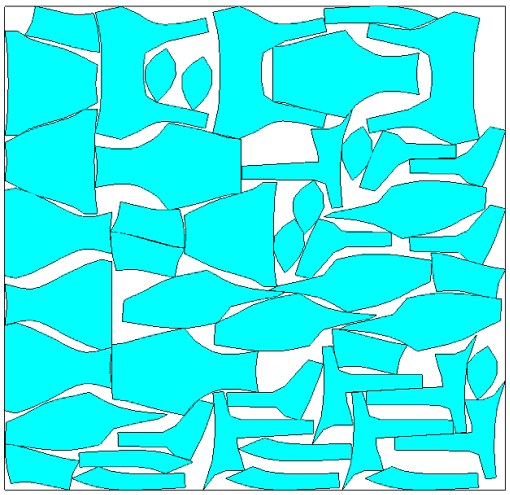


図 7: 実行例 (製品数 48，充填率 74.21%)

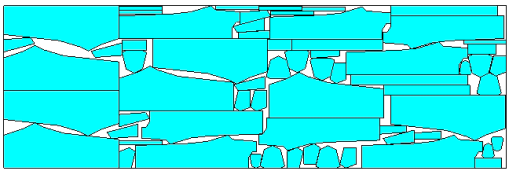


図 8: 実行例 (製品数 64，充填率 89.02%)

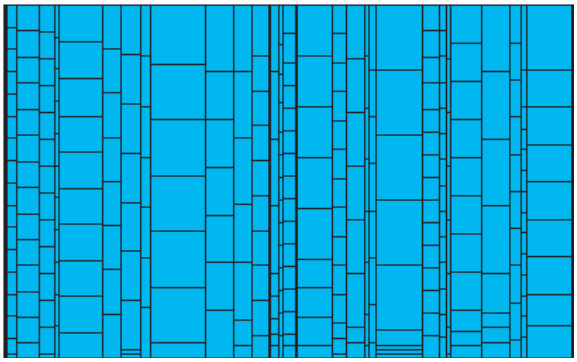


図 9: 1 次元資材切出し問題に対する列生成法の適用結果

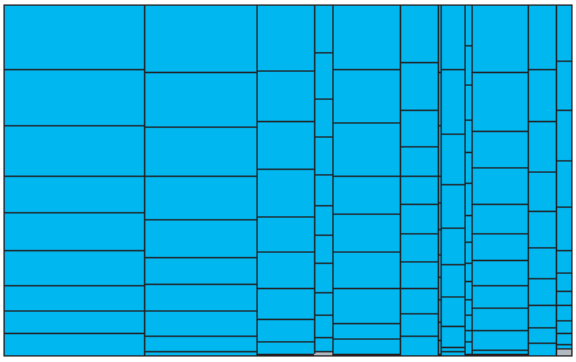


図 10: 1 次元資材切出し問題に対する提案解法の適用結果

6 段取り替え制約付き資材切出し問題

1 次元資材切出し問題は，定型の母材から様々な長さの板材を顧客の注文に応じて切出す計画を求める問題であり，鉄鋼・製紙・繊維などの素材産業をはじめとする多くの分野に応用を持つ代表的な組合せ最適化問題の一つとして知られている．

素材産業では，歩留まりの向上，つまり余剰素材の削減が最も重要な課題である．古典的な 1 次元資材切出し問題は，使用する母材の本数を最小にする板材の組合せを求める問題として定式化され，列生成法によって，大規模問題の良い近似解が短時間で求まることが知られている．しかし，実際の素材産業では，単に余剰素材の削減だけで製造コストが抑えられるわけではない．近年では，切出し工程の段取り替え作業にともなうコストや，切出された製品を一時的に積み上げておく空間の削減が重要な課題として注目されつつある．

本研究では，与えられた段取り替え数の下で，使用する母材の本数をを最小化する段取り替え数制約付き 1 次元資材切出し問題に対してメタ戦略と線形計画法を組み合わせたハイブリッド解法を提案した．

1 次元資材切出し問題では，1 本の母材から切出される板材の組合せはパターンと呼ばれる．提案解法では，現在の解のあるパターン p にある板材 i を追加した後に別の板材 i' を削除して新たなパターン p' を生成する操作と，現在の解のある板材 i をパターン p_1 から別のパターン p_2 に移動した後に，別の板材 i' をパターン p_2 からパターン p_1 に移動，もしくはパターン p_2 から削除して新たなパターン p'_1, p'_2 を生成して得られる解の集合を近傍とする局所探索法を用いた．また，使用するパターン集合が与えられた際に，各パターンの切出し回数を求める問題は整数計画問題として定式化できるが，整数条件を緩和して得られる線形計画問題を解いて，得られた実数最適解を適当な方法で丸めて整数解を求めている．

提案解法では，探索中に生じる微少に異なる多くの線形計画問題を独立に解くのではなく，現在の解における線形計画問題の最適解を基に，感度分析を適用して，これらの問題の最適解を高速に求めている．最後に，板材が 38 種類の 1 次元資材切出し問題に対する，列生成法と提案手法の実行結果を図 9, 10に示す．

図 9, 10における使用母材数は，405.922(実数最適値)，410，段取り替え数は 38，12 となっている．このように提案解法では，使用母材本数をほとんど増やすことなく，段取り替え数を大幅に削減していることが確かめられる．

7　一般化割当問題

一般化割当問題は，与えられた n 個の仕事を m 個のエージェントに割り当てる問題である．各仕事とエージェントのペアに対してコストと資源利用量が与えられ，また，各エージェントには利用可能資源量が与えられる．この時，各エージェントにおける資源制約を満たしつつ，割り当てに伴う総コストの最小化を図ることが目的である．割り当てという基本的な構造を対象としているため，様々な問題の基本構造を捉えた問題として非常に重要な問題である．この問題に対して，排除連鎖法 (ejection chains) と呼ばれる高度な近傍操作に基づく高性能アルゴリズムの開発に成功した．また，このアルゴリズムにさらにパス再結合法 (path relinking) などのアイデアを追加することで，大幅な性能改善にも成功した．得られたアルゴリズムの性能は極めて高く，$n = 1600$, $m = 80$ までの大規模なベンチマーク問題例に対する計算結果では，現存する他のアルゴリズムの追随を許さない性能を持つことが確認できている．

表 1に計算結果の一部を示す．比較対象の多い中規模までの問題例に対する計算結果である．表中，PREC はパス再結合など組み込んだ手法であり，それ以外は既存の代表的なメタ戦略アルゴリズム等の比較対象である．表の数値は制限時間内にアルゴリズムが得た最良の目的関数値であり，最小化問題なので値が小さいほどよい（なお LB は最適値の下界値である）.「*」印は表中のアルゴリズムの中で最良の結果が得られたことを示す．表より，PREC の列のほとんどに「*」印がついており，提案手法の性能が極めて高いことが確認できる．

参考文献

[1] Yagiura, M., Ibaraki, T., and Glover, F., An ejection chain approach for the generalized assignment problem, *INFORMS J. on Comput.*, 16, 133, 2004.

[2] Chu, P.C. and Beasley, J.E., A genetic algorithm for the generalized assignment problem, *Computers Oper. Res.*, 24, 17, 1997.

[3] Díaz, J.A. and Fernández, E., A tabu search heuristic for the generalized assignment problem, *Eur. J. Oper. Res.*, 132, 22, 2001.

8　割当型問題に対する汎用解法

複数のエージェントに幾つかの仕事を割当てる問題など，あるものを何かに割当てるタイプの問題は世の中に数多く存在する．組合せ最適化の分野においても，割当問題，一般化割当問題，2 次割当問題などが代表的な割当型問題として古くから研究されてきたが，これらの問題では割当てコストが線形もしくは 2 次に限定されており，その応用範囲はあまり広範なものではなかった．そこで本研究では，より汎用性の高い形で問題の定式化を行い，問題の適用範囲を拡げるとともに，メタヒューリスティクスに基づく発見的解法を提案した．

本研究における割当型問題の定式化は以下の通りである．仕事集合 J とエージェント集合 I が入力として与えられ，各仕事に対して，どれか 1 つのエージェントを割当てなくてはならない．ここで，エージェント i が割当てられた仕事の集合を J_i としたとき，i に対して，J_i に応じて定まる割当てコスト $f_i(J_i)$ が発生するものとする．そして，すべてのエージェントに対する割当てコストの合計 $\sum_i f_i(J_i)$ を最小化することが目的である．ただし，エージェント i を仕事 j に割当てるためには a_{ij} の資源が必要である．各エージェント i には容量 b_i が定められており，仕事集合 J_i

表 1: 一般化割当問題に対するメタ戦略の計算結果 ($n = 100, 200$ の問題例に対して，それぞれ 150 秒，300 秒実行，ただし RLS,CB,DF は除く)

type	n	m	LB	PREC	TSEC	BVDS-l	BVDS-j	VDS	RA	LKGG	NI	RLS	CB	DF	CPLEX
C	100	5	1930	*1931	*1931	*1931	*1931	*1931	1938	*1931	*1931	1942	*1931	*1931	*1931
C	100	10	1400	*1402	*1402	*1402	1403	*1402	1405	1403	1403	1407	1403	*1402	*1402
C	100	20	1242	*1243	*1243	1244	1244	1246	1250	1245	1245	1247	1244	*1243	*1243
C	200	5	3455	*3456	*3456	*3456	3457	3457	3469	3457	3465	3467	3458	3457	*3456
C	200	10	2804	2807	*2806	2809	2808	2809	2835	2812	2817	2818	2814	2807	*2806
C	200	20	2391	*2391	2392	2401	2400	2405	2419	2396	2407	2405	2397	*2391	*2391
D	100	5	6350	*6353	6357	6358	6362	6365	—	6386	6415	6476	6373	6357	6358
D	100	10	6342	6356	6358	6367	6370	6380	6532	6406	6487	6469	6379	*6355	6381
D	100	20	6177	*6211	6221	6275	6245	6284	6428	6297	6368	6358	6269	6220	6280
D	200	5	12741	*12744	12746	12755	12755	12778	—	12788	12973	12923	12796	12747	12750
D	200	10	12426	*12438	12446	12480	12473	†12496	12799	12537	12889	12746	12601	12457	12457
D	200	20	12230	*12269	12284	12440	12318	†12335	12665	12436	12793	12617	12452	12351	12393
E	100	5	12673	*12681	12682	*12681	12682	12685	12917	††12687	‡12686	12836	N.A.	*12681	*12681
E	100	10	11568	*11577	*11577	11585	11599	11585	12047	††11641	‡11590	11780	N.A.	11581	11593
E	100	20	8431	8444	*8443	8499	8484	8490	9004	††8522	‡8509	8717	N.A.	8460	8565
E	200	5	24927	*24930	*24930	24942	24933	24948	25649	††25147	‡24958	25317	N.A.	24931	*24930
E	200	10	23302	23310	*23307	23346	23348	23340	24717	††23567	‡23396	23620	N.A.	23318	23321
E	200	20	22377	*22379	22391	22475	22437	†22452	24117	††22659	‡22551	22779	N.A.	22422	22457

†Sun Ultra 2 Model 2300 で 1,000 秒実行
††Sun Ultra 2 Model 2300 で 20,000 秒実行
‡Sun Ultra 2 Model 2300 で 5,000 秒実行
⋆ 計算時間は文献 [1] を参照
⋆⋆ 文献 [2] の計算結果を引用
⋆⋆⋆ 文献 [3] の結果を引用

に対して，$\sum_{j \in J_i} a_{ij} \leq b_i$ でなくてはならない．なお，本研究の定式化では，割当てコスト $f_i(J_i)$ は効率的に計算可能である必要はなく，その計算自体が NP 困難であってもよい．これにより，並列機械スケジューリング問題や容量制約つき配送計画問題なども割当型問題として捉えることが可能になる．

この割当型問題に対して，反復局所探索法によるアルゴリズムを実装した．すべての割当てからなる集合を探索空間とし，近傍として，シフト近傍（現在の割当てから，ある 1 つの仕事の割当てを変更して得られる割当て集合）とスワップ近傍（ある 2 つの仕事に対して，割当てられているエージェントを交換することで得られる割当て集合）を用いた．ところで，局所探索においては，現在の割当てや近傍内の割当てに対してそれらの割当てコストを計算する必要がある．しかし，本研究の定式化では割当てコストを効率よく計算できるとは限らないため，割当てコストとして近似値を用いることを許可し，計算時間の短縮を行っている．ただし，このとき，割当てコストの計算をどの程度正確に行うかが問題となる．一般に，コストの計算を正確に行えば，より効果的な探索が期待される反面，多くの計算時間が必要となり，逆に，コストの計算にあまり時間をかけなければ，局所探索の反復を数多く実行できるが，最終的に得られる解の精度はあまり望ましいものではなくなる．そこで本研究では，割当てコストの近似値を，あまり正確ではないが高速に計算するルーチン（高速ルーチン）と，比較的多くの計算時間をかけ，より正確な値を計算するルーチン（精密ルーチン）の 2 種類のルーチンを併用して局所探索を行う方法を提案した．なお，割当てコストの計算を行うこれらのルーチンは問題依存であるが，それ以外のルーチンは，汎用的なものであり，さまざまな割当型問題に対して同様に適用可能である．したがって，ユーザが開発すべきルーチンは，割当てコストの計算ルーチン（高速ルーチンおよび精密ルーチン）のみである．

提案手法の有効性を評価するため，並列機械スケジューリング問題と容量制約つき配送計画問題を対象に計算実験を行った．ともに割当型問題として定式化した場合，割当てコストの計算が NP 困難になる問題である．例えば，容量制約つき配送計画問題の場合，エージェント i の割当てコスト $f_i(J_i)$ を計算することは都市数 $|J_i|$ の巡回セールスマン問題を解くことと同値であり，割当てコストの近似値の計算は，実行可能な巡回路を 1 つ

生成することで実現できる．また，局所探索において近傍解評価のために $f_i(J_i)$ を計算するとき，J_i は現在の割当て J_i' との共通部分が多いため，$f(J_i')$ の計算のために生成した巡回路を活用することができる．この性質を利用し，高速ルーチンでは，J_i' 用の巡回路に対し新たな都市を挿入するなどの軽微な修正を行い，J_i 用の巡回路を生成している．一方，精密ルーチンでは，高速ルーチンと同様の操作を行った後，単純な局所探索法を実行している．

計算実験の結果，高速ルーチンと精密ルーチンの 2 種類を使い分けることで，両方の利点を活かした効率的な探索が実現できることが分かった．また，並列機械スケジューリング問題や容量制約つき配送計画問題専用に設計されたアルゴリズムと比較しても，解の質に関しては遜色のない結果が得られており，とくに並列機械スケジューリング問題に対しては，計算時間の面でも専用アルゴリズムと同等であることが確認できた．

9 時間枠つき配送計画問題とその拡張

時間枠つき配送計画問題は，複数台の車両を用いて荷物の集配を行う際，車両の容量や顧客の指定時間枠などの種々の制約を満たしつつ，配送に伴うコストの最小化を図る問題である．これは，宅配などへの直接的な応用だけでなく，種々のスケジューリング問題なども含む非常に汎用性の高い問題である．また，移動距離を短くすることは輸送費用削減につながり，間接的には CO_2 削減にも寄与するなど，環境問題への取り組みへの貢献も期待できる．この問題に対し，時間枠に関するペナルティ関数を導入した汎用的な問題を提案し，その最小化問題に対して，動的計画法に基づく高速なアルゴリズムの開発を行ってきた．また，客間の移動時間が時刻に依存する場合や，客間の移動時間に柔軟性がある場合など，種々の拡張を検討し，非常に汎用性の高い定式化に対する局所探索法に基づく近似解法の開発を行ってきた．

以下では，それらの中から，客間の移動時間にも柔軟性を持たせた定式化に対する成果についてやや詳しく述べる．車両が客間を移動するのに要する時間（荷下ろしなど客のサービスに要する時間も含む）は，既存の研究では定数として扱われてきたが，本研究では，移動時間に伴うコスト関数を導入することで，問題の汎用性を高めている．現実の配送計画では，人手を増やすことでサービス時間を短縮する，有料道路を使って移動時間を減らすなど，コストを伴うことで移動時間に自由度を持たせられるケースは多く見受けられるため，このような柔軟性を取り入れたモデルに対する性能の高いソルバがあれば，非常に有用であると考えられる．

アルゴリズムの設計方針は，すべての制約条件を考慮制約として扱い，得られたペナルティ関数を最小化するというものである．1 つの車両の客の訪問順序が与えられたとき，各客におけるサービス開始時刻を決定するという部分問題を解く必要が生じるが，この部分問題の計算の複雑さを理論的に解析し，

- 客間の移動時間コストが一般の場合には NP 困難であることを示し，
- 移動時間に対するコストが凸関数の場合にはこれを厳密に解く動的計画法を考案した

ところが独創的な点である．さらに，この動的計画法の計算を高速化するために，精密なデータ構造に基づく様々な工夫を加え，実用性の高いアルゴリズムに仕上げることに成功した．

このアイデアを組み込んだメタ戦略アルゴリズムとして，反復局所探索法を提案し，代表的なベンチマーク問題例に対して一定の成果をおさめた．また，移動時間の短縮を考慮した問題例に対する計算実験を行い，そのようなコストを支払うことで，移動時間が固定された定数である場合よりも時間枠による制限を緩める効果が生じ，車両台数を減らしたり，移動距離を小さくしたりできることを確認した．このような柔軟な配送スケジュールを提示できることで，ユーザの選択肢が増え，利便性の向上が期待できる．

10 集合被覆問題

集合被覆問題は，複数の要素と要素集合の族，および各集合のコストが与えられたとき，全ての要素をカバーするように要素集合をいくつか選

び，選ばれた集合のコストの総和を最小化する問題である．この問題に対する，大きな近傍を利用した局所探索に基づくメタ戦略アルゴリズムを提案した．

この問題は，たとえば，飛行機や列車の乗務員スケジューリング問題などの重要な実用問題を解く際の部分問題として利用されるなど，実用上重要な基本問題である．このような実用の場面においては，問題サイズが極めて大きくなる傾向にあり，要素集合族の大きさが 100 万を越えることも少なくない．実際，そのような大規模な問題例がベンチマークとして公開されている．そのような大規模な問題例に対してもアルゴリズムが効率よく動作するように注意を払いつつ，メタ戦略アルゴリズムの設計・開発を進めた．

大規模なためのアイデアのひとつとして，集合被覆問題のラグランジュ緩和問題から得られる情報を利用しつつ，問題サイズを適応的に縮小する工夫を行った．具体的には，よい解に含まれる集合については，ラグランジュ緩和問題を解くことによって得られる相対コストの値が小さい傾向にあることに着目し，そのような集合に絞って探索を行うようにしている．ただし，探索対象の集合の絞り方が適切でないと，解の精度が落ちることが懸念される．そのため，探索状況に応じて探索対象の集合の選択を時々修正するという工夫を加えている．

また，メタ戦略の基本となる局所探索法において，大きな近傍を効率よく探索する工夫を行うことで，解の質と求解のスピードの両面における改善を図っている．具体的には，近傍操作において，3 つ以下の集合を入れ替えるというものを考えた．このように近傍を拡大することで，解の精度の向上が期待できるが，このような近傍操作に基づく近傍の中から改善解を探索するアルゴリズムを単純に実装してしまうと，集合族の大きさを n として $O(n^3)$ 時間を要する．n は 100 万を越えることもあるので，このような実装では現実的な時間では探索が終了しない．そこで，問題のコスト構造をうまく利用することで，改善の望みのない解への探索を省略する工夫を加え，改善解の探索の計算手間を大幅に改善している．

さらに，探索中に実行不可能解を探索することを許容し，制約違反をペナルティとして評価するという方針を取った．制約違反のペナルティに対する重みの適正値は，問題例に大きく依存し，その値を手動で調整することは現実的でないため，ペナルティ重みを探索中に適応的に調整するメカニズムを導入した．これにより，実行可能領域と実行不可能領域を交互に行き来するように探索を誘導する戦略的振動を実現している．

以上のような工夫を総合した結果，大規模なベンチマーク問題に対してこれまで知られていた最良の解よりもよい解を発見するなど，大きな成功を収めることができた．

また，集合被覆問題に対して開発したアルゴリズムやそこで得られた知見を用いて，織機の能力を最大限に引き出す問題や，グラフの種々のカット問題など，一見タイプの異なる問題に対するアルゴリズムも開発中であり，一定の成果が得られつつある．

さらに，集合被覆問題に対して緩和法を中心とした数理計画の手法に基づくさまざまな発見的解法を実装し，代表的なベンチマーク問題例に対する数値実験を通じて，それらの解法の性能を評価した．

11　正方形被覆問題

正方形被覆問題は，2 次元平面上に与えられた複数の点すべてを覆い尽くすように，大きさの決まった正方形を配置する問題であり，使用する正方形の数を最小化することが目的である．この問題は，公共施設の配置や VLSI 設計，画像処理分野などに応用を持つ．本研究では，従来の定式化に容量制約を追加した問題を考え，集合被覆アプローチ，メタヒューリスティクスの 2 種類の解法を提案し，その性能を評価するために計算機実験を行った．

集合被覆アプローチは，1 つの正方形で被覆することのできる極大点集合を予めすべて列挙しておき，問題を集合被覆問題として定式化する方法である．極大点集合の列挙には，重み付き極大クリーク列挙に対する出力線形アルゴリズムを用い，効率の良い列挙を行っている．アルゴリズムの性能は，列挙する極大点集合の数に大きく依存することが予想され，計算実験によりこれを確認した．容量制約がない問題例や容量制約が非常に厳しい

問題例，点の分布が疎である問題例に対しては，列挙の数が少なく抑えられる傾向にあるため集合被覆アプローチは効果的である．逆に，容量制約がある程度厳しく，さらに点が平面上密に分布している場合には，列挙すべき極大点集合が多くなり，非実用的となる．

一方，メタヒューリスティクスによるアプローチでは，まず欲張り法を用いて実行可能解を生成した後，正方形の数を 1 つずつ減らしていく．すなわち，実行可能解から正方形を 1 つ取り除いた後，正方形の数を増やすことなく，これが実行可能となるように修正を加える．解の修正にはメタヒューリスティクスを用い，実行可能解を得ることができる限り，正方形を取り除き解を修正する操作を繰り返す．本研究では，アルゴリズムの基本となる局所探索法に，タブー探索，散布探索などのアイデアを取り入れ，高性能化を実現した．また，初期実行可能解を生成するための欲張り法は，近似比 4 を持つものであり，とくに容量制約がない問題例に対しては近似比 2 を持つ．計算実験の結果，メタヒューリスティクスアプローチは，その性能が問題タイプに大きく依存しないことが分かり，集合被覆アプローチが有効に働かないタイプの問題例に対しても良質の解を求めることができた．最後に，点数 1600 の問題例に対する計算結果の例を図 11に示しておく．

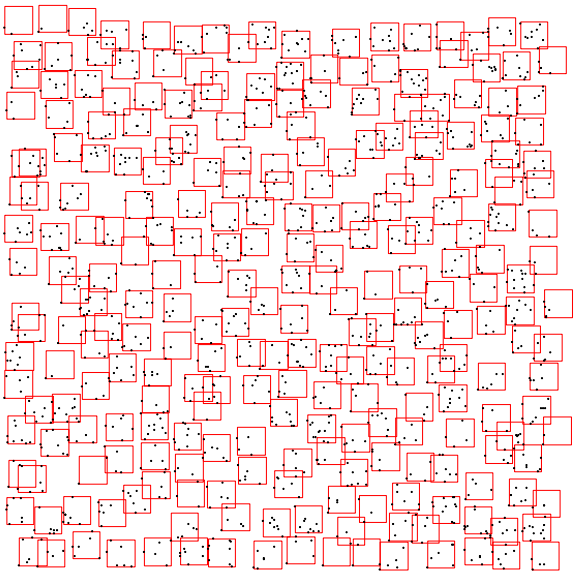


図 11: 正方形被覆問題に対する計算結果の例（点数 1600，正方形数 263）

12　ロボット動作計画問題

ロボット動作計画問題とは，ロボットと障害物の形状と，それらの位置・姿勢が与えられたときに，ロボットの初期姿勢から目的姿勢に至る動作経路を求める問題である．

回転軸を含むロボットの場合，動作経路を求めるために，各々の姿勢に対してロボットと障害物が衝突するかどうかを調べる必要がある．しかし，ロボットの取り得る姿勢の数は，自由度の数に対して指数関数的に増加するため，全ての姿勢を調べることは困難である．そこで，限られた数の姿勢に対してロボットが障害物と衝突するかどうかを調べ，その情報をもとに動作経路の探索を行う，確率的・発見的手法がいくつか提案されている．

本研究では，メタヒューリスティクスの 1 つであるパス再結合法の考えにもとづき，初期姿勢・目的姿勢の各々に到達可能な姿勢からなる 2 つ集合を用意し，各集合から仮の初期姿勢と目的姿勢 (もしくは目的姿勢と初期姿勢) の組を選んで局所探索法を適用する手続きを繰返し行う，双方向局所探索法を提案した．また，産業用アームロボット (6 軸)(図 12) に対する数値シミュレーションを通じて，提案解法を用いて障害物と衝突しない動作経路を短時間に見つけられることを確かめた．

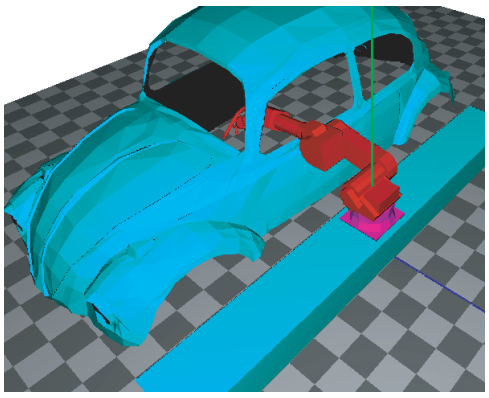


図 12: 産業用アームロボット (6 軸) の例

13 フロータイム及び電力量を最適化するジョブスケジューリング

モバイル情報機器の開発において, 長時間のバッテリ駆動を実現するには, 電力消費の効果的な制御が最重要課題である. プロセッサの高速化及び高密度化に伴い, 単位面積あたりの消費電力は 3 年に 2 倍のペースで指数的に増大している. 一方, 機器を駆動する電池に関しては, 大容量化が進んできているもののプロセッサの進歩と比べるとなかなか追いついていないのが現状である. これを打破するための中核技術となっているのが, プロセッサ上での動的な動作周波数（スピード）制御である. 例えば時間当たりのジョブが少ないときは低いスピードで処理すれば消費電力は抑えられる. ここで重要となってくるのがスピードスケーリング問題である. すなわち, 総消費電力量を低く抑えるには, 逐次投入されるジョブをどのようなスピードで実行するのが最適な戦略であろうか.

我々は総消費電力にジョブの総滞在時間を加えた量を目的関数とする新しいモデルを提案する. スピードスケーリング問題を議論するに際し, ジョブ投入から処理完了までの滞在時間も考慮すべき重要な要素である. 従来の研究では, 各ジョブにそれぞれ処理完了期限が設定され, これを入力の一つとして与えてきた. しかしながらモバイル機器の上ではジョブの終了に関しては通常, ベストエフォートが原則であり, 明確な完了期限は与えられないのが普通である. 実際, Windows や UNIX といった OS においても処理完了期限に基づいたスケジューリングは行われていない. 我々のモデルでは, ジョブの滞在時間をコストに組み込むことにより, 電力量と処理時間のトレードオフを解決することが可能である.

我々は, 単位時間当たりの消費電力量と総滞在時間の増分に着目し, これらの比をある一定の比に維持するフェーズバランスアルゴリズムを設計した. このアルゴリズムでは, 消費電力量と総滞在時間のどちらか一方が無限大に発散するリスクが回避される. 解析の結果フェーズバランスアルゴリズムが最悪評価において有界な競合比を持つことを証明した. また, 動的計画法に基づき多項式時間で最適スケジュールを計算するオフラインアルゴリズムを設計した.

14 オンライン・オフライン混合ジョブスケジューリング問題

ジョブスケジューリング問題では通常, 全てのジョブの情報があらかじめ分かっている場合について議論される. しかしそのような始めから分かっているジョブ（オフラインジョブと呼ぶ）以外に後から緊急にジョブ（オンラインジョブと呼ぶ）が追加され, 作成されたスケジュールを変更しなければならない場合が考えられ, 近年研究者の注目を集めている. こういったオンラインジョブに対応するスケジューリングで多く研究がなされているのは, 実行中のジョブの中断が許可されるモデルである. 本研究ではその中断を不許可とするモデルを考察する. このモデルも実用上非常に重要なのであるが, 実行中ジョブの退避が出来ないためスケジュール管理がより困難になる. 我々は, オンラインジョブ発生に関するある予測を基に動作するリスケジューリングアルゴリズムを設計する.

本研究では, ジョブを実行する機械は 1 つで, 全てのオフラインジョブは納期付きで時刻 0 から実行開始可能であるとする. 目的は, 納期遅れジョブ数期待値の最小化とする. この設定の下でオンラインジョブが 1 つも発生しない仮定しよう. この場合アルゴリズム NTJ が最適であることが知られている. これは, 基本的には納期の早い順にスケジュールに並べていき, もし納期違反になっていればスケジュールを遡り現在並べたジョブも含めて最も処理時間の長いジョブを取り除いて前に詰めるというものである. 今, 目的関数が納期遅れジョブ数であるため, 一旦納期遅れが確定したジョブは幾ら遅れても目的関数への影響は変化せず, 従って取り除かれたジョブは十分後に処理すると考えてよい. また後程用いるサブルーチンとして, 終了時刻付き NTJ を定義しておく. これはパラメータとして終了時刻をとる. 基本的には NTJ と同じ動作なのだが, あるジョブを並べたときそれが終了時刻以降に終了すればそのジョブは取り除いて十分後に処理する, という動作を追加したアルゴリズムである.

さてオンラインジョブが発生する場合を考えよう. 我々は今述べたアルゴリズム NTJ をベースにリスケジューリングアルゴリズムを設計する. こ

こでリスケジューリングとは, オンラインジョブが発生しそれが実行可能になる機会毎にその時刻以降のスケジュールを再構成することである. また時刻 0 でのスケジューリングにも同じアルゴリズムを適用するものとする. 以下では, オンラインジョブの処理時間はオフラインジョブに比べ 3 割までと短く, 納期は発生以降比較的早くやってくるものとする. またその各時刻における発生確率が既知であるとする. 我々が設計したアルゴリズムは次の 3 つである. アルゴリズム GRD: オンラインジョブ実行毎に NTJ を適用. アルゴリズム ADPT: オンラインジョブ実行毎に終了時刻付き NTJ を適用. ここで終了時刻は, リスケジューリング時点以降初めて発生確率が閾値以上になっている時刻. オンラインジョブに対しては特別に NTJ を適用. アルゴリズム ADPTEXP: オンラインジョブ発生毎に GREEDY と ADPT の納期遅れジョブ数期待値の概算値の小さい方を採用. ADPT と ADPTEXP はパラメータとして閾値をとるアルゴリズムである.

以上の 3 つのリスケジューリングアルゴリズムの性能を評価するために計算実験を行った. 時刻を 1 から 200 までとし, オフラインジョブ数を 20 個, 処理時間は 8 から 12 に設定した. オンラインジョブの発生確率は 2 つのピークのあるもの (パタン 1) とランダムに設定したもの (パタン 2) の 2 種類を用い, オンラインジョブの処理時間は 1 から 3 に設定した. 各パタンについてそれぞれ 1000 通りのオンラインジョブ列を生成した. 各アルゴリズムの評価値はオンラインジョブの発生情報を事前に知った場合の最適スケジュール (OPT) との納期遅れジョブ数の差を用い, 表 13 に結果の平均値を示す. ADPT, ADPTEXP では閾値を 0.1 から 0.9 までの値を用いて実験を行ったが, パタン 1 では ADPT は 0.5, ADPTEXP は 0.6, パタン 2 では ADPT は 0.7, ADPTEXP は 0.7 の時に最も良い解が得られた. なお, ADPT では閾値の設定によって大きく解の精度が変化したが, ADPTEXP は閾値による解の変化が小さかった.

	GREEDY	ADPT	ADPTEXP
パタン 1	2.95	0.85	2.14
パタン 2	5.31	3.04	4.63

図 13: OPT との納期遅れジョブ数差の平均値

15 衝突確率を考慮した生産ラインの効率化

近年，液晶テレビ，プラズマテレビ，ノートパソコンなどに用いられる平面ディスプレイ（FPD）の需要が高まってきており，効率の良い製造方法が求められている．元となるガラス基板の大型化や技術進歩に伴い，生産効率も良くなってきているが，一方で生産ラインも日々変化し，新たな課題も生じている．最近，Crystal Flow のような高度なシステムが開発されているが，これは既存ラインだけでなく，次世代生産工程におけるより高度なライン制御を目指して，進化していくものである．

FPD の生産システムは，タクトタイム方式で稼動するものが多い．これは，システムへのガラス基板の投入間隔を一定にすることで，制御が簡単になるばかりでなく，単位時間当たりの生産数の正確な見積もりをすることができるという利点がある．機械の処理時間は，様々な原因（例えば，熱処理，薬品処理などの影響）で一定とならず，そのときの状況によって変化する．それゆえ，システム稼動中に，ガラス基板同士の衝突が起こる可能性があるが，ガラス基板は高価でもろいので，衝突はできるだけ避けることが求められている．

生産効率をよくするには，タクトタイム（ガラス基板のシステムへの投入間隔）をできるだけ短く設定すればよいが，その分だけ衝突確率はあがる．これが，タクトタイムと衝突確率のトレード・オフである．このトレード・オフを考察するには，与えられたタクトタイムに対して衝突確率を評価することが重要である．現在のところ，タクトタイムの設定は，現場担当者の長年の経験に頼っている．しかし，実際には機械での遊び時間が目立つ場合が生じるため，ユーザーには大きな不満が残ってしまう．

そこで本研究では，FPD などの製造装置を簡単化したモデル上で，衝突確率の理論解析を行っ

た．そのモデルは，各機械のバッファ（ガラス基板が一時的に退避できる場所）が有限である直列型待ち行列と呼ばれる待ち行列ネットワークであり，生産システムなどの評価において従来から使われてきたものである．しかし，従来の研究では，衝突時のジョブの扱い方（例えば，即時式，待時式など）に基づいて，定常状態における性能を評価しているものが主であった．それに対し，本研究では，予め生産個数を決め（有限の時間区間を想定していることに対応），その期間内に衝突が少なくとも一度は起きる確率を評価尺度としている点が，従来の問題設定とは異なる．このような評価尺度は，衝突によって大きな損害を被る状況においては，妥当なものであろう．

これまでに処理時間を確率変数とみなした場合に，衝突確率の近似式が知られていた．具体的には，処理時間が一般分布に従う場合には，近似衝突確率は多重積分の形となるが，特に指数分布に従う場合には，閉じた形で表すことができる．実際の処理時間の観点からみると，指数分布ではなく，確率密度関数が左右対称なつりがね状になるものを採用するのが妥当であろう．正規分布は，そのような曲線であるが，負の定義域において，正の関数値をとるのが欠点である．本質的に処理時間は非負の値だからである．そこで，このような欠点を克服するために，本研究ではアーラン分布を仮定した．アーラン分布は，指数分布を拡張したものであり，適切なパラメータを設定することで，実際の処理時間の振る舞いを良く表すことができる．解析の結果，やはり閉じた形で表せることに成功した．

数値結果を図 14に示しておく．ここでは，機械数が 2，ジョブ数が 1000，各機械で処理時間は平均値が 1 分散が 0.1 のアーラン分布に従うと仮定した．図 14から，近似式とシミュレーションによる評価結果がほぼ同じになり，タクトタイムが増えるに従って，衝突確率が下がることが見てとれる．また，より広いパラメータ範囲で，衝突確率を高速に求めるための新しい近似方法も提案した．その近似衝突確率も高い精度を持つことを確認した．

また，衝突確率を低く保ったまま，タクトタイムとバッファの個数を最小化するための効率的な手法の考察を行った．具体的には，衝突確率 α を

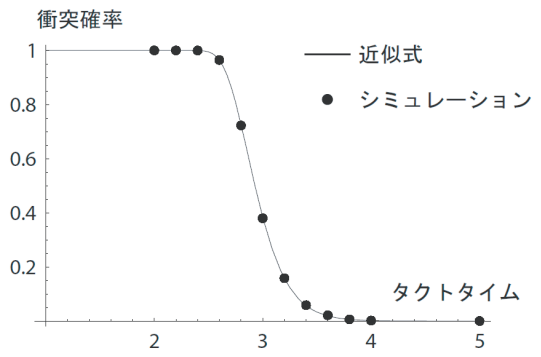


図 14: 近似式とシミュレーションによる衝突確率の例.

パラメータとし，衝突確率が α 以下という制約の下でタクトタイム最小化問題を定式化した．この問題には，上述のトレード・オフ関係を利用すれば，二分探索法を適用することができる．また，衝突確率とタクトタイムをパラメータとして，バッファ数最小化問題を定式化した．この問題に対し，本研究ではシミュレーションにより最も衝突が生じやすい場所から，順にバッファを配置していく手法を提案した．各場所のバッファの個数が増えるに従って，衝突確率が単調に減少するという性質を利用することで，二分探索のアイディアを適用することができ，効率よくバッファを配置することができる．以上の手法を実装し，計算実験によりその効果を確かめた．

16　段ボール生産工程のスケジューリング

具体的な生産工程のスケジューリングの例として, 段ボール生産企業と共同研究を行い, 工程の効率化のためのアルゴリズムを考案し大幅な改良を実現できる可能性を指摘し, 提案した.

段ボールは, 3 枚の性質の異なる紙をロールから巻きほどきながら接着することによって製造される．ロールは何種類かの標準幅をもつので, 段ボールの各注文は, まずどの幅のロールを用いるかを決定し, その後同じ幅に割りつけられたすべての注文を順にコルゲータという機械を用いて貼り付ける. 標準幅への割りつけは, 幅に合わず切り捨てられる無駄部分の面積と, 必要となるロール

長を考慮して, 整数計画問題を解くことによって決定する. コルゲータ上での処理順序については, 各注文が要求するロールの紙質が異なる場合にはロールを取り換える必要があって, そのための機械停止の回数が少なくなるように決めることが望まれる. 機械は, 同じ紙質の注文が一定以上の長さつづく場合には, その間に準備することによって停止を避けることができるという特性をもっている. これを利用して, 機械停止の回数を少なくする問題は, 新しいタイプのスケジューリング問題として記述される.

この研究では, 機械停止を必要とする注文の並び方を数学的に明らかにしたのち, 停止回数を最小にすることは, 一般的には NP 困難であることを示し, その上で, 実用的に有効な欲張りアルゴリズムに基づく近似解法を提案した. 実データに基づく計算実験の結果, 提案手法によると, 多くの場合最適なスケジュールが得られること, また, エキスパートが求めたスケジュールに比べ, 機械停止回数が圧倒的に少ないことを確認した.

17 現実のネットワークの特性に関する研究

インターネット，Web グラフをはじめ，経済，マーケティング，流行現象，伝染病の伝播，生態系，人間関係など，多くの領域で「ネットワーク」が見られる．近年のコンピュータ技術の発達によるデータ収集･解析能力の向上によって，このような現実のネットワークの性質が詳細に分析できるようになってきた．その結果，現実のネットワークはまったくランダムなネットワークとは異なり，特徴的な性質を持つということが分かってきた．このようなネットワークの特性を調べることにより，様々な応用に際してアルゴリズムを適用する範囲を限定でき計算量の削減につなげられる可能性がある．そこで，本研究では，主に現実のネットワークの特性を反映する適切な数理モデルの構築と解析に重点を置き，その結果として，現実のネットワークにおいて，メタヒューリスティックスをはじめ様々なアルゴリズムの計算量の削減につなげることを目指した．

複雑ネットワークの研究は，構造の解明と機能の解明に大きく分類できる．前者はスモールワールド性やスケールフリー性など現実のネットワーク形状の特徴の研究が目的である．後者は，ウィルス感染など，ネットワーク上で起こる現象の研究が目的である．構造と機能という二つの観点から本研究を進めた．

まず, 機能の観点からの研究として, 現実の情報通信ネットワークなどの自律的に形成されるネットワークの特性を反映した形成モデルの解析を行った．具体的には，携帯電話のトラフィックと加入者数の関係を実データに基づいて解析し，ネットワーク形成モデルを構築した．その結果，携帯電話加入者が形成するネットワークを，グラフから次数の高い点が優先的に選び出された点集合から得られる生成部分グラフと捉えることにより，実データの傾向と整合性を持つモデルが得られた．一方，ランダムな点の選択では整合性を持たせることはできない．したがって，携帯電話の加入は，人間関係においてハブとなる人間から優先的に起こったと解釈することができる．また，観測されたグラフ（生成部分グラフ）の次数分布のべき指数から，元のグラフの次数分布のべき指数を推定することもできることを示した．つまり，携帯電話加入者ネットワークデータから人間関係ネットワーク全体の特性を推定できることを示した．

さらに，通信ネットワークにおける P2P(peer-to-peer) 通信に関して，効率の良い制御方式を調べた．効率よく目的のデータを取得するためには，実際のネットワーク上に仮想的に構成するオーバレイネットワーク（P2P ネットワーク）の構造が非常に重要である．そこで，頂点数が大きくても，次数と直径が小さい de Bruijn グラフを用いることによって，ルーティングに必要な次数を最悪 4 に抑えつつ，目的ノードまでのホップ数を最悪 $\lceil \log_2 n \rceil$（n はノード数）に抑えることができるオーバレイネットワークの構成法を提案し，その構成法に基づいて構成したネットワークの性能をシミュレーションによって性能評価した．また，P2P ネットワーク上でのマルチキャストは，コンテンツや更新ソフトウェア配布などの際に必要であるが，その配布経路を与えるマルチキャストツリー決定法を検討した．一般の通信ネットワークは任意のグラフ構造を取りうるが，本研究では de Bruijn グラフをベースとしたグラフ構造になっているため，負荷を抑制できる効率的なマルチキャストツリー

の構成が可能である．このマルチキャストツリーの構成において，ネットワークグラフ全体を入力情報として利用することは困難であり，各ノードが局所的な情報だけからマルチキャストツリーの隣接ノードを決定することが必要であるが，各ノードが各自に割り当てられたアドレスに基づいて次数制約全域木を決定するアルゴリズムを提案し，シミュレーションにより性能評価した．

次に，構造の観点からの研究として，複雑ネットワークの生成モデルである閾値モデルの性質を明らかにした．現実世界に存在するネットワークの中には，次数分布がべき則に従うという性質（スケールフリー）や，クラスター係数や隣接点平均次数などに関しても特徴的な性質を持つものもある．このような特徴を持つネットワークの生成モデルとして，各点に重みが確率的に与えられており，点 v_i と v_j の間には，v_i と v_j の重みの和や積（一般的には 2 点の重みの関数）がある閾値を越える時，またその時に限って辺が張られるという原理で生成される閾値モデルというものがある．この閾値モデルにおいて，特に重みがガウス分布に従う場合を調べ，数値実験によりスケールフリー性に近い性質を持つことを示した．

18　オンライン領域追跡問題

有名なオンライン問題の 1 つに k サーバ問題がある．プレーヤーには平面上の k 個のサーバを与えられ, 要求として与えられた点に k 個のうちのいずれかのサーバを移動させるということを繰り返す．問題の目的は一連の要求列に対するサーバの移動距離の総和を小さくすることである．これまでに競合比の下界が k であることが知られている．本研究ではサーバが 1 個の場合を取り上げる．サーバが 1 個では上で述べた k 個の中から選ぶという選択の可能性がなくなってしまうので問題として成立しない．しかし, サーバの移動を要求点そのものでなく, その「近く」でも良いとするなら話は違ってくる．具体的には, 要求に対して一定の領域を対応させ, サーバはその領域内のどこかに移動させれば良いとする．つまりプレーヤーは単一のサーバをもって要求領域を「追跡」するのである．例えば移動無線中継車を使って次々と発生する事件を追跡する問題や, 進入制限のある旧市街のホテルからタクシーを呼ぶ場合等への応用が考えられる．既存結果は, 要求領域が凸である場合に, 有界な競合比を持つアルゴリズムが存在することのみであった．

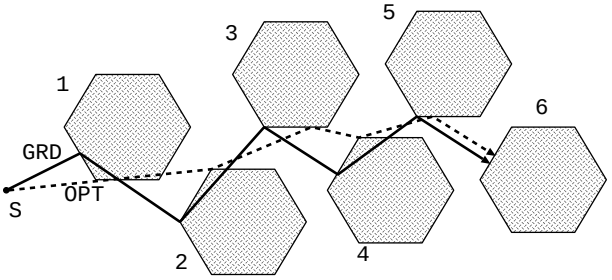


図 15: 正 6 角形を追跡する貪欲アルゴリズムと最適オフラインアルゴリズム

表 2: 正 n 角形を追跡する貪欲アルゴリズムの競合比

n	3	4	5	6	7	8
競合比	2.00	1.41	3.24	2.00	4.49	2.61

我々は, プレーヤーが要求領域の形状を事前に知っている場合にその形状情報を利用してどのように巧い追跡ができるかという点に興味がある．本研究では要求領域としては正多角形を選んだ．そしてプレーヤーのアルゴリズムとしては貪欲アルゴリズムに注目し性能解析を行った．貪欲アルゴリズムとは, 現在サーバのいる地点から最短距離で要求領域へと移動させるアルゴリズムである．性能尺度である競合比の解析に際しては償却解析と呼ばれる技法を用いる．解析の鍵は, 償却解析で適用するポテンシャル関数の選択である．試行錯誤の後, 正多角形の各辺の方向に関してマンハッタン距離を一般化したものがポテンシャル関数として有効であることを発見した．そしてこれを適用した結果, 正 n 角形に対して貪欲アルゴリズムの競合比が n が, 奇数ならば $1/\sin(\pi/2n)$, 偶数ならば $1/\sin(\pi/n)$ となることを証明した．さらにこの解析はタイトであり, 即ちこの値になるような要求領域列を実際に生成可能である．また, 別のアルゴリズムとして仕事関数アルゴリズムについての考察と, 凹領域の場合における競合比下界も与えた．

19　貪欲アルゴリズムの理論的解析

いわゆるマトロイド構造を有する組合せ最適化問題に対して貪欲アルゴリズムが最適解を見出すが, マトロイド構造をもたない問題に対してもしばしば貪欲アルゴリズムが効率よく近似最適解を見出す. そのような観点から, 近似あるいはヒューリスティックアルゴリズムにおける貪欲アルゴリズムの重要性が認識されている. 本研究は, 貪欲アルゴリズムの本質を解明し, より広い枠組みで有効な貪欲アルゴリズムの設計を可能にする基礎理論の構築を目的にし, 研究を進めた.

20　不等式系に対する逆関数定理

方程式の解の存在性, 安定性は様々な数学分野で現れる重要な概念である. 逆関数定理はそれらを保証する最も基本的な定理の一つであり, それ自身興味深い研究対象と言える.

例えば, 変分問題等の連続最適化問題を解くにあたって, 逆関数定理を用いて実行可能領域に対する接ベクトルを計算し, ラグランジュ乗数法等の最適性の必要条件を得ることができる. しかし, 現代的な連続最適化問題に対しては, 古典的な逆関数定理が利用できないことが多い.

というのは, もし制約が方程式系ならば逆関数定理が適用可能だが, 応用上現れる最適化問題を定式化する場合は, 選択肢が何らかの範囲内にあることを表現するために不等式を用いる場合が多いからである.

それに対して, 我々の研究する逆写像定理は不等式系に対しても適用することができ, 逆像が多価写像であっても, 良い振舞いをすることを保証する. 近年では, さらに, 正則性の定量解析と呼ばれる逆像の振舞の良さを数値化する手法が注目されている.

我々はその代表的な未解決問題である無限次元空間における正則半径の定理を, 連続関数空間で証明した (Mathematical Programming に掲載予定, イスラエル工科大学 Ioffe 教授との共同研究). 正則性の定量解析を応用すると最適化問題の制約式の安定性を数値化 (条件数) でき, その数は最適化アルゴリズムの計算量解析に用いることができる.

また, 実行可能領域に対する接ベクトルを計算する問題を研究した. 接ベクトルは最適性の必要条件を求める際に必要となる. 結果として, 制約式を定義する写像が連続という仮定のみで, 実行可能領域に対する接ベクトルと法線ベクトルの新たな公式を得た. 過去の結果と比較すると, 本研究ではリプシッツ連続性の仮定を連続まで弱めることに成功している.

研究業績一覧

著書

1. T. Ibaraki, K. Nonobe and M. Yagiura, eds.: “Metaheuristics: Progress as Real Problem Solvers”, Springer, NY, 2005.
   概要: The framework of metaheuristics can produce robust and efficient algorithms for many computationally hard problems in real-world applications. This book comprises the papers carefully selected from those presented at the Fifth Metaheuristics International Conference (MIC2003). The book features those papers describing applications of metaheuristics as real problem solving tools, and also contains those discussing methodologies of metaheuristics.

2. S. Fujishige and M. Yagiura, guest editors: “Pacific Journal of Optimization, Vol. 1, No. 3”, Yokohama Publishers, 2005.

3. S. Imahori, M. Yagiura, S. Umetani, S. Adachi and T. Ibaraki （分担執筆）:
   “in: T. Ibaraki, K. Nonobe and M. Yagiura, eds., Metaheuristics: Progress as Real Problem Solvers”, Springer, NY, 2005, Chapter 8 (22 pages).
   概要: We consider the two-dimensional cutting stock problem that arises in many applications in industries. In recent industrial applications, it is argued that the setup cost for changing patterns becomes more dominant and it is impractical to use many diRerent cutting patterns. Therefore, we consider the pattern restricted two-dimensional

cutting stock problem, in which the total number of applications of cutting patterns is minimized while the number of diRerent cutting patterns is given as a parameter n. For this problem, we develop local search algorithms. As the neighborhood size plays a crucial role in determining the e ± ciency of local search, we propose to use linear programming techniques for the purpose of restricting the number of solutions in the neighborhood. In this process, to generate a cutting pattern, it is required to place all the given products (rectangles) into the stock sheet (two-dimensional area) without mutual overlap. For this purpose, we develop a heuristic algorithm using an existing rectangle packing algorithm with the sequence pair coding scheme. Finally, we generate random test instances of this problem and conduct computational experiments, to evaluate the eRectiveness of the proposed algorithms.

4. 柳浦 睦憲（分担執筆）：
“簡単そうで難しい組合せ最適化 — 身近な話題から”, 数理工学のすすめ（改訂版），現代数学社, 2005.
概要: 計算困難な組合せ最適化問題に対するさまざまな現実的アプローチを身近な例を題材に取って解説する．具体的には，分枝限定法，動的計画法，欲張り法，局所探索法，メタ戦略などを概観したのち，近似解法の理論的成果に関しても触れる．

5. K. Nonobe and T. Ibaraki（分担執筆）：
“A Metaheuristic Approach to the Resource Constrained Project Scheduling with Variable activity durations and Convex Cost Functions”, in: J. Jozefowska and J. Weglarz, eds., Perspectives in Modern Project Scheduling, Springer Science+Business Media, 2006.
概要: We introduce a generalized model of the resource constrained project scheduling problem (RCPSP). It features that (i) the duration of an activity is not constant, but can vary in a specified range, and (ii) the objective is to minimize a convex function of time-lag costs, where a time-lag cost is charged according to the difference between the start/completion times of activities. These features achieve the flexibility of the model. It is known that, in the RCPSP, resource constraints can be replaced by some precedence constraints appropriately defined between the activities that require a common scarce resource. If we remove resource constraints by precedence constraints, our problem can be formulated as the dual problem of a minimum cost flow problem, and thus can be solved efficiently. Exploiting this property, we design a heuristic algorithm based on local search. We conducted computational experiments with benchmark instances to minimize the weighted earliness-tardiness costs, as well as instances in which activity-crashing or relaxation of temporal constraints are allowed. These results indicate the usefulness of our generalized RCPSP model and the proposed algorithm.

6. M. Yagiura and T. Ibaraki（分担執筆）：
“Generalized Assignment Problem”, in: T.F. Gonzalez, ed., Handbook of Approximation Algorithms and Metaheuristics, Chapman & Hall/CRC in the Computer & Information Science Series, 2007, Chapter 48 (18 pages).
概要: 一般化割当問題に対する近似解法を中心に，古典的なアルゴリズムから最新のものも含めて調査を行い，代表的なメタ戦略アルゴリズムの比較結果をまとめた．また，分枝限定法に基づく近似解法についても述べ，さらに，近似度に対する理論的な成果に対する調査結果もまとめた．

7. S. Imahori, M. Yagiura, H. Nagamochi（分担執筆）：
“Practical Algorithms for Two-Dimensional

Packing", in: T.F. Gonzalez, ed., Handbook of Approximation Algorithms and Metaheuristics, Chapman & Hall/CRC in the Computer & Information Science Series, 2007, Chapter 36 (15 pages).
概要: 長方形詰込み問題に対する実用的解法に焦点を当て，調査を行った．とくに，そのような解法の基礎となる解表現に対して詳しく調べ，種々の発見的手法を体系的にまとめた．また，近似度に対する理論的成果の調査も行った．さらに，多角形詰込み問題に対する最近のアルゴリズムの調査結果もまとめた．

学術論文

1. S. Fujishige:
"Dual Greedy Polyhedra, Choice Functions, and Abstract Convex Geometries", *Discrete Optimization,* 1, 41-49, 2004.
概要: いわゆるマトロイド構造を有する組合せ最適化問題に対して貪欲アルゴリズムが最適解を見出すが, マトロイド構造をもたない問題に対してもしばしば貪欲アルゴリズムが効率よく近似最適解を見出す．そのような観点から, 近似あるいはヒューリスティックアルゴリズムにおける貪欲アルゴリズムの重要性が認識されている．本研究は, 貪欲アルゴリズムの本質を解明し, より広い枠組みで有効な貪欲アルゴリズムの設計を可能にする基礎理論の構築を目指し, 選択関数と凸幾何の観点からアプローチした成果である．

2. M. Yagiura, T. Ibaraki and F. Glover:
"An Ejection Chain Approach for the Generalized Assignment Problem", INFORMS Journal on Computing, 16, 133-151, 2004.
概要: We propose a tabu search algorithm for the generalized assignment problem, which is one of the representative combinatorial optimization problems known to be NP-hard. The algorithm features an ejection chain approach, which is embedded in a neighborhood construction to create more complex and powerful moves. We also incorporate an adaptive mechanism for adjusting search parameters, to maintain a balance between visits to feasible and infeasible regions. Computational results on benchmark instances of small sizes show that the method obtains solutions that are optimal or that deviate by at most 0.16% from the best known solutions. Comparisons with other approaches from the literature show that, for instances of larger sizes, our method obtains the best solutions among all heuristics tested.

3. M. Yagiura, S. Iwasaki, T. Ibaraki and F. Glover:
"A Very Large-Scale Neighborhood Search Algorithm for the Multi-Resource Generalized Assignment Problem", Discrete Optimization, 1, 87-98, 2004.
概要: We propose a metaheuristic algorithm for the multi-resource generalized assignment problem (MRGAP). MRGAP is a generalization of the generalized assignment problem, which is one of the representative combinatorial optimization problems known to be NP-hard. The algorithm features a very large-scale neighborhood search, which is a mechanism of conducting the search with complex and powerful moves, where the resulting neighborhood is efficiently searched via the improvement graph. We also incorporate an adaptive mechanism for adjusting search parameters, to maintain a balance between visits to feasible and infeasible regions. Computational comparisons on benchmark instances show that the method is effective, especially for type D and E instances, which are known to be quite difficult.

4. H. Ono, M. Yagiura and T. Ibaraki:
"A Decomposability Index in Logical Analysis of Data", Discrete Applied Mathematics, 142, 165-180, 2004.
概要: Logical analysis of data (LAD) is one of the methodologies for extracting knowl-

edge in the form of a Boolean function f from a given pair of data sets (T, F) on attributes set S of size n, in which T (resp., F) $\subseteq \{0,1\}^n$ denotes a set of positive (resp., negative) examples for the phenomenon under consideration. In this paper, we consider the case in which extracted knowledge f has a decomposable structure; $f(x) = g(x[S_0], h(x[S_1]))$ for some $S_0, S_1 \subseteq S$ and Boolean functions g and h, where $x[I]$ denotes the projection of vector x on I. In order to detect meaningful decomposable structures, however, it is considered that the sizes $|T|$ and $|F|$ must be sufficiently large. In this paper, based on probabilistic analysis, we provide an index for such indispensable number of examples to detect decomposability; we claim that there exist many deceptive decomposable structures of (T, F) if $|T||F| \leq 2^{n-1}$. The computational results on synthetically generated data sets and real-world data sets show that the above index gives a good lower bound on the indispensable data size.

5. T. Ibaraki, S. Imahori, M. Kubo, T. Masuda, T. Uno and M. Yagiura:
"Effective Local Search Algorithms for Routing and Scheduling Problems with General Time-Window Constraints", Transportation Science, 39, 206–232, 2005.
概要: We propose local search algorithms for the vehicle routing problem with soft time window constraints. The time window constraint for each customer is treated as a penalty function, which is very general in the sense that it can be non-convex and discontinuous as long as it is piecewise linear. In our algorithm, we use local search to assign customers to vehicles and to find orders of customers for vehicles to visit. It employs an advanced neighborhood, called the cyclic exchange neighborhood, in addition to standard neighborhoods for the vehicle routing problem. After fixing the order of customers for a vehicle to visit, we must determine the optimal start times of processing at customers so that the total penalty is minimized. We show that this problem can be efficiently solved by using dynamic programming, which is then incorporated in our algorithm. We then report computational results for various benchmark instances of the vehicle routing problem. The generality of time window constraints allows us to handle a wide variety of scheduling problems. As such an example, we mention in this paper an application to a production scheduling problem with inventory cost, and report computational results for real world instances.

6. S. Imahori, M. Yagiura and T. Ibaraki:
"Improved Local Search Algorithms for the Rectangle Packing Problem with General Spatial Costs", European Journal of Operational Research, 167, 48-67, 2005.
概要: The rectangle packing problem with general spatial costs is to pack given rectangles without overlap in the plane so that the maximum cost of the rectangles is minimized. This problem is very general, and various types of packing problems and scheduling problems can be formulated in this form. For this problem, we have previously presented local search algorithms using a pair of permutations of rectangles to represent a solution. In this paper, we propose speed-up techniques to evaluate solutions in various neighborhoods. Computational results for the rectangle packing problem and a real-world scheduling problem exhibit good prospects of the proposed techniques.

7. E. Boros, T. Ibaraki, H. Ichikawa, K. Nonobe, T. Uno and M. Yagiura:
"Heuristic approaches to the capacitated square covering problem", Pacific Journal

of Optimization, 1, 465–490, 2005.
概要: We consider the capacitated square covering problem (CSCP), which is described as follows. Given a set of points, each having a demand, in the two-dimensional Euclidean plane, we find the minimum number of squares with the same size and capacity to cover all the points under the capacity constraint. As CSCP is NP-hard, we focus on heuristic algorithms in this paper. We first test a set covering approach, in which a CSCP is solved as a set covering problem. Since its performance is not always satisfactory, though it works quite well for a certain type of instances, we then propose a more robust metaheuristic approach. In this approach, starting with a feasible solution using a rather large number of squares, we remove squares one by one. After each removal of a square, the resulting infeasible solution is repaired by a local search method so that it becomes feasible. To increase the performance, we incorporate the idea of tabu search and scatter search as well as an adaptive control mechanism of penalty weights. Computational results on randomly generated instances with up to 1600 points indicate the effectiveness of our approaches.

8. 梅谷俊治，今堀慎治:
“切出し・詰込み問題とその応用 — (1)1 次元資材切出し問題”, オペレーションズ・リサーチ, 50, 270–276, 2005 年 4 月.
概要: いくつかの対象物を，互いに重ならないように与えられた領域内に配置する問題は，切出し・詰込み問題と呼ばれ，多くの分野に応用を持つ代表的な生産計画問題の一つである．本稿では，代表的な切出し・詰込み問題である 1 次元資材切出し問題について解説する．

9. 今堀慎治，梅谷俊治:
“切出し・詰込み問題とその応用 — (2) 長方形詰込み問題”, オペレーションズ・リサーチ, 50, 335–340, 2005 年 5 月.
概要: 長方形詰込み問題は，様々な大きさの長方形を二次元平面上に重なりなく配置する問題であり，幾何学や組合せ最適化の分野で古くから研究されてきた．本稿では，長方形詰込み問題の様々なバリエーションと解法について解説する．

10. 梅谷俊治，今堀慎治:
“切出し・詰込み問題とその応用 — (3) 多角形詰込み問題”, オペレーションズ・リサーチ, 50, 403–408, 2005 年 6 月.
概要: 多角形詰込み問題は，様々な形状・大きさの多角形を二次元平面状に重なりなく配置する問題であり，機械部品の板取や，服の型紙の配置など，実用的な問題とも密接な関わりを持つ．本稿では，近年，盛んに研究されている，計算幾何や数理計画の手法に基づく実用的な解法を中心に解説する．

11. M. Yagiura, T. Ibaraki and F. Glover:
“A Path Relinking Approach with Ejection Chains for the Generalized Assignment Problem”, European Journal of Operational Research, 169, 548–569, 2006.
概要: The generalized assignment problem is a classical combinatorial optimization problem known to be NP-hard. It can model a variety of real world applications in location, allocation, machine assignment, and supply chains. The problem has been studied since the late 1960s, and computer codes for practical applications emerged in the early 1970s. We propose a new algorithm for this problem that proves to be more effective than previously existing methods. The algorithm features a path relinking approach, which is a mechanism for generating new solutions by combining two or more reference solutions. It also features an ejection chain approach, which is embedded in a neighborhood construction to create more complex and powerful moves. Computational comparisons on benchmark instances show that the method is not only

effective in general, but is especially effective for types D and E instances, which are known to be very difficult.

12. H. Hashimoto, T. Ibaraki, S. Imahori and M. Yagiura:
"The Vehicle Routing Problem with Flexible Time Windows and Traveling Times", Discrete Applied Mathematics, 154, 2271–2290, 2006.
概要: We generalize the standard vehicle routing problem by allowing soft time window and soft traveling time constraints, where both constraints are treated as cost functions. With the proposed generalization, the problem becomes very general. In our algorithm, we use local search to determine the routes of vehicles. After fixing the route of each vehicle, we must determine the optimal start times of services at visited customers. We show that this subproblem is NP-hard when cost functions are general, but can be efficiently solved with dynamic programming when traveling time cost functions are convex even if time window cost functions are non-convex. We deal with the latter situation in the developed iterated local search algorithm. Finally we report computational results on benchmark instances, and confirm the benefits of the proposed generalization.

13. M. Yagiura, M. Kishida and T. Ibaraki:
"A 3-Flip Neighborhood Local Search for the Set Covering Problem", European Journal of Operational Research, 172, 472–499, 2006.
概要: The set covering problem (SCP) calls for a minimum cost family of subsets from n given subsets, which together covers the entire ground set. In this paper, we propose a local search algorithm for SCP, which has the following three characteristics. (1) The use of 3-flip neighborhood, which is the set of solutions obtainable from the current solution by exchanging at most three subsets. As the size of 3-flip neighborhood is $O(n^3)$, the neighborhood search becomes expensive if implemented naively. To overcome this, we propose an efficient implementation that reduces the number of candidates in the neighborhood without sacrificing the solution quality. (2) We allow the search to visit the infeasible region, and incorporate the strategic oscillation technique realized by adaptive control of penalty weights. (3) The size reduction of the problem by using the information from the Lagrangian relaxation is incorporated, which is indispensable for solving very large instances. According to computational comparisons on benchmark instances with other existing heuristic algorithms for SCP, our algorithm performs quite effectively for various types of problems, especially for very large-scale instances.

14. S. Umetani, M. Yagiura and T. Ibaraki:
"One-dimensional cutting stock problem with a given number of setups: A hybrid approach of metaheuristics and linear programming", Journal of Mathematical Modelling and Algorithms, 5, 43–64, 2006.
概要: One-dimensional cutting stock problem (1D-CSP) is one of the representative combinatorial optimization problems, which arises in many industrial applications. Since the setup costs for switching different cutting patterns become more dominant in recent cutting industry, we consider a variant of 1D-CSP, called the pattern restricted problem (PRP), to minimize the number of stock rolls while constraining the number of different cutting patterns within a bound given by users. For this problem, we propose a local search algorithm that alternately uses two types of local search processes with the 1-add neighborhood and the shift neighborhood, respectively. To improve the performance of

local search, we incorporate it with linear programming (LP) techniques, to reduce the number of solutions in each neighborhood. A sensitivity analysis technique is introduced to solve a large number of associated LP problems quickly. Through computational experiments, we observe that the new algorithm obtains solutions of better quality than those obtained by other existing approaches.

15. 増田直紀, 巳波弘佳, 今野紀雄:
"構造と機能から見た複雑ネットワーク", 応用数理, Vol. 16, No. 1, 2006 年 3 月.
概要: ネットワークの研究は, 構造の解明と機能の解明に大きく分類できる. 前者はスモールワールド性やスケールフリー性など現実のネットワーク形状の特徴の研究が目的である. 後者は, ウィルス感染など, ネットワーク上で起こる現象の研究が目的である. 構造と機能という二つの観点から, 複雑ネットワークに関する研究動向をサーベイし解説した.

16. 巳波弘佳:
"グラフ理論の基礎", 数理科学 (特集・ネットワーク科学の数理) サイエンス社, 518, 5-11, 2006 年 8 月.
概要: 複雑ネットワークの研究に関する特集号において, この分野においてよく使われる基本的なグラフの諸概念とアルゴリズムについて解説した.

17. 柳浦睦憲, 野々部宏司:
"分枝限定法 — さらなる計算効率の希求", システム/制御/情報, Vol. 50, No. 9, 350–356, 2006 年 9 月.
概要: 組合せ最適化問題に対する数理計画アプローチとして, 分枝限定法・分枝カット法の最新動向を紹介するとともに, 一般化割当問題を例として, アルゴリズムを構成する場合のガイドライン・勘所について解説した. また, 巡回セールスマン問題, 矩形詰込み問題など, いくつかの具体的な適用例を紹介した.

18. M. Nishihara, M. Yagiura and T. Ibaraki:
"Duality in Option Pricing Based on Prices of Other Derivatives", Operations Research Letters, 35, 165–171, 2007.
概要: We clarify a financial meaning of duality in the semi-infinite programming problem which emerges in the context of determining a derivative price range based only on the no-arbitrage assumption and the observed prices of other derivatives. The interpretation links studies in the above context to studies in stochastic models.

19. X. Xie, M. Yagiura, T. Ono and T. Hirata:
"Analysis of an Edge Coloring Algorithm Using Chernoff Bounds", Information Technology Letters, 6, 13–16, 2007.
概要: Given a multigraph $G = (V, E)$ with m edges and n vertices and a color set $\mathcal{C} = \{1, 2, \ldots, k\}$, a nearly equitable edge coloring is an assignment of given colors to edges in G such that, among the edges incident to each vertex, the numbers of edges colored with any two colors differ by at most two. The notion of the nearly equitable edge coloring was introduced in 1982 by Hilton and de Werra, who also proved that any graph has a nearly equitable edge coloring. Their proof is constructive and easily leads to an algorithm for finding such a coloring in $O(km^2)$ time. Later, Nakano et al. showed an algorithm that runs in $O(m^2/k + mn)$ time. In 2004, Xie et al. presented a more efficient algorithm, which improved the running time to $O(m^2/k)$. In this paper, we review Xie et al.'s results for the case when the initial edge coloring is a random color assignment. Using Chernoff bound, we show that, for any constants $\varepsilon \in (0, 1/2)$ and $\gamma \in (0, 1)$, the algorithm runs in $O\left(n^{1/2}m^{3/2+\varepsilon}\right)$ time with high probability for large n if the number of given colors $k = O(m^{1-\gamma})$. When $k = O(1)$, the time complexity of all existing algorithms becomes $O(m^2)$, which implies that this time complexity remains to be the best for more than twenty years since

1982 when Hilton and de Werra gave a constructive proof for the existence of a nearly equitable edge coloring for any graph. Our result is the first that improves this time complexity for the case with $m = n^{\vartheta}$ ($\vartheta > 1$ is an arbitrary constant).

20. 柳浦睦憲:
"局所探索法—反復改善に基づく最適化の基本戦略", オペレーションズ・リサーチ, 52, 538–542, 2007.
概要: 解を逐次的に改善していくという単純な操作の反復に基づく手法である局所探索法は，その実用的有効性が広く認識されている．メタヒューリスティクスに含まれる多くのアルゴリズムの基礎を成すものであり，計算困難な組合せ最適化問題に対する近似解法の基本戦略として，欠かすことのできない重要な手法である．本稿では，局所探索法の基本的な考え方と，効率的な局所探索アルゴリズムを構成する上で重要となるポイントを解説する．

21. S. Umetani and M. Yagiura:
"Relaxation heuristics for the set covering problem", Journal of the Operations Research Society of Japan, 50, 350–375, 2007.
概要: The set covering problem (SCP) is one of representative combinatorial optimization problems, which has many practical applications. The continuous development of mathematical programming has derived a number of impressive heuristic algorithms as well as exact branch-and-bound algorithms, which can solve huge SCP instances of bus, railway and airline crew scheduling problems. We survey heuristic algorithms for SCP focusing mainly on contributions of mathematical programming techniques to heuristics, and illustrate their performance through experimental analysis.

22. S. Albers, H. Fujiwara:
"Energy-Efficient Algorithms for Flow Time Minimization", ACM Transactions on Algorithms (TALG), Volume 3, Issue 4, Article No. 49, 2007.
概要: We study scheduling problems in battery-operated computing devices, aiming at schedules with low total energy consumption. While most of the previous work has focused on finding feasible schedules in deadline-based settings, in this article we are interested in schedules that guarantee good response times. More specifically, our goal is to schedule a sequence of jobs on a variable-speed processor so as to minimize the total cost consisting of the energy consumption and the total flow time of all jobs. We first show that when the amount of work, for any job, may take an arbitrary value, then no online algorithm can achieve a constant competitive ratio. Therefore, most of the article is concerned with unit-size jobs. We devise a deterministic constant competitive online algorithm and show that the offline problem can be solved in polynomial time.

23. E. Chiba, H. Fujiwara and T. Ibaraki:
"A New Approach to Approximate the Collision Probability in an Automated Production Line", Information Technology Letters, 6, 1–4, 2007 年 9 月.
概要: Flat Panel Displays (FPDs) are manufactured through many different processing equipments arranged sequentially in a line. Although the constant inter-arrival time (i.e., the tact time) of glass substrates in the line should be kept as short as possible, the collision probability between glass substrates increases as the time becomes shorter. Since the glass substrate is expensive and fragile, the collision should be avoided. In this paper, we give a simpler expression of the collision probability by a new approximation approach, which enables us to easily compute numerical values of the collision probability over a wider range of parameter values. We also carry out some

simulations to evaluate the exact probabilities and confirm that our approximation approach yields reasonable results compared to the simulated results.

24. H. Hashimoto, M. Yagiura and T. Ibaraki:
"An Iterated Local Search Algorithm for the Time-Dependent Vehicle Routing Problem with Time Windows", Discrete Optimization, （掲載予定）.
概要: We generalize the standard vehicle routing problem with time windows by allowing both traveling times and traveling costs to be time-dependent functions. In our algorithm, we use a local search to determine routes of the vehicles. When we evaluate a neighborhood solution, we must compute an optimal time schedule of each route. We show that this subproblem can be efficiently solved by dynamic programming, which is incorporated in the local search algorithm. The neighborhood of our local search consists of slight modifications of the standard neighborhoods called 2-opt*, cross exchange and Or-opt. We propose an algorithm that evaluates solutions in these neighborhoods more efficiently than computing the dynamic programming from scratch by utilizing the information from the past dynamic programming recursion used to evaluate the current solution. We further propose a filtering method that restricts the search space in the neighborhoods to avoid many solutions having no prospect of improvement. We then develop an iterated local search algorithm that incorporates all the above ingredients. Finally we report computational results of our iterated local search algorithm compared against existing methods, and confirm the effectiveness of the restriction of the neighborhoods and the benefits of the proposed generalization.

25. K. Haraguchi, M. Yagiura, E. Boros and T. Ibaraki:
"A Randomness Based Analysis on the Data Size Needed for Removing Deceptive Patterns", IEICE Transactions on Information and Systems, （掲載予定）.
概要: We consider a data set in which each example is an n-dimensional Boolean vector labeled as true or false. A pattern is a co-occurrence of a particular value combination of a given subset of the variables. If a pattern appears frequently in the true examples and infrequently in the false examples, we consider it as a good pattern. In this paper, we discuss the problem of determining the data size needed for removing "deceptive" good patterns; in a data set of a small size, many good patterns may appear superficially, simply by chance, independently of the underlying structure. Our hypothesis is that, in order to remove such deceptive good patterns, the data set should contain more number of examples than that at which a random data set contains few good patterns. We justify this hypothesis by computational studies. We also derive a theoretical upper bound on the needed data size in view of our hypothesis.

26. T. Ibaraki, S. Imahori, K. Nonobe, K. Sobue, T. Uno, M. Yagiura:
"An iterated local search algorithm for the vehicle routing problem with convex time penalty functions", Discrete Applied Mathematics, （掲載予定）.
概要: We propose an iterated local search algorithm for the vehicle routing problem with time window constraints. We treat the time window constraint for each customer as a penalty function, and assume that it is convex and piecewise linear. Given an order of customers each vehicle to visit, dynamic programming (DP) is used to determine the optimal start time to serve the customers so that the total time penalty is minimized. This DP algorithm is then in-

corporated in the iterated local search algorithm to efficiently evaluate solutions in various neighborhoods. The amortized time complexity of evaluating a solution in the neighborhoods is a logarithmic order of the input size (i.e., the total number of linear pieces that define the penalty functions). Computational comparisons on benchmark instances with up to 1000 customers show that the proposed method is quite effective, especially for large instances.

27. K. Matsumoto, H. Miwa, and T. Ibaraki:
"Scheduling of corrugated paper production", European Journal of Operational Research, (掲載予定).
概要: Corrugated paper is produced by gluing three types of papers of the same breadth. Given a set of orders, we first assign each order to one of the standard breadths, and then sequence those assigned to each standard breadth so that they are continuously manufactured from the three rolls of the specified standard breadth equipped in the machine called corrugator. Here we are asked to achieve multi-goals of minimizing total length of roll papers, total loss of papers caused by the differences between standard breadths and real breadths of the orders, and the number of machine stops needed during production. We use integer programming to assign orders to standard breadths, and then develop a special purpose algorithm to sequence the orders assigned to each standard breadth. This is a first attempt to handle scheduling problems arising in industry of corrugated paper production.

28. A.D. Ioffe, Y. Sekiguchi:
"Regularity estimates for convex multifunctions", Mathematical Programming, (掲載予定).
概要: The main result of the paper contains an exact formula for the rate of regularity of a set-valued mapping with a convex graph. As a consequence we find an exact expression for the rate of regularity of set-valued mappings associated with so-called constraint systems. It turns out that the rate is equal to the upper bound of Robinson-type estimates over all norms in the graph space of the homogenized mapping majorizing the norm of the underlying space. We further introduce a concept of a perfectly regular mapping and find some criteria for perfect regularity.

29. Y. Sekiguchi, W. Takahashi:
"On regularity of constraint systems with continuous opeartors", Journal of Nonlinear and Convex Analysis, (掲載予定).
概要: In the work, we consider a constraint system of a finite dimensional optimization problem defined with an operator and closed sets. The operator is assumed to be merely continuous. Under a constraint qualification, we give a straightforward proof for a representation of normal vectors to the feasible region. Then metric regularity of the constraint system are obtained by the formula. Moreover the rate of metric regularity is estimated.

研究会等

1. H. Hashimoto, T. Ibaraki, S. Imahori and M. Yagiura:
"A Local Search Algorithm for Routing and Scheduling Problems with Time Window and Traveling Time Constraints", Proceedings of the International Symposium on Scheduling (ISS2004), 143-146, 2004.
概要: We generalize the standard vehicle routing problem by allowing soft time window and soft traveling time constraints, and propose a local search algorithm, where both constraints are treated as cost functions. With the proposed generalization, the problem becomes very general, and can

treat various scheduling problems, e.g., with earliness and tardiness costs, and flexible processing time. In our algorithm, local search is used to determine routes. After fixing the route for a vehicle, we must determine the optimal start times of processing at customers so that the total cost is minimized. This subproblem is NP-hard when cost functions are general, and can be efficiently solved with dynamic programming when traveling cost functions are convex. We then report computational results for benchmark instances, and confirm the usefulness of the proposed generalization.

2. S. Umetani, M. Yagiura and T. Ibaraki: "One-dimensional cutting stock problem with a given number of setups: A hybrid approach of metaheuristics and linear programming", Proceedings of the 1st International Workshop on Hybrid Metaheuristics (HM 2004), 101–114, 2004.
概要: One-dimensional cutting stock problem (1D-CSP) is one of the representative combinatorial optimization problems, and arises in many industries. Since the setup costs for switching different cutting patterns become more dominant in recent cutting industry, we consider a variant of 1D-CSP, called the pattern restricted problem (PRP), which minimizes the number of stock rolls while the number of different cutting patterns is constrained within a bound given by users. For this problem, we proposed a local search algorithm which alternately uses two types of local search processes with the 1-add and shift neighborhoods. To improve the performance of the local search algorithm, we incorporated it with linear programming (LP) techniques, which restrict the number of solutions in the neighborhoods and solve a large number of associated LP problems quickly. Through computational experiments, we observed that the new algorithm obtains solutions of better quality compared to other existing approaches.

3. H. Hashimoto, M. Yagiura and T. Ibaraki: "An iterated local search algorithm for the time-dependent vehicle routing problem with time windows", Proceedings of the 6th Metaheuristics International Conference (MIC 2005), 506–513, 2005.
概要: We generalize the standard vehicle routing problem with time windows (VRPTW) by allowing both traveling times and traveling costs to be time-dependent, and propose an iterated local search algorithm. Our generalization can treat such situation as rush-hour traffic jam, and moreover, our time window constraint allows each customer to have more than one time window. In our local search procedure, after fixing a route of each vehicle, we must compute an optimal time schedule of each route. We show that this subproblem can be efficiently solved by dynamic programming, which is then incorporated in the local search algorithm. We further propose a filtering method that reduces the sizes of neighborhoods, based on the fact that there are many solutions having no prospect of improvement. Finally, we develop an iterated local search algorithm incorporating all these ingredients. We report computational results on benchmark instances of the VRPTW and artificially generated instances of the time-dependent VRPTW, and discuss the performance of our iterated local search algorithm against existing methods and the benefits of the proposed generalization.

4. S. Imahori, M. Yagiura and T. Ibaraki: "Variable neighborhood search for the rectangle packing problem", Proceedings of the 6th Metaheuristics International Conference (MIC 2005), 532–537, 2005.
概要: We consider the following rectan-

gle packing problem: Given a set of rectangular items, place all of them into an open-ended two-dimensional bin orthogonally without mutual overlap. This is called the strip packing problem and is known to be NP-hard. For this problem, we propose a variable neighborhood search algorithm based on a coding scheme with a particular grid structure called Bounded Sliceline Grid (BSG). A coded solution is an assignment of rectangular items into BSG, and a placement is computed from a coded solution with a decoding algorithm. In order to find a good coded solution, we use local search technique with some ideas to improve the efficiency; e.g., we utilize the critical paths to reduce the size of a neighborhood without sacrificing the solution quality. Moreover, we propose a new decoding algorithm for local search that can evaluate a coded solution in a neighborhood in amortized constant time.

5. S. Umetani, T. Kurakake, Y. Suzuki and M. Higashi:
"A bi-directional local search for robot motion planning problem with many degrees of freedom", Proceedings of the 6th Metaheuristics International Conference (MIC 2005), 878–883, 2005.
概要: The motion planning problem is the problem of finding a collision-free path of a robot from the start configuration to the goal configuration. We consider practical motion planningproblems with many degrees of freedom, and propose a variant of the path relinking approach, called the bi-directional local search (BLS). The proposed algorithm repeatedly applies a simple local search between pairs of initiating and guiding configurations. We also develop two heuristic algorithms based on SA and ILS, and compare efficiency of three algorithms through computational experiments on an instance of a welding articulated robot with six degrees of freedom.

6. D.Harada, T.Ciyonobu, H.Miwa:
"A Probabilistic Analysis of a Network Model Based on a Generalization of the Polya 's Urn Problem", IFORS 2005, 2005年7月.
概要: 現実のネットワークの生成モデルである閾値モデルにおいて，この重み分布が生成されるメカニズムを調べ，重みが「優先的選択」に従って増加する自然なモデルにおいて，重み分布が幾何分布に確率収束することを数学的に厳密に証明した．さらに，重みが幾何分布に従う場合，生成されるグラフがスケールフリーとなることを示した．

7. H.Miwa, N.Masuda, N.Konno:
"Scale-free networks and network mining problems", IFORS 2005, 2005年7月.
概要: 現実のネットワークの様々な生成モデルについて解説した．さらに，コミュニティ探索など，複雑ネットワークの研究でよく見られるネットワーク上の最適化問題について解説した．

8. M.Aida, K.Ishibashi, C.Takano, H.Miwa, K.Muranaka, A.Miura:
"Cluster structures in topology of large-scale social networks revealed by traffic data", IEEE GLOBECOM 2005, 2005年11月.
概要: 実際の携帯電話トラフィックデータと整合性のあるネットワーク生成モデルを提案し，その性質を解析した．さらに，観測された部分グラフの次数分布から，元のグラフの次数分布を推定する方法を提案した．

9. T. Imamichi, M. Yagiura and H. Nagamochi:
"An iterated local search algorithm based on nonlinear programming for the irregular strip packing problem", Proceedings of the Third International Symposium on Scheduling, 132–137, 2006.
概要: The irregular strip packing problem is a combinatorial optimization problem that

asks to place a set of 2-dimensional polygons within a rectangular container so that no two polygons overlap each other and no polygon protrudes from the container, where each polygon is not necessarily convex. The container has a fixed width, while its length can change so that all polygons are placed in it. The objective is to find a layout that minimizes the length of the container. This problem has many applications in material industry such as paper and textile industries, where raw materials are usually given in rolls. We propose a new separation algorithm based on nonlinear programming, and an algorithm that swaps two polygons in a sophisticated way; it tries to find their positions with the least overlap. We incorporate these algorithms as components in an iterated local search algorithm for the overlap minimization problem and then develop an algorithm for the irregular strip packing problem using the iterated local search algorithm. Computational comparisons on representative instances disclose that our algorithm is competitive with other existing algorithms. Moreover, our algorithm updates several best known results.

10. S. Umetani, M. Yagiura, T. Imamichi, S. Imahori, K. Nonobe and T. Ibaraki:
"A guided local search algorithm based on a fast neighborhood search for the irregular strip packing problem", Proceedings of the Third International Symposium on Scheduling, 126–131, 2006.
概要: The irregular strip packing problem asks to place a set of polygons within a rectangular strip of fixed height without overlap, so as to minimize the strip width required. We consider an overlap minimization problem which minimizes the amount of overlap penalty for all pairs of polygons within a given bound of strip width. We propose a local search algorithm which translates a polygon in horizontal and vertical directions iteratively, and incorporate it in metaheuristic approaches called the iterated local search and the guided local search. Computational results show that our algorithm is competitive with other existing algorithms.

11. T. Ibaraki, A. Ishikawa, H. Nagamochi, K. Nonobe and M. Yagiura:
"An iterated local search algorithm for the multi-resource generalized assignment problem with flexible assignment cost", Proceedings of the Third International Symposium on Scheduling, 160–165, 2006.
概要: We propose an iterated local search algorithm for the multi-resource generalized assignment problem (MRGAP) with flexible assignment cost. This problem generalizes the MRGAP so that the assignment cost function defined for each agent can be in any form. While this flexibility achieves a wide applicability, the computation of the assignment cost can be computationally expensive, Our algorithm features two types of oracles to evaluate this cost approximately; i.e., quick-evaluation oracle and accurate-evaluation oracle. In our computational experiments on the parallel machine scheduling and the capacitated vehicle routing, the algorithm combining two oracles performs well and is sometimes competitive with other existing algorithms tailored for the specific problem.

12. T. Ibaraki and K. Nakamura:
"Packing problem with soft rectangles", Third International Workshop on Hybrid Metaheuristics (HM2006), Lecture Notes in Computer Science (LNCS) 4030, 13-27, 2006.
概要: We consider the problems of packing rectangles, whose shapes are adjustable within given perimeter and area constraints. Using "sequence pairs" to specify relative positions of rectangles, we solve the result-

ing linear or convex programming problems to determine sizes and locations of all rectangles. To find good sequence pairs, we then resort to local search techniques. This is therefore a hybrid of local search and mathematical programming. The resulting algorithm can solve problem instances with up to 50 rectangles in reasonable amount of time.

13. 佐々木裕介，巳波弘佳:
“P2P における次数・直径の小さいオーバレイネットワーク構成法”, 信学技報, Vol. 106, No. 42, IN2006-11, 61-66, 2006 年 5 月.
概要: P2P ネットワークにおいて，高い性能を実現するためにオーバレイネットワークの構造は重要である．そこで本研究では，頂点数が大きくても，次数を小さく保ちつつ，直径が小さい de Bruijn グラフを用い，ノード数 n としたとき，ルーティングに必要な次数を最悪 4 に抑えつつ，目的ノードまでのホップ数を最悪 $\lceil \log_2 n \rceil$ に抑えることができ，さらにノードの参加・離脱に対しても安定性を有するオーバレイネットワークの構成法について提案した．

14. 巳波弘佳, 増田直紀, 今野紀雄:
“スケールフリー性を持つ閾値モデルの諸特性量の解析”, 信学技報, Vol. 106, No. 42, IN2006-13, 73-78, 2006 年 5 月.
概要: 現実世界に存在するネットワークの中には，次数分布がべき則に従うという性質（スケールフリー）を持つものも多い．他にもクラスター係数や隣接点平均次数などに関しても特徴的な性質を持つものもある．このような特徴を持つネットワークの生成モデルとして，各点に重みが確率的に与えられており，点 v_i と v_j の間には，v_i と v_j の重みの和や積（一般的には 2 点の重みの関数）がある閾値を越える時，またその時に限って辺が張られるという原理で生成される閾値モデルというものがある．本研究では，この閾値モデルにおいて，特に重みがガウス分布に従う場合を調べ，数値実験によりスケールフリー性に近い性質を持つことを示した．

15. K. Haraguchi and M. Yagiura:
“A Randomness Based Analysis on the Data Size Needed for Generating Reliable Rules”, Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Engineering and Decision Support (ICKEDS 2006), 75–82, 2006 年 5 月.
概要: We consider a two-labeled data set $X = X_1 \cup X_0$ in which each xample is a Boolean vector. A pattern is a co-occurrence of a particular value combination of some variables. If a pattern appears frequently in X_1 and infrequently in X_0, we call it a good pattern. In this article, we discuss the data size needed for removing “deceptive” good patterns; if X is small, many good patterns may appear independently of the underlying structure. We hypothesize that X should contain more number of examples than that at which a random data set contains few good patterns. We justify this hypothesis by computational studies, and derive a theoretical upper bound on the needed data size in view of our hypothesis.

16. 千葉英史, 浅野哲夫, 茨木俊秀:
“衝突確率を考慮したバッファ配置問題に対する計算機シミュレーションを利用した手法”, 情報処理学会研究報告（アルゴリズム, 2006 – AL – 108）, 57–63, 2006 年 9 月.
概要: 液晶や半導体の製造装置には，衝突回避のために，製造ライン上に通常十分にバッファが装備されているが，実際には余分なバッファも少なくない．一方，コスト面から見ると，できるだけバッファ数を減らすことが求められている．本論文では，ジョブの投入間隔が一定の直列システムにおいて，各機械のバッファ数を任意に設定できるとき，計算機シミュレーションにより衝突確率を求める手法を提案する．この手法を利用することで，与えられた衝突確率を満たすようなバッファ配置の中で，総バッファ数ができるだけ少ない配置を実時間内で求めることができる．また，代表的な数値結果も与える．

17. S. Umetani, M. Yagiura, T. Imamichi, S. Imahori, K. Nonobe and T. Ibaraki:
"A local search algorithm based on overlap minimization for the irregular strip packing problem", Proceedings of the 7th Metaheuristics International Conference (MIC 2007), 35/1–3, 2007.
概要: The irregular strip packing problem (ISP) asks to place a given set of non-convex polygons without overlap within a rectangular container with a constant width and a variable length so as to minimize the container length. As a core subproblem to solve ISP, we consider an overlap minimization problem (OMP) whose objective is to place all polygons into a container with a constant width and a constant length so that the total amount of overlap between polygons is as small as possible. We propose to use an approximate penetration depth to measure the amount of overlap between a pair of polygons and present an efficient algorithm to find a position with the minimum overlap for each polygon when it is translated to a specified direction. Based on this, we develop a local search algorithm for OMP that translates a polygon in the horizontal and vertical directions alternately, and then we incorporate it with a variant of the guided local search algorithm, which is the core part of our algorithm for ISP. Computational results show that our algorithm is quite promising and improves the best known values of some well known benchmark instances.

18. M. Yagiura, A. Komiya, K. Kojima, K. Nonobe, H. Nagamochi, T. Ibaraki and F. Glover:
"A path relinking approach for the multi-resource generalized quadratic assignment problem", Proc. Engineering Stochastic Local Search Algorithms—Designing, Implementing and Analyzing Effective Heuristics (SLS 2007), Lecture Notes in Computer Science (LNCS) 4638, 121–135, 2007.
概要: We consider the multi-resource generalized quadratic assignment problem (MR-GQAP), which has many applications in various fields such as production scheduling, and constitutes a natural generalization of the generalized quadratic assignment problem (GQAP) and the multi-resource generalized assignment problem (MRGAP). We propose a new algorithm PR-CS for this problem that proves highly effective. PR-CS features a path relinking approach, which is a mechanism for generating new solutions by combining two or more reference solutions. It also features an ejection chain approach, which is embedded in a neighborhood construction to create more complex and powerful moves. Computational comparisons on benchmark instances show that PR-CS is more effective than existing algorithms for GQAP, and is competitive with existing methods for MRGAP, demonstrating the power of PR-CS for handling these special instances of MR-GQAP without incorporating special tailoring to exploit these instances.

19. H. Hashimoto, Y. Ezaki, M. Yagiura, K. Nonobe, T. Ibaraki, A. Lokketangen:
"A set covering approach for the pickup and delivery problem with general constraints on each route", Proc. Engineering Stochastic Local Search Algorithms—Designing, Implementing and Analyzing Effective Heuristics (SLS 2007), Lecture Notes in Computer Science (LNCS) 4638, 192, 2007.
概要: In this paper, we consider a generalization of the pickup and delivery problem with time windows by allowing multiple constraints on each route, and propose a heuristic algorithm based on the set covering approach, in which all requests are required to be covered by a set of feasible routes. Our algorithm first generates

a set of feasible routes, and repeats reconstructing the set by using information from a Lagrangian relaxation of the set covering problem corresponding to the current set. The algorithm then solves the resulting set covering problem instance to find a good feasible solution for the original problem. We conduct computational experiments for instances with various constraints and confirm the flexibility and robustness of our algorithm.

20. X. Xie, M. Yagiura, T. Ono, T. Hirata and U. Zwick:
"New bounds for the nearly equitable edge coloring problem", Proc. the 18th International Symposium on Algorithms and Computation (ISAAC 2007), Lecture Notes in Computer Science 4835, 280–291, 2007.
概要: An edge coloring of a multigraph is nearly equitable if, among the edges incident to each vertex, the numbers of edges colored with any two colors differ by at most two. It has been proved that this problem can be solved in $O(m^2/k)$ time, where m and k are the numbers of edges and given colors, respectively. In this paper, we present a recursive algorithm that runs in $O\left(mn \log\left(m/(kn)+1\right)\right)$ time, where n is the number of vertices. This algorithm improves the best-known worst-case time complexity. When $k = O(1)$, the time complexity of all known algorithms is $O(m^2)$, which implies that this time complexity remains to be the best for more than twenty years since 1982 when Hilton and de Werra gave a constructive proof for the existence of a nearly equitable edge coloring for any graph. Our result is the first that improves this time complexity when m/n grows to infinity; e.g., $m = n^{\vartheta}$ for an arbitrary constant $\vartheta > 1$. We also propose a very simple randomized algorithm that runs in $O\left(m^{3/2}n^{1/2}/k^{1/2}\right)$ time with probability at least $1 - 1/c$ for any constant $c > 1$, whose worst-case time complexity is $O(m^2/k)$.

21. H. Fujiwara, K. Iwama, K. Yonezawa:
"Online Chasing Problems for Regular n-Gons", Proceedings of the 5th International Conference on Research, Innovation and Vision for the Future (RIVF 2007), 36–41, 2007 (Best Paper Award).
概要: We consider a server location problem with only one server to move. If each request must be served on the exact position, there is no choice for the online player and the problem is trivial. In this paper we assume that a request is given as a region and that the service can be done anywhere inside the region. Namely, for each request an online algorithm chooses an arbitrary point in the region and moves the server there. Our main result shows that if the region is a regular n-gon, the competitive ratio of the greedy algorithm is $\frac{1}{\sin\frac{\pi}{2n}}$ for odd n and $\frac{1}{\sin\frac{\pi}{n}}$ for even n. Especially for a square region, the greedy algorithm turns out to be optimal.

22. H. Fujiwara, K. Yonezawa, K. Iwama:
"Online Chasing Problems for Regular Polygons", 情報処理学会研究報告 (アルゴリズム, 2007-AL-114), 73–80, 2007.
概要: We consider a server location problem with only one server to move. If each request must be served on the exact position, there is no choice for the online player and the problem is trivial. In *the online chasing problem* a request is given as a region such that the service can be done anywhere inside. Namely, for each request an online algorithm chooses an arbitrary point in the region and moves the server there. In this paper we focus on a regular n-gon. We prove that the greedy algorithm is $O(n)$-competitive. We also give a preliminary observation of the work function algorithm and conjecture that it achieves a constant competitive ratio with an appropriate set-

ting of the parameter.

23. 佐々木裕介，巳波弘佳:
“次数・直径の小さいP2Pネットワーク構成法とその評価”, 信学技報, Vol. 106, No. 578, IN2006-240, 357-362, 2007年3月.
概要: P2Pネットワークにおいて，高い性能を実現するためにオーバレイネットワークの構造は重要である．そこで本研究では，頂点数が大きくても，次数を小さく保ちつつ，直径が小さいde Bruijnグラフを用い，ノード数nとしたとき，ルーティングに必要な次数を最悪4に抑えつつ，目的ノードまでのホップ数を最悪$\lceil \log_2 n \rceil$に抑えることができ，さらにノードの参加･離脱に対しても安定性を有するオーバレイネットワークの構成法について述べ，その構成法に基づいて構成したネットワークの性能をシミュレーションによって評価した.

24. Y.Kurebe, H.Miwa, T.Ibaraki:
“Weighted Module Placement based on Rectangle Packing”, 4th ESICUP meeting (EURO Special Interest Group on Cutting and Packing), 2007年3月.
概要: 2D rectangle packing problems ask to pack several modules in the minimum area without overlap. In this research, we consider the weight of a module in addition to its area. For a placement of the modules in the engine room of a car, and so on, it is important to pack the modules not only in the small area, but also with the low inertia moment and with the small gap between the center of gravity of the modules and the center of the area. Using sequence pairs to specify relative positions of rectangles, we solve the resulting nonlinear programming problems to determine the locations of all rectangles. To find good sequence pairs, we then resort to local search techniques. A local search algorithm is in general defined by the neighborhood (a subset of the set of all sequence pairs) of the current sequence pair. We popose a hybrid algorithm of local search and mathematical programming by combining some specialaized neighborhoods to this problem and using an approximation algorithm to solve the nonlinear programming problems. The proposed algorithm can solve problem instances with up to 50 rectangles in reasonable amount of time.

25. E. Chiba, H. Fujiwara, Y. Sekiguchi and T. Ibaraki:
“Collision Probability in an Automated Production Line under Erlang Distribution”, Proceedings of the 5th International Conference on Research, Innovation and Vision for the Future (RIVF 2007), 42–49, 2007年3月.
概要: In this paper, we derive a closed form formula of the collision probability for a model, in which the processing time on each equipment is assumed to follow the Erlang distribution. We also show some numerical results and computer simulation results of the collision probability.

26. Y. Kurebe, H. Miwa, T. Ibaraki:
“Weighted Module Placement Based on Rectangle Packing”, The 7th Metaheuristics International Conference (MIC 2007), 2007年6月.
概要: 2D rectangle packing problems ask to pack several modules in the minimum area without overlap. In this research, we consider the weight of a module in addition to its area. For a placement of the modules in the engine room of a car, and so on, it is important to pack the modules not only in the small area, but also with the low inertia moment and with the small gap between the center of gravity of the modules and the center of the area. Using sequence pairs to specify relative positions of rectangles, we solve the resulting nonlinear programming problems to determine the locations of all rectangles. To find good sequence pairs, we then resort to local search techniques.

A local search algorithm is in general defined by the neighborhood (a subset of the set of all sequence pairs) of the current sequence pair. We propose a hybrid algorithm of local search and mathematical programming by combining some specialized neighborhoods to this problem and using an approximation algorithm to solve the nonlinear programming problems. The proposed algorithm can solve problem instances with up to 50 rectangles in reasonable amount of time.

27. E. Chiba, H. Fujiwara and T. Ibaraki:
"A new approach to approximate the collision probability in an automated production line", The 8th Workshop on Models and Algorithms for Planning and Scheduling Problems (MAPSP 2007), 2007 年 7 月.
概要: In this paper, we give a simpler expression of the collision probability by a new approximation approach, which enables us to easily compute numerical values of the collision probability over a wider range of parameter values. We also carry out some simulations to evaluate the exact probabilities and confirm that our approximation approach yields reasonable results compared to the simulated results.

28. Y.Sasaki, H. Miwa:
"A Control Method of a P2P Network with Small Degree and Diameter", 7th International Conference on Hybrid Intelligent Systems, 2007 年 9 月.
概要: 近年，クライアント/サーバ型に取って代わるネットワーク形態として P2P(Peer-to-Peer) 型のネットワークが注目されている．P2P ネットワークはファイル共有，分散ストレージ，コンテンツ配信等，様々な分野での応用が期待されている．この P2P ネットワークにおいて，いかに効率よく確実に目的のデータを取得するかについて，様々な研究が行われてきた．効率よく目的のデータを取得するには，実際のネットワーク上に仮想的に構成するオーバレイネットワークの構造が重要である．本研究では，頂点数が大きくても，次数を小さく保ちつつ，直径が小さい de Bruijn グラフを用い，ノード数 n としたとき，ルーティングに必要な次数を最悪 4 に抑えつつ，目的ノードまでのホップ数を最悪 $\lceil \log_2 n \rceil$ に抑えることができ，さらに，ノードの参加・離脱に対しても安定性を有するオーバレイネットワークの構成法について提案した．

29. 巳波弘佳，藤原明広:
"複雑ネットワークの構造と数理モデル", 電子情報通信学会 時限研究専門委員会「複雑系による自己成長・修復ネットワーキング」第 4 回研究会（招待講演）, 2007 年 10 月.
概要: 現実のネットワークの様々な生成モデルについて解説した．さらに，コミュニティ探索など，複雑ネットワークの研究でよく見られるネットワーク上の最適化問題について解説した．

30. 茨木俊秀:
"問題解決エンジンとしてのメタヒューリスティクス・アルゴリズム", 日本オペレーションズリサーチ学会第 19 回 RAMP シンポジウム, 117-130, 2007 年 10 月.
概要: 組合せ最適化問題はさまざまな応用場面に現れるが, そのほとんどが NP 困難である．NP 困難であっても適切な近似アルゴリズムによって対応できる場合が多いとはいえ, アルゴリズムの開発は容易ではない．この隘路を解決するため, いくつかの標準問題を定義し, それらに対する問題解決エンジンを準備するというアプローチを提案する．この目的にはメタヒューリスティクスが適当であることを述べ, これまで開発した標準問題とそれらのエンジンを紹介する．具体的例として, 資源制約スケジューリング問題についてやや詳しく述べる．

31. T. Ono, M. Yagiura and T. Hirata:
"A vector assignment approach for the graph coloring problem", Proc. Learning and Intelligent OptimizatioN Conference (LION 2007 II), （Lecture Notes in Computer Science に掲載予定）.

概要: We consider the relationship between the graph coloring problem (GCP) and the vector assignment problem (VAP). Given an undirected graph, VAP asks to assign a vector to each vertex so as to maximize the minimum angle between the vectors corresponding to adjacent vertices.We show that any solution to the VAP in the 2-dimensional space, which we call the 2-dimensional VAP (2VAP), gives a feasible coloring, and that such transformation can be computed efficiently. We also show that any optimal solution to 2VAP gives an optimal coloring for GCP. Based on this fact, we propose a heuristic algorithm for GCP, whose search space is the set of solutions for 2VAP. The algorithm is quite simple and can be considered as a variant of the threshold accepting. The experiments show that our algorithm works well for graphs with relatively low degree.

32. H. Hashimoto and M. Yagiura:
"A path relinking approach with an adaptive mechanism to control parameters for the vehicle routing problem with time windows", Proc. the Eighth European Conference on Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization (EvoCOP 2008), (Lecture Notes in Computer Science に掲載予定).
概要: We propose a path relinking approach for the vehicle routing problem with time windows. The path relinking is an evolutionary mechanism that generates new solutions by combining two or more reference solutions. In our algorithm, those solutions generated by path relinking operations are improved by a local search whose neighborhood consists of slight modifications of the representative neighborhoods called 2-opt*, cross exchange and Or-opt. To make the search more efficient, we propose a neighbor list that prunes the neighborhood search heuristically. Infeasible solutions are allowed to be visited during the search, while the amount of violation is penalized. As the performance of the algorithm crucially depends on penalty weights that specify how such penalty is emphasized, we propose an adaptive mechanism to control the penalty weights. The computational results on well-studied benchmark instances with up to 1000 customers revealed that our algorithm is highly efficient especially for large instances. Moreover, it updated 41 best known solutions among 356 instances.

学会大会等

1. S. Umetani, M. Yagiura and T. Ibaraki:
"A local search approach to the pattern restricted 1D-CSP", ESICUP (EURO Special Interest Group on Cutting and Packing) 1st Meeting, 2004.

2. S. Umetani, M. Yagiura and T. Ibaraki:
"A variable neighborhood search for cutting stock problem with a given number of patterns", CORS/INFORMS Joint International Meeting, 2004.

3. M. Yagiura and T. Ibaraki:
"Recent Metaheuristic Algorithms for the Generalized Assignment Problem", Proceedings of the International Conference on Informatics Research for Development of Knowledge Society Infrastructure (ICKS2004), 229-237, 2004.

4. 柳浦睦憲:
"時間枠つき配送計画問題に対する数理的アプローチ", 日本オペレーションズ・リサーチ学会 関西支部講演会 (招待講演), 2004.

5. K. Nonobe and T. Ibaraki:
"A Metaheuristic Algorithm for RCPSP with Multiple-Modes and Generalized Precedence Constraints", CORS/SCRO-INFORMS International Meeting, 2004.

6. M. Yagiura, T. Ibaraki and F. Glover:
"A Path Relinking Approach with Ejection Chains for the Generalized Assignment Problem", CORS/SCRO-INFORMS International Meeting, 2004.

7. T. Ibaraki, S. Imahori, K. Nonobe, K. Sobue, T. Uno and M. Yagiura:
"An Iterated Local Search Algorithm for the Vehicle Routing Problem with Convex Time Penalty Functions", 35th Annual Conference of the Italian Operations Research Society (AIRO), 2004.

8. T. Imamichi, M. Kenmochi, K. Nonobe, M. Yagiura and H. Nagamochi:
"Branch-and-bound algorithms for rectangular strip packing and perfect packing problems", ESICUP (EURO Special Interest Group on Cutting and Packing) 2nd Meeting, p. 23, 2005.

9. 柳浦睦憲:
"メタヒューリスティクスに基づく問題解決エンジン", 電子情報通信学会総合大会, 2005.

10. S. Imahori, M. Yagiura and T. Ibaraki:
"An effective local search algorithm for strip packing problem", The IFORS Triennial 2005 Conference, p. 47, 2005.

11. M. Kenmochi, T. Imamichi, K. Nonobe, M. Yagiura and H. Nagamochi:
"Exact Algorithms for the 2-Dimensional Strip Packing Problem with Rotations", The IFORS Triennial 2005 Conference, p. 36, 2005.

12. S. Umetani, M. Yagiura, T. Imamichi, S. Imahori, K. Nonobe and T. Ibaraki:
"An iterated local search algorithm for irregular packing problem", The IFORS Triennial 2005 Conference, 2005.

13. 柳浦睦憲:
"メタヒューリスティクスによる汎用解法 (招待講演)", 第 36 回システム工学部会研究会「最適化手法の最新動向」, 2005.

14. 柳浦睦憲:
"一般化割当問題に対する効率的メタ戦略アルゴリズム (文献賞受賞招待講演)", 日本オペレーションズ・リサーチ学会秋期研究発表会, 2005.

15. 野々部宏司:
"資源制約付きスケジューリングによる鋳造日程最適化システムの実現", 日本オペレーションズ・リサーチ学会中部支部シンポジウム「実践的な解法に基づく生産スケジューリング」, 2005.

16. 松本一輝, 巳波弘佳, 茨木俊秀:
"段ボールの生産スケジューリング", スケジューリング・シンポジウム 2005 講演論文集, 158-163, 2005 年 9 月.

17. T. Imamichi, M. Yagiura, H. Nagamochi:
"An iterated local search algorithm based on nonlinear programming for the irregular strip packing problem", The 19th conference of the European Chapter on Combinatorial Optimization (ECCO XIX) and the International Symposium on Combinatorial Optimisation 2006 (CO 2006), 2006 年 5 月.

18. 柳浦睦憲:
"組合せ最適化問題に対する実用的解法", 日本オペレーションズ・リサーチ学会 平成１８年度第１回 OR セミナー『最適化の各論』, 1–10, 2006 年 6 月.

19. S. Umetani, M. Yagiura, T. Imamichi, S. Imahori, K. Nonobe and T. Ibaraki:
"A guided local search algorithm based on a fast neighborhood search for the irregular strip packing problem", The INFORMS International Conference, 2006 年 6 月.

20. M. Yagiura, T. Ibaraki, T. Imamichi, Y. Koga, H. Nagamochi and K. Nonobe:
"Efficient Branch-and-Bound Algorithms for Weighted MAX-2-SAT", The 21st European Conference on Operational Research (EURO XXI), 2006 年 7 月.

21. S. Umetani, M. Yagiura, T. Imamichi, S. Imahori, K. Nonobe and T. Ibaraki:
"A guided local search algorithm based on a fast neighborhood search for the irregular strip packing problem", the 1st Workshop on Mathematical Contributions to Metaheuristics (Matheuristics2006), 2006 年 8 月.

22. T. Ibaraki, A. Ishikawa, H. Nagamochi, K. Nonobe, M. Yagiura:
"An iterated local search algorithm for the multi-resource generalized assignment problem with flexible assignment cost", The 19th International Symposium on Mathematical Programming (ISMP 2006), 2006 年 8 月.

23. T. Ono, M. Ygiura, M. Iwaki and T. Hirata:
"Graph coloring via vector assignment in the plane", The 19th International Symposium on Mathematical Programming (ISMP 2006), 2006 年 8 月.

24. H. Hashimoto, T. Ibaraki, S. Imahori and M. Yagiura:
"Generalizations of the vehicle routing problem with time windows", The 1st Workshop on Mathematical Contributions to Metaheuristics (Matheuristics 2006), 2006 年 8 月. 橋本)

25. 柳浦睦憲:
"離散最適化問題に対するメタヒューリスティクス", OR 学会第 56 回シンポジウム — ここまで使える数理計画法, 33–40, 2006 年 9 月.

26. 小野孝男, 柳浦睦憲, 岩城正哉, 平田富夫:
"半定値計画法に基づく彩色問題の発見的解法", 第 108 回アルゴリズム研究会, 2006 年 9 月.

27. 千葉英史, 藤原洋志, 関口良行, 茨木俊秀:
"生産ラインにおける衝突確率: 処理時間がアーラン分布に従う場合", 日本オペレーションズ・リサーチ学会秋季研究発表会, 116–117, 2006 年 9 月.

28. 片岡達, 茨木俊秀:
"研究室配属問題の数理的考察", 日本オペレーションズ・リサーチ学会秋季研究発表会, 60-61, 2006 年 9 月.

29. 中村康治, 茨木俊秀:
"周長および面積を考慮した可変形状長方形詰込み問題", 日本オペレーションズ・リサーチ学会秋季研究発表会, 64-65, 2006 年 9 月.

30. 熱田光紀, 茨木俊秀:
"時間割の作成とそのパラメータ解析", 日本オペレーションズ・リサーチ学会秋季研究発表会, 62-63, 2006 年 9 月.

31. 原口和也, 柳浦睦憲, Endre Boros, 茨木俊秀:
"ルール生成に必要なデータ量に関するランダム性に基づいた解析", 信学技報, Vol. 106, No. 289 (COMP2006-38), 57–64, 2006 年 10 月.

32. 柳浦睦憲:
"割当型問題に対する汎用解法構築の試み", 日本オペレーションズ・リサーチ学会 第 3 回関西支部講演会, 「スケジューリング設計法 – 離散最適化アプローチを中心として –」, 7–13, 2006 年 11 月.

33. 野々部宏司:
"スケジューリング最適化ソルバ", 日本オペレーションズ・リサーチ学会 第 3 回関西支部講演会, 「スケジューリング設計法 – 離散最適化アプローチを中心として –」, 2006 年 11 月.

34. 橋本英樹, 柳浦睦憲:
"時間依存配送計画問題に対する反復局所探索法", ミニシンポジウム: 新世代計算限界と地球環境問題, 15–23, 2006 年 12 月.

35. 藤原洋志:
"正多角形領域に対するオンライン追跡問題", 組合せ論サマースクール, 2007.

36. 千葉英史, 茨木俊秀:
"衝突確率を考慮したバッファ配置問題に対する近似解法", 日本オペレーションズ・リ

サーチ学会春季研究発表会, 148–149, 2007 年 3 月.

37. 暮部裕介，巳波弘佳，茨木俊秀:
“重量付モジュール詰め込みの最適化”, 日本オペレーションズリサーチ学会春季研究発表会, 2007 年 3 月.

38. H. Fujiwara, K. Iwama, K. Yonezawa:
“Online Chasing Problems for Regular n-Gons”, 日本オペレーションズ・リサーチ学会春季研究発表会, 60–61, 2007 年 3 月.

39. S. Umetani, M. Yagiura, T. Imamichi, S. Imahori, K. Nonobe and T. Ibaraki:
“A metaheuristic approach based on overlap minimization for the irregular packing problem”, Dagstuhl-Seminar on Cutting, Packing, Layout and Space Allocation, 2007 年 3 月.

40. S. Umetani, M. Yagiura, T. Imamichi, S. Imahori, K. Nonobe and T. Ibaraki:
“A metaheuristic approach based on overlap minimization for the irregular packing problem”, ESICUP (EURO Special Interest Group on Cutting and Packing) 4th Meeting, 2007 年 3 月.

41. 木本大介，柳浦睦憲，小野孝男，平田富夫:
“多分割カット問題に対する集合被覆アプローチに基づく近似解法”, S@CO in 筑波 2007「計算と最適化—未来を担う研究者の集い」, 2007 年 6 月.

42. Y. Sekiguchi:
“Regularity analysis on set-valued mappings with closed convex graphs”, The Fifth International Conference on Nonlinear Analysis and Convex Analysis, 2007 年 6 月.

43. X. Xie, M. Yagiura, T. Ono, T. Hirata:
“Analysis of an Edge Coloring Algorithm Using Chernoff Bounds”, 情報処理学会研究報告, 2007-AL-113, 31–38, 2007 年 7 月.

44. 松浦勇，安藤正好，柳浦睦憲，平田富夫:
“織方図作成における最適化問題のグラフによる定式化”, RIMS 研究集会「数値最適化の理論と実際」, 2007 年 7 月.

45. 橋本 英樹，江崎 洋一，柳浦 睦憲，野々部 宏司，茨木 俊秀，Arne Løkketangen:
“多制約配送計画問題に対する集合被覆アプローチ”, 情報処理学会研究報告, 2007-AL-113, 47–54. 2007 年 7 月

46. 橋本英樹，江崎洋一，柳浦睦憲，野々部宏司，茨木俊秀，Arne Lokketangen:
“汎用制約つき集配計画問題に対する集合被覆アプローチ”, RIMS 研究集会「数値最適化の理論と実際」, 2007 年 7 月.

47. Y. Sekiguchi:
“Modulus of metric regularity of convex mappings”, Second Mathematical Programming Society International Conference on Continuous Optimization, 2007 年 8 月.

48. 瀬島賢治, 千葉英史, 茨木俊秀:
“移動時間が流量に依存する最大動的流問題”, 日本オペレーションズ・リサーチ学会秋季研究発表会, 114–115, 2007 年 9 月.

49. 千葉英史, 茨木俊秀:
“周期的なタイムスロット付きジャストインタイムスケジューリング問題の近似解法”, スケジューリング・シンポジウム, 229–234, 2007 年 9 月.

50. 熱田光紀, 茨木俊秀:
“汎用ソルバ-による時間割作成の試み”, 日本オペレーションズ・リサーチ学会秋季研究発表会, 126-127, 2007 年 9 月.

51. 佐々木方太, 野村俊秀, 茨木俊秀:
“ネットワークの通信時間改善問題における近似および厳密アルゴリズム”, 日本オペレーションズ・リサーチ学会秋季研究発表会, 116-117, 2007 年 9 月.

52. 野坂翔馬, 茨木俊秀:
“可変形状長方形詰込み問題における局所探索アルゴリズム”, 日本オペレーションズ・リサーチ学会秋季研究発表会, 208-209, 2007 年 9 月.

53. 片岡達, 茨木俊秀:
“研究室配属問題の数理的考察 (2)”, 日本オペレーションズ・リサーチ学会秋季研究発表会, 118-119, 2007 年 9 月.

54. 海老名健, 藤原洋志, 茨木俊秀:
“オンライン・オフライン混合ジョブスケジューリング問題”, 日本オペレーションズ・リサーチ学会秋季研究発表会, 108–109, 2007 年 9 月.

55. S. Imahori and M. Yagiura:
“The best-fit heuristic for the rectangular strip packing problem: an efficient implementation”, 情報処理学会研究報告, 2007-AL-114, 65–72, 2007 年 9 月.

56. 野々部宏司:
“スケジューリングと列生成法”, スケジューリング・シンポジウム 2007 講演論文集, 15–20, 2007 年 9 月.

57. 木本大介, 柳浦睦憲, 小野孝男, 平田富夫:
“多点対カット問題に対する集合被覆アプローチに基づく近似解法”, スケジューリング・シンポジウム 2007 講演論文集, 127–132, 2007 年 9 月.

58. 橋本英樹, 江崎洋一, 柳浦睦憲, 野々部宏司, 茨木俊秀, Arne Løkketangen:
“汎用制約を考慮した集配計画問題に対するルート生成アプローチ”, スケジューリング・シンポジウム 2007 講演論文集, 133–138, 2007 年 9 月.

59. 今堀慎治, 柳浦睦憲:
“大規模な長方形配置問題に対する実用的解法”, スケジューリング・シンポジウム 2007 講演論文集, 139–144, 2007 年 9 月.

60. 梅谷俊治, 柳浦 睦憲, 今道貴司, 今堀慎治, 野々部宏司, 茨木俊秀:
“多角形パッキング問題に対する重なり度最小化アプローチに基づくメタ戦略”, スケジューリング・シンポジウム 2007 講演論文集, 2007 年 9 月.

61. 森本琢也, 茨木俊秀:
“再スケジューリングのための局所探索アルゴリズム”, スケジューリング・シンポジウム 2007 講演論文集, 241–244, 2007 年 9 月.

62. 吉内友規, 茨木俊秀:
“列車ダイヤの乱れを修正する運転整理案”, スケジューリング・シンポジウム 2007 講演論文集, 203–206, 2007 年 9 月.

63. 野々部宏司:
“メタヒューリスティクス：計算困難問題に対する実用手法”, グローバル COE「計算世界観の深化と展開」発足イベント計算世界観ワークショップ#1: 最適化の理論と応用, 2007 年 12 月.

64. 今堀慎治, 梅谷俊治, 柳浦睦憲:
“資源の有効利用　－詰込み技法の貢献－”, ミニシンポジウム: 新世代計算限界と地球環境問題, 2007 年 12 月.

65. 松本一輝, 梅谷 俊治, 永持 仁:
“紙管製造工程における 1 次元カッティングストック問題とその環境問題への影響”, ミニシンポジウム: 新世代計算限界と地球環境問題, 2007 年 12 月.

66. 海老名健, 藤原洋志, 茨木俊秀:
“オンライン・オフライン混合ジョブスケジューリング問題”, ミニシンポジウム：新世代計算限界と地球環境問題, 2007 年 12 月.

67. 木本大介, 柳浦睦憲, 小野孝男, 平田富夫:
“多点対カット問題に対する集合被覆アプローチに基づく近似解法”, 情報処理学会研究報告, 2008-AL-116, 2008 年 1 月.

68. 千葉英史:
“周期的なタイムスロット付きジャストインタイムスケジューリング問題の近似解法”, 日本オペレーションズ・リサーチ学会 研究部会「コンピュテーション」, 2008 年 1 月.

文部科学省科学研究費補助金 特定領域研究 (課題番号 16092222)

C11: 大量データ処理のための領域効率の良いアルゴリズム

本研究では，大量データの効率的処理のためのアルゴリズムやデータ構造を開発した．大量データ処理を行う際の問題点としては，処理時間だけではなく，データの格納やアルゴリズムの動作に必要な記憶領域の大きさがある．よって本研究では領域効率の良いアルゴリズムの開発に重点を置き，次のアプローチを行った: (1) データ自身やデータ構造を圧縮して保存する簡潔データ構造，(2) データの一部のみをメモリに格納するアルゴリズム．その結果，大量データ処理のための基礎となるアルゴリズムとデータ構造を開発できた．

研究組織

研究代表者： 定兼 邦彦　九州大学 大学院 システム情報科学研究院
研究分担者： 山下 雅史　九州大学 大学院 システム情報科学研究院
小野 廣隆　九州大学 大学院 システム情報科学研究院

交付決定額 (配分額)

平成 16 年度	2,900,000 円
平成 17 年度	3,500,000 円
平成 18 年度	3,400,000 円
平成 19 年度	3,200,000 円
合　計	13,000,000 円

研究成果の概要

- 学術誌
  ACM Transactions on Algorithms (2007), Algorithmica (2005, 2007), Theoretical Computer Science (2005, 2007), Journal of Discrete Algorithms (2007), Theory of Computing Systems (2007)
- 国際会議
  SODA (Vancouver, 2005, Miami, 2006, New Orleans, 2007), CPM (Barcelona, 2006), ISAAC (香港, 2004), MFCS (Czech, 2007), AAIM (Portland, 2007)
- 受賞
  日本 IBM 科学賞 (2007 年)，文部科学大臣表彰若手科学者賞 (2007 年)，船井情報科学奨励賞 (2006 年)

1 はじめに

本研究では大量データ処理のための領域効率の良いアルゴリズムの開発を行った．大量データ処理を行う際の問題点としては，処理時間だけではなく，データの格納やアルゴリズムの動作に必要な記憶領域の大きさがある．よって本研究では領域効率の良いアルゴリズムの開発に重点を置き，以下のアプローチを行った．

1. **データを圧縮する**: データ自身やデータ構造を圧縮して保存する簡潔データ構造を開発し，少ないメモリで大量のデータを扱えるようにした．
2. **データの一部分のみをメモリに格納するアルゴリズム**: 全体のデータ量は多いが，同時にはその限られた部分のデータのみを使用するようなアルゴリズムならば限られたメモリでも動作する．本研究では特に，グラフの探索を行う省スペースアルゴリズムを開発した．

その結果，大量データ処理のための基礎となるアルゴリズムとデータ構造を開発できた．

1.1 簡潔データ構造

Web ページ，関係データベース，新聞記事，ゲノム配列など，現在大量のデータが存在し，それらを有効活用するための技術の開発が重要となっている．古典的な手法では，データをディスクに格納し，それを逐次的に読み込みながら処理を行うが，これでは速度が非常に遅く，また，限られた処理しか行えない．そこで現在は「主記憶データベース」と呼ばれる，全データを計算機のメモリ (主記憶) に格納して高速処理を行う手法が取られている．しかしこの手法でもデータの検索手法は古典的なアルゴリズムとデータ構造を用いているため，以下のような問題が存在する:

- 検索速度と，検索を行うために必要なメモリ量にはトレードオフが存在する．つまり，高速な検索を行うには大量のメモリが必要となる．
- 主記憶量の制限により，高速な検索を行えるデータ量は非常に小さくなる．
- データを圧縮することで必要メモリを減らすことができるが，データのランダムアクセスができなくなるため，検索が遅くなる．

これらの問題を解決するために提案されたものが簡潔データ構造である．

簡潔データ構造とは，データおよびそれを高速に処理するためのデータ構造（索引）のサイズを極限まで小さくし，なおかつ従来のデータ構造と同じ処理が同じ計算量で行えるものであり，研究代表者や海外の研究者らによりここ数年盛んに研究されている新しい概念である．現在は，高速な処理を実現するには大きなデータ構造を利用することが常識となっているが，そのために限られたメモリ内で扱えるデータ量が少なくなってしまう．ディスクを利用するアルゴリズムも存在するが，アクセス速度がメモリよりも数桁遅くなり，複雑な処理を行うことが出来ない．一方，簡潔データ構造を用いれば，大量のデータと索引をメモリに格納でき，高速処理が実現できる．

簡潔データ構造は，データをその情報理論的下限まで圧縮して格納し，かつ，問合わせを圧縮前と同じ計算量で行えるデータ構造である．データの情報理論的下限とは以下のように定義される．ある集合 $\mathcal{S}$ に属する要素のうちの 1 つ e を格納するデータ構造のサイズの情報理論的下限 L は，$L = \log_2 |\mathcal{S}|$ ビットとなる．これは 2 つの異なる要素を区別して格納するには L ビットが必要であるということを意味する．従来のデータ構造と異なる点は，領域計算量をビット単位で数え，極限まで計算量を小さくすることを目標としている点である．集合の要素を列挙することができればそれに順番に番号をつけることで 1 つの要素を L ビットで表現できるが，そのような表現から元の要素を復元したり，圧縮された表現のまま問合せを高速に行えるかどうかはわからないため，データの格納方法と，効率よい問合わせアルゴリズムを考える必要がある．また，計算のモデルは RAM モデルよりも厳密な，ワード RAM モデルを用いる．ワード RAM モデルは，計算機が 1 度に扱えるビット数に制限を与えた RAM モデルである．語長 w ビットのワード RAM モデルでは，計算機は w ビットの整数の四則演算，論理演算が定数時間で行える．また，計算機には $\mathrm{O}(2^w)$ ビットのメモリがあり，その任意のアドレスからの連続する

w ビットを 1 つの整数として定数時間で読み書きできる．情報理論的下限が L であるようなデータを格納する場合は，計算機の語長は $\Theta(\log L)$ とする場合が多い．なぜならばデータ構造へのポインタは $\Theta(\log L)$ ビット必要であり，これを従来のデータ構造では定数時間で扱えるという仮定があるからである．このような仮定の下で，ビット演算などを用いて効率的な問合せアルゴリズムを開発する．

本研究では，様々な簡潔データ構造および超簡潔データ構造を開発した．

- 圧縮接尾辞木
- 動的な圧縮接尾辞木
- 透過的データ圧縮法
- 文書検索のための簡潔データ構造
- 順序木に対する超簡潔データ構造
- 動的圧縮トライデータ構造
- 圧縮接尾辞配列の直接構築アルゴリズム
- 圧縮ビットベクトルの効率的実装
- 文字列検索のための超簡潔データ構造のサイズの改善

1.2 グラフ探索問題

グラフ探索問題として，次の問題を考える．

- **節点探索問題:** グラフとその 2 節点 u, v が与えられたときに，u からグラフの探索を開始してなるべく少ないステップ数で v に到達する．
- **節点訪問問題:** グラフが与えられたときに，ある節点からスタートし，なるべく少ないステップ数で全節点を訪れる．
- **節点列挙問題:** グラフが与えられたときに，全節点を重複無しに列挙する．

これらの問題は小さいグラフに対しては簡単に解くことができるが，Web のリンク構造を表す Web グラフや，組合せ最適化問題の解の構造を表すグラフのような大規模のグラフに対しては，計算機のメモリの制限により解く事が難しい問題になる．例えば，節点列挙問題は，グラフの節点数を n とすると，計算機に $n + \mathrm{O}(\log n)$ ビットのメモリがあればグラフの深さ優先探索により解ける．しかし n が大きい場合には計算機のメモリが足りないため，単純なアルゴリズムでは解けない．よって，グラフサイズよりも小さなメモリで上の問題を解くアルゴリズムを開発する．

本研究では，様々な計算モデル上で，様々なアプローチによりグラフ探索問題を解いた．

- ランダムアルゴリズムによる節点探索・訪問問題の解法
- スケールフリーネットワークでの，ランダムアルゴリズムによる節点探索問題の解法
- 再帰的森探索法による節点列挙問題の解法
- 無記憶のエージェントによる節点訪問問題を，グラフの枝のラベルを書き換えることで解く手法
- 無線ネットワークのような節点の隣接関係が未知なグラフにおける，エネルギー消費の少ないブロードキャストアルゴリズム

2 簡潔データ構造

2.1 圧縮接尾辞木

接尾辞は文字列検索のための代表的データ構造である．長さ n，アルファベットサイズ σ の文字列 S に対し，従来のデータ構造では接尾辞木は $\mathrm{O}(n \log n)$ ビット，具体的な実装では $n < 2^{30}$ のときに $10n \sim 13n$ バイトの領域を必要としていた．これは文字列自身のサイズ ($n \log \sigma$ ビット，通常の文字列では n バイト，DNA では $n/4$ バイト) と比較すると非常に大きい．本研究で提案した圧縮接尾辞木は，接尾辞木の機能を保ったままサイズを圧縮する．圧縮接尾辞木のデータ構造は，文字列に対する圧縮接尾辞配列，接尾辞木の木構造を表現する簡潔データ構造，木の枝長を表現するデータ構造から構成される．各構成要素のサイズはそれぞれ $\mathrm{O}(n \log \sigma)$ ビット，$4n + \mathrm{o}(n)$ ビット，$2n + \mathrm{o}(n)$ ビットである．このデータ構

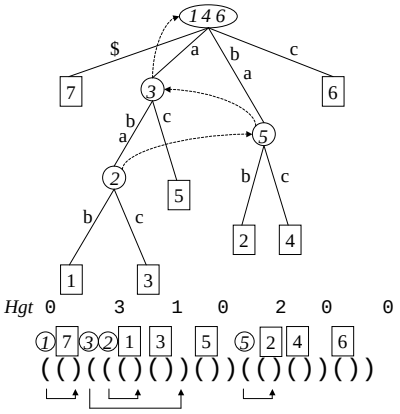


図 1: $S =$ ababac に対する圧縮接尾辞木.

造は接尾辞木を線形サイズ ($\mathrm{O}(n \log \sigma$ ビット) で表現する初めてののデータ構造である．接尾辞木の巡回などの演算は多くは圧縮前と同じ時間計算量で行える．一部の演算は圧縮前よりも遅くなるが，その計算量は圧縮接尾辞配列の 1 要素を復元する時間と等しく，速度低下はわずかである．

2.2 動的な圧縮接尾辞木

文書の集合 (ライブラリ) に対し，文書の挿入削除，およびパタンの検索を効率よく行うデータ構造を開発した．ライブラリ中の文書の長さの合計を n とする．1 つの文書 T の挿入・削除は $\mathrm{O}(|T| \log n)$ で行える．あるパタン P の存在位置を返す問合せは $\mathrm{O}(|P| \log n + occ \log^2 n)$ 時間で行える (occ は P の出現回数)．ライブラリを格納するために必要なスペースは $\mathrm{O}(n)$ ビットである (アルファベットサイズは定数とする)．

このようなライブラリのデータ構造のために，本研究では圧縮接尾辞木の新しい表現を開発した．従来法では文字列は静的なものしか扱えなかったが，本研究ではそれを動的な文字列に拡張した．接尾辞木の巡回，接尾辞リンクの計算が $O(\log d)$ 時間，文字列ラベルの復元が $O(\log^2 d)$ 時間でできき，パタン P の挿入削除が $O(|P| \log^2 d)$ 時間でできる．また，木を表現するバランス括弧列表現の更新を $O(\log n / \log \log n)$ 時間で行うアルゴリズムも提案した．

2.3 透過的データ圧縮法

従来の圧縮データ構造では，同じデータに対して同じ問合せを行う場合でも，圧縮手法が異なる場合には問合せのためのデータ構造も異なるものを用いる必要があった．本研究では問合せのためのデータ構造に手を加えることなくデータの圧縮が可能となる汎用的な圧縮法を開発した．

全てのデータは文字列とみなす事ができる．その文字列の長さを n，文字のアルファベットサイズを σ とすると，データの圧縮前のサイズは $n \log_2 \sigma$ ビットとなる．通常のデータ圧縮法ではこの文字列を $nH_k + o(n \log_2 \sigma)$ ビットに圧縮する．ここで H_k は文字列の次数 k の経験的エントロピーであり，$H_k \leq H_{k-1} \leq \cdots H_0 \leq \log_2 \sigma$ である．エントロピーはある仮定の下での圧縮率の下界であるため，この圧縮表現はサイズの点では最適である．しかし従来の圧縮法を用いてデータ構造を圧縮すると問合せ時間が非常に遅くなってしまう．なぜならデータ構造が圧縮してある場合，その一部分のみアクセスしたい場合でも圧縮されたデータ全体を復元する必要があるからである．本研究の圧縮法では，圧縮された文字列の任意の部分を高速に復元できる．具体的には，文字列中の位置が指定されたとき，その位置から始まる部分文字列で長さが $\log n$ ビットのものを定数時間で復元することができる．圧縮サイズは $nH_k + o(n \log_2 \sigma)$ ビットであり従来法と漸近的に等しい．

ここで重要なのは，指定された場所の $\log n$ ビットを定数時間で得るという操作は，圧縮されていない文字列中の $\log n$ ビットを単位時間で読み込む操作と同等であるということである．つまり，データは圧縮してあるにもかかわらず圧縮されていないとみなす事ができる．つまりデータ圧縮が透過的になっている．この圧縮法を用いれば，圧縮されていないデータに対して検索を行なうデータ構造があるとすると，それをそのまま圧縮されたデータに対して用いることができ，かつ問合せの計算量も同じである．つまり圧縮されたデータ用に検索のためのデータ構造を作り直す必要がなくなる．

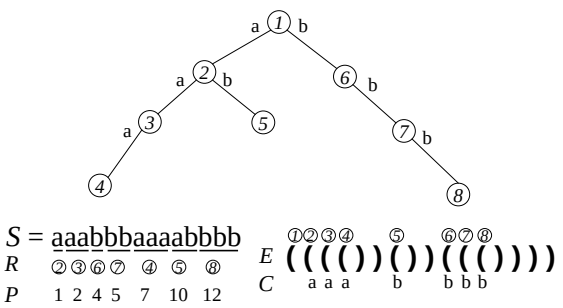


図 2: S = aaabbbaaaabbbb に対する提案データ構造.

2.4 文書検索のための簡潔データ構造

文書検索での問合せとしては，ある単語が指定されたときにそれを含んでいる文書を列挙するというものがある．しかし単に列挙してしまうと出力される文書数が多い場合にその中で重要なものを見つけることが難しい．そこで文書にある種のスコアをつけその順序に並び替えるということが行われている．代表的なスコアとしては tf*idf がある．これは文書中の問合せ語の頻度を基にしたスコアである．従来のデータ構造ではこのスコアは特定の単語のみにしか高速に計算できないため，検索精度が落ちている可能性がある．本研究では任意の単語に対するスコアを高速に計算できるデータ構造を開発した．問合せに用いる単語の長さを p，全文書の長さの合計を n，問合せ単語を含む文書の数を q とすると，従来手法では文書ごとに問合せを行なう必要があるため $O(pq)$ 時間かかってしまうが，これを $O(p+q\log^{\epsilon} n)$ に改善した ($\epsilon > 0$ は任意の定数)．データ構造のサイズは $O(1/\epsilon n H_0)$ である．$\epsilon = 1$ の場合，これは文書サイズの約 3 倍であり，非常に小さい．

2.5 順序木に対する超簡潔データ構造

本研究では順序木に対する簡潔データ構造を考える．過去に多くのデータ構造が提案されているが，それらには以下のような欠点が存在する．

1. 全ての基本演算を定数時間で実行できるデータ構造は存在しない．例えば，括弧列表現 (BP) は i 番目の子を求める演算ができず，DFUDS (depth-first unary degree sequence) は *lca* (lowest common ancestor) を計算できない．
2. データ構造のサイズは最悪の場合には最適だが，あるクラスに入る木のみを格納する場合は最適ではない．例えば，n ノードの木で，全ての内部ノードがちょうど 2 つの子を持つような場合，そのような木は n ビットで表現できる (深さ優先探索の順で内部ノードに対して 1 を出力し，葉に対して 0 を出力すればいい) が，BP と DFUDS では共に $2n$ ビット必要である．

これらの欠点は大量文書処理などでは致命的である．現在 Web ページやゲノム配列などの大量の文書が存在するが，これらを検索しようとした場合，高速に検索するためにデータ構造として接尾辞木 や圧縮接尾辞木 を用いる．圧縮接尾辞木では木構造を表現するために BP を用いているがこれは接尾辞木において *lca* 演算が必要だからである．接尾辞木は最大 $2n-1$ 個のノードを持つため，BP のサイズは $4n+o(n)$ ビットとなる．一方，接尾辞木をパトリシア木で表現すると $2n$ ビットで十分であるが，効率的な問い合わせができない．従って効率的な問い合わせを行うためにデータ構造のサイズが $2n$ ビット大きくなっている．これは大量の文書を扱う場合には無視できない．

もちろん，任意の n ノードの木を cn ビット以下 ($c < 2$) で表現することはできない．なぜなら情報理論的下界は $2n$ ビットだからである．しかし，もし n ノードの木全体ではなく，そのうちのある部分クラスだけを表現する場合には，情報理論的下界よりも小さくできる可能性はある．これがデータ圧縮の概念である．本論文ではある要素に対するデータ構造のサイズが，その要素のエントロピーであらわされるようなものを扱う．そのようなデータ構造を本論文では超簡潔データ構造 (ultra-succinct data structures) と呼ぶ．そのようなデータ構造としては，文字列に対するものや順序集合に対するものが存在するが，順序木に対するものは存在しない．

本研究では順序木に対する超簡潔データ構造を提案した．特徴は以下の点である．

1. 知られている全ての基本演算を定数時間で実行できる

2. データ構造のサイズは以下で定義する順序木のエントロピーを達成する．

順序木の **木形状エントロピー** を次のように定義する．

Definition 1 (木形状エントロピー) n ノードの順序木 T において，i 個の子を持つノードの数を n_i で表すとする $(0 \le i < n)$．このとき，T の木形状エントロピー $H^d(T)$ を以下のように定義する．

$$H^d(T) = \sum_i \frac{n_i}{n} \log \frac{n}{n_i}.$$

この定義は自然である．なぜならこの値は順序木でノードの次数の分布を固定した場合の情報理論的下界と一致するからである．

Lemma 1 (Rote 96) n ノードの木で，i 個の子を持つノードの数が n_i のとき，そのような木の数は

$$\frac{1}{n}\binom{n}{n_0\ n_1\ \cdots\ n_{n-1}}$$

である．ただし $\sum_{i\ge 0} n_i(i-1) \neq -1$ の場合は木の数は 0 である． □

この数を L とすると，$\log L \approx nH^d(T)$ となる．

本研究の主な貢献は，データ構造のサイズが木形状エントロピーに漸近的に一致するような，順序木の超簡潔データ構造の提案である．データ構造のサイズが既存のものよりも小さいだけでなく，木に対する操作の計算量も他のデータ構造と同じである．我々の証明技法は，個々の操作に対して証明を行うのではなく，より一般的な事実を示すものである．具体的には，DFUDS の瞬時復号可能性を示す．

Theorem 1 任意の n ノードの根付き順序木 T に対し，サイズが $nH^d(T) + \mathrm{O}(n(\log\log n)^2/\log n)$ ビットで，T の *DFUDS* 表現の任意の部分の連続する $\log n$ ビットを *word RAM* モデル上で定数時間で復元できるデータ構造が存在する． □

この定理は，このデータ構造を用いると，DFUDS 表現をそのまま格納していると仮定できることを意味する．よって，DFUDS で実現可能な演算は全て我々のデータ構造でも同じ計算量で実行できることは明らかである．さらに，たとえ DFUDS に対する新しい操作が提案されたとしても，それは我々のデータ構造の上でも同じ計算量で実行できる．

本研究のもう 1 つの貢献は，DFUDS の上で *lca*, *depth*, *level-ancestor* を求めるための $\mathrm{o}(n)$ ビットの補助データ構造の提案である．なお，*depth* と *level-ancestor* を求める簡潔データ構造は既に存在するが，これは BP や DFUDS とは異なる表現で汎用性がない．よって，DFUDS で実現可能な演算がこのデータ構造の上でも行えるという保障はない．また，*lca* は計算できない．さらに，このデータ構造のサイズは $2n + \mathrm{o}(n)$ ビットであり，これをさらに圧縮することは難しい．よって，DFUDS の上で上記の演算を実現することは価値がある．本論文では以下の定理を示す．

Theorem 2 任意の 2 つのノードの最近共通祖先 *(lca)*，各ノードの深さと深さ指定先祖 *(level-ancestor)* は，*DFUDS* 表現と $\mathrm{O}(n(\log\log n)^2/\log n)$ ビットの補助データ構造を用いて定数時間で計算できる． □

本論文で提案する新しい補助データ構造は既存のものよりも小さい．従来は $\mathrm{O}(n\log\log n/\sqrt{\log n})$ ビットであった．

2.6 動的圧縮トライデータ構造

動的トライは多くの応用を持つ基本的なデータ構造である．本研究では圧縮された動的トライを提案する．このデータ構造は領域効率が良いだけでなく，トライ T に格納されているパタン P の検索を $o(|P|)$ 時間，葉の挿入削除を $o(\log|T|)$ 時間で行える．

この新しいデータ構造を用いて，LZ 圧縮アルゴリズムの改良ができる．長さ n，アルファベットサイズ σ の文字列 S に対し，S を LZ78 圧縮法で圧縮する既存のアルゴリズムは (1) $\mathrm{O}(n)$ 時間，$\mathrm{O}(n)$ 語の作業領域，または (2) $\mathrm{O}(n\sigma)$ 時間，$\mathrm{O}(nH_k + n\log\sigma/\log_\sigma n)$ ビットの作業領域 (H_k は文字列の k 次のエントロピー) のものしか存在しない．本研究の新しいデータ構造に

より，LZ78 圧縮アルゴリズムで劣線形 (sublinear) 時間・領域のものが可能になった．正確には，$O(n(\log\sigma+\log\log n)/\log_\sigma n)$ ビットの作業領域で，(1) $O(n(\log\log n)^2/(\log_\sigma n\log\log_\sigma\log n))$ 最悪時間，または (2) $O(n\log\log n/\log_\sigma n)$ 期待時間である．この時間は $\sigma=2^{o(\log n\frac{\log\log\log n}{(\log\log n)^2})}$ のときに劣線形である．なお，領域が劣線形とは，それが $o(n\log\sigma)$ ビットであることと定義する．なぜならば入力サイズが $n\log\sigma$ ビットだからである．また，パタン検索の時間が劣線形であるとは，それが $o(|P|\log\sigma)$ であることと定義する．

2.7 圧縮接尾辞配列の直接構築アルゴリズム

圧縮接尾辞配列は文字列検索のためのデータ構造で，長さ n の文字列からのパタン P の検索が $O(|P|\log n)$ 時間で行える．しかしそのサイズは $O(n\log n)$ ビットであり，長い文字列に対しては実用的ではない．圧縮接尾辞配列は接尾辞配列のサイズを圧縮したもので，様々な符号化法が存在しサイズは $O(n\log\sigma)$，$O(nH_0)$，$nH_k+o(n)$ ビットのものが存在する．

圧縮接尾辞配列は接尾辞配列から $O(n)$ 時間で構築することができるが，このような方法では一時的に $O(n\log n)$ ビットの領域が必要となり実用的ではない．本研究では圧縮接尾辞配列を文字列から直接作ることでデータ構造の作成時に必要な領域を削減した．必要な領域は $O(n(H_0+1))$ ビットであり，時間計算量は $O(n\log n)$ である．これらはアルファベットサイズには依存しない．このアルゴリズムにより，ヒトゲノムに対する圧縮接尾辞配列が 3GB のメモリを持つ PC にて 7 時間強で構築できるようになった．従来のアルゴリズムでは時間はほぼ同じだがメモリは 48GB を必要としていた．

2.8 圧縮ビットベクトルの効率的実装

Rank / Select 辞書とは，順序集合 $S\in\{0,1,...,m-1\}$ において $rank(x,S)=|\{y\in S|y\le x\}|$ と $select(i,S)$ (S の中で i 番目に小さい要素) を返すデータ構造である．これは文字列，木，グラフなどの圧縮データ構造の基本構成要素であり，多くのデータ構造が提案されている．しかしそれらは漸近的な性能のみを考えており，実データに対する性能は良くない．本研究では単純な Rank/Select 辞書を提案する．特徴としては，集合 S の要素数が小さい場合にデータ構造のサイズを縮小できることと，データ構造が単純であるために実装が容易で，実データに対する性能 (データ構造のサイズと問い合わせ時間) が良い．実験により，既存の実装よりも速度，サイズともに優れていることを示す．

集合 S は長さ m の $\{0,1\}$ のベクトル $B[0,m-1]$ を用いて表現できる．すると $\mathbf{rank}(x,S)$ は $B[0,x]$ 内の 1 の数，$\mathbf{select}(i,S)$ は B 内で左から i 番目の 1 の位置となる．Rank/Select は，m ビットの B と，$O(m\log\log m/\log m)$ ビットの補助的なデータ構造を用いて定数時間で計算できる．ベクトル B をそのまま格納するデータ構造は，S の要素数 n が小さい場合，または多い場合にはサイズに無駄が多い．なぜなら B は $\binom{m}{n}$ 通りしかないため，$B(n,m)=\log\binom{m}{n}\approx n\log\frac{m}{n}+(m-n)\log\frac{m}{m-n}$ ビットで表現できるからである．Raman ら **rank** と **select** を定数時間で求める $B(n,m)+O(m\log\log m/\log m)$ ビットのデータ構造を提案している．

本研究で提案するデータ構造は，疎なベクトルに対してデータ構造のサイズが小さくなり，問い合わせ時間は既存のどのデータ構造よりも高速である．

2.9 文字列検索のための超簡潔データ構造のサイズの改善

文字列検索のための超簡潔データ構造には，圧縮接尾辞配列の他に LZ-index がある．これは LZ78 圧縮法を基にして，効率的な文字列検索が行えるようにしたデータ構造である．従来の LZ-index は長さ u の文字列を $4uH_k(T)+o(u\log\sigma)$ ビットで表現し，長さ m のパタンの occ 箇所の出現位置を $O(m^3\log\sigma+(m+occ)\log u)$ 時間で列挙できる．このデータ構造を 2 つのアプローチで改良した．どちらのデータ構造も，サイズは $(2+\epsilon)uH_k(T)+o(u\log\sigma)$ ビットであり (ϵ は任意の正数)，パタンの検索時間も $O(m^2\log m+(m+occ)\log u)$ に改良した．また，長さ ℓ の任意の部

分を $\mathrm{O}(\ell/\log_\sigma u)$ 時間で復元できるようにした．さらに，サイズを $(1+\epsilon)uH_k(T)+o(u\log\sigma)$ に削減し，パタンの検索時間を $m \geq 2\log_\sigma u$ のときに平均 $\mathrm{O}(m^2)$ 時間に改善した．

3 グラフ探索問題

3.1 ランダムアルゴリズムによる節点探索・訪問問題の解法

節点探索問題と節点訪問問題を，以下のランダムアルゴリズムの枠組みで解く．あるエージェントが，グラフのある節点からその隣接節点に移動することを繰り返す．どの隣接節点に移動するかはランダムであるが，その確率は予め定められた確率遷移行列 P によって定められている．エージェントは状態を持たず，遷移確率は現在どの節点にいるかによってのみ決まる．

このようなエージェントの動きを，ランダムウォークと呼ぶ．通常単にランダムウォークといえば，隣接する頂点に等確率で遷移するという標準ランダムウォーク (定義 2) を指す．節点 u からその隣接点 $v \in N(u)$ に移動する確率 p_{uv} は次のように定義される．

Definition 2

$$p_{uv} = \begin{cases} \frac{1}{\deg(u)} & (u \in N(u)) \\ 0 & (otherwise) \end{cases} u, v \in V$$

Definition 3 (Hitting Time) グラフ $G = (V, E)$ におけるランダムウォークで，頂点 $u \in V$ から出発した粒子が遷移確率行列 $P = (p_{uv})$ に従ってランダムに移動し，頂点 $v \in V$ に初めて到達するまでに要する遷移数の期待値を $H_G^P(u, v)$ とする．このとき G の Hitting Time(H_G^P) を以下のように定義する．

$$H_G^P = \max_{u,v \in V} H_G^P(u, v)$$

Hitting time，Cover time が小さくなるように確率遷移行列 P を定義することが目的である．本研究では以下の結果を得た．

- n 節点の木の Cover time は $\Omega(n\log n)$ である．
- グラフに対するハミルトニアン成分分解を定義し，グラフがサイズ k の分解を持つ場合には Cover time を $\mathrm{O}(nk)$ にできる．

木の Cover time の下界

Lemma 2 頂点 v_0 に 2 つの端末点 v_1 と v_2 が接続されているグラフ $G = (V, E)$ に対しある遷移確率行列 P を与える．このとき, v_0 から v_1 および v_2 への遷移確率を q_1 と q_2 とする．次に, 他の遷移確率を固定して q_1, q_2 のみを変化させると, G の Cover Time は $q_1 = q_2$ のとき最小となる．

Theorem 3 ある頂点 v_0 に $k \geq 2$ 個の端末点 $v_1, \cdots, v_k$ が接続されているようなグラフ $G = (V, E)$ に対しある遷移確率行列 P を与える．このとき, v_0 から $v_1, \cdots, v_k$ への遷移確率を $q_1, \cdots, q_k$ とする．次に, 他の遷移確率を固定して $q_1, \cdots, q_k$ のみを変化させると, G の *Cover Time* は $q_1 = \cdots = q_k$ のとき最小となる．

star graph に定理 3 を適用すると, star graph では標準ランダムウォークが最適なランダムウォークであることが示される．star graph 上での標準ランダムウォークにおける Cover Time C_{S_n} は $\Theta(n\log n)$ であることから次の系が得られる．

Corollary 1 頂点数 n の star graph 上のランダムウォークにおいて,

$$C_{S_n} = \Omega(n\log n).$$

Lemma 3 グラフ $G_0 = (V_0, E_0)$ 内に対し，新たに $k+1$ 個の頂点 $V_1 = \{y, z_1, z_2, \cdots, z_k\}$ を接続する．まず, $x \in V_0$ に y を接続する．次に, $z_1, \cdots, z_k$ を全て y に接続したグラフを G_A, x に接続したグラフを G_B とする．このとき G_A に対する任意の遷移確率行列 P と $u \in V_0$ に対して, $C_{G_A}^P(u) \geq C_{G_B}^{P'}(u)$ となるような G_B に対する遷移確率行列 P' が存在する

Theorem 4 頂点数 n の Tree のうち，最小の Cover Time を持つのは star graph である．

定理 4および, 系 1から,Tree における Cover Time の下界について, 以下の系が導かれる．

Corollary 2 Tree 上でのランダムウォークに対する Cover Time は $\Omega(n\log n)$

ハミルトニアン成分分解

Lemma 4 グラフ $G = (V, E)$ に対し, ある整数 $k > 0$ および以下のような V の分割 $V_1, V_2, \cdots, V_k$ が存在する.

- $|V_i| = 1$, または
- $|V_i| \geq 3$ かつ V_i の頂点を全て通る閉路が存在する.

ただし, $1 \leq i \leq k$.

Definition 4 グラフ $G = (V, E)$ が与えられたとき,V に対して補題 4の条件を満たすような分割 $V_1, V_2, \cdots, V_k$ を与える. このとき,V_i のなす閉路を $\mathcal{H}_i$ とし, これをハミルトニアン成分と定義する. 閉路にはある向きを定める. $v \in V_i$ のとき $\delta(v) = i$ となる関数 $\delta(v)$ を定義する. また, 順序集合 $E_c = \{\langle u, v\rangle \mid u \in V, \delta(u) = \delta(v), v \in N(u), \text{and } u \to v \text{ は } \mathcal{H}_i \text{ の持つ向きに等しい}\}$ を定義する. 両端の頂点がそれぞれ異なるハミルトニアン成分に属する枝から, ハミルトニアン成分が木構造をなすように, ハミルトニアン成分同士を接続する枝の集合 $E_t \subset E$ を定義する.

グラフ G に対するハミルトニアン成分分解は, 分割 $V_1, V_2, \cdots V_k$, と E_c および E_t により定義される.

Theorem 5 頂点数 n のグラフがサイズ k のハミルトニアン成分分解を持つとき Cover Time が $O(nk)$ となるようなランダムウォークが実現可能である.

3.2 スケールフリーネットワークでの，ランダムアルゴリズムによる節点探索問題の解法

この論文では与えられたグラフに対して，以下の問題を考える．(1) 与えられた二頂点を結ぶパスを見つける．(2) グラフの全頂点を訪れる．グラフの探索手法としては，一般的かつ抽象的なグラフに対して幅優先探索（DFS) やランダムウォークなど数多くの方法が存在するが，それらは実際のアプリケーションにおいて効率良く動作するとは限らない．例としては，DFS は最悪の場合全ての頂点を記憶するためのメモリが必要になり, ランダムウォークでは平均 $O(n^3)$-時間かかってしまう.

本論文では対象をより具体的なグラフモデルに限定することでより良い探索手法を提案する．本論文で扱うグラフ探索におけるモデルでは以下のことを仮定する.

1. グラフはある分散システムの通信ネットワークをモデル化したものであり，頂点と辺はそれぞれサイトと通信リンクを表す．この通信ネットワークはロジカルである.
2. 各頂点は一意の識別子 (ID) を持つが，その ID は頂点が訪れられるまで不明.
3. 各頂点はそこへ接続する辺を識別できるが, その辺によってどの頂点と接続しているかは知らない.
4. エージェントはいくつかの頂点の ID を記憶することができ，メモリに格納されている頂点へは直接移動 (ジャンプ) することができる.

エージェントはまず開始頂点に置かれる．探索によって隣接頂点へ訪れるとき，エージェントはその頂点へ移動する.

本研究では，上記の仮定の上で，局所的な次数情報を用いるグラフ探索手法を提案し，計算機実験を通してそれがスケールフリーという構造を持つネットワークに対して有効であることを示す.

準備

以下ではスケールフリーネットワークとそのモデルについて述べる. 実世界に存在する多くのネットワークでは次数の分布がベキ則に従うことが知られている. すなわち，ある頂点が次数 d を持つ確率 $P(d)$ は，$P(d) \propto d^{-\gamma}$ と書ける．このようなネットワークはスケールフリーネットワークとも呼ばれる．実世界の多くのスケールフリーネットワークでは，$2 < \gamma < 3$ であることが知られている.

スケールフリーネットワークを生成するモデルには多くのものが提案されているが，ここでは Barabási と Albert によって提案された BA モデ

ルを扱う．BA モデルでは，以下の 2 つのルールによってネットワークを生成する．

- **Growth**
  まず，m_0 個からなる完全グラフを用意する．各時間ステップで新たな頂点 v を追加する．既に存在する頂点から異なる $m'(\leq m_0)$ 個の頂点を下に定義する確率でランダムに選び，v と接続する．

- **Preferential Attachment**
  頂点 u が選ばれる確率は $\deg(u)/\sum_{v\in V'}\deg(v)$ である．ここで V' は現在の頂点の集合を表す．

BA モデルは $P(d)\propto d^{-3}$ となるスケールフリーネットワークを生成する．

提案手法：forest search

本節では，提案手法である forest search について述べる．動機としてはスケールフリーネットワークの構造的な特徴を用いて効率の良い探索ができないか，ということである．スケールフリーネットワークでは

グラフの各頂点 u に対して，$N^k(u)$ を u からの距離が高々 k である頂点の集合とする．u 自体はどの $k\geq 0$ に対しても $N^k(u)$ に属する．各頂点 u に対して，$N^1(u)$ の中から最大次数の頂点をその親 $\pi(u)$ に選ぶ．最大次数の頂点が複数ある場合にはその中で ID が最小の頂点を選ぶ．以降この親の選び方を**単純ルール**と呼ぶ．F を与えられたグラフ G の全頂点と各頂点 u に対して辺 $(u,\pi(u))$ からなる G の順序付き森とすると，F には長さが 2 以上のサイクルは存在しないため，F は G のスパニング森である．自己ループのある頂点はそれが木の根であることを意味する．スケールフリーネットワークの特徴から，F は次のような特徴を持つと考えられる：次数の高い頂点数の割合は非常に小さいので，F における木の数は少なく，また BA モデルにおける平均頂点間距離は小さいので，各木の深さも小さい．

次に，F における木の数を減らすことを目的として，スパニング森の定義に関する**追加ルール**を考える．単純ルールによって定義される F の各木の根 u に対して，$\pi(u)$ の定義を $N^2(u)$ の中から最大次数を持つ頂点（複数あればその中で最小 ID の頂点）へと変更する．この変更によって新たにサイクルが生じることは無い．

Theorem 6 追加ルールによって定義されるグラフ F は次の性質を持つ．

1. もし単純ルールにおける木の根 u が異なる木に属する頂点と隣接しているなら，追加ルールにおいては u は木の根ではない．
2. 追加ルールによって定義されるグラフ F には長さ 2 以上のサイクルは存在しない．

forest search では与えられたグラフ上を局所的な次数情報を用いてグラフが森であるかのように探索する．探索の概要としては目標頂点が見つかるまで新しい木を探し，その内部を DFS によって探索することを繰り返す．親の定義のおかげで，木の内部を DFS で探索する際にトラックを記憶する必要は無い．forest search によって木は暗に定義されるので，これを仮想木と呼ぶ．

図 3に forest search のアルゴリズムの骨子を示す．アルゴリズムの実行中，現在の頂点が目標頂点かどうかを調べ，もしそうならば出力・終了する．仮想木を識別し，また木の間を行き来するため，それまでに発見した木の根の ID を保持する *root list* と，他の木に移動するために渡る木に含まれない辺 (横断辺) を記憶する *cross stack* が必要である．cross stack の一要素は遷移元，遷移先頂点の ID の順序対からなる有向辺である．

実際にはこのアルゴリズムは，各仮想木を頂点としたときの多重グラフにおいても DFS を実行するが，木の根まで行かなければその木が既に探索済みの木か判別できないため，現在の木に‘‘ 隣接する” 全ての木に訪れる必要がある．

ここで，最悪の場合におけるステップ数に関して次のことが成り立つ．

Theorem 7 G を頂点数 $|V|$，辺数 $|E|$ の有限で連結な無向グラフとすると，*forest search* は最悪の場合 G を $O(t)$ のメモリ量を用いて $O(|V|+|E|\cdot h)$ で探索する．ここで t,h はそれぞれ G の仮想木の数と最大の深さを表す．

Step0: root list と cross stack を空にした後，開始頂点へ．
Step1: 現在の頂点から根 u まで登る．u が root list にあるか調べ，あれば cross stack から横断辺を pop してその遷移元頂点へジャンプし，Step3 へ．
Step2: 現在の頂点 (根) を root list へ追加し，仮想木を DFS で探索．
Step3: 仮想木の内部を DFS と同様に辿りながら次の横断辺を探す．あればそれを cross stack に push した後渡り，Step1 へ．なければ cross stack から横断辺を pop してその遷移元頂点へジャンプし，Step3 へ．(cross stack を pop するとき空ならば，連結成分の全頂点に最低一度は訪れたことを意味する．)

図 3: forest search

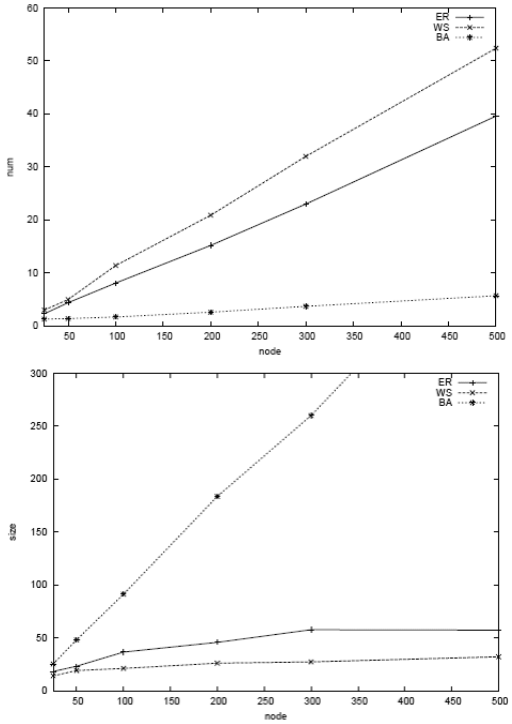


図 4: 単純ルール：木の数 (上) と最大木のサイズ (下)

計算機実験

forest search の性能を評価するためにアルゴリズムを実装し計算機実験を行った．探索においては比較のため，ランダムな探索戦略として池田らの提案による $\beta-$ ランダムウォークを実装し，forest search と同様にステップ数を計測した．

仮想木の数と最大の木のサイズ　forest search の性能は探索する仮想的な森の構造に依存すると考えられる．そこで，まず森に関する統計量を調べた．最初に単純ルールのみを適用した際の結果から示す．図 4は仮想木の数と最大の木のサイズを表している．比較のため，BA モデルによって生成されたグラフの他にランダムグラフを生成する ER モデルとスモールワールドネットワークを生成する WS モデルにおける結果も載せた．いずれのモデルにおいても頂点数 n に対して辺数が約 $2n$ になるように各パラメータを調整し連結グラフを生成した．BA モデルでは他の 2 モデルほど木の数は多くない（が，頂点数に対して線形で増加しているように見える）．最大の木のサイズに関しては，BA モデルでは線形に増加しているのに対して，他の 2 モデルではよりゆるやかに増加している．これらの結果から BA モデルでは，仮想的な森は 1 つの巨大な木とその他多くの小さな木から構成されていると考えられる．

次に追加ルールを適用した際の結果を示す．図 5は BA モデルにおける仮想木の数と最大木のサイズを示している．単純ルールのときと同じく，辺数が頂点数の約二倍になるように BA モデルでのグラフ生成における単位ステップあたりの辺の追加数 $m' = 2$ としたときの結果である．仮想木の数は非常に少ないことが分かる．また，90% 以上の頂点が最大木に含まれているという結果も得られた．したがって，追加ルールの効果は有効であると言える．

与えられた頂点の探索　与えられた開始頂点から目標頂点までに要したステップ数を示す．図 6は BA モデルにおいて最悪の場合のステップ数を図示したものである．比較のため $\beta-$ ランダムウォークの $\beta = 0.5$ における結果を細い破線で示した．forest search はランダムウォークよりも高速に探索が行われている．forest search が使用する 2 種類の記憶域 (root list および cross stack) のサイズはどちらも仮想木の数で抑えられる．リストとスタックはどのモデルにおいても最悪の場合は木の数とほぼ等しいサイズになるが，平均の場合は

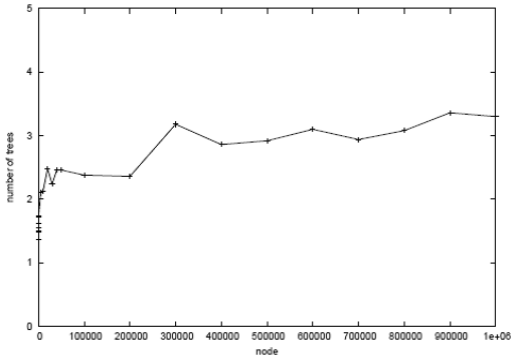


図 5: 追加ルール：木の数

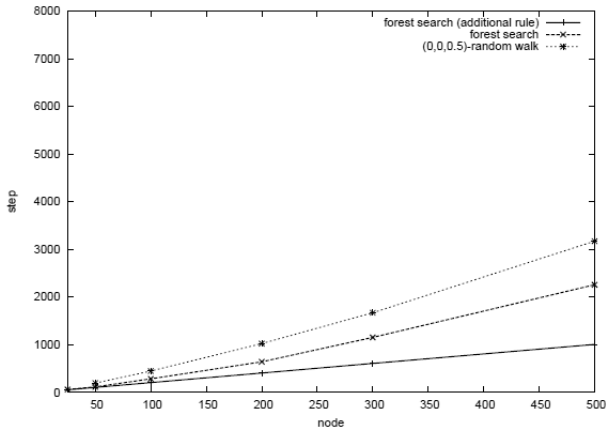


図 6: 目標頂点へ到達するまでのステップ数

ER，WS モデルにおいては頂点数に対して線形に増加し，BA モデルではほぼ 1 で済むという結果が得られた．これは，BA モデルでは最大木のサイズが大きく，開始，目標頂点の両方が同一の木に入っている可能性が高いため，目標頂点を他の木に移ることなく見つけることができるケースが多いからである．

全頂点の訪問　forest search は系統的な探索を行うので，全頂点をカバーすることに関してはランダムな探索戦略よりも高速ではないかと考えられる．そこで開始頂点から探索を開始し，グラフの全頂点を最低一回は訪れるときのステップ数を調べた．図 7 は BA モデルにおける最悪の場合の結果を図示したものである．forest search は単純ルール，追加ルール両方の結果を載せている．比較のため，β– ランダムウォーク ($\beta = 0.5$) と，それに過去に通過した k_n 頂点分の記憶を持たせた手法の 2 つを実行した結果を挙げた．ここで，k_n は探索するグラフにおける forest search の単純ルールが定義する仮想木の数の倍を表す．木の数の倍のサイズの記憶域を持つランダムウォークよりも forest search の方がより早く全頂点へ訪れていることが分かる．

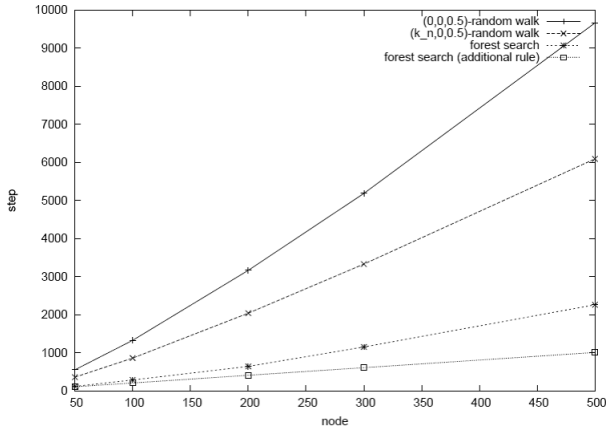


図 7: 全頂点を訪問するまでのステップ数

3.3 再帰的森探索法による節点列挙問題の解法

本研究では与えられた連結な無向グラフを探索する問題を考える．ここでグラフ探索とはグラフ上を辺に沿って遷移するトークンが，事前にグラフ全体の構造に関する情報を一切持たず，ある開始点から出発し全ての頂点に訪れ，また全ての辺を渡ることをいう．このような問題の応用としては，全体的な構造が未知なネットワークにおける頂点に格納されたデータの探索や，ネットワークメンテナンスなどが考えられる．グラフ探索問題ではトークンの能力やグラフに関する情報の入手可能性などに対して様々な設定のもとで研究が行われてきた．本研究では，頂点が一意にラベル付けされていることと，探索においてトークンは事前に頂点数に関する情報を持たず，また頂点には情報を書き残せないことを仮定する．グラフ探索の効率性に関する指標としては，時間とメモリ量の大きく二種類がある．前者は探索が終了するまでにトークンが遷移した辺の数（探索ステップ数）で，後者はトークンが探索中に必要とするビット数で評価する．既存研究の多くは探索ステップ数を最小化することを目標に行われてきたが，本研究ではトークンの持つメモリ量に着目する．

forest search では，隣接する頂点間の親子関係

がそれらの次数によって決められ，全体としてはグラフの全域森が定義される．トークンはこの仮想的な全域森の構造に従い，深さ優先探索（DFS）に基づいて頂点間を遷移する．局所的な木構造はトークンの近傍頂点の情報を用いて一意に決定できるため，記憶する必要があるのは木々の間を遷移するのに必要な情報のみであり，グラフ構造によっては省メモリな探索が可能となる．計算機実験を通して頂点の次数分布がベキ則に従うある種のグラフに対し，探索ステップ数とメモリ量に関して共に効率的な探索が行えることを示した．しかしながら，一般には探索において使用するメモリ量がグラフの頂点数 n について線形になる．

本研究では，forest search の枠組みで使用するメモリ量をどこまで減らすことが可能かという理論的な観点から，アルゴリズムの改良を行う．USTCON(無向グラフにおいて与えられた二頂点間にパスが存在するか決定する問題) を解くために提案されているアルゴリズムを参考に，グラフ全体として見たときには仮想的な木構造を再帰的に構築するようなアルゴリズムを作ることにより，使用するメモリ量を $O(\log^2 n)$ ビットにできることを示す．

準備

グラフ探索問題は未知な環境内をロボットが探索する問題のひとつに位置付けられ，これまでに様々なモデル設定の下で研究が行われてきた．本研究で扱うモデルでは特に以下のことを仮定する．

1. 無向グラフ $G = (V, E)$ はある分散システムの通信ネットワークをモデル化したものであり，頂点と辺はそれぞれサイトと通信リンクを表す．この通信ネットワークはロジカルである．
2. 集中型モデルではない．
3. 各頂点は一意のラベル (ID) を持つ．
4. 各頂点はそこへ接続する辺を識別できるが，その辺によってどの頂点と接続しているかは知らない．
5. トークンは探索前に G の構造や頂点数 $n = |V|$ について一切の情報を持たない．
6. トークンは頂点に情報を書き残すことができない．
7. トークンはいくつかの頂点の ID を記憶することができ，メモリに格納されている頂点へは直接移動 (ジャンプ) することができる．

仮定 2 について，集中型モデルとは G がランダムアクセス可能な行列として表現されている場合を指す．集中型モデルであれば，USTCON が $O(\log n)$ ビットで解けることを証明した論文によって，無向グラフを $O(\log n)$ ビットで探索可能なアルゴリズムが存在することが示されている．また仮定 3 について，各頂点が ID を持たない無向グラフであれば，$\Theta(D \log d)$ ビットで探索可能であることが証明されている．ここで，D, d はそれぞれグラフの直径と最大次数を表す．

再帰的な forest search

本節では，探索に必要なメモリ量を $o(n)$ ビットにすることを目標として forest search を再帰的に行うように変更する．基本的なアイデアとしては USTCON を解くアルゴリズムでしばしば採用されてきた Hook & Contract アプローチを用いる．Hook & Contract アプローチでは，与えられた無向グラフの全ての連結成分がそれぞれ一点に縮約されるまで次の処理を繰り返す．

1. 各頂点はそれぞれの隣接リストから隣接点をひとつ選び，hook する．
2. hook によって連結された各成分をひとつの代表点に縮約し，代表点の隣接リストを求める．

再帰的 forest search では，各仮想木を擬似的な頂点と見なしてそれぞれが更に親を選ぶことを，擬似頂点が一点になるまで繰り返すという過程をアルゴリズムに組み込む．グラフ全体として見ると仮想木の構築を再帰的に行うことによって，階層的な木構造を暗に定義することになる．その構造に沿ってトークンを動かすことでアルゴリズムから root list と cross stack を除去し，大域変数としては *level* と，現在のトークンの位置を示す頂点 ID の二つにすることができる．

以降では再帰のレベルをレイヤと呼び，レイヤ *level* においてトークンが置かれている仮想

図 8: 再帰的 forest search

```
Step0: level := 0
Step1: climb(level)
Step2: if ( deg(level) == 0 ) exit
Step3: DFS(level)
Step4: level := level + 1
Step5: goto Step1
```

木で，根まで登る，DFS を行うという処理をそれぞれ climb($level$)，DFS($level$) と表す．各レイヤにおいて，仮想木すなわち擬似頂点の次数や，DFS($level$) において隣接する頂点へ渡るための辺は，DFS($level-1$) を実行して得ることができる．つまり，climb($level$)，DFS($level$) の実行中，トークンは $level$ 以下のレイヤの異なる階層の木構造を行き来することになる．仮想木内部の探索の詳細は，レイヤごとに必要なメモリ量とともに後述する．

再帰的 forest search の大まかな流れは図 8のように表せる．図中で，deg($level$) は $level$ においてトークンが置かれている擬似頂点の（自己ループを除いた）次数を表す．

レイヤごとに必要なメモリ量について，仮に各レイヤにおける仮想的なグラフ構造が全て単純グラフであればトークンが記憶しなければならない情報は，近傍の親子関係を決定するのに必要な，

- 擬似頂点の次数
- 隣接する擬似頂点へ渡るとき，遷移元の頂点の ID
- 隣接する擬似頂点の最大次数とその ID

だけである．しかし一般には，トークンは多重グラフの上を遷移することになる．この場合，DFS($level$) で閉路が作られるのを避けるため，仮想木において子へ下るときには常に多重辺の一本目の辺を渡るようにしなければならない．この処理のためには上記の情報に加えて，

- 遷移元の頂点の ID
- 遷移先の擬似頂点（子）の ID

を二組記憶する必要がある．一組目は DFS($level$) において子へ下るときに辿る辺 e の情報であり，二組目は e と並行な多重辺の一本目を探索するための情報である．$level$ における一組目，二組目の有向辺をそれぞれ $(s_1, d_1), (s_2, d_2)$ と表し，またトークンの置かれている擬似頂点を u と表すと，これらの情報を用いた DFS($level$) におけるトークンの遷移は次のように行われる．

木構造を下るとき：辺を渡るときに (s_1, d_1) を記憶した後，一度 s_1 へ戻り climb($level-1$) を実行する．$level$ における u に接続する辺に対して，(s_2, d_2) を記憶して渡り，$d_1 = d_2$ となるまで走査する．このとき $s_1 = s_2$ ならば (s_1, d_1) は一本目の辺なので擬似頂点 d_1 以降を探索する．そうでなければ二本目以降の辺なので s_1 へ戻って渡るべき辺の探索を続ける．

木構造を登るとき：子の ID である d_1 を覚えて親への辺 e' を辿り climb($level-1$) を実行する．$level$ における u に接続する辺に対して，(s_2, d_2) を記憶して渡り，$d_1 = d_2$ となるまで走査する．辿りついたとき辺 (s_2, d_2) は e' と並行な一本目の辺なので，s_2 まで戻り，次の辺（d_1 の兄弟へ接続する辺）を探索する．

したがって，レイヤごとに必要なトークンのメモリ量は $O(\log n)$ ビットである．

最後に再帰的 forest search のレイヤ数が $O(\log n)$ になることを示す．始めに再帰的でない forest search について考える．各頂点が ID を持つ無向連結グラフ $G = (V, E)$ に対して，forest search が定義するグラフ（根付き木の集合）の各木をそれぞれ一点に縮約し，縮約後の頂点 ID に縮約前の木の根の ID を割り当てて得られるグラフを $G' = (V', E')$ と表す．

Theorem 8 $|V'| \leq \frac{|V|}{2}$.

定理 8より，次が成り立つ．

Corollary 3 再帰的 *forest search* において，レイヤ数 (再帰の深さ) は高々$\lceil \log n \rceil$.

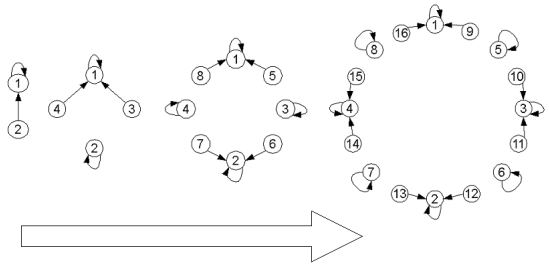
実際にレイヤ数が $\lceil \log n \rceil$ になるグラフは例えば図 9ような進化グラフのモデルで構成できる．構成したいグラフはサイクルグラフだが，説明ではそのグラフに forest search での親選びを適用した森をベースに記述している．グラフの成長過程は図 10のようになる．

以上より，再帰的 forest search でトークンが必要なメモリ量が $O(\log^2 n)$ ビットであることが分かる．

図 9: 進化グラフのモデル

(1): 二頂点 (ID: 1,2) から成るひとつの根付き木を用意する．
while() {
(2): グラフの各頂点 u に対して，
・u が根でないなら根にする (親から切り離して自己ループを付ける)．
・u が根なら新たに二個の頂点を u の子としてグラフに追加する．
(3): (2) で新たに追加した頂点の ID を適当な順に割り当てて行く．
}

図 10: 進化グラフの成長過程



3.4 無記憶のエージェントによる節点訪問問題を，グラフの枝のラベルを書き換えることで解く手法

グラフ上にトークンを巡回させ，グラフの全点に情報を伝えることを考える．グラフは巨大であるため，巡回するためのルートはトークンに格納することができないとする．そこでいかに少ない記憶を用いて効率よく巡回できるかが問題となる．従来手法ではグラフ上に全域木を格納する方法などがあるがその情報をグラフに追加する必要がある．本研究ではグラフに情報を追加せず，またトークンに記憶が必要ない巡回アルゴリズムを提案する．

仮定として，グラフの各点において，そこから d 本の枝が出ているときそれらには 1 から d までの整数のラベルがついているとする．このようなラベル付けは local orientation と呼ばれている．トークンの巡回アルゴリズムは次のようになる．まずある点から出発する場合には 1 のラベルのついている枝をたどる．ある点に到着したとき，到着するときに用いた枝のラベルが i の場合，次の点に出発する場合は $i+1$ のラベルのある枝へ向かう．このアルゴリズムではトークンは記憶を必要としない．トークンがグラフの全点を訪れることができるかどうかはグラフの枝のラベル付けによって決まるが，本研究ではラベル付けをうまく行うと，n 点のどのようなグラフに対しても，全点を訪れる長さ $10n$ 以下のツアーが存在することを示した．

3.5 無線ネットワークのような節点の隣接関係が未知なグラフにおける，エネルギー消費の少ないブロードキャストアルゴリズム

無線アドホックネットワークは，ネットワークの構造が頻繁に変化するため，さまざまな問題が生じる．本研究ではその中で，同一データを全ノードに送信するための電力消費の最小化問題を扱っている．ノード間の距離はあらかじめ分からないため，アルゴリズムの評価は競合比を用いる．つまり，距離が分かっている場合の最適アルゴリズムでの電力消費の何倍以内になるかという評価を用いる．この問題に対し，最悪の競合比が $3/2+\sqrt{2}$ となるオンラインアルゴリズムを提案した．また，このアルゴリズムは最適であることも示した．

研究業績一覧

学術論文

1. Kunihiko Sadakane, Nadia Takki-Chebihi, Takeshi Tokuyama:
“Combinatorics and algorithms for low-discrepancy roundings of a real sequence”, Theoretical Computer Science, Vol. 331, No. 1, 23–36, Feb. 2005.
概要: We discuss the problem of computing all the integer sequences obtained by rounding an input sequence of n real numbers such that the discrepancy between the input sequence and each output binary sequence is less than one. The problem arises in the design of digital halftoning methods

in computer graphics. We show that the number of such roundings is at most n+1 if we consider the discrepancy with respect to the set of all subintervals, and give an efficient algorithm to report all of them. Then, we give an optimal method to construct a compact graph to represent the set of global roundings satisfying a weaker discrepancy condition.

2. J. Jansson, H.-K. Ng, K. Sadakane, W.-K. Sung:
"Rooted Maximum Agreement Supertrees", Algorithmica, Vol. 43, No. 4, 293–307, Dec. 2005.
概要: Given a set $\mathcal{T}$ of rooted, unordered trees, where each $T_i \in \mathcal{T}$ is distinctly leaf-labeled by a set $\Lambda(T_i)$ and where the sets $\Lambda(T_i)$ may overlap, the maximum agreement supertree problem (MASP) is to construct a distinctly leaf-labeled tree Q with leaf set $\Lambda(Q) \subseteq \bigcup_{T_i \in \mathcal{T}} \Lambda(T_i)$ such that $|\Lambda(Q)|$ is maximized and for each $T_i \in \mathcal{T}$, the topological restriction of T_i to $\Lambda(Q)$ is isomorphic to the topological restriction of Q to $\Lambda(T_i)$. Let $n = \left|\bigcup_{T_i \in \mathcal{T}} \Lambda(T_i)\right|$, $k = |\mathcal{T}|$, and $D = \max_{T_i \in \mathcal{T}} \{\deg(T_i)\}$. We first show that MASP with $k = 2$ can be solved in $O\left(\sqrt{D}\, n \log(2n/D)\right)$ time, which is $O(n \log n)$ when $D = O(1)$ and $O(n^{1.5})$ when D is unrestricted. We then present an algorithm for MASP with $D = 2$ whose running time is polynomial if $k = O(1)$. On the other hand, we prove that MASP is NP-hard for any fixed $k \geq 3$ when D is unrestricted, and also NP-hard for any fixed $D \geq 2$ when k is unrestricted even if each input tree is required to contain at most three leaves. Finally, we describe a polynomial-time $(n/\log n)$-approximation algorithm for MASP.

3. Y. Handa, H. Ono, K. Sadakane, M. Yamashita:
"Neighborhood Composition: A Parallelization of Local Search Algorithms", Recent Advances in Parallel Virtual Machine and Message Passing Interface, Proceedings, LNCS 3241, 155–163, Sep. 2004.
概要: To practically solve NP-hard combinatorial optimizationproblems, local search algorithms and their parallel implementations on PVM or MPI have been frequently discussed. Since a huge number of neighbors may be examined to discover a locally optimal neighbor in each of local search calls, many of parallelization schemes, excluding so-called the multi-start parallel scheme, try to extract parallelism from a local search by distributing the examinations of neighbors to processors. However, in straightforward implementations, when the next local search starts, all the processors will be assigned to the neighbors of the latest solution, and the results of all (but one) examinations in the previous local search are thus discarded in vain, despite that they would contain useful information on further search. This paper explores the possibility of extracting information even from unsuccessful neighbor examinations in a systematic way to boost parallel local search algorithms. Our key concept is neighborhood composition. We demonstrate how this idea improves parallel implementations on PVM, by taking as examples well-known local search algorithms for the Traveling Salesman Problem.

4. Ho-Leung Chan, Wing-Kai Hon, Tak-Wah Lam, Kunihiko Sadakane:
"Dynamic Dictionary Matching and Compressed Suffix Trees", Proceedings of ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms, PR118, 13–22, Jan. 2005.
概要: Let T be a string with n characters over an alphabet of constant size. The recent breakthrough on compressed indexing allows us to build an index for T in optimal space (i.e., $O(n)$ bits), while support-

ing very efficient pattern matching. Yet the compressed nature of such indexes also makes them difficult to update dynamically. This paper extends the work on optimal-space indexing to a dynamic collection of texts. Our first result is a compressed solution to the *library management* problem, where we show an index of $O(n)$ bits for a text collection $\mathcal{L}$ of total length n, which can be updated in $O(|T| \log n)$ time when a text T is inserted or deleted from $\mathcal{L}$; also, the index supports searching the occurrences of any pattern P in all texts in $\mathcal{L}$ in $O(|P| \log n + occ \log^2 n)$ time, where occ is the number of occurrences. Our second result is a compressed solution to the *dictionary matching* problem, where we show an index of $O(d)$ bits for a pattern collection $\mathcal{D}$ of total length d, which can be updated in $O(|P| \log^2 d)$ time when a pattern P is inserted or deleted from $\mathcal{D}$; also, the index supports searching the occurrences of all patterns of $\mathcal{D}$ in any text T in $O\big((|T| + occ) \log^2 d\big)$ time. When compared with the $O(d \log d)$-bit suffix tree based solution of Amir *et al.*, the compact solution increases the query time by roughly a factor of $\log d$ only. The solution of the dictionary matching problem is based on a new compressed representation of a suffix tree. Precisely, we give $O(n)$-bit representation of a suffix tree for a dynamic collection of texts whose total length is n, which supports insertion and deletion of a text T in $O(|T| \log^2 n)$ time, as well as all suffix tree traversal operations, including forward and backward suffix links. This work can be regarded as a generalization of the compressed representation of static texts. In the study of the above result, we also derive the first $O(n)$-bit representation for maintaining n pairs of balanced parentheses in $O(\log n / \log \log n)$ time per operation, matching the time complexity of the previous $O(n \log n)$-bit solution.

5. S. Kutten, H. Ono, D. Peleg, K. Sadakane, M. Yamashita:
"Energy-Optimal Online Algorithms for Broadcasting in Wireless Networks", Proceedings of Second Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS), 125–130, Jan. 2005.
概要: We consider problems related to the design of energy-efficient online message broadcasting protocols in ad-hoc wireless networks. Recent developments in portable wireless devices with limited power resources have led to considerable interest in problems involving the construction of energy-efficient multicast trees in the network. Wireless devices can control their transmission power in order to save power consumption whenever the distance to the intended destination of the transmission is known. The attenuation of a signal with power P_s is $P_r = \frac{P_s}{d(s,t)^\delta}$, where $d(s,t)$ is the distance between hosts s and t, and $\delta \geq 1$ is the *distance-power gradient*. A message can be successfully decoded if P_r is no less than a constant γ. Therefore the *transmission range* of a host s, namely, the maximum distance to which a message can be successfully delivered from s, is $(P_s/\gamma)^{1/\delta}$. Power control also has a positive effect on reducing the number of transmission collisions between nearby senders. The problem studied here concerns a single sender which has to transmit a message to a given collection of receivers in an online setting, namely, when the hosts do not know each other's locations. The goal is to specify a protocol for the sender allowing it to directly broadcast the message to the recipients and receive acknowledgements, while minimizing the total transmission costs. By *direct broadcast* we mean that the sender is required to transmit the message itself to every recipient, namely, multi-hop deliv-

ery is not allowed. This restriction may be relevant in situations when the battery resources of the receivers is severely limited and it is desired to minimize their transmissions, or when when the reliability of the hosts is uncertain and only direct messages from the source can be trusted. Using varying levels of transmission power is important for energy-efficient communication. As far as the authors are aware, there has been no online algorithms with provable worst-case guarantees for energy-efficient broadcasting in ad-hoc wireless networks. The protocols proposed in this paper are based on computing or estimating the distances from the sender host to the receiver hosts in an energy-efficient way. The most basic case is that of a single sender and a single receiver. The generic doubling protocol employed by the sender is based on repeatedly transmitting the messages to increasingly larger distances, until reaching the receiver. The behavior of this protocol depends on the choice of the sequence of distances, and the problem is to determine them so as to minimize the overall power consumption. If a specific probability distribution may be assumed on the hosts, the algorithm can be optimized. This paper, however, assumes an online setting in which no a priori information is given about the distance from the sender to the receiver. Therefore the worst-case scenario should be considered. This motivation leads us to apply a competitive analysis to the algorithm. We compare the power consumption of an algorithm with that of the optimal (infeasible) offline algorithm that knows the distance d. We show that the optimal competitive ratio for this problem is $3/2 + \sqrt{2}$, i.e., there exists an online algorithm for the problem with this competitive ratio, and no online algorithm has smaller competitive ratio. The problem is somewhat similar to the famous *cow path* online problem, but setting the parameter of the algorithm is not obvious. Furthermore, we study the generalization of this problem where there is more than one receiver. This is a propoer extension of the cow path problem. For this problem we also propose a competitive online algorithm and prove its optimality. Interestingly, the competitive ratio of the generalized problem is the same, namely, $3/2 + \sqrt{2}$.

6. V. Mäkinen, G. Navarro, K. Sadakane: "Advantages of Backward Searching — Efficient Secondary Memory and Distributed Implementation of Compressed Suffix Arrays", Proceedings of ISAAC, LNCS 3341, 681–602, Dec. 2004.
概要: One of the most relevant succinct suffix array proposals in the literature is the Compressed Suffix Array (CSA) of Sadakane [ISAAC 2000]. The CSA needs $n(H_0 + O(\log\log\sigma))$ bits of space, where n is the text size, σ is the alphabet size, and H_0 the zero-order entropy of the text. The number of occurrences of a pattern of length m can be computed in $O(m \log n)$ time. Most notably, the CSA does not need the text separately available to operate. The CSA simulates a binary search over the suffix array, where the query is compared against text substrings. These are extracted from the same CSA by following irregular access patterns over the structure. Sadakane [SODA 2002] has proposed using *backward searching* on the CSA in similar fashion as the FM-index of Ferragina and Manzini [FOCS 2000]. He has shown that the CSA can be searched in $O(m)$ time whenever $\sigma = O(\text{polylog}(n))$. In this paper we consider some other consequences of backward searching applied to CSA. The most remarkable one is that we do not need, unlike all previous proposals, any complicated sub-linear structures based on the four-Russians technique (such as constant

time *rank* and *select* queries on bit arrays). We show that sampling and compression are enough to achieve $O(m \log n)$ query time using less space than the original structure. It is also possible to trade structure space for search time. Furthermore, the regular access pattern of backward searching permits an efficient secondary memory implementation, so that the search can be done with $O(m \log_B n)$ disk accesses, being B the disk block size. Finally, it permits a distributed implementation with optimal speedup and negligible communication effort.

7. Kunihiko Sadakane, Roberto Grossi:
"Squeezing Succinct Data Structures into Entropy Bounds", Proc. ACM-SIAM SODA, 1230–1239, Jan. 2006.
概要: Consider a sequence S of n symbols drawn from an alphabet $\mathcal{A} = \{1, 2, \ldots, \sigma\}$, stored as a binary string of $n \log \sigma$ bits. A *succinct* data structure on S supports a given set of primitive operations on S using just $f(n) = \mathrm{o}(n \log \sigma)$ extra bits. We present a technique for transforming succinct data structures (which do not change the binary content of S) into *compressed* data structures using $nH_k + f(n) + \mathrm{O}(n(\log \sigma + \log \log_\sigma n + k)/\log_\sigma n)$ bits of space, where $H_k \leq \log \sigma$ is the kth-order empirical entropy of S. When $k + \log \sigma = \mathrm{o}(\log n)$, we improve the space complexity of the succinct data structure from $n \log \sigma + \mathrm{o}(n \log \sigma)$ to $nH_k + \mathrm{o}(n \log \sigma)$ bits by keeping S in compressed format, so that any substring of $\mathrm{O}(\log_\sigma n)$ symbols in S (i.e. $\mathrm{O}(\log n)$ bits) can be decoded on the fly in constant time. Thus, the time complexity of the supported operations does not change asymptotically. Namely, if an operation takes $t(n)$ time in the succinct data structure, it requires $\mathrm{O}(t(n))$ time in the resulting compressed data structure. Using this simple approach we improve the space complexity of some of the best known results on succinct data structures. We extend our results to handle another definition of entropy.

8. Stefan Dobrev, Jesper Jansson, Kunihiko Sadakane, Wing-Kin Sung:
"Finding Short Right-Hand-on-the-Wall Walks in Graphs", Proc. of SIROCCO, LNCS 3499, 127–139, May 2005.
概要: We consider the problem of perpetual traversal by a single agent in an anonymous undirected graph G. Our requirements are: (1) deterministic algorithm, (2) each node is visited within $O(n)$ moves, (3) the agent uses no memory, it can use only the label of the link via which it arrived to the current node, (4) no marking of the underlying graph is allowed and (5) no additional information is stored in the graph (e.g. routing tables, spanning tree) except the ability to distinguish between the incident edges (called Local Orientation). This problem is unsolvable, as has been proven even for much less restrictive setting. Our approach is to somewhat relax the requirement (5). We fix the following traversal algorithm: Start by taking the edge with the smallest label. Afterwards, whenever the agent arrives at a node, it continues by taking the successor edge (in the local orientation) to the edge via which it arrived" and ask whether it is possible to choose the local orientations in such a way that the resulting perpetual traversal visits every node in $O(n)$ moves. We give a positive answer to this question, by showing how to construct such local orientations. This leads to an extremely simple, memoryless, yet efficient traversal algorithm.

9. Kunihiko Sadakane:
"Succinct Data Structures for Flexible Text Retrieval Systems", Journal of Discrete Algorithms, Vol. 5, No. 1, 12–22, Mar. 2007.
概要: We propose succinct data structures

for text retrieval systems supporting document listing queries and ranking queries based on the *tf*idf* (term frequency times inverse document frequency) scores of documents. Traditional data structures for these problems support queries only for some predetermined keywords. Recently Muthukrishnan proposed a data structure for document listing queries for arbitrary patterns at the cost of data structure size. For computing the *tf*idf* scores there has been no efficient data structures for arbitrary patterns. Our new data structures support these queries using small space. The space is only $2/\epsilon$ times the size of compressed documents plus $10n$ bits for a document collection of length n, for any $0 < \epsilon \leq 1$. This is much smaller than the previous $O(n \log n)$ bit data structures. Query time is $O(m + q \log^{\epsilon} n)$ for listing and computing *tf*idf* scores for all q documents containing a given pattern of length m. Our data structures are flexible in a sense that they support queries for arbitrary patterns.

10. Ho-Leung Chan, Wing-Kai Hon, Tak-Wah Lam, Kunihiko Sadakane:
"Compressed Indexes for Dynamic Text Collections", ACM Transactions on Algorithms, Vol. 3, Issue 2, Article No. 21, May 2007.
概要: Let T be a string with n characters over an alphabet of constant size. The recent breakthrough on compressed indexing allows us to build an index for T in optimal space (i.e., $O(n)$ bits), while supporting very efficient pattern matching. Yet the compressed nature of such indexes also makes them difficult to update dynamically. This paper extends the work on optimal-space indexing to a dynamic collection of texts. Our first result is a compressed solution to the *library management* problem, where we show an index of $O(n)$ bits for a text collection $\mathcal{L}$ of total length n, which can be updated in $O(|T| \log n)$ time when a text T is inserted or deleted from $\mathcal{L}$; also, the index supports searching the occurrences of any pattern P in all texts in $\mathcal{L}$ in $O(|P| \log n + occ \log^2 n)$ time, where occ is the number of occurrences. Our second result is a compressed solution to the *dictionary matching* problem, where we show an index of $O(d)$ bits for a pattern collection $\mathcal{D}$ of total length d, which can be updated in $O(|P| \log^2 d)$ time when a pattern P is inserted or deleted from $\mathcal{D}$; also, the index supports searching the occurrences of all patterns of $\mathcal{D}$ in any text T in $O\big((|T| + occ) \log^2 d\big)$ time. When compared with the $O(d \log d)$-bit suffix tree based solution of Amir *et al.*, the compact solution increases the query time by roughly a factor of $\log d$ only. The solution of the dictionary matching problem is based on a new compressed representation of a suffix tree. Precisely, we give an $O(n)$-bit representation of a suffix tree for a dynamic collection of texts whose total length is n, which supports insertion and deletion of a text T in $O(|T| \log^2 n)$ time, as well as all suffix tree traversal operations, including forward and backward suffix links. This work can be regarded as a generalization of the compressed representation of static texts. In the study of the above result, we also derive the first $O(n)$-bit representation for maintaining n pairs of balanced parentheses in $O(\log n / \log \log n)$ time per operation, matching the time complexity of the previous $O(n \log n)$-bit solution.

11. Jesper Jansson, Kunihiko Sadakane, and Wing-Kin Sung:
"Ultra-succinct Representation of Ordered Trees", Proc. ACM-SIAM SODA, pp. 575–584, Jan. 2007.
概要: There exist two well-known succinct representations of ordered trees: BP (balanced parenthesis) [Munro, Raman 2001]

and DFUDS (depth first unary degree sequence) [Benoit et al. 2005]. Both have size $2n + o(n)$ bits for n-node trees, which asymptotically matches the information-theoretic lower bound. Many fundamental operations on trees can be done in constant time on word RAM, for example finding the parent, the first child, the next sibling, the number of descendants, etc. However there has been no single representation supporting every existing operation in constant time; BP does not support i-th child, while DFUDS does not support *lca* (lowest common ancestor). In this paper, we give the first succinct tree representation supporting every one of the fundamental operations previously proposed for BP or DFUDS along with some new operations in constant time. Moreover, its size surpasses the information-theoretic lower bound and matches the entropy of the tree based on the distribution of node degrees. We call this an ultra-succinct data structure. As a consequence, a tree in which every internal node has exactly two children can be represented in $n + o(n)$ bits. We also show applications for ultra-succinct compressed suffix trees and labeled trees.

12. Daisuke Okanohara and Kunihiko Sadakane:
"Practical Entropy-Compressed Rank/Select Dictionary", Proc. Workshop on Algorithm Engineering and Experiments (ALENEX), Jan. 2007.
概要: Rank/Select dictionaries are data structures for an ordered set $S \subset \{0, 1, \ldots, n-1\}$ to compute $\mathbf{rank}(x, S)$ (the number of elements in S which are no greater than x), and $\mathbf{select}(i, S)$ (the i-th smallest element in S), which are the fundamental components of *succinct data structures* of strings, trees, graphs, etc. In those data structures, however, only asymptotic behavior has been considered and their performance for real data is not satisfactory. In this paper, we propose novel four Rank/Select dictionaries, **esp**, **recrank**, **vcode** and **sdarray**, each of which is small if the number of elements in S is small, and indeed close to $nH_0(S)$ ($H_0(S) \leq 1$ is the zero-th order *empirical entropy* of S) in practice, and its query time is superior to the previous ones. Experimental results reveal the characteristics of our data structures and also show that these data structures are superior to existing implementations in both size and query time.

13. 定兼 邦彦:
"圧縮データ構造", 電子情報通信学会論文誌, vol. J89-A, no. 6, pp. 470–475, 2006 年 6 月.
概要: 大量のデータからの検索を行う場合にはデータ構造を用いることが多いが，そのデータ構造のサイズが問題となっている．圧縮データ構造はデータ構造の機能や問合せ時間を保ったままサイズを小さくするものである．これまでに集合，文字列，木などを表現する圧縮データ構造が多く提案されている．本論文ではそれらのデータ構造を解説する．

14. Yuichi Kurumida, Hirotaka Ono, Kunihiko Sadakane, and Masafumi Yamashita:
"Forest Search: A Paradigm for Faster Exploration of Scale-Free Networks", Proc. of the 4th International Symposium on Parallel and Distributed Processing and Applications (ISPA), LNCS 4330, pp. 39–50, Dec. 2006.
概要: Scale-free networks naturally model wide area networks like the WWW. We consider the problem of fast exploration of huge scale-free networks using small memory space. Although there are many search algorithms for exploring an unknown graph, they require much space or time. For example, the depth first search requires some memory for all the nodes in the worst case,

and the random walk requires an $O(n^3)$-time in average, where n is the size of the graph. Under assumptions reflecting WWW applications, we propose a new exploration paradigm called *forest search* particularly designed for scale-free networks, and theoretically evaluate its space complexity. We also demonstrate its superiority over random walk based search algorithms by conducting simulations.

15. Diego Arroyuelo, Gonzalo Navarro, and Kunihiko Sadakane:
"Reducing the space requirement of LZ-index", Proc. Combinatorial Pattern Matching, LNCS 4009, pp. 307–318, Jul. 2006.
概要: The LZ-index is a *compressed full-text self-index* able to represent a text $T_{1...u}$, over an alphabet of size σ and with k-th order empirical entropy $H_k(T)$, using $4uH_k(T) + o(u \log \sigma)$ bits for any $k = o(\log_\sigma u)$. It can report all the *occ* occurrences of a pattern $P_{1...m}$ in T in $O(m^3 \log \sigma + (m + occ) \log u)$ worst case time. This is the only existing data structure of size $O(uH_k(T))$ able of spending $O(\log u)$ time per occurrence reported. Its main drawback is the factor 4 in its space complexity, which makes it larger than other state-of-the-art alternatives. In this paper we present two different approaches to reduce the space requirement of LZ-index. In both cases we achieve $(2 + \epsilon)uH_k(T) + o(u \log \sigma)$ bits of space, for any constant $\epsilon > 0$, and we simultaneously improve the search time to $O(m^2 \log m + (m + occ) \log u)$. Both indexes support displaying any subtext of length ℓ in optimal $O(\ell / \log_\sigma u)$ time. In addition, we show how the space can be squeezed to $(1+\epsilon)uH_k(T) + o(u \log \sigma)$ to obtain a structure with $O(m^2)$ average search time for $m \geq 2 \log_\sigma u$.

16. Masashi Shiozaki, Hirotaka Ono, Kunihiko Sadakane, and Masafumi Yamashita:
"A Probabilistic Model of the DNA Conformational Change", Proc. DNA, LNCS 4287, pp. 274–285, Jun. 2006.
概要: Predicting the behavior of DNA molecules in vitro is one of the most fundamental issues on DNA computing, but is also known to be quite difficult. Shiozaki et al. proposed a probabilistic model that can simulate many features of biochemical experiments in terms of the reaction rate, although there are several differences between the biochemical experiments and the computational simulations on the model. In this paper, we extend the model to support base pairs construction among k DNA sequences, which plays an essential role in realizing branch migrations. The simulation results have much more similarities to the biochemical experiments results than ones on the previous model, which implies that the analysis of the model may give some insight about the reaction rate. Through the analysis, we conclude this paper by giving a guideline for designing DNA sequences that can quickly react.

17. Suguru Kawashimo, Hirotaka Ono, Kunihiko Sadakane, and Masafumi Yamashita:
"DNA Sequence Design by Dynamic Neighborhood Searches", Proc. DNA, LNCS 4287, pp. 157–171, Jun. 2006.
概要: We propose a local-search based algorithm to design DNA sequence sets that satisfy several combinatorial constraints about hamming-distance criteria. To deal with the constraints in the local search, we adopt elaborate (and dynamic) neighborhood search frameworks called the Variable Neighborhood Search (VNS) and the Variable Depth Search (VDS). Although our algorithm can deal with many types of hamming distance-based constraints and is easy to extend (e.g., also applicable for other

constraints), in computational experiments, we succeeded in generating better sequence sets than the ones generated by exiting methods of more specified constraints.

18. Yuichi Kurumida, Tsukasa Ogata, Hirotaka Ono, Kunihiko Sadakane, and Masafumi Yamashita:
"A generic search strategy for large-scale real-world networks", Proc. of the 1st international conference on Scalable information systems (INFOSCALE), ACM International Conference Proceeding Series; Vol. 152, May 2006.
概要: We consider the following situation for a given large-scale network: Starting from an initial node we move to its neighbor node and repeat that until reaching a target node. How fast can we do this without any global topological information? This problem is considered "searching networks", and several approaches have been proposed. In this paper, we present a general framework of search strategies, under which all of these existing approaches can be formalized. Our framework characterizes random search strategies by the following three parameters: memory for previously-visited nodes, look-ahead property and transition probability. Through computational simulations for large-scale networks with small-worldness and scale-freeness, we investigate the relationship between the effect of parameters of the strategies and the coefficients of networks such as the clustering coefficient. The comparison result provides a guideline to obtain good parameters of the strategies according to the diameter and the clustering coefficients of networks.

19. Yuichi Asahiro, Jesper Jansson, Eiji Miyano, Hirotaka Ono, and Kouhei Zenmyo:
"Approximation Algorithms for the Graph Orientation Minimizing the Maximum Weighted Outdegree", Proc. AAIM, LNCS 4508, 167–177, Jun. 2007.
概要: Given an undirected graph $G = (V, E)$ and a weight function $w : E \to \mathbb{Z}^+$, we consider the problem of orienting all edges in E so that the maximum weighted outdegree among all vertices is minimized. In this paper (1) we prove that the problem is strongly NP-hard if all edge weights belong to the set $\{1, k\}$, where k is any integer greater than or equal to 2, and that there exists no pseudo-polynomial time approximation algorithm for this problem whose approximation ratio is smaller than $(1 + 1/k)$ unless P=NP; (2) we present a polynomial time algorithm that approximates the general version of the problem within a factor of $(2 - 1/k)$, where k is the maximum weight of an edge in G; (3) we show how to approximate the special case in which all edge weights belong to $\{1, k\}$ within a factor of $3/2$ for $k = 2$ (note that this matches the inapproximability bound above), and $(2 - 2/(k + 1))$ for any $k \geq 3$, respectively, in polynomial time.

20. Kazuo Iwama, Eiji Miyano, and Hirotaka Ono:
"Drawing Borders Efficiently", Proc. FUN, LNCS 4475, 213–226, Jun. 2007.
概要: A spreadsheet, especially MS Excel, is probably one of the most popular software applications for personal-computer users and gives us convenient and user-friendly tools for drawing tables. Using spreadsheets, we often wish to draw several vertical and horizontal black lines on selective gridlines to enhance the readability of our spreadsheet. Such situations we frequently encounter are formulated as the Border Drawing Problem (BDP). Given a layout of black line segments, we study how to draw it efficiently from an algorithmic view point, by using a set of border styles and investigate its complexity. (i) We first

define a formal model based on MS Excel, under which the drawability and the efficiency of border styles are discussed, and then (ii) show that unfortunately the problem is $\mathcal{NP}$-hard for the set of the Excel border styles and for any reasonable subset of the styles. Moreover, in order to provide potentially more efficient drawing, (iii) we propose a new compact set of border styles and show a necessary and sufficient condition of its drawability.

21. Yuichi Asahiro, Eiji Miyano, Toshihide Murata, and Hirotaka Ono:
"On Approximation of Bookmark Assignments", Proc. MFCS, LNCS 4708, 115–124, Aug. 2007.
概要: Consider a rooted directed acyclic graph $G = (V, E)$ with root r, representing a collection V of web pages connected via a set E of hyperlinks. Each node v is associated with the probability that a user wants to access the node v. The access cost is defined as the expected number of steps required to reach a node from the root r. A bookmark is an additional shortcut from r to a node of G, which may reduce the access cost. The bookmark assignment problem is to find a set of bookmarks that achieves the greatest improvement in the access cost. For the problem, the paper presents a polynomial time approximation algorithm with factor $(1-1/e)$, and shows that there exists no polynomial time approximation algorithm with a better constant factor than $(1 - 1/e)$ unless $\mathcal{NP} \subseteq \mathcal{DTIME}(N^{O(\log \log N)})$, where N is the size of the inputs.

22. Yuichi Asahiro, Eiji Miyano, Hirotaka Ono, and Kouhei Zenmyo:
"Graph Orientation Algorithms to Minimize the Maximum Outdegree", International Journal of Foundation of Computer Science, Vol. 18, No. 2, 197–215, Apr. 2007.
概要: This paper studies the problem of orienting all edges of a weighted graph such that the maximum weighted outdegree of vertices is minimized. This problem, which has applications in the guard arrangement for example, can be shown to be $\mathcal{NP}$-hard generally. In this paper we first give optimal orientation algorithms which run in polynomial time for the following special cases: (i) the input is an unweighted graph, and (ii) the input graph is a tree. Then, by using those algorithms as subprocedures, we provide a simple, combinatorial, $\min\{\frac{w_{max}}{w_{min}}, (2-\varepsilon)\}$-approximation algorithm for the general case, where w_{max} and w_{min} are the maximum and the minimum weights of edges, respectively, and ε is some small positive real number that depends on the input.

23. Jesper Larsson and Kunihiko Sadakane:
"Faster Suffix Sorting", Theoretical Computer Science, Vol. 387, Issue 3, 258–272, Nov. 2007.
概要: We propose a fast and memory-efficient algorithm for lexicographically sorting the suffixes of a string, a problem that has important applications in data compression as well as string matching. Our algorithm eliminates much of the overhead of previous specialized approaches while maintaining their robustness for degenerate inputs. For input size n, our algorithm operates in only two integer arrays of size n, and has worst-case time complexity $\mathrm{O}(n \log n)$. We demonstrate experimentally that our algorithm has stable performance compared with other approaches.

24. Kunihiko Sadakane:
"Compressed Suffix Trees with Full Functionality", Theory of Computing Systems, Vol. 41, No. 4, 589–607, Dec. 2007.
概要: We introduce new data structures for

compressed suffix trees whose size are linear in the text size. The size is measured in bits; thus they occupy only $O(n \log |\mathcal{A}|)$ bits for a text of length n on an alphabet $\mathcal{A}$. This is a remarkable improvement on current suffix trees which require $O(n \log n)$ bits. Though some components of suffix trees have been compressed, there is no linear-size data structure for suffix trees with full functionality such as computing suffix links, string-depths and lowest common ancestors. The data structure proposed in this paper is the first one that has linear size and supports all operations efficiently. Any algorithm running on a suffix tree can also be executed on our compressed suffix trees with a slight slowdown of a factor of polylog(n).

25. Wing-Kai Hon, Tak-Wah Lam, Kunihiko Sadakane, Wing-Kin Sung, Siu-Ming Yiu:
"A Space and Time Efficient Algorithm for Constructing Compressed Suffix Arrays", Algorithmica, Vol. 48, No. 1, 23–36, Jun. 2007.
概要: With the first human DNA being decoded into a sequence of about 2.8 billion characters, many biological research has been centered on analyzing this sequence. Theoretically speaking, it is now feasible to accommodate an index for human DNA in the main memory so that any pattern can be located efficiently. This is due to the recent breakthrough on compressed suffix arrays, which reduces the space requirement from $O(n \log n)$ bits to $O(n)$ bits for indexing a text of n characters. However, constructing compressed suffix arrays is still not an easy task because we still have to compute suffix arrays first and need a working memory of $O(nlogn)$ bits (i.e., more than 13 Gigabytes for human DNA). This paper initiates the study of constructing compressed suffix arrays directly from the text. The main contribution is a construction algorithm that uses only $O(n)$ bits of working memory, and the time complexity is $O(nlogn)$. Our construction algorithm is also time and space efficient for texts with large alphabets such as Chinese or Japanese. Precisely, when the alphabet size is $|\Sigma|$, the working space becomes $O(n(H_0 + 1))$ bits, where H_0 denotes the order-0 entropy of the text and it is at most $\log |\Sigma|$; for the time complexity, it remains $O(nlogn)$ which is independent of $|\Sigma|$.

26. Jesper Jansson, Kunihiko Sadakane, and Wing-Kin Sung:
"Compressed Dynamic Tries with Applications to LZ-Compression in Sublinear Time and Space", Proc. FSTTCS, LNCS 4855, 424–435, Dec. 2007.
概要: The *dynamic trie* is a fundamental data structure which finds applications in many areas. This paper proposes a compressed version of the dynamic trie data structure. Our data-structure is not only space efficient, it also allows pattern searching in $o(|P|)$ time and leaf insertion/deletion in $o(\log n)$ time, where $|P|$ is the length of the pattern and n is the size of the trie. To demonstrate the usefulness of the new data structure, we apply it to the LZ-compression problem. For a string S of length s over an alphabet $\mathcal{A}$ of size σ, the previously best known algorithms for computing the Ziv-Lempel encoding of S either run in: (1) $O(s)$ time and $O(s \log s)$ bits working space; or (2) $O(s\sigma)$ time and $O(sH_k + s \log \sigma / \log_\sigma s)$ bits working space, where H_k is the k-order entropy of the text. No previous algorithm runs in sublinear time. Our new data structure implies a LZ-compression algorithm which runs in sublinear time and uses optimal working space. More precisely, the LZ-compression algorithm uses $O(s(\log \sigma + \log \log_\sigma s)/ \log_\sigma s)$ bits working space and runs in $O(s(\log \log s)^2/(\log_\sigma s \log \log \log s))$

worst-case time, which is sublinear when $\sigma = 2^{o(\log s \frac{\log\log\log s}{(\log\log s)^2})}$.

27. Kazuya Maemura, Jesper Jansson, Hirotaka Ono, Kunihiko Sadakane, and Masafumi Yamashita:
"Approximation Algorithms for Constructing Evolutionary Trees from Rooted Triplets", Proc. WAAC, Aug. 2007.
概要: We study the evolutionary tree construction from rooted triplets from the viewpoint of approximation algorithms. An evolutionary tree is a rooted tree structure that represents the evolutionary interrelationship among various species in which species are represented by leaves. A triplet is a small evolutionary tree which consists of three leaves. Given a set S of species, and a set T of triplets whose leaves are from S, we construct a tree preserving (we say "satisfying") the evolutional divergence structures in T. It is shown that the problem of determining whether there exits a tree satisfying all of the triplets in T is polynomially solvable, while finding a tree that maximizes the number of satisfied triplets in T is NP-hard. For this maximization problem, Wu proposed simple bottom-up heuristics called Algorithm BPMF. In this paper, we study the performance of BPMF-type algorithms from both theoretical and simulation-viewpoints.

28. Yoshiaki Nonaka, Hirotaka Ono, Kunihiko Sadakane, and Masafumi Yamashita:
"Speeding up random walks on finite graphs", Proc. WAAC, Aug. 2007.
概要: A random walk on a finite undirected graph $G = (V, E)$ is a tour of a token located at a vertex which transits its adjacent vertices at random. It is known that both of the hitting and cover times of a (standard) random walk are bounded by $O(|V|^3)$, in which the token randomly chooses an adjacent vertex to visit with a uniform probability. In this paper, we design fast random walks by adopting different transition probabilities from the one of the standard random walk. We show that there exists a graph class having a linear (i.e., $O(|V|)$ time) hitting / cover time random walks, and give its characterization based on the graph decomposition of Hamiltonian components. On the other hand, we also show that it is impossible to speed up the hitting / cover times of random walks on trees into linear; any random walks on trees require $\Omega(|V| \log |V|)$ time of the cover time.

研究会等

1. 定兼 邦彦:
"圧縮全文索引構築アルゴリズムの実験的評価", コンピュテーション研究会, COMP2004-50, 47–54, 2004 年 10 月.
概要: 圧縮全文索引は文字列に対する索引であり任意のパタンを高速に検索できる．そのサイズは一般に元の文字列よりも小さくなるが，索引の作成時には大量のスペースが必要であった．本稿では近年提案された省スペースな索引構築アルゴリズム 3 つを実装し，実行速度，必要メモリに関する実験を行う．

2. 伊川洋平, 定兼邦彦:
"ホットリンク解析によるサイト内検索エンジンのランキング改善手法 大規模な Web サイトへの適用と考察", データ工学ワークショップ, 1C-o2, 2005 年 3 月.
概要: Web 検索エンジンの利便性を向上させる手段として，ハイパーリンクを解析し，各 Web ページの重要度に応じてスコアを割り当てるスコアリング技術が重要視されている．WWW 検索エンジンのためのスコアリング手法は広く研究されているが，サイト内検索エンジンのためのスコアリング手法は未だ確立しておらず，Web の大きな特徴であるリンク情報を活用できていないのが現状である．この点に着目して提案された，ホットリンクを用いたスコアリング手法は，ユーザーが特

定のコンテンツへ直接ジャンプできるように設定するホットリンクを分析することで，重要なコンテンツページに高スコアを割当て，サイト内検索エンジンのランキングを改善する手法である．本手法は，これまで小規模な Web サイトにおいて有効性が検証されているが，大規模な Web サイトについては充分検証が行われていなかった．本論文では，本手法が大規模な Web サイト対しても，重要なコンテンツページに高スコアを割当てることを実験により確認し，サイト内検索エンジンにおいて有用なスコアリング手法であることを検証する．

3. Hirotaka Ono, Sung-Hoon Park, Masafumi Yamashita:
"Failure Detectors for the Leader Election with Bounded Faulty Processes", 電子情報通信学会 COMP 研究会, COMP2005-55, 43–46, 2005 年 12 月.
概要: Determining the "weakest" failure detectors is a central topic in asynchronous fault-tolerant distributed system, and indeed the weakest failure detectors have been proposed for several fundamental problems such as Consensus, Non-Blocking Atomic Commit, and Leader Election. We consider failure detectors to solve the leader election problem with f faulty processes, under the assumption that future never affect the output of a failure detector. Sabel et. al. showed the weakest failure detector for the leader election is $\mathcal{P}$, perfect failure detector, with any number of faulty processes under some restricted conditions, and Delporte-Gallet et.al. showed the result holds under more realistic constraints. In this paper, we propose a new failure detector class $\mathcal{M}$ to solve the leader election with less than $\lceil n/2 \rceil$ faulty processes, and show that $\mathcal{M}$ is strictly weaker than $\mathcal{P}$. That is, there is a hardness gap of the leader election with respect to the number of faulty processes.

4. 原田 雄太, 小野 廣隆, 定兼 邦彦, 山下 雅史:
"負荷分散セミマッチングにおける最適性について", コンピュテーション研究会, vol. 106, no. 29, pp. 1–8, 2006 年 4 月.
概要: 本研究で扱う問題は 2 部グラフにおけるセミマッチング問題である．セミマッチングとは，2 部グラフ $G = (U \cup V, E)$ において各 U の頂点が 1 つの V の頂点と対を成す枝の集合である．これまで，各 V の頂点の次数が最も均等化されるようなセミマッチングを求める問題 (負荷分散セミマッチング問題) の研究が行われている．それに対し，本研究では重み付き 2 部グラフにおける最小重み負荷分散セミマッチング問題を定式化し，アルゴリズムを提案する．

5. 前村 一哉, 小野 廣隆, 定兼 邦彦, 山下 雅史:
"隠れマルコフモデルを用いた DNA 配列設計", コンピュテーション研究会, vol. 106, no. 63, pp. 39–46, 2006 年 5 月.
概要: DNA コンピューティングとは，DNA 同士の反応過程を計算として見なした新しい計算パラダイムである．DNA コンピューティングでは，計算に使用する DNA 分子の塩基配列設計することが重要な研究テーマのひとつとなっている．DNA 分子が意図したように反応するには，様々な制約をできるだけ満たす配列を準備する必要がある．このため従来様々な塩基配列の設計手法が研究されてきたが，本研究では隠れマルコフモデルを用いた配列設計を提案する．隠れマルコフモデルはマルコフ過程を利用した確率モデルである．本論文では，試験的な配列設計として行った，DNA のもつ最小自由エネルギーが小さい配列の設計の実験と結果について述べる．

6. 川下 優, 小野 廣隆, 定兼 邦彦, 山下 雅史:
"動的近傍操作を用いた DNA 塩基配列設計", コンピュテーション研究会, vol. 106, no. 63, pp. 47–54, 2006 年 5 月.
概要: 近年，DNA 塩基配列集合を利用したナノコンピューティング・ナノテクノロジーが注目されている．これらの技術に用いられる塩基配列集合は，利用目的に応じた制約を満たす必要がある．いくつかの制約は組合せ

的であるので，本論文では塩基配列集合問題を組合せ最適化問題と捉える．さらに，他の制約より組合せ的なオーバーラップ指標に着目し，局所探索法に基づくアルゴリズムを提案する．このアルゴリズムでは組合せ的制約を局所探索法で充足させるために，可変近傍探索法・可変深度探索近傍法と呼ばれる動的近傍操作を採用する．計算機実験において，提案手法は同様の制約を満たす他の手法と同等以上の配列集合の設計に成功した．

7. 定兼 邦彦:
“単純な Rank/Select 辞書”, コンピュテーション研究会, vol. 106, no. 128, pp. 43–48, 2006 年 6 月.
概要: Rank/Select 辞書とは，順序集合 $S \in \{0, 1, ..., m-1\}$ において $rank(x, S) = |\{y \in S | y \leq x\}|$ と $select(i, S)$ (S の中で i 番目に小さい要素) を返すデータ構造である．これは文字列，木，グラフなどの圧縮データ構造の基本構成要素であり，多くのデータ構造が提案されている．しかしそれらは漸近的な性能のみを考えており，実データに対する性能は良くない．本研究では単純な Rank/Select 辞書を提案する．特徴としては，集合 S の要素数が小さい場合にデータ構造のサイズを縮小できることと，データ構造が単純であるために実装が容易で，実データに対する性能 (データ構造のサイズと問い合わせ時間) が良い．実験により，既存の実装よりも速度，サイズともに優れていることを示す．

8. Jesper Jansson, 定兼 邦彦, Wing-Kin Sung:
“順序木の新しい表現法”, コンピュテーション研究会, vol. 106, no. 258, pp. 31–37, 2006 年 9 月.
概要: 順序木を表現する簡潔データ構造として有名なものは 2 つ存在する．BP (balanced parenthesis) [Munro, Raman 2001] と DFUDS (depth first unary degree sequence) [Benoit et al. 2005] である．これらは n ノードの木を $2n + o(n)$ ビットで表現するものであり，この大きさは情報理論的下界と一致する．これらのデータ構造の上では多くの基本的演算 (親, 最初の子, 次の弟) への移動，子孫の数など) を word RAM モデル上で定数時間で行える．しかし知られている基本的演算の全てを定数時間で行えるデータ構造は知られていない．BP では i 番目の子を求めることができず，DFUDS では *lca* (lowest common ancestor) を求めることができない．本論文は，BP または DFUDS で実行できる基本的操作の全てを定数時間で実行可能な新しい順序木の表現法を提案する．このデータ構造のサイズは $2n$ ビットより小さく，木のノードの次数の分布から定義されるエントロピーまで圧縮できる．その結果，全ての内部ノードがちょうど 2 つの子を持つような木の場合，サイズは $n + o(n)$ まで圧縮される．

学会大会等

1. 後藤隆元, 小野廣隆, 定兼邦彦, 山下雅史:
“文書データベースへの効率的な索引付けとその更新に関する研究”, 火の国情報シンポジウム, B-1-6, 2005 年 3 月.

2. 前村 一哉, 小野 廣隆, 定兼 邦彦, 山下 雅史:
“ボトムアップ手法を用いた系統樹構築の近似アルゴリズム”, 冬の LA シンポジウム, 2007 年 1 月.

3. 後藤 隆元, 小野 廣隆, 定兼 邦彦, 山下 雅史:
“部分文字列の高速復元に適した圧縮データ構造に関する研究”, 冬の LA シンポジウム, 2007 年 1 月.

4. 川下 優, 小野 廣隆, 定兼 邦彦, 山下 雅史:
“局主探索法に基づく DNA 配列設計手法”, 冬の LA シンポジウム, 2007 年 1 月.

5. 佐薙 光樹, 小野 廣隆, 定兼 邦彦, 山下 雅史:
“センサーネットワークにおける省電力高信頼なデータ伝送”, 冬の LA シンポジウム, 2007 年 1 月.

6. 坂田 敦, 小野 廣隆, 定兼 邦彦, 山下 雅史:
“k-set Agreement を解く故障検知器”, 冬の LA シンポジウム, 2007 年 1 月.

7. 原田 雄太, 小野 廣隆, 定兼 邦彦, 山下 雅史:
“負荷分散枝被覆問題に対する最適性とアル

ゴリズム”, 冬の LA シンポジウム, 2007 年 1 月.

8. 原田 雄太, 小野 廣隆, 定兼 邦彦, 山下 雅史: “負荷分散枝被覆問題に対する最適性とアルゴリズム”, 冬の LA シンポジウム, 2007 年 1 月.

9. 深見 浩和, 小野 廣隆, 定兼 邦彦, 山下 雅史: “境界上を移動可能なロボット 2 台による多角形探索”, 冬の LA シンポジウム, 2007 年 1 月.

10. 原田 雄太, 小野 廣隆, 定兼 邦彦, 山下 雅史: “負荷分散枝被覆問題とその解法”, 夏の LA シンポジウム, 2006 年 8 月.

11. 坂田 敦, 小野 廣隆, 定兼 邦彦, 山下 雅史: “k-set Agreement を解く故障検知器”, 夏の LA シンポジウム, 2006 年 8 月.

12. 来見田 裕一, 小野 廣隆, 定兼 邦彦, 山下 雅史: “スケールフリーネットワークにおける次数情報を用いた探索手法”, 夏の LA シンポジウム, 2006 年 8 月.

13. 深見 浩和, 小野 廣隆, 定兼 邦彦, 山下 雅史: “辺上を移動するロボット 2 台による多角形探索”, 夏の LA シンポジウム, 2007 年 7 月.

14. 野中 良哲, 小野 廣隆, 定兼 邦彦, 山下 雅史: “グラフ上のランダムウォーク高速化とその限界”, 夏の LA シンポジウム, 2007 年 7 月.

15. 原田 雄太, 小野 廣隆, 定兼 邦彦, 山下 雅史: “負荷分散枝被覆問題に対する最適性とアルゴリズム”, 夏の LA シンポジウム, 2007 年 7 月.

16. 川下 優, 小野 廣隆, 定兼 邦彦, 山下 雅史: “局所探索法による熱力学的 DNA 配列設計の改良”, 冬の LA シンポジウム, 2008 年 1 月.

17. 原田 雄太, 小野 廣隆, 定兼 邦彦, 山下 雅史: “重み付きグラフ上の枝被覆に対する次数均等化と重み最小化”, 冬の LA シンポジウム, 2008 年 1 月.

18. 野中 良哲, 小野 廣隆, 定兼 邦彦, 山下 雅史: “有限グラフ上の高速ランダムウォーク”, 冬の LA シンポジウム, 2008 年 1 月.

19. 来見田 裕一, 小野 廣隆, 定兼 邦彦, 山下 雅史: “局所的な次数情報を用いた無向グラフの探索”, 冬の LA シンポジウム, 2008 年 1 月.

20. 前村 一哉, 小野 廣隆, 定兼 邦彦, 山下 雅史: “3 点系統樹を入力とした系統樹構築の近似アルゴリズムの近似比とその解析”, 冬の LA シンポジウム, 2008 年 1 月.

21. 安藤 映, 小野 廣隆, 定兼 邦彦, 山下 雅史: “指数分布に従う枝重みをもつ有向非巡回グラフにおける最長路長さの分布関数の解析的な計算に関する考察”, 冬の LA シンポジウム, 2008 年 1 月.

22. 深見 浩和, 小野 廣隆, 定兼 邦彦, 山下 雅史: “辺上を移動するロボット 1 台による最適な多角形探索”, 冬の LA シンポジウム, 2008 年 1 月.