

平成 28 年 5 月 27 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25350434

研究課題名(和文) 実問題への適応能力のあるネットワーク最適化アルゴリズムと構造解析手法の発展的展開

研究課題名(英文) Progressive development of network optimization algorithms and structure analytical methods with adaptation abilities for real world problems

研究代表者

繁野 麻衣子 (Shigeno, Maiko)

筑波大学・システム情報系・教授

研究者番号：40272687

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：ネットワーク最適化理論を軸に 응용と理論のジョイント形成を目指して、応用事例の解決と理論の発展的展開を行った。応用事例では、医療分野、公共交通分野、飲食サービスなどでの複数の問題に対して解決法を示し、最適化技法導入の可能性を提示した。また、評価方法の検討として、ランキング手法の比較やグラフ上の情報拡散ゲームのモデルによる相違、ポピュラーマッチングの拡張を検討した。理論面では、通信ネットワーク上の最適化問題、グラフ上のグループテストのテスト法の構築、最速流問題に対する高速アルゴリズムの開発などを行った。

研究成果の概要(英文)：In order to construct a strong joint between application and theory around network optimization, we solved applications in real world problems and developed optimization theory progressively. In applications, we solved several problems on medical field, public transportation field, and restaurant service field. Our research showed possibility of the optimization technique on these applications. As investigating evaluation methods, we compared ranking techniques and researched information diffusion games on graphs. In addition, we discussed an extension of popular matching. In theoretical side, we developed algorithms for communication network optimization, constructed testing methods for group testing on graphs, and proposed a faster strongly polynomial time algorithm for a quickest flow problem.

研究分野：組合せ最適化

キーワード：ネットワーク最適化 モデリング アルゴリズム 最適化理論

### 1. 研究開始当初の背景

社会ネットワークや web ネットワークなど、対象とする個体間の繋がりが重要となる社会システムに対して、その構造を解析するネットワーク分析が注目され、社会科学、情報科学、情報工学などの分野で広く研究されている。

また、効率的なネットワークの設計や資源活用のためには、ネットワークの構造を解析するだけでなく、ネットワーク最適化理論も重要となる。ネットワーク最適化は整然とした理論の上に効率的なアルゴリズムが開発されており、理論的に興味深いのみでなく、多くの応用例も持つ。ネットワーク最適化とネットワーク構造解析を互に関連させることにより、ネットワークとして表現されている社会システムに対しては、ネットワーク理論が応用され、有効に活用されてきている。

しかし、ネットワーク理論はより広範な応用力を備えていると考える。つまり、ネットワーク最適化アルゴリズムや構造解析手法は、ネットワークとして表現されていない社会システムに対しても活用されるように、応用の視点を主軸に実践的に展開すべきといえる。

### 2. 研究の目的

本研究では、広く社会システムの問題に適応する能力をもった頑強なネットワーク理論の構築を目的とする。最適化技法は実社会での活用と結びついて研究の意義が生まれる一方で、理論と応用の融合が希薄であることも指摘されている。そこで、理論と応用の両面から発展的にネットワーク理論と構造解析を展開し、理論研究の社会への還元を築くことを目指す。そのために、以下の3点からアプローチを行う。

- (1) 実社会の問題への応用範囲の拡張を目指し、実例を収集してその問題解決の過程からネットワーク最適化アルゴリズムとの関連性を精査する。
- (2) 実問題をモデル化する際に解の評価方法が問題となる。構成員が合理的と納得できるような指標の作成をゲーム理論的観点から検討する。
- (3) 応用と理論を結びつける体系的なモデリングの構築を目指す。(1)の結果を利用した応用面からのアプローチと(2)の結果を利用した理論面からのアプローチの両軸から応用と理論をつなぐ指針を検討する。

### 3. 研究の方法

応用からの視点を主軸にネットワーク理論の発展的展開を行うために、まず、応用事例の情報収集を行い、それらの問題整理をした上でモデル作成を行う。一方で、理論面からも、評価方法の検討や問題の要請にあったアルゴリズムの開発を行う。より拡張したモデルに応えるためにオンラインアルゴリ

ムなども検討しながら、ネットワーク最適化の基礎理論の再検討もを行い、応用能力のあるネットワークモデルとその解法の開発を行う。

(1) まず、応用からの視点に主軸をおき、ネットワーク上の問題であるかどうかにかかわらず、最適化が必要となされる応用事例を収集し、問題を整理するとともに、問題解決を行うことから、そこで必要となる手法やアプローチ方法などを比較する。さらに、対象とした事例に対するアルゴリズムを開発、実装することで、実際に問題解決を試み、現場へフィードバックする。このことから、より適応能力のあるモデル構築を目指す。

(2) 次に事例集から解の評価関数のあるべき姿を検討すると同時に、評価関数による解の相違や解の存在性など理論面からも整理する。特に、グラフ上のゲームやランキングに関する見解を探求する。ランキングにおいては、スマートフォンアプリケーションのデータを対象として、実際にランキングを行い比較検討する。また、ポピュラーマッチングのような既存研究の拡張可能性についても検討する。

(3) 応用事例と平行して、ネットワーク上の基礎的な問題に対する高速アルゴリズムの開発や構造解析を行う。このとき、応用事例から必要とされるアプローチを検討しながらアルゴリズム開発や構造解析の方向性を定める。

### 4. 研究成果

(1) 応用事例としては、医療分野における手術室スケジューリングと病床割当、公共交通におけるコミュニティバスルート作成とタクシーの乗務員スケジューリングや乗務員評価、飲食分野ではレストランの作業手順スケジューリングに関して、問題の明確化、データの整理から解決法の提示までおこなった。さらに、さまざまな分野で現れるスタッフスケジューリングを包括的に眺めることも行った。これらの個別の応用事例の研究から、問題を多段階に分解することで単純な問題とすることの重要性、オンライン情報の扱い、制約が厳しい時の列生成法の有用性などの知見が得られた。特に、医療分野や公共交通での最適化技法による解決の可能性を示すことができ、今後の応用研究への繋がりとなったことに加え、飲食店の作業スケジューリングに関しては熟練作業者と同程度のスケジュール作成に成功しており、今後の導入に向けての展開が期待されている。このことから、最適化技法の実社会での活用へのジョイント形成に貢献できた。

(2) 解の評価方法としては、スマートフォンアプリケーションに対して、アプリケーションの所持非所持の時系列の変化に着目してランキング手法を提案し、既存のランキングと比較することでその特徴を把握した。また、グラフ上で情報が拡散するゲームとして

情報拡散ゲームと離散ポロノイゲームを対象として、均衡解の存在性の差異を検討し、モデルによる違いを把握した。割当の一つの評価であるポピュラーマッチングに対しては、キャンパス内の実問題においてポピュラーマッチングが存在しないときの解決方法を示した。

(3) アルゴリズム開発においては、ネットワーク構造を持つ複数の問題に対して個別に問題の特徴を活かして研究を進めた。

まず、通信ネットワークを対象として、光通信ネットワークにできるだけ要求を収容する場合に、どこまで収容できるか、オンラインで収容できるときと、最適解との差を厳密に求めた。解くことが非常に困難な問題ではあるが、切除平面法を利用することでグラフの形状によっては高速に解けることがわかった。また、仮想計算機のマイグレーション方法についても、厳密解とヒューリスティック解の比較を行い、ヒューリスティック解でも十分な性能が得られることを示した。光通信ネットワークへの要求の収容問題に対しては、問題の分割の仕方を変えるなどより高速化を測ることや消費電力を考慮することが今後の課題である。

次に、グラフ上のグループテスト問題では、前のグループテストの結果を利用しない非適応型のテストにおいて、テストするリンクが連結部分グラフをなすという条件のもとでテスト回数が最小となるテスト方法を構築した。与えられたグラフが完全グラフのときには、最適なテスト回数でテストが構築できることを示した。また、格子グラフにおいてもほぼ最適な回数でテストが構築できることを示した。ただし、格子グラフに対しては、格子サイズによる細かな例外処理を行う必要があり、これらの解決が今後の課題となる。

代表的なネットワーク最適化の一つである動的ネットワークフローに対しては、与えられたフローを最短時間で流す最速流問題に対して、高速な強多項式時間アルゴリズムを提案した。コストスケール法に基づき、最小費用流問題に対する強多項式時間アルゴリズムの拡張に成功し、最速流問題に対する現在もっとも良い多項式時間計算量を示すことができた。

ネットワークの構造解析としては、長さ6の閉路を含まず、かつ任意のリンクを加えると長さ6の閉路が生じるような飽和グラフの特徴付けを与えた。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計11件)

Yosuke Watanabe, Kiyo Ishii, Toshiki Sato, Atsuko Takefusa, Tomohiro Kudoh, Hidemoto Nakada, Maiko Shigeno, Akiko Yoshise, Routing and Wavelength/sub-wavelength path

assignment to maximizing accommodated traffic demands on optical networks, International Symposium on Scheduling, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 10, 査読有, 2016, 掲載確定.

Song Luo, Maiko Shigeno, Wenbo Ma, Ranking smartphone apps based on users' behavior records, Serviceology for Designing the Future, 査読有, 2016, 発行確定.

Mingchao Zhang, Song Luo, Maiko Shigeno, On the Number of Edges in a Minimum C6-Saturated Graph, Graphs and Combinatorics, 31, 査読有, 2015, 1085-1106,

DOI: 10.1007/s00373-014-1422-4.

Hikoe Enomoto, Masahiro Hachimori, Shun Nakamura, Maiko Shigeno, Yuya Tanaka, and Masaki Tsunami, Pure-strategy Nash equilibria on competitive diffusion games, Discussion Paper Series, 1333, 査読無, 2015, 1-27.

Song Luo, Yuji Matsuura, Ying Miao, Maiko Shigeno, Non-adaptive group testing on complete graphs with connectivity, Proceedings of The 9<sup>th</sup> Hungarian-Japanese Symposium on Discrete Mathematics and Its Applications, 査読有, 2015, 221-224. Y. Izunaga, K. Sato, K. Tatsumi and Y. Yamamoto, Row and column generation algorithms for minimum margin maximization of ranking problems, Journal of the Operations Research Society of Japan, 58, 査読有, 2015, 394-409.

徳永拓真, 田中勇真, 小林隆文, 沓水佑樹, 池上敦子, 非正社員を主力とするスタッフスケジューリングにおけるモデル化と支援システムの構築, 情報処理学会論文誌:数理モデル化と応用, 8, 査読有, 2015, 57-65.

繁野麻衣子, 松岡博, 手術室のスケジューリング, オペレーションズ・リサーチ, 58, 査読無, 2013, 628-633.

鵜飼孝盛, 吉瀬章子, 病床自動割当システムの作成, オペレーションズ・リサーチ, 58, 査読無, 2013, 634-640.

Yutaro Ikeda, Ayumi Igarashi and Maiko Shigeno, Applications of popular matchings on campus, Proceedings of Proceedings of International Symposium on Scheduling, 査読有, 2013, 86-90.

Satoshi Takahashi, Atsuko Takefusa, Maiko Shigeno, Hidemoto Nakada, Tomohiro Kudoh, Akiko Yoshise, Power efficient virtual machine packing for

green datacenter, International Journal of Next-Generation Computing, 4, 査読有, 2013, 162-181.

〔学会発表〕(計 12 件)

中村俊, 坪井哲也, 長谷川大輔, 石川浩司, 木村恵介, 田中未来, 孫傲雪, 繁野麻衣子, ファミリーレストランにおける料理提供タイミングの改善, サービス学会第 4 回国内大会, 2016.3.28-29, 神戸大学(兵庫県神戸市)

中村俊, 坪井哲也, 長谷川大輔, 石川浩司, 木村恵介, 田中未来, 繁野麻衣子, ファミリーレストランの調理作業手順のモデル構築, スケジューリングシンポジウム 2015, 2015.9.26-27, 青山学院大学(東京都渋谷区)

佐佐将秀, 繁野麻衣子, 最速流問題に対する消去-タイト法, 日本オペレーションズ・リサーチ学会秋季研究発表会, 2015.9.10-11, 九州工業大学(福岡県北九州市)

Yosuke Watanabe, Kiyoo Ishii, Toshiki Sato, Atsuko Takefusa, Tomohiro Kudoh, Hidenoto Nakada, Maiko Shigeno, Akiko Yoshise, Routing and Wavelength/sub-wavelength path assignment to maximizing accommodated traffic demands on optical networks, International Symposium on Scheduling, 2015.7.4-6, 神戸産業振興センター(兵庫県神戸市)

Song Luo, Yuji Matsuura, Ying Miao, Maiko Shigeno, Non-adaptive group testing on complete graphs with connectivity, The 9<sup>th</sup> Hungarian-Japanese Symposium on Discrete Mathematics and Its Applications, 2015.6.2-5, 九州大学西新プラサ(福岡県福岡市)

羅松, 松浦悠司, 繆瑩, 繁野麻衣子, グラフ上の連結性によるグループテスト, 日本応用数理学会研究部会連合発表会, 2015.3.6-7, 明治大学(東京都中野区)

Song Luo, Maiko Shigeno, Wenbo Ma, Ranking smartphone apps based on users' behavior records, 2nd International Conference on Serviceology, 2014.9.14-16, 慶應義塾大学(神奈川県横浜市)

繁野麻衣子, タクシーサービス向上のための OR 手法の適用可能性, 第 7 回サービス・イノベーションへの数理的アプローチ研究部会, 2014.9.12, テクノスジャパン株式会社(東京都渋谷区)

Megumi Fujimoto, Song Luo, Dian Sari Mutalara, Maiko Shigeno, Miki Zago, Usage pattern analysis for Android applications: classification and measurement, サービス学会第 2 回国内

大会, 2014.4.28-29, はこだて未来大学(北海道函館市)

三木和貴, 宮城智一, 繁野麻衣子, コミュニティバスの OD 推定と運行ルート策定, 日本オペレーションズ・リサーチ学会春季研究発表会, 2014.3.6-7, 大阪大学(大阪府豊中市)

羅松, 繁野麻衣子, On the random k-set designs under experimental uncertainty, 日本応用数理学会年会, 2013.9.9-11, アクロス福岡(福岡県福岡市)

Yutaro Ikeda, Ayumi Igarashi and Maiko Shigeno, Applications of popular matchings on campus, Proceedings of International Symposium on Scheduling, 2013.7.18-20, 東京国際交流館(東京都晴海)

〔図書〕(計 1 件)

繁野麻衣子, 池上敦子, スタッフスケジューリング(サービスサイエンスとはじめ 第 6 章)筑波大学出版会, 2014, 177-210.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

繁野 麻衣子 (SHIGENO Maiko)  
筑波大学・システム情報系・教授  
研究者番号: 40272687

(2) 研究分担者

山本 芳嗣 (YAMAMOTO Yoshitsugu)  
筑波大学・システム情報系・教授  
研究者番号: 00119033

八森 正泰 (HACHIMORI Masahiro)  
筑波大学・システム情報系・准教授  
研究者番号: 00344862

吉瀬 章子 (YOSHISE Akiko)  
筑波大学・システム情報系・教授  
研究者番号: 50234472

池上 敦子 (IKEGAMI Atsuko)  
成蹊大学・理工学部・教授  
研究者番号: 90146936

高橋 里司 (TAKAHASHI Satoshi)  
電気通信大学・情報理工学研究所・助教  
研究者番号: 40709193