

平成 30 年 6 月 25 日現在

機関番号：12301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2017

課題番号：26730006

研究課題名(和文) 離散凸性を活用したネットワーク最適化手法とその分野横断的応用研究

研究課題名(英文) Network optimization based on discrete convexity, and its interdisciplinary research

研究代表者

永野 清仁 (Nagano, Kiyohito)

群馬大学・社会情報学部・准教授

研究者番号：20515176

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：多くの候補の中から最もよいものを見つける「最適化」の手法が、本研究の中心的な技術である。本研究では、ネットワークなどの離散構造を研究対象とする最適化手法を中心に扱い、特に「離散世界における凸最適化」に対応するといえる劣モジュラ最適化やその周辺の技術をベースにしたネットワーク最適化手法の理論的發展を目指し研究に取り組んだ。また、基礎理論に加えて、理論に基づいた高度なネットワーク最適化技術を、機械学習を含む人工知能関連分野等に应用することによって、現代社会における問題解決のための最適化理論の基礎技術の構築や効率のよいアルゴリズム設計に取り組んだ。

研究成果の概要(英文)：Optimization methods, which find good solutions from many candidates, are the core technologies of this research. In this research, we focused on optimization methods with respect to discrete structures such as networks. Especially, we aimed at theoretical developments of network optimization methods based on submodular optimization. Submodularity can be regarded as a discrete version of convexity. In addition to basic theory, we applied network optimization methods to problems in machine learning, artificial intelligence, and so on. In this way, we worked on building basic technologies for optimization theory for solving problems in modern society, and designed efficient network optimization algorithms.

研究分野：離散最適化

キーワード：ネットワーク最適化 劣モジュラ最適化 人工知能 機械学習 組合せ最適化

1. 研究開始当初の背景

人間関係やインターネット、道路網など、世の中の様々な現象は抽象的にネットワークとして扱うことができる。ネットワーク上での最適化は様々な分野において現れ、理論・応用の両面において重要な研究対象である。本研究における中心技術はネットワーク最適化、そして離散世界の凸性ともいえる劣モジュラ関数に関する最適化である。



図1 ネットワーク最適化

2000年頃の劣モジュラ関数最小化に関するブレイクスルーの一つのきっかけにし、劣モジュラ最適化の理論研究は2005年ごろから理論計算機科学の分野で活発になされ始め、その状況は近年でも継続している。また機械学習を含む人工知能関連分野では2007年ごろから凸最適化に代わりうる新たなデータ解析のアプローチとして人々の関心を集めている。ただ、劣モジュラ最適化の応用研究において、ネットワークに適用したアルゴリズムの理論、アルゴリズムの性能・高速化などについて十分に議論されていないことが多かった。さらに離散凸解析の理論や双劣モジュラ関数の理論についてはまだ十分な応用研究がなされていないという状況であった。

2. 研究の目的

多くの候補の中から最もよいものを見つけることを最適化とよぶ。本研究においてはとくに、ネットワークのような離散構造を研究対象としてきた。最適化研究において、最適解を効率的に見つける方法、アルゴリズムの設計が重要となる。我々は離散構造を扱う離散最適化手法として、特に「離散の凸最適化」といえる、劣モジュラ最適化やその拡張である離散凸解析などをベースにしたネットワーク最適化手法の理論的發展に取り組んだ。さらにこれと並行し、ネットワーク最適化を軸にした最適化手法を、機械学習などの人工知能関連分野などへ応用する分野横断的な応用研究に取り組んだ。

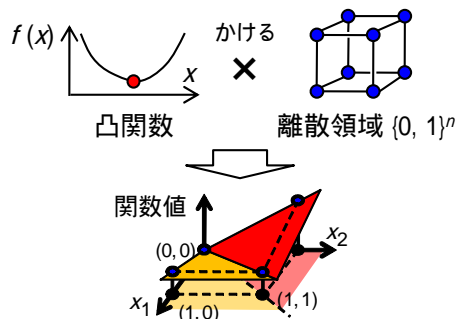


図2 離散凸性 = 劣モジュラ性

3. 研究の方法

本研究で中心となるのは離散凸性の概念である。連続的な対象を扱う連続最適化では、凸関数の最小化は非常に扱いやすい問題である。離散領域上の凸性と対応する概念として劣モジュラ関数がある。劣モジュラ性は n 次元 $0-1$ ベクトル全体上の凸性である意味で等価である (L. Lovasz, 1983年)。この性質は室田 (2003年) による離散凸解析の理論へと発展している。

離散凸最適化の理論においては、ネットワーク構造を含む様々な離散構造を統一的に扱うことが可能である。離散凸最適化の理論に基づいたネットワーク最適化技術の開発とその応用が本研究のテーマである。最適化理論の一番の特長はその汎用性であり、最適化を駆使した離散構造解析は、幅広い領域において有用な技術へ発展させることが可能となる。また、その汎用性ととも、問題の特殊性を利用することで、最適化アルゴリズムの高速化を試みることも現実の問題を扱う上では重要なテーマとなる。高速化のためには、ネットワークフローの技術などが重要な役割を果たす。

最適化理論研究で注意すべき点として、最適化問題には、解きやすい問題・解きにくい問題があることが挙げられる。例えば、ネットワークのノード集合 (点の集合) の2分割をする場合に、またがるエッジ (点と点を結ぶ線) の重み和を最小化する問題は解きやすい。しかし、一般のノード k 分割問題は「NP困難」とよばれるタイプの理論的には解きにくい問題となる。理論研究として、解きやすい問題については大規模なデータにも対処するためにさらなる高速化の研究に取り組み、また解きにくい問題については、何らかの形でその問題の難しさを克服する研究に取り組んでいくというのが妥当なアプローチとなるといえる。

本研究を進めていく上で、まず離散凸最適化理論 (劣モジュラ関数の理論、離散凸解析) の研究の深化と、大規模データへの適用を考慮したアルゴリズムの高速化/安定化に取り組むことが理論研究としては中心的であった。さらに離散凸性を用いたネットワーク最適化の応用のためには、我々が本研究以前に提案してきた機械学習関連分野の問題である、クラスタリング手法やネットワーク構造の解析手法のさらなる高速化などを課題として本研究に取り組んだ。さらに、これらの手法について通信分野などの新たな分野への応用を目指した。また理論研究として、不確実な状況下やデータがネットワーク上に分散している状況下での最適化は興味深い設定であり、離散凸性に基づいた最適化とその応用を本研究の課題の一つとした。また、離散凸解析や双劣モジュラ関数の理論のような、これまで応用が十分にされてこなかった理論の応用の可能性についても課題として検討してきた。

4. 研究成果

本研究で平成26年度に中心的に取り組んだテーマの一つは、無線資源割当問題である。複数の基地局と複数の端末がある状況で、基地局-端末間の割り当て方によってはシステム全体として負荷分散が達成されずに通信品質が非常に悪くなってしまふ。

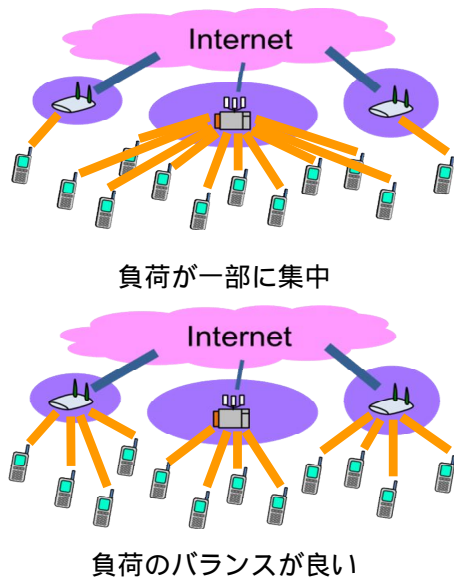
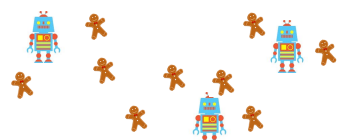


図3 無線通信における負荷分散の問題

このような問題解決のためにネットワークフローの技術を駆使した様々なアルゴリズムを提案した（その一部は長谷川幹雄氏らとの共著論文で発表されている）。具体的に言うと、すべての基地局の負荷のバランスを取るために、負荷の二乗和を目的関数とするようなモデルの最適化問題を設定し、さらにその最適化問題を、高速に解けるクラスの問題である最小費用流問題（minimum cost flow problem）としてとらえることで、十分大きいサイズの問題に対しても現実的な時間で解けるようなアルゴリズムを提案した。また機械学習やデータマイニングの分野における離散凸性に基づいたネットワーク最適化手法の応用研究についても取り組んだ。

平成27年度、本研究において中心的に取り組んだ内容は、劣モジユラ最適化技術を用いた機械学習の理論に関する書籍「劣モジユラ最適化と機械学習」（講談社 2015年12月、大阪大学の河原吉伸氏との共著）の執筆である。この書籍は、ネットワーク最適化を一般化した概念である劣モジユラ最適化について、その基礎理論やデータ科学の中心分野である機械学習に関する最先端の応用研究について扱った書籍である。機械学習を含む人工知能関連分野において、劣モジユラ最適化を中心的なトピックとした離散最適化分野の重要性は、国際的のみならず、国内においても広く認識されつつあるという状況になってきている。

平成28年度、本研究において中心的に取り組んだ内容は、人工知能分野のマルチエージェントシステムの基本問題であるマルチロボットルーティング問題に対して、最適化技術に基づく手法を提案することであった。マルチロボットルーティングは実社会における乗り合いタクシーの配車問題などと関連しており、社会的な重要性の高い問題といえる。



ロボットをどう動かすか？

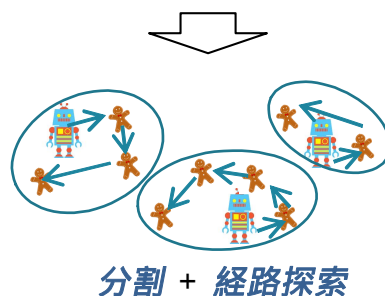


図4 マルチロボットルーティング

この問題に対するアプローチとして、本研究では並列計算による実際的な手法と、離散最適化理論に基づいたルーティング手法の両方を試みた。並列計算による実際的な手法に関しては人工知能関連分野の競争的な国際会議であるICAPSにおいて成果発表をすることができた。

平成29年度、本研究において中心的に取り組んだテーマは、劣モジユラ関数の一般化に対応する、劣加法的関数に関する最適化とその応用である。劣モジユラ関数でないような劣加法的関数にも基本的な関数がいくつも存在している。この劣加法的関数に関する最適化問題は応用として、人工知能分野のマルチロボットルーティング問題等を含む重要なクラスの問題であるといえる。劣加法的関数の最適化の理論的な扱いやすさ（扱いにくさ）の解析や、劣加法的関数の負荷分散問題に対するアルゴリズムの提案などの成果をまとめることができた。劣加法的関数の最適化は離散最適化理論においてこれまであまり扱われてこなかった問題であり、理論的側面のみならず人工知能分野などを中心とした応用面も含めて今後の広がりを期待できる研究対象といえる。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕(計 1 件)

Mikio Hasegawa, Hiroshi Hirai, Kiyohito Nagano, Hiroshi Harada, Kazuyuki Aihara, Optimization for Centralized and Decentralized Cognitive Radio Networks, Proceedings of the IEEE、査読有、Vol.102、pp.574 - 584
DOI: 10.1109/JPROC.2014.2306255

〔学会発表〕(計 2 件)

Akihiro Kishimoto, Kiyohito Nagano, Evaluation of Auction-Based Multi-Robot Routing by Parallel Simulation、Twenty-Sixth International Conference on Automated Planning and Scheduling (ICAPS 2016)、査読有、2016年6月、キングス・カレッジ・ロンドン、ロンドン、イギリス、プロシーディングス pp.495 - 503
<https://www.aaai.org/ocs/index.php/ICAPS/ICAPS16/paper/view/12850>

永野清仁、岸本章宏、劣加法的集合関数の負荷分散最適化、情報処理学会 第 164 回アルゴリズム研究会、査読無し、2017年9月、京都大学

〔図書〕(計 1 件)

河原吉伸、永野清仁、講談社、劣モジュール最適化と機械学習、2015年12月、184ページ

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

永野 清仁 (NAGANO, Kiyohito)

群馬大学・社会情報学部・准教授

研究者番号：20515176

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

()