

平成 30 年 6 月 19 日現在

機関番号：13904

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26330010

研究課題名(和文) 長大系列データ処理のためのアルゴリズム設計技法に関する研究

研究課題名(英文) A Study on Algorithm Designs for Processing Large Scale Sequential Data

研究代表者

藤戸 敏弘 (Fujito, Toshihiro)

豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：00271073

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：1. 次数制限除去問題・連結2辺支配集合問題・連結パス頂点被覆問題などのNP困難なグラフやネットワーク上での組合せ最適化問題に対し、新たに近似アルゴリズムを設計し、従来からの近似保証を改善した。
2. 匿名ポート番号ネットワーク上で定数ラウンド数内に動作する分散アルゴリズムを用いて、2辺支配集合問題等が高精度に近似可能であることを示した。
3. 任意辺に対する繰り返し攻撃からグラフを守り通すのに必要な最小守衛数を求める問題に対し、グラフが木である場合の結果を大幅に拡張するとともに、守衛が常に連結グラフを誘導する制約を付加した場合にも、木の場合の多項式時間性および一般グラフにおける2倍近似可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：1. Some NP-hard optimization problems on graphs and networks have been considered such as bounded degree deletion, connected 2-edge dominating set, and connected path vertex cover. A new algorithm is designed and an improved approximation guarantee is obtained for each of those problems considered.
2. A local algorithm is a deterministic distributed algorithm in an anonymous port-numbered network running in a constant number of synchronous rounds, and this study shows that 2-edge dominating set and 3-total vertex cover are approximable within 2 and 3, respectively, by local algorithms.
3. It is required in the eternal vertex cover problem to compute the minimum number of guards to be placed on vertices of a given graph G such that they can repel any sequence of attacks on edges in G . It is shown to be polynomial to compute the eternal vertex cover number when G is constructed by replacing edges of a tree by cliques (or by elementary bipartite graphs).

研究分野：計算機科学

キーワード：アルゴリズム 組合せ最適化 近似保証

1. 研究開始当初の背景

定数時間で有効な解計算を行うアルゴリズムは最近注目されている分野であり、高確率で高精度な解計算が可能であることを示すアルゴリズムが出現しつつある。一方、計算困難性のもと精度保証付きの解計算が求められる近似アルゴリズムは、その近似度を中心に古くから研究されてきたが、90年代に入り、画期的な PCP (確率的検証可能証明) 理論による近似度の下限証明技術や、半正定値計画法(SDP) に基づく設計法などが立て続けに発見され、最近も確率的最適化に応用を見出すなど、今日の隆盛に至っている。「将来の入力」という未知情報に対処することが求められるオンラインアルゴリズムでは、競合比解析を用いたオンラインモデルでのアルゴリズム理論を中心に開拓が推し進められ、乱択アルゴリズムや Yao の原理を利用する等の卓越した知見や優れた手法が獲得されている。より良い将来予測の実現を目指して最近出現したのが、過去のデータを学習するオンライン学習モデルや統計データに基づいた確率情報を利用する確率的最適化である。数理計画法では、線形計画における著名な単体法や内点法、凸計画における楕円体法、整数計画問題に対する汎用解法など、重要な理論的成果が数多く得られており、系統的アルゴリズム設計における有効性も、近似アルゴリズムをはじめ徐々に認識されつつある。

2. 研究の目的

本研究では、入力情報へのアクセス制限下で高品質解を高確率で計算するアルゴリズム理論の構築を目指し、期間内に以下のテーマを解決することを具体的目標とする。

- (1) 高精度計算可能な問題の構造解析。
- (2) 局所的アクセスとランダムサンプリング。
- (3) 数理計画法による系統的設計法。

3. 研究の方法

- (1) 高精度計算可能な問題の構造解析。
現在、入力データ規模に依存しないサイズ(つまり、固定ビット数)の入力情報だけで、高精度解を算出できることが知られている問題は、グラフの最小全域木、最大マッチング、最大カット、施設配置などであるが、そこで用いられる具体的方法は、局所探索法や貪欲法といった近似アルゴリズム設計での常套手段を基本骨格としている。勿論、これら骨格部分に下記 2. の部分入力情報の獲得手段をうまく組み合わせることで、初めてこれまでの通念を覆すような計算結果を得ているわけであるが、より詳細に観察すると、対象問題に対して良い近似アルゴリズムとなりうるものが、骨格アルゴリズムとして選ばれている。そこで、
 - i. 局所探索法や貪欲法が高精度近似

解法として機能する他の最適化問題に対する同様のアプローチの有効性

- ii. 近似アルゴリズムにおける他の汎用基本スキームである「線形計画緩和+ランダム丸め法」や「線形計画緩和+主双対法」の有効性について検証する。
- (2) 局所的アクセスとランダムサンプリング。
以下の二つの場合に分けて検討する。
- i. 局所入力情報への制限: インターネットのような大規模ネットワークにおいて、全サイトから情報収集することは(一部例外を除き)現実的ではなく、あるサイトから一定回数だけリンクを辿って得られる情報だけに制限される場合など、ローカルな情報しか使えない場合の計算手法について考察する。近似アルゴリズムやヒューリスティクスにおいても、局所探索法や貪欲法などでは局所的に設定された近傍内を探索することから、同手法の有効性について検証すべきと考える。ただし、通常の局所探索では、入力サイズに応じて近傍探索を繰り返すことができるのに対し、本研究の計算モデルでは、繰り返し回数を一定回数(もしくは、入力サイズの準線形関数)に制限した上で、同手法の有効性を考える必要がある。逆に、同手法の計算限界の方が(より容易に)明らかにできるかもしれない。
 - ii. サンプリング可能な入力情報: 局所部分情報に限定されず、入力全体から情報収集できる場合、ランダムにサンプリングすることが考えられる。ここで検討課題となるのが、どのような確率分布で入力情報をサンプリングするかである。最も単純なのは一様分布であるが、そのような分布でうまくいく対象問題は相当限定的になることも予想される。より重視すべきアプローチは、入力情報サンプリングと解計算を分離して考えるのではなく、解計算の途中経過とサンプリングの確率分布を連動させることで、より強力かつ有意な情報獲得を目指すことである。同アプローチの具体化を検討し、有効性を検証する。
- (3) 数理計画法による系統的設計法。
入力情報が部分的に時系列に沿って与えられるオンライン問題に対し、問題ごとには高性能(オンライン)アルゴリズムが開発されてはいるものの、未だ系統

的設計法なるものは知られていない。そこで、例えば入力情報が時系列にそって徐々に明らかになる（商品相場などの）環境においては、既知情報のみから（線形計画などで）解空間を記述し、新たな入力に応じて制約条件を付加することで解空間を修正していく、数理計画的アプローチを検討する。通常このような状況では、既知情報のみから（部分）解を決定する必要があるが、いかなる未知情報にも対処できるよう確率的決定法（丸め法等による）を使用するのが妥当であると考えられるので、その有効性について検証する。また問題（即ち解空間）によっては、部分問題の線形計画記述における変数の一部を最適値に固定しても、元の全体問題の最適性が失われないことが知られており、特にこの種の問題には有望なアプローチとなる可能性が高いと考える。

4. 研究成果

研究期間中に得られた主な研究成果は以下の通りである。

- (1) グラフの次数制限除去問題とは、グラフ G と次数制限 b が与えられ、 G から頂点集合 C を取り除くことで、残ったグラフ $G-C$ におけるどの頂点次数も b 以下となる、そのような C の中でコスト最小なものを計算する問題である。本研究では、
 - i. 同問題を、2-ポリマトロイド特性に関する頂点除去問題、さらには劣モジュラ集合被覆問題へ還元することで、 $2 \leq b \leq 5$ の範囲で従来を上回る近似保証が可能であることを示した。
 - ii. 同問題を有向グラフ上の問題へ拡張し、無向グラフの場合の近似保証がここでも成り立つとともに、有向グラフ特有の近似可能性 / 不可能性を示した。
- (2) グラフにおいて、任意の辺は自身と隣接辺すべてを支配する、という、2 辺支配集合問題とは、グラフ G 内のすべての辺を 2 回以上支配するような、最小コストの辺集合を求める問題である。一方、連結な G において、すべての辺を 1 回以上支配する連結な辺集合を求める問題を連結辺支配集合問題という。いずれの問題も 2 倍近似多項式時間アルゴリズムが知られていたが、本研究では、両問題を包含する、2 辺支配かつ連結な辺集合を求める連結 2 辺支配集合問題を扱った。その結果、最小 2 辺支配集合の高々 2 倍の大きさをもつ連結辺集合が常に存在し、効率よく計算できることを示した。
- (3) 匿名ポート番号ネットワーク上で定数（同期）ラウンド数内に動作する分散アルゴリズムをローカル・アルゴリズムと

いう。グラフ G の頂点被覆 C とは、任意の辺に接続する頂点を含む頂点集合をいうが、特に C により誘導される G のいずれの連結成分もが t 以上の大きさであるとき、 t -TVC という。本研究では、2 彩色可能グラフにおいて極大マッチングを計算するローカル・アルゴリズムを 2 回実行することで、2 辺支配集合問題は 2 倍近似可能、および 3-TVC は 3 倍近似可能であることを示した。

- (4) グラフの頂点被覆問題とは、入力グラフ $G=(V,E)$ に対し、 G のすべての辺を被覆する頂点集合の中で最小なものを計算する問題である。同問題には様々拡張・一般化が存在し、本研究ではその一つである恒久的頂点被覆問題を扱った。ここでは、攻撃側と防衛側による次のようなゲームを考える。防衛側は予め一定数の守衛を G の頂点上に配置しておき、攻撃側は G の任意の辺を攻撃する。辺 $e=\{u,v\}$ への攻撃に対し、 u もしくは v に守衛が配置されていれば、その守衛を動かし、 e を通過させることで、防衛側は e への攻撃に対処できるのに対し、そのような守衛の移動ができない場合、攻撃側の勝利によりゲームは終了する。一方、攻撃側による任意回の攻撃から常に G を守り続けられれば、防衛側の勝利となる。恒久的頂点被覆問題とは、入力グラフを防衛側が守り通すのに必要かつ最小な守衛数（恒久的頂点日複数）を求める問題をいう。本研究では、以下を示した：
 - i. 同問題は一般に NP 困難であるが、木などの初等的グラフに制限すると多項式時間であることが知られていた。本研究では、後者を一般化し、木の辺を初等的二部グラフ（もしくはクリーク）で置き換えてできるグラフにおいても多項式時間であることを示した。
 - ii. 頂点被覆が連結グラフを誘導するとき、それを連結頂点被覆というが、守衛の配置された頂点の集合が常に連結グラフを誘導するような恒久的頂点被覆を考え、これを恒久的連結頂点被覆問題と呼ぶ。本研究では、グラフが木の場合に恒久的連結頂点被覆数を導出し、一般グラフにおいては同問題が 2 倍近似可能であることを示した。

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 7 件)

T.Fujito, On approximability of connected path vertex cover, 15th Workshop on Approximation and Online Algorithms (WAOA

2017), 査読有, LNCS vol.10787, pp.17-25, 2018, DOI: 10.1007/978-3-319-89441-6_2

T.Fujito, K. Kimura, Y. Mizuno, Approximating partially bounded degree deletion on directed graphs, 12th International Conference and Workshop on Algorithms and Computation (WALCOM 2018), 査読有, LNCS vol.10755, pp.32-43, 2018, DOI: 10.1007/978-3-319-75172-6_4

T.Fujito, Approximating bounded degree deletion via matroid matching, 10th International Conference on Algorithms and Complexity (CIAC 2017), 査読有, LNCS vol.10236, pp.234-246, 2017, DOI: 10.1007/978-3-319-57586-5_20

H. Fujiwara, T. Kitano, T. Fujito, On the best possible competitive ratio for the multislope ski-rental problem, Journal of Combinatorial Optimization, 査読有, vol.31, issue 2, pp.463-490, 2016, DOI: 10.1007/s10878-014-9762-9

T. Fujito, T. Shimoda, On approximating (connected) 2-edge dominating set by a tree, 11th International Computer Science Symposium in Russia (CSR 2016), 査読有, LNCS vol.9691, pp.161-176, 2016, DOI: 10.1007/978-3-319-34171-2_12

T. Fujito, D. Suzuki, Fast and simple local algorithms for 2-edge dominating sets and 3-total vertex covers, 10th International Workshop on Algorithms and Computation (WALCOM 2016), 査読有, LNCS vol.9627, pp. 251-262, 2016, DOI: 10.1007/978-3-319-30139-6_20

H.Araki, T.Fujito, S.Inoue, On the eternal vertex cover numbers of generalized trees, IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 査読有, vol.E98A, issue 6, pp. 1153-1160, 2015, DOI: 10.1587/trans-fun.E98.A.1153

〔学会発表〕(計 5 件)

T. Fujito, Approximating Bounded Degree Deletion via Matroid Matching, 信学技報, 117(28(COMP2017-6)), pp.39-45, 2017

中村友哉, 藤戸敏弘, 恒久的連結頂点被覆問題について, 情報処理学会第 79 回全国大会講演論文集, 2017(1), pp.247-248, 2017

藤戸敏弘, 鈴木大智, Fast and Simple Local Algorithms for 2-Edge Dominating Sets and 3-Total Vertex Covers, 情報処理学会研究

報告, 2016-AL-157(7), pp.1-6, 2016

鈴木大智, 藤戸敏弘, 単純 2 辺支配集合問題の準ストリーミングアルゴリズム, 平成 26 年度電子情報通信学会東海支部卒業研究発表会, C3-4, 2015

下田知明, 藤戸敏弘, 連結 2 辺支配集合問題の近似アルゴリズム, 京都大学数理解析研究所講究録「計算理論とアルゴリズムの新潮流」, vol.1941, pp.6-16, 2015

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 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 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

藤戸 敏弘 (FUJITO, Toshihiro)
豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号 : 00271073

(2) 研究分担者

藤原 洋志 (FUJIWARA, Hiroshi)
信州大学・学術研究院工学系・准教授
研究者番号 : 80434893

(3) 連携研究者

()

研究者番号 :

(4) 研究協力者

()