

平成 21 年 5 月 20 日現在

研究種目：若手研究 (B)  
 研究期間：2006～2008  
 課題番号：18700031  
 研究課題名 (和文) 計算機実験に基づくネットワーク最適化問題に対する  
 実用的解法の開発  
 研究課題名 (英文) Development of Practical Algorithms for Network Optimization  
 Problems based on Computer Experiments  
 研究代表者  
 田岡 智志 (SATOSHI TAOKA)  
 広島大学・大学院工学研究科・助教  
 研究者番号：80274116

## 研究成果の概要：

本研究の目的は、ネットワーク最適化問題に含まれるさまざまな問題に対して実用面において必要とされている解法の開発である。高速に(つまり多項式時間で)解ける問題のクラスの発見と、その実用的解法の開発と検証を行った。また、NP 困難問題(解き難い問題)に対しては、総当りの(指数時間)解法の分散、並列処理などによる効率化とその検証、発見的解法の開発と検証を計算機実験に基づいて遂行した。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	2,100,000	0	2,100,000
2007 年度	600,000	0	600,000
2008 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	180,000	3,480,000

## 研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・ソフトウェア

キーワード：グラフ理論、ネット理論、NP 困難問題、計算機実験と評価、多項式時間解法、総当りの解法、発見的解法、近似解法

## 1. 研究開始当初の背景

多くの工学的諸問題に対する解法を評価する手段として、解法の計算速度に関わる最悪計算量や解精度に関わる最悪解精度(近似比)を理論的に示すことがある。しかし、これらは最悪の状況を示すものであり、また理論的な評価のために非常に複雑な解法になる傾向があるため、実用的な解法ではないことが多い。また、解法を利用する状況により、計算時間が膨大にかかる最良な解法でなくとも、高精度ならば高速な解法を利用すれば十分なことが実際に存在する。

そこで、従来の「理論的な保証を持つ解法または最高精度を有する解法の開発」という枠組みに収まらない実用面を考慮した多様な解法の開発が切望されている。

本研究で対象とするネットワーク最適化問題は、「ネットワーク上で、指定された条件、性質を満す対象の抽出法、構成法の最適化」を行う問題の総称である。具体的には、次の問題などが含まれる。

- (a) グラフの最短経路問題、最小木問題、最小スタイナー木問題、最大重みマッチング問題、最大独立点集合問題、最小点被

覆問題など

- (b) 所望の連結度を持つグラフの抽出や構成
- (c) 通信プロトコル設計及び種々のスケジューリング問題のネット論的アプローチ

対象問題は実社会のさまざまな問題への応用が可能なため研究対象にすべき問題の一つである。

## 2. 研究の目的

ネットワーク最適化問題を対象として、さまざまなデータに対して多角的な計算機実験により性能を検証し、利用する状況と解法の特徴を考慮した改良を行うことで、さまざまな実用面において本当に必要とされている解法の開発を目的とする。ネットワーク最適化問題の多くは、厳密解を得るためには総当たり解法を使わざるを得ない解き難い問題、いわゆる NP 困難問題である。そこで、主に上記の(a)~(c) に関して、

(1) 高速に(つまり多項式時間で) 解ける問題のクラスの発見と、その実用的解法の開発と検証、

また、NP 困難問題に対しては、

(2) 総当りの(指数時間) 解法の分散、並列処理などによる効率化とその検証、

(3) パフォーマンス比が定数上限を持つ近似解法、あるいは発見的解法の開発と検証を計算機実験に基づいて遂行する。これにより、理論上効率的な解法だけでなく、上記の(1)~(3) の結果を相互利用することで、高速で解精度の高い実用的解法を開発する。

## 3. 研究の方法

対象問題の難しさの見極め、逐次処理による厳密解法および近似解法の理論的考察(高速化や解精度の保証など)、発見的解法の高精度化は本研究の基礎となる。よって、これら逐次処理の効率化に関する研究は研究期間全般で行う。

次に、実用的解法の開発に不可欠な計算機実験について、その手順を以下の(i)~(iii) に示す。

- (i) 既存手法および提案手法を計算機上で実装する。
- (ii) 多角的な計算機実験を行う。
- (iii) 既存手法および提案手法の実験的比較評価により、各手法の弱点を見つけ出し、それらを克服する各手法の特性を考慮した改良を行う。再び(ii) を行う。

これらの中で重要なのが「多角的な計算機実験」と「各手法の特性を考慮した改良」である。

前者の中心的な役割を占めるのが入力データの生成であり、次のような様々な入力データを、できる限り多く生成し、それらを用

いて十分な計算機実験を行う。

- 乱数を利用して生成するデータ。
- 解法にとって性能が良くなる、あるいは悪くなるデータ(そのような問題のクラスの発見)。
- 現実社会から抽出したデータ。
- 応用する場合に想定される問題のクラスを発見し、そのクラスのデータ。
- 対象問題それぞれに対するベンチマークデータ。もし、対象問題そのもののベンチマークデータがなくても、対象問題に変換可能な他の問題に対するベンチマークデータが存在すれば、それらを対象問題用に変換したデータ。
- サイズが巨大なデータ(数百 MB のデータ)。
- 厳密解が分かっているデータ。

後者の「各手法の特性を考慮した改良」は、入力データの特徴に合わせた改良解法を提案することであり、本研究課題の中心的な目的である「実用的解法の提案」に密接に関わる。具体的な説明を以下で示す。

提案されている解法の中で最良の解精度を持つ解法をより高精度化することは、もちろん、最良ではないが非常に計算時間が短く高速な手法をその特性を維持しながら解精度の改良を行う必要がある。たとえば、

- 最良の解法は精度向上のための処理に膨大な計算時間を費やし、入力データが巨大ならば結果を得ることが不可能な場合、
- 多項式時間の厳密解法が存在しても、利用する場面によっては、高精度ならば近似解または発見的解を高速に求めれば良い場合、(たとえば、NP 困難である連結度に関する構成問題において、最大重みマッチング問題解法を用いる高精度な発見的解法を提案したが、厳密解である最大重みマッチングの代りに高精度で高速な近似解法で求めたマッチングを用いると、解精度はほとんど変わらず、計算時間が半分以下になる結果を得ている)

などが存在するからである。

一方、応用する場合に、ある制限されたクラスのデータを対象とすれば良い場合がある。たとえば、

- カーナビで応用することを考慮して、道路網をグラフでモデル化した最短経路問題を考える場合、各点に接続する辺数が 5 程度で、非常に粗なグラフを考えれば良い、
- 通信プロトコル設計問題などのネット論的アプローチを行う問題においては主にペトリネットという有向二部グラフを扱うが、応用する状況によっては、その 2 種類の頂点集合のうち 1 種類の

集合に含まれる点に接続する入出力辺の本数がそれぞれ高々1 であるというクラスを考えれば良い、などである。入力データのクラスの特徴を考慮した改良を行うことで、対象クラスにおいてはより高精度な手法を提案できる可能性がある。

以上の(ii) と(iii) を繰り返し、実用的解法の提案を目指す。

ところで、NP 困難問題の解法を実験的比較評価する場合、基本的にはそれら解法の相対的な評価をすることになる。上記に入力データの種類として「厳密解が分かっているデータ」を挙げているが、これにより絶対評価が可能となり、実験的評価の信頼度を飛躍的に増すことができる。厳密解を求める方法として、データを生成する際に厳密解も構成するように生成する方法があるが、データに片寄りが出る、問題がやさしくなるなどの弊害が出る可能性がある。そこで、任意に作成した、できるだけ大きいサイズのデータの厳密解を得るために、並列・分散処理による厳密解法の開発が必要となる。一年目はそのための予備実験を行い、基礎的準備を行い、本格的な開発は二年目以降で行う。

#### 4. 研究成果

ネットワーク最適化問題に関する研究は既に多く存在しているが、本研究のように、最適化問題の難易度を見極め、それらの問題の難しさに適した解法の提案を行い、さらに、理論的な効率の検証だけでなく、計算機実験を行うことで、より実用的な解法を開発し、利用する状況を考慮した多様な解法を開発する研究は国内外を問わず少ない。この点は非常に意義のある、そして独創的な研究であると主張したい。

また、上記の(a) で挙げた問題は他の多くの分野の基礎となる問題であるので、本研究成果が対象問題以外への適応が十分に可能であることも重要な意義である。

さらに、上述の解法開発の方針は、対象問題以外のさまざまな問題に対する解法の開発に利用可能である。よって、本課題で得られた成果は非常に意義があると考ええる。

上記の(a)~(c)に示した問題に対して、研究の方法で示した方法により得た研究成果を、研究の目的で挙げた(1)~(3) に分類して以下に示す。

##### 【(1)に関する結果】

- 耐故障ネットワーク構成問題に関連するリンク故障への対応の抽象化である辺連結度または点連結度に関する辺付加問題についての効率的な多項式時間解法に関する研究。

- グラフの最短経路木を、入力グラフの辺重みが増加した後に高速に再構成するオンラインアルゴリズムの設計に関する研究。

##### 【(2)に関する結果】

- 携帯電話のチャンネル配置問題などに関連するグラフの点彩色問題における最適解を求めるために、分散処理により高速化を図った解法に関する研究。
- 配置問題などに関連するグラフの最小重み点被覆問題の最適解を求める解法の評価と検証に関する研究。

##### 【(3)に関する結果】

- ペトリネット(ベクター加算システムの具体的モデル) に関して、スケジューリング問題などに関連する発火系列問題についての効率的解法に関する研究。
- 通信プロトコル等の設計検証に関連するインバリエント算出法の効率化についての研究。
- 指定した2つのベクトルに対して一方から出発して他方に出来るだけ近いベクトルへ遷移する手法の効率化に関する研究。
- スケジューリング問題に関連した最適初期資源配分問題の解法の効率化に関する研究。
- プリント基板等の配線問題などに関連するスタイナー木(定点をすべて含み、かつ辺重み最小の木) 効率的構成法に関する研究。
- VLSI 設計などに関連する最大重みマッチング問題解法の高速度に関する研究。
- 配置問題などに関連するグラフの最小重み点被覆問題に対する高性能な解法設計と検証に関する研究。

本研究では、主にネットワーク最適化問題に関連する基礎的な問題を対象としたが、得られた成果を相互に組合せて利用することで、より実用的・実践的な問題を対象とした効率的解法が開発が期待できると考える。

#### 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 6 件)

- (1) 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, pp. 1129-1139, 2008. (査読有り)

(2) 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, pp. 1140-1149, 2008. (査読有り)

(3) 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, 2007. (査読有り)

(4) Satoshi Taoka, and Toshimasa Watanabe. "Time Complexity Analysis of the Legal Firing Sequence Problem of Petri Nets with Inhibitor Arcs", IEICE Trans. Fundamentals, Vol. E89-A, No. 11, pp. 3216-3226, 2006. (査読有り)

(5) 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, 2006. (査読有り)

(6) 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, 2006. (査読有り)

[学会発表] (計 13 件)

(1) Satoru Ochiwa. "Heuristic Algorithms AADO and AMDLO for the Minimum Initial Marking Problem of Petri Nets", Proc. the 22th Workshop on Circuits and Systems in Karuizawa, pp. 492-497, 2009年4月21日, 長野県北佐久郡.

(2) 田岡 智志. "グラフ点彩色問題の分散分枝限定解法 ParaBSC に対する VNS に基づく性能強化", 第 22 回 回路とシステム軽井沢ワークショップ, pp. 516-521, 2009年4月21日, 長野県北佐久郡.

(3) Toshiya Mashima. "Minimum Augmentation to Tri-Connect a Bi-Connected Graph with Upper Bounds on

Vertex-Degree", Proc. the 22th Workshop on Circuits and Systems in Karuizawa, pp. 510-515, 2009年4月21日, 長野県北佐久郡.

(4) 田岡 智志. "MAX-LFS 解法と後処理の改良により性能強化されたペトリネットのマーキング構成問題解法", 第 22 回 回路とシステム軽井沢ワークショップ, pp. 486-491, 2009年4月21日, 長野県北佐久郡.

(5) Toshiya Mashima. "A Linear Time Algorithm for Tri-connectivity Augmentation of Bi-connected Graphs with Upper Bounds on Vertex-Degree Increase", Proc. of The 23rd International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications, pp. 313-316, 2008年7月7日, 山口県下関市.

(6) 田岡 智志. "グラフ点彩色問題解法の性能強化とその応用", 第 21 回 回路とシステム軽井沢ワークショップ, pp. 279-284, 2008年4月21日, 長野県北佐久郡.

(7) 田岡 智志. "最小重み点被覆問題に対する近似解法 — 計算機実験による性能比較 —", 第 21 回 回路とシステム軽井沢ワークショップ, pp. 285-290, 2008年4月21日, 長野県北佐久郡.

(8) Toshiya Mashima. "A Linear Time Algorithm for Tri-connectivity Augmentation of Bi-connected Graphs with Upper Bounds on Vertex-Degree Increase", Proc. of the 21st Karuizawa Workshop on Circuits and Systems, pp. 273-278, 2008年4月21日, 長野県北佐久郡.

(9) 西河 恭倫. "重み増加パス探索改良によるグラフ最大重みマッチング近似解法の性能強化", 第 20 回 回路とシステム軽井沢ワークショップ, pp. 751-756, 2007年4月24日, 長野県北佐久郡.

(10) Satoshi Taoka. "Enhancing PC Cluster-based Parallel Branch-and-Bound Algorithms for the Graph Coloring Problem", Proc. the 20th Workshop on Circuits and Systems in Karuizawa, pp. 391-396, 2007年4月23日, 長野県北佐久郡.

(11) Toshimasa Watanabe. "An Improved Heuristic Algorithm FEIDEQ for the Maximum Legal Firing Sequence Problem of Petri Nets", Proc. 2006 IEEE International Symposium on Circuit and Systems (ISCAS 2006), pp. 4483-4486, 2006年5月24日, ギ

リシヤ.

(12) Satoshi Taoka. "Performance Comparison of Algorithms for the Dynamic Shortest Path Problem", Proc. the 19th Workshop on Circuits and Systems in Karuizawa, pp. 637-642, 2006年4月25日, 長野県北佐久郡.

(13) Toshiya Mashima. "Tri-Connectivity Augmentation Problems for Bi-connected Graphs with Upper Bounds on Vertex-Degree Increase", Proc. the 19th Workshop on Circuits and Systems in Karuizawa, pp. 613-618, 2006年4月25日, 長野県北佐久郡.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

田岡 智志 (SATOSHI TAOKA)

広島大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：80274116

### (2) 研究分担者

### (3) 連携研究者