

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 24 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22500029

研究課題名（和文） 信頼性向上を考慮した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 in order to Improve Reliability of Information Networks

研究代表者

田岡 智志 (SATOSHI TAOKA)

広島大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号：80274116

研究成果の概要（和文）：

本研究の目的は、情報ネットワークの信頼性向上に関連するネットワーク最適化問題に対する実用的解法の開発である。次の(1)～(4)に対する実用性を考慮した解法を提案し、既存解法および提案解法の実験的検証を行った：(1) ネットワーク最適化問題に関連する基礎問題、(2) ネットワーク運用やプロトコル設計に関連する問題、(3) 確率ネットワークの信頼性評価、(4) 確率ネットワークの点容量割り当てによる信頼性向上。

研究成果の概要（英文）：

The purpose of my study is to develop practical algorithms for network optimization problems in order to improve reliability of information networks. For the following (1) through (4), I proposed algorithms having practicality and evaluate the algorithms and existing ones through results of computing experiment: (1) fundamental problems related to network optimization problems, (2) problems about investing a network or design of protocol on a network, (3) calculating reliability of a stochastic network, (4) improving reliability of a stochastic network based on the vertex capacity assignment.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

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：情報ネットワーク構成法、確率ネットワーク、ネットワークの信頼性、ネットワーク最適化問題、アルゴリズム設計、計算機実験と評価、グラフ理論、ネット理論

1. 研究開始当初の背景

【情報ネットワークの信頼性向上】インターネットやイントラネットなどに代表される各種情報ネットワークは、現代社会の最も重要な基盤の一つである。情報ネットワーク全

体の信頼性を維持・向上させることの重要性が認識されている。そこで、ノードや接続線に故障確率を持つ情報ネットワークについて、その信頼性の評価方法、また信頼性向上のための資源割り当て方法や構成方法を確

立することが注目されている。さらに、情報ネットワーク上では、1対1、1対多、または、これらが混在した複雑な形態の通信を行っていることが一般的であり、これらを考慮したモデルにおける問題の定式化や特性化、そして具体的な構築方法の確立が必要とされている。

【実用的解法の開発】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る。また、理論的評価のために非常に複雑な解法になる傾向があり、実用的な解法ではないことが多い。一方、解法を利用する状況によっては、膨大な計算時間を費やして厳密解(最適解)を求める総当りの解法や分枝限定解法といった厳密解法を利用できる場合がある。逆に、最良でなくても、高精度ならば高速な発見的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。

【対象問題】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。本研究では主にこれに関連する問題を対象とする。この問題に多くの組合せ最適化問題が含まれ、具体的には、次のような基本的問題から発展的問題まで多種多様な問題が含まれる。

- (a) 基本的問題: 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、点彩色問題、平面グラフ抽出問題、グラフの配線問題、グラフの最小コスト分割問題など
- (b) 資源割り当てに関する発展的問題: ネット論的アプローチなどによる通信プロトコル設計及び種々のスケジューリング問題
- (c) 連結度に関する発展的問題: グラフの連結度計算等の問題、連結度増加(耐故障性を持つネットワークの構成)問題
- (d) 信頼性向上に関する発展的問題: ネットワークの信頼性の算出法、信頼性向上のためのネットワーク構成問題

【研究の目標】申請者は、上記(a)~(c)の問題に対して実用性を意識した解法を開発しているが、解法の性能評価をより充実させる、解法の性能をさらに改善させ高速化を図る、などの課題が残っている。また、リンクまたはノードが、ある一定数故障しても通信経路が確保できるネットワーク構築についての結果も提示しているが、より実用性を高める

ために、ネットワークに故障確率を導入したモデルに対する信頼性について議論する必要があると感じている。

そこで、(a)~(c)の問題を、ノードやリンクに故障確率が与えられたネットワークを扱うことができるように拡張し、その解法の提案を行う。さらに信頼性向上を図るためのネットワーク構成問題の定式化や具体的な構成法について研究を行う。つまり、(d)に関する問題に取り組む。

2. 研究の目的

本研究では、信頼性を向上させるための情報ネットワーク構成法を主対象とする。具体的には、ネットワーク最適化問題に着目し、耐故障性に関する理論的基礎(特性化や理論上高速な解法の開発)の充実を図り、加えて計算機実験に基づいて、多項式時間解法、近似解法、発見的解法、そして総当りの解法や分枝限定解法などの厳密解法を対象に、実用面を考慮した高性能な逐次・並列・分散解法を開発を行う。

そこで、前節で示した基本的問題から発展的問題である(a)~(c)、さらにこれらを拡張した信頼性を考慮した問題である(d)に対する解法を開発を、以下の(1)~(3)に基づいて遂行する。

- (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その検証。
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、いわゆるNP困難問題である。そこで、NP困難問題に対しては次の(2), (3)を行う。
- (2) 厳密解を求めるための、分枝限定解法、分散・並列解法の効率化とその検証、
- (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。

これにより得られた成果および申請者がこれまでに得ている成果を相互利用し、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性を考慮した改良を行うことで、実用面で本当に必要とされている解法を開発する。

3. 研究の方法

ネットワーク最適化問題に関して、全期間を通じて逐次処理による解法の理論的考察、計算機実験に基づく近似解法、発見的解法の高精度化、厳密解法の高速度化を行う。また、信頼性の評価方法に関する検討を行う。2年目以降では効率の良い逐次処理および並列・分散処理による解法を開発を行い、近似解法または発見的解法の更なる改良を行う。これと並行して、信頼性向上のための構成問題の定式化、および、解法の提案と評価を行

う。いずれにおいても実用性に十分に考慮して遂行する。これらの詳細を以下で述べる。

まず、実用性の検証および解法の開発方針について示す。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全期間を通じて行う。

実用的解法の開発に不可欠な計算機実験については以下の(i)~(iii)の手順で行う。

- (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。(ii)と(iii)を反復する。)
- (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、それらを克服するための各手法の特性を考慮した改良を行う。再び(ii)に戻る。

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「多角的な計算機実験」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)。
- ・ 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。
- ・ 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。
- ・ 各対象問題に対するベンチマークデータ。対象問題そのもののベンチマークデータがない場合は、対象問題に変換可能な他の問題のベンチマークデータが存在すれば、それらを対象問題に変換したデータ。

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。「実用的解法の提案」は以下の状況への対応も必要とする。

- ・ 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すため、入力データの規模が巨大ならば結果を得ることが不可能な場合。(しかし、規模が小さければ、

現実的な時間で結果を得ることができる。場合によっては、近似解法や発見的解法よりも高速になる結果を得ている。厳密解法の高速化も必要と考える。)

- ・ 多項式時間の厳密解法は存在するが、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ることで十分な場合。(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わ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。)

一方、解法を適用する場面によっては、ある制限されたクラスのデータを対象とすれば十分な場合もある。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となる手法を提案できる可能性がある。

以上を踏まえ、1年目では、研究開始当初の背景で挙げたネットワーク最適化問題に関連する(a)~(c)に対して、解法の性能をより充実させ、これらの問題において、リンクやノード等に故障確率、帯域増減の確率が与えられるなどの拡張を行うための基礎研究を行う。また、既存の情報ネットワークの信頼性評価や構築方法について実用性の検証を行う。

2年目以降では、1年目で得た基礎研究の結果をふまえ、対象とするネットワーク最適化問題に関する諸問題を、1対1、1対多、これらが混在した複雑な通信形態を考慮した問題に拡張し、これらに対する実用的解法を1年目と同様な方針に基づき開発する。そして、解法の開発に関しては、効率の良い逐次処理だけでなく、並列・分散処理による厳密解法の開発を行う。さらに、厳密解と近似解法または発見的解法で得た解を比較検討し、1年目と同様に(ii)と(iii)の手順により、近似解法または発見的解法の更なる改良を行う。

4. 研究成果

情報ネットワークの信頼性向上に関連するネットワーク最適化問題に対して、次の(1)~(5)について実用性を考慮した解法を提案し、既存解法および提案解法の実験的検証を行った。

- (1) ネットワーク最適化問題に関連する基礎問題、
- (2) ネットワーク運用やプロトコル設計に関連する問題、
- (3) 連結度増加問題
- (4) 確率ネットワークの信頼性評価、

(5) 確率フローネットワークの点容量割り当てによる信頼性向上。

これら (1)~(5) に分けて得られた成果を示す。

(1) ネットワーク最適化問題に関連する基礎問題

グラフの最大誘導木抽出法に関する研究(1件)、グラフの点彩色問題に関する研究(1件)、グラフ点被覆問題に関する研究(3件)、平面グラフ抽出問題に関する研究(1件)、グラフの配線問題に関する研究(1件)。

(2) ネットワーク運用やプロトコル設計に関連する問題

実用的なスケジューリングに対する解法の高精度化および高速化に関する研究(4件)：これはネットワーク運用に必要なスケジューリングに関係している。

ペトリネット(ベクター加算システムの具体的モデル)に関する研究：指定した2つのベクトルに対し、一方から出発して他方に来るだけ近いベクトルへ遷移させるための解法に関する研究(3件)、および最適初期資源配分問題の解法に関する研究(4件)。これらはネットワーク運用・スケジューリングに関係している。

(3) 連結度増加問題

所望の辺連結度を持ち、かつ辺数が最小のグラフ構成法に関する研究(7件)；耐故障ネットワークの構成問題に関連する結果である。

(4) ネットワークの信頼性評価

確率ネットワークの信頼性評価法に関する従来手法の改良手法の提案(3件)：実用性が十分に考慮された状況の定式化とその解法についての結果が存在していたので、その既存手法の計算時間や使用メモリについて効率が悪いことを明らかにし、その改良手法を提案した。

(5) 信頼性向上

確率フローネットワークの点容量割り当てに関する研究(3件)：既存解法は非常に時間やメモリがかかることを指摘し、高性能な解法を提案した。

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4件)

1. Satoshi Taoka, Daisuke Takafuji, Toshimasa Watanabe. "Computing-based Performance Analysis of Approximation Algorithms for the Minimum Weight Vertex Cover Problem of Graphs", IEICE Trans. Fundamentals, Vol. E96-A, No.

- 6, June, 2013. (to appear) (査読有り)
2. Satoru OCHIWA, Satoshi TAOKA, Masahiro YAMAUCHI, Toshimasa WATANABE. "Two Heuristic Algorithms for the Minimum Initial Marking Problem of Timed Petri Nets", IEICE Trans. Fundamentals, Vol. E96-A, No. 2, pp. 540-553, February, 2013. (査読有り)
3. Tadachika OKI, Satoshi TAOKA, Toshiya MASHIMA, Toshimasa WATANABE. "A Fast Algorithm for Augmenting Edge-Connectivity by One with Bipartition Constraints", IEICE Trans. Information and Systems, Vol. E95-D, No. 3, pp. 769-777, March, 2012. (査読有り)
4. Satoshi Taoka, Toshimasa Watanabe. "The Marking Construction Problem of Petri Nets and Its Heuristic Algorithms", IEICE Trans. Fundamentals, Vol. E94-A, No. 9, pp. 1833-1841, September, 2011. (査読有り)

[学会発表] (計27件)

1. Satoshi Taoka, and Toshimasa Watanabe. A Distributed Algorithm for 2-Edge-Connectivity Augmentation Problem of a Connected Graph", The 28th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC), 30 June-3 July, 2013 (to appear). Yeosu, Korea
2. 田岡 智志, 野口 威, 渡邊 敏正. "通信ネットワークのトラフィックパスに基づく信頼性計算法の改良", 第26回回路とシステムワークショップ, 2013年7月29-30日(to appear). 淡路市
3. 奥本 政彦, 田岡 智志, 渡邊 敏正. "カンファレンスプログラム編成のための局所探索法の性能強化—初期解生成と近傍交換—", 信学技報, vol. 112, no. 383, MSS2012-58, pp. 71-76, 2013年1月22-23日. 大阪市
4. 花田 英人, 高藤 大介, 田岡 智志, 渡邊 敏正. "格子グラフ上の二重入れ子形状境界間を接続する互いに点素なパスについて", CAS-2012-73, pp. 41-45, 2013年1月28-29日. 別府市
5. 野口 威, 田岡 智志, 渡邊 敏正. "ネットワークのトラフィックパスに基づく信頼性計算における要素分解順序の改良について", CAS-2012-74, pp. 47-51, 2013年1月28-29日. 別府市
6. 田原 将充, 坂本 達哉, 田岡 智志, 渡

- 邊 敏正. “確率ネットワークにおける信頼性評価法の性能比較”, 電気・情報関連学会中国支部第 63 回連合大会, pp. 28-29, 2012 年 10 月 20 日. 松江市
7. Satoru Ochiwa, Satoshi Taoka, Toshimasa Watanabe. “Pseudo-polynomial Time Solvability for The Maximum Legal Firing Sequence Problem of Inhibitor-Arc Petri nets - Weighted Marked Graphs with Inhibitor Arcs -”, The 27th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC), 15-18 July, 2012. 札幌市
 8. Satoshi Taoka, Toshimasa Watanabe. “Performance Comparison of Approximation Algorithms for the Minimum Weight Vertex Cover Problem”, Proc. 2012 IEEE International Symposium on Circuit and Systems (ISCAS 2012), pp. 632-635, 20-23 May, 2012. Soul, Korea
 9. 坂本 達哉, 田岡 智志, 渡邊 敏正. “フローネットワーク故障耐性のための頂点容量割り当て法の性能強化”, 第 25 回回路とシステムワークショップ, pp. 214-219, 2012 年 7 月 30-31 日. 淡路市
 10. 山崎 雄太, 田岡 智志, 渡邊 敏正. “点の非隣接性を考慮した最小重み点カバー問題解法”, 第 25 回回路とシステムワークショップ, pp. 208-213, 2012 年 7 月 30-31 日. 淡路市
 11. 大野 峻, 高藤 大介, 田岡 智志, 渡邊 敏正. “描画固定部分グラフを有するグラフの平面性”, CAS-2011-86, 信学技報, Vol. 111, No. 377, pp. 7-12, 2012 年 1 月 19-20 日. 福岡市
 12. 小新 雄太, 田岡 智志, 渡邊 敏正. “グラフ点彩色問題の発見的解法の性能比較”, CAS-2011-145, pp. 213-218, 2012 年 3 月 8-9 日. 新潟市
 13. Tadachika OKI, Satoshi TAOKA, Toshimasa WATANABE. “A Simplified Algorithm for Augmenting Edge-Connectivity by One with Bipartition Constraints”, The First International Workshop on Networking, Computing, Systems, and Software (NCSS), 30 November-2 December, 2011. 吹田市
 14. Satoru Ochiwa, Satoshi Taoka, Toshimasa Watanabe. “Two Heuristic Algorithms for Minimizing Initial Markings of Timed Petri Nets”, The 26th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC), pp. 27-30, 19-20 June, 2011. Gyeongju, Korea
 15. Tadachika Oki, Satoshi Taoka, Toshimasa Watanabe. “A Fast Algorithm for Augmenting Edge-Connectivity by One with Multipartition Constraints”, The 26th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC), pp. 1232-1235, 19-20 June, 2011. Gyeongju, Korea
 16. 上原 康史, 田岡 智志, 渡邊 敏正. “カンファレンスプログラム編成のための局所探索法の改良”, 第 24 回回路とシステムワークショップ, pp. 188-193, 2011 年 8 月 1-2 日. 淡路市
 17. 大和 秀彰, 田岡 智志, 渡邊 敏正. “確率的頂点容量を持つフローネットワークのコスト付き頂点容量割り当て問題の発見的解法”, 第 24 回回路とシステムワークショップ, pp. 194-199, 2011 年 8 月 1-2 日. 淡路市
 18. 大和 秀彰, 田岡 智志, 渡邊 敏正. “確率フローネットワークの頂点容量割り当て問題に対する発見的解法”, 信学技報, vol. 110, No. 370, CST2010-82, pp. 127-132, 2011 年 1 月 20-21 日. 下関市
 19. 上原 康史, 田岡 智志, 渡邊 敏正. “カンファレンスプログラム編成のための局所探索法の改良”, SIGAL, Vol. 2011-AL-134, No. 8, 2011 年 3 月 7 日. 那覇市
 20. 吉岡 篤人, 田岡 智志, 渡邊 敏正. “Enhanced Algorithms for the Marking Construction Problem of Petri Nets based on Improvement of Finding Firing Sequences”, IEICE Tech. Rep., vol. 110, no. 370, CST2010-78, pp. 103-108, 20-21 January, 2011. 下関市
 21. Tadachika Oki, Satoshi Taoka, Toshimasa Watanabe. “A Parallel Algorithm for 2-Edge-Connectivity Augmentation of a Connected Graph with Multipartition Constraints”, 2nd International Workshop on Parallel and Distributed Algorithms and Applications (PDAA), 17-19 November, 2010. 東広島市
 22. Satoshi Taoka, Toshimasa Watanabe. “Heuristic Algorithms for the Marking Construction Problem of Petri Nets”, Proc. 2010 IEEE International Symposium on Circuit and Systems (ISCAS 2010), pp. 1344-1347, 30 May-2 June, 2010. Paris, France
 23. 沖 忠親, 田岡 智志, 間島 利也, 渡邊

- 敏正. "σ 辺連結 2 部グラフの(σ + 1) 辺連結化のための高速アルゴリズム", 第 23 回 回路とシステム軽井沢ワークショップ, pp. 404-409, 2010 年 4 月 19-20 日. 北佐久郡
24. 畑 守之, 田岡 智志, 渡邊 敏正. "カンファレンスプログラムの自動編成について", 第 23 回 回路とシステム軽井沢ワークショップ, pp. 215-220, 2010 年 4 月 19-20 日. 北佐久郡
25. Hiroyuki Yoshida, Daisuke Takafuji, Satoshi Taoka, Toshimasa Watanabe. "Heuristic Extraction of a Maximum Induced Tree from a Graph", Proc. the 23rd Workshop on Circuits and Systems in Karuizawa, pp. 415-420, 19-20 April, 2010. 北佐久郡
26. 落岩 諭, 田岡 智志, 渡邊 敏正. "時間付きペトリネットにおける最小初期マーキング問題に対する発見的解法 TPM と TMDLO", Tech. Rep. CST2010-40 IEICE of Japan, pp. 13-18, 2010 年 11 月 18 日. 吹田市
27. Tadachika Oki, Satoshi Taoka, Toshimasa Watanabe. "A Fast Algorithm for (σ+1)-Edge-Connectivity Augmentation of a σ-Edge-Connected Graph with Multipartition Constraints", IPSJ SIG Technical Report Vol. 2010-AL-131 No. 10, pp. 1-8, 22 September, 2010. 函館市

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田岡 智志 (TAOKA SATOSHI)
広島大学・工学研究院・助教
研究者番号：80274116

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：