

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008 ～ 2010

課題番号：20500015

研究課題名（和文） グラフの連結度とその応用に関する総合的研究

研究課題名（英文） Integrated Research on Connectivity of Graphs and its Applications

研究代表者

渡邊 敏正 (WATANABE TOSHIMASA)

広島大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：80112184

研究成果の概要（和文）：

本研究の目的は、グラフの連結度とその応用に関する理論的研究と実用アルゴリズム設計に関する研究を行うことである。解析（所与のグラフの連結度を求めること）、抽出（所望の連結度を持つ部分グラフの抽出）、構成（所望の連結度をもつグラフの構成）に関する理論的研究とアルゴリズム設計、および応用を意識したオンラインアルゴリズム、分散・並列アルゴリズム等の実用アルゴリズムの設計に関する成果を得ている。

研究成果の概要（英文）：

The subject of this project is to promote research on theoretical characterization and designing practical algorithms on connectivity of graphs and its applications. The results are summarized in the following (1) and (2).

(1) Theoretical characterizations and algorithms for analysis (computing connectivity of a given graph), extraction (extracting a subgraph with prescribed connectivity from a graph), and construction (constructing a graph of given connectivity by adding a minimum number of edges) are given.

(2) Various algorithms, such as online, parallel or distributed ones, for practical use in applications are obtained.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：アルゴリズム設計解析

科研費の分科・細目：情報学・情報学基礎

キーワード：アルゴリズム設計、アルゴリズムの効率、近似アルゴリズム、近似解精度、グラフ理論、ベクター加算システム

1. 研究開始当初の背景

グラフの連結度は極めて基本的な特徴であるが、まだ不明な点が多い。グラフの連結度計算法としては、最大流アルゴリズムがいまだに唯一といってもよい道具であり、より効率的な手法が望まれている。所望の連結度をもつグラフの特性化は構成問題の一つであるが、所望の辺連結度を持つグラフの多項式時間最小構成アルゴリズムが申請者により初めて提案されたのは 20 年前(1987 年)にすぎない。点連結度に関しては、最近後述のハンガリーグループにより、最小構成に関する理論的特性化が与えられたが、効率的アルゴリズム設計は未解決である。このように基本的であるが不明な点の多いグラフ連結度の本質に迫ることを研究目的とする。

連結度の本質解明に向けて大きなうねりが出ている現在、この機を捉えて研究を継続し、確固たる成果を挙げたい。すなわち、理論的特性化とアルゴリズム設計、オンラインアルゴリズム、並列・分散アルゴリズム設計も含み、連結度を集中的に研究するための、本申請「グラフの連結度とその応用に関する総合的研究」によって、連結度の解明につなげたい。この様な学術的独創性を持ち、かつ機を得た研究は見当たらない。本申請の必要性はここにある。

2. 研究の目的

グラフの連結度とその応用に関して次の 2 方向で総合的研究をおこなうことである。

【研究方向 1】解析（グラフの連結度を求めること）、抽出（所望の連結度を持つ部分グラフ抽出）、構成（所望の連結度をもつグラフ構成）に関して理論的研究とアルゴリズム設計をおこなうこと。

達成目標：(1) 連結度の本質を解明するための理論的基礎を確立。(2) 最適解（または高精度の近似解）を求める高速アルゴリズムの設計。

【研究方向 2】リンク（またはノード）故障に対する耐故障ネットワーク設計や通信経路確保への応用を意識した、逐次（またはオンライン、分散、並列）アルゴリズム等の実用アルゴリズムの設計。

達成目標：各種ネットワーク設計や耐故障性解析のための実用的アルゴリズムの設計。

3. 研究の方法

グラフの連結度に関する、解析、抽出、構成について、以下の(a)~(d) についての研究分担者と共に研究を進める。

(a) 構成に関して：

- (1) 所望の辺連結度を持つグラフの最小構成について、平面性を維持した k 辺連結化をはじめとして、辺連結度以外に一つあるいは複数の目標を追加した k 辺連結化の研究を進める。
- (2) 所望の辺連結度をもつ単純グラフの構成法について、 k 辺連結を $(k + 1)$ 辺連結へ増加するときに、多項式時間アルゴリズムのある場合と NP 完全である場合の見極めをめざす。より一般的な k 辺連結単純グラフの最小構成法を確立する。
- (3) 点連結度については、 k 点連結グラフの最小構成の効率的アルゴリズム設計を研究する。特に、 k が 4~6 程度の k 点連結度の理解しやすい特性化および高速な最小構成法も研究対象とする。
- (4) 実用上の制約条件（指定点間の k 辺（または k 点）連結化、各点での付加辺数上限など）がある場合の最小構成法を研究する。
- (5) 上記(1)~(4) において、付加辺に重みがある場合に関して、高精度で高速な近似アルゴリズムの設計をおこなう。

(b) 抽出に関して：所望の(辺または点) 連結度をもつグラフ構成の基礎となる、種々の k についての k 辺連結成分または k 点連結成分の高速な抽出アルゴリズム設計をおこなう。

(c) 解析について：グラフの連結度の高速計算法の設計をおこなう。最大流アルゴリズムを利用する手法の高速化とともに、最大流アルゴリズムを用いない計算法の開発をおこなう。

(d) オンラインアルゴリズム、分散アルゴリズムについて：以下の(1)~(3) のためのオンラインアルゴリズムおよび分散アルゴリズムの設計をおこなう。

- (1) 所望の連結度をもつグラフの最小構成。
- (2) k 連結成分の抽出。
- (3) 辺の追加、削除が生じるグラフにおける経路探索。

4. 研究成果

グラフの連結度とその応用に関する理論的研究と実用アルゴリズム設計を目的とした。研究期間内の成果は、研究論文 36 件 (2008

年度 14 件、2009 年度 11 件、2010 年度 11 件)である。概要は以下の通りである。

【I. グラフ構成に関して:17 件】

(1) 辺の付加に関する制約がある場合に、その付加によりグラフが所望の辺連結度を持つような辺数最小の辺集合の構成法に関する研究について以下の成果を得た (8 件) :

- ・各点に付加辺数の上限がある 2 点連結グラフを、最小本数の辺付加で 3 点連結グラフにする場合の線形時間解法を提案した。
- ・点集合の 2 分割が指定され、その点集合間のみ辺付加が許される場合に、付加によりグラフの辺連結度を 1 増加できる最小辺集合を求める高速解法を提案した。

(2) グラフの最大誘導木を抽出する高精度な発見的解法と高速厳密解法を提案した(5 件)。

(3) プリント基板設計における、ビアの少ない配線および層数の少ないレイアウト設計、それぞれの高性能な発見的解法を提案した (3 件)。前者は(2)を解法ツールとする。

(4) ネットワークが所望のフロー値を持つような点容量割当に関して、高精度で高速な発見的解法を提案した (1 件)。

【II. 実用アルゴリズムの設計に関して:19 件】

(1) グラフの最大重みマッチングを求める高速解法を提案した (1 件)。これは、辺重みがある場合に、付加によりグラフが所望の辺連結度または点連結度を持つようなコスト総和最小の辺集合を構成する手法の高精度化、高速化に有用なツールである。

(2) グラフの彩色問題に対する高精度で高速な解法を提案した(4 件)。総当りの探索を効率良く実行する分枝限定法の分散・並列処理による高速化を実現している。

(3) グラフの点被覆問題に対する高精度で高速な解法を提案した (1 件)。点被覆問題はグラフの基本問題の一つで幅広い応用を持ち、(2)の高速化にも利用されている。

(4) 学会発表セッション構成のための高性能な実用スケジューリング法を提案した(3 件) : 実用的スケジューリング法の高精度化および高速化を実現している。

(5) ペトリネット (ベクター加算システム的具体モデル) について、指定した 2 ベクトルの一方から他方に遷移するベクトルの加算

系列を算出する高性能解法を提案した(3 件)。また、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ための高性能解法を提案した (4 件)。さらに、最適初期資源配分法に関する高性能解法を提案した (3 件)。

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)

[総論文数] (合計 36 件)

[雑誌論文] (小計 4 件)

1. Toshimasa WATANBE, and Satoshi TAOKA. "Efficiently Computing Minimal-Support Nonnegative Integer Invariants of Petri Nets", IEICE Trans. Fundamentals, Vol. E92-A, No. 4, pp. 2707-2716, November, 2009, 査読有.
2. Satoru OCHIWA, Satoshi TAOKA, Masahiro YAMAUCHI, and Toshimasa WATANABE. "Two Enhanced Heuristic Algorithms for the Minimum Initial Marking Problem of Petri Nets", IEICE Trans. Fundamentals, Vol. E92-A, No. 4, pp. 2732-2744, November, 2009, 査読有.
3. Daisuke 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, April, 2008, 査読有.
4. Satoshi Taoka, Daisuke 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, April, 2008, 査読有.

[学会発表] (小計 32 件)

1. ○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, March, 2011, 沖縄県那覇市.
2. ○吉岡 篤人, 田岡 智志, 渡邊 敏正. "発火系列探索法の改良に基づいて性能強化されたペトリネットマーキング構成問題解法", IEICE Tech. Rep., vol. 110, no. 370, CST2010-78, pp. 103-108, 2011 年 1 月 21 日, 山口県下関市.

3. ○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21日, 山口県下関市.
4. ○Tadachika Oki, Satoshi Taoka, and 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), 2010年11月19日, 広島県東広島市.
5. ○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, 大阪府吹田市.
6. ○Tadachika Oki, Satoshi Taoka, and Toshimasa Watanabe. "A Fast Algorithm for $(\sigma + 1)$ -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, 2010年9月22日, 北海道函館市.
7. ○Hiroyuki YOSHIDA, Daisuke TAKAFUJI, and Toshimasa WATANABE. "Sharp Heuristic Algorithms for Extracting a Maximum Induced Tree from a Graph", CAS-2010-48, 信学技報, Vol. 110, no. 165, pp. 79-84, 2010年8月3日, 徳島県鳴門市.
8. ○Satoshi Taoka, and 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, 2010年5月31日, Paris France.
9. ○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 $(\sigma + 1)$ 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20日, 長野県北佐久郡.
10. ○Hiroyuki Yoshida, Daisuke Takafuji, Satoshi Taoka, and 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, 2010年4月20日, 長野県北佐久郡.
11. 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日, 長野県北佐久郡.
12. ○沖 忠親, 田岡 智志, 渡邊 敏正. "k辺連結2部グラフの $(k + 1)$ 辺連結化のための高速アルゴリズム", IPSJ SIG Technical Report Vol. 2010-AL-129 No. 7, 2010年3月5日, 神奈川県川崎市.
13. ○中野 雅章, 山内 雅弘, 田岡 智志, 渡邊 敏正. "ペトリネットの発火系列問題の拡張とWebアプリケーション用汎用スケジューラの作成", 電子情報通信学会コンカレント研究会, 2009年11月26日, 愛知県名古屋市.
14. ○渡邊 敏正. "組合せ最適化問題の計算複雑度解析とアルゴリズム設計", 信学技報, vol. 109, no. 301, CST2009-23, pp. 31-33, 2009年11月26日, 愛知県名古屋市.
15. ○吉田 浩之, 高藤 大介, 田岡 智志, 渡邊 敏正. "グラフの最大誘導木を抽出する発見的解法の点除去に基づく性能強化", CAS2009-24, 信学技報, Vol. 109, No. 199, pp. 1-6, 2009年9月24日, 広島県広島市.
16. ○Toshiya Mashima, Satoshi Taoka, and Toshimasa Watanabe. "Minimum Augmentation to Tri-Connect a Bi-Connected Graph with Upper Bounds on Vertex-Degree", Proc. 2009 IEEE International Symposium on Circuit and Systems (ISCAS 2009), 2009年5月27日, Taipei Taiwan.
17. ○石井 稔久, 田岡 智志, 渡邊 敏正. "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.
18. 道後 幸寛, ○田岡 智志, 渡邊 敏正. "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.
19. ○Satoru Ochiwa, Satoshi Taoka, Masahiro Yamauchi, and Toshimasa Watanabe. "Heuristic Algorithms AADO and AMDLO for the Minimum Initial Marking Problem of Petri Nets", Proc. the 22nd Workshop on Circuits and Systems in Karuizawa, pp. 492-497, 2009年4月21日, 長野県北佐久郡.
20. ○Toshiya Mashima, Satoshi Taoka, and

- Toshimasa Watanabe. "Minimum Augmentation to Tri-Connect a Bi-Connected Graph with Upper Bounds on Vertex-Degree", Proc. the 22nd Workshop on Circuits and Systems in Karuizawa, pp. 510-515, 2009年4月21日, 長野県北佐久郡.
21. ○竹歳 裕一郎, 落岩 諭, 田岡 智志, 山内 雅弘, 高藤 大介, 渡邊 敏正. "抑止辺を持つペトリネットの発火系列問題の解法について", CAS2008-140, 信学技報, Vol.108, No.453, pp. 217-222, 2009年3月3日, 岐阜県岐阜市.
22. ○菅 祐司, 吉田 浩之, 高藤 大介, 渡邊 敏正. "グラフの最大誘導木抽出法の計算機実験による性能評価", CAS2008-140, 信学技報, Vol.108, No.453, pp. 211-216, 2009年3月3日, 岐阜県岐阜市.
23. ○波多野 開悟, 田岡 智志, 渡邊 敏正. "トークン供給フロー制御と競合トランジションに基づく後退操作によるペトリネット発火系列探索法の性能強化", Tech. Rep. CST2008-43 IEICE of Japan, vol. 108, No. 415, pp. 11-16, 2009年1月29日, 神奈川県横浜市.
24. ○道後 幸寛, 田岡 智志, 渡邊 敏正. "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", Tech. Rep. CST2008-52 IEICE of Japan, vol. 108, No. 415, pp. 61-66, 2009年1月29日, 神奈川県横浜市.
25. ○石井 稔久, 田岡 智志, 渡邊 敏正. "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", Tech. Rep. CST2008-44 IEICE of Japan, vol. 108, No. 415, pp. 17-22, 2009年1月29日, 神奈川県横浜市.
26. ○山崎 智宏, 高藤 大介, 渡邊 敏正. "端子頂点グラフの全域平面部分グラフ抽出法に対する切断対とネット描画変更に基づく高精度化", 信学技報, vol. 108, no. 388, CAS2008-76, pp. 69-74, 2009年1月22日, 宮崎県宮崎市.
27. ○D. Takafuji, and T. Watanabe. "Heuristic Algorithms for Extracting a Maximum Induced Tree of a Graph", Technical Report of IEICE, CAS2008-58, pp. 77-82, 2008年11月7日, 大阪府吹田市.
28. Yuji Suga, ○Daisuke Takafuji, and Toshimasa Watanabe. "Enhanced Heuristic Algorithms K-LAG-V and K-LAG-S for the Constrained Via Minimization Problem", Proc. of The 23rd International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications, pp. 1529-1532, 2008年7月8日, 山口県下関市.
29. ○Toshiya Mashima, Satoshi Taoka, and Toshimasa Watanabe. "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8日, 山口県下関市.
30. 岡田 慎司, ○田岡 智志, 渡邊 敏正. "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.
31. 國近 拓也, ○田岡 智志, 渡邊 敏正. "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.
32. ○Toshiya Mashima, Satoshi Taoka, and Toshimasa Watanabe. "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.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡邊 敏正 (WATANABE TOSHIMASA)

広島大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：80112184

(2) 研究分担者

田岡 智志 (TAOKA SATOSHI)

広島大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号：80274116

高藤 大介 (TAKAFUJI DAISUKE)

広島大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号：00314732

(3) 連携研究者

()

研究者番号：