

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 29 日現在

機関番号：50103

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25330019

研究課題名(和文) 交差グラフ構造を有する情報ネットワークにおける信頼性向上のためのアルゴリズム研究

研究課題名(英文) A study on algorithms for improving the reliability of network system with intersection graph structure

研究代表者

本間 宏利 (Honma, Hiroto)

釧路工業高等専門学校・情報工学科・准教授

研究者番号：80249721

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：交差グラフの一種である区間グラフに対して、それが有する固有的な幾何学構造の特徴を効果的に利用して、迂回度最大の要節点を $O(n^2)$ 時間で導出するアルゴリズムを開発した。日本OR学会でこの成果発表を行い、電子情報通信学会に英語論文を投稿し採択された。

同様に、置換グラフに対しても、迂回度最大の要節点を $O(n^2)$ 時間で導出するアルゴリズムを開発した。この研究成果はISTS国際会議で発表し、電子情報通信学会に英語論文を投稿し受理された。

非退化型円弧グラフにおける最小フィードバック節点集合の導出アルゴリズムを開発した。この成果は第24回インテリジェントシステムシンポジウムにて発表した。

研究成果の概要(英文)：We proposed an algorithm to find the maximum detour hinge vertex on an interval graph that runs in $O(n^2)$ time, where n is the number of vertices in the graph. This result was accepted in Institute of Electronics, Information and Communication Engineers.

We proposed an algorithm that identifies the maximum detour hinge vertex on a permutation graph in $O(n^2)$ time, where n is the number of vertices in the graph. This result was accepted in Institute of Electronics, Information and Communication Engineers.

We presented an algorithm that takes $O(n+m)$ time to solve the FVS problem in a normal Helly circular-arc graph with n vertices and m edges. We presented our paper at the 24th Fuzzy, Artificial Intelligence, Neural Networks and Computational Intelligence.

研究分野：アルゴリズム工学

キーワード：アルゴリズム グラフ理論 離散最適化

1. 研究開始当初の背景

インターネットや LAN に代表される情報ネットワーク構造における離散最適化問題は、資源配分、スケジューリング、最適配置などの広い分野で精力的に研究され、多くの問題解決に実用化されている。我々は、これまでに大規模なグラフにおいて、非常に多くの計算時間を必要とする問題に対して、対象グラフを交差グラフのクラスに限定し、それらの上での効率的な逐次・並列アルゴリズムを開発してきた。これらのアルゴリズムは、ネットワークシステムの解析やその頑健化に応用されている。

前回採択された科研費研究(交差グラフにおける離散最適化問題を解く効率的アルゴリズムの開発 基盤研究(C) 課題番号 22500020)では、台形グラフのフィードバック節点集合問題や環状型置換グラフの閉節点、および、要節点導出問題における効率的なアルゴリズムの開発を行った。しかしながら、前回の研究で、アルゴリズムの実ネットワークシステムへの応用領域拡張化や、迂回度最大要節点問題などの新たな派生問題への対応や改善などが課題として残されたため、今回の研究ではそれに挑戦した。

2. 研究の目的

本研究では対象とするグラフを交差グラフに限定し、それらの幾何学的特徴を利用して、情報ネットワークの信頼性や安定性の向上に貢献する効率的アルゴリズムを構築する。本研究で扱う具体的なテーマを以下に示す。

(1)非退化型円弧グラフにおける最小フィードバック節点集合の導出アルゴリズムの開発。

(2)区間グラフ、置換グラフ上の迂回度最大要節点の導出アルゴリズムの開発。

フィードバック節点集合問題とは、それらをグラフから除去すると、グラフに閉路が存在しなくなる節点数最小の節点集合を導出する問題である。この問題は一般グラフに対しては NP 困難であることが知られている。この問題は大規模回路解析の効率化やネットワークシステム上のデッドロック回避等に応用されている。

要節点とは、それをグラフから除去することで、最短経路の長さがそれまでよりも長くなる 2 節点が存在するような節点をいう。要節点に対応する端末の稼働率を高めることで、ネットワーク全体の信頼性、安定性の向上を実現できる。本研究では、新たに、要節点に迂回度という尺度(要節点を除去した時に、影響を受ける 2 節点間の延長距離の尺度)を付加させ、迂回度が最大の要節点を導出する問題を迂回度最大要節点問題と定義

した。たとえば、図 1 の例では○印が付いた部分は全て要節点に相当する重要な末端であるが、特に実線の○印の末端は迂回度最大(最短距離が 2 から 4 へ延びる)となる非常に重要な部位となる。このように、迂回度最大要節点問題は、メンテナンスコストに制限がある状況下等で、最も経済的・有効的なネットワークシステム頑健化に応用可能である。

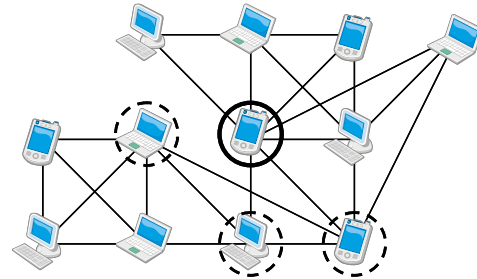


図1 要節点問題の応用例

本研究では、実システムや問題本質のモデル化に利用されている、交差グラフに属する数種のグラフ(非退化型円弧グラフ、区間グラフ、置換グラフ)に対して、フィードバック節点集合問題、および、迂回度最大要節点問題を解く効率的アルゴリズムの研究開発を行った。これにより、より広範囲の実ネットワークシステム解析の効率化や、その信頼性、安定性の向上への応用を目的とする。これらの離散最適化問題は、グラフ理論分野での計算量理論からの視点でも興味深い内容であり、本研究は実践的な応用と計算理論上の進展の両面から意義がある。

3. 研究の方法

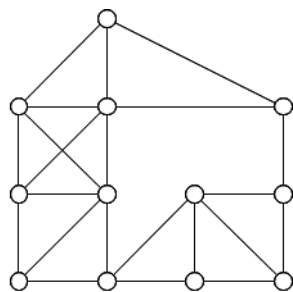
テーマ(1):非退化型円弧グラフにおける最小フィードバック節点集合の導出アルゴリズムの開発。

フィードバック節点集合問題はこれまでに様々なクラスのグラフに対して、効率的アルゴリズムの研究が行われてきた。我々もこれまでに、あるクラスの台形グラフに対して、同問題を解く効率的アルゴリズムを開発してきた。これら全ては、対象とするグラフの幾何学的特徴を巧みに応用した手法を適用している。よって、本研究で対象とする非退化型円弧グラフの幾何学的特徴の分析が必要となるが、非退化型円弧グラフの部分クラスである区間グラフに有効であったダイナミックプログラミング手法は、非退化型円弧グラフには不向きであることが明確化した。

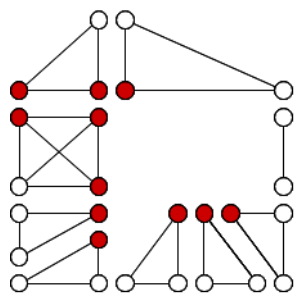
従って、本研究では別のアプローチとして、非退化型円弧グラフを極大クリークに分解し、閉路を構成しているクリーク重複度の高い節点から優先的に解の候補とする手法で最小位数のフィードバック節点集合を求めるアルゴリズムの構築を実現した(図 2)。分解された各クリークに対して、それらが有する閉路(三角形)が存在しなくなるように削

除する節点を選ぶ。この時、多くのクリークで共通に含まれる節点から削除することでフィードバック集合の大きさを小さくすることが可能である。ただし、非退化型円弧グラフは全ての三角形を除去しても長さ4以上の閉路（外周）がグラフに残留する場合もあるので、極力、外周を残さないで全ての三角形を削除するようにアルゴリズムを工夫した。それでもなお、外周が残されるケースでは、後処理として外周に必ず含まれるバックアークと呼ばれる節点の1つを除去することで位数最小のフィードバック節点集合の導出を行う方法を取り入れた。

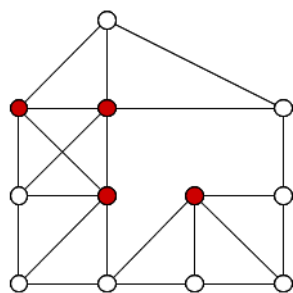
非退化型円弧グラフの全極大クリーク分解には効率的なアルゴリズムが知られており、我々はこれをアルゴリズムの前処理に取り込むことで効率的な問題解決アルゴリズム実現を行った。



(a) 円弧グラフ



(b) 極大クリーク分解例



(c) フィードバック節点集合

図2 FVS問題の解法案

テーマ(2)区間グラフ、置換グラフ上の迂回度最大要節点の導出アルゴリズムの開発。

これまでに、区間グラフ、置換グラフ、それぞれに対して、要節点問題を解く線形時間の最適アルゴリズムが開発されていた。本テ

ーマで、我々は新たに迂回度という概念を導入するが、1つの要節点の削除によって影響を受ける（最短距離が長くなる）節点对の組み合わせ数は、節点数の2乗に比例するということが、調査段階で判明していた。よって、要節点数が n 個存在するグラフを想定すると、迂回度最大の要節点を導出するのに $O(n^3)$ 時間の計算量を要することになり、決して効率的な手法とはいえなかった。この問題点の改善にあたり、ある1つの要節点(仮に v)の削除によって、最も悪影響を受ける(すなわち、最短距離が最も長くなる)節点对の候補(仮に x, y)を、対象とする各交差グラフの幾何学的特徴を利用して、一定の時間内で検出する方法を考案した。この方法によって、各要節点(v)の削除後の節点对(x, y)の距離を導出し、それが最大値となる要節点 v を迂回度最大要節点として導出する。区間グラフ、置換グラフとも任意の2節点間の最短距離を導出する $O(n)$ 時間アルゴリズムが既に存在しているので、要節点導出アルゴリズムとこれらの手法を適合することで、迂回度最大の要節点を導出する。

4. 研究成果

テーマ(1):非退化型円弧グラフにおける最小フィードバック節点集合の導出アルゴリズムの開発。

対象グラフを極大クリーク分解し、各クリークから全ての閉路（三角形）を除去するために、多くのクリークで共有される節点を優先的に削除し、さらに長さ4以上の閉路（外周）も可能な限り同時に削除するような手法を試みた。これにより、計算量 $O(n+m)$ 時間で非退化型円弧グラフにおける最小フィードバック節点集合を導出するアルゴリズムの構築に成功した。非退化型円弧グラフは周期性をもつ制御システム、たとえば、信号機や周期的スケジュール管理等のモデルに利用されることから、この成果はこれらの特徴を有するシステムの動作解析等に利用可能である。

テーマ(2)区間グラフ、置換グラフ上の迂回度最大要節点の導出アルゴリズムの開発。

両グラフともそれらの幾何学的特徴を利用して、一定の時間内で与えられた2節点間の最短距離を導出する方法を考案した。これにより、1つの要節点に対して局所的にその手法を適応させて要節点の迂回度を導出することに成功した。要節点が複数個存在した場合でも、局所的に手続きを適応させることで、仕事量を抑え、計算量 $O(n^2)$ のアルゴリズムを開発することができた。これにより、たとえば、区間グラフや置換グラフをモバイルコンピュータネットワークに置き換えた場合、メンテナンスコストに制限がある状況下等で、最も経済的・有効的なネットワークシステム頑健化に応用可能である。

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 3 件)

Hirotooshi Honma, Yoko Nakajima, Shino Nagasaki, A Parallel Algorithm for Spanning Tree Problem on a Certain Class of Circle Trapezoid Graphs, 査読有, International Journal of Information Engineering, Vol.5, No.2, pp.1-8, 2016. (<http://www.vkingpub.com/Journal/IJIE/273.html>)

Hirotooshi Honma, Yoko Nakajima, Yuta Igarashi, Shigeru Masuyama, Algorithm for Identifying the Maximum Detour Hinge Vertices of a Permutation Graph, 査読有, IEICE Trans. Information and Systems, Vol.E99D, No.2, pp.514-524, 2016. (DOI:10.1587/transfun.E98.A.1161)

Hirotooshi Honma, Yoko Nakajima, Yuta Igarashi, Shigeru Masuyama, Algorithm for Finding Maximum Detour Hinge Vertices of Interval Graphs, 査読有, IEICE Trans. Fundamentals, Vol.E97A, No.6, pp.1365-1369, 2014. (DOI:10.1587/transfun.E97.A.1365)

〔学会発表〕(計 3 件)

本間宏利, 区間グラフにおける最大影響度の要節点導出アルゴリズム, 日本オペレーションズ・リサーチ学会秋季研究発表会, 九州工業大学, 2015-9.

Hirotooshi Honma, An Algorithm for Solving the Maximum Detour Hinge Vertices Problem of a Permutation Graph, The 4th International Symposium on Technology for Sustainability, ID085, National Taipei University of Technology, Nov., 2014.

Hirotooshi Honma, An Algorithm for Minimum Feedback Vertex Set Problem on a Non-degenerate Circular-arc Graph, The 24th Fuzzy, Artificial Intelligence, Neural Networks and Computational Intelligence, Kitami Institute of Technology, Sep., 2014

〔その他〕

ホームページ:

<http://www.kushi-ro-ct.ac.jp/jjackpot/home/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

本間 宏利 (HONMA Hirotooshi)

釧路工業高等専門学校・情報工学科・准教授

研究者番号: 80249721

(2)研究分担者

中島 陽子 (NAKAJIMA Yoko)

釧路工業高等専門学校・情報工学科・助教
研究者番号: 20217730

(3)連携研究者

増山 繁 (MASUYAMA Shigeru)

豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号: 60173762