

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 13 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24650003

研究課題名(和文) 超大複雑ネットワークの高次探索：グラフ分解理論から実用高速アルゴリズムへの挑戦

研究課題名(英文) High-Level Processing of Huge-Scale Networks: Challenges from Graph Decomposition Theory to Practically Efficient Algorithms

研究代表者

今井 浩 (Imai, Hiroshi)

東京大学・情報理工学(系)研究科・教授

研究者番号：80183010

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円、(間接経費) 900,000円

研究成果の概要(和文)：Webリンクグラフ、社会ネットワークや巨大地図グラフなどの超大規模ネットワークを、その規模を乗り越えて高速・高次処理するアルゴリズムの設計・解析を目指して、グラフ・ネットワーク理論の基礎成果も創出しながら研究を進めた。具体的には、グラフマイナー理論を超大複雑ネットワークに適用し、情報流通の核となるコア部分と、その他の木的な部分に分解するコア木分解を新たに、その性質を活用した高速最短路クエリ・到達可能性クエリを処理するアルゴリズムを与えた。指数時間アルゴリズムの観点から、厳密に解ける問題サイズを倍などにするということについても固定パラメタ計算複雑度解析を行い、量子計算問題にも適用した。

研究成果の概要(英文)：For huge-scale networks such as Web link graph, social network and map road network, we aim at developing fast and high-level graph data processing based on graph minor theory and related fields, together with deriving new fundamental results in those fields. Specifically, we develop a new graph decomposition, called a core-tree decomposition, as a model for complex networks, and by making use of this model with its nice characteristics, we devise new fast algorithms for shortest-path queries and reachability queries on these huge-scale social networks. Exact exponential algorithms are also investigated to enhance the wide use of exact solutions of moderately large graphs for NP-hard intractable problems by presenting a class of tractable problems having small graph parameters which hold for large social networks. Some applications to quantum computing are also shown.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・情報学基礎

キーワード：アルゴリズム理論 グラフマイナー理論 指数時間アルゴリズム ビッグデータ

1. 研究開始当初の背景

並列コンピュータの計算能力の向上に伴い数億点の大規模グラフの問題が解明されつつある。Graph500 という並列コンピュータの多面的解析を目指すベンチマークでは、1.1PB までの超大グラフにおける幅探索が課題とされるが、並列コンピュータでの実装方式が主目的であり、超大グラフに対する大本のグラフアルゴリズム自体の開発を目指したのではない。

一方、数十コアまでの汎用的なコンピュータ上で巨大なグラフの問題を高速に解くことも非常に重要である。Web リンクグラフやソーシャルネットワークといった複雑ネットワークから広大な道路網まで幅広い分野の問題に対応するべく、巨大グラフ上での最短路検索等の基礎問題から現実問題に対応した発展問題に至るまで高速解明が求められる。その状況では幅探索する基本的操作だけでなく、繰り返し解くなどの高次な要求がなされる。最短路質問の場合、質問の 2 点に対し、その間の最短距離を即座に回答できるように巨大グラフを前処理しておくことが可能となる。また、大規模な問題に対してグラフを可能な限り分解して、個々の成分を十分に精査しつつ解くことも必要となる。その場合、多項式時間アルゴリズム設計の研究に比べると未解明部分が多く近年とみに進展しつつある指数時間アルゴリズムの効率化というテーマも顕在化する。これら高次機能に対応して、巨大性に対応できるスケラビリティをもつアルゴリズムの開発が必須となるが、理論からは実際の解決に向けての展開がされず、応用面からは各個撃破している現状で、まだこれらの問題に対してアルゴリズム設計の観点からの統一的な研究はなされていない。

本研究グループでは、事前研究段階で千万・億のオーダーの点を有するグラフの最短路質問に瞬時に答える方法の提案と実現、指数時間アルゴリズムの代表的解析手法の測定統治法を凌駕する解析法を提案しており、上記研究目的実現へ向けての準備が整っている。

2. 研究の目的

本研究では、超大グラフでの高次問題に対し、近年のグラフ理論の先端成果を適用して、統一的な方法論での解決を目指す。グラフ理論そのものは、理論的深化およびグラフマイナー理論に代表される体系化が進み、簡単なクラスのグラフへのアルゴリズム設計も行われてきており、グラフの深い構造に根差した漸近的計算量の優れたものが判明しているが、一方で理論を実用高速アルゴリズムへ変換する際には大きな隠れ定数やグラフ尺度の計算の難しさなど壁がある。上記の事前研究成果を基に、事前処理により質問に高速回

答すること、オンライン環境への対応といった高次処理を大規模グラフ処理で可能にすることをやる。その過程で、グラフアルゴリズムの高速化及び指数時間解法でのアルゴリズム設計・解析方法論へのフィードバックを実現する。

3. 研究の方法

グラフ理論の先端理論であるグラフマイナー理論や疎化理論において、アルゴリズム的に解決するべき点を見だし、複雑ネットワークや道路網等の現実に構造をもったグラフの場合の結果を解析する。そのような現実構造に着目した際の指標を、一般グラフの場合で理論的に調べることにより、理論へのフィードバックも実現する。これらの解析を基に最短路質問をより大規模なグラフで近似も一部許容する場合を土台とし、そこで得た知見から同問題でオンライン環境を入れた場合の解析や他のグラフ最適化問題に対するアルゴリズム設計へとつなげていく。この際、超大グラフを対象としてデータ構造面でも先端成果を取り入れてアルゴリズム設計をし、実装を通して実際の高速化度合いを検証する。グラフに対する指数時間アルゴリズムの成果をこれらの枠組みの中に適用し、これによって本研究成果の適用可能範囲を広げる。

4. 研究成果

まずは本グループの先行研究である超大グラフに対する最短路質問問題に対する成果を精査し、そこでの課題点と拡張方向を整理することから研究に着手した。超大複雑ネットワークで開発した最短路質問が効率的に適用できる理由を詳しく調べ、他のクラスの巨大グラフにおいても同様の手法が展開可能となる条件を調査すると同時に、巨大グラフでの高速アルゴリズム構築には、巨大データを効率よく処理できるデータ構造の開発が必要であるため、圧縮データを高速に検索する方法等の先端手法をこの巨大データ構造で展開することについても検討した。そこで大本となるのが対象グラフの木分解であるが、より一般のグラフに展開する際には、木分解で大きな成分を扱うことを検討する必要が出てくる。これまではその成分を扱うのに、一般に単純な動的計画法によってその成分サイズの指数オーダーの時間をかけていたところを、本研究では、最先端の指数時間アルゴリズム設計・解析手法により、適用範囲の拡張を目指した。

具体的には以下の 2 つのテーマを軸として、研究協力者である秋葉・岩田・河村らとともに研究を進めた。

(1) グラフマイナー理論の精査

Web リンクグラフやソーシャルネットワークといった複雑ネットワークや道路網など

の現在超大グラフ構造をもつ代表的なグラフクラスを最初のターゲットとして、そこで最短経路問題での成功のキーとなった木分解で大きな成分が定数個でかつ大きさもほどほどという性質をどこまで拡張できるかについて検討した。さらに、もう1桁大きなグラフの処理も可能な到達可能性クエリに対するアルゴリズムも開発した。

グラフ理論の観点から、上述の大きな成分を1まとまりのコアとして、他の木的な構造とともに、コア木分解と名づけて、その性質を詳細に調べ上げ、解明した性質を活用した超大規模Webグラフ解析アルゴリズムの構築にこぎつけている。

(2) 指数時間アルゴリズムの設計と解析

指数時間探索アルゴリズムの1つのマイルストーンとなっている測定統治法とポテンシャル法について比較を行った。従来の手法についても調査してポテンシャル法の新規性についてあらためて整理した。

また、量子計算でのネットワーク符号化や量子コンピュータの古典シミュレーションの研究を通して、統計物理の基本的問題でグラフの最大カット問題と強く関係するイジングモデルの分配関数計算について、指数時間アルゴリズムの設計と解析を行うことができた。これは、本研究が目標としたグラフ分解理論の普遍性から、物理分野への展開が図れた事例となっており、本研究年度内にスペインでの量子情報処理国際会議でポスター発表に至っている。引き続き、それら成果を国際会議論文発表することに取り組んでいるところである。

(3) グラフ・ネットワークの解析

他に、上記問題にも基礎となるネットワークフローでの耐故障性を、multi-link attackの観点で検討し、その計算量を解析した。また、その一連の研究以前に動的計画法を用いた周辺問題で、楕円曲線暗号の高速実装に関連した問題を、その計算過程を表すグラフ上の問題に帰着した成果もあげた。

超大規模グラフへのさらなる研究として、周期構造を有した無限グラフ(周期グラフ)の種々の離散構造を明らかにし、それが自然界のモデルとして用いられた場合の別のグラフパラメタを与える展開を見せている。

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)なお、申請時の研究協力者については、波線の下線で示した。

[雑誌論文](計 10件)

J.-F. Baffier, V. Suppakitpaisarn, H. Hiraishi, and H. Imai, Parametric Multiroute Flow and its Application to Robust Network with k Edge Failures, Lecture Notes in Computer Science (to appear), 2014, 査読有

Y. Iwata, K. Oka, and Y. Yoshida, Linear-Time FPT Algorithms via Network Flow, Proceedings of the 25th ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms, pp.1749-1761, 2014, 査読有

N. Fu, A. Hashikura, and H. Imai, Proximity and Motion Planning on 1-Rigid Planar Periodic Graphs, Transactions on Computational Science, Vol. XX (LNCS Vol.8110), pp.72-91, 2013, 査読有

T. Akiba, Y. Iwata, and Y. Yoshida, Linear-time enumeration of maximal k -edge-connected subgraphs in large networks by random contraction, Proceedings of the 22nd ACM international conference on Conference on Information & Knowledge Management, pp.909-918, 2013, 査読有

Y. Yano, T. Akiba, Y. Iwata, and Y. Yoshida, Fast and scalable reachability queries on graphs by pruned labeling with landmarks and paths, Proceedings of the 22nd ACM international conference on Conference on information & knowledge management, pp.1601-1605, 2013, 査読有

T. Akiba, Y. Iwata, and Y. Yoshida, Fast exact shortest-path distance queries on large networks by pruned landmark labeling, Proceedings of the 2013 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data, pp.349-360, 2013, 査読有

V. Suppakitpaisarn, M. Eda Hiro, and H. Imai, Fast Elliptic Curve Cryptography Using Optimal Double-Base Chains, Proceedings of the International Conference on Informatics & Application (ICIA2012), pp.190-204, 2012, 査読有

V. Suppakitpaisarn, M. Eda Hiro, and H. Imai, Optimal elliptic curve scalar multiplication using double-base chains, International Journal of Digital Information and Wireless Communications (IJDIWC), Vol.2, pp.115-134, 2012, 査読有

T. Satoh, F. Le Gall, and H. Imai, Quantum network coding for quantum repeaters, Physical Review A 86, 032331, 2012, 査読有

Y. Iwata, Y. Yoshida, Exact and approximation algorithms for the maximum constraint satisfaction problem over the point algebra, Proceedings of the 30th Symposium on Theoretical Aspects of

Computer Science, pp.127-138, 2012, 査読有

〔学会発表〕(計 16 件)

秋葉拓哉, 岩田陽一, 吉田 悠一, 2-Hop ラベルの直接的な計算によるグラフ最短経路クエリ処理の効率化, 第6回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム (DEIM), 2014年3月3日, ウェスティン淡路島, 兵庫県

H. Hiraishi, H. Imai, Y. Iwata, and B. Lin, Representing quantum graph states by binary decision diagrams, Quantum Information Processing 2014, 2014年2月3日, Barcelona, Spain

H. Hiraishi, H. Imai, Y. Iwata, and B. Lin, Linear Rank-Width Bounds for BDD of Quantum Graph States, LA シンポジウム冬, 2014年1月28日, 京都大学, 京都府

平栗勇人, 平石秀史, 今井浩, 二分決定図を用いた量子グラフ状態の表現, 第29回量子情報技術研究会(QIT29), 2013年11月18日, 早稲田大学, 東京都

T. Akiba, Y. Iwata, and Y. Yoshida, Fast Exact Distance Queries on Large Networks by Pruned Shortest-Path Trees, Third Workshop on Algorithms for Large-Scale Information Processing (ALSIP 2012), 2012年11月30日, 宮崎観光ホテル, 宮崎県

今井 浩, 平栗 勇人, 平石 秀史, 夫紀恵, イジング分配関数の古典・量子計算について, 第27回量子情報技術研究会(QIT27), 2012年11月27日, 慶應義塾大学日吉キャンパス, 神奈川県

N. Fu, Y. Hirakuri, H. Imai, and A. Motoyama, Quantum states associated with 2D periodic graph, Asian Quantum Information Science Conference (AQIS2012), 2012年8月23日, 蘇州, 中華人民共和国

平栗 勇人, 夫 紀恵, 今井 浩, 元山明, 点マイナーによる Archimedean タイリングの万能量子計算能力性の証明, 夏の LA シンポジウム, 2012年7月18日, 宮津ロイヤルホテル, 京都府

元山 明, 夫 紀恵, 平栗 勇人, 今井 浩, グラフマイナーによる二次元連結周期グラフの unbounded rank-width 性の証明とその量子計算能力, 夏の LA シンポジウム, 2012年7月18日, 宮津ロイヤルホテル, 京都府

C. Chuengsatiansup, H. Imai, and V. Suppakitpaisarn, Evaluating Optimized Computation in Double-Base Chain for Efficient Elliptic Curve Cryptography, 15th Japan-Korea Joint Workshop on Algorithms and Computation, 2012年7月10日, 国立情報学研究所, 東京都

N. Fu, A. Hashikura and H. Imai, Geometrical treatment of periodic graphs with coordinate system using axis-fiber and an application to a motion planning, The 9th International Symposium on Voronoi Diagrams in Science and Engineering, 2012年6月27日, ニュージャージー, アメリカ合衆国

V. Suppakitpaisarn, M. Edahiro, and H. Imai, Optimal Average Joint Hamming Weight for Asymmetric Representation, 電気情報通信学会コンピュータシオン研究会, 2012年06月21日, 北海道大学, 北海道

T. Tanuma and H. Imai, Notes on weighted Delaunay triangulations and discrete Ricci flow, 電子情報通信学会コンピュータシオン研究会, 2012年06月21日, 北海道大学, 北海道

V. Suppakitpaisarn, M. Edahiro, and H. Imai, Fastest Multi-Scalar Multiplication Based on Optimal Double-Base Chains, World Congress on Internet Security (WorldCIS-2012), 2012年6月10日, オンタリオ, カナダ

T. Satoh, F. Le Gall, H. Imai, Quantum network coding for quantum repeaters, The 7th Conference on Theory of Quantum Computation, Communication, and Cryptography, 2012年5月17日, 東京大学, 東京都

平石秀史, 今井浩, 森山園子, 三値マトロイドの生成と White の予想に関する実験, 電子情報通信学会コンピュータシオン研究会, 2012年4月27日, 大阪府立大学, 大阪

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

6 . 研究組織

(1)研究代表者

今井 浩(IMAI, Hiroshi)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・教授

研究者番号：80183010

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし

【研究協力者】

- 河村 彰星(KAWAMURA, Akitoshi)
東京大学・大学院情報理工学系研究科・助教
- 秋葉 拓哉(AKIBA, Takuya)
東京大学・大学院情報理工学系研究科・博士課程学生
- 岩田 陽一(IWATA, Yoichi)
東京大学・大学院情報理工学系研究科・博士課程学生