

令和 6 年 5 月 28 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2023

課題番号：19K11824

研究課題名(和文)大域的分散グラフアルゴリズムに対するパラメタライズド手法の確立

研究課題名(英文)Parameterized Approaches for Large-Scale Distributed Graph Algorithms

研究代表者

泉 泰介 (Izumi, Taisuke)

大阪大学・大学院情報科学研究科・准教授

研究者番号：20432461

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：分散グラフアルゴリズムにおけるパラメタライズド手法の研究を行い、多様な分散アルゴリズムの研究に関して結果を得た。特筆すべき成果として以下の3点を挙げる：(1)低競合ショートカットの構成可能性とさまざまなグラフパラメータの関係性の解明、(2)木幅に関する固定パラメータアルゴリズムの効率的な分散化、(3)最大マッチング問題に対する、出力サイズの線形時間パラメタ化分散アルゴリズムの提示。これらの3件は、分散並列処理に関するアルゴリズム研究の分野におけるトップカンファレンス(DISC、SPAA、SODA)へと採択された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、入力インスタンスの困難性に応じた最適な計算時間を達成する分散アルゴリズムをパラメタ化アルゴリズムの文脈から模索した。パラメタ化アルゴリズムは単一計算機上で動作するアルゴリズム(集中型アルゴリズム)において、現実的な入力の下で高速に動作するアルゴリズムを実現するための設計パラダイムとして成功を収めているが、分散アルゴリズムの文脈においては同様の手法は発展していない状況であった。本研究ではいくつかの重要な基本問題に対して新たなパラメタ化分散アルゴリズムを提案している。上述の通り、いずれの成果も当該分野のトップカンファレンスに採択されており、その成果の学術的波及効果は高い。

研究成果の概要(英文)：We conducted research on parameterized distributed graph algorithms. For various models and problems of distributed computation, we obtained novel algorithms with respect to parameterization. Notable achievements include the following three results: (1) the efficiency of low-congestion shortcuts and their relationship with various graph parameters, (2) efficient distributed implementations of fixed-parameter (centralized) algorithms with respect to treewidth, and (3) a new maximum matching distributed algorithm running in the linear time of output matching sizes. These three items were accepted at top conferences DISC, SPAA, and SODA in the field of algorithms and distributed and parallel computation.

研究分野：アルゴリズム

キーワード：分散アルゴリズム 計算複雑性 固定パラメータ容易性 グラフアルゴリズム

1. 研究開始当初の背景

複数の計算機が通信リンクで相互接続した分散システムにおいて、ネットワークのトポロジカルな構造に立脚した何らかの組み合わせ最適化問題(最短経路問題、彩色問題等)をネットワーク自身が計算したいという要求は自然な問題設定であり、また多くの応用が存在する。分散グラフアルゴリズムとは、複数の計算機が通信リンクで相互接続した分散システムにおいて、ネットワークのトポロジカルな構造を入力データと見なしてグラフアルゴリズムを実行する枠組みである。分散グラフアルゴリズムの理論解析は、直近の10年間における分野全体の主要な研究トピックとして数多くの研究が成されており、その最悪時効率性の解析技法が大きく発展してきた。その一方で、最悪時評価と実用的なアルゴリズムのパフォーマンスとの間には大きなギャップが存在しており、そこを埋めるためのより精緻な理論が求められていた。本研究はこのギャップを埋めるためのアプローチとして、パラメタ化アルゴリズムの技法に着目した。パラメタ化アルゴリズムは単一計算機上で動作するアルゴリズム(集中型アルゴリズム)において、現実的な入力の下で高速に動作するアルゴリズムを実現するための設計パラダイムとして成功を収めているが、分散アルゴリズムの文脈においては同様の手法は発展していない状況であった。

2. 研究の目的

このような状況に対して、本研究では、グラフ理論の基本的な諸問題のうち、特に求解のために大域的な情報収集を必要とする問題(大域的な問題)を対象とし、入力インスタンスの困難性に応じた最適な計算時間を達成する分散グラフアルゴリズムをパラメタライズドアルゴリズムの文脈から模索した。研究のゴールは、大域的な問題である最小カット、全域木、最短経路問題、マッチングといった諸問題に対して、パラメタ化アルゴリズムの技法を導入することでより現実に即した効率的なアルゴリズムを設計すること、およびパラメタ化分散グラフアルゴリズム設計のための体系的な理論を構築することである。

3. 研究の方法

集中型アルゴリズムの理論におけるパラメタ化アルゴリズムの枠組みに習い、本計画では

(1) 解のサイズに注目したパラメタ化アプローチ

(2) グラフパラメタに注目したアプローチ

の2側面から研究を遂行した。鍵となる技術は研究代表者が過去に発展させてきた設計技法のひとつである低競合ショートカットと呼ばれる概念である。この技法を軸としつつ、パラメタ化分散グラフアルゴリズムのための新たな設計技法の探求や、最大マッチング問題のような、過去に本研究で対象としているアプローチが試みられなかった新たな問題に取り組んだ。

4. 研究成果

研究成果は、分散グラフアルゴリズムの研究を中心としつつ、その関連研究(量子分散計算、自己安定アルゴリズム、集中型の固定パラメタアルゴリズム、遷移問題等)も含めた多様な成果を挙げた。特筆すべき成果として以下の3つを挙げる。

(1) 低競合ショートカットの手法に基づく、各種グラフパラメタと分散グラフアルゴリズム計算量の関係解明

(2) 木幅制限グラフに対する効率的な分散グラフアルゴリズムの統一的設計手法の提案

(3) 最大マッチング問題に対する高速なパラメタライズド分散アルゴリズムの発見

以下はこれらの成果の詳細を述べる。

(1) 低競合ショートカットの手法に基づく、各種グラフパラメタと分散グラフアルゴリズム計算量の関係解明

低競合ショートカットとは、入力が制限されたグラフに対して効率的に並列集合通信操作を実現するための一種のメタ分散アルゴリズムである。同手法を用いることで、例えば平面的グラフのようなグラフクラスに対して、大域的な問題に対する効率的な分散グラフアルゴリズムが設計可能であることが知られている。本研究では、この技法により得られるアルゴリズムの効率性とグラフパラメタとの関係性について研究を行った。具体的には代表的な4つのグラフパラメタ(コーダリティ、ダブリング次元、直径、クリーク幅)について検討を行った。このうち、コーダリティ、ダブリング次元、直径に関しては、それが小さいグラフに対してはより効率的な低競合ショートカットの実現が可能であることが判明した。一方でクリーク幅についてはパラメ

タ値が十分小さくとも、既存の最悪時下界を破れないことが示された。この結果は分散アルゴリズム分野のトップカンファレンスの一つである DISC2019 にて発表され、またその結果を拡張した内容が分野最難関ジャーナルの一つである Distributed Computing 誌に採択されている。

(2)木幅制限グラフに対する効率的な分散グラフアルゴリズムの統一的设计手法の提案

グラフの木幅とは、直感的にはそのグラフがどの程度木に近い構造を持つか、を表す指標である。木幅は、集中型のパラメタ化アルゴリズムの理論において最も重要なパラメタの一つであり、多くの計算困難な組み合わせ最適化問題について、入力を木幅の小さなグラフに制限した場合は効率的なアルゴリズムが構成可能であることが知られている。本研究では、分散グラフアルゴリズムにおいて同様のパラメタ化手法を実現するために枠組みについて研究を行い、以下のような成果を得た。

- 木分解を近似的に計算するための効率的な分散アルゴリズムを提案した。木分解は、木幅の小さいグラフを処理するための基本的な前処理の一つであり、木幅に関するパラメタ化アルゴリズムの構成におけるきわめて重要なビルディングブロックである。木分解の良し悪しは分解の幅と呼ばれる指標により評価されるが、本研究の提案アルゴリズムは、幅に関する緩い近似を許すことで従来手法よりも高速に動作する。
- いくつかの基本問題に対して、木幅の小さいグラフに対して高速に動作する分散グラフアルゴリズムを提案した。具体的には、距離ラベリングスキーム、二部マッチング、内周計算に対する高速なアルゴリズムを提案した。これらの問題の共通項は、いずれの問題もある種の制約下での最短パス発見問題へと帰着が可能であるということであり、提案アルゴリズムの核となるアイデアはこの制約付き最短パス発見問題に対して統一的な解法を与えた点にある。

本研究の結果は分散・並列処理のトップカンファレンスの一つである SPAA2022 にて発表されている。

(3)最大マッチング問題に対する高速なパラメタライズド分散アルゴリズムの発見

出力サイズの線形時間で解を求める、最大マッチング計算のために分散アルゴリズムを設計した。最大マッチングの計算はグラフアルゴリズムの理論における極めて古典的な問題である。一般グラフのマッチングは集中型アルゴリズムの文脈においてはそれを効率的に解く方法が知られているものの、そのアルゴリズムの構造は複雑であり、効率的な分散アルゴリズムとして実現することを妨げるいくつかの障壁が存在した。本研究はこの障壁を乗り越えるいくつかの新しい構造定理を証明し、それに基づくアルゴリズムを提案した。本研究の提案アルゴリズム以前には、一般グラフ上での最大マッチングの計算は自明な集中型手法のシミュレーション(ネットワークの全情報を 1 ノードに集めて解を求める)に基づく手法よりも高速な解法は知られておらず、提案手法は現時点において非自明な計算時間を達成する唯一のアルゴリズムである。この成果はアルゴリズム理論における最難関会議である SODA2024 にて発表されている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計18件（うち査読付論文 18件 / うち国際共著 6件 / うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 Izumi Taisuke, Kitamura Naoki, Naruse Takamasa, Schwartzman Gregory	4. 巻 -
2. 論文標題 Fully Polynomial-Time Distributed Computation in Low-Treewidth Graphs	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proc. of International Symposium on Parallelism in Algorithms and Architectures (SPAA)	6. 最初と最後の頁 11 - 22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3490148.3538590	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 KITAMURA Naoki, IZUMI Taisuke	4. 巻 E105.D
2. 論文標題 A Subquadratic-Time Distributed Algorithm for Exact Maximum Matching	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Information and Systems	6. 最初と最後の頁 634 - 645
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transinf.2021edp7083	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Dong Rongcheng, Sudo Yuichi, Izumi Taisuke, Masuzawa Toshimitsu	4. 巻 937
2. 論文標題 Loosely-stabilizing maximal independent set algorithms with unreliable communications	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Theoretical Computer Science	6. 最初と最後の頁 69 - 84
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.tcs.2022.09.031	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Dong Rongcheng, Sudo Yuichi, Izumi Taisuke, Masuzawa Toshimitsu	4. 巻 -
2. 論文標題 Loosely-Stabilizing Maximal Independent Set Algorithms with Unreliable Communications	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proc. of International Symposium on Stabilizing, Safety, and security of Distributed Systems	6. 最初と最後の頁 335 ~ 349
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-91081-5_22	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kitamura Naoki, Kitagawa Hirotaka, Otachi Yota, Izumi Taisuke	4. 巻 34
2. 論文標題 Low-congestion shortcut and graph parameters	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Distributed Computing	6. 最初と最後の頁 349 ~ 365
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00446-021-00401-x	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Sudo Yuichi, Eguchi Ryota, Izumi Taisuke, Masuzawa, Toshimitsu	4. 巻 -
2. 論文標題 Time-Optimal Loosely-Stabilizing Leader Election in Population Protocols	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proc. of 35th International Symposium on Distributed Computing (DISC 2021)	6. 最初と最後の頁 40:1 ~ 40:17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4230/LIPIcs.DISC.2021.40	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yuichi Sudo, Fukuhito Ooshita, Taisuke Izumi, Hirotsugu Kakugawa, Toshimitsu Masuzawa	4. 巻 33
2. 論文標題 Time-Optimal Leader Election in Population Protocols	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems	6. 最初と最後の頁 2620-2632
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TPDS.2020.2991771	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Taisuke Izumi, Yota Otachi	4. 巻 無し
2. 論文標題 Sublinear-Space Lexicographic Depth-First Search for Bounded Treewidth Graphs and Planar Graphs	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 47th International Colloquium on Automata, Languages, and Programming (ICALP 2020)	6. 最初と最後の頁 67:1-67:17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4230/LIPIcs.ICALP.2020.67	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ryota Eguchi, Naoki Kitamura, Taisuke Izumi	4. 巻 無し
2. 論文標題 Fast Neighborhood Rendezvous	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 2020 IEEE 40th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS)	6. 最初と最後の頁 168-178
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ICDCS47774.2020.00030	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Taisuke Izumi, Francois Le Gall, Frederic Magniez	4. 巻 無し
2. 論文標題 Quantum Distributed Algorithm for Triangle Finding in the CONGEST Model.	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 37th International Symposium on Theoretical Aspects of Computer Science (STACS 2020)	6. 最初と最後の頁 23:1-23:13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4230/LIPIcs.STACS.2020.23	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Yuval Emek, Noga Harlev, Taisuke Izumi	4. 巻 無し
2. 論文標題 Towards Distributed Two-Stage Stochastic Optimization.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 23rd International Conference on Principles of Distributed Systems (OPODIS 2019)	6. 最初と最後の頁 32:1-32:16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4230/LIPIcs.OPODIS.2019.32	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Yuichi Sudo, Fukuhito Ooshita, Taisuke Izumi, Hirotsugu Kakugawa, Toshimitsu Masuzawa	4. 巻 無し
2. 論文標題 Brief Announcement Logarithmic Expected-Time Leader Election in Population Protocol Model.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 2019 ACM Symposium on Principles of Distributed Computing, PODC 2019, Toronto, ON, Canada, July 29 - August 2, 2019.	6. 最初と最後の頁 60-62
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3293611.3331585	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Taisuke Izumi, Francois Le Gall	4. 巻 無し
2. 論文標題 Quantum Distributed Algorithm for the All-Pairs Shortest Path Problem in the CONGEST-CLIQUE Model.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 2019 ACM Symposium on Principles of Distributed Computing, PODC 2019, Toronto, ON, Canada, July 29 - August 2, 2019.	6. 最初と最後の頁 84-93
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3293611.3331628	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shimon Bitton, Yuval Emek, Taisuke Izumi, Shay Kutten	4. 巻 無し
2. 論文標題 Brief Announcement: Message Reduction in the LOCAL Model is a Free Lunch.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 2019 ACM Symposium on Principles of Distributed Computing, PODC 2019, Toronto, ON, Canada, July 29 - August 2, 2019.	6. 最初と最後の頁 300-302
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3293611.3331582	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Michael Dinitz, Magnus M. Halldorsson, Taisuke Izumi, Calvin Newport	4. 巻 無し
2. 論文標題 Distributed Minimum Degree Spanning Trees.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 2019 ACM Symposium on Principles of Distributed Computing, PODC 2019, Toronto, ON, Canada, July 29 - August 2, 2019.	6. 最初と最後の頁 511-520
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3293611.3331604	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Yuichi Sudo, Fukuhito Ooshita, Taisuke Izumi, Hirotsugu Kakugawa, Toshimitsu Masuzawa	4. 巻 無し
2. 論文標題 Logarithmic Expected-Time Leader Election in Population Protocol Model.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Stabilization, Safety, and Security of Distributed Systems - 21st International Symposium, SSS 2019, Pisa, Italy, October 22-25, 2019, Proceedings	6. 最初と最後の頁 323-337
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-34992-9_26	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shimon Bitton, Yuval Emek, Taisuke Izumi, Shay Kutten	4. 巻 無し
2. 論文標題 Message Reduction in the LOCAL Model Is a Free Lunch.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 33rd International Symposium on Distributed Computing, DISC 2019, October 14-18, 2019, Budapest, Hungary.	6. 最初と最後の頁 7:1-7:15-
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4230/LIPIcs.DISC.2019.7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Naoki Kitamura, Hirotaka Kitagawa, Yota Otachi, Taisuke Izumi	4. 巻 無し
2. 論文標題 Low-Congestion Shortcut and Graph Parameters.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 33rd International Symposium on Distributed Computing, DISC 2019, October 14-18, 2019, Budapest, Hungary.	6. 最初と最後の頁 25:1-25:17-
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4230/LIPIcs.DISC.2019.25	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計8件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 芦田雄斗, 北村直暉, 泉 泰介, 増澤利光
2. 発表標題 最短経路の最致命辺問題のパラメータ化複雑性
3. 学会等名 電子情報通信学会 コンピューテーション研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 成瀬 隆昌, 泉 泰介, 金 鎔煥, 片山 喜章
2. 発表標題 Hybrid networkモデルにおける高速な木分解アルゴリズム
3. 学会等名 第17回 情報科学ワークショップ
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 北村 直暉, 泉 泰介
2. 発表標題 CONGEST モデルにおける最大マッチングのための劣二乗アルゴリズム
3. 学会等名 第17回 情報科学ワークショップ
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤 僚祐
2. 発表標題 k-極大独立集合検証問題の分散計算複雑性
3. 学会等名 2020年度冬のLAシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 銚館 歩
2. 発表標題 ユークリッド辺重みをもつ単位円盤グラフにおける最小全域木問題の分散計算複雑性
3. 学会等名 2020年度冬のLAシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 柿澤一輝
2. 発表標題 地図を持つエージェントの平均的に高速なランデブーアルゴリズム
3. 学会等名 情報処理学会第175回アルゴリズム研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 泉泰介
2. 発表標題 On Hardness of Sublinear-Space Lex-DFS for Graphs of Maximum Degree Three
3. 学会等名 情報処理学会第174回アルゴリズム研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 北村直暉
2. 発表標題 Low-Congestion Shortcut and Graph Parameters
3. 学会等名 2019年夏のLAシンポジウム
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	金 鎔煥 (Kim Yonghwan) (50756773)	名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・助教 (13903)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
イスラエル	イスラエル工科大学(テクニオン)			
アイスランド	レイキャビク大学			