

令和元年6月14日現在

機関番号：17104

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K16006

研究課題名(和文)幾何データに対する省領域アルゴリズムと時間・領域トレードオフ

研究課題名(英文)Space Efficient Algorithms and Time-Space Trade offs for Geometric Data

研究代表者

齋藤 寿樹(Saitoh, Toshiki)

九州工業大学・大学院情報工学研究院・准教授

研究者番号：00590390

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：ビッグデータの利活用のための効率的なアルゴリズムが求められているが、ビッグデータのすべてをメモリに格納して処理することはできないため、省領域のアルゴリズムが必要とされている。本研究では、幾何的なデータに対する効率的な省領域アルゴリズムを開発を行った。特に区間およびそれを拡張した円弧に対する効率的なアルゴリズムを提案した。また、省領域で動作するデータ構造を実装し、その効率性について調査を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、区間を中心とした幾何データに対する効率的な省領域アルゴリズムを開発した。提案したアルゴリズムは任意の入力サイズおよび計算領域で動作するため、どれだけ巨大なデータでも必ず停止することを保証している。本アルゴリズムを適用することにより、様々な高次元のデータに対する近似アルゴリズムの開発などを考えることができる。

研究成果の概要(英文)：We require efficient algorithms for big data. However, we cannot store the data into memory because of the size of the data. We need efficient algorithms which work in the sub-linear space. In this research, we developed space efficient algorithms for geometric data. Especially, we proposed efficient algorithms on intervals and circular arcs. We also investigated the effectiveness of the space efficient data structures by the computer experiments.

研究分野：アルゴリズム理論

キーワード：アルゴリズム データ構造 グラフ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

#### 1. 研究開始当初の背景

近年、センサーの高性能化やスマートフォンの普及により、センサーネットワークやソーシャルネットワークなどの膨大なデータ、ビッグデータが至る所に点在し、それらビッグデータを利活用するための効率的なアルゴリズムが必要となってきた。現在のビッグデータの規模は数ペタバイト、もしくはゼタバイトと言われており、この量のデータを格納するメモリが搭載された計算機を用意することは現代では到底できない。これまでアルゴリズム理論において、多項式時間・多項式領域のアルゴリズムは効率的であるとされてきたが、ビッグデータに対しては、線形領域のアルゴリズムですら動作しないのである。そこで、データサイズよりも小さい、線形未満の計算領域で動作する省領域アルゴリズムの開発が必要とされている。

#### 2. 研究の目的

本研究では、ビッグデータに耐性を持つ省領域アルゴリズムの開発を目指す。特に現実の問題では様々な幾何データが入力として与えられることが想定されるため、幾何データに対する省領域アルゴリズムの開発を行う。また、アルゴリズムの動作をより精細に解析するため、計算機実験を行い、省領域アルゴリズムに対する精度の高い解析技法を考案する。そして、理論的に評価された領域計算量と時間計算量のトレードオフが実際の計算機上における指標として優れたものであるかを計算機実験により検証する。

#### 3. 研究の方法

研究代表者はこれまでに区間上における独立集合問題に対する省領域アルゴリズムを開発した。本研究では、このアルゴリズムを拡張し、区間上における未解決の問題、特に各区間に重みを与えた重み付きの最適化問題に対する省領域アルゴリズムの開発を行う。また、開発したアルゴリズムを計算機上で実装し、省領域アルゴリズムの計算量解析を検証する。特に、理論的に得られた領域計算量と時間計算量のトレードオフの関係を実際の計算機上で調査する。さらに、計算機実験によりアルゴリズムの動作を詳細に解析し、省領域アルゴリズムに対する精度の高い計算量を算出するための解析手法を開発する。また、この動作解析により得られた成果を活用し、アルゴリズムの改善へとつなげる。

#### 4. 研究成果

(1) David Kirkpatrick 氏 (UBC) とともに、区間の集合に対する劣線形領域データ構造を用いた効率的なアルゴリズムを開発した。この区間の集合は、数直線を塩基配列や時間軸と見ることにより、バイオインフォマティクスやスケジューリングなど、数多くの巨大データが存在し、効率的なアルゴリズムが求められている。これまで Temporal Priority Queue と呼ばれる優先度付きキューを拡張したデータ構造を提案し、そのデータ構造を用いて区間に対する独立集合や支配集合などの単純な問題に対するアルゴリズムを提案した。David Kirkpatrick 氏と一層、研究議論を進めることができ、それらを一般化した数多くの問題に対する汎用的なアルゴリズム技術の開発に成功した。また、Tom van der Zanden 氏 (ユトレヒト大学) らと区間を拡張した円弧と呼ばれる幾何構造に対する独立集合および支配集合を解く省領域アルゴリズムを行うとともに、重み付き区間上の独立集合に対する省領域アルゴリズムを開発した。

(2) 省領域アルゴリズムの計算機実験を行った。省領域で動作し、理論的に優れたデータ構造として、Navigation pile が知られている。このデータ構造を実装し、ソーティングを例に単純な優先度付きキューであるヒープとの比較を行った。実験の結果、特殊な場合にのみ Navigation pile は優れていることが示され、これは理論的な計算時間の解析と実装による計

算機実験のギャップを見つけることができた．このギャップを埋めるための高速化やギャップを考慮した計算モデルもしくは解析技法の開発などが今後の課題として挙げられる．

(3) トークンスワッピングは計算科学における最も重要な問題であるソーティングと密接に問題である．本研究では，トークンスワッピングやその関連問題に対する計算困難性の証明や効率的アルゴリズムの開発を行った．特に，トークンスワッピング問題に対する計算複雑度が未解決とされていたのに対し，本研究ではトークンスワッピング問題が NP-困難であることを証明するとともに，限定された入力のグラフにおいては効率的に解くことができることを示している．

(4) 集合族をコンパクトに表現するデータ構造であるゼロサプレス型二分決定グラフ (ZDD) およびそれを効率的に構築するフロンティア法が近年，注目を集めている．本研究では，これらの手法を用いて，平面的な幾何構造である最長片道切符を高速に求めるアルゴリズムの開発や，文字型のグラフ構造を列挙するアルゴリズムを開発した．また，これらのアルゴリズムを拡張し，コーダルグラフや区間グラフと呼ばれる幾何構造を表現として持つグラフを効率的に列挙するアルゴリズムを開発した．

## 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 16 件)

1. J. Kawahara, T. Saitoh, H. Suzuki and R. Yoshinaka: “Colorful Frontier-based Search: Implicit Enumeration of Chordal and Interval Subgraphs,” Special Event on Analysis of Experimental Algorithms, LNCS, to appear, June, 2019, 査読有.
2. K. Yamanaka, E.D. Demaine, T. Horiyama, A. Kawamura, S. Nakano, Y. Okamoto, T. Saitoh, A. Suzuki, R. Uehara, T. Uno: “Sequentially Swapping Colored Tokens on Graphs,” Journal of Graph Algorithms and Application, vol. 23, no. 1, pp. 3-27, 2019 (DOI:10.7155/jgaa.00482), 査読有.
3. J. Kawahara, T. Saitoh, R. Yoshinaka: “The Time Complexity of Permutation Routing via Matching, Token Swapping and a Variant,” Journal of Graph Algorithms and Applications, vol. 23, no. 1, pp. 29-70, 2019 (DOI:10.7155/jgaa.00483), 査読有.
4. T. Feng, T. Horiyama, Y. Okamoto, Y. Otachi, T. Saitoh, T. Uno and R. Uehara: “Computational Complexity of Robot Arm Simulation Problems,” International Workshop on Combinatorial Algorithms (IWOCA 2018), LNCS, vol. 10979, pp. 177-188. July, 2018. (DOI:10.1007/978-3-319-94667-2\_15), 査読有.
5. K. Yamanaka, T. Horiyama, J. M. Keil, D.G. Kirkpatrick, Y. Otachi, T. Saitoh, R. Uehara, Y. Uno: “Swapping colored tokens on graphs,” Theoretical Computer Science, vol. 729, pp. 1-10, 2018, June. (DOI:10.1016/j.tcs.2018.03.016), 査読有.
6. T. Akagi, T. Araki, T. Horiyama, S. Nakano, Y. Okamoto, Y. Otachi, T. Saitoh, R. Uehara, T. Uno and K. Wasa: “Exact Algorithms for the Max-Min Dispersion Problem,” 12th International Frontiers of Algorithmics Workshop (FAW 2018), LNCS, vol. 10823, pp. 263-272. May, 2018. (DOI:10.1007/978-3-319-78455-7\_20), 査読有.
7. K. Yamazaki, T. Saitoh, M. Kiyomi and R. Uehara: “Enumeration of Nonisomorphic Graphs in Graph Classes,” The 11th Annual Workshop on Algorithms and Computation (WALCOM 2018), LNCS, vol. 10755, pp. 8-19, March, 2018. (DOI:10.1007/978-3-319-75172-6\_2), 査読有.
8. E. Miyano, T. Saitoh, R. Uehara, T. Yagita and T.C. van der Zanden: “Complexity of the Maximum k-Path Vertex Cover Problem,” The 11th Annual Workshop on Algorithms and Computation (WALCOM

2018), LNCS, vol. 10755, pp. 240-251, March 3-5, 2018. (DOI:10.1007/978-3-319-75172-6\_21) , 査読有.

9. 戸田 貴久, 齋藤 寿樹, 岩下 洋哲, 川原 純, 湊 真一: “ZDD と列挙問題 – 最新の技法とプログラミングツール,” Computer Software, 34 巻 3 号 pp. 97 ~ 120, 2017, 8.

(DOI:10.11309/jssst.34.3\_97) , 査読有.

10. P. Klavík, J. Kratochvíl, Y. Otachi, T. Saitoh, and T. Vyskocil: “Extending Partial Representations of Interval Graphs,” Algorithmica, vol. 78, 3, pp. 945 – 967, 2017, July.(DOI:10.1007/s00453-016-0186-z)

11. S. Shimizu, K. Yamaguchi, T. Saitoh, and S. Masuda: “Fast maximum weight clique extraction algorithm: Optimal tables for branch-and-bound,” Discrete Applied Mathematics, vol. 223, pp. 120 – 134, 2017, May. (DOI:10.1016/j.dam.2017.01.026) , 査読有.

12. P. Klavík, J. Kratochvíl, Y. Otachi, I. Rutter, T. Saitoh, M. Saumell, and T. Vyskocil: “Extending partial representations of proper and unit interval graphs,” Algorithmica, vol. 77, 4, pp. 1071 – 1104, 2017, April.(DOI:10.1007/s00453-016-0133-z) , 査読有.

13. T. Saitoh and David Kirkpatrick: “Space-Efficient and Output-Sensitive Implementations of Greedy Algorithms on Intervals,” The 11th Annual Workshop on Algorithms and Computation (WALCOM 2017), LNCS, vol. 10167, pp. 320-332, March, 2017, 査読有.

14. S. Chaplick, P. Hell, Y. Otachi, T. Saitoh, and R. Uehara: “Ferrers Dimension of Grid Intersection Graphs,” Discrete Applied Mathematics, vol. 216, part 1, pp. 130–135, 2017, January.

(DOI:10.1016/j.dam.2015.05.035) , 査読有.

15. J. Kawahara, T. Saitoh, H. Suzuki, and R. Yoshinaka: “Solving the Longest Oneway-ticket Problem and Enumerating Letter Graphs by Augmenting the Two Representative Approaches with ZDDs,” Computational Intelligence In Information Systems (CIIS 2016), Advances in Intelligent Systems and Computing, vol. 532, pp. 294-305, November, 2016, Universiti Teknologi Brunei.

(DOI:10.1007/978-3-319-48517-1\_26) , 査読有.

16. S. Shimizu, K. Yamaguchi, T. Saitoh, and S. Masuda: “A fast heuristic for the minimum weight vertex cover problem,” IEEE/ACIS 15th International Conference on Computer and Information Science (ICIS 2016), ISBN: 978-1-5090-0807-0, pp. 1-5, June, 2016 , 査読有.

〔学会発表〕(計 30 件)

1. J. Kawahara, T. Saitoh, H. Suzuki and R. Yoshinaka: “Colorful Frontier-based Search: Implicit Enumeration of Chordal and Interval Subgraphs,” Special Event on Analysis of Experimental Algorithms, LNCS, to appear, June 24-29, 2019, Kalamata (Greece).

2. T. Horiyama, S. Nakano, T. Saitoh, K. Suetsugu, A. Suzuki, R. Uehara, T. Uno, K. Wasa: “Max-Min 3-dispersion Problems,” コンピューテーション研究会, IEICE Technical Report, vol. 118, no. 356, COMP2018-31, pp. 1-6, 2018 年 12 月 12 日.

3. 小林 賢也, Guohui Lin, 宮野 英次, 齋藤 寿樹, 鈴木 顕, 八木田 剛: “パス長を限定したパスカバー問題”, 情報処理学会九州支部「若手の会セミナー2018」, 2018 年 12 月 7 – 8 日.

4. 江藤 宏, 土中 哲秀, 宮野 英次, 西島 歩美, 小野 廣隆, 大舘 陽太, 齋藤 寿樹, 上原 隆平, Tom C. van der Zanden: “三角形の個数を最大・最小にする三角分割,” コンピューテーション研究会, IEICE Technical Report, vol. 118, no. 216, COMP2018-19, pp. 69-76, 2018 年 9 月 18 日.

5. T. Feng, T. Horiyama, Y. Okamoto, Y. Otachi, T. Saitoh, T. Uno and R. Uehara: "Computational Complexity of Robot Arm Simulation Problems," International Workshop on Combinatorial Algorithms (IWOCA 2018), LNCS, vol. 10979, pp. 177-188. July 16-19, 2018.
6. T. Akagi, T. Araki, T. Horiyama, S. Nakano, Y. Okamoto, Y. Otachi, T. Saitoh, R. Uehara, T. Uno and K. Wasa: "Exact Algorithms for the Max-Min Dispersion Problem," 12th International Frontiers of Algorithmics Workshop (FAW 2018), LNCS, vol. 10823, pp. 263-272. May 8-10, 2018.
7. K. Yamazaki, T. Saitoh, M. Kiyomi and R. Uehara: "Enumeration of Nonisomorphic Graphs in Graph Classes," The 11th Annual Workshop on Algorithms and Computation (WALCOM 2018), LNCS, vol. 10755, pp. 8-19, March 3-5, 2018.
8. E. Miyano, T. Saitoh, R. Uehara, T. Yagita and T.C. van der Zanden: "Complexity of the Maximum k-Path Vertex Cover Problem," The 11th Annual Workshop on Algorithms and Computation (WALCOM 2018), LNCS, vol. 10755, pp. 240-251, March 3-5, 2018.
9. K. Yamazaki, T. Saitoh, M. Kiyomi, and R. Uehara: Enumeration of Nonisomorphic Interval Graphs and Nonisomorphic Permutation Graphs, アルゴリズム研究会, IPSJ SIG Technical Report, 2018-AL-166-2, pp. 1-8, 2018年1月28-29日.
10. T. Feng, Y. Okamoto, Y. Otachi, T. Horiyama, T. Saitoh, T. Uno, and R. Uehara: "Computational Complexity of Robot Arm Simulation Problems," アルゴリズム研究会, IPSJ SIG Technical Report, 2018-AL-166-4, pp. 1-7, 2018年1月28-29日.
11. 杉本 晃弘, 齋藤 寿樹: "木における 1 ラウンドポロノイゲームの後手の最適戦略," コンピューテーション研究会, IEICE Technical Report, vol. 117, no. 370, COMP2017-31 (ISEC2017-77), pp. 33-40, 2017年12月21日.
12. 八木田 剛, 宮野 英次, 齋藤 寿樹, 上原 隆平, Tom C. van der Zanden: "部分グラフクラス上での最大 k-パス頂点被覆問題," コンピューテーション研究会, IEICE Technical Report, vol. 117, no. 370, COMP2017-30 (ISEC2017-76), pp. 25-32, 2017年12月21日.
13. 浦川 翔平, Tom C. van der Zanden, 齋藤 寿樹, 上原 隆平: "Circular Arc 上の独立集合を求める省領域アルゴリズム," コンピューテーション研究会, IEICE Technical Report, vol. 117, no. 370, COMP2017-28 (ISEC2017-74), pp. 11-18, 2017年12月21日.
14. 西島 歩美, 江藤 宏, 土中 哲秀, 宮野 英次, 小野 廣隆, 大舘 陽太, 齋藤 寿樹, 上原 隆平, Tom C. vander Zanden: "三角形総個数最大化問題", 平成 29 年度 OR 学会九州支部・若手 OR 交流会, 2017年10月28日
15. 八木田 剛, 宮野 英次, 齋藤 寿樹, 上原 隆平, Tom C. vander Zanden: "k-path vertex cover 問題に関する研究", 平成 29 年度 OR 学会九州支部・若手 OR 交流会, 2017年10月28日
16. 肘井 雅春, 柳 植竜, 宮野 英次, 齋藤 寿樹: "距離独立集合問題に対する近似アルゴリズムの実験的評価," 第 70 回連合大会 電気・情報関係学会九州支部連合大会(平成 29 年度), 12-1A-03, 2017年9月27日.
17. T. Saitoh: "Subgraph Enumeration Algorithms by ZDDs and Its Applications," Robotics and Computer Science, 2017年9月8日
18. J. Kawahara, T. Saitoh, and R. Yoshinaka: "The Time Complexity of the Token Swapping Problem and Its Parallel Variants," The 11th Annual Workshop on Algorithms and Computation (WALCOM 2017), LNCS, vol. 10167, pp. 448-459, March 29-31, 2017
19. K. Yamanaka, E.D. Demaine, T. Horiyama, A. Kawamura, S. Nakano, Y. Okamoto, T. Saitoh, A. Suzuki, R. Uehara, and T. Uno: "Sequentially Swapping Colored Tokens on Graphs," The 11th Annual

- Workshop on Algorithms and Computation (WALCOM 2017), LNCS, vol. 10167, pp. 435-447, March 29-31, 2017.
20. T. Saitoh and D. Kirkpatrick: "Space-Efficient and Output-Sensitive Implementations of Greedy Algorithms on Intervals," The 11th Annual Workshop on Algorithms and Computation (WALCOM 2017), LNCS, vol. 10167, pp. 320-332, March 29-31, 2017.
21. 兼本 樹, 齋藤 寿樹, 上原隆平: "ベグソリティアとフォーティワンの高速な解の数え上げ," 第12回 組合せゲーム・パズル研究集会, 2017年3月6日
22. 杉本 晃弘, 齋藤 寿樹: "木における1ラウンドポロノイゲームの後手の戦略," 第12回 組合せゲーム・パズル研究集会, 2017年3月6日
23. J. Kawahara, T. Saitoh, H. Suzuki, and R. Yoshinaka: "Solving the Longest Oneway-ticket Problem and Enumerating Letter Graphs by Augmenting the Two Representative Approaches with ZDDs," Computational Intelligence In Information Systems (CIIS 2016), Advances in Intelligent Systems and Computing, vol. 532, pp. 294-305, November 18-20, 2016.
24. T. Oikawa, I. Kanemoto, T. Saitoh, M. Kiyomi, R. Uehara: "Experimental enumeration of solutions for peg solitaire," アルゴリズム研究会, IPSJ SIG Technical Report, 2016-AL-159, No.3, pp.1, 2016年9月23日.
25. I. Kanemoto, T. Saitoh, M. Kiyomi, R. Uehara: "Counting the number of solutions for peg solitaire," コンピューテーション研究会, IEICE Technical Report, vol. 116, no. 211, COMP2016-14, pp. 1-6, 2016年9月6日.
26. S. Shimizu, K. Yamaguchi, T. Saitoh, and S. Masuda: "A fast heuristic for the minimum weight vertex cover problem," IEEE/ACIS 15th International Conference on Computer and Information Science (ICIS 2016), ISBN: 978-1-5090-0807-0, pp. 1-5, June 26-29, 2016.
27. K. Yamanaka, E.D. Demaine, T. Horiyama, A. Kawamura, S. Nakano, Y. Okamoto, T. Saitoh, A. Suzuki, R. Uehara, T. Uno: "Computational Complexity of Sequential Token Swapping Problem," コンピューテーション研究会, IEICE Technical Report, vol. 116, no. 116, COMP2016-13, pp. 115-122, 2016年6月22-23日.
28. 兼本 樹, 齋藤 寿樹: "Ls in L と Sphinxes in Sphinx に対する敷き詰め方の数の下界の改善 – フロンティア法による敷き詰め方の列挙 –, " コンピューテーション研究会, IEICE Technical Report, vol. 116, no. 116, COMP2016-9, pp. 41-48, 2016年6月22-23日.
29. 川原 純, 齋藤 寿樹, 吉仲 亮: "ゼロサプレス型二分決定グラフによる文字グラフの列挙," コンピューテーション研究会, IEICE Technical Report, vol. 116, no. 116, COMP2016-8, pp. 33-40, 2016年6月22-23日.
30. 清水 悟司, 山口 一章, 齋藤 寿樹, 増田 澄男: "最小重み頂点被覆問題に対する高速な発見的手法の提案," コンピューテーション研究会, IEICE Technical Report, vol. 116, no. 17, COMP2016-4, pp. 23-28, 2016年4月22日.

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。