

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 12 日現在

機関番号：14501
研究種目：若手研究(B)
研究期間：2012～2015
課題番号：24700130
研究課題名(和文)大規模区間データの高速解析処理アルゴリズムの研究

研究課題名(英文)Fast Manipulation Algorithms for Large Interval Data Set

研究代表者
齋藤 寿樹(Saitoh, Toshiki)

神戸大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：00590390
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、幾何データおよび幾何的特徴を持つグラフに対するアルゴリズムの開発およびZDDを用いた列挙アルゴリズムの開発を行った。幾何的特徴を持つグラフに対して、区間グラフを拡張したクラスに対する新たな知見の獲得や部分表現拡張問題に対するアルゴリズムの開発、また省領域アルゴリズムの開発に成功した。また、ZDDを用いた実用的なアルゴリズムの開発、特に系統樹の列挙や避難所割当の列挙、パズルソルバーに対するアルゴリズムの開発を行った。これらに対する研究成果は査読付き論文誌および査読付き国際会議や国内研究会などで発表した。

研究成果の概要(英文)：In this research, we developed algorithms for geometric data and graphs, and proposed efficient enumeration algorithms by using ZDDs. For geometric graphs, we obtained new knowledge for extended graph classes of interval graphs, and developed algorithms for partial extension problems and space efficient algorithms on intervals. We also presented efficient algorithms using ZDD for actual problems, for example, enumeration of phylogenies and evacuation assignments, and solving puzzles. These results were published in refereed international journals, refereed international conferences, and domestic workshops.

研究分野：アルゴリズム

キーワード：アルゴリズム 幾何データ ZDD

1. 研究開始当初の背景

近年、スマートフォンの普及やセンサーネットワークの発展により、膨大なデータ、ビッグデータに対する効率的な処理アルゴリズムが必要となってきた。こうしたビッグデータには、地図データやスケジューリングデータなど幾何データが数多く存在する。幾何データを効率的に計算機上で扱う表現としてグラフがある。そのため、幾何データおよび幾何的特徴を持つグラフに対する効率的なアルゴリズムの開発が求められている。一方で、データマイニングなどの分野で近年、列挙アルゴリズムの研究が盛んに行われている。特にゼロサプレス型二分決定図(ZDD)は組合せ集合を効率的に表現するデータ構造であり、数多くの実応用で重要な役割を果たしている。

2. 研究の目的

本研究では、膨大な幾何データを処理するための効率的なアルゴリズムの開発を目指す。幾何的特徴を持つグラフは、一般のグラフでは計算量理論上困難な問題であっても、効率的に解けることがある。そうした効率のよいアルゴリズムの拡張や改良を行うことで、ビッグデータに耐性を持つ効率的なアルゴリズムの開発を目指す。特に、ZDD などのような膨大なデータをコンパクトに表現するデータ構造の利用、もしくは、それらのデータ構造をより拡張することにより、巨大な幾何データをコンパクトに表現することを行う。そして、そうしたデータ構造から効率的にデータの特徴を抽出する効率的なアルゴリズムの開発を行う。こうした効率的なアルゴリズムの開発により、ビッグデータの利活用を目指す。

3. 研究の方法

本研究では、幾何データのうち、特にスケジューリングなどへの応用がある、区間データを対象とし、区間データおよび区間グラフに対する効率的なアルゴリズムの開発を行った。区間データのように低次元なデータであるほど、効率的でかつ単純なアルゴリズムの開発が期待できる。そして、区間データに対するアルゴリズムを拡張していくことで、より高次元の幾何データに対するアルゴリズムの開発を行う。

また、本研究では、データ構造 ZDD を様々な幾何データに対して適用する。特に、研究代表者はこれまでに区間グラフに関する効率的なアルゴリズムの開発を行ってきた。また、一方で、ERATO 湊プロジェクトに研究員として所属していた経緯から ZDD に関する知識も得ていた。これらの成果を融合することにより、区間データを中心とした、様々な幾何データに対する効率的なアルゴリズムの開発および列挙アルゴリズムを行う。研究推進のため、本研究では、上記分野における研究動向の調査するとともに、専門家

との研究議論することで、より有用な知見を数多く得てきた。また、実際の応用に対し、アルゴリズムを実装および計算機実験を行い、理論面だけでなく、実用面でもアルゴリズムの有用性を示した。

4. 研究成果

本研究では、主に(1)区間グラフおよび区間グラフと密接に関係のある幾何的特徴を持つグラフに対する効率的なアルゴリズムの開発および(2)ZDD を用いた効率的な列挙アルゴリズムの開発を行った。

(1) 幾何的特徴を持つグラフに対する効率的なアルゴリズムの開発を行った。主に、区間グラフを拡張したクラスに対する新たな知識の獲得や部分表現拡張問題に対するアルゴリズムの開発、また省領域アルゴリズムの開発を行った。

- 区間グラフを拡張した区間二部グラフに対し、半順序集合や直交線グラフとの関連を与えることができた(雑誌論文 2,10,14,15,学会発表 10,12)。
- グラフの認識問題を拡張した部分表現拡張問題に対し、区間グラフやその拡張されたグラフクラスに対する様々な知見を得ることができた(雑誌論文 1,5,8,13,学会発表 9,18,19)。
- 近年、メモリが安価になったとはいえ、ビッグデータの巨大さゆえ、計算作業領域の不足が重大な課題となっている。本研究では、区間データに対する省領域アルゴリズムの開発を行った(学会発表 4)。また、上記以外にも、近年盛んに研究が行われている遷移可能性問題などのグラフアルゴリズムの開発に成功している(雑誌論文 3-5,7,9,12)。

(2) ZDD を用いて、実用的な問題、特に系統樹の列挙や避難所割当の列挙、パズルソルバーに対するアルゴリズムの開発を行った。

- 系統樹は進化の過程を表す上で重要な役割を果たす。しかし、現代において、すべての種に対するすべての特徴を観測することは不可能である。そのため、不完全な情報から系統樹を構築する必要がある。そこからでは、複数の系統樹の候補が現れる。本研究では、そうした系統樹をすべて列挙する効率的なアルゴリズムを開発した(雑誌論文(17), 学会発表(17), (22), (23))。
- 近年発生している大災害において、被災者は避難所への避難を余儀なくされてしまう。しかし、各避難者が最寄りの避難所へ避難すると、一部の避難所に人が集中し、混雑してしまうという問題が発生し得る。そのため、様々な指標を考慮した避難所割当を考える必要がある。本研究では、そうした様々な指標を考慮したよい避難所割当パターンを列挙する効率的なアルゴリズムを開発した(学会発表(13-15))。

- 本研究では, 様々なパズルに対するアルゴリズムの開発を行った。(雑誌論文 16, 18, 学会発表 1, 2, 16) こうして解いたパズルの中にはナンバーリンクと呼ばれるパズルがあり, このパズルは集積回路の設計に応用があることが知られている。実応用のあるパズルに対する効率的なアルゴリズムの開発に成功した。

さらに, ZDD をトップダウンに構築する手法はフロンティア法として確立され, フロンティア法に関する書籍(図書(1))が出版された。

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 18 件)

- (1) Pavel Klavík, Jan Kratochvíl, Yota Otachi, Ignaz Rutter, Toshiki Saitoh, Maria Saumell, and Tomáš Vyskočil: "Extending partial representations of proper and unit interval graphs," *Algorithmica*, 掲載確定, 査読有。
- (2) Steven Chaplick, Pavol Hell, Yota Otachi, Toshiki Saitoh, and Ryuhei Uehara: "Ferrers Dimension of Grid Intersection Graphs," *Discrete Applied Mathematics*, 掲載確定, 査読有。(doi:10.1016/j.dam.2015.05.035)
- (3) Katsuhisa Yamanaka, Takashi Horiyama, David Kirkpatrick, Yota Otachi, Toshiki Saitoh, Ryuhei Uehara and Yushi Uno: "Swapping Colored Tokens on Graphs," *Lecture Notes in Computer Science*, vol.9214, pp. 619-628, 2015, 査読有。
- (4) Takehiro Ito, Yota Otachi, Toshiki Saitoh, Hisayuki Satoh, Akira Suzuki, Kei Uchizawa, Ryuhei Uehara, Katsuhisa Yamanaka and Xiao Zhou: "Competitive Diffusion on Weighted Graphs," *Lecture Notes in Computer Science*, vol.9214, pp. 422-433, 2015, 査読有。
- (5) Katsuhisa Yamanaka, Erik D. Demaine, Takehiro Ito, Jun Kawahara, Masashi Kiyomi, Yoshio Okamoto, Toshiki Saitoh, Akira Suzuki, Kei Uchizawa, and Takeaki Uno: "Swapping Labeled Tokens on Graphs," *Theoretical Computer Science*, vol. 586, pp. 81-94, 2015, June, 査読有。(doi:10.1016/j.tcs.2015.01.052)
- (6) Pavel Klavík, Jan Kratochvíl, Yota Otachi, and Toshiki Saitoh: "Extending Partial Representations of Subclasses of Chordal Graphs," *Theoretical Computer Science*, vol. 576, pp. 85-101, 2015, April, 査読有。(doi:10.1016/j.tcs.2015.02.007)
- (7) Katsuhisa Yamanaka, Erik D. Demaine, Takehiro Ito, Jun Kawahara, Masashi Kiyomi, Yoshio Okamoto, Toshiki Saitoh, Akira Suzuki, Kei Uchizawa, and Takeaki Uno: "Swapping Labeled Tokens on Graphs," *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 8496, pp. 364-375, 2014, 査読有。
- (8) Pavel Klavík, Jan Kratochvíl, Yota Otachi, Ignaz Rutter, Toshiki Saitoh, Maria Saumell, and Tomáš Vyskočil: "Extending Partial Representations of Proper and Unit Interval Graphs," *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 8503, pp. 253-264, July 2-4, 2014, 査読有。
- (9) Yota Otachi, Toshiki Saitoh, Katsuhisa Yamanaka, Shuji Kijima, Yoshio Okamoto, Hirota Ono, Yushi Uno, and Koichi Yamazaki: "Approximating the path-distance-width for AT-free graphs and graphs in related classes," *Discrete Applied Mathematics*, vol. 168, pp. 69-77, 2014, May, 査読有。(doi:10.1016/j.dam.2012.11.015)
- (10) Steven Chaplick, Pavol Hell, Yota Otachi, Toshiki Saitoh, and Ryuhei Uehara: "Intersection Dimension of Bipartite Graphs," *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 8402, pp. 323-340, 2014, 査読有。
- (11) Takuya Umesato, Toshiki Saitoh, Ryuhei Uehara, Hiro Ito, and Yoshio Okamoto: "The complexity of the stamp folding problem," *Theoretical Computer Science*, vol. 497, pp. 13-19, 2013, July, 査読有。(doi:10.1016/j.tcs.2012.08.006)
- (12) Masashi Kiyomi, Toshiki Saitoh, and Ryuhei Uehara: "Reconstruction Algorithms for Permutation Graphs and Distance-hereditary Graphs," *IEICE Transactions on Information and Systems*, vol. E96-D, No. 3, pp. 426-432, 2013, March, 査読有。
- (13) Pavel Klavík, Jan Kratochvíl, Yota Otachi, and Toshiki Saitoh: "Extending Partial Representations of Subclasses of Chordal Graphs," *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 7676, pp. 444-454, 2012, 査読有。
- (14) Shuji Kijima, Yota Otachi, Toshiki Saitoh, and Takeaki Uno: "Subgraph Isomorphism in Graph Classes," *Discrete Mathematics*, vol. 312, issue 21, pp. 3164-3173, 2012, November, 査読有。(doi:10.1016/j.disc.2012.07.010)
- (15) Masashi Kiyomi, Toshiki Saitoh, and Ryuhei Uehara: "Bipartite Permutation Graphs are Reconstructible," *Discrete Mathematics, Algorithms and Applications*, vol. 4, issue 3, pp. 1250039:1-14, 2012, August, 査読有。

(doi: 10.1142/S1793830912500395)

- (16) 川原 純, 齋藤 寿樹, 湊 真一: "ZDD を用いた新たな列挙手法," *電子情報通信学会学会誌*, 95 巻, 6 号, pp. 505-511, 2012 年 6 月, 査読無.
- (17) Masashi Kiyomi, Yoshio Okamoto, and Toshiki Saitoh: "Efficient Enumeration of the Directed Binary Perfect Phylogenies from Incomplete Data," *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 7276, pp. 248-259, 2012, 査読有.
- (18) Ryo Yoshinaka, Toshiki Saitoh, Jun Kawahara, Koji Tsuruma, Hiroaki Iwashita, and Shin-ichi Minato: "Finding All Solutions and Instances of Numberlink and Slitherlink by ZDDs," *Algorithms*, vol. 5, No. 2, pp. 176-213, 2012, April, 査読有. (doi:10.3390/a5020176)

[学会発表](計 23 件)

- (1) 兼本 樹, 齋藤 寿樹: "フロンティア法による「Ls in L」と「Sphinxes in Sphinx」の解の列挙," *組合せゲーム・パズル研究集会*, 2016 年 3 月 7 日, 電気通信大学(東京).
- (2) 杉本 晃弘, 齋藤 寿樹, 山口 一章, 増田 澄男: "手数が少ない場合におけるグリッド上のポロノイゲームの解析," *組合せゲーム・パズル研究集会*, 2016 年 3 月 7 日, 電気通信大学(東京).
- (3) Takehiro Ito, Yota Otachi, Toshiki Saitoh, Hisayuki Satoh, Akira Suzuki, Kei Uchizawa, Ryuhei Uehara, Katsuhisa Yamanaka and Xiao Zhou: "Computational Complexity of Competitive Diffusion on (Un)weighted Graphs," *アルゴリズム研究会, IPSJ SIG Technical Report*, 2015-AL-154, pp. 8:1-6, 2015 年 9 月 28 日, 九大西新プラザ(福岡).
- (4) Toshiki Saitoh, Takashi Horiyama, David Kirkpatrick, Yota Otachi, Ryuhei Uehara, Yushi Uno, Katsuhisa Yamanaka: "Space Efficient and Output Sensitive Greedy Algorithms on Intervals," *アルゴリズム研究会, IPSJ SIG Technical Report*, 2015-AL-154, pp. 4:1-7, 2015 年 9 月 28 日, 九大西新プラザ(福岡).
- (5) Katsuhisa Yamanaka, Takashi Horiyama, David Kirkpatrick, Yota Otachi, Toshiki Saitoh, Ryuhei Uehara and Yushi Uno: "Swapping Colored Tokens on Graphs," *The 14th Workshop on Algorithms and Data Structure (WADS 2015)*, August 5-7, 2015, Victoria(Canada).
- (6) Takehiro Ito, Yota Otachi, Toshiki Saitoh, Hisayuki Satoh, Akira Suzuki, Kei Uchizawa, Ryuhei Uehara, Katsuhisa Yamanaka and Xiao Zhou:

- "Competitive Diffusion on Weighted Graphs," *The 14th Workshop on Algorithms and Data Structure (WADS 2015)*, August 5-7, 2015, Victoria(Canada)
- (7) Hiroshi Yukumoto, Toshiki Saitoh, Kazuaki Yamaguchi, and Sumio Masuda: "Exact Algorithms for B-Bandwidth Problem with Restricted B," *KOREA-JAPAN Joint Workshop on Algorithms and Computation (WAAC 2014)*, July 13-15, 2014, Okinawa(Japan).
- (8) Pavel Klavík, Jan Kratochvíl, Yota Otachi, Ignaz Rutter, Toshiki Saitoh, Maria Saumell, and Tomáš Vyskočil: "Extending Partial Representations of Proper and Unit Interval Graphs," *The 14th Scandinavian Symposium and Workshops on Algorithm Theory (SWAT 2014)*, July 2-4, 2014, Copenhagen(Denmark).
- (9) Katsuhisa Yamanaka, Erik D. Demaine, Takehiro Ito, Jun Kawahara, Masashi Kiyomi, Yoshio Okamoto, Toshiki Saitoh, Akira Suzuki, Kei Uchizawa, and Takeaki Uno: "Swapping Labeled Tokens on Graphs," *The 7th International Conference on Fun with Algorithms (FUN 2014)*, July 1-3, 2014, Sicily(Italy).
- (10) Steven Chaplick, Pavol Hell, Yota Otachi, Toshiki Saitoh, and Ryuhei Uehara: "Intersection Dimension of Bipartite Graphs," *アルゴリズム研究会, IPSJ SIG Technical Report*, 2014-AL-148, pp. 4:1-7, 2014 年 6 月 13-14 日, 道後温泉 大和屋(愛媛).
- (11) 山中 克久, エリック ドメイン, 伊藤 健洋, 川原 純, 清見 礼, 岡本 吉央, 齋藤 寿樹, 鈴木 顕, 内澤 啓, 宇野 毅明: "グラフ上のラベル付きトークン整列問題," *コンピュテーション研究会, IEICE Technical Report*, COMP2014-2, pp. 5-12, 2014 年 6 月 13-14 日, 道後温泉 大和屋(愛媛).
- (12) Steven Chaplick, Pavol Hell, Yota Otachi, Toshiki Saitoh, and Ryuhei Uehara: "Intersection Dimension of Bipartite Graphs," *The 11th Annual Conference on Theory and Applications of Models of Computation (TAMC 2014)*, April 11-13, 2014, Chennai(India).
- (13) 中野 浩太郎, 齋藤 寿樹, 加藤 直樹, 瀧澤 重志: "都市における避難所割当てパターンの列挙と評価," *情報処理学会第 76 回大会, 講演論文集(4)*, pp. 771-772, 2014 年 3 月 17-19 日, 東京電機大学(東京).
- (14) 中野 浩太郎, 齋藤 寿樹, 瀧澤 重志, 加藤 直樹: "都市における避難所割当ての列挙と評価," *日本オペレーションズリサーチ学会 2014 年春季研究発表会, アブストラクト集*, pp. 224-225, 2014 年 3

- 月7日, 大阪大学 豊中キャンパス(大阪).
- (15) 松永 涼, 齋藤 寿樹, 近藤 広樹, 中野 浩太郎: "ZDD を用いた Exact Cover 問題に対するパレート最適な解の列挙," アルゴリズム研究会, IPSJ SIG Technical Report, 2014-AL-147 No.16, pp.1-8, 2014 年 3 月 3-4 日, 中央大学(東京).
- (16) 中嶋 章裕, 齋藤 寿樹, 山口 一章, 増田 澄男: "あみだくじを数え上げる省領域アルゴリズムについて," 組合せゲーム・パズルミニ研究集会, 2014 年 2 月 28 日, JAIST(石川).
- (17) 森戸 一貴, 齋藤 寿樹, 山口 一章, 増田 澄男: "動的計画法を用いた有向二値完全系統樹の効率のよい列挙," コンピューテーション研究会, IEICE Technical Report, COMP2013-12, pp. 63-70, 2013 年 5 月 17-18 日, 小樽商科大学(北海道).
- (18) Pavel Klavík, Jan Kratochvíl, Yota Otachi, Ignaz Rutter, Toshiki Saitoh, Maria Saumell, Tomáš Vyskočil: "Extending Partial Representations of Proper and Unit Interval Graphs," The 29th European Workshop on Computational Geometry (EuroCG 2013), pp. 217-220, March 17-20, 2013, Braunschweig (Germany).
- (19) Pavel Klavík, Jan Kratochvíl, Yota Otachi, and Toshiki Saitoh: "Extending Partial Representations of Subclasses of Chordal Graphs," The 23th International Symposium on Algorithms and Computation (ISAAC 2012), December 19-21, 2012, Taipei(Taiwan).
- (20) Eishi Chiba, Yusuke Abe, Toshiki Saitoh, Takao Kageyama, Hiroki Koga and Takashi Kobayashi: "Maximum-Profit Rooted Not-Necessarily-Spanning Tree Problem," The IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), pp. 1359-1363, December 10-13, 2012, Hong Kong(China).
- (21) Eishi Chiba, Yusuke Abe, Toshiki Saitoh, Takao Kageyama, Hiroki Koga and Takashi Kobayashi: "Maximum-Profit Rooted Not-Necessarily-Spanning Tree Problem," KOREA-JAPAN Joint Workshop on Algorithms and Computation (WAAC 2012), July 10-11, 2012, Tokyo(Japan).
- (22) 清見 礼, 岡本 吉央, 齋藤 寿樹: "不完全データと矛盾しない有向二値完全系統樹を列挙する効率的手法," コンピューテーション研究会, IEICE Technical Report, COMP2012-14, pp. 17-24, 2012 年 6 月 21 日, 北海道大学(北海道).
- (23) Masashi Kiyomi, Yoshio Okamoto, and Toshiki Saitoh: "Efficient Enumeration of the Directed Binary Perfect Phylogenies from Incomplete

Data," 11th International Symposium on Experimental Algorithms (SEA 2012), June 7-9, 2012, Bordeaux(France).

〔図書〕(計1件)

- (1) 湊 真一(編), 齋藤 寿樹, 他 xx 名 (共著): "超高速グラフ列挙アルゴリズム - フカシギの数え方が拓く, 組合せ問題への新アプローチ -, "(2章および5章執筆担当) ISBN:978-4627852617, 森北出版, 2015年4月.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

齋藤 寿樹 (Saitoh, Toshiki)
神戸大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号: 00590390