

令和元年6月3日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K00009

研究課題名(和文) 計算幾何学と計算トポロジーが拓く新時代データ解析の理論基盤

研究課題名(英文) Theoretical Foundation of Innovative Data Analysis Based on Computational Geometry and Topology

研究代表者

岡本 吉央 (Okamoto, Yoshio)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：00402660

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：代表的な成果として、以下のものを得た。

(1) 有界多角形領域の直径と半径を計算する効率的アルゴリズムを開発した。特に、マンハッタン距離を採用した際、有界多角形領域の直径と半径が多項式時間で計算できると判明した。(2) グラフを2次元平面上に辺交差なく直線分を用いて埋め込む際に、辺長を事前にどの程度指定できるか考察した。(3) グラフを2次元平面上に描くとき、辺交差のパターンや使う曲線の種類を制限することがどのような場合に可能であるか考察を行った。(4) センサネットワークをモデル化する際によく用いられる単位円グラフという幾何構造に対して、既存研究の欠点を補うような再帰分割データ構造を考案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

計算幾何学、計算トポロジーは情報学基礎理論における比較的若い研究分野であるが、それであっても、多くの問題が未解決のまま残されている。現在、幾何的データやトポロジー的データは世の中に満ち溢れ、それらの処理に対して、計算幾何学と計算トポロジーの果たす役割は今後一層増していくことが予想される。そのような未来に対して、本研究の培った技法や知見が基盤的な位置づけを担うこととなる。

研究成果の概要(英文)：Below is the summary of representative results from this project.

(1) Efficient algorithms have been developed for computing the diameter and the radius of a bounded polygonal domain. (2) Prescription of edge lengths has been studied for graphs embedded on the plane by straight line segments without edge crossings. (3) Restrictions of edge crossing patterns and curve types have been studied for graphs embedded on the plane. (4) Recursive decomposition data structures have been proposed for unit disk graphs that have been used for modeling sensor networks in the literature.

研究分野：情報学基礎理論

キーワード：計算幾何学 離散数学 アルゴリズム理論

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

1. 研究開始当初の背景

地理情報システムやセンサネットワーク、蛋白質構造解析など、対象物の空間座標といった幾何的属性を持つ大規模データが発生する状況は多く存在する。幾何的属性を持つ入力を対象にしたアルゴリズムの設計と解析を探究する分野が計算幾何学である。これはアルゴリズム理論の中で最もよく発達した分野であると同時に、その応用が非常に限られてきた分野でもある。その大きな理由の1つはアルゴリズム設計の方法論に関する問題である。伝統的に、計算幾何学において採用されている計算モデルは実数 RAM モデルと呼ばれ、これは実数を簡便に扱えるという点で理論的に優れたモデルであるが、ビットを基礎とする普通の計算機 (あるいはワード RAM モデル) が行う計算と極めて異なる。そのため、計算幾何学におけるアルゴリズムの多くが論文に記述されるままでは計算機上に実装しにくく、その困難性に多くの研究者が直面している。

一方、幾何的属性を持つデータから、ある種の組合せ構造を抽出して、そのトポロジ的側面を解析するという方法論が最近生まれ、これは計算トポロジーという名称で認知されている。この方法論では、幾何的データの持つ幾何を捨象することで、グラフまたは半順序集合といった組合せ構造を抽出し、元のデータに関して有用なトポロジ的情報を獲得することを目指す。この手法は蛋白質構造解析などにおいてある程度成果を挙げ、トポロジ的データ解析の名の下で研究されているが、その応用の展開を妨げる要因も存在している。特に、抽出される半順序集合は巨大になることが多いため、既存の組合せアルゴリズム設計手法では手に負えないという問題が存在する。

2. 研究の目的

本研究の目的は、計算幾何学および計算トポロジーというアルゴリズム理論の分野で培われた計算技法を大規模データ解析に応用可能なレベルまで引き上げること、および、その限界を明確化することである。着眼点は解析すべきデータが持つ特殊な内在構造をアルゴリズム設計に活かすことである。そのため、離散数学において発達した解析技法、特に、確率的解析技法や計算複雑性解析技法を用いる。そして、その構造を支配するパラメータの意味づけを大規模データ解析という立脚点から行い、数学における定理が持つ計算理論的解釈を明確にする。これにより、自己目的化した数学における定理が計算という視点から外部化され、抽象的な数学が大規模データ解析に応用可能となる。

3. 研究の方法

研究目標を次の部分テーマに分割し、順次研究を進展させる。

(1) 大規模幾何的データに内在するアルゴリズム的構造とその数理の探究

地理情報システム、センサネットワーク、蛋白質構造解析など、計算幾何学や計算トポロジーの応用分野から現れる大規模データに対して、その幾何構造に内在する性質を分類する。そして、その中からアルゴリズムの設計と解析に有用であるものを抽出する。

(2) 大規模幾何的データの構造に基づいた計算幾何学 / 計算トポロジーのアルゴリズム開発

計算幾何学や計算トポロジーにおける基本問題に対するアルゴリズム設計と解析を、構造に基づく手法から見直し、新たな研究潮流を創出する。例えば、計算幾何学における各種領域探索問題、凸包構成問題、最短路問題、幾何的被覆問題、計算トポロジーにおける単体的複体のホモロジー計算、離散モース関数の計算、折り畳み列

の計算を対象とする。

4. 研究成果

紙面の都合上、代表的な成果に限定して、紹介する。

- (1) 有界多角形領域の直径と半径を計算するための効率的アルゴリズムの開発を行った。特に、マンハッタン距離を採用した際に、有界多角形領域の直径と半径が多項式時間で厳密に計算できることが判明した。また、直交有界多角形領域における直交リンク距離に関しても、その直径と半径が多項式時間で厳密に計算できることが判明した。これらの成果は、理論計算機科学に関する査読付き国際会議、および、計算幾何学に関する論文誌で発表された。また、最適化の理論と応用に関わる国内会議において、この成果を含む招待講演を行った。
- (2) 1次元単体的複体、すなわち、グラフを2次元平面上に辺交差なく、直線分を用いて埋め込む際に、その辺長を事前にどの程度指定できるか考察した。成果として、極めて制限されたクラスのグラフに対してのみ、そのような事前指定が可能であることが判明した。また、これは「リンケージの剛性」に関わる問題と関連することも判明した。この研究と関連して、グラフの辺長に対して柔軟性を持たせたモデルを考案し、その際に埋め込みが可能であるかどうかという判定問題が計算理論的に困難であることを証明した。これらの成果は、理論計算機科学に関する査読付き国際会議、および、離散幾何学に関する論文誌で発表された。
- (3) 1次元単体的複体、すなわち、グラフを2次元平面上に描くとき、辺交差のパターンや使う曲線の種類を制限することがどのような場合に可能であるか考察を行った。成果として、既存研究では辺交差のない描画しか対応できなかったところ、各辺が高々1回の交差に関わるようなグラフのクラスに対しても同様な手法で2次元平面上に描くことができるようになった。この成果は、ネットワーク可視化に関する査読付き国際会議で発表された。また、関連する研究の状況について、トポロジーに関する国内会議で招待講演を行った。
- (4) センサネットワークをモデル化する際によく用いられる単位円グラフという幾何構造に対して、既存研究の欠点を補うような再帰分割データ構造を考案した。また、計算機実験により、センサネットワークの文献で良く用いられるランダム入力に対して、既存研究に対する優位性を確認した。この成果はアルゴリズムとデータ構造に関する査読付き国際会議で発表された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 27 件)

- (1) Sang Won Bae, Yoshio Okamoto, and Chan-Su Shin, Area bounds of rectilinear polygons realized by angle sequences. Computational Geometry: Theory and Applications, to appear. DOI:10.1016/j.comgeo.2019.05.004. 査読有
- (2) Takehiro Ito, Naoyuki Kamiyama, Yusuke Kobayashi, and Yoshio Okamoto, Algorithms for Gerrymandering Over Graphs. Proceedings of the 18th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2019), 2019, pp. 1413-1421. <http://www.ifaamas.org/Proceedings/aamas2019/pdfs/p1413.pdf> 査読有
- (3) Hans L. Bodlaender, Tesshu Hanaka, Yoshio Okamoto, Yota Otachi, and Tom C. van der Zanden. Subgraph Isomorphism on Graph Classes that Exclude a Substructure. Proceedings of 11th International Conference on Algorithms and Complexity (CIAC 2019), Lecture Notes in Computer Science 11485 (2019) 87-98. DOI:10.1007/978-3-030-17402-6_8 査読有
- (4) Takehiro Ito, Naonori Kakimura, Naoyuki Kamiyama, Yusuke Kobayashi, and Yoshio Okamoto, Reconfiguration of Maximum-Weight b -Matchings in a Graph. Journal of Combinatorial Optimization 37 (2019) 454-464. DOI:10.1007/s10878-018-0289-3. 査読

有

- (5) Katsuhisa Yamanaka, Erik D. Demaine, Takashi Horiyama, Akitoshi Kawamura, Shin-Ichi Nakano, [Yoshio Okamoto](#), Toshiki Saitoh, Akira Suzuki, Ryuhei Uehara, and Takeaki Uno, Sequentially Swapping Colored Tokens on Graphs. *Journal of Graph Algorithms and Applications* 23 (2019) 3-27. <http://jgaa.info/getPaper?id=482> 査読有
- (6) Takehiro Ito, Naonori Kakimura, Naoyuki Kamiyama, Yusuke Kobayashi, and [Yoshio Okamoto](#), Minimum-Cost b -Edge Dominating Sets on Trees. *Algorithmica* 81 (2019) 343-366. DOI:10.1007/s00453-018-0448-z. 査読有
- (7) Sang Won Bae, Matias Korman, and [Yoshio Okamoto](#), Computing the Geodesic Centers of a Polygonal Domain. *Computational Geometry: Theory and Applications* 77 (2019) 3-9. DOI:10.1016/j.comgeo.2015.10.009. 査読有
- (8) Elena Arseneva, Man-Kwun Chiu, Matias Korman, Aleksandar Markovic, [Yoshio Okamoto](#), Aurélien Ooms, André van Renssen, Marcel Roeloffzen. Rectilinear Link Diameter and Radius in a Rectilinear Polygonal Domain. *Proceedings of 29th International Symposium on Algorithms and Computation (ISAAC 2018)*, *Leibniz International Proceedings in Informatics (LIPIcs)* 123 (2018) 58:1-58:13. DOI:10.4230/LIPIcs.ISAAC.2018.58 査読有
- (9) Evmorfia Argyriou, Sabine Cornelsen, Henry Förster, Michael Kaufmann, Martin Nöllenburg, [Yoshio Okamoto](#), Chrysanthi Raftopoulou, and Alexander Wolff, Orthogonal and Smooth Orthogonal Layouts of 1-Planar Graphs with Low Edge Complexity. *Proceedings of 26th International Symposium on Graph Drawing and Network Visualization (GD 2018)*, *Lecture Notes in Computer Science* 11282 (2018) 509-523. DOI:10.1007/978-3-030-04414-5_36 査読有
- (10) Tianfeng Feng, Takashi Horiyama, [Yoshio Okamoto](#), Yota Otachi, Toshiki Saitoh, Takeaki Uno, Ryuhei Uehara, Computational Complexity of Robot Arm Simulation Problems. *Proceedings of 29th International Workshop on Combinatorial Algorithms (IWOCOA 2018)*, *Lecture Notes in Computer Science* 10979 (2018) 177-188. DOI:10.1007/978-3-319-94667-2_15 査読有
- (11) Toshihiro Akagi, Tetsuya Araki, Takashi Horiyama, Shin-Ichi Nakano, [Yoshio Okamoto](#), Yota Otachi, Toshiki Saitoh, Ryuhei Uehara, Takeaki Uno, Kunihiko Wasa, Exact Algorithms for the Max-Min Dispersion Problem. *Proceedings of 12th International Frontiers of Algorithmics Workshop (FAW 2018)*, *Lecture Notes in Computer Science* 10823 (2018) 263-272. DOI:10.1007/978-3-319-78455-7_20 査読有
- (12) Takehiro Ito, Naonori Kakimura, Naoyuki Kamiyama, Yusuke Kobayashi, [Yoshio Okamoto](#), and Taichi Shiitada. Tight approximability of the server allocation problem for real-time applications. *Proceedings of 3rd International Workshop on Algorithmic Aspects of Cloud Computing (ALGO CLOUD 2017)*, *Lecture Notes in Computer Science* 10739 (2018) 41-55. DOI:10.1007/978-3-319-74875-7_4 査読有
- (13) Takehiro Ito, Naonori Kakimura, Naoyuki Kamiyama, Yusuke Kobayashi, and [Yoshio Okamoto](#), Reconfiguration of Maximum-Weight b -Matchings in a Graph. *Proceedings of 23rd Annual International Computing and Combinatorics Conference (COCOON 2017)*, *Lecture Notes in Computer Science* 10392 (2017) 287-296. DOI:10.1007/978-3-319-62389-4_24 査読有
- (14) Paz Carmi, Man Kwun Chiu, Matthew J. Katz, Matias Korman, [Yoshio Okamoto](#), André van Renssen, Marcel Roeloffzen, Taichi Shiitada, and Shakhar Smorodinsky, Balanced line separators of unit disk graphs. *Proceedings of 15th Algorithms and Data Structures Symposium (WADS 2017)*, *Lecture Notes in Computer Science* 10389 (2017) 241-252. DOI:10.1007/978-3-319-62127-2_21 査読有
- (15) Katsuhisa Yamanaka, Erik D. Demaine, Takashi Horiyama, Akitoshi Kawamura, Shin-Ichi Nakano, [Yoshio Okamoto](#), Toshiki Saitoh, Akira Suzuki, Ryuhei Uehara, and Takeaki Uno, Sequentially Swapping Colored Tokens on Graphs. *Proceedings of 11th International Conference and Workshop on Algorithms and Computation (WALCOM 2017)*, *Lecture Notes in Computer Science* 10167 (2017) 435-447. DOI:10.1007/978-3-319-53925-6_34 査読有
- (16) Takashi Horiyama, Takashi Iizuka, Masashi Kiyomi, [Yoshio Okamoto](#), Ryuhei Uehara, Takeaki Uno, Yushi Uno, and Yukiko Yamauchi, Sankaku-Tori: An Old Western-Japanese Game Played on a Point Set. *Journal of Information Processing* 25 (2017) 708-715. DOI:10.2197/ipsjip.25.708. 査読有
- (17) Akinori Kawachi, [Yoshio Okamoto](#), Keisuke Tanaka, and Kenji Yasunaga, General Constructions of Rational Secret Sharing with Expected Constant-Round Reconstruction. *The Computer Journal* 60 (2017) 711-728. DOI:10.1093/comjnl/bxw094. 査読有
- (18) Takehiro Ito, Naonori Kakimura, Naoyuki Kamiyama, Yusuke Kobayashi, and [Yoshio](#)

- Okamoto, Efficient Stabilization of Cooperative Matching Games. Theoretical Computer Science 677 (2017) 69-82. DOI:10.1016/j.tcs.2017.03.020. 査読有
- (19) Sang Won Bae, Matias Korman, Joseph Mitchell, Yoshio Okamoto, Valentin Polishchuk, and Haitao Wang, Computing the L_1 Geodesic Diameter and Center of a Polygonal Domain. Discrete & Computational Geometry 57 (2017) 674-701. DOI:10.1007/s00454-016-9841-z. 査読有
- (20) Tillmann Miltzow, Lothar Narins, Yoshio Okamoto, Günter Rote, Antonis Thomas, Takeaki Uno, Approximation and Hardness of Token Swapping, Proceedings of 24th European Symposium on Algorithms (ESA 2016), Leibniz International Proceedings in Informatics (LIPIcs) 57 (2016) 66:1-66:15. DOI:10.4230/LIPIcs.ESA.2016.66 査読有
- (21) Takehiro Ito, Naonori Kakimura, Naoyuki Kamiyama, Yusuke Kobayashi, and Yoshio Okamoto, Efficient Stabilization of Cooperative Matching Games. Proceedings of 15th International Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems (AAMAS 2016), 2016, pp. 41-49. <http://trust.sce.ntu.edu.sg/aamas16/pdfs/p41.pdf> 査読有
- (22) Sang Won Bae, Matias Korman, Joseph Mitchell, Yoshio Okamoto, Valentin Polishchuk, and Haitao Wang, Computing the L_1 Geodesic Diameter and Center of a Polygonal Domain. Proceedings of 33rd International Symposium on Theoretical Aspects of Computer Science (STACS 2016), Leibniz International Proceedings in Informatics (LIPIcs) 47 (2016) 14:1-14:14. DOI:10.4230/LIPIcs.STACS.2016.14 査読有
- (23) Satoru Iwata, Naoyuki Kamiyama, Naoki Katoh, Shuji Kijima, and Yoshio Okamoto, Extended formulations for sparsity matroids. Mathematical Programming 158 (2016) 565-574. DOI:10.1007/s10107-015-0936-8. 査読有
- (24) Marek Cygan, Holger Dell, Daniel Lokshtanov, Dániel Marx, Jesper Nederlof, Yoshio Okamoto, Ramamohan Paturi, Saket Saurabh, and Magnus Wahlström, On problems as hard as CNF-SAT. ACM Transactions on Algorithms 12(3), Article No. 41, 2016. DOI:10.1145/2925416. 査読有
- (25) Masashi Kiyomi, Yoshio Okamoto, and Yota Otachi, On the treewidth of toroidal grids. Discrete Applied Mathematics 198 (2016) 303-306. DOI:10.1016/j.dam.2015.06.027. 査読有
- (26) Takehiro Ito, Shin-Ichi Nakano, Yoshio Okamoto, Yota Otachi, Ryuhei Uehara, Takeaki Uno, and Yushi Uno, A polynomial-time approximation scheme for the geometric unique coverage problem on unit squares. Computational Geometry: Theory and Applications 51 (2016) 25-39. DOI:10.1016/j.comgeo.2015.10.004. 査読有
- (27) Zachary Abel, Robert Connelly, Sarah Eisenstat, Radoslav Fulek, Filip Morić, Yoshio Okamoto, Tibor Szabó, and Csaba Tóth, Free edge lengths in plane graphs. Discrete & Computational Geometry 54 (2015) 259-289. DOI:10.1007/s00454-015-9704-z. 査読有

[学会発表](計 18 件)

- (1) 堀山 貴史, 栗田 和宏, 岡本 吉央, 内澤 啓, 上原 隆平, Mind the Mind with Synchronous Clocks, 第 14 回組合せゲーム・パズル研究集会, 2019 年 .
- (2) 岡本 吉央, 幾何的最短路に関わる諸問題, 招待講演, 第 30 回 RAMP シンポジウム, 2018 年 .
- (3) Yoshio Okamoto, Balanced Line Separators of Unit Disk Graphs, NWO-JSPS joint seminar: Computations on Networks with a Tree-Structure: From Theory to Practice, 2018.
- (4) 垣村 尚徳, 神山 直之, 小林 佑輔, 岡本 吉央, 劣モジュール再割当問題, 本部 SSOR 2018, 2018 年 .
- (5) 岡本 吉央, タイリングのはなし, 基盤(S)離散構造処理系プロジェクト「短期滞在セミナー週間 (SSSW) 2018.07」, 2018 年 .
- (6) Yoshio Okamoto, Submodular Reassignment Problem for Reallocating Agents to Tasks with Synergy Effects, 11th Combinatorial Algorithms Day, 招待講演, 2018.
- (7) Yoshio Okamoto, Balanced line separators of unit disk graphs, 招待講演, Shonan meeting “Geometric Graphs: Theory and Applications”, 2017.
- (8) Paz Carmi, Man Kwun Chiu, Matthew J. Katz, Matias Korman, Yoshio Okamoto, Andre van Renssen, Marcel Roeloffzen, Taichi Shiitada, Shakhbar Smorodinsky, Balanced line separators of unit disk graphs, 15th Algorithms and Data Structures Symposium (WADS 2017), 2017.
- (9) 伊藤 健洋, 垣村 尚徳, 神山 直之, 小林 佑輔, 岡本 吉央, 後田多 太一, 実時間アプリケーションに対するサーバ配置問題の近似 (不) 可能性 夏の LA シンポジウム 2017 年 .
- (10) Yoshio Okamoto, Tight Approximability of the Server Allocation Problem for Real-Time Applications, 招待講演, 10th Combinatorial Algorithms Day, 2017.
- (11) Takashi Horiyama, Ryuhei Uehara, Yoshio Okamoto, “Sphinxes in Pyramid” and

“Sphinxes in Hexagon”, 第 12 回組合せゲーム・パズル研究集会, 2017 年 .

- (12) Yoshio Okamoto, Angular Resolution --- Around Vertices and Crossings, 招待講演, Shonan Seminar “Algorithms for Beyond Planar Graphs”, 2016.
- (13) Takehiro Ito, Naonori Kakimura, Naoyuki Kamiyama, Yusuke Kobayashi, Yoshio Okamoto, Efficient Stabilization of Cooperative Matching Games, 15th International Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems (AAMAS 2016), 2016.
- (14) Yoshio Okamoto, Path-related problems in polygonal domains, 招待講演, Lorentz Workshop “Fixed-Parameter Computational Geometry”, 2016.
- (15) Yoshio Okamoto, Swapping Labeled Tokens on Graphs, 招待講演, Dutch-Japanese bilateral seminar on kinetic geometric networks, 2016.
- (16) 伊藤 健洋, 垣村 尚徳, 神山 直之, 小林 佑輔, 岡本 吉央, ネットワーク型交渉ゲームの安定化アルゴリズム, 第 157 回情報処理学会アルゴリズム研究会, 2016 年 .
- (17) 岡本 吉央, 行列の分解と組合せ最適化問題の拡張定式化, RIMS 共同研究「組合せ最適化セミナー」, 招待講演, 2015 年
- (18) 岡本 吉央, Non-Planar Graph Drawing, トポロジーとコンピュータ 2015, 招待講演, 2015 年 .

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
出願年 :
国内外の別 :

取得状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
取得年 :
国内外の別 :

〔その他〕

ホームページ等

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名 :

ローマ字氏名 :

所属研究機関名 :

部局名 :

職名 :

研究者番号 (8 桁) :

(2)研究協力者

研究協力者氏名 :

ローマ字氏名 :

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。