

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月31日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22310089

研究課題名（和文）大規模なセンサネットワーク位置推定問題の数値解法に関する研究

研究課題名（英文）Numerical methods for large sensor network localization problems

研究代表者

小島 政和 (KOJIMA MASAKAZU)

東京工業大学・大学院情報理工学研究科・名誉教授

研究者番号：90092551

研究成果の概要（和文）：センサネットワークは、環境モニタリング、構造物管理、交通制御などのさまざまな分野で使われている。アンカーと呼ばれるその位置が既知の  $m$  個のセンサとネットワーク上で隣接するセンサ間の距離の情報からその位置が未知の  $n$  個のセンサの位置を推定する問題は最も基本的で重要な問題の1つである。理論的には NP 困難な難しい問題として知られており、さまざまな分野で研究が行われている。この研究課題では、センサネットワーク位置推定問題に対する半正定値計画緩和を中心に研究を進めた。半正定値計画緩和は精度の良い推定位置を生成することが知られているが、センサネットワーク位置推定問題の規模の増加に伴って、計算コストが急速に増加する欠点を有している。この欠点を解消するためにネットワークの構造的な疎性の有効利用および半正定値計画問題を解く主双対内点法ソフトウェア SDPA の高速化をおこなった。この研究課題の主たる研究成果として大規模な問題を高速に解くソフトウェアパッケージ SFSDP を開発・公開した。

研究成果の概要（英文）：Sensor network localization (SNL) problems have attracted considerable research interests for a broad spectrum of applications such as environmental monitoring, traffic control and structural assessment. The problem is to estimate the locations of  $n$  sensors of unknown positions using given distances and some  $m$  sensors of known positions (called anchors) in a sensor network of  $m+n$  sensors. Finding the solutions of this problem is known to be NP-hard. Thus, approximating the solution of this problem has been dealt with from many angles. In this project, we have studied numerical methods based on the semidefinite programming (SDP) relaxation. The SDP relaxation can provide approximate solutions with accuracy, but the computational cost of solving SNL problems by the SDP relaxation becomes expensive rapidly as their sizes increase. To avoid this difficulty, we fully exploited the sparsity which were involved in large scale SNL problems and improved the performance of the SDP solver SDPA. As a final product, we released a software package SFSDP that can solve large-scale sensor network localization problems in high speed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	5,600,000	1,680,000	7,280,000
2011年度	2,900,000	870,000	3,770,000
2012年度	3,000,000	900,000	3,900,000
年度			0
年度			0
総計	11,500,000	3,450,000	14,950,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学・社会システム工学・安全システム

キーワード：OR, 最適化

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 本研究で用いる半正定値計画(SDP)緩和は2006年に Biswas-Ye によって提案されている。この手法はセンサー間の距離が正確であり、ネットワークが“剛”であるという条件のもとで、正確な位置を計算する強力な方法である。しかしながら、Biswas-Ye の SDP 緩和は計算量が多く大規模な問題に適用出来なかった。

(2) この欠点を和らげるために、2009年に疎性の有効活用を組み込んだ SDP 緩和が Kim-Kojima-Waki (SIAM Journal Optimization, Vol.20 192-215) によって提案されている。この SDP 緩和は Biswas-Ye の SDP 緩和と理論的に同じ精度を保証し、かつ、計算量を大幅に軽減している。

(3) 本研究は Kim-Kojima-Waki によって提案された疎性の有効活用を組み込んだ SDP 緩和の理論的な枠組みを出発点としている。

### 2. 研究の目的

(1) 理論的には、上述の Kim-Kojima-Waki の疎性の有効活用を組み込んだ SDP 緩和をさらに精緻化する。特に、疎性のさらなる活用による計算量の削減、数値的な安定性および推定精度の向上に重点を置く。

(2) 研究終了時点までに大規模な位置推定問題を高速に解く、実用性、信頼性の高い計算手法に基づくソフトウェアを公開する。

(3) 応用。

### 3. 研究の方法

互いに関連した以下の研究課題(1)~(5)を行う。

(1) 数理最適化問題への定式化。

(2) 数理最適化問題の求解によるセンサの位置推定。

(3) 推定位置の精度の向上。

(4) (2)で用いる半正定値計画問題の数値解法ソフトウェアパッケージである SDPA の高速化。

(5) モデルの拡張と応用を行う。

(1),(2)に関する基本的な枠組みはすでに上記の Kim-Kojima-Waki 論文で提案しており、それを数値的に安定した高速な計算手法として実現・実装することに主眼が置かれる。

### 4. 研究成果

主たる研究成果は以下の(1)~(5)である。

(1) 大規模なセンサネットワーク位置推定問題を高速、高精度で解くソフトウェア SFSDP (雑誌論文) 3, ホームページ等 1)の開発、

改良、高速化および公開。

(2) 半正定値計画問題の数値解法ソフトウェアパッケージである SDPA の高速化 (雑誌論文) 6, ホームページ等 2)。

(3) より大規模なセンサネットワーク位置推定問題に対するホモトピー法の開発 (雑誌論文) 1). これは当初の目的には入っていなかったが、枝数の多いセンサネットワークの位置推定には極めて効率がよいことが実証された。

(4) センサ位置の範囲推定の提案 (雑誌論文) 4の応用)。

(5) Euclidean Distance Geometry 問題への拡張 (S. Kim, M. Kojima and M. Yamashita, Parallel Implementation of Successive Sparse SDP Relaxations for Large-Scale Euclidean Distance Geometry Problems, Research Report B-470, Dept. of Math. and Comp. Sci., Tokyo Inst. Tech., 2012年11月)。

### 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 26 件)

1. M. Kojima and M. Yamashita, Enclosing Ellipsoids and Elliptic Cylinders of Semialgebraic Sets and Their Application to Error Bounds in Polynomial Optimization, Mathematical Programming 発表確定, 査読有。

2. J. Gotoh and K. Fujisawa, Convex optimization approaches to maximally predictable portfolio selection, Optimization, A Journal of Mathematical Programming and Operations Research, 発表確定, 査読有。

3. T. Umesato, T. Saitoh, R. Uehara, H. Ito and Y. Okamoto, The complexity of the stamp folding problem, Theoretical Computer Science, 発表確定. 査読有。

4. Y. Otachi, T. Saitoh, K. Yamanaka, S. Kijima, Y. Okamoto, H. Ono, Y. Uno and K. Yamazaki, Approximating the path-distance-width for AT-free graphs and graphs in related classes, Discrete Applied Mathematics, 発表確定. 査読有。

5. T. Mizutani, M. Yamashita, Correlative Sparsity Structures and Semidefinite Relaxations for Concave Cost Transportation Problems with Change of Variables, J. of Global Optimization, 発

表確定, 査読有.

6. S. Kim and M. Kojima, A Continuation Method for Large-sized Sensor Network Localization Problems, Pacific Journal of Optimization, Vol.9 (2013) 117-136, 査読有.

7. S. Kim, M. Kojima, H. Waki and M. Yamashita, Algorithm 920: SFSDP: a Sparse Version of Full SemiDefinite Programming relaxation for sensor network localization problems, ACM Transaction on Mathematical Software, Vol.38 (2012) 4, 査読有.

8. J. S. M. Anderson, M. Nakata, R. Igarashi, K. Fujisawa and M. Yamashita, The second-order reduced density matrix method and the two-dimensional Hubbard model, Computational and Theoretical Chemistry, Available online 23, August 2012. 査読有.

9. K. Fujisawa, T. Endo, H. Sato, M. Yamashita, S. Matsuoka and M. Nakata, High-Performance General Solver for Extremely Large-Scale Semidefinite Programming Problems, Proceedings of the 2012 ACM/IEEE conference on Supercomputing, SC '12, 2012. 査読有.

10. S. W. Bae and Y. Okamoto, Querying two boundary points for shortest paths in a polygonal domain, Computational Geometry: Theory and Applications, Vol.45 (2012) 284-293. 査読有.

11. H. Toyozumi, S. Tani, N. Miyoshi and Y. Okamoto, Reverse preferential spread in complex networks, Physical Review E, Vol.86 (2012) DOI: 10.1103/PhysRevE.86.021103. 査読有.

12. Y. Okamoto, Y. Otachi and R. Uehara, On bipartite powers of bigraphs, Discrete Mathematics & Theoretical Computer Science, Vol.14 (2012) 11-20. 査読有.

13. W. Didimo, M. Kaufmann, G. Liotta, Y. Okamoto and A. Spillner, Vertex angle and crossing angle resolution of leveled tree drawings, Information Processing Letters Vol. 112 (2012) 630-635. 査読有..

14. T. Ito, S. Nakano, Y. Okamoto, Y. Otachi, R. Uehara, T. Uno and Y. Uno, 4.31-approximation for the geometric unique coverage problem on unit disks, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 7676 (2012) 372-38. 査読有.

15. P. Angelini, C. Binucci, W. Evans, F. Hurtado, G. L. T. Mchedlidze, H. Meijer and Y. Okamoto, Universal point subsets for planar graphs, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 7676 (2012) 423-432. 査読有.

16. S. W. Bae, Y. Okamoto and C. Shin, Area bounds of rectilinear polygons realized by angle sequences, Lecture Notes in Computer Science, Vol.7676 (2012) 629-638. 査読有.

17. 横尾真, 岩崎敦, 櫻井祐子, 岡本吉央, 『計算機科学者のためのゲーム理論入門』シリーズについて, コンピュータ ソフトウェア, 29 巻 (2012) 2\_65-2\_68. 査読有.

18. 横尾真, 岩崎敦, 櫻井祐子, 岡本吉央, 『計算機科学者のためのゲーム理論入門』シリーズ第3回 メカニズムデザイン (基礎編), コンピュータ ソフトウェア, 29 巻 (2012) 4\_15-4\_31. 査読有.

19. 横尾真, 岩崎敦, 櫻井祐子, 岡本吉央, 『計算機科学者のためのゲーム理論入門』シリーズ第2回 非協力ゲーム (発展編), コンピュータ ソフトウェア, 29 巻 (2012) 3\_39-3\_53. 査読有.

20. 横尾真, 岩崎敦, 櫻井祐子, 岡本吉央, 『計算機科学者のためのゲーム理論入門』シリーズ第1回 非協力ゲーム (基礎編), コンピュータ ソフトウェア, 29 巻 (2012) 2\_69-2\_84. 査読有.

21. N. Tsukada, R. Hirade and N. Miyoshi Fluid limit analysis of FIFO and RR caching for independent reference models, Performance Evaluation, Vol. 69 (2012) 403-412. 査読有

22. M. Yamashita, K. Fujisawa, M. Fukuda, K. Nakata, M. Nakata, Algorithm 925: Parallel solver for semidefinite programming problem having sparse Schur complement matrix, ACM Transactions on Mathematical Software, Vol. 39 Issue 1, Article No. 6. 査読有

23. S. Kim, M. Kojima, M. Mevissen and M. Yamashita, "Exploiting Sparsity in Linear and Nonlinear Matrix Inequalities via Positive Semidefinite Matrix Completion", Mathematical Programming Vol.129 33-68 (2011). 査読有.

24. K. Murota, Y. Kanno, M. Kojima and S. Kojima, "A numerical algorithm for block-diagonal decomposition of matrix \*-algebras, Part I: proposed approach and application to semidefinite programming", Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics Vol.27 125-160 (2010). 査読有.

25. M. Mevissen and M. Kojima, "SDP Relaxations for Quadratic Optimization Problems Derived from Polynomial Optimization Problems", Asia-Pacific Journal of Operational Research Vol 27 (1) 15-38 (2010). 査読有.

26. S. Kim and M. Kojima, "Solving polynomial least squares problems via

semidefinite programming relaxations”, Journal of Global Optimization Vol. 46 (1) 1-23 (2010). 査読有.

[学会発表] (計 37 件)

1. 藤澤克樹, 大規模最適化問題に対するソフトウェア開発と高速&安定計算 ー理論からスパコンまでー, 統計的機械学習セミナー, 統計数理研究所(東京都立川市), 2013年3月26日
2. 有馬直彦, 小島政和, S.Kim, 「一般2次最適化問題と等価なCompletely Positive Programming --- 0-1 混合線形制約2次最適化問題への理論的応用 ---」, 日本オペレーションズ・リサーチ学会2013年春季研究発表会, 東京大学, 2013年3月5日.
3. Y.Okamoto, Improved Approximation for Geometric Unique Coverage Problems, Dagstuhl Seminar “Computational Geometry, 2013年3月4日, Schloss Dagstuhl(ドイツ)
4. 岡本吉央, シャカシャカと整数計画法, 組合せゲーム・パズル第8回ミニ研究集会, 2013年3月1日, 電気通信大学(東京都)
5. 並河雄紀, 岡本吉央, 大館陽太, 費用2種類の施設配置ゲームの仁とシャープレイ値の計算について, 情報処理学会第143回アルゴリズム研究発表会, 2013年3月1日, 飯坂温泉伊勢谷(福島県)
6. 藤澤克樹, 大規模最適化問題に対するソフトウェア開発と高速&安定計算 ー理論からスパコンまでー, 日本数式処理学会東北地区合同分科会, カルチャー仙台ビル(仙台市), 2013年1月26日
7. S.W.Bae, Y.Okamoto and C.Shin, Area Bounds of Rectilinear Polygons Realized by Angle Sequences, 23rd International Symposium on Algorithms and Computation (ISAAC 2012), 2012年12月21日, National Taiwan University (台湾)
8. T.Ito, S.Nakano, Y.Okamoto, Y.Otachi, R.Uehara, T.Uno and Y.Uno, A 4.31-Approximation for the Geometric Unique Coverage Problem on Unit Disks 23rd International Symposium on Algorithms and Computation (ISAAC 2012), 2012年12月20日, National Taiwan University (台湾)
9. P.Angelini, C.Binucci, W.Evans, F.Hurtado, G.Liotta, T.Mchedlidze, H.Meijer and Y.Okamoto, Universal Point Subsets for Planar Graphs, 23rd International Symposium on Algorithms and Computation (ISAAC 2012), 2012年12月20日, National Taiwan University (台湾)
10. 藤澤克樹, 大規模最適化問題に対するソフトウェア開発と高速&安定計算 ー理論からスパコンまでー, JST 湊ERATO セミナー, 北海道大学(札幌市), 2012年12月12日

11. 小島政和, 「0-1 混合整数 2 次計画問題は非負象限上の無制約 2 次最適化問題に変換出来るか?」, 科研費シンポジウム情報化ネットワーク社会に向けた高度な専門的数理的技術ライブラリの研究と開発, 東京工業大学, 2012年11月29日, 招待講演.
12. K.Fujisawa, T.Endo, H.Sato, M.Yamashita, S.Matsuoka, M.Nakata, High-performance general solver for extremely large-scale semidefinite programming problems”, 2012 ACM/IEEE conference on Supercomputing, SC '12, Salt lake city, USA, 2012年11月15日
13. 岡本吉央, うそはうそであると見抜けるアルゴリズム, 日本オペレーションズ・リサーチ学会関西支部講演会「続・娯楽のOR」(招待講演), 2012年11月15日, 大阪府立大学(大阪府)
14. 並河雄紀, 岡本吉央, 大館陽太, 施設配置ゲームにおける仁・シャープレイ値の計算について, 電子情報通信学会コンピュータシミュレーション研究会, 2012年10月31日, 東北大学(宮城県)
15. 岡本吉央, コア安定性の計算理論, 科研費基盤(S)キックオフシンポジウム「持続可能な発展のための資源配分メカニズム設計理論の構築」(招待講演), 2012年10月6日, JR博多シティ(福岡県)
16. 岡本吉央, 最適化×計算限界=(算法設計+問題構造)×(計算上界+計算下界), ELCミニ研究集会(B01), 2012年9月6日, 京都大学(京都府)
17. 藤澤克樹, 次世代スパコン技術を用いた超大規模グラフ解析と実社会への応用, 第11回情報科学技術フォーラム(FIT2012), 法政大学(東京都小金井市), 2012年9月4日
18. K.Fujisawa, T.Endo, S.Matsuoka, H.Sato, M.Yamashita, High-performance general solver for extremely large-scale semidefinite programming problems, 21st International Symposium on Mathematical Programming (ISMP 2012), Berlin, Germany, 2012年8月24日
19. M.Yamashita, I.Wang, An approach based on shortest path and connectivity consistency for sensor network localization problems, ISMP 2012, 2012年8月22日TU Berlin, (Berlin, Germany).
20. Y.Okamoto, Two (open) problems: simple, fun, and hopefully solvable, Fields Workshop on Discrete and Computational Geometry (招待講演), 2012年8月14日, Carleton University (カナダ)
21. T.Ito, S.Nakano, Y.Okamoto, Y.Otachi, R.Uehara, T.Uno and Y.Uno, A Polynomial-Time Approximation Scheme for the Geometric Unique Coverage Problem on Unit

Squares, 13th Scandinavian Symposium and Workshops on Algorithm Theory (SWAT 2012), 2012年7月4日, University of Helsinki (フィンランド)

22. 小島政和, 「多項式最適化問題の半正定値計画緩和」, 日本オペレーションズ・リサーチ学会最適化の理論と応用研究部会, 筑波大学, 2012年7月1日, 招待講演.

23. M. Cygan, H. Dell, D. Lokshtanov, D. Marx, J. Nederlof, Y. Okamoto, R. Paturi, S. Saurabh, and M. Wahlström, On problems as hard as CNF-SAT, 27th IEEE Conference on Computational Complexity (CCC 2012), 2012年6月26日, Universidade do Porto (ポルトガル)

24. 清見礼, 岡本吉央, 斎藤寿樹, 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, 電子情報通信学会コンピュータシミュレーション研究会, 2012年6月21日, 北海道大学 (北海道)

25. M. Kiyomi, Y. Okamoto, and T. Saitoh, Efficient Enumeration of the Directed Binary Perfect Phylogenies from Incomplete Data, 11th International Symposium on Experimental Algorithms (SEA 2012), 2012年6月8日, LaBRI (フランス)

26. Y. Okamoto, Improved Approximation for Geometric Unique Coverage Problems, 5th Combinatorial Algorithms Day, 2012年6月4日, ETH Zurich (スイス)

27. N. Miyoshi and T. Shirai, A cellular network model with Ginibre configured base stations, 4th Meeting of EURO Working Group on Stochastic Modelling (StochMod12), 2012年5月30日, Ecole Centrale Paris, Paris, France

28. 小島政和, 「半正定値計画緩和による大域的最適化」, 最適化理論の産業・諸科学への応用, 九州大学伊都キャンパス, 福岡, 2011年10月13日

29. 小島政和, 半正定値計画問題への招待, 最適化理論の産業・諸科学への応用, 九州大学伊都キャンパス, 九州大学伊都キャンパス, 福岡, 2011年10月13日

30. M. Kojima, Enclosing Ellipsoids and Elliptic Cylinders of Sets of Semialgebraic Sets and Their Application to Error Bound in Polynomial Optimization, National Cheng-Kung University, Tainan, Taiwan, November 26, 2010.

31. M. Kojima, Exploiting Structured Sparsity in Large Scale Semidefinite Programming Problems, National Cheng-Kung University, Tainan, Taiwan, November 26, 2010.

32. M. Kojima, Introduction to Semidefinite Programming, National

Cheng-Kung University, Tainan, Taiwan, November 24, 2010.

33. M. Kojima, SOS and SDP Relaxation of Polynomial Optimization Problems, National Cheng-Kung University, Tainan, Taiwan, November 22, 2010.

34. M. Kojima, Exploiting Structured Sparsity in Linear and Nonlinear Semidefinite Programs, University of California, San Diego (USA), October 21, 2010.

35. M. Kojima, Enclosing Ellipsoids and Elliptic Cylinders of Sets of Semialgebraic Sets and Their Application to Error Bound in Polynomial Optimization, Modern Trends in Optimization and Its Application, Workshop II: Numerical Methods for Continuous Optimization, IPAM, UCLA, Los Angeles, October 18, 2010.

36. M. Kojima, Exploiting Structured Sparsity in Large Scale Semidefinite Programming Problems, International Congress of Mathematical Software 2010, Kobe, September 13, 2010.

37. M. Kojima, Enclosing Ellipsoids and Elliptic Cylinders of Semialgebraic Sets and Their Application to Error Bounds in Polynomial Optimization, The University of Tsukuba, Tsukuba, July 31, 2010.

[その他]

ホームページ等

1. ソフトウェア SFSDP (A Sparse Version of Full SemiDefinite Programming Relaxation for Sensor Network Localization Problems) 公開ホームページ

<http://www.is.titech.ac.jp/~kojima/SFSDP122/SFSDP.html>

2. ソフトウェア SDPA ファミリー公開ホームページ

<http://sdpa.indsys.chuo-u.ac.jp/sdpa/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小島 政和 (KOJIMA MASAKAZU)

東京工業大学・大学院情報理工学研究科・名誉教授

研究者番号 : 90092551

(2) 研究分担者

岡本 吉央 (OKAMOTO YOSHIO)

電気通信大学・情報理工学 (系) 研究科・准教授

研究者番号 : 00402660

三好 直人 (MIYOSHI NAOTO)

東京工業大学・情報理工学（系）研究科・  
准教授

研究者番号：20263121

山下 真 (YAMASHITA MAKOTO)

東京工業大学・情報理工学（系）研究科・  
准教授

研究者番号：20386824

藤澤 克樹 (FUJISAWA KATSUKI)

中央大学・理工学部・教授

研究者番号：40303854

(3)連携研究者

なし