

令和元年6月28日現在

機関番号：25403

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H02878

研究課題名(和文) 非線形観測による推定の新展開

研究課題名(英文) Novel Development of Nonlinear Sparse Recovery

研究代表者

三村 和史 (Mimura, Kazushi)

広島市立大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：40353297

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,400,000円

研究成果の概要(和文)：圧縮センシングのような線形観測に基づくスパース推定の枠組みを、非線形観測の場合に拡張した場合についての解析手法を開発し、具体的な課題に適用した。既存の解析手法では得られない非線形性に由来する性質を明らかにした。さらに、線形観測の場合を含む関連の深い諸問題についての解析や、非線形性を利用した機械学習的手法の推定手法への適用などを行ない、応用上でも重要な知見を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

非線形観測からの推定の問題について、理論的な取り扱い方法を提案した。提案手法の適用、推定手法の開発、および関連する問題群への解析によって、理論と応用の両面において既存の推定問題の取り扱いの枠組みを拡げた。

研究成果の概要(英文)：Methods to analyze nonlinear sparse recovery systems are developed and are applied to some information theoretic problems. Problems including linear sparse recovery are analyzed, and deep-learning like techniques based on nonlinearity are applied to develop estimators for nonlinear systems.

研究分野：情報理論，情報統計力学

キーワード：情報理論 情報統計力学 信号処理 計算量理論

1. 研究開始当初の背景

本研究課題は、非線形観測による推定問題の性質の理解への貢献を目指すものである。近年提案された高次元データから本質的な構造を再現する圧縮センシングの発展などにより、線形観測から元の情報を推定する問題については膨大な研究の成果が蓄積されてきた。その一方で、非線形観測から元の情報を推定する問題は、グループテストやブーリアン圧縮センシングを始めとする圧縮センシングの分野、有歪データ圧縮などの情報理論の分野、および、頂点被覆・集合被覆・ゴシップアルゴリズムなどの計算機科学の分野など、多くの分野に出現する重要な問題であり、さらなる研究の進展が期待される。

2. 研究の目的

非線形観測による推定問題解析における一般的な理論的枠組みの構築し、情報統計力学や現代符号理論に基づく非線形観測の理論の深化と、計算機科学等の諸問題へ展開することを目的とする。

3. 研究の方法

これらに共通して適用できる枠組みを検討するため、特に線形観測を非線形変換するという構造を持つ非線形性に着目する。非線形観測を含む重要な項目のうち、情報統計力学、現代符号理論、理論計算機科学によって解析が可能と考えられる問題群、および関連する問題群について網羅的に解析に取り組む。

4. 研究成果

4. 1 情報統計力学に基づく理論の深化

代表的な非線形観測の問題のひとつであるグループテストについての解析的な評価を行った。グループテストは、複数の人の血液を混ぜたものを検査することによって個々の検査結果を得る手法に端を発する推定問題である。混ぜた血液が陽性となるのは、少なくともひとりが陽性であるときであり、論理和演算をした結果が観測されることになる。このような非線形観測に対して、起こり得る検査結果の集合を考え、検査結果の最小距離の分布を解析的に評価した。線形符号などの場合とは異なり、非線形観測の場合は、定義のとおり全ての観測結果の対の距離を計算する以外に距離分布を求める方法はない。得られた距離分布から、検査結果の最小距離を評価することが可能となる。検査結果の最小距離によって、異なるふたつの状態が同じ観測を与えることとなる限界を、解析的に評価することが可能となった。この手法は、任意の次数分布で定義される観測行列についても性能評価や、閾値グループテスト、観測にノイズのあるグループテストなどにも適用ができる。閾値の決め方の影響や、ノイズの影響などについて議論をした。圧縮センシングのような線形観測の場合、一般には(陽性の人の数に対応する)非零要素数は少ないほど誤差の小さい推定が可能となるが、グループテストのような非線形観測の場合、陽性の人の数は少なすぎてもいけないことなどが明らかとなった。この解析手法は、圧縮センシングにもそのまま適用ができる。観測に飽和現象がある場合などの非線形性を導入した圧縮センシングに関する解析を行った。

また、非線形観測の特殊な場合である線形観測についても議論した。(1) 各要素の平均が0でないランダムな観測行列を用いた線形観測にノイズが加わった場合、Lassoで推定をすると観測数を増やすと、却って推定誤差が大きくなってしまう場合があることがわかった。正則化項の大きさと観測数のふたつをどのように決めればよいかについて、ランダム行列平均を用いて評価した。(2) 非線形観測と線形観測の両方で広く用いられる近似的確率伝搬法の収束性についても議論をした。反復法が安定に収束するようなダンピングを導入した推定方法についての性能評価をした。(3) 小規模の問題に対する近似的確率伝搬法(AMP)の性能低下の原因を明らかにするために、確率伝搬法(BP)を直接適用した場合の性能との比較を行った。(4) ブロック構造をもつランダム行列について、ブロックサイズを無限大とした極限における漸近的な固有値分布を求めた。(5) 観測がポアソン分布に従うスパース推定の問題を、L1ノルム正則化で解いた時の性能評価を目的として、確率伝搬法にもとづくアルゴリズムを定式化し、密度発展法を用いて解析をした。(6) カーネル法に基づく回帰手法において、説明変数の置換に関して不変という意味での対称性を満たす回帰モデル構成方法を提案した。(7) 観測行列の要素が0でない平均をもつ分布から独立に生成された場合について、圧縮センシングにおけるL1ノルム最小化の性能を解析した。推定対象の疎ベクトルの0でない要素の分布に偏りがある場合には、行列要素の平均を0から大きくしていくにつれて、より少数の線形観測からL1ノルム最小化によって疎ベクトルが誤差なく推定できることがわかった。(8) ブロックスパースなベクトルを推定する手法として知られている混合L2/L1ノルム最小化について、相転移条件を解析的に評価した。観測行列の各ブロックが0でない平均をもつ分布から独立に生成された場合について解析を行い、推定対象の

ベクトルの 0 でないブロックの値の分布に偏りがある場合には、行列の各ブロックの平均が大きくなるにつれて、より少数の線形観測から混合 L2/L1 ノルム最小化によってブロックスパースベクトルが誤差なく推定できることがわかった。(9) 空間結合の構造をもつ数独について解配列の上界を評価した。

4. 2 現代符号理論に基づく理論の深化

現代符号理論に関する研究成果は次のとおりである。(1) 圧縮センシングのための学習可能な反復アルゴリズムを提案した。提案手法は従来の深層学習法よりも少数のパラメータで高い推定精度の疎信号復元を可能とする。また、観測行列の各成分の平均値が非零の場合や条件数が大きい場合への拡張、実データである手書き文字画像の復元実験を行い、既存手法よりも高い推定性能を示すことを確認した。(2) 平面上に定義されるランダム幾何グラフを対象とし、確率的にノード故障が発生する場合のグラフの連結確率の近似式を提案し、相転移現象を解析した。この解析は、SISO/MIMO 等の通信方式や各種フェージングも考慮することが可能である。議論したランダムグラフの連結性は、アドホック無線センサネットワークの信頼性の基本的な尺度となっている。(3) ランダムなノード故障を仮定した場合のエルデシュ・レニーランダムグラフの連結性の相転移現象を解析した。まず、平均場近似であるキャピティ法により有限ノード数での連結確率の近似式を導き、近似式の漸近解析から、平均次数がノード数の対数に比例する($O(\ln n)$)領域に相転移の閾値が存在することを予想した。(4) 誤り訂正符号で使用される確率伝搬法に適した量子化器を構成するために、深層ニューラルネットワークによる学習可能な量子化器を提案した。数値計算の結果、提案した量子化器は比較的信号長が小さな場合、BP 復号器に効果的な量子化が得られることが明らかとなった。無線通信において信号の量子化は消費電力削減に寄与するが、同時に発生する量子化雑音による信号劣化を低減することが重要となる。(5) QPSK 変調を利用した過負荷 MIMO をスパース信号復元とみなし、我々の提案した学習可能反復アルゴリズムを応用することで、学習可能な MIMO 信号検出アルゴリズムを提案した。先行研究と比較し、学習可能パラメータが少数かつ低学習/実行コストであるにも関わらず、高い信号検出性能を持つことを示した。MIMO は次世代無線通信技術として注目されており、大規模かつ過負荷の状況で低計算コストかつ高推定精度の信号検出アルゴリズムを開発することは重要である。

4. 3 計算機科学等の諸問題への展開

計算機科学に関する研究成果は次のとおりである。(1) 木構造から生じる低競合ショートカットを発見する、汎用的な分散アルゴリズムを示した。提案アルゴリズムは任意のグラフに対して適用可能な初めてのアルゴリズムである。(2) 木幅あるいは種数が制限されているグラフに対する効率的な低競合ショートカット構成の方法を示した。種数制限グラフに対しては、より効率のよいショートカットの存在性および構成可能性が示されており、また木幅が制限されたグラフクラスに関しては初めて非自明な性能を達成するショートカットの構成可能性が示された。(3) 分散グラフアルゴリズムの標準的なモデルの一つである CONGEST モデルにおいて、世界で初めて三角形の発見および列挙を準線形時間で行う分散アルゴリズムを示した。また、同問題に対する初めての非自明な計算時間下界を示した。(4) 空間中を移動しながら通信を繰り返すエージェント群からなる受動的モバイルシステムに対して、その理論モデルのひとつである個体群プロトコルモデル上での分散アルゴリズムについて、特に集合通信操作、メッセージ消失に対する故障耐性に関する結果を得た。また、計算機ネットワークトポロジ上でサイズ 3 の閉路を検出、列挙する問題に対する高速な分散アルゴリズムを得た。(5) ネットワーク上を自律的に移動するモバイルエージェントによる、グラフ探索の領域計算量を改善した。具体的には、モバイルエージェントによる深さ優先探索問題について、エージェントの内部記憶領域、各計算機の記憶領域がともに $O(1)$ ビットとなるようなアルゴリズムを提案した。(6) 受動的モバイルネットワークにおける計算機群を k 個の等しいサイズのグループに分割するアルゴリズムを提案した。提案アルゴリズムは既知の 2 分割アルゴリズムの一般化であり、また領域計算量に優れたアルゴリズムである。(7) 分散・並列計算における一般的なモデルのひとつである CONGEST-CLIQUE に対して量子通信を可能とした拡張モデルを考え、そのうえで古典モデルよりも真に高速な全点対最短経路アルゴリズムを提案した。(8) 最小次数制限全域木問題は、木中の頂点の最大次数が最小となるような全域木を計算する問題であり、無線ネットワークにおける全放送問題等への応用がある。この問題は NP 完全であり、最適解を現実的な計算時間で求めることは絶望視されている。最適次数 d に対して最大次数が $O(d + \log n)$ となるような全域木を発見する分散アルゴリズムを提案した。(9) 分散計算のモデルのひとつである LOCAL モデルにおいて、漸近的な実行時間を変化させることなく、アルゴリズムが利用する総メッセージ数を削減する一般的な手法を提案した。(10) 受動的モバイルネットワークのモデルのひとつである個体群プロトコルモデルにおいて、 $O(\log n)$ 期待時間、 $O(\log n)$ 状態数の厳密リーダー選挙問題を提案した。提案アルゴリズムは既知のリーダー選挙アルゴリズムに対して、ほぼ同等な状態数でより高速に動作する。(11) 受動的モバイルネットワークのモデルのひとつである個体群プロトコルモデルにおいて、集合通信操作を、収集する値のドメインサイズに寄らない、エージェント数 n に対する準線形時間で達成するアルゴリズムを提案した。提案アルゴリズムを用いて、当該モデルが対称関数に関

する任意のストリーム計算アルゴリズムをシミュレート可能であることも併せて示した。
これらの研究成果に関して、論文投稿の準備を進めている。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 8 件)

- ① S. Takabe and T. Wadayama, “Approximation Theory for Connectivity of Ad Hoc Wireless Networks with Node Faults,” IEEE Wireless Communications Letters, 2019 (in press)
- ② S. Takabe and T. Wadayama, “Fault tolerance of random graphs with respect to connectivity: Mean-field approximation for semidense random graphs,” Physical Review E, 2019 (in press)
- ③ Ryota Eguchi and Taisuke Izumi, “Sub-linear time Aggregation in Probabilistic Population Protocol Model,” IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 2019 (in press)
- ④ D. Ito, S. Takabe, and T. Wadayama, “Trainable ISTA for Sparse Signal Recovery,” IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 67, pp. 3113-3125, 2019
- ⑤ Hiroto Yasumi, Naoki Kitamura, Fukuhito Ooshita, Taisuke Izumi, Michiko Inoue, “A Population Protocol for Uniform k-partition under Global Fairness,” International Journal of Networking and Computing, vol. 9, pp.97-110, 2019
- ⑥ Toru Aonishi, Kazushi Mimura, Masato Okada, and Yoshihisa Yamamoto, “Statistical mechanics of CDMA multiuser detector implemented in coherent Ising machine,” Journal of Applied Physics, vol. 124, pp. 223102, 2018
- ⑦ Toru Aonishi, Masato Okada, Kazushi Mimura, and Yoshihisa Yamamoto, “Critical memory capacity of Hopfield model implemented in coherent Ising machine,” Journal of Applied Physics, vol. 124, pp. 152129, 2018
- ⑧ Toru Aonishi, Kazushi Mimura, Shoko Utsunomiya, Masato Okada, and Yoshihisa Yamamoto, “Statistical Mechanics of Coherent Ising Machine - The Case of Ferromagnetic and Finite-Loading Hopfield Models -,” Journal of the Physical Society of Japan, vol. 86, pp. 104002.1-104002.7, 2017

[学会発表] (計 28 件)

- ① Kazushi Mimura and Jun’ichi Takeuchi, “Dynamics of Damped Approximate Message Passing Algorithms,” 2019 Information Theory Workshop (ITW2019), 2019
- ② Kazushi Mimura, “A stable iterative sparse recovery algorithm and its analysis,” APSCIT 2019 Annual Meeting, 2019 (invited)
- ③ Kazushi Mimura, “Property of measurements in the noisy group testing scheme,” IC-LYCS2019, 2019 (invited)
- ④ Toshiyuki Tanaka, “Phase Transition in Mixed L2/L1-norm Minimization for Block-Sparse Compressed Sensing,” 2019 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT2019), 2019
- ⑤ Taisuke Izumi, Francois Le Gall, “Quantum Distributed Algorithm for the All-Pairs Shortest Path Problem in the CONGEST-CLIQUE Model,” ACM Symposium on Principle of Distributed Computing (PODC2019), 2019
- ⑥ Michael Dinitz, Magnus M. Halldorsson, Taisuke Izumi, Calvin Newport, “Distributed Minimum-Degree Spanning Trees,” ACM Symposium on Principle of Distributed Computing (PODC2019), 2019
- ⑦ Shimon Bitton, Taisuke Izumi, Shay Kutten, Yuval Emek, “Brief Announcement: Message Reduction in the LOCAL model is a Free Lunch,” ACM Symposium on Principle of Distributed Computing (PODC2019), 2019
- ⑧ Yuichi Sudo, Fukuhito Ooshita, Taisuke Izumi, Hirotsugu Kakugawa, and Toshimitsu Masuzawa, “Brief Announcement: Logarithmic Expected-Time Leader Election in Population Protocol Model,” ACM Symposium on Principle of Distributed Computing (PODC2019), 2019
- ⑨ Kazushi Mimura, “Parallel dynamics of the 3-body sparse SK model,” Seminar at Institute for Mathematical and Molecular Biomedicine, King’s college London, 2018
- ⑩ Kazushi Mimura, “A study on dynamics of iterative sparse recovery algorithms,” Japan-Singapore Workshop on Coding and Information Theory, Singapore, Mar. 2018 (invited)
- ⑪ S. Takabe and T. Wadayama, “Connectivity of Ad Hoc Wireless Networks with Node Faults,” 2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM2018), 2018
- ⑫ T. Wadayama and S. Takabe, “Joint Quantizer Optimization based on Neural Quantizer for Sum-Product Decoder,” 2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM2018), 2018
- ⑬ D. Ito, S. Takabe, and T. Wadayama, “Trainable ISTA for Sparse Signal Recovery,” IEEE International Conference on Communications (ICC2018), 2018

- ⑭ Naoki Kitamura, Kazuki Kakizawa, Yuya Kawabata, and Taisuke Izumi, “Brief Announcement: Graph Exploration Using Constant-Size Memory and Storage,” ACM Symposium on Principle of Distributed Computing (PODC2018), 2018
- ⑮ Kazushi Mimura and Tadashi Wadayama, “Anneal Average Distance Distribution of Measurement vectors in Non-adaptive Group Testing,” 2018 International Conference on Applied Mathematics and Computational Science, 2018
- ⑯ Toshiyuki Tanaka, “Performance analysis of L1-norm minimization for compressed sensing with non-zero-mean matrix elements,” 2018 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT2018), 2018
- ⑰ Yosuke Fujii, Kohei Suzuki, Ayako Iwasaki, Takuya Okada, Kazushi Mimura, and Ryo Yamada, “Morphological characterization of 3D shape with curvature flow and spherical harmonics decomposition,” 2017 IEEE International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI2017), 2017
- ⑱ Giuseppe Antonio Di Luna, Paola Flocchini, Taisuke Izumi, Tomoko Izumi, Nicola Santoro, and Giovanni Viglietta, “Population Protocols with Faulty Interactions: The Impact of a Leader,” The 10th International Conference on Algorithms and Complexity (CIAC2017), 2017
- ⑲ Giuseppe Antonio Di Luna, Paola Flocchini, Taisuke Izumi, Tomoko Izumi, Nicola Santoro, and Giovanni Viglietta, “On the Power of Weaker Pairwise Interaction: Fault-Tolerant Simulation of Population Protocols,” The 37th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS2017), 2017
- ⑳ Taisuke Izumi and Francois Le Gall, “Triangle Finding and Listing in CONGEST Networks,” 2017 ACM Symposium on Principles of Distributed Computing (PODC2017), 2017
- 21 Yota Eguchi and Taisuke Izumi, “Brief Announcement: Fast Aggregation in Population Protocols,” 2017 International Symposium on Distributed Computing (DISC2017), 2017
- 22 Kazushi Mimura, “Recent Progress in Compressed Sensing,” RIMS (Research Institute for Mathematical Sciences, Kyoto University) Research Project, 2016 (invited)
- 23 Kazushi Mimura, “Distance Distribution of Nonlinear Codes in Nonlinear Measurement Systems - Analysis of Noisy Group Testing-,” Seminar at Institute for Mathematical and Molecular Biomedicine, King's College London, 2016
- 24 Tadahiro Kitazono and Kazushi Mimura, “Upper Bounds for the Number of Solutions to Spatially Coupled Sudokus,” 2016 IEEE International Symposium on Information Theory and its Applications (ISITA2016), 2016
- 25 Arise Kuriya and Toshiyuki Tanaka, “Effects of the approximations from BP to AMP for small-sized problems,” 2016 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT2016), 2016
- 26 Toshiyuki Tanaka, “Limiting eigenvalue distributions of block random matrices with one-dimensional coupling structure,” 2016 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT2016), 2016
- 27 B. Haeupler, T. Izumi, G. Zuzic, “Low-Congestion Shortcut without Embedding,” 2016 ACM Symposium on Principles of Distributed Computing (PODC), 2016
- 28 B. Haeupler, T. Izumi, G. Zuzic, “Near-Optimal Low-Congestion Shortcuts on Bounded Parameter Graphs,” 2016 International Symposium on Distributed Computing (DISC), 2016

など

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.prl.info.hiroshima-cu.ac.jp>

<http://www-adsys.sys.i.kyoto-u.ac.jp>

<http://twlab.web.nitech.ac.jp>

<http://wadalab.web.nitech.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名： 田中 利幸

ローマ字氏名： Toshiyuki Tanaka

所属研究機関名： 京都大学

部局名： 情報学研究科

職名： 教授

研究者番号 (8 桁)： 10254153

研究分担者氏名： 和田山 正
ローマ字氏名： Tadashi Wadayama
所属研究機関名： 名古屋工業大学
部局名： 工学研究科
職名： 教授
研究者番号 (8桁)： 20275374

研究分担者氏名： 泉 泰介
ローマ字氏名： Taisuke Izumi
所属研究機関名： 名古屋工業大学
部局名： 工学研究科
職名： 准教授
研究者番号 (8桁)： 20432461

(2) 連携研究者

連携研究者氏名： 竹内 純一
ローマ字氏名： Jun'ichi Takeuchi
所属研究機関名： 名古屋工業大学
部局名： 工学研究科
職名： 教授
研究者番号 (8桁)： 80432871

連携研究者氏名： 高邊 賢史
ローマ字氏名： Satoshi Takabe
所属研究機関名： 名古屋工業大学
部局名： 工学研究科
職名： 助教
研究者番号 (8桁)： 60804218

(3) 研究協力者

研究協力者氏名： A.C.C. Coolen
ローマ字氏名： A.C.C. Coolen
所属研究機関名： King's College London, UK

※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。