

令和 2 年 6 月 24 日現在

機関番号：25403

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2019

課題番号：16K12496

研究課題名(和文) 圧縮センシングのダンピング付き反復再構成法の解析と応用

研究課題名(英文) Analysis of Damped Iterative Algorithms for Compressed Sensing and Its Applications

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) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題は、広い応用のある圧縮センシングの推定手法の解析を目的とする。時間計算量を小さくするために、反復推定アルゴリズムが用いられている。ダンピングを導入した場合の反復推定アルゴリズムを解析した。IST および Orthogonal AMP にダンピングを導入したアルゴリズムを解析し、ダンピングを導入しても Onsager 項はダンピング項には影響がないことを示し、ダンピングを導入した Orthogonal AMP の結果が、ダンピングを導入した AMP を説明することを示した。結果は、適用範囲の広い効率的なアルゴリズム開発に適用できる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

圧縮センシングの反復推定アルゴリズムは時間計算量が小さく、応用でとても重要になる。しかし、現在の反復推定アルゴリズムは、観測行列の性質によっては発散してしまう問題があり、比較的狭いクラスの観測行列でしか直接適用することが困難であり、人為的にダンピングなどを導入することなどが必要になる。本研究課題の結果は、そのような反復計算を安定にさせ、適用範囲を広くしたうえで効率的なアルゴリズム開発に適用でき、様々な応用への貢献が期待できる。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to analyze iterative estimation algorithms for compressed sensing. Iterative algorithms are used to reduce the time complexity to estimate the original signal. We have analyzed the iterative estimation algorithms that the damping effect is introduced. We analyzed the algorithm of the damped IST and the damped Orthogonal AMP, and showed that even if damping was introduced, the damping term did not affect the Onsager term. Our results can be applied to develop efficient algorithms with a wide range of applications.

研究分野：数理工学

キーワード：圧縮センシング 近似的確率伝搬法 ダンピング 経路積分法

1. 研究開始当初の背景

スパース推定は、高次元の冗長な情報から、冗長性を取り除いた低次元の情報を取り出す枠組みである。非零要素が少ない高次元の原信号の線形和を少し観測して、その少ない観測信号から原信号を推定する問題として定式化される。できるだけ少ない観測信号から、疎な高次元の原信号を推定することが目標となる。この枠組みは統計学での回帰分析のひとつであり、早くから機械学習の分野で応用されており、情報工学、通信工学、医用工学、画像処理などの幅広い分野に応用があり注目されている。大規模な高次元データの効率的な再構成法の開発や応用など競争が激化している。

圧縮センシングの疎情報の再構成の問題では、理論的に最適な再構成法は、組合せ爆発に起因して指数的な計算量が必要となる。このため、最適な推定法を多項式時間の反復再構成法で近似的に解くという接近法がとられている。最近、高速かつ理論的に最適なものと同等の反復再構成法も発見されたが、適用できる観測の設定には強い制約があり、制約を満たさないとき推定値が発散してしまうなど、そのままでは適用範囲が限定的になってしまっているのが現状であり、改善が望まれている。

2. 研究の目的

本研究課題は、圧縮センシングの効率的な反復推定法を構成することを目標とする。反復再構成法の収束性の問題が顕在化して以降、収束性の改善手法が競争的に検討されてきた。代表的な反復推定アルゴリズムである AMP は、観測行列の各要素が従う確率分布の平均が 0 に近い値でなければならないなど、観測行列の統計的な性質が制約されてしまうことが問題となっている。より広いクラスの観測行列に対応するために、これまでに、期待値伝搬法、適応 TAP に基づく手法、その拡張にあたる直交 AMP や、Vector AMP などが提案され、詳しく解析されてきた。これらのほか、深層展開を用いた反復推定アルゴリズムの最適化についても検討が進められている。

反復計算を安定にするための手法の中でも特に、1 回の反復での更新量を小さくするというダンピングを導入する方法は、様々なアルゴリズムに導入が容易であり有力な方法のひとつとなっている。ダンピングとは、1 回の反復での更新量を小さくする効果のことである。ダンピングの効果が強すぎると 1 回の反復での変化が少なくなり過ぎるため計算時間が増加してしまい、逆に弱すぎると収束性は改善されない。つまり、最適な強さがあることになる。しかし、現在も最適なダンピングの強さは不明であり、解明が急務となっている。そこで、本研究課題では、ダンピングが導入された反復推定アルゴリズムを解析することによって、収束が保証された高速で性能のよい反復再構成法の構成を目指した。反復再構成法において、反復ステップごとに推定誤差を評価する。この解析は、最適なダンピングの強さを評価可能にするものとなる。

3. 研究の方法

圧縮センシングにおいての、収束が保証された効率的な反復再構成法の構成を目指して、本研究課題では、

- (1) 収束条件の検討。
- (2) ダンピングを導入した IST の推定値の時間変化の解析と、収束条件の評価。
- (3) ダンピングを導入した直交 AMP の推定値の時間変化の解析と、収束条件の評価。
- (4) ダンピングを導入した AMP の推定値の時間変化の解析と、収束条件の評価。

のように、問題を分割して段階的に取り組み、具体的な課題への適用を検討した。

4. 研究成果

関数解析の分野においても、Mann の不動点近似定理などのダンピングと同等な反復計算について研究が進められている。しかし、Mann の不動点近似定理を AMP へそのままの形式で適用することは、Onsager 項があるために適用することは困難であった。このため、反復履歴を計算に取り込むことのできる経路積分法によって、まず AMP に Onsager 項を削除した形式をしている IST にダンピングを導入した反復推定アルゴリズムの解析を行った。CDMA 通信についての、Onsager 項キャンセリング並列干渉除去アルゴリズムと同様の形式のキャンセル項が必要となることがわかった。解析の結果は、隣り合う推定値の推定値の変化量（応答関数）に依存することがわかった。

続いて、AMP の変形である直交 AMP の解析を行った。メッセージの独立性を仮定して導かれた状態発展法の結果を、経路積分法によって仮定なく導出することに成功した。これによって、直交 AMP の解析結果が AMP の解析結果と一致することがわかった。次にダンピング直交 AMP を解析した。これによって、ダンピング直交 AMP の Onsager 項は、ダンピングによる慣性項には依存せず、ダンピングのない直交 AMP の Onsager 項と（定数倍を除いて）同じになり、応答関数が全て 0 になることがわかった。これは、ダンピング直交 AMP の解析が、ダンピングを導入した AMP にも適用できることを示唆する。ダンピング直交 AMP の解析結果と、ダンピング AMP の計算機実験の値とよく一致することを示した。

ダンピングをスパース重ね合わせ符号の反復復号アルゴリズムに適用することについても検討した。スパース重ね合わせ符号は、メッセージを表すスパースベクトルにガウス分布から生成した観測行列との積により AWGN 通信路のための符号化を生成する手法である。スパース重ね合わせ符号のダンピングを導入した反復復号アルゴリズムのダンピング係数を深層学習によって最適化した。深層学習から得られる結果は、ダンピング係数の初期値に依存することがわかった。最適なダンピング係数系列は、1 系列に定まらず一定の大きさを持った領域にあることが示唆され、この知見は今後のダンピング係数系列の最適化に利用できる。また、ベルヌーイ分布から生成した 2 元観測行列を用いた場合を考察した。従来研究において、圧縮センシングにおける L0 再構成に対応する復号法を用いた場合、ガウス分布による観測行列を採用した場合に比べ、達成可能な伝送速度とシャノン限界との差が、 n を符号長とするとき、 $(\log n)^{1/2}/n^{1/8}$ 程度以下であることが知られていたが、本論文では、この差分が実際には $n^{1/4}$ 程度以下であることを示した。

これらの結果の一部は、既に学術論文誌での掲載、国内会議や国際会議での発表をしており、引き続き論文化を進めている。また、ダンピング直交 AMP の解析結果を用いたダンピング係数の最適化、平衡状態解析による収束条件の評価、ダンピング AMP の直接的な経路積分法による解析、条件付け法による厳密な解析などへと展開している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yoshinari Takeishi and Jun'ichi Takeuchi	4. 巻 2
2. 論文標題 An improved analysis of least squares superposition codes with bernoulli dictionary	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Statistics and Data Science	6. 最初と最後の頁 591-613
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s42081-019-00057-9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Toru Aonishi, Kazushi Mimura, Masato Okada, and Yoshihisa Yamamoto	4. 巻 124
2. 論文標題 Statistical mechanics of CDMA multiuser detector implemented in coherent Ising machine	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 233102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5041998	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Toru Aonishi, Masato Okada, Kazushi Mimura, and Yoshihisa Yamamoto	4. 巻 124
2. 論文標題 Critical memory capacity of Hopfield model implemented in coherent Ising machine	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 152129
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5041997	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Toru Aonishi, Kazushi Mimura, Shoko Utsunomiya, Masato Okada, and Yoshihisa Yamamoto	4. 巻 86
2. 論文標題 Statistical Mechanics of Coherent Ising Machine - The Case of Ferromagnetic and Finite-Loading Hopfield Models -	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 104002, 7 pages
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.86.104002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計24件(うち招待講演 9件/うち国際学会 12件)

1. 発表者名 Kazushi Mimura and Jun'ichi Takeuchi
2. 発表標題 Dynamics of Damped Approximate Message Passing Algorithms
3. 学会等名 The 2019 Information Theory Workshop (ITW2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazushi Mimura
2. 発表標題 A stable iterative sparse recovery algorithm and its analysis
3. 学会等名 APSCIT 2019 Annual Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazushi Mimura
2. 発表標題 Property of measurements in the noisy group testing scheme
3. 学会等名 The 2019 International Conference for Leading and Young Computer Scientists (IC-LYCS 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazushi Mimura
2. 発表標題 On dynamics of iterative sparse recovery algorithms
3. 学会等名 CCF YOCSEF workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Minori Ihara, Kazunori Iwata, Nobuo Suematsu, and Kazushi Mimura
2. 発表標題 Typical Performance of Sparse Signal Recovery from a Linear Measurement with Large Coherence
3. 学会等名 The 2018 International Symposium on Information Theory and Its Applications (ISITA2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroki Yamamoto, Kazunori Iwata, Nobuo Suematsu, and Kazushi Mimura
2. 発表標題 A Shape Matching Method Considering Computational Feasibility
3. 学会等名 The 2018 International Conference on Signal Processing and Machine Learning (SPML2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazushi Mimura
2. 発表標題 A study on dynamics of iterative sparse recovery algorithms
3. 学会等名 Japan-Singapore Workshop on Coding and Information Theory (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazushi Mimura and Tadashi Wadayama
2. 発表標題 Anneal Average Distance Distribution of Measurement vectors in Non-adaptive Group Testing
3. 学会等名 The 2018 International Conference on Applied Mathematics and Computational Science (ICAMCS2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yosuke Fujii, Kohei Suzuki, Ayako Iwasaki, Takuya Okada, Kazushi Mimura, and Ryo Yamada
2. 発表標題 Morphological characterization of 3D shape with curvature flow and spherical harmonics decomposition
3. 学会等名 The 2017 IEEE International Symposium on Biomedical Imaging (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 三村和史, 森健, 竹内純一
2. 発表標題 スパース推定のためのダンピングAMPの解析と深層展開
3. 学会等名 電子情報通信学会情報理論研究会若手研究者のための講演会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山田亮, 三村和史, 吉安徹
2. 発表標題 閉曲面三角メッシュからの「おおまかな形特徴量」抽出
3. 学会等名 第108回人工知能基本問題研究会 (SIG-FPAI) (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 竹内純一, 三村和史
2. 発表標題 スパース重ね合わせ符号の状況と課題
3. 学会等名 電子情報通信学会情報理論研究会若手研究者のための講演会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 波多江優和, 三村和史, 川喜田雅則, 竹内純一
2. 発表標題 スパース重ね合わせ符号のためのBayes最適AMP復号器
3. 学会等名 電子情報通信学会情報理論研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 青西亨, 三村和史, 岡田真人, 山本喜久
2. 発表標題 コヒーレント・イジングマシンの統計力学 -CDMAマルチユーザ復号器の場合-
3. 学会等名 電子情報通信学会ニューロコンピューティング研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中川瞬希, 青西亨, 三村和史, 岡田真人, 山本喜久
2. 発表標題 コヒーレントイジングマシンの統計力学 -離散シナプスを持つHopfieldモデルの解析-
3. 学会等名 電子情報通信学会ニューロコンピューティング研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 三村和史
2. 発表標題 反跳場項がキャンセルできる縮小写像に関する考察
3. 学会等名 第2回情報理論および符号理論とその応用ワークショップ
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 井原みのり, 岩田一貴, 末松伸朗, 三村和史
2. 発表標題 大きなコヒーレンスを持つ観測によるスパース推定の性能評価
3. 学会等名 第2回情報理論および符号理論とその応用ワークショップ
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 三村和史, ACC Coolen
2. 発表標題 イジング模型の同期的反復過程の定常状態の解析
3. 学会等名 情報理論とその応用シンポジウム
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Kazushi Mimura
2. 発表標題 Recent Progress in Compressed Sensing
3. 学会等名 RIMS (Research Institute for Mathematical Sciences, Kyoto University) Research Project (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Kazushi Mimura
2. 発表標題 Distance Distribution of Nonlinear Codes in Nonlinear Measurement Systems -Analysis of Noisy Group Testing-
3. 学会等名 Seminar at Institute for Mathematical and Molecular Biomedicine, King's college London (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 藤井庸祐, 鈴木康平, 岡田卓也, 岩崎絢子, 三村和史, 山田亮
2. 発表標題 すべての細胞は真ん丸に
3. 学会等名 バイオイメージ・インフォマティクスワークショップ 2016
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Tadahiro Kitazono and Kazushi Mimura
2. 発表標題 Upper Bounds for the Number of Solutions to Spatially Coupled Sudokus
3. 学会等名 2016 IEEE International Symposium on Information Theory and its Applications (ISITA2016) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 波多江優和, 宮本耕平, 川喜田雅則, 三村和史, 竹内純一
2. 発表標題 空間結合圧縮センシングによるスパース重ね合わせ符号の復号について
3. 学会等名 情報理論研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yoshinari Takeishi, Jun'ichi Takeuchi
2. 発表標題 An Improved Upper Bound on Block Error Probability of Least Squares Superposition Codes with Unbiased Bernoulli Dictionary
3. 学会等名 2016 IEEE International Symposium on Information Theory (国際学会)
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<http://www.info.hiroshima-cu.ac.jp/~mimura/>
<http://www.me.inf.kyushu-u.ac.jp/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	竹内 純一 (Takeuchi Jun'ichi) (80432871)	九州大学・システム情報科学研究院・教授 (17102)	
研究協力者	クーレン トン (Coolen A. C. C.)		King's College London, Radboud university