

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 1 日現在

機関番号：12608

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2015～2016

課題番号：15H06197

研究課題名(和文) 確率的階層型凸最適化アルゴリズムの構築と高精度信号復元への応用

研究課題名(英文) A study of stochastic hierarchical convex optimization algorithms and their applications to signal recovery

研究代表者

小野 峻佑 (Ono, Shunsuke)

東京工業大学・科学技術創成研究院・助教

研究者番号：60752269

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：高精細信号復元を実現するために、確率的最適化(乱択評価に基づく効率的最適化)と階層型最適化(複雑な制約条件の下での最適化)の融合をキーアイデアとして研究を遂行した。主要な成果を以下に挙げる。信号の観測過程を記述するモデル行列が特殊な構造を持たない場合に効率的復元を可能とする、確率的近接分離最適化に基づく信号復元アルゴリズム。観測信号に含まれる雑音の統計的性質が非ガウスの場合に有効な複雑なデータ忠実性制約を効率的に扱う信号復元アルゴリズム。固定ステップサイズによる加速を実現した階層型凸最適化アルゴリズム。グループL0ノルムから成る非凸制約条件を効率的に扱うアルゴリズム。

研究成果の概要(英文)：This study aims to establish novel signal recovery methods. The key idea of this study is twofold: stochastic optimization, which enables very efficient optimization based on randomized procedures, and hierarchical optimization, which allows optimization subject to involved hard constraints. Several main contributions are as follows. 1. signal recovery algorithms based on stochastic proximal optimization, which enables efficient signal recovery in the case where the model matrix describing observation process has no specific structure. 2. signal recovery algorithms that can deal with involved hard constraints on data-fidelity arising in signal recovery under non-Gaussian noise contamination. 3. Acceleration of hierarchical convex optimization based on fixed stepsizes. 4. Efficient algorithm to deal with a nonconvex constraint involving a group L0 norm.

研究分野：信号処理、画像処理、数理最適化

キーワード：信号復元 確率的最適化 階層型最適化 凸最適化 非凸最適化

1. 研究開始当初の背景

雑音や劣化を含む観測データから所望の信号を復元する問題(以下、信号復元問題)は様々な応用において現れる重要な問題であるが、一般に不良設定/条件の逆問題となるため、「所望の信号に関する先験的性質」と「観測データとの整合性」の両方を加味した復元手法が必要となる。特に、前述の二つの尺度を目的関数/制約条件として表現した凸最適化問題として定式化し、これを解くことで信号を復元するアプローチがその柔軟性と大域的最適性保証の観点から広く用いられている。

一般に、ひとつの凸最適化問題の最適解は一意に定まらない。これは信号復元においても例外ではなく、複数の最適解(=復元信号候補)の中に別の指標を基準にした場合に顕著に異なるものが存在する場合がある。このような状況において、より高精度な復元を達成するための非常に有効なアプローチとして、「階層型凸最適化:ある凸最適化問題の最適解の集合上で別の凸関数(=指標)を最小化することで特定の解を選出することが挙げられる。

一方、信号復元アルゴリズムの各反復において「信号の観測過程を記述するモデル行列」と「信号ベクトル」の積の計算が必要となるが、これは一般には信号の次元の二乗の計算オーダーであるため、信号の次元が大きく(画像データ等)かつモデル行列に特定の構造が仮定できない場合において、アルゴリズム全体の計算量を大幅に増加させる原因となってしまう。

これに対し、近年、機械学習分野で確率的最適化が注目を集めている。これは、学習に伴う最適化計算の各反復において、ランダムに選ばれた一部の教師データだけを用いることで、計算量を大幅に削減する原理である。これを信号復元問題に当てはめると、各反復においてモデル行列の一部の行をランダムに選択し、それらと信号ベクトルの積のみを計算すれば良いことになる。

階層型凸最適化と確率的最適化融合できれば、計算量的ボトルネックが解消され、より広範な信号復元問題に強力な階層型凸最適化のアプローチを適用することが可能となる。

2. 研究の目的

確率的最適化と階層型凸最適化のアイデアを融合した確率的階層型凸最適化アルゴリズムの構築と収束解析、およびその信号復元応用を目的とする。

3. 研究の方法

・設計フェーズ: 確率的最適化の原理を申請者らの過去の研究成果に取り入れることで、確率的階層型凸最適化アルゴリズムの更新手順を設計

・解析フェーズ 1 & 2: 非拡大写像の不動点

定理の確率的解析等を参考に確率的階層型凸最適化アルゴリズムが生成する点列の収束条件・関数値の収束レートを導出することで、当該アルゴリズムの適用可能範囲を明確化し、振る舞いを理論的に保証

応用フェーズ: 解析結果を踏まえ、確率的階層型凸最適化アルゴリズムを CT 画像再構成問題および空間的に非一様なぼけ除去問題へ実際に応用

4. 研究成果

高精細信号復元を実現するために、確率的最適化(乱択評価に基づく効率的最適化)と階層型最適化(複雑な制約条件の下での最適化)の融合をキーアイデアとして研究を遂行した。主要な成果を以下に挙げる。

1. 【確率的近接分離最適化に基づく信号復元アルゴリズム】: 従来の凸最適化に基づく信号復元アルゴリズムは、各反復において、信号の観測過程を記述する行列(モデル行列と呼ぶ)と変数ベクトルの積を複数回計算する必要があった。これは、モデル行列にスパース性等の特殊な性質/構造を仮定できない場合に、その計算オーダーが信号ベクトルの次元数の二乗になることを意味し、計算量が膨大になってしまう。提案法は、そのような性質/構造を仮定できないモデル行列(例えば、圧縮センシング復元におけるランダム観測や CT に伴うラドン変換等)を扱う場合に、各反復において、ランダムに選ばれたモデル行列の一部の行と変数ベクトルの積だけを計算すれば良い設計になっており、格段に効率的な信号復元を実現できる。

2. 【複雑なデータ忠実性制約が課された信号復元問題を効率的に解くアルゴリズム】: 信号復元問題は、一般に「復元信号に対する先験的性質(スパース性等)を評価する正則化項」と「観測データとの整合性を評価するデータ忠実項」の和を最小化する最適化問題に帰着される。その際、このふたつの項のバランスを決定するパラメータの適切な設定が重要な課題となる。これを解決する手段としてデータ忠実項を制約条件として記述する方法があるが、最適化の難度が大きく増すことが問題となっていた。提案法は、ハイブリッド最急降下法と呼ばれる階層型不動点アルゴリズムの非自明な実現例となっており、従来法では解くことのできなかった「データ忠実性制約付き信号復元問題」の最適解を、劣勾配射影の不動点集合による特徴付けを介することで、効率的に求めることができる。

3. 【階層型凸最適化アルゴリズムの加速】: ハイブリッド最急降下法に基づく階層型凸最適化アルゴリズムは、反復数が増えるごとに徐々にステップサイズ

を小さくしなければ収束が保証されなかった。そこで、階層型凸最適化の一層目の最適化の記述を限定することにより、固定ステップサイズで収束が保証されるアルゴリズムを開発し収束解析を行った。画像復元を対象とした人権により、収束性能が大幅に改善されることを確認した。

4. 【非凸制約付き信号平滑化/復元アルゴリズムの構築】: 信号値の差分値のグループ L_0 ノルムとして定義される量の上界に関する制約条件を伴う信号平滑化/復元問題を効率的に得アルゴリズムを構成した。これにより、平滑度をコントロールするパラメータの設定が格段に直感的になり、様々な応用(主に画像処理)においてその顕著な有効性を確認した。

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5件) 以下すべて査読有

1. Shunsuke Ono, SL_0 gradient projection, IEEE Transactions on Image Processing, vol. 26, no. 4, pp. 1554-1564, Apr. 2017.
2. Shunsuke Ono, 近接分離による分散凸最適化 - 交互方向乗数法に基づくアプローチを中心として -, 計測と制御, 計測自動制御学会, vol. 55, no. 11, pp. 6 pages, Nov. 2016.
3. Shunsuke Ono, Isao Yamada. Color-line regularization for color artifact removal, IEEE Transactions on Computational Imaging, vol. 2, no. 3, pp. 204-217, Sep. 2016.
4. Masaki Onuki, Shunsuke Ono, Masao Yamagishi, Yuichi Tanaka. Graph signal denoising via trilateral filter on graph spectral domain, IEEE Transactions on Signal and Information Processing over Networks, vol. 2, no. 2, pp. 137-148, Feb. 2016.
5. Shunsuke Ono, Isao Yamada. Signal Recovery With Certain Involved Convex Data-Fidelity Constraints, IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 63, no. 22, pp. 6149-6163, Nov. 2015.

[学会発表](計31件) 以下9までは査読有

1. Konstantinos Slavakis, Isao Yamada, Shunsuke Ono. Accelerating the hybrid steepest descent method for affinely constrained convex composite minimization tasks, IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing

(ICASSP), Proceedings of IEEE ICASSP 2017, pp. 4711-4715, Mar. 2017.

2. Shunsuke Ono. Edge-preserving filtering by projection onto SL_0 gradient constraint, IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP), Proceedings of IEEE ICASSP 2017, pp. 1492-1496, Mar. 2017.
3. Saori Takeyama, Shunsuke Ono, Itsuo Kumazawa. Hyperspectral image restoration by hybrid spatio-spectral total variation, IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP), Proceedings of IEEE ICASSP 2017, pp. 4586-4590, Mar. 2017.
4. Kaito Hosono, Shunsuke Ono, Takamichi Miyata. Weighted tensor nuclear norm minimization for color image denoising, IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), pp. 3081-3085, Sep. 2016.
5. Shunsuke Ono, Masao Yamagishi, Takamichi Miyata, Itsuo Kumazawa. Image restoration using a stochastic variant of the alternating direction method of multipliers, IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP) 2016, Proceedings of IEEE ICASSP 2016, Mar. 2016.
6. Masaki Onuki, Shunsuke Ono, Keiichiro Shirai, Yuichi Tanaka. Image colorization based on ADMM with fast singular value thresholding by Chebyshev polynomial approximation, IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP) 2016, Proceedings of IEEE ICASSP 2016, Mar. 2016.
7. Shunsuke Ono, Keiichiro Shirai, Masahiro Okuda. Vectorial total variation based on arranged structure tensor for multichannel image restoration, IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP) 2016, Proceedings of IEEE ICASSP 2016, Mar. 2016.
8. Masaki Onuki, Shunsuke Ono, Keiichiro Shirai, Yuichi Tanaka. Non-local/local filters using fast eigenvalue filtering, IEEE

- International Conference on Image Processing (ICIP), Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), Sep. 2015.
9. Makoto Watanabe, Seisuke Kyochi, Shunsuke Ono. Gradient-domain image decomposition for image recovery, IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), Sep. 2015.
 10. Shunsuke Ono. The Basics of Image Restoration: How to Estimate Latent Images from Incomplete Observations, Workshop on High-Resolution Quantitative Measurements, Proceedings of Workshop on High-Resolution Quantitative Measurements, Feb. 2017.
 11. Shunsuke Ono. 信号処理とコンピュータビジョンの狭間で考える, 第1回若手異分野交流研究会, Feb. 2017.
 12. Saori Takeyama, Shunsuke Ono, Itsuo Kumazawa. Mixed noise removal of hyperspectral images by hybrid spatio-spectral total variation regularization, IEICE Workshop on Image Engineering, IEICE Technical Report, vol. IE2016-116, no. 464, pp. 87-91, Feb. 2017.
 13. Keiichiro Shirai, Shunsuke Ono, Masahiro Okuda. Minimization of mixed norm for frequency spectrum of images and its application of pattern noise decomposition, IEICE Workshop on Image Engineering, IEICE Technical Report, vol. IE2016-116, no. 464, pp. 81-86, Feb. 2017.
 14. Shunsuke Ono. Image smoothing subject to L_0 gradient constraint, 第31回信号処理シンポジウム, 第31回信号処理シンポジウム予稿集, Nov. 2016.
 15. Saori Takeyama, Shunsuke Ono, Itsuo Kumazawa. A hybrid spatio-spectral total variation regularization for hyperspectral image restoration, 第31回信号処理シンポジウム, 第31回信号処理シンポジウム予稿集, Nov. 2016.
 16. Saori Takeyama, Shunsuke Ono, Itsuo Kumazawa. Hybrid Spatio-Spectral Total Variation 最小化によるハイパースペクトル画像のノイズ除去, 2016年度映像メディア処理シンポジウム (IMPS2016), 2016年度映像メディア処理シンポジウム予稿集, Nov. 2016.
 17. Shunsuke Ono. L_0 勾配制約を用いた画像平滑化, 2016年度映像メディア処理シンポジウム (IMPS2016), 2016年度映像メディア処理シンポジウム予稿集, Nov. 2016.
 18. 細野 海人, Shunsuke Ono, Takamichi Miyata. Weighted tensor nuclear norm 最小化を用いた色画像ノイズ除去, 2016年度映像メディア処理シンポジウム (IMPS2016), 2016年度映像メディア処理シンポジウム予稿集, Nov. 2016.
 19. 栗原 竜司, Shunsuke Ono, Keiichiro Shirai, Masahiro Okuda. 空間-波長構造テンソルに基づくハイパースペクトル画像のための正則化, 第31回信号処理シンポジウム, 第31回信号処理シンポジウム予稿集, Nov. 2016.
 20. Shunsuke Ono. Plug-and-play image restoration with operator decoupling, 第31回信号処理シンポジウム, 第31回信号処理シンポジウム予稿集, Nov. 2016.
 21. Keiichiro Shirai, 馬場 達也, Shunsuke Ono, Masahiro Okuda. 画像の局所領域がもつ特徴を利用した画像復元法と最適化の役割, 第28回 RAMP シンポジウム, Oct. 2016.
 22. Shunsuke Ono. 明日から使える凸最適化～近接分離最適化を中心に～, 第19回画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2016), Aug. 2016.
 23. Saori Takeyama, Shunsuke Ono, Itsuo Kumazawa. A constrained optimization approach to image restoration using blurred/noisy image pair, IEICE Workshop on Image Engineering, IEICE Technical Report, vol. IEICE-116, no. 119, pp. 25-29, Jul. 2016.
 24. Makoto Watanabe, Seisuke Kyochi, Shunsuke Ono. 画像復元のための勾配分解法, IEICE SIP Symposium 2015, Proceedings of IEICE SIP Symposium, Nov. 2015.
 25. Masaki Onuki, Shunsuke Ono, Keiichiro Shirai, Yuichi Tanaka. チェビシェフ多項式近似による画像ノイズ除去フィルタの固有値フィルタリング, IEICE SIP Symposium 2015, Proceedings of IEICE SIP Symposium, Nov. 2015.
 26. Masaaki Nagahara, Shunsuke Ono. 最適制御のための近接分離法, IEICE SIP Symposium 2015, Proceedings of IEICE SIP Symposium, Nov. 2015.
 27. Shunsuke Ono. 信号処理・画像処理における凸最適化, 日本オペレーションズ・リサーチ学会「最適化の基盤とフロンティア」研究部会 (WOO), 予稿なし, Nov. 2015.
 28. Shunsuke Ono, Takamichi Miyata. 確率的最適化を用いた効率的な画像復元, Image Media Processing Symposium

- (IMPS) 2015, Proceedings of Image Media Processing Symposium (IMPS) 2015, Nov. 2015.
29. 児玉和也, 山崎俊彦, 福嶋慶繁, Shunsuke Ono. パネル討論: 映像メディア処理のこれから, Image Media Processing Symposium (IMPS) 2015, Nov. 2015.
 30. Shunsuke Ono, Masao Yamagishi, Takamichi Miyata, Itsuo Kumazawa. Efficient image restoration based on a stochastic ADMM, IEICE SIP Symposium 2015, Proceedings of IEICE SIP Symposium, Nov. 2015.
 31. Shunsuke Ono, Keiichiro Shirai, Masahiro Okuda. A Structure-Tensor-Based Regularization Approach to Multichannel Image Restoration, IEICE SIP Symposium 2015, Proceedings of IEICE SIP Symposium, Nov. 2015.

〔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

<https://sites.google.com/site/thunsukeono/publications>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小野 峻佑 (ONO, Shunsuke)

東京工業大学・科学技術創成研究院・助教

研究者番号: 60752269