

研 究 報 告 書

「統合的凸最適化による In Hand な成分分離型信号情報再構成」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 2016 年 10 月～2020 年 3 月

研 究 者: 小野 峻佑

1. 研究のねらい

本研究の技術的目標は、ノイズ・ぼけ・情報欠落を伴う観測データに埋もれた所望の信号情報(画像、スペクトル、音、脳波等)を“*In Hand*”に再構成するための統合的凸最適化フレームワークの構築である。当該フレームワークは「成分分離モデル・正則化」と「統合的凸最適化アルゴリズム」を二本の柱とし、従来の信号情報再構成技術にはない次のような利点を提供する。

1. 成分ごとの正則化項(事前知識(例:スパース性))とデータ忠実項(観測データとの整合性(例:二乗誤差))を柔軟に設計・活用できるため、シグナル/ノイズ比の低い観測データから高精度な信号情報を再構成できる。加えて、分解再構成された各成分を解析に利用できる。

2. 最先端の凸最適化技術を基盤とした一般的なモデリング&最適化フレームワークであり、低計算量・安定した収束・スケーラビリティなどを担保しながら、様々な種類の信号情報を統一的な方法論で再構成できる。

信号再構成・解析はあらゆる自然科学・工学分野において必要不可欠な技術であるが、様々な事例において普遍的かつ柔軟に活用できるフレームワークは存在しなかった。本研究はその状況を打開し、広範な分野における革新的な基盤技術となる可能性を秘めている。

本研究では信号情報再構成に関する実践的技術と最新の情報科学/工学・応用数学の知見を融合することで、数理モデリング・最適化・アルゴリズムが一体となったフレームワークを構築し、情報数理と計測の間に橋をかけることを目指す。さらに、計測手法の専門家と連携することで、このフレームワークを様々な事例においてより見通しよく活用できるよう洗練・改良し、広範な科学・工学分野にブレイクスルーをもたらすことが、本研究のねらいである。

2. 研究成果

(1)概要

本研究では「成分分離モデルの定式化と正則化設計」と「統合的凸最適化アルゴリズムの構築と解析」を二本の柱として進めた。前者に関しては、成分分離型信号情報再構成モデルの具体的な定式化(提案モデル)を与えた。また、提案モデルで利用可能なハイパースペクトルイメージング用の正則化を新たに設計し実際に応用することでその有効性を確認した。加えて、関数として陽に表現できないが強力な正則化を提案モデルで利用するための方法論についても研究を行った。後者に関しては、提案モデルを最適化するためのアルゴリズム(提案アルゴリズム)を構築し、大域解への収束条件を導出した。また、提案アルゴリズムを更に発展させるための方策として、乱択エピグラフ射影に基づく効率化と拘束付きテンソル因子分解アルゴリズムとの融合を検討した。さらに、提案モデル・アルゴリズムの実応用例として、ロバストなハイパースペクトル画像合成法とハイパースペクトルイメージングのための混合ノイズ除去法を提案し、実データを用いた実験を通して有効性を示した。

(2) 詳細

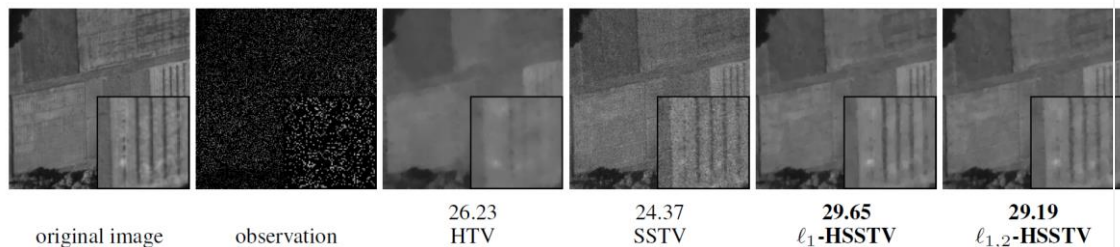
テーマ A: 成分分離モデルの定式化と正則化設計

1. 成分分離型信号情報再構成モデルの定式化

成分分離型の信号情報再構成に伴う最適化問題の汎用型(提案モデル)を定式化した。具体的には、 K 個の成分に分離しつつ各成分に M 個の正則化(微分不可能な関数でも良い)を施す設計になっており、すべての成分の和と計測データの間の整合性を担保する制約条件も同時に課しながら再構成を行う汎用的なモデルになっている。当該研究成果はテーマ B-1 の成果と合わせて信号処理分野のトップジャーナルである IEEE Trans. Signal Process. に投稿すべく準備を進めている。

2. ハイパースペクトルイメージングのための正則化

ハイパースペクトルイメージングを対象とした正則化項を新たに提案した。提案正則化は、ハイパースペクトル画像に内在する空間方向・スペクトル方向の相関を局所差分のスパース性によって特徴づけたものであり、近接写像が計算可能な凸関数を用いて定式化されているため、テーマ A-1 の提案モデルに容易に当てはめることができる。実際のハイパースペクトル画像を用いた実験により、既存の正則化に比べて飛躍的に再構成精度を向上できることを確認している(下図の HSSTV が本成果による再構成結果であり、数値(PSNR)が高いほど精度が高い)。当該研究成果に関する論文は信号処理分野のフラグシップカンファレンスである ICASSP2017 に採択されている。また、上記の成果を更に拡張し様々な実データを用いて有効性の検証を網羅的行った結果をまとめ、リモートセンシング分野のトップジャーナルである IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. に投稿中である。



3. 関数として陽に表現できない正則化

任意のガウスノイズ除去手法を事後確率推定問題の一種と捉えることで、これらの手法を一般的な信号情報再構成問題に正則化として組み込むことが可能であることを示すと同時に、実際のアルゴリズムも提案している。本成果は、テーマ A-1 の提案モデルで利用する正則化として「陽に関数表現できないもの」も利用可能であることを示唆しており、提案モデルの応用可能性を広げる検討結果でもある。当該研究成果に関する論文は信号処理分野のトップレタージャーナルである IEEE Signal Process. Lett. に採択されている(5. 主な研究成果リスト (1) 1)。

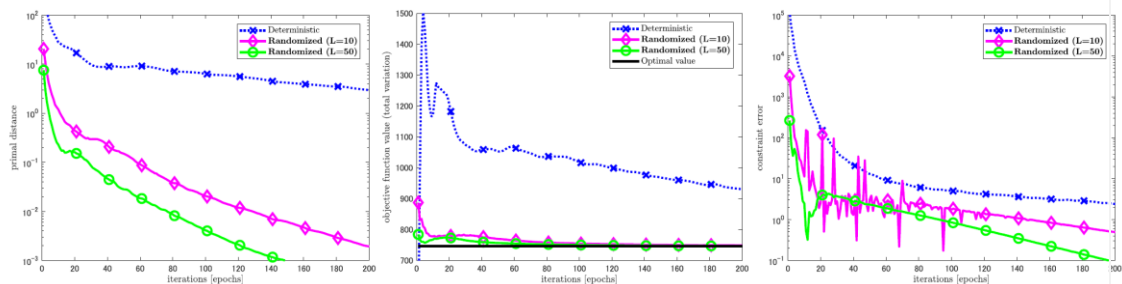
テーマ B: 統合的凸最適化アルゴリズムの構築と解析

1. テーマ A-1 で定式化した提案モデルを最適化するためのアルゴリズム(提案アルゴリズム)を構成した。また、最適化問題が凸性を満たすケースを想定し、大域的最適解への収束条件の導出を行った。具体的には、主-双対近接分離法を理論基盤とした上で最適性

条件・適切なステップサイズ・誤差の許容範囲等を明らかにした。当該研究成果はテーマ A-1 の成果と合わせて信号処理分野のトップジャーナルである IEEE Trans. Signal Process. に投稿すべく準備を進めている。

2. 乱択エッジグラフ射影に基づくアルゴリズムの効率化

計測データに対する整合性を保証する制約条件を複数の単純なエッジグラフ集合に分解することで、信号情報再構成問題を効率的に解く乱択アルゴリズムを提案した（下図の Randomized が本成果の収束速度をプロットしたものであり、従来法 (Deterministic) より飛躍的に高速であることが確認できる）。当該アルゴリズムは、テーマ A-1 で定式化した提案モデルを簡略化したものを解くように構成されており、テーマ B-1 で構成した提案アルゴリズムのさらなる効率化に向けた検討となっている。当該研究成果に関する論文は、信号処理分野のフラグシップカンファレンスである ICASSP2019 に採択されている（5. 主な研究成果リスト (1) 2）。



3. テンソル因子分解アルゴリズムとの融合

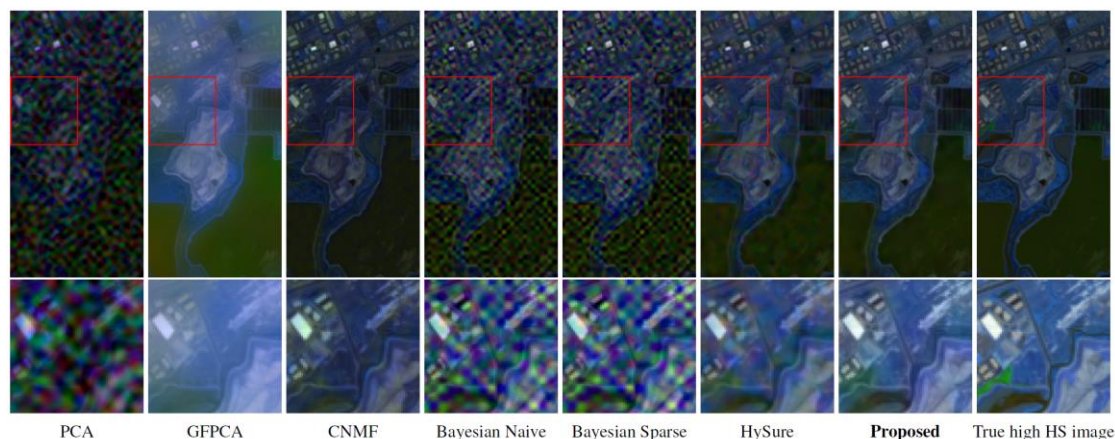
事前知識や物理的制約を柔軟に取り入れながら効率的なテンソル因子分解を可能とするアルゴリズムを提案した。当該アルゴリズムは、テーマ B-1 の提案アルゴリズムの原理にもなっている主-双対近接分離法と交互最適化法を融合することで、スパース正則化・非負値制約等を含めた様々なソフト/ハード拘束を利用した場合でもスケールするものとなっている。テーマ A-1 の提案モデルとテンソル因子分解モデルの統合へ向けた検討としても位置づけられる。当該研究成果に関する論文は、信号処理分野のフラグシップカンファレンスである ICASSP2018 に採択されている（5. 主な研究成果リスト (1) 3）。

テーマ C: 提案モデル・アルゴリズムの実応用

1. 二成分同時推定によるロバストなハイパースペクトル画像合成

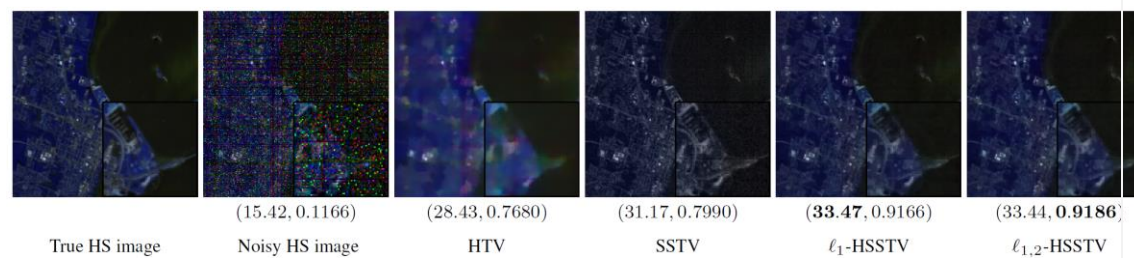
（空間的に）低解像度なハイパースペクトル画像と高解像度な参照画像（グレースケール画像またはマルチスペクトル画像）のペアから、空間的に高解像度なハイパースペクトル画像を合成する手法を新たに提案した（下図 Proposed が本成果による合成結果であり、真値（右端の画像）に最も近いものが得られている）。提案法は、観測画像のペアにノイズが重畳している場合にロバストな推定を実現するため、高解像度ハイパースペクトル画像とノイズレスな参照画像のふたつを異なる正則化を使って同時に推定するフレームワークになっており、テーマ A-1・B-1 における提案モデル・アルゴリズムの一実現例になっている。当該研究成果に関する論文は、信号処理分野のフラグシップカンファレンスである ICASSP2018、2019、およびアジア太平洋地域最大の信号処理系会議 APSIPA ASC 2018

(招待論文)に採択されている(5. 主な研究成果リスト (1) 5)。



2. 成分分離に基づくハイパースペクトル画像の混合ノイズ除去法

ハイパースペクトル画像がガウス性ノイズとスパースノイズ(欠損、外れ値)によって汚染されている状況において有効なノイズ除去手法を提案した。具体的には、ノイズ除去問題をハイパースペクトル成分とスパースノイズ成分の分離問題として定式化し、前者はテーマ A-2 で構成したハイパースペクトル画像用の正則化を、後者は L_1 ノルム正則化を用いて特徴付けることで、効果的なノイズ除去を達成した(下図の右二枚が本成果による除去結果であり、主観的にも客観指標においても真値(左端の画像)に最も近いものが復元できている)。テーマ A-1・B-1 における提案モデル・アルゴリズムの一実現例となっている。当該研究成果に関する論文は、画像処理分野のフラグシップカンファレンスである ICIP2019 に採択されている(5. 主な研究成果リスト (1) 4)。



3. 今後の展開

情報科学的側面での展開としては、本研究で取り組んできたモデルベースの方法論とディープニューラルネットワークに代表されるデータ駆動的方法論の効果的な融合が考えられる。これに関しては、学習済みのDNNをプラグアンドプレイ方式(研究成果:テーマA-3参照)で最適化アルゴリズムに組み込んだ場合における収束解析の基礎検討を既に進めており、一定の成果が得られている(第34回信号処理シンポジウムで発表予定)ため、今後の発展が期待できる。

計測科学的側面での展開としては、個々の計測ドメインで特有のノイズやアーティファクトを成分分離モデルで扱うことにより効果的に取り除く方法論の確立(具現化)が考えられる。これに関しては、同領域の小川氏(京大)との共同研究において、CT像に現れる特有のノイズを特徴づける関数を適切に設計し成分分離モデル(研究成果:テーマA-1参照)に当てはめることで効果的に除去できることが基礎検討結果から明らかになっており、今後様々な計測ドメインでの応用が期待できる。

4. 自己評価

研究目的の達成状況

2. 研究成果で述べたように、当初の目的であった「成分分離モデルの定式化と正則化設計」と「統合的凸最適化アルゴリズムの構成と解析」に関しては、論文投稿・ソースコード公開が間に合わなかったものの、おおよそ達成することができたと考えている。加えて、アルゴリズムの乱択化による効率化の検討、関数表現できない正則化の利用の検討、テンソル因子分解アルゴリズムとの融合など、当初は想定していなかった拡張に関する成果も得られており、今後の発展性を含めて包括的に研究を進めることができた。また、もう一つの大きな柱であった「ハイパースペクトルイメージングへの応用」に関しても、イメージングに伴う計測モデルと数理最適化技術を融合することにより当初の構想以上の成果（ハイパースペクトル画像合成等）が得られている。上記の研究成果に基づいて、超解像顕微鏡関連の学会で招待チュートリアル講演、数理科学の国際会議で招待講演を行うとともに、オペレーションズ・リサーチ学会を始めとした学会誌に解説論文を寄稿することで当該成果の発信にも努めた。

研究の進め方（研究実施体制及び研究費執行状況）

実施体制・研究費執行状況ともに、ほぼ計画通りである。

研究成果の科学技術及び社会・経済への波及効果（今後の見込みを含む）

「成分分離モデルの定式化と正則化設計」と「統合的凸最適化アルゴリズムの構成と解析」に関しては、ソースコードの整備・公開が完了すれば、本研究成果を含む様々な正則化技術等を計測ドメインの研究者が活用できるようになり、計測に基づく科学・工学・産業の発展の加速に寄与すると予想される。また、「ハイパースペクトルイメージング応用」に関する成果は、既存の技術では取り除けなかったノイズを分離するものや、解像度を合成技術により向上させるものであるため、未知の物質・性質・事象等を捉えられる可能性が高まり、ハイパースペクトルイメージングが鍵となる分野にブレイクスルーをもたらすと期待できる。

計測技術と高度情報処理の融合に対する貢献

3-2. 領域内の融合活動で得た成果で列挙したように、領域内の計測系さがけ研究者と密に連携し、計測技術と情報技術を高度に融合させることで様々な成果が生まれている。

京大・小川氏との共同研究では、実際に用いられている計測原理を数理モデルに落とし、圧縮センシングベースのCT像再構成アルゴリズムを構築した。これにより、従来計測にかかっていた時間を最大で1/12に短縮した上で、高解像度のCT像を得ることに成功しており、応用結晶学領域に初めて高度な数理情報技術を持ち込んだ画期的な成果となっている。

理研・葛西氏との共同研究では、NMRによるタンパク質解析に有用な正則化・制約を洗い出し、これらを柔軟に利用しつつ効率的にテンソル因子分解を行えるアルゴリズムを構成した。これにより、従来のアルゴリズムで利用できなかった様々な正則化・制約を利用した上で100倍以上の高速化を達成しており、こちらも計測-情報の高度融合の成功例となっている。

他にも、流体場計測（東北大・野々村氏）やラマン分光計測（北大・小松崎 G）においても数理最適化に基づく正則化技術を導入することで様々な成果が得られているほか、埼玉大・松永氏、中央大・片山氏、さがけ専任・星野氏等、領域内の研究者とも本格的な共同研究に向けてディスカッションや技術相談を行っている。

また、クラスタ会議などでスパース最適化や圧縮センシングのチュートリアルを行った上で、最適化に基づくいくつかの逆解析手法（ロバスト主成分分析やTV正則化）のソースコードを

領域内の研究者が自由に使えるように公開し、最先端の最適化に基づく情報技術を計測の専門家が理解・利用できるような努めた。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1. S. Ono, "Primal-dual plug-and-play image restoration," IEEE Signal Processing Letters, vol. 24, no. 8, pp. 1108–1112, Aug. 2017.
2. S. Ono, "Efficient constrained signal reconstruction by randomized epigraphical projection," Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing 2019 (ICASSP' 19), pp. 4993–4997, May. 2019.
3. S. Ono and T. Kasai, "Efficient constrained tensor factorization by alternating optimization with primal-dual splitting," Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing 2018 (ICASSP' 18), pp. 3379–3383, Apr. 2018.
4. S. Takeyama, S. Ono, and I. Kumazawa, "Mixed noise removal for hyperspectral images using hybrid spatio-spectral total variation," Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing 2019 (ICIP' 19), pp. 3128–3132, Sep. 2019.
5. S. Takeyama, S. Ono, and I. Kumazawa, "Robust hyperspectral and multispectral image fusion with hybrid regularization," Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing 2019 (ICASSP' 19), pp. 2152–2156, May. 2019.

(2) 特許出願

研究期間累積件数: 0件(公開前の出願件名については件数のみ記載)

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

1. S. Ono, "Nonsmooth Convex Optimization and Sparse Regularization in Signal and Information Processing," ICMMA'18, Feb. 2019. (invited talk)
2. S. Ono, "The Basics of Image Restoration: How to Estimate Latent Images from Incomplete Observations," Workshop on High-Resolution Quantitative Measurements, Feb. 2017. (invited talk)
3. S. Ono, "近接分離アルゴリズムとその応用—信号処理・画像処理的観点から—," オペレーションズ・リサーチ, vol. 64, no.6, pp. 316–325, Jun. 2019. (招待解説論文)
4. 小野峻佑, "8章: コンピュータビジョンにおける凸最適化," 米谷竜, 斎藤英雄編著 コンピュータビジョン—広がる要素技術と応用—, 共立出版, Jun. 2018. (著書)
5. 小野峻佑, 第16回船井情報科学振興財団研究奨励賞, 公益財団法人船井情報科学振興財団, Jul. 2017. (受賞)