

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	
Title(English)	Convex Optimization Techniques for Remote Sensing Data Analysis
著者(和文)	長沼一輝
Author(English)	Kazuki Naganuma
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第12782号, 授与年月日:2024年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:小野 峻佑,石井 秀明,小野 功,村田 剛志,横田 理央
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12782号, Conferred date:2024/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	審査の要旨
Type(English)	Exam Summary

論文審査の要旨及び審査員

報告番号	甲第	号	学位申請者氏名	長沼 一輝	
論文審査 審査員		氏名	職名	氏名	職名
	主査	小野 峻佑	准教授	横田 理央	教授
	審査員	石井 秀明	教授		
		小野 功	教授		
		村田 剛志	教授		

論文審査の要旨 (2000 字程度)

本論文はリモートセンシングデータ解析のための凸最適化技術の構築およびその応用に関するものであり、英文6章からなる。

第1章「Introduction」では、まずリモートセンシングデータ解析に凸最適化を利用する動機付けを行っている。そして、当該分野の今後の発展という観点から既存の手法の限界を提起し、本研究の目的を導いている。最後に、本研究の貢献を整理し、概説している。

第2章「Preliminaries」では、リモートセンシングデータ解析で重要な役割を担う凸最適化技術に関する基礎知識を紹介している。具体的には、リモートセンシングデータを特徴付けるために用いられる線形作用素や凸関数を導入した上で、代表的な凸最適化アルゴリズムとその周辺の数学的なツールについて説明している。

第3章「Flatness Constraints and General Framework for Remote Sensing Image Destriping」では、リモートセンシングデータに重畳する縞状ノイズを効果的に除去する汎用的なフレームワークを提案している。まず、縞状ノイズの強度が一方方向に沿って一定であることを数学的にモデル化する制約（平坦性制約）を新たに設計している。次に、この平坦性制約と一般的な形式で表現した正則化項を組み込んだ凸最適化問題として縞状ノイズ除去問題を定式化している。さらに、この問題の最適解を効率的に計算するために、凸最適化技術の一種である主-双対近接分離法（PDS）に基づくアルゴリズムを開発している。最後に、実際のリモートセンシングデータであるハイパースペクトル（HS）画像と熱赤外線動画を利用し包括的な比較実験を行うことで、提案法が最新の既存法と比べて頑健かつ効果的なノイズ除去を実現できることを実証している。

第4章「Problem Structure-Based Stepsize Design via Variable-Wise Diagonal Preconditioning for Primal-Dual Splitting」では、PDSのステップサイズを自動的かつ適切に定める方法として、Operator norm-based design method of Variable-wise Diagonal Preconditioning (OVDP)を提案している。OVDPを用いることで、PDSの収束を高速化するステップサイズを、最適化問題に含まれる線形作用素の作用素ノルム（の上界）に基づいて自動的に決定できることを述べている。また、アルゴリズム中の演算の複雑化を避けるための数学的工夫を施すことで、既存のステップサイズ決定法と比べて実行時間の大幅な削減が可能となることを示している。加えて、OVDPにより定まるステップサイズがPDSの収束条件を満たすことを数学的に証明している。最後に、HS画像の混合ノイズ除去、HSミクセル分解、グラフ信号復元の三種類の実問題への応用を通して、多様なリモートセンシングデータ解析の問題設定において、OVDPを用いることで従来法と比べて平均して数倍から数百倍以上の解析時間の短縮が実現できることを実証している。

第5章「Robust Hyperspectral Unmixing Using Mixed Noise Constraint Modeling and Problem Structure-Based Stepsize Design」では、第3章で提案した縞状ノイズの制約モデリングと第4章で提案したステップサイズ自動決定法を駆使することで、HS画像に含まれる複数の構成要素の含有率マップをロバストに推定する技術を新たに提案している。提案法では、含有率マップに対する既存の二つの正則化に加え、推定された含有率マップと構成要素辞書から再構成されたHS画像に対する正則化項を導入している。このアプローチにより、非常にノイズの多い状況でも高い精度で含有率マップを推定できるとしている。さらに、第3章で提案した平坦性制約を含む制約モデリングにより、本手法は縞状ノイズを含む多様なノイズに対応でき、かつ正則化パラメータの設定が容易になるように設計されている。定式化された最適化問題を解くために、PDSに基づくステップサイズ調整が不要なアルゴリズムを、第4章で提案したOVDPに基づいて開発している。最後に、多様なノイズを伴うHS画像を利用した実験によって、特にノイズが多い状況において、既存法に比べて数倍以上の高精度で含有率マップを推定できることを確認している。

第6章「General Conclusion」では、本論文の成果と意義を総括するとともに、本研究の限界とそれを踏まえた今後の研究の方向性について、データ正則化の制約モデリングのための最適化技術の構築、凸最適化を超えたモデル化の導入、扱う解析タスクの拡張の三つの観点から論じている。

以上のとおり、本研究は、幅広いリモートセンシングデータ解析タスクを柔軟に扱いながら様々な事前知識を解析に反映するための要諦となる凸最適化技術を著しく発展させたものである。これらは、今後、リモートセンシングを用いる学術・産業領域において、劣化を伴う生データから価値ある情報を解析するための基盤的技術となることが期待できるため、その工学的貢献は極めて大きい。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として十分なものであると認められる。

注意：「論文審査の要旨及び審査員」は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。