

氏名（本籍）	細野 海人（千葉県）
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	甲第 249 号
学位授与の日付	令和 3 年 9 月 16 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目	テンソル核ノルムの非凸拡張と画像・信号復元への応用
論文審査委員	(主査) 教授 宮田 高道 (副査) 教授 中静 真 教授 飯田 一博 教授 菖木 禎史 教授 今野 将

学位論文の要旨

テンソル核ノルムの非凸拡張と画像・信号復元への応用

本論文は、テンソル核ノルムの非凸拡張と画像・信号処理への応用を目的として、テンソルランク近似関数のパッチベース画像復元への応用およびテンソル核ノルムの非凸拡張間の関係を検証し、それによって既存のテンソル復元手法の復元精度の向上、ならびに手法やパラメータ選択の補助を実現する手法について述べたものである。

テンソルとは、ベクトルや行列の一般化であり、多次元情報とその間の複雑な関係を記述するための強力なツールである。静止画像、動画、交通量データなど様々な多次元データをテンソルとして扱うことで、要素間の複雑な相関関係の自然な記述が可能となることが知られており、画像、信号処理分野で様々な応用されている。

一方で、それらのテンソルデータは多くの場合、センサーの故障、データ取得時の外乱などのため完全な形で観測することはできず、実際に観測できるのは、元のテンソルデータに対して要素の欠損、テンソル全体の劣化などが加わった不完全な観測テンソルとなる。そのような観測テンソルしか得られない場合、データの分析、応用などの際に問題が生じるため、観測テンソルを補完、復元し本来のテンソルを推定するテンソル復元が必要となる。

テンソル復元に対しては様々なアプローチが研究されており、近年特に注目を集めているのがテンソルの低ランク性に着目した手法である。テンソルのランクには複数の異なる定義があるが、そのうちのひとつである Tucker ランクとその近似関数であるテンソル核ノルムは、計算の容易さなどから広く用いられている。テンソル核ノルムはカラー画像全体をテンソルとみなすことで画

像復元への応用が可能であることが明らかになっており、また、テンソル核ノルムの拡張である重み付きテンソルシャッテン-p ノルムは、テンソル復元において高い性能を発揮することが知られている。一方、近年画像復元分野において頻繁に用いられるパッチベースの画像復元手法について、このようなテンソルランクの近似関数をどう応用すればよいかについては検討がされていなかった。また、重み付きテンソルシャッテン-p ノルムは複数のパラメータを持ち、それらの特殊な場合として他のテンソル核ノルムの拡張を内包しているが、それらの拡張の効果に相乗性があるのかという問題を明らかにした研究はなく、このことがテンソル復元手法を実際の問題に適用する際の障壁の一つとなっていた。

本研究では、これらふたつの問題を明らかにするために、テンソルランク近似関数のパッチベース画像復元への応用と、テンソル核ノルムの非凸拡張間における効果の相乗性の有無の解明を行った。

本論文は、以下の5つの章から構成されている。

1 章では、テンソル復元とテンソルランク近似関数についての解説を行ったうえで、テンソルランク近似関数に関してパッチベース画像復元への応用がなされていないこと、テンソル核ノルムの非凸拡張間の関係について未解明であることを述べた。これらの問題を解決することが本研究の目的であり、そのために、重み付きテンソル核ノルムを提案し、これを用いたパッチベース画像復元アルゴリズムを提案すること、重み付きテンソルシャッテン-p ノルムを用いた制約付き最小化問題を提案し、テンソル核ノルムの非凸拡張の間での相乗性を検証することを述べた。

2 章では、テンソルランクとその近似関数など、テンソル復元に関わる基礎的な知識と記法について述べた。

3 章では、テンソルランク近似関数のひとつである重み付きテンソル核ノルムを提案した。また、画像に対する類似パッチ探索により得られる類似パッチテンソルを提案し、これを重み付きテンソル核ノルムと組み合わせることで、自然画像が持つ性質である非局所自己相似性と色線形性の2つを同時に表現可能な、自然画像に関する事前情報の表現方法を提案した。これを用いてテンソルランクの近似関数を用いたパッチベースのカラー画像ノイズ除去を実現し、更に **plugand play ADMM** という画像ノイズ除去手法を一般の画像復元問題へと適用可能なよう拡張する枠組みを応用することで、テンソルランクの近似関数を用いたパッチベースのカラー画像復元へ提案手法を応用することについて述べた。

4 章では、重み付きテンソルシャッテン-p ノルムは自身が持つ2種類のパラメータの特殊な場合として、2種類のテンソル核ノルムの拡張を内包していることについて述べた。また、重み付きテンソルシャッテン-p ノルムのパラメータを変化させながら性能を比較することで、それぞれの拡張による効果の有無を確かめることが可能であると述べた。しかしながら、既存研究で提案されている重み付きテンソルシャッテン-p ノルムを用いた最小化問題は、それを構成する2つの項の間のバランスをとるパラメータが存在し、その値によって大きく性能が変化するだけでなく、重み付きテンソルシャッテン-p ノルムのパラメータによってもその最適な値が変化するという問題を取り上げた。この問題を解決するため、この章では重み付きテンソルシャッテン-p ノルムを

用いた、テンソル復元のための新たな制約付き最小化問題とその解法を提案した。合成テンソルを用いた性能比較実験を通して、重み付きテンソルシャッテン-p ノルムが内包する2種類のテンソル核ノルムの拡張に対し、これらの効果の相乗性の有無を確認した。また、このとき単純なランク最小化を用いた手法との比較も同時に行うことで、低ランクテンソル復元における手法決定の方針を提示した。

5章では、本論文の内容を総括し、今後の展望について述べた。

審査結果の要旨

本論文は、テンソル核ノルムの非凸拡張と画像・信号処理への応用を目的として、テンソルランク近似関数のパッチベース画像復元への応用およびテンソル核ノルムの非凸拡張間の関係を検証し、それによって既存のテンソル復元手法の復元精度の向上、ならびに手法やパラメータ選択の補助を実現する手法について述べたものである。

テンソルとは、ベクトルや行列の一般化であり、多次元情報とその間の複雑な関係を記述するための強力なツールである。静止画像、動画、交通量データなど様々な多次元データをテンソルとして扱うことで、要素間の複雑な相関関係の自然な記述が可能となることが知られており、画像、信号処理分野で様々な応用されている。

一方で、それらのテンソルデータは多くの場合、センサーの故障、データ取得時の外乱などのため完全な形で観測することはできず、実際に観測できるのは、元のテンソルデータに対して要素の欠損、テンソル全体の劣化などが加わった不完全な観測テンソルとなる。そのような観測テンソルしか得られない場合、データの分析、応用などの際に問題が生じるため、観測テンソルを補完、復元し本来のテンソルを推定するテンソル復元が必要となる。

テンソル復元に対しては様々なアプローチが研究されており、近年特に注目を集めているのがテンソルの低ランク性に着目した手法である。テンソルのランクには複数の異なる定義があるが、そのうちのひとつである Tucker ランクとその近似関数であるテンソル核ノルムは、計算の容易さなどから広く用いられている。テンソル核ノルムはカラー画像全体をテンソルとみなすことで画像復元への応用が可能であることが明らかになっており、また、テンソル核ノルムの拡張である重み付きテンソルシャッテン-p ノルムは、テンソル復元において高い性能を発揮することが知られている。一方、近年画像復元分野において頻繁に用いられるパッチベースの画像復元手法について、このようなテンソルランクの近似関数をどう応用すればよいかについては検討がされていなかった。また、重み付きテンソルシャッテン-p ノルムは複数のパラメータを持ち、それらの特殊な場合として他のテンソル核ノルムの拡張を内包しているが、それらの拡張の効果に相乗性があるのかという問題を明らかにした研究はなく、このことがテンソル復元手法を実際の問題に適用する際の障壁の一つとなっていた。

本研究では、これらふたつの問題を明らかにするために、テンソルランク近似関数のパッチベ

ース画像復元への応用と、テンソル核ノルムの非凸拡張間における効果の相乗性の有無の解明を行った。

本論文は、以下の5つの章から構成されている。

1章では、テンソル復元とテンソルランク近似関数についての解説を行ったうえで、テンソルランク近似関数に関してパッチベース画像復元への応用がなされていないこと、テンソル核ノルムの非凸拡張間の関係について未解明であることを述べた。これらの問題を解決することが本研究の目的であり、そのために、重み付きテンソル核ノルムを提案し、これを用いたパッチベース画像復元アルゴリズムを提案すること、重み付きテンソルシャッテン-pノルムを用いた制約付き最小化問題を提案し、テンソル核ノルムの非凸拡張の間での相乗性を検証することを述べた。

2章では、テンソルランクとその近似関数など、テンソル復元に関わる基礎的な知識と記法について述べた。

3章では、テンソルランク近似関数のひとつである重み付きテンソル核ノルムを提案した。また、画像に対する類似パッチ探索により得られる類似パッチテンソルを提案し、これを重み付きテンソル核ノルムと組み合わせることで、自然画像が持つ性質である非局所自己相似性と色線形性の2つを同時に表現可能な、自然画像に関する事前情報の表現方法を提案した。これを用いてテンソルランクの近似関数を用いたパッチベースのカラー画像ノイズ除去を実現し、更に **plug and play ADMM** という画像ノイズ除去手法を一般の画像復元問題へと適用可能なよう拡張する枠組みを応用することで、テンソルランクの近似関数を用いたパッチベースのカラー画像復元へ提案手法を応用することについて述べた。

4章では、重み付きテンソルシャッテン-pノルムは自身が持つ2種類のパラメータの特殊な場合として、2種類のテンソル核ノルムの拡張を内包していることについて述べた。また、重み付きテンソルシャッテン-pノルムのパラメータを変化させながら性能を比較することで、それぞれの拡張による効果の有無を確かめることが可能であると述べた。しかしながら、既存研究で提案されている重み付きテンソルシャッテン-pノルムを用いた最小化問題は、それを構成する2つの項の間のバランスをとるパラメータが存在し、その値によって大きく性能が変化するだけでなく、重み付きテンソルシャッテン-pノルムのパラメータによってもその最適な値が変化するという問題を取り上げた。この問題を解決するため、この章では重み付きテンソルシャッテン-pノルムを用いた、テンソル復元のための新たな制約付き最小化問題とその解法を提案した。人工テンソルを用いた性能比較実験を通して、重み付きテンソルシャッテン-pノルムが内包する2種類のテンソル核ノルムの拡張に対し、これらの効果の相乗性の有無を確認した。また、このとき単純なランク最小化を用いた手法との比較も同時に行うことで、低ランクテンソル復元における手法決定の方針を提示した。

5章では、本論文の内容を総括し、今後の展望について述べた。

本論文はテンソル核ノルムの非凸拡張の応用について研究したものであり、テンソル核ノルムを用いた画像復元アルゴリズムを提案したほか、テンソル核ノルムの異なる非凸拡張間の関係を明らかにしたものであり、テンソル復元の信号処理応用について重要な知見を得たものとして価

値ある集積であると認める。従って、学位申請者の細野海人は、博士(工学)の学位を得る資格があると認める。