

## 審査の結果の要旨

氏名 高山 泰一

高山泰一の博士論文は「正則化を用いたハイパースペクトルデータによる森林モニタリング」と題し、本文は6章から構成されている。

森林由来の温室効果ガスの排出を抑制する活動では、国家規模で吸排出量を正確に算定するための測定方法の確立が必要であり、リモートセンシングデータに対する期待は高い。現状の実運用では、森林・非森林の分類までにとどまる一方で、研究レベルでは様々なセンサや手法を用いた高精度化へのアプローチが存在し、特に100波長以上の画像が取得可能なハイパースペクトルデータを用いることによる分類の細密化と高精度化、およびバイオマス推定への有効性について議論がなされている。既存研究では教師データとなる地上調査データが十分に存在することを前提としている一方で、実際の地上調査では、時間的な制約や人的コスト、調査費用への制約が存在するため、十分な数の地上調査データを用意できない。特に多次元データであるハイパースペクトルデータの利用では、「データの次元数に対して、サンプル数が非常に少ない」という状況に陥ることで、過学習と呼ばれる推定や分類モデルの一般性の欠如が起り、結果として精度が劣化する。本研究ではバイオマス推定および森林タイプ分類について、ハイパースペクトルデータを用い、正則化を用いた推定手法および分類手法を提案することで、過学習を回避したモデル構築を提案している。あわせて、本提案手法を用いた森林モニタリングの全体像やセンサ開発、実運用面への貢献についての議論を行っている。

第1章は序論であり、森林モニタリングの必要性とリモートセンシングデータ活用の利点について論じ、特に有効性が期待されるハイパースペクトルデータを用いた森林モニタリングに関する既存研究についての整理を実施している。当該センサが持つ多次元性に対して地上サンプルデータが少ない状況による推定モデルへの弊害について概要説明を行った上で、正則化に注目した推定モデルを提案することにより、実用に耐えうる精度の推定モデル構築が可能となる点を説明している。

第2章では、過学習の発生要因および具体的な影響について詳細に議論した上で、本論文における具体的な解決へのコンセプトが提示されている。

第 3 章では、パラメトリックな推定としてバイオマス推定を扱っている。既存研究では、**Partial Least Squares** 回帰やサポートベクター回帰などハイパースペクトルデータのすべての波長帯を用いた推定手法が用いられている。一方、実際のハイパースペクトルデータは、大気吸収、森林状態やノイズの影響が波長帯で異なるとともに、バイオマス推定に寄与しない波長帯も存在する。本研究では推定に必要な波長のみを推定モデルに使用すべく、正則化項を持つ **Lasso** 回帰を用いることで過学習を回避している。さらに、波長方向に連続性を持つことから、集合的に波長選択を行うことで更なる精度向上を目指す **Fused lasso** 回帰の適用を提案している。実データを用いた検証により、**Fused lasso** 回帰は他の手法よりも高い推定精度が得られ、選定された波長帯は樹木の葉に含まれる水分やリグニンの量に反応する波長帯であり、植物学的な見地からも本手法がバイオマス推定において妥当であることが示されている。

第 4 章では、ノンパラメトリックな推定問題として森林タイプ分類を扱っている。最も汎用的な手法であるサポートベクターマシンで起こる過学習を回避するためには、主成分解析による次元削減を前段に付加する手法が一般的である。本研究では、**Fused** スパース判別分析(**SDA**)による波長選択を主成分解析の前段に実施する方法、および **Fused SDA** で選定されたバンドに対して更なる次元圧縮を行う **Fused Integrated SDA** を前段に実施する方法を提案している。提案した **Fused Integrated SDA** を前段とする手法が最も有望な分類手法であることが示されている。

第 5 章は、第 3 章および第 4 章の結果を元にしたアプリケーションの提案である。まず、ハイパースペクトルセンサを用いた森林モニタリングシステムの提案として、コストおよび得られる精度の観点から 3 段階のシナリオを設定し、本研究で提案した手法を核にすることで、実用性に耐えうる森林モニタリングが可能となることを示している。また、波長選択による衛星センサから地上局への伝送容量の削減や、森林モニタリングに特化した小型・軽量センサ設計への貢献についても提示している。

第 6 章はまとめであり、本研究で得られた結果および考察を総括している。

以上のように、ハイパースペクトルデータを用いた森林モニタリングにおいて、正則化を用いることで高い推定精度を保つ手法を提案し、その有効性を示している。また、提案手法の応用例を示すなど、科学的な意義が十分に高く、また工学としての貢献も大きい。

よって、本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。