

論文審査の結果の要旨および担当者

報告番号	※	第	号
------	---	---	---

氏 名 BASCON Maria Victoria Rabaca

論 文 題 目

Utilization of Multispectral-UAV system for Rice Crop Management

(マルチスペクトラルカメラ搭載 UAV を用いた水稲管理技術の開発)

論文審査担当者

主 査 名古屋大学助教 西内 俊策

委 員 名古屋大学教授 中園 幹生

委 員 名古屋大学教授 犬飼 義明

委 員 名古屋大学教授 村瀬 潤

委 員 名古屋大学准教授 土井 一行

論文審査の結果の要旨

BASCON Maria Victoria Rabaca は、マルチスペクトラルカメラ搭載 UAV を用いた水稲の低空リモートセンシングデータから水稲の表現型の推定モデルの開発を行い、マルチスペクトル画像と時系列データを用いることで地上部バイオマス (AGB)、葉面積指数 (LAI)、及び収量推定の精度の向上とその限界を明らかにし、また収量予測に最適なデータ取得時期を特定する手法を開発した。以下にその要旨を記載する。

無人航空機 (UAV) や人工衛星を用いたリモートセンシングは、現在、稲作管理において急速に普及している。人工衛星は国土レベルの広域をカバーし、将来、農業の重要な観測プラットフォームになると期待されていますが、時間・空間分解能が低く、研究圃場を利用した技術開発は困難である。そこで、より高い時間・空間分解能で作物のセンシングデータを取得できる UAV を用いて、衛星を利用したモニタリングに応用が可能な技術の開発が求められている。

水稲の AGB や LAI などのパラメータは生産性の指標であり、収量の見積りや農業上の意思決定のための稲作管理の評価に利用できる。これまでの研究から、この水稲の LAI と AGB は、マルチスペクトラルカメラの分光反射率から得られる植生指数 (VI) を用いて推定できることが示されている。そこで本研究では、優れた LAI・AGB 推定モデルの開発が水稲の穀物収量予測に役立つという前提の元、UAV 由来のマルチスペクトル画像を用いた LAI・AGB 推定手法の改良とそれを用いた穀物収量推定手法の開発を行った。

一般的に作物予測モデルの精度は、特徴変数の種類、モデルアルゴリズム、データ計測のタイミングなどに依存し、精度の高い作物予測モデルを開発するためには、これらの要因を考慮する必要がある。また、イネの穀物収量を予測する時期は慣例的に 4 つの生育期 (分けつ期、幼穂形成期、穂ばらみ期、出穂期) が採用されているが、イネ収量予測に最適なデータ取得時期の品種間差やその期間については明らかにされていない。そこで、本研究では以下の 4 つの項目について検討した。

- (1) テクスチャ変数の利用が LAI-VI 推定モデル精度に与える影響の評価
- (2) 特徴量の選択方法と植生割合 (VF) の利用が AGB 推定モデル精度に与える影響の評価
- (3) VI を変数に用いた穀物収量予測モデルの開発
- (4) イネ収量予測に最適なデータ取得時期の評価

本試験は、2020 年と 2021 年に東郷フィールド内の肥料水準の異なる 2 つの圃場で実施された。草型の異なる水稲 5 品種 (あいちのかおり、にこまる、中手新千本、ハツシモ、旭) を栽培し、UAV によるマルチスペクトル画像の取得を定植から出穂

論文審査の結果の要旨

別紙 1 - 2

期にかけて行い、LAI と AGB、穀物収量については品種別に 4 つの生育期（分けつ期、幼穂形成期、穂ばらみ期、出穂期）にデータの取得を行った。また、モデル作成時にはデータ分割後、クロスバリデーションによるモデル作成を用い、テストデータを用いたモデル評価を行った。

(1) テクスチャ変数の利用が LAI-VI 推定モデル精度に与える影響の評価

まず、一般的にリモートセンシングで利用されるマルチスペクトラルカメラの分光反射率から算出される VI に加え、グレーレベル共起行列 (GLCM) から算出したテクスチャ特徴を UAV 由来の変数として利用することで、LAI の推定モデル精度の改善が見られるかを評価した。モデルの次元を縮小するための特徴量選択手法として、網羅的特徴選択 (Exhaustive Feature Selection: EFS) や分散閾値 (Variance Threshold)、分散インフレーション因子 (Variance Inflation Factor: VIF) を用いたパラメータ選択を行った。回帰モデルには、多重線形回帰 (MLR)、サポートベクトル回帰 (SVR)、ランダムフォレスト (RF)、リッジ回帰 (Ridge Regression) を用いて、それぞれの組み合わせについて LAI 推定モデル精度を比較した。

その結果、VI を利用したイネの LAI 推定では RF モデルが安定した結果を示し、特徴量の選択がその推定性能にほとんど影響しないことが明らかとなった ($R^2 = 0.60-0.62$, $RMSE = 0.68-0.73 \text{ m}^2 / \text{m}^2$)。さらに、特定の VI (RVI, GRVI) にテクスチャデータ ($DTI_{(NIR, R)}$, $RTI_{(NIR, G)}$) を組み合わせることで、本試験に試供した 5 品種すべてにおいて LAI 推定モデルの精度が向上した ($R^2 = 0.68-0.82$)。このことから、VI に加えて適切なテクスチャ情報を説明変数に用いることで、イネの LAI 推定モデルの精度を向上させることができることを明らかにした。

(2) 特徴量の選択方法と植生割合 (VF) の利用が AGB 推定モデル精度に与える影響の評価

次に、AGB の推定モデルの精度向上のために、LAI の代替指標としての利用が知られている VF を AGB 推定モデルに利用することを検討した。

説明変数として VI に加えて、植物領域に特徴的な分光反射率を利用した Excess Green などを用いて VF を算出した。モデルの次元を縮小するための特徴選択法には、再帰的特徴除去 (Recursive Feature Elimination: RFE) や M 統計、z 検定を用い、回帰モデルの SVR や RF、Extreme Gradient Boost (XGBoost) との各組み合わせについて、そのモデル精度の評価を行った。

しかし、本研究では特徴量の選択に加え、追加の説明変数として VF を利用した場合でも AGB 推定モデル精度の有意な向上は見られなかった。光条件の異なる屋外

論文審査の結果の要旨

条件下で、解像度の低いマルチスペクトルカメラを用いた場合には、植物と非植物を安定的に区別することが出来ないことが原因として考えられた。

(3) VI を変数に用いた穀物収量予測モデルの開発

穀物の収量予測モデルにおいて、分けつ期、幼穂形成期、穂ばらみ期、出穂期に測定した VI を説明変数とすることは一般的であるが、そのモデル精度評価において、品種間差が与える影響については評価例が少ない。本研究では、対象とする 5 品種の生育ステージ毎に取得した VI を説明変数に用いて、収量を予測するモデルを開発し、その比較を行った。

収量予測モデルには、4 生育期間のそれぞれの VI を説明変数とし、モデルには SVR や MLR, Ridge 回帰などを利用した。

比較した中では RF モデルが最も精度が高く、Red Edge を用いた 5 種類の正規化 VI を説明変数とすることで、中庸な精度 ($R^2 = 0.35$, $RMSE = 0.78$ ton/ha) で穀物収量の予測ができると分かり、レッドエッジバンドを用いた正規化 VI がモデルに最適な変動性を与えることで穀物収量予測に寄与することが示唆された。そのモデルに、穂ばらみ期と出穂期の VI を説明変数として加えた場合、穀物収量予測は若干改善された ($R^2 = 0.39$, $RMSE = 0.75$ ton/ha)。また、品種ごとに予測モデルを作成したところ、ハツシモ ($R^2 = 0.50$, $RMSE = 0.84$ ton/ha) とにこまる ($R^2 = 0.50$, $RMSE = 0.53$ ton/ha) で特に良好な結果が得られたが、品種毎に予測精度は異なり、出穂後、収穫までの期間が比較的長い晩生の品種では、出穂期までの VI を用いた収量推定は難しいことが明らかとなった。また、作物パラメータとの相関が低い変数でも説明変数として採用されることから、予測の精度向上には様々な入力が必要であることが示された。

(4) イネ収量予測に最適なデータ取得時期の評価

イネの収量予測を行うタイミングは、一般的にイネの生育期と紐付けられるが、実圃場においては必ずしも生育期に観測が出来るとは限らず、モデルの予測性能を保障する上では収量予測に最適なデータ取得期間について評価することが必要である。

品種毎の最適なデータ取得期間を明らかにするために、多時的の VI を説明変数に用いた AGB と LAI の XGBoost 推定モデルを作成し、得られた推定値からゴンペルツ曲線を用いた栽培期間中の AGB と LAI の時系列変化についてシミュレーションを行った。その後、AGB と LAI のシミュレーション値を用いて収量推定を行う単日線形回帰モデルを構築し、各品種の収量予測に最適なデータ取得のタイミングを決定した。

論文審査の結果の要旨

その結果、VI を取得すべきタイミングは分けつ期と出穂期の間の 4~31 日間と、品種により大きく異なることが明らかとなった。このことはリモートセンシングを用いた収量推定に向くイネ品種と向かない品種があることを支持する結果となった。

この研究では、LAI 推定手法の改善に加え、これまで評価の対象とされていなかった、イネにおいてリモートセンシングに対する適性に品種間差が存在することを明らかにした。また、収量予測に最適なデータ取得時期を決定する手法を構築したことは、イネ品種毎の収量推定モデルの予測性能の保障をすることに繋がり、今後の農業リモートセンシングの普及に貢献すると考えられる。

したがって、本委員会は本論文が博士（農学）の学位論文として十分な価値を有すると認め、論文審査に合格と判定した。