

研 究 報 告 書

「超高精細フィールドセンシングによる個体生育モニタリング」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 平成 27 年 12 月～平成 31 年 3 月

研 究 者: 杉浦 綾

1. 研究のねらい

栽培研究の問題点

従来の栽培研究におけるフィールドデータの収集は手作業で行われるものが多く、中には研究者による目視評価によるものもある。しかし、生育シーズンを通じて野外圃場で作物個体を一つ一つ手作業で計測あるいは目視観察する作業は膨大な手間とコストがかかる。そのため、データ量が制限され、複雑な生長動態や特徴を分析するには不十分であることが多い。作物生育の詳細な解析を実現するには、時間的・空間的に高分解能のフィールドデータをいかに効率よく得るかにかかっている。

効率的な生育情報収集

本研究では、栽培研究で必要となる作物形質や生育の時系列データを UAV 空撮画像から高精細・高効率で個体レベルの情報として収集できるシステムの開発を目標とする。定期的に圃場空撮を行い、画像処理技術あるいは画像認識技術により、できるだけ多くの生育データを1個体毎の情報として自動抽出し、シーズン中の生長過程を追跡できるよう時系列データとして蓄積する。対象作物は北海道畑作地域の主要作物であるバレイショとする。

機械学習による収量推定

画像により生育情報の収集を行うが、最終的なねらいは、得られたデータから、生育情報、環境情報と収量を結ぶ関係の解明である。画像で収集した生育情報から、機械学習により、収量との関連を調べる。作物学においては、さまざまな作物において生長解析がなされており、生長プロセスを説明できる作物モデルの研究が従来からあるため、その知見も取り入れて、収量の推定を行う。

大規模圃場への展開

本研究では、高頻度、大面積を対象として収量推定を行うため、生育情報を空撮画像からいかに効率よく得るかが技術的課題となる。

草高、植被率、萌芽時期、枯凋期などの基本的な生育情報を画像から自動抽出するほか、従来のリモートセンシング手法も取り入れ、葉の反射スペクトルも個体レベルの情報として計測する。これらの計測を自動化することで、大面積にも適用できる技術とする。仮に通常様式で1ヘクタールのバレイショ栽培を行った場合、44000 株以上の生育変化が観測できることになる。これは手作業での計測では現実的に不可能であり、このようなデータ自体得られた事例は過去にない。大規模生産圃場での生育情報収集の可能性を検討する。

2. 研究成果

(1) 概要

作物個体の生育情報を収集するため、UAV にカメラを搭載し圃場の空撮を行った。2016 年

から3年間、バレイショ圃場約1500m²を準備し、5月下旬から9月上旬まで2～3日に1回の頻度で撮影を行った。一眼レフカメラとマルチスペクトルカメラを使用した。一眼レフカメラの画像からは、公開しているソフトウェア FieldReconst により、オルソ画像と3次元情報を生成し、主に植物体の大きさの計測に使用した。一方、マルチスペクトルカメラの画像からは、葉の反射率を計測した。シーズン中の画像データは、すべて同一の座標系で扱えるよう、絶対座標系に正確に変換し整理した。

本研究の内容は、主に、生育情報計測手法の開発と、機械学習による収量推定の2つに分けられる。

まず、生育情報抽出手法の開発では、画像から作物個体の位置を検出するプログラムを開発した。2016年に開発した方法を2017年と2018年にも適用し、安定した性能を持つことを確認した。一度、個体位置を検出できれば、その位置の画像データから生育情報を計測できる。被覆面積や草高などの個体生育を画像から計測し、その計測精度を評価した。画像から個体生育情報の計測まですべてを自動化したことで、大規模圃場でも個体の情報を得ることができた。

次に、機械学習による収量推定では、上記のとおり計測した個体の地上部生育情報と地下部塊茎質量との関連を調べた。いくつかの機械学習手法を試し、3年間のデータに対して、地上部生育と収量に相関があることを確認した。さらに、生長プロセスを理論的に説明できるよう、作物モデルを導入した。作物モデルにはいくつかの未知パラメータが含まれているが、画像による生育情報とのデータ同化により推定できる可能性がある。このデータ同化による収量推定方法について検討した。

(2) 詳細

「生育情報抽出手法の開発」

2016年5月から9月まで定期的に撮影したバレイショ圃場の画像から、すべての個体位置を自動検出できるプログラムを作成した。画像中の緑色部分を抜き出し、その領域の面積、外接矩形の縦横の長さ、円形度などを特徴量として、サポートベクターマシンにより個体の判別を行った。表1のとおり教師データ427個体の検出精度は、再現率99.8%(426/427)で、別圃場の1480個体でテストした場合、誤検出が4個体あったものの、再現率は100.0%であった。同様に2017年の465個体、2018年の427個体でテストした結果、再現率はそれぞれ98.9%と99.1%であり、安定して個体位置を検出できることを確認した。開発した方法により、約10アールの圃場で3,611個体、1ヘクタールの大規模圃場で28,168個体の生育情報を一斉に計測できることを確認した。

表1 個体位置検出の精度

	2016年教師用 (427個体)	2016年テスト用 (1480個体)	2017年テスト用 (465個体)	2018年テスト用 (431個体)
正検出個体数 (再現率)	426(99.8%)	1480(100%)	460(98.9%)	427(99.1%)

個体検出時に抽出した緑色部分が検出個体の領域であるため、そのサイズが被覆面積として計算できる。また、3次元再構成による高さ情報から、草高のほか植物体全体の体積が得られる。さらに、マルチスペクトル画像から得られた反射率のうち、青(475nm)、赤(668nm)、近赤外(717nm, 840nm)の4バンドを説明変数とした重回帰モデルで、葉身窒素含有率を推定した。草高について地上マニュアル計測したものと比較し精度評価を行った結果、図1(a)のように、RMS誤差3.85cm、最大誤差14.63cmであった。また、図1(b)のように植物体体積と乾物質量と比較すると、決定係数 $R^2=0.61$ の相関を得た。さらに、画像から推定した葉身窒素含有率は、元素分析によるものと比較した結果、 $R^2=0.88$ であった(図1(c))。いずれの項目も、作物生育を示す代表的なものであり、十分な精度で計測・推定できることを確認した。生長期間を通じて定期的に画像撮影しているため、このような生長量を時系列データとして得ることができた。したがって、画像による個体生育情報計測に関して、当初の目的を達成したといえる。また、空撮画像から、オルソ画像生成、3次元データ復元、個体検出、生長データの出力までをほぼ自動化したため、大規模圃場へも十分適用できる技術である。

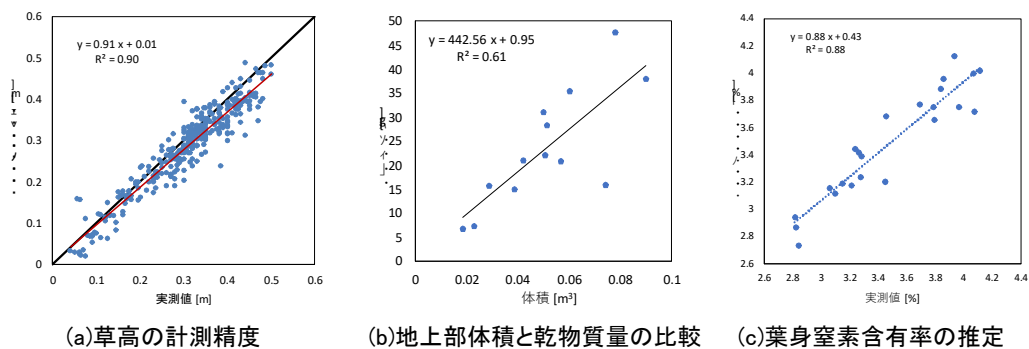


図1 個体生育情報の計測精度

「機械学習による収量推定」

生育期間中の個体生長量が画像から正確に得られたが、この地上部の生長データからさらに、地下部塊茎質量である収量の推定を試みた。方法として、線形単回帰や重回帰のほか、リッジ回帰やラッソ回帰、あるいは、主成分分析を組み合わせたものなど、いくつかの機械学習を試した。また、説明変数として、画像から計測した時系列生長データである被覆面積、草

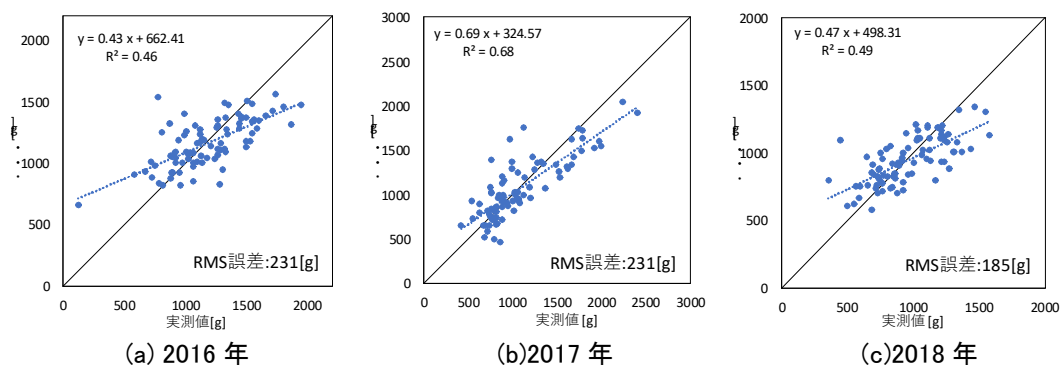


図2 SVRによる収量推定精度

高、体積、窒素含有率、反射率、NDVI を用意し、これらのうち一つあるいは複数を組み合わせて使用した。一例として、被覆面積と草高を説明変数としたサポートベクトル回帰(SVR)の結果を図2に示す。2016 年から3 年間、同様の試験を行い、各シーズン 430 個体程度の学習データを用意した。430 個体のうち 80%を教師データとし、残り 20%をテストデータとした。図2 は、テストデータによる予測精度である。各年の決定係数はそれぞれ、 $R^2=0.46, 0.68, 0.49$ であったため、地上部生長量と収量に強い関連があると判断できる。

ただし、この方法では、一度決定した推定モデルを次年度に適用できない。画像撮影時期や撮影回数が違うため、同じ説明変数を得ることができないためである。また、ブラックボックス的方法であるため、詳細な生長解析を行うことができない。そこで、生長過程を説明できる作物モデルを導入し、データ同化手法により収量推定を行う。気温や日射量などの環境情報を入力とし、時間発展により生長変化を記述するものであるが、これに観測した生長データを組み合わせることで個体ごとの生長と収量を推定する。現在、作物モデルの構造に検討を要しており、今後、収量の推定精度を明らかにする。

3. 今後の展開

農業分野では UAV による空撮は、効率的な圃場観測を実現するものとして、活用が期待されている。UAV 画像により作物個体の生育情報を計測できる技術を開発したが、その応用場面は栽培研究だけではなく、育種過程における個体選抜にも活用できる。これまで地上で人手を掛けて行っていた生育観測のいくつかを簡便化できる可能性があるため、品種改良の効率化をねらう。一般の生産現場では、圃場内の生育のばらつきを把握できるため、精密農業の実現に貢献できる。本研究では、より広域の画像を収集するため、固定翼 UAV を導入した。これにより、一度のフライトで 100 ヘクタールをカバーできるようになり、北海道の大規模畑作地帯でも UAV による空撮画像の利用が現実的なものとなりつつある。今後収量推定方法について検討を重ね、より広域に展開できる技術を開発する。

4. 自己評価(公開)

個体生育情報の計測に関しては、すべての処理を自動化し、大規模圃場にも適用できるものであることから当初の目的を達成できたが、収量推定については、十分な結果に至らず、方法について今後も検討が必要である。

研究実施体制は計画どおり適切なものであった。所属機関の畑作圃場を使用し、3 年間の圃場試験を実施できた。また、年間約 150 回の UAV フライトを実施したが、期間中、機材のメンテナンスに十分な予算であったため、安定した実験体制を整備することができた。すべての研究費は本課題遂行に適切に執行した。

本研究で開発した技術は、育種作業の効率化に貢献できるほか、広域に展開できる可能性があるため、収量推定技術が確立すれば、北海道畑作地帯全体で収量のばらつきを詳細に評価することができる。精密農業の観点で、作物生産の最適化を実現するための基盤情報となりえる。

5. 主な研究成果リスト

(1)論文(原著論文)発表

1. R. Sugiura et al. (2016) Field phenotyping system for the assessment of potato late blight resistance using RGB imagery from an unmanned aerial vehicle. Biosystems Engineering 148, 1–10.

(2)特許出願

研究期間累積件数:0 件

(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. Ryo Sugiura, Field Phenotyping System Using Imagery from Unmanned Aerial Vehicle. Field Phenomics with Big Data, 2016 年 2 月
2. Ryo Sugiura, High-performance crop monitoring by drone, The 9th GEOSS AP Symposium, 2017 年 1 月
3. 杉浦綾, 画像解析によるバレイショの生長計測, 日本育種学会・日本作物学会シンポジウム, 2017 年 12 月
4. 杉浦綾, 大規模圃場における作物個体の生育モニタリング, バイオインフォマティクス学会, 2018 年 9 月
5. 杉浦綾, ドローン画像による馬鈴薯の疫病とウィルス感染株検出の取り組み, 植物病理学会シンポジウム, 2018 年 10 月