

論文の内容の要旨

農学国際 専 攻
平成 23 年度博士課程 入学
氏 名 郭 威
指導教員名 二宮正士

論文題目 Studies on high-throughput phenotyping by use of time series crop images taken under natural environments

(自然環境下で撮影した作物時系列画像を用いた高速フェノタイピングに関する研究)

21 世紀になっても毎日 20 万人の増加が続いている。国連は今年 6 月、2050 年までに世界の人口が 96 億人に達するとする人口統計を発表し (UN report, 13 June 2013)、急速に増加している人口や食遷移に呼応できる十分な食料の確保が急務になっている。さらに、気候変動が懸念される中、世界各地で大干ばつによる大幅な減収や、高温・異常低温・日照不足等による生育不良などが世界各地で恒常的に発生している。そのような中、限られた土地や水資源のもと、食料を安定的に増産し確保するには、革新的な育種開発と栽培技術の高度化が必須である。

そのためには、作物のゲノム解析と表現型解析を平行して加速化することや、作物生育状況の的確な把握が必要となる。この数年の高速シーケンサの発達によるゲノム解析を革新的な高速化は、大量の遺伝情報を生成し、さまざまな植物ゲノム配列情報が解明されてきた。しかし、表現型解析については、多くの場合、破壊的で人力に依存し、研究開発のボトルネックとなっている。そのことはとりわけ野外圃場で顕著である。これまでも、それまで定性的に行われてきた表現形解析の定量化や客観化の試みは行われてきたが、多くの場合破壊的で圃場での高速な表現形解析には必ずしも実用的ではなかった。

そのような中、生物個体の表現型を総合的に解析する Phenomics と呼ばれる研究分野が、1996 年 “Aging Research Centre” の Steven Garan 氏により提唱され、さまざまな取り組みが行われてきた。2005 年にはベルギーのヘントにある “Cropdesign” 研究所が表現型を評価するプラットフォーム “

TraitMill”を発表した。また 2008 年には、Australian Plant Phenomics Facility がオーストラリア政府によって設立され、High Resolution Plant Phenomics Centre (HRPPC) と Plant Accelerator という二つ研究施設で、将来の変動環境に適応できる作物の作出に向け、植物の生長を包括的に解析し理解するための研究や、そのための技術開発が始まった。さらに 2011 年には、ドイツとオランダの民間会社“LemnaTec”と“KeyGene”が協力して、高速植物表現型解析のための商業プラットフォームを提供する“PhenoFab Europe”を設立した。これらの研究施設では、多くの作物をベルトコンベヤー上に並べられたポットで栽培し、ポットを連続的に非破壊測定装置に送り込むことで、個体の成長やそれに関連する種々の表現型形質を画像処理技術や各種の光センサーにより高速に解析することを実現した。これらの動きをきっかけとして、2009 年以降“International Plant Phenotyping Symposium”や“International Symposium- PhenoDays”が開催されるなど、多くの研究結果が発表されてきている。

農業分野における植物表現型解析では、実際の圃場で栽培された作物を対象にし、環境との交互作用も含む実際のパフォーマンスを評価する必要がある。しかし、これまでに開発された手法は、主に撮影条件が整った室内環境下で撮影された画像を対象としており、光環境などの変化により条件が複雑な野外では適応できない場合が多い。一方、フィールドサーバなど野外で環境を測定しながら高頻度の時系列作物画像を容易に収集できる機器類の発達著しく、それらの時系列画像を連続的に評価することで、時間変化に伴う作物の新たな形質を評価することへの期待も高まっている。そこで本研究では、そのように近年急速に発展したフィールドモニタリングシステムと画像解析技術を組み合わせた、野外でも使える低コスト・高速フェノタイピングのための技術開発を行い、より効率的な育種はもとより、作物生育状況の高速でタイムリーな把握による生産現場での最適な栽培実現に貢献することを目的とした。

本研究では、代表的な穀物であるコムギと水稻を対象に、野外圃場で連続的に撮影された時系列 RGB 画像から、非破壊で作物外観形質を連続的に評価する新たな手法を開発し、それを圃場での低コスト高速フェノタイピングシステムへ取り込むことを検討した。なお、本研究では実際の現場での利用を想定して画像センサーのコストや取り扱いの容易性、現在目視で評価されている形質評価の高速化を想定して、RGB 画像に限定して用いている。

第 1 章で研究の背景と目的を述べた後、第 2 章ではこれまでいくつも提案

されてきたが、十分に解決できていない自然環境下で撮影された圃場画像からの植物領域分割手法について、新たに DTSM (decision tree based segmentation model) を提案した。野外の通常の圃場で撮影された画像は、光条件の変化により陰影、反射などが生じ、画像ごとに植物領域の性質が異なっているため、既往の領域分割手法は適用できないことが多い。さらに、既存手法の多くは画像 1 枚ごとの処理が必要であるが、時系列に沿って大量画像の連続撮影を行った場合、一枚一枚の画像に対して異なる処理を施すことはコスト的に容易でない。DTSM では、機械学習のひとつである非線形決定木を利用することで、画素単位の色情報から植物領域を抽出することによる問題解決を図った。本手法は、膨大な数の時系列画像を一括処理できる。この手法を、実際のコムギ圃場で撮影された画像を学習に用いて、評価した。既存の手法と比較したところ、DTSM では陰や強い鏡面反射がある画像にも高い領域分割精度を示した。画像ごとのしきい値処理などが不要で大量の時系列画像にそのまま適応でき、異なる年度に撮影された画像にも適用できるなど高い汎用性を示した。以上の結果から、本手法を用いることで野外圃場において撮影した時系列画像からさまざまな形質評価を行うための道が開けた。

第 3 章では、DTSM を利用した画像分割フレームワークを開発し、それを用いて実際の場面での応用性を検討した。まず、ムギ時系列画像を利用し、植被率の計測精度を検証した。また、移植から出穂一週間前までの水稻時系列画像を用い、植被率の計測精度を評価した。その結果、DTSM を用いることで、水稻の生育初期から生育中期にわたり、高い精度で植被率を計測可能であることが確認された。さらに、同時に計測された風速の変化など環境変動により短時間に植被率が変化することも把握できた。将来、フィールドサーバ等により取得された局所的な気象データと連動することにより、さらに高い精度で植被率を計測できると期待される。

第 4 章では、藻や雑草が多く発生している水稻圃場で撮影された画像を対象とし、これまで先行事例のないケースでの作物領域分割手法について検討した。本研究で対象とした水田では雑草等が水稻と同じ色、形状を有しているため、第 2 章で提案した画素単位の情報に基づいた DTSM がそのまま適用できない。そこで、本章では色特徴のほか、対象植物の空間（形態）情報を加えた植物領域分割手法を開発した。その結果、ある程度作物領域を背景や雑草と分割できることが分かった。しかし、本手法は画像の解像度に大きく依存する一方で、取得した画像データの解像度が低く、今回の結果からは本手

法の実用性について十分な検証ができず、今後の課題として残された。

第 5 章では、水稻の表現型計測において最も重要な指標のひとつである開花期の自動検出手法を開発した。水稻の開花は環境に対して敏感であり、温度や湿度、日射、降雨などの変化によって開花日や日内の開花時間変動する。そのため、従来、目視によって行われてきた開花調査には、大変な労力を必要としてきた。水稻の開花は一般的に一週間程度連続して行われる中、穂上での開花位置が成長により常に変化することや、開花状態の形状が多様であること、穂が茎の最先端に存在し、微小な風や光の変化でも二次元の画像上で表現された背景、形状や色が大きく変動するなど、画像認識上さまざまな困難があり、未だに画像を利用した自動開花検出に関する研究は発表されていない。このような対象を検出するのは、画像解析の分野で究極の課題の一つとされて来た。近年、機械学習手法の進歩や計算機の高速化などにより研究が盛んとなってきた「一般物体認識」は、自然画像から数万種類の物体を認識可能する概念として期待が高まっている。本研究ではその概念を参考に、圃場で撮影された RGB 画像を使って水稻開花を検出する手法を開発した。本手法は、まず水稻画像群から手動で多様な形状を示す開花部分だけを抜き出した数百枚の画像で学習画像データベースを構築する。次に、学習画像を回転・スケール変化・照明変化等に対して頑健なローカル特徴量で記述することにより、高次元のベクトルで画像を表現する。そして機械学習のひとつである Support Vector Machine で、多様な形状をもつ開花穂の検出モデルを構築し、時系列画像に適用した。その結果を、目視で計測した開花穂数と比較したところ、日内の開花時間や開花のピーク、開花全期間にわたる相対的な開花量の変化などを高い精度で検出することが示された。

第 6 章では、総合考察を行った。本研究では、野外で撮影された RGB 時系列画像だけでも、光条件、天候変動に頑健な作物形質評価が実現できることを示した。さらに、時系列画像を連続的な解析を可能にすることで、時系列上での新たな形質評価への道も示すことができた。将来、本論文で提案した手法を圃場観測機器等と統合することで、圃場での低コスト高速表現型解析システム構築に大きく貢献ができると考えられる。なお、本研究で取得、構築した学習および評価用作物画像は、今後、類似研究を支援するための画像データベースとして公開する予定である。