

論文の内容の要旨

農学国際専攻

平成 24 年度博士課程入学

氏 名 山本 恭輔

指導教員 二宮 正士

論文題目 画像解析と機械学習によるトマトの自動生育診断および高速フェノタイピングに関する研究

近年の日本の農業においては、農業従事者の高齢化が進む一方で、後継者が不足するという深刻な問題に直面している。日本は世界有数の農業技術を有する国であるが、これは農業機械の発展のみならず、優れた技術を持つ熟練者の存在が非常に大きい。しかし、担い手不足の問題が進む現在では、これらの技術の伝承が難しい状況にあり、日本の農業技術の低下が懸念されている。こうした課題の解決方法の一つとして、精密農業の実現による栽培技術の高度化があげられる。精密農業は、「圃場マッピング技術」、「意思決定支援システム」、「可変作業技術」という 3 つの要素技術によって構成されるが、この中で精密農業において基盤となるのが圃場マッピング技術、特に圃場における作物の生育状態の空間的・時間的ばらつきを把握することである。意思決定支援システムと可変作業は実際の作物の生育状態のばらつきに基づいて実行されることから、圃場マッピング技術が確立されて初めて他の 2 つが実現されると言っても過言ではない。

以上のことから、栽培の観点から見た作物の生育状態を正確に把握することの重要性の高さが伺える。一方、近年では、育種分野においても同様の技術が必要とされ始めている。

この数年の高速シーケンサの発達によるゲノム解析の革新的な高速化は、大量の遺伝情報を生成し、様々な作物のゲノム配列情報が解明されてきた。膨大な遺伝情報を活かすためには、その遺伝情報がどのように表現型として発現するかを知る必要がある。しかし表現型の計測は、多くの場合、破壊的で人力に依存する方法によって行われており、研究開発のボトルネックになっている。育種開発をより効率化するためには、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、環境との相互作用によって変化する作物の生育状態を的確に把握することが必要となる。このような中、近年では表現型解析の高速化を目的とした高速フェノタイピングに関する技術開発が活発になってきた。欧米諸国などには実際にそのような技術を導入した

フェノタイピング施設がいくつか存在し、植物の生長を包括的に解析し理解するための研究が行われている。しかし、開発されてきた技術の多くは特別な実験環境や独自の施設での利用を条件としており、実際の育種圃場での利用は想定されていなかった。そこで近年では、実圃場でも利用可能な高速フェノタイピング技術に関する研究が行われ始めている。その中には可視画像解析を用いたものが多くあるが、実圃場では照明条件などの撮影環境の不均一性が問題となるため、画像から対象作物の表現型に関する情報を抽出することは容易ではない。加えて、植物は生育段階や生育状態によって様相が大きく変化することも、画像解析による表現型解析の大きな障害となる。そのため、実圃場における高速フェノタイピング技術の開発は育種分野における大きな課題の 1 つとして未だ残っている。

作物の表現型の評価は、栽培期間だけでなく収穫後においても重要となる。従来、収穫した農作物の表現型の評価は農家や育種家などの目視観察によって行われてきた。しかし、農産物を製品としてとらえた場合、農産物の加工業者や消費者が希望する品質の設計、その数値化を含めた定量的評価の確立などが課題となる。また、遺伝情報との総合的な解析を考えても、農作物の表現型は定量化されていることが望ましい。

以上のことから、近年では、栽培と育種の両面において、作物の生育状態を的確に把握するための技術開発の重要性が高まっていることがわかる。また、既往研究の結果から、この目的に対する画像解析の有用性が高いことは明らかである。一方で、作物の外観特徴の計測には豊富な経験と知識を要するように、対象作物が違えば計測すべき項目や評価方法も異なる。また、同種の作物であっても評価されるべき項目は多岐に渡り、例えばトマトでは品種登録のために実に 71 種類もの表現型に関する特徴を計測する必要がある。表現型の自動定量計測に関する技術は既に多く提案されてはいるものの、計測対象とされている表現型はそのごく一部であることから、生育状態を的確に把握するための技術開発は未だ発展途上であると言える。

本研究の目的は、作物画像から生育状態に関わる情報を抽出するための画像解析技術を開発し、精密農業の実現のための要素技術や高速フェノタイピング技術としての実用化の可能性を見出すことにある。また、開発する技術は、実際に育種開発や栽培が行われる環境に近い条件であっても利用できるものにするのも目的の 1 つである。さらに本研究では、栽培期間と収穫後を含めた複数の栽培ステージにおいて作物の生育状態を定量的に評価するための画像解析技術の確立を目指す。対象作物には、日本における需要が高く、特に品質が重要視されているため精密な管理が求められるトマトをモデル作物として用いる。本研究では、トマトの栽培ステージを生育初期、着果期以降、収穫後の 3 つに分け、それぞれで生育状態を的確に把握するための画像解析技術を開発する。各生育ステージにおいて計測対象とする形質を、育種開発、作物の生育診断などにおいて特に重要とされる形質の中から選抜し、それらの評価を自動化するための技術を開発する。

以下、本論文における各章の概要を説明する。

第 1 章では、育種面と栽培面の 2 つの観点から見た研究背景について述べ、本研究の目的を明確にした。

第 2 章では、トマトの生育初期段階における重要な生育指標の 1 つである本葉の節間距離に着目し、トマト栽培施設内で撮影した生育初期の樹体画像から本葉の節間距離を推定するための解析手法を開発した。開発手法は節検出、節位推定、節間距離推定の 3 段階の処理によって構成される。節検出処理では、画像特徴量の機械学習によって画像分割条件を決定するため、異なる個体に適用する場合でも画像輝度の閾値の調整を要しなかった。また、Bag of Features と呼ばれる一般物体認識手法を適用することで、節検出処理において発生した多くの誤検出が削除され、節検出の結果が大幅に改善されることが確認された。また、検出節の節位推定に Affinity Propagation と呼ばれる非階層クラスタリング手法を採用したため、最終的な節数が異なる個体を解析する場合でもパラメータの調整を要しなかった。さらに、検出節のクラスタリング結果に対して線形回帰を適用することで、未検出節の補間および誤検出節の削除が可能となった。以上の結果を用いることで、節間距離についても高精度で推定可能であることが確認された。また、時系列画像の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を示すことができた。

第 3 章では、果菜類における最も重要な形質の 1 つとしてあげられる収量の自動計測を目的とし、トマト栽培施設内で撮影した着果期以降の樹体画像から果実を検出するための解析手法を開発した。第 2 章と同様、開発手法では、機械学習によって生成された分類モデルを元に画像分割条件を決定するため、作物の状態が異なる複数のトマト樹体画像から果実検出を行う際にも画像輝度の閾値の調整を要しなかった。また、熟果、未熟果に加えて、外観特徴上の問題から可視画像解析による検出が難しいとされてきた幼果も高精度で検出可能であった。さらに、開発手法では最初に画素ベースでの画像分割を行った上でその他の処理を施すため、樹体画像の解析において深刻な問題となるオクルージョンの問題も解決された。栽培ベッドのパノラマ画像に対して開発手法を適用した結果では、栽培ベッド内の着果数分布を的確に把握できていたことに加え、開発手法では過大評価と過小評価がランダムに発生することから、栽培ベッド全体における総着果数が正確に推定された。

第 4 章では、収穫後のトマト果実の外観特徴を定量評価するための画像解析技術を開発した。開発技術を用いることで、果実の外観特徴を低次元の特徴量で表現できることに加え、従来の定性的な外観特徴指標を定量値で表すことが可能であった。また、得られた外観特徴量を用いて品種間の多重比較検定を行った結果では、おおよそ全ての品種間で有意な差が認められた。この結果は、本研究の外観特徴量が各品種における外観特徴の微細な差異を的確に捉えていたことを示唆している。さらに、得られた特徴量を用いることで、品種間の外観特徴上の関係性

を定量的に把握することができた。この結果から、開発手法は特に果実の外観品質評価や育種分野の遺伝子解析などにおける利用価値が高いと考えられた。

第 5 章では、総合考察として本研究の成果をまとめた上で、現段階における開発手法の問題点を明らかにし、今後の展望について述べた。本研究では、トマトの様々な栽培ステージにおいて、その生育状態を数量的に把握するための画像解析技術が確立された。開発技術では、全ての処理が自動で実行されることから、従来の目視による評価手法と比較して作物の生育状態の評価が高速化されることが期待できる。特に、2 章と 3 章で開発した手法では、画像分割や領域抽出が機械学習によって生成された分類モデルに基づいて行われる。そのため、汎用性が非常に高く、生育段階や生育状態が様々な時系列の樹体画像に対しても閾値等の調整を要さなかった。この結果は、開発手法が実際の育種圃場においても利用できる可能性を示唆している。将来的には、提案手法を UAV や自動走行ロボットなどの圃場観測機器やスマートフォン、タブレットなどの小型情報端末などと組み合わせることで、トマトの自動生育診断および表現型解析の低コスト化、高速化が期待できる。なお、本研究で開発した手法、および取得した作物画像とそれらから抽出した真値に関する情報は、外部の研究者に向けて公開することを予定している。