

圃場でダイズの種子数を計測するフェノタイピング技術

1. はじめに

ダイズは、世界中の人間の食料として不可欠なタンパク質源の一つとして、また、日本の伝統的な食文化に欠かせない重要な作物です。国内のダイズ生産量を増加させるため、多収品種の育成が進められていますが、収量を調査する作業には膨大な時間と労力が要求されます。様々な作物の育種プロセスにおいても、収量調査は大きな障壁となっており、効率化が求められています。このような背景のもと、植物の形質を高速かつ精密に測定できる革新的手法として、画像センシング技術、機械学習、特に深層学習を応用した「植物フェノミクス」研究が、注目を集めています。そこで本研究では、これらの最先端技術を活用して、育種圃場でダイズの種子数を自動的に、かつ正確に測定するシステムの開発を目指しました。この研究により、従来の手間と時間を要する方法から脱却し、育種の効率化と加速化を図ることができます。

2. フィールドセンシング

育種選抜で対象とする農業形質の計測（フェノタイピング）は、気象や土壌などの周辺環境の影響を受けやすい野外の圃場（フィー



図1 育種現場でよく使われている地上フェノタイピングロボットの例³⁾のFigure 2より改変

ルド)において実施することになります。作物のパフォーマンスを長期にわたり高頻度で評価するには、運用コストを低く抑えられるプラットフォームが望まれます。最近のドローンは操作が容易であり、多様な画像センサーを搭載すれば大量の高解像度の時系列画像データを低コストかつ迅速に取得できるため、育種分野を含む広範な農学や農業におけるセンシングプラットフォームとしての注目が高まっています¹⁾。しかし、現在広く使われているドローンセンシング技術は植物の群落の上もしくは斜め上から、一定の距離(数メートル以上)において撮影するため、群落内部の詳細なデータを取得することは困難です。

この問題に対応するため、比較的条件を選ばずに導入・活用できるフェノタイピング用の地上ロボットやローバーの開発が進められています。これらはタイヤ式とキャタピラ式に大きく分けられ、移動プラットフォーム、センサー(データ取得用とナビゲーション用)、中央制御計算モジュール、マニピュレータ、フェノタイピングアルゴリズムから構成されています²⁾。図1³⁾は、近年育種現場で頻繁に使用されている地上フェノタイピングロボットの例です。海外での事例が多い中、日本でも研究事例が少しずつ報告されています^{4,5)}。ただし、日本、特に本州の圃場は大区画化が進んでおらず、段差などによって自由な走行が困難であったり、高精度の全自動ナビゲーションが難しい市街地に近接していることも珍しくなく、汎用性の高いロボットの開発は未だ多くの課題があり、これからもフェノタイピング研究開発におけるホットなトピックになると考えています。

3. フェノタイピング

本研究では、圃場でダイズの種子数を自動で計測することをフェノタイピングの目標として設定しました。この目標を画像解析の課題に置き換えた場合、画像から対象物を認識し、その個数を数えることとなります。一般に、画像の中で目標とする物体を検出し、その位置や個数を特定するためには、深層学習を用いた物体検出技術がよく使われます。しかし、ダイズの種子は小さく、かつ種子や莢が密集しているため、従来広く使用されている深層学習モデルでは、種子数を正確に数えることが非常に困難でした。特に、写真上で種子同士が重なる場所が多いと、正確なカウントが難しくなります。

そこで、本研究では、監視カメラで捉えた非常に高密度の群集から人の数を深層学習で推定する「群集カウント」というアプローチに注目しました。群集カウントには、物体を検出してから数を数え上げる方法と、密度マップを生成した後に回帰分析により対象物の数を推定する方法があります。後者は、教師データの作成が容易(対象物に点を打つだけ)であるため、群集カウント方法として主流となっています。また、最新の手法では、数を推定だけでなく、各対象物の位置も特定できます。

本研究では、群集カウントの最新の手法P2PNetを基にして、ダイズ圃場での種子数とその位置を同時に特定できるP2PNet-Soyモデルを開発しました⁶⁾。P2PNet-Soyは、少ない教師データでもモデルの精度を向上させるための教師なしクラスタリングアルゴリズムk-dツリー(K-d tree)を導入しました(図2)。種子の識別精度を高めるために学習した物体全体を表現する高レベル特徴(high-level feature)

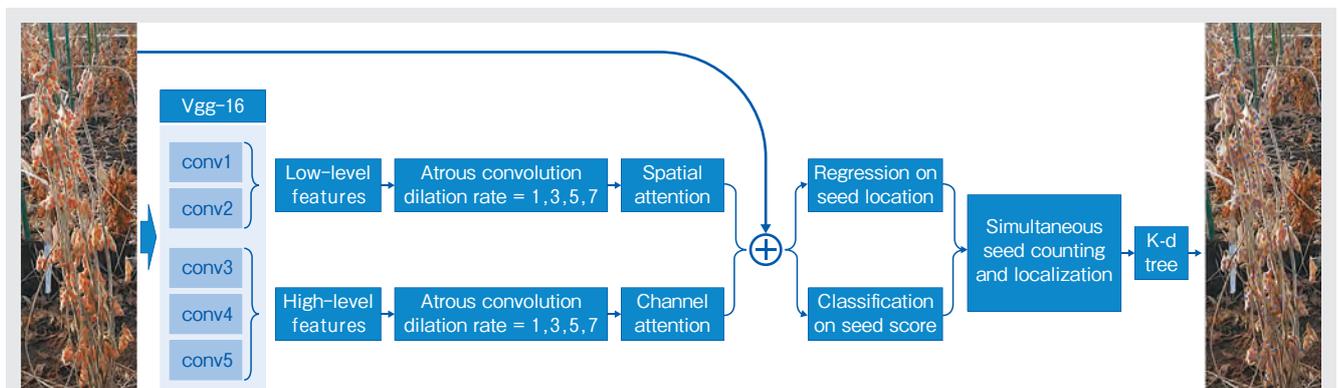


図2 P2PNet-Soyモデルの仕組み (Zhao et al., 2023)

と、エッジや色などを表現する低レベル特徴 (low-level feature) の両方を活用しました。更に、モデル性能を最大化するために、アーキテクチャと後処理にいくつかの改善を施しました。例えば、教師なしクラスタリングによって、密接する検出結果を統合したり、スケール不変の特徴抽出によって大きさのちがう種子にも対応できるようになりました。また、チャンネル方向と空間方向のアテンションを組み合わせることで、前景と背景を効果的に分離し、種子の計数精度を向上させました。

4. 圃場試験および結果

栽培試験は茨城県つくば市にある農研機構の試験圃場で実施しました。種子は2021年6月10日に播種し、畝間0.8m、株間間隔0.2mで、ダイズ1種類につき5株を栽培しました。圃場から成熟期が近く、

草型の違う24種類のダイズを選び、市販のデジタルカメラ (ソニー DSC-RX0M2) を用いて撮影しました。前処理として、画像からダイズの個体を分離し、種子のアノテーション作業を行い、P2PNet-Soyモデルを作成しました。そして、24種類のダイズを対象に、片側から撮影した画像をモデル訓練に、逆側をモデル性能検証に使用しました。その結果、P2PNet-Soyの平均絶対誤差 (MAE) は汎用手法P2PNetの105.55から12.94に減少し、P2PNet-Soyの優位性を示すことができました (図3)。また、学習させたモデルは、背景に写っているダイズの影響を受けにくく、ドローンやロボットで撮影した圃場画像に対しても有効であることが示唆されました。現段階では、写真に写っていない裏側の種子数は測定できないため、撮影方向によっては個体の種子数の評価が異なるなどの課題があり、さらなる改良の余地があります。

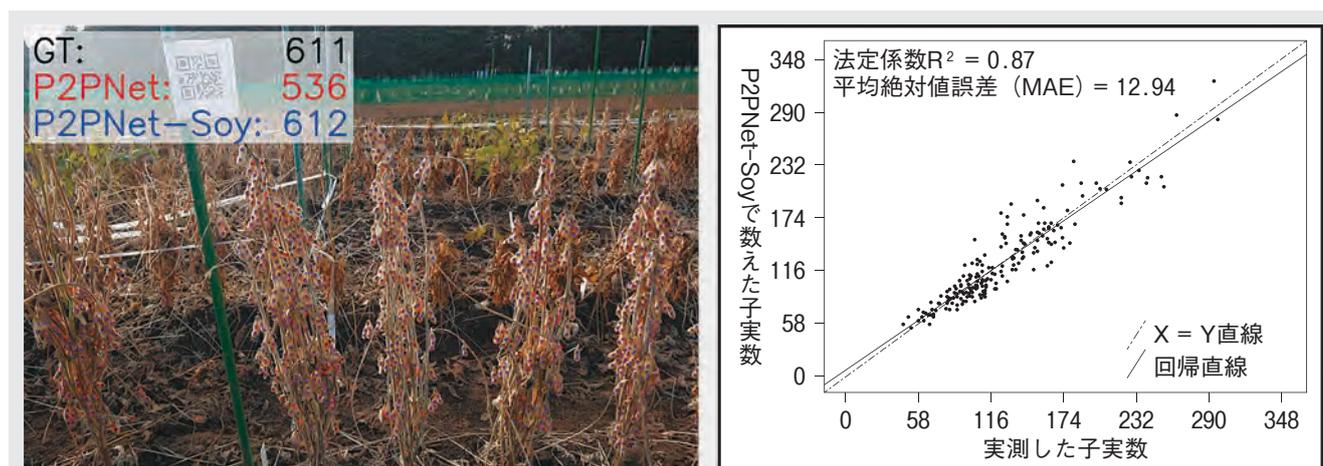


図3 P2PNet-Soyを実際の育種圃場画像に適用して種子数を測定したときの種子数 (左) と本手法P2PNet-Soyの測定精度 (右)。写真左上のGT: 人間が目視で測定した種子数、P2PNet: 群集カウントのために開発された従来法で測定した種子数、P2PNet-Soy: 開発した方法で測定した種子数
他の場所のダイズの検出精度をさらに見る場合には以下のリンクの動画 <https://www.youtube.com/watch?v=UcLwK2nYPMw> をご参照ください。

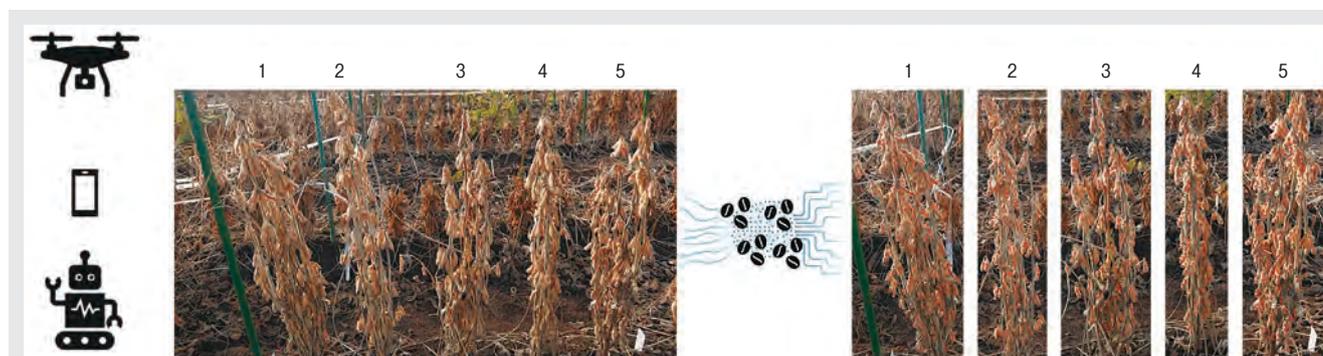


図4 「P2PNet-Soy」モデルの利用イメージ
スマートフォン、ドローンや地上ロボットに搭載したRGBセンサーを用いて圃場のダイズを撮影し、撮影された画像に対してP2PNet-Soyを適用することで、画像上にあるダイズの種子数が自動測定されて出力されます。

本研究では、高密度群集からの人数推定に用いられる深層学習に基づく群集カウントアプローチに焦点を当て、ダイズの種子数計測に応用しました。図4はその利用イメージです。本手法を利用すれば、ダイズの収量構成要素の一つである種子数の調査を、従来の肉眼による計数から開放することができるうえ、種子数の大規模調査が可能となるため、収量予測技術や品種選抜の加速につながる強力なツールになると期待できます。また、本文紹介された「P2PNet-Soy」モデルに関するソースコードとテストデータセットは、以下のリンクから入手できます：<https://github.com/UTokyo-FieldPhenomics-Lab/P2PNet-Soy>。

5. 謝辞

本研究は、JSTAIP加速課題「ビッグデータ駆動型AI農業創出のためのCPS基盤の研究（JPMJCR21U3）」および農林水産省委託プロジェクト・スマート育種システム「育種ビッグデータの整備および情報解析技術を活用した高度育種システムの開発（BAC1003）」により行われました。

6. 参考文献

- 1) Guo W, Carroll ME, Singh A, Swetnam TL, Merchant N, Sarkar S, Singh AK, Ganapathysubramanian B. UAS-based plant phenotyping for research and breeding applications. *Plant Phenomics*. 2021; 2021: 9840192.
- 2) 郭 威. 地上ロボットを用いた植物フィールドフェノタイピング技術. *JATAFFジャーナル* 2022 ; 10 : 24-28.
- 3) Xu R, Li C. A review of high-throughput field phenotyping systems: Focusing on ground robots. *Plant Phenomics*. 2022; 2022: 9760269.
- 4) Kuroki K, Yan K, Iwata H, Shimizu KK., Tameshige T, Nasuda S, Guo W. Development of a high-throughput field phenotyping rover optimized for size-limited breeding fields as open-source hardware. *Breed. Sci.* 2022; 72: 66-74.
- 5) Tanabata T, Kodama K, Hashiguchi T, Inomata D, Tanaka H, Isobe S. Development of a plant conveyance system using an AGV and a self-designed plant-handling device: A case study of DIY plant phenotyping. *Breed. Sci.* 2022; 72: 85-95.
- 6) Zhao J, Kaga A, Yamada T, Komatsu K, Hirata K, Kikuchi A, Hirafuji M, Ninomiya S, Guo W. Improved field-based soybean seed counting and localization with feature level considered. *Plant Phenomics*. 2023; 5 : 0026.