

研究終了報告書

「緻密な生育管理を実現する「未来栽培」のための植物の三次元構造復元と植物ラ イフログの構築」

研究期間：2017年10月～2021年3月

(新型コロナウイルス感染症の影響を受け2021年9月まで延長)

研究者：大倉 史生

1. 研究のねらい

植物の栽培において、各個体の日々の生育過程をモニタリングし、将来の生育傾向を予測することは、非常に有益でありかつ重要であるにも関わらず非常に困難である。例えば適切な剪定のためには、将来の生育を予測し、さらに各葉への光の当たり方等を考慮し適切な剪定を行うことが重要である。しかし、生育状況を適切に取得・管理することは非常に難しく、栽培従事者の経験知によるところが大きいため、新規参入者の大きな障壁となっている。近年、バイオインフォマティクスを用いた解析技術や、環境データのセンシングに基づく解析技術についての研究が活発に行われている。一方で、植物の生育状態・生理状態・環境応答はその形状や構造に顕著に現れる。しかし、葉一枚・枝一本のレベルで植物形状・構造を簡易に測定することはこれまで困難であった。コンピュータが植物の生育状態等を適切に把握するためには、植物の構造情報(どこに枝があり、どこに何枚葉がついているかなど)を取得することが必須である。

もし、植物を多視点から撮影した画像群などを入力として植物の「構造」情報を復元し、継続的に三次元植物モデルおよび各種センサデータを蓄積すれば、緻密な生育解析・予測等が可能となり、栽培プロセスを大きく変革する「未来栽培」の実現が見えてくる。

本研究では、「未来栽培」のコア技術となる植物構造復元を実現することで、将来の個葉・枝単位の成長解析・予測の応用につなげる。植物の構造復元技術は、屋外圃場や植物工場で、主に果樹などの樹木栽培を対象として広く活用できる技術となるとともに、植物科学における生長解析の新たなツールとなる。

実際に存在する植物を複数地点から撮影した写真群(多視点画像)を入力とした三次元形状の復元に関する研究開発は、コンピュータビジョン(CV)・コンピュータグラフィックス(CG)分野を中心に行われている。しかし、細い枝や、葉による遮蔽により不可視領域が多く発生することにより、正しく構造を復元することが困難であった。本研究では、これまで CV/CG 分野で取り組まれてきた三次元復元、画像処理、深層学習技術を深化・発展し、新たなアプローチで三次元植物構造復元を実現する。

2. 研究成果

(1)概要

本研究では、画像から植物の形や構造を推定することを目標とした研究に取り組んだ。具体的には、深層学習および三次元復元技術を応用し、植物を複数方向から撮影した画像から、葉などに隠れた部分も含む植物の形状を、一本の枝、一枚の葉に至るまで正確に復元する技術を構築した。

研究テーマ A「植物枝形状・構造の復元」においては、枝の三次元形状・構造を復元するため、深層学習手法の一つである画像変換と三次元復元手法を組み合わせ、植物構造復元に適したフレームワークを設計した。その結果、一部が遮蔽された枝の三次元形状・構造の復元が可能であることを示した。また、入力画像数を削減するため、色と距離を計測可能なカメラ(RGBD カメラ)による入力を用いた単一画像からの形状復元にも取り組んだ。

研究テーマ B「植物は形状・構造の復元」においては、多視点植物画像からの葉「ごと」の三次元復元を、画像の領域分割手法の一種であるインスタンスセグメンテーションと、視点間でのインスタンスの対応付け問題の組み合わせ(多視点インスタンスセグメンテーション問題)に帰着させた。類似した見た目の繰り返しからなる植物の特性に対応するため、密な特徴点对応に依存しない、物体の二次元・三次元の関係(エピポーラ幾何)のみに基づく新たな領域対応付け手法を構築した。

研究テーマ A および B の成果は、情報科学(コンピュータビジョン)分野における新規かつ顕著な技術であることが認められ、当該分野のハイレベルな国際会議において発表された。その他、本研究では時系列植物画像を撮影可能なスタジオの構築や、他研究者(主に植物科学分野)との共同研究を通じて、植物科学と情報科学双方の最先端を両立する研究分野の確立に寄与した。

新型コロナウイルス感染症の影響を受け 6 ヶ月間研究期間を延長し、収集データの整備および植物枝構造復元手法のさらなる実用性向上に取り組み、本研究課題において実装された手法群のツール化を進めた。

(2) 詳細

研究テーマ A 「植物枝形状・構造の復元」

植物構造復元のコア技術の一つは枝構造の復元である。近年、深層学習による構造復元問題に関する研究が行われている。特に、画像や動画からの人体の関節構造の推定が広く試みられている。しかし、植物はその関節(分岐)数が一定ではなく、人体と比較し複雑な構造である。また、葉などによる遮蔽が大きいことも問題となる。

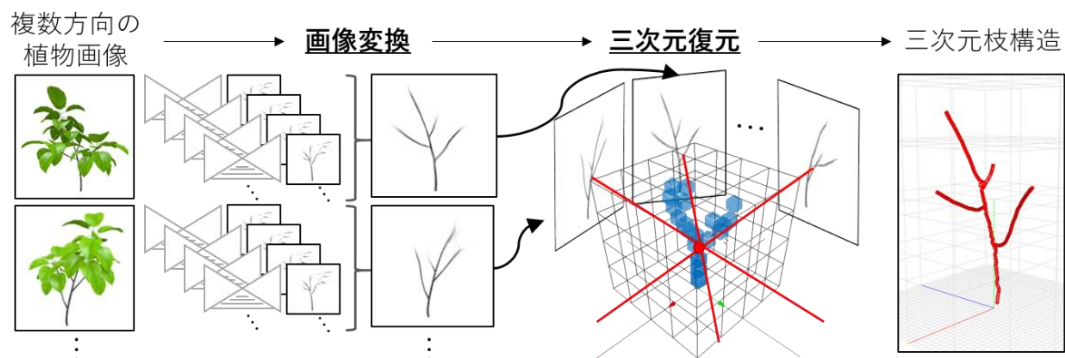


図 1 多視点植物画像からの枝構造復元手法

本研究では、人体構造推定に用いられるような三次元復元や深層学習手法を大幅に改良し、植物の構造復元問題に挑戦した[1]。そのために、図 1 に示すように、画像の「変換」を学習する画像変換(image-to-image translation)法と三次元復元を組み合わせた植物構造復元

に適したフレームワークを設計した。具体的には、植物を複数方向から撮影した画像群(多視点植物画像)を入力とし、各画像の「葉付き画像」から「枝画像」への変換を学習する。葉付きの植物画像を入力して枝確率画像を出力するよう学習されたネットワークを用い、出力画像を用いて三次元投票を行うことで、三次元枝確率を出力し、枝構造に変換した。このとき、学習データには植

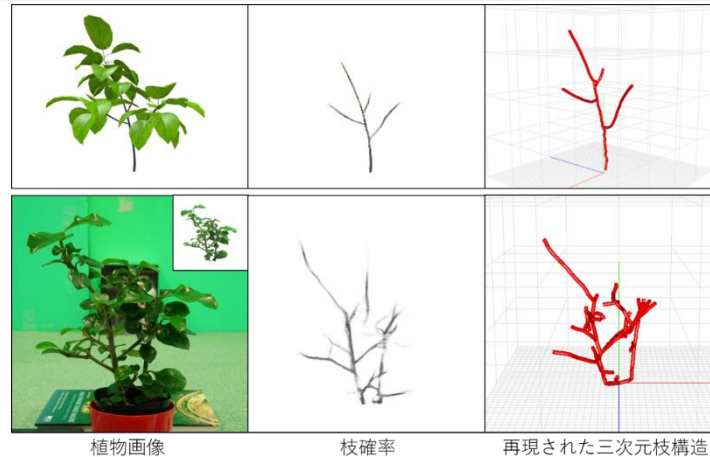


図 2 植物枝構造の復元結果

物の枝分かれが表現できる L-system に基づく CG モデルが生成可能なソフトウェアである L-studio による CG シミュレーション画像を用いた。CG および実植物を対象にして実験を行った結果、単純な植物に対しては良好な結果が得られた(図 2)。

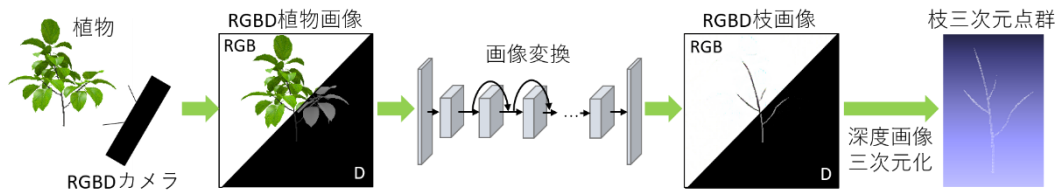


図 3 単一画像からの枝形状復元

本研究ではさらに、入力画像数の削減を目的とし、単一画像のみを入力とする三次元枝構造推定にも取り組んだ。図 3 に示すように、Microsoft Kinect などの RGB 画像と深度(距離)画像を同時撮影可能な距離画像センサ(RGBD カメラ)による撮影を想定する。深層学習による画像変換(image-to-image translation)ネットワークを多チャンネル画像(RGBD 画像)入力に拡張し、枝の RGB 画像とともに深度画像を出力するようにした。しかし、その際深度方向の推定精度が極端に低くなることがわかった。そのため、本研究では枝部分の深度の平滑性(滑らかさ)を仮定する損失関数の導入により、RGBD 画像変換の精度および安定性の向上を図った。画像変換手法を応用した RGBD 画像間の画像変換および、その振る舞いの解析・改善は、情報科学においても興味深い研究テーマとなった。

研究テーマ B 「植物葉形状・構造の復元」

Multi-view stereo (MVS) などで得られた三次元点群に対し、葉のパーツモデルの当てはめや点群の分割による葉の形状復元が行われることがある。しかし、これらは三次元点群の欠損に大きく影響を受ける。そのため、本研究では画像上の特徴を有効に活用する葉「ごと」の形状復元手法として、インスタンスセグメンテーションを活用した手法を構築した[3]。

本研究では、多視点植物画像からの葉「ごと」の三次元復元を、画像の領域分割手法の一種であるインスタンスセグメンテーションと、視点間でのインスタンスの対応付け問題の組み合わせ(多視点インスタンスセグメンテーション問題)に帰着させた。特に植物の葉のように、類似

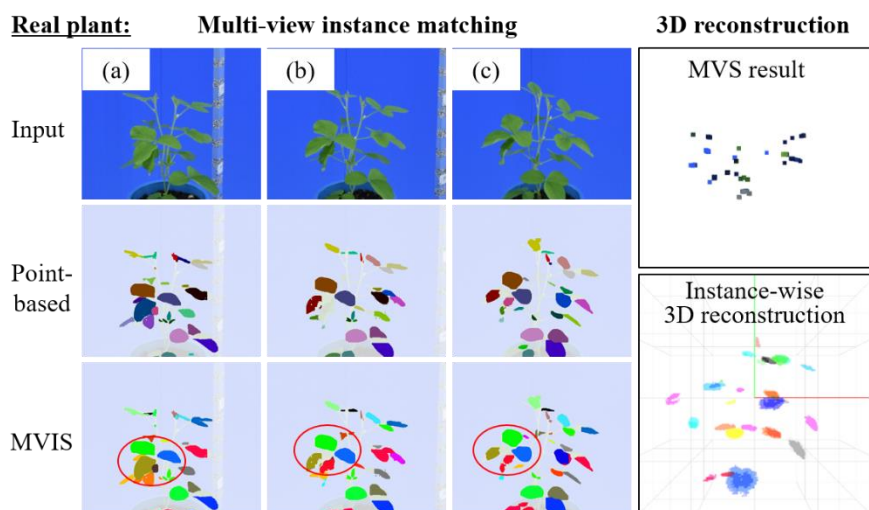


図 4 多視点インスタンスセグメンテーションおよび三次元復元例

の様相や形状が繰り返し現れる場面では、画像間での特徴点对応付けが困難であるため、多視点画像間でインスタンス領域とその対応を求めることは難しかった。そこで本研究では、密な特徴点对応に依存しない、物体の二次元・三次元の関係(エピポーラ幾何)に基づくインスタンス領域の対応付け手法を構築し、広く使われるインスタンスセグメンテーション手法(Mask R-CNN)と組み合わせて実装した。また、視点ごとに対応の取れたインスタンス領域情報は、任意の三次元復元手法と組み合わせて「物体ごとの」三次元復元に利用した。

CG および実際の植物、その他類似物体を組み合わせた環境を用いた実験より、提案手法が MVS による手法と比較して高い精度でインスタンス対応付けが可能であることが示された。また、単純な三次元復元手法である back projection 法を用いた三次元復元結果についても、MVS と比較して復元精度が大きく向上することを確認した。

研究テーマ C 「データ収集およびデータセット構築」

本研究課題の主要な応用の一つは、時系列の植物形状・構造解析にある。本研究では単一時刻における枝葉の形状解析の開発を重点的に行なってきたが、これを時系列復元に拡張することは、今後重要となる。これまでに、植物の時系列画像を取得する試みが行われてきたが、コンピュータビジョンにおける三次元・四次元復元技術のアルゴリズム開発・評価を行うには時間的あるいは空間的に不十分であった。本研究では、時間的に密な、かつ多視点の画像取得が可能な植物の生育環境を整えることとした。照明環境、撮影タイミング、水やりの自動化を実施し、継続的にテスト運用を行っている。

コロナ延長期間中において、さきがけ他研究者との共同での取り組みの一環として、データ蓄積・公開用リポジトリの整備を進めた。Dataverse (<https://dataverse.org>) をホストするサーバとして実装を進めており、準備が整い次第公開する。

研究テーマ D 「学術分野創生にむけた共同研究」

本研究では、新たな植物画像解析手法の開発のみならず、他の(主に植物科学分野の)研究者と共同で、実際の育種現場等にただちに有用になるような技術の開発を進めた([2]など)。

葉の疾病検出と可視化に関し、手法選定、実験設定、論文執筆などの点において協力したほか、オオムギ種子のセグメンテーションのためのデータ生成手法について、主に実験設定・論文執筆などの点において協力した。その他、複数の共同研究が進んでいる。

3. 今後の展開

本研究は今後、新規学術分野の創生と、栽培・育種の革新につながる技術開発を両輪としたフェーズに入る。

さきがけ研究期間を通じて、植物の画像解析が情報科学(コンピュータビジョン)における挑戦的な対象となり得、情報科学分野に新たな知見をもたらすことがわかった。本研究の延長として、情報科学(特にコンピュータビジョン分野)における新たな問題の提示・解決を通じ、本分野の研究者が増えることが予想される。また、最先端の情報科学を駆使して植物特有の挑戦的な課題を解決することで、植物科学分野における新たな基盤技術を提供し続ける。両分野の最先端を両立する、新たな学術分野が創生される。

本研究で構築された枝葉の三次元復元技術は、まずは比較的撮影環境がコントロールされた育種の現場において活用されていく予定である。圃場や植物工場などの環境における植物の復元、あるいは時系列の植物形状・構造の復元には未だ課題が多い。今後、これらの課題を解決していくとともに、実農業現場における応用技術の開発を続ける。

4. 自己評価

植物の三次元形状・構造の復元を目指す研究目的について、一定程度達成された。しかし、当初目指していた実圃場環境下における栽培技術の proof-of-concept に至ることはできなかった。これは、当初の予想に比して、コンピュータビジョン・画像解析における植物という対象の特異性・挑戦性が大きかったことによる。このことは、今後の学術分野としての広がり示しているものであり、肯定的に捉えている。

社会への波及効果については、研究開始当初と比較して重要性は増している。本研究で構築した技術およびその延長となる技術群は、栽培の自動化・高品質化のみならず育種の高速化・高精度化への応用が求められており、気候変動下・農業従事者が減少する中で持続可能な社会を実現する上で欠かせないものとなる。

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文)発表(フルペーパー査読付き国際会議を含む)

研究期間累積件数:5件

1. Takahiro Isokane, Fumio Okura, Ayaka Ide, Yasuyuki Matsushita, Yasushi Yagi. Probabilistic plant modeling via multi-view image-to-image translation. Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'18), 2018, pp. 2906–2915 (h5-index: 299).

本研究では、多視点の観測から葉の下に隠れている植物の3次元枝構造を推定する手法を提案する。これまでの幾何学的アプローチが枝の可視性に大きく依存していたのとは異な

り、本手法は確率的な枠組みで枝構造を統計的に推定する。画像変換を多視点画像に適用して枝の存在確率を求めることで、提案手法は、直接観察できない3次元分岐パターンを表す植物の3次元モデルを生成する。実験により、従来の手法と比較して、本手法の有用性が実証された。

2. Yosuke Toda, Fumio Okura, Jun Ito, Satoshi Okada, Toshinori Kinoshita, Hiroyuki Tsuji, Daisuke Saisho. Training instance segmentation neural network with synthetic datasets for crop seed phenotyping. *Communications Biology*, 2020, Vol. 3, Article 173.

深層学習による植物の画像解析における問題の一つとして、訓練データの少なさおよび、アノテーション作業の手間が挙げられる。本研究は、様々な品種の大麦の種子の表現型を獲得することを目的としたインスタンスセグメンテーション用のネットワークが、CG合成されたデータセットだけで十分に学習できることを示す。仮想のキャンバス上に種子をランダムに配置し大量の画像を生成する(ドメインランダム化)ことによりネットワークと訓練することで、高い精度で領域分割を実現した。

3. Takuma Doi, Fumio Okura, Toshiki Nagahara, Yasuyuki Matsushita, Yasushi Yagi. Descriptor-free multi-view region matching for instance-wise 3D reconstruction. *Proc. Asian Conf. on Computer Vision (ACCV'20)*, 2020, in press. (Oral; acceptance rate < 10%)

本論文では、テクスチャや形状特徴に依存しない領域インスタンスの対応付け手法を提案する。本手法は、インスタンスセグメンテーションの多視点拡張および、物体ごとの三次元復元に活用できる。植物の葉などの繰り返しテクスチャや形状を持つシーンでは、テクスチャや形状を用いた多視点対応付けが困難である。そこで本研究では、幾何的制約(エピソード制約)に基づく多視点領域マッチング手法を提案する。さらに、多視点対応のついたインスタンスが物体ごとの三次元復元に有効であることを示す。

(2)特許出願

研究期間累積件数:0件(特許公開前のもも含む)

(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)

書籍:

1. Okura, Isokane, Ide, Matsushita, Yagi. Image-based structural phenotyping of stems and branches. In *Intelligent Image Analysis for Plant Phenotyping*, CRC Press, Oct 2020.
2. 大倉 史生, 磯兼 孝悠, 井手 絢香, 松下 康之, 八木 康史. AI活用による見えない枝の三次元構造復元手法の開発. *人と共生するAI革命, エヌ・ティー・エス*, Jun 2019.

総説論文・解説:

1. 大倉 史生, 水谷 未耶, 野下 浩司, 戸田 陽介. 植物科学の「人工知能」との関わり方を考える. *BSJ-Review*, Jun 2020.
2. 大倉 史生, 野下 浩司, 木下 俊則, 戸田陽介. 深層学習の利活用による植物表現型解析技術の展望. *BSJ-Review*, 10, Jul 2019.
3. 大倉 史生, 磯兼 孝悠, 井手 絢香, 松下 康之, 八木 康史. 植物画像群から隠れた枝構造を再現. *画像ラボ*, Jan 2019.

プレスリリース:

1. 「植物の画像から、葉に隠れた見えない構造を再現」(2018年4月)
https://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2018/20180426_2
関連する報道 新聞 44 件(地方紙含む)、インターネットメディア 6 件(研究代表者把握分)
2. 合成画像の AI 学習で種子の形態評価を効率化 ～植物科学・農学分野における機械学習モデルの開発の高速化に期待～(2020年4月)
<http://www.itbm.nagoya-u.ac.jp/ja/research/2020/04/post-20.php>
関連する報道 新聞 3 件、雑誌 1 件(研究代表者把握分)