

令和 6 年 5 月 30 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14947

研究課題名(和文)植物3次元形態の数理モデル化によるフェノタイピング基盤技術の開発

研究課題名(英文) Mathematical modeling for 3D plant morphology as fundamental technologies of plant phenotyping

研究代表者

野下 浩司(Noshita, Koji)

九州大学・理学研究院・助教

研究者番号：10758494

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：表現型の総体であるフェノームのデータ、特に、植物の3次元形態のフェノームデータの蓄積を進めるために、個別構成要素のフェノタイピングの高速化、階層性をつなぐフェノタイピングを実現する数理モデルの開発に取り組んだ。本研究では、3次元空間中における葉の輪郭形状を2次元の-3次元の情報を統合することで推定する手法の開発、葉脈のネットワーク構造のグラフとしての表現とネットワークベース特徴量による定量化と形態空間解析におこなった。これらの取り組みにより、植物3次元形態を適切に定量化する数理モデルとデータ取得の基盤を提供し、植物3次元形態のフェノーム解析を高効率に可能にする基盤理論・技術の開発を進めた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

開発した植物フェノタイピング手法は、従来定量的に評価することが難しい形質についての定量化を実現した。本研究では、植物3次元形態を個別に定量化可能な要素の表現型値の個別のモデル化とその多変量確率分布モデルにより階層的な集合を表現可能にするというアプローチにより実現した。植物3次元形態の過不足のない定量化はもちろん、野外圃場などの計測が不安定な状況でもノイズに頑健なフェノタイピングが可能になることが期待される。

研究成果の概要(英文)：To accumulate phenome data, especially 3D morphological properties of plants, I attempt to improve the throughput of phenotyping individual components and develop mathematical models to integrate these components into hierarchical structures. In this study, we developed a method for estimating the shape of leaf outlines in 3D space by integrating 2D and 3D information and quantification and morphospace analysis of the network structure of leaf veins as network features. Through these efforts, I have provided phenotyping methods and data acquisition platforms for appropriately quantifying 3D plant morphology, and have developed the theory and technology that enables highly efficient phenome analysis of 3D plant morphology.

研究分野：形態測定学

キーワード：形態測定学 植物フェノタイピング 画像解析 機械学習 数理生物学

## 1. 研究開始当初の背景

植物体の 3 次元形態の定量化や機能性評価は育種学、作物学はもちろん生態学や植物科学など幅広い分野において重要な課題の一つである。次世代シーケンサーの普及によりゲノムや遺伝子発現データは高速・大量に取得可能となった。さらにタンパク質や代謝産物、代謝フラックスなどを含めたマルチオミクスデータの活用は今後ますます進むだろう。これに加え、表現型(フェノタイプ)データを高効率に取得できれば遺伝情報と表現型情報の関連の解明、ひいては効率的な育種プログラムの実現や複雑な病害の統合的な理解に繋がる。特に、植物の 3 次元形態はその多様性や機能性、病害抵抗性などの側面から重要な表現型であるが、ゲノムワイド関連解析などをおこなう際に必要な量的形質として評価が難しい。これは植物の 3 次元形態が細胞や組織、器官が階層的に組み合わさった複雑な形質であり、そのフェノームを過不足なく得ることが難しいためである。ゲノム情報において遺伝子配列が A, T, C, G からなる文字列としてモデル化されることや塩基置換モデルなどを仮定することでその差を計算できる状況と大きく異なる。また、その結果、フェノームの評価は類型的、一次的、あるいは専門家の達観による評価により行われるケースも少なくなく、暗黙知的で体系化されているとは言い難い。フェノーム解析におけるブレークスルーには植物 3 次元形態のフェノーム解析のための理論・技術が必要である。かたちの数理モデル化が可能になれば、定量的に表現が困難であった複雑な病変を量的形質として遺伝学的な解析が実施できる。また、限られたデータから合理的な外挿が必要な育種プロセスの改善・高度化につながる。

## 2. 研究の目的

個別構成要素のフェノタイピングの高速化、階層性をつなぐフェノタイピングを実現する数理モデルの開発を通し、植物 3 次元形態を適切に定量化する数理モデルとデータ取得の基盤を提供し、植物 3 次元形態のフェノーム解析を高効率に可能にする基盤理論・技術の開発を目的とした。植物 3 次元形態を個別に定量化可能な要素の表現型値の個別のモデル化とその階層的な集合を表現可能にするモデルにより統合するという独創的なアプローチを取る。これにより、植物 3 次元形態の過不足のない定量化はもちろん、野外圃場などの計測が不安定な状況でもノイズに頑健なフェノタイピングが可能になることが期待される。

## 3. 研究の方法

本研究では、個別要素の形状や形態のフェノタイピング技術の高度化とそれらが組合わさった複雑な表現型を定量化するための解析手法の適用可能性の検証に取り組んだ。具体的には、三次元空間中における葉の輪郭形状を二次元的-三次元の情報を統合することで推定する手法の開発、葉脈のネットワーク構造のグラフとしての表現とネットワークベース特徴量による定量化を用いた形態空間解析、に取り組んだ。

まず、個別構成要素のフェノタイピングの高速化に取り組んだ。画像解析・機械学習を活用することで、画像から輪郭の自動抽出をおこなった。写真測量的な手法によりこれらの情報を三次元空間中に統合する。

また、階層的なネットワーク構造を深層学習によって抽出し、ネットワーク特徴量により定量化した。これらの情報に基づき形態空間を構築し、形態的多様性を評価した。

## 4. 研究成果

植物多視点画像データセットとそのアノテーションデータを活用し、深層学習に基づくインスタンスセグメンテーションによる 2 次元画像中の小葉の認識、SfM 及び MVS によるカラメラパラメータの推定と三次元再構築、三次元インスタンスセグメンテーションと二次元画像中のインスタンスの対応付け、輪郭形状推定からなる三次元葉縁再構築手法を提案した。仮想データによる提案手法の精度検証と実データへ適用する上でのガイドラインの作成をおこない、提案手法を対象に適用する際に特に注意すべき設定を特定した。これにより従来の二次元的な投影や計測に基づく定量化や、三次元であっても輪郭の認識が難しいケースでは得ることができない三次元輪郭形状を直接的に推定することが可能となった。本手法は切り込みの入った葉や穴の空いた葉にも適用できる。一方で、セレーションや長葉の先端部位などのような細かい空間的な変動については精度が低下することが明らかになった。また、実データへの適用性を検証した。異なる生育ステージのサイズの個体へ提案手法を適用し、複数の葉の葉縁を再構築できることを確認した。

複雑な繰り返し構造である葉脈をグラフとして表現するための画像解析手法を提案し、染色画像と非処理画像の両方で構造抽出をおこなった。さらに、得られたグラフからネットワーク特徴量による定量化をおこない、形態空間上でその分布パターンを検証することで、葉脈構造に特異的な制約をデータドリブンに見出した。提案手法は、画像の取得、U-Net による葉脈の抽出、無向グラフへの変換、ネットワーク特徴量化、からなる。本手法を五種の被子植物の葉に適用し、約 90%の精度で識別することができた。また、伊都キャンパスでサンプリングした 5 種 479 枚の

非染色葉標本と国立科学博物館 葉脈標本データベースに含まれる 5 属 328 枚の染色標本の解析し、高次葉脈がツリー状からループ状に遷移する潜在空間を特定することに成功した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Iwamasa Kohei, Noshita Koji	4. 巻 -
2. 論文標題 Network feature-based phenotyping of leaf venation robustly reconstructs the latent space	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 bioRxiv	6. 最初と最後の頁 1-36
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1101/2022.09.20.508639	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Noshita Koji, Murata Hidekazu, Kirie Shiryu	4. 巻 72
2. 論文標題 Model-based plant phenomics on morphological traits using morphometric descriptors	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Breeding Science	6. 最初と最後の頁 19～30
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1270/jsbbs.21078	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Tsugawa Satoru, Teratsuji Kaname, Okura Fumio, Noshita Koji, Tateno Masaki, Zhang Jingyao, Demura Taku	4. 巻 12
2. 論文標題 Exploring the mechanical and morphological rationality of tree branch structure based on 3D point cloud analysis and the finite element method	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 4054
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-022-08030-5	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Fukano Yuya, Guo Wei, Aoki Naohiro, Ootsuka Shinjiro, Noshita Koji, Uchida Kei, Kato Yoichiro, Sasaki Kazuhiro, Kamikawa Shotaka, Kubota Hirofumi	4. 巻 12
2. 論文標題 GIS-Based Analysis for UAV-Supported Field Experiments Reveals Soybean Traits Associated With Rotational Benefit	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Frontiers in Plant Science	6. 最初と最後の頁 637694
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fpls.2021.637694	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Murata Hidekazu, Noshita Koji	4. 巻 6
2. 論文標題 Three-Dimensional Leaf Edge Reconstruction Combining Two- and Three-Dimensional Approaches	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Plant Phenomics	6. 最初と最後の頁 181
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.34133/plantphenomics.0181	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Murata, H., Noshita, K.
2. 発表標題 Leaf shape phenotyping method by instance segmentation and curve-based 3D reconstruction
3. 学会等名 IPPS2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Noshita, K.
2. 発表標題 Characterization of foliage structures using persistent homology analysis
3. 学会等名 IPPS2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Iwamasa, K., Noshita, K.
2. 発表標題 A simple method for extracting leaf vein images and quantitative vein network features
3. 学会等名 IPPS2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Feldman, A., Noshita, K., Fukano, Y.
2. 発表標題 3D reconstruction and shape analysis of tubers of Jerusalem artichoke ( <i>Helianthus tuberosus</i> ) using spherical harmonics
3. 学会等名 IPPS2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 村田 英和, 野下 浩司
2. 発表標題 葉輪郭再構築への2次元-3次元協調的アプローチ
3. 学会等名 生態学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 野下 浩司
2. 発表標題 さまざまな形態記述子によるモデルベース植物フェノタイピング
3. 学会等名 日本植物バイオテクノロジー学会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 野下浩司
2. 発表標題 植物の「かたち」を測る・モデル化する：数理モデルの構築・定量化の理論提案・植物フェノタイピング技術の開発
3. 学会等名 超分野植物科学研究会 (TDPS) 第1回研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 野下浩司
2. 発表標題 草姿・草型のフェノタイピング：3次元計測と「かたち」の数理モデル化
3. 学会等名 日本植物学会 第85回大会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 野下浩司
2. 発表標題 草姿・草型の数理モデル化と高効率フェノタイピングへの応用
3. 学会等名 農業情報学会2021年度 年次大会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Koji Noshita
2. 発表標題 Morphometrics and its applications
3. 学会等名 RIMS Workshop Mathematical methods for the studies of flow, shape, and dynamics（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 野下 浩司	4. 発行年 2023年
2. 出版社 文一総合出版	5. 総ページ数 22
3. 書名 植物3次元形態のデータ化，定量化，モデル化（植物の超階層生物学：ゲノミクス×フェのミクス×生態学でひもとく多様性 種生物学会 編/佐藤 安弘・村中 智明 責任編集）	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------