

# 研究報告書

## 「マルチスケールデータ融合による草姿・草型の超解像フェノタイピング技術の開発」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 2016年10月～2020年3月

研究者: 野下 浩司

### 1. 研究のねらい

植物体の空間的パターンである草姿・草型は受光態勢、耐倒伏性、ガス交換効率、他個体または別種の植物との空間的な競争、耐病性などに関わるため、収量や栽培管理の容易さに深く結びつく極めて重要な形質である。そのため、草姿・草型の定量化や機能性評価は効率的な栽培管理の提案のための重要な課題の一つといえる。

本研究では、草姿・草型の大規模かつ詳細な経時的フェノタイピングシステムを提案する。近年、無人航空機(UAV)によるリモートセンシングの圃場での利用が進みつつある。UAVリモートセンシングは高頻度に行うことができ、得られる3次元的な標高データや点群データは広範囲をカバーする。しかし、現状ではその空間解像度は作物の器官レベルでの観察には不十分であり、外側の葉に覆われた内部の構造(分枝パターンや内部の葉の分布など)は基本的にはモニタリングできない。一方、3Dスキャナや2次元画像からの3次元再構築技術の一般化は、興味ある対象の表面の形態や色彩パターンなど3次元的な情報へのアクセスを容易にした。従来、計測の難しかった植物の3次元的な形態を点群データとして取得することは器官や個体レベルでは十分可能である。しかし、UAVリモートセンシングとは逆に大規模かつ頻繁な計測には不向きである。本研究では、地上での詳細な器官や個体レベルでの計測・モデル化により、上空からの大規模・高頻度のモニタリングを補完することで、草姿・草型の超解像技術を確立し広範囲・高精度・高頻度の定量化と機能性評価を可能にするシステムを構築する。

### 2. 研究成果

#### (1) 概要

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。これに加え表現型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最適な栽培管理方法の提案に繋がることが期待される。そのため各種センサーの開発や画像解析、ロボティクスを利用して植物の表現型データを効率的に収集・解析することを目指す「植物フェノタイピング」への取り組みが世界的に活発になっている。

本研究では、草姿・草型の大規模かつ詳細な経時的フェノタイピングシステムの構築を目指し、野外での植物3次元データの取得技術の開発、草姿・草型を定量的に記述するモデルの提案という要素技術・理論の構築をおこなった。そして、提案したモデルとUAVリモートセンシングデータを組み合わせ草姿・草型の大規模かつ詳細なフェノタイピングを実現するためのシナリオを検討した。具体的には、ダイズ群落を対象にその葉の面積や角度、それらの空間分布を多変量確率分布として集約するモデルを用いて、地上での詳細計測した

3次元点群から分布を推定し、UAV モニタリングによる DEM から推定する枠組みを提案、検証した。

## (2) 詳細

### 研究テーマ A 「野外における器官-個体レベルの植物3次元構造データの取得と点群解析技術の開発」

「植物フェノタイピング」への取り組みが世界的に活発になっているが、圃場などの野外環境でのフェノタイピングは未だ課題が多い。

本研究では、まず、野外環境下で植物の3次元形態データを収集するために、2次元画像のセットから3次元点群を推定する Structure from Motion (SfM) 及び multi-view stereo (MVS) を利用した3次元計測システムと得られた点群から表現型値(葉面積、葉角度、それらの空間分布など)を推定するためのパイプラインの開発をおこなった。

SfM 及び MVS による3次元データの収集は同一シーンの撮影を前提としているため野外環境では風や光環境の変化などが問題となる。そこで約30台のデジタル一眼レフカメラを配置した移動式の写真測量スタジオ(図1a)を作成し、圃場でもほぼ同一シーンの撮影を可能にした。これによりダイズ小葉を個別に認識できる程度の高い解像度をもった3次元点群が再構築できる(図1b)。得られた点群データから表現型値を推定するために点群の前景抽出、小葉の分割、小葉の表面再構築、葉面積・葉角度とその空間分布の推定をおこなう点群解析パイプラインを開発した(図1c) [Noshita et al. (in prep)]。本システムの一部技術(走行台車など)は共同研究者の他のプロジェクトへの技術移転をおこなった。また、比較的 low cost のフェノタイピングシステムの観点から国際的なコミュニティとの連携も進めた [Reynolds, et al. 2018]。

a. 移動式写真測量スタジオ



b. 点群解析パイプライン

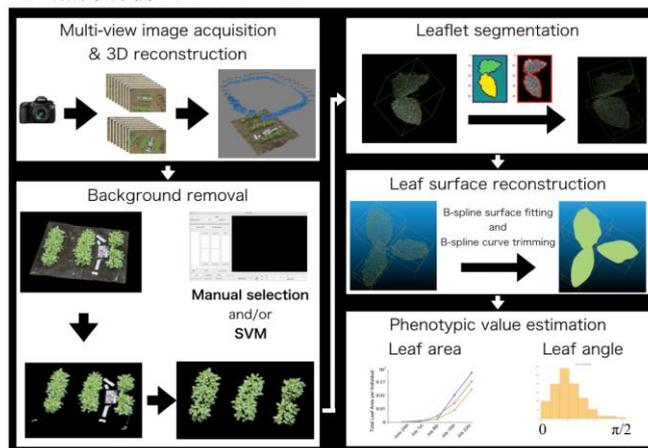


図1. 野外における植物3次元データの収集と解析

## 研究テーマ B 「草姿・草型を記述するモデルとその定量化方法・理論の提案」

草姿・草型は複数の器官が組み合わさった複雑な形態形質であり、繰り返される分岐構造とそこに付随する各種器官の総体として認識される。従来、植物の3次元形態の評価は目視により定性的におこなわれてきたが、その評価基準は暗黙知的であり体系化されているとは言い難い。理由の一つは、植物3次元形態という複数の器官の総体として現れる複雑な形質を適切に定量化できていないという理論的・技術的な不備にある。単純に計測した形態形質(草丈、葉の枚数、茎葉重など)を集めただけでは3次元形態を直接的に表現するには不十分である。

そこで、ダイズの葉の分布パタン、葉面積、葉角度に注目し、それを記述する多変量確率分布によるモデルを提案した。提案したモデルを用いることで、草姿・草型を多変量確率分布として定量的に表現できるだけでなく、その分布に基づく仮想的な個体や群落を生成することができる(図2a)。これは提案したモデルが草姿・草型を再構築するのに十分な解像度を持った特徴量あるいは表現としてデザインされていると考えられる(図2a)[Noshita and Guo (in prep.)]。こうした群落概形の形態測定学的解析はダイズ以外の植物種へも適用可能である[Fukano et al. 2018]。

## 研究テーマ C 「草姿・草型の大規模かつ詳細な経時的フェノタイピングシステムの構築」

提案したモデルを利用し、草姿・草型の大規模かつ詳細な経時的フェノタイピングシステムを目指した。近年普及しつつある無人航空機(UAV)によるリモートセンシングは高頻度に実行でき、得られる3次元的な標高データや点群データは広範囲をカバーする。しかし、現状ではその空間解像度は作物の器官レベルでの観察には不十分であり、外側の葉に覆われた内部の構造は基本的にはモニタリングできない。

そこで、提案した多変量確率分布による群落構造の記述モデルを利用し、UAV モニタリングにより得られるオルソモザイク画像とDEM 画像からの分布推定をおこない、それに基づいて仮想的な群落構造を合理的に再構築することとした。本研究では、仮想的に生成した3種類の異なる群落構造を用意しDEM 画像からの品種推定と品種に紐づく確率分布からの仮想群落の生成をおこなった。現在はオルソモザイク画像とDEM の両方から確率分布を推定し、局所的なDEM に基づき仮想的な群落構造を再構築する方法の検討を進めている。

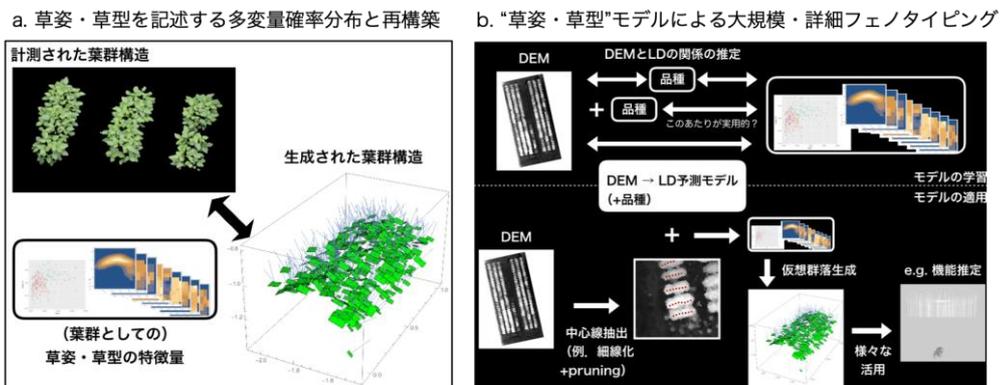


図2. 草姿・草型を記述するモデルとその植物フェノタイピングへの応用

### 3. 今後の展開

本研究では、草姿・草型を葉群としてその特徴や空間分布を多変量確率分布として記述するモデルの提案をおこなうことができた。一方で、主張な構成要素である分枝の構造は無視している。植物の発生プロセスと機能的要請を考慮すれば、葉群の空間分布と分枝パターンは互いに影響し合うはずであり、それをある種の構造的制約や事前情報として活用できると考えられる。再構築可能な程度の具体性と定量性を持った分枝パターンの記述モデルの構築と両モデルの相互依存的な関係を表す体系の整備を進めていきたい。また、形態測定学的な観点からは、本研究により提案したモデルは相同性が非自明な対象間における比較を可能にするためのフレームワークと位置づけられる。この考えをより一層進め、剛体的性質である形態や形状の記述と接続関係の定量表現としてのパーシステントホモロジーやディープストラクチャーの中間に位置する一般的な「かたち」の表現と比較を可能とするフレームワークの構築と従来の形態空間の概念を拡張していく。これは、イネやコムギなどの葉の空間分布としての記載が難しい作物種や花や葉球などの複数器官の複合体の定量化を可能にする上で必須であり、量的遺伝学的解析やゲノム育種を実施するためにも今後重要な技術となると考えられる。

本研究で開発したシステムや提案したモデル・理論は草姿・草型の定量化とその効率化をすすめることが示されたが、圃場で得られた実データでの直接的な検証までは至っていない。今後は、ダイズ群落の受光態勢の定量的評価とその草姿・草型との関係性の解明が次の課題となる。こうした検証を深めることで、特定環境における「理想的な草姿・草型」を推定、提示できるという仮説を実証する。例えば、地域依存的に最適な栽培管理方法が異なることが環境依存的なものであるのか、あるいは初期に成功した手法が偶然性を伴い継承されているのか、を明らかにすると思われる。本研究の要素技術・理論を踏まえ、客観的な最適栽培管理方法のデザインする方向性への展開も期待される。

### 4. 自己評価

本研究課題は、地上での詳細な器官や個体レベルでの計測・モデル化により、上空からの大規模・高頻度のモニタリングを補完することで、草姿・草型の超解像技術を確立し広範囲・高精度・高頻度の定量化と機能性評価を可能にするシステムを構築する試みである。そのための要素技術・理論として、野外植物フェノタイピングにおける3次元点群データの収集、点群データから表現型情報を推定するパイプラインの開発、表現型情報を集約する草姿・草型の定量的表現モデル・理論の提案、大規模かつ詳細な経時的フェノタイピングシステムを実現する提案モデルの利用法、の開発と部分的な統合をすすめることができたと考えている。特に、草姿・草型という抽象度の高い概念を特定の軸を基準として集約し多変量確率分布として切り取ることで定量的に捉えるモデル・理論を提案できた点は、今後植物一般で問題となってくる相同性が自明ではない対象間の形態比較、表現型空間の把握と非線形性の緩和を考える上で重要な一歩であったと思っている。

作物生産の現場における具体的な課題への応用については掲げた目標に対して十分な取り組みができなかった点が反省点として残る。期間中に取り組んだ JST SciFos 活動でも明らかとなったが、システム化・サービス化に向けての要素技術開発では植物の3次元形態情報という抽象的な情報ではなく、そこから意義ある情報を具体的に抽出することが要求される。3次元形態に基づき推定される機能のみならず遺伝、生理、環境との相互作用などを組み込

んだより包括的な植物フェノタイピング技術・理論の開発と社会実装については今後の課題としたい。

## 5. 主な研究成果リスト

### (1) 論文(原著論文)発表

1. Reynolds D., Baret F., Welcker C., Bostrom A., Ball J., Cellini F., Lorence A., Chawade A., Khafif M., Noshita K., Mueller-Linow M., Zhou J., Tardieu F. What is cost-efficient phenotyping? Optimizing costs for different scenarios. *Plant Science*. 2018, 282, pp. 14–22.
2. Fukano, Y., Guo, W. Noshita, K., Hashida, H. and Kamikawa, S. Genotype-aggregated planting improves yield in Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus*) due to self/non-self discrimination. *Evolutionary Applications*. 2018, 12(3), pp. 508–518.
3. Sakamoto, L., Kajiya-Kanegae, H., Noshita, K., Takanashi, H., Kobayashi, M., Kudo, T., Yano, K., Tokunaga, T., Tsutsumi, N., Iwata, H. Comparison of shape quantification methods for genomic prediction, and genome-wide association study of sorghum seed morphology. *PLoS ONE*. 2019, 14(11), e0224695.

### (2) 特許出願

研究期間累積件数: 0件(公開前の出願件名については件数のみ記載)

### (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)

- Noshita, K., Guo, W., Kaga A. and Iwata, H. Monitoring of soybean growth in early stage based on 3D plant analysis. 1st Asia-Pacific Plant Phenotyping Conference. Beijing, China. Oct. 20, 2016.
- Noshita, K., Guo, W., Kaga A. and Iwata, H. An image processing pipeline for acquiring 3D morphological information from “noisy” point cloud data. 2017 CIGR World Workshop in Matsuyama: OS 1 Precision measurement and modeling of dynamical plant information. Ehime Univ. 2017/9/3.
- Noshita, K. and Guo, W. Model-based morphometrics for plant phenotyping. SMB-JSMB 2018. University of Sydney, Sydney, Australia. 2018/07/09.
- Noshita, K., Guo, W. Outline-based morphometrics and geometric analysis for leaf shapes in a three-dimensional space. IPPS2019. Nanjing, China. 2019/10/24.
- 野下 浩司 野外における作物個体・個体群3次元再構築. 新スマート農業 進化する農業情報利用(農業情報学会(編))(2019) pp. 農林統計出版.