

研究終了報告書

「(研究課題名)」マルチモーダル・マルチテンポラル個葉スケール空撮画像のテンソル分解による作物の活性度推定法の開発

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：宇都 有昭

1. 研究のねらい

一般に作物の生産性と品質は、生長時の葉群落の受光量と光の利用効率に依存する。そして、葉群落の受光量と光の利用効率は群落内の葉の量(LAI)と葉の配置によって決定づけられる。例えば、大豆の葉は、太陽光の角度に応じて茎に対する葉の角度(葉角度)を変化させ、光合成効率を高める(調位運動と呼ばれる)。すなわち、下層の葉まで光がよく届くように、上層の葉の角度が太陽光と並行になるよう変化させている。したがって、生産性に優れた品種の育種において、適切な群落構造と環境変化への適応性を持つ品種の選別が重要であり、LAIと葉の配置を正確に計測する技術が求められる。特に、葉の配置の計測には、葉の数の計測や形状、葉角度などの評価が含まれるため、個葉スケールの映像処理技術が必要である。また、葉の数は成長段階、開花時期、収量、健康状態などにも関連することから、育種だけでなく生産の場においても重要な情報となる。

近年の計測・映像処理技術の発達により、実験室栽培作物の近接計測の自動化、高精度化が実現し、品種改良に利用されてきた。しかしながら、室内栽培環境と露地栽培環境の違いにより、実験室レベルで得られた知見に基づいて開発された機能改変植物が露地栽培で予想通りの機能を発揮しないなどの課題が生じている。したがって、目的とする群落構造を露地栽培で発現させるためには、露地栽培の作物の群落構造を正確に計測する技術が必要である。また、露地栽培では広い栽培面積を利用できるため、多品種を同時に大量栽培することが可能であり、露地栽培作物の群落構造を正確に計測し、優れた品種を効率的に高スループットスクリーニングする技術が求められる。近年のドローン、センシング技術の発達により圃場栽培作物の空撮画像を高時間・空間解像度で取得可能となった。しかし、既存の技術(SfM、LiDARなど)では、空撮画像から個葉スケールの3次元再構築が困難である。一方、葉の陰影分布は、太陽の直達光の角度、物体表面の法線方向、カメラの視線方向の関係で決まることから、日射条件、カメラ角度、空撮画像が得られれば、画像のピクセル単位で葉の法線方向が推定できる可能性がある。本研究課題では、時系列個葉スケール空撮分光画像を用いて、テンソル/行列分解により作物の活性度としての光合成利用効率に寄与する葉角度と葉の分光特性を推定する方法を開発することを目標とする。

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、光学画像に基づくテンソル/行列分解による葉角度推定法の改良、および推定された葉角度と実測葉角度の精度検証を行った。6ヶ月の延長期間内に予定していた観測はコロナ禍が継続したため実施できなかった。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究課題では、A. 計測系の開発と整備、B. 陰影分布に基づく日照条件推定法の開発、C. 陰影分布の統計量に基づく葉角度分布推定法の開発、D. 複数の異なる分光画像センサに基づくマルチモーダル空撮画像の統合による高空間・波長分解能画像生成法の開発、およびE. テンソル/行列分解により葉角度と葉分光特性推定法の開発を実施した。以下にその概要を示す。

- A. 計測系の開発と整備： 地上設置型3次元形状・分光画像・日照条件計測装置の開発、および圃場空撮のためのドローン、画像センサ(RGB、マルチスペクトル・温度カメラ、ハイパースペクトルカメラ)の整備を行った。
- B. 陰影分布に基づく日照条件推定法の開発： (i)で開発・整備した計測系を用いて、小麦圃場(帯広畜産大)にて計測された様々な天候下での小麦の個葉スケール分光画像の陰影分布および日射条件(直射光および散乱光)の時間変化に基づき、陰影分布に基づく日照条件推定法の開発を実施した。
- C. 陰影分布の統計量に基づく葉角度分布推定法の開発：(i)で開発・整備した計測系を用いて、小麦圃場(帯広畜産大)にて計測されたケイ酸肥料施肥の有無で葉角度分布を制御された水稻の3次元形状と葉スケール分光画像を計測し、陰影分布の統計量と葉角度分布の関係性について調査した。
- D. 複数の異なる分光画像センサに基づくマルチモーダル空撮画像の統合による高空間・波長分解能画像生成法の開発：マルチスペクトル画像とパンクロマティック画像の複合により、高空間・波長解像度、空間フィルタ、スペクトル応答分布を同時に推定する方法を開発した。
- E. テンソル/行列分解により葉角度と葉分光特性推定法の開発： 圃場の個葉スケール空撮分光画像に適用可能な、葉角度と葉分光特性推定法の開発を実施した。

(2) 詳細

研究テーマ A 「個葉スケール空撮分光画像に基づく葉角度と葉分光特性推定のための計測系の開発と整備」

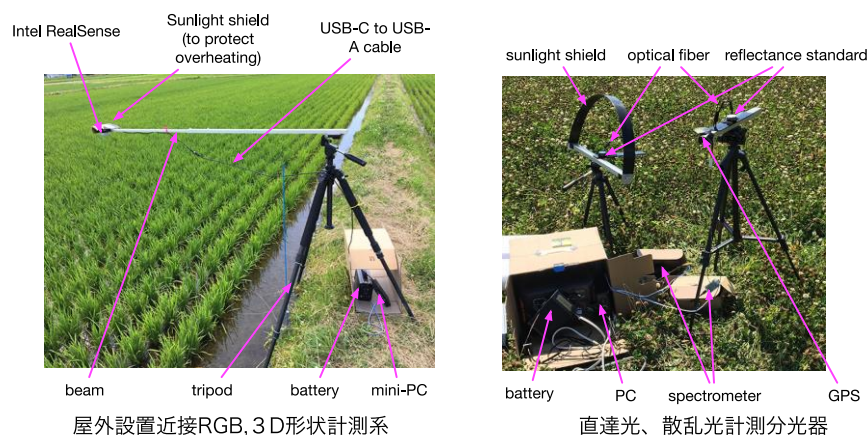


図1 (i) RGB 画像計測装置、(ii)ステレオ視とIRパターン照射に基づく作物表面の3次元計測

装置、(iii)日射条件(直射光および散乱光)の時間変化を計測する分光器,を有する地上設置型の作物計測装置

本研究課題で開発を目指す手法の精度検証のためには、正確な分光画像の取得、日射条件の取得、法線ベクトル分布のグラントゥールズの計測が必要である。本研究テーマでは、(i) RGB 画像計測装置、(ii)ステレオ視と IR パターン照射に基づく作物表面の3次元計測装置、(iii)日射条件(直射光および散乱光)の時間変化を計測する分光器,を有する地上設置型の作物計測装置を開発した(図1)。また、正確な分光画像の取得のため近接ハイパースペクトル計測装置を整備した。さらに、空撮分光画像取得のための、ドローン、RGB カメラ、マルチ/ハイパースペクトルカメラの整備を実施した。

研究テーマ C で示すように、作物表面の3次元計測装置が、屋外において葉角度分布の差異を判別可能であることが確認された。しかしながら、様々な作物の葉表面集合の近似曲面のモデル化のためには、さらに正確な計測が必要である。Structure from Motion や LiDAR による計測も含めた検討が必要である。

研究テーマ B 「陰影分布に基づく日照条件推定法の開発」

本研究課題の最終目的である個葉スケールの葉角度推定(研究テーマ E)では、葉表面の反射を評価することから、詳細な日照条件(直達光成分と散乱光成分)が必要である。で構成される光合成有効放射のうち、散乱光成分は群落により深く浸透することから群落の光合成において重要な役割を果たしている。作物の個葉スケール空撮画像の葉表面の陰影分布は、日照条件、群落構造、葉の分光特性などの情報を含む。本論文では、個葉スケール空撮画像の統計量、全天放射と散乱光の比(SDF)、太陽高度(SZA)の関係を調査した。高次統計量(HOS)は露地栽培の小麦の近接画像、SDF は地上設置の分光器、SZA は計測地点と計測時刻から算出された。

研究テーマ C 「陰影分布の統計量に基づく葉角度分布推定法の開発」

本研究課題の最終目的である個葉スケールの葉角度推定(研究テーマ E)では、葉のセグメンテーションが必須である。高い植栽密度で栽培される圃場の作物の葉は稠密に分布し、隠蔽も多いことから、セグメンテーション自体が非常にチャレンジングな課題である。本研究テーマでは、群落スケールの統計量を評価することで、葉のセグメンテーションを必要としない群落構造の推定を実施した。

ケイ酸を水稻に施肥することで、水稻の受光体勢が改善するという報告がある。山形大学農学部農場(鶴岡)の3カ所の水稻圃場において、3[m]× 3[m]の領域にケイ酸を施肥し、受光体勢を変化させた。用意した3圃場において、1圃場あたり2カ所(ケイ酸施肥領域と非施肥領域)で、RGB-D 画像を1分毎に計測し、日射条件の変化による陰影の変動と3D 形状の変動の計測を実施した。ケイ酸施肥の有無により葉角度分布に有意な差があることを確認した。葉の陰影分布の統計量に基づき、葉角度分布を推定する方法について検討した。

水稻の葉は半楕円球の一部に類似していることから、様々な方向に展開する各株の葉表面集合は半楕円球で近似できると仮定した。半楕円球は $x^2+y^2+z^2/c^2=0$ で定義され、 c が大きいほ

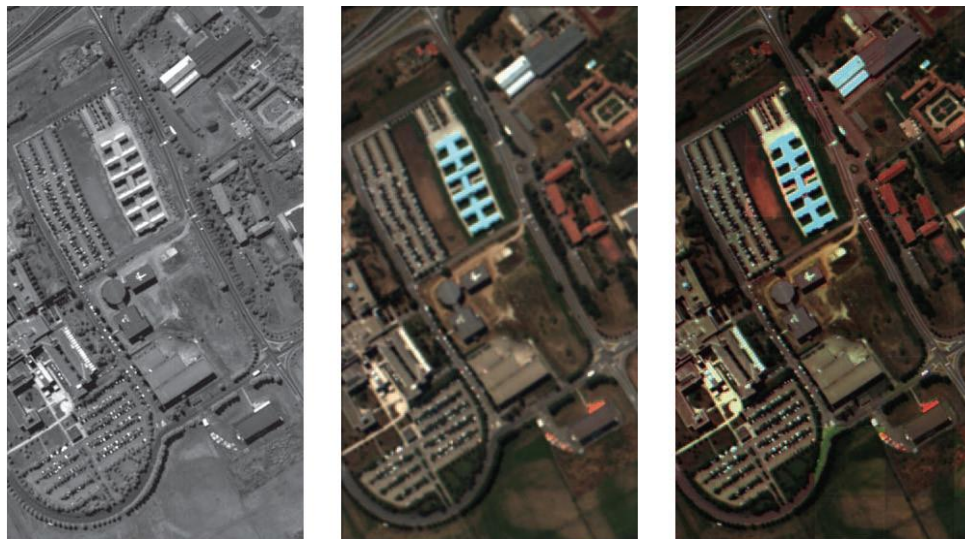
ど、大きな葉勾配を持つ分布となる。ここでは、実際の葉の陰影分布と、葉計測時と同様の直達光が照射された半楕円球のCG陰影分布を比較することで、適当な構造パラメータ c の推定ができると考えた。実画像とCG画像の陰影の頻度分布の高次統計量および最頻輝度の時間変化を観察することで、kurtosis と最頻輝度値を評価することで、ケイ酸施肥領域と非施肥領域の判別が可能であることが分かった。

今回、作物の群落構造を単純な半楕円体で近似可能であるという仮定と、観察結果に矛盾は見られなかったが、より高精度の葉角度分布の判別、さらには群落構造パラメータの推定のためには、群落構造をより正確に記述するモデルの調査が必要である。

研究テーマ D 「複数の異なる分光画像センサに基づくマルチモーダル空撮画像の統合による高空間・波長分解能画像生成法の開発」

UAV 搭載用に開発されたセンシング機器にはそれぞれ特徴(RGB センサの高空間分解能、ハイパースペクトル(HS)センサの高波長分解能等)があるため、これら複数センサ(モダリティ)で計測されたマルチモーダルデータの相補的な利用(データ複合)が求められる。本研究テーマでは、マルチスペクトル画像(高波長・低空間分解能)とパンクロマティック画像(低波長・高空間分解能)をテンソル分解の枠組みで統合し、高波長・高空間分解能画像を生成する技術の検討を実施した。図2に衛星画像に基づく予備実験の結果を示す。

本手法を個葉スケール画像に適用する場合、風などによる葉の揺れや日照条件の変化の影響を考慮すると、マルチモーダル空撮画像は同期して取得する必要がある。今後は、同一プラットフォームへの複数センサの搭載、分散協調ドローンによる同期撮影などの検討が求められる。



パンクロマティック画像

マルチスペクトル画像

合成画像

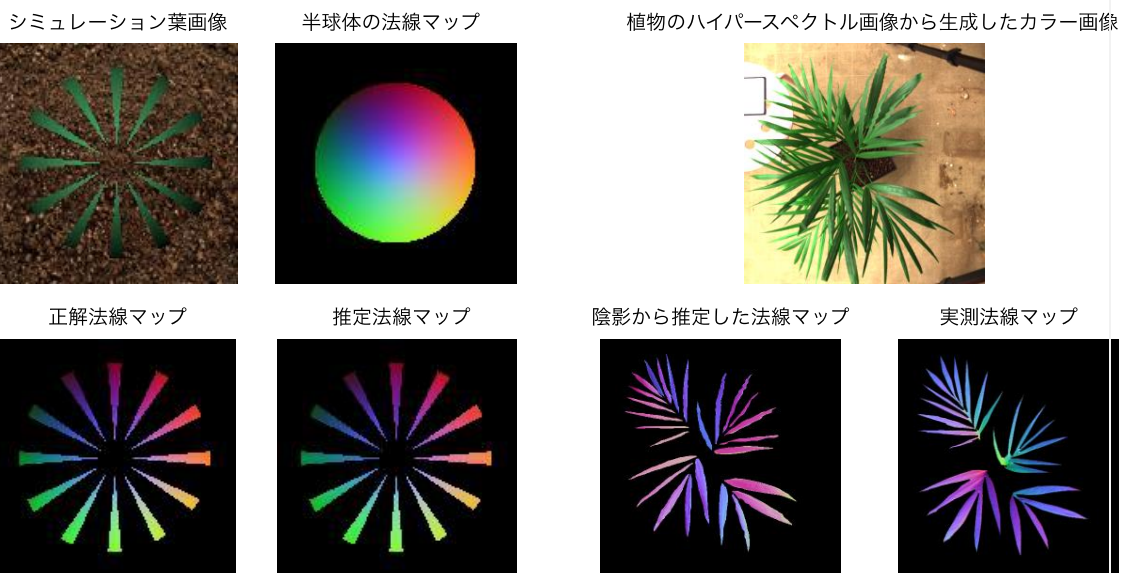
図2 パンクロマティック画像、マルチスペクトル画像生成した高空間・波長分解能合成画像

研究テーマ E 「テンソル/行列分解により葉角度と葉分光特性推定法の開発」

物体表面の拡散反射は、物体表面の法線方向と分光特性(反射率)、物体表面の直達光強度と入射角度の積で定義される。したがって、適切な行列分解により、法線方向、反射率、直達光強度および入射角度を推定できる可能性がある。本研究課題では、本テンソル/行列分解の不適切性を、(1)葉の法線方向の空間的連続性、(2)葉の法線方向のz方向の非負性、(3)葉の法線方向の低ランク性、(4)鏡面反射領域の補間、を交互方向乗数法の正則化項として利用することで、時系列個葉スケールシミュレーション画像に基づき、葉表面の法線方向と反射率を正確に推定できることを示した。また、(5)葉表面の反射率を既知とすることで、1枚の画像から、葉表面の法線方向と反射率を正確に推定できることを示した(図3)。

葉の可視光の反射率は土壌の窒素量などの空間的不均一性などにより一定とならないが、近赤外帯域は葉構造のみに依存するため土壌の影響を受けにくい。葉表面の反射率を既知とすることは有効であると考えている。

一方、上記の(3)の制約条件評価のためには、葉のセグメンテーションが必要である。テーマCで示したように、葉のセグメンテーション自体が非常にチャレンジングな課題であるが、農作物モニタリングのためには必要な技術であると考えており、今後の主たる研究課題として位置付けている。



(a) シミュレーション画像への適用例

(b) 実際の植物の画像への適用例

(注：表層の26枚のみ表示。曇天時計測。ハイパースペクトル画像計測と実測3D構造の計測時刻に差異あり)

図3 1枚の作物の画像から葉法線方向を推定した結果。(a) 葉の陰影画像(シミュレーション画像)から葉の法線方向を推定した結果。(b) 実際の植物のカラー画像に基づく葉の推定法線マップと実測法線マップ。半球体の法線マップでは、手前に膨らんでいる半球の各点の法線方向を色で表す。例えば赤色は右上手前方向、緑色は左下手前方向、中心の水色は垂直方向を示す。

3. 今後の展開

2020年度および2021年度前期はコロナ禍により、屋外での計測実施できなかったが、テンソル/行列分解により葉角度と葉分光特性推定法の開発に集中することで、陰影分布に基づく葉角度

推定法の実用化のための障害となっていた問題のいくつかを解決することができた。実測データに基づく開発した手法の精度検証が完了次第、論文を投稿する。また、本手法の実用化のために、さまざまな葉形状の作物へ適用可能な正則化の開発、および葉のセグメンテーション手法の開発を実施する。東工大の「最先端量子科学に基づく超スマート社会エンジニアリング教育プログラム」で構築されるスマート農業フィールドにおいて、2022年より大豆の栽培を開始予定である。このフィールドを実験圃場として、引き続き作物の群落構造計測法の開発を進める予定である。今後1年間のタイムラインを以下に示す。

～2021年12月：論文投稿(ハイパーパラメータ最適化、実データへの適用)

～2022年3月：開発したテンソル/行列分解による葉角度推定の正則化は稲や小麦など線形の葉形状のみに対応しているため、大豆などの葉形状へ適用可能な正則化について検討する

～2022年9月：本手法のための葉群落の葉のセグメンテーション技術の検討

2022年4月～：観測(東工大農業フィールドなど)

4. 自己評価

【研究目的の達成状況】

個葉スケール空撮分光画像の陰影分布から葉角度を推定するための技術の開発として、当初目標としていたテンソル/行列分解の正則化は実現できたと考えている。研究初期は、照度差ステレオの方法を利用することで、容易に葉の法線方向が推定可能であると予想していた。その後、実用化のためには、様々な制約を追加する必要があることが判明したが、最終年度の前半にこの問題を解決することができた。本解析の評価は、2021年度に実施する圃場計測で得られるデータを利用する予定である。

一方、本方式の正則化のためには、葉のセグメンテーションが必要であることが分かった。高い植栽密度で栽培される露地作物の葉群落は、葉が稠密に分布し、隠蔽も多数発生することから、非常にチャレンジングな問題である。今後、この問題を重要な課題の一つとして取り組んでいく予定である。

本研究課題では、当初作物の活性度の評価も目的の一つとしていた。研究開始時の作物の活性度に関する定義が明確でなかったことから、作物の光合成効率に関連する群落内の光環境に寄与する群落上層の葉角度分布の評価が活性度と同義であると考えた。この仮説の評価のためには、実際の群落の葉角度の推定と計測、および光合成効率の計測が必要である。2022年度に実施する圃場計測では、光合成効率の計測も実施する予定である。

【研究の進め方】

私が専門とするリモートセンシングの分野では、個葉スケールの解析を行っている研究はなく、本研究課題は前例のない高精度計測を実現するものであると考えていた。しかしながら、本研究領域のターゲットとするフェノタイピングでは、作物の形質を詳細に記述することが目的としていることを、最初の領域会議で知ることとなり、当初は研究の方向性、および本研究が社会へ寄与する意味について戸惑う部分があった。まず、フェノタイプおよびフェノタイピングに関する情報収集から始め、フェノタイピングが目指すものが、リモートセンシングで対象とする生産者のため

の情報というより、育種に役立つ情報であることを学んだ。そして、私の研究課題で目的とする葉角度分布の推定は、まさに育種に役立つ可能性がある技術であると理解した。

研究は、まず計測機器の開発および現地計測から始めた。ハイパースペクトルセンサの開発およびその運用に経験があったため、特に分光計測においては、適切な開発と計測ができたと考えている。しかしながら作物の3D構造の計測では、検証のための十分な精度が得られたと言えない。一つの理由としては、開発した装置の評価のための実験室を確保できなかったことが挙げられる。2022年度以降は、東工大に農業フィールドを確保できるため、屋外観測の前には十分な精度検証を実施する予定である。

本研究課題の主たる目的であるテンソル/行列分解の正則化では、当初、テンソル分解のライブラリを利用して正則化を実施する予定であった。しかしながら、本研究で必要とされる複雑な正則化に対応したライブラリは存在しないことが判明した。その後、最も適切な最適化法の調査に時間をかけすぎてしまったため、開発が大幅に遅れてしまったことは反省点である。幸か不幸か、COVID-19の影響で2020年は解析法の開発に集中できたため、目標としていたテンソル/行列分解の正則化の開発は達成できたと考えている。

【研究成果の科学技術及び社会・経済への波及効】

空撮では群落の上層のみ計測可能であり、近接計測による従来のフェノタイピングの精度と比較することはできない。しかしながら、明らかに従来のリモートセンシングよりは精度が高く、今後は圃場の高スループットスクリーニングのための技術として重要な技術となる可能性がある。これまで、空撮映像から個葉スケールで作物の形質を計測する技術基盤が存在しなかったと私は考えている。これまで、空撮画像から個葉の数や、形状、葉角度を計測することができるとは考えられてこなかった。今、深層学習と高性能計算など、空撮画像に大量に含まれる個葉を解析するための要素技術は揃った。今後私は、空撮映像に基づく個葉スケール作物画像解析を重要な研究課題として取り組んでいきたい。また、稠密に分布し、隠蔽も多数発生する葉群落から葉の数を計量できる技術が実現した場合、災害における避難時の群衆の動き解析など、大量かつ多様な物体を対象とした動画からの情報抽出に応用が可能であり、農業の枠を超えた幅広い波及効果が期待できる。

ドローン技術が普遍化した中で、フェノタイピングにおける空撮技術の重要性はますます大きくなることが予想されるが、リモートセンシング側の研究者として感じることは、リモートセンシングとフェノタイピングの間にはまだ埋めるべき距離があるということである。先日、IEEEのリモートセンシングの学会(オンライン)に参加した際も、農業関連の研究は高高度計測(衛星、航空機)によるものであり、本領域の目指す精度を扱う研究はなく、積極的なフェノタイピング研究者の参加が必要であると感じた。一方、フェノタイピングのための空撮技術においても、大気補正やシミュレーションのための大気3D放射伝達モデルなど、リモートセンシングで発達してきた技術を取り入れることで、精度の改善が望まれる部分も多く、リモートセンシングのコミュニティの積極的なフェノタイピングコミュニティへの参加が望まれる。リモートセンシング分光に関する知識と、農作物に関する知識が要求される本研究課題で開発した手法を社会実装できるレベルまで成熟されるためには、リモートセンシングコミュニティとフェノタイピングコミュニティの有機的な協働が不可欠である。本研究課題を出発点として、リモートセンシングとフェノタイピングの交流が活発化することを期待している。幸い、私は、この3年で、フェノタイピングについて学ぶことができた。今後は、

リモートセンシングとフェノタイピングの架け橋としての役割も担っていきたい。

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数:15件

1. Kuniaki Uto, Mauro Dalla Mura, Yuka Sasaki, Koichi Shinoda. Estimation of leaf angle distribution based on statistical properties of leaf shading distribution. Proc. IGARSS2020, 2020, 4 pages.

作物の葉角度分布は、群落の光合成効率を評価する上で、重要な特徴である。近年のドローン、センシング技術の発達により、個葉スケール空撮画像が取得可能となった。本論文では、空撮画像中の葉表面の陰影分布を評価することで、異なる葉角度分布を持つ水稻の判別を行った。葉群落の葉表面集合を構造パラメータで変形可能な半楕円球で近似して得られる様々な太陽高度での合成画像の陰影分布の高次統計量と、実際に計測された画像の陰影分布の高次統計量を比較することで、ケイ酸肥料施肥の有無により葉角度分布の制御を行った水稻の判別が可能であることが確認された。

1. Kuniaki Uto, Mauro Dalla Mura, Jocelyn Chanussot, Koichi Shinoda. Estimation of Diffuse Component of Global Radiation Based on Leaf-Scale Crop Images. Proc. IGARSS, 2019, pp.6263-6266, doi: 10.1109/IGARSS.2019.8898222

直達光成分と散乱光成分で構成される光合成有効放射のうち、散乱光成分は群落により深く浸透することから群落の光合成において重要な役割を果たしている。作物の個葉スケール空撮画像の葉表面の陰影分布は、日照条件、群落構造、葉の分光特性などの情報を含む。本論文では、個葉スケール空撮画像の統計量、全天放射と散乱光の比(SDF)、太陽高度(SZA)の関係を調査した。高次統計量(HOS)は露地栽培の小麦の近接画像、SDF は地上設置の分光器、SZA は計測地点と計測時刻から算出された。

3. Kuniaki Uto, Mauro Dalla Mura, Jocelyn Chanussot. Spatial resolution enhancement of optical images based on tensor decomposition. Proc. IGARSS2018, pp. 8058-8061, doi: 10.1109/IGARSS.2018.8518769

光学リモートセンシング画像の、空間解像度と波長分解能にはトレードオフが存在し、これまでマルチモーダル画像の複合により、高空間・波長解像度を生成する様々な方法が開発されてきたが、高空間・波長解像度、空間フィルタ、スペクトル応答分布を同時に推定する方法は提案されていなかった。本論文では、テンソル分解の枠組みで、マルチスペクトル画像とパンクロマティック画像の複合により、高空間・波長解像度、空間フィルタ、スペクトル応答分布を同時に推定する方法を開発した。

(2)特許出願

研究期間累積件数: 1件(特許公開前のもも含む)

1	発 明 者	宇都 有昭
	発 明 の 名 称	光学画像装置の計測対象表面の傾斜推定法、および作物の光合成効率を推定する方法
	出 願 人	東京工業大学
	出 願 日	2019/09/20
	出 願 番 号	特願 2019-171806
	概 要	本発明は、光学画像装置で計測される直達光による対象表面の陰影分布から計測対象表面の分光特性・傾斜分布を取得する機能を有する。本技術は、安価な光学画像センサで同一視点から取得される時系列画像中の陰影分布および時間変化を用いて観測対象表面の分光特性、勾配、直達光の角度情報を推定することが可能である。

(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)

1. K. Uto, M. Dalla Mura, and J. Chanussot. Normal direction and true color estimation of leaves based on tensor decomposition of leaf-scale optical images. Proc. 9th Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing, September 23-26 2018, Amsterdam, Netherlands.
2. K. Uto, M. Dalla Mura, J. Chanussot. Estimation of skylight conditions based on leaf-scale wheat images. Proc. Images et data : méthodes d'analyse et modélisation pour l'agriculture numérique, GdR ISIS, March 14 2018, Ivry-sur-Seine, France
3. 宇都 有昭, ダラ ムラ マウロ, シャヌソ ジョセリン, 篠田 浩一, 個葉スケール作物画像からの特徴抽出に関する検討. 研究報告コンピュータビジョンとイメージメディア, vol. 2019-CVIM-217, no. 38, 2019, 2019年5月31日(日本, 東京)
4. Kuniaki Uto, Mauro Dalla Mura, Jocelyn Chanussot, Koichi Shinoda, Estimation of Leaf Color and Angle based on UAV-Captured Leaf-Scale Images for Indicator of Plant Growth, 7th International Workshop on Image Analysis Methods for the Plant Sciences (France, Lyon)
5. Josselin Aval, Xavier Briottet, Sophie Fabre, Pierre-Yves Foucher, Véronique Carrère, Rodolphe Marion, Kuniaki Uto, Christiane Weber, Mauro Dalla Mura, Chapter 3.2 - Applications in remote sensing—anthropogenic activities, Data Handling in Science and Technology, Vol. 32, pp. 411-452, 2020