

UAV-LiDAR 計測におけるレーザスポットサイズの影響を考慮した 水稻生育モニタリング手法の検討

防災・復興システム工学研究室 磯野 柊二

1. はじめに

農業分野の担い手減少と高齢化が深刻化している中、生産性の低下に対処するため、ICT や AI、ロボット技術を活用するスマート農業が推進されている。中でも、衛星画像やマルチスペクトルカメラ搭載の UAV などを用いた、リモートセンシング技術による水稻生育モニタリング手法の開発が研究されている。

著者らはこれまで、LiDAR システムを活用し、水田直上からレーザ計測された水稻群落点群の鉛直分布（以下、点群鉛直分布）を解析することで、水稻の生育情報（草丈・茎数）を推定する手法の開発を進めている。しかし、点群鉛直分布は群落茎葉が同一であっても、使用機器や観測条件（飛行高度やレーザ入射角、レーザ光の発散角など）によって変化する。観測条件の中でも、UAV の飛行高度やレーザ光の入射角・発散角は、水稻群落へ入射するレーザ光のスポットサイズの変化として表現される。そのため、レーザスポットサイズによる点群鉛直分布への影響を検討することで、これらの観測条件と点群鉛直分布の関連性を検証できると考える。

既往研究では、異なる LiDAR 機器や飛行高度など、特定の観測条件下（主にレーザスポットサイズ）における点群鉛直分布の変化を検討してきたが、この関連性を網羅的に検討することは困難である。そこで、特定の観測条件下における点群鉛直分布を推定するシミュレーションモデルを活用することで、特定の観測条件と点群鉛直分布の関係を、省力的に検討することが可能となる。柳沼ら¹⁾は、レーザが群落へ鉛直に入射する条件下において、群落茎葉と植被率が所与のもと、レーザスポットサイズの効果を表現した点群鉛直分布（以下、推定点群鉛直分布）を推定するシミュレ

ーションモデルを試作し、その有用性を検討した。しかし、この検討は 2022 年度の 1 シーズンのみ、各計測日で 1 つの比較領域のみ、1 つの群落茎葉の鉛直構造のみの検討であることに加え、モデルを用いた試行回数が少なく（20 条件程度）、検討結果に再現性があるとは言い切れない。この試作モデルを活用するためには、より多くのデータを用いて、より多くの試行を実施し、再現性を確保したうえでのモデルの有用性を検討する必要がある。

本研究では、レーザスポットサイズの効果を表現した点群鉛直分布を推定するシミュレーションモデルを用いて、レーザスポットサイズと点群鉛直分布の関係を検討することを目的として、2 つの検討を行う。まず、2022 年度、2023 年度の観測データ（指標田を対象）を用いて、比較領域と群落茎葉の鉛直構造を複数設定し、出力結果の再現性が確保されるまでモデルを試行することで、圃場内の生育のバラつきを考慮したモデルの有用性（再現性）の検討を行う。また、2024 年度の観測データ（指標田ではない通常の圃場）を用いて、2022 年度と 2023 年度と同じ条件下で同様の再現性が得られるか検討し、異なる圃場におけるモデルの汎用性を検討する。

2. 方法

2.1 点群鉛直分布推定モデル

本モデルは、研究室で開発したものである。レーザが群落に鉛直入射（入射角 $\pm 4^\circ$ 以下）する条件のもと、群落を 1 次元多層モデルで表現する。その際、各層の Leaf Area Density（単位体積当たりの葉面積密度：以下、LAD）と植被率に比例して、レーザ反射の発生確率を判断する。

モデル内では、レーザ発散角が非常に小さい仮

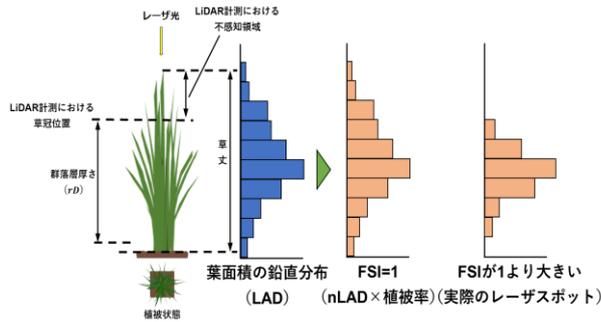


図-1 シミュレーションモデルのイメージ図

想 LiDAR のレーザスポット (Pure Spot : 以下, PS) を定義し, 現実世界でのレーザスポットは複数の PS から構成される混合スポット (Mixture Spot : 以下, MS) としている. PS はレーザが単一の物体で占有された状態となる微細なスポットであり, PS の分布は設定する LAD と比例する. 1 つの MS を 1 つの PS で構成する場合を FSI=1 (FSI : Footprint Size Index) と定義し, この時すべての MS は PS となり, 得られる推定点群鉛直分布は「正規化した LAD×植被率」に一致する. FSI の値を変動させることで, 実際のレーザスポットの大小を表現した推定点群鉛直分布を出力する (図-1). また, 実際の UAV-LiDAR 計測において, LAD と同様の分布を取得することは困難であるため, FSI=1 を超える値によって実際のレーザスポット効果を表現することが現実的である.

シミュレーションでは, 鉛直領域 (入射角±4°以下) に入射する PS の個数を M とし, 各植生層の高さを 10cm とした次元鉛直多層モデルで群落を表現する. レーザ光の反射の有無は PS で判断し, 植生層全体で反射する PS の個数は, 「M×植被率」と等しい. 「M×(1-植被率)」の PS は地面へ到達し, 分布の作成に寄与しない.

MS の高さは, 1 つの MS を構成する N 個の PS のうち, 植生で反射した PS のみの高さを平均して算出する. また, N 個の PS のうち, 植生で反射した PS が閾値 (本研究では概ね 30% に設定) を超えた場合, MS は植生反射として推定点群鉛直分布を作成する (図-2).

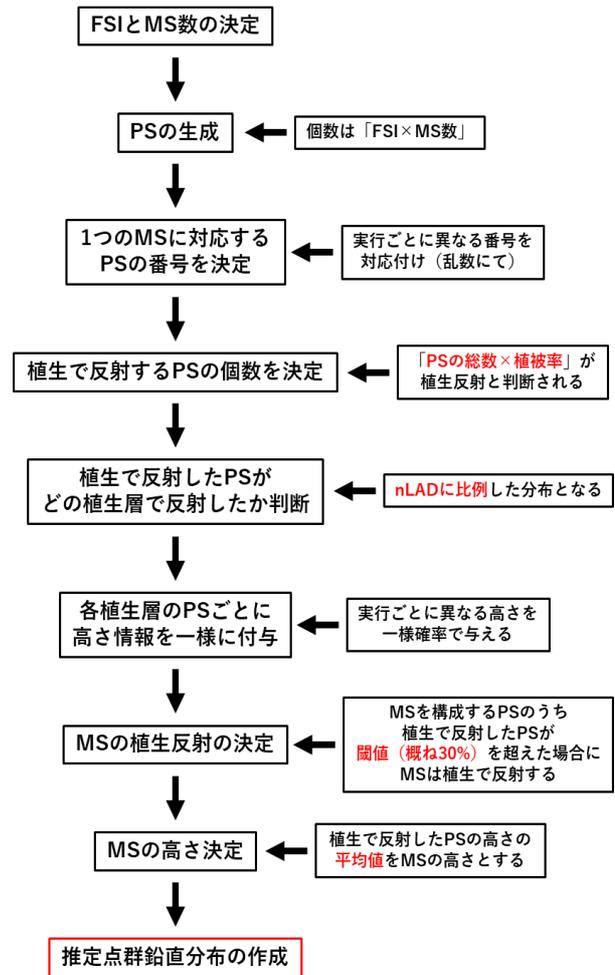


図-2 シミュレーションのワークフロー

本研究では, FSI=2~20 (刻み幅 : 1) にて推定点群鉛直分布を出力する. 使用機器や観測条件が計測年度内で同一である場合, UAV-LiDAR 計測結果から作成する点群鉛直分布 (以下, 観測点群鉛直分布) を最も再現するときの FSI は, 年度を通して同程度であることが期待される.

モデルの有用性を検討するため, 観測点群鉛直分布と推定点群鉛直分布の類似度を確認する. 類似度を示す指標は, RMSE を主指標, 相関係数 (以下, CORR) および Kullback-Leibler 情報量 (以下, KLD) を補助指標として用いる. さらに, 実行回数までの平均 RMSE を算出し, RMSE が収束 (焼き捨て期間を 30 回設定) するまでモデルを実行することで, 各 FSI における推定点群鉛直分布の平均的な再現性を確保する.

2.2 UAV-LiDAR 計測

観測点群鉛直分布の作成、植被率を算出するため、UAV-LiDAR 計測を実施する。本研究では、DJI 社製 Matrice 300RTK に LiDAR システムとして、DJI Zenmuse L1 を搭載した UAV-LiDAR を用いて計測を実施した（図-3）。

2022、2023 年度の UAV-LiDAR 計測は、「JA 越後ながおか」の指標田の一つ、新潟県長岡市宮地町地区の水田を対象とした。この圃場には、2022 年 5 月 13 日、2023 年 5 月 18 日にコシヒカリが作付され、それぞれ 2022 年 5 月 30 日から 8 月 19 日、2023 年 5 月 30 日から 8 月 18 日まで、概ね 10 日間隔で JA による生育調査が実施された。両年度の計測は、JA の生育調査日と概ね同期させ、計 6 回実施した。

2022、2023 年度と異なる圃場として、2024 年度は新潟県長岡市越路中沢地区の水田を対象に UAV-LiDAR 計測を実施した。この圃場には 2024 年 5 月 3 日にコシヒカリが作付された。計測は同年 6 月 4 日から 7 月 31 日まで、概ね 7 日間隔で計 9 回実施した。

2.3 観測点群鉛直分布の作成

UAV の飛行高度 10m、レーザ入射角が鉛直（±4°）以下の条件で取得した水稻群落の三次元点群を用いて観測点群鉛直分布を作成する。本研究では、測定日ごとに圃場内で 10 個の小領域（Area1 ~ 10、大きさ：約 2.8m×1.6m）を設定し、領域ごとに観測点群鉛直分布を作成する。

2.4 植被率の算出

UAV-LiDAR 計測時に圃場の空撮画像を撮影し、空撮画像に二値化処理を行うことで、圃場の植被率を算出した。植被率は、対象圃場内から 5 領域を選定し、それぞれの空撮画像から算出した平均値を、各測定日の植被率と決定した。

2.5 実測調査

シミュレーションへ入力する LAD を算出するため、UAV-LiDAR 計測と同期して水稻の層別刈取法（植物を地表から等間隔で刈取、層ごとに葉



図-3 UAV-LiDAR システム



図-4 層別刈取の様子

の重量と葉以外の重量を測定する方法）を実施した（図-4）。本研究では、圃場内から 4 株の水稻（稲 1~4）を採取する。採取した各株は、地表から 10cm の高さの層ごとに刈り取り、各層の葉面積と乾燥重量を測定する（面積測定は稲 1 のみ）。葉面積は、スキャン画像に二値化処理を行うことで算出した。また、4 株の乾燥重量は、学内の乾燥炉にて 120°C で 24 時間乾燥させた重量を測定した。葉面積を測定していない稲 2~4 については、稲 1 の測定面積と、乾燥重量の関係式を用いて、各株の乾燥重量から面積へ換算する。

3. 結果と考察

2022 年度、2023 年度の UAV-LiDAR 計測による取得した観測点群鉛直分布と、シミュレーションモデルにより出力される推定点群鉛直分布間の類似度を算出し、モデルの有用性を検討した。分布間の RMSE が最小値を示した時の FSI と試行回数

を、表-1 (2022年度, Area2, 稲1) と表-2 (2024年度, Area1, 稲1) に例示する。また、2022年度, Area2, 稲1での観測, 推定点群鉛直分布を図-5に例示する。

表-1より, FSI=6~9の範囲(平均: 6.83, 標準偏差 1.07)でRMSEは最小となり, 同一シーズン内で同程度のFSIにより観測点群鉛直分布を概ね再現する結果が得られた。また, 生育初期を除いた時期でRMSEが0.100(10%)を下回り, 分布間の高い類似度を示したことから, モデルに有用性があることが示唆される。

表-2より, 2024年度においても, 生育初期を除いた時期で概ねFSI=6~9の範囲でRMSEが10%を下回り, 2022, 2023年度と同様の傾向が確認された。これは, 異なる圃場においてもモデルに一定の汎用性がある可能性を示唆している。さらに, FSI=6~9の範囲で分布間の類似度が高くなることから, この範囲のFSIがL1のレーザスポットサイズを表現している可能性が示唆される。

いずれの年度でも, 生育初期ではRMSEが増加する傾向が確認された。これは, 稲株が未成熟であるため, UAV-LiDAR計測時にレーザが地面付近の点を多く取得することで, 観測点群鉛直分布における群落下層部の点群が増加した可能性が考えられる。

4. まとめ

本研究では, レーザスポットサイズの効果を表現した点群鉛直分布を推定するシミュレーションモデルを活用し, モデルの有用性及び汎用性を検討した。その結果, 生育初期を除く時期で, RMSE 10%以下となり, 観測点群鉛直分布を概ね再現できる可能性が示唆された。さらに, 異なる圃場においても同様の傾向を示し, モデルに汎用性があることが示唆される。

本研究では, 植生で反射したPSの平均値を用いてMSの高さを計算している。より群落下層部を再現した推定点群鉛直分布の出力には, 中央値や3分の1高さなどを用いて検討を行い, 適切な高さの

表-1 RMSEが最小値を示したFSIと試行回数(2022年度, 稲1, Area2)

DAT	FSI	RMSE	試行回数
27	7	0.181	119
38	7	0.099	31
48	9	0.053	102
59	6	0.050	38
69	6	0.071	97
80	6	0.054	36

表-2 RMSEが最小値を示したFSIと試行回数(2024年度, 稲1, Area1)

DAT	FSI	RMSE	実行回数
32	8	0.142	31
41	8	0.115	31
48	10	0.082	41
56	9	0.072	163
62	6	0.075	83
70	9	0.037	97
76	6	0.045	33
83	6	0.070	85

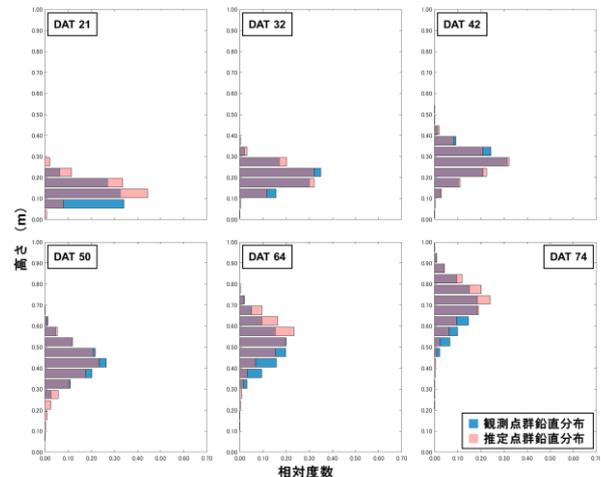


図-5 観測, 推定点群鉛直分布の比較(2022年度, 稲1, Area2)

計算方法を決定する必要があると考えられる。

【参考文献】

- 1) 柳沼 謙伸: ドローン LiDAR 計測による水稻生育モニタリングにおける観測条件の影響に関する研究, 長岡技術科学大学大学院環境社会基盤工学専攻修士論文, 2024