

# UAV 搭載 LiDAR による水稲草丈計測に関する検討

環境社会基盤工学専攻 防災・復興システム工学研究室  
山根 怜

## 1. はじめに

水稲の生育状況を把握し適切な栽培管理を行うことは、高品質なコメの安定生産のために非常に重要である。これにより水稲の生育の過不足を確認し、施肥時期の判断を行っている。水稲の草丈や茎数、葉色は、一般に手作業で計測している。この作業は多大な労力と時間を要し、圃場広域を調査対象とすることは困難である。調査結果の再現性を高めることや、より広範囲の計測を行うため、リモートセンシング技術を用いた研究が進められている。衛星による地域単位の広範囲を対象とする生育モニタリングでは、天候障害による計測頻度の低下などの問題がある。それを補完するために、UAV によるリモートセンシングが研究されている。これらのリモートセンシングで利用されるものは分光情報であることが多い。より直接的に水稲の構造を計測する技術として挙げられる能動型光学センサが、すでに土木・測量分野で広く利用されている LiDAR (Light Detection and Ranging) である。LiDAR は、自動運転技術などに利用される車載用 LiDAR の小型化、低コスト化が進んでいる。

既往研究<sup>1)</sup>にて、より広域の水稲へ LiDAR 計測による草丈推定手法を適用するためには、計測高度によるレーザフットプリント径の変化を考慮する必要がある可能性が示唆された。計測高度が上がっても、既往研究におけるレーザフットプリント径と同程度の大きさとなれば、車載用 LiDAR による計測であっても、草丈推定手法を適用できる可能性がある。

本研究では、Phan ら<sup>2)</sup>によって提案された、水田直上からの LiDAR 計測で取得した水稲群落の 3 次元(3D)点群の解析から計算される「LiDAR 計測された群落層厚さ」から草丈を推定する手法をより広範囲に適用するために、新たな LiDAR を搭載した UAV システムによる計測を行い、草丈推定手法を適用した。その結果を確認するとともに、以下の 2 項目についての検討も行った。

### 1) 「草丈推定手法の適用時期」

既往研究では移植後 1 か月前後から出穂期前までを計測期間としてきた。今回の計測では初めて、移植直後から出穂後まで計測を行った。計測期間の草丈推定に与える影響を確認し、適用時期について検討した。

### 2) 「レーザフットプリント径の大きさによる草丈推定への影響」

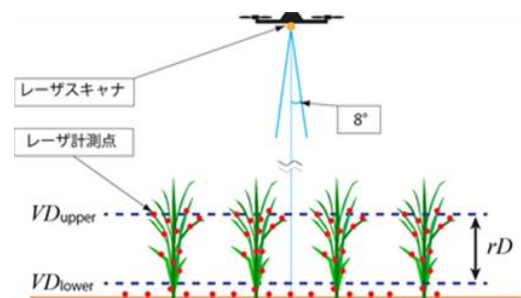
より高い高度での計測が可能になったため、同一の飛行コースを違う高度で計測することによる、レーザフットプリント径の大きさの差が草丈

推定に与える影響を検討する。

以上の項目を検討するため、UAV-LiDAR 計測を行った。

## 2. LiDAR 計測による水稲の草丈推定手法

Phan ら<sup>2)</sup>は、レーザ走査角 (群落への入射角) が  $\pm 8^\circ$  の範囲において、水稲群落の 3D 点群の鉛直分布から LiDAR 計測した群落層厚さ( $rD$ )を算出し、これと実測した草丈の関係から草丈推定式を決定している。 $rD$ は 3D 点群の鉛直分布のパーセントイル解析で決定した群落の上層部( $VD_{upper}$ )と下層部( $VD_{lower}$ )の位置の差で表される(図 1)。本研究では、既往研究<sup>1,2,3)</sup>に倣い  $VD_{upper}$  と  $VD_{lower}$  をそれぞれ 99、5 パーセントイル高さとする ( $VD_{99}$  と  $VD_{05}$ )。



## 3. UAV-LiDAR 計測実験

### 図 1 UAV-LiDAR 計測の群落層厚さ

UAV-LiDAR 計測と同期して水稲の草丈を実測する必要がある。本研究では JA 越後ながおかの指標田の一つで、UAV 計測への協力が得られた新潟県長岡市宮路町地区の水田を対象とする。この水田には 2019 年 5 月 21 日にコシヒカリが作付けされ、5 月 30 日から 8 月 20 日まで概ね 10 日間隔で生育調査が実施された。

### 3.1 UAV システムの概要

車載 LiDAR (Velodyne VLP-16) をジンバル (DJI Ronin-MX) に取り付け、産業用ドローン (DJI Matrice600, D-RTK) に搭載し UAV システムとした。LiDAR の計測範囲を機首方向に偏らせるため、LiDAR を傾けて (9 度) ジンバルに取り付けた。GNSS 信号を LiDAR へ入力することで、LiDAR データとフライトログデータの時刻同期を可能とした。

この LiDAR のレーザフットプリント径は、計測高度 10m にて  $33 \times 13$ (mm)であり、これは既往研究<sup>1,2)</sup>におけるレーザフットプリント径  $30 \times 15$ (mm)と同程度の大きさである。

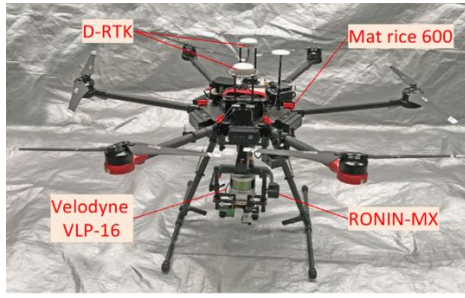


図 2 UAV システム全景

### 3.2 実験方法

飛行速度と高度は、レーザフットプリント径と位置合わせ用の反射マーカを判別できる走査頻度から 10m と 1m/s とする。また、レーザフットプリント径の大きさによる草丈推定手法への影響を検討するため、同様のコースにて高度 20m 及び 30m での計測も試みた。

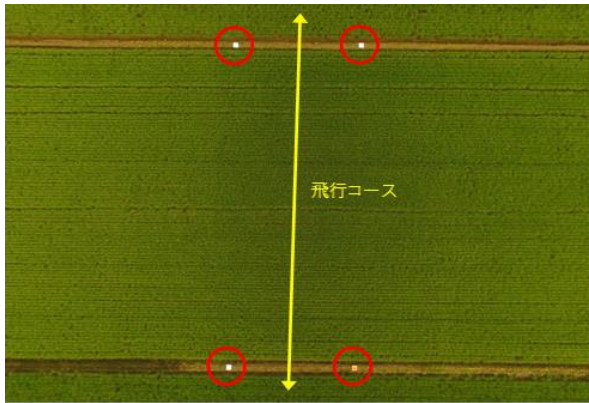


図 3 圃場空撮画像



図 4 UAV-LiDAR 計測の様子

### 3.3 3次元点群化と位置合わせ

VLP-16 は以下の式 (1) にてセンサ中央を原点としたセンサ座標を走査フレーム (走査光が一周した回数) 毎に出力する。

$$\begin{aligned} X_{vlp} &= R \sin \omega \cos \theta \\ Y_{vlp} &= R \cos \omega \sin \theta \\ Z_{vlp} &= R \sin \omega \end{aligned} \quad (1)$$

以上を以後 VLP 座標系とする。ここで、R は照射距離、 $\omega$  は走査面傾角、 $\theta$  は走査回転角である。

ジンバルにより LiDAR の姿勢は一定 (水平) に維持されるとの前提で、フライトログデータ (経緯度、対地高度、機首方向) を利用して、LiDAR 計

測点に地図座標 (日本平面直角座標, 第 8 系) を付与する。ここでは後で位置合わせを行うため、機体位置と LiDAR 器械点とのオフセット成分を考慮しない。このシステムにおいて地面に垂直入射する走査面は走査面傾角が  $9^\circ$  の走査面であるため、VLP 座標系の YZ 座標軸を  $9^\circ$  時計回りに回転する座標変換をまず行う。その後、方位角情報を利用した座標変換を行い、LiDAR 計測点の地図座標 (X, Y, Z) は以下の式 (2) にて求められる。

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin \beta & -\cos \beta \sin(-9^\circ) & \cos \beta \cos(-9^\circ) \\ \cos \beta & -\sin \beta \sin(-9^\circ) & \sin \beta \cos(-9^\circ) \\ 0 & -\cos(-9^\circ) & -\sin(-9^\circ) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_{vlp} \\ Y_{vlp} \\ Z_{vlp} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_{UAV} \\ Y_{UAV} \\ Z_{UAV} + E_0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

( $X_{uav}, Y_{uav}, Z_{uav}$ ) は機体位置の地図座標、 $\beta$  は機首方向である。また、 $E_0$  は離陸地点の標高である。

式(1)で地図座標を付与した 3D 点群に対して反射マーカ (位置が既知) を利用した精密位置合わせを実施し、解析用の 3D 点群とする。レーザ入射角  $\pm 8$  度の範囲の 3D 点群を飛行方向に分割 (4m 幅、6 区画、図 3) し、各区画の  $VD_{99}$  と  $VD_{05}$  を計算し、区画の平均値を計測日における  $VD_{99}$  と  $VD_{05}$  とする。

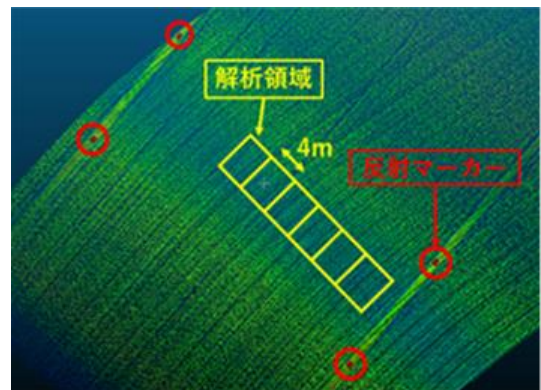


図 5 3D 点群と反射マーカ

## 4. 結果・考察

### 4.1 UAV-LiDAR 計測による水稻草丈推定

5月30日から8月21日まで合計14回計測を行った。この内、JAの生育調査と同期し、LiDAR データから時刻情報が取得できた9回分 (5月30日から8月9日) のデータを解析した。また、20m での計測は3回、30m での計測は1回行った。

以上のデータから得られた 3D 点群の鉛直分布から計測日毎の  $rD$  を算出し、草丈との対応関係を調べた。図 3 に計測高度毎の UAV-LiDAR 計測の  $rD$  と実測草丈  $H$  の関係について示す。計測高度 10m における  $rD$  の増加と草丈の増加に線形関係が確認できる。これにより、車載用 LiDAR を用いた UAV-LiD

AR 計測においてもレーザフットプリント径を考慮した計測高度を設定すれば、Phan らの草丈推定手法が適用できることが示された。

このデータから計測高度 10m における草丈推定式を求めると、

$$H = 1.67 \cdot rD \quad (3)$$

となった。この草丈推定式の誤差は RMSE 5.8cm であった。

図 3 を見ると、計測高度 10m では実測草丈が最も大きい 8 月 9 日より前の時期の  $rD$  は増加傾向にあるが、8 月 9 日で減少していることが分かる。また図 7 から、8 月 9 日において大きな推定誤差が生じていることが分かる。

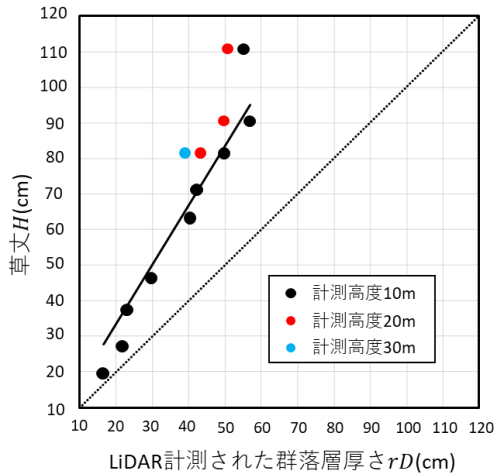


図 6 計測高度毎の群落層厚さと実測草丈の関係

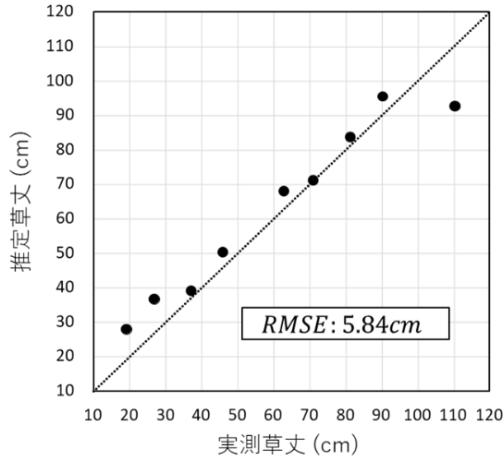


図 7 計測高度 10m の実測草丈と推定草丈の関係

#### 4.2 草丈推定手法の適用時期

既往研究における計測期間は移植 1 か月後から出穂期前までとしていた。これに則り、今回の計測データでの 5 月 30 日から 8 月 9 日までに絞った計測結果から草丈推定式を求めると、

$$H = 1.59 \cdot rD \quad (4)$$

となった。この草丈推定式の誤差は RMSE 2.4cm

となった。この結果から、草丈推定手法の適用期間は Phan らの設定した通り、出穂期前までとすることが望ましいことが分かった。

#### 4.3 レーザフットプリント径の大きさによる草丈推定への影響

高度におけるレーザフットプリント径は 10m のときと比較し、20m では面積比 4 倍、30m では面積比 9 倍となる。

UAV の GNSS 機器の不調による機体の異常動作が確認されたことから、20m と 30m での計測開始が遅れた上、30m の計測は DAT64 のみとなってしまった。

図 6 より、計測高度が上がるごとに  $rD$  が小さくなっていることが分かった。このことからレーザフットプリント径が大きくなると、 $rD$  が小さくなる可能性が示唆された。

また計測高度 20m の結果では、3 シーンに渡って増加傾向が確認できる。ここから、この UAV システムでは計測高度 20m においても草丈推定手法が適用できる可能性が示唆された。

#### 5. 結論

本研究では、移植直後から出穂期後の水稻を対象に、車載用 LiDAR を搭載した UAV システムにより計測を実施し、Phan らの提案した草丈推定手法を圃場のより広域に適用した結果、以下のことが分かった。

1. LiDAR のレーザフットプリント径を考慮した計測高度を設定すれば、Phan らの水稻草丈推定手法が適用できることが分かった。
2. 既往研究よりも長い期間の計測を行ったことで、推定誤差に影響が出た。草丈推定手法の適用期間は Phan らの設定した通り、出穂期前までとすることが望ましいことが分かった。
3. 同様のコースを異なる高度にて計測を行った結果、レーザフットプリント径が大きくなると  $rD$  が小さくなる可能性が示唆された。また、今回開発したシステムでは計測高度 20m においても草丈推定手法が適用できる可能性が示唆された。

#### 【参考文献】

- 1) 合屋 渉太：UAV-LiDAR 計測による広域の水稻草丈推定に関する基礎的研究、長岡技術科学大学大学院環境社会基盤工専攻修士論文、2019
- 2) PHAN THI ANH THU, Kazuyoshi Takahashi, Atsushi Rikimaru, Yasuhiro Higuchi: Method for estimating rice plant height without ground surface detection using laser scanner measurement, Journal of Applied Remote Sensing Vol.10 No.4, 2016
- 3) 尾高 直人：UAV-LiDAR 計測による水稻の草丈推定に関する研究、長岡技術科学大学大学院環境社会基盤工専攻修士論文 2018