近距離 LiDAR 計測による水稻草丈推定における 群落繁茂状況とレーザ入射角に関する検討

Study of Foliage Abundance and Laser Incident Angles on Rice Plant Height Estimation using a short-range LiDAR measurement

合屋 渉太*・力丸 厚**・高橋 一義**

Shota GOYA, Atsushi RIKIMARU and Kazuyoshi TAKAHASHI

Abstract: Plant height, one of the fundamental crop growth parameters, is usually collected by a direct measurement. The authors have developed a method for the estimation of rice plant height by using a short-range LiDAR measurement from above a paddy rice canopy. In this method, the estimated rice plant height is calculated based on the analysis of the vertical distribution of 3D point cloud data, therefore the estimation is affected by foliage abundance and laser incident angle conditions. Plants with similar height but different foliage abundance were observed using a short-range LiDAR from above a paddy rice canopy to examine the influence of the incident angles on rice plant height estimation. The results of the examination showed that the influence of the incident angle condition was similar in different foliage abundance until the maximum tiller number stage. In addition, the estimation of rice plant height was not affected by foliage abundance in a laser incident angle less than 8 degrees which is almost a vertical incident condition.

1. はじめに

コメの安定生産には、水稻生育状況を定期的に調査し、過剰生育の抑制や施肥時期の判断など、適切な栽培管理を行う必要がある。生産現場では、水稻の草丈、茎数、葉数などを直接計測する慣行測定が実施され、水稻の生育状況把握や管理情報として活用している（やまがたアグリネット, 2018, 新潟県, 2018）。

しかし、慣行測定では、一株ずつ計測するため調査株数や調査点の増加は、作業量・作業時間の増加に直結する。また、調査結果が調査株の個体差や生長のバラツキの影響を受けやすく、空間代表性が低い。このため、生育調査時の労力低減や能率向上、調査結果の再現性や空間代表性を高めるため、リモートセンシング技術を活用した手法が研究されている。

たとえば、分光器に代表される受動型センサを利用する事例として、水稻の分光反射率の測定結果から稲

体窒素吸収量を推定する研究（堀尾ら, 2007）や、マルチコプターに搭載した可視・近赤外カメラを用いた高頻度・高分解能の近接リモートセンシングが水田内の詳細な生育管理に有効であることを示した研究（田中ら, 2016）がある。

しかし、受動型センサは天候障害の影響を受けやすく、とくに田植後1か月～出穂直前が梅雨時期と重なる地域では、その利用は制限される。

一方、より天候障害に左右されにくく、土木分野で広く利用されている能動型センサとしてLiDAR（Laser Imaging Detection and Ranging）がある。

LiDARを利用した生育モニタリングでは、おもに草丈が対象となる。たとえば、Tillyら（2014）は地上据え置き型LiDARにより取得した水稻群落の三次元点群データから、多時期のCSM（Crop Surface Model）を生成した。そして、CSMと草丈の間に強い相関（ $R^2=0.91$ ）があることを示している。ただ、CSMを利用する手法は、草丈の基準となる地面位置をDEMとして与える必要がある。しかし、茎葉が繁茂しているあるいは水面でおおわれている状況下では、LiDAR計測によりDEMを生成することは容易でない。

* 長岡技術科学大学大学院修士課程

**長岡技術科学大学

「写真測量とリモートセンシング」VOL. 57, NO. 5, 2018

Phan ら (2016) は、地面高を利用しない水稻群落上方からの近距離 LiDAR 計測による草丈推定手法を提案している。そして、レーザ入射角がほぼ鉛直($\pm 8^\circ$)となる計測領域において、LiDAR 計測点の鉛直分布から決定した、群落最上層部の位置と群落下層部の位置の相対距離にあたる群落層厚さ (LiDAR 計測した群落層厚さ) と草丈の関係を解析し、草丈を誤差 4 ~ 10 cm で推定可能であることを示している。

また、市川ら (2017) は、Phan らの手法において、レーザ光が斜め入射する計測領域において草丈推定が可能か検討した。そして、レーザ走査領域を入射角により複数に分割し、分割領域ごとに Phan らの手法を適用することで草丈推定が可能であることを示した。加えて、Phan らの手法の適用範囲拡大には、草丈が同一であっても茎葉の繁茂状況が異なる場合を考慮する必要性を指摘している。

そこで、本稿では草丈が同一であっても茎葉の繁茂状況が異なる水稻群落を経時的に LiDAR 計測したデータを用いて、1) 茎葉の繁茂状況が異なる状況において、LiDAR 計測した群落層厚さのレーザ入射角依存性の有無および傾向について調べ、2) UAV を含む航空機搭載 LiDAR 計測データを用いた広域の草

丈推定への Phan らの手法の適応条件を検討する。

2. 材料と方法

2.1 水稻群落の近距離 LiDAR 計測

水稻群落上方から LiDAR 計測するため、図 1 に示す空中ガイドレールを水田内 (新潟県農業総合研究所内の水田) に設置した。このガイドレールに沿って、モータ駆動の架台に取り付けた LiDAR を移動させることで、計測対象の群落を LiDAR 計測した。ガイドレールは、高さ 3.8 m (LiDAR 器械点高は 3.6 m) に位置し、架台の移動速度 3 cm/s、移動距離は 11.8 m である。また、LiDAR は、北陽電機製の UTM-30LX (諸元を表 1 に示す) である。レーザスポットサイズは、距離 3.6 m において (水田土壌面において) 48 mm $\times$ 10 mm である (UTM-30LX/30LX-EW カタログ, 2018)。

草丈が同一であるものの、茎葉の繁茂状況が異なる水稻群落を用意するため、ガイドレール下の水田に、基肥量の異なる 3 つの区画 (I : 1.0 kgN/10a, II : 3.0 kgN/10a, III : 5.0 kgN/10a) を設置した。いずれの区画も 3.0 m $\times$ 4.1 m とし、コシヒカリを栽植密度 15

図 1 実験装置及び区画の配置図

表1 UTM-30LX 諸元

波長	905nm
走査角度	270度
角度分解能	0.25度
走査時間	25ms
測距精度	30mm (0.1~10m)

表2 計測日 (2017年)

計測日	DOY
6月12日	163
6月20日	171
6月23日	174
6月26日	177
6月29日	180
7月3日	184
7月12日	193
7月19日	200

株/m²で2017年5月12日に移植した。

LiDAR 計測は、2017年6月12日から7月19日まで合計8回実施した(表2)。また、LiDAR 計測と並行して、水稻の草丈と茎数を実測し(各区画5株を測定)、その平均値を区画の代表値とした。さらに、区画中央の植被率を架台に取り付けたデジタルカメラ(Rasberry Pi 用カメラモジュール OV5647, 500万画素)で植被状態を撮影し、撮影画像から植被率を算出した。ここで、植被率はつぎの手順で算出した。まず、式1を用いて植被画像(RGB 画像)からGV 値を画素値とする植生領域強調画像を生成した。なお、式1で平方根内の数値が負の値になる場合は、GV=0とした。

$$GV = \sqrt{(2G - R) \times (2G - B)} \quad (1)$$

つぎに、この画像を大津の手法により二値化し、植生領域を抽出した後、画像中央の4株分相当の領域における植被領域の比率を植被率とした。なお本稿では、茎葉の繁茂状況の違いを定性的に判断する指標として茎数と植被率を利用する。

2.2 LiDAR 計測した群落層厚さの計算

Phan らの草丈推定手法では、レーザ入射角がほぼ鉛直(±8°)となる計測領域において、LiDAR 計測点の鉛直分布を解析し、群落最上層部の位置と群落下層

図2 LiDAR 計測された群落層厚さ (rD) と鉛直距離 (VD_{99} , VD_5) の関係

部の位置の相対距離にあたる、LiDAR 計測した群落層厚さ (rD) と草丈 (H) の関係から草丈推定式を決定している。ここで、レーザ走査角 α (本稿では、レーザ走査角=レーザ入射角となる) で計測された LiDAR 計測点の鉛直距離 D は、計測距離を r とすると次式により計算される。

$$D = r \cos \alpha \quad (2)$$

本稿では、地盤高を基準に鉛直距離を鉛直上向きの距離(高さ)へ変換し、これを LiDAR 計測点の高さとする。そして、Phan らの手法同様、図2のように LiDAR 計測点の高さが、99パーセンタイル (VD_{99}) を群落最上層部の位置、5パーセンタイルの高さ (VD_5) が群落下層部の位置として、 rD を算出する(式3)。

$$rD = VD_{99} - VD_5 \quad (3)$$

2.3 レーザ入射領域の分割と解析領域の決定

LiDAR 計測した群落層厚さが同一であっても、レーザ光が斜めに群落を通過すると、経路長が鉛直に通過する場合より増加する。レーザ入射角を θ とすると経路長は、 $1/\cos \theta$ 倍増加する。この効果を考慮して本稿では、つぎの3つの入射角条件となる範囲を解析領域に設定した(表3, 図1)。1つ目は鉛直入射条件となる0.00~8.00°(A)、2つ目は経路長が1.06倍となる19.25~26.50°(B)、3つ目は経路長が1.18倍となる31.75~36.00°(C)である。なお、区画境界の影響を避けるためガイドレール方向は中央の幅1.0mの領域とした。

表3 解析領域の入射角範囲

領域	レーザ入射角: θ
A	0.00 ~ 8.00度
B	19.25 ~ 26.50度
C	31.75 ~ 36.00度

3. 結 果

3.1 草丈、茎数、植被率の経時変化

区画Ⅰ～Ⅲの草丈、茎数、植被率の経時変化を図3に示す。茎数と植被率の経時変化から、基肥量の多い区画ほど茎葉が繁茂していることが確認できる（区画Ⅲ>区画Ⅱ>区画Ⅰの順に繁茂の程度が低い）。一方、草丈の経時変化は、DOY 174（6月23日）～180（6月29日）の期間で区画Ⅰの値が若干小さい（区画Ⅰ～Ⅲの平均草丈は32.7, 37.7, 41.8cmであるのに対し、区画Ⅰの草丈は30, 34, 39.2cm）ものの、全体として区画Ⅰ～Ⅲでほぼ同様（草丈の標準偏差は1.3～3.8cm）である。これらより、「草丈が同一であっても、茎葉の繁茂状況が異なる水稻群落」という条件を概ね満足していることが分かる。なお、茎数の経時変化から、DOY 180前後が最高分げつ期であることが確認できる。

3.2 LiDAR 計測点の鉛直分布の経時変化

標準的な基肥である区画Ⅱにおける LiDAR 計測点の鉛直距離分布の推移を図4に示す。

DOY 163（6月12日）では、入射角0.00～36.00°の領域（A～C）において地面を含む群落下層部に相当する計測点が相対的に多く、レーザ光が地面まで到達していることが分かる。また、DOY 171（6月20日）においても同様のことが言える。しかし、DOY 180では、入射角31.75～36.00°の領域Cにおいて、レーザ光が地面付近まで到達する頻度が少なくなり、さらに生育が進行したDOY 193（7月12日）とDOY 200（7月19

日）では、入射角19.25～26.50°の領域Bにおいてもレーザ光が地面付近まで到達していないことが分かる。一方、入射角0.00～8.00°の領域Aでは、どの時期においても地面点付近にレーザ光が到達している。この傾向は、区画ⅠとⅢにおいても同様であった。

3.3 VD_{99} と VD_5 の経時変化

LiDAR 計測される群落最上層の位置（ VD_{99} ）と群落下層部の位置（ VD_5 ）の経時変化を示す（図5）。 VD_{99} は、区画と領域の違いにより値が変動するものの、入射角条件と茎葉の繁茂状況によらず単調増加する傾向が見てとれる。一方、 VD_5 の経時変化は、DOY 180まで入射角条件と茎葉の繁茂状況の影響が小さいことが分かる。しかし、それ以降は、入射角条件によって VD_5 の値の増加傾向が異なっている。とくに、入射角0.00～8.00°の領域Aでは、 VD_5 の値がほぼ横ばいであるのに対して、入射角19.25～36.00°の領域BとCでは、時間の経過（生育）にともない VD_5 の値が増加すること、茎葉が繁茂しているほど、 VD_5 の値の変動幅が大きくなることが分かる（図5bをみるとDOY 200において領域Bでは、3.6cm：図中①、領域Cでは、11.4cm：図中②）。

3.4 LiDAR 計測した群落層厚さと草丈の関係

前述した式3より区画ごと、領域ごとに LiDAR 計測した群落層厚さ（ rD ）を算出した。図6に rD と実測した草丈（ H ）の関係を示す。 rD と H の関係が、入射角条件と茎葉の繁茂状況の両方の影響を受けていることが分かる。ただ、入射角が小さい領域では、茎

図3 草丈、茎数、植被率の経時変化

図6 LiDAR 計測した群落層厚さ (rD) と草丈 (H) の関係

葉の繁茂状況の影響は小さく、入射角が大きくなるにともない、その影響が大きくなることが分かる。とくに、最も茎葉が繁茂した区画IIIの入射角 $31.75\sim36.00^\circ$ の領域Cでは草丈が50cm以上 (DOY 180以降) となる範囲で、 rD がほぼ変化せず (23~24cm) rD が、 H の増加に追従していない。なお、草丈が50cm未満の時期 (DOY 180まで) では、 rD と H の関係が、入射角条件と茎葉の繁茂状況によらず、単調増加していることが分かる。また、図6(a)~(c)をみると入射角条件ごとの rD と H の関係が類似している。このことから、計測期間全体を通じて、茎葉の繁茂状況の影響は小さいことが分かる。

4. 考 察

4.1 茎葉の繁茂状況によるLiDAR計測した群落層厚さの入射角依存性

rD と H の関係が、入射角条件により大きく変化し、入射角が大きい領域では、茎葉の繁茂状況の影響が強く現れる結果となった。これは、群落下層部の位置にあたる VD_5 の位置が、入射角が大きいほど、茎葉が繁茂するほど高くなる傾向を示していることによる。とくに、最も茎葉が繁茂した区画III (図6c, 6d) の入射角 $31.75\sim36.00^\circ$ の領域Cでは、ほぼ rD が変化していない。このことから、茎葉が繁茂した群落では、入射角が大きいLiDAR計測データへPhanらの草丈推定手法をそのまま適用できない可能性が明らかになった。

草丈が50cmに達する最高分げつ期までは、 rD と H

の関係が茎葉の繁茂と入射角条件の違いによらず、単調増加傾向を示している。これは、この時期の群落上層部の茎葉が相対的に疎で、入射角条件と茎葉の繁茂状況によらず、レーザ光が地面を含む群落下層まで到達していることを示している。

水稻群落のLiDAR計測点の鉛直分布は、品種や栽培状況により変化すると考えられる。しかし、層別刈り取り法で、水稻群落の植物面積密度 (PAD) の鉛直分布を経時的測定した細井ら (2012) の研究では、最高分げつ期までは、PADのピークが群落下層にあったと報告している。このことから、最高分げつ期までの群落では、LiDAR計測した群落層厚さは、茎葉の繁茂状況と入射角条件に影響されない可能性が高いと考えられる。

4.2 鉛直入射領域における草丈推定

rD と H の関係は、入射角が小さい領域では、茎葉の繁茂状況による変動は小さい。そこで、区画I~IIIの入射角 $0.00\sim8.00^\circ$ の領域AのLiDAR計測データに、Phanらの推定手法を適用し、草丈推定を試みた。推定式は、次のようになった。

$$H = 1.66rD + 0.5 \text{ [cm]} \quad (4)$$

推定誤差 (RMSE) は2.5~5.3cmであった。この数値は、草丈実測値の標準偏差1.3~3.8cmと同程度である。このことは、レーザ光がほぼ鉛直に入射する領域であれば、茎葉の繁茂状況によらず、Phanらの手法により草丈が推定できる可能性を示唆している。

5. ま と め

UAVを含む航空LiDAR計測へのPhanらの草丈推定手法の適用の可能性を検討するため、草丈が同一であっても、茎葉の繁茂状況が異なる水稻群落を経時的にLiDAR計測したデータを用いて、LiDAR計測した群落層厚さのレーザ入射角依存性の有無および傾向について、次のような基礎的な知見を得た。1) LiDAR計測した群落層厚さ(rD)と草丈(H)の関係は、入射角条件による影響は存在し、入射角により大きく変化するものの、茎葉の繁茂状況の違いによる差は小さい。2) 茎葉が繁茂した群落では、入射角が大きいLiDAR計測データ(領域C: $31.75 \sim 36.00^\circ$)へPhanらの草丈推定手法をそのまま適用できない可能性がある。3) 最高分げつ期までは、 rD と H の関係がレーザ入射角と繁茂状況による影響をほぼ受けない可能性が確認された。4) レーザ光が水稻群落へほぼ鉛直に入射する領域(レーザ入射角 8.00° 以下)の条件であれば、Phanらの手法により、RMSE: $2.5 \sim 5.3$ cm程度で、草丈が推定できる可能性が確認できた。

本稿の結果は、水稻群落上方3.6mと低高度からの近距離LiDAR計測に基づいている。このため、航空LiDAR計測のような数点～数十点/ m^2 といった空間的に疎な点群データに対して、本稿の結果がそのまま当てはまるとは限らない。とくに、レーザスポット径の大きさは、 VD_{99} と VD_5 の位置の決定に影響すると考えられる。

草丈の広域推定の実現には、LiDAR計測した群落層厚さにおける、点群密度とレーザスポット径の大きさの影響を明らかにすることが必要である。また、昨今のUAV搭載LiDARでは高密度かつレーザスポット径の小さな機種もある。このような機器であれば、利用する点群データをレーザ入射角が鉛直となる範囲に制限することで、本稿の知見を活用し草丈を広域に推定できる可能性がある。これらについては、さらなる実験データの蓄積と解析が今後の課題である。

謝 辞

本研究の実施にあたり、新潟県農業総合研究所作物

研究センター 樋口泰浩氏より多大なるご協力を戴いた。ここに深謝の意を表す。

(受付日2018.7.12, 受理日2018.9.12)

参考文献

- 市川由輔, 2017. レーザスキャナ計測データを用いた水稻草丈推定手法におけるレーザ入射角の影響検討, 応用測量論文集, 28, pp.33-40.
- 田中 圭, 2016. 小型マルチコプターを用いた近接リモートセンシングによる水稻生育マップの作成, 日本リモートセンシング学会誌, 36(4), pp.373-387.
- 新潟県, 2018. 長岡農業普及指導センター稲作情報 No. 3, http://www.pref.niigata.lg.jp/HTML_Top/278/564/H30inasakujoyouhouNo3_317136,0.pdf (accessed 13 Jul. 2018)
- 堀尾光広, 水紺屋秀之, 2007. 水稻の生育・栄養診断への携帯式生育情報測定装置の利用, 農業機械学会誌, 69(5), pp. 8-11.
- やまがたアグリネット, 2018. 米づくり技術情報 No. 3, http://agrin.jp/ufile/7/48/25393/image1_file0118051117305728738.pdf (accessed 13 Jul. 2018)
- Anh Thu Thi Phan, Kazuyoshi Takahashi, Atsushi Rikimaru, Yasuhiro Higuchi, 2016, Method for estimating rice plant height without ground surface detection using laser scanner measurement, Journal of Applied Remote Sensing, 10(4), 046018-1-12, <https://doi.org/10.1117/1.JRS.10.046018>.
- Fumiki Hosoi, Kenji Omasa, 2012, Estimation of vertical plant area density profiles in a rice canopy at different growth stages by high-resolution portable scanning lidar with a lightweight mirror, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 74, pp.11-19.
- Nora Tilly, Dirk Hoffmeister, Qiang Ca, Shanyu Huang, Victoria Lenz-Wiedemann, Yuxin Miao, Georg Bareth, 2014, Multitemporal crop surface models: accurate plant height measurement and biomass estimation with terrestrial laser scanning in paddy rice, Journal of Applied Remote Sensing, 8(1), 083671-1-22, <https://doi.org/10.1117/1.JRS.8.083671>.