

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 21 日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26450362

研究課題名(和文) Dual照射面角でのレーザ計測によるSUAVベースの水稻生育度測定システムの開発

研究課題名(英文) Development of a rice growth observation system using a laser scanner onboard a small UAV with dual laser-scanning inclination angles

研究代表者

高橋 一義 (Takahashi, Kazuyoshi)

長岡技術科学大学・工学研究科・准教授

研究者番号：00332651

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：非測量水準のレーザスキャナ(LRF)を搭載するUAVシステムの試作と並行して、水稻の点群データ解析に基づく草丈推定アルゴリズムの妥当性を地上実験により検討した。地上実験では、LRF点の鉛直距離1%tileと95%tileから算出した植生層高さ(rD)を草丈(H)へ変換し、推定誤差4cmを達成した。なお、レーザ入射角が30度を超える計測領域では、Hの増加に対しrDがほぼ変化しない現象を確認した。試作UAVシステムによる低高度からの水田計測では、草丈の推定誤差7cmを達成した。地上、UAV実験を通じて、広域の草丈推定の実現に向け、局所的な生育ムラを考慮したアルゴリズム検討の必要性を認識した。

研究成果の概要(英文)：A UAV system equipped with a non-survey grade laser rangefinder (LRF) was developed. A novel algorithm of estimating rice plant height (H) was proposed and its validity was evaluated based on point cloud data obtained by ground-based observations. As the result of the observation data analysis, the estimation error (RMSE) was minimized to 4cm with the laser-scanned vegetation layer height (rD) calculated by two vertical distances of point cloud data of 1 percentile and 95 percentile. It was found that the rD hardly increased with H in an area of laser incident angles greater than 30 degrees. UAV observations at low altitudes were conducted in 2016. Applying the algorithm to the UAV observation data, the RMSE of plant height was 7cm. From the results of ground-base and UAV observations, it is necessary to consider the local coverage of rice plants to improve estimation accuracy and to achieve practical UAV monitoring of rice growth in wide areas.

研究分野：リモートセンシング

キーワード：スマート農業 レーザレンジファインダ 精密農業 草丈推定

1. 研究開始当初の背景

コメに対する社会ニーズは、おもに低価格、高品位、安全(安心)の三つに集約される。生産者は、このニーズに応えるため産地内の生育変動やバラツキを把握する情報技術、作業能率を向上させる機器の開発、発展に取り組んでいる。生育量の測定技術に関しては、慣行測定の代替えとして、稲株群落の分光反射特性や稲株の平面的な広がりを表す植被率から稲体窒素量を推定する手法などがある。また、広域を対象とした生育量測定に関して、出穂期以降の葉色情報を衛星や航空機から計測し、米タンパク含有率を推定する手法が実用化されている。しかし、天候・雲障害を受けやすい分けつ期～幼穂形成期に関しては、水稻群落からの太陽反射光を利用する受動型の計測手法では、稲株の分光情報や植被率の安定した計測が困難である。このため、この時期では衛星、航空機を利用した生育量の測定の実用化が進んでいない。

近年、従来主流である受動型計測にくらべ天候・雲障害の影響を受けにくいレーザスキャナ(能動型センサ)の利用が測量分野を中心に普及している。水稻生育モニタリングへのレーザスキャナの活用事例として、地上レーザスキャナによる水稻群落鉛直構造(植物面積密度:PDA)の経時変化の計測、地上設置型のレーザスキャナによる水稻群落の草丈計測報告などがある。しかし、いずれも広域を対象とした生育量測定手法ではない。

申請者は、航空レーザスキャナ計測を念頭にした水稻生育モニタリング手法の実用化に取り組んでいる。これまで、移植後約1~2ヶ月の水稻を対象に、地上実験による水稻直上からのレーザ計測から、営農情報として活用可能な水準で植被率を推定する可能性を見出している(レーザ入射角 $\pm 8^\circ$)。また、衛星測位技術とMEMS技術の進展により、小型無人航空機(SUAV)の導入コストが下がり、低コストで任意のタイミングで観測を実現したいという事案へのSUAVの活用が今後、急速に増加すると見込まれる。

2. 研究の目的

SUAV搭載レーザスキャナを利用した水稻の生育量(草丈、茎数あるいは草丈と茎数の積値など)を推定するアルゴリズムを検討する。また面的な生育量測定の実現性を検討するために、小型レーザスキャナ(LRF)を搭載したSUAVベースの水稻生育量測定システムを試作する。

3. 研究の方法

レーザスキャナ計測による水稻生育量推定アルゴリズムの検討は、大きく3つの内容から構成される。

一つ目は、生育量推定アルゴリズムを検討するための基礎データを野外実験により取得する。二つ目は、非測量水準の小型LRFを搭載したSUAVベースの水稻生育量測定

システムを試作する。三つ目は、試作SUAVシステムを利用した生育量の推定である。

(1) 野外実験による基礎データ取得

地上据え置き型レーザスキャナを利用した場合、水稻群落へのレーザ光の入射条件が計測領域ごとに異なる。また、水稻群落へのレーザ光入射角(たとえば 30° 以下)が小さく設定することが容易でない。このため、地上据え置き型のレーザスキャナによる計測は、水稻群落上層部の位置の測定用途に向くものの、草丈、茎数など水稻群落の形状・体積情報を取得する用途には向かない。

そこで、SUAVに搭載したLRFでの計測と同様に、水稻群落直上からレーザ計測を可能とする野外実験装置を作成し水稻群落のレーザ計測データを取得した。同時に、草丈、茎数を実測した。データ取得は、2014年と2016年に実施した。LRFとして、いずれも非測量水準のSICK LMS200(2014年:測距性能30mm)、HOKUYO UTM30LX(2016年:測距性能30mm)を用いた。2015年は、一度、野外実験装置を設置したものの強風被害により実験続行不能となった。なお、HOKUYO UTM30LXは、後述する試作SUAVシステムに組み込むLRFと同機種である。

(2) 草丈推定アルゴリズムの検討

2014年および2013年(別課題で取得済み)のレーザ計測データ(野外実験)の内、レーザ入射角が鉛直とみなせる入射角 8° 以内のデータを解析し、水稻生育量の内、草丈について、その推定アルゴリズムを検討した。検討したアルゴリズムでは、水稻茎葉の繁茂度が上昇すると、レーザ光が水田土壌面へ到達しにくい状態になること、また、水深が深い、水田水が濁っている状態では、土壌面までレーザ光が達しないことから、レーザ計測データから水田土壌面位置を決定せず、草冠部分を新たな基準位置(D^t)とし、レーザ計測データの鉛直分布から決定した群落下層位置(D^b)との差(相対高さ)から算出される植生層高さ(rD)を説明変数とした。

レーザ計測した植生層高さは、 D^t と D^b をどのように設定するかで変わる。ここでは、 D^t を1%-tile鉛直距離、 D^b として70, 80, 95%-tile鉛直距離とした場合について、レーザ計測植生層高さと草丈の関係を調べ、提案アルゴリズムの妥当性を評価した。また、2016年のレーザ計測データを利用して、レーザ入射角がレーザ計測した植生層高さと草丈の关系到及ぼす影響を評価した。

(3) SUAVベースのレーザ計測システムの試作

対角直径80cmのマルチロータ機に、アクティブジンバルを取り付け、そこに小型LRF(HOKUYO UTM30LX)を搭載したレーザ計測システムを試作した。また、機体の位置と機首方向を記録する廉価なIMUを取り付けた。

平坦地に設置した反射ターゲットを試作

システムでレーザ計測し、取得レーザ計測点の位置精度を評価した。

(4)SUAV による水稻のレーザ計測と草丈推定
試作システムに搭載する LRF を 2 台に増やし、鉛直と斜め 45 度を同時計測するよう改良した。改良した試作システムを用いて、2016 年 6 月～7 月において、水田上空を高度 5m (目安) からレーザ計測した。前述の(2)と同様に、計測期間を通じて、直接計測した草丈とレーザ計測した植生層高さの関係から、草丈推定式を決定し、提案アルゴリズムの UAV システムへの適用性ならびに広域の草丈推定への課題を検討した。

4. 研究成果

(1)レーザ計測データ (野外実験装置)

図 1 は、解析領域の草丈等の時間推移の一例である。2013 年と 2014 年では草丈はほぼ同様な推移であった。一方、茎数は 2014 年に比べ 2013 年は約 2/3 であった。また、図 2 は 2014 年におけるレーザ計測点の高さ分布推移の一例を示す。この間、草丈は約 40cm (a) から 80cm (g) まで増加した。草丈の増加に伴い、鉛直分布が広がる様子、また土壌面に対応する計測点が急激に減少することが読み取れる。2016 年も同様の結果を得た。

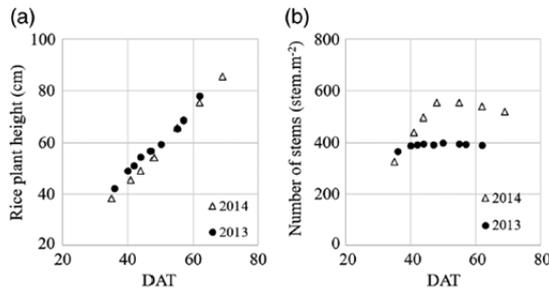


図 1 草丈、茎数の推移

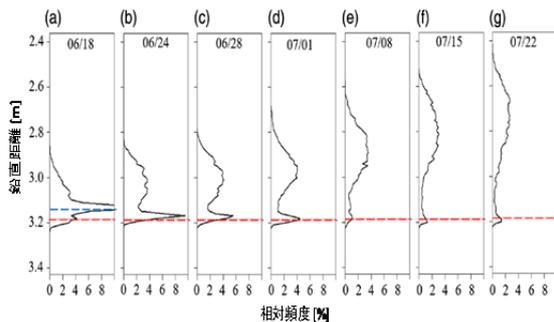


図 2 レーザ計測点の鉛直分布(2014 年)。赤線は水田土壌位置 (収穫後に測定)、青線は、水面位置 (b-g は水張りなし) を示す。

(2)レーザ計測による草丈推定

非測量水準の LRF で取得したレーザ計測データから、前述した通りレーザ計測した植生層高さを算出し、草丈との関係を調べた。図 3 は、2013, 2014 年の 2 シーズン分のデータを同時に解析した結果を示す。95%-tile 鉛直距離を D^b とした場合に最も線形関係が高く

なり、計測期間を通じて推定誤差は 4cm であった。なお、70, 80%-tile 鉛直距離を利用した場合においても、推定誤差は 9cm 以下であった。2013 年と 2014 年は、茎数の推移が大きく異なっていた。しかし、草丈推定にその影響はほとんど現れなかった。

このことから、非測量水準の LRF で取得したレーザ計測データを利用した場合においても、提案アルゴリズムは草丈を高精度に推定できる可能性があることが示唆された。

図 4 は、レーザ入射角が変化した場合、レーザ計測した植生層高さとの関係を表す。これを見ると、草丈が 50cm 以上の水稻で、レーザ入射角の影響が現れはじめることが分かる。この傾向は、とくに入射角が 30° を超える領域 E で大きく、レーザ入射角を考慮した推定アルゴリズムの必要性が示唆された。

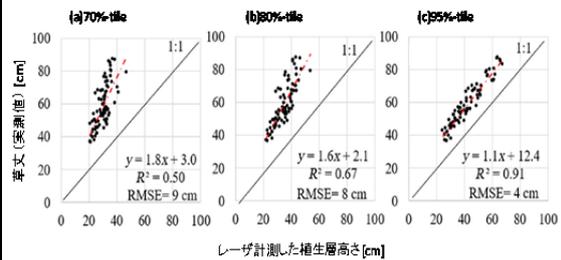


図 3 レーザ計測した植生層高さとの関係

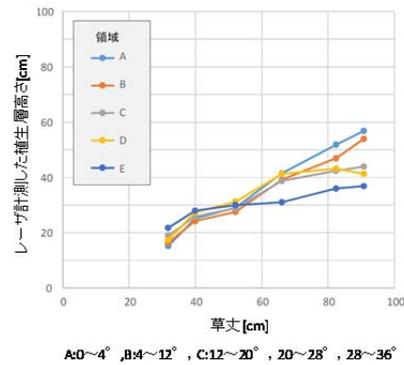


図 4 レーザ入射角が変化した場合の草丈とレーザ計測した植生層高との関係

(3)SUAV ベースのレーザ計測システムの試作
廉価な市販品をアSEMBルし、SUAV ベースのレーザ計測システムを試作した (図 5)。試作システムは、シングルボード PC により LRF 制御、GPS、IMU データ記録を実行する。記録した GPS データを事後測位解析することで、レーザ計測時の機体位置を計算し、LRF がアクティブジンバルにより常時水平を保持するとの前提で、レーザ計測データを三次元点群化した。

平坦地に敷設した反射ターゲットの位置を試作システムによりレーザ計測し、その位置の評価誤差を評価した。図 6 は、三次元点群化の反射強度画像と高さ分布を示す。図中の赤字は反射ターゲット位置を表す。試作システムによるレーザ計測では、一部の区間でデータ欠損が生じた。これは、データ記録ブ

プログラムのバグによりもので、大きくデータ欠損が生じないように、現在はデータ記録プログラムを更新済である。

反射ターゲットの位置を測量（GPS 測量とトータルステーション測量）した結果を利用して三次元点群データの位置評定誤差を計算した。その結果、地上基準点（GCP）を設けない場合、誤差は、1mを超えるものの、1点でも GCP を利用することで、評定誤差を 0.1 から 0.2m まで小さくできる可能性を確認した（表 1。H は水平距離，D は三次元距離）。



図 5 試作システムの外観

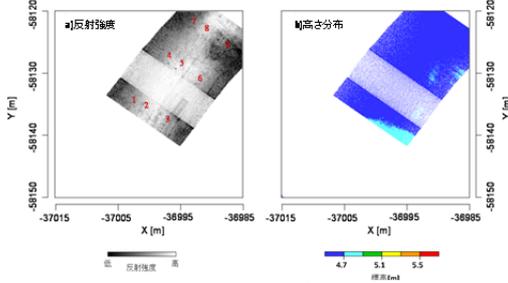


図 6 三次元点群化例と反射ターゲット位置

表 1 反射ターゲットの位置評定誤差

	X [m]	Y [m]	Z [m]	H [m]	D [m]
平均値	0.118	0.130	0.112	0.181	0.226
標準偏差	0.072	0.085	0.070	0.103	0.097

(4) SUAV による水稻のレーザ計測と草丈推定

新潟県長岡市の水田において、試作システムによるレーザ計測を実施した。図 7 は、取得したレーザ計測データの内、反射強度を画像化した結果である。図中に水田の畦に設置した反射マークが 3 つ確認できる。このマーク位置を目安に、レーザ計測した植生層高さを算出ならびに草丈推定を試みる領域を 4 つ設定した（図中の 4 つの赤枠）。設定した領域の中で欠株が少ない領域においてレーザ計測した植生層高さと草丈の関係調べた（図 8）。植生層高さは、1%-tile, 95%-tile 鉛直距離から算出した。前述 (2) で示した式と同様の推定式を得た。この式を用いて領域 1~4 において草丈を推定した（図 9）。推定誤差は、4cm~10cm であった（平均 7.4cm）。推定誤差にバラつきが生じた要因として、草丈を導出した領域と推定式を適用する領域の間で a) 生育状態が異なる、b) 生育状態は同一でも水稻の密度（植被状態）が異なる、ことが考えられた。

SUAV システムによる推定誤差は、地上実験結果と同程度であった。このことは、草丈の

面的な推定を非測量水準の LRF を搭載した UAV システムで実現可能であることを示唆する。

しかし、提案アルゴリズムは、草丈推定領域の生育状態が均一であることを前提とする。一方、実際の水田では、同一水田内においても、局所的な生育ムラ（生育差や水稻の密度差など）が存在する。今後、UAV システムによる広域の草丈推定の実現に向け、同一水田内の局所的な生育ムラを考慮したアルゴリズム検討が必要である。

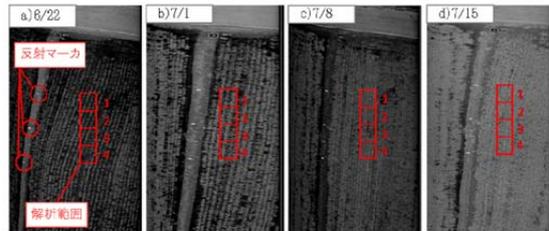


図 7 レーザ計測データの一部（反射強度）

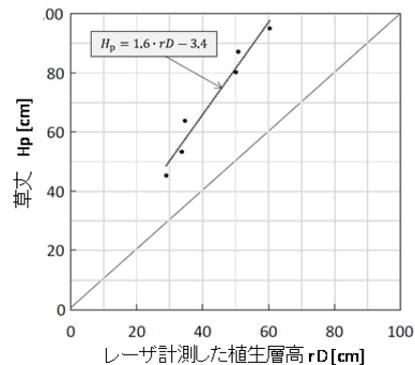


図 8 レーザ計測した植生層高さと草丈の関係

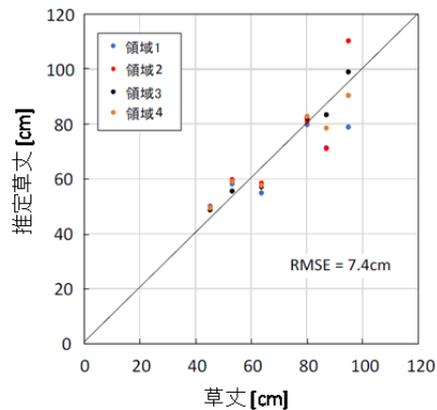


図 9 推定草丈と実測草丈の関係

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 1 1 件）

①市川由輔，高橋一義，PHAN THI ANH THU，樋口泰浩，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，Vol.28，掲載決定，2017，査読有

②尾高直人, 高橋一義, Phan THI ANH THU, 小型 UAV 搭載レーザスキャナシステムを用いた水稲草丈推定の試み, 応用測量論文集, Vol.28, 掲載決定, 2017, 査読有

③ 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, 2016.12, DOI: 10.1117/1.JRS.10.046018, 査読有

④小型・低コストな無人無線航空機ベースのレーザスキャナ計測システムの試作とその性能評価, 高橋一義, THU Phan Thi Anh, 入江博樹, 山田貴浩, 応用測量論文集, Vol.26, pp.11-20, 2015, 査読有

⑤水稲群落上方からのレーザスキャナ計測による生育モニタリングの検討, 丸山貴士, 高橋一義, 樋口泰浩, 応用測量論文集, Vol. 25, pp. 87-95, 2014, 査読有

〔学会発表〕(計6件)

①市川由輔, 高橋一義, 樋口泰浩, 小型レーザスキャナ計測による水稲生育モニタリングの検討, 日本リモートセンシング学会, 2016.11.01, 新潟テルサ(新潟県・新潟市)

②尾高直人, 高橋一義, 小型レーザスキャナ搭載 UAV システムを用いた水稲生育モニタリングの試み, 日本リモートセンシング学会, 2016.11.01, 新潟テルサ(新潟県・新潟市)

③ Anh Thu Phan Thi, Kazuyoshi Takahashi, Atsushi Rikimaru, A study of effect of planting densities and directions on rice growth measurement using laser scanner, The 36th Asian Conference on Remote Sensing, 2015.10.27, マニラ(フィリピン)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高橋 一義 (TAKAHASHI, Kazuyoshi)
長岡技術科学大学・工学研究科・准教授
研究者番号: 00332651

(2) 研究分担者

入江 博樹 (IRIE, Hiroki)
熊本高等専門学校・建築社会デザイン工学
科・教授
研究者番号: 70249887

(4) 研究協力者

樋口 泰浩 (HIGUCHI, Yasuhiro)