

令和 3 年 6 月 11 日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K05901

研究課題名(和文) 非測量用マルチビームLiDARによる水稲草丈・茎数の広域モニタリング手法の開発

研究課題名(英文) Development of a monitoring method for the estimation of plant height and stem number of rice plants in wide areas using a non-survey-grade multi-laser LiDAR

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) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：LiDAR計測により水稲の草丈・茎数を推定する基本手法(LiDAR計測基礎手法)の適用範囲の拡張には、取得される水稲群落の3D点群情報がレーザー入射角により変動する性質(レーザー入射角特性)の理解が不可欠である。本研究では、製作したUAV-LiDARシステムによりレーザー入射角特性を検討する基礎データ取得し、水稲群落の3D点群情報を集約するLiDAR計測指標とレーザー入射角の関係を調査した。その結果、LiDAR計測基礎手法が拡張可能性は入射角40度以下の領域であること、高度10mからのUAV-LiDAR計測にLiDAR基礎手法を適用し草丈・茎数が推定可能(誤差12%)であることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

稲作のスマート農業の進展には生育量を適宜、広範囲で知ることが重要である。本研究では、低価格なLiDARによる水稲草丈・茎数の広域測定を実現するため、水稲群落の三次元点群がレーザー入射角により変動する特性の検討に取り組んだ。その結果、入射角40度以下の領域なれば申請者が非測量用途のLiDARを念頭に開発したLiDAR計測基礎手法の拡張可能性があること、ドローンを利用した広域推定の可能性を確認した。

研究成果の概要(英文)：In order to expand the application of the fundamental method for estimating rice-plants' height and stem numbers by LiDAR measurements (the fundamental method), it is necessary to understand the characteristics of the 3D point cloud information of rice plants vary according to the laser incident angle (the laser incident angle characteristics). In this study, the basic data to examine the laser incident angle characteristics were acquired by using the UAV-LiDAR system that I manufactured. Then the relationship between the LiDAR measurement indices that aggregate the 3D point cloud information of rice plants and the laser incident angle was investigated. As a result, it was found that the fundamental method can be expand to an incident angle of 40 degrees or less in the observation area. The fundamental method can also be applied to the UAV-LiDAR measurement at an altitude of 10 m to estimate the rice-plants' height and stem numbers with a 12% margin of errors.

研究分野：リモートセンシング

キーワード：精密農業 LiDAR ドローン 生育量 草丈 茎数 三次元点群

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

コメに対する国内の社会ニーズは、おもに低価格、高品質、安全(安心)の三つに集約される。生産者は、これらのニーズに応えるため産地内の生育変動やパラツキを把握する情報技術、農作業能率を向上させる機器の開発・利用に取り組んでいる。生育量の測定技術に関しては、現慣行測定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(分光反射特性)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、その結果を翌年の営農方針へ反映する試みがなされている。しかし、稲株が大きく生長する、分けつ期～幼穂形成期は天候が安定せず、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を安定して測定することが困難である。このため、この時期を対象とした衛星・航空機を利用した生育量測定の実用化が遅れている。近年、従来主流である受動型計測にくらべ天候の影響を受けにくい能動型センサのレーザスキャナ(あるいはLiDAR: Light Detection And Ranging)の利用が測量分野を中心に普及している。レーザスキャナを水稻生育モニタリングへ活用した事例として、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、それらは広域を対象とした生育量測定手法ではない。

申請者は、ドローン(あるいは航空機)によるレーザスキャナ計測を念頭におい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、草丈と茎数を推定する基本手法(LiDAR計測基礎手法)を開発している(レーザ入射角 $\pm 8^\circ$ )。

### 2. 研究の目的

申請者のLiDAR計測基礎手法の適用可能なレーザ入射角条件を拡張するには、レーザ入射角により取得される水稻群落の三次元点群情報が変動する性質(入射角特性)を解明することが不可欠である。本研究では、同一の水稻群落を複数のレーザ入射角でLiDAR計測可能な、マルチビームLiDAR搭載のUAV-LiDARシステムを製作し、入射角特性を解明するためのデータを取得する。そして、水稻群落の三次元点群の鉛直分布特性を集約したLiDAR計測指標の入射角特性を分析し、草丈と茎数推定において推定可能な入射角条件に関する知見を得る。

### 3. 研究の方法

#### (1) UAV-LiDARシステムの製作

複数の走査面を備えるマルチビームLiDARを産業用マルチローター機(ドローン)に搭載し、同一の水稻群落を上空から複数のレーザ入射角でLiDAR計測可能なUAV-LiDARシステムを製作する。ドローン本体は搭載センサ類のサイズ・重量を考慮して産業用マルチローター機とする。LiDARは、水稻群落へのレーザ入射角をより大きく設定するため、鉛直よりやや傾けてドローンに取り付ける。なお、ドローン本体には、計測時の飛行経路の再現性を高めるためRTKシステムを導入する。

#### (2) UAV-LiDAR計測とLiDAR計測指標の入射角特性の分析

同一水稻群落を複数のレーザ入射角でLiDAR計測するUAV-LiDAR計測を実施する。飛行高度・飛行速度はLiDARの計測性能を考慮し、高度10m・1m/sを基本とする。計測対象水田は、研究協力が得られた地元農協が定期的に生育調査を実施する水田とする。計測期間は、入射角特性の分析対象となる、田植え後1カ月から出穂直前を含むように設定し、研究協力が得られた地元農協が実施する生育調査日(概ね10日間隔)前後を対象にUAV-LiDAR計測を実施する。

入射角特性の分析の前処理として、取得した三次元点群を結合し、地図情報を付与する。地図情報を付与する方法として、LiDAR-SLAM方式とLiDARの位置・姿勢情報を利用する方式の2つを検討する。

LiDAR計測基礎手法では、計測点の鉛直分布特性を集約した2つのLiDAR計測指標「LiDAR計測した群落層厚さ」と「群落空間体積」を考える。ただし、群落空間体積の算出には、LiDAR計測した群落層厚さが必要である。そこで本研究では、LiDAR計測した群落層厚さに着目して、レーザ入射角条件とLiDAR計測した群落層厚さの関係の経時変化について分析する。

#### (3) 草丈・茎数の推定範囲の拡張に関する検討

LiDAR計測基礎手法では、2つのLiDAR計測指、「LiDAR計測した群落層厚さ」と「群落空間体積」を考え、それぞれ実測した草丈と茎数の関係に基づき、草丈と茎数を推定する。ただし、推定可能範囲はレーザ光が水稻群落へ鉛直入射する範囲に限定される。またLiDAR計測基礎手法は、地上3mに敷設したレールを利用したLiDAR計測実験に基づき開発したもので、UAV-LiDAR計測データへの適用実績はほぼない。そこでUAV-LiDAR計測へのLiDAR計測基礎手法適用し、草

丈・茎数推定が可能か検討する。その後、LiDAR 計測指標の入射角特性の分析結果を踏まえ、レーザー入射角の影響を考慮した草丈推定を検討する。

#### 4. 研究成果

##### (1) UAV-LiDAR システムの製作

マルチビーム LiDAR を搭載するドローン本体として、産業用マルチローター機である DJI Matrice600 を選択した。これに DJI D-RTK を組み込み、飛行経路の再現性を高めた。マルチビーム LiDAR には、16 個の走査面を備える Velodyne VLP-16 を採用した。計測時のレーザー走査面角を一定に維持するため、アクティブジンバル (DJI Ronim-MX) に LiDAR を取り付けた。この他のセンサとして、計測対象を記録するカメラ (GoPro HERO3, MAPIR Survey3 Camera) を搭載した。LiDAR の取り付け角は、水稻群落へのレーザー入射角をより大きく設定するため、鉛直より 9 度傾けた (研究期間後半 10 度)。搭載センサ類の制御は小型 PC (MousePro-C100PV) により実施する形態とした。製作した UAV-LiDAR システムを図 1 に示す。

当初、LiDAR をアクティブジンバルに取り付けたが、計測中にドローン本体が急回転するシーンで、時折ジンバルの動作が不安定になったことから、研究期間後半では、LiDAR の搭載形態を変更し、廉価な GNSS-INS により LiDAR の姿勢角を記録する方法へ変更した。

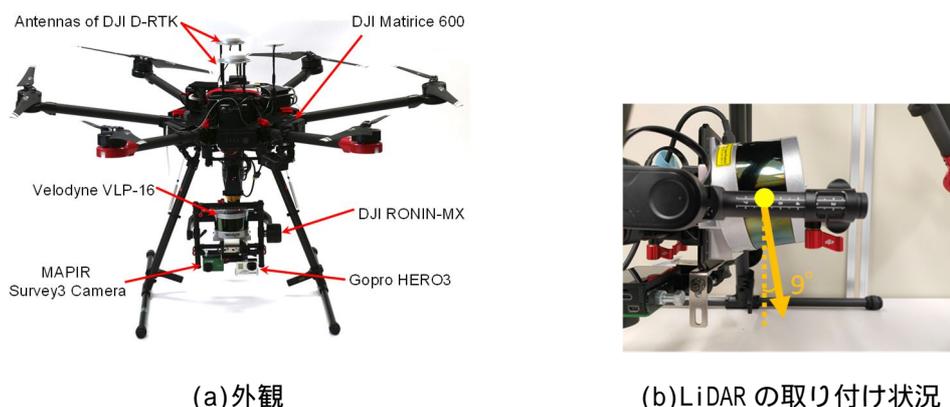


図 1 製作した UAV-LiDAR システム

##### (2) UAV-LiDAR 計測と入射角特性の分析

研究協力が得られた地元農協 (JA 越後ながおか山本支店) が定期的に生育調査を実施する指標田の一つ (新潟県長岡市宮路町) を対象に UAV-LiDAR 計測実験を 2019 年と 2020 年に実施した。UAV-LiDAR 計測期間は、2019 年は 5 月 30 日から 8 月 20 日 (田植え 5 月 21 日)、2020 年は 6 月 10 日から 7 月 30 日 (田植え 5 月 24 日) であった。作付け品種は兩年ともコシヒカリである。計測日は、生育調査日当日を基本としたが、天候条件により前後の日に実施し、概ね 10 日間隔で水稻群落の三次元点群を取得した。対象水田には、解析対象領域を 3 次元点群上で明確に判断するため反射マーカーを配置した。なお飛行高度と飛行速度は計画通り、10m と 1m/s とした。対象水田および UAV-LiDAR 計測の風景を図 2 に示す。



図 2 対象水田および UAV-LiDAR 計測の風景

入射角特性の分析の前処理として、取得した三次元点群への地図座標付与を実施した。予定していた 2 つの方式の内、LiDAR-SLAM 方式 (ROS-LOAM) では取得した三次元点群をうまく結合できなかった。水田付近では、市街地や森林域とは異なり地表面の凹凸など形状に特徴のある地物が少なく、LiDAR-SLAM がうまく機能しなかったと考えられる。そのため、2019 年以降の実験では、取得した三次元点群への地図座標付与は、ドローンの位置情報と LiDAR の姿勢情報および反

射マーカーの位置座標を利用する方式とした。図3に地図座標付与済の点群の可視化例を示す。

地図座標付与済の三次元点群において、レーザ入射角条件ごとに計測点の鉛直分布を作成し、LiDAR計測指標の挙動を分析した。ここでは、LiDAR計測した群落層厚さ(rD)に着目し分析を実施した。レーザ入射角条件は、走査角と走査面角の組み合わせを考慮し、走査角が6度未満、12~18度、24~30度、36~42度、48~54度、走査面角が6度未満、8~12度、14~18度、20~24度とした。図4に計測点の鉛直分布例を示す。図4では、水稻の生育が進むにともない、計測点の鉛直分布が群落上層部にピークをもつように変化していることが分かる。とくに、水稻群落にレーザ光が斜め入射する領域となる(b),(d),(f)では、その傾向が顕著に表れている。

計測点の鉛直分布の特性を集約したLiDAR指標のひとつである、LiDAR計測した群落層厚さに着目した。計測日毎に、レーザ入射角とLiDAR計測した群落層厚さの関係を調査した。結果の一例を図5に示す。この図をみると走査面角とLiDAR計測した群落層厚さの関係は、走査面角がほぼ鉛直(図5a)と斜め(図5b)の領域で概ね類似した挙動を示すことが分かる。水稻の生育の

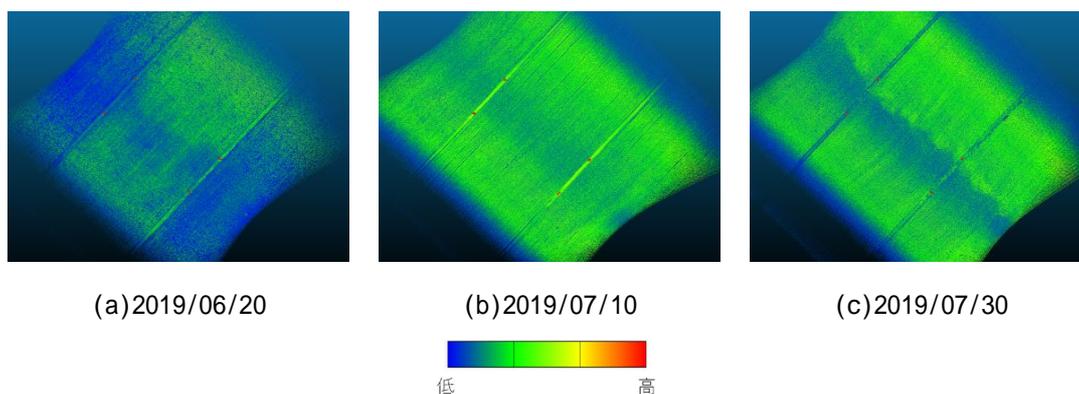


図3 計測点群の反射強度画像の例

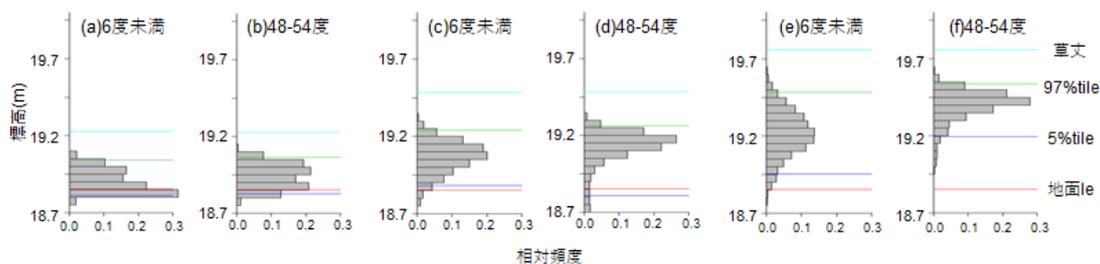


図4 計測点の鉛直分布の経時変化の一例。図はレーザ走査面角が6度未満であり、(a),(b)は2019/06/20、(c),(d)は2019/07/10、(e),(f)は2019/07/30の結果である。

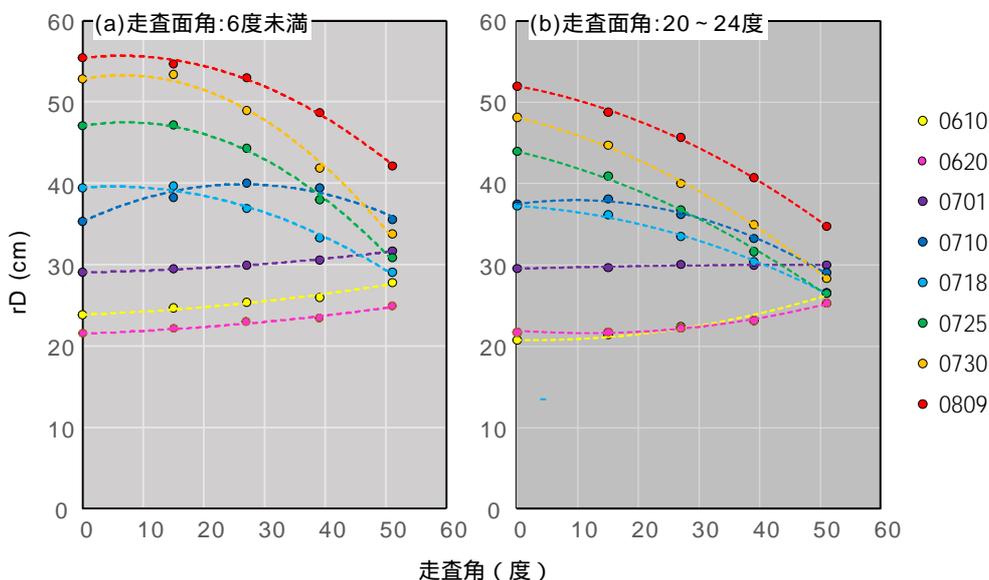


図5 レーザ入射角条件とLiDAR計測した群落層厚さの関係の一例(2019年)

進行にともなう、走査角とLiDAR計測した群落層厚さの関係は、稲株が小さい田植え後1カ月程度(～7/1)までは、単調増加傾向を示す。しかし、それ以降は走査角の増加に対してLiDAR計測した群落層厚さが減少する傾向となる。これは葉が繁茂することで株間・条間が閉塞し、レーザー光が群落下層に到達する割合が減少したことが反映したものと考えられる。また、走査角が50度を超える領域ではLiDAR計測した群落層厚さの経時変化が小さいことから、LiDAR計測基礎手法による草丈・茎数の推定が不可能になると推察される。

### (3) 草丈・茎数の推定範囲の拡張に関する検討

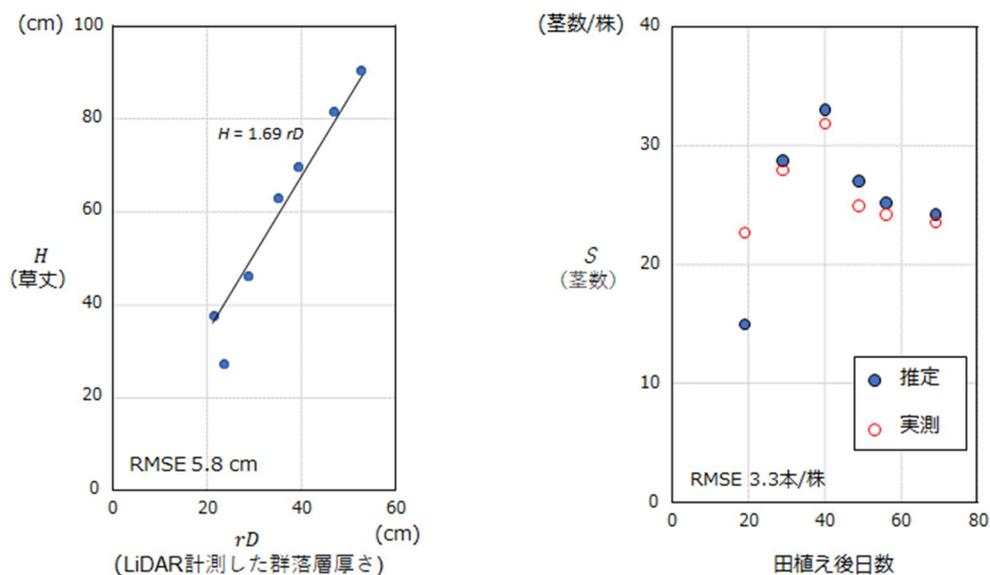
高度10mで取得した水稻群落の三次元点群へLiDAR計測基礎手法(レーザー光が群落に鉛直入射する領域に限定)を適用し、草丈・茎数の推定を試みた。2019年のデータへ適用した結果を図6に示す。2019年データにおける草丈・茎数ともに推定誤差は、ともに12%であった。この値は、LiDAR計測基礎手法開発時に使用した地上レーザLiDAR計測時と同程度である。このことから高度10mと比較的低高度ではあるもののUAV-LiDAR計測による水稻の草丈・茎数の推定は十分に可能であると考えられる。しかし、2020年データに対するLiDAR計測基礎手法の適用では、空間群立体積と茎数の間に関係が見いだせず、茎数推定には至らなかった(草丈推定はほぼ同程度の誤差)。群落空間体積は、水稻群落層に対応する点群が占める空間体積に関係する指標である。これまで、群落空間体積の計算対象点群をLiDAR計測した群落層厚さから決定していたが、この方法では地面付近の点群をうまく除外できない可能性が確認された。今後は、計測点の鉛直分布を分析し、地面付近の計測点を積極的に除外する方法を取り入れるなど群落空間体積の算出方法の修正が必要と考えられる。

前述したようにレーザー入射角条件とLiDAR計測した群落層厚さの関係は水稻の生育により変動する。しかし、計測日ごとに着目すると入射角とLiDAR計測した群落層厚さの関係は単調である。そこで、任意の入射角に対応する領域のLiDAR計測した群落層厚さ $rD(\theta)$ を入射角ゼロ度の領域のLiDAR計測した群落層厚さ $rD_0$ へ換算することで、レーザー入射角を考慮した草丈推定が可能か検討した。次の式は換算の考え方を定式化したものである。ここで右辺第二項は入射角に応じた修正量で、本研究では二次多項式とした。

$$rD_0 = rD(\theta) + f(\theta) \quad (1)$$

入射角(走査角)40度以下を対象に、2019年データへ式(1)を適用した。その結果、出穂直前の7月30日を除いて、換算誤差は1cmとなった。ただし、7月30日は換算誤差が10cmと大きく、入射角(走査角)の増加により急激にLiDAR計測した群落層厚さが変化する場合、多項式の次数を大きくするなどの対応が必要と考えられる。

しかし、多項式の係数は草丈とLiDAR計測した群落層厚さの関係により変動する。そのため、今回検討した方法の汎用性は高くない。UAV-LiDAR計測による広域の水稻草丈・茎数推定の実現には、レーザー入射角の影響をより普遍的に評価する方法の確立が不可欠である。



(a) LiDAR計測した群落層厚さと草丈の関係

(b) 実測・推定茎数の経時変化

図6 UAV-LiDAR計測データへのLiDAR基礎手法の適用例(2019年データ)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 山根 怜, 高橋一義, PHAN Anh Thu Thi, 佐藤栄一	4. 巻 67
2. 論文標題 車載LiDAR搭載UAVシステムによる低高度からの水稲草丈モニタリングの検討	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 第67回日本リモートセンシング学会学術講演会論文集(CD-ROM)	6. 最初と最後の頁 P2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 山根 怜, 合屋渉太, 高橋一義	4. 巻 -
2. 論文標題 低高度UAV-LiDAR計測による水稲草丈推定手法の検討	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本写真測量学会平成30年度秋季学術講演発表会論文集	6. 最初と最後の頁 137-138
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 GOYA Shota, RIKIMARU Atsushi, TAKAHASHI Kazuyoshi	4. 巻 57
2. 論文標題 Study of Foliage Abundance and Laser Incident Angles on Rice Plant Height Estimation using a short-range LiDAR measurement	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of the Japan society of photogrammetry and remote sensing	6. 最初と最後の頁 217 ~ 223
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4287/jsprs.57.217	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 A.T.T. Phan, K. Takahashi	4. 巻 16(1)
2. 論文標題 Rice Plant Height Estimation Using a Non-Survey Grade Laser Scanner: A Hokuyo UTM 30LX Case Study	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Geoinformatics	6. 最初と最後の頁 61-69
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Phan, A. T. T. , Takahashi, K	4. 巻 17(2)
2. 論文標題 Estimation of Rice Plant Height from a Low Cost UAV- Based Lidar Point Clouds	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Geoinformatics	6. 最初と最後の頁 89-98
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 市沢元規, Anh Thu Thi Phan, 高橋一義	4. 巻 69
2. 論文標題 車載LiDAR搭載UAVシステムによる水稲の茎数推定検討	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本リモートセンシング学会第69回学術講演会論文集	6. 最初と最後の頁 17-18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計3件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 山根 怜
2. 発表標題 車載LiDAR搭載UAVシステムによる低高度からの水稲草丈モニタリングの検討
3. 学会等名 日本リモートセンシング学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 市沢元規
2. 発表標題 車載LiDAR搭載UAVシステムによる水稲の茎数推定検討
3. 学会等名 日本リモートセンシング学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高橋一義
2. 発表標題 ドローン搭載LiDAR による水稻生育モニタリングの試み
3. 学会等名 日本ドローンコンソーシアム(招待講演)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	アンツウティ ファン (Anh Thu Thi Phan)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------