

令和 3 年 5 月 25 日現在

機関番号：12601  
研究種目：基盤研究(B)（一般）  
研究期間：2017～2020  
課題番号：17H03898  
研究課題名（和文）多方向ライダー計測による植物群落3次元計測法並びに植物構造・生理統合解析法の開発

研究課題名（英文）3D measurement of plant community with multidirectional lidar observation and development of plant structural and physiological analyzing method

研究代表者  
細井 文樹（Hosoi, Fumiki）  
東京大学・大学院農学生命科学研究科（農学部）・准教授

研究者番号：80526468  
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,000,000円

研究成果の概要（和文）：ライダーによる植物計測におけるブラインドエリア削減のため、SLAMによる地上測定やUAVによる方法を検討し、測定条件や異なる移動体での比較を行なった。その結果、ブラインドエリアをより削減するための測定条件を確認した。得られた植物3次元画像から、構造情報の抽出法を検討し、葉傾斜角の自動抽出方法を開発した。3次元ライダー画像と2次元カメラ画像をコンポジットする技術を開発した。本方法により、植物のクロロフィル3次元空間分布や、葉温の3次元空間分布を得られることが示され、植物生理や生化学特性の3次元空間分布を得る方法を開発することができた。

#### 研究成果の学術的意義や社会的意義

3次元測定器であるライダーにより植生3次元情報を得ることは、気候変動や大気汚染などの植生への影響モニタリングにおいて極めて有効だが、ライダーのレーザーが届かないエリアであるブラインドエリアの存在がその精度に影響していた。本研究では自動運転などに使われるSLAM技術をもとに、地上、上空から多方向計測によりブラインドエリアの問題を解消しようとしたもので、本研究で得られた知見を使えば、より精度の高い植生モニタリングが可能となる。また、植生の3Dと2Dの画像を統合する技術を開発し、これにより植物の生理的な情報の3次元空間分布も得られ、植物の本質的特性に立脚したモニタリングの可能性を切り開いた。

研究成果の概要（英文）：The method of plant measurement using lidar was investigated based on SLAM system on the ground and from the air with UAV for decreasing blind area in lidar measurement of plant. In the investigation, different measurement conditions were tried and different platforms were compared, so that the suitable conditions became clear. The method to extract 3D structural information from the obtained 3D images were investigated and the automated method of extracting leaf inclination angle distribution was developed. An image fusion method was developed for plant images taken using a 2D camera and 3D lidar. It was demonstrated that 3D spatial distributions of chlorophyll and temperature of plant were available by this method. The method to obtain 3D spatial characteristics of plant physiology and biochemistry could be developed.

研究分野：リモートセンシング

キーワード：ライダー リモートセンシング UAV SLAM 植生 3次元画像 画像合成

## 1. 研究開始当初の背景

気候変動や大気汚染に対する植生のレスポンスを把握し、対策を講じるためには、植物の構造や生理特性の正確かつ迅速なモニタリングが必要である。植生構造計測については、レーザービームをスキャン照射し、その反射光から対象の3次元（3D）点群画像を得るライダーが用いられている。ライダーには航空搭載型と地上の可搬型があるが、航空機ライダーでは樹冠下部が、可搬型ライダーでは樹冠上部がブラインドエリア、すなわちレーザービームが到達できずに情報が得られない領域となり、申請者らはこのブラインドエリアの存在がライダー画像からの植生構造特性推定に大きな誤差をもたらすことを確認しており（Hosoi and Omasa, 2007 J.Exp.Bot）、その削減は極めて重要な課題である。そこで申請者らは、異なる方向から植生にビーム照射をして得られたライダー計測データを合一することで、ブラインドエリア削減に一定の効果あることを確認したが（Hosoi and Omasa, 2010 IEEE Trans. Geosci. Remote Sens）、従来のライダーは移動性の問題などからビームの方向をそれほど数多くとれないため、ブラインドエリアを十分には削減できなかった。これより、ブラインドエリアを十分に削減するには、地上と上空にてライダーを自由に移動させ、様々な方向から漏れなく対象をレーザースキャンする必要があると考えられる。従来のライダーでは、そのような計測ポジションを自在に変えながら行うスキャンは難しい。

一方、近年、高速スキャンの2次元可搬型ライダーを移動体に乗せて移動しながら、自己位置推定と周辺の3D画像を生成していくSLAM（Simultaneous Localization and Mapping）という技術の発展が見られる。この方式はGPSや姿勢情報をとるIMUは必要なく、非常に軽量な2次元ライダーがあれば測定可能なため、UAVや車、さらには人が徒歩で測定するといったマルチプラットフォーム性を有する。本方法を使えば、上空も地上も樹冠内も自在に動き回り、対象を漏れなくスキャンしてブラインドエリアを削減できる可能性がある。

植生モニタリングには蒸散や光合成能力、含有色素量などの生理的特性の計測も欠かせない。植生の生理的特性はその3D空間分布に重要な意味がある。例えば光合成能力やクロロフィル量、窒素量などは植生内の3次元的位置により異なっており、それにより、植生は各部位で異なる光環境などの環境条件に適応している。植生生理特性の3D空間分布を捉え、その変化をモニターすることにより、周辺環境の変化に対して植生がどのように応答するのかを把握することができる。こうした空間分布は、分光画像や温度画像、蛍光画像などの生理特性を反映する画像データを活用できる。しかしこれらの画像は2次元（2D）であり、3次元的な解析は難しい。そこで、上述したようなブラインドエリアを削減した完全に近い形の植生3D画像を取得し、これに生理特性に関する2D画像をコンポジットすれば、植生全体の生理特性3次元空間解析が可能になると考えられるが、このようなフル3D画像へのコンポジット法は技術的難易度が高く、いまだ試みられていない。申請者らはこれまで、画像計測により、植物の構造や生理特性推定法に関する研究に従事してきた。特にライダーを用いた研究では、植物個体から群落まで、その構造特性の高精度抽出法を開発してきた。その一方で、現状のライダー測定では対象のブラインドエリアが生じ、それが構造推定を困難にすることや、植生の生理的特性を3次元構造とリンクさせ、3次元空間解析を行う方法が存在していないという認識のもと、これらを解決しようとしたのが、本申請である。

## 2. 研究の目的

(i) 植物群落の上部、下部からその内部に至るまで、植生のライダー計測におけるブラインドエリアを極力削減した植生3次元構造画像を取得する方法の開発。(ii) (i)で取得したブラインドエリアを極力排除した植生3次元画像から、有効な構造情報を取得する方法の開発。(iii) 植生の3次元画像に植生の生理的特性を与える2次元画像をコンポジットする手法の開発。(iv) (iii)より得られた構造と生理情報が統合された3次元画像データから、対象の構造特性や生理特性の3次元空間解析を可能とする技術の開発。

## 3. 研究の方法

(i) 地上およびUAV SLAMシステムによる対象植生スキャン  
まずはSLAMの基本となる地上でのSLAMシステムの測定条件の検討から行う。ここでは対象からの距離や他の3次元測定法であるSfMとの比較、徒歩や車載などのプラットフォームの違いによる影響評価などを行い、ブラインドエリア削減も含めた地上での測定法の最適化を検討する。次に上空からのUAV測定を行い、ブラインドエリア削減のための条件を検討する。

### (ii) 構造情報の抽出

(i)で得た対象植生の3次元構造データはこれまでのものより欠落部が少なく、構造パラメータの情報精度も高くなる。このデータを利用して、植生構造特性を抽出するための解析方法を検討する。具体的には、3次元点群データ内の個々の点群の並び方に着目し、必要な構造情報を得るための手法を検討する。

(iii) 植生 3次元画像に植生の生理的特性を与える 2次元画像をコンポジットする方法の開発  
ライダーと対象を結ぶライン上にカメラを配置し、投影面を同一にしたのちにデータ取得を行う。3D 構造画像と 2D 生理情報画像の両者の対応点の指定を行いながら、投影モデル計算による画像合成計算を行い、2D 画像の各画素の情報を対応する 3D 画像の各ボクセルの属性値としてさらに追加して格納することで、3D コンポジットモデルを生成する。カメラの種類を変えたり、カメラとライダーの位置関係や対象との距離、カメラの収差補正の方法等をあわせて検討する。また、対象植物の種類やサイズなども変えながら検討する。

#### 4. 研究成果

##### (i) 地上および UAV SLAM システムによる対象植生スキャン

本方法の研究成果については、対象樹木からの地上での徒歩によるスキャン適正距離を検討し、よりスキャン漏れが少なく、正確な情報を抽出する条件を導いた(板倉ら, 2018)。移動距離と対象の距離、レーザーの照射角度、樹木の高さによってレーザーがカバーできる領域が異なるため、その条件を理論と実測の両面から検討し、適切な条件式を導きだした。本方法は SLAM による地上測定の基本となるものである。図 1 にその例を示すが、ライダーと対象までの距離によって点群の密度が異なり、距離が適正でない(a)などは、樹冠上層部の点密度が低く、うまくカバーできていないことがわかる。

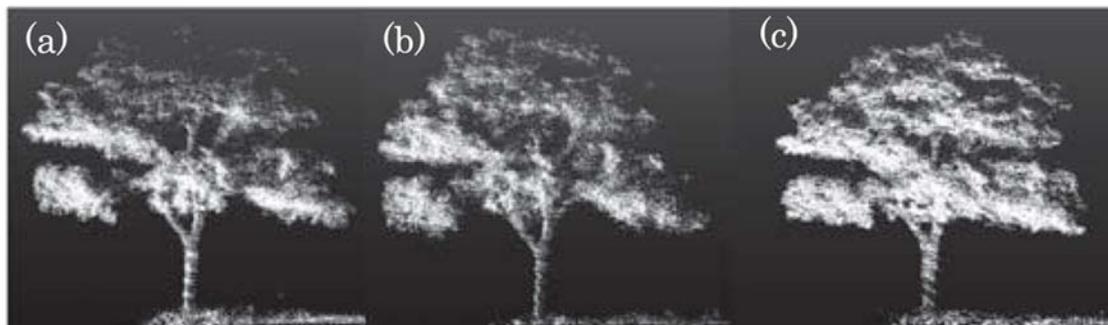


図 1 対象までの距離の違いによる 3次元画像点群画像の違い。対象とライダーの距離がそれぞれ(a) 8.5m (b) 9.7m (c) 10.9mの例(板倉ら, 2018、生態工学から引用)。

また SLAM の移動体の違いによる影響も検討し、徒歩は点群密度が非常に高く、車載ではそれに比べて低くなる結果が得られたが、車載は移動速度が 60 km/h でも推定した構造パラメータは良好な精度を維持しており、広くエリアをカバーするためには、車載も有効なプラットフォームとなりうることを示された(板倉ら, 2017)。図 2 は車載と徒歩の点群画像の例であるが、どちらも緑地の概形を正確に再現できていることがわかる。

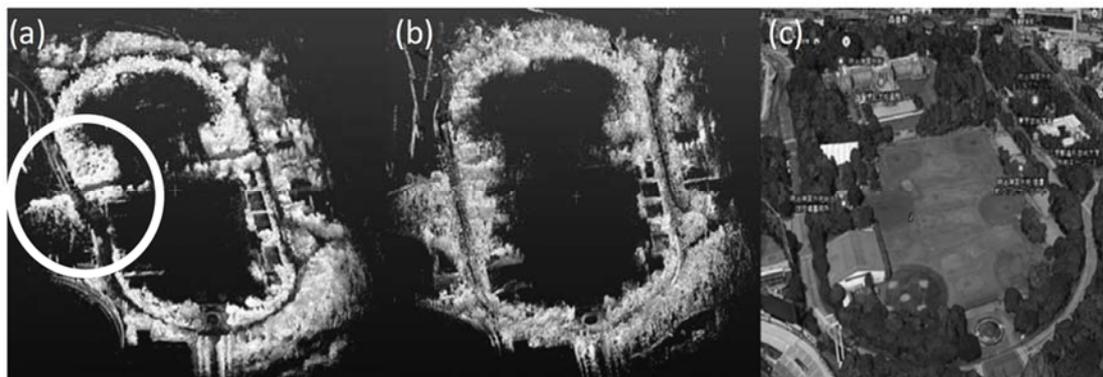


図 2 緑地を対象とした SLAM 3次元点群画像の例。(a) 車載 (b) 徒歩 (c) 写真(板倉ら, 2017、生態工学から引用)。

本研究ではライダーを想定しているが、近年急速に適用が進んでいる写真測量に基づく SfM (Structure from Motion) による 3次元測定結果との比較も行なった(板倉ら, 2018)。その結果、SfM はカメラの画角の範囲でしか 3次元画像化できないので広範囲の 3次元化が難しいのに対し、ライダーでは 360度スキャンをするため、より広く対象を 3次元化できる。この特性は、周囲を樹木に覆われる森林植生のデータ取得には極めて有効な特性であると言える。また、SfM はカメラから遠すぎるものや光条件によって暗くなった場所は 3次元化できないなど、複雑な明暗や遠近感のある実際の植生を対象とするには改良が必要となる。ライダーの場合、外光にはあまり影響を受けず、小径のビームをうまく樹冠に送り込むことができるため、ブラインドエリアの削減もよりやりやすいことが、再確認された。

UAV の測定については、ある程度ライダーの角度をつけることで、よりブラインドエリアの削

減が可能であることがわかった。飛行速度は低速ほどスキャン漏れが少なくなるため、機器の許す範囲で低速飛行させることが望ましい。

(ii) 構造情報の抽出

ブラインドエリアを削減した植物点群画像では、得られる構造パラメータの精度が増すだけでなく、その分布も植物全体の空間情報に基づくものとなり、その価値が増す。こうした質のよい樹木点群画像をもとに、葉の傾きを表す葉傾斜角の自動抽出方法の検討を行なった。葉の傾きを求めるためには、個々の葉に相当する点群をセパレーションし、異なる葉の点群が混じらないようにする必要がある。個々の葉のセパレーションに **k-means** クラスタリングを採用し、セパレートした点群に平面フィッティングを行い、自動的に正確な葉傾斜角分布を算出することができた (図3、kuo et al., 2019)。ブラインドエリアを減らす条件を採用しているため、ここで得られた角度分布は樹木全体のものとなり、有効な構造パラメータが算出できた。

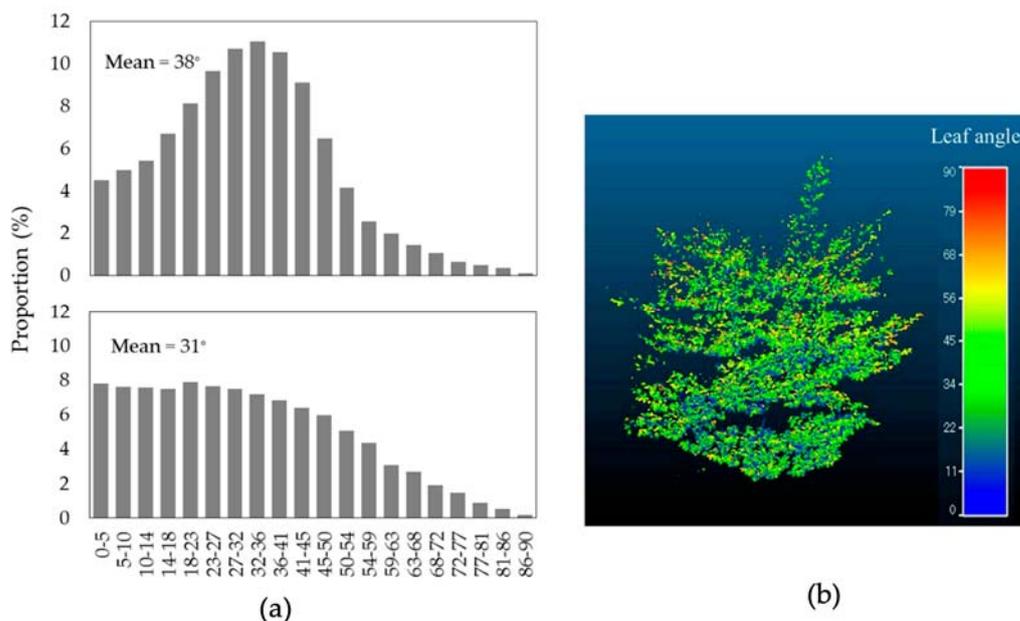


図3 樹木の葉傾斜角算出例。(a)上段 樹木上部、下段 樹木下部 の葉傾斜角分布。(b) 樹木全体の葉傾斜角分布 (kuo et al., 2019, Remote Sensing から引用)。

(iii) 植生3次元画像に植生の生理的特性を与える2次元画像をコンポジットする方法の開発  
本方法ではライダーによる3次元点群画像に2次元カメラ画像をコンポジットするものだが、両者は3次元と2次元という次元の異なる画像のため、そのコンポジットは特別に検討する必要がある。3次元画像を2次元平面に投影する場合、見る角度によってその投影画像は様々なものとなる。そこで、3次元画像の2次元投影面と、カメラで取得される画像の投影面を同一にすることで、ライダー3次元画像の2次元投影画像内の対象とカメラ2次元画像内の対象を同一の形状にすることができる。投影面を同一にする方法としては、データ取得時にライダーとカメラの光軸を揃えることによって可能となる (Hosoi et al., 2019)。投影面を合わせた画像について、対応点をもとに位置合わせをして画像合成し、もとの3次元画像に戻すことで、カメラ画像ののった3次元点群画像が作成される。カメラ画像は分光画像でも、サーマル画像でも、任意のカメラが使用可能であり、本方法により様々なカメラとライダーとの融合が可能となり、多様な植物生理情報が3次元構造とともに、統合的に解析可能となる。図4は分光画像をもとにクロロフィル濃度に変換されたクロロフィル濃度分布3次元点群画像及びサーマル画像による温度3次元点群画像の例である。こうして作成された植物生理や生化学情報3次元画像は、任意の断面で自由に空間分割することが可能であり、クロロフィルの垂直分布や、実測では測定困難な水平断面内でのクロロフィル分布といった、これまで扱うことがほぼできなかった植物生理特性空間分布も得られるようになった (図5)。

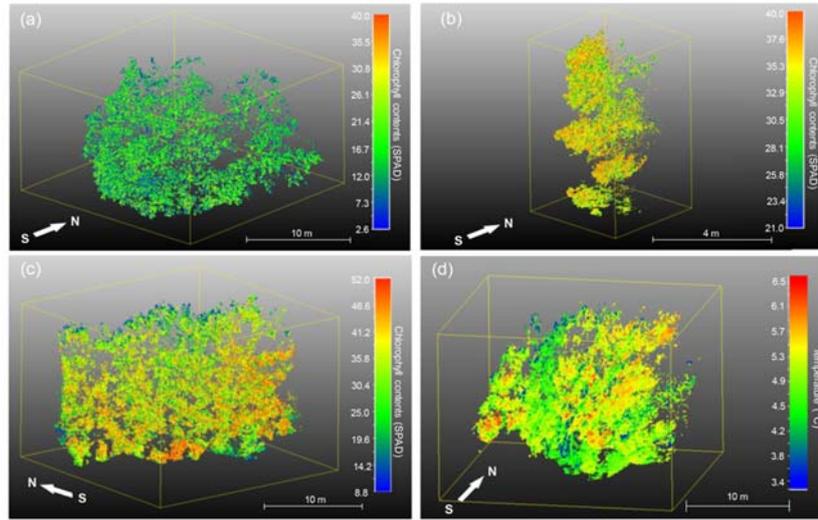


図4 3次元クロロフィル(a),(b),(c)および温度((d))点群画像の例。(a)ソメイヨシノの単木(b)シラカシの単木 (c) シラカシ群落 (d) シラカシ群落 (Hosoi et al., 2019, Remote Sensing から引用)。

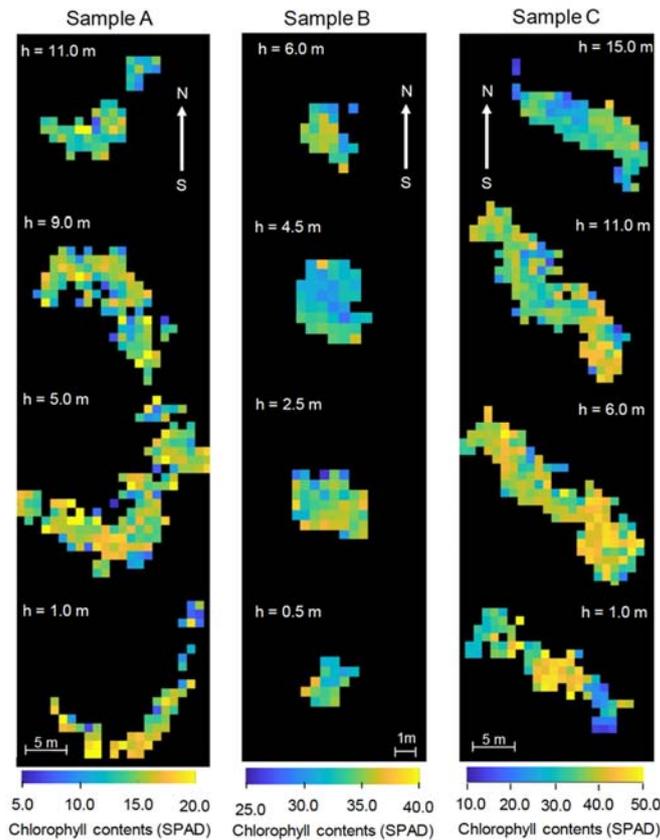


図5 クロロフィルの水平分布。(a) ソメイヨシノ単木(b)シラカシ単木 (c)シラカシ群落。h は高さを表す (Hosoi et al., 2019, Remote Sensing から引用)。

(iv) その他

本研究を遂行することにより、本研究と関係の深い植物画像計測に関する新たな知見や技術の開発が行われた。得られた3次元画像から、一本一本の樹木を分離し、個々の樹木の構造解析を可能とする技術を開発した (Itakra and Hosoi., 2018)。カメラ画像にうつる植物に対して、動的輪郭モデルと深層学習を適用することで、品種の分類を可能とした(板倉ら 2018)。また SfM において、画像のブレが生成される植物3次元画像の品質を下げる問題に対して、画像にフーリエ変換を適用し、その画像に深層学習を適用することで、ブレを除去し、精度の高い植物3次元画像生成ができることを示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Kenta Itakura, Fumiki Hosoi	4. 巻 74
2. 論文標題 Estimation of tree structural parameters from video frames with removal of blurred images using machine learning	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Agricultural Meteorology	6. 最初と最後の頁 154-161
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2480/agrmet.D-18-00003	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 -

1. 著者名 板倉健太, 鎌倉以直, 細井文樹	4. 巻 29
2. 論文標題 手持ちおよび車載されたLIDARを用いた 樹幹直径の推定に関する研究	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 生態工学	6. 最初と最後の頁 107-113
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11450/sei tai kogaku.29.107	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 -

1. 著者名 板倉健太, 鎌倉以直, 細井文樹	4. 巻 30
2. 論文標題 移動型スキャングライダーによる樹高測定に必要な移動距離の算出および地上および高所からの3次元画像の位置合わせによる樹高測定	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 生態工学	6. 最初と最後の頁 7-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11450/sei tai kogaku.30.7	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 -

1. 著者名 板倉健太, 鎌倉以直, 細井文樹	4. 巻 30
2. 論文標題 ライダーおよびSfMを用いた地上における 植生の3次元計測手法の比較研究	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 生態工学	6. 最初と最後の頁 15-20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11450/sei tai kogaku.30.15	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 -

1. 著者名 板倉健太, 細井文樹	4. 巻 30
2. 論文標題 動的輪郭モデルを用いた植物と画像背景の分離および転移学習による植物分類	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 生態工学	6. 最初と最後の頁 81-85
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11450/seitaikogaku.30.81	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 -

1. 著者名 Kenta Itakura, Fumiki Hosoi	4. 巻 74
2. 論文標題 Automatic each tree detection and canopy segmentation from three-dimensional point cloud images obtained from ground-based lidar	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Agricultural Meteorology	6. 最初と最後の頁 109-113
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2480/agrmet.D-18-00012	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 -

1. 著者名 Kenta Itakura, Fumiki Hosoi	4. 巻 74
2. 論文標題 Estimation of tree structure parameters from video frames with removal of blurred images using machine learning	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Agricultural Meteorology	6. 最初と最後の頁 154-161
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2480/agrmet.D-18-00003	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 -

1. 著者名 Fumiki Hosoi, Sho Umeyama, Kuanting Kuo	4. 巻 11
2. 論文標題 Estimating 3D chlorophyll content distribution of trees using an image fusion method between 2D camera and 3D portable scanning lidar	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 remote sensing	6. 最初と最後の頁 2134
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/rs11182134	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 Kuanting Kuo, Kenta Itakura, Fumiki Hosoi	4. 巻 11
2. 論文標題 Leaf segmentation based on k-means algorithm to obtain leaf angle distribution using terrestrial LiDAR	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 remote sensing	6. 最初と最後の頁 2536
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/rs11212536	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 細井文樹	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 レーザーキャナを使った植生計測における現状と展望	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本リモートセンシング学会誌	6. 最初と最後の頁 印刷中
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 -

〔学会発表〕 計11件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Kenta Itakura, Fumiki Hosoi
2. 発表標題 Automatic measurement of tree structure using machine learning
3. 学会等名 International Symposium on Agricultural Meteorology 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 板倉健太, 細井文樹
2. 発表標題 自動セグメンテーションによる植物の葉面積、葉傾斜角の推定
3. 学会等名 農業施設学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kenta Itakura, Fumiki Hosoi
2. 発表標題 Automatic individual tree detection and canopy segmentation from three-dimensional point cloud images obtained from ground-based lidar
3. 学会等名 The Remote Sensing Society of Japan
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 板倉健太, 細井文樹
2. 発表標題 画像解析を用いた葉の自動分離による葉面積、葉傾斜角の推定
3. 学会等名 生態工学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 板倉健太, 細井文樹
2. 発表標題 機械学習を利用したブレ検出による、動画からの植物構造の推定
3. 学会等名 生態工学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 板倉健太, 細井文樹
2. 発表標題 動的輪郭モデルを用いた植物と画像背景の分離および転移学習による植物分類
3. 学会等名 農業食料工学会関東支部
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 細井文樹, 潘 洋, 板倉健太
2. 発表標題 マルチプラットフォームライダーによる樹木構造計測
3. 学会等名 日本農業気象学会全国大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 板倉健太, 鎌倉以直, 細井文樹
2. 発表標題 手持ちおよび車載されたLIDARを用いた樹幹直径の推定に関する研究
3. 学会等名 生態工学会年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kenta Itakura, Icyoku Kamakura, Fumiki Hosoi
2. 発表標題 Calculation of moving distance when measuring tree height using portable scanning lidar and tree height measurement by using registration of images obtained on the ground and high places
3. 学会等名 International society of Paddy and Water Environment Engineering (Pawees) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 板倉健太, 鎌倉以直, 細井文樹
2. 発表標題 ライダーおよびSfMを用いた地上における 植生の3次元計測手法の比較研究
3. 学会等名 農業気象学会関東支部例会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kenta Itakura, Fumiki Hosoi
2. 発表標題 Automatic leaf segmentation in 3D plant images for estimating leaf area and leaf inclination angle.
3. 学会等名 International Symposium on Agricultural Meteorology (ISAM) (国際学会)
4. 発表年 2018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
研究分担者	清水 庸 (Shimizu Yo) (00323486)	高崎健康福祉大学・農学部・教授  (32305)	

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
---------	---------