

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 6 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25292154

研究課題名(和文) マルチプラットフォームライダーとSARの連携による植物群落3次元構造の広域推定

研究課題名(英文) Estimation of large scale three dimensional structure of plant communities by combining multi platform lidar and SAR

研究代表者

細井 文樹 (Hosoi, Fumiki)

東京大学・農学生命科学研究科・准教授

研究者番号：80526468

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、マルチプラットフォームライダーとSARを用いて、植物群落3次元構造の広域推定の可能性について検討した。ライダーでは、ボクセルモデリングをもとに、樹木の材積や葉面積密度、葉傾斜角の高精度推定方法を開発した。SARについては、植物の構造に依存した偏波散乱成分の分解により、植物構造情報を利用した解析ができることがわかった。プラットフォームにUAVを用いたUAVライダーについては、小型ライダーを搭載することにより、植物群落の高精度3次元画像が取得できるものを開発した。UAVライダーや可搬型ライダーとSARデータを利用することによる植物群落広域推定のための基礎的知見を得ることができた。

研究成果の概要(英文)：In this research, possibility of estimating large scale three dimensional structure of plant communities with multi platform lidar and SAR was investigated. Methods for accurate estimation of woody volume, leaf area density and leaf inclination angle of trees were developed based on voxel modeling with lidar measurements. In SAR analysis, it was confirmed that analysis using plant structural information was possible based on decomposition of polarimetric scatter components that depend on plant structure. UAV lidar mounting a small lidar was developed, by which precise 3-D images of plant communities could be obtained. Basic knowledge for estimating large scale structure of plant communities using UAV lidar, portable lidar and SAR could be obtained.

研究分野：農学

キーワード：可搬型ライダー 多偏波SAR 群落構造パラメータ プラットフォーム Unmanned Aerial Vehicle リモートセンシング

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化や生物多様性の喪失など、地球規模の環境問題が深刻さを増す中、地球観測技術の重要性が増しており、その一環として植物群落の構造やバイオマスの計測がさかんに行われている (Lefsky et al., 2002 Bioscience, Naeset et al., 2011 Remote Sens. Environ.). 気候変動による植物のレスポンスや生態系のメカニズムの変化を把握し、また、地球温暖化に関わる炭素収支の正確な推定を行い、その対策を講じるためには、植物群落の複雑な3次元構造を正確に計測し、モニタリングする技術が必要となる (Omasa et al., 2007 J. Exp.Bot.). 一方、農業分野においても生育モニタリングや収量推定に加え、環境負荷を低減するための精密農業などにおいて、植物の3次元構造を正確に計測し、その情報を利用する動きが広がっている (Hosoi and Omasa, 2012 ISPRS J. Photogramm., McKinion et al., 2010 Comput. Electron. Agr.).

植物の3次元計測については、近年、レーザーの反射光を検知して対象の3次元情報を得るライダーがさかんに用いられている。特に地上設置型の可搬型ライダーでは、高い空間分解能と距離精度から、植物群落の樹冠内部の詳細な情報が取得可能であり、この情報をもとに葉面積密度や葉傾斜角の空間分布、器官別バイオマス、ブランチングパターン、ギャップフラクション分布など、詳細な植物群落3次元構造パラメータを引き出すことが可能となってきた (Hosoi and Omasa, 2007 J. Exp.Bot.). この方法でカバーできる範囲は数m～数100mであるが、環境及び農業問題に対応する地球観測という観点では、さらに広く森林群落や圃場をカバーすることが必要となる。一方、航空機搭載型ライダーでは数kmの範囲の計測が可能であり、比較的広い範囲の樹高計測やバイオマス測定などが行われている (Hyyppä et al., 2012 Remote Sens. Environ.). しかし航空機ライダーは上空という一方向からの計測で、かつ可搬型ライダーほどビーム径も小さくないため、群落内部へのビームの侵入は限定的であり、航空機ライダー単体で可搬型ライダーのように樹冠内部の情報を十分に取出して詳細な3次元構造パラメータを引き出すことは、現状難しい。

全天候型衛星センサーである合成開口レーダー (SAR) は、数km～数100kmという広域の森林群落バイオマス推定や農作物の生育モニタリングに利用されてきている。本センサーは、マイクロ波の偏波特性を利用することで、植物群落の形状に関する情報を取得したり、マイクロ波の周波数を選択することで、群落内部までマイクロ波を浸透

させ、樹冠内部の情報を取得可能である。このように、本センサーは群落の形状や樹冠内部の情報を取得し、そこから詳細な3次元構造パラメータの広域推定を実現する可能性を秘めたセンサーであると言えるが、そのために必要な植物の3次元構造パラメータの地上での実測は、測定自体の労力が極めて大きく、破壊計測も伴うために計測可能なエリアが限定されるなど、衛星データに関連付けて解析するために必要な十分な量の3次元構造パラメータ実測データを得ることが、現実には極めて困難である。従って、群落内部の詳細な3次元構造をSARデータから推定するのは、現状困難であるといえる。申請者はこれまで、地上や航空機、人工衛星リモートセンシングを用い、植物群落構造の推定法の研究に従事してきた。特に可搬型スキヤニングライダーを用いた研究では、植物個体から群落まで、葉面積密度や葉傾斜角の空間分布、器官別バイオマスなど、その詳細な3次元構造パラメータを正確に効率よく算出する方法を開発してきた。その一方で、可搬型ライダーはカバーできる領域が狭く、また多地点観測するには労力と時間を必要とするため、対象となる植物群落の3次元構造パラメータを可搬型ライダーだけから広域で算出するのは困難であり、その広域への展開方法を模索する中で、本申請を着想するに至った。

2. 研究の目的

本研究では、森林群落及び作物群落を対象とし、複数のプラットフォームに搭載されたライダー計測により対象の3次元データを取得し、そこから対象の詳細かつ正確な3次元構造パラメータを算出し、得られたパラメータと衛星センサーであるSARデータから得られた構造パラメータとの関係から、広域に渡る対象植物の3次元構造パラメータの推定の可能性を検討することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) ライダーデータからの植物群落構造パラメータの推定精度の向上

ライダーとSARの連携による植物群落構造の広域推定においては、まずライダー単体の画像データから得られる植物群落構造パラメータの推定精度を高める必要がある。ライダー計測については、可搬型ライダーデータからボクセルモデリングを用い、バイオマスや葉傾斜角、葉面積密度の空間分布推定を高い精度で行える方法を開発する。得られた推定値を実測値との比較によって、その精度と有効性を検証する。対象としては、森林の木本群落と水田のイネ群落を用いる。

(2) SARデータからの植物群落情報抽出方法の検討

SARデータ単体の検討として、多偏波デー

タを用い、対象の構造による偏波の散乱過程の違いを利用し、植生構造情報を得る。そのため、どのような対象の構造がどのような散乱過程となるのかという視点に基づき、散乱強度を対象構造毎に分離する。具体的には、エントロピー α 分解、3成分分解、4成分分解など複数の分離方法を検討する。このような分離を行うことで、対象にどのような構造のものがどの程度の割合で含まれているのかを明確にし、植物群落の特徴的な構造特徴が抽出を試みる。

SARにより抽出した構造情報とライダーから得られる構造情報の関係について検討し、相互に相関させることで、広域植物群落構造推定の可能性について検討する。

(3) UAV 搭載型ライダーの開発

地上でのライダー計測の効率化とカバーするエリア拡大のため、UAV (Unmanned Aerial Vehicle)の一種である無人マルチローターヘリに軽量のライダーを装着して使用する方法も検討する。本 UAV は通常のラジコンヘリよりも取り扱い及び操縦が容易で、GPS と連動して自動的にコースを飛行する能力を有しており、地上付近から数 10~100メートル程度の高さまで、上空を低速で連続移動させながら、効率よくデータを取得することができる。本方法はデータ取得の効率化による計測範囲の拡大に加え、例えば森林群落の場合、地上からアクセスしにくい樹冠上部のデータも取得できるため、より精度の高い対象の3次元点群データの取得も可能となると考えられる。この UAV にライダーを搭載可能となるよう、装置の設定や装備の設計を主とした開発を行う。

4. 研究成果

(1) ライダーデータからの植物群落構造パラメータの推定精度向上—材積の推定

植物群落構造パラメータとして重要な、樹木の材積高精度推定方法を検討した。

本方法では、まず落葉期に計測を行い、葉のない状態の樹木のデータを取得する。得られたライダーデータから、ボクセル座標系への変換を行う。変換後、幹に相当する部分の内部をボクセルで埋めてしまう。このように内部が充填されることで、ボクセル数をカウントし、そこにボクセル一個あたりの体積を乗じることで、体積が算出される。結果を図1に示す。

図1より、実測値と比較すると、平均相対誤差は6.8%であり、高い精度の材積推定が本方法によって可能であることが示された。本方法は従来の幹直径や樹高と材積の相関式を利用するより極めて精度が高く、また、事前にそのような材積式を得る必要なく、ラ

イダーデータのみから複雑な形状の樹木でも高精度に材積が算出できることが極めて有益である。

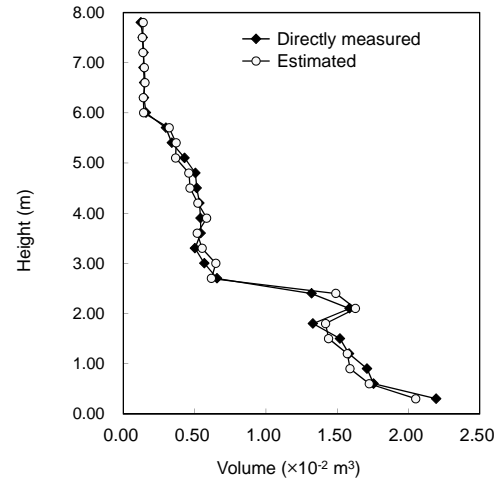


図1 高さ毎の材積推定結果 (細井ら、*ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2013より引用)

(2) ライダーデータからの植物群落構造パラメータの推定精度向上—葉面積密度の推定

植物群落構造パラメータとして重要な、葉面積密度の推定精度を上げる方法を検討した。

対象としてイチヨウ群落を選択し、地上と10mの高さの高所からライダーによる測定を行った。ライダーデータをボクセル化し、そのボクセルの属性をカウントすることで葉面積密度を算出した。地上計測では樹冠の上部が、高所計測では樹冠の下部が過小評価となったが、これら両者を合一することで両者の過小評価部が補間され、葉面積密度分布の推定精度が向上した (図2)。

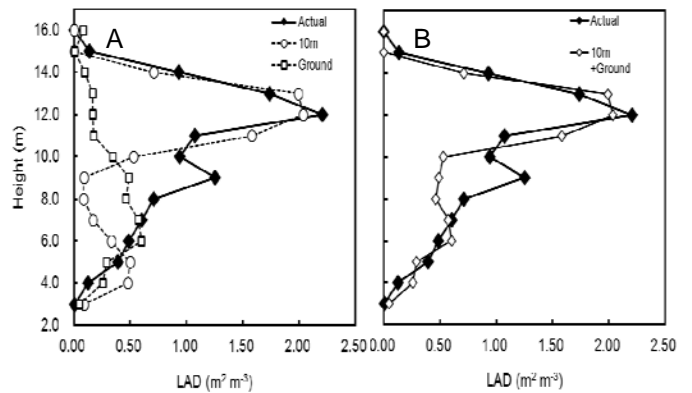


図2 イチヨウにおける葉面積密度推定結果。Aは地上と10m高所、実測値を併記したもの、Bは両者を合一したもの (細井ら、*生態工学*、2014より引用)。

(3) ライダーデータからの植物群落構造パラメータの推定精度向上—葉傾斜角の推定

植物群落構造パラメータとして重要な、樹木の葉傾斜角季節変化の高精度推定方法について検討した。

空間分解能が mm オーダーの可搬型ライダーを使用し、5月～11月に渡ってイチョウを対象として測定を行った。ライダーデータから 150 枚の葉に相当するデータを抜きだし、各葉に相当するデータに 3次元平面フィッティングを施し、その平面の法線から葉傾斜角を算出した (図 3)。結果は各季節変化の植物の状態を反映し、植物の季節変化を高精度にモニターする方法論を確立することができた。

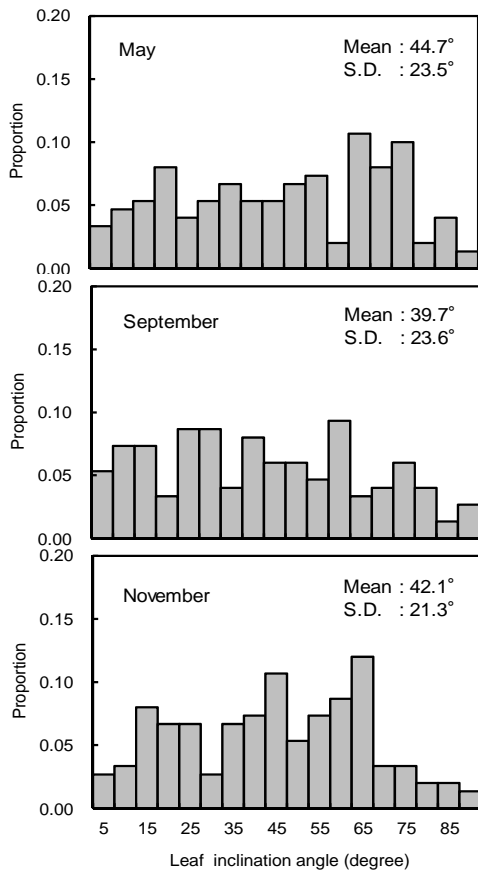


図 3 ライダー計測により求めた葉傾斜角分布の季節変化 (水城ら、生態工学、2015 より引用)。

(4) SAR データからの植物群落情報抽出方法の検討—自然災害と耕作放棄地

SAR データから植物群落の情報をとるにあたって、植生だけでなく、植生以外の人工物や水域などがどのような偏波特性を持っているかを把握し、対象の特性に応じた偏波特性をまずは明確にする必要があった。この目的のため、津波被害によって水害が生じた領域の推定を偏波特性に基づいて推定する方法を試みた (打田ら、生態工学、2015 より引用)。ここでは津波浸水エリアを対象と

した ALOS PALSAR の L バンド SAR フルポラリメトリ画像を入手し、多偏波散乱行列から平均化 Coherency 行列を得た。ここから表面散乱成分、2 回反射成分、体積散乱成分に相当する項をもとに、植生や水域、都市域、田畑に分類した。その結果、都市域は 2 回反射成分が強く、植生は体積散乱成分が強いなど、分類カテゴリーごとに特徴的な散乱成分があることがわかった。

このような散乱傾向をもとに、植物を対象として取り扱うため、耕作放棄地と耕作地の分離が可能かどうか検討した。ここでは二偏波 SAR 画像を用いたが、耕作放棄地では雑草の繁茂により、よりランダムな状態の散乱信号強度が増し、HH 成分と HV 成分の位相差がランダムとなることが考察された。以上により、SAR の偏波データを用いて、耕作放棄地と耕作地の区別ができることがわかった (図 4 参照。山城ら、生態工学、2014)。これにより、植物の散乱特性に関する知見が得られた。

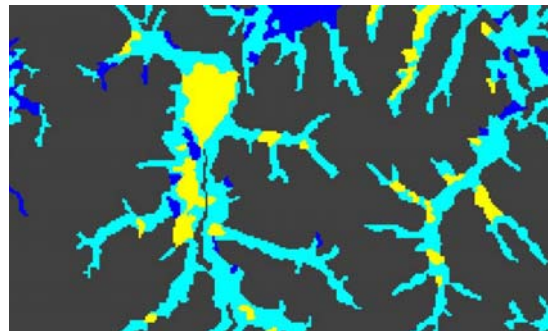


図 4 二偏波 SAR 画像による耕作放棄地と耕作地の分類結果 (山城ら、生態工学、2014) 黄：水田 水色：耕作放棄地 青：住宅地

(5) SAR データからの植物群落情報抽出方法の検討—針葉樹と広葉樹の分類

(4) までの検討で得られた植生の偏波散乱特性の知見をもとに、樹種ごとの構造情報の違いに関する情報が得られるかどうか検討した (打田ら、生態工学、2015)。ここでは散乱成分の 4 成分分解法を適用し、それぞれの成分が樹種によってどのように異なってくるかを検証した。その結果、4 成分のうち、ヘリックス散乱成分が針葉樹と広葉樹で異なっていることがわかった。ヘリックスは枝や幹の交差状態の違いによりその散乱強度に違いが生じるため、針葉樹と広葉樹の幹や枝の構造情報の違いがこの散乱成分に現れることが考察された。ヘリックスを含めた 4 成分散乱成分の違いにより、針葉樹と広葉樹の分類ができることがわかった (図 5)。

ここまで、可搬型ライダー単体と SAR データから植生構造情報が得られることがわかった。特に SAR データより、幹や枝の構造情報や下部構造の情報が得られることがわかったため、こうしたデータを可搬型ライダーからの求めた植生構造推定値と関係付ける

ことで、広域植生構造推定の可能性があることがわかった。今後、植物群落構造の広域推定を行うための基礎的知見が得られたことが大きな成果と考えられる。

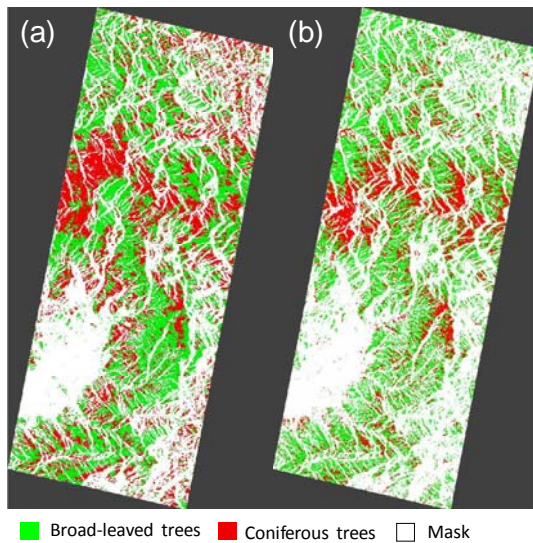


図5 SARフルポラリメトリデータを用いた針葉樹と広葉樹の分類結果。(a)検証データ (b)SARフルポラリメトリ4成分分解法による推定結果(打田ら、生態工学、2015より引用)。

(6) UAV搭載型ライダーの開発

UAVに搭載する小型ライダーの発売が26年度後半と遅れたが、これを購入後、動作確認とライダーデータをもとに3D画像を生成するアルゴリズム(SLAM方式)を決定した。このライダーシステムの場合、UAVだけでなく、車載や徒歩などあらゆるプラットフォームに対応できることがわかり、当初の予定より汎用性の高いシステムを構築することができた。このシステムを用いて樹木を測定したところ、極めて詳細な3D画像が得られることが確認され(図6)、その画像から構造パラメータを推定した結果、実用可能な良好な精度を有していることがわかった(潘ら、生態工学、2016)。



図6 SLAMにより得た樹木3D画像(潘ら、生態工学、2016より引用)

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 10件)

- ① 潘 洋, 郭冠霆, 細井文樹. SLAMにより取得された3次元点群画像からの樹幹直径及び樹高の推定に関する研究, 生態工学, 査読有, 29巻, 2017, 17~22. <http://doi.org/10.11450/seitaikogaku.29.117>
- ② 飯田裕太, 細井文樹, 大政謙次. 常緑樹を対象とした二波長可搬型スキャニングライダーデータにおける器官分離手法に関する研究, 生態工学, 査読有, 28巻, 2016, 113-118. <http://doi.org/10.11450/seitaikogaku.28.113>
- ③ 草場剛史, 細井文樹, 内藤裕貴, 大政謙次. 中距離可搬型スキャニングライダーを用いた高所からの水稻植物面積密度垂直分布の推定, 生態工学, 査読有, 28巻, 2016, 61-65. <http://doi.org/10.11450/seitaikogaku.28.61>
- ④ 打田欽也, 細井文樹, 大政謙次. SARフルポラリメトリを用いた針葉樹と広葉樹の分類手法に関する研究, 生態工学, 査読有, 27巻, 2015, 117-121. <http://doi.org/10.11450/seitaikogaku.27.117>
- ⑤ 水城秀平, 細井文樹, 大政謙次. 高解像度可搬型スキャニングライダーを用いたイチョウの葉傾斜角分布季節変化の計測, 生態工学, 査読有, 27巻, 2015, 99-103. <http://doi.org/10.11450/seitaikogaku.27.99>
- ⑥ 打田欽也, 細井文樹, 大政謙次. SARフルポラリメトリを用いた津波水害領域の抽出に関する研究, 生態工学, 査読有, 27巻, 2015, 43-47. <http://doi.org/10.11450/seitaikogaku.27.43>
- ⑦ 山城 悠, 細井文樹, 大政謙次. 二偏波合成開口レーダー画像を用いた耕作放棄地の推定, 生態工学, 査読有, 26巻, 2014, 107-111. <http://doi.org/10.11450/seitaikogaku.26.107>
- ⑧ 細井文樹, 大政謙次. 3次元リモートセンシングによる森林構造の計測と解析, 日本生態学会誌, 査読有, 64巻, 2014, 223-231. http://doi.org/10.18960/seitai.64.3_223
- ⑨ 細井文樹, 上野 伸, 水城秀平, 大政謙次. 地上及び高所からの可搬型スキャニングライダー計測によるイチョウ群落葉面積密度分布の推定, 生態工学, 査読有, 26巻, 2014, 45-49. <http://doi.org/10.11450/seitaikogaku.26.45>
- ⑩ F. Hosoi, Y. Nakai, K. Omasa. 3-D voxel-based solid modeling of the broad-leaved tree for accurate volume estimation using portable scanning lidar. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 査読有, 82巻,

〔学会発表〕（計8件）

- ① 細井文樹, 打田欽也, 大政謙次. SAR フルポラリメトリ画像を用いた樹種分類, 生態工学会, 2016年6月25日, 宮崎グリーンズフィア一番館コンベンションホール (宮崎県宮崎市) .
- ② 細井文樹, 大政謙次. 可搬型スキャニングライダーによる広葉樹葉傾斜角分布の計測, 生態工学会, 2015年6月27日, 明治大学黒川農場 (神奈川県川崎市) .
- ③ 細井文樹, 大政謙次. 可搬型スキャニングライダーを用いた高さ毎の葉傾斜角分布の計測, 農業情報学会, 2015年5月14日, 東京大学弥生講堂 (東京都文京区) .
- ④ F. Hosoi. Voxel-based tree modeling from lidar images for extracting tree structural parameters, 18 December, AGU Fall meeting (Invited) , Moscone center (San Francisco, CA).
- ⑤ 細井文樹, 中井洋平, 大政謙次. スキャニングライダーによる樹木のソリッドモデリング, 生態工学会, 2014年6月27日, プラザヴェルデ (静岡県沼津市) .
- ⑥ 細井文樹, 中井洋平, 大政謙次. 可搬型スキャニングライダーを用いたボクセルモデリングによる材積推定, 農業情報学会, 2014年5月14日, 東京大学弥生講堂 (東京都文京区) .
- ⑦ 打田欽也, 細井文樹, 大政謙次. 合成開口レーダーを用いた津波浸水地域の抽出に関する研究, 農業情報学会, 2013年5月16日, 東京大学弥生講堂 (東京都文京区) .
- ⑧ F. Hosoi, Y. Nakai, K. Omasa. Voxel tree modeling for estimating leaf area density and woody material volume using 3-D lidar data., 2013年11月12日, ISPRS workshop laserscanning 2013, WOW kremlin hotel (Antalya, Turkey).

〔図書〕（計0件）

〔産業財産権〕

- 出願状況 (計0件)
- 取得状況 (計0件)
- 〔その他〕
- ホームページ等
- なし

6. 研究組織

(1) 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・

准教授

研究者番号 : 80526468

(2) 研究分担者

清水 庸 (SHIMIZU Yo)

東京大学・大学院農学生命科学研究科・
助教

研究者番号 : 00323486

大政謙次 (OMASA Kenji)

東京大学・大学院農学生命科学研究科・
研究員

研究者番号 : 70109908

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

なし