

スマートな森林経営を実現する、異なる空間スケールにおける 針葉樹蓄積推定手法の開発

農林環境専門職大学 短期大学部
講師 星川健史

Ⅰ 研究目標と成果の概要

静岡県の林業振興では、需給バランスを維持した増産が求められる。富士市にある合板工場は、静岡県内原木生産量の多くを消費する一大需要者であり、供給者の林業事業体は、それに見合った計画的安定供給が求められる。林業事業体は、詳細な森林データベースが未整備のため、樹種別生産量計画を立てにくい。この課題の解決は、静岡県の行政課題：林業における需要と供給の一体的創造に貢献する。

富士山麓は、スギ・ヒノキ以外にもモミ等が分布するため、多様な針葉樹林の適切な管理が求められる。しかし、リモートセンシング技術を用いた樹種判別は世界的に実用的技術が確立されていない。

スマート林業の技術として着目されているリモートセンシング等を用いて林分レベルから地域レベルの異なる空間スケールにおいて、1) 機械学習を用いた材積の推定と2) 機械学習を用いた針葉樹種の識別を同時に達成することで森林経営に有効な情報を提供することを研究の目的とする。

ここで、計測手法の効率と精度には負の相関関係がある。すなわち、効率が高いほど精度は低く、精度が高いほど効率が低い。異なる空間スケールにおいて、求められる効率と精度は異なり、要求に応じた計測手法の選択が重要となる。本研究では、3つの空間スケールにおいて、求められる効率を考慮した計測手法を選択し、実用的な目標精度を設定した。いずれの空間スケールにおいても、目標精度を上回る精度で原木生産量の推定および針葉樹種の識別に成功した。

1) 機械学習を用いた材積の推定

空間スケール	計測手法	目標精度	到達精度
林分（数ヘクタール）	バックパックレーザー	95%	96%
森林（数十ヘクタール）	ドローン写真	90%	93%
地域（数千ヘクタール）	衛星画像・航空機レーザー	70%	83%

2) 機械学習を用いた樹種の識別

空間スケール	計測手法	目標精度	到達精度
林分（数ヘクタール）	バックパックレーザー	-	-
森林（数十ヘクタール）	ドローン写真	90%	96%
地域（数千ヘクタール）	衛星画像・航空機レーザー	70%	88%

II 個別の研究成果

1. バックパックレーザーによる材積の推定

バックパックレーザーは、1または2個のレーザースキャナを搭載した計測器を背負い、歩行しながら連続的に地物の形状を計測するものである。地上からの計測となるため、森林の計測においては樹冠に遮られることなく幹の形状を捉えることができる利点がある。調査地は、静岡県富士山の麓の森林に位置する。調査地は、主要林業樹種であるスギとヒノキが植栽されている。調査地には400m² (20m×20m) の5つの区画を設置した。地表から約1.3mのところにある幹の直径（胸高直径、DBH）、樹高をスチールメジャー及び測高器を用いて調査した（従来法）。各プロットにおいて、すべての樹木の位置をマッピングした。4つの区画の地形はほぼ平坦で、1つの区画の地形は急な斜面であった。

バックパックレーザーシステム（D50, GreenValley Intl.）を用いて、上述の調査地を計測した。バックパックレーザーシステムを背負った調査者が各区画の外周を歩き、区画内の立木をスキャンした。ソフトウェアLiDAR360 ver. 3.2（GreenValley Intl., California, USA）を用いて、レーザースキャンで得られた点群データから、樹木の位

置、DBH、樹高を一括して抽出した。Ishiharaら（2015）の方法を用いて、DBHと樹高から幹のバイオマスを推定した。

バックパックレーザー法によって検出された樹木の本数は、従来法の本数と一致した。すなわち検出率はすべてのプロットで100%であった。バックパックレーザーは、移動しながらスキャンすることで、特定の方向にあるセンサーの死角をなくすることができるためだと考える。DBH推定のRMSEは2.0cmから3.1cm、相対RMSEは6.8から10.0%であった。バイアスは-2.9cmから-1.5cmで、相対的バイアスは-9.3%から-5.0%であった。バックパック型LiDARの測定値が従来の方法に比べて過小評価されている傾向が見られた。バックパックレーザーは設置型の地上レーザーよりもDBHの精度が高い。TLSはDBHを過大評価する傾向があり、バックパックLiDARは過小評価する傾向がある。今回のDBHの結果は、これまでの研究でBack-pack LiDARの手法を用いて得られた結果に近い。本研究では、樹皮の粗さがある程度あるスギとヒノキを対象とし、幹の断面を円に近似させた。これらの要因により、本研究ではDBHを過小評価している可能性がある。

樹高推定のRMSEは1.0mから1.8mの範囲で、相対RMSEは5.4から10.1%であった。バイアスは-1.6mから-0.5m、相対バイアスは-9.0%から-2.8%の範囲であった。DBHと同様にバックパックLiDARの測定値が従来の方法に比べて過小評価されている傾向が見られた。TLSはTHを過大評価する傾向にあるが、Back-pack LiDARは確実にTHを過小評価している。THが過小評価される一般的な理由は、高木の広い樹冠によって樹上の視界が遮られるためである。THの過小評価は、上部キャノピーでのサンプルポイント密度が低いことに起因する。本研究の過小評価には原因が考えられる。本研究のTHの結果は、Koら（2021）のBack-pack LiDARを用いた結果に近い。バックパックレーザー法による幹のバイオマスの精度は、DBHよりも樹高の影響が大きいことがわかった。

バックパックレーザー法は、森林の樹木やその他の特性を記録するための新しい測定原理を提供するものである。本研究では、バックパックレーザーによるDBH、樹高、および幹のバイオマスの測定誤差を従来の方法と比較して評価し、その結果、過小評価されていることを明らかにした。本研究で行なったバックパックライダー法は、森林のインベントリと管理のための効率的で実用的なツールに進化させることができる明確な

能力を持っていることを示している。

2. ドローン写真による材積の推定

目的

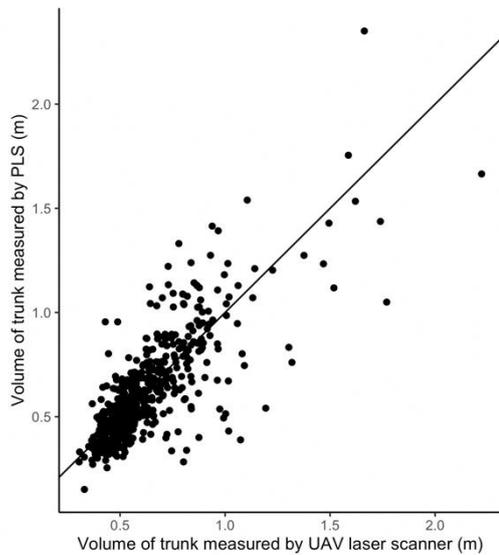
ドローン技術・写真測量技術の急速な進展により、上空から観測可能な地物の色や立体形状を計測することが容易になっている。森林において、樹冠の形状を計測することにより、既存の地形情報と併せて解析して林分レベルで材積を計測できるのか検証した。

方法

富士市市有林（18.7 ha）を対象とし、ドローン写真測量により立木幹材積を推定した。その手順は、まずドローン（Phantom4 Professional v2.0、DJI社）のプログラム飛行により対象地全域を網羅する多数の空中写真を撮影した。次に、Pix4D mapper（Pix4D社）で3次元モデルを生成、点群データからdrone2cw（名古屋大学）により単木抽出、樹高と個体位置を求め、胸高直径を推定式により求めた。胸高直径の推定式は、バックパックレーザー計測で得られた胸高直径を、樹高と樹冠投影面積から一般化線形モデルを用いて作成した。標準地調査は、5つのプロット（20 m×20 m）を設定し、毎木調査により胸高直径、樹高、個体位置を調べた。バックパックレーザー計測（LiBackpack D50、GVI社）は、標準地調査と同じ調査地の外周を周回するように計測し、LiDAR360（GVI社）を用いて胸高直径、樹高、個体位置を調べた。バックパックレーザー計測を地上調査と比較して精度を確認した後、バックパックレーザー計測を真値として無人ヘリコプターレーザー測量とマルチローター写真測量の精度を検証した。

結果

ドローンを用いた手法により、調査地内に12094本の樹木を検出した。16か所の標準地内における樹木の検出率の平均は111%と誤検出がやや多かった。推定式により求めた胸高直径をバックパックレーザーと比較したところ平方根平均二乗誤差（RMSE）で3.60 cmと精度が高かった。したがって、ドローンを用いた手法は、毎木調査やバックパックレーザーなどの労力の大きい地上調査と比較しても、実用的な精度で立木評価を行えることがわかった。



ドローン法とバックパックレーザー法のそれぞれで得られた材積の関係



ドローン空中写真から作成した高精細なオルソ画像の例

黄線は対象地を示す。

3. 衛星画像による材積の推定

はじめに

衛星画像による森林測量には、次のようなものがある。Landsat等の無料だが低解像度(30m/pixel)のもの、WorldView-2、SPOT棟の高解像度(0.5m/pixel)だが高価なもの、

そして中解像度で無料のものである。例としてSentinel-2 は、中解像度(10m/pixel)で無料である。本研究は、地域(数千ha)スケールにおける衛星画像を用いた森林材積量の推定を担当する。そのために、樹冠最高点を判別する単木樹高を評価し、Sentinel-2による中解像度(10m/pixel)で無料のものを用いた。

静岡県は、伊豆半島を始めとして航空レーザ測量を進めている。このデータは、広範囲かつ森林における樹木個体の高さを比較的精度良く評価できる。しかし、コスト高のため次回の測量計画は未定である。そのため、継続的な樹木成長をモニタリングすることができない。本研究では、航空レーザ測量で得られた森林材積量と衛星画像から得られた指標との関係を構築する。これにより、衛星画像は、継続的に撮影されるため、一旦関係式が構築されれば、今後は、衛星画像から地域(数千ha)スケールの森林材積量を推定することが可能となる。

方法

静岡県は、航空レーザ測量のポイントクラウドデータベースを公開し、利用を促進している。特に富士山南東部と伊豆東部は重点的に進んでいる。今回は伊豆市修善寺から伊東市中心部を結ぶ直線横一列合計38個のメッシュをすべて解析した。ひとつのメッシュの大きさは、350mの正方形で12.2haである。

以下のLiDARデータの処理をLiDAR360を用いて行った。データの前処理としては、外れ値の除去、グラウンドポイントの分類、およびデータの正規化を行なった。

航空レーザ測量による森林材積量の推定については、次のように行った。レーザ光が地表に当たって反射された点群と樹冠に当たって反射された点群の差を取り、高さ点群を抽出した。この極大値が樹木先端とみなせ個体識別と樹高を評価した。場所、高さ、キャノピーの直径などの個々の樹木属性を抽出するには、ポイントクラウド内の樹木を表すポイントのクラスターを個々の樹木にセグメント化した。樹木の幹直径と樹高から、幹材積量を推定し、面積あたりの材積量に換算した。

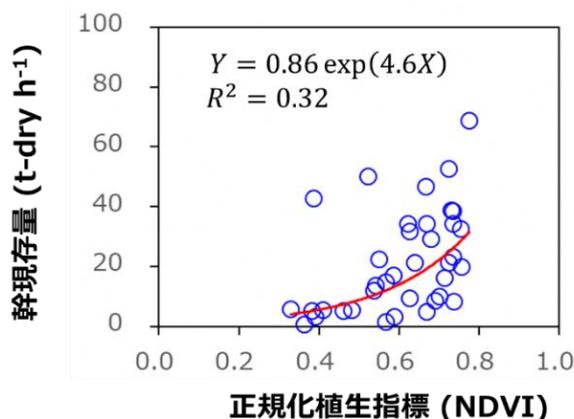
衛星画像の入手と処理は、クラウド環境で衛星と地上の複数データを結合して分析ができるプラットフォームTellusを用いた。衛星画像は、地上分解能10mのSentinel-2を用いた。最初に、関心領域の画像情報を取得した。Jupyter Notebook上で、Pythonを用

い、Sentinel-2用のAPIを入力した。航空レーザ測量が2020年3月に実施された。これは、落葉広葉樹が葉を地表に落としている時期であるため、衛星画像も冬季である2020年1月1日から3月31日までの期間で最も被雲率が低い画像を入手した。加えて、この解析対象とした。対象範囲は、航空レーザ測量と全く同じメッシュ単位で38か所とした。

測定バンドのうち、地上解像度がpixel当り10mである可視赤、可視緑、可視青の地表面反射率データを用いて、RGB 合成画像を、可視赤と近赤外の地表面反射率データを用いて正規化植生指数 (NDVI) をそれぞれ求めた。独立変数として衛星画像により求めたNDVI、従属変数として航空レーザ測量とアロメトリー式により求めた単位面積当たりの幹現存量で表し、非線形単回帰分析を行った。

結果と考察

非線形回帰の結果、決定係数が0.32と弱い関数が得られた。これは、NDVIが上昇すると指数関数的に幹現存量が増加することを意味する。しかしながら、誤差もあり、今後さらなる解析を要する。誤差が含まれる理由は、次のように考えられる。航空レーザ測量は3月初旬のため落葉樹は、着葉していない時期である。今回は、落葉樹が含まれる森林を区別していないことが、樹高の評価で誤差が含まれる大きな要因と考えられる。



4. 航空機レーザーによる材積の推定

はじめに

林業分野において森林資源の管理は、木材供給や樹木生産計画に大きく影響する。そのため森林資源データベースの作成は重要な課題とされている。この課題に対してアロメトリー式を用いた材積量推定が広く知られており、推定式のパラメータとして計測し

やすさから胸高直径が主に使用されている。しかし、近年では林業分野における従事者の減少や労働力の低下のため、航空機等を用いた航空レーザ計測が行われている。航空レーザ計測では標高データの取得が可能であるが、胸高直径の取得は不可能である。

そこで本研究では、標高データを用いた林分材積量推定を行い、現地調査データと比較および精度検証を行い、標高データのみを用いた材積量推定について評価することを目的とする。

方法

アジア航測株式会社「令和元年度 航空レーザ測量成果を用いた森林資源解析調査業務委託」報告書の現地調査データを用いて、論文「小谷 英司、栗屋 善雄（2013）低密度LiDARデータによる人工針葉樹林の林分パラメータの推定. 写真測量とリモートセンシング, 59: 44-55.」記載の林分材積量の推定式の精度検証を行った。

現地調査データ（Excelファイル）に現地調査地点30か所それぞれに緯度経度が記載されており、その緯度経度を用いてQGISへ表示させた。表示させた現地調査地点から調査地点が重なる箇所のLPデータをダウンロードした。ダウンロードしたLPデータをLiDAR360で解析を行った。解析したデータは1カ所が12ha（400m×300m）であり、一方現地調査地点面積は0.04ha（半径11.3mの円形）である。今回は現地調査データとの精度検証を目的としているため、これでは調査面積の違いが明らかに大きく、正しい精度検証ができるとは言えない。そのため解析したデータから、現地調査地点と同じ箇所のデータのみを抽出する必要がある。抽出のために、円の方程式から判別式を作成した。判別式は、調査地点と一致する対象樹木群の抽出ができていることを確認した。林分材積量推定式より材積量を推定するため、対象樹木群の各グリッドの標高値を、対象樹木群が含まれるグリッド数で割り各調査地点ごとのファーストパルス平均高を算出した。算出した各調査地点のファーストパルス平均高を用いて、林分材積量推定式より、各調査地点での推定材積量を算出した。

結果と考察

航空機レーザーデータを用いて空間体積法により推定された材積量は、誤差指標のRMSE（二乗平均平方根誤差）117.7m³、相対RMSE17%だった。地域レベルでは実用的な精

度が得られた。航空機レーザーは、静岡県では2020年から2022年にかけて県内全域で計測されたため、広域での材積推定が可能となった。一方で、航空機レーザーデータの取得経費は高額となるため、継続的な取得は現時点では難しい。継続的に取得可能な衛星画像を用いた精度の高い材積推定法の開発が望まれる。

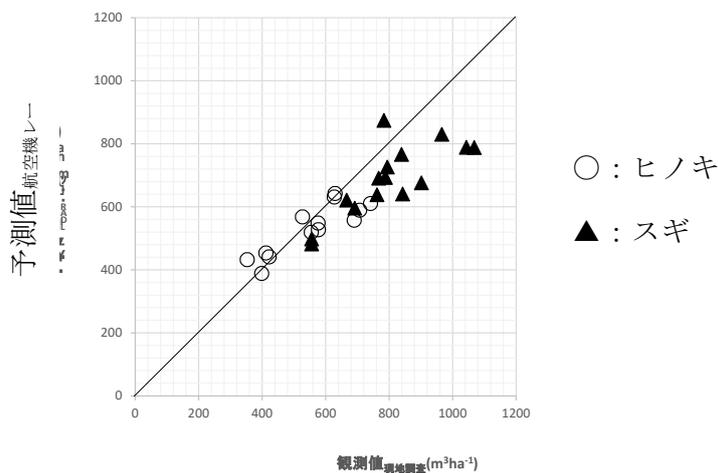


図 現地調査結果と解析データのバイアス

5. ドローン空中写真による樹種の識別

はじめに

人工林の同一林分においても、複数の樹種が植栽されている場合がある。樹種が異なれば、収穫時には販売先や価格が異なる。そのため、林分内の樹種構成を把握することは重要である。ドローン空中写真は林分単位での調査が効率的に行え、分解能が高いため単木ごとの解析に適している。本研究では、ドローン空中写真を用いて針葉樹単木の樹種識別を試みた。

方法

調査地は富士市市有林4地域とした。主な構成樹種はヒノキおよびスギで、1地域は加えてモミが植栽されている。2020年2月と2021年3月にドローン (Phantom4 RTK、DJI) による空中写真の撮影を行なった。撮影高度は100mとし、オルソ画像を作成するためにオーバーラップ率85%で撮影した。空中写真はPix4D mapper (Pix4D) を用いてオルソ画像に合成した。ArcGIS (Esri) のディープラーニング用トレーニングデータの作成ツ-

ルを用いて、単木ごとに樹種のラベル付けを行い単木ごとの画像をエクスポートした。画像のサイズは64×64ピクセル、128×128ピクセル、256×256ピクセルの3種類を作成した。機械学習のうち、画像分類によく使われる畳み込みニューラルネットワーク (CNN) を用いて学習を行なった。総画像枚数は713枚で、この画像を学習用・検証用・評価用の3つに分割し、学習する画像数を増やすために、画像を回転・反転・拡大・縮小するなどしてデータを水増し (オーギュメンテーション) して用いた。学習したモデルを用いて評価を行い、全体精度 (正解率) やFスコアを算出した。

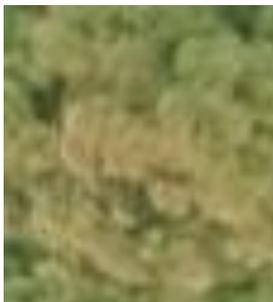
調査地ごとの画像数

調査地	スギ	ヒノキ	モミ
内山	144	87	0
四区	1	168	0
須津	17	134	0
大淵	117	62	87
合計	255	371	87

結果

画像のサイズは128×128ピクセルまたは256×256ピクセルを用いた時、95%以上の全体精度を達成した。最も良いモデルでの全体精度は96%、Fスコアは95%だった。この精度は、既往の研究と同程度か高い精度である。実用的な樹種分類が行えると考えられる。ただし、ドローン空中写真の場合、撮影時の天候や林分によって見え方が異なる場合があることから、より多くの林分での検証が必要である。

画像サンプル

サイズ	スギ	ヒノキ	モミ
大 256× 256			
中 128× 128			
小 64×64			

256×256ピクセルの画像を用いたCNNにおける混同行列

正解/予測	スギ	ヒノキ	モミ	精度
スギ	63	2	0	0.97
ヒノキ	3	99	0	0.97
モミ	0	3	19	0.86
			全体精度	0.96

6. 航空機空中写真による樹種の識別

はじめに

植生情報の管理や生態系の現状把握のため短い周期での定期的な植生図の更新が必要である。しかし、精度の高い植生図作成による作業量の増加や、現地調査や空中写真判読での植生図作成に多くの時間を要し、森林情報の管理が困難となっている。そこで空中写真を用いて一度に植生状況を把握する方法が望まれている。

本研究では、空中写真を用いた機械学習を行うことで、スギ林及びヒノキ林植生図作成のための精度の高いパラメータを決定することを目的とする。

方法

本研究で使用する空中写真は、国土地理院が無料公開している電子国土基本図(カラーオルソ画像、2010年4月及び2011年5月)の1/20,000縮尺のものを入手した。空中写真の地上分解能は約0.6mである。市街地データには、環境省から公開されている1/2.5万植生図を使用した。植生図データ内の市街地データを抽出し、画像分類に使用した。教師データ及び検証データとするスギ林及びヒノキ林の判別を行うため、目視による判別の信頼性を検証した。空中写真目視で伊豆半島のスギ林及びヒノキ林それぞれ50か所の判別を行った。その場所がスギ林及びヒノキ林であることをGoogle Street Viewでの林側面からの写真で確認したところ、目視判別での正答率はそれぞれ100%であったため、目視によるスギ林及びヒノキ林判別を信用できるものとしてデータ作成を行った。本研究は伊豆半島の森林を対象とした。これまでの研究により、市街地を含めた広範囲の中から一樹種を判別することが困難であることが分かっている。そのためまず市街地の範囲を植生図により削除し、森林のみとなった画像から機械学習によりスギ林及びヒノキ林特定する二段階の分類方法を行った。機械学習はランダムフォレストを用いた。

結果と考察

オブジェクトサイズを12m(20×20ピクセル)、6m(10×10ピクセル)、3m(5×5ピクセル)の三種のオブジェクトサイズを用いて機械学習を行い、分類精度の比較を行った。下表に決定木2,000本、教師データ29,800個を用いてオブジェクトサイズを変化させた際のAUC値を示す。オブジェクトサイズを大きくすると、スギとヒノキの分類精度が上がっ

た。左から、スギ、ヒノキ、その他の樹種の結果を示す。グレーに塗りつぶされたピクセルが当該クラスに分類されたことを示し、正解の範囲を黒線で囲って示す。下図から比較的良好に樹種を予測できていることがわかる。

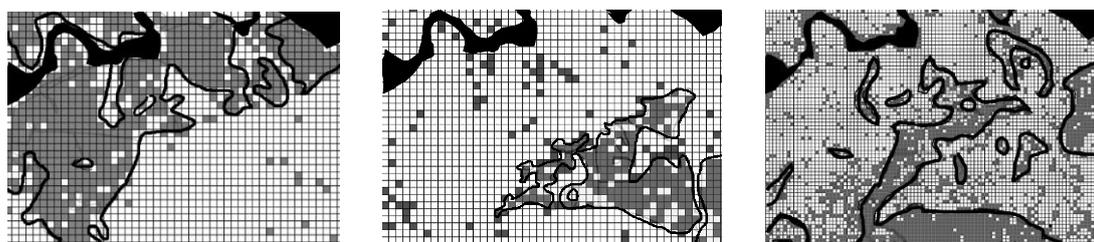


図 RandomForestによる樹種判別の検証結果

表 特徴量別のAUC分類精度に関する比較

オブジェクトサイズ	その他	スギ	ヒノキ
3m×3m	0.879	0.849	0.778
6m×6m	0.900	0.870	0.823
12m×12m	0.890	0.883	0.868

III まとめ

本研究では、衛星画像・航空機レーザーデータを用いた地域レベルの材積、ドローンを用いた森林レベルの材積、バックパックレーザーを用いた林分レベルの材積を推定し、それぞれの目標精度をほぼ満たした。したがって、これらは実利用可能な段階になったと言える。今後は、管理の目的に応じて手法を選択して活用することが望まれる。近年、

ドローン等の企業への導入が進み、オープンデータとして高品質なデータが提供されてきている。森林管理のための情報のIT化は急速に進み、労働力不足などの森林・林業の課題解決に資することを期待する。

試験地の設定にあたっては、富士市に協力いただいた。航空LiDARデータ、野外調査データの一部は静岡県から提供いただいた。ここに謝意を表す。

IV 論文等発表

窪田雪人, 星川健史, 小栗幹一, 鈴木静男 (2021) 静岡県御殿場市におけるナラ枯れ状況の把握—衛星画像を用いた予備的調査—地理情報システム学会・第30回学術研究発表大会

Ryodai KATO, Takeshi HOSHIKAWA, Shizuo SUZUKI (2022) Forest trunk biomass estimation by airborne laser scanning. Laser Solutions for Space and the Earth 2022. Yokohama, Japan.