

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：82105

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24780163

研究課題名(和文) 航空機リモートセンシングによる森林の質的および量的情報一元把握システムの開発

研究課題名(英文) Development of a system for integrally measuring the qualitative and quantitative forest information using airborne remote sensing technologies

研究代表者

高橋 與明(Takahashi, Tomoaki)

独立行政法人森林総合研究所・九州支所・主任研究員

研究者番号：90435587

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：低コスト仕様の航空機リモートセンシングデータを利用した質的および量的な森林情報を一元的に把握する森林現況把握システムを開発することが本研究の目的である。本システムの主要な構成の中で主に開発されたのは、1. 一般的なデジタルオルソ空中写真から土地被覆タイプに関する情報を抽出する手法、2. レーザの照射密度が低い航空機LiDARデータから平均樹高を推定する手法、3. 要間伐林分を把握する手法である。

研究成果の概要(英文)：The aim of this study is to develop a system for integrally measuring the qualitative and quantitative forest information using low-cost products derived from airborne remote sensing technologies. The key components of the system developed in this study are 1) the method for land cover type classification using general and low-cost digital aerial orthophotos, 2) the method for mean tree height estimation using low-sampling density LiDAR data and 3) the method to examine the necessity of thinning for stands.

研究分野：森林計測学

キーワード：航空機LiDAR オルソ空中写真 リモートセンシング 森林 間伐 平均樹高 分類

## 1. 研究開始当初の背景

現在、森林・林業再生プランの基本認識でも指摘されているように、相続などにより自らの所有すら意識しない森林所有者の増加が懸念されている。このような状況下では、持ち山の森林現況(資源量や要間伐林分の所在など)を把握できていない所有者が今後増える可能性は当然高い。したがって、森林組合などの共同体が所有者に代わって森林現況を継続的に正確に把握していくことは、提案型集約化施策を推し進める上でも極めて重要である。森林現況は森林簿などのなんらかのデータベースで管理されているが、広大な森林における正確な資源量(量的情報)のみならず要間伐林の所在(質的情報)なども含めた森林現況を人手や労力を極力かけずに正確に把握できる新たなシステムが存在すれば、現在のデータベースの正確性を効率的にチェックすることができ、あるいはデータベース情報そのものの更新に利用できるようになるかもしれない。そのようなシステムを可能にする技術として期待できるものの一つに、近年目覚ましく発展している航空機リモートセンシング技術が挙げられる。

本研究において航空機リモートセンシングとは、一般的な有人航空機による航空機レーザ測量とデジタル空中写真測量の二つを指すことにする。現在の一般的な航空機レーザ測量技術では、林冠表面の標高計測のみならず、簡易コンパス測量に匹敵するほどの高い精度で森林内の地盤面の標高を把握できる。一方、現在の一般的なデジタル空中写真測量技術では、高解像度のデジタルオルソ空中写真を安価に容易に作成できる(ここでは林野庁測定規程に準ずる50cm解像度、8ビット、可視域(青・緑・赤)の3バンドの写真と同程度の品質のオルソを指し、より高品質で高価格のトゥルーオルソは想定していない)。つまり、これらの航空測量技術そのものは現時点でかなり洗練されているため、上述のシステムを構築するのに航空機リモートセンシング技術を有効活用できるものと期待される。

## 2. 研究の目的

本研究では、低コスト仕様の航空機リモートセンシングデータを利用した質的および量的な森林情報を一元的に把握する森林現況把握システムを開発する。

## 3. 研究の方法

開発するシステムの主要な構成の中で特に重要なものが、(1)一般的なデジタルオルソ空中写真から土地被覆タイプに関する情報を抽出する手法(2)「レーザの照射密度が低い航空機LiDARデータから平均樹高を推定する手法(3)要間伐林分を把握する手法

の3つである。各々について以下に説明する。

### (1) デジタルオルソ空中写真から土地被覆タイプに関する情報を抽出する手法

本研究では、スギ林、ヒノキ林、広葉樹林、竹林、農地、建造物、の6つの典型的な土地被覆タイプを含むある地域をテストエリアとして設定した。土地被覆タイプ情報を得る手段としては、オブジェクトベース画像分類を用いてテストエリア内のオルソ空中写真の分類を行った。オブジェクトベース画像分類とは、ピクセルごとに分類するのではなく、あるまとまったピクセルの集合体(森林域でいえば単一の林相を表すようなパッチ)を一つのオブジェクトとしてとらえ、オブジェクトごとに画像分類する手法を意味する。分類をオブジェクト単位で行うことで、例えば単木単位で画像分類する際にノイズとなる影の影響や単木樹冠内の輝度の変動でしばしば引き起こされる誤分類を低減できる効果がある。オブジェクトは、使用するソフトウェアのアルゴリズムや設定するパラメータによってその大きさや形が様々に異なるため、試行錯誤で適当なオブジェクトを発生させる必要がある。本研究においても、試行錯誤でオブジェクトを発生させた後、各オブジェクト内の各バンドの平均値やエントロピーや明度など、合計22種類の画像統計量(説明変数)を算出し、以後の解析に使用した。

分類の手法は、一般的によく用いられるk-Nearest Neighbor法(k-NN法)を適用した。また、k-NN法の比較として、同じノンパラメトリック機械学習アルゴリズムの一つであるRandom Forest法を適用し、結果の比較を行った。

### (2) レーザの照射密度が低い航空機LiDARデータから平均樹高を推定する手法

著者の既存研究において、林分特性が様々に異なる樹冠閉鎖したスギ・ヒノキ人工林を対象に、樹冠高モデル(CHM)の80パーセンタイル値を平均樹高の推定値とみなした場合の誤差を調べた結果、二乗平均平方根誤差は1m未満であることがわかっている。この既存研究では、高精度の数値標高モデル(DEM)を利用することを前提として、レーザ照射密度が超高密度のデータから約0.5点/m<sup>2</sup>という低密度のデータまでほぼ同じ誤差で平均樹高を推定できることが示されている。ただ、この既存研究結果が、例えば別の時期に航空機LiDAR計測されたデータでも確実に成り立つのかはわからない。そこで、本研究では二期の航空機LiDAR計測データから針葉樹林(スギ・ヒノキ林)の平均樹高の成長量をCHMの80パーセンタイル値で検出可能かどうかを調べ、その適用性および頑健性を調べることを目的とした。なお、本研究で示す結果は、先の既存研究と同様に高精度のDEMを利用す

ることを前提としている。

### (3) 要間伐林分を把握する手法

間伐の必要性を表現する指標として、一般的には収量比数、相対幹距、形状比などが挙げられる。本研究では、これらの中で特に形状比に着目した。形状比とは、胸高直径に対する樹高の比であり、ある林分に対しては平均形状比（単木の形状比を林分内で平均した値）と林分形状比（林分の平均胸高直径に対する林分の平均樹高の比）を計算できる。低コスト仕様の航空機リモートセンシングデータを利用する場合は、林分形状比を推定するほうが現実的であるため、林分形状比の推定を試みた。スギ林を対象に、まず平均樹高の推定は前述の(2)の結果をそのまま適用した。次に、平均胸高直径の推定は、あらかじめ22個のプロット調査で実測した平均胸高直径と立木本数の関係を経験的に定式化しておき、オルソ空中写真から画像解析で推定した立木本数を経験式に代入することで推定した。最後に、推定平均胸高直径に対する推定平均樹高の比で林分形状比を算出し、林分形状比80以上の林分を要間伐林分と定義してその正解率を計算した。

## 4. 研究成果

### (1) デジタルオルソ空中写真から土地被覆タイプに関する情報を抽出する手法

まず、k-NN法を利用して分類モデルを構築した。汎化性能（予測能力）の観点から過学習をさせないために、パラメータkの数を極端に多くすることは避けることが肝要である。本研究では、kの数を変化させて分類の全体精度の変動を調べた結果（各kに対して500回の層化無作為抽出法で9/10個のデータで学習させ、残りの1/10個のデータを分類した結果）kが5以上でおおむね全体精度が安定し始めることがうかがえた（図-1）。したがって、k=5を採択しておけばよいと考えられた。k=5の場合の全体精度の中央値は約75%であった。

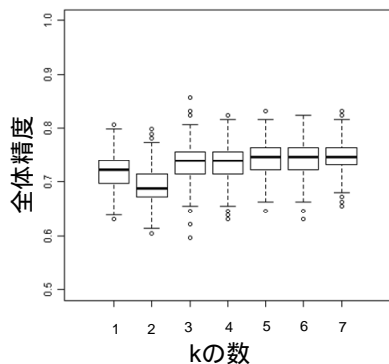


図-1. k-NN法による土地被覆分類の全体精度

次に、Random Forest法を利用して分類モデルを構築した。層化無作為抽出法でデータを二分割し、学習データから500本の木の生成を通じて得られた最適モデルを用いて検証データを分類した結果、全体精度は約83%であった（表-1）。モデル構築時のサンプル数に対する検証データ数の割合や汎化性能を総合的に判断した結果、本研究で用いたオルソ空中写真に対しては、k-NN法と比較してRandom Forest法のほうが分類手法として優れていると判断された。Random Forest法で得られた最適モデルを利用してテストエリアのオルソ空中写真から土地被覆をマッピングしたものが図-2である。

		写真判読による項目						User's Accuracy (%)
		竹林	広葉樹	スギ	ヒノキ	農地	建造物	
土地被覆タイプ	竹林	5	0	0	1	1	0	71.4
	広葉樹	0	18	6	0	1	0	72.0
	スギ	0	2	59	0	0	0	96.7
	ヒノキ	0	2	3	2	0	0	28.6
	農地	1	0	0	0	11	0	91.7
	建造物	0	1	0	0	2	4	57.1
	Producer's Accuracy (%)	83.3	78.3	86.8	66.7	73.3	100.0	Overall Accuracy (%) 83.2

表-1. Random Forest法による分類結果

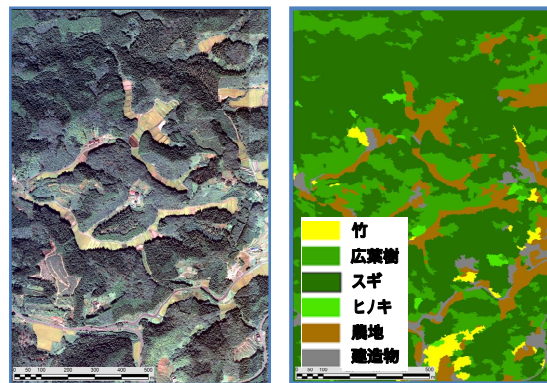


図-2. 約1.5km x 1kmのオルソ空中写真(左)とRandom Forest法による土地被覆図(右)

### (2) レーザの照射密度が低い航空機LiDARデータから平均樹高を推定する手法

二時期の航空機LiDAR計測（2006年および2010年）データを用いて、スギ林とヒノキ林で合計41個のプロット内のCHMの80パーセントイル値を各年について算出した結果、いずれの計測年においても実測の平均樹高と1:1の関係が認められた（図-3）。そして、80パーセントイル値の差分値を単純に樹高成

長量とみなした場合に、全プロットの平均樹高成長量は約 1.4m であり、地上調査による平均樹高成長量の約 1.2m とほぼ同じ値であることがわかった。つまり、少なくとも高精度の DEM が利用できるならば、CHM の 80 パーセント値を用いることで、レーザ照射密度の低い航空機 LiDAR データから平均樹高を精度良く推定できる可能性が極めて高いことがより明確になった。

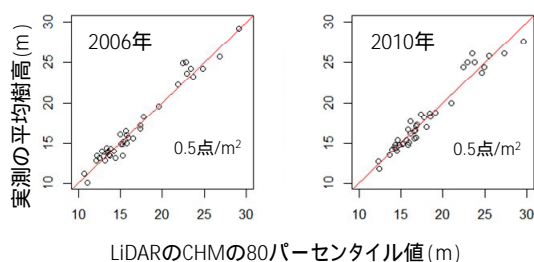


図-3. 二時期の航空機 LiDAR データからそれぞれ算出した樹冠高モデル(CHM)の 80 パーセント値と実測の平均樹高との関係

### (3) 要間伐林分を把握する手法

オルソ空中写真の各バンドの輝度値の空間的自己相関に着目した画像解析手法(バリオグラム解析と Local Maximum Filtering の組み合わせ)から、半自動的にスギ林の単木位置を特定することが可能であることがわかった。しかしながら、50cm 解像度のオルソ空中写真(林野庁測定規程に準ずる写真測量用の高性能の航測カメラによる撮影画像)を用いて立木密度を推定した場合、約 1500 本/ha 以上の立木密度のスギ林分に対して過小推定が著しいことがわかった。一方、航空機 LiDAR 計測時に簡易カメラによって同時に撮影された 25cm 解像度のオルソ画像を用いて立木密度を推定した結果、約 3000 本/ha のスギ林分までは立木密度の推定に著しい過小推定は認められなかった。そこで、後者のオルソ空中写真から推定した立木密度を経験式に代入して推定した平均胸高直径と、レーザ照射密度の低い航空機 LiDAR データ(約 0.5 点/m<sup>2</sup>)から直接推定した平均樹高を用いて林分形状比を算出した。林分形状比 80 以上のスギ林分を要間伐林分とみなしたところ、その正解率は約 77%であった。

### 今後の課題と展望

(1) に関しては、土地被覆タイプの分類精度のさらなる向上のためには、例えば落葉期と着葉期のオルソ空中写真がある場合はそれらの二時期の画像を利用することが得策である。しかしながら両者が揃う場合は稀であるためあまり現実的ではない。一方、エン

ドユーザーが安価に入手できる画像の中で、一時期の画像から高精度(例えば分類精度が 90%以上)の土地被覆タイプ分類を実現できる可能性を秘めているものに、高分解能のマルチスペクトル衛星画像が挙げられる。詳細は割愛するが、単位面積当たりの金額がオルソ空中写真と同程度のある衛星画像について、土地被覆タイプ間の輝度値の分散を調べたところ、オルソ空中写真で生じていた誤分類を軽減できるポテンシャルを有することが示唆された。したがって、金銭的なコストの低減と土地被覆タイプ情報の抽出精度の向上を同時にはかるには、そのような衛星画像とオルソ空中写真を併用することも有益な方法の一つであると考えられる。

(2) に関しては、レーザ照射密度の低い航空機 LiDAR データから容易な計算でスギ・ヒノキ林の平均樹高を実用レベルの精度で推定できる可能性が極めて高いことがわかってきたが、これは現状では高精度の DEM の利用を前提とした話である。例えば、航空機 LiDAR データから新規に DEM を作成する場合、地盤面まで到達できるレーザポイント数は林冠木の樹種や樹冠閉鎖率、下層植生の種類と量と植被率などの影響を強く受け、レーザ照射密度が低いとそれらの影響次第で DEM の精度が著しく低下する場合は否めない。したがって、レーザ照射密度が低い航空機 LiDAR データから作成される DEM を用いて平均樹高を推定する際は、誤差が実用上使えないほど大きくなる場合が生じることが起こりえる。広域の森林を対象に高精度の DEM を整備するには、現状では高コスト仕様の航空機 LiDAR の利用や地上 LiDAR の利用に頼らざるを得ないと思われるが、DEM は高精度のものを一度整備してしまえば、大きな土砂移動による地盤高の極端な変化がない限りその DEM はかなり長い期間にわたって使える可能性がある。今後、国レベルで高精度の DEM の整備が進めば、低コスト仕様の航空機 LiDAR 測量や航空機 LiDAR 計測よりも安価なデジタル空中写真測量で得られる三次元データ(ポイントクラウド)を平均樹高推定に利用できる場面が増えると考えられる。さらに、高精度 DEM が整備されていれば、近年急速に発達している安価な無人航空機による両測量技術で得られる三次元データも平均樹高推定に利用できるものと考えられる。

(3) に関しては、間伐の必要性を判断する指標として本研究では特に林分形状比に着目して手法開発を進めたが、林分形状比を推定する上で鍵となるのが立木密度(本/ha: 平均胸高直径の関数で表すことができる)の推定である。一般的な 50cm 解像度のオルソ空中写真を用いた場合、要間伐林分が否かにかかわらず、立木密度が高いスギ林分(例えば約 1500 本/ha 以上)の画像からの立木密度の推定値は著しく低くなる場合があることがわかった。一方、25cm 解像度のオルソ空中写真を用いた場合、そのような大きな

過小推定はかなり軽減できる場合があることがわかった。今後、もし一般的なデジタル写真測量技術の高解像度化が進めば(例えば50cm解像度が25cm解像度になるだけで)約3000本/haくらいまでのスギ林分を解析対象にできるようになると思われる。これは、無人航空機を利用する場合でも同様のことが当てはまるであろう。また、画像解析の手法に関して、本研究で開発した手法は光学画像からの単木抽出によく用いられる Local Maximum Filtering に依存しているが、単木抽出の精度を高める際に鍵となる最適な window サイズを、バリオグラム解析を通じてある程度客観的に決定する方法を取り入れている。現状の単木抽出の精度(=立木密度推定の精度)をさらに向上するような手法に改良することが今後必要であるとともに、平均胸高直径を推定する経験式の作成手法の高度化をはかる必要がある。その両方の精度が高まれば、低コスト仕様の航空機リモートセンシング技術を用いて林分形状比を指標とした要間伐林分の特定の正解率を確実に高めることができると考えられる。

#### 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 4 件)

高橋與明、山川博美、近藤雅信(2015)1伐5残のスギ列状間伐林分における航空機LiDARデータと天空率との関係、九州森林研究、68: 27-30、査読有り

高橋與明、齋藤和彦、永田雅史(2014)管理状態の異なる竹林における波形記録式航空機LiDARデータの特長、森林総合研究所九州支所年報、26: 23、査読なし

高橋與明、細田和男、鹿又秀聡(2013)オルソ空中写真とGISデータを用いたスギ小班の上層木立木密度マッピング、森林総合研究所九州支所年報、25: 23、査読なし

高橋與明、粟屋善雄、清野嘉之、島田政信(2012)山岳林における地上部現存量と合成開口レーダデータとの関係、森林総合研究所九州支所年報、24: 31、査読なし

[学会発表](計 6 件)

高橋與明、山川博美、近藤雅信(2015)航空機LiDARデータと森林の天空率との関係、第126回日本森林学会大会発表会、2015年03月26日~2015年03月29日、北海道大学(北海道)

高橋與明、山川博美(2014)波形記録式航

空機LiDARデータと林内光環境の指標値との関係、第70回九州森林学会研究発表会、2014年10月25日~2014年10月25日、佐賀大学(佐賀県)

高橋與明、粟屋善雄、田中真哉(2014)航空機LiDARによる針葉樹林の平均樹高成長モニタリングの可用性、第125回日本森林学会大会発表会、2014年03月27日~2014年03月30日、大宮ソニックシティ(埼玉県)

高橋與明、粟屋善雄、田中真哉(2013)航空機LiDARデータによるスギ・ヒノキ林の平均樹高成長量の検出の可能性、第69回九州森林学会研究発表会、2013年10月26日~2013年10月26日、宮崎大学(宮崎県)

高橋與明、齋藤和彦、永田雅史(2013)航空機LiDARデータを用いた管理状態の異なる竹林の分類、第124回日本森林学会大会発表会、2013年03月25日~2013年03月28日、岩手大学(岩手県)

高橋與明、粟屋善雄、田中真哉(2012)航空機LiDARのレーザ点密度の違いが林分平均樹高推定に与える影響の解析、第68回九州森林学会研究発表会、2012年10月27日~2012年10月27日、熊本県立大学(熊本県)

#### 6. 研究組織

##### (1)研究代表者

高橋 與明(TAKAHASHI TOMOAKI)  
独立行政法人森林総合研究所・九州支所・主任研究員  
研究者番号: 90435587