

# 航空レーザ計測データを活用した簡易な森林資源量評価手法の開発

2019 年度～2021 年度

岩下幸平<sup>\*</sup>・釜田淳志<sup>\*</sup>

## 要 旨

普及型 UAV を用いた航空写真による森林資源量解析について調査し、現在普及している鉛直方向の撮影と比較して、鉛直方向の撮影に斜め方向の撮影を併用することで、安定して立体構造の再現の精度を高められることを確認した。また、簡易的に実施可能な樹頂点の自動抽出手法について、5 か所の調査プロットにおける正解率を一般化線形混合モデルを用いて比較することで、現在一般的に使用されているフィルターサイズを固定した局所最大値フィルター法より抽出精度の高い可変フィルターによる局所最大値フィルター法による樹頂点抽出について、その最適なフィルターサイズを明らかにした。

## I はじめに

近年の技術革新により、小型無人飛行機(以下、UAV)の低価格化と操作の簡易化が進んでいる。それに伴い、これらを用いて森林調査を高効率に実施できる手法について様々な手法が開発されてきている。愛知県においても森林組合等の林業事業体ですでに導入され、伐採跡地の状況確認等に活用されており、また『あいちの ICT 林業活性化構想』(愛知県 2019)の中で、森林所有者や管理者、素材生産業者について UAV の導入と操縦する人材の育成を図るとしている。

一方で、比較的安価な普及型 UAV を用いた森林情報の把握手法については、国内において資料が不十分であり、機体を導入した林業事業体においてもその機能が十分には発揮されていない場合が多い。中でも機体を安全に飛行させながら森林の写真撮影する手法について説明したものが少なく、また得られた写真から事業体等が必要とする樹頂点等を抽出する手法について体系的に解説したものはほとんど見受けられない。

正射投影画像(以下、オルソ画像)や立体情報の取得を目的として UAV を用いて航空写真を撮影する際、自動航行によって連続的に写真を撮影

することが多い。これは、後の解析に必要な写真を漏れなく撮影する上で望ましいだけでなく、手動で撮影を実施する場合に比較して操作者の負担を減らすことができる。一方で、愛知県内の森林は起伏に富んでおり、障害物への接触や航空法における地上 150m 以上への飛行制限といったものに特に注意する必要がある。また撮影対象への距離が同一プロジェクト内で大きく異なってしまうことはその後の解析に悪影響を及ぼす可能性がある。そのため、地形に沿って飛行ルートを作成する必要がある。

しかしながら、自動航行において一般的に利用されている DJI GS Pro や DJI Pilot、Pix4d Capture 等は、地形に沿った撮影プロジェクトを作成するのが難しい。一方で、Litchi や UgCS といった一部のアプリケーションでは、PC 上で地形データを取り込み地形に沿った飛行プロジェクトが作成できるようになっているため、森林域での撮影ではこれらを用いることが望ましいと考えられる。

UAV に限らず写真による測量では、使用したレンズの光学特性を補正することで高精度な測量が可能となる。レンズの光学特性を把握する際には、同一の物体について重なりのある複数の写真を撮

影し、その特徴点の三次元的構造から逆算する手法が一般的である。一方で、UAVによる航空写真撮影として一般的に行われている同一平面から鉛直方向の撮影では、立体構造の把握の上で特に大切な奥行き方向のパラメーター（ $f$ 値）の算出が原理的に不可能であり、奥行き方向の精度が安定しない（神野 2020）。奥行き方向の精度が低いということは、森林の計測においては樹冠部の立体構造の計測精度が低いということであり、これは森林の調査において重要な項目であるため、現状普及している手法は樹高や材積の計算に適していないと言える。中でもドーム状変形と呼ばれる撮影範囲の中心が盛り上がり推定される現象が知られており、この場合樹高を過大に推定することとなる。地上基準点を増やすことでこれらを解消することも考えられるが、基準点の測量時間が増大し調査効率が著しく悪化するほか、森林では地上基準点の設置や測量が制限されるため現実的な方法ではない。一方で、これらのパラメーター推定には、写真の撮影方向を鉛直方向から傾けた写真を併用することで解消されることが知られている（神野 2020）。

しかしながら、森林において UAV を用いて調査を行う事例については、斜め撮影の有効性について検討した事例は見当たらず、例えば林野庁による国有林における収穫予想調査を目的とした UAV による立木調査マニュアル（林野庁 2019）でも、斜め撮影については言及がない。斜め撮影の有効性を示すことは、森林における UAV を用いた調査に対してより安定して奥行き方向の精度向上に資すると考えられる。

撮影結果から得られる森林の情報として、オルソ画像や三次元モデルによる樹高や立木本数、樹冠面積や樹冠体積、そしてそれらを用いた材積の推定がある。一方で、空撮画像による樹高と樹冠面積、もしくは樹冠体積から材積を推定する手法

については、対象とする林分での空撮画像と照らし合わせた現地調査を要するものが多いが、これにはプロット調査より労力を要するため、林業の省力化の推進を考えると現場への導入は難しい。また、精度の期待できる幹材積の推定手法については、既往研究で報告がされているため、今回は三次元モデルから樹高や立木本数を抽出することを目的とした。

その手法としては、樹頂点が一般的に三次元モデルにおける極大値となる性質を用い局所最大値フィルター法（Local Maximum Filter）による抽出が一般的に行われている。局所最大値フィルター法は、適切なフィルターサイズを設定することで抽出精度が高くなると考えられるが、日本の森林において普遍的に用いることのできるフィルターサイズは明らかになっていない。また、一般的に樹木は樹高が高くなるほど樹冠投影面積も大きくなるため、調査林分の樹高が高くなるのであればより大きいフィルターを設定すべきであると考えられる。そこで、フィルターの中心の高度に対してサイズが変化する可変フィルターによる抽出が、フィルターサイズが固定されている場合よりも抽出精度が高くなると考えられるが、前述と同様に日本国内において適した可変フィルターについては明らかになっていない。

そこで本研究では、普及型 UAV による航空写真撮影について安全に安定した品質の写真を撮影する手法について明らかにし、また森林の管理の上で重要となる樹頂点の自動抽出手法について、固定フィルター、可変フィルターともに最適なフィルターサイズを明らかにした。さらに上記の最適なフィルターサイズに基づいた結果について、愛知県が 2018 年に実施した航空レーザ計測データ（以下、県航空レーザ計測データ）や民間事業者によるリモートセンシングサービスによる結果と比較し、各手法の特徴について明らかにした。

## II 方法

### 1. 撮影方法の検証

普及型 UAV を用いた森林情報の把握手法について、現在普及している鉛直方向の撮影と、斜め方向の撮影を併用した手法について比較するため、2021年3月30日に愛知県森林・林業技術センター（以下、林業センター）の敷地内にあるスギ植栽地で、安全な自動飛行ルート設定と斜め方向の撮影による精度向上に関する調査を行った。

調査に用いた機材のうち、UAV は DJI 社の Phantom 4 pro+ を使用した。機体の運行に用いるプログラムには、VC Technology 社の Litchi for DJI Drones を用いた。撮影プロジェクトの作成は、村上・篠原（2019）を参考にした。地形データには県航空レーザ計測データによる DEM（Digital Elevation Model、数値標高モデル）を.tiff ファイル（測地系：JGD2000 第7系、解像度：25cm×25cm）から SAGA GIS 上でポイントシェープファイルに変換し、測地系を WGS84 pseudomercator に再投影した。そのシェープファイルに対して三角網法（Triangulation）により内挿補間を行い、.asc ファイル（測地系：WGS84 pseudomercator、解像度：10cm×10cm）としたものを地形データとした。まず鉛直方向撮影のプロジェクトを作成し、次に斜め方向撮影のプロジェクトを、鉛直方向のプロジェクトのルートに対して 45° 回転させたルートで作成し、カメラの角度は鉛直方向を -90° とし、-60° とした。調査地内の周囲 4 点に地上基準点（以下、GCP）を設置し、GCP の中心に、ビズステーション株式会社の Drogger PRO1RWS を 2m の紅白ポール先端に据え付けた RTK 測量機を設置して GNSS 衛星からの搬送波のデータを取得した。計測時間は約 1 時間とした。取得した搬送波のデータについて、RTK 解析ソフトである RTKLIB を用いて国土地理院より取得した最寄りの電子基準点における GNSS 衛星搬送波データお

よび電子基準点のアンテナの特性データ、ジオイドデータとともに後処理基線解析を実施し、GCP の位置を求めた。また、調査地の中心付近に検証点を 1 つ設置し、これも GCP と同様に測量した。県航空レーザ計測データによる標高データに対して 65m 上空を飛行高度として地形に沿って飛行させ、オーバーラップ率は前後方向と左右方向ともに 90% とした。写真パラメーターは、表-1 のとおりとした。また、流し撮影ではなく各撮影地点で機体を静止させて撮影を行った。得られた写真について、SfM ソフトウェアである Agisoft 社の Metashape を用いて表-2 のとおりの設定で 3D モデルを作成した。以降の解析も含め、いずれもアラインメント時に汎用事前選択はオンに、座標事前選択はオフにした。アラインメント実施後に各 GCP 及び検証点における座標の誤差とモデル作成時に推定されたレンズパラメーターのうち f 値を記録した。

### 2. 立木抽出手法の検証

森林における樹頂点抽出手法の調査のため、北設楽郡東栄町大字足込字黒畑と豊田市和合町の 2 つの皆伐地に調査地を設置した。各調査地の撮影状況及び写真パラメーターは、表-1 のとおりとした。斜め方向の撮影プロジェクトは、鉛直方向の撮影プロジェクトのルートに対して 30° 回転させ、カメラ角度は -60° とした。調査範囲の周囲 3 点に GCP を設置し、上述の手法と同様に Drogger PRO1RWS を用いて位置を測量した。皆伐前、皆伐後にそれぞれ撮影を行い、3D モデルを表-2 のとおりのパラメーターを設定して作成した。なお高密度クラウド作成時に深度フィルターはオフにし、モデル作成時にサーフェスは自由形状を選択した。また、モデル、DEM、オルソ画像のソースは高密度クラウドとした。皆伐後の撮影で枝条等が積まれておらず伐根が視認可能な水平 20m×20m のプロットを、足込黒畑の調査地に 2

つ、和合町の調査地に3つ設置した。また、プロットに対して中心及び辺の方向が同一な30m×30mの枠を設け調査のバッファゾーンとした。

県航空レーザ計測データのDEMを.tiffファイル(測地系:JGD2000第7系、解像度:25cm×25cm)からSAGA GIS上でポイントシェープファイルに変換し、測地系をWGS84 53Nに再投影した。そのシェープファイルに対して三角網法(Triangulation)により内挿補間を行い、.tiffファイル(測地系:WGS84 53N、解像度:10cm×10cm)としたものを地形データとした。Metashapeを用いて作成したDSM(Digital Surface Model、数値表層モデル)から地形データをQGIS上で差し引いたものをDCHM(Digital Canopy Height Model、数値樹冠モデル)とした。

作成したDCHMを、統計解析ソフトであるR 4.2.0(R Core Team 2022)に、地理解析パッケージであるraster(Hijmans2022)を用いて取り込み、森林解析パッケージであるForestTools(Plowright and Roussel 2021)を用いて局所最大値フィルター法による樹頂点抽出を行った。本パッケージの局所最大値フィルター法では、フィルターサイズを $F(x)$ 、フィルター中心ピクセルの値を $x$ として

$$F(x)=Ax+B$$

という一次式として設定することが可能であり、 $A$ を0とすれば固定フィルター、 $A$ を0以外の実数とすれば可変フィルターとして樹頂点抽出が可能である。そこで、 $A$ と $B$ を表-3のとおり設定し抽出を行った。また、最小樹高を10mとし、抽出された点のうち高さがそれより小さいものを除去したものを樹頂点とした。

皆伐前の撮影による3Dモデルの形状と、皆伐後の撮影による3Dモデル上の根株位置から実際の樹頂点(True)を作成した。局所最大値フィルター法によって抽出された点を実際の樹頂点と比

較し、各フィルターサイズの抽出について、Correct(抽出成功:抽出結果のうち実際の樹頂点と一致したもの)、Commission(過剰抽出:抽出結果のうち実際の樹頂点がないにもかかわらず抽出されたもの)、Omission(抽出失敗:実際の樹頂点があるにもかかわらず抽出結果に一致するものがなかったもの。なお、CorrectとOmissionの和がTrueとなる。)の3つを目視で計数した。抽出精度の指標として、機械学習を用いた分類において普遍的に用いられる評価指標であるAccuracy(正解率)を以下の式により算出した。

$$Accuracy = (Correct) / (True + Commission)$$

この値は、必ず0以上1以下となるものである。つまり、正常な抽出が全くなければCorrect=0となることで0となり、実際の樹頂点と全く同じ抽出ができればCorrect=TrueかつCommission=0となることで1となり、それ以外の場合で0より大きく1より小さい値をとる。この値が高い抽出結果が精度の高い抽出手法である。AとBの組み合わせによる抽出のCorrect、Commission、Accuracyについて、一般化線形混合モデルを用いた分散分析によってAとBが与える影響を調べた。解析にはRの一般化線形混合モデルのパッケージであるlme4を用いた(Douglas, et al. 2015)。応答変数がCorrectの場合とCommissionの場合は、説明変数をA、BとA・Bの交互作用項とし、ランダム効果は各プロットに割り振った番号とした。誤差構造は応答変数がCorrectの場合には二項分布としリンク関数にはlogitを、応答変数がCommissionの場合には負の二項分布とし、リンク関数にはlogを設定した。作成した一般化線形混合モデルについて、パッケージcar(John and Sanford 2019)を用いて分散分析によりAとBが応答変数に与える影響について調べた。応答変数がAccuracyの場合、一般的にフィルターサイズが小さければ樹頂点は抽出されやすくなるが、側枝

等の誤抽出も増え、フィルターサイズが大きいと誤抽出は減るが抽出される樹頂点も減ると考えられることから、A もしくは B を十分に小さい値から大きくしていくとある値で Accuracy は最大となり、それ以上では小さくなる一山型の挙動を示すと考えられる。そこで、説明変数として A、B と A の二乗項と B の二乗項、そして上記 4 変数の交互作用を設定した。ランダム効果は各プロットに割り振った番号とした。誤差構造は二項分布とし、リンク関数には logit を設定した。作成したモデルについて、パッケージ MuMIn (Bartoń, 2022) を用いて変数減少法によるモデル選択を行い、AIC が最小のモデルを最適モデルとして採用した。最適モデルに対して今回実施した抽出の A と B、プロット番号を適用し、固定フィルター (A=0) と可変フィルター (A>0) でそれぞれ Accuracy の推定値が最大となった際のフィルターサイズを求めた。また、最適モデルによる Accuracy 推定値の最大値と、その最大値を与えるフィルターサイズで抽出を行った際の Accuracy とを比較した。

### 3. リモートセンシング手法の比較

2. 立木抽出手法の検証で求めた最適なフィルターサイズを用いて局所最大値フィルター法による抽出を実施した結果について、各プロットで県航空レーザ計測データによる抽出結果、レーザヘリによるリモートセンシング技術による森林調査サービスを提供している A 社、UAV 写真測量によるリモートセンシング技術による森林調査サービスを提供している B 社の抽出結果と比較した。なお、レーザヘリによる調査が林分に対する点群密度が最も高く樹冠下の樹幹の抽出が可能であるため、これを最も正しいデータとして本数、樹高、樹冠面積について比較を行った。樹高と樹冠面積についてはそれぞれを応答変数として手法を説明変数に、調査地(東栄町足込黒畑と豊田市和合町)をランダム効果、誤差構造としてはガンマ分布(リンク関数は log) として lme4 を用いて一般化線形混合モデルを作成し、car により分散分析を行った。なお、県航空レーザによるデータについては樹冠面積が保存されていなかったため除いた。

表-1 各調査地の撮影状況と写真パラメーター

調査地	撮影状況	撮影枚数	撮影日	露光時間	ISO	絞り
森林・林業 技術センター	鉛直撮影	151	2021年3月30日	1/500	100	F3.2
	斜め撮影	237	2021年3月30日	1/500	100	F3.2
東栄町足込黒畑	伐採前	634	2021年8月26日	1/640.2	100	F4
	伐採後	804	2022年3月16日	1/1000	100	F3.2
豊田市和合町	伐採前	1481	2021年10月29日	1/500	100	F4.5
	伐採後	1562	2022年3月2日	1/1000	100	F3.2

表-2 各調査地の SfM・MVS 解析パラメーター

調査地	撮影状況	アラインメント精度	高密度クラウド作成品質
森林・林業 技術センター	鉛直撮影	最高	—
	斜め撮影併用	最高	—
東栄町足込黒畑	伐採前	最高	最高
	伐採後	高	高
豊田市和合町	伐採前	最高	最高
	伐採後	高	中

表-3 AとBの組み合わせ

A (m)	B (m)
0.00	0.6 ~ 1.7
0.01	0.3 ~ 1.4
0.02	0.1 ~ 1.4
0.03	-0.1 ~ 1.0
0.04	-0.3 ~ 0.7
0.05	-0.6 ~ 0.3

Bは0.1刻みで変化させた。

表-4 推定したf値とGCP及び検証点の誤差

地点	森林・林業技術センター		東栄町足込黒畑		豊田市和合町	
	鉛直撮影	斜め撮影併用	伐採前	伐採後	伐採前	伐採後
f値	3437.35	3623.84	3622.30	3624.13	3622.36	3621.21
GCP1	21.3025	1.5803	—	4.0443	2.4471	2.1836
GCP2	23.5496	1.5158	0.9690	3.6015	4.3174	3.3731
GCP3	18.3919	1.6341	1.7855	3.6991	3.7790	3.8532
GCP4	18.9663	2.6830	2.2289	3.6549	—	—
GCP合算	20.6541	1.9147	1.7412	3.7540	3.6013	3.2142
検証点	25.0475	7.9248	—	—	—	—

(f値は単位なし、それ以外はcm)

### III 結果

#### 1. 撮影方法の検証

鉛直撮影の場合、4つのGCPにおける最適化後の誤差が3軸合成で20.65cmであったのに対し、斜め撮影併用の場合1.91cmであった。また検証点の差は前者が25.05cmに対して後者が7.92cmであった(表-4)。

カメラパラメーターのうちf値の推定について、デフォルトで設定されている値が3648だったのに対して、鉛直方向のみで解析した場合が3437.35であり、斜め撮影を併用した場合は3623.84となった。

#### 2. 立木抽出手法の検証

3Dモデルの作成にあたり、推定されたf値とGCPにおける誤差は、表-4のとおりとなった。根株や3Dモデルから目視で抽出した各プロットの樹頂点数は、表-5のとおりであった。応答変数をCorrectとした場合もCommissionとした場合も、AおよびBが大きくなると応答変数は有意に減少した(表-6、図-1、図-2)。応答変数をAccuracyとした場合の最適モデルは、表-7のとおりであり、Accuracyの推定値はあるAを与えたときあるBで最大となる一山型の挙動を示した(図-3)。そのモデルについて表-3の説明変数およびランダム効果を代入した場合、固定フィル

ター(A=0)のときのAccuracyの推定値が最大となるフィルターサイズは1.2mであり、そのときのAccuracyの推定値は表-8のとおりであった。可変フィルター(A>0)のときのAccuracyの推定値が最大となるフィルターサイズは、 $0.03x+0.5m$ であり、そのときのAccuracyの推定値は、表-8のとおりであった。つまり、可変フィルターの方がAccuracyが高くなると推定された。また、実際に各フィルターサイズで抽出を行った際のAccuracyは、表-8のとおりであり、5プロットのうち4プロットで固定フィルターより可変フィルターの方がAccuracyが高かった。

#### 3. リモートセンシング手法の比較

各手法について抽出本数を比較すると表-9のとおりであり、最も正しいと考えられるA社レーザに対して東栄町足込黒畑におけるB社UAVによる調査以外は少なく、特に林業センターUAVが最も少なかった。

調査手法が樹高と樹冠面積に与える影響については、表-10のとおりであり、調査手法によって樹高と樹冠面積には有意に差が認められたが(図-4、図-5)、樹高は県航空レーザが最も小さいものの手法間で差が小さいのに対し、樹冠面積は林業センターUAVが最も大きく、また手法間で差が大きかった。

表－5 各プロットの樹頂点数

樹種	東栄町足込黒畑		豊田市和合町		
	プロット1	プロット2	プロット1	プロット2	プロット3
スギ	0	13	3	2	2
ヒノキ	27	0	17	31	43
計	27	13	20	33	45

表－6 Correct及びCommissionに対してAとBが与える影響

応答変数	説明変数	係数±標準偏差	z値	Pr値
Correct	(Intercept)	3.7043±0.1743	21.25	<0.001 ***
	A	-54.7491±2.9881	-18.32	<0.001 ***
	B	-2.2621±0.1025	-22.06	<0.001 ***
	A:B	0.4673±2.9127	0.16	0.875
Commission	(Intercept)	6.1518±0.4280	14.373	<0.001 ***
	A	-87.9358±4.6884	-18.756	<0.001 ***
	B	-3.5633±0.1821	-19.563	<0.001 ***
	A:B	-14.1183±5.1364	-2.749	<0.01 **

表－9 各リモートセンシング手法における抽出本数

手法	東栄町足込黒畑	豊田市和合町
A社レーザ	681	2788
県航空レーザ	506 (-175)	2061 (-727)
B社UAV	902 (221)	2441 (-347)
林業センターUAV	391 (-290)	1920 (-868)

表－10 樹高及び樹冠面積に対して計測手法が与える影響

応答変数	説明変数	係数±標準偏差	t値	Pr値
樹高	(Intercept)	3.2642±0.0950	34.343	<0.001 ***
	A社レーザ	0.0429±0.0059	7.237	<0.001 ***
	B社UAV	0.0475±0.0060	7.949	<0.001 ***
	林業センターUAV	0.0313±0.0065	4.795	<0.001 ***
樹冠面積	(Intercept)	3.0696±0.0452	67.885	<0.001 ***
	A社レーザ	-0.1591±0.0234	-6.799	<0.001 ***
	B社UAV	-0.5052±0.0236	-21.401	<0.001 ***

表-7 AとBがAccuracyに与える影響について変数減少法により得られた最適モデル

順位	AIC	変数減少法により残った説明変数の係数														
		(Intercept)	A	A <sup>2</sup>	B	B <sup>2</sup>	A:A <sup>2</sup>	A:B	A:B <sup>2</sup>	A <sup>2</sup> :B	A <sup>2</sup> :B <sup>2</sup>	B:B <sup>2</sup>	A:A <sup>2</sup> :B	A:A <sup>2</sup> :B <sup>2</sup>	A:B:B <sup>2</sup>	A <sup>2</sup> :B:B <sup>2</sup>
1	2097.878	-6.45	355.42	-6360.34	14.08	-9.22	38330.24	-414.63	21.93	5099.85	3072.15	1.84	—	-67664.32	51.93	-2030.96
2	2098.181	-6.14	328.32	-5569.40	13.22	-8.49	30726.70	-385.95	102.76	—	2697.19	1.65	—	—	—	—
3	2098.633	-6.78	391.04	-7466.48	15.28	-10.52	48721.34	-555.75	193.70	-1064.66	7721.42	2.27	-47315.15	—	—	-762.62
4	2098.819	-6.54	352.84	-6012.10	14.65	-10.10	32698.40	-445.56	139.28	26.63	3386.29	2.19	—	—	—	-424.02
5	2098.838	-6.35	342.20	-5862.49	13.98	-9.37	32574.43	-414.77	123.94	—	2976.29	1.96	—	—	-6.70	—

表-8 固定フィルターと可変フィルターにおけるAccuracyとAccuracyの推定値の関係

調査地	プロット	Accuracyの最大値		Accuracy推定値の最大値		Accuracy	
		固定 (フィルターサイズ)	可変 (フィルターサイズ)	固定 (1.2m)	可変 (0.03x+0.5m)	固定 (1.2m)	可変 (0.03x+0.5m)
東栄町足込黒畑	1	0.5263 (1.5m)	0.5405 (0.03x+0.7m)	0.6308	0.6378	0.4884	0.5122
	2	0.7143 (1.5m)	0.7143 (0.04x+0.1m等)	0.6677	0.6733	0.6667	0.6429
豊田市和合町	1	0.6957 (1.4m)	0.6957 (0.01x+1.1m等)	0.6494	0.6559	0.6400	0.6957
	2	0.5556 (1.0m)	0.6053 (0.04x+0.1m)	0.6412	0.6479	0.5000	0.5294
	3	0.62 (1.0m)	0.62 (0.01x+0.9m)	0.6208	0.6280	0.5319	0.5636



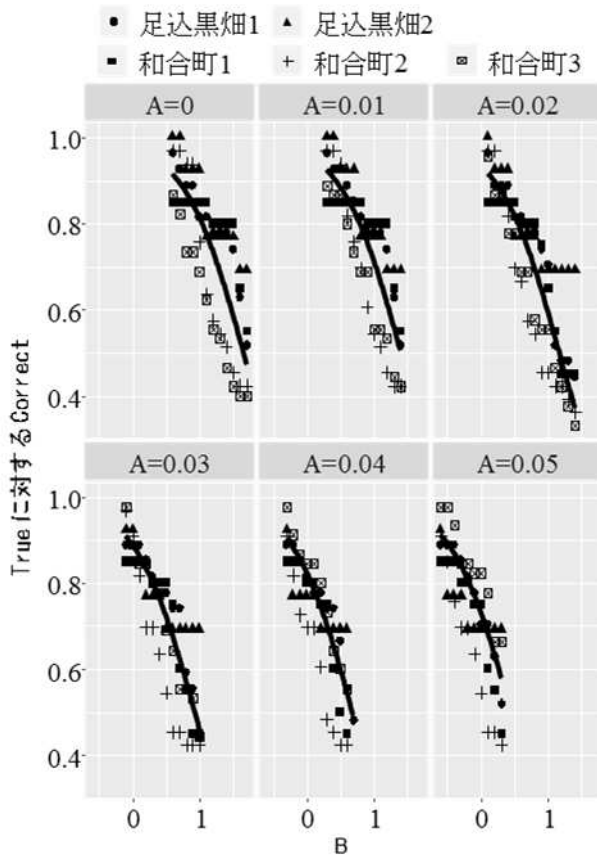


図-1 Correctに対するAとBの関係

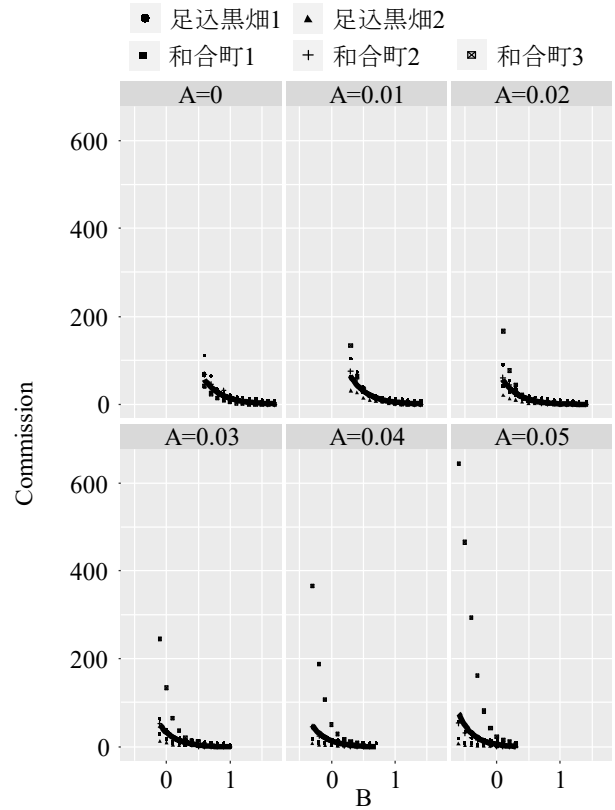


図-2 Commissionに対するAとBの関係

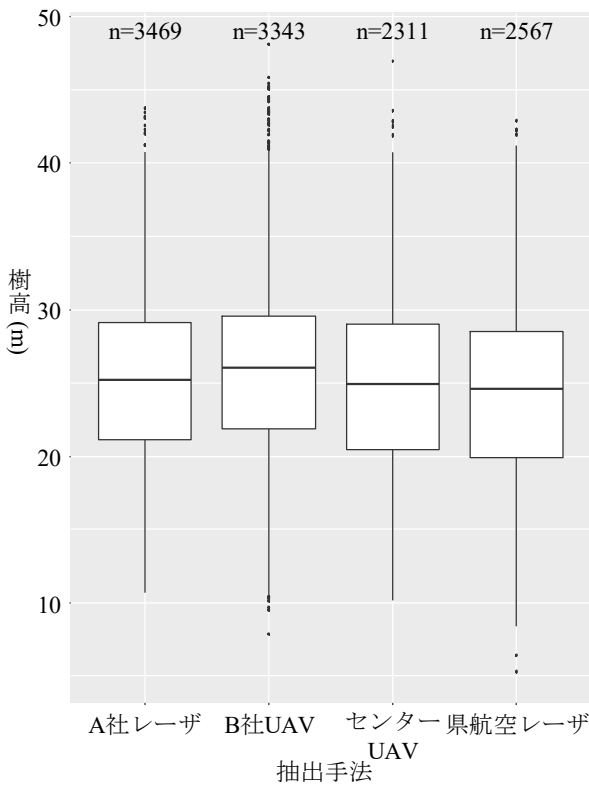


図-4 各抽出手法における樹高

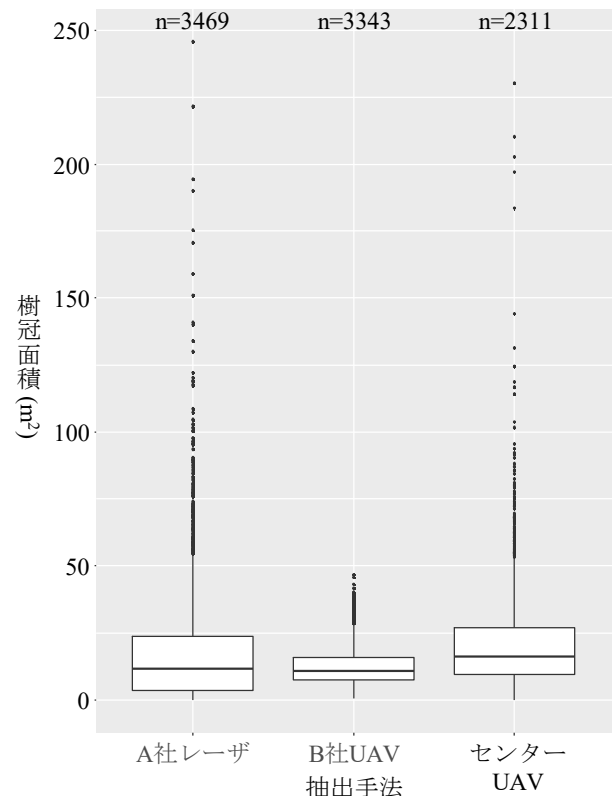


図-5 各抽出手法における樹冠面積

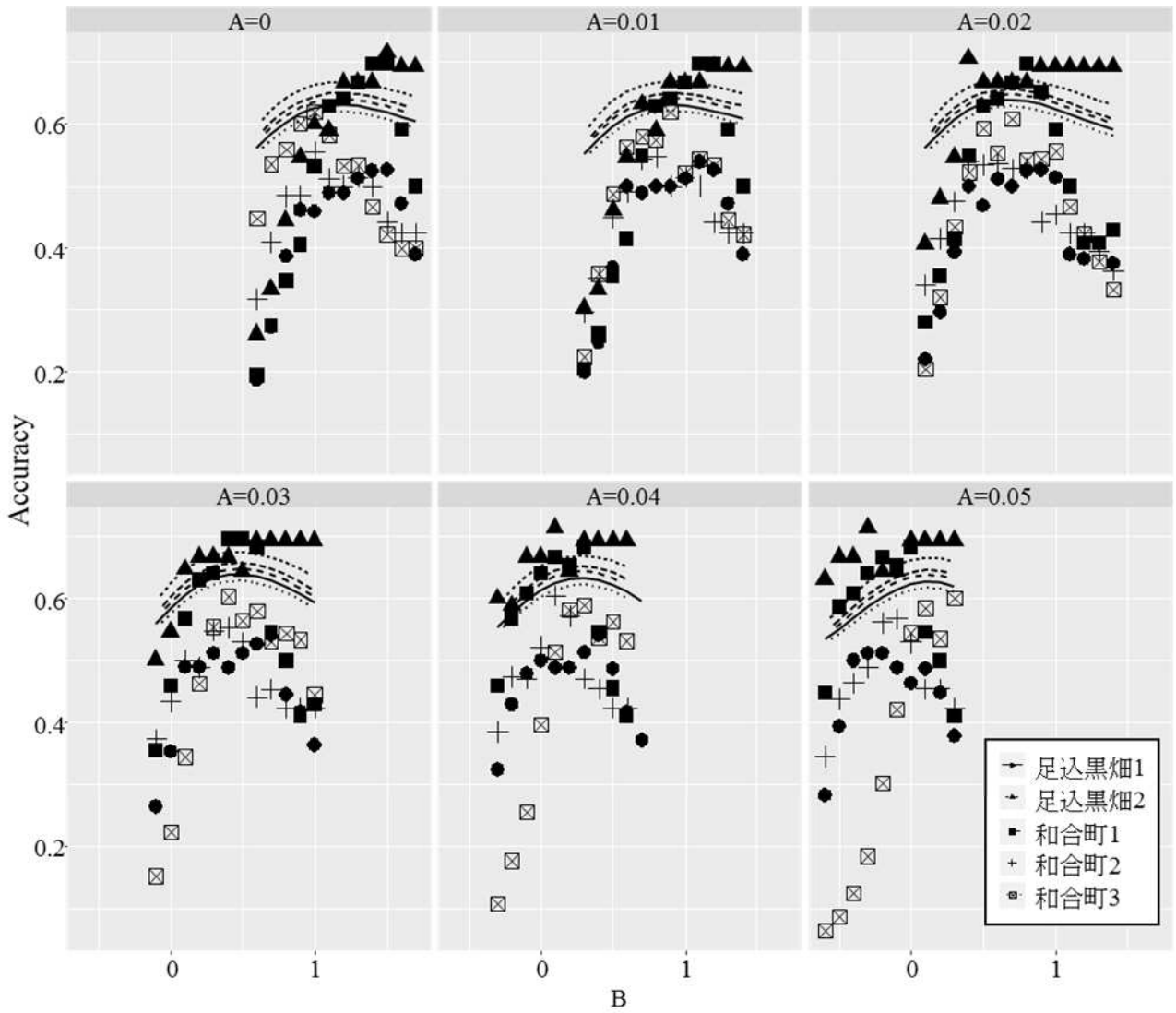


図-3 Accuracyに対するAとBの関係

#### IV 考察

##### 1. 撮影方法の検証

今回は、Litchi for DJI Drones を用いて地形に沿った自動航行を行った。Web サービスである Litchi Mission Hub 上でのプロジェクトの作成は、従来用いられている DJI Pilot 等が UAV のプロポに接続するタブレット端末やスマートフォンで設定をしなければならないのと比較して安全かつ精密なプロジェクトをより簡単に作成できた。Litchi for DJI Drones は、1 ライセンス買い切り型で約 3,200 円であり、DJI Pilot や DJI GS Pro 等

が無料で利用可能なのに対し少々割高ではあるが、上記の理由により十分導入に値すると考えられた。

鉛直方向の撮影では、今回処理を実施した範囲では GCP の誤差が RTK による GCP の計測誤差である 5cm の範囲内に収まらず、検証点誤差も 25.05cm と大きかったのに対し、斜め撮影を併用することで各 GCP の誤差が RTK による計測誤差の範囲内に収まり、検証点での誤差も 10cm 以内に収まった。カメラパラメーターのうち f 値についても前者が 3437.35 に対して後者が 3623.84 であり、カメラのデフォルトの値である 3648 に対

して前者の方が差が大きかった。カメラパラメーターは、機体によって差があるためデフォルトの3648を真値として用いることは推奨されないが、鉛直方向の撮影の場合にはこれに対して機体の差とみなすには差が大き過ぎると考えられた。鉛直方向のみの撮影では、原理的にf値を求めることが不可能と言われている一方で、実際の撮影では風や機体に加わる慣性により撮影方向に微小な誤差が発生し、偶然にf値が求まる場合があるとされている。今回は、撮影地点ごとに機体を静止させて撮影していたため、一般に行われている流し撮りよりも撮影方向に加わる誤差が小さくなったことでよりf値の求まり難い条件となった可能性が考えられる。鉛直方向の撮影の解析においても他のレンズパラメーターの調整の設定を変更したり、f値を3623に固定したりすることでGCPの誤差を計測誤差の範囲内に収めることは可能かもしれないが、その場合、局所適応により検証点を含めてモデル全体の相対精度が低くなる可能性が考えられるため推奨されない。

これらのことから、Litchi for DJI Dronesにより地形に沿って斜め撮影を併用して実施することは、調査の安全性を高めるだけでなく解析についても信頼性を上げることが可能だと考えられた。

## 2. 立木抽出手法の検証

今回の結果から、固定フィルターよりも可変フィルターを設定した方が抽出の正解率が高くなる、つまり固定フィルターよりも可変フィルターの方が抽出精度が高いことがわかった。今回抽出に使用したForestToolsのデフォルトのフィルターサイズは $0.06x+0.5$ であり、今回最適となったフィルターサイズ $0.03x+0.5$ よりもフィルター中心の高さに対する係数であるAが大きかった。このパッケージに含まれているデータセットであるカナダブリティッシュコロンビア州のKootenay mountainにおけるデータでは、樹高が約2.0mか

ら13.5m、樹冠半径が約0.13mから4.16mであり、今回調査対象とした林分は、それと比較して先鋭な樹形となっていると考えられる。そのため、デフォルトで設定されているフィルターサイズよりも樹高に対する影響を小さくした方が適切な式になったと考えられる。このように、樹形の縦横比が異なる場合に適切なフィルターサイズを与える式は変わってくると考えられるため、今回用いた一次式によるフィルターサイズは、今後調査区域を増やすことでより広範囲に使用可能な式が出てくる可能性が高いが、一方で局所的には抽出精度が下がると考えられる。今後より柔軟なフィルターサイズを与える式の登場が望まれる。

## 3. リモートセンシング手法の比較

抽出本数については、東栄町足込黒畑におけるB社UAVを除いてA社レーザより少なくなった。今回の調査では、A社レーザを真値とした各手法における正解率を算出しておらず、また実際の出材状況と比較していないため十分な議論をすることは難しいが、A社レーザによる抽出は下層の被圧木や複数の株の樹冠が融合したようなものも個別に抽出可能なのに対し、写真による抽出であるB社UAVや林業センターUAV、高高度から実施する県航空レーザ計測では抽出が難しかったと考えられる。一方で、被圧木も抽出できているA社レーザと比較して手法間で樹高の差が小さいことについては、各手法で使用している地盤高のデータが異なっていることや(A社はA社レーザによる計測、林業センターUAVと県航空レーザは県航空レーザ計測、B社UAVは国土地理院DEM)、県航空レーザ計測は調査実施年度が他と比較して古いことが原因かもしれない。樹冠面積について見ると、A社レーザと比較して林業センターUAVの樹冠面積は少し大きく、B社UAVは大幅に小さかった。リモートセンシングによる材積算出では樹高とともに樹冠面積も使用するが、B社による抽

出は樹冠面積が低く抽出されるため材積も低くなる可能性が高い。林業センターUAVによる抽出は抽出本数は少ないが、樹冠面積が大きく抽出されるため材積については差が緩和される可能性がある。

## V まとめ

今回の調査で、斜め撮影を併用した撮影が鉛直撮影のみの場合よりも三次元モデルの構築の再現性に優れていることを検証点誤差から確認し、実際の森林における調査でも斜め撮影の併用により撮影法比較試験の際と近いカメラパラメーターが得られたことから、森林における調査でも本撮影手法が有効であることを示すことができた。

前述の斜め撮影の併用による UAV 航空写真から作成した 3D モデルに対して簡易に実施可能な局所最大値フィルター法による樹頂点抽出について、固定フィルターでは 1.2m が、可変フィルターでは  $0.03x+0.5m$  が最適だと示された。固定フィルターによる抽出の正解率は、可変フィルターによる抽出の Accuracy に比較して顕著に低いわけではないため、可変フィルターによる抽出が困難な環境では固定フィルターによる抽出も十分に視野に入ってくると考えられる。今回は、固定フィルターによる抽出と可変フィルターによる抽出の両方を実施するために統計解析ソフトウェア R 上で実施したが、固定フィルターであれば無料で商用利用可能な地理情報ソフトウェアである QuantumGIS 上で、TreeDensityCalculator プラグインを用いることで実施可能であるため、R の使用が難しい場合にはこれが推奨される。

抽出手法間の比較では、A 社レーザ計測を最も正しいものとする、林業センターUAVによる調査は最も抽出本数が少なく見積もられたが、樹冠面積は最も近かった。B 社 UAV については抽出本数が過少になる場合も過剰になる場合もあり、ま

た樹冠面積は小さく抽出された。県航空レーザ計測は抽出本数が過少となった。一回の計測における調査面積で考えると、A 社レーザ計測 10ha 以上、B 社 UAV と林業センターUAV は 10ha 以内なのに対し、県航空レーザ計測は県内全域を広く計測している。このことから、広い範囲に対して実施したい場合には航空レーザ計測が優れており、狭い範囲に対して地形データとともに精密に立木の情報を得たい場合にはレーザヘリ、狭い範囲について簡易的にデータを得たい場合には UAV による写真計測が適していると考えられた。また、県航空レーザと林業センターUAV を比較すると、抽出本数、樹高ともに差が少なかったため、今回開発した普及型 UAV を用いた抽出手法は、県航空レーザ計測に対して補助的に用いることが可能であると考えられた。

## 引用文献

- 愛知県農林水産部農林基盤局林務課 (2019) あいちの ICT 林業活性化構想. URL : <https://www.pref.aichi.jp/uploaded/attachment/290281.pdf>
- Bartoń K (2022) MuMIn: Multi-Model Inference. R package version 1.46.0, <https://CRAN.R-project.org/package=MuMIn>
- Douglas Bates, Martin Maechler, Ben Bolker, Steve Walker (2015). Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. Journal of Statistical Software, 67(1), 1-48. doi:10.18637/jss.v067.i01.caasacsa
- Hijmans R (2022) raster: Geographic Data Analysis and Modeling. R package version 3.5-15, <https://CRAN.R-project.org/package=raster>

神野有生 (2020) SfM-MVS の精度確保のための  
注意点. (ドローンによる撮影・リモートセン  
シング技術とビジネス活用. 岩田、情報機構).  
254-261

John Fox and Sanford Weisberg (2019) An {R}  
Companion to Applied Regression, Third  
Edition. Thousand Oaks CA: Sage. URL:  
[https://socialsciences.mcmaster.ca/jfox/Books/  
Companion/](https://socialsciences.mcmaster.ca/jfox/Books/Companion/)

村上拓彦・篠原朋恵 (2019) Litchi を用いた UAV  
空撮計画の作成方法. 森林計画学会誌 53: 89-  
93

Plowright A、 Roussel J (2021) ForestTools:  
Analyzing Remotely Sensed Forest Data. R  
package version 0.2.5、 [https://CRAN.R-  
project.org/package=ForestTools](https://CRAN.R-project.org/package=ForestTools)

R Core Team (2022) R: A language and environment  
for statistical computing. R Foundation for  
Statistical Computing, Vienna, Austria. URL  
<https://www.R-project.org/>.

林野庁 (2019) 国有林における収穫調査等の効率  
化手法実践体制構築委託事業報告書 UAV 立  
木 調 査 マ ニ ュ ア ル . URL :  
[https://www.rinya.maff.go.jp/j/gyoumu/gijutu/  
attach/pdf/syuukaku\\_kourituka-2.pdf](https://www.rinya.maff.go.jp/j/gyoumu/gijutu/attach/pdf/syuukaku_kourituka-2.pdf)