

UAV を活用した林分材積調査の実証について

四国森林管理局 四万十森林管理署 平松 龍之典
四万十市農林水産課 武山 泰之
(元 四国森林管理局安芸森林管理署)
農林水産省輸出・国際局国際経済課 村上 大輝
(元 四国森林管理局四万十森林管理署)

1. 背景

国有林野の管理経営においては、効率的な事業実行に取り組むとともに適切な森林を通じ収穫量を計画的に確保する必要があります。近年、林業分野でも ICT 化が進みつつある中、四国森林管理局内においても UAV を含む先端機器の普及が進んでおり、境界巡視をはじめとして様々な業務を効率的に実行できるようになりました。更なる業務効率化を追求するためには、先端機器の活用方法が鍵であると考えられます。

UAV の活用によって、大幅な効率化を図ることのできる可能性を秘めている業務の一つに、資源調査があります。UAV を活用した森林資源の具体的な把握手法として、UAV による樹木検出と林分密度管理図を組み合わせた林分材積の推定方法が報告されています。ただし、四国の国有林を対象とした UAV による材積計算を行った例はなく、まずは実態を把握する必要があります。令和元年度の業務研究で、UAV による立木本数推定の実態について調査を行った結果、立木本数の推定精度は 6～8 割程度ということが分かりました。令和二年度は、元年度の継続研究として、①立木本数推定の補正方法の検討、②樹高の推定精度の検証、③材積の推定精度の検証、の 3 点を目的として調査を行いましたので、その結果をご報告させていただきます。

2. 材料と方法

調査地を四万十森林管理署管内と安芸森林管理署管内で計 18 箇所設定しました。詳細は表 1 の通りです。現地調査では UAV による空撮画像の撮影と地上 3D スキャナ OWL(株式会社アドイン研究所, 東京都千代田区)による立木位置図の取得を行いました。樹高と材積の推定精度の検証のため、6 つの調査地内に 6 つの標準地を設定し、胸高直径と樹高の測定を行いました。



図 1 1023 林班のオルソ画像

図中の点が OWL による実測立木位置

表 1 各調査地の概要。12 林小班の中で、樹種別に計 18 箇所設定。

林小班名	樹種	林齢	本数/ha	相対幹距比 (%)
88 ろ小班	ヒノキ	52	1690 本/ha	13.4
1023 ろ小班	スギ・ヒノキ	61	1000 本/ha	14.7
1024 ろ小班	スギ	56	870 本/ha	13.3

1026 は小班	スギ・ヒノキ	63	780 本/ha	20.5
1058 に小班	ヒノキ	57	1000 本/ha	18.3
1058 に小班	ヒノキ	57	1300 本/ha	17.0
1059 は小班	スギ・ヒノキ	48	570 本/ha	19.0
1207 い 2 小班	スギ	70	650 本/ha	19.4
1213 ろ 小班	スギ・ヒノキ	49	900 本/ha	18.0
1214 い 1 小班	スギ・ヒノキ	70	860 本/ha	20.3
1272 は 小班	スギ	59	1500 本/ha	11.6
3 と 3 小班	ヒノキ	22	1200 本/ha	23.0
2113 い 小班	スギ	247	100 本/ha	21.5

(1) UAV 画像からの林分 3D モデルの作成

対象林分上空で UAV を飛行させ、空撮画像を取得しました。使用した UAV は DJI Phantom 4 Pro(DJI, Shenzhen, China)です。UAV 飛行経路計画システム(株式会社ジツタ, 愛媛県松山市)を使用し、UAV が常に地面と 30~40m を保つように飛行経路を計画しました。撮影条件については、オーバーラップ率 85%程度, サイドラップ率 80%程度と設定し、等時間ごとの鉛直下向きの撮影としました。現地で撮影した写真から Agisoft Metashape Pro(Agisoft LLC, St. Petersburg, Russia)を用いてオルソ画像の作成と 3D モデル化を行いました。このソフトウェアは複数枚の画像を用いて撮影対象表面の幾何学形状を復元することができます。Metashape による 3D モデルの作成時、各設定はデフォルトの値とし、精度は低、中、高、最高の四段階のうち「中」としました。

(2) Assist Z を用いた 3D モデルからの立木自動検出

3D モデルは、無数のポイントから構成されています。それぞれのポイントが x, y, z 座標を持っており、z 座標が各ポイントの標高データです。作成した 3D モデルから樹頂点を検出する際は、ソフトウェア「Assist Z(株式会社ジツタ, 愛媛県松山市)」を使用しました。

このソフトウェアは局所最大値法(Popescu et al. 2003)をアレンジした手法を用いて、3D モデル表面の局所的な凸部を樹頂点として自動検出することができます。その際、いくつかの検出条件を設定することができますが、本研究ではそのうちのメッシュ幅と検出樹木周囲フィルタを使用しました。令和元年度の調査結果をもとに、メッシュ幅は「0.4」、検出樹木周囲フィルタは「2.2」として立木の自動検出を行いました。

樹高の推定について、検出した樹頂点の標高から真下の地面の標高を引くことで推定しました。使用した地面のデータは、平成 30 年度に航空レーザー測量で計測した地盤データです。

(3) 立木自動検出精度の検証

オルソ画像・立木位置図・Assist Z の出力結果を QGIS ver 3.10(QGIS Development Team)に読み込み、立木自動検出精度の検証を行いました。これ以降、樹高と林分材積に関して、標準地調査の結果を「実測値」、Assist Z での計測結果を「推定値」と表現します。樹高と林分材積の単位はそれぞれ m と m^3/ha です。なお、3D モデルからの立木検出について、天候やオーバーラップ率等の写真撮影条件や、Metashape Pro での 3D モデル作成条件により、検出結果が大幅に変わります。従って、以降の結果についてはあくまで我々の検証条件下での精度であり、Assist Z 等ソフ

トウェアの精度を示すものではありません。

ア 立木本数の推定精度

自動検出の結果は、正しく検出・未検出・誤検出の3種類に分類され、正しく検出された本数と誤検出本数の合計が Assist Z での立木の推定本数となります。(詳細は令和元年度の発表集を参照)

$$\text{立木本数の推定精度(\%)} = 100 \times \left(\frac{\text{立木の推定本数}}{\text{実際の立木の本数}} \right) \cdots (1)$$

イ 林分の平均樹高の推定精度

6つの標準地で、実測値と推定値の平均値同士の比較をしました。また、2(3)アの正しく検出できた個体の樹高について、各個体の実測値と推定値を比較し、単木レベルでの推定精度の検証も行いました。

ウ 林分材積の推定精度

本研究の各調査地の林分が林分密度管理図に沿って成長していると仮定すれば、各調査地の林分材積は下記の式で計算できます。

$$V = \left(\alpha \times H^\beta + \frac{\gamma \times H^\delta}{N} \right)^{-1} \cdots (2)$$

Vがha当たりの材積、 $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ が樹種ごとの定数、Hが林分の上層樹高、Nがha当たりの立木本数を表しています。Assist Zでは区域内の立木本数と樹高を計測することが可能であるため、理論上は式(2)を用いて、Assist Zの立木検出結果から林分材積を推定できます。

6つの標準地において、この推定精度を検証するため林分材積の実測値と比較を行いました。なお、実測値の計算については、細田ら(Kazuo et al. 2010)の論文に掲載されている係数を使用して、式(3)により単木ごとの材積を計算したのち、それらを合算して林分材積を算出しました。式(3)中のVは幹材積(m^3)、Hは樹高(m)、DBHは胸高直径(cm)、a, b, c, dは樹種ごとの係数を示しています。

$$V = a \times H + b \times DBH^2 + c \times DBH^2 \times H + d \cdots (3)$$

エ 推定立木本数の補正と推定材積の補正

式(1)で求めた立木本数推定精度と相対幹距比の関係性について、全ての調査地を対象に分析しました。相対幹距比はha当たりの本数密度に平均樹高も加味した林分の込み具合の指標であり、値が小さいほど混みあった林分であることを示しています。

式(1)の推定精度は混みあった林分では50%程度、疎な林分では100%程度の一定値をとると仮定し、両者の関係性を4係数ロジスティック曲線で表現しました。式(4)の係数b, c, d, eは定数、Srは相対幹距比(%)を示しています。各係数は統計計算ソフト「R 4.0.3」のパッケージ、「nplr」を用いて計算しました。この関係性を使用して立木本数の補正を行った後、式(2)にその値を代入し、補正後の林分材積を計算しました。

$$\frac{\text{推定本数}}{\text{実際の本数}} = d + \frac{c-d}{1 + \left(\frac{e}{Sr}\right)^b} \cdots (4)$$

3. 結果

(1) 立木本数の推定精度

立木本数の推定精度を表2に示しています。樹種別に、スギで52%~115%、ヒノキで57~98%という推定結果でした。両樹種とも、相対幹距比が小さいほど推定精度が低い傾向にありました。

(2) 林分の平均樹高の推定精度

林分の平均樹高は、図1の通り誤差-0.1~1.4mの精度で推定が可能でした。また、図2に単木レベルの推定値と実測値の散布図を示しています。両者は強い正の相関があり、回帰直線は式(5)となりました。

$$\text{樹高の実測値} = 1.0104 \times \text{樹高の推定値} - 0.3745 \dots (5)$$

表2 樹種別の立木本数推定精度

林小班名	相対幹距比	スギ 推定精度
1272 は	11.58	52%
1024 ろ	12.71	69%
1023 ろ	13.39	54%
1059 は	18.49	94%
1213 ろ	19.03	97%
1026 は	19.41	106%
1207 い2	19.42	115%
2113 い	21.45	110%
1214 い1	24.74	103%

林小班名	相対幹距比	ヒノキ 推定精度
88 ろ	13.41	57%
1023 ろ	15.42	65%
1214 い1	15.96	58%
1058 に	16.89	67%
1213 ろ	16.94	65%
1058 に	16.98	57%
1026 は	21.48	68%
3 と3	23.05	98%
1059 は	23.93	98%

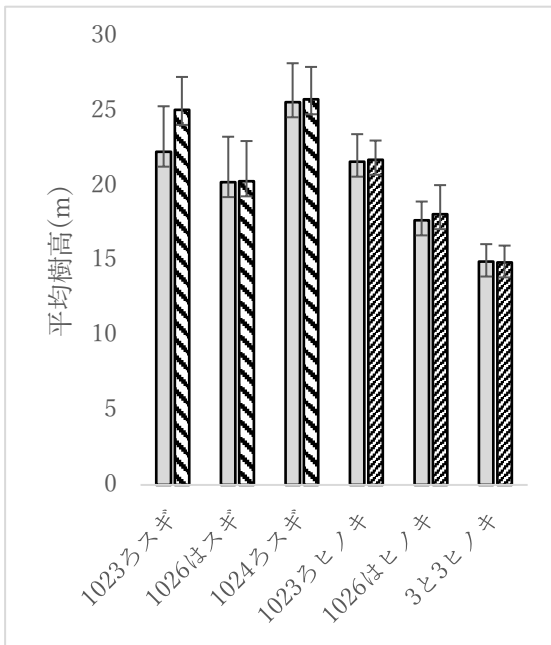


図1 各標準地の実測と推定の平均樹高
各項目左側が実測値、右側が推定値を示す。
図中のエラーバーは標準偏差。

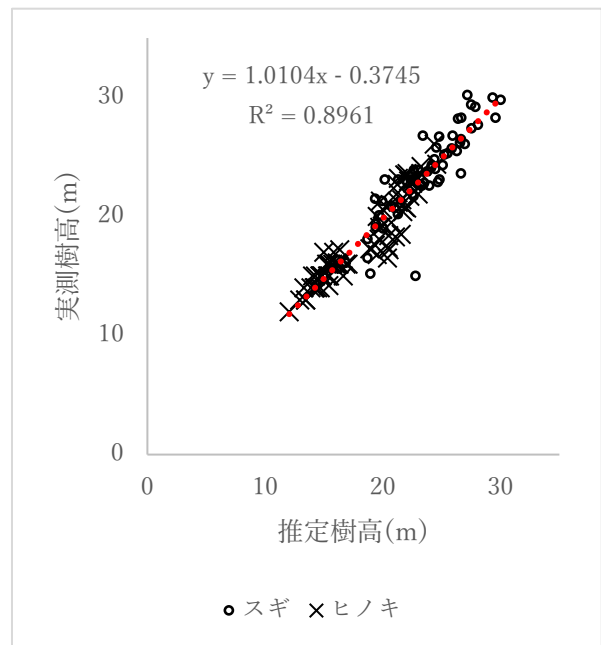


図2 正しく検出できた個体についての推定樹高と実測値の関係性
図中の赤点線は近似直線を示している。

(3) 林分材積の推定精度

林分材積の推定精度を図3に示しています。式(2)により推定した林分材積の推定値を実測値と比較したところ、全ての標準地で過小評価であり、その幅は5～37%でした。

(4) 推定立木本数の補正と推定材積の補正

式(4)の係数は樹種ごとに異なることが分かり、補正式は下記の通りとなりました。

$$\text{スギ} : \frac{\text{推定本数}}{\text{実際の本数}} = 1.08 + \frac{0.53-1.08}{1+\left(\frac{18.11}{Sr}\right)^{-46.61}} \dots (6)$$

$$\text{ヒノキ} : \frac{\text{推定本数}}{\text{実際の本数}} = 0.98 + \frac{0.61-0.98}{1+\left(\frac{21.84}{Sr}\right)^{-85.85}} \dots (7)$$

立木本数と林分材積の推定精度は、補正前後でそれぞれ表3・図3の通りとなりました。

表3 立木本数推定精度

標準地名	補正前	補正後
1023 ろスギ	65 %	124 %
1026 はスギ	105 %	91 %
1024 ろスギ	73 %	138 %
1023 ろヒノキ	65 %	135 %
1026 はヒノキ	68 %	112 %
3と3ヒノキ	98 %	100 %

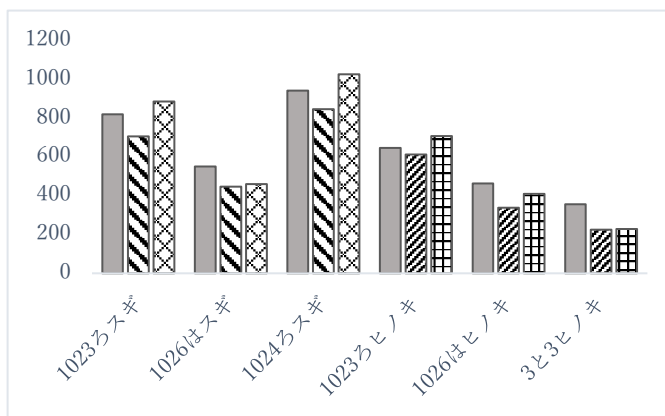


図3 林分材積推定精度

左から順に、毎木調査による実測値、補正前の林分材積推定値、補正後の林分材積推定値をそれぞれ示している。

4. 考察

(1) 立木本数の推定精度

令和元年度の調査と同様に、推定本数は過小評価となる傾向にありました。相対幹距比の大きい（密度の小さい）スギのプロットでは過大評価となっていますが、これは誤検出が一定数あったことを示しています。同程度の密度のヒノキ林分では過大評価となっていないことから、スギ林分で誤検出が起りやすい可能性があります。

(2) 林分の平均樹高の推定精度

図2と式(5)より、単木レベルの樹高の推定値と実測値の比は、およそ1:1となることが分かりました。この結果と図1の結果を踏まえると、平均樹高の推定はAssist Zによって高精度で行うことができると考えています。

今回の調査では、樹木検出の際に用いる地面のデータとして航空レーザー計測由来の地盤データを使用しました。この特徴として、精度が高いものの、整備されている地域が限られているということが挙げられます。一方、日本全国のデータが整備されているのが国土地理院の標高データです。国土地理院のデータは、航空レーザー由来のデータと比べると精度が低いため、同様の調査を国土地理院の標高データを使用して行った場合、今回の調査とは異なる結果になる可能性があります。

(3) 林分材積の推定精度

3D モデルから直接推定できる立木の本数と樹高という2つの変数のみで林分材積が計算可能となる方法が、今回採用した林分密度管理図を用いたものでした。理想的には、そもそも各調査地が林分密度管理図に沿った成長をしているのかどうか検討する必要がありますが、本調査では行っておりません。

林分密度管理図の理論に基づいて林分材積を計算したところ、5%~37%の過小評価となりました。若齢林である「3と3ヒノキ」の結果では、立木本数推定精度が高いにも関わらず材積の推定精度は低くなっています。従って、この林分の成長曲線は林分密度管理図のものとは乖離がある可能性があります。

(4) 推定立木本数の補正と推定材積の補正

立木本数推定精度と相対幹距比の散布図から式(6)(7)を導出しました。樹種ごとに係数が異なることから、検出精度に対して樹種の影響が存在するということが推察できます。スギでは、相対幹距比が19%で推定精度が100%に近い値をとりますが、ヒノキでは相対幹距比が23%を越えなければ100%に近づきません。そのため、3Dモデルからの立木検出に関してはヒノキ林分の方が難しいと考えられます。

図3より、立木検出本数の補正によって、5つのうち4つの調査地において林分材積の推定誤差が±10%程度にまで軽減されました。ただし、表3から分かるように、補正後の本数は多くの場合過大評価となってしまったため、本補正方法には課題が残っています。

5. まとめ

Assist Zによる林分密度管理図を適用して林分材積を計算した場合、推定立木本数と林分材積は過小評価になることが分かりました。相対幹距比と推定精度の関係性を用いて推定立木本数の補正を試みたところ、林分材積の推定誤差を±10%程度にまで軽減できました。ただし、補正後の推定立木本数精度が大きく過大評価となる傾向にあり、補正後の林分材積は林分によって過小評価と過大評価の両方となりうることを踏まえると、現段階では今回紹介した方法で収穫調査をはじめとする精密調査を実施することは難しいと考えられます。従って、相対幹距比の異なる林分の調査地を増やし補正の精度をさらに高めていくと同時に、精度を厳しく求められない簡易的な調査において、補正なしで本手法によって林分材積計算を行い、過小評価であるということを踏まえて計算結果を利用する、ということが現時点での業務における活用方法であると考えられます。

6. 謝辞

UAVの飛行方法やAssist Zについては株式会社ジツタのご担当者様には多大なるご理解とご協力をいただきました。また四国森林管理局そして四万十森林管理署・安芸森林管理署の職員の皆様にも調査地の選定と現地調査の際にご協力をいただきました。この場をお借りしてお礼を申し上げます。

7. 参考文献

Kazuo, H., Yasushi, M., and Toshiro, I. 2010. 現行立木幹材積表と材積式による計算値との相違およびその修正方法. *Japan Soc. For. Plan.* **44**(2): 23~29.

Popescu, S.C., Wynne, R.H., and Nelson, R.F. 2003. Estimating plot-level tree heights with lidar: Local filtering with a canopy-height based variable window size. *Comput. Electron. Agric.* **37**(1-3): 71-95.

doi:10.1016/S0168-1699(02)00121-7.