

UAVなどから得られるDEMデータ等を用いた林分調査方法の検討

森林技術・支援センター

森林技術普及専門官

一般職員

○^{たぐち}田口^{やすひろ}康宏
^{おおたけ}大武^{ふみや}史弥

要旨

UAV（無人航空機）などから得られるデータを用いた林分調査方法について、特にDEM（数値標高モデル）データ等の高さに関するデータに着目し、（１）三次元点群データを使用した立木調査、（２）DEMデータ等を利用する場合の自動飛行時の飛行・撮影方法、（３）森林三次元測量システム（OWL）とUAVを使用した樹高測定方法の精度と活用方法の３点について検討しました。

はじめに

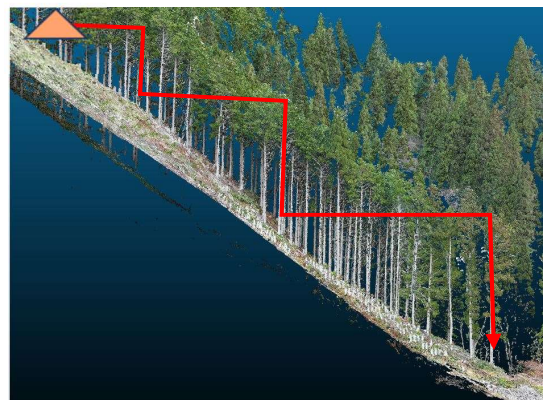
UAVによる写真測量から得られるオルソ画像以外でもDEMデータ等の活用が図られていますが、GNSS単独測位のUAVについては、相対測位機能（RTK-GNSS搭載型など）があるUAVに比べ絶対座標での精度が低く、特に高さ方向（Z軸）については誤差が大きい報告があります（吉坂 2022，木村ら 2020）。また、GNSS単独測位で評定点による補正を用いない場合において、特に高さ方向（Z軸）については誤差が大きくなることが報告されています（木村ら 2020）。評定点を用いて補正を行えば誤差が小さくなると考えられますが、評定点を用いて補正を行うことは煩雑であると思われます。今回は絶対座標ではなく、相対座標でのUAVを用いた林分調査のための活用方法とその精度の検証について報告します。

１ 調査方法

（１）三次元点群データを使用した立木調査

危険を伴うなど立木調査が困難な調査について、輪尺等による直接的な測定ではなく、UAVの写真測量を用いて間接的な立木調査ができないか検討しました。

造林地が隣接している71年生林分の本洞国有林1043ろ林小班において、造林地を崩壊地等の危険な箇所と想定して、目視できるスギ4本・ヒノキ31本の計35本の立木に対して、UAV（Autel社 Evo II Pro V3、以下の方法でも同機を使用）を用いて横・斜めから連続して写真撮影を行いました。斜めから連続撮影した理由は、斜面の上下方向を撮影することで、幹の横の点群を多く得られないかと考えて行いました。なお、UAVの連続撮影にあたっては、対象林分が傾斜約33°であるため、階段状に飛行させました（図－１）。



図－１ UAVの連続撮影時の飛行方

写真測量処理が可能なソフトウェアのMetashape（ver:2.0.4）を使用して、三次元点群データを作成し、点群処理ができるソフトウェアのCloudCompare（ver:2.12.4）を使用して、胸高直径及び樹高を測定しました。なお、今回の（２）（３）の方法についてもMetashape（ver:2.0.4）を使用しました。CloudCompare上での胸高直径の測定につ

いては、山側の地上と思われる点から1.2mの位置を測定し、その位置で水平となるように測定しました（図－２）。また、樹高の測定については山側の地上と思われる点から梢端部^{しょうたん}までを測定しました（図－

Distance: 0.308310

0.0	-0.307983	0.0
0.0	0.019137	0.307989
0.0	-0.002089	0.019441

Distance: 1.505341

0.0	-0.038009	0.0
0.0	0.084838	1.50185
0.0	-1.301050	1.04746

Location: 11.4715133			
0.5	0.464056	0.5	9.850404
0.5	0.372068	0.5	13.748011
0.5	0.371002	0.5	14.476011
0.5	0.3	0.5	14.476011

The flowchart illustrates the derivation of 90°-70m-2 direction flight patterns from 90°-90m-2 direction flight patterns. The process starts with two initial nodes on the left:

- [1] 90° - 90m - 2方向・斜め有
- [2] 70° - 90m - 2方向・斜め有

These nodes lead to various intermediate nodes, which then combine into final nodes on the right:

- [3] 90° - 70m - 2方向・斜め有
- [4] 70° - 70m - 2方向・斜め有
- [5] 90° - 70m - 1方向・斜め有

The flow is indicated by arrows of different colors (orange, yellow, green, blue, black).

- 2 -

の5種類の方法でUAVを飛行させました。①～④の撮影区域の自動飛行については、直行二方向で飛行させ、最後に斜め写真を加える設定も行いました。また、これら4種類については、精度比較のため、連続写真から斜め写真のみを無しにしたり、一方向のみにしたりして12種類作成しました。さらにそれらを組み合わせて7種類作成し、計24種類の飛行・撮影方法としました（図－4）。

（3）森林三次元測量システム（OWL）とUAVを使用した樹高測定方法の精度と活用方法

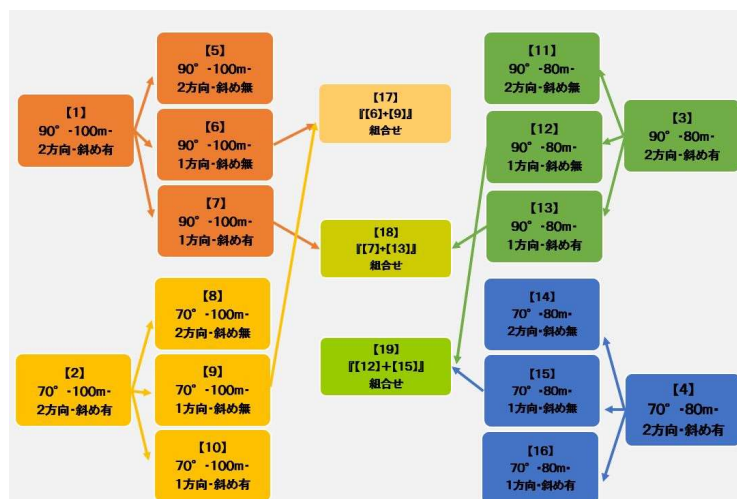
ア 森林三次元測量システム（以下「OWL」という。）は、ネスルンド方式による樹高補正機能が搭載されていますが、OWL（OL10x型）については、直接の測定において20数mを超えると樹高が低く測定されることがあると言われています（小田 2021）。なお、OWL200型は、OWL106型と比較した場合、新しいレーザースキャナの特長により樹高はより高くまで計測可能にとされています（OWL200型 パンフレット）。

OWL（OL10x型）とUAVを用いた樹高計測について、「UAVによる写真解析

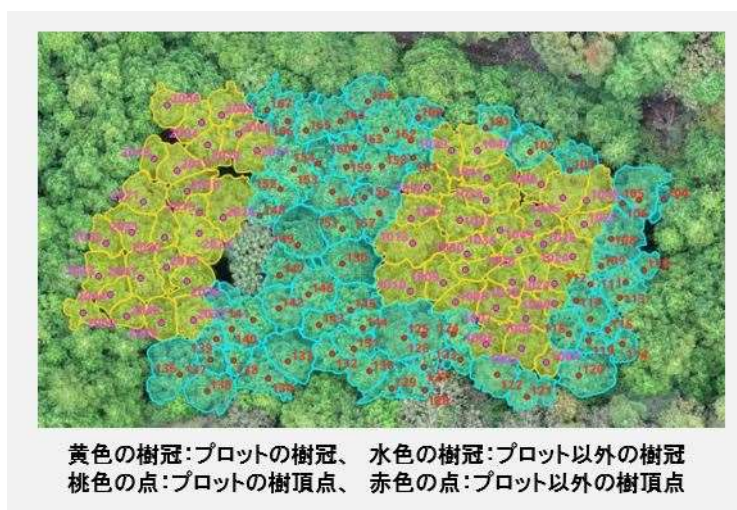
により算出した梢端の標高からOWLで測定された立木の根元の標高を差し引くことで樹高を算出する方法」がありますが（坪倉 2020）、調査方法（2）と同様に斜め写真等を追加することで精度向上できないかと考え、図－5のと通りの飛行・撮影方法によりUAVを自動飛行（フロントオーバーラップ率90%、サイドオーバーラップ率85%）させ、DSM（数値表層モデル）を作成し梢端の標高を求め、OWLで測定した立木の根元の標高を差し引くことで樹高を算出しました。今回は、73年生の大洞国有林192へ林小班の2プロット、ヒノキ56本を対象に前述のUAVによる樹高測定とVertexによる実測との比較を行いました。

イ 前述の2プロット、ヒノキ56本を標準地として、プロット以外を使用機械UAVのみで材積推定できないか検討しました。材積推定にあたっては、プロット内においてOWLで測定された胸高直径、（3）アで最も精度が良かった飛行・撮影方法で得られた樹高、オルソ画像を用いてGIS（QGIS3.34.11）にて計測した樹冠投影面積から重回帰式（線形）を算出し（図－6）、プロット以外の68本についてUAVから得られた梢端標高から国土地理院の1m

メッシュの数値標高モデル（国土地理院ウェブサイト、以下「1mDEM」という。）から得られた根元標高を差し引いて計算した樹高、GISにて計測した樹冠投影面積から先に求めた重回帰式により胸高直径を



図－5 （3）アの飛行・撮影方法の種類



図－6 プロット、プロット以外の樹冠と樹頂点

推定し、その値を用いて材積を算出しました。比較にあたっては、胸高直径は直径巻尺、樹高はVertexを使用し、これらを実測値としました。

2 調査結果・考察

(1) 三次元点群データを使用した立木調査

UAVの連続写真から三次元点群データを使用して計測した胸高直径・樹高、それらにより求められた材積について、それらの実測値との差を比較したところ、胸高直径では $-1.5\text{cm} \pm 1.6\text{cm}$ (平均値 $\pm$ 標準偏差)、樹高では $-0.4 \pm 0.8\text{m}$ 、単木材積では $-0.07 \pm 0.10\text{m}^3/\text{本}$ となり (図-7)、試験を行った35本の全体の材積と比較して89.6%となりました。胸高直径・樹高・単木材積ともに実測との差がマイナス傾向にありましたが、この方法を使用すれば収穫調査時の参考値となるのではないかと考えました。今回、これらの値がマイナス傾向にあった原因は、点群同士の距離を測定時に測り間違えていることと、写真測量による点群が得られていないことではないかと考えました。

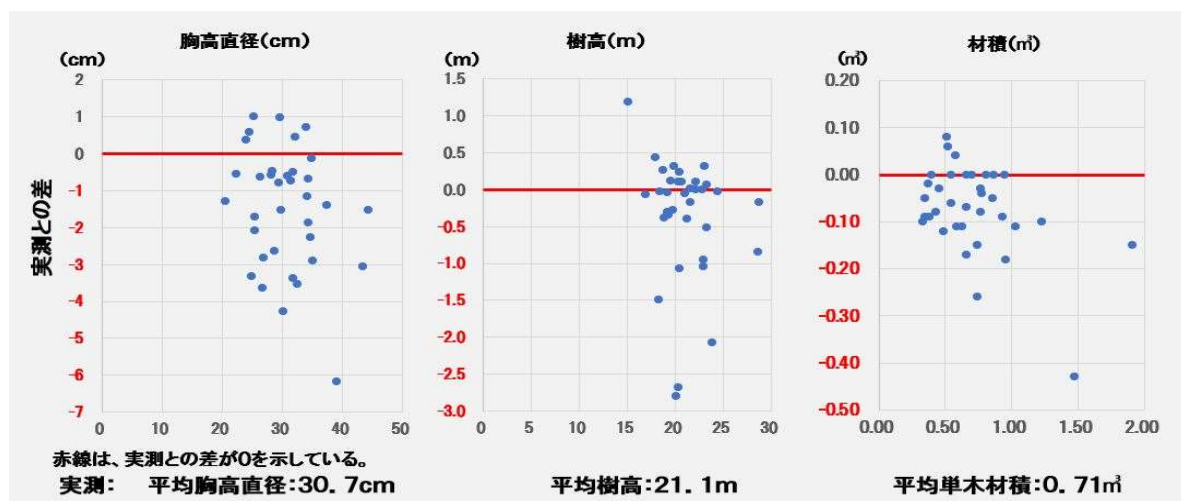


図-7 PC上での測定と実測との差

(2) DEMデータを利用する場合の自動飛行時の飛行・撮影方法

約5mおきの実測 (Vertex) の斜距離と相対座標から計算した斜距離の比較について、RMSEが最も小さい飛行・撮影方法では、RMSEが8.1906cmであり実測との差の平均が $-1.2 \pm 8.2\text{cm}$ でした。RMSEの小さかった撮影方法は、最後に斜め写真を入れる設定もしくはカメラ角度が 70° の設定とした撮影方法でした (表1)。また、離陸地点からの高度が70mの飛行方法が高度90mの飛行方法よりRMSEが小さかったです。高田ら (2021) は、RTK測位型UAVを用いて発着地点50m・100m、カメラ角度 90° ・ 80° の飛行・撮影方法で比較したところ、RMSEが小さいもので2~4cmでありカメラ角度 90° より 80° のほうが精度が高く、高度については精度には関係ないことが観測されました。RMSEを順にみたときに8cmで収束しているようにみえますが、今回使用したUAVはGNSS単独測位であり、RTK測位型に比べて精度が低いことが誤差の一因であることも考えられますが、Vertexの測定による誤差も一因であると考えられました。

表－１ 相対座標から計算した斜距離と実測との比較

誤差の小さい順	誤差 (cm)	飛行方法・撮影方法	差の平均 (cm)	差の標準偏差 (cm)	差の最大 (cm)	差の最小 (cm)
1	8.1906	90°・70m・2方向・斜め有	-1.2	8.2	23.0	-16.6
2	8.1907	70°・70m・1方向・斜め無	-0.8	8.3	23.0	-18.1
3	8.2951	70°・70m・1方向・斜め有	-2.2	8.1	21.5	-14.9
4	8.4251	90°・70m・1方向・斜め有	-2.6	8.1	24.0	-16.4
5	8.6145	70°・70m・2方向・斜め無	0.2	8.8	23.7	-19.7
6	9.2404	『[13]+[16]』組合せ	-3.7	8.6	21.5	-20.1
7	9.7460	90°・斜め飛行・1方向・斜め無	2.7	9.5	29.0	-13.8
8	10.0183	90°・70m・2方向・斜め無	5.2	8.7	30.4	-13.7
9	10.0489	90°・70m・1方向・斜め無	4.8	9.0	29.1	-15.4
10	10.3993	70°・90m・2方向・斜め無	4.6	9.5	29.3	-16.3

誤差(RMSE)が小さい順に並べ、飛行方法・撮影方法の上位10位までを記載
赤字は、斜め写真入りもしくは、カメラ角度が70°となっている撮影方法
『[13]+[16]』組合せ：『90°・70m・1方向・斜め無』 + 『70°・70m・1方向・斜め無』

(3) 森林三次元測量システム (OWL) と UAV を使用した樹高測定方法の精度と活用方法

ア プロット内のヒノキ56本の平均樹高は22.9mであり、梢端標高から根元標高を差し引いて求めた樹高と実測 (Vertex) の比較について、RMSEの小さかった飛行・撮影方法は(2)と同様に最後に斜め写真を入れる設定もしくは、カメラ角度が70°の設定とした撮影方法でした(表2)。RMSEが最も小さい飛行・撮影方法ではRMSEが0.472m、実測との差の平均が-0.03±0.47mであり、参考元の方法が実測との差の平均が-0.22±1.20mであったことから、斜め写真等を入れる設定が有効であると考えられました。また、実測との差が0.5mを下回ったことから樹高測定として使用できる可能性が考えられました(同等性検定 同等性マージン0.5m・95%信頼区間、 $p<0.001$)。しかし、小田(2021)の報告では立木8本を伐採し、伐倒した立木を巻尺で測定した樹高とVertexにて測定した樹高を比較したところ、RMSEが1.54mでありVertexを使用して測定した樹高の方が高くなっており、実際の樹高と異なる可能性が考えられました。

表－２ 梢端標高から根元標高を差し引いて求めた樹高と実測との比較

誤差の小さい順	誤差(m)	飛行方法・撮影方法	差の平均(m)	差の標準偏差(m)	差の最大(m)	差の最小(m)
1	0.472	『[7]+[13]』組合せ	-0.03	0.47	1.03	-1.33
2	0.480	70°・80m・1方向・斜め有	0.08	0.48	0.99	-1.05
3	0.496	70°・80m・1方向・斜め無	0.07	0.50	0.92	-1.48
4	0.608	70°・100m・1方向・斜め有	0.35	0.50	1.38	-0.93
5	0.744	90°・100m・1方向・斜め有	0.60	0.44	1.42	-0.84
6	0.847	『[6]+[9]』組合せ	-0.52	0.67	0.79	-2.12
7	0.859	90°・80m・1方向・斜め有	0.73	0.46	1.56	-0.69
8	0.862	90°・100m・1方向・斜め無	0.74	0.45	1.62	-0.73
9	0.875	70°・80m・2方向・斜め無	0.46	0.75	1.75	-2.41
10	0.890	70°・100m・2方向・斜め有	0.77	0.45	1.76	-0.60

誤差(RMSE)が小さい順に並べ、飛行方法・撮影方法の上位10位までを記載
赤字は、斜め写真入りもしくは、カメラ角度が70°となっている撮影方法
『[7]+[13]』組合せ：『90°・100m・1方向・斜め有』 + 『90°・80m・1方向・斜め有』
『[6]+[9]』組合せ：『90°・100m・1方向・斜め無』 + 『70°・100m・1方向・斜め無』

イ プロット以外の68本について、実測の平均樹高22.3mであり、UAVから得られた梢端標高から1 m DEMでの根元標高を差し引いて計算した樹高と実測との差は、 $-0.5 \pm 0.9\text{m}$ (RMSE1.0m) でした。

OWLで測定された胸高直径、(3)アで最も精度が良かった飛行・撮影方法で得られた樹高、オルソ画像を用いて計測した樹冠投影面積から得られた重回帰式は、次のとおりとなりました。

$$\text{胸高直径 (予測値)} = (\text{樹高} \times 0.84123) + (\text{樹冠投影面積} \times 0.65993) + 2.55651$$

(補正 R^2 : 0.647, RMSE: 2.7cm, t値 樹高: 3.231, 樹冠投影面積: 6.921, 切片: 0.468)

実測の平均胸高直径は、30.9cmであり、上記の式から予測された胸高直径との差は $-1.7 \pm 2.6\text{cm}$ (RMSE3.1cm)であり、また、これらにより算出された単木材積と実測との差は $-0.10 \pm 0.14\text{m}^3$ (RMSE0.17 m^3)であり、計測した68本の実測の材積と比較して87.0%となりました。林野庁(2021)の報告では、航空レーザ測量で樹高・樹冠投影面積を測定し、重回帰式(べき乗)を用いて胸高直径を推測したところ、RMSEが2 cm程度であったため、航空レーザ測量の結果がある場合はそれを用いて胸高直径を推測したほうが精度が良いと考えられました。なお、今回測定した値を同様に重回帰式(べき乗)を用いた場合はRMSEが3.3cm、計測した68本の実測の材積と比較して、86.1%となり精度が少し低くなりました。古川ら(2020)は、樹冠長・樹冠幅・樹冠面積・樹冠体積のそれぞれと胸高直径との相関関係をみたところ、最も相関が高かったのは樹冠体積であったため、樹冠体積を用いて回帰式を求めることができれば精度が高くなる可能性が考えられました。

3 おわりに

今回、UAVによる写真測量から得られる三次元点群データやDEMデータ等を用いて林分調査方法について検討しました。上記(2)の結果は、UAVによる写真測量から得られるDEMデータについては斜め写真等を入れることで精度が向上することが考えられました。また、上記(1)・(3)の結果は、いずれも実測の材積の9割弱程度であり、精度の向上が必要でした。

今回のデータ処理にあたってはパソコン上で手動操作にて行ったため、上記(2)以外は通常の調査より特に内業について人工数が掛かり増しになったため、実用化には他機関等の協力を得て自動化することが必要であると考えました。

UAVを有効活用するため、森林技術・支援センターでは平成30年度から中部森林管理局主催の「無人航空機活用技術研修」のサポートを行い、令和3年度からは「ドローン操作講習会」を主催しており、今後も内部職員や地方自治体職員等のUAVの操作技能向上を目指した技術普及に取り組んでいきたいと思っています。

4 引用文献等

- ・吉坂英則(2022) ドローンによる高精度計測の検証と利用について～RTKによる森林計測～. 令和4年度近畿地方整備局研究発表会
- ・木村圭佑・山下尚・小塚清(2020) RTK-GNSS 搭載型 UAV を用いた空中写真測量における標定点削減に関する検討. 建設施工と建設機械シンポジウム論文集(Web) 31-34
- ・那須満まる・篠原庄次(2024) 低コスト省力造林の取組について～オルソ画像を活用した下刈省略区域の判定～. 令和6年度国有林野事業業務研究発表会
- ・神野有生・八田滉平・福元和真・田村尚也・宮崎真弘・米原千絵・浦川貴季・清水隆博・炭田英俊(2019) UAV 写真測量のSfM における斜め撮影の効率的配置, 標定点の省略可能性, 水の影響と対策に関する検討. 日本写真測量学会 令和元年度年次学術講演会発表論文集 5-8

- ・藤原峻・保田浩・齋藤正博・黄川田智洋・松葉修一・杉浦 綾・眞田康治・秋山征夫(2022) 高精度測位システムを搭載したUnmanned Aerial Vehicle (UAV) によるイネ稈長推定法の検討. 育種学研究 24 巻 1 号 12-21
- ・小花和宏之・早川裕式・坂上 清一(2021) RTK-UAV測量において3次元モデルのDomingを低減する方法ーGCPを使用せずにcmレベルの精度を実現する撮影・データ処理ー. システム農学 37巻 2 号 29-38
- ・小田三保(2021) UAV-SfM 法による地上型レーザースキャナの樹高補正. 九州森林研究No. 74 95-96
- ・森林三次元測量システムOWL200型 パンフレット
- ・坪倉真(2020) ICT機器を活用したこれからの森林管理～地上レーザースキャナによる樹高計測の検証と補正・補完～. 令和 2 年度国有林野事業業務研究発表会
- ・国土地理院ウェブサイト 基盤地図情報 数値標高モデル 1 mメッシュ (FG-GML-5337-62-DEM1A)
- ・高田雅也・神野有生・加賀谷仁秀・春名正基 (2021) RTK測位型UAV撮影による標定点レスSfMにおける撮影方法・解析設定の影響：道路沿いの現地実験データを用いた検討例. 写真測量とリモートセンシング 60巻 4 号 211-216
- ・林野庁 (2021) 令和 3 年度国有林野成長予測モデル整備事業報告書
- ・古川修平・長島啓子 (2020) 地上型レーザースキャナを用いて算出した樹冠量指標と胸高直径, 材積の関係. 森林計画学会誌 54巻 1 号