

UAV による撮影データを用いた森林作業道の地山勾配測量手法の検討

富沢直浩^{*}・家村達弥^{***}・矢田 豊

要旨：造林事業の補助金交付申請業務の省力化のため、UAV 空撮画像から作成したオルソ画像及び点群データを用いて森林作業道の地山勾配を測量する手法を検討し、計測値の精度及び、作業道測量に係る労務がどの程度省力化されるか検証した。その結果、計測値の精度は RMSE1.47° と実用上問題ないものとなり、測量に係る労務量は従来の現地測量と比べて約 40%削減される結果となった。以上を踏まえ、UAV 空撮によるオルソ画像及び点群データを用いた森林作業道の測量手順を確立し、その手法をマニュアルとしてとりまとめた。

キーワード：UAV, 作業道, 測量, 地山勾配, 点群データ

I. はじめに

近年、林業現場の測量業務において、無人航空機（ドローン）（以下、UAV）による空撮画像から作成したオルソ画像（以下、UAV オルソ画像）を活用する手法が採用されるようになってきた。石川県では、森林環境保全整備事業実施要領の運用（林野庁 2024）に従い、森林環境保全整備事業（以下、造林事業）の補助金の交付申請の際に、施業内容に応じて面積や延長等の測量成果が必要とされているが、これらの測量には UAV オルソ画像を活用できることとされている（石川県 2024a）。測量成果の確認を UAV オルソ画像上で行うことができるため、現地での検査も省略でき（石川県 2024b）、測量と検査の両方において労務の軽減が可能となっている。

森林作業道（以下、作業道）を開設して造林事業の補助金の交付申請をする際には、延長、幅員に加えて各測点における地山勾配の測量成果が必要とされている（石川県 2024a）。延長及び幅員はオルソ画像上で計測できるため、現地測量が省略可能である。しかし、UAV オルソ画像からは標高情報を得ることができないため、地山勾配を計測できず、現状では現地測量以外の測量手法が確立されていない。このため、石川県内では作業道の測量において UAV オルソ画像はほとんど活用されず、現地測量を行うのが一般的となっている。

石川県内における作業道の測量は、作業道の開設後に測点を設置してコンパス測量を行うとともに、各測点の山側斜面の地山でスラントにより地山勾配を測定する方法（以下、従来法）で行われている（石川県 2024b）。ただし、この手法による測量は、①測点の位置や測定位置、測定方向が少しずれるだけで勾配が大きく異なる

値となる可能性があり、恣意性が介入する余地があること、②急勾配の場合は法高が高く、勾配測定が容易ではないこと、等の問題を持ち合わせており、精度が高い測量が可能なものにはなっていない。

一方で、県内の林業事業体が UAV オルソ画像を作成する際には、Metashape Professional（Agisoft 社）（以下、Metashape）というソフトウェアを用いて処理するのが一般的となっている。Metashape を用いてオルソ画像を作成する際には、その処理過程において 3 次元座標の点群データも作成される。この点群データの座標値は測量用途に耐え得る精度であることが報告されており（早坂ら 2015）、皆伐施工地等の上空から地山を視認できる現場における作業道の地山勾配の測定にも使用可能であると考えられるが、具体的な検証事例は見当たらない。よって今回、この点群データを用いた作業道の地山勾配の測定手法を検討することで、UAV による空撮画像を用いた作業道の測量（以下、UAV 測量）手法を確立し、計測値の精度を検証するとともに、作業道の測量にかかる労務がどの程度省略化されるのかを確認することとした。

II. 方法

1. 使用した機体・ソフトウェア

UAV は、Mavic2 enterprise（DJI 社）を用い、Mission Planner（ArduPilot 開発チーム）及び Litchi for DJI Drones（VC Technology 社）により飛行計画を作成し、表-1 に示した撮影諸元に基づく自動飛行による撮影を実施した。撮影データのオルソ化及び点群データの作成には、Metashape Ver.2.1.2 を使用した。オルソ画像の処理には QGIS v3.32.2（QGIS Development

^{*}石川県県央農林総合事務所森林部 ^{***}金沢森林組合森本事業所

表-1. 各調査地の概要

項 目	金沢市 富樫県有林	金沢市 加賀朝日町	金沢市 福久町
調査事項	労務量	精度	精度
施業種	皆伐	皆伐	皆伐
施業時期	2024年9～10月	2023年6～7月	2023年11月
施業面積 (ha)	1.32	0.57	0.47
森林作業道開設延長 (m)	578	125	71
UAV撮影時期	2024年11月	2024年5月	2024年5月
飛行高度設定	対地高度一定	飛行高度一定	対地高度一定
撮影対地高度(m)	70	70(70~80)	60
オーバーラップ率(%)	90	90	90
サイドラップ率(%)	70	70	80
点群データの解像度(cm/pix)	9.1	9.9	10.8
オルソ画像の解像度(cm/pix)	2.3	2.5	2.7

Team) を、点群データの処理には CloudCompare v2.13 (Girardeau-Montaut D.) を用いた。また、地山勾配の計算等の測量データの整理・とりまとめには Microsoft Excel 365 (Microsoft 社) を使用した。

2. 調査地

皆伐を行い、その際に作業道を開設した金沢市の3箇所において調査を行った。各調査地における調査事項、施業内容、UAVでの撮影時の設定、点群データ・UAV オルソ画像の解像度は表-1のとおりである。

3. UAV 測量と従来法の労務量の比較

金沢市の富樫県有林の皆伐施業地内における作業道の測量作業について、UAV 測量を行った場合と、従来法を行った場合のそれぞれの作業時間をいずれも2024年11月に計測した。コンパス測量における方位角と水平距離の測定は、デジタルコンパス内蔵のレーザー距離計である TruPulse360R (Laser Technology 社) を、地山勾配の測定には、スラントと2.0mの測量用ポールを用いた。

労務量は、以下の項目の作業時間を計測した。

- ①準備・片付（飛行計画作成、測量器具の準備・片付け）
- ②現地作業（移動時間、UAV 操縦、現地測量作業）
- ③データ処理（オルソ化処理、点群データ処理、データ整理・とりまとめ）

なお、計測時間には小休憩を含むものとし、昼休み等の長時間の休憩時間は除いた。また、

作業に慣れた者による作業時間を計測した。

4. UAV 測量による地山勾配の測量精度検証

金沢市加賀朝日町地内及び同市福久地内の皆伐施業地の作業道について、UAV 測量を行った。また2025年1月に、同現場において UAV 測量と同じ測点に横断線を設置し、その両端点間の勾配を、TruPulse360R を用いて計測した。これらの測量で得られた各測点の地山勾配のデータを比較し、UAV 測量による地山勾配の測量精度を確認した。

Ⅲ. 結果

1. UAV 撮影データを用いた作業道測量の手順

上述した UAV 及び Metashape を使用して得られたオルソ画像と点群データを用いることにより、以下の手順により作業道の測量を行うことができた。

- ①事業完了時に撮影された UAV オルソ画像から、作業道の中心線の線形データを作成 (QGIS)
- ②点群データを用い、作業道中心線の直交方向に等間隔で横断線データを作成 (CloudCompare)
- ③各横断線の両端点の標高データを出力 (QGIS)
- ④出力した標高データから、各測点における地山勾配を算出して測量成果を作成 (Excel)

また、上記の手法にて測定するにあたり、以下の事項について検討した。

表-2. UAV 測量と従来法の測量の労務量の比較（金沢市富樫県有林）

項目	作業内容	UAV測量			従来法の測量		
		人数 (人)	所要時間 (分)	延べ時間 (分)	人数 (人)	所要時間 (分)	延べ時間 (分)
1.準備・片付 (内業)	飛行計画作成	1	45	45	-	-	-
	測量機器準備	1	5	5	2	10	20
	測量機器片付け	1	5	5	2	5	10
2.現地作業 (外業)	移動時間(事務所⇄現場)	2	60	120	3	60	180
	測量作業	2	10	20	3	110	260
3.データ処理 (内業)	オルソ化	1	50	50	-	-	-
	点群データ処理	1	40	40	-	-	-
	データ整理・とりまとめ	1	10	10	1	30	30
外業計				140			440
内業計				155			60
合 計				295			500

1) 測点の設定方法

測点は CloudCompare で容易に設定できること、恣意的な設定を排除できることから、等間隔で設定することとした。測点間隔は、2023 年度に県央農林総合事務所管内で造林補助事業に申請のあった森林作業道全 39 路線（総延長 26,707m）の測量成果における平均測点間距離が 9.64m であったことから、これと概ね同程度となるよう、10m 以内の等間隔に設定することとした。従来法と同様に、等間隔ではなく任意の測点を設ける手法についても検討したが、CloudCompare での処理方法が煩雑となること、またデータの客観性が損なわれることから、採用しなかった。

2) 横断線の長さ（水平距離）

幅員 3.0m、地山勾配 30° の標準断面では、道路中心から法面の端部までの水平距離が片側 4.0m 程度となる。これに片側 1.0m の余裕幅を加えた水平距離 10.0m を各測点での横断線の長さとした。

3) 横断線の幅（点群取得幅）

横断線の幅（横断線の標高値を得るために点群を取得する幅）は 50cm（片側 25cm）とした。点群の解像度は 10cm 前後であったため、より狭い幅でも処理できる可能性は高いが、今回は 50cm に設定した。

4) 地山勾配の測定方法

各測点における地山勾配は、各横断線の両端点の標高差と横断線の長さから

$$\text{地山勾配}(\text{°}) = 180/\pi \times \arctan(h/l)$$

h: 横断線の両端点の標高差(m)

l: 横断線の水平距離(m)

により求めることとした。

5) 不正値の処理方法

今回用いた点群データは UAV で撮影された画像から得たものであるため、標高データは上空から見える部分のものである。よって、横断線上に樹木や集積棚等の障害物がある場合には、地盤高ではなく障害物の高さを拾ってしまい、不正値（過大値）となってしまうケースがあった。この場合、横断線にかかる障害物の点群を CloudCompare で除去することにより、不正値の補正を行った。

6) 作業マニュアルの作成

以上の工程を取りまとめた詳細な作業手順については別途マニュアルを作成し、普及に活用することとした（富沢・矢田 2025）。

2. 各測量作業における労務量の比較

UAV 測量を行った場合と従来法を行った場合のそれぞれの労務量の計測結果は表-2 のとおりとなった。UAV 測量を行った場合の労務量は、従来法を行った場合の約 59% に減少した。外業と内業の労務量をそれぞれ比較すると、UAV 測量を行った場合の外業は従来法を行った場合の約 32% に減少したのに対し、内業では約 258% に増加した。なお、従来法における作業道の測点数は 75 だった。

3. 現地測量データとの比較

UAV 測量の地山勾配を、UAV 測量と同じ測点・横断線において現地で測定した地山勾配と比較したところ、その誤差は 27 点中 20 点（74%）が ±2° の範囲となり、RMSE は 1.47° となった（図-1）。

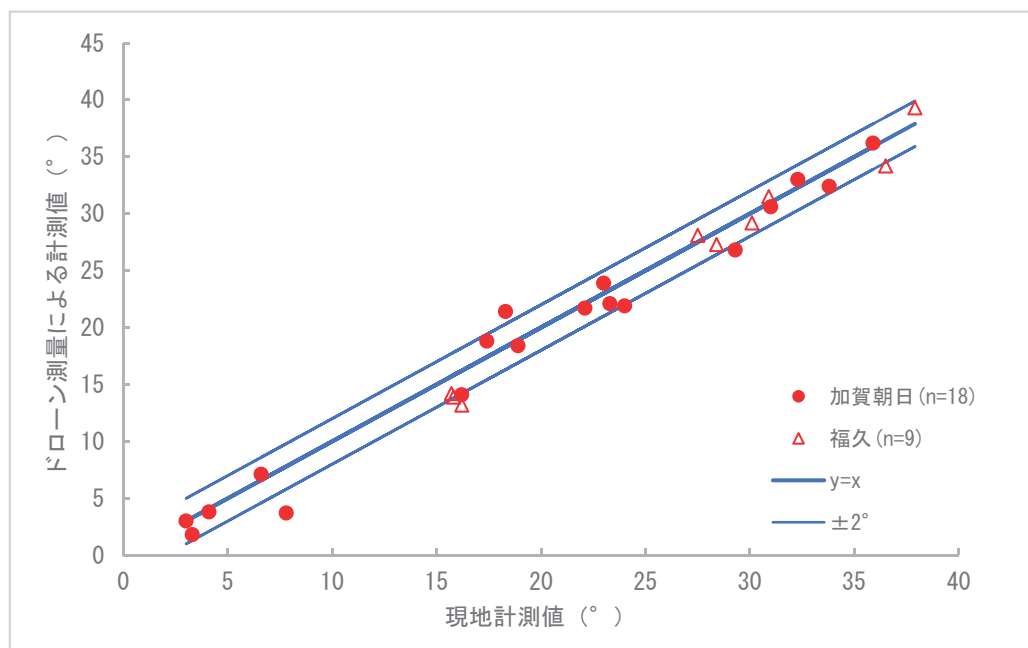


図-1. UAV 測量による地山勾配計測と現地で同様の計測をした場合の計測値比較

IV. 考察

1. UAV を用いた作業道の測量手法の検討

今回検討した手法による UAV 空撮画像から得られた点群データは、上空から視認可能な部分でのみ地山の標高を測定できるため、樹木が多く残る施業現場（間伐等）では使用困難であり、皆伐及び伐採率の高い更新伐等の施工地であることが適用条件となる。なお、今回使用した 2 つのソフト（QGIS, CloudCompare）はいずれもフリーソフトウェアであるため、既に Metashape を使用してオルソ画像を作成している事業体においては、追加費用がかからず導入は比較的容易であると考えられる。

2. UAV 測量による労務上・管理上の利点

表-2 のとおり、UAV 測量を活用することで、現地での測量作業を省略できるため、測量に係る労務を大きく低減できることが明らかになった。また、UAV オルソ画像を作成することから、作業道の測量だけでなく、皆伐等の施業範囲の周囲測量も行うことができるため、施業全体では今回の調査結果以上に測量労務を削減できる可能性がある。ただし、今回は 1 箇所でのしか労務量を調査できていないため、より高精度で定量的に労務量を把握する場合には、多くの施工地における検証が必要である。

また検査時において、現地で全路線を踏査することなく、点群データから全線の状況を立体的に俯瞰できること、開設直後の状況を点群

データとして保存できることは、検査時の省力化や作業道の維持管理上のメリットであると考えられる。

3. 測量結果の比較と測量精度

UAV 測量で得られた地山勾配と、現地で UAV 測量と同じ測点・横断線を設定して得られた地山勾配を比較したところ、今回の検証の範囲では、UAV 測量の成果を活用しても問題ない精度であるものと考えられた。なお、従来法では、測点や地山勾配を測定する位置において恣意性が介入する余地があったが、UAV 測量では恣意性が介入しにくく、従来法よりも客観性の高い値を得ることができるものと考えられる。

4. UAV 測量時に留意すべき条件について

今回、複数箇所のデータを処理した結果、以下のような現場条件では、UAV 測量時に留意が必要であることが分かった。

- ①路線近くに残存木や集積棚等の障害物が多い場合：不正値が多くなる傾向がある。この場合、補正作業に時間を要するだけでなく、残存木が多い場合など、地上の標高が得られない場合には、撮影画像からの測定が困難なこともあるものと考えられる。
- ②スイッチバック線形など、隣接路線がある場合：横断線の端点が隣接路線に入ってしまう、地山で測定されないために、実際より緩勾配になる傾向があるものと考えられる。

③幅員が広い場合：勾配が急な場合、横断線の端点が法面の途中になってしまい、実際より緩勾配になる傾向があるものと考えられる。

なお、②および③については、従来法でも地山の測定が困難である等、点群データによる測定に限った問題ではない。

5. 今後の課題

今回、UAV を用いて作業道を測量可能であることが確認できたことは、作業道の測量・検査の労務省力化、測量結果の客観性と精度の向上等の点において、大きな意義があるものと考えられる。今後検証点数を増やして、その適用範囲等を確認する必要がある。なお、今回の手法で大きな課題となるのは、樹木が少ない皆伐等の施工地でしか活用できないことであろう。この問題に関しては、間伐等施工地では従来の空撮プランに加え、作業道の線形に沿って（安全等に支障のない範囲で）低空の飛行・空撮を行うことで、必要な点群を得ることができる可能性がある。また、UAV を用いたレーザー測量が安価かつ容易に実施可能になれば、解決される可能性がある。

また、今回は既存のフリーソフトでの処理方法を検討したものであるが、2 つのソフトを交互に使う必要があるなど、操作手順はやや煩雑である。よって、今回使用しなかったソフトを用いることで作業をさらに簡略化できるかどうかについては検証する余地があり、さらに効率的な作業手法の開発が待たれるところである。

謝辞

本研究を行うに当たり、金沢森林組合の皆様におかれては、現地測量等の調査に協力していただいた。石川農林総合事務所の北口由美専門員には、白山市内における近年の取組についての情報を提供していただいた。また、奥能登農林総合事務所の一二三悠穂専門員には、CloudCompare の操作手法についてのアドバイスをいただいた。厚く御礼申し上げる。

引用文献

早坂寿人・大野裕幸・大塚力・関谷洋史・瀧繁幸(2015) UAV による空撮写真を用いた三次元モデリングソフトウェアの精度検証. 国土地理院時報 127: 107-116

石川県(2024a) 石川県造林事業実施要領. 石川県

石川県(2024b) 石川県森林作業道実施要領. 石川県

林野庁(2024) 森林環境保全整備事業実施要領の運用.

https://www.rinya.maff.go.jp/j/seibi/sinrin_seibi/attach/pdf/index-38.pdf (2025.1.31 参照)

富沢直浩・矢田 豊(2025) オルソ画像と点群データを用いた森林作業道の測量データ作成手順. 石川県(普及資料)