

# 積雪期の UAV-SfM 測量における 地上基準点設置作業の効率化に関する研究

高橋 浩司<sup>1</sup>・白川 龍生<sup>2</sup>・長沼 芳樹<sup>3</sup>・佐野 至徳<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 北見工業大学 大学院工学研究科 (〒090-8507 北海道北見市公園町165番地)  
E-mail: d2071400051@std.kitami-it.ac.jp (Corresponding Author)

<sup>2</sup>正会員 北見工業大学 工学部社会環境系准教授 (同上)  
E-mail: shirakaw@mail.kitami-it.ac.jp

<sup>3</sup>非会員 株式会社構研エンジニアリング 技術管理部  
(〒065-8510 北海道札幌市東区北18条東17丁目1番1号)  
E-mail: y.naganuma@koken-e.co.jp

<sup>4</sup>非会員 株式会社構研エンジニアリング 技術管理部 (同上)  
E-mail: y.sano@koken-e.co.jp

積雪期の道路管理においては、道路横の斜面等での積雪深の変化を適切に把握することが重要である。積雪深を計測するには、近年活用事例が増えている UAV-SfM 測量が効率的だが、無雪期の点群と位置を正確に重ね合わせる必要があるため、積雪斜面で安定的に恒常的な地上基準点を複数設置することは難しいと指摘されていた。そこで本研究では、UAV の測位方式の違い、斜面上に設置する地上基準点の数の違いに着目し、その計測精度を検証した。結果、(1) RTK 搭載型 UAV を用いること、(2) 地上画素寸法を 1cm 相当で撮影すること、(3) 地上基準点を 2 点以上配置し SfM 解析で使用することを条件に、積雪深の計測誤差は+6.4cm (8%) に抑えられ、実用上問題ないことを確認した。このことから、積雪期の UAV-SfM 測量における地上基準点設置作業の効率化が図れることを明らかにした。

**Key Words:** *unmanned aerial vehicle, real time kinematic, ground control point, structure from motion, point cloud, digital elevation model, snow distribution measurement*

## 1. はじめに

特別豪雪地帯および豪雪地帯では、道路横の斜面や切土法面に雪が積もり、これが起因となり図-1のように冬期に雪崩災害が発生することがある。また、安心・安全な道路交通を確保するには、道路横の斜面や切土法面における積雪深の変化を適切に把握し、図-2のように法面の事前除雪や一時的な通行止めにより、この問題に対処する必要がある。斜面等における積雪の分布は、従来、雪尺やスノープローブ (測深棒) を用いて、調査者が直接計測し把握する方法、航空写真測量や衛星リモートセンシングを用いて広範囲に間接計測する方法が広く用いられている<sup>1)</sup>。しかし、直接計測は調査範囲全体の計測精度の低さや調査時の雪崩に対する危険があること、間接計測は高頻度の計測や解像度の高い計測に高コストかつ時間を要するなど、いずれの計測方法においても複数の問題が指摘されている<sup>2,3)</sup>。



図-1 雪崩災害の事例 (北海道上川郡清水町)



図-2 雪崩予防として法面除雪を行う作業員

近年、自然災害調査や地形学分野では、新たな測量技術として UAV (Unmanned Aerial Vehicle : 無人航空機) による撮影と SfM/MVS (Structure-from-Motion / Multi-View Stereo : 多視点ステレオ画像を用いた写真測量) を組み合わせた手法 (以下, UAV-SfM 測量) が導入されている<sup>4),5)</sup>。この手法は、低コストで特殊技術を必要とせず、かつ安全な場所から撮影可能である。積雪の計測においては、小花和らが無雪期および積雪期の2時期の差分から積雪深を算出し、実測値との相対誤差は平均 8%であると述べている<sup>2)</sup>。高橋らは、UAV-SfM 測量を利用した防雪設備周辺の雪面形状を計測する際の最適な撮影条件として、1) 雪質が降雪直後の新雪以外であること、2) 雪面の反射率が 0.9 未満であること、3) 天気が雪面に陰影のできやすい直達日射が卓越する晴れであることを示した<sup>6)</sup>。ここで反射率とは、入射太陽放射量と地球で反射された放射量との比<sup>7)</sup>であり、過去の研究ではアルベドメーター (クリマテック製 CPR-PCR-01) を現地に設置して上向きおよび下向き短波放射を取得し、その比率を積雪表面の反射率として算出している (通常、反射率の範囲は 0~1.0 で示される)。また、この文献<sup>6)</sup>では防雪柵周囲を対象とした場合、計測値の相対誤差は平均値 -4%、標準偏差 ±2% が得られ、実用上問題ないことを明らかにしている。

一方で、小花和らは、UAV-SfM 測量により積雪分布を推定するためには、例えば積雪前後のように複数時期の計測結果を正確な位置座標に基づき重ね合わせてその差分を計算する必要があると指摘している<sup>8)</sup>。通常、UAV は GNSS アンテナを内蔵しているが、その測位方式は単独測位方式であるため、SfM 解析に必要な高精度の位置情報が付与されず、作成した点群データを高い精度で重ね合わせることができない。そこで位置精度を向上させるため、計測エリア周辺に複数の地上基準点 (以下、GCP : Ground Control Point) を設置する方法がある。座標を地上で事前計測し、その後、SfM 解析時に GCP の計測値を代入する方法がある。しかしこの方法は、積雪による GCP の埋没、融雪による沈下や移動が発生するため、積雪環境下における経時的に安定した恒常的な GCP を複数設置することは極めて難しいとも指摘している<sup>9)</sup>。

この問題に対し RTK-GNSS (Real Time Kinematic - Global Navigation Satellite System) を搭載した UAV (以下、RTK 搭載型 UAV) を用いて GCP 点数を削減し計測する方法が提案されている<sup>9),10)</sup>。しかし、現状は積雪表面計測への適用にあたり、データ精度の検証等が未だ十分とはいえない。

そこで本研究では、UAV-SfM 測量で積雪表面を計測する際の条件について、2機種の UAV (RTK 搭載 / 非搭載) を用いた撮影実験を行い、測位方式 (相対測位 / 単独測位) の違いによる計測精度を検証した。また、斜面

上における GCP 設置作業の効率化を目的に、SfM 解析の際に入力する GCP 点数の違いが点群作成に与える影響に着目し、その精度を検証した。

## 2. 研究方法

### (1) 実験場所および実験方法

実験場所は、図-3に示す Sky-View 輪厚ドローンフィールド (北海道北広島市) である。実験範囲は、南北方向に約 140 m、東西方向に約 70 m の範囲で、南西方向に緩やかな下り傾斜を呈し、植生は計測に影響の出ない程度に刈り取られている。

図-4に検証方法を示す。実験方法は、無雪期および積雪期の2時期に実験範囲外側に複数の GCP を設置し、RTK 搭載型および RTK 非搭載型の2機種の UAV によって空中写真を撮影する。その撮影画像をもとに SfM 解析により、デジタル表層モデル (以下、DSM : Digital Surface Model) を作成する。SfM 解析では、GCP の数を

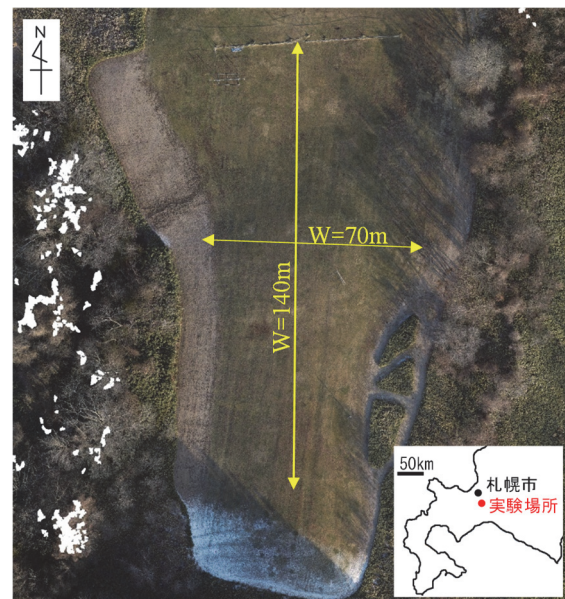
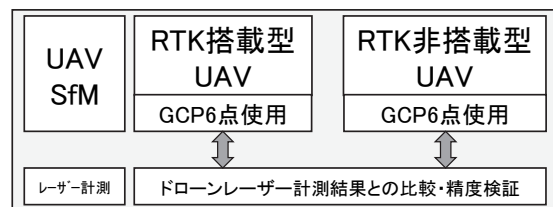
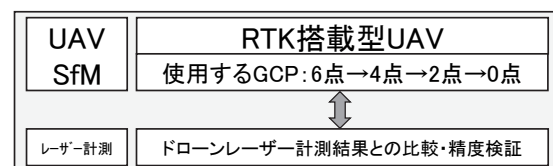


図-3 実験場所 (Sky-View 輪厚ドローンフィールド)



a) RTK搭載 / 非搭載型 UAV の2機種の違い



b) SfM解析に使用する GCP 数の違い

図-4 検証方法

変化させ、複数のDSMを作成する。このDSMについてドローンレーザー計測（以下、レーザー計測）を基準に、その精度を検証する。

(2) UAV 撮影およびドローンレーザー計測

撮影に使用する UAV 機体およびカメラ仕様を表-1 に示す。撮影は、鉛直下向きの俯瞰撮影とする。撮影画像における雪面でのオーバーラップ率（重複度）は、「公共測量作業規程の準則」に基づき、進行方向に 80%以上、隣接コースで 60%以上とする。撮影対地高度は、地上解像度が 1cm 程度となる 50 m に設定する。平面的な地上解像度は、RTK 搭載型 UAV で 0.6 cm/px, RTK 非搭載型 UAV で 1.4 cm/px である。画像の記録形式は SfM 解析の処理時間コストを考慮し JPEG 形式とする。

図-5 に RTK 搭載型 UAV による撮影の概要を示す。現地には RTK 固定基地局を設置し、これと UAV 本体とをワイヤレスで接続し、撮影する。RTK 固定基地局については、事前に電子基準点を基準とした RTK-GNSS 測量を行い、取得した位置座標および標高値を入力する。

また、基準となるレーザー計測は、表-1 に示す RTK-GNSS 搭載型 UAV (Matrice 300 RTK) に、カメラの代わりに表-2 に示すレーザースキャナを搭載し、雪面の計測を行う。計測高度は、撮影と同様に対地高度 50m とし、対象エリア全体の点群が計測可能となるよう自動航法で計測する。

(3) GCP の配置



本研究では、UAV 撮影の直前に GCP を配置する（図-6）。無雪期に設置した GCP は積雪によって埋没するため、撮影時に雪面上へ GCP を 6 点配置し、各 GCP について RTK-GNSS 測量により公共座標を算出する。ここで公共座標の高さは、一般に標高（楕円体高 - ジオイド高）で示される。しかし、UAV に記録される高さは楕円体高が採用されているため、両者の高さには違いがある。本実験においては、UAV 測量結果にジオイド高を減じた標高に統一し比較する。本実験におけるジオイド高は、国土地理院の測量計算サイト「ジオイド高計算」にて位置座標を入力し、算出した。また、GCP 箇所の積雪表面高さを検証点とする場合は、図-6 に示す GCP 板の周囲 4 点の高さの平均値を用いる。

(4) SfM 解析の手順

本研究では、先行研究と同様、SfM 解析に Agisoft Metashape Professional Version1.8.4 build 14856, 点群処理に TREND-POINT ver.9 を使用する<sup>9)</sup>。

UAV で撮影した画像は SfM 解析用ソフトウェアに読み込み、以下の手順で解析する。順に、「1. 画像特徴点の抽出及びタイポイントの検索」→「2. バンドル調整

表-1 撮影に使用する UAV 機体およびカメラ仕様

RTK-GNSS	搭載型	非搭載型
機体写真		
機種	Matrice 300 RTK	Phantom 4 Pro
メーカー	DJI	DJI
カメラ	Zenmuse P1	付属
カメラ特性		
画素数	4500 万画素	2000 万画素
センサーサイズ	35.9×24 mm	13.2×8.8 mm
解像度	8192×5460 pixl	5472×3648 pixl
ピクセルサイズ	4.4×4.4 μm	2.41×2.41 μm
画角	84°	84°
35mm換算焦点距離	24 mm	24 mm

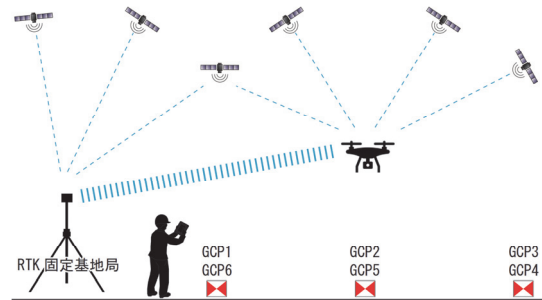


図-5 RTK 搭載型 UAV による撮影の概要

表-2 レーザースキャナ仕様

機種	Zenmuse L1
メーカー	DJI
システム性能	
測定距離	450 m @ 反射率80%, 0 klx
	190 m @ 反射率10%, 100 klx
点数	シングルリターン: 最大240,000pt/s マルチリターン : 最大480,000pt/s
レンジ精度	3cm@100m

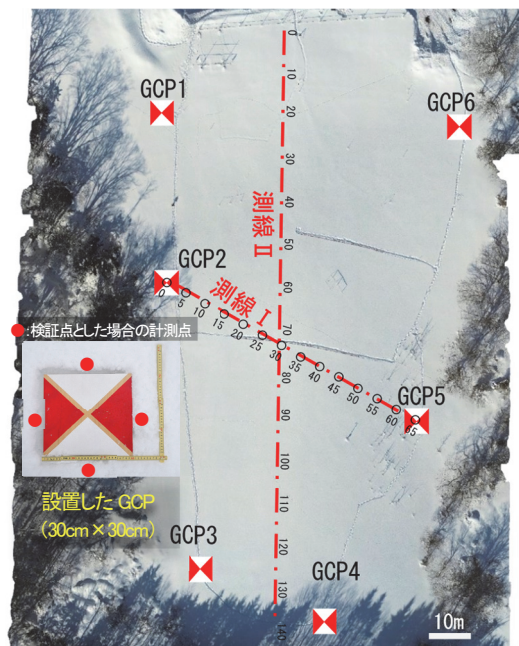


図-6 本研究における GCP の配置

(内部及び外部標定要素の推定) と低密度点群データの出力」→「3. 地上基準点及び精度検証点の設置と座標入力及び地上基準点を利用した再バンドル調整 (内部及び外部標定要素の高精度化)」→「4. 精度検証点を用いた精度検証」→「5. 高密度点群及び TIN (Triangulated irregular network) の作成」→「6. DSM およびオルソ画像の作成と出力」の6ステップで構成である<sup>11)</sup>。また、雪面画像を SfM 解析する場合には、積雪環境特有の可視光反射率の高さや、色調および凹凸の少なさから、点群の欠損等が生じることがある<sup>9)</sup>。このため、撮影画像の位置情報が重要であることから、SfM 解析ソフトウェアに画像を読み込む際には RTK-GNSS または GNSS により画像に付与された Exif (Exchangeable image file format) 情報による座標値を有効とする。

解析時のパラメータは、先行研究から以下のように設定した<sup>9)</sup>。写真のアライメント (写真を読み込み、撮影位置、姿勢等を推定) は、精度：中、マスク適用先：静止したタイポイントを除外した。メッシュ構築は、ソースデータ：高密度クラウド (品質：中)、深度フィルタ：弱 (頂点カラーを計算、内挿補間：有効)、サーフェスタ입：自由形状 (3D)、ポリゴン数：高 (1400000) とした。標定点の入力および補正は有効とした。

計測範囲全体の点群は、写真のアライメント処理後、写真測量の原理で 3 次元メッシュモデルの生成およびオルソモザイクを構築し作成する。無雪期の SfM 解析についても同様の手順で実施した。

(5) 雪面の高さおよび積雪深の推定方法

雪面の高さおよび積雪深の推定位置は、図-6 に示す 6 箇所の GCP 位置、および 2 測線 (測線 I : 5m 間隔, 測線 II : 10m 間隔) 上とする。積雪深は、積雪期および無雪期の点群データを TREND-POINT ver.9 で同時に読み込み、測線上の計測点の標高差により算出する。

(6) 実験ケース

表-3 に実験ケースを示す。撮影においては、case1~case4 は RTK 搭載型 UAV, case5 は RTK 非搭載型 UAV を使用する。SfM 解析においては、case1 および case5 では GCP6 点 (図-7a), case2 においては、南側の GCP2 点 (GCP3, GCP4) を除いた計 4 点 (図-7b), case3 においては、南側 GCP2 点 (GCP3, GCP4) および中間部の GCP2 点 (GCP2, GCP5) 計 4 点を除いた 2 点の GCP (GCP1, GCP6) のみ (図-7c) を用いる。case4 は、全ての GCP を使用しない (図-7d)。

なお、RTK 非搭載型 UAV においては、GCP 点数を削減し SfM 解析を行った結果、点群の計測誤差が数 m 以上となったことから、本研究の対象から除外した。

表-3 実験ケース

機種	RTK搭載型 UAV				RTK非搭載型 UAV	
	case1	case2	case3	case4	case5	case6
GCP1	○	○	○		○	○
GCP2	○	○			○	○
GCP3	○				○	
GCP4	○				○	
GCP5	○	○			○	○
GCP6	○	○	○		○	○

凡例 ○ : GCPを使用

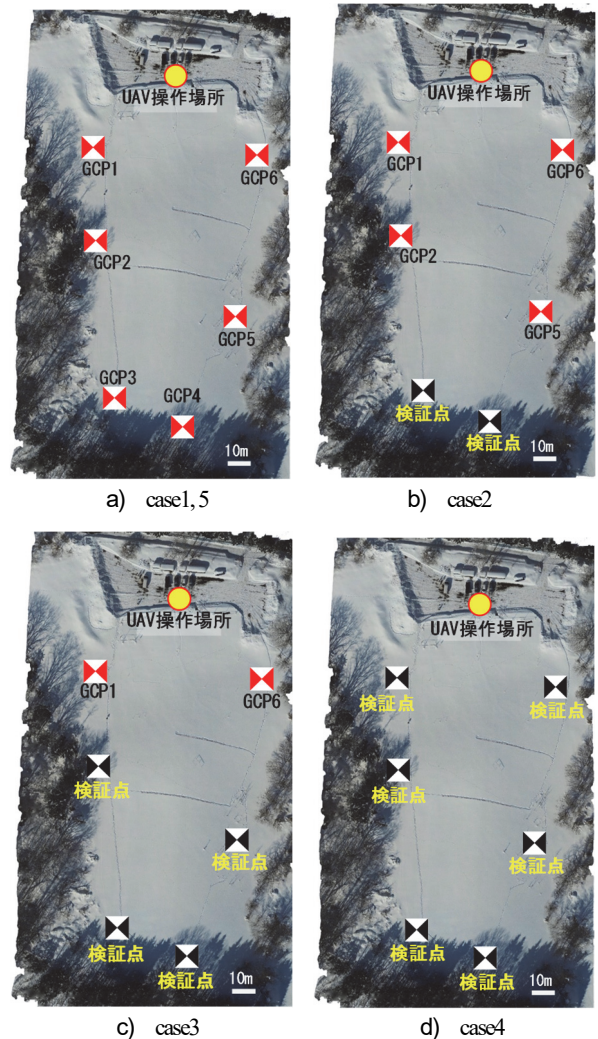


図-7 解析に使用する GCP と検証点

3. 結果

(1) 天候および雪面の雪質

積雪期の UAV 撮影については、2022年2月10日14時頃に実施した。天候は晴 (直達日射の割合が多く、雲量が 8以下)、実験場内に設置した気象観測装置 (ヤング社 CYG-5103) によると、気温：-0.8~-1.5°C、風速：0.9~1.5m/sであった。ここで雲量とは雲が全天を覆う割合を示す (通常雲量は 0+, 10-を含む13段階で 0~10の整数で

表され、8以下が晴れと定義されている)。また雪面の雪質は、撮影時が2月上旬の厳冬期であったため、新雪・こしもざらめ雪の混合型であった(図-8)<sup>12)</sup>。先行研究によると、確実に点群が作成可能な条件は、雪質は降雪直後の新雪以外、雪面の反射率は0.9未満(参考:地球全体の反射率は一般に0.3<sup>7)</sup>)、天候は晴れ、時間帯は下向き短波放射が適度にあり、雪面に影ができやすい日中とされており、点群作成のための撮影に適するものと判断した<sup>6)</sup>。

無雪期のUAV撮影については、2021年12月16日(天候:晴れ)に実施した。

### (2) 基準となるレーザー計測の精度

レーザー計測により取得した点群をTREND-POINT ver.9で読み込み、GCPの中心座標6点を検証点として計測した。計測方法については、GCP版の中心点に最も近接した点群の座標値を読み取った。この値に対して、地上で実施したネットワーク型RTK-GNSS測量による座標値と比較し、精度を検証した。表-4にレーザー計測による検証点での計測誤差を示す。各検証点における誤差は、平面( $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ )および高さ( $\Delta Z$ )方向で-5.2 cm以下、検証点6点のRMSE(Root Mean Squared Error: 平均二乗誤差)は4.4 cm以下であった。一般的なGNSS測量の誤差は数 cm程度とされており、今回のレーザー計測結果は実験の基準として問題ないと判断した。

### (3) SfM解析

SfM解析は、無雪期および積雪期についてそれぞれ実施した。ここで、SfM解析にあたり、RTK-GNSS測量に

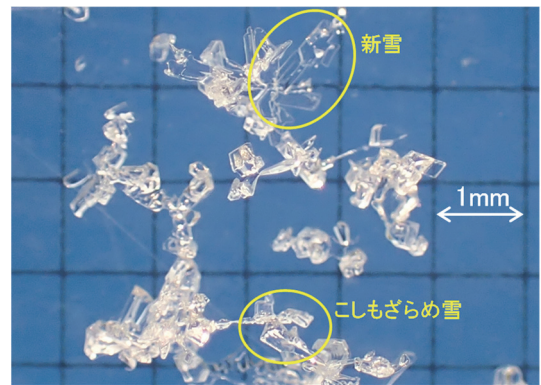


図-8 積雪表面の雪結晶(新雪,こしもざらめ雪の混合型)

表-4 レーザー計測による検証点での計測誤差

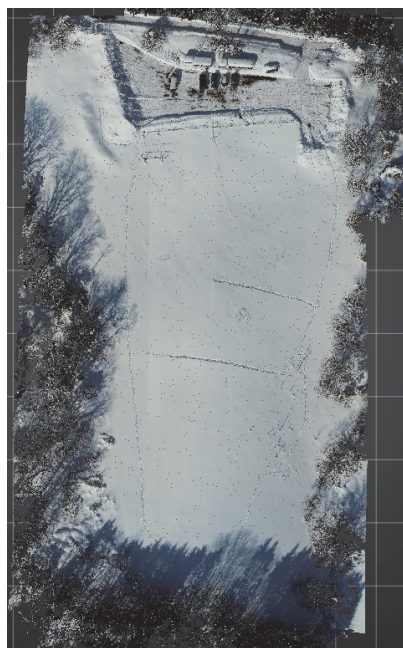
	誤差 (cm)			検証点
	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$	
GCP1	-2.3	-5.2	1.0	○
GCP2	-0.5	-2.2	4.6	○
GCP3	0.0	4.8	0.8	○
GCP4	-1.8	-4.8	-3.3	○
GCP5	-4.9	4.5	-3.0	○
GCP6	3.4	4.1	-0.2	○
RMSE	2.7	4.4	2.7	

より得られたGCPの位置座標の入力点数を6点、4点、2点、0点と変化させた。図-9にGCPを6点使用しSfM解析により作成した点群の例を示す。いずれのケースにおいても積雪深を計測するための標高値は取得可能な状態で、実験範囲内の点群未作成箇所や解像度が著しく低下する箇所もなく、点群が作成できていたことを確認した。

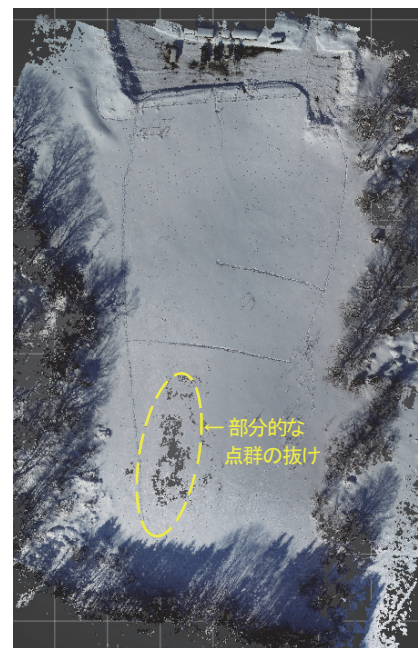
図-9 c)については、積雪期にRTK非搭載型UAVでの撮影画像をSfM解析した結果で、画像中央付近より南側の



a) RTK 搭載型 UAV (2021.12.16 撮影)



b) RTK 搭載型 UAV (2022.2.10 撮影)



c) RTK 非搭載型 UAV (2022.2.10 撮影)

図-9 UAV-SfMによる点群の例

一部に点群の抜けが見られるものの、図-6に示す2測線上の点群は欠けることなく作成できているため、本計測実験では問題無いものとする。

#### 4. 考察

##### (1) UAVの測位方式の違いによる雪面形状の計測精度

UAVの測位方式については、RTK搭載型(相対測位)および非搭載型UAV(単独測位)による2機種の撮影画像をもとに点群を作成し、その計測精度について検証した。SfM解析は、各撮影画像とGNSS測量によるGCP座標6点を全て使用し行った。表-5に、UAV-SfM測量による計測誤差を示す。結果、GCPにおける誤差(RMSE)は、RTK搭載型(case1)/非搭載型(case5)UAVいずれも誤差1.7cm以下であり、レーザー計測の結果と同様に一般的なGNSS測量の誤差程度に収まっていることがわかる。これにより作成した点群は積雪深を計測する上で実用的な精度が得られた。

雪面形状の再現性については、計測点での雪面および地表面の標高から断面図を作成し比較を行った。図-10に、図-6に示す測線Iおよび測線IIにおけるUAV-SfM測量による地表面および雪面の計測値(標高)を示す。地表面は、無雪期に実施したUAV-SfM測量結果である。積雪期に実施したcase1およびcase5は、いずれも無雪期に実施した地表面の凹凸を捉えており、RTK搭載型/非搭載型による大きな違いが見られなかった。

図-11に、測線Iおよび測線IIにおけるUAV-SfM測量とレーザー計測による積雪深の計測結果を示す。case1はRTK搭載型UAVによる計測結果であるが、測線Iおよび測線IIともにレーザー計測の結果とほぼ一致している。最大誤差は、測線I計測点0mで+5.3cmと全体に比べて比較的大きな値となっているが、この点については、両端の計測点0m,65mにGCP2およびGCP5があり、SfM解析時に公共座標で補正されていることから、レーザー計測の誤差と考えられる。これを除外した最大誤差は、測線II計測点50mで+3.4cmとなっており、一般的なGNSS測量の鉛直誤差の範囲に収まった。

一方、case5は積雪期に実施したRTK非搭載型UAVによる推定結果だが、case1に比べレーザー計測結果と乖離している。測線Iでは、両端部の計測点0m,65mではGCP点上のため誤差は小さいが、中間部に向かって、最大誤差は計測点30mで+19.8cmと大きい。測線IIでは、端部の最大誤差は計測点140mで-11.0cmであるが、中間部の最大誤差は計測点110mで+22.0cmであった。また、測線IIは、測線Iと異なり端部の計測点0m,140mにGCPがないことから広範囲でずれが大きくなったものと推察される。SfM解析は画像1枚ごとに記録されるExifデー

表-5 UAV-SfM測量による計測誤差 (case1, case5)

case1	誤差 (cm)			case5	誤差 (cm)		
	ΔX	ΔY	ΔZ		ΔX	ΔY	ΔZ
GCP1	0.3	2.7	1.0	GCP1	0.7	-0.6	0.1
GCP2	0.6	-0.9	0.5	GCP2	-1.4	0.2	-0.3
GCP3	1.6	0.4	-0.3	GCP3	0.7	2.9	0.2
GCP4	-0.2	-0.6	0.1	GCP4	2.0	-3.0	0.1
GCP5	-1.8	0.5	-1.1	GCP5	-3.0	0.0	-0.1
GCP6	-0.5	-0.1	-0.2	GCP6	0.9	0.5	0.1
RMSE	1.0	1.2	0.7	RMSE	1.7	1.7	0.2

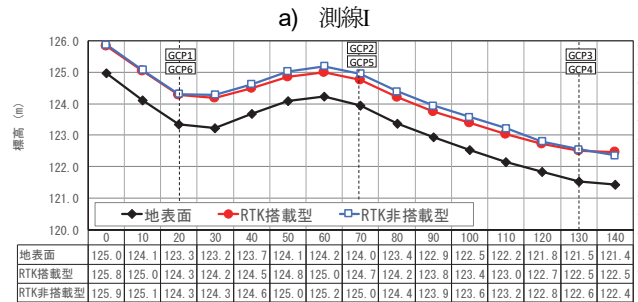
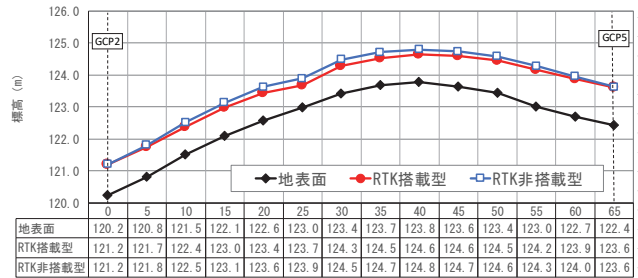


図-10 UAV-SfM測量による地表面および雪面の計測値(標高)

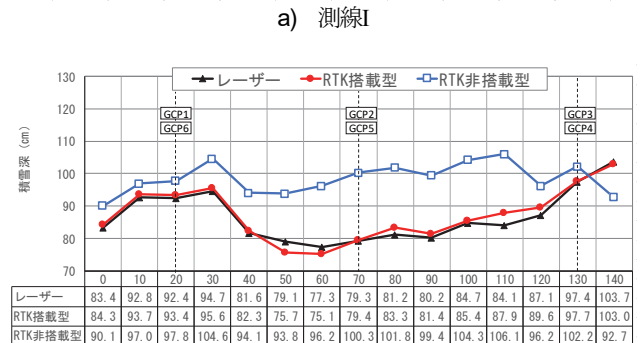
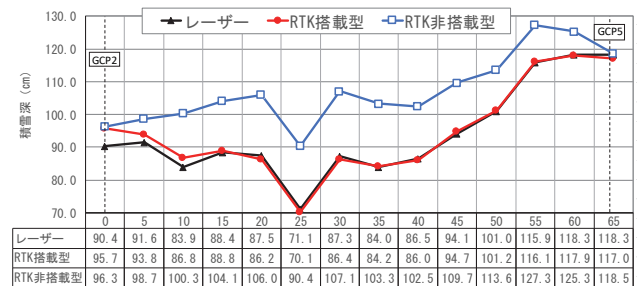


図-11 UAV-SfM測量およびレーザー計測による積雪深

タをもとに、撮影位置の推定、画像特徴点の抽出、タイポイントの検索が行われる。ただし、RTK非搭載型

UAVの撮影画像はGNSS単独測位のため位置座標の精度が低く、特に高さについては、UAVに搭載された気圧高度計より推定しているためさらに精度が低下し、解析結果に影響したものと推察される。

(2) GCP点数の違いによる雪面計測精度

GCP点数の違いについては、RTK搭載型UAVによる撮影画像をもとにGCP点数を変化させてSfM解析を行い、作成した点群をもとに、その計測精度について検証した。

a) 検証点での雪面計測の精度

表-6に、各ケースにおける検証点での計測誤差を示す。検証点での計測誤差は、UAV-SfM測量により計測した点群上のGCP位置座標について、地上で実施したRTK-GNSS測量結果を比較した。case2 (GCPを4点使用) およびcase3 (GCPを2点使用) においては、検証点でのXおよびY方向の誤差(平面での誤差)はいずれも-3.9cm ~ +9.7 cm, Z方向の誤差(高さの誤差)は-1.9 cm ~ +3.5cmだった。このうちGCP3のX方向の最大誤差がcase3で9.7cmと比較的大きな値であり、GCP3の位置が解析に使用したGCP1, 2, 5, 6から最も離れていたことが影響したものと推察される。しかし、地形に極端な凹凸がないこと、高さ方向の誤差が3.5cm以下に抑えられていることから、積雪深を算定する上で影響はないものと考えられる。一方、case4 (GCP不使用) においては、XおよびY方向の誤差は-1.4cm ~ +5.6 cmとcase2, case3と同程度であるのに対し、Z方向の誤差は+23.7 ~ +29.2 cmで、case2, case3と比較し誤差は大きい。ただし、いずれの検証点においても高さ方向に一定程度のずれが発生しており、ずれの平均値+27.1 cmを平行移動した場合の標準偏差は±2.1 cmとなるため、点群の高さ方向の歪みはcase2およびcase3同程度であると考えられる。この一定程度のずれは、使用したUAVの特性と考えられるため事前にこのずれの量を把握することが実用上重要である。

このことから、積雪期にRTK搭載型UAVを用いてUAV-SfM測量を行う場合には、撮影時に少なくとも2点以上のGCPを設置することにより、高さの計測誤差は

3.5cm以下に抑えられたことから、積雪深計測における実用上問題ないと考えられる。

b) 測線上での雪面高さの再現性

図-12に、各ケースのUAV-SfM測量およびレーザー計測による積雪深の誤差を示す。積雪深は式(1)、計測誤差は式(2)より算出する。

$$H = h_s - h_g \tag{1}$$

$$E = \frac{(H_{SfM} - H_L)}{H_L} \times 100 \tag{2}$$

ここに、H:積雪深(m),  $h_s$ :各計測点の雪面高(m),  $h_g$ :地表面高(m), E:計測誤差(%),  $H_{SfM}$ :UAV-SfM測量による積雪深(m),  $H_L$ :レーザー計測による積雪深(m)を示す。

図-12 a1, 図-12 a2は、測線Iにおける計測誤差を示す。case4を除く全てのケースで、西側端部の計測点0mから中央付近の計測点35mまでの誤差が大きい。この範囲は、現場が西側への下り傾斜であること、または前述の通りレーザー計測による誤差の可能性がある。一方、計測点35から東側端部の計測点65mに向け誤差が小さくなっている。

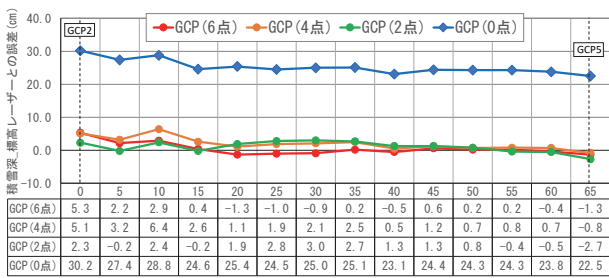
図-12 b1, 図-12 b2は、測線IIにおける計測誤差を示す。case4を除く全てのケースで、中間部の計測点50mから南側端部の計測点140mまでの誤差が大きくなっていくが、計測点50mを境に計測点140mに向け地形が傾斜しており、この影響が考えられる。一方、計測点0mから中間部の計測点40mまでは、誤差は小さい。これは図-6に示す通り測線上にGCPはないものの、計測点の周囲50m以内の範囲にGCP1, GCP6の2点があり、この2点の誤差が-0.5 ~ 1.0cmと小さかったことが影響したものと推察する。

表-7に、各caseの誤差の最大値を示す。ただし、測線Iの計測点0mについては、前述の通りレーザー計測の誤差と考えられるため、評価の対象外とした。

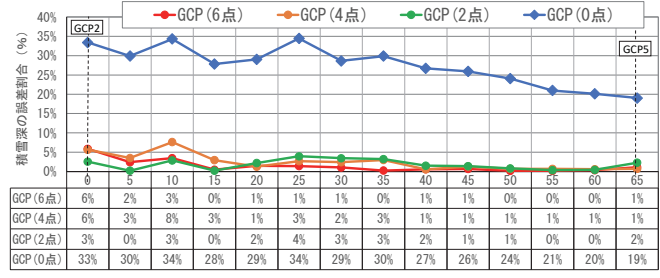
GCP数を図-6に示す6点全てを使用したcase1は、レーザー計測との誤差が測線Iの計測点10mで最大2.9 cm (3%)、測線IIの計測点110mで最大3.8 cm (5%)で

表-6 検証点での計測誤差

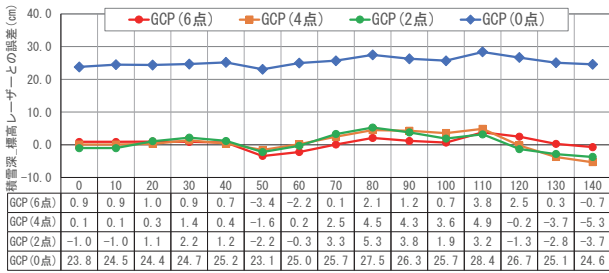
case2	誤差 (cm)			検証点	case3	誤差 (cm)			検証点	case4	誤差 (cm)			検証点
	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$			$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$			$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$	
GCP1	0.0	2.5	0.7		GCP1	0.6	1.9	0.5		GCP1	-0.9	1.3	29.2	○
GCP2	1.4	-1.5	0.2		GCP2	0.6	-0.1	-1.9	○	GCP2	-1.3	-0.5	26.0	○
GCP3	8.4	2.9	3.3	○	GCP3	9.7	3.0	3.5	○	GCP3	-0.1	1.5	28.7	○
GCP4	-1.4	-3.6	-1.0	○	GCP4	-3.9	-2.4	-1.9	○	GCP4	5.6	0.2	25.8	○
GCP5	-1.6	1.3	-0.8		GCP5	-3.6	4.7	3.3	○	GCP5	-1.4	3.0	28.9	○
GCP6	-0.1	0.1	-0.1		GCP6	-0.8	-0.1	-0.5		GCP6	-1.0	2.0	23.7	○
RMSE	3.6	2.3	1.5		RMSE	4.5	2.6	2.3		RMSE	2.5	1.7	27.1	



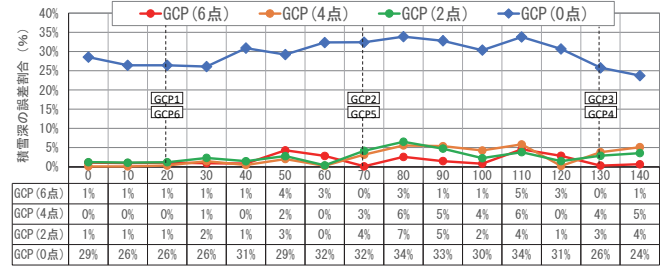
a1) 測線I (レーザー計測との誤差[cm])



a2) 測線I (レーザー計測との誤差比率[%])



b1) 測線II (レーザー計測との誤差[cm])



b2) 測線II (レーザー計測との誤差比率[%])

図-12 UAV-SfM 測量およびレーザー計測による積雪深の誤差

表-7 計測誤差の最大値

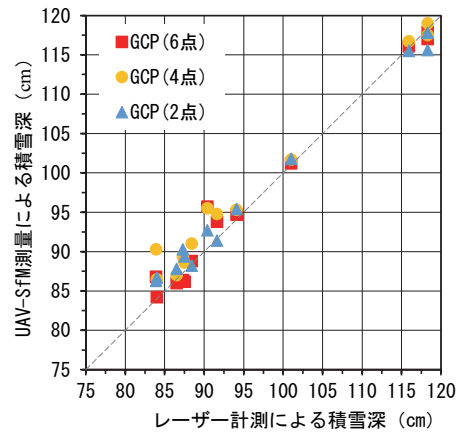
	GCP数	測線 I		測線 II	
		誤差(cm)	比率	誤差(cm)	比率
case1	6	2.9	3%	3.8	5%
case2	4	6.4	8%	4.9	6%
case3	2	3.0	3%	5.3	7%
case4	0	28.8	34%	28.4	34%
case4 <sup>※</sup>	0	1.7	2%	1.3	2%

※ -27.1cm補正した場合

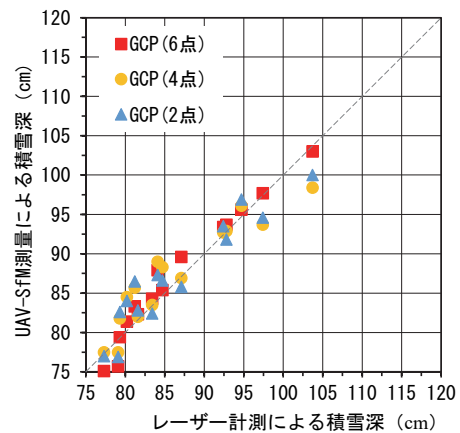
あり、各ケースの中で最も再現性が高かった。これは、計測範囲を囲うように GCP を配置したことにより、同範囲内の誤差が最小限に抑えられたものと考えられる。

GCP 数を図-6 に示す 4 点使用した case2 では、レーザー計測との誤差が測線 I の計測点 10 m で最大 6.4 cm (8%)、測線 II の計測点 110 m で最大 4.9 cm (6%) であった。また、GCP 数を図-6 に示す 2 点使用した case3 では、レーザー計測との誤差が測線 I の計測点 30 m で最大 3.0 cm (3%)、測線 II の計測点 80 m で最大 5.3 cm (7%) であった。これまで、法面上の積雪深を把握するためには、あらかじめ法面に設置した雪尺を離れた場所から目視により 10cm 単位で読み取っていた。本実験結果では、いずれのケースも case1 に比べばらつきはあるものの、最大誤差は 6.4cm (8%) で 10cm 以下に抑えられおり、実用上は積雪深の計測にあたり大きな問題ないと考えられる。

図-13 に、GCP 点数の異なる UAV-SfM 測量およびレーザー計測による積雪深の比較を示す。各ケース共に UAV-SfM による推定値は実測値に比べ高い傾向にあるが、GCP 点数の違いによる差異は小さかった。このこと



a) 測線 I



b) 測線 II

図-13 GCP 点数の異なる UAV-SfM 測量およびレーザー計測による積雪深の比較



から、雪面を対象として UAV-SfM 測量を行う場合には、RTK 搭載型 UAV を使用すること、計測範囲周辺を囲うように GCP を配置することにより、計測誤差を 5% 以内に抑えられることがわかった。また、GCP 数を減じた場合においても誤差が大きく変わらなかったことから、計測範囲内に GCP を 2 点以上配置することにより、計測誤差は 8% 以下に抑えられることがわかった。

一方、GCP を全く使用していない case4 は、測線 I, II 全てにおいて、誤差が大きい。レーザー計測との誤差が測線 I の計測点 10m で最大 28.8cm (34%)、測線 II の計測点 110m で最大 28.4 cm (34%) であった。撮影に使用した UAV は RTK-GNSS を搭載しているが、高さ方向は一定の誤差が出ていることから、少なくとも 2 点以上の GCP を配置する必要があるといえる。

## 5. まとめ

本研究では、積雪期の UAV-SfM 測量における地上基準点設置作業の効率化を目的に、測位方式の異なる UAV による撮影実験および SfM 解析の際に入力する GCP 点数を変化させた実験を行い、その計測精度を検証した。本研究により得られた知見は以下のとおりである。

- 1) 測位方式の異なる UAV (RTK 搭載/非搭載型) で雪面を撮影し、GCP を 6 点使用し SfM 解析を行った結果、GCP 点での高さの計測誤差はいずれも 1.7cm 以下であり、大きな違いが見られなかった。
- 2) RTK 非搭載型 UAV で撮影し、GCP を 6 点使用し SfM 解析を行った結果、計測点での最大誤差は、測線 II の計測点 110m において +22.0 cm (26%) で、計測点でのばらつきも大きい結果となったため、積雪期の計測に適さないと考えられる。
- 3) RTK 搭載型 UAV で撮影し、GCP を 6, 4, 2 点と変化させ SfM 解析を行った結果、計測点での最大誤差は、GCP を 6 点使用した場合 +3.8cm (5%)、GCP を 4 点使用した場合 +6.4cm (8%)、GCP を 2 点使用した場合 +5.3cm (7%) で、計測程度に大きな差はなかったことから、GCP 点数を減らした場合においても、積雪深計測における実用精度には問題ないことを確認した。
- 4) RTK 搭載型 UAV で撮影し、GCP を使用せず SfM 解析を行った結果、検証点での高さの最大誤差は +29.2 cm で、一定程度のずれが確認された。ずれの平均値 +27.1 cm を平行移動した場合の標準偏差は ±2.1 cm となるため、この一定程度のずれの量を把握することが実用上重要である。このずれの量を把握する方法として、地形条件の異なる場所や衛星捕捉数の異なる場所での撮影実験を数多く行い、傾向を分析する

のが望ましく、今後の課題と考える。

- 5) 本実験においては、計測範囲周辺を囲うように GCP を配置し、計測誤差は +3.8cm (5%) 以下に抑えられることができた。また、計測範囲付近に GCP を 2 点以上配置することにより、計測誤差は +6.4cm (8%) 以下に抑えられることがわかった。一方、GCP を全く使用しない場合には、高さ方向には一定の誤差が生じることがわかった。

以上より、RTK 搭載型 UAV を用いた UAV-SfM 測量により雪面形状計測を行う場合、撮影時の地上画素寸法を 1cm 相当に設定し、GCP を 2 点以上配置することにより、積雪深計測における精度を確保でき、実用上問題ないと考えられる。このことから、積雪期の UAV-SfM 測量における地上基準点設置作業の効率化が図れるものと考えられる。

謝辞：本研究の現地実験にあたり、ご協力をいただきました。ジオリサーチ北野智也様、猿渡久人様に感謝申し上げます。また、実験に際し敷地の使用をお認めいただきました。合同会社北海道スカイビュー福山様にお礼申し上げます。

## REFERENCES

- 1) たとえば、公益社団法人日本雪氷学会北海道支部：雪氷調査法，pp. 2, 38, 187-196, 1991. [Hokkaido Branch of the Japanese Society of Snow and Ice: Snow and ice survey method, pp. 2, 38, 187-196, 1991.]
- 2) 小花和宏之，河島克久，松元高峰，伊豫部勉，大前宏和：小型 UAV を用いた積雪分布の 3 次元計測，雪氷，78 巻 5 号，pp. 317-328, 2016. [Obanawa, H., Kawashima, K., Matsumoto, T., Iyobe, T. and Ohmae, H.: Three-dimensional measurement of snow distribution using a small UAV, *Seppyu*, Vol. 78, No. 5, pp. 317-328, 2016.]
- 3) Nolan, M., Larsen, C. and Sturm, M.: Mapping snow depth from manned aircraft on landscape scales at centimeter resolution using structure-from-motion photogrammetry, *The Cryosphere*, Vol. 9, pp. 1445-1463, 2015.
- 4) 井上公，内山庄一郎，鈴木比奈子：自然災害調査研究のためのマルチコプター空撮技術，防災科学研究所研究報告，第 81 号，pp. 61-98, 2014. [Inoue, H. Uchiyama, S. Suzuki, H.: Multicopter Aerial Photography for Natural Disaster Research, Report of Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 81, pp. 61-98, 2014.]
- 5) 早川裕式，小花和宏之，齋藤仁，内山庄一郎：SfM 多視点ステレオ写真測量の地形学適応用，地形，第 37 巻，第 3 号，pp. 321-343, 2016. [Hayakawa, Y. Obanawa, H. Saito, H. and Uchiyama, S.: Geomorphological Applications of Structure-from-Motion Multi-View Stereo Photogrammetry: A Review, Japanese Geomorphological Union, 37, 3, pp. 321-343, 2016.]
- 6) 高橋浩司，白川龍生，長沼芳樹，佐野至徳：UAV-SfM 測量による防雪設備周囲の雪面形状計測法，土

- 木学会論文集 F3 (土木情報学), Vol.79, No.9, 22-00139, 11pp, 2023, <https://doi.org/10.2208/jscej.22-00139>. [Takahashi, K., Shirakawa, T., Naganuma, Y., Sano, Y.: UAV-SfM Surveying method for measuring snow surface profile formed around snow fences, Japanese Journal of JSCE F3 (Civil engineering Informatics), Vol.79, No.9, 22-00139, 11pp, <https://doi.org/10.2208/jscej.22-00139>, 2023.]
- 7) 小倉義光：一般気象学（第2版補訂版），p. 114, 東京大学出版会，2020. [Ogura, Y.: *Ippan Kisyougaku (2nd Edition Supplement)*, p. 114, University of Tokyo Press, 2020.]
- 8) 小花和宏之, 坂上清一, 八木隆徳: 積雪深計測におけるRTK-UAVの有効性, 地形, 第41巻第1号, pp. 15-26, 2020. [Obanawa, H. Sakagami, S. and Yagi, T.: Effectiveness of RTK-UAV measurements for estimating snow depth distribution, Japanese Geomorphological Union, 41, 1, pp. 15-26, 2020.]
- 9) 小林裕之, 高岸且, 森川英治, 細野賢一, 江口輝, 小島光平: RTK機能搭載UAVとGNSS移動基地局の組み合わせによる写真測量の精度検証, 森林計画誌 短報, 55 No.1, pp.23-29, 2021. [Kobayashi, H. Takagishi, S. Morikawa, E. Hosono, K. Eguchi, A. and Kojima, K.: Accuracy verification of photogrammetry by the combination of an UAV with RTK function and a mobile GNSS station, Japan Society of Forest Planning, 55, 1, pp.23-29, 2021.]
- 10) 小花和宏之, 坂上清一, 八木隆徳: RTK-UAVを用いた地形計測の測位性能および省力効果, 地形, 第40巻第2号, pp. 125-134, 2019. [Obanawa, H. Sakagami, S. and Yagi, T.: Accuracy, Precision, and Labor Saving Effect of Terrain Measurement Conducted Using RTK-UAV, Japanese Geomorphological Union, 40, 2, pp. 125-134, 2019.]
- 11) たとえば, 内田庄一郎: 必携ドローン活用ガイド, pp.243-253, 東京法令出版株式会社, 2020. [Uchiyama, S.: *Hikkei drone katsuyo guide*, pp.243-253, Tokyo Horei Publishing Co., Ltd., 2020.]
- 12) たとえば, 公益社団法人日本雪氷学会: 積雪観測ガイドブック, pp.97-105, 株式会社朝倉書店, 2010. [The Japanese Society of Snow and Ice.: *Guidebook for Snow Observation*, Asakura Publishing Co., Ltd., 2010.]

(Received October 26, 2023)

(Accepted February 7, 2024)

## STUDY ON EFFECTIVE INSTALLATION OF GROUND REFERENCE POINTS FOR UAV-SfM SURVEYING METHOD IN THE SNOW SEASON

Koji TAKAHASHI, Tatsuo SHIRAKAWA Yoshiki NAGANUMA  
and Yoshinori SANNO

In road management during the snowy season, it is important to properly determine changes in snow depth on slopes next to roads. UAV-SfM surveying, which has been increasingly used in recent years, is an efficient method for measuring snow depth, but it has been pointed out that it is difficult to stably and permanently establish multiple ground reference points on snow-covered slopes, which is necessary to accurately superimpose the positions of point clouds during the snow-free and snow-covered seasons. In this study, we focused on the differences in positioning methods of UAVs and the number of ground reference points to be set up on slopes, and verified their measurement accuracy. As a result, it was confirmed that the measurement error of snow depth could be suppressed to +6.4 cm (8%), which is practicable for snow depth measurement, under the following conditions: (1) a UAV equipped with RTK is used, (2) set the ground pixel size to the equivalent of 1 cm when shooting, and (3) at least two ground reference points are installed for SfM analysis. This result indicates that the UAV-SfM surveying system can improve the efficiency of ground reference point placement during the snowy season.