

UAV-SfM測量による 防雪設備周囲の雪面形状計測法

高橋 浩司¹・白川 龍生²・長沼 芳樹³・佐野 至徳⁴

¹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)

²正会員 北見工業大学准教授 (同上)
E-mail: shirakaw@mail.kitami-it.ac.jp

³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

⁴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

積雪寒冷地での道路管理においては、既往の防雪対策を適切に評価することが重要である。防雪設備周辺の吹きだまり等を計測するには、近年活用事例が増えているUAV-SfM測量が効率的だが、積雪環境特有の条件から点群作成の可否や精度低下などの問題点が指摘されていた。そこで本研究では、雪面の雪質や下向き短波放射（明るさの基準）、積雪表面の反射率に着目し、使用するカメラのセンサーサイズや撮影高度を変化させ、点群作成の可否とその精度を検証した。その結果、積雪環境下においても、点群が欠けることなく無雪期同様に作成できることを確認した。また、推定値と実測値の比較により、相対誤差の平均値-4%、標準偏差2%が得られた。このことから、吹きだまりを対象とした場合、実用上は問題ないことを明らかにした。

Key Words: *unmanned aerial vehicle, structure from motion, point cloud, digital surface model, snow distribution measurement*

1. はじめに

積雪寒冷地において、安全・安心な道路交通を確保するためには、既往の防雪対策の適切な評価が重要となる。図-1には、冬期視程障害対策として設置された防雪柵（吹き払い柵）周辺の状況を示す。吹き払い柵は、防雪板で風を制御し、柵の下部間隙から加速されて吹き抜ける強い風で道路の路側や路面の雪を払うことで、視程障害を緩和する機能を有する。しかし、この例では下部空間に吹きだまりが発生し、本来の機能を果たせず道路交通の支障となっている。

従来、吹きだまり等の積雪分布を把握するには、雪尺やスノープローブ（測深棒）を用いて人が点で直接計測する方法や、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面で間接的に計測する方法が広く用いられてきた¹⁾。しかしながら、これらの方法は、調査範囲が広域の場合、計測点数の少なさによる調査範囲全体の



図-1 防雪柵周辺の吹きだまり状況の事例

計測精度の低さ、雪崩が発生する地域での危険性、さらに高頻度の計測や解像度の高い計測値を求めた場合に高コストかつ時間を要するなど問題が指摘されている²⁾³⁾。

近年、新たな計測技術として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)手法や高分解能3次元数値標高モデル (DEM : Digital Elevation Model) を作成する画像解析技術 (以下, SfM解析) が数多く導入されている. さらに2010年代後半には, 低コストで特殊技術を必要とせず, かつ作業者が安全な場所にいながら撮影可能なUAV (Unmanned aerial vehicle : 無人航空機) と先述のSfM解析を組み合わせた測量技術 (以下, UAV-SfM測量) が普及し, 自然災害調査の分野⁴⁾や地形学的な分野⁵⁾で導入されている. 土木分野においても, 平成28年3月国土交通省国土地理院により「UAVを用いた公共測量マニュアル(案)」⁶⁾が制定, 改正され, 多くの測量作業で活用されている.

これらの新たな写真測量技術は, 積雪環境下でも利用が試みられている. UAV-SfM測量については, 積雪期の数値標高モデル (DSM : Digital Surface Model) および無雪期のDEMの2時期の差分を取ることで積雪深を算出した事例がある⁷⁾. しかしながら, 実際の適用にあたっては, 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, 点群作成の可否や精度低下などの問題があると指摘されている⁸⁾. SfM解析は, 撮影画像に対して画像の特徴点の抽出, タイポイントの決定を自動で行う. これに基づき, 外部標定要素 (撮影時の3次元座標と3軸の傾き) と内部標定要素 (レンズのゆがみパラメータ) から高密度な3次元点群が構築される. ここで, 積雪表面は可視光反射率が高く, 輝度の範囲が狭くピークが大きいスペクトル特性を有する.

内山ら⁹⁾は, 積雪表面の凹凸が小さく陰影が少ないことにより, 画像全域でのコントラストが小さいこと, SfM解析では十分な数の画像特徴点を抽出できないこと, またそれに続く三次元的な計測処理を行うことができない場合があることを指摘している. 千葉ら¹⁰⁾は, 特に曇天で周囲がやや暗いときに撮影した画像では, 被写体表面の模様が単調で同じ色の画素が広がって分布すること, 撮影位置が正しく推定された場合においても雪面の模様が捉え難いこと, さらに3Dメッシュデータも生成されない場合があることを指摘している.

UAV-SfM測量の活用事例は増えつつあるが, 積雪表面計測への適用では, 撮影条件と計測可否およびデータ精度の検証等が未だ十分とはいえないのが現状である.

そこで本研究は, UAV-SfM測量で積雪表面を計測する際の撮影条件について, 積雪環境特有の条件である雪面の雪質や下向き短波放射 (明るさの基準), 積雪表面の反射率 (下向き短波放射と上向き短波放射の比) に着目し, 使用する撮影機材, 撮影高度および撮影時刻を変化させ, 点群生成の可否とその精度を検証した. 検証事例としては, 防雪設備の周囲に形成される吹きだまりや雪丘など, 実用上の利用頻度が高い雪面形状とした.

2. 積雪環境特有の条件と点群作成の可否に係る既存研究の取り組み

(1) 概要

UAV撮影時の積雪表面の明るさ情報として, 下向き短波放射・雪面反射率・雪質・太陽高度・天気の違いに着目し, SfM解析による点群生成の可否との関係について, 既存研究の取り組みを整理する.

(2) 条件

2019年2月14日～2021年3月1日に実施したUAV-SfM測量結果について整理を行う. 撮影場所は北海道北見市と北海道当別町の2箇所である. 表-1に条件を示す.

機種	PHANTOM 4 PRO (DJI)
撮影方法	自動航法(鉛直下向き)
重複度	進行方向80%以上, 隣接コース60%以上
対地上高	30m
画像形式	jpeg
SfM解析	Agisoft Metashape Professional Version1.7.1 build 11797

(3) 結果および考察

表-2に気象観測結果と点群作成の可否について整理した. 撮影開始時刻は9:23～16:26で, 日射があり撮影可能な時間帯全体を網羅している. 気象条件である下向き短波放射は8～883W/m², 雪面反射率は0.597～0.910, 太陽高度は48°～1°であった. 天候は全20ケースのうち直達日射の割合が多く, 雪面に影ができやすい晴が9ケース, 散乱日射の割合が多く, 影ができにくい曇が11ケースであった. 雪質は, 撮影時期が1月下旬の厳冬期から3

No.	撮影日	撮影開始時刻	下向き短波放射 (W/m ²)	雪面反射率	雪質	太陽高度 (°)	天候	点群作成可否
1	2019	10:04	476	0.835		29	晴	×
2	2.14	11:57	391	0.870	新雪	33	曇	×
3		13:58	226	0.865		25	曇	×
4	2019	10:01	398	0.877		39	曇	×
5	3.14	12:04	444	0.881	新雪	43	曇	×
6		13:53	299	0.879		33	曇	×
7	2019	10:05	781	0.597	ざらめ雪	44	晴	○
8	3.26	11:50	205	0.676		48	曇	○
9		11:46	202	0.910		34	曇	×
10	2020	13:38	547	0.857	新雪	29	晴	○
11	2.17	15:53	47	0.865		9	曇	×
12	2020	9:23	721	0.737		40	晴	○
13	3.25	11:04	883	0.693	ざらめ雪	48	晴	○
14		12:32	826	0.660		46	晴	○
15	2021	14:22	299	0.778		19	晴	○
16	1.25	15:29	65	0.825	こしまり雪	10	晴	○
17		16:26	8	0.786		1	晴	○
18	2021	11:26	238	0.770		39	曇	×
19	3.1	13:29	369	0.670	こしまり・ざらめ雪	34	曇	×
20		15:05	89	0.765		23	曇	×

[撮影場所] No.1～14:北見市, No.15～20:当別町

月下旬の融雪期であったため、新雪、ざらめ雪、こしまり雪、こしまり・ざらめ雪と冬期の雪面に一般的に確認される雪質全体を網羅した結果となった。

図-2にUAV-SfM測量により作成した積雪表面の点群を示す。雪面計測が可能な点群の作成可否については、表-2右欄に示す。可能と判定した“○”は9ケースで、点群の未作成箇所や解像度が極端に落ちる箇所もなく点群が作成できた。一方、不可と判定した“×”は11ケースで、実験範囲内に点群の未作成箇所が大きくが存在する結果となった。

No.1~6は、雪質は新雪で、天気は晴（下向き短波放射476 W/m²）または曇（下向き短波放射444~226W/m²）であった。全てのケースで天気に関係なく積雪表面の点群は作成できてない。これは、新雪の特性上、雪面反射率が0.835~0.881と極めて高く、積雪表面に凹凸が殆どないことが影響したものと推定する。

No.7~8は、天気は晴または曇のどちらにおいても積雪表面の点群は作成できている。これは、撮影時の気温が3度以上で、積雪表面の融雪が進んでいる状態であり、積雪表面の雪質がざらめ化したことが理由と考える（No.12~14についても同様）。

No.9~11は、雪質はNo.1~6と同様に新雪で、点群が作成できにくい条件下であったが、No.10においては、斜面頂部にある林帯の影が実験範囲にできており、積雪表面に大きなコントラスト差ができていたため、点群が作成できたものと考えられる。

No.12~20は、雪質はざらめ雪またはこしまり雪で、点群作成の可否については、天気は晴の場合が可、曇の場合が否と明確に分かれた。

結果、雪質が新雪の場合、天気は曇の場合については、UAV-SfM測量による積雪表面の点群の再現は困難であることがわかった。ただし、新雪は雪面反射率の高い板状結晶群（樹枝状結晶など）で構成され、雪面反射率が高く降雪中および直後は計測が難しいが、時間経過と共に雪結晶が変化して圧密した「こしまり雪」や凝結した「こしもざらめ雪」になると新雪に比べ雪面反射率が低下し撮影に適するため、積雪表面の雪質を観察することで撮影が可能になるものと考えられる。一方、雪質が新雪以外で、晴れていて日射がある場合（少しでも積雪表面に影ができていた場合）、ほとんどのケースにおいて点群を作成できていることがわかった。この結果から、日射による影の出現が、点群作成の可否に大きく影響しているものと考えられる。

既往研究の整理から得られた知見を以下に示す。

- 1) 明るさの基準となる下向き短波放射は、天候と時間帯で変化するが、8~883W/m²の範囲で点群が作成できているため、写真撮影が可能な時間帯であれば、直接影響しない。

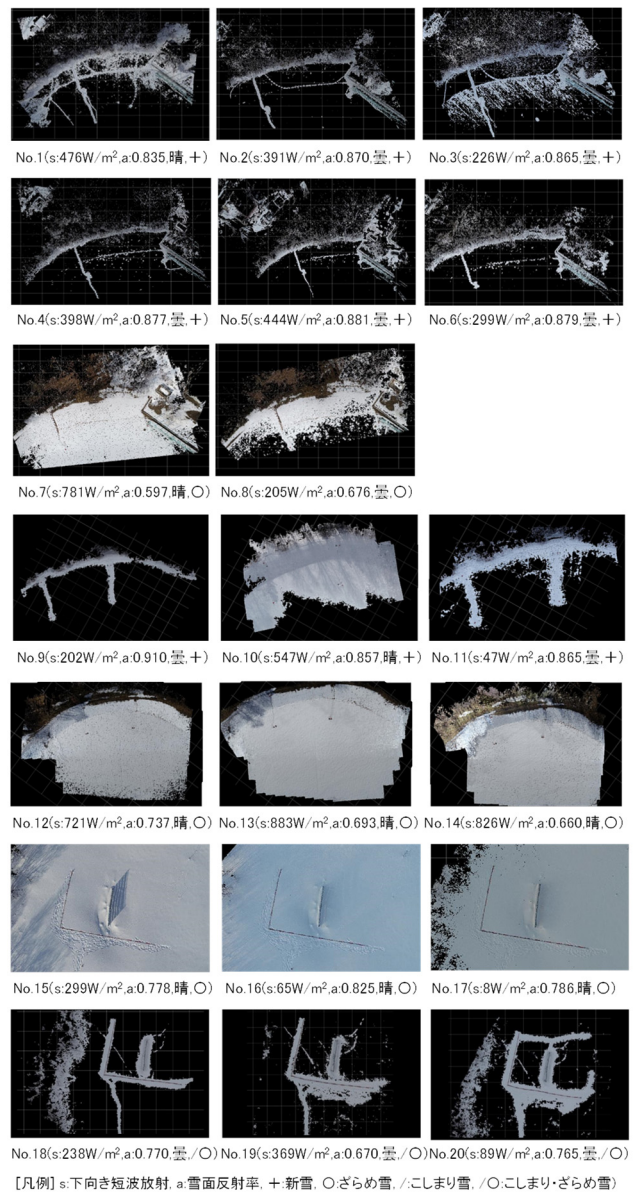


図-2 UAV-SfM測量により作成した点群

- 2) 雪面反射率は雪質と関連するが、新雪時の様に0.9に近い値の場合、点群が作成できない場合がある。
- 3) 雪質は、降雪直後の新雪の場合、雪面反射率が極めて高く、雪面の凹凸もできにくいいため、点群作成には適さない。
- 4) 太陽高度は、積雪表面の影のでき方に影響するが、点群作成に直接影響しない。
- 5) 天気は、直達日射が卓越する晴に比べ、散乱日射が卓越する曇の際に積雪表面に凹凸を明瞭にする影ができにくいことから、UAV撮影に最も適さない。本研究では、以上より得られた知見をもとに確実に点群が作成可能な条件として、雪質は降雪直後の新雪以外（雪面反射率<0.9）、天気は晴の日とし、時間帯は下向き短波放射が適度にある日中とする。その上で、UAV撮影条件である撮影機材、撮影高度および撮影時刻を変化させ、点群生成の可否とその精度を検証する。

3. 研究方法

(1) 実験場所および気象観測

実験場所は、図-3(a)に示す北海道ドローン協会当別ドローン練習場（北海道当別町）である。実験場所では、防雪柵前後の吹きだまり等を再現する目的で、撮影範囲内に図-3(b)に示す防雪柵（吹きだめ柵：柵高 $H=3.07\text{m}$ ，延長 $L=7.80\text{m}$ ）を設置し，これを中心に幅 20m ×延長 20m 程度の平坦な場所を実験範囲とした。

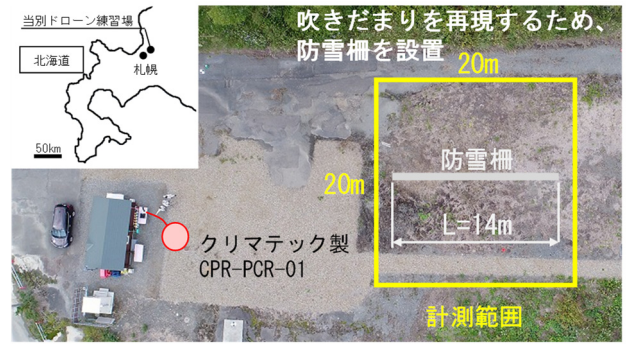
気象観測では，図-3(c)に示すクリマテック製CPR-PCR-01の日射計を設置し，撮影時の明るさの基準として上向き・下向き短波放射を計測し，その比率を積雪表面の反射率として算出する。また，撮影時の天候および積雪表面の雪質を記録する。

(2) UAV撮影

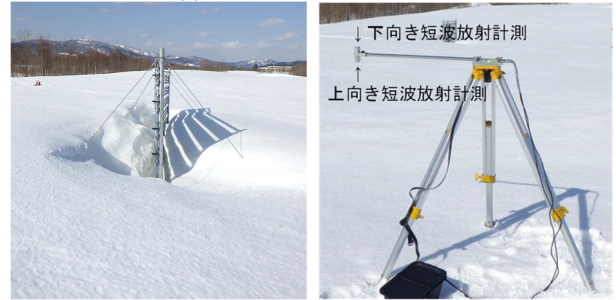
撮影に使用する機材は，積雪表面の凹凸情報を得るための画像の解像度に着目し，表-3に示すセンサーサイズの異なる2機種とする。実験では，普及型モデル（UAV-1）および，高解像度モデル（UAV-2）を使用する。撮影方法は，鉛直下向きに俯瞰撮影，それに加えて手動航行により俯角 60° の斜め方向にも撮影する。撮影画像の積雪表面でのオーバーラップ率（重複度）は，「UAVを用いた公共測量マニュアル（案）」⁹⁾に基づき，進行方向に 80% 以上，隣接コースで 60% 以上とする。撮影高度は，積雪表面での解像度に着目し，対地高度 15m ， 30m ， 50m とする。撮影時刻は，太陽高度の変化に伴い短波放射の雪面からの反射が異なる時間帯として，太陽高度が高くなる $13:30$ 頃，および低くなる $16:00$ 頃の2回とする。画像の記録形式はJPEG形式とする。積雪期の撮影日は，既存研究の取り組み整理結果をもとに決定する。また，無雪期の撮影日は，積雪がなく植生が極力繁茂していない時期とする。

(3) 地上基準点の設置

UAV-SfM測量による3次元モデルの位置情報（座標値）は，一般的にUAV本体，またはデジタルカメラに搭載されたGNSS（Global Navigation Satellite System：全球測位衛星システム）位置情報をExif（Exchangeable image file format）で記録し，3次元モデルの位置情報付与の際に利用される。しかし搭載されたGNSSは単独測位であることが多く，この手法で得られた3次元モデルの精度は撮影条件や使用機材に影響を受け，位置情報の精度は 10m 程度であるが，キネマティック測量は数 cm の精度が得られる²⁾。本研究では，点群の位置精度を向上させるため，UAV撮影前に実験範囲周辺の地表面上または積雪表面に地上基準点（以下，GCP：Ground control point）を配置する。図-4に設置概要を示す。無雪期には，現地に設置されて





(a) 実験場の概要と平面配置

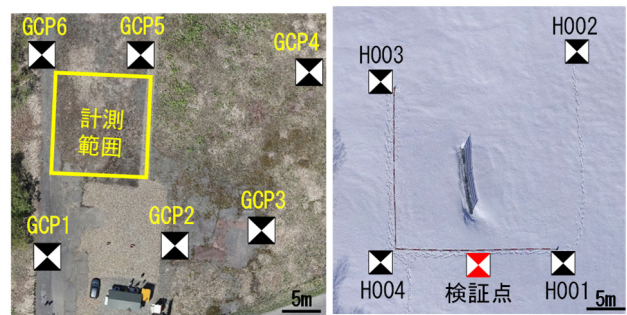


(b) 防雪柵設置状況 (c) クリマテック製 CPR-PCR-01

図-3 実験場概要

表-3 実験に使用した UAV 機体およびカメラ仕様

No.	UAV-1	UAV-2
機体写真		
機種	PHANTOM 4 PRO	MATRICE 600 PRO
メーカー	DJI	DJI
カメラ	付属	SONY $\alpha 7R$ IV
カメラ特性		
画素数	2000 万画素	6100 万画素
センサーサイズ	$13.2 \times 8.8 \text{ mm}$	$35.7 \times 23.8 \text{ mm}$
解像度	$5472 \times 3648 \text{ pixl}$	$9504 \times 6336 \text{ pixl}$
ピクセルサイズ	$2.41 \times 2.41 \text{ }\mu\text{m}$	$3.79 \times 3.79 \text{ }\mu\text{m}$
画角	84°	84°
35mm換算焦点距離	24 mm	24 mm



(a) 無雪期 (b) 積雪期

図-4 地上基準点の設置概要

いた標定6点をGCPとして使用し，積雪期には既設の標定が積雪で埋没するため，雪面上にGCPとなる標定を4点配置する。それぞれのGCPについては，GNSS測量（VRS：Virtual Reference Station）で計測する。また，積雪表面の点群の精度を検証する目的で，図-4(b)に示すGCP

“H001”と“H004”の間に検証点を1点設ける。

(4) SfM解析手順

SfM解析は、UAVにて撮影した画像をSfM解析用ソフトウェアに読み込み、以下の手順で処理する。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（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ステップで構成させる¹⁰⁾。解析時のパラメータは、過去の経験から以下とした。写真のアライメントは精度：中、マスク適用先：静止したタイポイント除外とした。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。評定点の入力および補正は有効とした。

図-5(a)に積雪期の写真のアライメント後の画像の例、図-5(b)に積雪期の生成された画像特徴点とタイポイント画像の例を示す。写真のアライメント処理後、写真測量の原理で全ての写真および特徴点の相対的な3次元位置関係を推定した後、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により、点群データを作成する。無雪期のSfM解析についても同様の手順で実施した。

本研究では、先行研究と同様にSfM解析にAgisoft Metashape Professional Version1.7.1 build 11797を使用する。

(5) 積雪深の推定方法と実測による精度検証

積雪深の推定方法については、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。また、求めた積雪深の推定値とスノープローブを使用して現地計測で得た積雪深との比較を行い、点群の精度を検証する。積雪

深の推定および現地計測は図-6に示す2測線（主測線：防雪柵中心、副測線：防雪柵がない区間）とし、計測間隔は防雪柵を中心に延長20mの範囲を1m間隔（1測線あたり21点）で計測した。

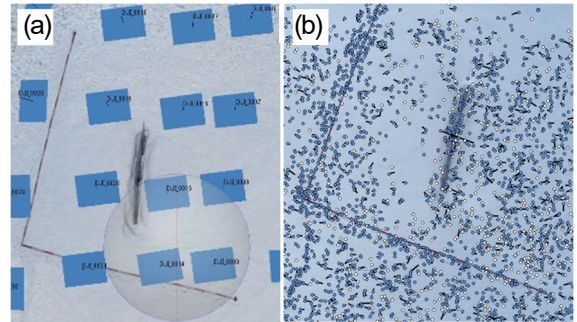


図-5 (a)アライメント後における撮影位置の例、(b)画像特徴点およびタイポイントの例

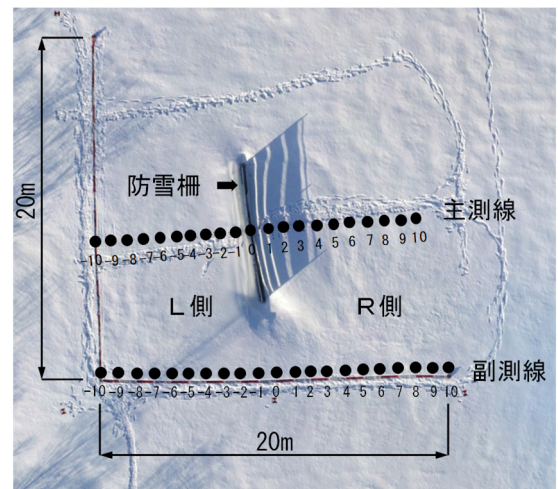


図-6 積雪深計測箇所の概要（中心を[0]とし、R側に1m離れる毎に[1]～[10]、L側に1m離れる毎に[-1]～[-10]とする）

4. 結果および考察

(1) 積雪環境特性とSfM解析

表-4に撮影条件と気象観測の結果を示す。積雪期のUAV撮影は、2021年3月8日に実施し、太陽高度の異なる

表-4 撮影条件と気象観測の結果

(2021.3.8 撮影)	撮影高度	地上解像度	撮影時刻		下向き短波放射	雪面反射率	雪質	太陽高度	太陽方位	天気	気温(°C)
case	機種	(m)	(mm/px)	開始	終了	(W/m ²)		(°)			
1		15	4	13:44	13:47	606	0.651	35	南西		0.4
2	UAV-1	30	8	13:32	13:36	611	0.654	36	南南西	晴	0.4
3		50	13	13:39	13:42	609	0.654	35	南西		0.4
4		15	4	16:11	16:23	123	0.816	13	西南西		0.1
5	UAV-1	30	8	15:41	15:50	232	0.760	18	西南西	晴	0.2
6		50	13	15:51	15:54	216	0.782	18	西南西		0.2
7	UAV-2	15	2	13:55	13:59	557	0.660	33	南西	晴	0.3
8		30	4	13:47	13:48	605	0.654	35	南西		0.4

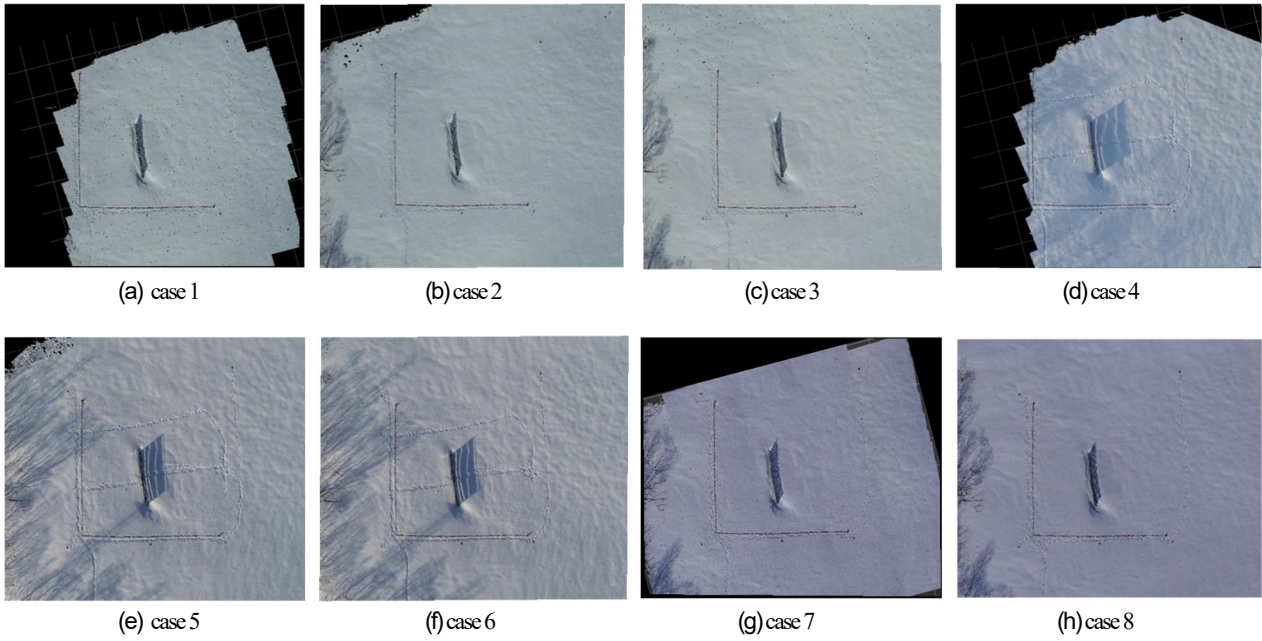


図-7 UAV-SfM 測量により得られた点群

2つの時間帯として、13:00頃 (case 1~3, 7, 8) および 16:00頃 (case 4~6) に、撮影した。天候は晴 (直達日射の割合が多く雲量が少ない) で、太陽高度は 36° から 13° に変化した。図-7にUAV-SfM測量により得られた点群を示す。積雪表面の影のつき方は、撮影時間帯により大きな違いが見られた (図-7)。積雪表面の雪質は、撮影時が3月上旬の融雪期であり、水を含んで粗大化したざらめ雪であった。図-8に撮影箇所の明るさを示す下向き短波放射と積雪表面反射率の計測値を示す。下向き短波放射は、13時頃は $557\sim 611\text{W/m}^2$ であったが、日没前の16時頃は $123\sim 232\text{W/m}^2$ となった。また、積雪表面の反射率は $0.651\sim 0.816$ で、これは海面や草地の反射率 (海面 $0.05\sim 0.4$, 草地 $0.15\sim 0.3^{11}$) に比べ高い値を示した (地球全体の反射率は一般に 0.3^{12})。

SfM解析の結果、全8ケースにおいて積雪深を推定可能な状態で、実験範囲内の点群の未作成箇所や解像度が著しく低下する箇所もなく、点群が作成できた。この結果は、既存研究での点群作成可能な条件に合致しており、被写体である積雪表面の反射率が高い条件においても、

日射強度の強弱が点群作成の可否に影響を与えていないことを確認した。

(2) GCPを用いた点群の精度検証

SfM解析の際、UAV撮影により得られた画像とGNSS測量により計測したGCPの位置座標4点を使用し、ジオリファレンスを行った。表-5に作成した積雪表面の点群の精度検証としてSfMソフトウェアにより出力した4点のGCPのRMSE (Root Mean Squared Error: 平均二乗誤差) 事例を示す。結果、GCPにおける誤差 (RMSE) はどの撮影高度においても 5mm 以下であり、一般的なスノーロープによる現地計測単位 (cm) より値が小さいことから、積雪深を推定する上で作成した点群に十分な精度が得られていることを確認した。表-6に検証点での誤差の事例を示す。検証点の座標は、ターゲット中心から半

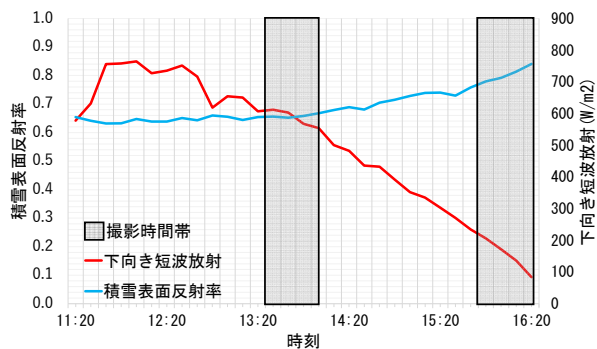


図-8 下向き短波放射および積雪表面反射率

表-5 誤差の例 (case2, case3)

標定点 (撮影高度)	$\Delta X(\text{mm})$		$\Delta Y(\text{mm})$		$\Delta Z(\text{mm})$	
	30	50	30	50	30	50
GCP1	5	5	0	-1	-5	-3
GCP2	0	1	0	0	5	3
GCP3	0	-3	-6	-6	-5	-3
GCP4	-6	-3	5	8	6	4
RMSE	4	4	4	5	5	3

表-6 検証点での誤差の例

検証点	$\Delta X(\text{mm})$	$\Delta Y(\text{mm})$	$\Delta Z(\text{mm})$
case1	1	0	-5
case2	-2	-1	-1
case3	4	1	-2
case4	1	-1	-4
case5	0	1	-1
case6	12	-1	-7

径10cm以内の点群の平均座標とした。結果、最大誤差は平面上12mm, 高さ7mm以下であり、積雪深を推定する上で十分な精度が得られていることを確認した。

(3) UAV-SfM測量における積雪表面形状の再現性

積雪表面形状の再現性については、SfM解析により得られた点群の計測点での標高と、地表面の標高に実測した積雪深を加えた積雪表面の標高との比較を行った。SfM解析により得られた標高とは、各計測点からXY距離が最も近い点群の標高を算出したものである。

図-9に作成した断面図の一例 (case7) を示す。(a)主測線、(b)副測線ともに実測値に比べUAV-SfM測量による推定値が一律に低い値を示しているが、積雪表面の形状は概ね再現できていることがわかった。

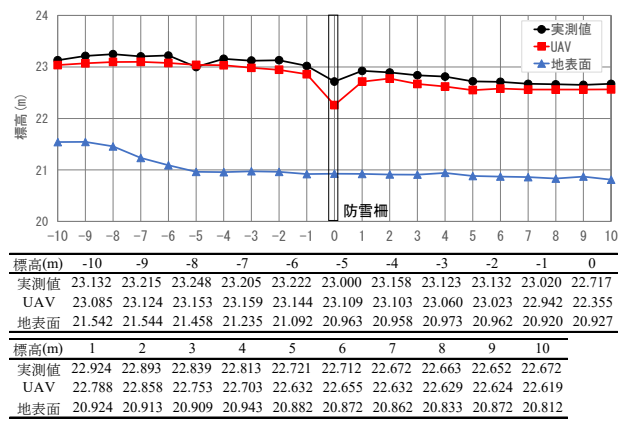
(4) センサーサイズの異なるUAV-SfM測量の精度検証

図-10に、センサーサイズの異なる2機種のUAV-SfM測量による推定値と実測値との比較結果の事例を示す。UAV-SfM測量による推定値case2とcase8を比較すると、図-10 (a)主測線および(b)副測線のどちらも値に大きな差は見られなかった。これは、本実験では撮影高度が30mで平面的な地上解像度がそれぞれ8mm/px (case2), 4mm/px (case8)であったことから、推定値に大きな違いが見られなかったものと推察する。

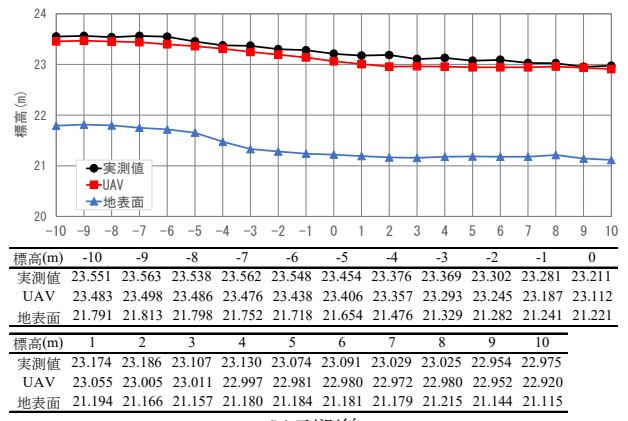
実測値との比較では、図-10(a)主測線は中央部の防雪柵周辺を除き、最大誤差が14cm (7%)であった。一方、防雪柵周辺の最大誤差は39cm (21%)となったが、撮影位置によって積雪表面が直立する防雪柵により遮られたこと、防雪柵周辺の積雪表面は極端な凹形状部で、さらに防雪柵の影で暗部となっていたことが原因で点群の作成精度が低下したと推察する。また、今回の撮影条件においては、防雪柵自体の点群データは生成されなかったことから、必要に応じて柵の側面に対し垂直方向の撮影画像を追加するなどの対策が必要であることがわかった。図-10 (b)副測線は、主測線と異なり、計測範囲内に画像内に映り込む障害物がなかったことから極端な誤差は生じなかったが、最大誤差は20cm (10%)となった。

(5) 撮影高度および撮影時刻の異なる場合のUAV-SfM測量の精度検証

図-11に、撮影時刻13:30頃および16:00頃を実施したUAV-SfM測量による推定値と実測値の結果を示す。撮影機材は表-3に示すUAV-1で、撮影高度は15m, 30m, 50mの各3ケース (合計6ケース) である。図-11(a)には、撮影時刻13:30頃、撮影高度 (case1:15m, case2:30m, case3:50m), 計測位置は主測線での結果を示す。図-11(b)には、撮影時刻16:00頃、撮影高度 (case4:15m, case5:30m, case6:50m), 計測位置は主測線での結果を示す。

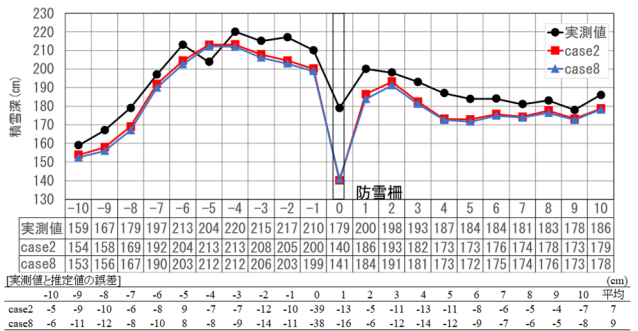


(a) 主測線

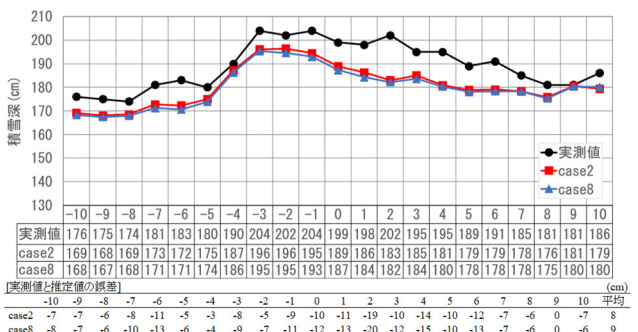


(b) 副測線

図-9 実測値と UAV-SfM 測量による積雪断面比較の例 (case7)



(a) 主測線



(b) 副測線

図-10 実測値とセンサーサイズの異なる UAV-SfM 測量結果比較 (撮影時刻: 13:30 頃, 撮影高度: 30m, UAV 機体: case2: UAV-1, case8: UAV-2)

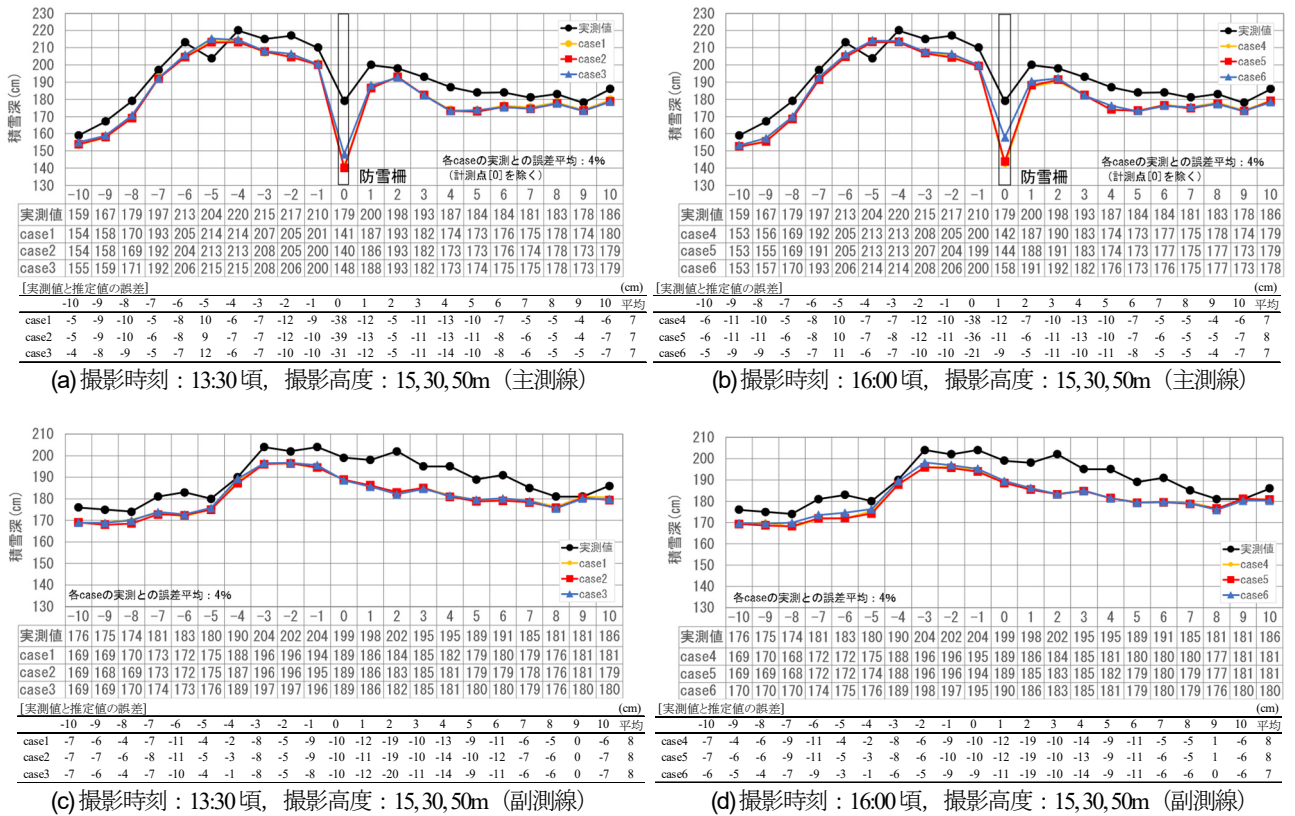


図-11 実測値と撮影時刻・撮影高度の異なる UAV-SfM 測量による推定値
(撮影時刻：13:30頃，16:00頃，UAV機体：UAV-1，撮影高度：15m,30m, 50m)

す。図-11(c)には、撮影時刻13:30頃、撮影高度 (case1:15m, case2:30m, case3:50m)，計測位置は副測線での結果を示す。図-11(d)には、撮影時刻16:00頃、撮影高度 (case4:15m, case5:30m, case6:50m)，計測位置は副測線での結果を示す。

ここでは、撮影条件と UAV-SfM 測量の精度検証として、撮影時刻13:30頃および16:00頃に撮影した各撮影高度の積雪深推定値と実測値との違いに着目した。主測線のグラフを図-11(a), (b)に示す。防雪柵中心部の計測点 [0], [1]および[-5]を除き積雪表面の凹凸を概ね再現できている。計測点[0]は防雪柵があり、計測点[1]は防雪柵の真西にあたり、防雪柵の影の影響で暗部となっていたことから誤差が大きくなったと推察する。また、計測点 [-5]では、他の計測点と異なり計測値が逆転している。これは狭い範囲で現地形が凸部または雪面が凹部となっており、細かな再現ができていなかったといえる。次に副測線のグラフを図-11(c), (d)に示す。計測点[2]を除き積雪表面の凹凸を概ね再現できている。計測点[2]は、主測線の計測点[-5]と同様に、現地形が狭い範囲で凹部または雪面が凸部に変化しており、細かな再現が不十分だったといえる。

再現性はどのケースにおいても大差がなく、測線毎の誤差平均は4% (図-11) であった。しかし実測値との比

較の結果、撮影範囲端部の一部分を除き、全体的に UAV-SfM 測量による推定値が実測値に比べ低い値を示している。推定値が実測値より低くなった原因として、積雪期と無雪期で異なるGCPを用いて、異なる時期にGNSS測量したため、基準点の誤差が累積した可能性がある。一般的に、GNSS測量の鉛直方向の誤差は3~4cmとされている。また、無雪期の撮影の際、俯瞰撮影のみだったため、点群全体でドローミング現象が発生し、実際の地表面より高く評価されていた可能性がある。このドローミング現象について、小花和ら¹³⁾は、鉛直下向き撮影画像のみで3次元モデルを作成した場合、モデル全体が凸型に歪むdomingあるいはbowl-effectと呼ばれる現象が発生することがあると指摘している。しかしながら、UAV-SfM 測量による推定値が実測値に比べ低い値を示す点については、カメラの性能、撮影条件、SfM解析ソフトの特性など、諸条件が影響した可能性があり、明確な原因はわかっていない。今回の実験では、実測値との誤差平均が4%であり、どのケースにおいても積雪表面形状をよく捉えていることから、実験データとしては問題ないものとする。しかしながら、広範囲を UAV-SfM 測量する際には、地上基準点を多く設置するなどの対策が必要である。

本研究では、いずれのケースにおいても作成した点群

にケース毎の大きな差異がないことを確認した。撮影時刻の違いについては、雪質がざらめ雪、天候が晴れの場合においては、障害物による極端な暗部以外は、いずれの条件においても差異なく積雪深を推定できることを確認した。また、撮影高度の違いについては、15, 30, 50mの範囲においては、点群の作成精度にほとんど差が無かった。これは、推定積雪深の誤差が最大20 cm（計測点[0]を除く）であったのに対し、積雪表面上での分解能が13mm/px（撮影高度50m）以下であったことが要因と推察する。

図-12に、撮影時刻13:30頃に実施したUAV-SfM測量による推定値と実測値との比較を示す。各推定値は、実測値に比べ主測線での一部を除き低い値となったが、ケース毎の差異はほとんど見られなかった。誤差は防雪柵中央部の計測点[0]を除き-11~+14cm、各ケースの誤差の絶対値の平均は7~8cm、相対誤差（誤差絶対値/積雪深×100%）の平均値は4%であった。誤差の要因としては、SfM解析時のソフトウェア上の誤差、地表面または積雪表面の局所的な凹凸の影響、人がスノープローブで計測する際に発生する誤差やばらつきの影響が考えられる。

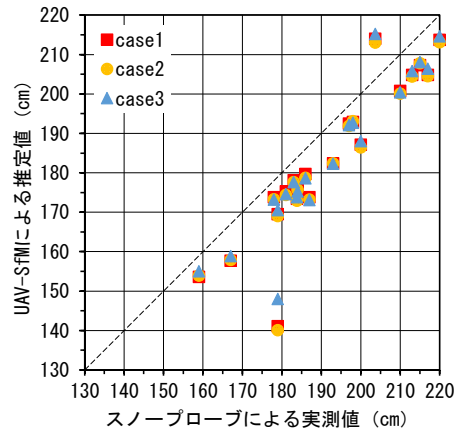
全計測点における実測値に対する推定値の誤差の分布を図-13に示す。ここでは、実測値との相対誤差として、推定値から実測値を減算した値を誤差としている。誤差の大半は負の値であり、誤差は平均値-4%、標準偏差2%であった。すなわち、今回実施したUAV-SfM測量による積雪深の推定値は、実測値に比べ4%程度低く、標準偏差が2%未満であった。

このことから、積雪環境下においても、点群が無雪環境と変わらず問題なく作成できることを確認した。また、UAV-SfM測量を実際の道路管理等に適用することについては、これまで点での積雪深計測しかできていなかった現状を踏まえると、面的な計測が可能となるため、計測誤差が10%程度は許容範囲であると考えられる。

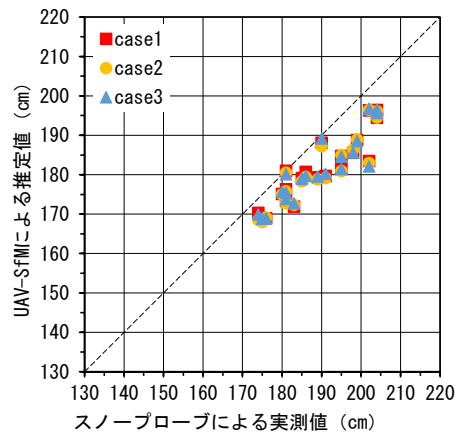
5. まとめ

本研究では、既往研究の取り組み整理および2021年3月に実施した実験結果をもとに、UAV-SfM測量による雪面形状の計測法について、雪面の雪質や下向き短波放射、積雪表面の反射率に着目し、撮影条件を変化させ、点群作成の可否とその精度を検証した。検証によって得られた知見を以下に述べる。

- 1) 天候が晴、雪質がざらめ雪の条件において、積雪環境特有の高い可視光反射率（0.651~0.816）であっても点群が問題なくできた。また、撮影時間帯が日中から日没前（下向き短波放射123~611W/m²）



(a) 撮影時刻：13:30頃、撮影高度：15,30,50m（主測線）



(b) 撮影時刻：13:30頃、撮影高度：15,30,50m（副測線）

図-12 実測値と撮影時刻・撮影高度の異なる UAV-SfM 測量による推定値との比較（UAV機体：UAV-1）

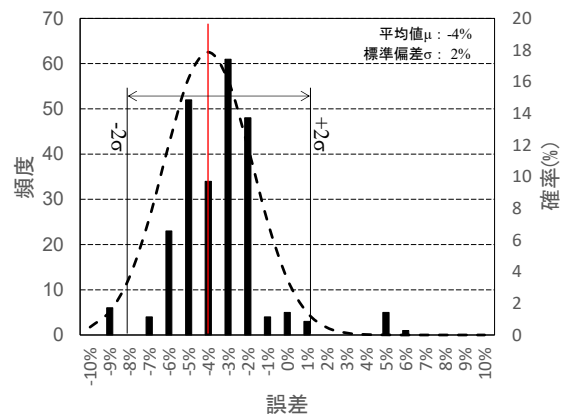


図-13 UAV-SfMによる推定値とスノープローブによる実測値の誤差分布

の時間帯で撮影図化できたことから、積雪表面に影ができる状況下であれば、撮影時刻に関わらず点群が作成できることがわかった。

- 2) センサーサイズ、高度を変化させて撮影したが、いずれのケースにおいても作成した点群の精度には大きな差異がなかった。このことから、撮影機材の選定および撮影高度の設定においては、計算さ

れる分解能が、積雪表面で求める計測精度以下になるように設定すれば問題ない。

- 3) 地上基準点 (GCP) を4点設置し、GNSS測量した座標値をSfM解析の補正に使用した。検証点において、作成した点群データと実測値の高さの誤差は5mm以下であり、積雪深を推定する上で十分な精度が得られていることを確認した。
- 4) 防雪柵中央部の特異値を除き-19~+11cm、各ケースの誤差の絶対値の平均は8~10cm、相対誤差(誤差絶対値/積雪深×100)の平均値は4%であった。また、全計測点における実測値に対する推定値の誤差の大半はマイナス側で、誤差の平均値 μ が-4%、標準偏差 σ は2%であった。すなわち、今回実施したUAV-SfM測量による積雪深の推定値は、実測値に比べ4%程度低く、誤差が2%であった。
- 5) 計測誤差発生の原因としては、SfM解析時のソフトウェア上の誤差、地表面または積雪表面の局所的な凹凸の影響、人がスノーブローブで計測する際に発生する誤差やばらつきの影響が考えられる。

以上より、防雪設備周囲のような凹凸のある積雪表面にUAV-SfM測量を適用し、対地高度15~50mで撮影した場合、推定値は実測値-4%とすれば誤差が2%であり、実用レベルにおいて問題ないと判断する。また、推定値と実測値の比較結果により、防雪設備周囲の計測を対象とした場合、実用上問題ないことを明らかにした。しかしながら、雪質や天候が異なる条件である場合、撮影高度を樹木や障害物を避けるために50m以上にする場合は、積雪表面上での撮影分解能が下がり、SfM解析精度に影響を及ぼす。このことから、求める撮影精度と分解能の関係については、事前に確認が必要である。

実空間での適用に際し、使用するUAVの耐風性能が現地風速以下であること、飛行中に降雪がないことを確認する必要がある。また、計測対象箇所の周辺で、積雪期に埋没せず、車両の通行に影響のない場所に、無雪期と積雪期に共通して使用可能なGCPを設置しておくことが望ましい。

謝辞: 本研究にあたり、貴重なご意見をいただきました、北見工業大学の亀田貴雄教授、名古屋大学の佐藤洋太博士ならびに気象研究所の谷川朋範博士に感謝申し上げます。また、UAV撮影にあたり、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、実験日の除雪作業にも快くご協力いただきました、北海道ドローン協会の皆様にお礼申し上げます。また、防雪柵設置、実験場での除雪および積雪観測を補助して下さいました富安株式会社マルエイ三英事業部の皆様にもお礼申し上げます。

REFERENCES

- 1) 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, *Seppyō*, 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. and Suzuki, H.: Multicopter aerial photography for natural disaster research, *Report of Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience*, Vol. 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, *Chikei*, Vol. 37, No. 3, pp. 321-343, 2016.]
- 6) 国土交通省国土地理院：UAVを用いた公共測量マニュアル(案)，pp. 25-26, 2017. [Geospatial Information Authority of Japan: *Public Surveying Manual Using UAV (Draft)*, pp. 25-26, 2017.]
- 7) 秋山一弥，松下拓樹，塚原直幸：小型 UAV を用いた全層雪崩と雪崩デブリの測定，日本雪工学科論文集，Vol. 37, No. 2, pp. 17-28, 2021. [Akiyama, K., Matsushita, H. and Tsukahara, N.: Measurement of full-depth avalanches and avalanche debris using small unmanned aerial vehicles, *J. of Snow Eng. of Japan*, Vol. 37, No. 2, pp. 17-28, 2021.]
- 8) 内山庄一郎，鈴木比奈子，上石勲，中村一樹：雪崩災害調査へのUAV-SfMの適用：2017年那須町雪崩災害の事例，自然災害科学J. JSNDS, Vol. 37 特別号，pp. 119-135, 2018. [Uchiyama, S., Suzuki, H., Kamiishi, I. and Nakamura, K.: Applicability of the UAV-SfM survey to the 2017 Nasu avalanche disaster, *Natural Disaster Science, J. JSNDS*, Vol. 37 special issue, pp. 119-135, 2018.]
- 9) 千葉隆弘，Thomas Thiis，高橋徹，苫米地司：デジタル画像を用いた写真測量による屋根上積雪深の測定精度について，北海道科学大学研究紀要，Vol. 40, pp. 35-43, 2016. [Chiba, T., Thomas, T., Takahashi, T. and Tomabechi, T.: Accuracy of snow depth on roofs by photogrammetry using digital images, *Bulletin of Hokkaido University of Science*, No. 40, pp. 35-43, 2016.]
- 10) 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，2020. [Uchiyama, S.: *Hikkei Drone Katsuyo Guide*, pp. 243-253, Tokyo Horei Publishing, 2020.]
- 11) 木村健一，木内俊明：建築士技術全書2 環境工学，p. 10, 彰国社，1952. [Kimura, K. and Kiuchi, T.: *Kenchiku-*

- shi Gijyutsu Zensho Vol. 2 Kankyo Kougaku*, p. 10, Shokokusha Publishing, 1952.]
- 12) 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.]
- 13) 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, *Chikei*, Vol. 41, No. 1, pp. 15-26, 2020.]

(Received May 25, 2022)

(Accepted July 8, 2023)

UAV-SfM SURVEYING METHOD FOR MEASURING SNOW SURFACE PROFILE FORMED AROUND SNOW FENCES

Koji TAKAHASHI, Tatsuo SHIRAKAWA Yoshiki NAGANUMA
and Yoshinori SANO

In road management in snowy and cold regions, it is crucial to adequately evaluate existing snow protection measures. UAV-SfM surveying, increasingly used in recent years, is an efficient method for measuring snow blowdown around snow protection facilities. However, the conditions peculiar to snow cover may prevent the formation of point clouds or reduce accuracy. In this study, we focused on snow quality, downward shortwave radiation (brightness criterion), and reflectance of the snow surface. We verified the feasibility and accuracy of generated point clouds by varying the sensor size of the camera used and the altitude at which the image was captured. It was confirmed that point clouds could be created in snowy and snow-free environments without missing points. A comparison of the estimated and measured values yielded a mean relative error of -4% with a standard deviation of 2%, indicating no problem in practical use when the target is a snow blowdown.