(27) 積雪期の UAV−SfM 測量における地上基準点削減に関する研究

髙橋　浩司[1]・白川　龍生[2]・長沼　芳樹[3]・佐野　至徳[3]

[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

[2]正会員　北見工業大学（〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地）
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）

豪雪地帯での道路管理においては，切土法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．このためには，近年活用事例が増えている UAV−SfM 測量が効率的だが，積雪深を算出する場合，二時期の点群を正確な位置座標に基づき重ね合わせる必要があることや，積雪環境下における経時的に安定した恒常的な地上基準点を複数設置することは極めて難しいと指摘されていた．そこで本研究では，UAV−SfM 測量で雪面形状を計測する際，UAV への RTK 搭載 / 非搭載の違い，SfM 解析に入力するための GCP 点数の違いが点群作成精度に与える影響に着目し，その精度を検証した．結果，RTK 搭載型 UAV を使用することを前提に，GCP 点数を 2 点まで削減した場合の計測誤差は−8 %以下であることを確認し，実用上は問題ない精度で計測できることがわかった．

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

1. はじめに

これまで積雪深の計測は，雪尺や測深棒を用いて，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．しかし，調査範囲が広域の場合，これらの方法は調査範囲全体の計測精度の低さ，調査時の雪崩の危険性など，複数の問題が指摘されている [1),2)].

一方，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 による撮影と SfM/MVS（Structure-from-Motion / Multi-View Stereo）を組み合わせた手法（以下，UAV−SfM 測量）が導入されている [3),4)]．この手法による積雪の計測においては，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，精度検証した事例がある．しかしながら， 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されている [5)]．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．この際に撮影画像に記録される位置情報のみでは SfM 解析に必要な高精度の位置情報が付与されないため，作成した点群データを正確に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，融雪による沈下および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されている．

近年は，RTK−GNSS を搭載した UAV（以下，RTK 搭載型 UAV）を用いて GCP 数を削減する方法が提案 [6)]されている．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 測量で雪面を計測する際の撮影および解析条件について，（1） RTK 搭載 / 非搭載の違い，（2）GCP 点数の違いが SfM 解析での点群作成に与える影響に着目し，その計測精度を検証した．

2. 研究方法

(1) 実験場所および実験方法

実験場所を図-1 に示す．実験範囲は南北方向に約 140 m，東西方向に約 65 m で，南西方向に緩やかな下り傾斜を呈している．

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/RTK 非搭載型の 2 機種の UAV によって空中写真撮影する．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．図-2 に検証方法を示す．SfM 解析では，GCP の数を変化させ，複数の DSM を作成し，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

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，「UAV を用いた公共測量マニュアル（案）」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 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．

(3) GCP の配置

本研究では，UAV 撮影の直前に GCP を配置する（図-1）．無雪期に設置した標定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．

(4) SfM 解析の手順

UAV にて撮影した画像は SfM 解析用ソフトウエアに読み込み，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（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 [13]．

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．

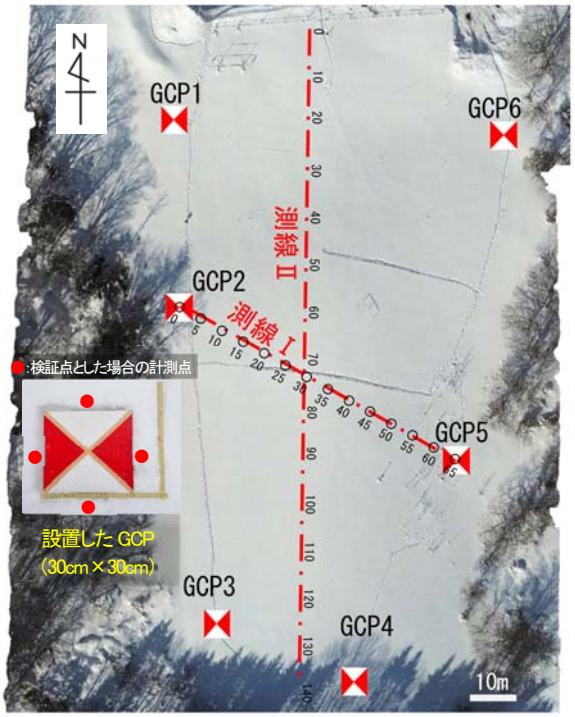
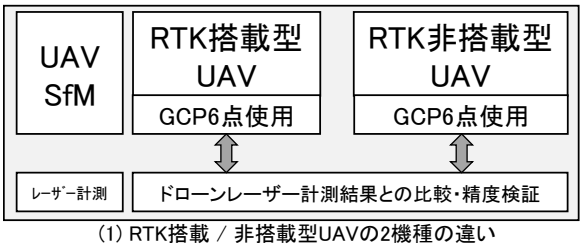
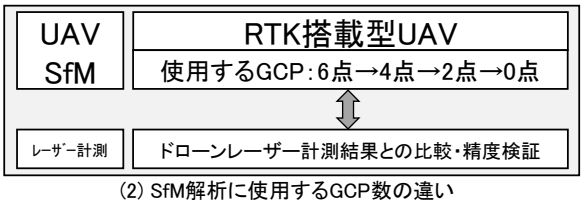


図-1 実験場所および本研究における GCP の配置



(1) RTK搭載 / 非搭載型UAVの2機種の違い



(2) SfM解析に使用するGCP数の違い

図-2 検証方法

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

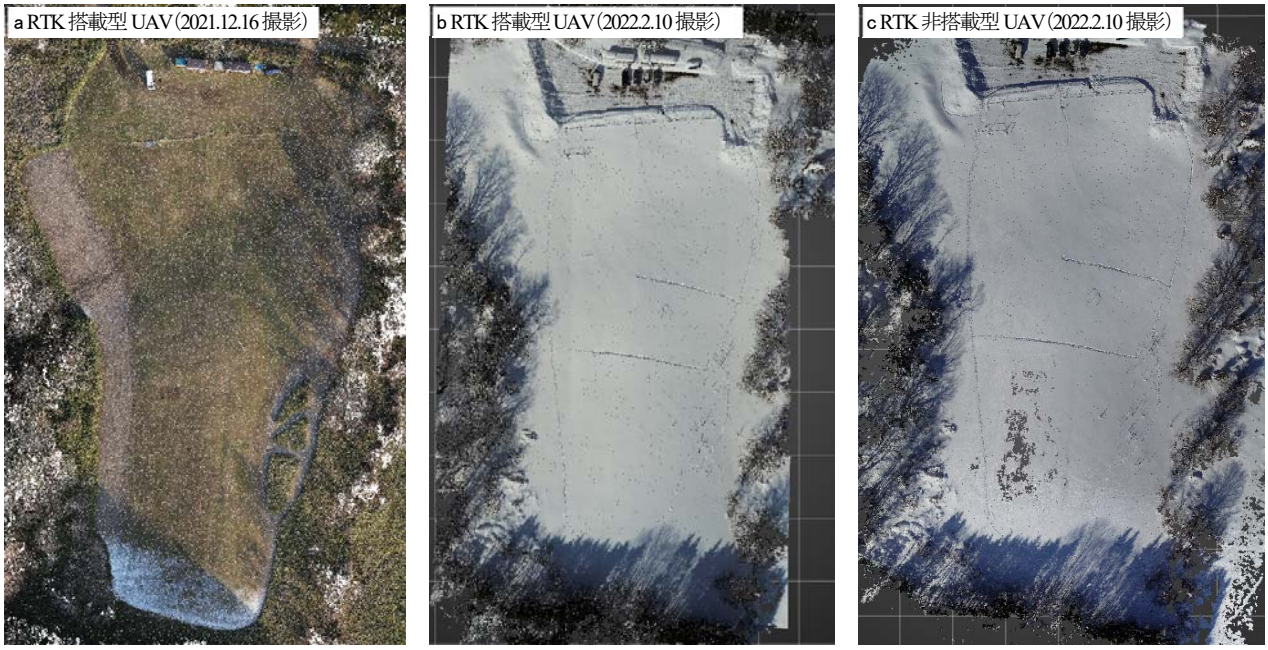


図-3　UAV–SfM による点群データの例

(5)　雪面の高さおよび積雪深の推定方法

雪面高さおよび積雪深の推定位置は，図-1 に示す 6 箇所の GCP 位置，および 2 測線上とする．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．

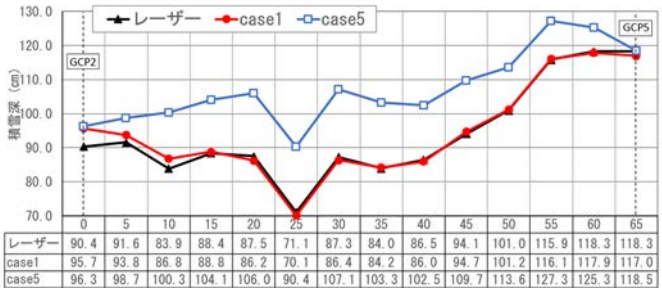
(6)　実験ケース

表-2 に実験ケースを示す．case1～case4 は RTK 搭載型 UAV による実験，case5 は RTK 非搭載型 UAV による実験とする．case1 および case5 は図-1 に示す撮影範囲内の全 GCP（6 点）を使用する．case2,3 は GCP 数を 4 点,2 点のみ使用する．case4 は 全ての GCP 使用しない．なお，RTK 非搭載型 UAV による SfM 解析の際，GCP 点数を削減した場合も実施したが，作成した点群の誤差が数 m 以上となったことから，本研究の対象から除外した．

表-2　実験ケース

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

凡例　○：GCPを使用



	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
レーザー	90.4	91.6	83.9	88.4	87.5	71.1	87.3	84.0	86.5	94.1	101.0	115.9	118.3	118.3
case1	95.7	93.8	86.8	88.8	86.2	70.1	86.4	84.2	86.0	94.7	101.2	116.1	117.9	117.0
case5	96.3	98.7	100.3	104.1	106.0	90.4	107.1	103.3	102.5	109.7	113.6	127.3	125.3	118.5

図-4　RTK 搭載型/非搭載型 UAV–SfM 測量およびドローンレーザー計測による積雪深の推定結果の例（測線 I ）

3.　結果および考察

(1)　SfM 解析

図-3にSfM解析により作成した点群データの例を示す．図-3aは無雪期の撮影画像によるSfM解析結果である．ここでは，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ている．図-3bは，積雪期にRTK搭載型UAVでの撮影画像をSfM解析した結果であり，無雪期と同様，点群の未作成部分や解像度の低下箇所は見受けられなかった．図-3cは，積雪期にRTK非搭載型UAVでの撮影画像をSfM解析した結果だが，画像中央付近より南側の一部に点群の未作成部分があるが，計測測線上の点群は欠けることなく作成できた．

(2)　RTK 搭載/非搭載型 UAV を用いた UAV–SfM 測量による雪面形状の計測精度

RTK 搭載 / 非搭載型 UAV による撮影画像をもとに作成した点群の計測精度について検証する．図-4 に，測線 I における積雪深の推定結果を示す．case1 は RTK 搭載型 UAV による推定結果であるが，レーザー計測の結果とほぼ一致している．最大誤差は，計測点[0]で+5.3 cm 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[0], [65]に GCP2 と 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，レーザー計測の計測誤差と考えられる．これを除外した

最大誤差は，計測点[10]で+2.9 cm となっており，一般的な GNSS 測量の鉛直誤差程度に収まる精度が得られた．

一方，case5 は，RTK 非搭載型 UAV による推定結果だが，case1[赤]に比べてレーザー計測結果と乖離している．最大誤差は，両端部の計測点[0]，[65]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[30]で+19.8 cm と大きい．SfM 解析は画像 1 枚ごとに記録される位置情報データをもとに，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，さらに精度が低下する．これが解析結果に影響したと推察される．

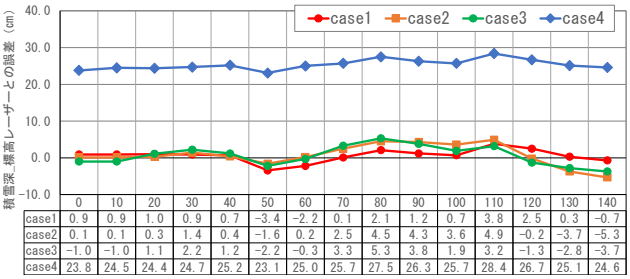
(3) RTK 搭載型 UAV を使用した雪面形状計測における GCP 点数削減時の再現性

図-5 に，測線Ⅱの各ケースの UAV–SfM 測量による推定積雪深とレーザー計測との誤差を示す．case4 を除く全てのケースで，中間部の計測点[50]から南側端部の計測点[140]までの誤差が大きくなっているが，計測点[50]を境に [140]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[0]から中間部の計測点[40]までは，誤差は小さい．これは測線上に GCP はないものの測線からの離れ50m以内の範囲にGCPがcase2では4点，case3 では 2 点あり，SfM 解析時に補正されたことが影響していると考える．

GCP 数を 6 点全て使用した case1 は，レーザー計測との誤差が最大3.8 cm（5%）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 4 点使用した case2 では，測線Ⅱで最大誤差は4.9 cm（6%）であった．また，GCP 数を 2 点使用した case3 では，最大誤差は 5.3 cm（7 %）であった．いずれのケースも case1 に比べばらつきが大きい．しかし，誤差は 8 %以下に抑えられており，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-6 に，GCP 数の異なる UAV–SfM 測量による推定積雪深とレーザー計測による推定積雪深との比較を示す．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，ケース間の差異は小さかった．



	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
case1	0.9	0.9	1.0	0.9	0.7	-3.4	-2.2	0.1	2.1	1.2	0.7	3.8	2.5	0.3	-0.7
case2	0.1	0.1	0.3	1.4	0.4	-1.6	0.2	2.5	4.5	4.3	3.6	4.9	-0.2	-3.7	-5.3
case3	-1.0	-1.0	1.1	2.2	1.2	-2.2	-0.3	3.3	5.3	3.8	1.9	3.2	-1.3	-2.8	-3.7
case4	23.8	24.5	24.4	24.7	25.2	23.1	25.0	25.7	27.5	26.3	25.7	28.4	26.7	25.1	24.6

図-5 UAV–SfM 測量とレーザー計測との誤差の例（測線Ⅱ）

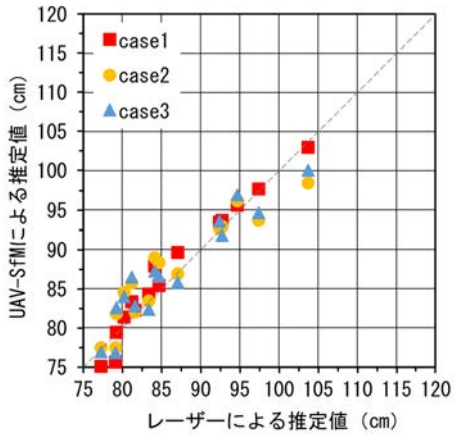


図-6 GCP 数の異なる UAV–SfM 測量/レーザー計測による推定積雪深の比較の例(測線Ⅱ)

4． まとめ

雪面を対象として UAV–SfM 測量を行う場合には，RTK 搭載型 UAV 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 を全く使用なかった場合には最大誤差が 28.4 cm と大きく，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．

参考文献

1) 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.
2) Nolan, M., C. Larsen and M. Sturm: Mapping snow depth from manned aircraft on landscape scales at centimeter resolution using structure-from-motion photogrammetry. *The Cryosphere*, 9, pp. 1445-1463, 2015.
3) 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.
4) 早川裕弌，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.
5) 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.
6) 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.