

積雪深計測における RTK-UAV の有効性

小花和宏之1.坂上清一1.八木隆德1

Effectiveness of RTK-UAV measurements for estimating snow depth distribution

Hiroyuki OBANAWA¹, Seiichi SAKANOUE¹ and Takanori YAGI¹

Abstract

Three-dimensional models (digital surface models (DSMs) and ortho mosaic images) of the study area were created for multiple periods before and after snow accumulation through structure from motion and multi-view stereo processing, using only aerial images with precise positioning data (i.e. without ground control points) taken with a consumer-grade unmanned aerial vehicle (UAV) with a built-in realtime kinematic (RTK) global navigation satellite system. Snow depth distribution was estimated from the difference between DSMs during the snow-free and snow-covered periods. Accuracy of the obtained values was verified by comparing them with the actual values measured on the ground. The calculated snow depth was almost always smaller than the actual measured value, although a strong correlation between the values (r =0.98) was observed. Moreover, the accurate estimation of snow depth distribution could be obtained using an appropriate conversion formula. A comparison was made between RTK-UAV snow depth measurement and the conventional method. Although the former method was slightly inferior in terms of equipment cost and the measurable range, it was superior in terms of spatial resolution, data accuracy, temporal resolution (measurement frequency) and measurement labor.

Key words: Unmanned Aerial Vehicle (UAV), Real Time Kinematic (RTK), Phantom 4 RTK, Snow depth

キーワード: 無人航空機 (UAV), リアルタイムキネマティック (RTK), Phantom 4 RTK, 積雪深

1. はじめに

積雪深の分布を知ることは、水資源管理および防災(関, 2016;堀, 2017;西原・谷瀬, 2018)、冬期における列車運行の安全や安定性確保(鈴木・河島, 2018)など、我々の生活に関わるエネルギーやインフラの維持管理において重要である。これまで、積雪深を計

²⁰¹⁹年8月10日受付, 2019年11月22日受理

¹ 国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構北海道農業研究センター (〒 062-8555 北 海道札幌市豊平区羊ヶ丘 1)

¹ Hokkaido Agricultural Research Center, National Agriculture and Food Research Organization, 1 Hitsujigaoka, Toyohira, Sapporo, Hokkaido 062–8555, Japan

測する手法としては測深棒・雪尺(たとえば,鈴木・河島, 2018)や航空レーザ(たとえば, 関, 2016;西原・谷瀬, 2018)を用いた計測手法等が一般的であった.しかし,たとえば 測深棒の場合,計測点の少なさによる空間解像度の低さや,斜面においては現地調査時の 雪崩や滑落等の作業リスクが問題であった(松山・泉, 2017;西原・谷瀬, 2018).また, 航空レーザの場合,計測頻度の低さや高解像度データの購入コストなどが課題であった.

一方,近年 UAV-SfM (Unmanned Aerial Vehicle with Structure from Motion)を用いた 積雪深分布の計測手法が実施され始めている(たとえば、小花和ほか、2016; Harder et al., 2016; 荒川ほか、2017). それらの手法は、空間解像度が高くかつ比較的安価に実施で きるといったメリットを持っている. ただし、UAV-SfM 手法により積雪分布を推定する ためには、複数時期の計測結果(たとえば、積雪前と積雪後のデジタル表層モデル(Digital Surface Model: DSM))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. DSM の位置精度を向上させるためには、UAV 計測前に地上に複数の目印(地 上基準点、Ground Control Points: GCPs)を設置し、その座標を地上で計測し、その後、 SfM 処理中に GCPs を代入(目視によるマーキングおよび座標入力)する必要がある. し かし、積雪による地上マーカーの埋没、融雪による地上マーカーの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 GCPs の設置は極めて難しい という課題が存在している(たとえば、Bernard et al., 2017; 松山・泉、2017; 沖田ほか、 2018). また、積雪面の移動は困難であり、GCPs の設置、測位、撤去の労力は非常に高い. さらに、SfM 処理時の GCPs 代入作業は自動化することができないため、労働コストが高 い.

一方,近年 RTK-GNSS(Real Time Kinematic - Global Navigation Satellite System)搭載 小型回転翼 UAV(以下,RTK-UAV と呼称)を用いて UAV すなわち写真撮影の位置情報 を従来よりも高精度化することで,GCPs を省略する手法が提案・実証され始めている(た とえば,小花和ほか,2019).上記のように,積雪深分布の UAV-SfM 計測において GCPs の設置・測位・維持は困難であるが,RTK-UAV の使用により GCPs を省略することが可 能になればそれらの問題が解決し,積雪深分布の計測の大幅な省力化の実現が期待され る.そこで本研究では,RTK-UAV の空撮画像および各写真に記録された位置座標のみを 用いて(すなわち GCPs を使用せずに)作成した複数時期の3次元モデルの差分より積雪 深を推定し,地上における実測値と比較することで,その正確性および利便性について検 証した.

2.方 法

2.1. 調查地

調査地は、国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構北海道農業研究センター 内の採草地およびその周辺である(Fig. 1). 範囲は 170 m×170 m, 面積は 28,900 m²(約



Fig. 1. Study area. The base map is from GSI Maps.

2.9 ha)である. ほぼ平坦な地形であり,標高は77~80 m である. 調査範囲は牧草,道路,森林に覆われ,一部には平屋の人口構造物が存在する.

2.2. 空撮およびデータ処理

撮影は、積雪前の2018年12月6日、積雪後の2019年1月4日、1月30日、3月5日 の4回実施した(Table 1). 撮影時刻は正午前後であり、できるだけ太陽高度が高くて明 るい時間帯を選んだ. 天候はいずれの日も曇りであった. 計測場所より北西に約1.5 km 離れた場所に位置する北海道農業研究センター内の気象観測露場(標高73.6 m)(鮫島ほ か、2008)のデータによると、空撮時における気温は-1.3~2.7℃、風速は1.2~3.1 m/s であった.

空撮機材は DJI 社製 Phantom 4 RTK を使用した.同 UAV は RTK-GNSS 受信機が内蔵さ れており、カタログスペックによると、その測位の正確度(真値との差, accuracy)は水 平方向 10 mm + 1 ppm (RMS)、鉛直方向 15 mm + 1 ppm (RMS) (1 ppm は機体から 1 km 移動する毎に誤差が 1 mm 増大するという意味) (DJI, 2018) である.従来の一般向け (consumer grade) UAV で使用されている単独測位 GNSS 受信機の正確度は一般に数 m ~数 10 m と考えられるため、その測位性能は著しく向上している.ただし、Phantom 4

Date		Dec. 6, 2018	Jan. 4, 2019	Jan. 30, 2019	Mar. 5, 2019
Aerial photographing time		12:10-12:26	11:04-11:27	11:40-11:51	11:58-12:08
Number of aerial photos		201	199	199	199
Climate conditions	Temperature (°C)	-1.0	-0.2	-1.3	2.7
	Average wind velocity (m/s)	1.2	1.6	3.1	2.6
	Snow depth (cm)	0	26.7	67.4	46.9

 Table 1. Specifications of aerial photography. The meteorological data were recorded in the weather observation field at Hokkaido Agricultural Research Center.

RTK で空撮した写真とその位置情報のみを用いて作成した3次元モデルの位置情報の正 確度と精度を検証した結果,正確度は水平平均118 mm,鉛直平均292 mm,精度(再現性, precision)は水平平均69 mm,鉛直平均35 mmという結果が得られている(小花和ほか, 2019).

撮影条件は、対地高度 50 m、オーバーラップ 80%、サイドラップ 60%、シャッター スピード、絞り、イメージセンサ感度、ホワイトバランスはオートとした。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、モデル全体が凸型あるいは凹型に歪む、 doming あるいは bowl-effect と呼ばれる現象が発生することが知られており、その低減方 法として斜め撮影が効果的であることが示されている(たとえば James and Robson, 2014; 神野ほか、2018). そこで本研究では、カメラの角度を UAV 前方向に伏角-80 度とした. また、フライトには自律飛行ソフトウェアである DJI 社製 GS RTK を使用した. ルート 設定は、double grid(格子パターン)とし、UAV は常に進行方向を向くように設定した. すなわち、対象範囲は直行する 4 方向から斜めに撮影された.

空撮写真の Structure from Motion and Multi View Stereo (SfM-MVS) 処理(以下, SfM 処理と呼称)は、Agisoft 社製 PhotoScan Professional Edition (現 Metashape Professional Edition)を用いて実施した. なお、上述のように、SfM 処理時に GCPs は使用しなかった. また、高さデータはジオイドモデルによる変換をせずに、楕円体高を使用した. SfM 処理 によって作成した4時期のオルソモザイク画像および DSM は位置情報付きの Tiff 画像と して出力し、GIS ソフトウェア上で重ね合わせ、各時期の DSM と無雪期(2018 年 12 月 6 日)の DSM の差分を計算することで、積雪深分布図を作成した. なお、オルソモザイ ク画像の空間解像度は 1.4 cm、DSM および積雪深分布図の空間解像度は 2.8 cm である.

2.3. 地上計測

積雪深の真値(実測値)を得るために,調査範囲内10カ所にポールを設置し,地表面(地面あるいは積雪面)より上の長さをメジャーで実測することで,各調査ポイントにおける積雪深を計測した.ポール設置場所は,周りに地物が無い草地内に5カ所,建物の近くに2か所,森林の近くに2か所,森林内に1か所とした(Fig.2).



Fig. 2. Ortho mosaic images depicting snow depth. Yellow circles indicate locations where the snow depth was measured. The dotted line in C indicates the position of the survey line in the cross-sectional view shown in Fig. 4.

3. 結果および考察

3.1. RTK-UAV 計測により作成した積雪深分布

空撮画像より作成した複数時期の DSM の差分から作成した積雪深分布図を Fig. 2 に示 す.気象観測露場の記録によると(Fig. 3),最初の空撮日(2018年12月6日)の翌日が 長期積雪初日であり,その後2月初旬あたりに積雪深のピーク(75 cm, 2019年1月26日) を迎え、3月末に長期積雪が無くなっている.RTK-UAV 計測から推定した積雪深(Fig. 2) は、1月4日から1月30日にかけての積雪深の増加とその後の減少を示しており、上記 気象データと調和的である.Figs.2B-Dでは車の轍跡や建物周辺の吹き溜まりといった 詳細な積雪深の変化が表現されており、空間解像度の高さを示している.樹木で覆われた 場所は、樹枝の形状が複雑過ぎて3次元形状の再現性が低く、DSM およびオルソモザイ ク画像の品質が著しく低かった.そのため、落葉樹林帯の積雪深(DSM 差分)は不自然 に大きいあるいは小さい値となり、Fig.2の凡例の表示範囲を超えるため表示されていな い.また、道路沿いおよび建物に隣接した駐車場周辺は、除雪の堆積の影響で積雪深が大 きくなっており、一部は凡例の表示範囲を超えている.Fig.2Cに破線で示した建物を東 西に横切る測線における,降雪前(2018年12月6日)および積雪後3時期(2019年1月4日,1月30日,3月5日)のDSM,および2019年1月30日における積雪深の断面図をFig.4に示す.建物周辺の尖った吹き溜まりや,屋根上の雪庇の張り出しによるDSMの局所的な増加,除雪による駐車場および道路の積雪深の減少など,高精細な積雪深分布が再現されていることが分かる.

3.2. 地上計測により実測した積雪深

計測結果を Table 2 に示す. 建物に隣接した場所に設置した Pole 2 において,屋根上の 積雪の滑落によりポールが破損したため,2019 年 3 月 5 日のデータが欠測である.また,



Fig. 3. Temporal changes in snow depth. The data were recorded in the weather observation field at Hokkaido Agricultural Research Center.



Fig. 4. Snow depth measured on January 30, 2019, and cross section of various DSMs.

Pole 3 は樹林内に位置するが、上述のように樹木で覆われた場所は DSM の品質が著しく 低く、Pole の場所の正確な特定および DSM 差分の正確性に問題があったので、この後の 解析からは除外した. 2019 年 1 月 4 日の平均積雪深は 26.6 cm, 1 月 30 日は 67.1 cm, 3 月 5 日は 42.2 cm であった. 全体的な傾向として、周りに遮蔽物が無い草地内のポイント (ポール 1, 4, 7, 8, 9) は相対的に積雪深が大きく、建物(ポール 2, 10) や森林(ポー ル 3, 5, 6) の近くのポイントは積雪深が小さかった.

3.3. 積雪深の比較

ポール設置場所における, RTK-UAV 計測で推定した積雪深と地上調査により測深棒で 実測した積雪深の比較結果を Fig. 5 に示す. 比較した点数は, 2019 年 1 月 4 日と 1 月 30 日は 9 点, 3 月 5 日は 8 点 (Pole 2 欠測のため)である.

1月30日のPole 4を除いて、すべての時期および場所で、実測値より推定値の方が積 雪深が小さかった。両値の絶対値差分は、3時期平均で8.6 cm (RMSE は 9.5 cm)、1月4 日のみの平均で7.6 cm (RMSE は 8.2 cm)、1月30日のみの平均で6.6 cm (RMSE は 7.7 cm)、 3月5日のみの平均で11.9 cm (RMSE は 12.4 cm)であり、3月5日の差が相対的にやや 大きかった。以上より、RTK-UAV 計測で推定した積雪深は約10 cm 程度の誤差(正確性) を持つことが示された。もっとも、多少ばらつきはあるものの、3時期全データにおける 両値の関係は以下の式(1)で表され、強い相関関係(r=0.98)を示しており、適切な変 換式を用いることでより正確に積雪深分布を推定することが可能になると考えられる。

ただし、上記変換式は本研究の撮影条件(カメラ機種、撮影高度、写真重複率など)にお ける較正式である.たとえば、UAV-SfM 計測結果の位置情報の正確性に関しては、撮影 高度への依存度が高いと考えられ(たとえば、石田ほか、2016)、撮影条件が上記較正式

Monouring point	Actual snow depth (cm)					
Measuring point	Dec. 6, 2018	Jan. 4, 2019	Jan. 30, 2019	Mar. 5, 2019	Average	
Pole 1	0	33.0	76.0	51.5	53.5	
Pole 2	0	20.0	63.0	-	41.5	
Pole 3	0	21.0	57.0	37.0	38.3	
Pole 4	0	29.0	73.0	50.5	50.8	
Pole 5	0	21.5	63.5	47.5	44.2	
Pole 6	0	21.5	58.5	26.0	35.3	
Pole 7	0	27.0	70.0	46.5	47.8	
Pole 8	0	27.5	68.5	44.5	46.8	
Pole 9	0	28.5	69.5	49.5	49.2	
Pole 10	0	31.5	61.5	21.5	38.2	
Average		26.6	67.1	42.2		

Table 2. Actual snow depth measured using a sounding rod.



Fig. 5. Comparison between estimated snow depth measured with RTK-UAV survey and actual value measured with sounding rod.

に与える影響に関しては今後の更なる検討が必要である.

推定値が実測値より小さくなった理由として、以下の2点が考えられる.

1) 12月6日のDSM を積雪深0mの地表データとしているが、実際は僅かに短草や枯草 が存在しており、それらの影響で地表DSMの値が実際より大きくなり、結果的に推定積 雪深が過小評価された. Fig.5に示した回帰式のy切片は12.24 cmであり、この値(真値 とのずれ)は短草や枯草に由来している可能性がある.

2) 積雪深計測用に設置した Pole の姿勢が厳密な鉛直ではなく、僅かでも傾いていたことで、実測積雪深が過大評価された.ただし、仮に Pole がかなり大きく 10 度傾いていた としても、本計測における最大積雪深 76 cm における誤差(真値の過大評価)は+1.2 cm であり、その影響は比較的小さいと考えられる.

また,そもそも積雪深の推定に使用する DSM の値の主な誤差要因として,以下の2点が考えられる.

3) 空撮写真の撮影位置の誤差. すなわち, UAV に搭載された RTK-GNSS の測位誤差.
 Phantom 4 RTK の場合, 鉛直誤差は 15 mm (カタログスペック) である.

4) SfM-MVS 処理において発生する誤差.これは、カメラの性能(画素数、ダイナミックレンジ、レンズの歪み、シャッター機構など)、撮影条件(撮影高度、撮影方向、写真重複率、移動/静止撮影、撮影面積など)、気象条件(日射量、太陽高度、影、風速、気温など)、対象物特性(形状、テクスチャなど)、SfM-MVS 処理アルゴリズム/パラメータなど、様々な要因が影響する(神野ほか、2019)ため、一概に評価することはできない.



Fig. 6. Characteristics of snow depth measuring techniques. SR: spatial resolution; MR: measurable range; A: accuracy; TR: temporal resolution; EC: equipment cost; LC: labor cost.

また, doming のような系統誤差も存在する.

RTK-UAVによる積雪深分布の推定をより高精度化するためには、以上4つの誤差要因の影響を低減する必要がある。特に3および4に関しては、以下の対策が有効だと考えられる。

3') GNSS 補正情報を発信する基準局と RTK-UAV の距離(基線長)を短くする. すなわち, 計測場所が電子基準点から遠い場合,計測場所近傍に基準局を新設し,複数時期の空撮に おいて新設した基準局からの補正情報を利用することで,誤差の低減を図る.

4')斜め撮影の最適化(枚数,配置など)により,domingを低減する.

3.4. 他の手法との比較

積雪深を計測する方法としては、測深棒,定点カメラ(積雪面から露出している樹木等 の高さを計測,杉浦・与河,2017),レーザ距離計(単点,代田ほか,2018),航空レーザ (点群),衛星画像(Marti et al., 2016; 堀,2017),UAV-SfM(GCPs 使用),RTK-UAV-SfM (GCPs 不使用)が挙げられる.Fig.6にそれぞれの方法の特徴を4段階(優れる4>3> 2>1劣る)で示す.ただし,使用する機種,計測方法,計測面積,地形・気象条件等に より各能力は変化するため,この評価はあくまで大まかな目安である.たとえば、測深棒 はデータの正確性および機材コストは優れるが,積雪上を踏査する必要があるため計測労 力が大きく,また高密度(空間解像度),広範囲(計測可能範囲),高頻度(時間解像度) で計測することは極めて難しいためそれらの評価は劣る.一方,衛星画像は計測範囲の面 で優れるが,回帰日数や雲の影響により一般に計測頻度が低く,また高解像度かつ高頻度 撮影画像を使用する場合,価格が高い.

各手法における大きな欠点(評価1)に注目すると、まず、測深棒、定点カメラ、レー ザ距離計は高密度(高空間解像度)かつ広範囲の計測ができない.また、航空レーザお よび衛星画像に関しては機材運用および運用コストの観点で高頻度の計測ができない. UAV-SfM(GCPs使用)は特に積雪上のGCPs関連作業(設置・計測・維持・撤去)の労 力が大きい.一方、RTK-UAV-SfMは機材コストおよび計測可能範囲でやや劣るものの、 他の特徴では優れており、大きな欠点が無い.状況や目的によって最適な方法は異なるが、 例えば現地踏査が不可能な豪雪地帯や急傾斜地を高解像度かつ高頻度で計測したい場合、 GCPs 作業が無い RTK-UAV-SfM が最適かつ実質的に唯一の選択肢になると考えられる.

4.まとめ

RTK-UAV で撮影した空撮画像および撮影時にリアルタイムに各写真に記録される位置 座標のみを用いて(すなわち GCPs を使用せずに), SfM-MVS 処理により積雪前後の複数 時期の3次元モデル(DSM およびオルソモザイク画像)を作成した.次に,無雪期およ び積雪期の DSMs の差分により積雪深分布を推定し,地上における実測値と比較するこ とで,その正確性を検証した.その結果,ほぼすべての時期及び場所において,実測値に 比べて RTK-UAV 計測により推定した積雪深の方が小さい結果となり,約10 cm 程度の誤 差を示した.もっとも,両値は強い相関関係 (r=0.98)を示しており,適切な変換式を 用いることで,積雪深分布の正確な推測が可能であることが示された.また,積雪深計測 における RTK-UAV の優位性に関して,従来手法と比較することで考察した.その結果, RTK-UAV を用いた積雪深計測手法は,機材コストおよび計測可能範囲でやや劣るものの, 空間解像度,データの正確性,時間解像度(計測頻度),計測労力の面で優れているとい う特徴が明らかとなった.

UAV-SfM 手法は,斜面崩壊,地すべり,落石といった各種マスムーブメントによる変化量の計測に用いられることが多い(たとえば,早川ほか,2016:Obanawa and Hayakawa,2018).しかし,対象とするイベントの発生場所・規模の想定および発生時期の推定は困難であり,直接計測による地形変化量の真値の取得,および推定値の正確性の評価は難しい.一方,本研究が対象とした積雪深は,直接的な計測が容易であるため,変化量の真値を取得することが容易である.地表面標高の変動という点で積雪深変化と地形変化は同義であり,地形計測における RTK-UAV の有効性を検証する上で,本研究成果は調査対象とする現象のアナロジー(類比)として有効だと考えられる.

謝 辞

本研究は、農研機構「平成 30 年度理事裁量経費」および農研機構生研支援センター「革

新的技術開発・緊急展開事業(うち人工知能未来農業創造プロジェクト)」の支援を受け て行われた. 農研機構北海道農業研究センターの根本学氏からは,気象観測データを提供 していただいた.ここに記して深く感謝申し上げます.

引用文献

- 荒川逸人・金 高義・友松岳士(2017) UAV 撮影画像を用いた昭和基地の積雪深分布:雪氷研究大 会講演要旨集, 68.
- Bernard, E., Friedt, J. M., Tolle, F., Griselin, M., Marlin, Ch. and Prokop, A. (2017) Investigating snowpack volumes and icing dynamics in the moraine of an Arctic catchment using UAV photogrammetry: The Photogrammetric Record, 32(160), 497–512.
- 代田俊登・上村靖司・鈴木智也・藤野丈志(2018)汎用レーザー距離計による積雪深と降雪強度の 同時測定:雪氷研究大会講演要旨集,28.
- DJI (2018) Phantom 4 RTK ユーザマニュアル v1.4:69 p.
- Harder, P., Schirmer, M., Pomeroy, J. and Helgason, W. (2016) Accuracy of snow depth estimation in mountain and prairie environments by an unmanned aerial vehicle: The Cryosphere, 10, 2559– 2571.
- 早川裕弌・小花和宏之・齋藤 仁・内山庄一郎(2016) SfM 多視点ステレオ写真測量の地形学的応 用:地形, 37(3), 321-343.
- 堀 雅裕(2017)リモートセンシング質問箱「第26回 積雪の光学リモートセンシング」:日本リ モートセンシング学会誌,37(5),461-465.
- 石田大輔・服部聡子・織田和夫・近藤弘嗣・長山真一・重高浩一(2016) UAV を用いた 3 次元出来 形計測と精度検証:先端測量技術, 108, 62-69.
- James, M.R. and Robson, S. (2014) Mitigating systematic error in topographic models derived from UAVand ground-based image networks: Earth Surf. Process. Landforms, 39, 1413–1420. doi. org/10.1002/esp.3609.
- 神野有生・八田滉平・福元和真・田村尚也・宮﨑真弘・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.
- 神野有生・宮崎真弘・八田滉平・福元和真(2018) UAV 写真測量の SfM における斜め撮影の導入 に関する基礎的シミュレーション:日本写真測量学会平成 30 年度秋季学術講演会発表論文集, 31-32.
- Marti, R., Gascoin, S., Berthier, E., De Pinel, M., Houet, T. and Laffly, D. (2016) Mapping snow depth in open alpine terrain from stereo satellite imagery: The Cryosphere, 10, 1361–1380.
- 松山 洋・泉 岳樹(2017)小型無人航空機(UAV)を用いた積雪深分布の推定と検証-新潟県 巻機山周辺を事例に-:財団法人国土地理協会平成27年度学術研究助成 研究成果報告集, 1-33.
- 西原照雅・谷瀬 敦(2018) 航空レーザ測量を用いた風衝斜面及び風背斜面における積雪分布の分 析:水工学論文集 B1(水工学),74(4), I 883-I 888.
- Obanawa, H. and Hayakawa, Y.S. (2018) Variations in volumetric erosion rates of bedrock cliffs on a small inaccessible coastal island determined using measurements by an unmanned aerial vehicle with structure-from-motion and terrestrial laser scanning: Progress in Earth and Planetary Science, 5. doi.org/10.1186/s40645-018-0191-8.
- 小花和宏之・河島克久・松元高峰・伊豫部勉・大前宏和(2016)小型 UAV を用いた積雪分布の3次 元計測:雪氷,78(5),317-328.
- 小花和宏之・坂上清一・八木隆徳(2019) RTK-UAV を用いた地形計測の測位性能および省力効果: 地形,40(2),125-134.
- 沖田竜馬・河島克久・松元高峰・小花和宏之(2018) UAV-SfM 測量データと航空レーザ測量データ を用いた積雪深分布図の作成:雪氷研究大会講演要旨集, 68.
- 鮫島良次・廣田知良・濱嵜孝弘・加藤邦彦・岩田幸良(2008)北海道農業研究センターにおける