空撮画像を用いた SfM に基づく写真測量による屋根上積雪深の測定精度

MEASURED ACCURACY OF SNOW DEPTH ON ROOFS BY PHOTOGRAMMETRY BASED ON SfM USING AERIAL IMAGES

千葉隆弘 — * 1 堤 拓哉 — * 2
高橋 徹 — * 3

Takahiro CHIBA — * 1 Takuya TSUTSUMI — * 2
Toru TAKAHASHI — * 3

キーワード：
SfM, 空撮画像, 写真測量, 屋根上積雪深, 測定精度

Keywords:
SfM, Aerial images, Photogrammetry, Roof snow depth, Measured accuracy

To verify the measured accuracy of the snow depth on the roof by SfM-based photogrammetry using aerial images, the authors performed aerial photography by UAV and measurement of the roof snow depth for the gymnasium of Hokkaido University of Science. Phantom 4, Phantom 3, and Mavic Pro were used for aerial photography. As a result, it was found that the RMSE of the roof snow depth was 30 to 40 mm. In addition, it was found that it is necessary to secure the number of images that satisfy the conditions of 90% overlap ratio and 60% side overlap ratio.

1. はじめに

重複した複数のデジタル画像から被写体表面の点群およびその点群を基に3Dメッシュモデルを生成するSfM (Structure from Motion) ソフトウェアがデスクトップPCやラップトップPCで、かつ、安価で利用できるようになった。同時に、CCDカメラを搭載した小型UAVが急速に普及し、国土交通省国土地理院では、「UAVを用いた公共測量マニュアル(案)¹⁾」を整備するといったように、空撮画像を用いたSfMに基づく写真測量の技術が一般化しつつある。

一方、建築物における屋根の積雪荷重は、建築基準法と日本建築学会建築物荷重指針・同解説²⁾のいずれにおいても、地上積雪荷重に屋根形状係数を乗じて算定される。地上積雪荷重は、これまで気象庁で観測された地上積雪深を基に算定され、再現期間500年に対する地上積雪深を推定できるまで観測データの蓄積がなされている。これに対し、屋根形状係数については、屋根上積雪深の実測データに基づいて設定されるのが望ましいものの、その実測データの蓄積が進んでおらず、粉体を用いた吹雪風洞実験の結果に基づいて設定されている³⁾。これは、吹雪風洞実験の結果について、十分な精度検証がなされていないことを意味している。

これまで建築物の屋根上積雪深は、屋根に直接上がって雪尺を雪面に突き刺す、あるいは積雪断面観測を行って測定するのが一般的である。高所での作業であり、作業安全性を確保することが難しいことが屋根上積雪深の実測データ蓄積が進まない大きな要因である。従って、空撮画像を用いた写真測量による屋根上積雪深の測定手法が確立できれば、実測データ蓄積の飛躍的な促進に期待できる。

SfMは、重複した複数のデジタル画像を比較して、画像の撮影位置と被写体表面の座標を画素単位で同時に特定していくものである。従って、撮影した画像における色のパターンが多様であるほど3Dメッシュモデルを生成し易い。一方、屋根上積雪深を測定する場合は、色のパターンが極端に少ない雪面が被写体となる。筆者らは、空撮時における天候の違いと3Dメッシュモデルの生成状況との関係を検討した^{4), 5), 6)}。その結果、拡散光が主となる曇りの天候で撮影された空撮画像では、色のパターンの多様性が失われ、3Dメッシュモデルが生成されない箇所が生じること、直射光が得られる晴れの天候で撮影された空撮画像では、雪面においても色のパターンの多様性が生じることによって、適正な3Dメッシュモデルが生成されることを明らかにした。斜面積雪や雪崩の分野における既往の研究をみると、筆者らの研究と同様に、雪面においても適正な3Dメッシュモデルが獲得されている^{7), 8)}。これらに対し、積雪深の測定精度に言及した研究は、筆者ら^{4), 5), 6)}以外に見当たらない。近年、小型UAVにおけるアップデートの周期が短く、搭載されているカメラや、カメラの姿勢を制御するジンバルの性能が向上している。こうした機体の性能向上と測定精度との関係を把握することも重要である。

このような背景から本研究では、空撮画像を用いたSfMに基づく写真測量による屋根上積雪深の測定精度を明らかにすることを目的に、カメラの仕様が異なる3つの小型UAVを用いて屋根上積雪深の測定精度を検証した。なお、本研究で対象とする測定精度は、積雪荷重の評価に影響を及ぼさない精度を想定しており、屋根上積雪深の測定精度としては、100 mm程度以内を目標としている。

本稿は文献10)に加筆・修正を加えたものである。

¹⁾ 北海道科学大学工学部建築学科 教授・博士(工学)
(〒006-8585 札幌市手稲区前田7条15丁目4-1)

²⁾ 地方独立行政法人北海道立総合研究機構建築研究本部北方建築総合研究所
研究主幹・博士(工学)

³⁾ 千葉大学大学院工学研究院 教授・工博

⁴⁾ Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Hokkaido Univ. of Science, Dr. Eng.

⁵⁾ Senior Research Manager, Hokkaido Research Organization, Building Research Dept., Northern Regional Building Research Institute, Dr. Eng.

⁶⁾ Prof., Graduate School of Engineering, Chiba Univ., Dr. Eng.

2. 研究方法

本研究では、北海道科学大学の体育館（以下、HIT Arena という。）を対象に、写真測量に基づいて屋根上積雪深を測定した。写真 1 に、HIT Arena の概要と屋根上積雪深の測線を示す。HIT Arena は、平面規模が約 60 m×70 m、高さが約 18 m であり、メインアリーナ、サブアリーナ、および武道場で構成されている。その屋根形状は、建物中央部に位置している大きなメインアリーナの屋根が他の屋根に比べて 3.0 m 高い階段状の陸屋根となっている。冬期の主風向は西北西であることから、メインアリーナ屋根風下側の下段屋根には吹きだまりが発生する。本研究では、吹きだまりが発生する下段屋根に、測線 A および B の 2 本の測線を設定して屋根上積雪深の測定精度を検証することとした。屋根上積雪深の実測は空撮直後に実施し、10 mm 目盛りの雪尺を雪面から屋根面まで突き刺し、0.5 m 間隔で屋根面からの積雪深を測定した。

空撮に用いた小型 UAV を写真 2 に示す。本研究では、dji 製の機体 I（Phantom 4）、機体 II（Phantom 3）、および機体 III（Mavic Pro）の 3 機種を用いた。これらの機体に搭載されている純正カメラの仕様を表 1 に示す。機体 I のセンサーが最も大きく、最大画素数は 20.0M pixel である。機体 II および機体 III は、機体 I に比べてセンサーが小さく、最大画素数はいずれも 12.4M pixel である。レンズの視野角については、機体 II が他の機体に比べて大きいものの、広角レンズとは感じにくい程度である。これらのカメラは、いずれの機体においても、三軸ジンバルを介して取り付けられている。

空撮は、屋根雪がない状態（2017 年 9 月 7 日）と屋根雪がある状態（2017 年 12 月 11 日）とで 2 回実施した。すなわち、屋根面と積雪面との相対距離が屋根上積雪深となる。空撮方法は、カメラを真下向きとし、画像相互のオーバーラップを十分に確保することを目的に、それぞれの機体で 300 枚以上撮影することとした。撮影インターバルは 2 sec に設定したことから、飛行時間は 12 min とし、360 枚程度の空撮画像を撮影した。飛行高度は、機体を離陸させた下段屋根面から 30 m とし、機体は手動でゆっくり操作した。

写真 1 HIT Arena の概要と屋根上積雪深の測線

SfM ソフトウェアには、Agisoft の Metashape（旧 PhotoScan）を用いた。写真のアライメント→高密度クラウド（点群）生成→3D メッシュモデル生成の手順で解析が進められるが、最も多くの解析時間を要する高密度クラウド生成の設定を”medium”とし、1 つの 3D メッシュモデルを 24 h 以内に生成することを目指した。なお、高密度クラウド生成の設定”high”は、解析に用いた画像の画素をすべて使用する設定であるが、解析時間が 48 h 以上になるとともに、”medium”と比較して生成された 3D メッシュモデルの品質が格段に向上した様子がみられなかった。一方、3D メッシュモデルの精度をつかさど

写真 2 本研究で用いた 3 つの小型 UAV

表 1 各小型 UAV に搭載されている純正カメラの仕様

カメラ仕様	機体 I (Phantom 4)	機体 II (Phantom 3)	機体 III (Mavic Pro)
センサー	1"CMOS	1/2.3"CMOS	1/2.3"CMOS
視野角	80.0°	94.0°	78.8°
アスペクト比	3 : 2	4 : 3	4 : 3
画素数	20.0M pixel	12.4M pixel	12.4M pixel

写真 3 撮影された画像の一部（2017 年 12 月 11 日撮影）

るコントロールポイントについては、メインアリーナ屋根の四隅に設定し、3D メッシュモデルの精度が空撮画像のオーバーラップ状況に極力依存するようにした。なお、四つのコントロールポイントにおける累積誤差は、生成されたいずれのモデルにおいても、30 mm 未満であった。

3. 研究結果

3.1 3D メッシュモデルの生成状況

屋根雪がある 2017 年 12 月 11 日に、各機体で撮影された画像の一部を写真 3 に示す。いずれの画像においても、下段屋根面における自然に形成された雪面の凹凸・模様や、下段屋根のトップライト周辺に形成された吹きだまり・吹き払い領域が明瞭に撮影されている。これらの画像を用いて生成した 3D メッシュモデルを図 1 に示す。機体 I では 360 枚、機体 II では 353 枚、機体 III では 366 枚の空撮画

像を用いて HIT Arena の 3D メッシュモデルを生成した。テクスチャー表示のモデルをみると、いずれの場合においても、建物全体の 3D メッシュモデルが適正に生成され、さらに、風下側下段屋根の雪面や吹きだまり・吹き払い領域が精度よく生成されている様子が伺える。メッシュ表示のモデルをみると、いずれの場合も繊細であり、その間隔は 80~120 mm 程度であった。

3.2 屋根上積雪深の測定精度

測線 A および測線 B において、3D メッシュモデルから得られた屋根上積雪深の測量値と実測値とを比較した結果を表 2 に示す。なお、屋根面は 2017 年 9 月 7 日の測量値とし、図中に示す屋根上積雪深の実測値は、屋根面の測量値からの相対距離として表示している。屋根面の測量値と屋根上積雪深の実測値との関係を見ると、測線 A および B の両方において、いずれの機体においてもほぼ同様の値を示す。これは、いずれの機体においても屋根面の 3D メッシュモデル

図 1 生成された 3D メッシュモデル

表 2 測量値と実測値との比較

図2 各機体における測定誤差の頻度分布

に大きな違いがみられないことを意味している。屋根上積雪深の測量値と実測値とを比較すると、いずれの場合においても屋根上積雪深の測量値は実測値と同程度であり、測線 A では距離 x が 9.0 m 近傍、測線 B では距離 x が 13.5 m 近傍に生じた深さ 0.8 m 程度の吹きだまりのピークを写真測量により測定されていることが確認できる。

ここで、屋根上積雪深の実測値を真値とし、測線 A および測線 B の合計 50 点における測量値と実測値との差である測定誤差を機体ごとに算定した。図 2 に、各機体における測定誤差の頻度分布を示す。機体 I の場合をみると、誤差が 0~20 mm の割合が高く、標準偏差も比較的小さい傾向を示す。測定精度を表す RSME (二乗平均平方根誤差) は 33.8 mm であった。これに対し、機体 II の場合をみると、誤差が-20~20 mm の範囲に分布しており、機体 I に比べて標準偏差が大きく、RMSE は 37.3 mm となった。機体 III の場合をみると、誤差のばらつきの程度が機体 II と近似しており、RMSE は 37.2 mm であり、機体 II とほぼ同様の結果となった。機体 I の搭載カメラにおける画像の画素数は 20.0M pixel、機体 II および機体 III の搭載カメラにおける画像の画素数は 12.4M pixel であることから、屋根上積雪深の測定精度は画像の画素数が大きいほど向上することになる。

以上の結果をみると、空撮画像の画素数が大きいほど屋根上積雪深の測定精度が向上している。SfM ソフトウェアでは、画素単位で点群を生成しており、画素数が大きいほど 3D メッシュのサイズが小さくなることによって測定精度が向上するものと考えられる。一方、撮影距離が大きくなるほど画素一辺当たりの距離が大きくなることから、3D メッシュのサイズや屋根上積雪深の測定精度は、撮影距離の影響を受けることになる。ここで、既往の研究^{4), 5), 6)}で得られた結果を含めて撮影距離とメッシュ平均間隔との関係を図 3 に示す。なお、メッシュ平均間隔とは、測線軸方向におけるメッシュ間隔の平均値である。既往の研究で得られた両者の関係をみると、撮影距離の増加に伴いメッシュ平均間隔が増加する比例関係を示し、図中の回帰式で両者の関係を表すことができる。このような既往の研究で得られた結果と本研究の結果とを比較すると、機体 I は既往の研究と同程度のメッシュ平均間隔を示すものの、機体 II および機体 III においては、メッシュ平均間隔が大きくなる傾向を示す。既往の研究では、画素数 16.0M pixel のデジタルカメラを用いて手持ち撮影あるいは空撮した画像から 3D メッシュモデルを生成した。このため、撮影距離に対する機体 II および機体 III のメッシュ平均間隔が大きくなった

図3 撮影距離とメッシュ平均間隔との関係

図4 撮影距離と測定精度 RMSE との関係

と考える。次に、撮影距離と測定精度 RMSE との関係を図 4 に示す。既往の研究における両者の関係をみると、測定精度 RMSE は概ねメッシュ平均間隔に対応しており、撮影距離とメッシュ平均間隔との関係から測定精度が予測可能であることが示されている。本研究で得られた撮影距離と測定精度 RMSE との関係をみると、いずれの機体においても既往の研究に比べて RMSE が小さく、測定精度がメッシュ平均間隔に依存していないことを示している。本研究で用いたいずれの機体もカメラの姿勢を制御する三軸ジンバルが搭載されて

おり、空撮画像にはフォーカスが合っていないものは一切含まれていない。このため、撮影距離に対するメッシュ平均間隔が大きい場合においても、高品質の空撮画像を基に 3D メッシュモデルが適正に生成されたことによって屋根上積雪深の測定精度を確保できた。

3.3 空撮画像の枚数と屋根上積雪深の測定精度との関係

以上に示すように、360 枚程度の空撮画像を用いて生成した 3D メッシュモデルに基づいて RMSE が 40 mm 以下の精度で屋根上積雪深を測定することが可能であることを明らかにした。また、写真測量で用いる機体として、カメラの性能が高い機体Ⅰが望ましいものの、機体Ⅱや機体Ⅲにおいても十分な精度で屋根上積雪深の写真測量が実施可能であることがわかった。以下では、機体Ⅰの空撮画像を用いて、その画像枚数と屋根上積雪深の測定精度との関係について検討した。

国土地理院の「UAV を用いた公共測量マニュアル（案）¹⁾」では、

空撮画像の撮影方法として、飛行経路方向のオーバーラップ率を 80 ～90%以上、飛行経路相互間のサイドラップ率を 60%以上確保する必要があるとされている。また、既往の研究をみると、オーバーラップ率を 90%、サイドラップ率を 60%として撮影した空撮画像の重複枚数分布は、撮影対象領域全体にわたって 5 枚以上になることが示されている⁹⁾。本研究では、画像枚数 25 枚、50 枚、100 枚、および 200 枚とした場合における屋根上積雪深の測定精度を検討した。

図 5 に、画像枚数ごとに示した 3D メッシュモデルの生成状況を示す。なお、図中に示す画像の重複枚数分布は、Pix4Dmapper を用いて解析した結果を示している。HIT Arena における 3D メッシュモデルの生成状況をみると、いずれの枚数においても HIT Arena のモデルを生成することができている。画像の重複枚数分布をみると、25 枚の場合は、2～3 枚が大半を占めており、5 枚以上重複した箇所は部分的である。50 枚の場合をみると、4 枚以上重複した箇所が大

図 5 画像枚数ごとの 3D メッシュモデルの生成状況

図6 画像枚数ごとの測量値と実測値との比較

半を占めるようになり、100枚の場合では大半が5枚以上となり、4枚の重複箇所が一部のみみられる。200枚の場合をみると、ほぼすべての空撮領域において画像の重複枚数が5枚以上となっている。屋根上積雪深の測線を設定した領域における3Dメッシュモデルの生成状況を見ると、25枚の場合で適正なモデルが生成されていない箇所がみられるものの、50枚以上の空撮画像からは同程度の品質で3Dメッシュモデルが生成されたようにみえる。

ここで、測線Bを対象として撮影枚数ごとの測量値と実測値とを比較した結果を図6に示す。25枚の場合をみると、測量値は実測値に比べて200mm程度大きく、その傾向は50枚および100枚で同様にみられた。これらに対し、200枚の場合をみると、測量値と実測値が近似するようになり、空撮画像360枚程度の場合と同様の測定精度になった。以上の結果をみると、重複画像が2枚以上で被写体の3Dメッシュモデルが生成されるものの、適正な測定精度を確保するためには重複画像が確実に5枚以上となるオーバーラップ率90%およびサイドラップ率60%の条件を満たすように空撮画像の枚数を確保することが必須である。

4. まとめ

本研究では、空撮画像を用いたSfMに基づく写真測量による屋根上積雪深の測定精度を明らかにすることを目的に、カメラの仕様が異なる3つの小型UAVを用いて屋根上積雪深の測定精度を検証した。本研究で使用した小型UAVは、dji製の機体I (Phantom 4)、機体II (Phantom 3)、および機体III (Mavic Pro)であり、SfMソフトウェアについては、AgisoftのMetashapeを使用した。その結果、画素数が大きくカメラの性能が高いほど屋根上積雪深の測定精度が向上したものの、三軸ジンバルを搭載した小型UAVで撮影した空撮画像を用いることで屋根の積雪荷重を評価するための屋根上積雪深を写真測量に基づいて測定することが十分可能であることが明らかとなった。また、屋根上積雪深の測定精度を確保するため、オーバーラップ率90%およびサイドラップ率60%の条件を満たすように

空撮画像の枚数を確保する必要性も明らかとなった。

今後は、屋根の積雪荷重を評価するための屋根形状係数を構築することを目指し、写真測量に基づいた屋根上積雪深の実測データを蓄積する予定である。

参考文献

- 1) 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), 2017年3月改定版, 入手先 < <https://www.gsi.go.jp/common/000186712.pdf> >, 参照 2020.06.21
- 2) 日本建築学会編: 建築物荷重指針・同解説(2015), 5章 雪荷重, pp.207-293, 2015.2
- 3) 遠藤久久, 苔米地司: 模型雪による屋根上積雪形状の風洞模型実験(その1), 北海道工業大学研究紀要, No.11, pp.163-178, 1983.3
- 4) 千葉隆弘, Thomas Thiis, 高橋徹, 苔米地司: 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, 2016.3
- 5) 千葉隆弘, 苔米地司: 空撮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, 北海道の雪氷, No.35, pp.127-130, 2016.9
- 6) 千葉隆弘: 空撮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関する研究—体育施設を対象とした撮影距離ごとの測定精度について—, 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), B-1, pp.21-22, 2017.7
- 7) 内山庄一郎, 上石勲, 井上公, 鈴木比奈子, 丸小有沙: SfMによる積雪環境の三次元モデリングと積雪深推定, 雪氷研究大会(2015・松本)講演要旨集, p.P2-43, 2015.9
- 8) 秋山一弥, 松下拓樹, 中村絵美: マルチコプターを用いた全層雪崩の調査, 雪氷研究大会(2015・松本)講演要旨集, p.B3-1, 2015.9
- 9) 早坂寿人, 大野裕幸, 大塚力, 関谷洋史, 瀧繁幸: 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, No.127, pp.107-116, 2015.12
- 10) 千葉隆弘: 空撮画像を用いた写真測量による屋根上積雪深の測定精度—機体の違いと測定精度との関係について—, 日本建築学会北海道支部研究報告集, No.91, pp.176-179, 2018.6

[2020年7月6日原稿受理 2020年11月30日採用決定]