

(61) UAV-SfM/MVS 測量における 構造物の再現性向上のための最適条件の検討

長屋 佑美¹・菊 雅美²

¹学生会員 岐阜工業高等専門学校 専攻科先端融合開発専攻 (〒501-0495 岐阜県本巣市上真桑 2236-2)

E-mail: 2018y26@edu.gifu-nct.ac.jp

²正会員 岐阜工業高等専門学校講師 環境都市工学科 (〒501-0495 岐阜県本巣市上真桑 2236-2)

E-mail: kiku@gifu-nct.ac.jp

UAV-SfM/MVS 測量の計測精度および再現性を高めるために、岐阜工業高等専門学校の校舎を対象に UAV-SfM/MVS 測量を行った。UAV を用いて空撮をする際に、カメラの撮影角度、オーバーラップ率、サイドラップ率を変化させ、撮影条件の違いによる 3D モデルの視覚的な再現性や距離精度、構造物のエッジの再現性を検証した。その結果、鉛直下向き撮影画像と同じ対地高度において、斜め撮影画像を加えることで、3D モデルの視覚的な再現性を高められることがわかった。距離精度についても斜め撮影画像を加えることで精度が高められる可能性が示唆された。また、斜め撮影画像を加えることで構造物のエッジも、鮮明に抽出できることが明らかになった。

Key Words: UAV, SfM/MVS, 3D model, PhotoScan, survey

1. はじめに

近年、UAV (Unmanned aerial vehicle, 無人航空機) の普及に伴って、UAV で撮影した画像から画像処理手法 SfM/MVS (Structure from Motion/Multi-View Stereo, 多視点画像解析) 技術を用いて 3D モデルを構築する UAV-SfM/MVS 測量が実務に導入されつつある。ただし、UAV-SfM/MVS 測量については、これまでに多くの研究が行われ、様々な課題が明らかにされている。例えば、早坂ら¹⁾によって、構造物のエッジを明瞭にするための最適な方法を検討する必要性が明らかになった。また、大石ら²⁾によって、一様部分が多く、特徴点の少ない画像を用いる場合は、画像のマッチング処理が不完全になる可能性が明らかにされた。UAV-SfM/MVS 測量が実務に適用される機会が増えたことを背景に、国土交通省国土地理院は、「UAV を用いた公共測量マニュアル (案)」³⁾を制定・改正した。マニュアルでは、UAV-SfM/MVS 測量の運用・三次元点群の作成・品質評価についての方法が示されている。しかし、基本的な測量手順が示されているのみで、3D モデルの精度に関わる詳細な測量方法や解析方法については明記されておらず、計測者の判断に委ねられている。また、マニュアルに沿って UAV-SfM/MVS 測量を行った場合の 3D モデルの再現性や精度は不明確な部分もある。

山川・菊⁴⁾は、岐阜工業高等専門学校の校舎を対象に UAV-SfM/MVS 測量を行い、構造物の 3D モデル化を試みた。そして、構築した 3D モデルの水平・鉛直距離について、トータルステーション (以下、TS) 測量と比較し、良好な計測精度が得られていることを示した。しかし、3D モデルの再現性が低く、再現性の向上に課題が残された。また、本研究を通じて、UAV-SfM/MVS 測量の精度は、計測方法だけでなく、解析方法の影響も受けることが判明した。そのため、UAV-SfM/MVS 測量の詳細な作業手順や設定値について、さらに検討していく必要性が明らかとなった。

従来の写真測量と異なり、UAV-SfM/MVS 測量において構造物を対象とする場合は、構築した 3D モデルの視覚的な再現性も重要になると考えられる。SfM/MVS 技術では、複数の視点の情報に基づいて 3D モデルを構築するため、対象物を様々な角度から撮影することを推奨している。そのため、3D モデルを構築する際に、対象物を斜めから撮影した画像を用いることは、3D モデルの再現性を向上させる手段の一つと考えられる。しかし、斜め撮影画像を用いた場合の 3D モデルの再現性について検討された例はほとんどない。

そこで、本研究では、UAV-SfM/MVS 測量の計測精度および再現性を高めるために最適な計測方法について明らかにすることを目的とする。

表-1 撮影条件

Case	Camera angle [°]	Overlap [%]	Sidelap [%]	Number of photos
A 1	90	90	90	109
A 2	90	90	80	49
A 3	90	92	92	168
A 4	60	90	90	107
A 5	45	90	90	109
M 1	90	90	60	92
M 3	45	90	60	93

表-2 3Dモデル内におけるGCPのRMSE

Case	RMSE		
	Horizontal [m]	Vertical [m]	Total [m]
A 1	0.079	0.012	0.080
A 2	0.045	0.025	0.052
A 3	0.120	0.008	0.121
A 1 + A 4	0.051	0.011	0.052
A 1 + A 5	0.038	0.010	0.038
M 1 + M 3	0.013	0.010	0.016

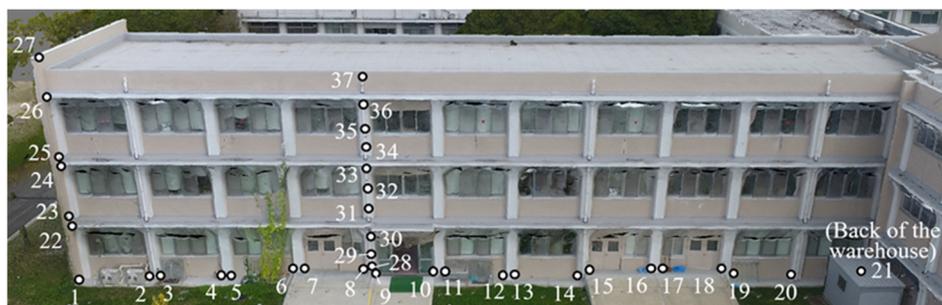


図-1 TS 測量と UAV-SfM/MVS 測量の精度検証箇所

2. UAV-SfM/MVS 測量の概要

本研究では、岐阜工業高等専門学校の校舎を対象に UAV-SfM/MVS 測量を行った。UAV には、DJI Phantom 4 を用いた。UAV による空撮は、自動操縦と手動操縦の 2 回に分けて行った。

自動操縦による空撮は、自動飛行制御アプリ DJI GS Pro を用いて 2017 年 12 月 20 日に実施した。撮影条件は表-1 に示す Case A 1～Case A 5 であり、カメラの撮影角度、オーバーラップ率、サイドラップ率を変化させた。撮影高度は全てのケースで対地高度 30 m とした。

手動操縦による空撮は、2017 年 8 月 30 日に行った。対地高度 30 m から、撮影条件を変えて 4 ケースの空撮を実施した。本稿では、紙面の都合上、表-1 に示す Case M 1 と Case M 3 によって作成したモデルのみ取り上げる。なお、撮影ではオーバーラップ率 90%、サイドラップ率 60% を意識したものの、手動撮影のため具体的な数値は不明である。

空撮時には、平面直角座標系に基づく位置情報を 3D モデルに与えるため、GCP (Ground Control Point : 地上基準点) を設定した。設定箇所は上空が開いている校舎南側および北側とし、自動操縦では 10 地点、手動操縦では 11 地点に 42 cm 四方の対空標識をそれぞれ設置した。そして、UAV による空撮と並行して GCP に対する GNSS 測量を行い、後処理によって GCP の座標を得た。

3D モデルの精度を検証するため、TS を用いた測量を実施した。図-1 に示すように、計測点として 37 点を設定し、校舎南側を対象に水平角度・水平距離・鉛直角度を計測した。

3. 構築した 3D モデルの精度検証

(1) GCP の再現精度

3D モデルの再構築には、3D モデリングソフトウェア PhotoScan を使用した。表-2 に、GCP の座標値に対する 3D モデルと GNSS 測量の RMSE (二乗平均平方根誤差) を示す。同表から、鉛直下向き撮影画像のみの Case A 1～Case A 3 を比較すると、オーバーラップ率 90%、サイドラップ率 80% で撮影した Case A 2 の RMSE (Total) が最も小さい。このことから、画像間のサイドラップ率が高ければ、3D モデル内の GCP の精度が高くなるとは必ずしもいえないことがわかった。また、Case A 2 は、他のモデルに比べて鉛直方向の RMSE が大きい。一方、鉛直下向き撮影画像のみで 3D モデルを作成した Case A 1 と、Case A 1 に斜め撮影画像を加えた Case A 1+A 4 や Case A 1+A 5 を比較すると、斜め撮影画像を加えることで GCP の RMSE が水平方向および鉛直方向ともに小さくなることが明らかとなった。また、手動操縦で撮影した Case M 1+M 3 の RMSE (Total) は、0.016 m と全ケースの中で最小となった。この結果から、水平方向と鉛直方向のどちらの精度も考慮すると、鉛直下向き撮影画像のオーバーラップ率やサイドラップ率に留意するより、鉛直下向き撮影画像に斜め撮影画像を加えて 3D モデルを作成の方が GCP の精度は良くなると思われる。

本来であれば、この時点で GCP の RMSE が大きい場合、3D モデルの精度に影響を与える可能性があるため、次の手順へ進まない。しかし、本研究では、GCP の誤差の影響を含めて撮影条件の検討を行うため、この条件のまま検討を進めた。



(a) Case A 1 (カメラ角度 90°, オーバーラップ率 90%, サイドラップ率 90%)



(b) Case A 2 (カメラ角度 90°, オーバーラップ率 90%, サイドラップ率 80%)



(c) Case A 3 (カメラ角度 90°, オーバーラップ率 92%, サイドラップ率 92%)



(d) Case A 1+A 4 (カメラ角度 90° と 60°, オーバーラップ率 90%, サイドラップ率 90%)



(e) Case A 1+A 5 (カメラ角度 90° と 45°, オーバーラップ率 90%, サイドラップ率 90%)



(f) Case M1+M3 (カメラ角度 90° と 45°, オーバーラップ率 90%, サイドラップ率 60%)

図-2 UAV 自動操縦で撮影した画像を使用して作成した 3D モデル

(2) 構造物の視覚的な再現性

図-2(a)～(e)に、自動操縦の UAV によって空撮した画像から構築した 3D モデル (タイルモデル) を示す。鉛直下向き撮影画像のみで作成した Case A1～Case A3 の 3D モデルを比較すると、Case A2 の再現性が最も低く、校舎側面の空洞が少ないのは Case A3 であることがわかる。このことから、画像間のサイドラップ率が大きくなるほど、3D モデルの再現性は向上するといえる。しかし、3D モデルが密な点群によって構築されるため、解析時の負荷は大きくなる。また、Case A3 においても、校舎の再現性が高いとはいえない。一方、鉛直下向き撮影画像に斜め撮影画像を加えた Case A1+A4 や Case A1+A5 では、校舎側面の空洞は生じておらず、視覚的な再現性は高くなった。斜め撮影画像を加えることで、校舎側面が撮影画像に十分に映り込み、3D モデルが詳細に再現されたと考えられる。

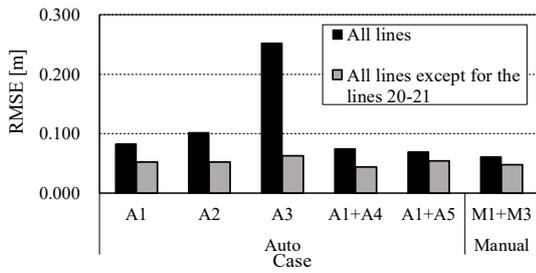
図-2(f)に、手動操縦の UAV によって空撮した画像から構築した Case M1+M3 の 3D モデルを示す。手動操縦の場合も、自動操縦と同様に、鉛直下向き撮影画像に斜め撮影画像を加えることで、3D モデルの再現性が良くなる傾向を確認した。

以上から、鉛直下向き撮影画像に斜め撮影画像を加えることで、3D モデルの視覚的な再現性を高められることがわかった。

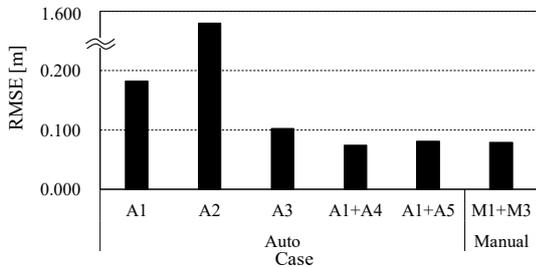
(3) 構造物の距離精度

図-3(a)に、3D モデル内の水平距離について、TS 測量と UAV-SfM/MVS 測量の RMSE を示す。同表から、鉛直下向き撮影画像のみで作成した Case A1～Case A3 の 3D モデルを比較すると、Case A3 の RMSE が 0.252 m と最も大きくなった。各測線における TS 測量と UAV-SfM/MVS 測量の絶対差を確認したところ、測線 20-21 の絶対差は 0.946 m と大きく、倉庫背後部の校舎の再現性の低さが RMSE を大きくした原因であることが判明した。そこで、倉庫裏にある測線 20-21 を除いたところ、同図に示すように、Case A3 の RMSE は 0.063 m となった。Case A3 では、測点 21 付近において密な点群によって誤ったモデルが構築されていた。これによって、水平精度が低くなったと考えられる。一方、鉛直下向き撮影画像に斜め撮影画像を加えて 3D モデルを作成した Case A1+A4, Case A1+A5, Case M1+M3 と鉛直下向き撮影画像のみで作成した 3D モデルを比較すると、斜め撮影画像を加えた 3D モデルの方が、RMSE は小さいことがわかる。

鉛直距離精度を示した図-3(b)から、鉛直距離に対しては、鉛直下向き撮影画像のみで作成した Case A1～Case A3 の 3D モデルは、鉛直下向き撮影画像に斜め撮影画像を加えた 3D モデルよりも RMSE が大きいことがわかる。特に、Case A2 の RMSE が最も大きく、この要因として、図-2(b)に示したように、3D モデルの再現性が



(a) 水平距離精度



(b) 鉛直距離精度

図-3 距離精度の二乗平均平方根誤差

著しく低いことが挙げられる。

以上の結果より、鉛直下向き撮影画像に斜め撮影画像を加えることで、水平距離および鉛直距離ともに、精度を高められることがわかった。

(4) 構造物のエッジの再現性

PhotoScan で作成した DSM (Digital Surface Model : 数値表層モデル) を QGIS で読み込み、図-4 に示す 2 地点の GCP を結ぶ測線において、校舎の断面図を作成した。図-5 に、抽出した断面図を示す。同図より、Case A2 と Case A1+A5 を比較すると、どちらも校舎側面や屋上部分のエッジが鮮明に抽出されていることがわかる。しかし、両者には鉛直方向の標高値に差異がみられ、特に、校舎屋上部分において 3 m 程度の差が生じている。紙面の都合上、掲載を割愛したが、他のケースは Case A1+A5 と概ね一致することを確認した。したがって、3Dモデルの鉛直方向の再現性が低かった Case A2 では、鉛直距離精度も低く、鉛直方向に校舎が引き延ばされたと判断できる。

以上より、鉛直下向き撮影画像に斜め撮影画像を加えることで、3Dモデルの再現性が向上するだけでなく、構造物のエッジについても、鮮明に抽出できることがわかった。また、3Dモデル内の GCP の RMSE が小さくても、構造物の再現性が低い場合は、構造物の標高値の精度が低くなる可能性が示唆された。

4. おわりに

本研究では、UAV-SfM/MVS 測量によって作成した 3D

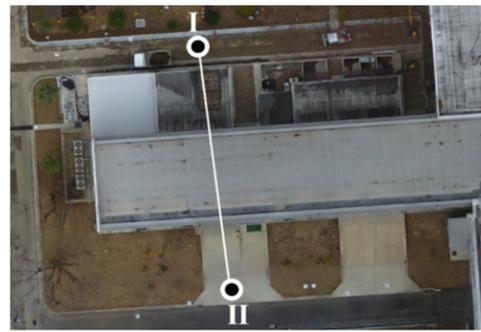


図-4 断面図の抽出箇所

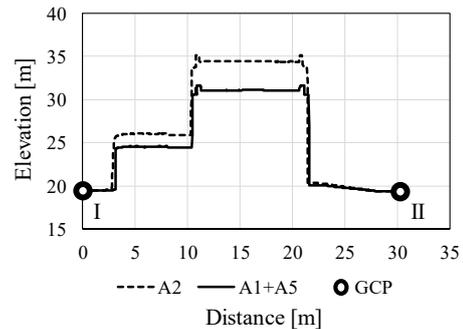


図-5 測線 I-II の断面図

について、GCPの精度、構造物の視覚的な再現性、モデル内の距離精度、エッジの再現性などの複数の観点から検証を行い、建物の再現性および計測精度を高めるための撮影条件について総合的に評価した。その結果、UAV-SfM/MVS測量によって構造物の3Dモデルを作成する際には、オーバーラップ率 90%、サイドラップ率 90%において、鉛直下向きのみならず斜め撮影を行い、これらの画像を用いることで、再現性の高い 3Dモデルが得られることを明らかにした。

謝辞：本研究の一部は、JSPS 科研費（若手研究・18K13264）および下中科学研究助成金の助成を受けたことをここに付記し、感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 大石 哲, 白谷栄作, 桐 博英, 高橋順二, 水上幸治, 村木広和 : UAVを使った低空画像解析による海岸堤防の劣化状態の検出, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. 71, No. 2, pp. 1_1717-1_1722, 2015.
- 3) 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), <http://www.gsi.go.jp/common/000186712.pdf>, (2018-6-1).
- 4) 山川奈巳, 菊 雅美 : UAV-SfM 測量による建物の 3次元モデル化に関する一考察, 平成 28 年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集, IV-063, pp. 437-438, 2017.