

RTK 測位付き UAV 空撮に基づく SfM ～山口町船坂地区における実証実験～

山口大学 ○浦川貴季, 高田雅也
GEO ソリューションズ 加賀谷仁秀, 春名正基
山口大学 神野有生

1. はじめに

UAV写真測量では、標定点（地上に設置して精密に測量し、カメラパラメータ推定の補助や点群のジオリファレンスに用いる点）の必要性が、現地作業において労力・コストがかさむ要因であった。一方で近年、撮影位置のRTK-GNSS測位が可能なUAVの低廉化が進んでいる。このようなUAVを用いることで、対象領域と撮影・解析の工夫次第では、標定点を全く用いずに所要の精度を得られる可能性がある。標定点を用いないUAV写真測量の適用範囲を明らかにするためには、特に難しい条件下での実証データの蓄積が必要である。

そこで本研究では、撮影高度に対して長く、誤差が蓄積しやすいと予想される領域を対象に、SfMの精度検証実験によって、標定点の省略可能性とそのため必要な撮影・解析の工夫について検討した。

2. 実験・解析方法

2.1 対象領域と検証点

実験対象領域は、兵庫県西宮市山口町の船坂地区に位置する、延長約 400 m×幅約 5 m の道路沿いの領域である（図-1）。この道路区間には勾配があり、区間 1 の東端と区間 3 の北端では前者が約 27 m 高くなっている。対象領域中の 21 地点に対空標識を設置し、対空標識の中心を検証点とした。

検証点の絶対座標の測量にあたっては、まず電子基準点を既知点とする GNSS 測量（干渉測位方式）により、基準点を 3 点新設した（新点の標準偏差は最大で MB 0.005 m, ML 0.005 m, MH 0.009 m）。さらに、当該エリアを網羅できるようにトータルステーションによる結合多角方式にて 2 次基準点を 4 点設置（標準偏差は最大で水平 0.002 m, 標高 0.003 m）した後、各基準点より放射観測法によって実施した。

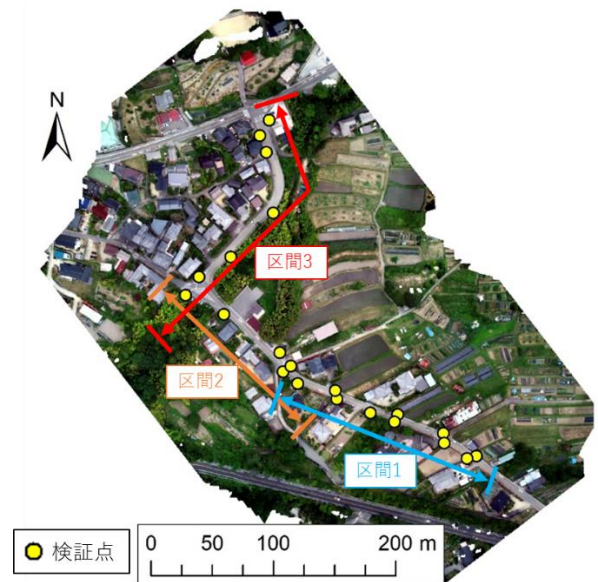


図-1 対象とした道路と検証点位置

2.2 UAV による空撮

UAV には、DJI 社の Phantom 4 RTK（以降 P4RTK と呼ぶ）を使用した。P4RTK は撮影位置の RTK-GNSS 測位が可能であり、公称測位精度は垂直方向に 1.5 cm+1 ppm (RMS)、水平方向に 1 cm+1 ppm (RMS) である。撮影の諸条件や飛行経路は全て付属のアプリケーションである GS RTK を用いて設定した。また、歪み補正機能は OFF とした。

空撮は、2019 年 6 月 26 日に、図-1 に定義する各区間において図-2, 3, 4 に例示する経路で行った。各区間について、撮影高度（離陸地点からの高度）50 m・100 m, 天底角（鉛直下向きからの傾き）0°・10° の計 4 通りのフライトを実施した（計 12 フライト）。各フライトのオーバーラップ率（重複率）は、コースの前後方向に 90%, 左右方向に 80% と設定した。表-1 に撮影高度・天底角別の 3 区間合計撮影枚数を示す。また、区間 2 では対地高度を一定（50 m）に保つフライトも試行した。

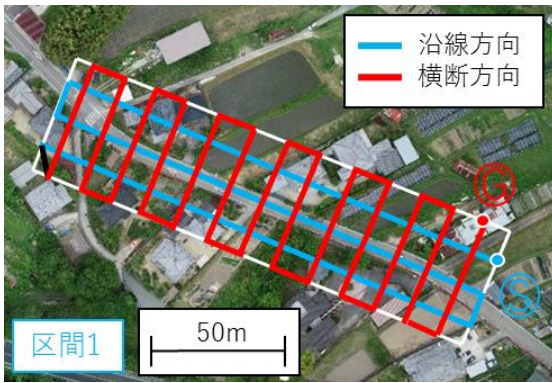


図-2 飛行経路の例（区間1；撮影高度 50m；天底角 0° ）。以下，Ⓢは撮影開始地点，ⓔは撮影終了地点を示す。

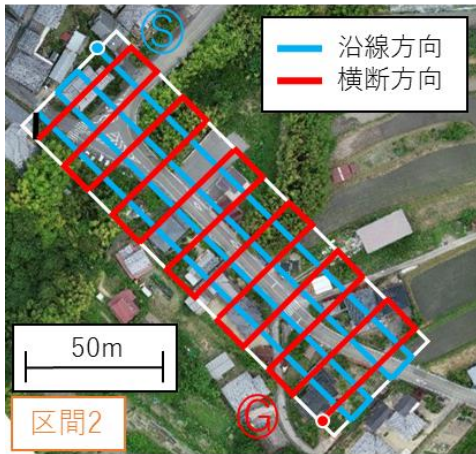


図-3 飛行経路の例（区間2；撮影高度 50m；天底角 0° ）

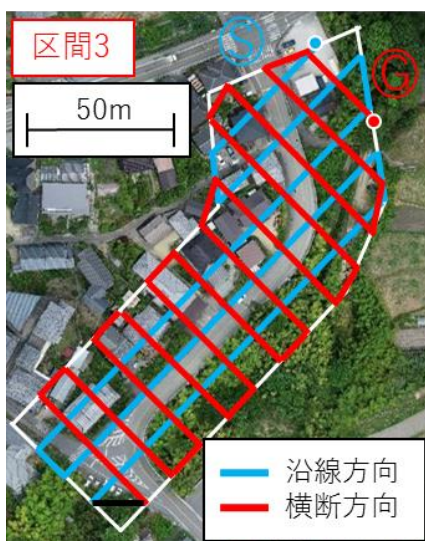


図-4 飛行経路の例（区間3；撮影高度 50m；天底角 0° ）

表-1 撮影高度・天底角別の3区間合計撮影枚数

撮影高度 [m]	天底角 [°]	枚数	沿線方向飛行中の撮影枚数	横断方向飛行中の撮影枚数
50	0	895	400	495
50	10	1038	438	600
100	0	342	160	182
100	10	461	195	266

画像のサイズは 5472×3648 画素，画角は約 84° であり，対地高度 100 m における地上画素寸法は 0.027 m である。

2.3 SfM 解析

複数のフライトを組み合わせ、表-2 に示す様々な画像セットを用意し、それぞれについて SfM 解析を行った。以下に、全画像セットで共通する解析手順を示す。SfM 解析には Agisoft Metashape Professional ver 1.5.2~1.5.4 を用いた。

1. 特徴点の検出，特徴量の計算，画像間での特徴点の対応付け。
2. カメラパラメータの推定とタイポイント（疎な点群）の生成。
 - 各画像の撮影位置の絶対座標（緯度・経度・楕円体高）を用いた。
 - SfM には原寸サイズの画像を入力した。
 - カメラモデルとして Brown のモデルを用いた。考慮した内部パラメータは $f, cx, cy, k1, k2, k3, k4, p1, p2, p3, p4$ である。
 - 内部パラメータの推定は、画像ごとに行う、すなわち画像ごとにカメラが異なると仮定する設定とした。
 - 各画像の撮影位置の絶対座標の使用に際しては、P4RTK が各画像に埋め込んだ、RTK-GNSS 測位の誤差の標準偏差に基づく重みを与えた。同じく画像に埋め込まれたカメラの向き (pitch, roll, yaw) 情報は、精度の観点から使用していない。
3. バンドル調整によるカメラパラメータの最適化。
4. 三角測量による検証点の絶対座標の推定。
 - あらかじめ自動検出した、各画像上での各対空標識の画素座標を用いた。

5. 検証点誤差（三角測量による推定位置と地上測量による実測位置との距離）の計算.

ただし、手順 4 で言及した対空標識の自動検出においては、得られうる最良のカメラパラメータとして、全画像を用いて、全対空標識を標定点とした SfM 解析に基づくカメラパラメータを用いた。これは、検証点誤差を、カメラパラメータの推定誤差 (SfM 自体の誤差) の指標として解釈できるようにするためである。より具体的には、自動検出の失敗によって三角測量に用いられる画像数が不十分となり、検証点誤差に大きな三角測量由来の誤差が混入することを防ぐためである。上記のカメラパラメータを用いても、同一の対空標識が画像間で異なるものと検出されることがあり、その場合には同じ絶対座標をもつ別の検証点として扱った。後出の表-2 の「検証点数」列の値が対空標識の総数 21 を上回ることがあるのは、このためである。

3. 解析結果

表-2 に画像セット別の SfM 解析結果の概要を示す。「画像セット」列において、「下」は鉛直下向き撮影の画像、「斜」は天底角 10° の斜め撮影画像を示している。「沿線」は図-2, 3, 4 に示す沿線方向経路上で撮影された画像を、「横断」は横断方向経路上で撮影された画像を表す。「沿線 1」は「沿線」画像から中央付近 1 コース分のみを抽出した画像を表す。表中の「撮影位置に関する残差 RMS」列は、SfM で推定した撮影位置と RTK 測位による撮影位置との距離の RMS である。また「検出画像数」は、当該対空標識の自動検出に成功し、検証点の三角測量に用いられた画像数を示している。検出画像数の小さい検証点は三角測量に伴う誤差が大きくなるため、表-2 では検出画像数が一定数以上の検証点に絞って、検証点誤差の RMS を示している。検出画像数が 4 枚以上の検証点誤差については、xyz 成分の 3 軸合成だけでなく、東西方向、南北方向、鉛直方向も示している。

表-2 より、例えば以下のことが観察できる。

A) ケース①と③、ケース②と④を比較すると、鉛

直下向きの撮影よりも、天底角 10° で多方向の斜め撮影の方が高精度を与えている。

- B) 「沿線」画像のみを用いたケース⑬⑭⑮では、鉛直方向のみならず水平方向にも大きな誤差が生じている。
- C) ケース⑪⑫⑬およびケース⑭⑮⑯を比較すると、「沿線」よりも「横断」の斜め撮影画像の方が精度向上に貢献している。
- D) ケース⑧と⑪、ケース⑨と⑬を比較すると、複数高度での撮影の方が高精度を与えている。
- E) ケース⑥と⑧、ケース⑦と⑨を比較すると、複数高度のうち低高度側で斜め撮影を行う方が高精度となっている。

図-5 に、最も高精度を与えたケース⑧について、全 45 検証点（「検出画像数」で絞り込んでいない）に関する楕円体高の実測値と推定値を例示する。これらの検証点に関して、実測楕円体高の標準偏差が 7.953 m であるのに対し、楕円体高の推定誤差の RMS は 0.032 m と、その 250 分の 1 未満であった。

本実験の結果より、対象領域が撮影高度に対して長大で誤差が大きくなりやすい状況でも、斜め撮影の方向や高度などの工夫により、標定点を用いずに効率的かつ高精度な SfM が可能であることが示唆された。講演会では、さらに考察を加えて発表する予定である。

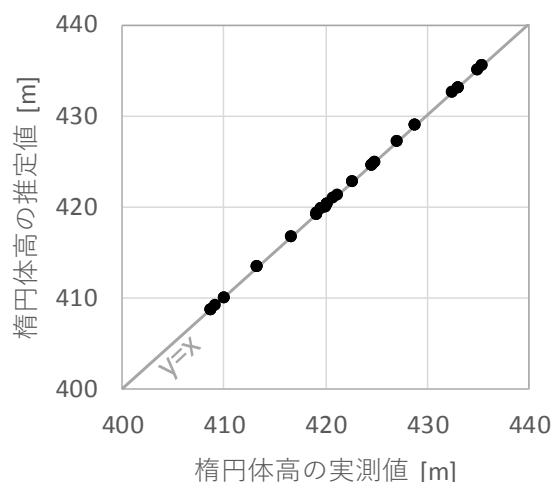


図-5 ケース⑧の検証点における楕円体高の実測値と推定値

表-2 画像セット別の SfM 解析結果の概要.

ケース番号	画像セット	画像枚数	ポイント数 [$\times 10^6$]	再投影誤差 RMS [pix]	撮影位置に関する 残差RMS [m]	検証点誤差の統計量									
						検出画像数 3以上		検出画像数4以上						検出画像数 10以上	
						RMS [m]	3軸合成	RMS [m]			3軸合成			RMS [m]	3軸合成
						東西成分	南北成分	鉛直成分	東西成分	南北成分	鉛直成分	東西成分	南北成分	鉛直成分	RMS [m]
①	50m下	895	2.38	0.836	0.014	0.360	0.033	0.074	0.349	0.358	0.358	0.358			
②	100m下	342	1.07	0.831	0.007	0.627	0.034	0.059	0.621	0.625	0.622	0.622			
③	50m斜	1038	2.89	0.813	0.017	0.042	0.012	0.014	0.036	0.040	0.041	0.041			
④	100m斜	461	1.56	0.836	0.013	0.109	0.046	0.067	0.071	0.107	0.103	0.103			
⑤	50m下+100m下	1237	3.41	0.827	0.012	0.140	0.044	0.029	0.129	0.139	0.136	0.136			
⑥	50m下+100m斜	1356	3.92	0.833	0.013	0.088	0.038	0.020	0.077	0.088	0.080	0.080			
⑦	50m下沿線+100m斜	861	2.64	0.818	0.013	0.103	0.057	0.037	0.075	0.101	0.105	0.105			
⑧	50m斜+100m下	1380	3.93	0.806	0.015	0.036	0.011	0.013	0.029	0.034	0.034	0.034			
⑨	50m斜沿線+100m下	780	2.31	0.784	0.009	0.050	0.006	0.017	0.048	0.051	0.052	0.052			
⑩	100m下+100m斜	803	2.59	0.852	0.012	0.089	0.036	0.047	0.063	0.087	0.093	0.093			
⑪	50m下+50m斜	1933	5.21	0.835	0.016	0.065	0.012	0.023	0.056	0.062	0.064	0.064			
⑫	50m下+50m斜横断	1495	4.00	0.834	0.014	0.059	0.015	0.014	0.054	0.058	0.057	0.057			
⑬	50m下+50m斜沿線	1333	3.64	0.846	0.015	0.215	0.065	0.066	0.197	0.218	0.215	0.215			
⑭	50m下沿線+50m斜	1438	3.98	0.832	0.017	0.061	0.012	0.023	0.055	0.060	0.063	0.063			
⑮	50m下沿線+50m斜横断	1000	2.71	0.806	0.013	0.188	0.065	0.065	0.169	0.193	0.190	0.190			
⑯	50m下沿線+50m斜沿線	838	2.41	0.830	0.017	0.533	0.181	0.154	0.485	0.540	0.518	0.518			
⑰	50m下沿線+50m斜沿線1	516	1.45	0.799	0.014	0.239	0.148	0.132	0.118	0.231	0.282	0.282			
⑱	50m下沿線**+50m斜沿線1	534	1.47	0.788	0.016	0.201	0.132	0.091	0.128	0.205	0.226	0.226			

* 区間2では対地高度一定で撮影