

斜め往復 UAV 撮影に基づく標定点レス SfM における撮影方法・解析設定の影響

山口大学 ○神野有生

株式会社フジタ 松岡祐仁

山口大学 大津勇貴・杉本一生・高田雅也

1. はじめに

現在の UAV 写真測量では一般に、MVS に必要なカメラの外部・内部パラメータのすべてを、SfM を用いて推定する。この場合に標定点ゼロを実現するには、各画像の投影中心を RTK-GNSS 等で高精度に測るだけでなく、内部パラメータの推定に配慮した撮影が必要である。撮影方法の確立を目指して国内外で多くの実験が行われ、例えば浦川ら (2019)は、カメラを鉛直下向きから前に傾けた (pitch をつけた) 斜め往復撮影や、複数高度撮影の有効性を見出した。

ただし従来の実験では、特定の撮影方法 (で得た画像セット) の良否を、単一の解析設定 (デフォルト設定等) で実施した SfM の精度 (検証点誤差統計量) により評価することが多い。SfM の精度は特徴点の抽出等の諸過程に関する解析設定に依存し、最適な設定は被写体を含む諸条件つまり画像セットに依存するため、これでは適切に評価できない恐れがある。一方、一般的な実用場面では最適な解析設定は不明 (検証点を使った解析設定の最適化は困難) だから、最適な解析設定における精度を撮影方法の評価基準とすることも実用に沿わない。

そこで高田ら (2020)は、幅広い解析設定で高精度を与える撮影方法を探す実験を行った。具体的には、天底角 (pitch)が 0, 5, 10, 30° の斜め往復撮影で得た各画像セットについて、主要な設定項目を広く変化させた 500 超の解析設定で SfM を実施し、高精度を与えた解析設定の割合や全解析設定に関する検証点誤差の統計量を評価した。結果として、天底角 30° の画像セットが優れていたと報告している。標定点レス SfM を可能とする撮影方法の確立のためには、このような実験例の蓄積も有効と考えられる。

本発表では高田ら (2020)を踏襲し、天底角や解析設定の数をさらに拡充して、新たに 2 サイトで実施した実験について報告する。

2. 実験方法

2 サイト A (君津 DDFP), B (造成地) で、図 1 に例示する斜め往復撮影を、表 1 に示す撮影条件の組み合わせ (各サイト 10 通り = 10 画像セット) で実施した。B の詳細は松岡ら (2020)を参照。検証点の楕円体高の標準偏差は A: 0.95 m, B: 0.34 m であり、主な被覆は A: 短草、B: 裸地であった。撮影時の風速は両サイトとも 0 - 2.2 m/s であった。撮影には DJI Phantom 4 RTK を、フォーカス無限遠・歪み補正なし・基地局ありで用いた。検証点はエアロセンス AEROBO marker とし、スタティック測位を行った。

各画像セットについて、Agisoft Metashape 1.5.5 を用いて表 2 に示す計 2250 通りの設定で SfM を行い、検証点誤差 RMS (SfM 後の三角測量による推定位置とスタティック測位で得た位置との距離の、全ての検証点に関する RMS) 等の、多試行に関する統計量を評価した。ここで、画像に埋め込まれた投影中心の測位結果をバンドル調整に、製造時のカメラ校正結果を内部パラメータの初期値に利用した。カメラモデルについては、放射・接線方向の高次の歪みや画素の歪みに関するパラメータの有無により、表 3 の 5 通りを扱った。各試行ではカメラモデルとそのパラメータ (内部パラメータ) を全画像で共有した。

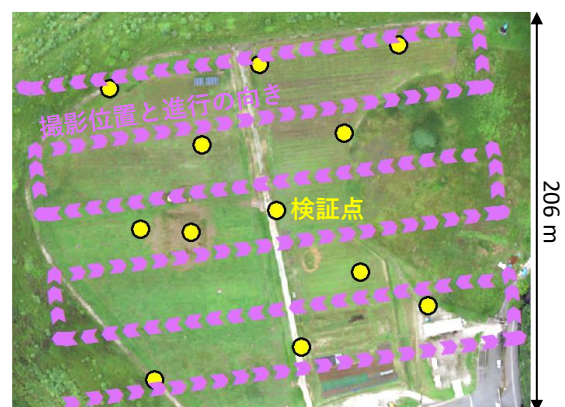


図 1. サイト A における天底角 20° の撮影

表 1. 撮影条件 (計 10 通り)

項目	サイト A	サイト B
天底角 [°]	0-45 (5 刻み)	0-40 (10 刻み)
対地高度 [m]	55 (GSD 0.015)	73 (GSD 0.020)
重複率 [%]	80×60	80×60, 80×75

表 2. SfM の解析設定 (計 2250 通り)

設定項目 (Metashape での呼称)	設定値	
特徴点	i. 入力画像のサイズ (アラインメント精度)	縦横 1/4, 縦横 1/2, 原寸
	ii. 画像あたり上限特徴点数 (キーポイント制限)	1k (= 1000), 3k, 9k, 27k, 50k, ∞
バンドル調整	iii. 投影中心測位精度 (カメラ精度 [m]) に乗じる倍率	0.25, 0.5, 1, 2, 4
	iv. タイポイント投影位置精度 (タイポイント精度 [pix]) に乗じる倍率	0.25, 0.5, 1, 2, 4
	v. カメラモデル (考慮する内部パラメータの組)	5 通り

表 3. パラメータの有無によるカメラモデルの定義

番号	cx, cy, k1 - k3, p1, p2	k4	p3, p4	b1, b2
①	有 (SfM により推定)	有	有	有
②		有	有	無
③		有	無	無
④		無	有	無
⑤		無	無	無

3. サイト A に関する結果と考察

- 図 2 に、カメラモデルが②の試行群 (画像セット = 天底角ごとに各 450 試行) について、検証点誤差 RMS の統計量を例示する。次のことが観察できる。
- (ア) 天底角 10° 以下では 15° 以上に比べ、四分位幅 (75%値と 25%値の差) が、すなわち解析設定による精度のばらつきが顕著に大きい。
 - (イ) 天底角 20-35° では、四分位幅と最大値がともに小さく、解析設定によらず比較的高い精度が得られている。
 - (ウ) 天底角 35° 以上では、最小・最大値と四分位数全てが単調増加した (描画範囲外のものを含め)。

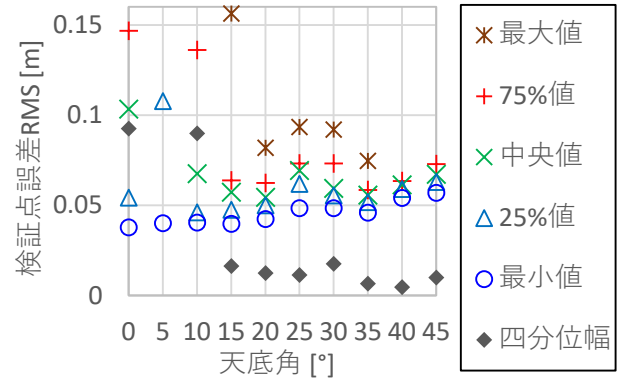


図 2. カメラモデル②を用いた天底角別各 450 試行に関する検証点誤差 RMS の統計量 (A)。一部は値が大きく、描画範囲外にある。

表 4. 天底角別の各 2250 試行に関する集計 (A)

天底角 [°]	f の四分位幅 [pix]	k1 の四分位幅 [×1000]	検証点誤差 RMS の統計量 [m]			鉛直平均誤差率の中央値 [%]	姿勢推定失敗率 [%]
			中央値	四分位幅	最大値		
0	16.78	4.36	0.125	0.217	2.808	95.0	0.097
5	43.38	5.24	0.439	0.293	1.378	99.5	0.000
10	10.10	4.25	0.188	0.136	0.989	97.4	0.000
15	5.62	4.14	0.093	0.067	0.451	88.2	0.000
20	2.86	4.05	0.071	0.034	0.269	77.8	0.013
25	1.88	3.81	0.085	0.027	0.365	87.3	0.036
30	1.49	3.83	0.074	0.025	0.204	86.6	0.065
35	1.58	4.16	0.063	0.019	0.257	81.7	0.280
40	1.28	4.23	0.066	0.013	2.168	80.4	0.335
45	1.45	4.99	0.073	0.020	> 10 ¹²	81.9	2.265

表 4 には、全カメラモデルの試行に関する統計量を示すが、同様の傾向が確認される。鉛直平均誤差率が大きいと、鉛直方向のバイアスが誤差の主要な成分である。ここに鉛直平均誤差率とは、検証点鉛直誤差平均 (鉛直座標の推定値とスタティック測位値との差の、全検証点に関する平均) の絶対値と検証点誤差 RMS の比である。加えて、天底角 35° 以下の全 18000 試行について、検証点鉛直誤差平均と f の推定値は強い直線関係 ($R^2 = 0.9961$, 残差 RMS = 0.016 m) にあったことから、天底角 35° 以下では **f が誤差の支配要因** と言える。さらに、天底角 5° から 30° にかけて f の四分位幅が単調減少していることから、上記 (ア) (イ) の主な原因は、天底角の増加に伴う f の推定の安定である。これは、高田ら (2020), 松岡ら (2020) の報告や、f がカメラの向きの一様な画像群では不定となる事実とも整合する。

表 5. 同／異コース間のマッチング状況の比較 (A)

集計した画像の組	天底角 [°]	異コース画像とのマッチングが占める割合 [%]		幾何学的検証を通過したマッチングの割合 [%]	
		幾何学的検証前	幾何学的検証後	同コース画像とのマッチング	異コース画像とのマッチング
		例1	20	28.7	29.2
	40	10.5	7.1	88.1	57.4
	45	7.4	4.8	85.5	53.8
例2	20	24.2	21.0	91.5	75.9
	40	7.1	5.9	91.8	75.9
	45	3.6	2.8	89.7	70.0

表 4 で、上記 (ウ) との関連が推測されることとして、姿勢推定失敗率 (アラインされなかった画像の割合) と放射方向歪みのパラメータ $k1$ の四分位幅が、天底角 25° 以上では単調増加した。また全画像セットの計 22500 試行中、検証点誤差 RMS の上位 15 試行 (> 3 m) は、全て天底角 45° の画像セットのものであり、その過半数では 1 コースの全画像 (他の試行では一部の画像) に、姿勢推定の失敗または、推定されたカメラの向き of 明らかな異常が見られた。向きの異常な画像を数枚精査したところ、異コース画像との有効な (幾何学的検証を通過し姿勢推定に使われた) マッチングが皆無であった。そこで表 5 に示すように、天底角 $20, 40, 45^\circ$ の画像セットから写った領域の似た画像を 2 組選び、解析設定が同じ試行間で比較したところ、天底角の増加に伴って、異コース画像とのマッチングの割合が幾何学的検証前 (局所特徴による対応付け) の段階で減り、さらに幾何学的検証の通過割合が減ることもあいまって、幾何学的検証後 (有効なマッチング) ではより顕著に減っていた。異コース画像との有効なマッチングのない画像群は、向きが一様な単コース撮影で得た画像群同然であることから、 f や $k1$ 等に加え roll の推定も困難となる。以上より、(ウ) の機構として、天底角の増加に伴う隣接コース画像間のマッチングの減少によるカメラパラメータ推定の困難化が想定される。隣接コースの画像間では、カメラの向きに天底角の倍の差がつき、被写体が平面の場合ですら局所特徴に相応の差異が生じることに注意を要する。

4. サイト B に関する結果と考察

表 6 に、サイト B について表 4 同様の表を示す。ただし、姿勢推定の失敗が多く 1 検証点も三角測量できなかった 1 試行 (天底角 40°) を集計から除外している。両サイドラップとも、天底角 $10-20^\circ$ では A 同様に、天底角増加に伴う f の安定化とそれによる鉛直誤差の低減が認められる。ただし、A では天底角 30° で f の四分位幅が極小となったところ、B のサイドラップ 60% では天底角 20° で極小となり、その極小値や鉛直平均誤差率は A のいずれの天底角の場合よりも小さい。AB 間でタイポイントの統計量 (画像あたりタイポイント数、タイポイントあたりマッチング数、再投影誤差 RMS 等) に顕著な差異はなく、コースの数・長さ等の影響が考えられる。

また両サイドラップとも、天底角が 30° から 40° に増えるとき、A (表 4) と同様に姿勢推定失敗率、 $k1$ の四分位幅、検証点誤差 RMS の最大値が増えている。一部の試行・画像の精査により、天底角増加に伴う異コース画像とのマッチングの減少やカメラの向きの異常が認められたことから、前章で議論した A と同様の機構が想定される。なお、表 4・表 6 で見られる極めて大きな検証点誤差 RMS の最大値は、推定された向きが異常な画像に起因する。それらの画像への検証点の投影は再投影誤差が大きいため、SfM 後に検証点を検出する実用場面では対処が可能であるが、本研究では試行間の平等のため、事前に検出した検証点の投影を全試行で共有し、各試行では再投影誤差等で選別せず三角測量に用いている。

表 7 にはカメラモデル別に、検証点誤差 RMS が 0.04 m 以下 (投影中心と検証点の GNSS 測位の誤差

表 6. 画像セット別各 2250 試行に関する集計 (B)

サイドラップ [%]	天底角 [°]	f の四分位幅 [pix]	k1 の四分位幅 [$\times 1000$]	検証点誤差 RMS の統計量 [m]			鉛直平均誤差率の中央値 [%]	姿勢推定失敗率 [%]
				中央値	四分位幅	最大値		
60	0	25.92	5.51	0.300	0.361	$> 10^3$	99.7	0.000
	10	2.49	4.16	0.062	0.043	0.979	89.0	0.000
	20	1.21	4.01	0.035	0.007	0.127	31.0	0.000
	30	1.24	4.10	0.027	0.007	0.300	29.8	0.000
	40	1.13	4.53	0.027	0.017	$> 10^2$	36.2	3.195
75	0	42.72	6.94	0.328	0.542	$> 10^3$	99.5	1.219
	10	2.18	4.09	0.060	0.034	0.256	87.7	0.037
	20	1.34	4.30	0.035	0.008	0.071	58.3	0.083
	30	1.16	4.18	0.032	0.004	$> 10^1$	41.5	0.855
	40	1.39	4.58	0.042	0.007	$> 10^3$	68.7	3.989

表 7. 画像セット・カメラモデル別の各 450 試行に関する、検証点誤差 RMS が 0.04 m 以下の解析設定の割合 [%] (B)

重複率 [%]	天底角 [°]	カメラモデル				
		①	②	③	④	⑤
80×60	0	4.4	6.2	2.9	3.6	5.1
	10	18.4	27.8	19.1	7.3	4.4
	20	76.7	86.9	81.1	79.3	74.2
	30	66.2	96.9	95.8	95.6	95.1
	40	92.4	69.6	65.3	70.9	66.4
80×75	0	6.9	9.8	0.4	9.6	0.2
	10	35.6	16.2	0.4	7.1	1.1
	20	78.0	75.3	72.7	71.1	66.7
	30	99.1	99.6	98.4	99.8	97.3
	40	82.2	28.2	17.6	19.3	17.1

により生じ得る見かけの誤差レベル)の「高精度」となった解析設定の割合を示す。カメラモデル①でサイドラップ 60%の試行群を除き、高精度を与えた解析設定の割合は、天底角 30° が最も大きく(>95%)、20, 40° がそれに続いた。両サイドラップについて、**天底角 30° は、幅広い解析設定で高精度を与えた**と言える。カメラモデル①・サイドラップ 60%の試行

群の中で高精度が得られなかったのは、入力画像のサイズが縦横 1/4 または画像あたり上限特徴点数が 1000 の試行群に限られていた (表 8)。

5. まとめ

1 方向斜め往復 UAV 撮影と投影中心の RTK-GNSS 測位に基づく標定点を用いない SfM の精度を、20 の画像セット×2250 組の解析設定で調べた。解析設定によらず高精度を得やすい天底角は、画像セットによるが 20 - 35° であり、天底角が過小だと f の推定に、過大だと隣接コース画像とのマッチングに問題が生じた。その他、文中の太字部分を参照されたい。

参考文献

- [1] 浦川貴季ほか, 日本写真測量学会 2019 年度秋季学術講演会, 2019.
- [2] 高田雅也ほか, 日本写真測量学会令和 2 年度年次学術講演会発表論文集, 2020.
- [3] 松岡祐仁ほか, JCMA 令和 2 年度建設施工と建設機械シンポジウム, 2020.

表 8. 重複率 80×60[%]・天底角 30° の画像セットに関するカメラモデル①の各試行の検証点誤差 RMS [m] (B)

画像あたり上限特徴点数 (キーポイント制限)	入力画像のサイズ (アラインメント精度)														
	縦横各 1/4 (低)					縦横各 1/2 (中)					原寸 (高)				
	0.25	0.5	1	2	4	0.25	0.5	1	2	4	0.25	0.5	1	2	4
1k	0.113	0.121	0.120	0.099	0.132	0.043	0.043	0.041	0.046	0.051	0.029	0.028	0.026	0.026	0.026
	0.122	0.110	0.095	0.113	0.142	0.041	0.041	0.042	0.046	0.045	0.029	0.029	0.027	0.027	0.026
	0.107	0.117	0.113	0.116	0.128	0.044	0.042	0.037	0.043	0.040	0.029	0.029	0.028	0.028	0.026
	0.115	0.106	0.123	0.123	0.124	0.041	0.042	0.038	0.040	0.043	0.029	0.029	0.029	0.029	0.028
	0.113	0.110	0.120	0.116	0.124	0.041	0.040	0.037	0.039	0.043	0.029	0.029	0.029	0.029	0.029
3k	0.035	0.036	0.040	0.050	0.041	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.024	0.024	0.025	0.024	0.024
	0.036	0.042	0.044	0.037	0.048	0.025	0.025	0.024	0.025	0.024	0.025	0.024	0.024	0.024	0.024
	0.042	0.039	0.039	0.033	0.034	0.025	0.025	0.025	0.025	0.024	0.025	0.025	0.024	0.024	0.024
	0.033	0.038	0.033	0.040	0.034	0.025	0.025	0.025	0.025	0.024	0.025	0.025	0.025	0.024	0.024
	0.032	0.033	0.034	0.033	0.032	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.026	0.025	0.025	0.024
9k	0.053	0.080	0.125	0.195	0.284	0.025	0.025	0.025	0.024	0.023	0.025	0.024	0.025	0.028	0.034
	0.087	0.061	0.070	0.202	0.263	0.026	0.024	0.025	0.024	0.024	0.026	0.025	0.024	0.025	0.028
	0.129	0.079	0.124	0.116	0.110	0.025	0.025	0.025	0.024	0.024	0.027	0.026	0.025	0.024	0.025
	0.066	0.122	0.056	0.070	0.074	0.025	0.025	0.025	0.024	0.024	0.027	0.027	0.026	0.025	0.025
	0.092	0.061	0.148	0.090	0.110	0.025	0.025	0.025	0.024	0.024	0.028	0.027	0.027	0.027	0.025
27k	0.067	0.088	0.111	0.187	0.265	0.026	0.026	0.025	0.026	0.028	0.028	0.027	0.028	0.031	0.034
	0.058	0.087	0.166	0.146	0.262	0.026	0.026	0.025	0.025	0.027	0.029	0.027	0.027	0.028	0.031
	0.070	0.071	0.079	0.091	0.124	0.026	0.025	0.026	0.025	0.025	0.031	0.030	0.027	0.027	0.028
	0.075	0.071	0.070	0.066	0.150	0.026	0.026	0.025	0.025	0.025	0.032	0.031	0.029	0.028	0.027
	0.057	0.057	0.059	0.065	0.065	0.026	0.026	0.026	0.026	0.025	0.033	0.032	0.032	0.030	0.027
50k	0.067	0.112	0.133	0.246	0.280	0.025	0.025	0.025	0.026	0.028	0.027	0.027	0.026	0.027	0.028
	0.057	0.053	0.078	0.126	0.277	0.026	0.026	0.025	0.025	0.026	0.029	0.027	0.026	0.027	0.027
	0.061	0.056	0.080	0.122	0.153	0.026	0.025	0.025	0.025	0.025	0.031	0.028	0.027	0.026	0.027
	0.059	0.061	0.125	0.059	0.136	0.026	0.026	0.025	0.025	0.025	0.032	0.031	0.028	0.027	0.027
	0.084	0.059	0.062	0.057	0.200	0.026	0.026	0.026	0.025	0.025	0.032	0.031	0.030	0.028	0.027
無制限	0.100	0.071	0.111	0.124	0.300	0.026	0.025	0.025	0.026	0.029	0.029	0.027	0.028	0.027	0.028
	0.061	0.066	0.114	0.164	0.258	0.025	0.025	0.025	0.025	0.026	0.031	0.029	0.027	0.027	0.027
	0.091	0.088	0.107	0.069	0.243	0.026	0.025	0.025	0.025	0.025	0.033	0.030	0.028	0.027	0.027
	0.111	0.065	0.061	0.074	0.242	0.026	0.026	0.025	0.025	0.025	0.034	0.032	0.029	0.028	0.027
	0.110	0.061	0.069	0.058	0.067	0.026	0.026	0.026	0.025	0.025	0.034	0.032	0.032	0.030	0.028

↑ 緑塗りは 0.04 m 以下の試行を表す

タインポイント投影位置
精度に乗じる倍率
0.3
0.5
1
2
4

0.25 0.5 1 2 4
投影中心測位精度に乗じる倍率