

RTK 測位型 UAV 撮影による標定点レス SfM における撮影方法・ 解析設定の影響: 道路沿いの現地実験データを用いた検討例

Effect of photography method and analysis settings in SfM without GCP by using RTK-UAV: investigation using along-road experiment data

高田 雅也*・神野 有生*・加賀谷 仁秀**・春名 正基**

*山口大学大学院

**株式会社 GEO ソリューションズ

Abstract: UAV (Unmanned aerial vehicle)-based photogrammetry without GCP (Ground control point), which combines SfM (Structure from Motion) and RTK-UAV (i.e., UAV capable of RTK-GNSS positioning of shooting position), has been studied around the world in recent years. While some studies show that the photography method and analysis settings have large effects on survey accuracy, there are only a few such studies and it is desirable to accumulate cases. In this study, experimental data simulating 14 types of photography methods, including oblique ones, were analyzed by using Agisoft Metashape with 216 SfM settings. As a result, it was confirmed that the analysis settings in addition to the photography method have complex effects on the accuracy of SfM. In addition, the accuracy did not always improve by adding images, and the analysis settings that can obtain high accuracies differed depending on the photography method.

1. はじめに

近年, SfM (Structure from Motion) ソフトウェアの確立や, 廉価かつ高度な空撮が可能な UAV (Unmanned aerial vehicle) の出現により, SfM を用いた UAV 写真測量は測量方法の1つとして一般的になりつつある. 一方, 高精度な測量を実現するための撮影方法の確立や, コストパフォーマンスの妨げとなる標定点 (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) の省略等の課題があり, 課題解決と事例蓄積のための現地実験が国内外で多数行われている. 例えば Enoc Sanz-Ablanedo, et al. (2020) は, 標定点をジオリファレンスのみに用い, 関心領域に向けてカメラを鉛直下向きから傾ける POI (Point of Interest) 撮影が, 鉛直下向き撮影と比べて高精度を得やすいことを報告している.

また, 標定点を用いない写真測量 (標定点レス UAV 写真測量) 実現のため, 撮影位置の RTK-GNSS 測位が可能な UAV (DJI 社 Phantom 4 RTK (以降 P4RTK)) を用いた実験例も増えている. 浦川ら (2019) は, 道路沿いの細長い領域を対象に, UAV を道路沿線方向に飛行したのち道路横断方向に飛行させて空撮する 2 方向往復撮影や複数高度撮影等の撮影方法の工夫

により, 標定点なしでも高精度な SfM が可能であることを示唆した. Y. Taddia, et al. (2019) は海岸で, 天底角 (鉛直下向きからの傾き) 30° の斜め撮影のみを用いて, 高精度な内部パラメータが得られたことを報告している. M. V. Peppas, et al. (2019) は, 天底角 $15 - 45^\circ$ の斜め撮影画像を混合した場合, 系統的な鉛直誤差が生じたことを報告している. さらに高田ら (2020) は, 多様な撮影方法 (天底角 $5, 10, 30^\circ$ の斜め 1 方向往復撮影) で得た画像データを, Agisoft 社 Metashape を用いた多様な解析設定で解析することで, 撮影方法や解析設定によっては, 標定点レス UAV 写真測量が高精度で可能であることを示した.

このように, 標定点レス UAV 写真測量の実験例は増えつつあるものの, 多数の撮影方法や解析設定を組み合わせた検討は少なく, 浦川ら (2019) を含む多くの研究では解析設定は 1 通りに限定されている. SfM が本質的に被写体依存であることを鑑みると, さらなる事例の蓄積が必要である. そこで本稿は, 浦川ら (2019) で得た現地実験データを用いて, 新たに多様な解析設定で SfM 解析を行った結果を報告する.

2. 方法

2.1. 現地実験サイトと検証点の地上測量

本研究で用いた浦川ら (2019) の現地実験データについて簡単に説明する. 現地実験サイトは図 1 に示すような延長 400 m, 幅 5 m の道路沿いである. 一度の空撮では全体を撮影することが難しいため, 区間 1・区間 2・区間 3 に分割し, それぞれの区間で空撮を行った. 道路には勾配があり, 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. 対空標識 (21 点) は図 1 に示すように配置し, 中心を検証点として GNSS 及びトータルステーションを用いて地上測量した (浦川ら, 2019).

2.2. 撮影

空撮には P4RTK (画角: 84°) を用い, 飛行経路の作成には付属アプリの GS RTK を用いた. 各区間で 2 方向往復撮影 (図 2) を, 2 種類の撮影高度 (発着地点において 50 m, 100 m, 地上画素寸法 0.014 m, 0.027 m) と 2 種類の天底角 (0° , 10°) で行い, 合計 12 回の空撮を行った. なお, 対地高度一定の空撮ではないため, 撮影高度は画像間で異なる. 画像の重複率は, UAV の進行方向に 90%, 隣接コース間に 80% とした. カメラの設定は, 歪み補正機能: OFF, フォーカス: 無限遠, 画像サイズ: 5472×3648 pix とした.

表 1 に撮影高度・天底角別の 3 区間合計画像枚数を示す. なお表 1 における「沿線方向」は, 2 方向往復撮影 (図 2) の前半部, すなわち道路に沿うコースで撮影された画像群を示し, 「横断方向」は後半部, す



図 1 現地実験サイトと検証点の配置

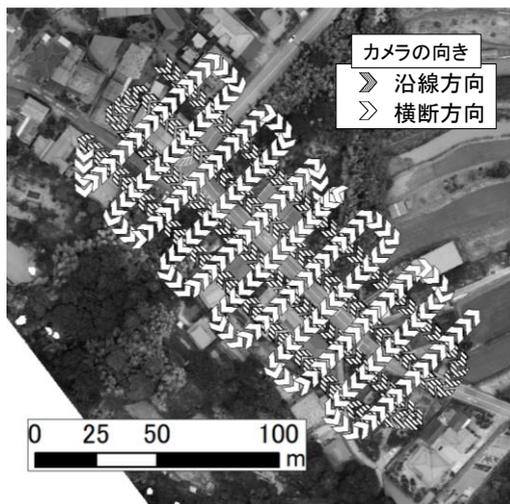


図 2 2 方向往復撮影の飛行経路例 (区間 2; 撮影高度 50 m・天底角 10°)

表 1 撮影高度・天底角別の画像枚数 (3 区間合計)

発着地点の撮影高度 [m]	天底角 [°]	飛行方向	本稿での呼称	画像枚数
50	0		50m下	895
		沿線方向	50m下沿線	400
		横断方向	50m下横断	495
	10		50m斜	1038
		沿線方向	50m斜沿線	438
		横断方向	50m斜横断	600
100	0		100m下	342
	10		100m斜	461

なわち道路を横断するコースで撮影された画像群を示す.

2.3. 解析方法

まず, 様々な撮影方法を模擬するために, 表 2 に示すような 14 種類の画像セットを定義した (3 区間の画像を混合). なお, 「画像セット名」は表 1 に示す「本稿での呼称」を用いており, 2 種類の画像群を組み合わせる際は「+」で示している.

次に, Agisoft 社 Metashape Professional を用いた SfM 解析を行った. はじめに, 全画像を用いて検証点の画素座標を推定した後 (Ver. 1.5.2), 各画像セットについて表 3 に示す各設定項目の設定値の全ての組み合わせで, すなわち 1 画像セットあたり 216 試行の解析を行った (Ver. 1.5.5). その後, 各試行について検証点 RMS 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の距離の全検証点に関する二乗平均の正の平方根) を評価した. 以下に, 各試行の解析手順を示す.

表 2 画像セットと画像枚数

セット番号	画像セット名	画像枚数
①	50m下	895
②	100m下	342
③	50m斜	1038
④	100m斜	461
⑤	50m下+100m下	1237
⑥	50m下+100m斜	1356
⑦	50m下沿線+100m斜	861
⑧	50m斜+100m下	1380
⑨	50m斜沿線+100m下	780
⑩	100m下+100m斜	803
⑪	50m下+50m斜	1933
⑫	50m下+50m斜横断	1495
⑬	50m下+50m斜沿線	1333
⑭	50m下沿線+50m斜	1438

表 3 各画像セットに適用した解析設定

設定項目	設定値	場合の数
「アラインメント精度」 (入力画像の縮小率)	低(0.25倍)/中(0.5倍)/高(1倍)	3
「キーポイント制限」 (1画像あたり 上限特徴点数)	500/1000/2500/5000/7500/10000/ 25000/50000	8
「タイポイント制限」 (1画像あたり 上限タイポイント数)	0	1
「カメラ精度 (m)」	P4RTKが各画像に埋め込んだ RTK-GNSS測位のx, y, z方向の誤差の 標準偏差を基準に, 0.5倍/1倍/2倍	3
「タイポイント精度 (pix)」	1 pixを基準に, 0.5倍/1倍/2倍	3
推定する 内部パラメータの種類	f, cx, cy, k1, k2, k3, k4, p1, p2, p3, p4	1

1. 特徴点の抽出, 特徴量の計算.
2. タイポイントの生成とカメラパラメータの推定 (バンドル調整).
3. 三角測量 (前方交会) による検証点の絶対座標の推定.
4. 検証点 RMS 誤差の計算.

なお, カメラモデルは Metashape のもの (Agisoft LLC, 2019) を用い, そのパラメータ (内部パラメータ) 推定に際しては, 1 試行あたり 1 組を推定した. また手順 4 では, 三角測量に用いられた画像枚数が 4 枚以上の検証点に関する RMS を計算した. 以下は, 表 3 に「」で示した各設定項目 (Ver. 1.5.5 の日本語版 GUI における表記) の機能の詳細である. 各設定項目の機能の多くは, Metashape 以外の SfM ソフトウェアにも実装されているものである.

- 「アラインメント精度」: 入力画像の縮小率を設定する項目. 「最高」「高」「中」「低」「最低」の 5 段階で設定することができ, 「最高」は読み込

んだ画像の縦横をそれぞれ 2 倍に拡大した画像で処理を行い, 「高」は等倍, 「中」は 0.5 倍, 「低」は 0.25 倍, 「最低」は 0.125 倍で処理を行う.

- 「キーポイント制限」: 各画像について検出される特徴点の数の上限を設定する項目. 0 以上の数値によって設定でき, 0 を入力すると無制限となる.
- 「タイポイント制限」: 各画像に投影されるタイポイントの数の上限を設定する項目. 0 以上の数値によって設定でき, 0 を入力すると無制限となる.
- 「カメラ精度 (m)」: カメラパラメータの推定に画像の撮影位置情報をどの程度重視するかを設定する項目. 数値が小さいとより重視される. 本研究では, P4RTK が撮影位置座標を RTK-GNSS 測位する際に各画像に埋め込んだ x, y, z 各方向の誤差の標準偏差を基準として, それらを 0.5 倍, 1 倍, 2 倍とした.
- 「タイポイント精度 (pix)」: カメラパラメータの推定にタイポイントをどの程度重視するかを設定する項目. 数値が小さいとより重視される. 本研究では, 1 pix を基準として, それを 0.5 倍, 1 倍, 2 倍とした.

3. 結果と考察

表 4 に各画像セットについて, 検証点 RMS 誤差が 4 cm 以下となった試行数とその割合を示す. なお, 本研究では検証点 RMS 誤差が 4 cm 以下であるような試行を高精度とみなした. これは, 検証点 RMS 誤差に, SfM 解析以外に起因する誤差 (P4RTK による撮影位置の測位誤差 3 cm 程度や検証点の地上測量誤差 1 cm 程度) が 4 cm 程度含まれ得ると推測されるためである. 表 4 において, 画像セットごとに高精度が得られる解析設定の割合は多様な値をとることから, 撮影方法・解析設定が SfM の精度に大きく影響していることが示された. 特に, 鉛直下向き撮影画像のみを用いた画像セット①・②・⑤については, 高精度を得た解析設定は存在せず, 鉛直下向き撮影のみでは高精度が得られにくいことが示された. また, 画像セット③・④ (斜め撮影画像のみ) と画像セット⑥・⑩・⑪ (斜め撮影画像に同高度または低高度の

表 4 検証点誤差 RMS が 4 cm 以下の試行数とその割合

セット番号	画像セット	画像枚数	検証点誤差 RMS			
			4 cm以下の試行数	4 cm超の試行数	合計試行数	4 cm以下の試行数の割合 [%]
①	50m下	895	0	216	216	0.0
②	100m下	342	0	216	216	0.0
③	50m斜	1038	68	148	216	45.9
④	100m斜	461	33	183	216	18.0
⑤	50m下+100m下	1237	0	216	216	0.0
⑥	50m下+100m斜	1356	0	216	216	0.0
⑦	50m下沿線+100m斜	861	0	216	216	0.0
⑧	100m下+50m斜	1380	81	135	216	60.0
⑨	100m下+50m斜沿線	780	89	127	216	70.1
⑩	100m下+100m斜	803	19	197	216	9.6
⑪	50m下+50m斜	1933	0	216	216	0.0
⑫	50m下+50m斜横断	1495	0	216	216	0.0
⑬	50m下+50m斜沿線	1333	0	216	216	0.0
⑭	50m下沿線+50m斜	1438	0	216	216	0.0

鉛直下向き撮影画像を追加した画像セット)を比較すると、前者と異なり後者では高精度を得た解析設定がほとんどない。したがって、単高度斜め 2 方向往復撮影に、地上画素寸法に関する要求を満たすために同高度または低高度の鉛直下向き撮影を加えると、高精度を得られる解析設定の割合が減少することがあることが示された。

次に、表 5 に画像セット③における解析設定別の検証点 RMS 誤差を示す。表 5 における 3×3 のブロック (「アラインメント精度」, 「キーポイント制限」が同じ 9 試行) には、表 6 に示すように「カメラ精度 (m)」, 「タイポイント精度 (pix)」別の検証点 RMS 誤差 (e_{11}, \dots, e_{33}) が記されている。例えば表 5 の「アラインメント精度」: 高, 「キーポイント制限」: 50,000 のブロックにおいて、タイポイントを相対的に最も重視した場合の検証点 RMS 誤差は $e_{13} = 0.063$ m である。表 5 から、特定の設定値にすることで常に高精度となるような設定項目はないため、複数の設定項目が複合的に精度に影響しているといえる。また、各ブロックの対角成分 e_{11}, e_{22}, e_{33} は、「カメラ精度 (m)」と「タイポイント精度 (pix)」の比が等しいが、 e_{11}, e_{22}, e_{33} の標準偏差と、全 9 セルの標準偏差の比は、全ブロックの平均で 0.07 と小さかった。従って、「カメラ精度 (m)」と「タイポイント精度 (pix)」はそれぞれの値よりもその比が精度上重要であるといえる。Metashape におけるバンドル調整の目的関数の

詳細は不明であるが、他の例 (一般社団法人 日本写真測量学会, 2016) を踏まえれば、これは自然な結果である。

表 7 に、画像セット別の最適な (検証点 RMS 誤差が最小となった) 解析設定と標準的解析設定における検証点 RMS 誤差を示す。ここで標準的解析設定とは、アラインメント精度: 高, キーポイント制限: 50,000, タイポイント制限: 0, カメラ精度: P4RTK が撮影位置座標を RTK-GNSS 測位する際に各画像に埋め込んだ x, y, z 各方向の誤差の標準偏差, タイポイント精度: 1 pix という解析設定を指す。表 7 より、画像セットごとに最適な解析設定は異なり、標準的解析設定では検証点 RMS 誤差が 4 cm を若干超えたが、解析設定を変えることで高精度が得られた画像セットもあった (④⑧⑩)。また、画像セット⑬では、標準的解析設定における検証点 RMS 誤差が 0.107 m に対し、最適な解析設定における検証点 RMS 誤差は 0.060 m であり、検証点 RMS 誤差が 4 割以上小さくなった。

4. 結論

本研究から、RTK 測位型 UAV 撮影による標定点レス SfM の精度は、撮影方法に加えて「アラインメント精度」や「キーポイント制限」, 「カメラ精度 (m)」と「タイポイント精度 (pix)」の比といった解析の設定に複合的な影響を受けることがわかった。加えて

表 5 入力画像の縮小率, 画像あたり上限特徴点数別の検証点誤差 RMS [m] (画像セット③;各 3×3 のブロックは撮影位置座標による拘束の重みとタイポイントによる拘束の重みのバランスを示す)

		「アライメント精度」								
		低			中			高		
「キーポイント制限」	500	0.106	0.104	0.099	0.076	0.063	0.042	0.061	0.039	0.032
		0.108	0.106	0.107	0.080	0.076	0.063	0.074	0.061	0.038
		0.108	0.108	0.111	0.082	0.082	0.076	0.078	0.075	0.060
	1000	0.083	0.075	0.061	0.074	0.052	0.030	0.052	0.031	0.033
		0.086	0.083	0.075	0.083	0.074	0.051	0.072	0.050	0.030
		0.088	0.087	0.083	0.086	0.083	0.073	0.080	0.070	0.049
	2500	0.083	0.068	0.047	0.057	0.036	0.028	0.034	0.032	0.043
		0.091	0.084	0.066	0.074	0.057	0.034	0.055	0.032	0.033
		0.094	0.092	0.084	0.080	0.074	0.056	0.072	0.054	0.032
	5000	0.080	0.060	0.045	0.045	0.029	0.032	0.029	0.038	0.050
		0.091	0.079	0.058	0.066	0.044	0.029	0.042	0.029	0.039
		0.097	0.091	0.078	0.079	0.066	0.042	0.064	0.041	0.030
	7500	0.077	0.057	0.044	0.041	0.029	0.032	0.030	0.041	0.054
		0.090	0.077	0.055	0.063	0.039	0.029	0.037	0.031	0.043
		0.097	0.091	0.076	0.078	0.062	0.038	0.060	0.036	0.031
	10000	0.077	0.057	0.044	0.037	0.028	0.033	0.031	0.043	0.054
		0.090	0.077	0.055	0.058	0.035	0.029	0.034	0.032	0.044
		0.097	0.091	0.076	0.076	0.057	0.034	0.056	0.033	0.033
25000	0.077	0.057	0.044	0.028	0.033	0.045	0.034	0.045	0.056	
	0.090	0.077	0.055	0.041	0.028	0.035	0.029	0.035	0.046	
	0.097	0.091	0.076	0.065	0.040	0.028	0.045	0.029	0.036	
50000	0.077	0.057	0.044	0.028	0.035	0.049	0.038	0.049	0.063	
	0.090	0.077	0.055	0.040	0.028	0.037	0.030	0.039	0.050	
	0.097	0.091	0.076	0.064	0.038	0.028	0.036	0.030	0.040	

表 6 表 5 における 3×3 の 1 ブロックの構成

		「カメラ精度 (m)」の倍率		
		0.5	1	2
「タイポイント精度 (pix)」の倍率	0.5	e_{11}	e_{12}	e_{13}
	1	e_{21}	e_{22}	e_{23}
	2	e_{31}	e_{32}	e_{33}

引用文献

一般社団法人 日本写真測量学会, 2016. 三次元画像計測の基礎 バンドル調整の理論と実践. 東京電機大学出版局, 33-38.

浦川貴季, 高田雅也, 加賀谷仁秀, 春名正基, 神野有生, 2019. 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～. 日本写真測量学会令和元年度秋季学術講演会発表論文集, 5-8.

高田雅也, 水津佑輔, 松岡祐二, 野松晃, 神野有生, 2020. 造成地の GCP 不使用型 UAV 写真測量の SfM 段階における撮影方法・解析設定の影響. 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, 43-46.

Agisoft LLC, 2019. Agisoft Metashape User Manual: Professional Edition, Version 1.5, 138.

Enoc Sanz-Ablanedo, Jim H. Chandler, Pablo Ballesteros-Pérez, José Ramón Rodríguez-Pérez, 2020. Reducing systematic dome errors in digital elevation models through better UAV flight design. Earth Surf. Process. Landforms 45, 2134-2147.

以下のような知見も得られた。

- 画像枚数を増やすほど高精度を得やすくなるとは限らない。例えば単高度斜め撮影に、地上画素寸法に関する要求を満たすために同高度または低高度の鉛直下向き撮影を加えると、高精度を得られる解析設定の割合が減少することがある。
- 最適な(最も高い精度を得られる)解析設定は画像セットごとに異なり、最適な解析設定では、標準的解析設定と比べて検証点 RMS 誤差 が 4 割以上小さくなることもある。

【著者最終原稿】高田雅也・神野有生・加賀谷仁秀・春名正基, RTK 測位型 UAV 撮影による標定点レス SfM における撮影方法・解析設定の影響: 道路沿いの現地実験データを用いた検討例, 写真測量とリモートセンシング, Vol. 60, No. 4, pp. 211 – 216, 2021.

表 7 画像セット別の最適な(最も高い精度が得られた)解析設定と標準的解析設定における検証点誤差 RMS [m]
(検証点誤差 RMS の太字は 4 cm 以下であることを示す)

セット番号	画像セット名	画像枚数	最適な解析設定				検証点誤差RMS [m]	
			「アライメント精度」	「キーポイント制限」	「カメラ精度 (m)」	「タイポイント精度 (pix)」	最適な解析設定	標準的解析設定
①	50m下	895	高	50000	2	0.5	0.303	0.423
②	100m下	342	高	50000	2	0.5	0.195	0.417
③	50m斜	1038	中	50000	1	1	0.028	0.039
④	100m斜	461	高	2500	1	0.5	0.020	0.040
⑤	50m下+100m下	1237	高	500	1	0.5	0.112	0.143
⑥	50m下+100m斜	1356	高	500	0.5	2	0.079	0.097
⑦	50m下沿線+100m斜	861	高	500	0.5	2	0.075	0.110
⑧	100m下+50m斜	1380	中	1000	2	0.5	0.030	0.043
⑨	100m下+50m斜沿線	780	高	5000	2	2	0.026	0.039
⑩	100m下+100m斜	803	低	7500	2	0.5	0.032	0.046
⑪	50m下+50m斜	1933	高	500	1	1	0.066	0.096
⑫	50m下+50m斜横断	1495	高	500	0.5	0.5	0.072	0.105
⑬	50m下+50m斜沿線	1333	高	500	1	2	0.060	0.107
⑭	50m下沿線+50m斜	1438	高	1000	0.5	1	0.059	0.086

M. V. Peppas, J. Hall, J. Goodyear, J. P. Mills, 2019. Photogrammetric assessment and comparison of DJI Phantom 4 PRO and Phantom 4 RTK small unmanned aircraft systems. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-2/W13, 503-509.

Y. Taddia, F. Stecchi, A. Pellegrinelli, 2019. Using DJI Phantom 4 RTK Drone for Topographic Mapping of Coastal Areas. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-2/W13, 625-630.