

斜め往復撮影による標定点不要の造成地 UAV 写真測量手法の開発

株式会社フジタ
山口大学
山口大学

○ 松岡 祐仁
神野 有生
高田 雅也

1. はじめに

UAV 空中写真測量は、国土交通省が推進する「i-Construction」において、広範囲を効率的に計測できる手法として広く普及している。しかし、事前に設置する標定点の測量、工事進捗による標定点更新に膨大な労力を要しており、タイムリーかつ有効に活用する上で現場実装の隘路となっていた。

近年、高精度 GNSS 測位が可能な自己定位型 UAV が低廉な価格で導入可能になり、写真測量の更なる効率化・高精度化が期待される。令和 2 年 3 月改訂「空中写真測量（無人航空機）を用いた出来形管理要領（土工編）（案）」では、SfM の利用においてカメラ位置を直接計測できる手法（自己定位 UAV）を併用する場合の標定点設置は任意 1) となった。しかし、標定点を全く設置しない場合、従来から行われている鉛直直下向き撮影では、鉛直方向に系統誤差が生じる課題があり、標定点の設定や調整点での誤差のオフセットが必須であった。

本報は、標定点を完全に省略して作業の省力化を可能にした上で、鉛直誤差を抑制して計測の高精度化を図ることのできる造成地を対象とした「斜め往復撮影」手法を開発した経緯、及び本手法の現場検証の結果について報告する。

2. 標定点設置作業の省力化・削減の取り組み²⁾

当社では、2017 年に簡易 UAV 測量システム「デイリードローン[®]」を開発した。GNSS 搭載対空標識による標定点設置作業の省力化や独自の飛行・

解析設定により事前準備～解析までの作業時間を従来比 1/3 となる即日測量を実現したものである。

2018 年末、高精度 GNSS 測位方式に対応する自己定位型 UAV 「Phantom 4 RTK[®]」（以下、P4RTK と称す）を導入した。写真撮影位置の高精度測位により、SfM 時の外部標定要素推定の高精度化が期待できる。2~4ha での当社実験では以下の結果を得た。

- ・ 工事測量（起工測量、岩線・出来高計測等）
領域中央 - 標定点 1 点（計測精度±100mm）
- ・ 出来形計測
領域隅部 - 標定点 4 点（計測精度±50mm）

標定点を従来に比べ大幅に削減した上で計測精度を確保できることから、標定点設置に多大な労力を要していた広大な造成土工現場や高低差の大きい現場を中心に運用を進めている。

3. 多様性飛行撮影の導入

3.1 鉛直誤差発生の原因

自己定位型 UAV による標定点削減の取り組みでは、標定点の完全省略時、高い水平精度が確保できているが、鉛直方向に一律の大きな誤差が生じることがしばしば起こる。SfM では、カメラのレンズ特性や撮像面との位置関係等の幾何学構造の校正作業である内部標定が行われる。一律に生じる誤差は、完全に鉛直直下向きの画像セットのみでは、内部標定要素の内、焦点距離に代表される奥行き方向のスケールが幾何学的に求まらず誤差推定されることに起因した系統誤差³⁾である（図-1）。

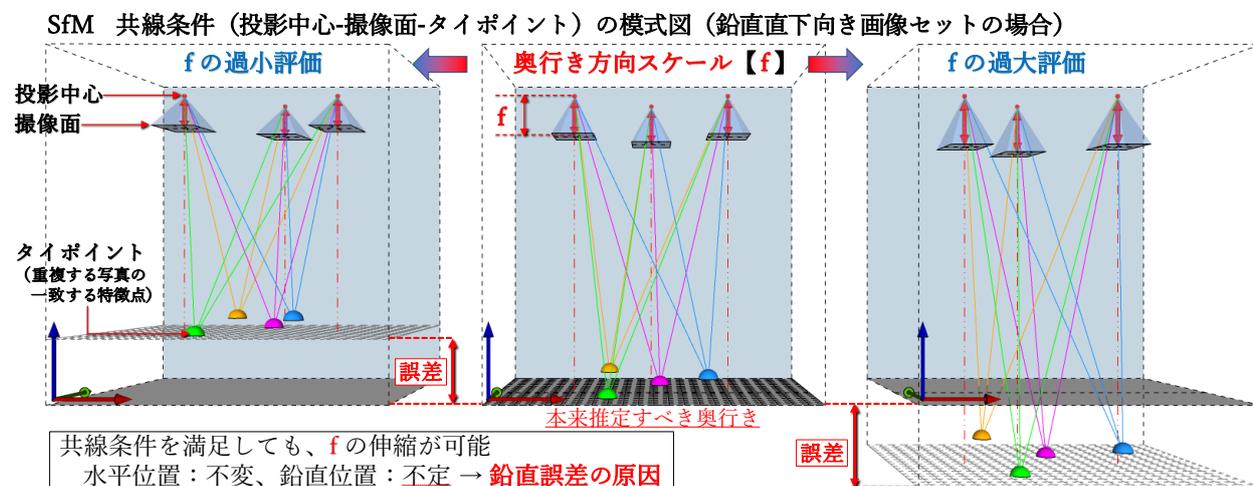


図-1 奥行き方向のスケール誤差推定

鉛直直下向き撮影でも目標鉛直精度を得られるケースがあるが、風による急激な機体の揺れ、ジンバルの制御誤差等で撮影画像の向きに微小なばらつきが生じて奥行き方向の誤推定が抑制されていると考えられる。しかし、偶発的事象に期待することは、運用上現実的でない。このため、奥行き方向のスケールを表すパラメータを幾何学的に安定して求めて鉛直精度の改善を図るため、鉛直直下向き画像セットに別高度や斜め向き画像を加える多様性（多視点）飛行撮影に取り組むこととした。

3.2 多様性（多視点）飛行撮影 検証実験⁴⁾

図-2に、対象領域と検証点14点の配置を示す。撮影にはP4RTK（RTK-GNSS測位）を用い、対地高度73m（地上画素寸法GSD20mm/pix）から鉛直直下向き撮影を進行方向80%、隣接コース間60%のオーバーラップ率で行った（基本ケース122枚）。

次に基本ケースとは別に多様性飛行として、以下の別高度鉛直直下向き、及び斜め向き撮影画像取得のため追加撮影を行った。

- ① 高度55m（鉛直直下向き）…………… 1枚
- ② 高度73m（天底角30°斜め向き）…… 26枚



図-2 多様性飛行撮影 検証領域

3.3 検証点誤差

表-1に基本ケース122枚、及び基本ケース+多様性飛行撮影画像（①、②：ケース1~6）を追加してSfM解析（Pix4D mapper使用）を行った場合の検証点誤差の最大値（絶対値）、RMSを示す。

表-1 多様性飛行撮影画像追加時の検証点誤差

ケース	基本+追加(枚数)		X誤差(m)		Y誤差(m)		Z誤差(m)	
	①鉛直	②30°	最大	RMS	最大	RMS	最大	RMS
基本	-	-	0.021	0.009	0.017	0.008	1.127	1.097
1	1	-	0.034	0.012	0.019	0.008	0.052	0.028
2	-	26	0.037	0.013	0.015	0.008	0.079	0.060
3	-	6	0.035	0.012	0.018	0.008	0.083	0.065
4	-	3	0.037	0.013	0.020	0.008	0.046	0.031
5	-	1	0.035	0.012	0.018	0.008	0.024	0.011
6	1	1	0.037	0.012	0.018	0.008	0.025	0.011

いずれのケースにおいても、水平誤差は小さく高精度の結果を得られている。しかし、基本ケースの場合、鉛直成分は全体的に約1.1m オフセットされた結果となり系統誤差が確認できる。

ケース1~6の鉛直誤差は、基本ケースに別高度や斜め向き撮影画像を加えることにより、標定点の設定なしで工事測量要求精度100mmを確保した。ただし、別高度の鉛直直下向き撮影1枚（ケース1）や斜め向き画像全26枚（ケース2）を加えるだけでは、出来形計測要求精度50mm以下にはならない。そこでSfM解析の過程でノイズとなり、画像間マッチング、内部標定要素の推定に悪影響を与える可能性がある領域周辺の植生が写る割合の大きな画像、抽出タイポイント数が少ない画像を段階的に除去して解析を行った。結果、ケース4~6では、1~3枚と少数の多様性飛行撮影画像を加えることで鉛直誤差が50mm以内となった。

以上より、鉛直直下向き撮影画像セットに多様性飛行撮影画像を加えることにより、鉛直成分の誤推定を大幅に抑制する効果が得られたと考える。一方、多様性飛行撮影画像は、単に枚数を加えるだけでは、十分な効果が得られない可能性があり、少数でも画像同士のマッチングに有利な画像の追加が重要であることが示唆された。

4. 斜め往復撮影

多様性飛行撮影画像追加の検証実験では、鉛直誤差の抑制効果を得ることができたが、有利な画像を取得するためには、対象領域に応じて事前検討された適切な位置、高度・角度からの撮影が必要となることが示唆された。多数の画像を撮影してSfM解析時に有利な画像を選定する方法も考えられるが、実運用では、追加飛行、解析回数・時間を要することになり、手法としての一般化は難しい。

そこで、従来の鉛直直下向き撮影の軌跡は変えず、カメラ角度を進行方向に対して一定角に固定した斜め向き重畳画像を取得する手法（図-3、写真-1）を試行することとした。本手法であれば、隣接コース間の計測領域は2方向から撮影され、多様性飛行撮影による鉛直誤差抑制効果が期待できる。

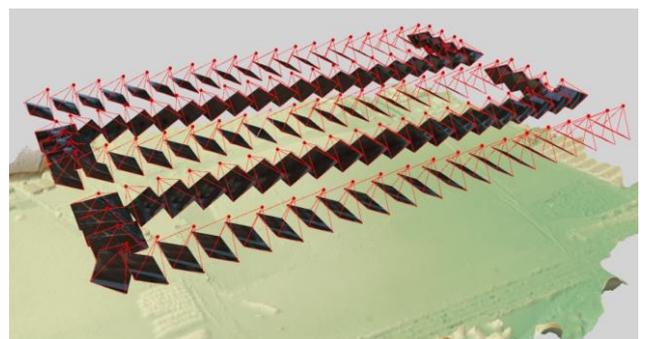


図-3 斜め往復撮影 飛行経路・軌跡



写真-1 斜め往復撮影 カメラ角度

4.1 斜め往復撮影 飛行実験

図-4 に飛行実験対象領域と検証点 9 点の配置を示す。対象領域は、一部植生が分布しているものの大半は裸地の造成地である。撮影には P4RTK (RTK-GNSS 測位) を用い、以下の組み合わせで計 30 ケースの飛行実験を実施した。

- ・対地高度…73, 55, 36m (3 種類)
- ・撮影角度…天底角 0, 10, 20, 30, 40° (5 種類)
- ・ラップ率…80%×60%, 80%×75% (2 種類)

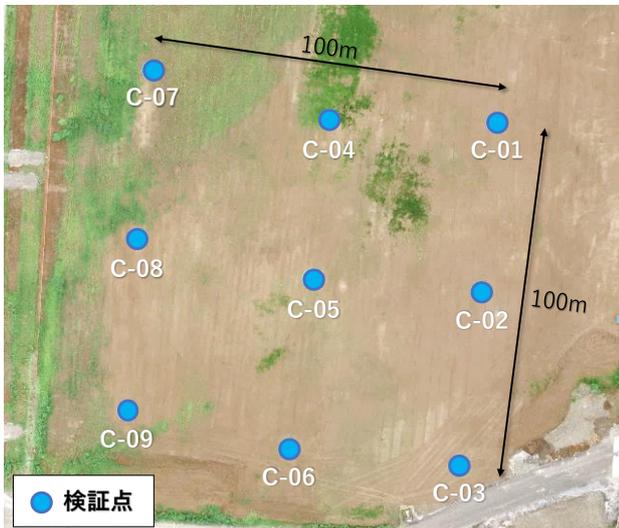


図-4 斜め往復撮影 検証領域

4.2 検証点誤差

表-2 にラップ率 80×60% 設定時の鉛直直下向き撮影 (天底角 0°), 及び斜め往復撮影 (天底角 10°~40°) において、飛行高度を変化させた時の検証点誤差の最大値 (絶対値), RMS を示す。いずれのケースも天底角 0° の場合、50mm 以上の鉛直誤差が生じている。高度 73m, 天底角 10° ケースで最大 62mm の鉛直誤差が生じているが、それ以外のケースも含め、斜め往復撮影では鉛直精度の改善が確認できる。

表-3 にラップ率 80×75% にした場合の検証点誤差の最大値 (絶対値), RMS を示す。隣接コース間の重複を大きくすることで画像間のマッチングに有利になると考えられるため実験項目として実施したが、今回の実験ではラップ率 80×60% と比較して位置精度への大きな影響は見られなかった。

高度 36m, 天底角 0° では、鉛直 RMS 誤差が 22mm となった。しかし、前項で述べたとおり、何らかの要因により鉛直直下向きではない画像が混入して鉛直誤差が抑制されたことが要因として推測され、偶発的で再現性の難しい結果と考える。

表-2 検証点誤差 (ラップ率 80×60%)

高度 73m						
天底角 (°)	X誤差(m)		Y誤差(m)		Z誤差(m)	
	最大	RMS	最大	RMS	最大	RMS
0	0.016	0.009	0.034	0.022	0.072	0.046
10	0.017	0.012	0.027	0.021	0.062	0.046
20	0.029	0.020	0.024	0.017	0.028	0.016
30	0.020	0.011	0.028	0.017	0.014	0.008
40	0.013	0.008	0.024	0.015	0.017	0.012
高度 55m						
0	0.030	0.021	0.034	0.023	0.077	0.060
10	0.026	0.017	0.027	0.017	0.040	0.028
20	0.019	0.011	0.026	0.018	0.029	0.018
30	0.017	0.011	0.020	0.013	0.044	0.034
40	0.023	0.012	0.026	0.018	0.041	0.035
高度 36m						
0	0.018	0.011	0.029	0.021	0.055	0.047
10	0.018	0.013	0.027	0.021	0.021	0.013
20	0.019	0.012	0.028	0.019	0.014	0.008
30	0.012	0.007	0.025	0.018	0.032	0.020
40	0.017	0.010	0.025	0.020	0.032	0.019

表-3 検証点誤差 (ラップ率 80×75%)

高度 73m						
天底角 (°)	X誤差(m)		Y誤差(m)		Z誤差(m)	
	最大	RMS	最大	RMS	最大	RMS
0	0.023	0.014	0.033	0.024	0.633	0.624
10	0.031	0.019	0.025	0.016	0.048	0.043
20	0.026	0.019	0.023	0.015	0.014	0.007
30	0.030	0.021	0.028	0.017	0.025	0.017
40	0.028	0.019	0.023	0.017	0.037	0.031
高度 55m						
0	0.024	0.017	0.025	0.018	0.099	0.082
10	0.022	0.016	0.026	0.018	0.037	0.024
20	0.035	0.025	0.024	0.016	0.032	0.023
30	0.025	0.016	0.027	0.018	0.040	0.035
40	0.028	0.020	0.023	0.017	0.041	0.035
高度 36m						
0	0.031	0.020	0.027	0.018	0.028	0.022
10	0.029	0.018	0.027	0.018	0.034	0.022
20	0.026	0.016	0.024	0.015	0.038	0.028
30	0.029	0.021	0.028	0.018	0.040	0.036
40	0.023	0.016	0.025	0.018	0.033	0.029

表-4 各ケースの焦点距離 f 標準偏差 (pixel)

天底角 (°)	ラップ率80×60%			ラップ率80×75%		
	高度 (m)					
	73	55	36.5	73	55	36.5
0	6.552	4.649	2.028	4.611	3.894	3.039
10	0.510	0.433	0.467	0.413	0.513	0.511
20	0.182	0.155	0.180	0.137	0.181	0.240
30	0.104	0.084	0.108	0.082	0.099	0.129
40	0.067	0.059	0.079	0.062	0.077	0.128

4.3 焦点距離 標準偏差

表-4 に、全 30 ケースの SfM 解析により推定された奥行き方向のスケールを表す主要パラメータのひとつである焦点距離 f (focal length) の標準偏差を示す。値が大きいほど焦点距離 f の推定において不確実性が増すが、鉛直直下向き撮影 (天底角 0°) では、鉛直誤差 50mm 以内のケースも含め数画素程度の大きな値となった。斜め往復撮影では、全てのケースで 1/2 画素程度以下となり、天底角の増加に比例して焦点距離 f の推定が安定的になり、本手法の導入効果が顕著に表れたといえる。

一方、鉛直誤差と焦点距離 f の標準偏差の関係は完全に比例していない。斜め往復撮影は、天底角が大きくなるほど鉛直方向の情報が多くなり、奥行き方向のスケール推定に有利になると考えられる。半面、撮影画像の地上投影形状が進行方向に広がる台形となり、画像前方ほど画素当たりの密度が小さくなり、特徴点の形状自体も変形することから、画像間のマッチングに不利になると考えられる。このトレードオフの関係が、天底角の大きさと鉛直精度が比例しない可能性のひとつと考えられるが、今後の検証項目としたい。

今回の対象領域では、検証した各高度において天底角 20° 以上の斜め往復撮影であれば、鉛直精度 50mm の安定的な確保が確認できた。

5. おわりに

「斜め往復撮影」は、自己定位型 UAV による外部標定要素推定の高精度化と併せて、斜め向き重畳画像セットにより内部標定要素の内、奥行き方向のスケールを高精度に推定し、標定点を不要とした造成地等の土工を対象とする空中写真測量手法である。その特徴を以下に示す。

- ① 従来の鉛直直下向き撮影の飛行経路はそのままにカメラを進行方向に傾けることで、多様性飛行撮影画像セットを取得できる。
- ② 斜め往復撮影画像セットの SfM 解析により、鉛直方向の誤推定が大幅に抑制できる。
- ③ 従来の鉛直直下向き撮影での GSD20mm/pixel に相当する高度からの斜め往復撮影でも、i-Construction の出来形計測要求精度に相当する

50mm の計測が標定点不要で達成可能である。標定点が不要となり飛行撮影前の準備工程が大幅に軽減されることは、運用上大きなメリットである。この特徴を活かして、人の立ち入りが困難な場所での測量、例えば近年頻発する災害発生時の初動調査への展開が期待できる。

一方、本手法では、これまで標定点や調整点に依存していた位置精度の確保が、撮影画像の情報のみとなる。裸地が多くを占める造成地では良好な位置精度を得ているが、計測対象の植生被覆などの地表面状況、撮影画像の質等の状況に大きく依存することに留意が必要である。これまでの蓄積データの検証では、従来標準設定で行われることの多かった SfM 解析において、解析設定の変更が精度に大きく影響⁴⁾することが明らかになっている。計測対象の状況に大きく依存する本手法が、より安定して精度を確保するために適した解析設定について継続して詳細検討を行う予定である。

現在、本手法は、主に造成現場での着工前等の現況測量、土量変化率の把握による土配計画での運用、及び検証実験により、事例を蓄積しているところである。今後は、斜め向き撮影で光軸が傾くことによる飛行高度と GSD、ラップ率の関係を明確にして ICT 基準類との整合性を図ることや、カメラ角度等撮影条件の最適化を行い、現場の生産性向上に資する技術として発展させていく所存である。

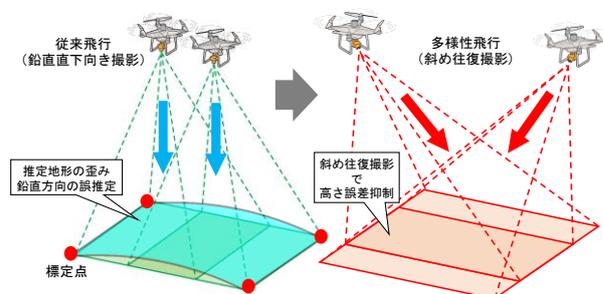


図-5 斜め往復撮影手法 概念図

参考文献

- 1) 国土交通省：空中写真測量（無人航空機）を用いた出来形管理要領（土工編）（案），p35，2020
- 2) 松岡祐仁・野末晃・上原広行：切盛土の日々の出来高管理に簡易UAV測量を適用，日本建設機械施工協会 令和元年度建設施工と建設機械シンポジウム，2019
- 3) 神野有生・宮崎真弘・八田滉平・福元和真：UAV写真測量のSfMにおける斜め撮影の導入に関する基礎的シミュレーション，日本写真測量学会 平成30年度秋季学術講演会，2018.
- 4) 高田雅也・水津佑輔・松岡祐仁・野末晃・神野有生：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，2020