

土工現場における UAV 写真測量技術の精度検証

Evaluation of UAV Photogrammetric Accuracy for Earthworks

木村 圭 佑^{*1}
Keisuke Kimura

松元 和 伸^{*1}
Kazunobu Matsumoto

高橋 貢 治^{*2}
Koji Takahashi

伊 東 和 久^{*3}
Kazuhisa Ito

飯 島 敦^{*4}
Atsushi Iijima

西 村 芳 保^{*4}
Yoshiyasu Nishimura

【要旨】

本報では、3次元写真測量技術の検証および社内での運用、特に小規模土工の現場での適用を目的として、撮影が容易な道路土工の法面(1:1)と、撮影条件が厳しい急峻な小規模法面(1:0.5)である土工現場において、UAV測量精度の検証を行った。その結果、道路土工現場においては、ラップ率縦90%、横60%の条件で撮影および解析を実施することで、要求精度を確保できることを確認した。一方、急峻な小規模法面の現場においては、出来形管理要領(土工編)(案)に準拠した方法では、要求精度を確保できなかった。この対応として、ラップ率縦90%、横60%での撮影に加え、標定点の増設とともに、斜め方向撮影により解析に使用する写真枚数の追加により、要求精度を確保できることを示した。

【キーワード】 UAV i-Construction 測量技術 生産性向上

1. はじめに

UAVは、Unmanned Aerial Vehicleの略で、日本語では無人航空機と訳され、その中でもプロペラのあるUAVがドローンと呼ばれている。平成25年度には、UAVを用いた公共測量が始まり、平成28年3月の「UAVを用いた公共測量マニュアル(案)」の制定により、UAVの利用が大きく進んだ。国土交通省は、全ての建設生産プロセスで、ICTや3次元データ等を活用し、建設現場の生産性向上を目指す目的で、i-Construction推進に向けたロードマップを、同年に示している。i-Constructionの取り組み中では、ICT技術の全面的な活用として、「ICT土工」が挙げられており、ドローン等による3次元計測や、その結果を用いた出来形管理が盛り込まれた¹⁾。また、3次元データを利用した、土工における調査・測量、設計、施工、検査の各プロセスにおいて、15の新基準が制定された。

当社においても、この動きに対応するために、社内での運用方法について検討した。特に、外注によるコストが高くなりがちな、小規模土工を対象にして、UAV測量精度を確保するための撮影方法について、検証を行った。

なお、本報では、国土交通省による平成30年3月版「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)²⁾」記載事項に則って検証を行った。

2. 要求精度確保のための検討

2.1 測量目的とその許容誤差

表-1に、国土交通省が導入した空中写真測量(無人航空機)を用いた出来形管理要領(土工編)(案)に規定されている測量の目的とその許容誤差、地上解像度について示す。この許容誤差を満足できない場合は、測量成果として採用できない。その際には、条件を再検討しての再測量が必要となる。この中で最も厳しい許容誤差条件となっているのは、出来形計測時の±50mm以内である。そこで、本報では出来形計測をターゲットにし、この許容誤差内でUAV測量を実施できるための各種条件について検証を行った。

表-1 測量の目的と許容誤差、地上解像度

測量の目的	許容誤差	地上解像度
起工測量	±100mm以内	20mm/画素以内
部分払い出来高計測	±200mm以内	20mm/画素以内
出来形計測	±50mm以内	10mm/画素以内

2.2 UAV撮影方法の検討

(1) 使用UAVおよびソフトウェア

今回の検証で使用したUAVは、安価で操作も比較的簡単である、DJI社製のPhantom 4 Proを用いた。また、同社製のソフトウェアであるGS Proを用いて、飛行ルートを作成し、自律飛行により撮影を行うこととした。

1. 技術研究所 研究開発G 第一研究室, 2. 大阪支店 黒部川電力新姫六作業所, 3. 大阪支店 箕面北部作業所, 4. 名古屋支店 設楽ダム転流作業所

UAVの性能を表-2に示す。選定したUAV搭載のカメラ性能で、地上解像度10mm/画素以内を満足する飛行高度は38m以下である。本検証では、飛行高度を35mに設定し、飛行ルートを作成した。

(2) 対空標識

対空標識は、写真測量ソフトウェアで中心を自動認識できる図-1のようなX型模様のもを用いた。

対空標識には、3次元測量により得られた点群データに、現場の座標を与えるための標定点と、写真測量の精度検証に用いる検証点の2つの役割がある。それを、出来形管理要領（土工編）（案）に規定されている間隔で、測量対象エリア内に配置し、中心座標を事前に測量しておく必要がある。対空標識の大きさは、精度面の検証を事前に行い、可搬性を考慮して1辺450mmのものを用いることにした。

(3) 写真のラップ率

写真のラップ率（写真の重なる割合）は、出来形管理要領（土工編）（案）によると、進行方向に対するラップ率（以下縦ラップ率）が最低90%以上であることを示す飛行計画、または、飛行後に縦ラップ率が最低80%以上を確認するための確認方法、いずれかを記載する、とある。隣接コースとのラップ率（以下横ラップ率）については、60%以上とする、とある。そのため、本報では、飛行ルート作成時に縦ラップ率を90%、横ラップ率を60%に設定した。また、写真測量解析時に使用枚数を減少させることで、縦ラップ率を小さくした場合の精度検証を実施することにした。

(4) カメラの設定

撮影時におけるカメラの設定項目として、シャッター速度、絞り値、ISO感度が挙げられる。

シャッター速度を遅くすると写真ブレの原因に、絞り値を小さくすると被写界深度（ピントが合う範囲）が狭く、ISO感度を大きくすると写真にノイズが乗る。

これらは解析精度に影響を与えるため、適切なカメラの設定が必要である。設定の自動化は可能であるが、天候や撮影場所により写真の明るさが変わってしまう。そのため、撮影時の状況に応じて表-3の条件を満足するように、シャッター速度を決定した上で、事前に試験飛行を行い、絞り値、ISO感度の値を設定し、写真の明るさを確認した上で本撮影を実施することにした。

表-2 使用した UAV の性能

機体	DJI Phantom4 Pro
価格	約 20 万円
飛行時間	約 30 分
撮影画素数	約 2000 万画素 (5472×3648 画素)
焦点距離	24 mm(35 mm 換算)
10 mm/画素以内となる 飛行高度	38 m 以下

表-3 カメラの設定

シャッター速度	1/500 秒以下
絞り値	5.0 以上
ISO 感度	400 以下

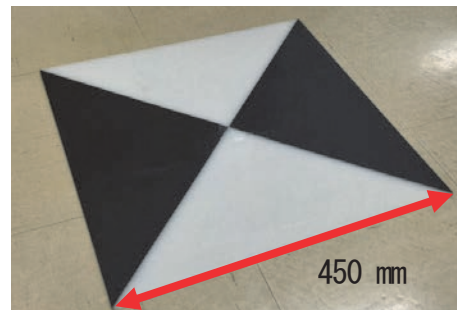


図-1 X型模様の対空標識

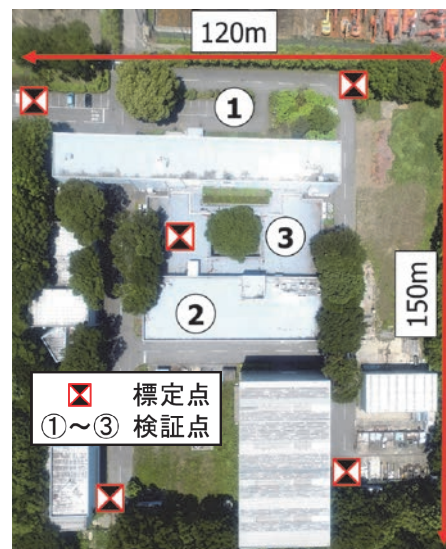


図-2 標定点・検証点設置位置

3. 事前検証実験

3.1 検証概要

2章で決定した撮影方法を用いて、飛鳥建設技術研究所において精度検証を実施した。図-2は技術研究所の上空写真を示したものであり、検証範囲は、約150m×120mである。

対空標識は、標定点をそれぞれの間隔が100 m以内となるように5箇所、検証点を高さ異なる3箇所設置した。検証点番号は同図中で示すとおりである。なお、中心座標の測量は、ネットワーク型RTK方式のGNSS (Global Navigation Satellite System) 機器を用いて実施した。

精度検証は、写真のラップ率が縦90%、横60%の場合と縦80%、横60%の場合の2ケースで実施した。

(2) 精度検証結果

3次元写真測量によって得られた点群データを図-3に示す。このデータを用いた写真ラップ率の違いによる精度検証結果を表-4および表-5に示す。なお、検証に用いた写真枚数は、それぞれ380枚および190枚である。写真ラップ率が縦90%、横60%の場合の最大誤差は検証点②のZ軸方向で-38 mm、縦80%、横60%の場合の最大誤差は検証点③のY軸方向で52 mmであった。この結果から、写真ラップ率を縦90%、横60%として撮影を実施すれば、要求精度である±50mmを満足することが確認された。



図-3 3次元写真測量による点群データ

表-4 写真ラップ率縦90%、横60%の場合の誤差(mm)

検証点	ΔX	ΔY	ΔZ
①	-2	0	-19
②	-3	-13	-38
③	14	32	-31

塗りつぶしは各検証条件内の最大誤差を示す

表-5 写真ラップ率縦80%、横60%の場合の誤差(mm)

検証点	ΔX	ΔY	ΔZ
①	14	-24	36
②	24	38	13
③	18	52	13

塗りつぶしは各検証条件内の最大誤差を示す

4. 建設工事現場における検証

事前検証結果を踏まえて、実際の建設現場で検証を行った結果について報告する。実施したのはUAVによる撮影が容易な道路土工の法面(1:1)と、測量対象の撮影条件が厳しい急峻な小規模法面(1:0.5)である。

4.1 道路土工法面

(1) 検証概要

道路土工法面を対象に精度検証を実施したのは、大阪府発注の箕面北部丘陵地区 道路築造工事(その2)内の法面である。検証対象の法面は、図-4に示す、幅80m、高低差35m、斜距離50mで1:1の勾配である。

法面の高低差が35mあり、

(i) 事前検証で用いたUAVでは1回で撮影できない

(ii) 測量対象の高低差が大きいと精度が低下する³⁾ことから、法面上側と下側を2回に分けて撮影した。

ラップ率が縦90%、横60%の場合と縦80%、横60%の場合の2ケースに対して、図-5～図-7で示す、標定点の枚数が10枚、8枚、4枚の3ケース、計6ケースで検証した。また、検証点は5箇所を設置し、検証点番号は同図中で示すとおりである。なお、対空標識の中心座標測量はトータルステーションを用いて行った。

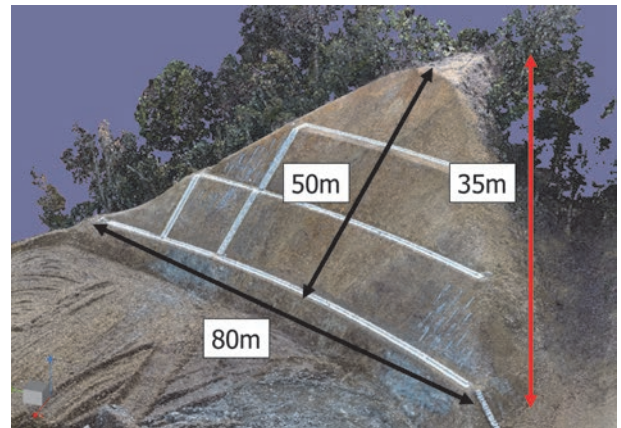


図-4 道路土工の法面での検証対象

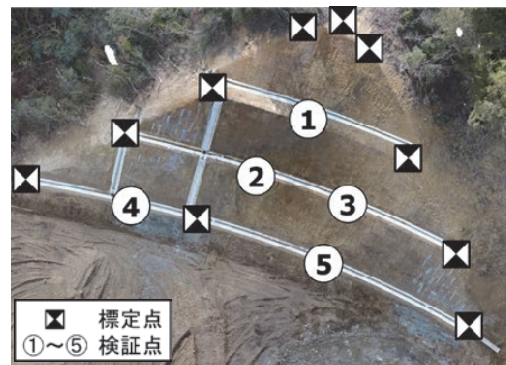


図-5 標定点10枚配置図

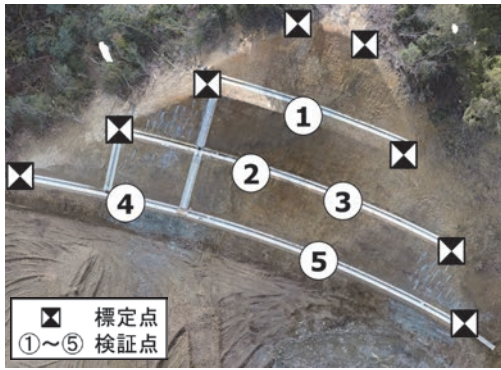


図-6 標定点8枚配置図

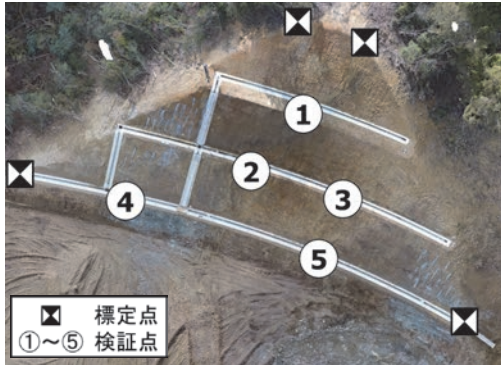


図-7 標定点4枚配置図

表-6 標定点枚数ごとの検証点誤差(mm)

標定点	検証点	縦90%,横60% (写真150枚)			縦80%,横60% (写真80枚)		
		ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ
10枚	①	4	1	2	0	-11	-1
	②	-8	8	2	3	19	-14
	③	-5	5	3	22	7	-8
	④	15	5	-2	25	40	-28
	⑤	16	-2	5	68	26	-24
8枚	①	3	0	4	-1	-20	8
	②	-7	7	4	6	14	-10
	③	-5	6	5	17	6	-04
	④	19	5	0	40	36	-29
	⑤	17	-1	6	66	29	-25
4枚	①	3	3	2	-6	-17	-1
	②	-8	9	2	-7	11	-13
	③	-4	7	4	16	-3	-6
	④	16	7	-1	9	34	-26
	⑤	17	1	7	60	13	-20

塗りつぶしは各検証条件内の最大誤差を示す

(2) 精度検証結果

標定点枚数の違いによる検証結果を表-6に示す。写真ラップ率が縦90%、横60%の場合(写真150枚)の最大誤差は、標定点10枚のとき、検証点⑤のX軸方向16mm、8枚のとき、検証点④のX軸方向19mm、4枚のとき、検証点⑤のX軸方向で17mmであった。また、縦80%、横60%(写真80枚)の場合の最大誤差は、標定点10枚のときが検証点⑤のX軸方向68mm、8枚のとき、検証点⑤のX軸方向66mm、4枚のとき、検証点⑤のX軸方向60mmであった。

この結果より、写真ラップ率縦90%、横60%で撮影すれば、出来形管理要領(土工編)(案)に規定されている最低限の標定点数で要求精度を満足することがわかる。一方で、写真ラップ率縦80%、横60%の場合では、要求精度を満たさなかった。

したがって、小規模土工現場での写真測量時には、精度確保のために、縦90%、横60%のラップ率で撮影することが必要である。

4.2 急峻な小規模法面

(1) 検証概要

急峻な小規模法面を対象として精度検証を実施したのは、国土交通省中部地方整備局発注の平成28年度設楽ダム転流工工事における仮設備ヤード後背法面の最上部である。

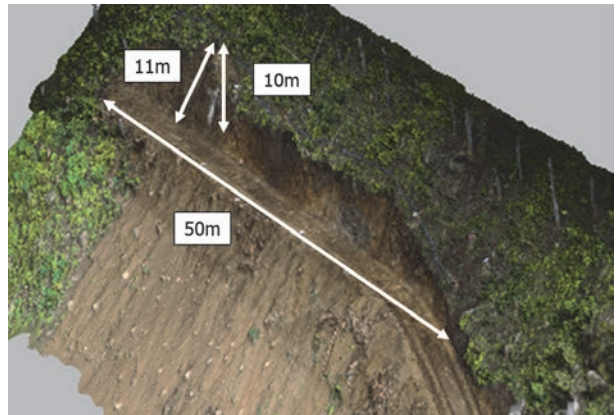


図-8 急峻な小規模法面での検証対象

表-7 撮影に用いたカメラの性能

使用カメラ	SONY α 6000
総画素数	2400万画素(6000×4000画素)
焦点距離	75mm(35mm換算)
10mm/画素以内となる飛行高度	120m以下

高い樹木が存在しており、前述したUAVを用いて飛行高度35mで撮影を行うと、樹木に衝突し墜落する危険が考えられた。このことから、当現場では、表-7に示すような焦点距離が75mm(35mm換算)の中望遠レンズを取り付けた、レンズ交換式カメラを採用した。

また、撮影にはこのカメラを搭載可能なUAV (DJI Matrice 600 Pro) を用いた (写真—1)。今回用いたカメラとレンズの組み合わせで地上解像度を10 mm/画素以内を満足する飛行高度は120 m以下である。

撮影時の安全を確保しつつ、低空での撮影により地上解像度を高くすることを勘案し飛行高度を70 mとした。なお、対空標識の中心座標測量はトータルステーションを用いて行った。

本検証では、対象範囲が狭いため、飛行ルート作成時に撮影写真枚数が少なくなることが予想された。そのため、通常はUAVの真下方向を撮影するのみとなっているが、カメラを斜め下方向 (45°) に向け、別アングルからの撮影を追加で実施した。斜め方向から撮影した写真の有無の2ケース、標定点の枚数および配置が図—9～図—11で示すそれぞれ9枚、6枚、4枚の3ケース、ラッ



写真—1 レンズ交換式カメラを搭載したUAV



図—9 標定点9枚配置図



図—10 標定点6枚配置図



図—11 標定点4枚配置図

プ率が縦90%、横60%の場合と縦80%、横60%の場合の2ケース、計12ケースで検証を行った。また、検証点は2箇所に設置した。検証点番号を同図中に示す。

(2) 精度検証結果

斜め下方向写真を含めずに解析した場合の、標定点枚数ごとの検証点の精度検証結果を、表—8に示す。写真ラップ率が縦90%、横60%の場合 (写真82枚) の最大誤差は、標定点枚数が、9枚では検証点②のX軸方向88 mm、6枚では検証点②のX軸方向88 mm、4枚では検証点①のZ軸方向で134 mmであった。また、縦80%、横60% (写真49枚) の場合の最大誤差は、標定点枚数が、9枚では検証点②のZ軸方向236 mm、6枚では検証点②のZ軸方向209 mm、4枚では検証点①のY軸方向258 mmであった。したがって、出来形管理要領 (土工編) (案) に準拠した方法では精度を満足することができなかった。

次に、斜め下方向写真を含めて解析した場合の、標定点枚数ごとの検証点の精度検証結果を、表—9に示す。写真ラップ率が縦90%、横60%の場合 (写真150枚) の最大誤差は、標定点枚数が、9枚では検証点①のX軸、Y軸方向±38 mm、6枚では検証点①のY軸方向60 mm、4枚では検証点①のY軸方向で131 mmであった。

表—8 標定点枚数ごとの検証点誤差(mm) (斜め写真無)

標定点枚数	検証点	縦90%,横60% (写真82枚)			縦80%,横60% (写真49枚)		
		ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ
9枚	①	-41	-56	77	-5	37	119
	②	88	-8	79	82	-5	236
6枚	①	-46	-46	81	-6	62	110
	②	88	-33	77	96	8	209
4枚	①	-65	13	134	40	102	-50
	②	70	6	132	258	-85	-179

塗りつぶしは各検証条件内の最大誤差を示す

表—9 標定点枚数ごとの検証点誤差(mm) (斜め写真有)

標定点枚数	検証点	縦90%,横60% (写真150枚)			縦80%,横60% (写真72枚)		
		ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ
9枚	①	-38	38	26	-35	23	2
	②	15	-17	-24	30	-50	-83
6枚	①	-44	60	30	-39	46	4
	②	19	-3	-31	35	-33	-88
4枚	①	-75	131	47	-56	123	9
	②	4	51	-39	28	35	-96

塗りつぶしは各検証条件内の最大誤差を示す

標定点枚数が、9枚では検証点②のZ軸方向-83 mm、6枚では検証点②のZ軸方向-88 mm、4枚では検証点②のX軸方向123 mmであった。

以上の結果より、写真のラップ率が縦90%、横60%の場合で、斜め方向の写真を入れて解析し、かつ標定点を多く設定するケースのみ、最大誤差が-38 mmとなり、目標精度の±50 mm以内を満足する結果となった。つまり、写真のラップ率を大きくする、斜め方向の写真を追加する、標定点を増やすことで精度を確保した。

5. おわりに

本報では、国土交通省の出来形管理要領（土工編）（案）に準拠した条件の下で、UAV 写真測量手法の検証を行った。飛鳥建設技術研究所内、道路土工現場においては、ラップ率縦90%、横60%の条件で撮影および解析を実施することで、要求精度を確保できることを確認した。

一方、急峻な小規模の法面現場においては、出来形管理要領（土工編）（案）に準拠した方法でUAV 写真測量を行うと、測量精度を確保することができなかった。この対応として、写真ラップ率縦90%、横60%での撮影に加え、標定点の増設および斜め方向撮影により解析に使用する写真枚数の追加により、要求精度を確保できることを示した。

以上のように、小規模の急峻な法面では、現場条件を事前に検討して、現場に適切な測量方法を採用することが重要である。

今後、現場職員で容易に測量可能な運用方法の構築やマニュアルの整備を行い、社内展開を進めていきたい。また、GNSS 内蔵型の対空標識を導入など、測量業務の省力化についても検討を進めていく予定である。

謝辞：本検証を行うにあたり、大阪府都市整備部ならびに国土交通省中部地方整備局設楽ダム工事事務所の皆様をはじめ多くの方々には、ご理解、ご協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 国土交通省：i-Construction 推進に向けたロードマップ、2018年、<http://www.mlit.go.jp/tec/i-construction/pdf/180601_roadmap.pdf>、（入手 2018.7.30）
- 2) 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）、2018年、<<http://www.mlit.go.jp/common/001230311.pdf>>、（入手 2018.7.30）
- 3) 早川健太郎、他：土工管理にUAVを活用する場合の効果的な運用方法について、土木学会第72回年次学術講演会、VI-736、pp.1471-1472、2017。

Summary As part of a broader effort to verify the efficacy of three-dimensional photogrammetry and its potential applications to Tobishima operations, particularly at small-scale earthwork construction sites, we performed UAV photogrammetry verification at an easy-to-photograph road construction slope (1:1) and a difficult-to-photograph small steep slope (1:0.5). The results of the survey at the road construction site premises showed that 90% overlap and 60% sidelap ratios met accuracy requirements. The results of the survey on the small steep slope in accordance with the work progress control guideline for earthwork (draft version) failed to meet accuracy requirements. We also found that the latter results could be improved to meet accuracy requirements, by adding control points and adding photographs taken along the diagonal axis to the analysis, in addition to applying the 90% overlap and 60% sidelap ratios.

Key Words : UAV, i-Construction, Surveying technology, Labor-saving