

UAV による自動飛行システムを用いた空中写真測量の構造物出来形管理に関する検証

(株)福田組 正会員 ○音田 有輝 (株)福田組 正会員 椎谷 成孝
(株)福田組 正会員 若月 和人 金井度量衡(株) 吉田 雄一

1. はじめに

現在、3次元計測技術を用いた構造物の出来形管理には TLS(地上型レーザースキャナー)が広く用いられている。TLS は高精度な 3 次元点群データを取得できる一方、機材が高価であり、構造物による死角を補うため複数回の据付け・測定が必要となる課題がある。これらの課題を解決する手段として、UAV を用いた空中写真測量が考えられる¹⁾。近年、産業用 UAV(Unmanned Aerial Vehicle)の自動飛行技術が進歩し、安定した自動撮影が可能となっている。本検証では、新たなケースを追加し、UAV による構造物出来形管理への適用性について追加検証した。

2. 検証方法

本検証では、下記 2 ケースの工事における樋門と橋台を対象とした(表-1, 写真-1, 写真-2)。

表-1 対象工事および検証方法

ケース	工事名	発注者	検証方法
1	千曲川静間地区築堤護岸他その 1 工事	北陸地方整備局	UAV・スチールテープ
2	熊本 57 号西合志 IC 橋下部工 (A1) 工事	九州地方整備局	UAV・スチールテープ・TLS

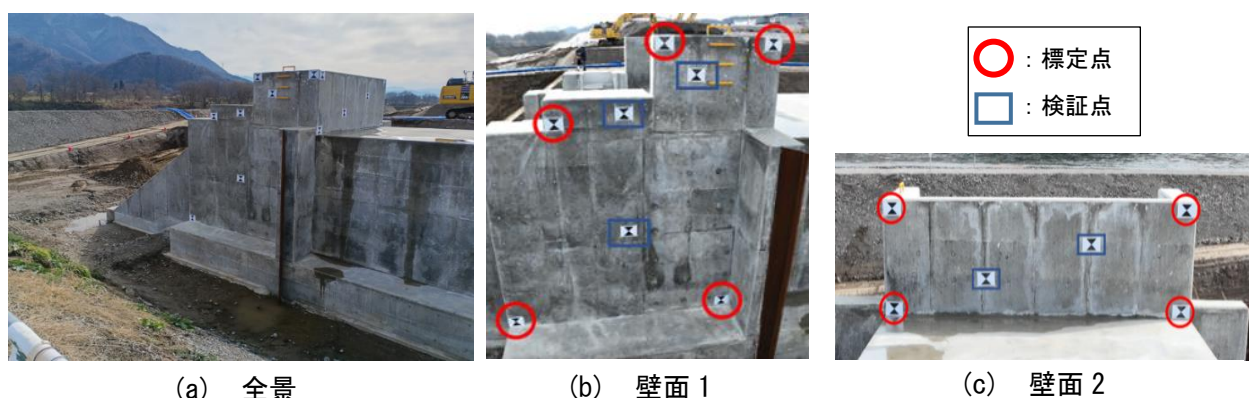


写真-1 ケース 1 対象構造物および対空標識配置

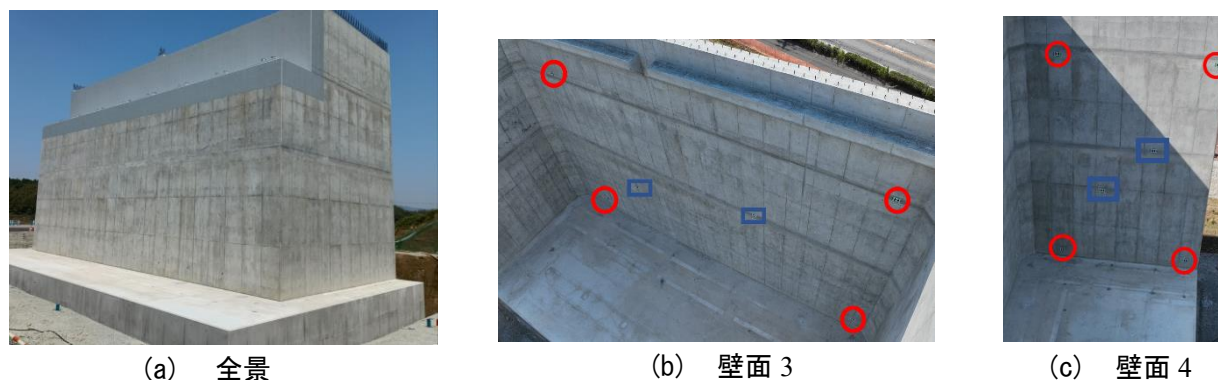


写真-2 ケース 2 対象構造物および対空標識配置

あらかじめ対象構造物に標定点と、精度検証を目的とした検証点を2面に設置し、各点の座標はTS(トータルステーション)を用いて測定した(写真-1, 写真-2). 寸法はスチールテープを用いて測定した. ケース2ではさらにTLSを用いて出来形計測を行った.

UAVは、Matrice 4E(DJI社製)を使用し、飛行および撮影はDJI社製の自動飛行システムを用いて実施した(図-1, 図-2). UAVのカメラの諸元を表-2に示す. 撮影時の飛行速度は1.5m/s以下とした.

解析では、GSD(地上画素寸法)を変更して撮影した複数ケースに対して、SfM解析ソフトのMetashape(Agisoft社製)で点群生成し、GSDが点群の精度に及ぼす影響を評価した.

各ケースの撮影パターンを表-3, 表-4に示す. ケース1について検証した既往の事例¹⁾において、GSDが0.5および1.3mm/pixでも必要十分な精度が得られていることから、ケース2では、効率性も考慮して2つのパターンのみで検証を行った.

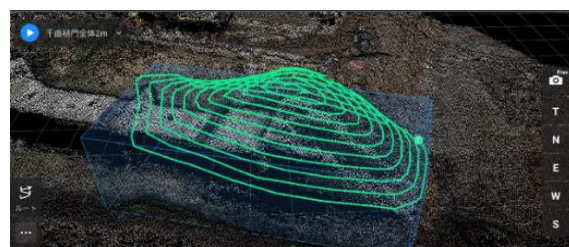


図-1 ケース1 撮影ルート(自動生成)

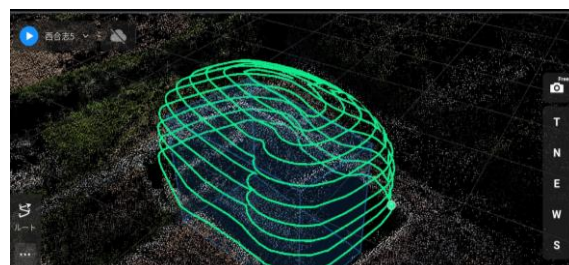


図-2 ケース2 撮影ルート(自動生成)

表-2 撮影カメラの諸元

画素数	5280×3956 (20MP)
センサー	4/3 インチ CMOS
FOV	84°
絞り値	f/2.8~f/11
焦点距離	12mm

表-3 ケース1 撮影パターン

パターン	GSD(mm/pix)	離隔(m)	オーバーラップ率(%) サイドラップ率(%)	撮影枚数(枚)	撮影時間(分)
1-1)	0.3	1	70	755	約10
1-2)	0.5	2	70	551	約7
1-3)	1.3	5	70	515	約6

表-4 ケース2 撮影パターン

パターン	GSD(mm/pix)	離隔(m)	オーバーラップ率(%) サイドラップ率(%)	撮影枚数(枚)	撮影時間(分)
2-1)	0.5	2	70	2181	約25
2-2)	1.3	5	70	1208	約14

生成した3次元点群データの出来形管理への適用性の判定には、国土交通省の「3次元計測技術を用いた出来形管理要領(案)²⁾」,「土木工事施工管理基準及び規格値(案)³⁾」を用いた. 測定精度および計測密度の規格値を表-5に示す.

なお,本検証のケース1における対象構造物は樋門であるが,上記要領には当該工種の点群精度の記載がないため擁壁工の精度規格値を準用した.

本検証では,測定精度に関してケース1では規格値20mmの場合に該当する±5mm以内,ケース2では規格値10mmの場合に該当する±3mm以内,点群の計測密度に関しては「1点以上/0.0025m²」を判定基準として採用し,これらの基準値を満たすか確認した.

表-5 測定精度および計測密度(抜粋)

ケース	工種	測定精度	測密度
1	擁壁工	規格値 50mmの場合: ±15mm 以内 30mmの場合: ±10mm 以内 20mmの場合: ±5mm 以内	1点以上/0.0025 m ² (0.05m×0.05m メッシュ)
2	橋台	規格値 50mmの場合: ±15mm 以内 30mmの場合: ±10mm 以内 20mmの場合: ±5mm 以内 10mmの場合: ±3mm 以内	1点以上/0.0025 m ² (0.05m×0.05m メッシュ)

3. 検証結果

本検証では式(1)により絶対残差を算出し、基準値と比較した。

$$\text{絶対残差} = |\text{点群計測値} - \text{実測値}| \quad (1)$$

3.1 精度確認

全パターンにおける検証点の X 座標, Y 座標, Z 座標それぞれの最大絶対残差を表-6, 表-7 に示す。ケース 1 では, 全パターンにおいて座標の最大絶対残差が $\pm 5\text{mm}$ 以内に収まっており, 測定精度を満足する結果が得られた。同様にケース 2 でも, 全パターンにおいて座標の最大絶対残差が $\pm 3\text{mm}$ 以内に収まっており, 測定精度を満足する結果が得られた。

また, GSD の変更に伴う座標精度の顕著な変化は認められなかった。

3.2 寸法確認

ケース 1 では UAV による空中写真測量による点群データから取得した計測値と, 現場においてスチールテープで計測した実測値との比較を行った。寸法精度の確認については, 表-5 の測定精度の規格値を準用して検討を行った。寸法計測位置を図-3, 各寸法の絶対残差を表-8 に示す。全パターンにおいて, 絶対残差は 3mm 以内であることを確認した。その結果, 求められる測定精度を満足することを確認した。

ケース 2 ではケース 1 で行った比較に加え, TLS による点群データから取得した計測値と, 現場においてスチールテープで計測した実測値との比較を行った。寸法計測位置を図-4, 各寸法の絶対残差を表-9 に示す。UAV の絶対残差については, W2~W4 では求められる測定精度を満足したが, W1 のみ満足しなかった。また, UAV と TLS の各寸法の絶対残差は同程度であり, UAV は TLS と同等の計測精度であった。

表-6 ケース 1 各座標の最大絶対残差 (mm)

GSD (mm/pix)	X 座標	Y 座標	Z 座標	測定精度 (規格値)
0.3	2.55	2.80	0.93	5mm
0.5	2.57	2.11	0.88	
1.3	2.67	2.49	1.00	

表-7 ケース 2 各座標の最大絶対残差 (mm)

GSD (mm/pix)	X 座標	Y 座標	Z 座標	測定精度 (規格値)
0.5	2.32	1.90	0.90	3mm
1.3	2.43	2.84	1.74	

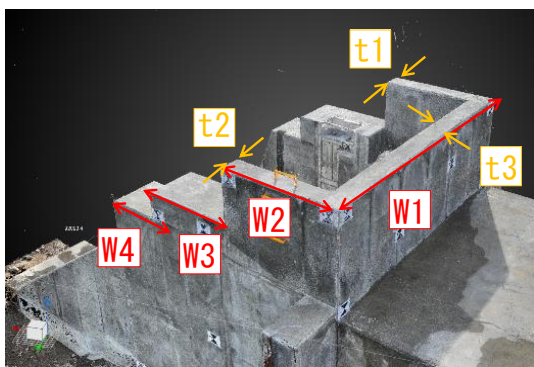


図-3 ケース 1 点群の計測図

表-8 ケース 1 各寸法の絶対残差 (mm)

GSD (mm/pix)	W1	W2	W3	W4	t1	t2	t3	測定精度 (規格値)
0.3	3	2	1	3	0	2	0	5mm
0.5	1	1	2	1	1	0	1	
1.3	2	1	1	2	2	2	1	



図-4 ケース 2 点群の計測図

表-9 ケース 2 各寸法の絶対残差 (mm)

対象	GSD (mm/pix)	W1	W2	W3	W4	測定精度 (規格値)
TLS		1	1	3	1	3mm
UAV	0.5	4	2	1	3	
	1.3	4	2	2	3	

3.3 密度確認

密度の確認は TREND-POINT(福井コンピュータ社製)の 3D 密度確認機能で確認した。全ケースにおいて生成された点群密度は、対象壁面において規格値である「1 点以上/0.0025m²」を満足することを確認した。結果として全ケース、自動飛行 1 回で鮮明な点群が作成できた(図-5、図-6)。しかし、本検証の対象ではない面の一部において、点群密度が不十分な箇所が確認された(図-7)。その原因として、塗装面での光の反射や日射による強い陰影の影響が考えられる。これらの箇所では、塗装面での光の反射や日射による強い陰影の影響等、SfM 解析の特性に起因して計測密度が不十分になったと考えられる。

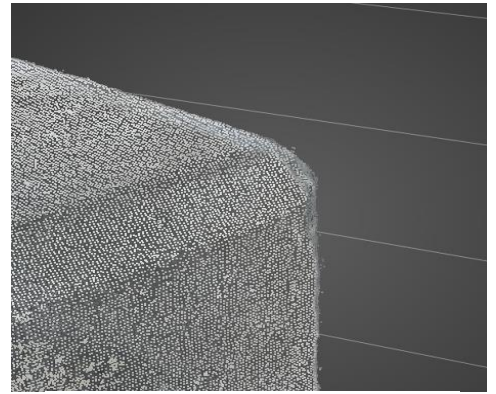


図-5 ケース 1 代表的点群生成

4. 考察

本検証において、GSD の変更が各座標の最大絶対残差に及ぼす影響が顕著に認められなかった要因として、TS の測定精度が一般に 2～3mm 程度であるのに対し、本検証で得られた絶対残差も同程度の値を示したことから、GSD の変更に伴う精度の差異が明確に現れなかったと考えられる。

寸法確認において、ケース 2 で W1 が測定精度を満足しない結果となった要因として、W1 の寸法計測に用いた面の点群密度が不十分であったことが考えられる(図-7)。その結果、寸法を適切に計測できず、求められる測定精度を満足しない結果となったと考えられる。また、W1 の計測に用いた面は標定点から離れた位置にあり、標定点の配置による点群精度への影響があった可能性も考えられる。

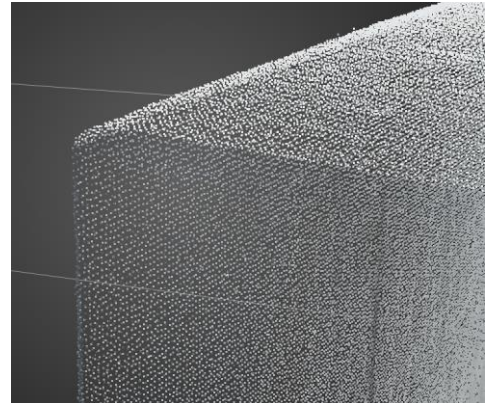


図-6 ケース 2 代表的点群生成例

5. 結論

本検証では、樋門および橋台を対象として、UAV の自動飛行システムを用いた空中写真測量による構造物出来形管理への適用性を検証した。その結果、ケース 1 では検証点の最大絶対残差が±5 mm 以内、ケース 2 では±3 mm 以内となり、その結果、すべてのケースで対象工種における測定精度の基準を満足した。点群の計測密度についても、すべてのケースで規格値を満足した。

現場作業において、UAV による空中写真測量は従来の TLS と比較して、撮影時間の短縮や高所部の撮影が容易であることに加え、死角の低減が期待できる点で優位性を有する。そのため、実務への適用に際しては、作業効率や使用機材の性能などを総合的に勘案し、適切な GSD を設定することが重要である。

UAV の自動飛行システムを用いた空中写真測量により、高度な操縦技術を必要とせず安定した撮影を行うことができ、国土交通省が定める測定精度および計測密度の基準を満足する 3 次元点群データを簡便に作成できることを確認した。

以上より、UAV による自動飛行システムを用いた空中写真測量は構造物出来形管理に十分適用可能であると考えられる。今後はさらなる複数のケースで検証し結果の再現性を確認する。

参考文献

- 1) 音田 有輝, 椎谷 成孝, 若月 和人, 吉田 雄一: 構造物出来形管理に対する自動飛行システムを用いた UAV の適応性検証, 令和 8 年度土木学会全国大会 第 81 回年次学術講演会, VI-1492
- 2) 国土交通省: 3 次元計測技術を用いた出来形管理要領 (案), 令和 7 年 3 月.
- 3) 国土交通省: 土木工事施工管理基準及び規格値 (案), 令和 7 年 3 月.



図-7 密度不足例