

(62) PPKを用いた高効率で高精度な 3次元点群取得手法の研究

永峰 義寛¹・尾崎 良明²・阪田 暁³

¹ 非会員 中央復建コンサルタンツ株式会社 総合技術本部 (〒533-0033 大阪府大阪市東淀川区東中島 4-11-10)

E-mail: nagamine_y@cfk.co.jp

² 正会員 中央復建コンサルタンツ株式会社 鉄道系部門 (〒533-0033 大阪府大阪市東淀川区東中島 4-11-10)

E-mail: osaki_y@cfk.co.jp

³ 正会員 独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 九州新幹線建設局 技術管理課 (〒812-8622 福岡市博多区祇園町 2-1)

E-mail: sakata.aki-f8r4@jrtr.go.jp

国土交通省は 2025 年度に全事業での BIM/CIM の原則適用を目指す方針を示した。BIM/CIM では 3 次元モデルの活用が必須となるが、既存資料には 3 次元データ自体の不備、若しくは必要な部分の 3 次元データが欠けている事も多い。加えて、経年変化等の影響で資料と現況が著しく異なり、現況の 3 次元モデルの構築に時間を要する場合が多々ある。本稿では 3 次元モデル作成に資する 3 次元点群データを、Real Time Kinematic (以下、RTK) 機能を搭載した UAV と Post Processing Kinematic : 後処理キネマティック (以下、PPK) を採用し、写真撮影の絶対位置を高精度に確定することで現地に標定点を設置せず、Structure from Motion (以下、SfM) 技術を用いて、高効率・高精度に 3 次元点群を取得する研究を行った。

Key Words: *bim/cim, 3d model, rtk, ppk, sfm*

1. はじめに

BIM/CIM では、計画、調査、設計段階から 3 次元モデルを導入することで、一連の建設生産・管理システムの効率化・高度化を図ることを目的としている。

国土交通省は「CIM 導入ガイドライン (案) 第 1 編 共通編¹⁾」「BIM/CIM 活用ガイドライン (案) 共通編²⁾」等々の整備を行った。令和 2 年度は BIM/CIM の適用範囲が拡大され、要求事項も増加している。要求を満たすためには、高精度な 3 次元モデルが必須である。

本稿では、3 次元モデル作成に資する高精度な 3 次元点群データを、UAV を用いて効率的に取得する手法の研究を行った。

測量マニュアル (案)³⁾に則り、現地に標定点と検証点 (以下、GCP) を設置して取得した 3 次元点群を「正規データ」とし、UAV の位置情報 (撮影位置) を PPK で更新し取得した 3 次元点群を「実験データ」とした。空中写真の取得には、RTK 機能を搭載した DJI 社製の UAV 「Phantom 4 RTK」を使用した。



図-1 DJI 社製 Phantom 4 RTK

2. 3次元点群データ取得手法

SfM ソフトを用い、2 種類の手法で 3 次元点群の取得を行った。取得手法は次の通りで、UAV を用いた公共

表-1 Metashape の主要な解析条件

写真のアライメント	最高
高密度クラウド	中
メッシュ構築	サーフェスタ입 : 自由形状(3D)
	ソースデータ : 高密度クラウド
	ポリゴン数 : ポリゴン中
テクスチャ構築	マッピング : 汎用
	ブレンドモード : マイク(標準)
	テクスチャサイズ : 4096×1

現場は対象面積が約 15,000 m²、標高差が 46m で比高の大きい地域に当たり、複数の基準面を設ける³⁾ことが推奨されるが、本研究ではより厳しい条件下において PPK の精度⁴⁾を確認するため、同高度での空中写真撮影、即ち単一の基準面の空中写真の取得を行った。

3次元点群取得においては、オーバーラップ 90%、サイドラップ 60%、対地高度 100m（地上画素寸法 0.03m/px 以内：3次元点群データの位置精度は 0.20m 以内³⁾）を基本とし、格子状のコースで空中写真 586 枚の撮影を行った。正規データ、実験データの双方で、SfM 技術を用いる Agisoft Metashape Professional (1.6.2.10247)（以下、Metashape）を用い、標定点の有無以外の解析条件を同様とし 3次元点群を得た。解析条件を表-1 に示す。

(1) 正規データの作成

GCP の設置は、より正確なデータ取得を目的に、3次元点群の位置精度が 0.05m 以内に対応できる間隔³⁾とし、標定点 8 点と検証点 2 点を設置した。

GCP を対象に RTK 測量を実施し、各々の座標値と標高値を取得し本研究の「基準データ」とした。標定点の座標値と標高値（基準データ）を基に Metashape で解析し、「正規データ」を取得した。設置した GCP の設置位置図を図-2 に示す。

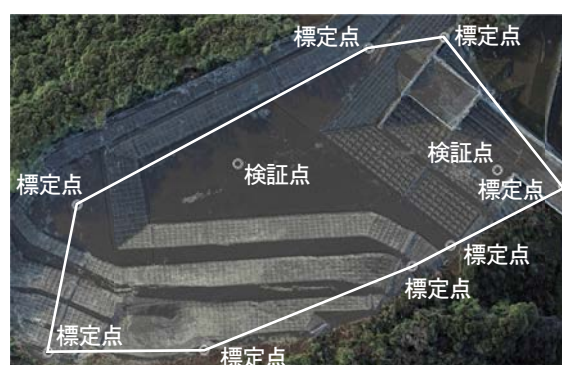


図-2 GCP 設置位置図

(2) 実験データの作成

GCP を用いない場合、撮影の絶対位置の精度は取得する 3次元点群データの位置精度に大きな影響及ぼす。

そのため、UAV が記録した空中写真の Exchangeable image file format（以下 Exif）情報を、電子基準点を固定局とした撮影位置の誤差情報を用い、PPK で高精度な Exif 情報へ更新を行い、Metashape で解析した「実験データ」を取得した。

3. 取得データの比較

RTK 測量で取得した「基準データ」（標定点 8 点と検証点 2 点）の座標値を基準とするデータ比較を行った。

「基準データ」－「正規データ」と「基準データ」－「実験データ」の 2 種類について、基準データとの座標値の離隔（以下、水平絶対誤差）及び標高誤差、標定点を結んだ多角形の点間距離最大誤差率及び内角最大誤差率の 4 項目各々の標準偏差（以下、 σ ）、二乗平均平方根誤差（以下、RMSE）に着目し取り纏めた。

(1) 水平絶対誤差と標高誤差

基準データを基に、正規データ、実験データの誤差ベクトルを 100 倍で表現した水平絶対誤差のイメージ図を図-3 に示す。

図-3 に示す通り、「基準データ」からの「正規データ」及び「実験データ」に誤差方向に特段の規則性はないが、水平絶対誤差は明らかな差が認められ、正規データと比較し、実験データの方が誤差は小さい。

「基準データ」－「正規データ」及び「基準データ」－「実験データ」の水平絶対誤差と標高誤差の差分抽出を行い、それぞれの結果を整理し表-2 に示す。

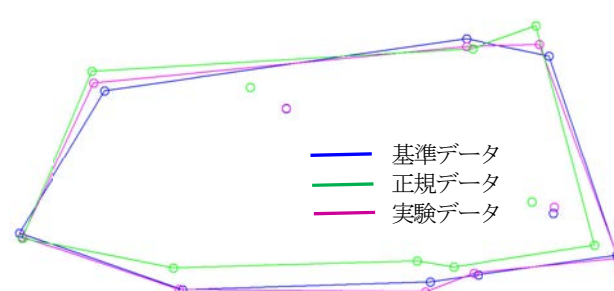


図-3 水平絶対誤差イメージ図

表-2 基準データからの水平絶対誤差と標高誤差

位置 誤差	水平絶対誤差(m)		標高誤差(m)	
	正規	実験	正規	実験
σ	0.024	0.012	0.034	0.036
2σ	0.047	0.024	0.068	0.072
平均値	0.061	0.018	-0.010	-0.034
RMSE	0.066	0.022	0.035	0.050
最大絶対値	0.107	0.039	0.065	0.086
最小絶対値	0.015	0.001	0.006	0.016

a) 水平絶対誤差

空中写真は地上画素寸法 0.03m/px 以内で撮影したため、取得する 3 次元点群データの位置精度は 0.20m 以内³⁾となるが、正規データにおける基準データとの水平絶対誤差は $\sigma=0.024\text{m}$ 、 $\text{RMSE}=0.066\text{m}$ 、誤差の最大絶対値は 0.107m、最小絶対値は 0.015m であった。

これは地上画素寸法 0.02m/px 以内で空中写真を取得した場合の精度、0.10m 以内³⁾に近い精度であり、標高差が大きかったにもかかわらず、十分な精度を確保できたと言える。

実験データにおける水平絶対誤差は $\sigma=0.012\text{m}$ 、 $\text{RMSE}=0.022\text{m}$ 、最大絶対値は 0.039m、最小絶対値は 0.001m であった。これは地上画素寸法 0.01m/px 以内で空中写真を取得した場合の精度、0.05m 以内³⁾であり、標高差が大きかったにもかかわらず、非常に高い精度を確保できたと言える。

b) 標高誤差

正規データでは $\sigma=0.034\text{m}$ 、 $\text{RMSE}=0.035\text{m}$ 、誤差の最大絶対値は 0.065m、最小絶対値は 0.006m であった。

これは地上画素寸法 0.02m/px 以内で空中写真を取得した場合の精度、0.10m 以内³⁾であり、標高差が大きかったにもかかわらず、高い精度を確保できたと言える。

実験データでは $\sigma=0.036\text{m}$ 、 $\text{RMSE}=0.050\text{m}$ 、誤差の最大絶対値は 0.086m、最小絶対値は 0.016m であった。これは地上画素寸法 0.02m/px 以内で空中写真を取得した場合の精度、0.10m 以内³⁾であり、標高差が大きかったにもかかわらず、高い精度を確保できたと言える。

(2) 標定点の点間距離誤差と多角形の内角誤差

標定点を結んだ多角形の点間距離及び多角形の内角について「基準データ」－「正規データ」及び「基準データ」－「実験データ」各々の差分を抽出し、最大・最小の誤差率算出を行った。それぞれの結果を整理し表-3、表-4 に示す。

表-3 標定点の点間距離誤差

標定点の 点間距離誤 差	正規データ		実験データ	
	誤差 (m)	誤差率 (%)	誤差 (m)	誤差率 (%)
σ	0.040	—	0.023	—
2σ	0.081	—	0.045	—
平均値	0.005	—	-0.005	—
RMSE	0.041	—	0.023	—
最大絶対値	0.071	0.33	0.044	0.16
最小絶対値	0.006	0.02	0.004	0.01

表-4 多角形の内角誤差

多角形の 内角誤差	正規データ		実験データ	
	誤差 ($^{\circ}$ ' ")	誤差率 (%)	誤差 ($^{\circ}$ ' ")	誤差率 (%)
σ	0-05-47	—	0-02-59	—
2σ	0-11-34	—	0-05-57	—
RMSE	0-10-23	—	0-06-36	—
最大絶対値	0-17-49	0.24	0-09-47	0.09
最小絶対値	0-01-08	0.05	0-01-48	0.02

a) 標定点の点間距離誤差

正規データにおける基準データとの点間誤差は $\sigma=0.040\text{m}$ 、 $\text{RMSE}=0.041\text{m}$ 、最大絶対値は 0.071m、最小絶対値は 0.006m であった。最大値であってもその誤差率は 0.33%と 0.5%未満であり、点間距離に大きな変動はないと言える。

実験データにおける基準データとの点間誤差は $\sigma=0.023\text{m}$ 、 $\text{RMSE}=0.023\text{m}$ 、最大絶対値は 0.044m、最小絶対値は 0.004m であった。最大値であってもその誤差率は 0.16%率と 0.5%未満であり、点間距離に大きな変動はないと言える。

b) 多角形の内角誤差

正規データにおける基準データとの内角誤差は $\sigma=0^{\circ} 5' 47''$ 、 $\text{RMSE}=0^{\circ} 10' 23''$ 、誤差の最大絶対値は $0^{\circ} 17' 49''$ 、最小絶対値は $0^{\circ} 1' 8''$ であった。最大値であってもその誤差率は 0.24%と 0.5%未満であり、多角形の内角に大きな変動はないと言える。

実験データにおける基準データとの内角誤差は $\sigma=0^{\circ} 2' 59''$ 、 $\text{RMSE}=0^{\circ} 6' 36''$ 、誤差の最大絶対値は $0^{\circ} 9' 47''$ 、最小絶対値は $0^{\circ} 1' 48''$ であった。最大値であってもその誤差率は 0.09%と 0.1%未満であり、多角形の内角に大きな変動はないと言える。

4. 比較結果の考察

(1) 各点の水平絶対誤差と相対誤差の考察

正規データでは標定点 8 点と検証点 2 点設置し、空中

写真 586 枚を、UAV を用いた公共測量マニュアル（案）³⁾に則り解析し $\sigma=0.024\text{m}$ 、 $\text{RMSE}=0.066\text{m}$ の結果を得た。

実験データでは同じ写真のすべての Exif 情報を PPK で更新し、GCP を考慮しない解析を行った。解析の結果は表-2 に示す通り、各点の絶対位置は $\sigma=0.012\text{m}$ 、 $\text{RMSE}=0.022\text{m}$ と高精度の結果を得た。また、表-3 に示す通り標定点間距離の最大誤差率は、正規データ 0.33% に対し実験データ 0.16% と高精度な結果が得られ、表-4 に示す通り、各点を頂点とする多角形の内角の最大誤差率は正規データ 0.24% に対し実験データ 0.09% とより高精度な結果を得た。

上述の通り、実験データの各標定点は正規データと比較し、絶対位置と図形的な相対性において水平誤差が小さい。よって、PPK で更新した Exif 情報を使えば標定点を設置する事なく、高精度な結果を得ることが可能と考える。

(2) 各点の標高誤差について

空中写真の Exif 情報は GNSS の情報より記録される。

一般に GNSS の標高誤差は、水平誤差と比較し大きい。併せて、研究現場は 2019 年より始まった航空重力測量⁵⁾ 未完地域であり、既存ジオイド高誤差の影響も受ける。

表-2 に示す通り、正規データと実験データの精度較差が小さかったことは、水平位置と比較して標高精度の低い Exif 情報を用いて解析したことが原因と考えられる。

しかし、取得した標高誤差は正規データ、実験データ共に最大 0.10 m 以内と高精度な結果が得られ、PPK で更新した Exif 情報を使えば標定点を設置する事なく、高精度な結果を得ることが可能と考える。

5. まとめ

SfM 技術では、現地に GCP を設置し撮影位置の補正等を行い、3 次元点群の位置精度向上を図る。しかし、GCP の設置は多大な手間と時間を要し非効率である。

本研究では、撮影位置の Exif 情報を PPK で更新し、空中写真撮影位置を直接補正することで 3 次元点群の位

置精度の向上を図った。

研究の結果、水平誤差については GCP を設置した場合と同等以上の精度が得られ、標高誤差については同等の精度が得ることが可能で、GCP の設置を大幅に削減できることが分かった。併せて、標高差に応じて複数の基準面を設け、地上画素寸法 0.01m/px 以内の画像取得を行えば、更に高精度な 3 次元点群の取得が期待できる。

令和 2 年 3 月、「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）」⁶⁾で出来形計測において PPK を用いた解析が採用されたが、本研究で示した通り、高精度に取得した 3 次元点群データは出来形計測以外でも、起工測量、現地測量、3 次元モデル作成、被災地の迅速な計測など、様々な活用が可能である。

今後、3 次元点群取得における現場作業の省力化や高精度化等の更なる検討を実施し、BIM/CIM の推進に貢献できれば幸いである。

謝辞：今回の研究に際し、実証実験をご了承いただき、作業現場の日程調整など多大なるご尽力を賜った、独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 九州新幹線建設局の関係各位に対し、ここに深謝の意を表する。

参考文献

- 1) 国土交通省：BIM/CIM 活用ガイドライン（案）共通編，2020。
- 2) 国土交通省国土地理院：UAV を用いた公共測量マニュアル（案）第 3 編 3 次元点群作成，2017。
- 3) 国土交通省国土地理院：UAV を用いた公共測量マニュアル（案）第 3 編 3 次元点群作成，2017。
- 4) 松岡祐仁：RTK-UAV を利用した高精度簡易測量技術（デイリードローン RTK），国土交通省 中国地方整備局 中国技術事務所 防災技術センター 令和元年中国地方建設技術開発交流会，＜http://www.cgr.mlit.go.jp/ctc/tech_dev/kouryu/kadai31.htm#shimane>，入手日付：（入手 2020.3.11）。
- 5) 国土交通省国土地理院：航空重力測量，＜https://www.gsi.go.jp/buturisokuchi/grageo_ag.html>，入手日付：（入手 2020.5.11）。
- 6) 国土交通省国土地理院：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），2020。