

UAVを用いた3次元出来形計測と精度検証

石田 大輔・服部 聡子・織田 和夫 (アジア航測株式会社)

近藤 弘嗣 (国土交通省総合政策局)

長山 真一 (国土交通省国土技術政策総合研究所)

重高 浩一 (元国土交通省国土技術政策総合研究所 (現 内閣府))

1. はじめに

国土交通省では、ICT (Information and Communication Technology) の全面的な導入により建設生産システム全体の生産性向上を図る i-Construction を推進している。施工管理における完成形状の出来形計測では、TS (トータルステーション) を用いた従来手法に加えて、

UAV (Unmanned Aerial Vehicle) などを用いた3次元出来形計測の導入が進められている¹⁾ (図1参照)。

UAV は、地図作成、災害調査や、ダム、橋梁の点検調査など多くの分野での活用が期待されており、精度を検証した事例も多く蓄積されてきている。しかしながら、これらの検証は、地形測量を対象とした事例が多く、3次元出来形計測を対象とした精度検証の事例は少ない^{2) 3) 4)}。

そこで、本研究では、UAV を用いた出来形計測の適切な手法を得るため、実際に完成形状の盛土を対象に UAV を用いた3次元出来形計測を行い、精度を検証した。はじめに撮影条件を複数設定し、UAV による撮影を行った。次に検証点における水平・垂直方向の精度検証と TS 取得断面における断面形状の比較の2種類の精度検証を行った。本稿ではその結果につ

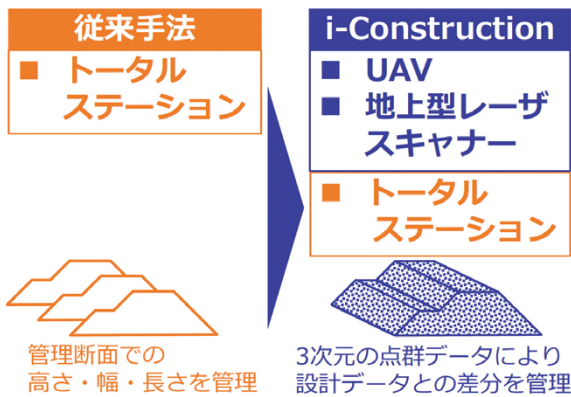


図1 i-Constructionの導入に伴う土工における出来形管理計測のイメージ

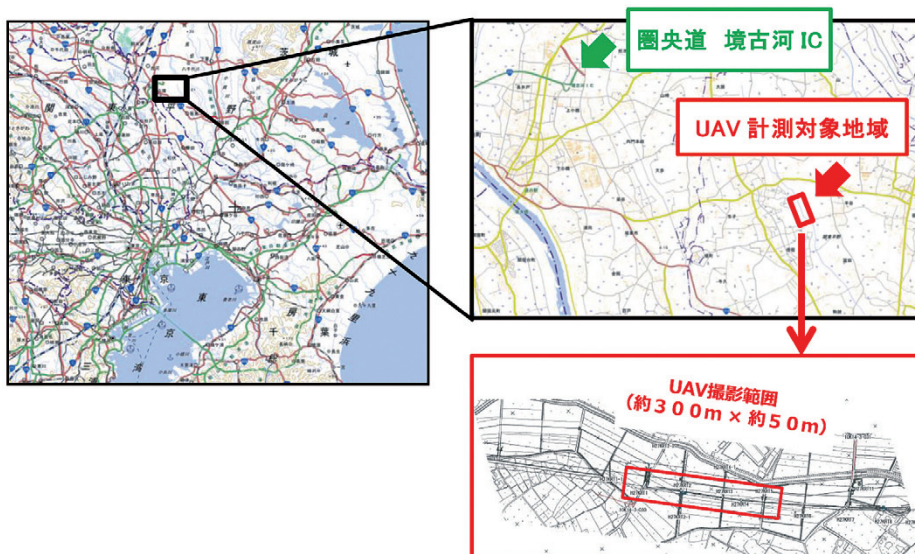


図2 対象地域

表1 撮影条件

撮影方向	対地高度	地上分解能	1枚あたりの撮影エリア	撮影写真枚数	コース数
垂直撮影	50m	12mm	横 73m×縦 49m	292枚	6
	150m	37mm	横 220m×縦 146m	37枚	2
斜め撮影	約 50m	—	—	64枚	2



項目	内容
機体名	DJI Spreading Wing S900
大きさ(幅/高さ)	900×535 (mm)
飛行時間	約15分
飛行距離	約1,000m

項目	内容
機種名	SONY NEX-7
センサー	APS-Cサイズ 約2,430万画素
レンズ	E 16mm F2.8
総重量	約417g

図3 使用機材

いて報告する。

2. 3次元出来形計測

2.1 計測の概要

本研究の3次元出来高計測は、図2に示すとおり関東地方整備局北首都国道事務所管内の圏央道整備地区における延長約300m、幅約50mの土工工事が既に完了している区間で行った。

本研究に使用した機材を図3に示す。UAVは、DJI社製 Spreading Wings S900を使用した。カメラはソニー社製 NEX-7(APS-Cサイズ、2,430万画素)に16mm(F2.8)純正レンズを装着し、UAVにジンバルを介して搭載した。

計測はUAVによる出来形計測と、標定点、検証点の計測を含めて2015年11月の2日間で行った。天候は両日ともに快晴、風速は約1m/sであった。午後になると北側の法面が影となる

ため、影の影響を避けるために撮影は午前中に行った。

2.2 撮影条件

UAVによる撮影の条件を表1に示す。垂直写真撮影は、自律飛行により行った。また、法面やボックスカルバートのような土木構造物の側面への撮影を考慮し、斜め写真撮影を、地上オペレータによる遠隔操作で行った。垂直写真撮影では、対地高度の違いによる3次元点群の精度の比較や撮影枚数の違いによる作業の効率化を考慮するため、対地高度は50mと150mの2つのパターンで行った。オーバーラップは80%、サイドラップは60%に設定した。

2.3 撮影実施

本研究のUAVによる撮影コースを図4に示す。対象とする盛土を天端から法面にかけて確



図4 撮影コース

- 垂直(50m)
- 垂直(150m)
- 斜め

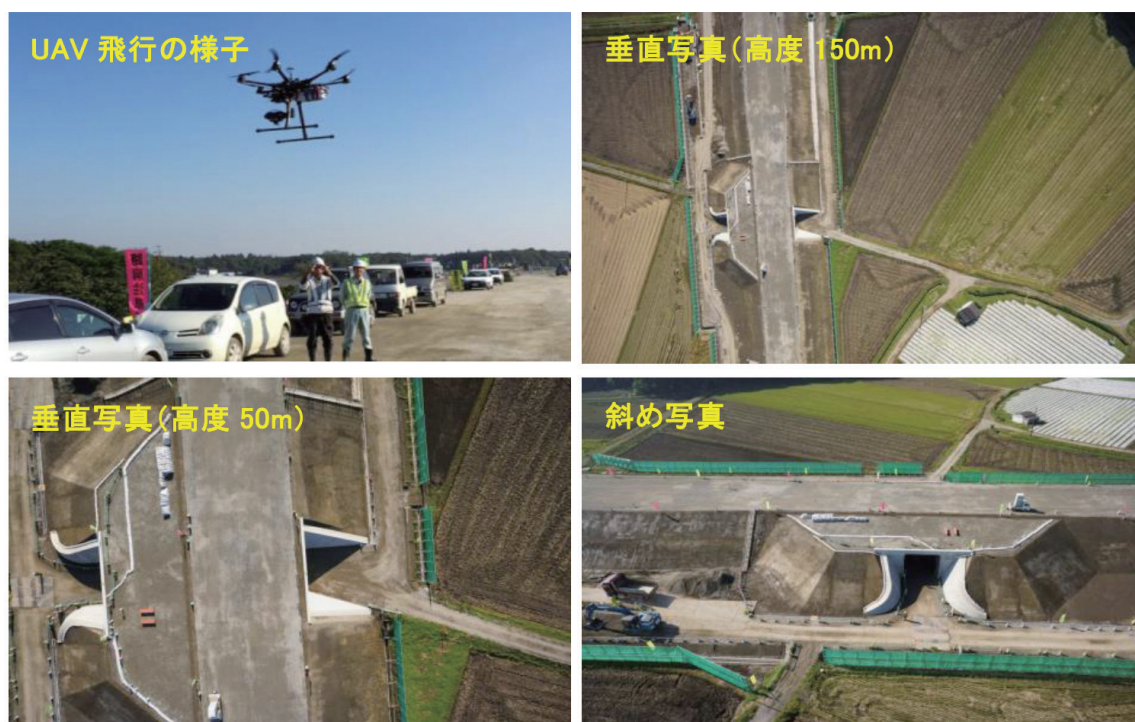


図5 撮影状況

実にモデル化するため、撮影範囲は、法尻から計測対象より外側に約10m拡大して設定した。カメラの焦点距離およびシャッタースピードは固定し、シャッター操作は専任オペレータが遠隔で操作した。撮影の状況を図5に示す。垂直写真および斜め写真ともに影の影響が少ない写真

を撮影できた。

2.4 標定点・検証点の設置

本研究で使用した標定点・検証点は、図6に示すとおり天端上を横断するように配置したほか、法尻付近で対象範囲全体を囲うように配



図6 標定点・検証点の配置図



図7 標定点・検証点設置の様子

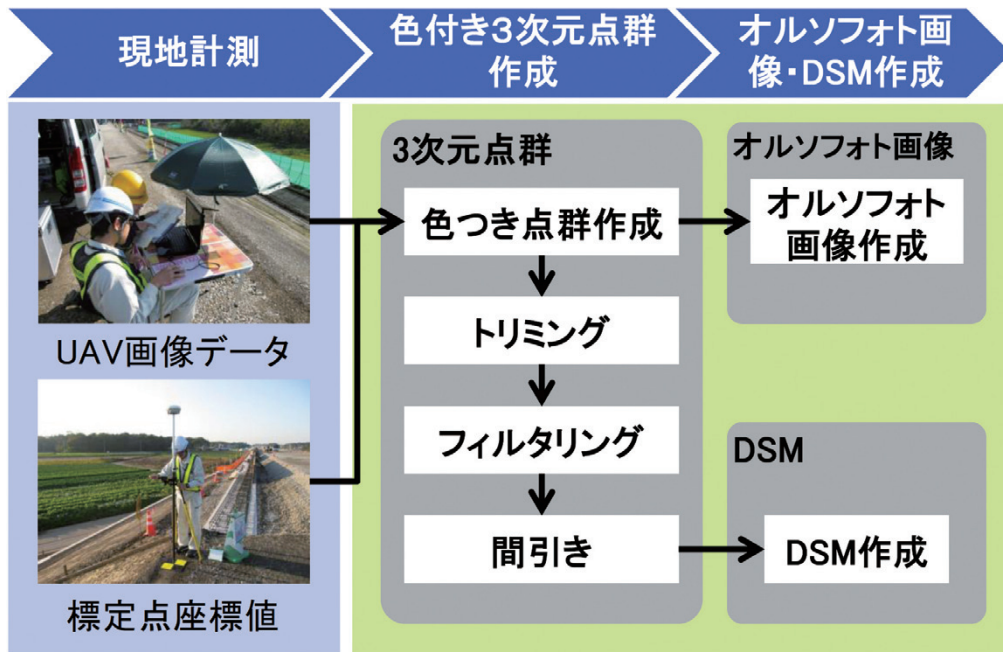


図8 データ作成フロー

置した。標定点・検証点の各点には、図7に示すとおり28cm角の対空標識を設置した。なお、解析時に標定点数を任意に設定し、残りを検証点として設定して複数のケースで解析を行うため、標定点と検証点の区別は行わずに対空

標識の設置および観測を行った。

2.5 3次元点群・DSM・オルソフォト画像作成

本研究では、UAVにより得られた画像データと標定点座標値から、3次元点群、オルソフォ

ト画像、および DSM (Digital Surface Model) を図6に示すフローに従い作成した。出力フォーマットは、3次元点群は LAS とし、DSM・オルソフォト画像は Geotiff とした。

各データの作成概要は以下のとおりである。

- ① 3次元点群の作成には、SfM (Structure from Motion) ソフトウェアである Pix4D 社の Pix4Dmapper Pro を使用した。内部標定要素の設定は、カメラの公称値を初期値として与え、Pix4Dmapper Pro のセルフキャリブレーションによる値の補正を行うものとした。点群生成密度は、Pix4Dmapper Pro の「High」「Optimal」「Low」の三段階のうち標準設定である Optimal モードを使用した。作成した色つき3次元点群を図7に示す。
- ② オルソフォト画像の作成は、Pix4Dmapper Pro を使用した。地上解像度の設定は、

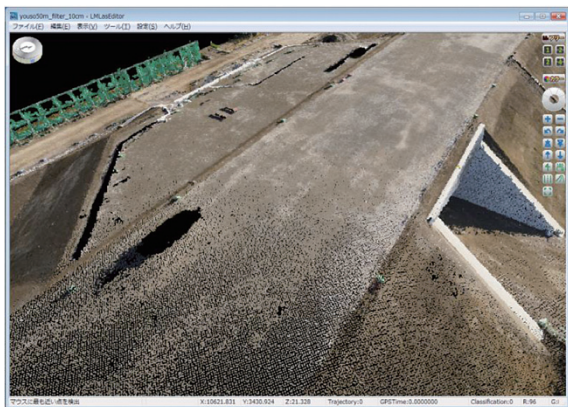


図7 作成した3次元点群

オルソフォト画像



DSM

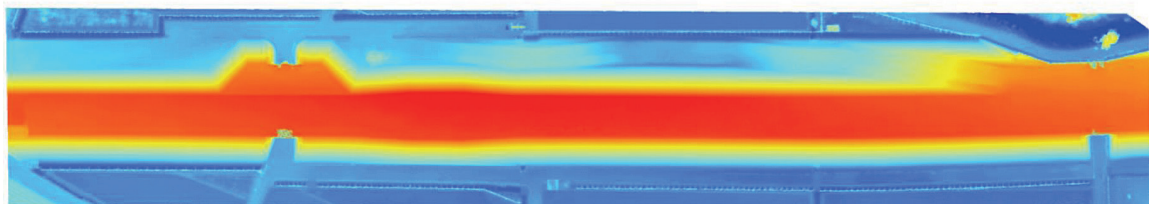


図8 作成したオルソフォト画像とDSM

UAV により得られた画像データと同等の1cm /1pixel とした。

- ③ DSM は、トリミング、フィルタリング、間引きの工程を経て作成した。トリミングでは、作成した3次元点群に対し、計測対象範囲以外を削除した。フィルタリング処理では、トリミングした3次元点群に対して撮影時に除外できなかった車両・ロードコーン・看板や表面が判読できる植生などの不要物を取り除いた。間引きでは、フィルタリングした3次元点群に対して点群データを10cm³の立方体領域に区切り、各立方体の中心に最も近い点を残し、その他の点を削除する方法で処理を行った。

作成したオルソフォト画像と DSM を図8に示す。SfM ソフトウェアで作成した3次元点群は、その点群密度にばらつきができる。間引き処理により点群の密度が均一化された3次元点群データは、その後のコンピュータでの取扱いが容易になるため、現地説明会や検査での活用が期待できる。

3. 精度検証

3.1 検証条件

検証条件は、表2に示すとおり、対地高度、撮影方向、標定点数や初期カメラ位置を考慮し

表2 検証条件

検証ケース		1	2	3	4	5	6
解析条件	対地高度(m)	50	50	50	50	50	150
	撮影方向	垂直	垂直	垂直	垂直+斜め	垂直	垂直
	標定点数	6	12	4	6	6	6
	初期カメラ位置	なし	なし	なし	なし	あり	なし

標定点数の精度への影響

斜め写真の精度への影響

初期カメラ位置の精度への影響

対地高度の精度への影響

で6ケースを設定した。標定点は、外部標定点として計測対象全体を囲む4点を最小構成として配点し、ケースによっては任意に中間点を設定した。内部標定点は、天端上で任意に設定し、残りは解析に使用せずに検証点として使用した。初期カメラ位置は、UAV 本体に GNSS 機器を付帯させてカメラ位置を取得した。6ケー

スの検証条件のそれぞれ設定した目的は、次のとおりである。

ケース1からケース3は、対地高度を 50m に統一し、標定点数を変化させ、解析時の標定点数の違いによる精度への影響の確認を目的としている。ケース4は、ケース1の条件に斜め写真を追加し、斜め写真の有無による精度へ

表3 検証点における RMS 誤差

ケース		1	2	3	4	5	6
検証点	水平	0.018m	0.015m	0.020m	0.021m	0.025m	0.031m
RMS 誤差	垂直	0.023m	0.019m	0.016m	0.026m	0.033m	0.208m

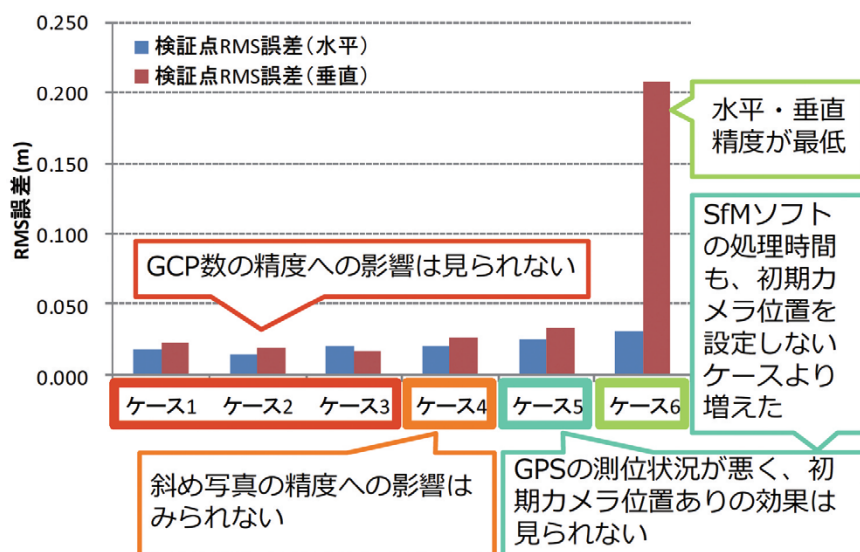


図9 検証点における RMS 誤差

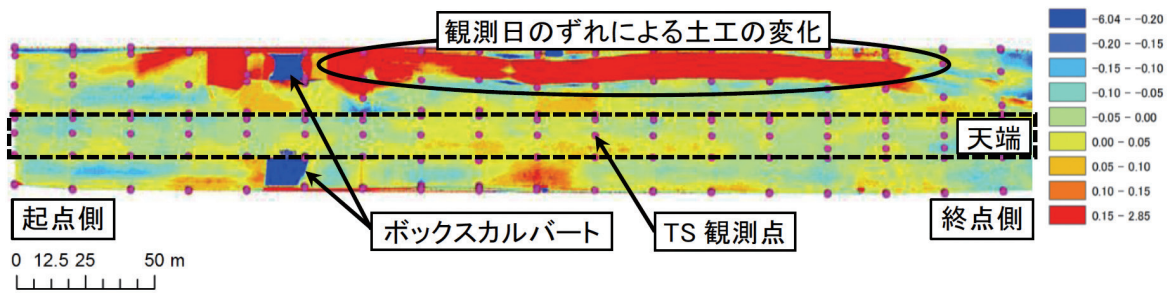


図10 UAV-TS 差分図

の影響の確認を目的としている。ケース5は、ケース1の条件に初期カメラ位置を追加し、初期カメラ位置の有無による精度への影響や、処理時間の効率化の確認を目的としている。ケース6は、ケース1の条件のうち対地高度を150mに設定し、対地高度の違いによる精度への影響の確認を目的としている。

3.2 検証点での精度検証

検証条件で設定した6ケースの精度検証の結果を表3および図9に示す。垂直写真のみを使用し、初期カメラ位置を設定しないケース1から3では、標定点の点数の多少によらず水平・垂直ともに同様の精度を示した。斜め写真を加えたケース4と初期カメラ位置を設定したケース5では、垂直精度がやや落ちた。対地高度が150mのケース6では、垂直精度が大幅に低下した。

3.3 トータルステーションとの比較

ケース1の成果から作成したDSM(以下、「UAV-DSM」という。)から、正解データとしてTSで観測した結果から作成したDSM(以下、「TS-DSM」という。)を差し引いた差分図を図10に示す。凡例は、UAV-DSMがTS-DSMと比較して、赤に近い色ほど標高が高く、青に近い色ほど標高が低いことを示している。その結果、天端上においては概ね5cm以内の差分となり、出来形管理基準として許容する計測誤差 $\pm 50\text{mm}^5$ の範囲内である。なお、図10の上部の

赤色の着色部分は、TSの計測時点とその後のUAVによる計測時点の間に実施された土工工事の結果が反映されている。

4. まとめ

本研究では、UAVを用いた出来形計測の適切な手法を得るため、実際にUAVを用いて3次元出来形計測とその精度検証を行った。

その結果を踏まえ、効率的かつ安定的に計測誤差数センチ程度に入ることとした。

対地高度は地上画素寸法に関係し、高度が高くなるにつれて得られる画像は粗くなり精度が低下する。対地高度150m(ケース6)では垂直精度が20cm程度であったため、従来手法の代替として使用できない。一方で、対地高度50m(ケース1からケース5)では、誤差は5cm以内に入り、従来手法の代替として有用であることが分かった。すなわち地上画素寸法は1cm程度に設定することが基本と考えられる。

標定点の点数は、一般的に配置数が多いほど精度が向上するが、本研究では配置数の増減による精度への影響はみられなかった。本研究の解析範囲が小面積かつ平坦地であるために影響は少なかったと考えられる。

斜め写真の追加は、精度の低下に大きな影響を与えなかった。ボックスカルバートのような構造物や垂直に切り立った地形が含まれる場合、垂直写真と斜め写真の両方を使用することは高密度な点群の作成に有効と考えられる。

初期カメラ位置の設定は、3次元点群作成時

の処理時間の短縮を期待したが、GNSS 機器の測位状況が悪く、実際には初期カメラ位置を設定しないケースよりも処理時間が長くなった。

■謝辞

本研究を進めるにあたり、国土交通省関東地方整備局様には計測現場をご提供いただくとともに、撮影時においては車両の移動などのご協力をいただきました。一般社団法人日本建設機械施工協会様には現地 TS 測量成果をご提供いただきました。ここに記しまして御礼申し上げます。

■参考文献

- 1) i-Construction 委員会：i-Construction ～建設現場の生産性革命～、〈<http://www.mlit.go.jp/common/001127288.pdf>〉、2016
- 2) 早坂寿人、大野裕幸、大塚力、関谷洋史、龍繁幸、中野一也、小林浩、鈴木英夫：UAV による撮影画像を用いた三次元モデリングソフトウェアの精度検証、日本写真測量学会 平成 27 年度年次学術講演会発表論文集、pp.1-4、2015
- 3) 中野一也、鈴木英夫、民野孝臣：UAV を用いた三次元モデル作成に関する基礎的検討について、日本写真測量学会 平成 27 年度秋季学術講演会発表論文集、pp.3-6、2015
- 4) 村木広和、安原裕貴：UAV 単独測位による撮影位置と地上基準点を組み合わせた 3 次元計測精度検証、日本測量調査技術協会 先端測量技術 No.107、pp.25-28、2015
- 5) 近藤弘嗣、長山真一、藤島崇、石田大輔、服部達也、池田広貴：i-Construction で適用する土工出来形の面管理に関わる基準類の検討、建設ロボット研究連絡協議会 第 16 回建設ロボットシンポジウム論文集、2016

■執筆者

石田 大輔 (いしだ だいすけ)

アジア航測株式会社
dsk.ishida@ajiko.co.jp



(共著者)

服部 聡子 (はっとり さとこ)

アジア航測株式会社

織田 和夫 (おだ かずお)

アジア航測株式会社

近藤 弘嗣 (こんどう こうじ)

国土交通省総合政策局

長山 真一 (ながやま しんいち)

国土交通省国土技術政策総合研究所

重高 浩一 (しげたか こういち)

国土交通省国土技術政策総合研究所 (現 内閣府)