

# UAV による出来形管理に向けた 3 次元点群生成と精度検証

石田大輔<sup>\*1</sup>, 服部聡子<sup>\*1</sup>, 織田和夫<sup>\*1</sup>, 政木英一<sup>\*1</sup>, 近藤弘嗣<sup>\*2</sup>  
長山真一<sup>\*3</sup>, 重高浩一<sup>\*4</sup>, 服部達也<sup>\*5</sup>, 池田広貴<sup>\*6</sup>, 椎葉裕士<sup>\*7</sup>

## 3D Point Cloud Processing and Accuracy Verification for the Management of Earthworks by UAV Image Processing

Daisuke Ishida<sup>\*1</sup>, Satoko Hattori<sup>\*1</sup>, Kazuo Oda<sup>\*1</sup>, Eiichi Masaki<sup>\*1</sup>, Kouji Kondou<sup>\*2</sup>  
Shinichi Nagayama<sup>\*3</sup>, Kouichi Shigetaka<sup>\*4</sup>, Tatsuya Hattori<sup>\*5</sup>, Hiroki Ikeda<sup>\*6</sup>  
and Shiiba Yuuji<sup>\*7</sup>

<sup>\*1</sup> アジア航測株式会社

Asia Air Survey Co.,Ltd

<sup>\*2</sup> 国土交通省 総合政策局

Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism. Policy Bureau

<sup>\*3</sup> 国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management

<sup>\*4</sup> 国土技術政策総合研究所 (現在: 内閣府)

National Institute for Land and Infrastructure Management

(Present address: Cabinet Office, Government of Japan.)

<sup>\*5</sup> 国土交通省 関東地方整備局

Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism. Kanto Regional Development Bureau

<sup>\*6</sup> 国土交通省 近畿地方整備局

Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism. Kinki Regional Development Bureau

<sup>\*7</sup> 一般社団法人 日本建設機械施工協会

Japan Construction Machinery and Construction Association

建設現場における生産性の向上には、ICT 技術を活用した効率的な施工管理が必要とされており、UAV による 3 次元計測技術を活用が注目されている。

本研究では、実際の施工現場において UAV による出来形計測および精度検証を行い、UAV を用いた適切な出来形計測手法を検討した。また、検討した計測手法に準じて全国 8 地方整備局管内における様々な環境下の施工現場において出来形計測を行い、精度検証を実施して有用性を検証した。

**Key Words:** i-Construction, UAV, SfM, 精度検証, 出来形管理, 3次元点群, 写真測量

## 1. はじめに

国土交通省が推進する i-Construction では、ICT 技術の全面的な活用 (ICT 土工) を建設現場に導入し、建設生産システム全体の生産性を向上させることが掲げられている<sup>(1)</sup>。

i-Construction が適用される事業の施工管理では、従来の TS によって計測する出来形管理の他に、UAV (Unmanned Aerial Vehicle) 等を用いた 3 次元計測による出来形管理が導入されることになる。

UAV を用いた 3 次元計測では、UAV から撮影した写真から SfM (Structure from motion) 技術を利用した写真測量により 3 次元点群データを生成する手法が用いられている。近年、急速な普及により構造物の点検・

調査、災害状況の把握など、様々な分野で UAV と SfM 技術を用いた 3 次元計測の活用可能性が期待されており、産学官において精度検証の事例が蓄積されつつある<sup>(2)(3)(4)</sup>。しかしながら、これらの事例の多くは、地形測量を前提としており、出来形計測を前提とした精度検証の事例は少ない。UAV と SfM 技術を用いた 3 次元計測を適用するにあたり、適切な計測および処理手法を検討するには、実際に出来形計測を行い、3 次元点群を生成し、その精度を検証する必要がある。

この状況を踏まえ、著者らは平成 27 年 11 月より UAV を用いた 3 次元計測手法の検討とその精度検証を行い、UAV を用いた出来形計測の適切な手法の確立に取り組んできた。はじめに要素試験として撮影条件を変えな

から UAV を用いた出来形計測を行い、3次元点群の生成とその精度検証を行った。その結果、出来形計測における適切な UAV の計測手法を整理した。その成果を踏まえ、様々な環境下にある全国 8 地方整備局管内の計 9 か所の施工現場において、実運用を想定した運用試験を行い、有用性を確認した。

本稿では、UAV を用いた土工現場における出来形計測に向けた、3次元点群の生成手法とその精度検証の結果を報告する。

## 2. 要素試験

要素試験では、出来形計測を行うにあたり、対地高度、撮影方向、基準点数、初期カメラ位置 (SfM 処理時に与える各写真の概略撮影位置) の各要素の組み合わせのパターンを複数設定し、適切な解析条件を検討した。また、使用するカメラは、UAV に搭載可能な軽量かつ高画質なミラーレス一眼カメラを前提にした。

### 2.1 要素試験方法

**2.1.1 対象地域** 本試験は、国土交通省関東地方整備局北首都国道事務所管内の圏央道整備区間のうち重機による作業が完了した延長約 300m、幅約 50m の範囲で実施した。対象地域を Fig.1 に示す。



Fig.1 Target Area

**2.1.2 使用機材** 本試験では、UAV は DJI 社製の Spreading Wings S900 を使用した。カメラは、ソニー社製の NEX-7 (APS-C サイズ、2,430 万画素、16mm レンズ) を採用した。カメラはジンバルを用いて UAV に装着した。使用した機材を Fig.2 に示す



Fig.2 UAV (S900) and Camera (NEX-7)

**2.1.3 標定点・検証点の設置および計測** 本試験では、標定点 (以下、「GCP」という。) および検証点として 28cm 角の対空標識を準備し、Fig.3 に示すような計測対象の範囲内・外に合計 23 点を設置した。設置位置は、既存の基準点上を基本とし、補完のために新たな位置にも設置した。UAV による撮影終了後、対空標識に対して Fig.4 に示すような GNSS (VRS 方式) (以下、「GNSS」という。) による計測を実施した。その結果、既存の基準点座標値と GNSS による座標値の間に、有意な系統誤差が認められたため、GCP・検証点の座標値は次の通りに設定した。

既存の基準点上の GCP・検証点座標値は、既存の基準点座標値を採用し、新設の GCP・検証点座標値は、GNSS による座標値と既存の基準点座標値との残差の平均値を求めて補正を行った。



Fig.3 GCP Placement in Target Area



Fig.4 GCP Measurement by VRS-GNSS Surveying

**2.1.4 撮影条件** 本試験では、対地高度の設定を、地上画素寸法と撮影の効率化を考慮して 50m と 150m に設定した。撮影方向は、垂直撮影を基本とし、法面や構造物の形状を考慮して斜め撮影も行った。垂直撮影時のラップ率はオーバーラップ 80%、サイドラップ 60% で設定した。本試験での撮影条件の詳細を Table 1 に示す。

Table 1 Photography Conditions List

撮影方向	対地高度	地上画素寸法	1枚あたりの撮影範囲	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

**2.1.5 撮影計画** 本試験では、天端から法尻にかけて確実にモデル化ができるように、法尻から計測対象

の外に向かって10m程度の余裕を含む撮影コースを設定した。具体的なコース設定をFig.5に示す。

1回の飛行時間は、安全を考慮しカタログスペックの半分以下となる10分以内に設定した。その結果、対地高度50mの場合は、1回の撮影に2回飛行が必要となった。UAVの操作およびカメラのシャッター操作はリモートによる手動操作とし、それぞれ専任のオペレータが担当した。なお、カメラのピントおよびシャッタースピードは固定した。

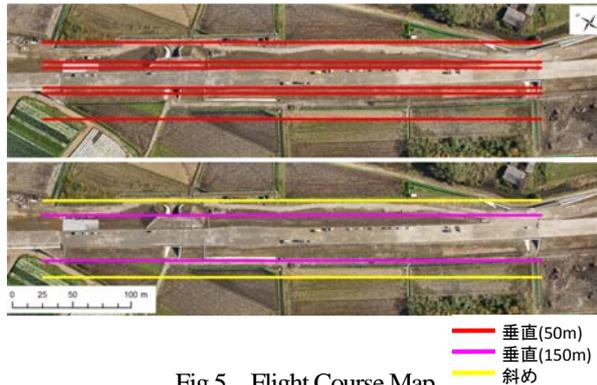


Fig.5 Flight Course Map

**2.1.6 3次元点群生成** 本試験でUAVから撮影された写真とGCPの座標値から、色付き3次元点群、オルソ画像および数値表層モデル(以下、「DSM」という。)を作成した。また別途赤色立体地図も作成した。一連の作業フローをFig.6に示す。

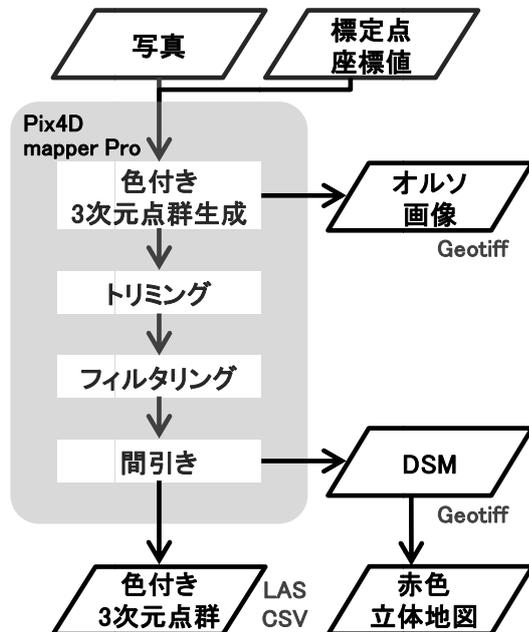


Fig.6 Work flow for the 3D Point Cloud Processing

3次元点群の生成は、Pix4D社製の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った。次に、生成した3次元点群に対し、本試験の対象範囲を残してトリミングを実施した。

撮影時に除外できなかった車両・ロードコーン・看板・や地表面が判読できる植生は、Fig.7に示すように車両等の不要物を取り除くフィルタリング処理を行った。

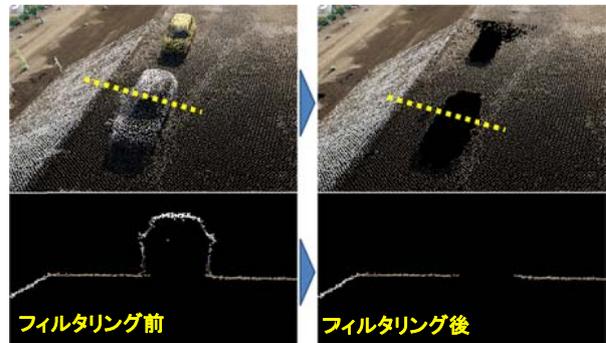


Fig.7 Point Clouds before and after Filtering

また、3次元点群の生成後の工程で、説明会や検査等での3次元点群の活用を想定した場合、3次元点群の間引き処理を行うことでデータ量を減らし取り扱うコンピュータへの負荷を軽くする必要性も考えられる。

本試験では、点群データを10cm<sup>3</sup>の立方体領域に区切り、各立方体の中心に最も近い点のみを抽出し残りの点を削除する手法で間引き処理を行った。処理の前後の違いをFig.8に示す。

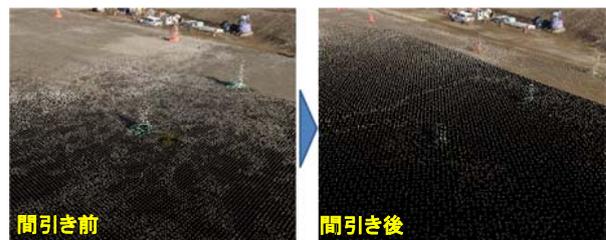


Fig.8 Thinning of a Point Cloud

**2.1.7 検証パターン** 本試験では、対地高度、撮影方向、GCP数や初期カメラ位置を検証項目とし、Table 2に示すような6パターンを検証パターンとして設定した。

初期カメラ位置は、UAV本体に付帯させたGNSS機器から取得し、写真にExif情報として付与した。

GCPは23点設置した対空標識から次のように設定した。

外部GCPは、計測対象全体を囲うように法尻付近4点を最小構成とし、パターンによって中間点を任意に設定した。

内部標定点は、天端上からパターンによって任意に選択した。残りの対空標識は解析には使用せずに検証点として使用した。

Table 2 Analysis -Conditions List

検証パターン	1	2	3	4	5	6
対地高度	50m	50m	50m	50m	50m	150m
撮影方向	垂直	垂直	垂直	垂直+斜め	垂直	垂直
GCP 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

## 2.2 要素試験結果

**2.2.1 出来形計測結果** 本試験での出来形計測の成果として生成した3次元点群データをFig. 9に示す。またFig. 10には、併せて作成したDSM, 赤色立体地図とオルソ画像を示す。



Fig.9 Coloured Point Cloud

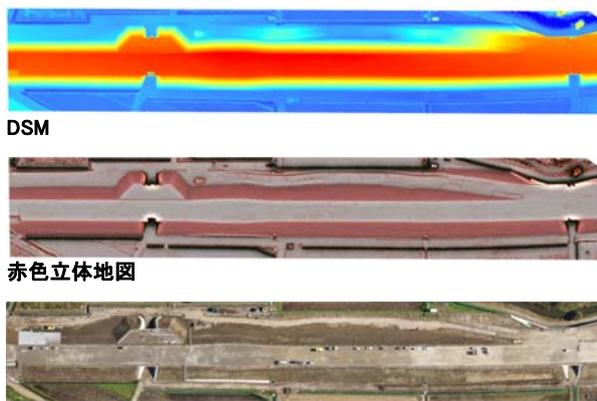


Fig.10 DSM, Red Relief Image Map and Ortho Photo of the Target Area

**2.2.2 精度検証** 本試験では、前節までの成果に対し、各検証パターンによる精度検証を行った。

水平精度は、生成したオルソ画像上の検証点と、GNSS 測量成果とを重畳させて、その差異から GCP 全体と検証点全体のそれぞれの RMS 誤差を求めた。

垂直精度は、生成した3次元点群と、GNSS 測量成果とを重畳させて、GNSS 測量成果の垂線上の点群との高さから RMS 誤差を求めた。Fig. 11 に水平精度および垂直精度の検証イメージを示す。



Fig.11 Accuracy verification at Checking Points and GCP

各検証パターンによる精度検証を行った結果を Table 3 に示す。また、検証点における RMS 誤差のグラフをFig. 12に、標定点における RMS 誤差のグラフをFig. 13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検証パターン1から3では、GCP 数の違いによらず水平精度および垂直精度は概ね同様の精度を示した。

これに対し、斜め写真を加えた検証パターン4と、初期カメラ位置を設定した検証パターン5は、垂直精度が落ちる結果となった。

撮影の効率化を目的とした対地高度 150m の検証パターン6は、水平精度は若干の低下となり、垂直精度については大幅に低下する結果となった。

Table 3 Result of Accuracy verification at Checking Points

検証パターン	1	2	3	4	5	6
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
GCP 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
検証点 RSME 水平 (m)	0.018	0.015	0.020	0.021	0.025	0.031
検証点 RSME 垂直 (m)	0.023	0.019	0.016	0.026	0.033	0.208
標定点 RSME 水平 (m)	0.013	0.012	0.012	0.021	0.020	0.018
標定点 RSME 垂直 (m)	0.015	0.015	0.014	0.011	0.021	0.050

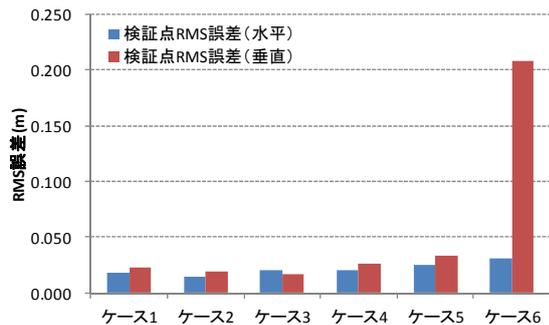


Fig.12 RMSE of Coordinates of Checking Points

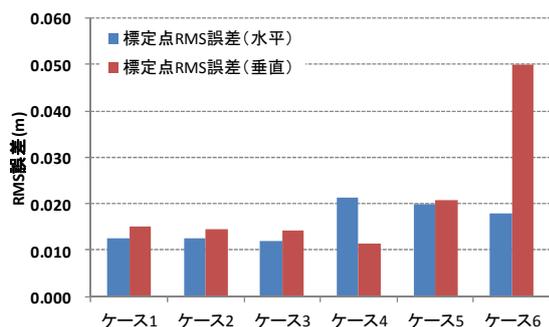


Fig.13 RMSE of Coordinates of GCP

### 2.2.3 運用試験実施における実施基準の設定

精度検証の結果を踏まえ、効率的かつ安定的に精度を確保できる撮影および解析条件について検討した。

対地高度は地上画素寸法に関係し、高度が高いほど画像が粗くなり精度低下を招く。対地高度 150m (パターン 6) では垂直精度が 20cm 程度であったため、従来手法の代替で使用すると思った場合の精度として、対地高度を 50m すなわち地上画素寸法 1cm 程度を基本とした。また、GCP・検証点の座標値も、対空標識の設置後に全点を既存基準点からトータルステーションで観測することとした。

GCP 配置数は一般的には点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がみられなかった。これは解析範囲が小面積かつ平坦地であるため、配置数による影響がなかったと考えられる。このため地形条件によらず安定的に精度が確保できる点と運用時の作業効率の点の両方を考慮し、配置数は解析範囲の四隅を中央付近の 5 点程度とし、対象範囲の形状に応じて追加することとした。

計測対象範囲内に構造物の側面や切り立った地形がある場合、垂直写真と斜め写真の両方を解析に使用することで、このような箇所でも高密度な点群が生成される。斜め写真を追加しても (パターン 4) も精度

に大きく影響しないことから、運用試験では撮影対象の状況に応じて斜め撮影を行うものとした。

初期カメラ位置を設定することで SfM ソフトでの処理時間を短縮できると期待されたが、本研究では GNSS の測位状況が悪かったため、設定しないケースより処理時間が長かった。このため作業時間を短縮させる必要がある場合は、GNSS の測位状況に応じて初期カメラ位置を設定することも可能である。

## 3. 運用試験

**3.1 対象地域** 前章で整理した UAV による計測手法が、様々な環境下においても有用であるかを検証するため、Table 4 に示した全国 8 地方整備局の計 9 か所の施工現場において運用試験を実施した。

要素試験の対象は、平野部における道路工事区間であったが、本試験では山間部での周辺に樹木が多い状況や築堤工事区間の施工現場も含まれている。

Table 4 List of Operational Experiment Sites

地方整備局名	事務所名	工事箇所	状況
北海道	北見道路事務所	北海道横断自動車道整備区間	山間部 周囲：樹木あり 天候：晴れ
東北	福島河川国道事務所	管内道路改良工事区間	山間部 周囲：樹木あり 天候：晴れ
関東	荒川上流河川事務所	荒川築堤工事区間	河川堤防 天候：曇り
	江戸川河川事務所	中川築堤工事区間	河川堤防 天候：晴れ ※数日前に積雪
北陸	千曲川河川事務所	千曲川築堤工事区間	河川堤防 天候：晴れ
中部	名古屋国道事務所	管内道路工事区間	山間部 周囲：樹木あり 天候：晴れ ※数日前に降雨
近畿	大戸川ダム工事事務所	管内道路工事区間	山間部 周辺：樹木あり 天候：晴れ
四国	徳島河川国道事務所	吉野川築堤工事区間	河川堤防 天候：晴れ
九州	鹿児島国道事務所	管内道路工事区間	平野部 天候：曇り ※風の影響で片側法面撮影中止

**3.2 精度検証結果** 本試験での精度検証の手法はいずれも要素試験と同様の方法で行った。各地域の精度検証を行った結果を Table 5 に示す。また、検証点

全体における RMS 誤差のグラフを Fig. 14 に、標定点全体における RMS 誤差のグラフを Fig. 15 に示す。

水平誤差および垂直誤差は、いずれの地域においても、RMS 誤差 50mm 以下となり、従来手法の代替として有用であることを確認できた。併せて要素試験における出来形計測手法の実施基準の設定も、その他の環境下で有用であることを確認できた。

なお、関東地方整備局管内の荒川築堤工事築堤区間においては、検証点が1点のみであったため、検証点RMS 誤差は算出していない。

Table 5 Result of Accuracy Verification at Operational Experiment Sites

地方整備局名	北海道	東北	関東		北陸	中部	近畿	四国	九州
			荒川	中川					
検証点 RMS 残差 水平(m)	0.022	0.024	-	0.012	0.021	0.016	0.013	0.017	0.025
検証点 RMS 残差 垂直(m)	0.019	0.015	-	0.014	0.018	0.018	0.013	0.026	0.017
標定点 RMS 残差 水平(m)	0.005	0.028	0.009	0.013	0.012	0.013	0.011	0.017	0.025
標定点 RMS 残差 垂直(m)	0.005	0.026	0.005	0.006	0.009	0.016	0.011	0.003	0.016

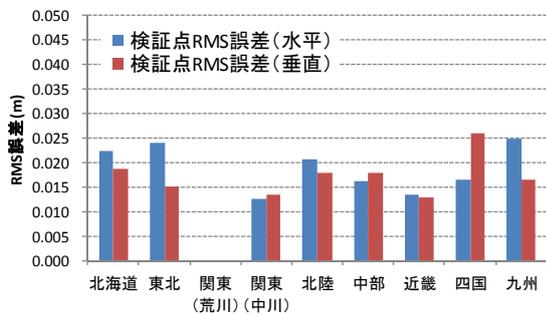


Fig. 14 RMSE of Coordinates of Checking Points at Operational Experiment Sites

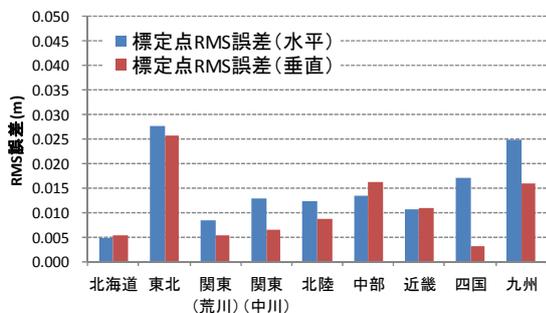


Fig. 15 RMSE of Coordinates of GCP at Operational Experiment Sites

### 3.3 運用上の注意点

要素試験では GCP の座標観測に GNSS による方法で観測を使用したが、GNSS による座標値と既存の基準点の座標値には有意な系統誤差が認められたため、解析には補正した値を採用し、運用試験では GCP の観測は既存基準点を基準としたトータルステーションで観測した。同様に実際の運用時に UAV 画像から生成した 3 次元点群データを設計図面等の既存資料と比較する際にも、位置ずれを生じさせないために GCP の観測は既存基準点を基準としたトータルステーションでの観測が望ましいと考えられる。また UAV を飛行させる場合は、気象条件に左右される点を留意する必要がある。降雨・強風などの悪天候時や積雪がある場合は UAV 飛行および撮影ができない。出来形管理では施工状況に合わせて迅速に撮影を行う必要があるが、天候による遅延も考慮に入れた工程管理を行う必要がある。

### 4. おわりに

本研究では、UAV を用いた出来形計測に関する適切な手法の確立を目的に、実際に UAV を用いて出来形計測を行い、3 次元点群を生成し精度検証を行った。

その結果、UAV における出来形計測の適切な手法を整理した。さらに全国 9 か所の様々な環境下にある施工現場においても有用性を検証した。

謝辞：本研究を進めるにあたり、北海道開発局、東北地方整備局、関東地方整備局、北陸地方整備局、中部地方整備局、近畿地方整備局、四国地方整備局、九州地方整備局には、実証試験および運用試験を行うための計測現場をご提供いただき計測時にもご協力をいただいた。ここに記して感謝の意を表す。

### 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>>，（入手 2016.4.30）
- (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。