

## 無人航空機による三次元計測の実証実験

森時 悠 千葉 拓史  
関原 弦 レ・クオク・ズン

### 概 要

広域地域を迅速かつ均一な精度で測量できる写真測量技術は、19世紀頃から利用されている古い技術であるが、近年、センサ技術などのハードウェアの技術的な発達と低価格化、コンピュータビジョンなどのソフトウェアの研究成果を容易に利用できる環境が整ったことから、無人航空機を利用した三次元計測技術の利活用が積極的に行われるようになった。

当社では、国土交通省の取組みである i-Construction の実施以前から、無人航空機による三次元計測技術に着目し、土木現場で実運用することを念頭に、研究開発を行ってきた。本報では、2015年度および2016年度において、当社で実施した無人航空機による三次元計測の実証実験の結果を報告する。無人航空機の普及が広がっている現状から、今回の実証実験では、最新の無人航空機や、各種ソフトウェアを新たに導入し、実際に土木現場で無人航空機にて三次元計測を行い、土木現場における作業負荷をできるだけ軽減するための試行錯誤を行った。今回の実証実験より、撮影時の作業知識や市販ソフトウェアの効果的な利用方法を習得することができ、現状、有効な技術や今後の課題を整理することができた。

### A Substantiative Experiment for Three-Dimensional Measurement Using UAV Photography

#### Abstract

Photogrammetry has been widely applied in various fields since the 19th century as it enables quick measurement with a wide range and uniform accuracy. Recently, hardware technologies including sensor technology have reached an advanced stage and achieved cost reduction, and the details of software research projects related to a variety of computer vision libraries are easily accessible to all. For these reasons, three-dimensional (3D) measurement using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) photography has become remarkably popular.

Even before the Japanese Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism began enforcing its i-Construction initiative, our company had spent a substantial amount of time studying 3D measurement for the construction field using UAV photography. In this paper, we report the results obtained from a substantiative experiment on three-dimensional measurement conducted by our Information Technology Solutions Development Department in 2015 and 2016. In this experiment, we used the latest UAV models, combining with the latest software packages for 3D image processing. We measured the real situations of civil engineering sites to develop labor-saving approaches. In conclusion, we gained working knowledge of UAV photography and effective use of commercial software packages, and thereby managed to discern effective technologies for now and challenges for the future.

キーワード: 無人航空機、三次元計測、  
i-Construction

## §1. はじめに

近年、無人航空機(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)は、慣性センサや全地球衛星測位システム (GNSS) などの各種センサ技術の小型化や低価格化により、容易に入手することが可能となった。そのため、空撮や運搬、軽作業を目的とした無人航空機の利用が急速に拡大している。特に、土木現場における無人航空機の利用は、労働者の人口減少を背景とした生産性の向上の一手段として有効とされていることから、積極的に行われるようになった。

国土交通省では、社会全体の生産性向上につながる新規市場の開拓を支える取り組みとして、ICT 技術の活用により建設生産プロセスの抜本的な生産性向上を目指す「i-Construction」の取り組みを行っており、中でも、無人航空機による写真測量は短期間で高密度な三次元測量を行うことができるため、実施を強く推進している。

i-Construction に係る測量作業において適用する事を前提に定められ、平成 29 年 3 月 31 日に改正された“UAV を用いた公共測量マニュアル(案)”に記載されている主な仕様は下記の通りである。

- ・地上画素寸法
  - ・部分払い出来高計測時：2cm/画素以内
  - ・出来形測量時：1cm/画素以内
- ・実際の飛行結果から確認できる場合のラップ率
  - ・オーバーラップ率:80%以上
  - ・サイドラップ率:60%以上
- ※ただし、実際の飛行結果からラップ率が確認できない場合は計画時に下記が必要となる。
  - ・オーバーラップ率:90%以上
  - ・サイドラップ率:60%以上
- ・位置精度（検証点の位置座標と三次元点群が示す位置座標の較差の許容範囲）
  - 出来形計測：5cm 以内
  - 起工測量・岩線計測：10cm 以内
  - 部分払い出来高計測:20cm 以内

2015 年度、及び、2016 年度において、当社は、無人航空機にカメラを搭載し、撮影した画像を元に三次元画像計測を行い、無人航空機の建設現場への適用を目的とした実証実験を行ったので報告する。今回の実証実験では、土木現場に負担がかからないことを最優先に考えて、1日で撮影作業が完了することを前提とする。そして、前提条件の基で、なるべく高品位な 3D モデルを生成し、生成したモデルから精度の高い土量推定を行う。これを実現するため、一連の三次元画像計測とモデルの解析作業を行い、撮影時の作業知識や市販ソフトウェアの効果的な利用方法を習得

する。

撮影時の作業ノウハウを蓄積するために、回転翼航空機と固定翼航空機による撮影を行い、それぞれの特徴について確認する。また、市販ソフトウェアを効果的に利活用するためには、生成した点群の精度や、GNSS 情報を利用した際の点群への影響、点群から生成した 3D モデルの位置精度の確認、計画モデルと計測モデルの土量比較、計測モデルを用いた土量変化率の算出について検討した。

## §2. 使用した無人航空機

本章では、三次元画像計測を行う際に使用した無人航空機について述べる。使用した無人航空機は、回転翼航空機の  $\alpha$ UAV と、固定翼航空機の eBee である。

### 2.1 回転翼航空機 $\alpha$ UAV

$\alpha$ UAV は、アミューズワンセルフ社製の国産回転翼航空機であり、機体の組み立てや分解を工具を使用せずに行うことができ、折りたたみが可能で持ち運びが容易な設計となっている。

回転翼航空機の特徴としては、ホバリングと呼ばれる空中に停止する機能を持ち、さらには、その場で方向転換できることが挙げられる。ジャイロセンサや加速度センサを使用すると、空中で安定した姿勢を制御することが可能となるため、人口密集地や小規模な環境での利用、禁止区域を避けた自動飛行、宅配や検査のような無人航空機自体に作業をさせるといった目的での活用が期待されている。

撮影時の  $\alpha$ UAV を図1に示す。



図1 撮影時の  $\alpha$ UAV

### 2.2 固定翼航空機 eBee

eBee は、無人航空機製造会社の世界最大手である仏 Parrot 社の子会社の senseFly 社が、航空撮影用に設計した固定翼航空機である。eBee は、機体が 690g と軽量であり、組み立てが容易で、専用のケースに収納することができるため、持ち運びが容易な設計となっている。

固定翼航空機は、水平飛行が得意で、省電力でバッテリー

一効率が高い。最大飛行時間は 50 分程度であり、最大速度が約 90 キロメートルと高速に飛行することができるため、広範囲な撮影を行うことが可能となっている。

撮影時の eBee を図2に示す。



図2 撮影時の eBee

### §3. 三次元計測

本章では、三次元画像計測を行うための事前準備ならび撮影方法、撮影後に 3D モデルを生成するための点群処理、3D モデルの生成方法について述べる。

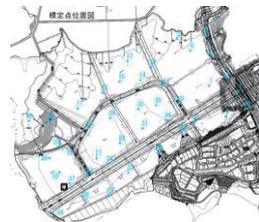
#### 3.1 実証実験を行うための事前準備

実証実験を行うための事前準備として、対空標識の設置と、標定点・検証点の配置について述べる。

対空標識と標定点・検証点の配置図を図 3 に示す。



対空標識(1m×1m)



標定点・検証点の配置図

図 3 対空標識と標定点・検証点の配置図

対空標識は、白と黒の対角線で分けられた 1m×1m の正方形の標識を利用した。対空標識の位置情報には主に、GNSS 情報を利用することにした。対空標識は、標定点と検証点とに分かれ、標定点は点群を生成するための基準点として利用し、検証点は生成した点群の精度を確認するために利用する。

#### 3.2 撮影方法

通常、無人航空機を用いた写真測量を実施する場合、無人航空機に搭載されている自律飛行機能を利用して、撮影を行う。自律飛行機能とは、事前にコンピュータで飛行ルートを設定し、設計した飛行ルートのデータを機体に入力することにより、無人航空機本体が自律的に飛行できるようにする機能である。

飛行ルートの設定作業は現場での飛行を行う以前に、事務所などで行う。一般的には短冊形の飛行ルートを設計することが多く、左右の重なり率であるサイドラップ率と、上下の重なり率であるオーバーラップ率を考慮して写真の撮影間隔を検討する。

今回の撮影を実施するにあたり、当社の無人航空機飛行に関する社内規定に基づき、飛行の際には、最低2名を配置することにした。2名の内訳は、オペレータとサポーターとし、オペレータは、ドローンの操縦を担当し、無人航空機の飛行中に、機体から目を離さず、GNSS の不良や機器の故障などの異常が発生した場合にすぐにフォローできるよう対応する。一方、サポーターは、オペレータを補助する役割となり、無人航空機の飛行中に、コントローラや PC などの無人航空機を操作する手元の装置で、バッテリーの消費量や、消費電流、移動速度、離陸地点からの距離といった情報を常に監視し、異常がないか確認する。また、バッテリー消費量、消費電流などを常に読み上げ、機体のオペレータと情報共有する。

機体の飛行については、事前に作成した飛行計画をもとに撮影する。これにより、安全に無人航空機を飛行させることができる。撮影した画像は無人航空機に搭載されているカメラに取り付けられた SD カードから、撮影後に回収する。

#### 3.3 点群の生成

複数枚の画像から 3D モデルを生成するための点群の生成方法について述べる。

今回、これらの点群の生成には、スイスの Pix4D 社製の Pix4Dmapper を利用した。Pix4Dmapper は、には、無人航空機で撮影された複数枚の画像を利用し、点群を生成するソフトウェアである。生成した点群の例を図 4 に示し、Pix4Dmapper の点群のレポート機能により出力した結果を図 5 に示す。



図 4 複数枚の画像から生成した点群の例

図 5 のレポート機能により出力した結果には、点群の精度や、生成時の処理時間などが記載されている。

### 3.4 点群に基づく 3D モデルの生成

撮影画像から 3D モデルを生成する手順を図 6 に示す。

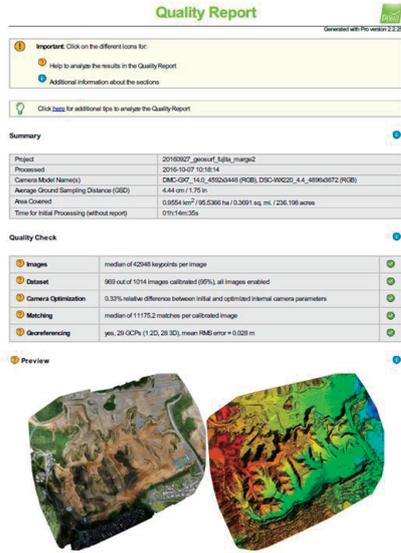


図 5 点群のレポート機能により出力した結果

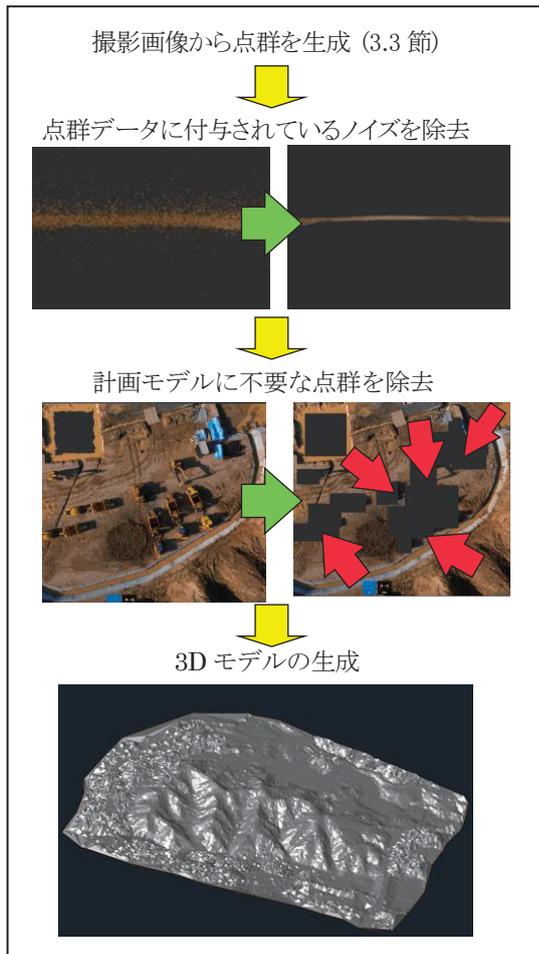


図 6 撮影画像から 3D モデルを生成する手順

3.3 に述べた方法により、撮影画像から点群を生成する。生成した点群は、ノイズが付与されているため、形状が平坦になるようにノイズを除去する。ノイズが除去された点群には、土木作業中の重機や、森林、水面など、測量に不要なデータが存在するため、これを対話的に除去する。その後、除去した点群に基づいて 3D モデルを自動的に生成する。

上記の手順で、ノイズ除去や不要な点を削除するためには、株式会社アイ・エス・ピー 社製 LandForms を利用し、3D モデルの生成には、Autodesk 社製 AutoCAD Civil 3D を利用した。図 6 の点群の表示には、Autodesk 社製 Autodesk ReCap を利用した。

## §4. 現場での実証実験

本章では、現場で行った実証実験について述べる。撮影条件を示した後、点群の精度、GNSS 情報を利用した際の点群への影響、点群から 3D モデルを生成する際の位置精度、計画モデルと計測モデルの土量比較、計測モデルの土量変化率に関する検証結果について報告する。

### 4.1 撮影条件

今回は、敷地面積が約 40ha、高低差が起工時 約 100m の造成現場を対象とし、年間を通して 3 度の測量を行った。撮影条件を表 1 に示す。

表 1 撮影条件

	2016年2月	2016年9月	2016年12月
機体	α UAV	eBee	α UAV
飛行高度(m)	100~200	160~230	140~210
地上画素寸法(mm)	26.9~53.8	48~69	37.7~56.5
オーバーラップ率	80%	80%	90%
サイドラップ率	60%	80%	60%
フライト数	6	2	7
飛行時間	1h26m00s	0h59m52s	1h15m28s
標定点の数	23	29	1
検証点の数	13	12	37
撮影枚数	2039	659	2261
撮影位置の取得方法	後処理キネマティック測位 ※1	RTK法 ※1	後処理キネマティック測位 ※2

※1 電子基準点を利用  
※2 現場基準点を利用

### 4.2 点群の精度

同一現場で、年間を通して 3 度の測量を行った。対空標識を用いた精度比較のための計測結果を表 2 に示す。

表 2 対空標識を用いた精度比較のための計測結果

	RMS Error(m)			最大誤差(m)		
	X Error	Y Error	Z Error	X Error	Y Error	Z Error
2016年2月	0.069	0.061	0.112	0.1979	0.169	0.37
2016年9月	0.018	0.022	0.041	0.051	0.063	0.084
2016年12月	0.026	0.03	0.012	0.07	0.068	0.023

2016年2月の計測では、撮影した写真が暗く、キーポイントのマッチングがうまくいかなかったため、点群のRMS Errorの値が高くなった。これは、オペレータの習熟度が足りなかったことが原因と考えられる。2016年9月以降の計測では、おおむね5cm未満のRMS Error値となった。

2016年12月の計測データでは、高精度なGNSS情報を利用して算出を行ったため、標定点を1点のみとした状態でも高い精度になった。

要因としては、12月の測量では、写真位置の測量に現場基準点を利用した後処理キネマティック測位を実施したことが考えられる。

2016年9月と2016年12月の点群の位置精度は、10cm以内となり、i-Constructionで規定されている起工測量の要求精度の範囲内であるため、日常管理における活用が可能であると考えられる。

### 4.3 GNSS情報を利用した際の点群への影響

無人航空機による三次元計測を行う際に、現場作業の効率化や計算時間の削減のために、写真撮影位置に対応したGNSS情報を利用して点群を生成する場合がある。上記GNSS情報の精度の点群への影響を調べるため、GNSS情報を利用した場合の検証点における較差の統計情報と、利用しなかった場合の統計情報を比較した。

標定点を5点、検証点を33点利用した場合の検証点における較差の統計情報を、表3に示す。

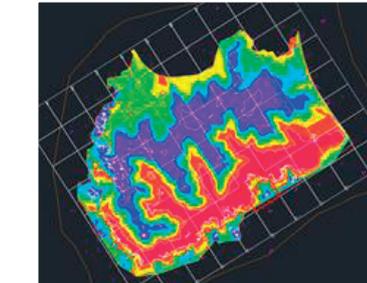
GNSS情報として後処理キネマティック解析を実施した値を利用した場合の統計情報を①に、ディファレンシャル測位を利用した場合の統計情報を②に、GNSSを利用しない場合の統計情報を③に示す。

①と②を比較したところ、統計情報に大きな違いはなかった。①・②と③を比較したところ、標定点を利用した場合としない場合においては、精度は同程度であるが、解析時間については、大きく異なることがわかった。

### 4.4 計画モデルと計測モデルの土量比較

計画モデルと、三次元計測にて求めたモデルを用いて、それぞれ土量算出を行い、それらの比較を行った。

計画モデルと計測モデルの土量比較の結果を、図7に示す。



計画モデルと計測モデルの土量比較

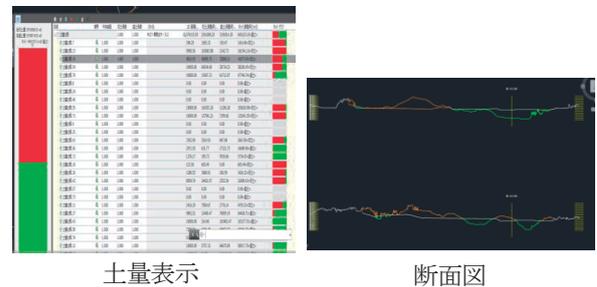


図7 計画モデルと計測モデルの土量比較

図7の上図は、計画モデルと計測モデルの土量比較をした結果であり、赤色は盛土箇所、青色は切土箇所である。図7の左下図は土量の表示であり、赤色が盛土箇所、緑色が切土箇所である。図7の右下図は、土量比較したモデルの断面図となっている。図7の土量比較により、異なる時期の任意の場所や、縦断面や横断面の土量の状況を視覚的、定量的に把握することができる。

### 4.5 計測モデルを用いた土量変化率の算出

一般的に、土木工事である造成現場の現場運営では、定期的に土量配分計画を検討する必要があり、検討の際には、土量の変化量が重要な指標となる。今回、計測モデルを用いて、盛土と切土の変化率を確認した。2016年2月、2016年9月、2016年12月の盛土と切土の変化率(盛土/切土)の結果を表4に示す。

表3 点群位置の統計情報

単位:cm

	①後処理キネマティック解析			②ディファレンシャル測位			③GNSSを利用しない場合		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
平均	1.01	-0.21	-1.09	0.74	0.46	-0.15	0.95	-0.03	-0.4
$\sigma$	1.51	1.67	2.34	1.96	2.08	2.8	1.69	1.83	2.63
RMS Error	1.82	1.68	2.59	2.09	2.13	3.21	1.94	1.83	2.66
解析時間	6h28m26s			6h40m10s			1d2h5m7s		

表 4 計測モデルから算出した盛土と切土の変化率

	2月⇔9月	9月⇔12月	2月⇔12月
切土(m <sup>3</sup> )	736,268	595,503	1,252,574
盛土(m <sup>3</sup> )	948,668	536,528	1,406,001
変化率	1.2884	0.9009	1.1224

	2月⇔9月	9月⇔12月	2月⇔12月
切土(m <sup>3</sup> )	804,928	559,544	1,309,247
盛土(m <sup>3</sup> )	706,339	524,356	1,175,470
変化率	0.8775	0.9371	0.88978

表 4 の上表は測量計測と解析作業を A 社に依頼した結果であり、下表は B 社に依頼した結果である。A 社の結果と B 社の結果を比較したところ、2 月のデータに大きな差異があることが分かった。原因としては、2 月の計測モデルの元となった点群には、伐採林や樹木などが多く存在しており、両社にヒアリングをした所、伐採林・樹木の除去方法に違いがあったため、その影響が大きな差異につながったものと考えられる。

## §5. 実験結果における考察

今回の実験結果では、1日撮影作業を完了することを目的として、撮影条件を設定し、実験を行った。結果として、オーバーラップ率を 80%以上、サイドラップ率を 60%以上確保することで、点群の精度として地上画素寸法の約 0.5～1.5 倍程度となり、位置精度としては、10cm 以内を確保することができた。

起工測量で必要となる位置精度は 10cm 以下と規定されているため、日常管理には十分活用できるものであると考えられる。

また、今回の実証実験を通じて、無人航空機による三次元計測を行うにあたって必要となる、飛行ルートや対空標識の設定、配置図などの撮影前の準備、人員配置や役割分担などの当日の作業、解析方法やソフトウェアの利活用やデータの後処理などについてのノウハウを蓄積することができた。

## §6. 今後の課題

本報に関する今後の課題を以下に示す。

- ・1フライトの 実質飛行時間は、安全性を考慮し、バッテリー容量に基づく推定飛行可能時間の約半分程度に設定したため、今回の実証実験では、複数回のフライトの飛行が必要となった。バッテリー効率が向上した場合には、飛行時

間が延長されるため、フライト数の軽減や、フライト前の事前準備の工数の削減が可能になると考えられる。

- ・広範囲で飛行させる場合、飛行時間が増加するため、複数箇所の離着地点の設定する必要があり、それに伴い、人手や作業の手間や、撮影箇所と離着陸地点の距離の設定作業、目視可能な範囲に離陸地点を決定することを考慮する必要がある。各決定事項を予め検討し、より効果的な飛行準備を行うことが必要と考えられる。

- ・地表面の形状を取得する際に、樹木・雑草などの地表面が確認できない箇所は、地表面の形状を取得することができない。その場合には、樹木高や地表面を推定する必要があり、その方法を検討する必要がある。

- ・近年普及が進んでいるレーザースキャナーが搭載されている無人航空機を利用すると、ラップ率を考慮する必要がなくなるため、フライト数を削減することができる。また、測量精度が写真測量と比較して向上する可能性が高い。他にも、樹木や雑草がある場合においても地表面の形状を取得することが可能であるため、三次元画像計測のみならず、状況によってレーザースキャナーを利用することも検討する必要がある。

## §7. おわりに

本報では、無人航空機による三次元計測の実証実験を行い、土木現場に負担がかからないことを考慮しながら、なるべく高品位な 3D モデルを生成する方法や、精度の高い土量推定を実施することについて報告した。

今後は、現場職員へ無人航空機の更なる利用を促進させることにより、測量業者の活用による生産性の向上や、i-Construction への円滑な対応が可能になると考えられる。

本文中に記載されている会社名・商品名等は各社の商標および登録商標です。なお、本文および図表中では、「™」、「®」は明記していません。

- ・LandForms は、株式会社アイ・エス・ピーの登録商標または商標です。

- ・Autodesk、Civil 3D は、米国 Autodesk, Inc.の商標または登録商標です。

## ひとこと

近年、技術の発達が目覚しく、日々新しい技術が誕生している。これらの技術を積極的に導入し、建設業の IT 化を推進していきたい。



森時 悠