(9) ３次元出来形計測を対象とした自動追尾型 TS を用いた UAV の現場実証

早川　健太郎[1]・黒台　昌弘[2]・西田　信幸[3]・佐々木　剛[4]

[1]正会員　株式会社安藤・間　技術本部技術研究所（〒305-0822 つくば市苅間 515-1）
E-mail:hayakawa.kentaro@ad-hzm.co.jp

[2]正会員　株式会社安藤・間　技術本部技術研究所（〒305-0822 つくば市苅間 515-1）
E-mail:kurodai.masahiro@ad-hzm.co.jp

[3]非会員　株式会社トプコン　技術本部スマートインフラ企画部（〒174-8580 東京都板橋区蓮沼町 75-1）
E-mail: nob.nishita@topcon.co.jp

[4]非会員　株式会社トプコン　技術本部 IT ソリューション開発部（〒174-8580 東京都板橋区蓮沼町 75-1）
E-mail: t.sasaki@topcon.co.jp

UAV による空撮画像から高精度な 3 次元形状データを得るためには，①標定点の配置と個数，②写真の地上分解能，③ 隣り合う写真の重複度等，i-Construction で定められた条件を正しく履行する必要がある．筆者らは，現場での作業性をさらに向上させるために，標定点数を減じることが可能な「自動追尾型 TS を用いた UAV により 3 次元モデルを作成する手法」に着目した．この手法はトータルステーションによる測距および測角の技術や写真測量の技術および各センサの同期技術を組み合わせて高精度な 3 次元形状データを取得するものであり，性能実証実験の結果，i-Construction で規定されている 3 次元形状データの精度 50mm を満足できることが分かった．

Key Words: *UAV, 3D measurement, TS tracking, i-Construction*

1. はじめに

平成 28 年度に始まった国土交通省による i-Construction 施策により，従来，航空機等を用いて行われていた空中写真測量が無人航空機（以降，UAV）に換えて施工現場でも用いられるようになった．その目的としては，短時間で広い範囲の 3 次元形状を把握することであり，得られた 3 次元形状データは起工測量や岩線測量，進捗に応じて実施される出来形計測として用いられている．

i-Construction では，UAV による出来形計測の精度管理や施工手順の規範となる管理要領を定めているが，実際に作業をしてみると，経済性や作業性の観点でいくつかの課題があることが分かった．本稿ではそれらに対応するために開発された UAV を概説し，その性能を確認するために実施した性能実証実験について記述する．

2. i-Construction における UAV 出来形計測の実態

(1) 現状と課題

UAV による出来形計測において，所定の精度で 3 次元形状データを得るためには，①標定点の配置と個数，②撮影する写真の地上分解能，③隣り合う写真の重複度等の i-Construction で定められた条件を正しく履行する必要がある．筆者らは経済性と作業性を向上させるために，特に条件①について注目した．

空撮した複数の写真を用いて精度の高い 3 次元形状データを取得するためには，標定点と呼ばれる基準点を現場内に配置しなければならない．また，測量成果の点検のため，検証点と呼ばれる基準点を，同様に設置する必要がある．そのため，以下のような課題がある．

a)施工現場では建機やトラックが稼動するエリアが多く存在するにも関わらず，定められた配分で標定点や検証点を配置し，かつ，空撮等の一連の作業を終えるまで固定しなければいけない．

b)標定点や検証点の座標を求めるための測量は，規定された精度を確保する必要があることから高度な測量技術を要する．

c)測量作業中や標定点等の撤収作業時は，重機施工エリア等に立ち入る必要があり，危険作業となる．

このように，UAV による出来形計測作業は，短時間で広い範囲の 3 次元形状を把握することを可能とする反面，これまで実施されていなかった作業が加わることで，作業面や安全面での懸念といった課題が残されている．

(2) 標定点や検証点の設置と測量作業の実態

表-1 に標定点や検証点の設置と測量に要する作業の一覧を示した．当初トータルステーション（以降,TS）による測量作業を実施しており，広さ 40ha，標定点や検証点が計 65 点の条件（**図-1**）で，測量作業員 3 名で 2 日間の作業となっている．この作業量を軽減するため，工期途中より測量機器を TS から RTK-GPS に変更したことから，広さ 31ha（計測範囲が途中で変更），標定点や検証点が計 55 点の条件で，測量作業員 2 名で 1 日間の作業となった．

このように，使用する測量機器を変更することで標定点や検証点の設置と測量に要する作業量を軽減できた一方で，UAV 飛行時間がその準備を含めて 40ha で 3 時間程度（著者らが得ている実績値）であることを鑑みれば，標定点等の配置条件の見直しや個数削減が，UAV による出来形計測全体の効率化に寄与するものと考える．

3. 自動追尾型 TS を用いた UAV について

(1) 概要

「自動追尾型 TS を用いた UAV により 3 次元モデルを作成する手法（以降，新手法と呼ぶ）」は，TS による測距および測角の技術や写真測量の技術および各センサーの同期技術を組合せて，多くの標定点を使用せずとも高精度な 3 次元形状データを取得できるものである．

自動追尾型 TS は随時移動する UAV に搭載したプリズムの 3 次元位置を直接的にかつ高精度に求めることができる装置であり，3 次元モデリングに必要な写真撮影位置を正確に求めるためには，プリズムの 3 次元位置を計測したタイミングと UAV に搭載されたカメラで写真撮影を行ったタイミングの時間的誤差を解消する必要がある．そのため，自動追尾型 TS と UAV の双方における記録データにおいて GNSS 時刻に基づく共通項を持たせた．また，UAV に搭載されたカメラの姿勢は撮影された写真から求めるが，自動追尾型 TS で計測する 3 次元位置との相関を維持するため，プリズムはカメラに直接取付ける方式とした．このようにカメラの 3 次元位置や姿勢を正確に計測し，かつレンズのキャリブレーションをモデリングの都度実施することで，高精度な 3 次元モデリングを実現している．

(2) 機器の構成と技術的特長

図-2 に示した機器構成により，以下の技術的課題を克服している．

a) 自動追尾型 TS と写真撮影の各々のタイミング

自動追尾型 TS はプリズムまでの距離および水平角と高度角を計測することにより，プリズムの 3 次元位

表-1 標定点や検証点の設置と測量に要する作業

対象面積	測量機器	標定点、検証点の個数	人工
40ha	TS	65	3人×2日
31ha	RTK-GPS	55	2人×1日

図-1 40ha の現場での配点状況（一例）

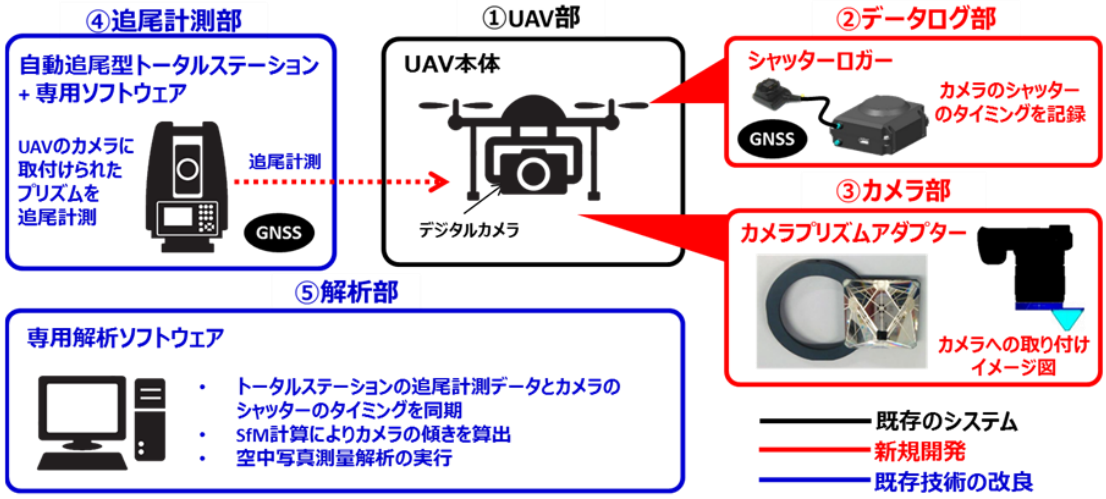

図-2 新手法を構成する機器群

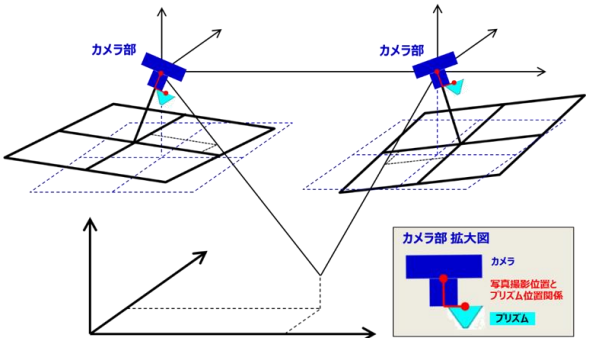

図-3　カメラとプリズムの位置関係

置を求めている．しかし，随時移動しているプリズムの位置を追尾しかつ計測するためには，計測するデータごとの時刻をより精細に求める必要がある．

新手法においては，図-2 の④追尾計測部の改良により，高い時間分解能で計測されたプリズムの 3 次元位置に対し，GNSS 時刻を同期させることとしている．一方で，UAV に搭載された新手法の図-2 の②データログ部では，UAV に搭載されたカメラで写真撮影したタイミングに GNSS 時計による精細な時刻情報を付加して記録している．これら 2 つのデータを GNSS 時刻により同期させることで，UAV で撮影した写真の位置を高精度に求めることができる．

b)　写真撮影位置および姿勢とプリズム位置のオフセット

上記 a)項で自動追尾型 TS での計測と写真撮影のタイミングの時間的誤差を改善することは可能だが，この処理だけでは写真撮影の位置とプリズムの位置との関係およびカメラの傾きが確定できておらず，正確な撮影位置を求めるに至っていない．そこで，新手法では図-3 に示したように，カメラ位置とプリズム位置の関係を保持する仕組みとし，追尾計測したプリズムの位置からカメラの位置を定義することとした．また，カメラの傾きは写真の相対的な関係より SfM による解析にて算出することとした．その際，カメラの傾きをより高精度に求めるために，セルフキャリブレーション技術により最適なレンズキャリブレーション値を求めている．

4.　性能実証実験

(1)　実証実験の概要

自動追尾型 TS を用いた UAV による 3 次元モデルの精度が i- Construction の出来形管理基準を満たすことを確認するために，大規模造成工事の一角（約 90m×200m，高低差 30m，図-4）を実験エリアとして，平成 29 年 5 月 11 日に性能実証実験を行った．

本実験で使用した UAV と飛行パラメータを図-5，表-2 に示す．なお，これらのパラメータは国土交通省が定める空中写真測量（無人航空機）を用いた出来形管理要領（土工編）に基づいている．実験エリアにて表-2 のパラメータで自動追尾型 TS を用いた UAV を飛行させ，空撮した写真から表-3 の 3 ケースにて 3 次元モデリングを行い，新手法と現手法（i- Construction 準拠）を比較した．ケース 1 は現手法であり，TS による自動追尾を行っていない．ケース 2 とケース 3 では UAV の飛行を TS により自動追尾している．さらにケース 3 では，解析結果の精度向上を目的として地上基準点を 1 点設けている．現場に配置した標定点，地上基準点，検証点の位置を図-6(ケース 1)，図-7(ケース 2)，図-8(ケース 3)に示す．

(2)　新手法と現手法の精度比較結果

3 つの解析手法により得られた 3D モデルに含まれる検証点の較差を表-4 に示す．i- Construction 基準では出来形測量の場合，すべての検証点で±50mm 以内の精度を

図-4　実験エリア

図-5　実験に使用した UAV

表-2　使用機器の諸元と撮影パラメータ

使用機器と撮影パラメータ		
機器	UAV本体	QC730
	カメラ	α6000
	レンズ	28mm固定焦点
パラメータ	飛行高度	対地70m
	オーバーラップ	90%
	サイドラップ	60%
	地上分解能	1cm
	ｼｬｯﾀｰｽﾋﾟｰﾄﾞ	1/1000
	ISO	200
	絞り値	5.6
	インターバル	2秒

表-3　設定した実験ケース

	ケース1	ケース2	ケース3
SfMソフト	MAGNET Collage(ﾄﾌﾟｺﾝ社製)		
位置推定	TS追尾なし（現手法）	TS追尾	TS追尾
標定点	9	なし	地上基準点1
検証点	13	14	12

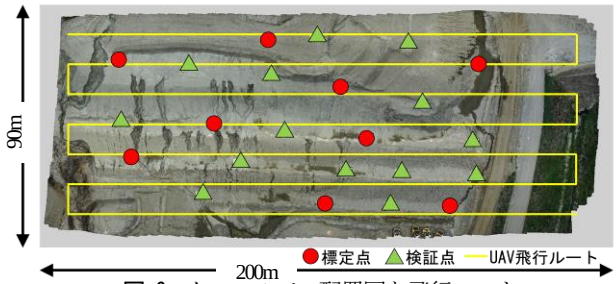

図-6　ケース 1 での配置図と飛行ルート

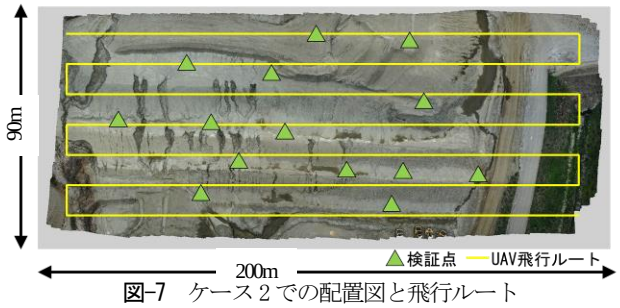

図-7　ケース 2 での配置図と飛行ルート

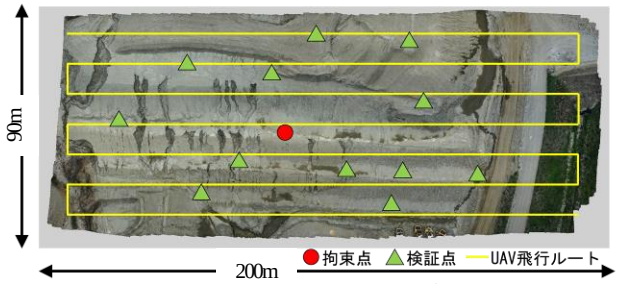

図-8　ケース 3 での配置図と飛行ルート

表-4　各ケースにおける検証点の精度

	検証点の座標較差					
	RMS(m)			MAX(m)		
	X	Y	Z	X	Y	Z
ケース1	0.010	0.011	0.005	0.022	−0.021	−0.010
ケース2	0.009	0.012	0.007	−0.015	0.071	−0.023
ケース3	0.008	0.015	0.007	−0.016	0.033	−0.022

必要としており，ケース 1,3 ではこれを満足している．これに対してケース 2 では 14 点配置した検証点の内 6 点で最大較差が±50mm 上回り，最大で 71mm となった．このことから，TS 追尾型の UAV を用いて 3 次元モデルを作成する場合にには，解析時に地上基準点を 1 点設けることでモデリング精度を i- Construction の出来形管理基準まで向上させることができると考える．

次に，ケース 3 での 3 次元モデルを基準データとして，面的な評価（凸凹の度合い）を行った．3 次元モデルの比較には TREND-POINT（福井コンピュータ社製）を用いた．比較した範囲はケース 1 で設置した外部標定点の内側 8282m^2 とした．

ケース 1 とケース 3 との比較では，**図-9** によればケース 1 の方が標高が高い（暖色系）部分が多いことが分かる．具体的には，**表-5** に示すようにケース 3 を基準とした平均標高差は+1mm となった．これは 3 次元モデルの形状に大きな差が無いことを示している．一方，ケース 2 とケース 3 の比較では，**図-10** のようにケース 2 の標高が全体的に高く（暖色系）なっていることが分かる．**表-5** に示すように，ケース 3 を基準とした平均標高差は+8mm となった．

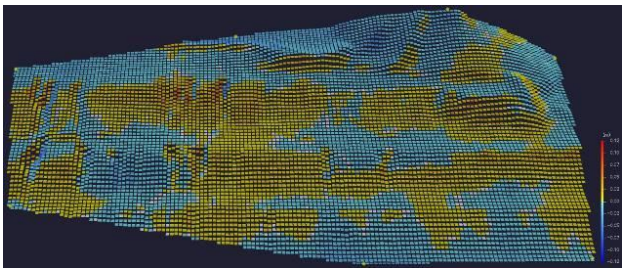

図-9　ケース 1 とケース 3 の面的な標高値比較

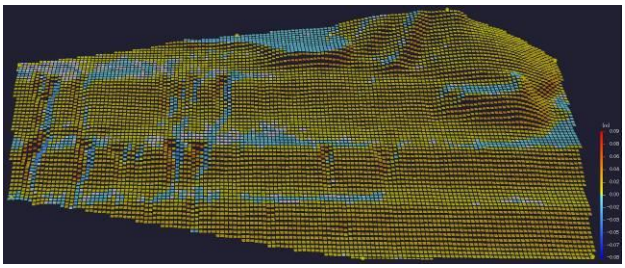

図-10　ケース 2 とケース 3 の面的な標高値比較

表-5　標高差より求めたケースごとの差

比較対象	標準偏差(mm)	土量差(m3)	平均標高差(mm)
ケース1	13	6	1
ケース2	10	67	8

5.　まとめ

自動追尾型 TS を用いた UAV による空撮から 3 次元モデルを作成し，その精度を確認する性能実証実験を実施して，以下のような結果を得た．

①自動追尾型 TS による飛行ログデータを活用した解析により，標定点を使用せずとも i-Construction で規定された精度に近い結果を確認することができた．

②最低 1 点の地上基準点を解析に使用することにより，i-Construction の要求精度を満たすことが可能であることが実証できた．

③紙面の都合上詳細なデータを示せていないが，新手法では，地上基準点 1 点を除き，標定点の設置とその測量が不要となるので，UAV 飛行前の準備作業が割愛できることから，大幅な現地作業時間を削減することができる．

以上のように，本実験により新手法の土工出来形計測における有用性を見出すことができた． センシング技術や SfM 技術およびポジショニング技術の向上により，さらなる現場作業の効率化を今後も検討する所存である．