

24. カメラ位置を直接計測するUAV写真測量システム

TSトラッキングUASの概要と評価結果

株式会社 トプコン ○ 大谷 仁志
株式会社 トプコン 佐々木 剛
(一社) 日本建設機械施工協会 椎葉 祐士

1. はじめに

平成28年度に公表された空中写真測量（無人航空機）を用いた出来形管理要領（土工編）（案）が今年度改訂され、新方式としてUAVに搭載されたカメラ位置を直接計測し、標定点を不要とする新手法が掲載された。UAVを用いた写真測量は、撮影時のカメラ位置を正確に求めるために、建設現場に多数の標定点（対空標識）を設置しなければならない。しかし、実現場で計画通りに設置できない場合や撮影後に写真測量ソフトウェア：SfM（Structure from Motion）を用いて画像上に写っている標定点を抽出する処理がほとんど手作業であることなどがUAV写真測量の計測精度や生産性向上に関する大きな課題であった。

我々はこうしたUAV写真測量の課題をカイゼンするために、自動追尾トータルステーション（以下自動追尾TS）を用いて、空撮時のUAVに搭載されたカメラ位置を直接計測し、標定点を使わない写真測量システムを開発した。本論文ではシステムの概要、技術的要素、地上型レーザースキャナーやトータルステーションを用いた面的精度、作業性などについて報告する。

2. UAV写真測量の課題

UAV写真測量の計測精度を決める要因としては、撮影した画像の品質とカメラキャリブレーション、SfMの精度確保に必要な空中写真のラップ率、そして建設現場に設置する標定点の配置が重要である。特に、標定点はSfMで得られた三次元モデルを工事基準点に座標変換（絶対標定）するため、標定点は外側標定点として100m以内に1点、内側標定点として天端上に200m間隔で設置・固定するように出来形管理要領には記載されている。しかし、図-1に示すように重機が稼働している建設現場では、安全性の観点から重機を停めて標定点を設置・測量しなければならず、足場などの問題により規定通りに設置できない場合がある。また、日々変化する建設現場では、標定点の保存が難しく、その都度、設置が必要であり、前回フライトさせたUAVの撮影計画が同じ

であっても同様の計測精度を得られる保証はない。さらに、現状ではUAVの自律飛行による空撮やSfMでの解析はほぼ自動で行えるが、建設現場での標定点の設置・測量作業や写真測量ソフトウェアを用いて画像上に写っている標定点の検出作業は基本的に手作業のため、UAV写真測量の生産性向上の最大の課題であった。

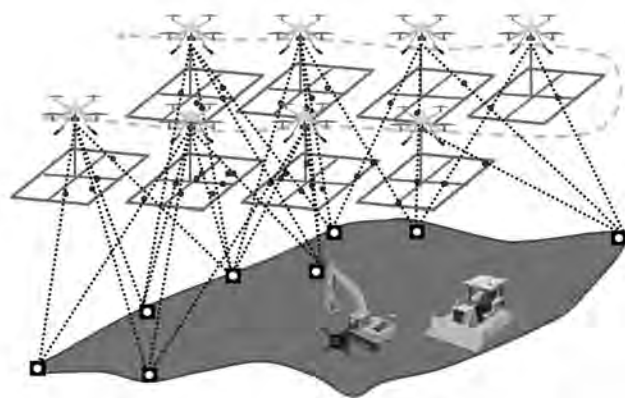


図-1 従来のUAV写真測量の課題

3. システムの概要

カメラ位置を直接計測する手法として、当社で開発した「TSトラッキングUAS」（以下本システム）の構成を図-2に示す。

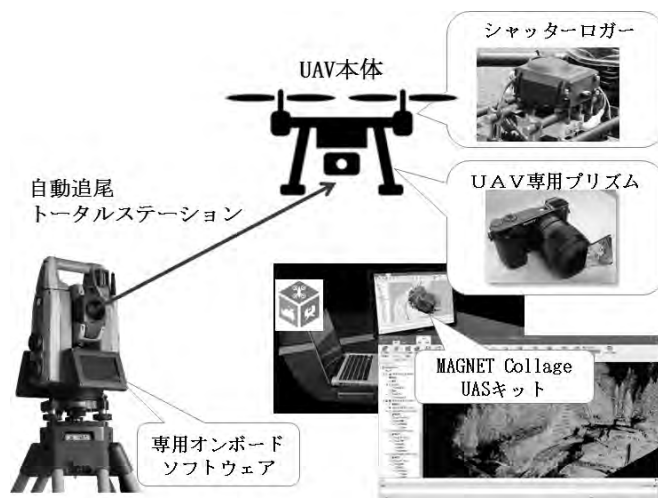


図-2 TSトラッキングUAS

本システムは、カメラのレンズ部分に全周プリズムを取り付け、さらにカメラのシャッタータイミングをGNSS時間で記録するシャッターロガー装置をUAV本体に搭載する。また、図-3に示すようにカメラのプリズムを高速追尾しGNSS時間で三次元データを出力できる自動追尾TSを用いる。これらのデータを専用の写真測量ソフトウェア(MAGNET Collage UAS キット)に入力すると、シャッターロガーと自動追尾TSの時間同期処理により、各画像の撮影位置が求められ、最新のSfMアルゴリズムにより、自動的に点群データが生成できる。本システムは、UAVの機体に搭載する新規に開発したセンサー&部品と既存の製品を改良することでシステム化を実現した。



図-3 自動追尾TSを用いたカメラ位置計測

4. 本システムの技術要素

写真測量では、撮影時のカメラの位置と傾き(外部標定要素と呼ぶ)を必要とする。そのため、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)では、「SfMの利用においてカメラ位置を直接計測できる手法」(p34)と記載されており、各々のカメラの傾きは別途SfMソフトウェアにより後処理で解析できることを前提としている。これまで、航空測量カメラではカメラの位置・傾きを求める直接定位システムとしてGNSS-IMU装置を用いるが、IMUはカメラの三軸の傾きを求めるセンサーとして非常に高価なため、本システムは、後処理でSfMの解析から得られる各カメラの傾きを利用している。以下に本システムの技術的要素について説明する。

4-1 カメラキャリブレーション

本システムは、基本的にカメラの外部標定要素が既知に基づく前方交会法による計測のため、カメラのキャリブレーションは正確でなければならない。独立(事前)したキャリブレーションを高精度に行う方法が理想ではあるが、本論文の精度検証では撮影環境や全体のシステム誤差も考慮してSfMの解析時にセルフキャリブレーションを

行っている。

4-2 レバーアーム補正

写真測量のカメラ位置で必要なのはレンズの主点位置の三次元座標である。そのため、図-4に示すように追尾用全周プリズムはレンズの主点近くに設置した。プリズムはレンズ口径に合わせてホルダー化しており、事前にプリズムとカメラ主点との関係は精密に計測されている。カメラの機種に依存するが、プリズムアダプターをレンズに取り付ければ、その都度計測する必要はない。通常、マルチコプター(回転翼)UAVにはカメラを鉛直方向に制御できるジンバルが取り付けられているが、風等の影響により揺れる場合があり、さらにUAVによる空中撮影時の飛行旋回等によりヘディングが回転するため、カメラの三軸の傾きからプリズム位置をカメラ主点に変換する必要がある。本システムでは、SfMで得られた各画像の三軸の傾きを利用して自追尾TSで求められた各々のカメラのプリズム位置をカメラの主点位置に三次元変換する。



図-4 全周プリズムとレバーアーム

4-3 カメラ位置の高速・高精度な計測

自動追尾TSはUAVの飛行スピードに対応した高速・高精度な性能を必要とする。図-5に自動追尾TSとその同期方法を示す。

本システムで用いる自動追尾TSは、当社のGT、iXシリーズであり、移動体追尾機能を利用する。自動追尾TSの測距及び測角センサーは独立したセンサーで常時観測しており、同時刻における測距、測角データにて移動体の高精度な三次元計測が行える。さらに自動追尾TS内部にはGNSSのモジュールが搭載されており、計測された三次元データに関連づけられたGNSS時間が20Hz(0.05sec)で出力可能である。

UAVにはカメラのフラッシュ・シューに取り付けられた検出センサーにより、撮影時のシャッタータイミングを正確に検出し、GNSS時間で撮影時間を記録できるシャッターロガー装置が搭載される。例えばカメラのインターバルタイマーを2秒に設定した場合、2秒毎の撮影時間をGNSS時間でロガーに記録し、そのログデータと自動追尾TSとのGNSS時間の同期を行い、正確なカメラの撮影位置を計算している。

今年度改訂されたラップ率の緩和により、進行方向のラップ率が90%から80%になり、UAVのスピードを倍にすることが可能になったが、本システムはUAVのスピードが4.2m/s程度の場合でも追尾可能である。

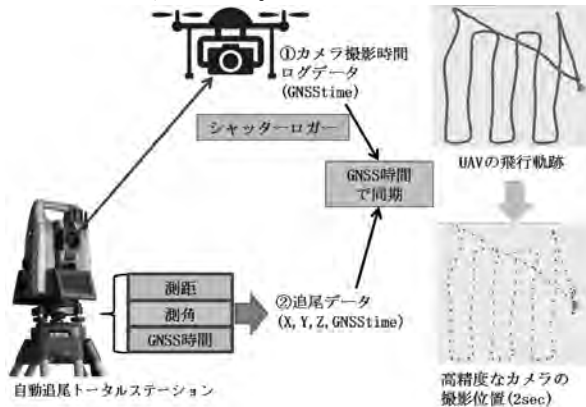


図-5 自動追尾TSと同期方法

5. 精度検証実験

本システムの計測精度と作業性を確認するために、施工技術総合研究所において検証実験を実施した。(図-6)

実験の実施内容は、出来形管理要領に記載されているカメラ位置計測を併用する空中写真測量の事前精度確認試験に従い、UAVとの追尾距離を150mから300mの50m間隔で4フライトのデータを取得した。各フライトの点群データの面的評価としてレーザースキャナー(以下TLS)やトータルステーション(以下TS)との較差を評価した。さらに検証点誤差及び従来の写真測量(標定点設置)との作業時間を比較した。

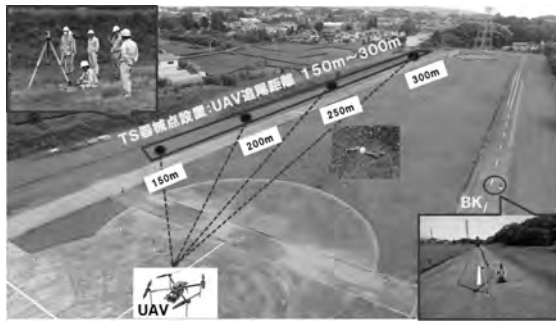


図-6 自動追尾TSの設置と実験風景

5-1 撮影カメラ

本実験で使用したカメラの仕様を表-1に示す。

表-1 カメラの仕様

メーカー型名	SONY α6000
撮像素子	APS-C (23.5×15.6mm)
焦点距離	28mm
撮影画素数(3:2)	6000×4000 2430万画素
画素サイズ	3.91μm
外形寸法 幅×高×奥	120mm×66.9mm×45.1mm
本体質量	344g

5-2 飛行計画

UAV撮影諸元と飛行計画を表-2に示す。対地高度は50mに設定し、地上画素寸法は7mm、解析に用いた撮影枚数は140枚であった。

表-2 UAV撮影計画と諸元

対地高度	50m	
コース間距離	11.1m	
地上画素寸法	7mm	
進行方向ラップ率	90%	
隣接コースラップ率	60%	
UAVスピード	2.1m/s	

検証点はテストエリア(50m×140m)に10点、さらに事前精度確認試験用検証点として天端に10m間隔で6点設置した。ここで「調整点」とは、計測エリア内で測量した少なくとも1点の任意点であり、本システムの補正に使用する。本実験では点番号10を使用した。

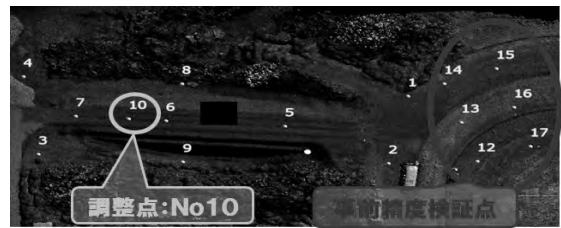


図-7 検証点の配置図

5-3 面的評価

本システムで得られた点群データを図-8に示す。計測密度:10cm間隔(全9017点)で作成し、TLSで得られた点群データとの較差を求めた(表-3)。調整点ありの場合、目標精度内率(出来形計測規格値:±5cm以内)は、全て100%であった。

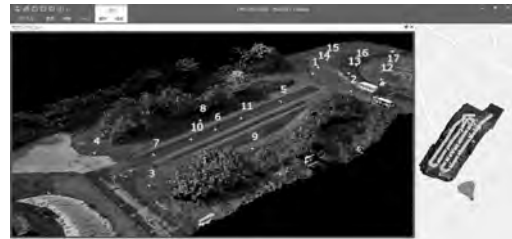


図-8 点群データ(MAGNET Collage UAS)

表-3 TLS(GLS-2000)との較差

条件	TS距離	点群数	標準偏差	最大誤差	目標精度内率(±5cm以内)
調整点なし	150m	9017	1.0cm	7.8cm	81% (7313)
	200m	9017	1.0cm	-4.8cm	100% (9017)
	250m	9017	1.8cm	21.3cm	4.6% (422)
	300m	9017	0.7cm	-8.0cm	70.2% (6329)
調整点あり 1点使用 (NO.10)	150m	9017	0.8cm	4.0cm	100% (9017)
	200m	9017	0.9cm	-4.2cm	100% (9017)
	250m	9017	1.2cm	-4.3cm	100% (9017)
	300m	9017	1.0cm	-4.2cm	100% (9017)

福井コンピュータ（株）のTREND-POINTを用いて図-9に示す各フライトのヒートマップを作成した。調整点を用いた場合、各フライトにおいて天端、法面部分が目標値：±5cm以内に点群データが分布していることを確認した。

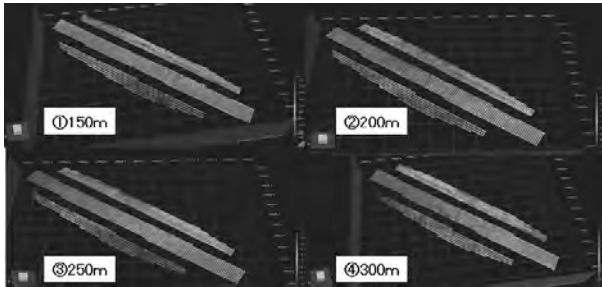


図-9 各フライトのヒートマップ

TSを用いてメッシュ測量（252点）をした結果を表-4に示す。これも上記TLSと同様な結果が得られ、調整点ありの場合では各フライトにおいて、全て目標値：±5cm以下であった。

表-4 TSメッシュデータとの較差

条件	TS距離	点群数	標準偏差	最大誤差	目標精度内率 (±5cm以内)
調整点なし	150m	296	1.1cm	7.2cm	80.2% (202)
	200m	252	0.9cm	-5.1cm	99.6% (251)
	250m	252	4.0cm	19.7cm	4.8% (12)
	300m	252	1.1cm	-10.1cm	67.1% (169)
調整点あり 1点使用 (NO.10)	150m	252	0.9cm	3.2cm	100% (252)
	200m	252	1.1cm	-4.6cm	100% (252)
	250m	252	1.4cm	4.7cm	100% (252)
	300m	252	1.4cm	-6.2cm	99.2% (250)

5-4 検証点精度評価結果

検証点は、テストエリア内に16点設置し、各検証点の三次元座標の最大誤差を表-5にまとめた。調整点ありの場合は全ての検証点は目標値：±5cm以内であった。

表-5 TS検証点の最大誤差

条件	TS距離	検証点数	ΔX Max	ΔY Max	ΔZ Max
調整点なし	150m	16	-5.2cm	-4.0cm	8.8cm
	200m	16	-7.0cm	-8.4cm	-2.1cm
	250m	16	12.8cm	-4.7cm	15.8cm
	300m	16	1.9cm	3.3cm	-3.8cm
調整点あり 1点使用 (NO.10)	150m	15	-2.6cm	-1.8cm	-1.9cm
	200m	15	-3.7cm	-1.8cm	2.3cm
	250m	15	1.6cm	-1.4cm	-4.4cm
	300m	15	-1.8cm	-1.1cm	-1.6cm

5-5 作業性評価

従来の写真測量とカメラ位置を直接計測する手法の作業時間を比較した結果を図-10に示す。従来の写真測量は90分、本システムのカメラ位置を直接計測する手法は25分であり、作業時間が7割程度削減できる。

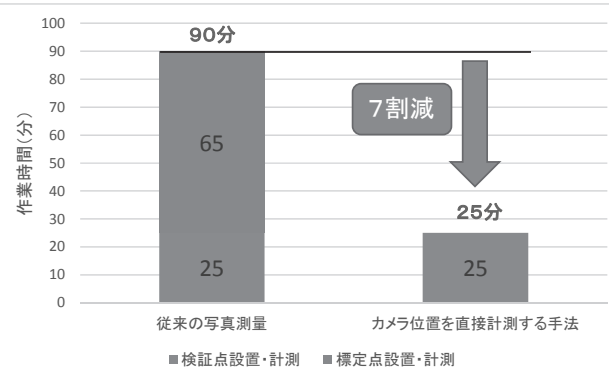


図-10 作業時間評価

6. おわりに

本実験の結果、本システムを用いると、TLSやTSメッシュ測量との面的な較差および検証点の最大誤差の結果は、調整点ありの場合において全て目標値：±5cm以内であることが確認できた。また作業時間は、本システムは標定点の設置・測量作業が不要になるため、7割程度削減できる。これは、UAV写真測量のメリットでもあるが、建設現場の計測範囲が広がるほど生産性向上が見込める。

本手法を用いる場合には、①自動追尾TSを精度よく設置する。②調整点は計測範囲の内側に少なくとも1点設置する。③自動追尾TSが確実にUAVを追尾できるように太陽光が入らない位置に設置することが必要である。

本システムは、i-ConstructionにおけるUAV写真測量の計測精度と生産性向上を目的として、現行製品を改良し早期に商品化を進めた。従来の写真測量に必要な標定点そのものを不要とするため、建設現場だけでなく、災害現場や河川などで有効である。さらに本手法は非GNSS環境下でのUAVの機体の制御も可能であり、将来的に橋梁などのインフラ点検に応用できると考えられる。

参考文献

- 1) 空中写真測量を用いた出来形管理要領（案）：
<https://www.mlit.go.jp/common/001179704.pdf>
- 2) T. Anai, T. Sasaki, H. Otani, K. Osaragi, N. Kochi” AERIAL PHOTOGRAMMETRY PROCEDURE OPTIMIZED FOR MICRO UAV” ISPRS Volume XL-5, 2014, pp.41-46
- 3) 黒台昌弘、澤正樹、小川満、大谷仁志：造成工事の出来形・土量管理に適用する3次元計測技術の比較検討、土木学会第70回年次学術講演会第VI部門、pp.15-26、2015
- 4) 佐々木剛、深谷暢之、佐々木大輔、穴井哲治、大谷仁志：小型UAVによる空撮画像からの自動標定とモデリング、日本写真測量学会平成27年度年次学術講演会、pp.5-2、2015