

RTK-GNSS 搭載型 UAV を用いた

空中写真測量における標定点数削減に関する検討

国土技術政策総合研究所 ○ 木村 圭佑
 国土技術政策総合研究所 山下 尚
 国土技術政策総合研究所 小塚 清

1. はじめに

国土交通省では「ICTの全面的な活用」等の施策を建設現場に導入することによって、建設生産システム全体の生産性向上を図り、魅力ある建設現場を目指す取り組みであるi-Constructionを平成28年度より進めており、必要となる出来型管理・監督・検査等の要領および基準類の整備を行っている(図-1)。

整備を行うにあたり、公共工事の工種は多種にわたること、またICTの進歩が速いことから、令和元年度よりICTを活用する立場にある関係業団体から、

- ① 新たなICTを活用する提案
- ② 既存ICTの活用対象を広げる提案
- ③ 既存基準類の改定(カイゼン)

の3点を対象とした提案(以下民間提案とする)を募集し、本年度は22件の提案・要望を受け付けた(図-2)。

本報では、民間提案の中から土工における無人航空機(以下UAVとする)を用いた空中写真測量の標定点設置に対する提案・要望を対象とし、それに関連した検証実験について述べる。

2. 研究目的

空中写真測量を実施するには、測量対象の内外に標定点と検証点を設置する必要がある。標定点は写真測量により得られた3次元データに座標を付与するために用いる点で、検証点は3次元データに付与した座標の精度を確認するために用いる点である。標定点や検証点は計測器精度の関係から現在の要領では、中心座標をトータルステーション(以下TSとする)等により測量する必要がある。その設置数は測量範囲の大きさに比例して増加し、それに伴って測量に関する作業時間は増加する。このことから標定点や検証点の測量作業は現場作業の省力化についての課題となっている。そのため、標定点数を削減することで作業時間を軽減させる技術開発が行われており、例えばプリズムを取り付けたUAVをTSで追尾しカメラ位置を正確に測量することで、標定点なしで所定の精度(検証点誤差が±0.05m以内)を確保できる技術が登場した。この技術は、カメラ位置を直接計測できる手法として標定点の設置が不要とすることができると出来型管理要領で規定している。その後、RTK(リアルタイムキネマティック法)-GNSS等を用いて、カメラ位置を高精度に得られるUAVが登場し、このたびこの技術を用いることで標定点不要とすることは出来ないが削減することができるという民間提案をいただいた。

基準適用年度				
平成28年度	平成29年度	平成30年度	令和元年度	令和2年度
ICT土工				
	ICT舗装工(アスファルト舗装)			
	ICT浚渫工(港湾)			
	ICT舗装工(コンクリート舗装)			
	ICT浚渫工(河川)			
	ICT地盤改良工(浅層・中層混合処理)			
	ICT法面工(吹付工)			
	ICT付帯構造物設置工			
	ICT地盤改良工(深層)			
	ICT法面工(吹付法砕工)			
	ICT舗装工(修繕工)			
	民間等の要望も踏まえ更なる工種拡大			

図-1 i-Construction基準類の整備状況

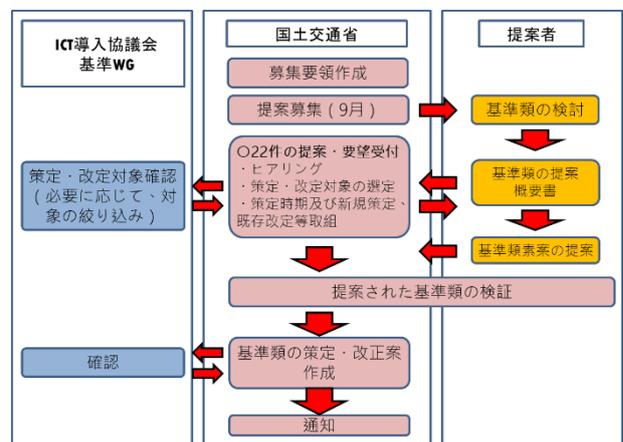


図-2 基準類民間提案のフロー

表-1 RTK-GNSS 搭載型 UAV で使用できる測位技術

	RTK 方式	ネットワーク型 RTK 方式	PPK 方式
説明	既知点設置の基準局による補正情報で座標を決定する	電子基準点からの補正情報を通信回線により取得する RTK	UAV で取得した位置座標とタイムスタンプから、後処理で電子基準点の補正情報により座標を求める
長所	通信回線不要	基地局不要	基地局不要 通信回線不要
短所	基地局必要 既知座標上に設置	携帯回線が使えないと使用不可 月額料金必要	後処理なので撮影時に良い結果が得られるか不明

表-2 検証条件

使用 UAV	DJI Phantom4 RTK
撮影高度および地上画素寸法	36.5m (0.01m/画素) 73m (0.02m/画素)
カメラ位置を直接計測する手法	① GNSS 単独測位 ② RTK-GNSS ③ ネットワーク RTK-GNSS ④ PPK-GNSS
標定点	① 従来手法 (5 点) ② 四隅 (4 点) ③ 中央 (1 点) ④ なし
写真のラップ率	進行方向 90%, 隣接コース間 60%
SfM ソフトウェア	Pix4D Mapper
検証方法	検証点 (8 点) 中心座標の較差

本報は、RTK-GNSS 搭載型 UAV を用いた空中写真測量に関して、民間提案で提供されたデータを基に、この技術が土工の出来形管理に使える技術であるかどうか検証を行い、その結果を示すものである。

3. 研究方法

本報では、RTK-GNSS 搭載型 UAV を用いて検証実験を実施した。研究に用いた UAV では RTK-GNSS 方式以外にも、ネットワーク型 RTK-GNSS 方式 (VRS 方式) や、PPK-GNSS (後処理キネマティック) 方式も実施可能である (表-1)。これらの測位技術は現場条件に応じて使い分けることで利便性が向上すると考えられるため、全ての方式で検証を行うこととした。

検証条件を表-2 で示す。地上画素寸法は 0.01m/画素と 0.02m/画素の 2 パターンで、それに応じた



図-3 標定点と検証点の配置

飛行高度を設定する。写真のラップ率は進行方向 90%、隣接コース間を 60%である。標定点および検証点は図-3 で示す配置とし、中心座標の測量は TS を用いて実施した。また、標定点数と検証点誤差の関係を求めるために、使用する標定点数を 0 点、1 点 (中央)、4 点 (四隅)、5 点と変えてそれぞれ解析を行った。

検証方法は、TS で測定した座標を真値とし、SfM (Structure from Motion) 解析で得られた検証点中心座標との較差を測量誤差とし、この大きさが出来形管理要領に規定している $\pm 0.05\text{m}$ 以内であることを確認することで行った。なお機体個体差による影響を防ぐために、カメラ位置を直接計測する手法毎に、同型別機体を用いて 2 回ずつ撮影を実施した。

4. 研究結果

検証の結果を以下に示す。XY 軸方向（平面方向）の測量誤差については全ての計測パターンにおいて、出来形管理要領で規定している $\pm 0.05\text{m}$ 以内に収まっていたため、Z 軸方向（高さ方向）について述べることにする。

図-4 から図-7 は、それぞれ標定点を 0 点、1 点（中央）、4 点（四隅）、5 点（従来手法）設置した場合における、各カメラ位置を直接計測する手法で、地上画素寸法 $0.01\text{m}/\text{画素}$ の場合の測量誤差の最大値・最小値（白箱部の上下）および測量誤差の平均（ μ ）と標準偏差（ σ ）から求めた $\mu \pm 3\sigma$ （上下のヒゲ部）を示したものである。測量誤差が正規分布に従うと仮定するならば、その分布は $\mu \pm 3\sigma$ の間に 99.7% が収まる。

地上画素寸法が $0.01\text{m}/\text{画素}$ で、標定点が 0 点（無し）の場合、いずれのカメラ位置を直接計測する手法においても、測量誤差の最大値・最小値および $\mu \pm 3\sigma$ が $\pm 0.05\text{m}$ を満たしておらず、所定の精度を確保できないことがわかる。地上画素寸法 $0.02\text{m}/\text{画素}$ 、標定点無しの場合は、さらに条件が悪くなるため、同様に精度を確保できていない。

標定点が 1～5 点の場合、RTK・VRS・PPK 方式では、最大値・最小値および $\mu \pm 3\sigma$ が $\pm 0.05\text{m}$ の

範囲内を満たしていることがわかる。また、これら 3 つの方式では、地上画素寸法が $0.02\text{m}/\text{画素}$ の場合においても同様に所定の精度を確保できることが確認できた。

GNSS 単独測位については、標定点数が増加することで検証点の誤差が減少するが、いずれの場合においても所定の精度（ $\pm 0.05\text{m}$ ）を確保できていないという結果が得られた。これは、従来手法では UAV から取得した GNSS 測位による座標を用いず、標定点の座標を用いて SfM 解析により得られた 3 次元点群データに座標を与えるからであると考えられる。また、RTK・VRS・PPK については標定点数の増加と検証点の誤差に関連は見られなかった。

図-8 および図-9 はそれぞれ地上画素寸法が 0.01m と 0.02m で、RTK・VRS・PPK 方式における、標定点を中央 1 点とした場合での標定点と検証点の平面距離と検証点の Z 方向の誤差の関係を示したものである。

図から平面距離と Z 方向の誤差に相関関係が見られず、誤差は標定点と検証点の直線距離に依存しないと考えられることから、標定点を 1 点とする場合において、設置する位置は検証対象エリアの中央でなくても良いことが示唆される。

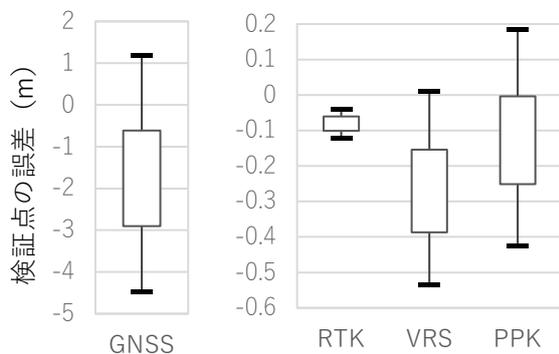


図-4 標定点0点の場合の誤差（0.01m/画素）

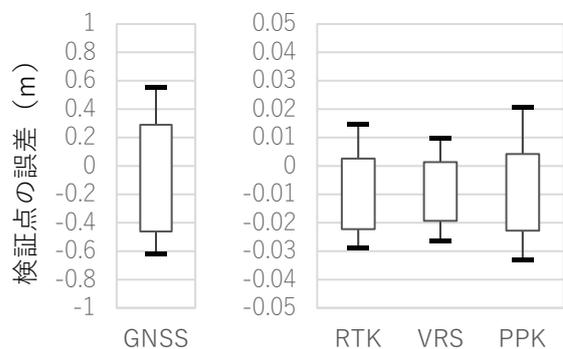


図-5 標定点1点の場合の誤差（0.01m/画素）

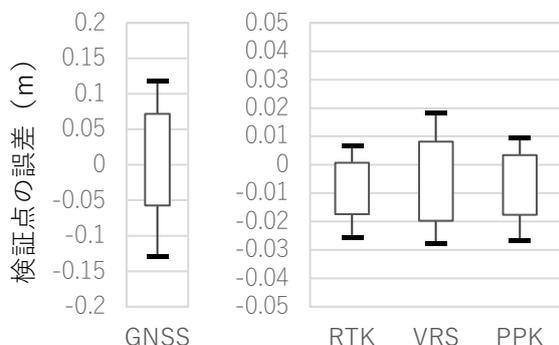


図-6 標定点4点の場合の誤差（0.01m/画素）

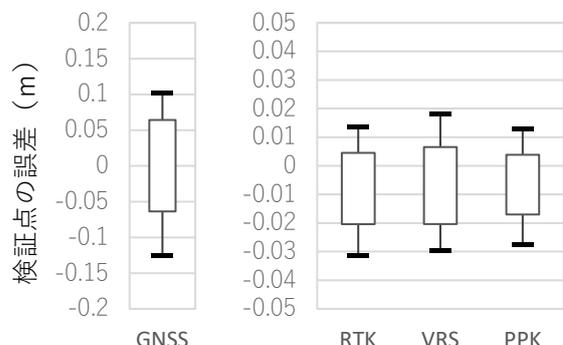


図-7 標定点5点の場合の誤差（0.01m/画素）

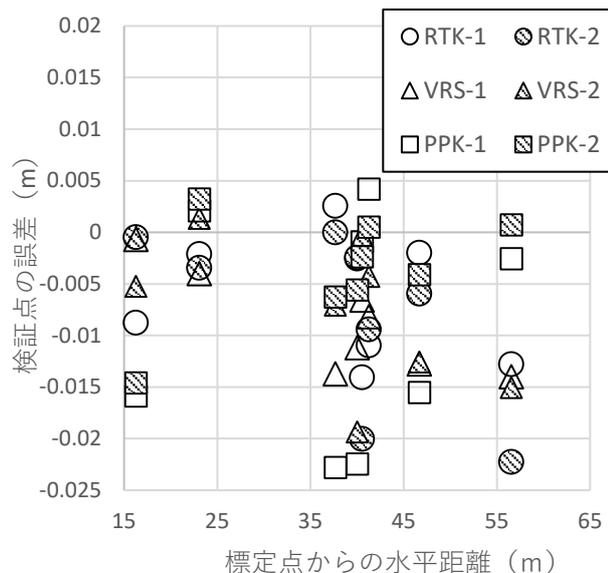


図-8 カメラ位置を直接計測する手法ごとの
標定点-検証点間距離と測定誤差 (0.01m/画素)

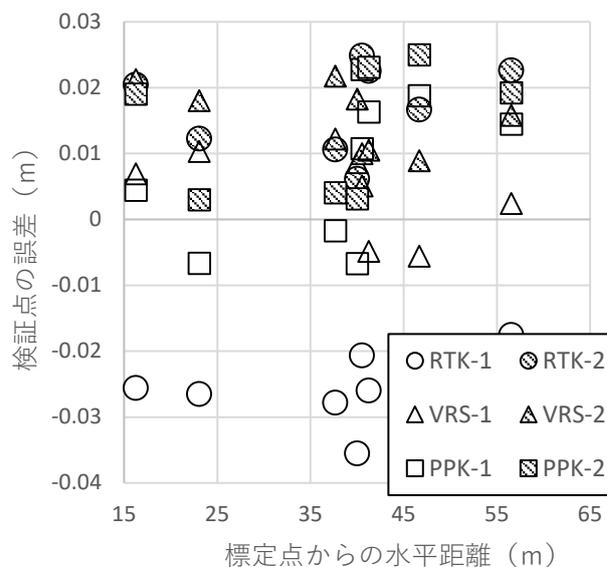


図-9 カメラ位置を直接計測する手法ごとの
標定点-検証点間距離と測定誤差 (0.02m/画素)

5. 結論

検証結果から、RTK-GNSS搭載型UAVを用いた、RTK・ネットワーク型RTK(VRS)・PPKの各手法を用いたカメラ位置を直接計測する技術を用いた場合、標定点なしの時では、出来形管理要領に規定されている検証点精度を確保することができないが、1点以上設置すれば精度を確保できることが確認できた。

また、現行の要領では出来形計測において地上画素寸法0.01mを満足する条件を付していたが、カメラ位置を直接計測する手法を用いることで地上画素寸法0.02mとした場合でも所定の精度を確保できることが結果として得られた。

加えて、検証点の誤差は、標定点と検証点間の距離に依存しないことが示唆された。これは、RTK-GNSS等を用いてカメラ位置を直接計測した場合、XY軸方向の計測精度は高いがZ軸方向(高さ方向)は低いため、標定点を用いて高さ方向の座標を合わせていると考えられる。そのため、標定点の設置位置とXY軸方向の計測精度には関連がみられなかったと推測される。

今回の検証では、標定点を1点とした場合について、その設置位置が測量対象の中央の場合にのみ、標定点と検証点間の距離とその測定誤差について検証を実施したが、他の4点のうち1点を標定点として使用した場合での精度検証を追加で実施することで、標定点の配置場所の制約条件等を調査することができると思われる。

本報ではRTK-GNSS搭載型UAVを用いて検証を行った。今後は、本検証結果の妥当性を検討するために、現行の要領で使用可能と記載されているTS追尾型UAVを用いて、今回の検証と同条件で追加検証を行い、その結果の比較・検討の実施を予定している。

参考文献

- 1) 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), 2019
- 2) UAVを用いた公共測量マニュアル(案), 2017
- 3) 第11回 ICT導入協議会資料, 2020