

RTK-GNSS 搭載型 UAV を用いた写真測量の 地表面沈下計測への適用性の検証

Verification of Applicability of Photographic Measurement Using RTK-GNSS-Equipped UAV to Ground Surface Subsidence Instrumentation

木村 圭 佑^{*1}
Keisuke Kimura
藤本 克 郎^{*2}
Katsuro Fujimoto

勝部 峻太郎^{*1}
Shuntarou Katsube
古宮 正勝^{*2}
Masakatsu Komiya

松田 浩 朗^{*1}
Hiroaki Matsuda

【要旨】

トンネル工事においては、掘削に伴うトンネル直上の沈下といった地表面変状が問題となる。地表面の変状監視には、トータルステーションがよく用いられるが、地表面にプリズムを設置する必要があり、供用地での計測が困難であった。一方で、UAV による写真測量が土工の出来形測量に活用されているが、計測頻度の多い地表面変位計測への活用については、計測に必要なターゲットの測量など労力の面で問題があった。

本報では、ターゲットを削減可能な RTK-GNSS を搭載した UAV による写真測量の地表面変位計測への適用性を検証する目的で、計測精度の検証実験を実施した。本論文ではその結果を示す。

【キーワード】 UAV RTK-GNSS SfM 地表面沈下計測 ICT

1. はじめに

国土交通省は、2016年にICTの全面的な活用など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、もって魅力ある建設現場を目指す取り組みである、i-Constructionを開始した。この取り組みにより、UAV (Unmanned Aerial Vehicle) を用いた写真測量やレーザースキャナを用いた3次元計測技術による出来形管理要領が盛り込まれた。このような社会背景から、建設現場におけるUAVの導入が進んでいる。

ただし、UAVの活用は、出来形計測や工事写真の撮影と言った用途に留まっていることが現状である。そこで筆者らは、UAVの新たな活用方法として、建設工事現場直上の地表面沈下計測に着目した。

地表面沈下計測は、トータルステーション (以下、TS) がよく用いられている。ただし、TSを用いる方法では、地表面にプリズムを設置する必要があり、トンネル直上が供用されている場合などにおいてはプリズムの設置が難しく、適用できないこともある。

一方で、UAV写真測量は、計測対象にセンサ等を設置する必要がなく、供用地においても適用が可能である。ただし、計測精度の確保・検証のために計測対象範囲周辺にターゲットを設置する必要がある。また、UAV写真

測量実施毎にターゲットの座標をTSといった他の方法で別途測量する必要があり、ターゲットの設置・測量に関する労力が課題となっている。

近年、自身の座標を正確に連続測定できるRTK-GNSS搭載のUAVが開発されている。本UAVを利用することで、ターゲットの数を削減可能であり、計測精度が確保できれば、ターゲットの設置・測量に関する労力を削減できると考えられる。

以上のことから、RTK-GNSS搭載型UAVによる写真測量技術の地表面変位計測に対する計測精度の検証を目的として、現場実験を実施し、その結果を報告する。

2. 検証現場の概要

令和2年度北勢BP坂部トンネル工事 (発注者: 国土交通省中部地方整備局) において、検証実験を実施した。本工事は、丘陵地を約870mの延長で貫くトンネルを建設する工事のⅢ期工事である。トンネル上部は営業中のゴルフ場で、未固結地山を最小厚3mの低土被りで施工する条件下での工事である。Ⅰ期工事では200mmを超える地表面沈下が発生しているため、ゴルフ場の営業に支障がないよう、適切な掘削工と掘削補助工の施工、計測管理を徹底し、地表面の沈下対策が求められている。

1. 技術研究所 研究開発G 第一研究室 2. 名古屋支店 坂部トンネル作業所



写真-1 標定点・検証点用ターゲット



写真-2 Phantom4 RTK

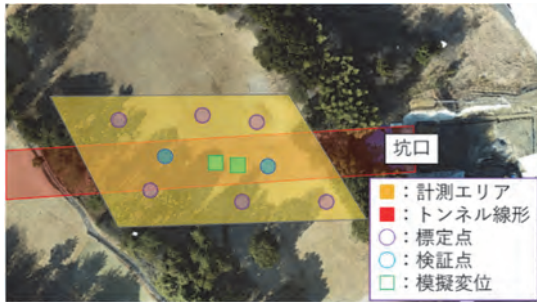


図-1 計測エリアと標定点・検証点配置図

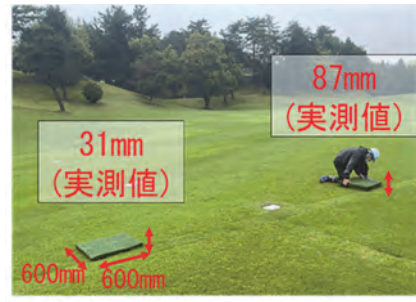


図-2 模擬変位として用いた人工芝

3. 検証方法

本報では、「3次元計測技術を用いた出来形管理要領(案)」(令和4年3月版)²⁾に記載の、UAV写真測量による土工の出来形管理手法に従い、地表面沈下計測が実現可能か検証を行った。その検証方法を以下で示す。

UAV写真測量では、撮影写真からSfM(Structure from Motion)技術を用いて、3次元点群データを作成する。3次元点群データは絶対座標を有しておらず、何らかの方法で絶対座標に変換する必要がある。絶対座標を与える方法として、①標定点を用いる方法(以下、標定点方式)、②UAVの機体座標を利用する方法が挙げられる。

写真-1は、写真測量で使用される、計測エリアに設置するターゲットである。標定点方式では、このターゲットを、3次元形状を取得したい範囲を囲うように4点以上設置する。ターゲットの中心座標をTS等で測量し、絶対座標を得る。SfM解析で作成した3次元点群データ上の標定点に、絶対座標を入力することで、3次元点群データに絶対座標を付与する。この方法では、出来形管理基準(水平・鉛直±50mm)を満足する検証点精度が確保できることを確認できている。

しかし、標定点方式では、最低でも標定点が4点必要である。さらに、計測対象の面積に応じて、標定点を増やす必要があり、設置や測量に対する労力が課題となる。

この課題を解決する方法として、②UAVの機体座標を利用する方法が近年利用されている。UAVには、自機のおおまかな位置を取得するためにGNSSを搭載しているが、従来は、単独測位方式のため機体座標の精度が10m程

度となり³⁾、最終的な検証点精度も出来形管理基準(水平±50mm、鉛直±50mm)を満足しないものとなっていた。近年、機体座標を正確に取得する方法として高精度なRTK(Real Time Kinematic)機能を有したGNSSを搭載したUAVが開発されている。RTK-GNSSの測位精度は1~5cmであり³⁾、写真の撮影位置を正確に記録することが可能で、標定点の設置枚数を1枚まで削減できるとともに、出来形管理基準を満足する検証点精度を確保できるため、作業の生産性向上に大きく寄与する。

ただし、出来形管理基準を満たす精度が確保できるとしても、地表面沈下計測への適用性は検証が必要である。

そのため、実現場において標定点方式とRTK-GNSSを用いる方法(以下、RTK-GNSS方式)で、検証点の精度を検証した。また、模擬的な変位を適用し、その変位計測結果から計測精度を検証した。

本検証実験では、RTK-GNSS搭載のUAVとして、DJI社製のPhantom4 RTK(写真-2)を用いた。計測エリアは図-1の黄色部分で示す、トンネル掘削部直上のゴルフ場敷地内である。また、標定点の使用枚数が、精度におよぼす影響を調べるために、最低限必要な4点に2点加えた6点を設置した。なお、検証点は2点設置している。

また、模擬的な地表面変位(以下、模擬変位)として、図-2で示す人工芝を用いた。これは、検証対象が芝生であり、形状が類似した物を選定したためである。人工芝は、1辺が600mm、厚さが31mmおよび87mmの2種類を用いた。この人工芝を設置した状態と、未設置の状態の点群データを比較することで検証を行った。

UAVによる写真撮影の方法を、表-1で示す。飛行高度は、30mと50mの2通りとした。出来形管理要領では、地上画素寸法が10mm以下となる飛行高度で撮影と規定されているが、検証点精度を満たすことが確認できる場合は、地上画素寸法は任意でも良いとされているため、地上画素寸法がそれぞれ8mmと14mmとなる飛行高度とした。また、RTK-GNSSによるUAV機体位置の取得方法は、携帯電話通信回線を使用した仮想基準点方式(VRS)を用いた。UAVの飛行コースは、進行方向ラップ率80%、サイドラップ率60%となるように設定している。なお、SfM解析は、Agisoft社製Metashapeを用いて実施した。

4. 検証結果

4.1 検証点の精度検証

模擬変位の有無における、検証点での精度確認結果を表-2に示す。標定点方式は、現場内に設置した4点、および6点の2通りとし、点群の現場座標系への変換を行っている。また、RTK-GNSS方式では、出来形管理要領(案)に則り、RTK-GNSSによるUAVの写真撮影位置および、標定点を1点使用することで点群の現場座標系への変換を行っている。なお、標定点方式、およびRTK-GNSS方式では両者とも同じ写真を用いている。

表-2より、標定点方式では、標定点数にかかわらず

検証点精度は3方向全て±10mm以下となることがわかる。出来形管理要領では、検証点精度が±50mm以下となることが求められているため、標定点は最低限必要な4点でも十分な精度であることが確認できる。以後の検証は、標定点が4点の場合の点群を用いることとする。

RTK-GNSS方式は、検証点精度が標定点方式に比べ、低い結果となった。特に、飛行高度が30mで模擬変位が有る場合、最大で70mm(Y方向)となっており、出来形管理要領で求められている精度を満たしていない。一方で、飛行高度が50mの場合、最大で27mm(X方向)の誤差であり、出来形管理要領(案)で求められている精度を満たしている。

一般的に、飛行高度が低い方が地上解像度の高い写真を撮影可能であり、より高精度な点群を生成することが可能であるが、本現場のようにゴルフ場のような地表面が植生で覆われている場所では、低高度での撮影は、写真間の特徴点が少なく、SfM解析において不利に働き、精度が低下したものと考えられる。また、飛行高度が高い方が、電波の障害となる周囲の植生に影響を受けずにGNSS電波を受信できることで、UAVの位置座標精度が高くなり、点群データの精度も高くなった可能性も考えられる。

表-1 実験条件

機体	DJI Phantom4 RTK	
座標付与方法	標定点・RTK-GNSS	
対地高度	30m	50m
地上解像度	8mm/pix	14mm/pix
写真ラップ率	80%, 60%	
SfMソフトウェア	Agisoft Metashape	



図-3 検証領域(赤色の部分)

表-2 検証点における精度確認結果(単位: mm)

			標定点 4点			標定点 6点			RTK-GNSS		
			ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ
模擬変位無	飛行高度 30m	検証点①	1	0	0	1	0	-2	23	3	-2
		検証点②	1	2	2	1	1	0	31	10	27
	飛行高度 50m	検証点①	0	0	1	1	0	-1	15	-4	-3
		検証点②	1	2	3	1	2	5	11	3	3
模擬変位有	飛行高度 30m	検証点①	-2	-2	3	-1	1	-3	7	-37	23
		検証点②	-1	0	6	-2	2	1	25	-70	-32
	飛行高度 50m	検証点①	1	0	-1	1	0	-1	27	-3	-7
		検証点②	1	3	3	1	4	4	18	0	6

4. 2 模擬変位の計測結果

模擬変位適用前後の結果を比較し、模擬変位の計測結果とした。対象は、図-3で示す模擬変位周辺の約400㎡の領域である。模擬変位がない状態を基準とし、模擬変位がある点群との差分をとっている。

表-3は、模擬変位設置部分における、10mmメッシュ(0.0001㎡)の差分を示したものである。表より、すべての結果において、31mmの模擬変位に対して最大12mm、87mmの模擬変位に対しては最大7mmの範囲で変位を計測できていることがわかる。この結果より、UAV写真測量を用いることでcmオーダーの沈下計測が可能であることが示唆される。

次に、検証領域内での模擬変位を設置していない部分における、点群の差分について示す。これは、模擬変位を設置していない部分は、理想的には全ての点において差

表-3 模擬変位周辺の差分

方式	飛行高度	模擬変位	点群の最大差分	差
標定点	30m	31mm	37mm	+6mm
		87mm	86mm	-1mm
	50m	31mm	41mm	+10mm
		87mm	90mm	+3mm
RTK-GNSS	30m	31mm	30mm	-1mm
		87mm	80mm	-7mm
	50m	31mm	43mm	+12mm
		87mm	90mm	+3mm

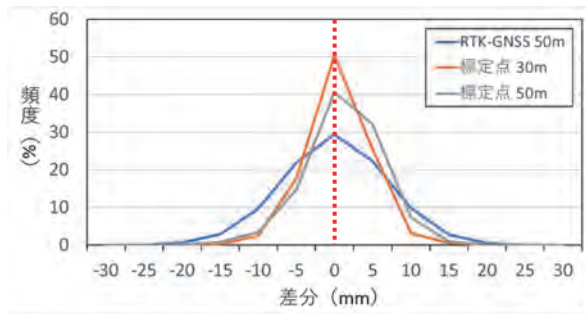


図-4 (a) 差分のヒストグラム

分はゼロとなるが、全く同じ座標の差分を取っているわけではないため、平均値と最大・最小値を用いて比較・検証を行った。その結果を表-4に示す。表より、差分の平均値はどの方法においても±5mm以下になっている。また、標定点方式、およびRTK-GNSS方式の飛行高度が50mの場合については、差分の最大・最小値が±30mm程度である。図-4に、差分のヒストグラムを示す。図-4(a)より、標定点方式については、±10mm以内の差分は、飛行高度30mが約97%、飛行高度50mが約95%であった。また、RTK-GNSS方式の飛行高度50mが、約83%であった。最大・最小値は30mm程度であるが、ばらつきはほぼ±10mm以内であることがわかる。一方で、RTK-GNSS方式の飛行高度が30mについては、差分の最大・最小値が±130mmとなっている。また、図-4(b)より、±10mm以内の差分は、11%と他の結果と大きく異なる結果となった。

RTK-GNSS方式における飛行高度が30mおよび50mの場合について差分の値のヒートマップを図-5に示す。

表-4 模擬変位周辺以外の差分

方式	飛行高度	差分		
		平均値	最大値	最小値
標定点	30m	-1.0mm	22mm	-26mm
	50m	-0.7mm	24mm	-29mm
RTK-GNSS	30m	3.2mm	130mm	-124mm
	50m	2.3mm	30mm	-21mm

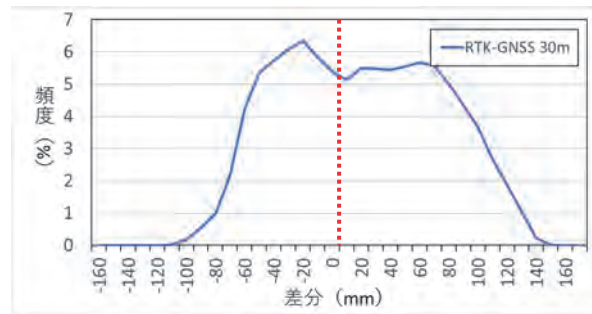


図-4 (b) RTK-GNSS 30mにおける差分のヒストグラム

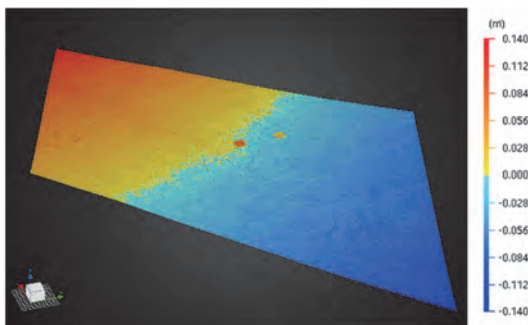


図-5 (a) RTK-GNSS 30m 差分のコンター

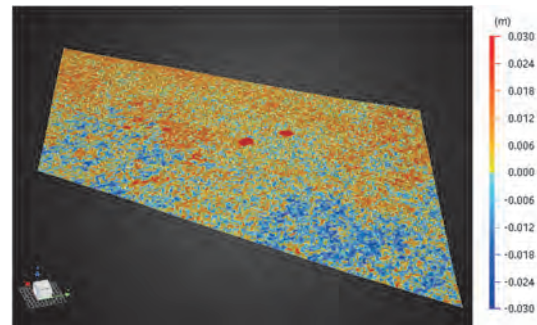


図-5 (b) RTK-GNSS 50m 差分のコンター

図-5 (a) より、飛行高度 30m の場合、模擬変位設置後点群の左上側が高く右下側が低くなっていることが確認できる。差分の基準面を他の点群とした場合においても同様であったため、模擬変位適用後の点群が傾いていると判断できる。すなわち、基準面と比較面の傾斜が異なるため、適正な差分が出ていないことがわかる。ただし、本報で模擬変位を設置した位置は検証領域の中央付近で、点群間の差分が少ない場所であったため、点群の比較で模擬変位が 10mm 程度の誤差で計測できたと考えられる。

一方で、飛行高度 50m の場合は、点群間の差分は小さく、全体的に基準面と比較面の傾斜も同等であることがわかる (図-5 (b) 参照)。

5. おわりに

本報では、3次元計測技術を用いた出来形管理要領(案)に記載されている、土工での RTK-GNSS を搭載した UAV による写真測量技術を用いた出来形管理手法を、地表面沈下計測に適用した。

標定点方式では、検証点精度が出来形管理要領の基準値内、かつ模擬変位の検出確認でも実測値±10mm の範囲で計測できる結果が得られた。

一方、RTK-GNSS 方式でも標定点方式と同等の精度で計測できる場合もあるが、周辺環境と飛行高度の影響で精度が劣化することを確認した。

なお、本現場における地表面沈下の管理基準値は 25mm であり、mm 単位の計測精度が必要であるため、本研究で実施した UAV による地表面沈下計測をそのまま適用することは困難である。

しかし、UAV 写真測量は、沈下計測の省力化など生産性向上が期待できるため、今後も研究を重ねて測量精度向上に努め、また他の用途への適用視野に入れ、開発を進めていく予定である。

謝辞：本検証を行うにあたり、国土交通省中部地方整備局北勢国道事務所ならびに名四カントリークラブの皆様をはじめ多くの方々には、ご理解、ご協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 安藤綾香, 軟弱地盤かつ低土被り区間のトンネル掘削における地表面沈下対策について, 中部地方整備局管内事業研究発表会, 2021
- 2) 国土交通省 総合政策局, 「要領関係等 (ICT の全面的な活用)」, https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/constplan/sosei_constplan_tk_000051.html, (参照 2022-08-23)
- 3) 国土地理院, 「GNSS を使用した測量のいろいろ」, <https://www.gsi.go.jp/denshi/denshi45009.html>, (参照 2022-08-23)
- 4) 酒井 健吾, 山本 遼介, 長谷川 宏一, 泉 岳樹, 松山 洋, 小型 UAV から撮影された直下視画像と斜め視画像を用いた森林樹冠の DSM 作成, 日本リモートセンシング学会誌, 2016, Vol36, No. 4, pp388-397.

Summary The problem of ground surface deformation, such as subsidence of an area directly above the tunnel, arises because of the excavation in tunneling work. Although the total station is often used for the monitoring of ground surface deformation, the instrumentation on commonly used land was difficult because the installation of prisms on the ground surface was required. On the other hand, photographic measurement using UAV is utilized for finished shape instrumentation in earthwork, and when utilizing it for the instrumentation ground surface displacement with high frequency instrumentation, there was a problem from the aspect of labor, such as measurement of target required for instrumentation.

This paper conducted verification experiments for instrumentation accuracy for the purpose of verifying the applicability of photographic measurements using RTK-GNSS-equipped UAV capable of eliminating the target to the instrumentation of ground surface subsidence. This paper shows its results.

Key Words : UAV, RTK-GNSS, Structure from Motion, Ground surface measurement, ICT

