移動体多点計測技術(MMS)を用いた 出来形管理に向けた基礎的研究

椎 葉 祐 士・桑 野 裕 士

国土交通省は、生産性向上の施策として「i-Construction」に取り組んでおり、平成28年度は土工事を対象に、平成29年度は舗装工事を対象にICTを全面的に活用する工事が進められている。その中では、3次元計測技術として、地上型レーザースキャナーやドローンを用いた空中写真測量が適用できることとなっており、面的に多点の計測を実施できる技術が導入されている。筆者らは、新たな計測技術の導入によるさらなる生産性向上の可能性を確認すべく、移動体多点計測技術を用いた出来形管理に着目し計測精度や作業性について検証した。なお、本報告は、すべての移動体多点計測技術を網羅した検証結果ではなく、今回の検証対象とした適用技術から得られた結果として、適用可能性の一側面を述べる。

キーワード: i-Construction, 出来形管理, MMS, IMU, レーザースキャナー, トータルステーション, GNSS

1. はじめに

国土交通省では、平成28年度を生産性革命元年と位置づけ、調査・測量、設計、施工、検査及び維持管理・更新のあらゆるプロセスにICTを取り入れることで生産性を向上させる「i-Construction」を推進している。このi-Constructionの取り組みでは、ICTの全面的な活用(ICT土工・ICT舗装工)として、「無人航空機を用いた空中写真測量」や「地上型レーザースキャナー(以下、TLS)」などの面的な計測技術を用いて起工測量や出来形管理などを実施し、施工全体の生産性を向上させることを目指している。また、ICT土工で導入される機器についても、平成29年度にはUAVレーザーを新たに適用するなど、新技術を活用できるような改善もされている状況である。

2. 目的

本報告は、i-Construction の ICT 土工・ICT 舗装工やトンネルなどの構造物の計測において、今後期待されている技術の1つである移動体多点計測技術の効果検証結果を報告するものである。移動体多点計測技術(以下、MMS)は、測位技術、IMU、レーザースキャナーを搭載し、計測機器の位置を測位しながら移動して計測するため、地上型レーザースキャナーや空中写真測量に比べて、点群データのための解析や位置決めに必要な標定点の設置・計測が不要となる特徴を有す

る。そのため,ICT 土工や ICT 舗装工の起工測量や出来形管理等の計測作業をさらに効率化する技術の1 つとして期待されている1 。そこで,本報告では,土工や舗装工,構造物を対象とし,実験ヤードにて移動体多点計測技術による計測と TS・レベルなどによる正解データの計測を行い,計測精度や作業時間などについて検証を行った。

3. 移動体多点計測技術に関する効果検証

(1) 背負子型 MMS の ICT 土工への適用可能性検証

(a) 検証概要と適用技術

本検証では、背負子型の MMS(ライカジオシステム㈱製ペガサスバックパック)を利用した。今回使用した背負子型 MMS の概要を図—1に示すが、レーザースキャナー、5 台のカメラ、GNSS/IMU を搭載



図一1 適用技術

した機材となっている。搭載されている IMU の計測 頻度は 125 Hz/ 秒であり,移動中の計測者・センサー の挙動を正確に再現できることから,計測者が背負っ て歩き回ることによって,3次元計測できるツールである。本技術では機材初期化作業のため,計測前後に静止,および計測前に IMU 初期化のために移動しながらの初期化を行う。

(b) 検証項目

背負子型 MMS の ICT 土工への適用可能性検証は、 面的な計測精度および作業時間について、検証を実施 した。面的な計測精度は、TS を用いて計測した標高 値(以下、正解データ)を真値とした比較により評価 を実施した。また、作業時間については、TLS によ る面的な計測作業を基準として背負子型 MMS の作業 時間と比較した。調査する作業項目は、標定点設置・ 計測、初期化、機械設置、計測、盛替え回数とした。

(c) 検証方法と検証条件

検証場所は、施工技術総合研究所内の土工事(切土 および盛土)を模擬した試験ヤードで実施した。試験 ヤードの状況を写真—1に示すが、切土部は、延長 約20 m、法長約7 m、盛土部は、延長約40 m、法長 約4 m(一部小段を有する)の形状となっている。ま た、背負子型 MMS の計測は、切土部、盛土部の順に 一筆書きの経路にて実施し、正解データは、TSを用 いて、約2 m 間隔にて計測を実施した(写真—2)。

背負子型 MMSの計測データと正解データとの標高 較差の比較は、図一2に示すとおり、点群データから TIN データ化し、正解データの平面座標値における三角面上の標高座標と正解データの標高値を比較した。

(d) 計測精度の検証結果

既に ICT 土工で適用されている TLS や空中写真測量を用いた出来形管理要領では、出来形管理に必要な



写真―1 試験ヤードの状況

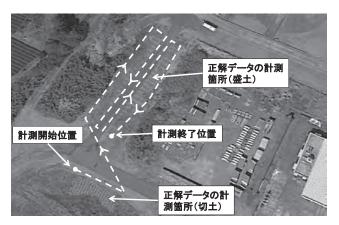


写真-2 検証方法と検証条件(計測経路)

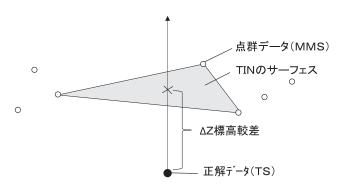


図-2 標高較差の評価方法

表-1 計測精度の検証結果

	10目			2回目		
計測対象	検証 点数	平均 (mm)	標準偏差 (mm)	検証 点数	平均 (mm)	標高較差 (mm)
盛土	157	14	19	157	15	22
切土	115	9	23	115	-22	28

計測機器の計測精度が \pm 50 mm と定められている 20 。 表—1 に精度検証結果を示すが、背負子型 MMS の計測データと正解データとの標高較差の標準偏差をみると、切土部、盛土部の標準偏差の 2 倍が \pm 50 mm に収まる可能性が高い結果となった 30 。

(e) 作業時間の検証結果

計測作業に係わる所要時間を表—2に示す。背負子型 MMS と TLS の計測時間を比較すると, 6割程度作業時間が短縮する結果となった。要因としては, 背負子型 MMS による計測では, IMU の初期化など

表-2 作業時間の検証結果

時間(分)	標定点 設置・計測	初期化	機械 設置	計測	盛替 回数	合計
TLS	60 (4 箇所)	-	12	14	4	86
背負子型 MMS	_	23		10	-	33

に時間を要するものの、標定点の設置・計測や計測機器の盛替えが不要となることが作業時間の短縮につながったと考えられる。

(2) 手押車型 MMS の ICT 舗装工への適用可能性検証

(a) 検証概要と適用技術

H29年度より、ICT活用工事の工種拡大としてICT舗装工が実施されており、現在、適用可能な3次元計測技術はTLSおよびTSとなっている。本検証では、手押車型MMS(ライカジオシステム(株)製プロスキャン)を利用した。今回使用した手押車型MMSの概要を図一3に示すが、レーザースキャナー、カメラ、IMUを搭載した機材となっており、測位方法はTSで実施した。本技術では、初期化のために、計測前後に数分静止、計測中は、8m移動ごとに数秒停止を繰り返して計測する。



(b) 検証項目

手押車型 MMS の ICT 舗装工への適用可能性検証は、面的な計測精度および作業時間について、検証を実施した。面的な計測精度は、レベルを用いて計測した標高値(以下、正解データ)を真値とした比較により評価を実施した。また、作業時間については、TLSによる面的な計測と手押車型 MMS との作業時間の比較を実施した。調査する作業項目は、標定点設置・計測、初期化、機械設置、計測、盛替之回数とした。

(c) 検証方法と検証条件

検証場所は、施工技術総合研究所内の舗装工事を模擬した試験ヤードで実施した。試験ヤードの状況を写真—3に示すが、舗装面は延長50mであり、表層(密粒度アスファルト舗装)を対象に行った。また、手押車型MMSの計測は、50mの延長を往復して実施し、正解データは、レベルを用いて計測機器から移動体の距離が20m、30m、40m、50mの検証面を計測した(図—4)。

手押車型 MMS の計測データと正解データとの標高 較差の比較は、現行の要領では、鉛直方向の精度は、



写真一3 試験ヤードの状況

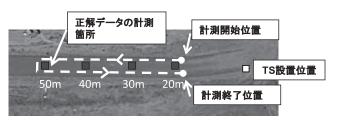


図-4 検証方法と検証条件(計測経路)

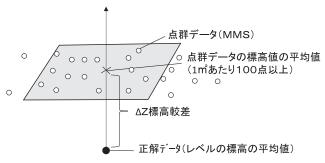


図-5 標高較差の評価方法

1 m² の検証面に 100 点以上計測できる条件とし、計 測点の標高の平均値とレベルで計測した真値(検証面 の 4 隅の標高の平均値)と比較して求めていることか ら、図—5 に示す方法で実施した。

(d) 検証結果

既にICT舗装工で適用されているTLSを用いた出来形管理要領では、表層・基層の出来形管理に必要な計測機器の計測精度が±4mmと定められている⁴。図—6に計測データ、表—3に精度検証結果を示すが、手押車型MMSの計測データ(1 m² 当たり 100点以上の標高の平均値)とレベルで計測した正解データとの標高較差がすべての計測距離の条件において4mmに収まる結果となった。

(e) 作業時間の検証結果

計測作業に係わる所要時間を表—4に示す。手押車型 MMS と TLS の計測時間を比較すると、7割程度作業時間が短縮する結果となった。要因としては、



図-6 手押車型 MMS の計測データと検証箇所

表-3 計測精度の検証結果

Ī	計測モード 50	0 Hz	計測モード 100 Hz			
距離	点数 (1 m²	標高較差	距離	点数(1 m²	標高較差	
(m)	当たり)	(mm)	(m)	当たり)	(mm)	
20 m	2543	-1	20 m	2438	-2	
30 m	2619	-2	30 m	2710	-2	
40 m	4316	-3	40 m	2304	-2	
50 m	2707	-1	50 m	3423	-1	

表-4 作業時間の検証結果

時間(分)	標定点 設置・計測	起動 · 初期化	機械 設置	計測	盛替 回数	合計
TLS	60 (4 箇所)	_	6	10	2	76
手押車型		6	6	9		21
MMS	_	0	0	9		<u> </u>

手押車型 MMS による計測では、背負子型 MMS と同様に、IMU の初期化などに時間を要するものの、標定点の設置・計測や、計測機器の盛替えが不要となることが作業時間の短縮につながったと考えられる。

(3) 手押車型 MMS のトンネルエへの適用可能性検証

(a) 検証概要と適用技術

ICT 活用工事の工種拡大として、構造物工などへの適用も期待されている。本検証では、トンネルエへの導入を想定し手押車型 MMS(ライカジオシステム(株製プロスキャン)を利用した。

(b) 検証項目

手押車型 MMSのトンネル工への適用可能性検証は、面的な計測精度および作業時間について、検証を実施した。面的な計測精度は、ノンプリズム式 TSを用いて計測した座標値(以下、正解データ)を真値とした比較により評価を実施した。また、作業時間については、TLSによる面的な計測と手押車型 MMSとの作業時間の比較を実施した。調査する作業項目は、

標定点設置・計測, 初期化, 機械設置, 計測, 盛替え 回数とした。

(c) 検証方法と検証条件

検証場所は、施工技術総合研究所内のトンネル工事を模擬した試験ヤードで実施した。トンネルは延長80 m である。また、手押車型 MMS の計測は、80 m の延長を往復して実施し、正解データの計測は、トンネル側面にターゲットを設置し、ノンプリズム TS を用いて計測した。手押車型 MMS は、反射強度を用いてターゲットの中心を判別し、座標値を抽出した。手押車型 MMS の計測データと正解データとの比較は、座標値の水平成分と鉛直成分の較差を評価した。

(d) 計測精度の検証結果

表-5 に精度検証結果を示すが、手押車型 MMS の 計測データと正解データとの座標の各成分の較差をみ ると、± 10 mm に収まる結果となった。

(e) 作業時間の検証結果

計測作業に係わる所要時間を表—6に示す。手押車型 MMS と TLS の計測時間を比較すると, 7割程度作業時間が短縮する結果となった。

表-5 計測精度の検証結果

		1回目		2回目			
	検証 点数	平均 (mm)	標準 偏差 (mm)	検証 点数	平均 (mm)	標高 較差 (mm)	
水平	15	8	5	15	9	5	
鉛直	15	-1	2	15	-1	2	

表-6 作業時間の検証結果

時間 (分)	標定点 設置・計測	初期化	機械 設置	計測	盛替 回数	合計
TLS	60 (4 箇所)	_	12	14	4	86
手押車型		6	10	12		28
MMS			10	14	_	40

4. 考察

(1) 背負子型 MMS の ICT 土工への適用可能性

背負子型 MMSのICT 土工への適用検証結果より、計測精度については、現行の要領で要求している計測精度 ± 50 mm を満たす可能性が高い結果となった。今回の検証では、既知点の標高を用いた計測データの調整を実施していないため、既知点の標高で高さ調整することで、RTK - GNSS の高さ精度の影響を少なくでき、さらなる精度向上も期待できる。また、作業時

間については、TLSと比較して、7割程度時間短縮する結果となっており、背負子型 MMS では、一人で計測できることから、TLSを二人作業で想定するとさらなる時間短縮効果も期待できる。

(2) 手押車型 MMS の ICT 舗装工への適用可能性

手押車型 MMS の ICT 舗装工への適用検証結果より、計測精度については、現行の要領で要求している計測精度 ± 4 mm を満たす結果となった。今回の検証では、延長 50 m の範囲での検証であったが、測角精度の高い TS を利用することで、数百 m 程度を一度に計測することも可能であると推察される。また、作業時間については、TLS と比較して、7割程度時間短縮する結果となっており、背負子型 MMS と同様に手押車型 MMS では、一人で計測できることから、TLSを二人作業で想定するとさらなる時間短縮効果が期待できる。

(3) 手押車型 MMS のトンネルエへの適用可能性

手押車型 MMS のトンネル工への適用検証結果より、計測精度については、座標値の各成分の計測精度 ± 10 mm を満たす結果となった。図一7に示すような面的な出来形計測や面的な変状の確認等への活用が期待できる。



図一7 トンネルの面的な変状の把握イメージ

(4) 精度確認方法の提案

背負子型や手押車型 MMS は、RTK-GNSS や TS などの測位技術、レーザースキャナー、IMU を搭載しており、計測精度については、測位技術が TS の場合は、TS の測角精度に起因する TS と被計測位置の計測距離、IMU のドリフトに起因する航路のずれ、レーザースキャナーのレーザーの入射角に起因する計測距離などの影響が考えられるため、精度確認手法を確立する必要がある。そのため、図—8に示すような移動体の進行方向と左右方向について検証面や検証点を設置して評価する精度確認方法を提案する。

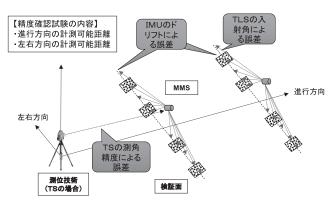


図-8 計測精度の検証結果

5. おわりに

本報告では、i-Construction の取り組みの中で進められている ICT 土工や ICT 舗装工に適用する 3 次元計測技術として、背負子型 MMS と手押車型 MMS による出来形管理の適用可能性について検証を実施した。検証の結果、計測精度については、既出要領の要求精度を満たす可能性が高く、作業性についても、TLS に比べて効率が向上することを確認できた。今後の展開としては、ICT は、日進月歩で新たな技術が開発されているため、本報告のような検証を進めるとともに、現場条件や現場規模に応じた適切な ICT が導入できるような環境整備が継続的になされることを期待する。

J C M A

《参考文献》

- 1) ICT 導入協議会 ICT 施工普及促進に関する重点プログラム(提案) http://www.mlit.go.jp/common/001151895.pdf
- 2) 地上型レーザースキャナーを用いた出来形管理要領 (土工編) (案) http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/constplan/sosei_constplan_tk_000031.html
- 3) 近藤弘嗣ら:i-Construction で適用する土工出来形の面管理に関わる 基準類の検討, 第16回建設用ロボットシンポジウム論文集, 2016
- 4) 地上型レーザースキャナーを用いた出来形管理要領(舗装編)(案) http://www.mlit.go.jp/common/001181639.pdf



[筆者紹介] 椎葉 祐士(しいば ゆうし) (一社) 日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所 主席研究員



桑野 裕士 (くわの ゆうじ) ライカジオシステムズ(株) ジオスペーシャルソリューションズ事業部 事業部長