特集⋙ IoT, AI, ビッグデータ

MMS による土工現場の出来形計測と 新たに考案した精度管理手法

早 川 健太郎・白 石 宗一郎

地図作成の分野では、広範囲を短時間で計測できる MMS (Mobile Mapping System) が広く用いられ ており、取得された点群データはビッグデータとしてアーカイブされ、道路の管理業務などで活用されて いる。土工現場の出来形計測に MMS を適用する場合には、精度管理のために設置する標定点や検証点の 配置, 計測距離と計測精度との関係をきちんと把握しておくことが重要である。筆者らは実工事において, MMS による計測精度が i-Construction における出来形管理基準値 50 mm を満足することを確認した。さ らに、その結果から切土法面などで効果を発揮する新たな精度管理手法を考案した。

キーワード: 土工、MMS、点群データ、切盛土出来形、精度管理手法

1. はじめに

i-Construction 施策の推進によって建設現場におけ る3次元計測が普及し、これまでの点や線を用いた出 来形管理から3次元空間的な管理へ移行が進んでいる。 その3次元計測の多くは、TLS (Terrestrial Laser Scanner: 地上据置き型レーザスキャナ) や UAV (Unmanned Aerial Vehicle:無人航空機) に搭載し たデジタルカメラ画像による写真測量などによって実 施されている。一方、地図作成業務においては、道路 や標識などの道路付属施設の計測に MMS (Mobile Mapping System) が導入され、その計測作業や道路 空間の施設管理への活用が進んでいる。走行しながら 車両周辺の3次元計測が可能といった MMS の機動性 に着目し、筆者らは2015年に広範囲な土工現場での 起工測量を対象に実証実験を行い、計測精度および適 用可能性について評価した。その結果は、筆者らの独

自の「3D モデルによる土工出来形管理の効率化・高 度化のための MMS 計測マニュアル (案)」として運 用しているところである¹⁾。

本マニュアルは、主に盛土工事を対象に執筆された ものであり、今般車両が乗り入れることができない切 土工事における MMS の計測精度を実証実験において 評価し、その結果から切土法面などで効果を発揮する 新たな精度管理手法を考案したので、本稿で紹介する。

2. MMS の概要と盛土工事での活用事例

MMS は移動体の位置を計測する GNSS 受信機とそ の姿勢を計測する IMU(Inertial Measurement Unit: 慣性計測装置)をベースとした機器構成であり、移動 体からの相対的な空間をレーザスキャナや画像を用い て計測して統合することで, 移動した周辺の空間情報 を高精度かつ効率的に計測するシステムである。



図-1 MMSの外観と仕様

MMS の運用に際しては、目的とする計測対象と MMS の走行位置との距離(以下、計測距離)に合わせてレーザスキャナを選択するもので、レーザスキャナには、近距離を高精度で計測する位相差方式と長距離を計測できるタイムオブフライト方式が使用される。筆者らが実証実験で使用した MMS(図一1)は後者の方式を採用し、測距精度 5 mm で最長 800 m まで計測できるレーザスキャナを 2 台搭載している。照射方向の異なる 2 台のレーザスキャナは 1 秒間に 110万回(55 万回×2台)のレーザ照射を行い、車両周辺の空間情報を詳細な点群データとして記録する。

これらの点群データは膨大な容量となり、計測時間 や走行速度などによって異なるが、例えば、40 ha ($400 \times 1000 \text{ m}$) の盛土工事の場合で、17 億点ものビッグ データとして収集されることになる。

取得される点群は、レーザスキャナの特性上、車両の近くの路上では数 mm 間隔と非常に密に取得されるが、車両から距離が離れれば必然的に点の間隔が増大する。図一2に MMS による計測結果の一例を示す。このように、MMS から得られる膨大な点群データには出来形管理に不要な建機の点群や必要以上に点群密度の濃い箇所が存在する。現場内の地形を詳細に表現できるビッグデータとして記録できることは MMS の大きな利点であるが、得られた膨大なデータを適切にフィルタリングし、扱いやすいデータにすることも MMS 運用において重要なプロセスである。

3. 切土出来形計測を対象にした実証実験 2)

(1) 実験概要

MMS による切土出来形計測の実証実験を図—3に示す道路新設工事において、切土法面の掘削・整形が完了した段階で行った。切土法面は最大高さが約50mで7段の法面があり、勾配は1:1.2である。作業では車両を法面内に乗り入れることをせず、法面の裾を流れる川の両岸の道路を往復走行しながら計測した。走行ルートから計測箇所を計測する状況を図—3



図―2 盛土工事にて MMS から得られた点群データ



図-3 切土工事での計測対象と計測風景

に示す。

MMSの走行ルート、計測した2か所の法面(計測箇所①、②)および標定点・検証点の配置を図—4に示す。現場の測量座標系との整合を図るために設ける「標定点」は両岸の走行ルートの始終点に計4箇所設置し(H01~H04)、取得したデータの信頼性を確認する「検証点」はその標定点間の中間に計3箇所設置した(K01~K03)。また、切土出来形計測の精度評価を実施する目的で、切土法面上に検証点(1.0m×0.9mのビニール製白色シート)を33箇所設置した(図—3)。なお、走行ルート上の標定点・検証点の測量はVRS-GNSSにて、切土法面上の検証点についてはノンプリズム型のトータルステーションを用いて測量した。MMSによる計測距離は図—5に示すように、最大約160m程度である。



図-4 実証実験の走行ルートと配点状況

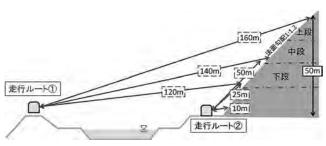


図-5 走行ルートと計測対象との関係

(2) 計測条件

計測はレーザ照射点数およびスキャン周波数,計測距離を順次変化させて行った。計測条件を表—1に示す。表の右端には、レーザ照射位置から150m離れた位置での点群データの点間隔を計算値として示し、点群の粗密の程度を表している。2章で例示した図—2において説明したように、切土・盛土における出来形を3次元的に表現する場合には、点群の粗密が重要な要素となるためこのような計測条件を設定した。なお、誌面の都合上、点間隔と計測精度との関係については記述を割愛をする。

(3) 計測結果

計測によって得られた点群データを図―6に示す。表―1に示したすべての条件の計測データについて、法面上に設置した検証点の座標と MMS による実測値との較差を比較した。その結果を表―2に示す。このように、「補正後」のデータはi-Construction における出来形測量の基準値50 mm を満足していることが分かる。なお、この表に記載の「補正前」とは取得した生データの値であり、「補正後」とは走行ルート上に設置した標定点の座標を用いて座標補正した値である。また、この実証実験では法面上の検証点は座標補正に用いていない。



図―6 切土工事の点群データ(一例)

表-2 計測結果の標準偏差(補正有無別)

データ		標準偏差	
		水平(m)	高さ(m)
補正前	走行ルート①	0.052	0.039
	走行ルート(2)	0.073	0.095
補正後	走行ルート①と②を合成	0.029	0.043

表-3 計測距離別の標準偏差

= 5		標準偏差	
	7-3	水平(m)	高さ(m)
補正後	上段(最大距離160m程度)	0.042	0.043
	中段(最大距離140m程度)	0.023	0.040
	下段(最大距離120m程度)	0.023	0.044

次に、図—5に示すように計測距離に応じて標定点を上段、中段、下段の3つに分類して評価した結果を表—3に示す。計測距離の増大に応じて水平方向の標準偏差が大きくなる傾向が確認できるが、高さ方向の標準偏差では明瞭な傾向を確認できない。すなわち、計測距離120~160 mの間においては、レーザ照射位置(すなわち、走行ルート)から法面方向への仰角や計測距離の違いは計測精度に大きく影響を与えないことが分かる。

また、一般にレーザは水滴や雨滴に弱いとされている。実証実験中のいくつかのケースにおいて、1 mm/h程度の降雨があったが、法面上の検証点の計測結果を比較したところ、雨滴の計測精度に対する影響はほとんど確認できなかった。今後、MMS を現場適用する場合の条件設定の幅が広がる可能性を確認できた。

4. 新しく考案した精度管理手法

(1) テストフィールドを用いた検証

MMS をはじめレーザスキャナによる計測において、計測地点と計測対象の離隔が長距離になる場合に所定の精度を確保したい時には、離れた計測対象に標定点や検証点を設置して座標を取得し、精度評価することが妥当な精度管理手法と考える。

表一1 計測条件

CASE	走行ルート	計測対象	レーザ照射点数		レーザ照射点数		スキャン周波数	点間隔
1	①(往復)	上·中·下段	粗	550kHz	30Hz	50cm		
2	②(往復)	下段	租	祖 (最大計測距離:200m)	3002	12cm		
3	①(往復)	上·中·下段	中	550kHz	FOLL	25cm		
4	②(往復)	下段		(最大計測距離: 200m)	50Hz	6cm		
5	①(往復)	上·中·下段	=	密	550kHz	100Hz	14cm	
6	②(往復)	下段	124	(最大計測距離: 200m)	10012	3cm		
7	①(往復)	上·中·下段	粗	VP	200kHz	50Hz	52cm	
8	②(往復)	下段		(最大計測距離:700m)	30112	6cm		
9	①(往復)	上·中·下段	粗	жя 300kHz	EDU-	52cm		
10	②(往復)	下段		(最大計測距離:450m)	50Hz	6cm		

しかしながら、3章で示した切土法面を利用した実証実験では、走行ルートから最大約160m離れた法面上の標定点を用いて座標補正せずとも、i-Constructionにおける出来形測量の基準値を満足することを確認した。このことから、出来形計測における計測距離と計測精度との間には何かしらの関係があるものと推測される。

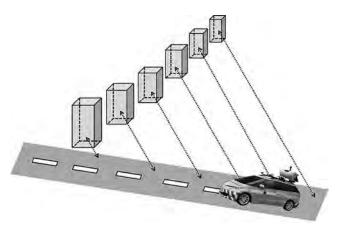
そこで、この計測距離と計測精度との関係を改めて明らかにして、MMSによる計測結果の品質を保証する新たな精度管理手法を検討することを目的として、テストフィールドを用いた検証を実施した。

テストフィールドは、図―7に示すような連続する橋脚を持つ高架橋の下を通過する一般道とした。一般道からの離隔が約90m~約300mまでの6つの橋脚を計測対象とし、各々の橋脚の外郭形状をノンプリズム型のトータルステーションにより測量して基準データとした。

次に、一般道を往復走行して MMS による橋脚の点群データを取得した。走行前には、スキャナ諸条件、すなわち、 MMS に装備されたレーザスキャナ装置の取付け角度、位置及び照射パラメータを微調整した。なお、往路では橋脚を進行方向右側のレーザスキャナで照射し(図一7)、復路では進行方向左側のレーザスキャナで照射する。このようにして計測することで、往路/復路および左右のレーザスキャナの組み合わせから、複数の橋脚の点群データを取得する。

(2) 検証結果と考察

走行後、左右のレーザスキャナで取得された計測結果を解析して橋脚の点群データを生成し、前述のようにあらかじめ取得しておいた橋脚の基準データを計測距離別に比較した。その結果を図―8に示す。ここに図示するように、距離の増大に応じて基準データとの較差も増加しており、一次線形式で近似できることが



図―7 テストフィールドにおける MMS と橋脚の位置関係

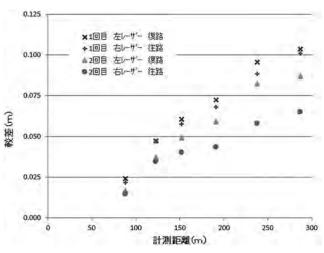


図-8 計測距離と計測精度との関係

分かる。この線形式より、i-Construction における出来形測量の基準値である 50 mm を保証する計測可能距離は約 125 m, 起工測量の基準値である 100 mm を保証する計測可能距離は約 250 m と導出することができる。なお、図一8 は実験の一例であり、スキャナ諸条件は可変であるので、こういったスキャナに関わる条件を変化させた実験を進めていくことで、スキャナ条件―計測距離―計測精度の相互関係がより明確となる。

(3) 考案した精度管理手法

以上までに記述した切土工事での実証実験とテストフィールドにおける検証結果から、MMS 走行路付近に標定点と検証点を設置し、遠く離れた計測対象物には標定点と検証点を設置しないで精度管理を行う方法を以下に提案する。

- ①現地計測に先立ち、トータルステーションなどで あらかじめ計測した既設構造物などの地物(基準 データ)を, MMS により計測する(計測データ)。
- ②移動するレーザスキャナ装置からの距離に応じて、基準データと計測データの関係を評価するために、計測距離と精度との一次近似式を作成する。これにより、計測精度に応じた有効計測距離を把握することができる。
- ③さらに、MMS に装備されたレーザスキャナ装置の取付け角度、位置及び照射パラメータ等を調整する。これら②と③を繰り返すことで、計測距離と精度との一次近似式の正確さを高める。
- ④現地計測では、まず、MMSの走行路面上やその 近傍といった設置や測量が容易な場所に標定点と 検証点を配置し、計測距離と精度を確認する。一 方、標定点・検証点を配置していない遠方の計測

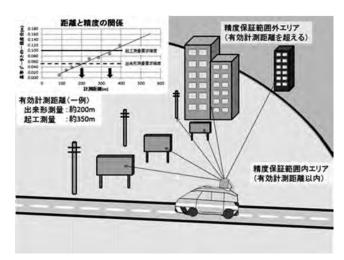


図-9 新しい精度管理手法の概念図

エリアにおいては、②や③の工程で作成した「計測距離と精度との一次近似式」を参照し、有効計測距離以内のデータのみを採用することで、計測した3D点群データの精度を保証する(図—9,特許出願中)。

このように、本精度管理手法を採用することにより、MMSの走行位置から遠く離れた場所や標定点・検証点の設置が困難な計測エリアに、これらの点を設ける必要がなくなる。そのため、事前の設置と測量にかかる手間・時間を大幅に削減できるとともに、適用可能となる工事内容の幅も広がることとなる。また、計測エリアでの作業が減少するため安全面でも効果を発揮するものと考えられる。

5. おわりに

2015 年から MMS を用いた切土・盛土の出来形計 測について、ビッグデータの有効活用の観点から現地 作業手順と計測精度管理手法の検討に取り組みはじ め、i-Construction 施策によって普及した 3 次元計測 の枠組みの中で、安全性向上と標定点設置や測量作業 の省力化をめざして開発を進めてきた。

レーザスキャナを用いた計測によって取得される点群データはまさにビッグデータの一つであり、そのビッグデータが表現している地形形状の特徴を損なわないように、かつ、高速にデータ処理をすることが望まれている。近い将来、出来形管理を含む土工の施工管理は3次元データが中核となる手法で進められていくものと予想する。そのような中で、ビッグデータの処理方法に加えてデータの精度管理は施工管理上重要なプロセスであり、この点からも本稿で示した精度管理手法が活用されていくことに期待している。

J C M A

《参考文献》

- 1) 早川健太郎, 黒台昌弘, 木付拓磨, 足立有史, 垣内力, 白石宗一郎, 大伴真吾:造成工事における MMS (モービル・マッピング・システム) の計測精度検証と現場導入, 土木建設技術発表会 2017, pp.5-8, 2017.
- 2) 木付拓磨, 早川健太郎, 黒台昌弘, 足立有史, 白石宗一郎, 大伴真吾: MMS による切土法面での出来形測量における精度検証, 土木学会第 73 回年次学術講演会, VI -729, pp.1457-1458, 2018.





早川 健太郎 (はやかわ けんたろう) 安藤ハザマ 建設本部 技術研究所 先端・環境研究部 研究員



白石 宗一郎(しらいし そういちろう) 朝日航洋㈱ モビリティ空間技術部 インフラドクター推進グループ