

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

安藤ハザマ	正会員	○早川健太郎	安藤ハザマ	正会員	黒台 昌弘
安藤ハザマ	正会員	木付 拓磨	安藤ハザマ	正会員	足立 有史
朝日航洋		垣内 力	朝日航洋		白石宗一郎
			朝日航洋		大伴 真吾

1. はじめに

国土交通省が推進する i-Construction では、3次元出来形計測の方法として、GNSS や TS に加えて、無人航空機(UAV)による写真測量や地上レーザスキャナ(以降、LS)を用いた出来形管理基準が整備されている。これらは土工事の生産性向上を目的に導入が進められているが、各々の技術には特徴があり地形、周辺環境を考慮した技術や機器の選択が現場管理の重要な要素となっている。一方、車両にレーザ計測装置や全方位カメラなどを搭載し、走行しながら3次元データを収集する MMS（モービル・マッピング・システム）は、道路及び道路付属物などのデータを取得して道路台帳などを作成する業務に利用されている。MMS を用いた3次元計測については、既に公共測量で使用するための基準が国土地理院より制定されており、成果物としての数値地形図データの位置精度は、地図情報レベル 500 で水平精度が標準偏差 25cm 以内となっている。

このような中、筆者らは広範囲の3次元データを効率よく取得することができる MMS に注目し、土工事における3次元計測技術としての適用性を評価した。具体的には、道路や地図の分野に活用されている公的な基準類を参照して独自の「土工出来形管理のための MMS 計測マニュアル」を整備するとともに、比較的平坦な造成地と多段の切土法面といった形状の異なる地形を選定して、MMS の精度検証を実施した。

2. MMS を土工出来形管理へ適用するための検討

(1) システム概要

MMS とは車両に GNSS アンテナやレーザ計測装置、全方位カメラなどの機器を搭載し、走行しながら周辺の3次元空間位置データと周囲の映像を高精度で効率的に取得できる移動体計測システムである(図-1)。高性能な IMU (慣性航法装置) と GNSS を搭載して走行車両の位置や角度、加速度情報と搭載したレーザ計測装置で取得した3次元データを統合することで、周辺の地物の3次元出来形データが取得できる。



図-1 MMS の一例

また、走行しながら計測をする MMS は広範囲を迅速に把握できるメリットがある一方で、工事現場内では通行可能な道路を整備する必要があるといった制約がある。精密機器を搭載していることや IMU による姿勢補正の精度の関係から大きな凸凹がある道路ではスピードを抑えて走行するなど、計測上の工夫も必要となる。

(2) MMS を土工出来形計測で活用する場合の課題と対応¹⁾

前述のように MMS は主に地図作成に利用されてきたことから、定期的に繰り返し実施する土工出来形計測に適用する場合には、計測方法や精度管理において、以下のような課題が考えられる。

- ① 所定の精度を得るための、適正な計測範囲設定や計測方法を定めたルールがない
- ② 出来形計測や土量計算に対応した3次元点群データの作成に時間がかかる
- ③ 土工管理に必要な3次元点群データの精度を担保する管理方法がない

キーワード MMS, 3次元計測, i-Construction, MMS 計測マニュアル, 土工出来形管理

連絡先 〒305-0822 茨城県つくば市荻間 515-1 安藤ハザマ技術研究所 TEL 029-858-8815

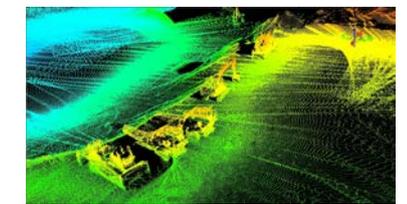
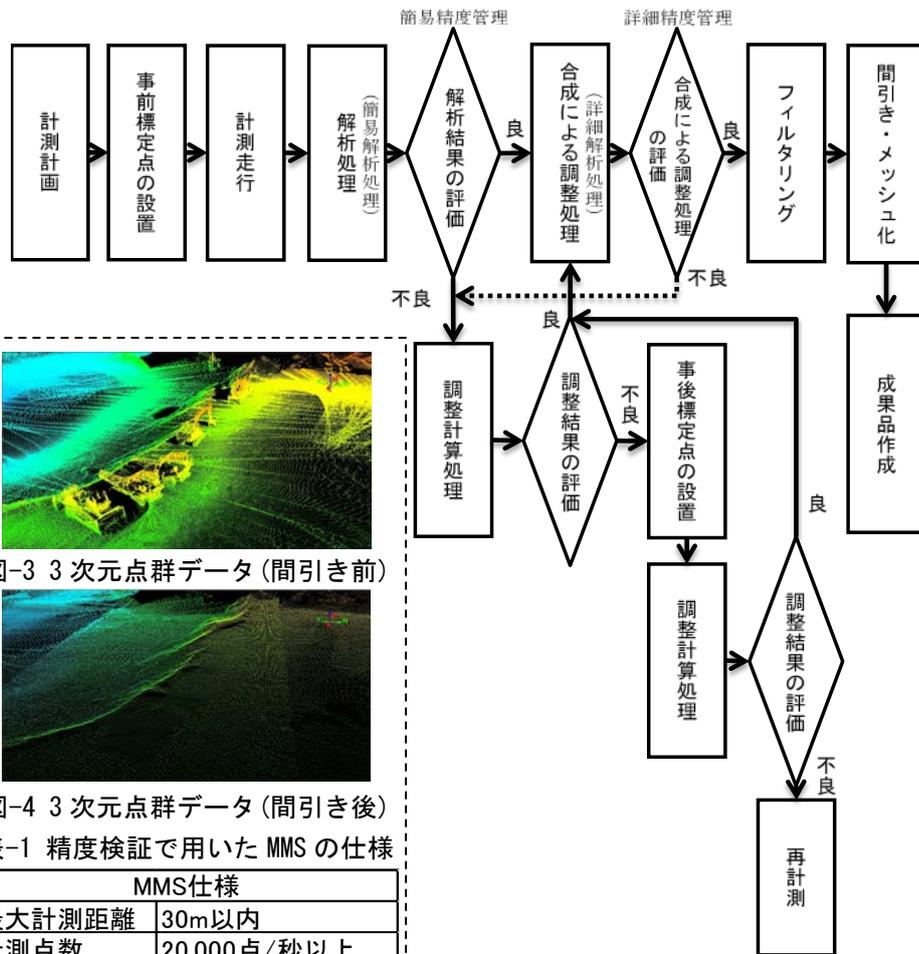


図-3 3次元点群データ(間引き前)

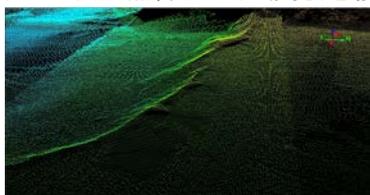


図-4 3次元点群データ(間引き後)

表-1 精度検証で用いたMMSの仕様

MMS仕様	
最大計測距離	30m以内
計測点数	20,000点/秒以上
計測範囲	複数台で360°
計測精度	±10mm

図-2 MMS計測マニュアルの作業フロー

このような課題を解決しMMS計測による土工出来形管理の効率化および高度化を図る目的で、筆者らは「3次元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)」(以下、MMS計測マニュアルという)を独自に作成した。このMMS計測マニュアルには、計測計画、標定点設置、計測、解析処理、評価などの方法を実例を交えて記載しており、作業実施者のみならず作業監督の立場からも分かりやすく取りまとめている。それらの全体の流れを表す作業フローを図-2に示す。

前述の3つの課題に対して、本MMS計測マニュアルでは、以下のような対応策を示した。

- ①計測車両が計測対象の形状に応じて無駄なく走行し、必要な精度を確保できるよう、測量基準点(標定点、検証点)の設置ルールを定めた。
- ②計測データに含まれる不要物の除去技術、地形の特徴を損なわない大容量点群データの間引き技術、および複数の計測データの合成技術の3つの技術を統合利用し、処理時間を短縮した。
- ③計測中に取得したGNSSおよびIMUデータを解析し、任意座標系の生データを測量座標系の3次元点群データへ変換処理した後、3次元点群データ中の標定点の3次元座標を抽出し、実測値との較差を算出することで計測データの品質の判定を行う「簡易解析処理」と、同一区間や隣接区間にある複数の計測データを1つに統合することで計測精度を高め、現場内に配置した検証点から精度を評価する「詳細解析処理」の2段階評価を導入した。

これらの対応策により処理した点群データを図-3、図-4に示す。図-3は計測直後のデータであり、建機が計測され点群密度に偏りがある。この計測データについて出来形管理に不要な建機を削除した上で、点群が取得できていない箇所をTINにより内挿補間し、点群密度の高い箇所では地形の特徴を損なうことなく点群を間引くことで、図-4に示すデータが作成される。

(3) MMS運用マニュアルを用いた計測精度の検証

比較的平坦な造成工事現場にてMMS計測マニュアルに則って計測をした場合の精度検証を行った。計測には三菱電機社製のMMSを用いた(表-1)。計測エリアと走行ルート、標定点、検証点の配置図を図-5に示す。140m×100mのエリアに標定点(H1~H4)、検証点(C1~C4)を配置し、往復の走行(R1とR2)を行った。

「簡易解析処理」の結果、標定点H1~H4のRMSE(平均二乗誤差)は水平方向±3.2cm、高さ方向±1.7cmとなった(表-2)。これはMMS計測マニュアルにおいて記した独自基準値25cmを満足しているため、続いて「詳細解析処理」を実施した。その結果、検証点C1~C4のRMSEは水平方向±8.6cm、高さ方向±3.6cmと

なり (表-2), 独自基準値 25cm を満足した。

独自基準値25cmは地図作成の業務を参考にして設定した数値 (地図情報レベル 500 に相当) であり, i-Construction で求められている出来形計測の精度 (±5cm) と大きな差がある。今後, 本 MMS 計測マニュアルを見直すこととしているが, 本検証ではMMSによる計測の精度が10cmを下回ることが確認された。

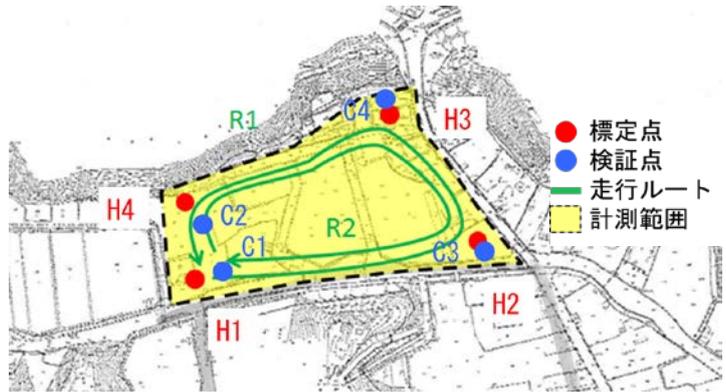


図-5 走行ルートおよび標定点・検証点配置図

3. 切土法面における MMS の出来形計測への適用性の評価²⁾

(1) 精度検証実験の概要

MMS による土工出来形管理の適用範囲を拡充するために, 高低差のある切土工事 (国土交通省東北地方整備局発注で ICT 活用工事の国道 283 号釜石西地区道路改良工事) において, MMS による起工測量での現況地形の計測を行い, 取得した 3 次元データの精度を検証した。また, 当現場では MMS での計測以前に LS での起工測量を実施していたため, 本実験の作業時間を記録することで両者の歩掛を比較した。

MMS の仕様, 走行ルートおよび標定点・検証点の配置を表-3, 図-6 に示す。計測箇所は延長が約 1.0km 区間の高さ 50m 程度の 2 つの法面 (計測箇所①, ②) である。その対面にある川の兩岸の道路を往復走行し計測した。標定点は走行ルートの始終点に設置し, 検証点は標定点間の中間に 1~2 箇所設置した。計測距離は図-7 に示すように最大 150m 程度である。計測はレーザの点群間隔や計測距離を変化させて行った (表-4)。

表-2 簡易解析処理と詳細解析処理の結果

標定点	較差		検証点	較差	
	水平(m)	高さ(m)		水平(m)	高さ(m)
H1	0.032	0.017	C1	0.069	0.017
H2	0.021	0.005	C2	0.104	0.002
H3	0.015	0.020	C3	0.112	0.018
H4	0.049	0.021	C4	0.038	0.067
RMSE	0.032	0.017	RMSE	0.086	0.036

表-3 精度検証で用いた MMS の仕様

MMS仕様	
最大計測距離	100m以上
計測点数	1,100,000点/秒以上
計測範囲	360°
計測精度	±8mm

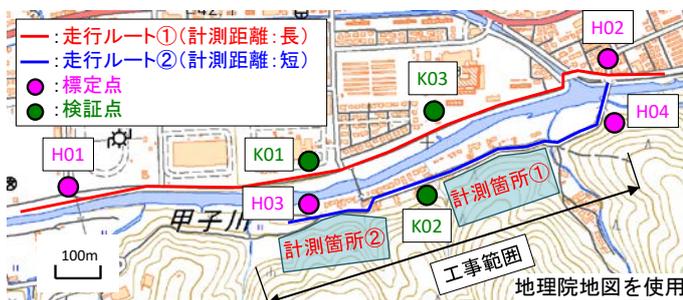


図-6 走行ルートおよび標定点・検証点配置図

表-4 計測条件

CASE	走行ルート	計測距離	レーザ発射数	点間隔
1	①(往復)	90m~150m	密 有効測定レート: 550kHz (1,100,000回測定/秒) 最大測定距離: 200m	14cm程度
2	②(往復)	10m~50m		3cm程度
3	①(往復)	90m~150m	中 有効測定レート: 300kHz (600,000回測定/秒) 最大測定距離: 450m	25cm程度
4	②(往復)	10m~50m		6cm程度
5	①(往復)	90m~150m	粗 有効測定レート: 150kHz (300,000回測定/秒) 最大測定距離: 800m	50cm程度
6	②(往復)	10m~50m		12cm程度

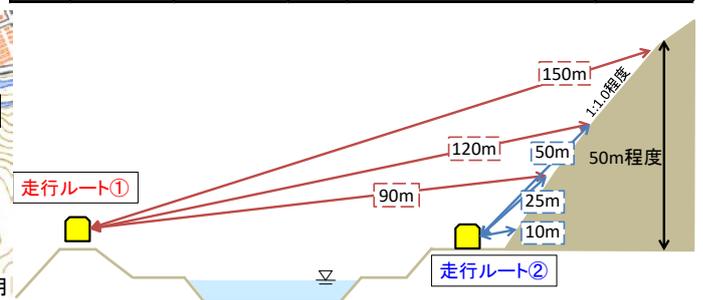


図-7 計測距離

(2) 実験の結果と評価

現地における MMS による計測の後, 前出の作業フローにしたがって解析処理を行った。まず「簡易解析処理」を行い, 標定点の 3 次元座標と実測値との較差を算出した。前述のように MMS 計測マニュアルの独自基準値 25cm を適用し, 水平・高さ方向で標準偏差 25cm 以内であることを確認した。次に, 「詳細解析処理」を行い, 「簡易解析処理」の判定基準と同様の精度があることを確認した。独自に設定した MMS 計測マニュアルでは, 走行面と同程度の標高に設置した標定点や検証点に対して精度を評価することとしており, この点に

において、本計測で取得された3次元点群データは公共測量成果と同等の精度を有することを確認した。

続いて、MMS 走行ルートと標高差が 50m ほどある法面での計測精度を確認するために、切土法面内にある切株を検証点として点群データの精度検証を行った。検証方法は、表-4 における全 CASE のデータについて、伐採後の切株の3次元座標と実測値との較差を算出した。計測箇所①で検証に用いた切株の位置を図-8 に示す。また、図-7 に示した計測距離毎の精度結果を表-5 に示す。これより、水平および高さの較差は、計測距離の増大に従い、平均値、標準偏差ともに大きくなる傾向があることが分かる。また、MMS 計測マニュアルで規定されている標準偏差 25cm を確保し、i-Construction での起工測量の基準である要求精度 10cm を満たすためには、100m 程度の距離までが有効範囲であると考えられる。

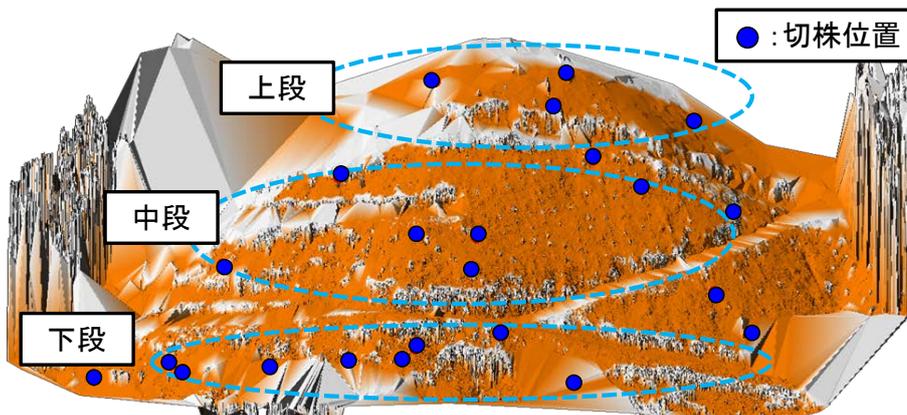


図-8 切株の位置 (計測箇所①)

次に、MMS と LS の歩掛比較の結果を示す。LS では、切り立った法面に何度もスキャナを据え替える必要があったため、掛かった人工は約 10 人工 (2 人で 5 日間作業) だった。これに対して、MMS での現場計測時間は約 1 人工 (3 人で 2.5 時間作業) であり、MMS を活用することで作業効率の向上に寄与すると考えられる。

表-5 切株位置の較差 (計測箇所①)

計測距離	平均値		標準偏差	
	水平(m)	高さ(m)	水平(m)	高さ(m)
10m	0.078	0.040	0.041	0.036
25m	0.111	0.067	0.063	0.086
50m	0.108	0.063	0.055	0.093
90m	0.091	0.265	0.056	0.121
120m	0.132	0.305	0.092	0.135
150m	0.156	0.297	0.078	0.185

4. 造成工事での MMS 活用方針

道路事業で多くの実績のある MMS をさらに有効活用するための検討を行う中で、現地計測や精度管理の方法を工夫することで MMS は土工出来形計測に十分適用できるとの着想から、筆者らはいくつか

の現場実証を経て、独自に「3次元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)」を作成し、その検証を実施した。その結果、平坦面および切土法面 (100m 程度の距離) では 10cm 程度の計測精度で 3次元データを取得できることがわかった。また、計測精度は計測距離に依存するため、現場内で運用する場合には計測対象と走行ルートの離隔を事前にチェックすることで、一定の精度でデータを得ることができるといった知見も得られた。

造成工事現場は、平坦な地形だけではなく、凸凹が存在する上に、切土や盛土などが出現する変化に富んだ地形を持つエリアである。そのすべての地形の出来形データを得るためには、UAV や LS だけの運用では困難なことも多く、広範なエリアになるほど複数の計測技術の組み合わせが必要になってくるものと考えられる。

i-Construction が掲げる出来形管理基準では±5cm 以内の計測精度が求められている中で、現時点では MMS による計測は精度面で十分でないことは否めない。今後は、MMS を土工出来形管理に適用できる 3次元計測技術とするために、精度向上を図る検討を行うとともに MMS 計測マニュアルをより充実させ、現場測量作業の効率化、省力化に貢献したいと考える。

参考文献

- 1) 大伴真吾, 中野一也, 垣内力, 白石宗一郎 : MMS を利用した土工出来形計測実証, 先端測量技術, 108 号, pp. 22-29, 2016
- 2) 木村拓磨, 早川健太郎, 黒台昌弘, 足立有史, 白石宗一郎, 大伴真吾 : i-Construction を視野に入れた MMS による起工測量での精度検証, 土木学会 第 72 回年次学術講演会講演論文集, pp1463-1464, 2017