

衛星不可視区間を含む MMS 計測点群の 3 次元位置精度検証 Three-dimensional Position Accuracy Verification of MMS Measurement Pointcloud including Satellite Invisible Section

基本図情報部 片山理佐子・関口泰徳¹・笹川啓²
National Mapping Department
KATAYAMA Risako, SEKIGUCHI Yasunori, SASAGAWA Akira

要 旨

車載写真レーザ測量システムで取得される 3 次元点群データの位置精度は、自車位置姿勢データの精度に左右される。特に、衛星測位による自車位置の精度に大きく依存しており、GNSS 衛星からの電波の受信状況による精度の劣化が課題となっていた。近年、自車位置姿勢データ取得装置の性能やデータ処理・解析技術の向上に伴い、GNSS の受信状況によらずに高精度な計測が可能となってきた。そこで、衛星測位情報を使用せずに得られた自車位置姿勢データを用いて取得した 3 次元点群データの位置精度に関する検証を行った。

その結果、衛星測位情報を使用しない区間の距離が長くなるほど衛星測位情報を使用する場合と比較して較差が大きくなることや、カーブ箇所では時間と共に蓄積される IMU の姿勢角誤差の影響が見られることが確認できた。

1. はじめに

国土交通省では、平成 27 年度から「ICT の全面的な活用 (ICT 土工)」等の施策を導入して建設現場の生産性向上を図る i-Construction を推進し、建設現場における 3 次元データの導入・活用を図っている。3 次元点群データを取得する方法の一つに車載写真レーザ測量システム (Mobile Mapping System, 以下「MMS」という。) を用いた測量があり、走行しながら道路周辺の地形・地物等の 3 次元位置情報を効率的かつ迅速に取得することができる。国土地理院においては、平成 28 年 3 月に数値地形図データ作成の標準的な作業方法として、測量法第 34 条に基づく作業規程の準則 (以下「作業規程の準則」という。) に盛り込み、令和元年 12 月には、3 次元点群データ取得のための測量方法として、「車載写真レーザ測量システムを用いた三次元点群測量マニュアル (案)」を公表するなど MMS は今後、自動運転用地図作成等に幅広く活用される技術として期待されている。

MMS は、GNSS 測量機や IMU (慣性計測装置)、走行距離計 (オドメータ) 等のデータから、1 秒以下の間隔で自車位置を測位し、短周期で 3 軸に対する加速度及び傾きを計測することで、任意の時刻に対する自車の位置と姿勢を算出可能である。近年、これらの機材性能やデータ処理・解析技術が向上し、より高精度な計測が可能となってきている。しかし、機材等の性能が向上したとはいえ、衛星測位情報を良好に受信できない場合に 3 次元点群の位置精度がどの程度劣化するかという課題は、依然残されたままである。

そこで本稿では、調整点の設置が困難なトンネル等で MMS を活用した測量を想定し、衛星測位情報を使用せず、IMU や走行距離計から得たデータのみを用いて解析処理を行った場合の 3 次元点群データ及び道路中心線の位置精度について検証したので報告する。

2. MMS の諸元

本検証で使用した MMS の諸元を図-1 に示す。本検証では、三菱電機株式会社製「MMS-Xv320Z」を使用した。これは搭載機器を容易に取り外しできないよう車両に固定されたシステムである。作業規程の準則では固定式システムについて年 1 回のキャリブレーション実施を標準としており、本検証で使用した MMS においても、年 1 回のメーカー点検においてキャリブレーションを実施している。

また、本検証で使用した MMS の自車位置姿勢データ取得装置は GNSS 測量機や IMU、走行距離計から成る。周囲を計測する数値図化用データ取得装置はレーザスキャナ (図-1 における標準レーザ及び高精度レーザ) とカメラ (図-1 におけるカメラ及び全周囲カメラ) で構成されている。なお、本検証において走行路線状況の確認は通常のカメラ画像のみでまかなうことができ、色付き点群も生成する必要がないことから、全周囲カメラは使用していない。

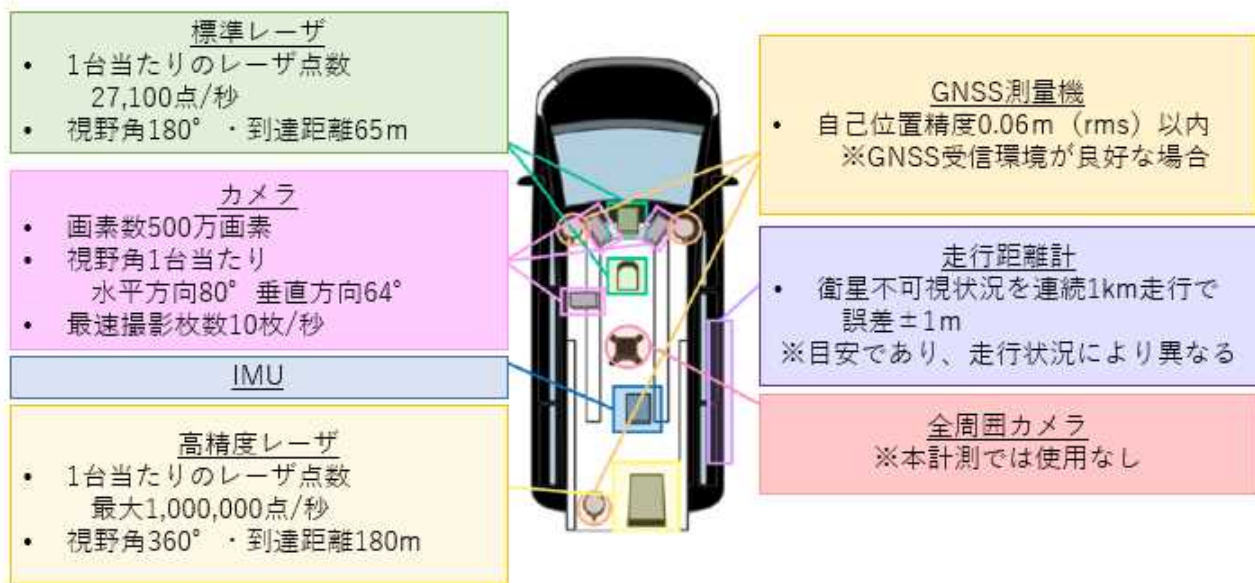


図-1 本検証に用いた MMS の諸元

3. 検証内容とその結果

本検証では、3つのパターンにおける MMS 計測点群及び道路中心線の精度検証を実施した。この3つの検証の概要とその狙いは以下のとおりである。

- 1) 衛星測位情報を使用した点群位置の精度検証
 一般道において、一般的な条件下で MMS 計測した3次元点群データの絶対位置精度を検証する。さらに、衛星測位情報を使用しない区間に対して、走行距離計や IMU により MMS の位置を補間した場合の3次元点群データの絶対位置精度も検証する。
- 2) トンネル等の衛星測位不可区間を想定した MMS 点群位置の精度検証
 実際のトンネルを想定し、一般的な道路トンネルと似た形状を持ち、かつ衛星測位情報を受信できる高速道路において、衛星測位情報を使用した場合と使用しない場合 (MMS の位置を走行距離計

や IMU で補間) の3次元点群データの相対位置精度を検証する。

また、1)の結果と合わせて、一般道よりも曲率の小さい高速道路における衛星測位情報を使用しない場合の絶対位置精度を推測する。

- 3) 実際の道路トンネルにおける道路中心線の精度検証

1)と 2)の結果を踏まえ、実際に道路トンネルを走行・計測し、算出した道路中心線の位置精度を検証する。

各検証の計測路線を図-2 及び表-1 に示す。移動取得は、表-1 に示す日時で作業規程の準則に基づき実施した。また、取得データの解析演算は、本検証で用いた MMS システム専用の後処理統括ソフトウェアである三菱電機株式会社製「MMS Positioning Post Process (Ver11.2.4)」を使用した。

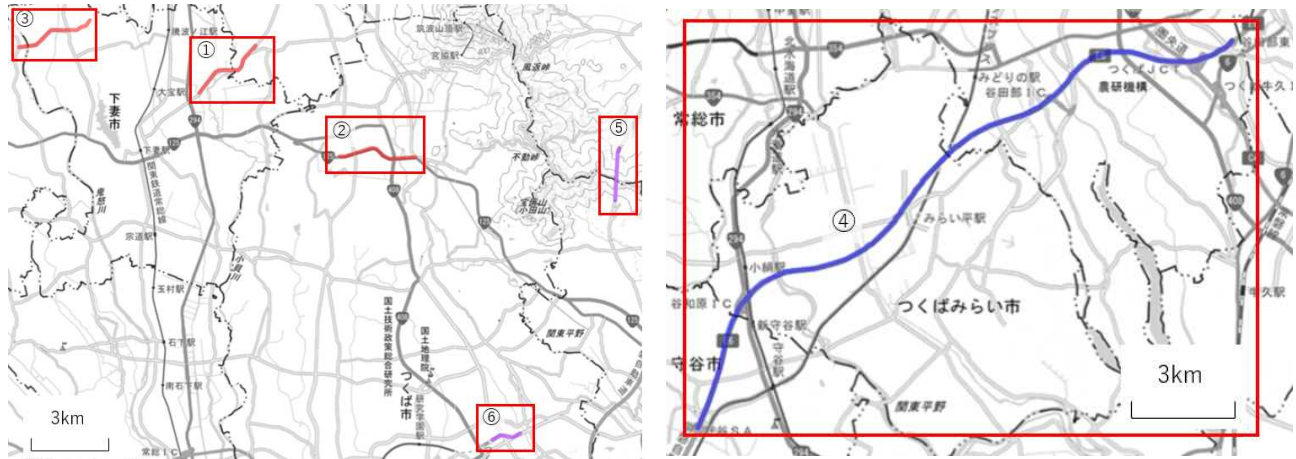


図-2 各検証の計測経路

表-1 各検証の計測路線

検証内容	路線番号	路線地名	路線距離	検証日時
1)	①	一般道 (茨城県下妻市下田 周辺)	3.02km	2020年2月28日 11時44分～11時58分
	②	一般道 (茨城県つくば市田中 周辺)	3.03km	2020年2月28日 11時9分～11時26分
	③	一般道 (茨城県下妻市江 周辺)	3.06km	2020年2月28日 12時16分～12時29分
2)	④	常磐自動車道 守谷 SA～谷田部東 PA	20.56km	2020年2月25日 13時4分～15時5分
3)	⑤	朝日トンネル (茨城県石岡市柴内 周辺)	1.99km	2020年2月28日 14時13分～14時23分
	⑥	つくば花室トンネル (茨城県つくば市吾妻 周辺)	1.17km	2020年2月28日 13時27分～13時46分

3.1 一般道における MMS 点群位置の精度検証

3.1.1 検証内容

はじめに、本検証で用いた MMS について、衛星測位情報を使用した場合と使用しない場合の計測精度を把握するため、一般道を走行し、取得した3次元点群データと、現地でネットワーク型 RTK-GNSS 測量 (VRS 方式) (以下「VRS-GNSS 測量」という。) で計測した結果を比較して精度検証を実施した。

3次元点群データの取得では、作業規程の準則に基づき、移動取得した3次元点群データを解析する際に、衛星測位情報を用いた解析処理 (以下「通常解析」という。) を実施した。そして、現地にて VRS-GNSS 測量で取得した検証点座標と、解析処理を行った3次元点群データの同一地点における座標を比較し、精度評価を行った。

本検証の計測路線は、表-1 及び図-2 (赤線) ①・②・③である。衛星測位情報を使用しない計測区間は、各路線においてカーブを含んだ 1km・2km・3km の3パターンの区間を設定し、往路及び復路に分けて解析を行った。また、精度評価に使用した検証点は路面マーカや縁石角といった3次元点群データで特定できる恒久的地物の位置とし、配点距離を 100m とした。

3.1.2 検証結果

精度検証結果を表-2, 3 に示す。なお、値は誤差の最大値である。

通常解析を行った場合、水平位置の誤差は最大で 0.144m、標高の誤差は最大で 0.184m であった。作業規程の準則に規定される数値図化用データと調整点との誤差の許容値は、地図情報レベル 500 の場合、水平位置が 0.15m 以内、標高が 0.2m 以内とされており、どの路線においてもこれを満たす結果となった。

次に、衛星測位情報を使用しない場合について、一定区間の衛星測位情報を除外し IMU や走行距離計等の情報のみを用いた解析処理 (以下「IMU 解析」という。) を行い、3次元点群データの精度検証を行った。その結果、衛星測位情報の除外区間のいずれの場合も地図情報レベル 500 における許容値を満たすことはできなかったうえに、衛星測位情報の除外区間が長くなるほど精度が劣化する傾向にあることが分かった。

衛星測位情報の除外区間では、IMU 及び走行距離計で得たデータのみから自車位置を推定しているため、ハンドル操作などの急な姿勢、方位の変化による IMU 誤差が時間経過とともに累積することや、本来は衛星測位情報で補正しているタイヤのスリップ等による走行距離計の誤差が精度劣化の要因として挙げられる。また、路線②については、誤差が著しく大きくなり良い検証結果とならなかった。図-3 に示すように、路線②では衛星測位情報の除外区間の始点位置付近で走行軌跡が曲がっており、何らかの誤差要因が発生したと思われる。そこから誤差が累積したことで、最終的に大きな誤差となったと考えられる。衛星測位情報が使用できない状況において、誤差を最小限に抑えるためには、急な姿勢変化が発生しないよう、機器搭載車両の運転時のハンドル操作はゆっくり行うこと、加速度についても急激な速度変化が発生しないよう、車両の速度も一定にする必要があると考えられる。

表-2 水平位置の精度検証結果

単位：m

除外区間		通常解析	IMU 解析		
			1km	2km	3km
①	往路	0.102	0.417	0.481	1.423
	復路	0.144	0.462	0.555	0.627
②	往路	0.096	2.077	1.731	6.375
	復路	0.079	2.462	5.408	1.849
③	往路	0.108	0.294	1.380	2.969
	復路	0.104	0.193	0.302	0.611

表-3 標高の精度検証結果

単位：m

除外区間		通常解析	IMU 解析		
			1km	2km	3km
①	往路	0.157	0.228	0.382	0.301
	復路	0.142	0.281	0.225	0.200
②	往路	0.163	0.307	0.352	0.301
	復路	0.184	0.276	0.324	0.382
③	往路	0.173	0.192	0.368	0.320
	復路	0.178	0.178	0.242	0.285



図-3 往路計測開始箇所の車両挙動

3.2 高速道路における点群位置の精度検証

3.2.1 検証内容

次に、実際のトンネルを想定した衛星測位不可区間の3次元点群データについての位置の誤差量をシミュレーションした。衛星測位不可区間の例として挙げられる道路トンネルは、一般的に信号や交差部がほとんど無く、一定速度で走行することができる。そこで、これらの特徴を持ち、かつ衛星測位情報も受信できる環境下である高速道路として、常磐自動車道(表-1及び図-2(青線)④守谷SA～谷田部東PA間)において、検証として上り線と下り線をそれぞれ1回計測した。

本検証では、3.1の検証結果より、通常解析を行った場合の位置座標が検証点座標とほぼ差異無いことから通常解析の成果を正として評価を行った。通常解析により作成した反射強度画像とIMU解析によ

り作成した反射強度画像について、100m毎に設定した白線等の道路付帯物の検証点において座標の比較を行った。

IMU解析を行った衛星測位情報の除外区間は、計測区間の中心位置から5km・10km・15km・18kmの4パターンとし、上下線別々に解析を行った。衛星測位情報の除外区間を最大18kmとしたのは、令和2年6月現在、日本最長の道路トンネルである山手トンネルの距離(18.597km)を参考としたためである。

3.2.2 検証結果

下り線における精度検証結果を表-4に示す。黄色セルは衛星測位情報除外区間、数値及び赤色バーは走行距離地点における通常解析とIMU解析の結果の較差を示す。

各衛星測位情報除外区間における較差の最大値は、5kmの場合に8.5km地点で1.12m、10kmの場合に5.2km地点で2.90m、15kmの場合に5.2km地点で4.84m、18kmの場合に5.6km地点で5.60mであった(検証点及び較差は100m毎に取得したが、表-4は1km単位で示しているため、表-4には較差の最大値の記載はない)。なお、本検証では通常解析の成果を正としたため、表-4に記載しているdXYの値は、検証点からのズレ(平面距離)ではなく、通常解析とのズレ(平面距離)を表している。IMU解析の位置精度は、本検証結果と1)で検証した通常解析の平面誤差量の値からある程度推測できる。

また、衛星測位情報の除外区間における精度劣化の傾向は、除外区間の長さが5km、10km、15km、18kmの全ての場合において同じ傾向を示していた。衛星測位情報の除外区間において、距離とともに較差が増大するのではなく、一旦増大した後に差が縮小し、その後再度差が大きくなるという傾向を示している。これは、計測対象路線の道路形状の影響によるものと推測され、本検証の計測路線が左右に緩やかなカーブ形状となっており、時間と共に蓄積されるIMUによる姿勢角誤差が逆方向へのカーブにより解消したと考えられる。

上り線については、較差が最大15mとなり(表-5)、下り線に比べて約3倍となった。これも3.1の路線②と同様に、車両挙動(姿勢角)による何らかの影響があったものと推測される。さらに正確な評価のためには、同一路線における複数回計測した結果の比較や大きな誤差要因を排除した上での計測結果を使用した検証が必要であると考えられる。

表-4 高速道路下り線における精度検証結果

単位：m

走行距離 (km)	衛星測位情報除外区間			
	5km	10km	15km	18km
	dXY	dXY	dXY	dXY
0.0	0.025	0.076	0.049	0.045
1.0	0.032	0.024	0.509	0.651
2.0	0.033	0.025	0.779	1.144
3.0	0.051	1.585	2.504	3.167
4.0	0.038	2.654	3.864	4.682
5.0	0.247	2.847	4.709	5.460
6.0	0.110	2.380	4.384	5.146
7.0	0.861	1.473	3.113	3.979
8.0	1.020	0.951	2.066	3.035
9.0	0.765	0.689	1.386	2.437
10.0	0.040	0.949	2.057	3.224
11.0	0.031	0.545	2.610	3.780
12.0	0.197	0.208	2.738	3.874
13.0	0.028	0.013	2.545	3.491
14.0	0.017	0.019	0.856	2.176
15.0	0.017	0.036	0.047	1.245
16.0	0.061	0.053	0.046	0.944
17.0	0.043	0.040	0.019	0.341
18.0	0.029	0.025	0.017	0.025

表-5 高速道路上り線における精度検証結果

単位：m

走行距離 (km)	衛星測位情報除外区間			
	5km	10km	15km	18km
	dXY	dXY	dXY	dXY
0.0	0.022	0.018	0.027	0.290
1.0	0.027	0.042	0.086	1.275
2.0	0.059	0.075	0.072	2.243
3.0	0.035	0.024	0.027	4.754
4.0	0.044	0.036	1.715	8.403
5.0	0.023	0.015	4.212	10.599
6.0	0.013	0.020	5.697	11.947
7.0	0.033	1.974	7.218	13.194
8.0	0.042	4.894	8.789	14.567
9.0	0.432	6.246	9.696	15.203
10.0	0.987	5.979	10.636	15.515
11.0	1.413	5.122	11.113	15.469
12.0	1.551	4.253	11.090	15.061
13.0	0.464	3.814	10.084	14.126
14.0	0.014	3.200	8.779	12.662
15.0	0.019	1.322	6.958	10.230
16.0	0.032	0.021	4.972	7.404
17.0	0.064	0.050	2.023	3.154
18.0	0.021	0.045	0.076	0.357

3.3 実際の道路トンネルにおける道路中心線の精度検証

3.3.1 検証内容

実際の道路トンネルにおいて移動取得を行った結果について精度検証を行った。計測路線は、表-1 及び図-2 (紫線) における⑤茨城県道 138 号朝日トンネル(検証路線長 1.78km) (ほぼ直線の路線形状)、⑥茨城県道 24 号つくば花室トンネル (検証路線長 0.77km) (カーブのある路線形状) を選定した。なお、作業規程の準則に基づき、本検証の計測路線は坑口前後を含めた。

道路トンネル内では衛星測位情報を取得できないため、通常解析の成果と IMU 解析の成果を比較することができない。そのため、本検証では MMS で取得した 3 次元点群データを用いて作成した反射強度画像から算出した道路中心線と、基盤地図情報の道路縁間の中心位置を比較することで精度検証を行った。

3.3.2 検証結果

路線⑤の精度検証結果を図-4、路線⑥の精度検証結果を図-5 に示す。図中の数値は、MMS で取得した 3 次元点群データから作成した道路中心線と基盤地図情報の道路中心において、往路及び復路の計測始点から 5m 毎に取得した座標の較差の絶対値をメートル単位で示したものである。

路線⑤においては、最大で約 0.3m の較差があった。反射強度画像と基盤地図情報の比較でも同様に 0.3m ほどのズレが見られた。

一方、路線⑥では、図-5 のとおり、カーブ付近で道路中心線同士の比較においてズレが大きく、最大で 9m の差があった。衛星測位情報の除外区間がつくば花室トンネルの路線距離である約 1km の場合、1) と 2) の結果における水平位置の誤差の最大値は 0.193~0.462m であった。路線⑥の誤差はこれよりかなり大きいことがわかる。これについては、カーブ付近でのハンドル操作が原因である可能性もある

が、往路と復路で同様のベクトル図を示すことから、比較した地図データそのものに起因する可能性もある。

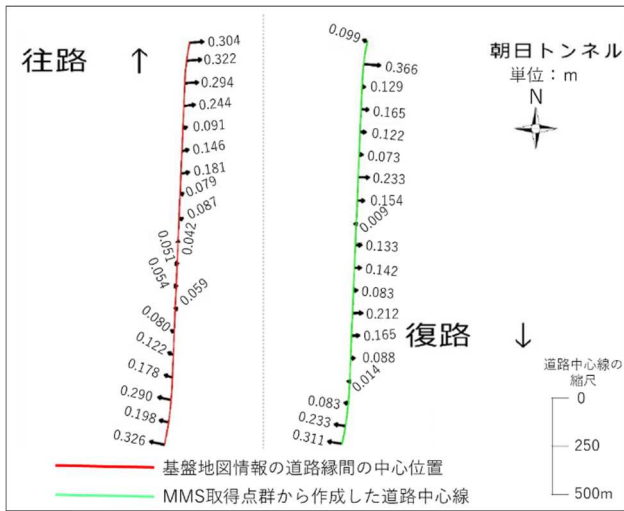


図-4 路線⑤の道路中心を比較したベクトル図

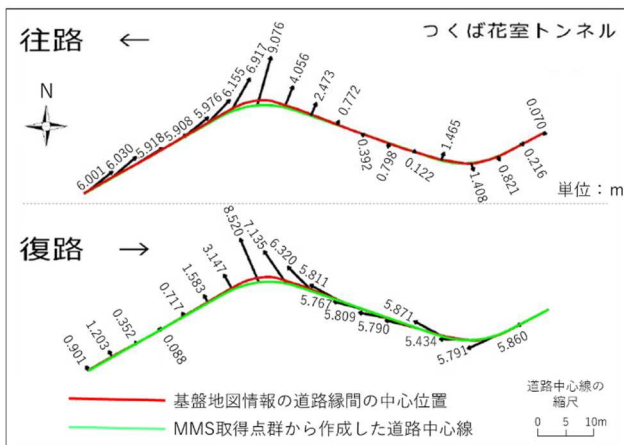


図-5 路線⑥の道路中心を比較したベクトル図

4. まとめ

MMS を用いて取得した 3 次元点群データについて、3 つの検証を行い、以下の結果が得られた。

- 1) 通常解析を行った場合、水平位置や高さの誤差は最大で 0.144m、平均で 0.04m であり、地図情報レベル 500 の許容値を満たした。
- 2) トンネル等を想定した衛星測位情報を使用しない場合の誤差の最大値は、衛星測位情報除外区間が 5km の場合に 1.12m、10km の場合に 2.90m、15km の場合に 4.84m、18km の場合に 5.60m であった。ただし、車両挙動などの何らかの影響によって較差の最大値が 15m になる場合もあった。
- 3) 実際に道路トンネル内で計測した結果について、路線⑤では最大 0.3m 程度の誤差であった。路線⑥では最大で 9m の誤差があり、誤差要因の詳細な検討が必要であると考えられる。

また、本検証では各路線を 1 回の往復計測しか実施していないことから、一定の定量評価を得るためには以下のデータ取得及び評価をすることが望ましい。

- 同一路線を複数回計測したデータを評価
- 直線区間やカーブ区間に分けて評価（路線形状の違いによる誤差要因の把握のため）
- ドライバーを変えて評価（運転技術の違いによる影響が生じる可能性があるため）

さらに、IMU 誤差は時間累積と車両挙動による姿勢角誤差が要因とされており、本検証でも特に路線②と路線④の上り線においてこれらが要因とみられる誤差が見受けられた。IMU 誤差の要因の例として信号による停止がある。これは、赤信号での停車と発進の車両挙動や停車時の時間累積が変わってくるため、赤信号の有無によって精度が変わってしまう。今後の検証の際にはこれらの点にも留意して、より高い測量結果との比較分析が必要であろう。

(公開日：令和 3 年 6 月 23 日)

参考文献

国土交通省 国土地理院 (2020)：作業規程の準則，第 3 編 第 4 章。
 国土交通省 国土地理院 (2019)：車載写真レーザ測量システムを用いた三次元点群測量マニュアル (案)，1-25。
 藤原博行，伊藤裕之，笹川啓，大野裕幸 (2013)：MMS から作成した反射強度画像の精度検証について，国土地理院時報，124，23-27。
 三菱電機株式会社：三菱モーターマッピングシステム高精度 GPS 移動計測装置，
<https://www.mitsubishielectric.co.jp/mms/pdf/mms.pdf> (accessed 19 November, 2020).