

# 3D LiDAR を簡易設置した車両による 高効率な広域 3 次元環境地図の構築と精度の検討

○石井拓海（芝浦工大） 長谷川忠大（芝浦工大） 油田信一（芝浦工大）

市原海渡（芝浦工大） 松井佳音（芝浦工大） 金野直樹（西武建設(株)） 須長真介（西武建設(株)）

## 1. はじめに

国土交通省では、2016 年より生産性革命プロジェクトを発足し推進している[1]。その背景には、技術労働者の減少や高齢化に伴う離職・次世代への技術継承の問題がある。建設業における就業者数は、1997 年に 685 万人でピークを迎えて以降、2020 年は 492 万人と減少傾向にある[2]。また、2020 年の建設業における就業者年齢構成は、50 歳以上が 233 万人で全体の約 47%、29 歳以下が 58 万人で全体の約 12% となっており高齢化が進行している。この高齢化・担い手不足の問題に対して、1 人当たりの生産性向上による改善が求められている。また、生産性革命プロジェクトの取組の 1 つに「インフラの整備・管理の高度化」があり、ICT を活用した i-Construction[3]が推奨されている。i-Construction は、全ての建設生産プロセスを対象に、ICT を全面活用して生産性を向上させる取り組みである。一方、建設生産プロセスにおいて、地形・地物の情報を取得する測量は必要不可欠な作業の 1 つである。i-Construction では、測量の作業時間の短縮かつ高精度なデータ取得が求められ、全プロセスを 3 次元データで繋ぐことが期待されている。

従来型の RTK-GNSS 法を用いた地形測量[4]は、高精度の 3 次元地図作成が実現できる。しかし、現地での基準点の現況調査や新たな基準点の設置などの設備準備や細部測量など準備期間も長く負担が大きい。これに対して、ドローンを用いた測量（ドローン測量）[5]や移動計測車両による測量（Mobile Mapping System. 以下、MMS）[6-7]などの新たな測量手法は、従来の地形測量と同程度の位置精度を有して、準備などの整備コストを比較的安く抑えられるため活用され始めている。特に、広いエリアの測量において、従来型の地形測量と比較して大幅な効率向上が期待できる。本研究では、ドローンを飛行させることが困難な山岳部道路の測量を対象に考えており、MMS に注目している。

MMS は、大別して、車上装置と車両下部に光学オドメータ、車内設置の計測・記録装置から構成される。車上装置は、GNSS、IMU、LiDAR および全方位カメラがフレームに固定された計測ユニットになっており、車両のルーフキャリアに設置される。各センサの正確な位置関係および LiDAR やカメラの傾きなどのパラメータが地図精度に影響するため、あらかじめ

適切な配置でフレームに固定していると考えられる。また、計測時のみ設置して利用する脱着式 MMS もあるが、計測ユニットの大きさ・重量、光学オドメータの取付などを鑑みると、計測ユニットや光学オドメータをあらかじめ適切に設置した専用車での使用が適切であると考えられる。その場合、山岳部道路など地方での MMS の活用を考えると、MMS を設置した専用車の調達などの設備コストが課題になる。そこで本研究では、上記の課題を解決するため、適当なセンサを持ち込み現地で調達した車両に簡易設置して、走行しながら計測するのみで高効率な広域 3 次元環境地図を構築し、その精度を検証した。

本論文では、センサ単体（GNSS、IMU、LiDAR）を簡易的に後付けした、現地調達の車両を走行させ計測することにより、高効率な広域 3 次元環境地図の構築を検証した。また、センサなどの機材は現地へ宅配できる程度のセットアップとすると共に、市販の比較的安価なセンサを利用して高精度な地図作成を目指した。検証実験では、本地図作成手法における再現性および従来型の地形測量との精度の比較を行い、本手法の有用性を実証した。

## 2. 本地図作成手法の概要

### 2.1 課題と戦略

本研究では、山岳部道路の測量を対象としている。路面の状態、路肩のガードレールや看板、山側の法面などの計測が必要になる。また、GNSS の補正情報を取得するための 4G 通信が不安定もしくは接続できない箇所や衛星情報の取得が不安定な箇所があり、GNSS の測位データを取得できない箇所が存在する。そこで、その間の位置推定は、IMU の方位推定の結果を活用して位置補間することにより対応することとした。一方、センサを宅配で持ち込み、現地調達の車両に簡易設置して計測する。そこで、自己位置推定には GNSS と IMU のデータのみを利用するとして、各々を簡易設置することとした。また、Point Cloud Data（以下、PCD）取得に 3D LiDAR を使用した。さらに、1 台のラップトップを用いて、3 つのセンサデータをタイムスタンプ付きで記録し、記録したセンサデータを基にオフラインで 3 次元地図を作成することとした。

### 2.2 ハードウェア構成

Fig.1 にセンサデータ取得に使用した実験車両の 1 例を示す。GNSS アンテナは車両のルーフ、IMU は車内、3D LiDAR はボンネットに設置した。なお、

本研究では路面と路肩のガードレールが測量対象となるため、3D LiDAR は路面に対して下向きにマグネットジョイントで固定した。また、Table 1 に今回使用した機材の仕様を示す。比較的入手が容易な製品を選定した。さらに、GNSS の RTK 測位のためソフトバンク株式会社/ALES 株式会社の高精度位置情報配信システム ichimill を使用した。

## 2.3 ソフトウェア構成

Fig.2 に 3 次元地図作成のフローを示す。大別して、1) 各センサデータ取得、2) 3 次元自己位置推定、3) PCD の座標変換の 3 つの処理がある。現地では、センサデータ取得のみを行い、自己位置推定と PCD の座標変換はオフラインで実行する。センサデータは、RTK-GNSS による緯度、経度、標高データを 5[Hz]、IMU による加速度、角速度データを 100[Hz]、3D LiDAR による PCD を 20[Hz] で取得する。その後、タイムスタンプ付きの各センサデータは、csv 形式でファイルに保存して入力として使用する。3 次元自己位置推定は、RTK-GNSS による緯度、経度データを平面直角座標系に変換し、IMU により推定した方位と組み合わせ、 $x, y, z, \text{roll}, \text{pitch}, \text{yaw}$  の 6 自由度を推定している。しかし、RTK-GNSS は測定レートが 5[Hz] であるため、その間の位置推定は IMU による方位推定を活用して補間した。また、yaw に関しては、GNSS 測位データから一定移動距離毎に yaw を算出して、IMU の角速度データから積分した yaw の累積誤差を補償した。これにより、方位推定の精度を高めた。次に、PCD の座標変換では、3 次元自己位置推定結果を基にフレーム毎でなく、ポイント毎に座標変換した。本研究では車両を 30~40[km/h] で走行させながら PCD を取得しており、ポイント毎にグローバル座標へ変換することで取得時間の遅れの影響を軽減できるためである。最後に、座標変換した PCD をフレーム更新のタイミングで出力し、それらを重ね合わせて 3 次元環境地図を構築する。

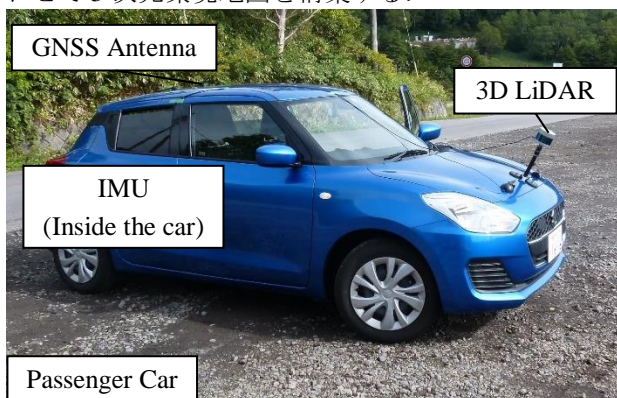


Fig.1 Experimental vehicle mounted with sensors

Table 1 Specification of hardware

Measuring Equipment	Product
GNSS	C099-F9P (u-blox)
IMU	RT-USB-9axisIMU2 (RT Corporation)
3D LiDAR	VLP-32C (Velodyne)
PC	CF-LX5 (Panasonic)

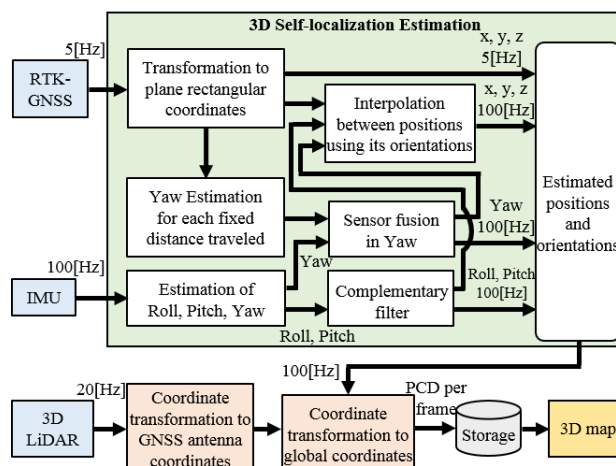


Fig.2 Flow of Software configuration for 3D map building

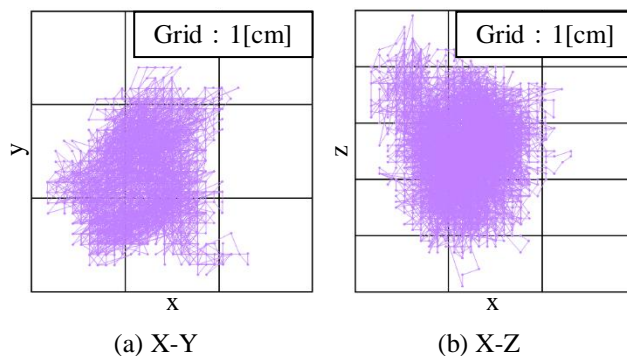


Fig.3 Fixed-point observation by RTK-GNSS

## 3. RTK-GNSS の測位精度の検証

本研究の 3 次元自己位置推定法の精度は、推定アルゴリズムから RTK-GNSS の測位精度に大きく依存する。そこで、本研究における GNSS セットアップでの測位精度について検証した。Fig.3 に定点測位結果を示す。これは、4G 通信が安定していて GNSS の補正情報を常に取得できる環境にて、GNSS アンテナを三脚に取り付け約 2[m] の高さに固定し、1 時間程度測定した結果である。なお、平面直角座標に変換してプロットしている。測位のばらつきは、 $x$  方向が 3 [cm] 以内、 $y$  方向が 3[cm] 以内、 $z$  方向が 5[cm] 以内に収まっており、比較的高精度で測定できることが確認された。

次に、従来型地形測量にて行う基準点の計測結果と本研究における GNSS セットアップの精度を検証した。西武建設株式会社にて 5 点の基準点を選定し、1 時間観測後に既知点となる電子基準点データを株式会社ジェノバよりダウンロードし基線解析した位置  $P_0(x_0, y_0, z_0)$  と、本研究の GNSS セットアップで基準点に GNSS アンテナを設置して 3 分間測位した平均位置  $P(x, y, z)$  を比較した。  $P_0$  と  $P$  の差は  $x$  方向が  $0.039 \pm 0.006$  [m]、 $y$  方向が  $-0.014 \pm 0.011$  [m]、 $z$  方向が  $6.200 \pm 0.021$  [m] 程度となった。  $x, y$  方向においては比較的良く一致しているが、 $z$  方向には大きな差が確認できた。 $z$  方向の位置は GNSS 受信機から取得できる

標高であり、補正情報配信サービスの違いが原因ではないかと考えられるが、今後の検証が必要である。ただし、5つの基準点のx, y, z方向の差とも、ほぼ一定の値である。そのため、従来型地形測量の結果と本研究で作成した3次元地図を比較する場合は、この一定値の差をGNSSの測位位置から補償することとした。

#### 4. センサの相対位置関係とキャリブレーション

現地調達した車両に各センサを個別に設置するため、次のパラメータを計測する必要がある。なお、本地図作成手法では、GNSSアンテナの位置を代表点としてデータを処理する。1) GNSSアンテナとLiDARとの相対位置関係( $x_{offset}$ ,  $y_{offset}$ ,  $z_{offset}$ ), 2) LiDARの設置姿勢( $roll_l$ ,  $pitch_l$ ,  $yaw_l$ ), センサのキャリブレーションのため、3) IMUの角速度の初期オフセット( $\omega_{ix}$ ,  $\omega_{iy}$ ,  $\omega_{iz}$ ), 4) 車両の初期方位 $yaw_{init}$ の計測が必要となる。1) は、GNSSアンテナとLiDARの相対位置をメジャーにより測定した。ただし、各センサとも車両の中心に設置し、 $x_{offset}$ と $z_{offset}$ のみ測定した。2) は $roll_l$ ,  $pitch_l$ と $yaw_l$ をそれぞれ次の方法で推定した。 $roll_l$ ,  $pitch_l$ の推定には、駐車場など正面に障害物のない平面が確保できる場所にて、路面のPCDを取得した。そのPCDから、レンジ画像を用いた地平平面検出手法[8]により、平面の法線ベクトルを算出して、 $roll_l$ ,  $pitch_l$ を推定した。また、 $yaw_l$ は、LiDARの正面にポールを配置してポールのPCDを取得し、そのPCDから推定した。3) のIMUの角速度の初期オフセットは、車両を停止した状態で10秒間計測を行った平均値を用いた。4) はセンサデータ取得走行開始時に5[m]以上直進し、その間の測位位置からGNSS平面直角座標系の初期方位 $yaw_{init}$ を算出した。

#### 5. 3次元自己位置推定手法

##### 5.1 姿勢推定

roll, pitchは、IMUの加速度、角速度データによる推定角度に相補フィルタを適用して出力する。これにより、角速度の積分による累積誤差の影響を削減している。また、yawはIMUの角速度データを100[Hz]レートで積分して角度を推定する。さらに、RTK-GNSS測位位置x, yを用いて一定移動距離毎にyawを計算し、IMUの角速度を積分したyawと融合することで積分による累積誤差の影響を定期的に補

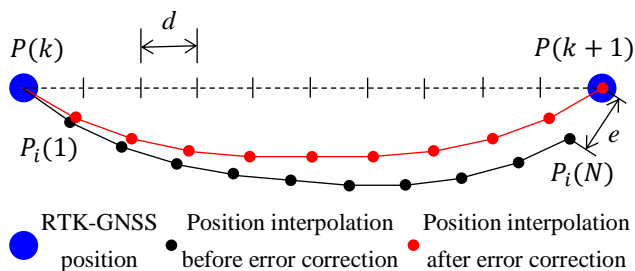


Fig.4 Schematic diagram of IMU-based position interpolation

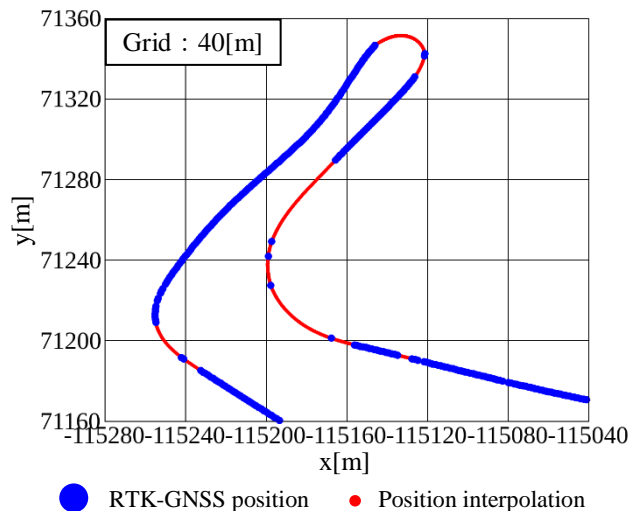


Fig.5 Estimation of self-position using GNSS and IMU

正している。なお、今回はRTK-GNSSによるyawの累積誤差の補正を0.5[m]毎に行った。

##### 5.2 位置推定

位置x, y, zは、GNSS受信機から取得した緯度、経度、標高を国土地理院が示している変換式に従い、平面直角座標系のENZ座標に変換して使用する[9]。しかし、GNSS測位結果を5[Hz]レートで取得しているため、このままでは3D LiDARの取得レート20[Hz]に追いつかずPCDを十分に活用することができない。そこで、GNSS測位位置の間をIMUによる推定方位を活用して位置推定することとし、次の手法を提案する(Fig.4)。

- 1) GNSS測位位置 $P(k)$ と $P(k+1)$ の間に直線を引き、その直線をIMUによるデータ取得数 $N$ で均等分割して移動量 $d$ を算出する
- 2) 測位位置 $P(k)$ を現在位置として移動量 $d$ とIMUによる推定角度roll, pitch, yawを与え、IMUのデータ取得数 $N$ 回のオドメトリ計算をして補間位置 $P_i(t)$  ( $t=1\sim N$ )を推定する
- 3) 最終的な補間位置 $P_i(N)$ とGNSS測位位置 $P(k+1)$ の誤差 $e$ を計算する
- 4) 補間位置 $P_i(t)$ に対して誤差 $e$ を均等に割り当て、全体を補正する

この位置補間手法により、GNSSの5[Hz]測位レートに対してIMUの100[Hz]計測レートで位置推定可能となった。さらに、今回実験を行った山岳部道路のように4G通信が不安定で補正情報の取得が困難、もしくは衛星情報が取得困難で測位情報が得られない箇所のある環境においても位置推定が可能となる(Fig.5)。Fig.5より、カーブ区間であっても概ね走行軌跡を描いており、位置推定に成功している。

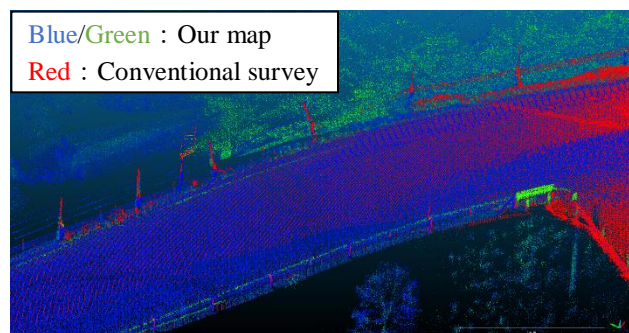
#### 6. 検証実験

山岳部道路において3次元地図作成の検証実験を行った。本実験では、Fig.1に示すように乗用車に各センサを簡易的に後付け設置して30~40[km/h]で車

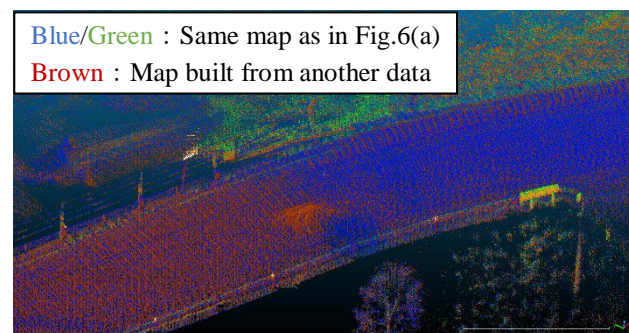


両を走行させ、センサデータを取得した。作成した地図の距離は約 12.5[km]になり、2 日間で 8 回分のデータを取得した。また、比較のため、西武建設株式会社により約 5[km]程度の区間で従来型の測量も実施した。5 名のチームで 5 日間をかけて測量データの取得を行ったが、同区間を本手法では 10 分程度で走行してセンサデータを取得した。このことから、作業効率の高さがわかる。センサデータの取得後、オフラインにて自己位置推定および環境地図構築を実施した。また、今回、地図構築に用いる PCD は水平-90~+90[°]、最小距離 1.7[m]、最大距離 20[m]に制限し、点群を間引いた。

はじめに、従来型の測量地図と本研究による 3 次元環境地図を比較した。当初、比較した結果、XY 平面上に 35[cm]程度の誤差が見られた。検証した結果、4 章で説明した GNSS アンテナと LiDAR の相対位置  $x_{offset}$  の誤差であることが判明した。人がメジャーにて曖昧に測定していたことによる人為的誤差といえる。そこで本実験では、相対位置  $x_{offset}$  を適切と思われる距離に調整して地図の比較を行った。Fig.6(a)に、比較結果の 1 例を示す。赤色の PCD が従来型地形測量、青緑色の PCD が本手法による地図を示している。ポールと同じ位置と思われる点を選択して距離を計算した結果、5[cm]以内の誤差であった。今後、正確に精度を確認する方法を検討する必要があるが、概ね精度良く地図作成できていることが確認できた。また、GNSS アンテナと LiDAR の相対位置を正確に測定する方法、もしくは基準点を設置して平面直角座標における精度を担保するなどの検討が必要であることも確認できた。次に、Fig.6(b)に本手法の再現



(a) Comparison between our maps and survey maps



(b) Reproducibility of 3D map building  
Fig.6 An example of 3D map building

性検証結果を示す。同区間において、異なるタイミングで取得したセンサデータを用いた環境地図を比較した。青緑色の PCD が Fig.6(a)と同様の地図、茶色の PCD が異なるセンサデータを用いて作成した地図を示している。これも、ポールと同じ位置と思われる点間距離を計算して精度を検証した。その結果、3[cm]以内の誤差に収まっており、本手法の再現性を確認できた。

## 7. おわりに

本研究では、RTK-GNSS, IMU, 3DLiDAR を用いた高効率な広域 3 次元環境地図の構築を検証した。そして、山岳部道路における検証実験により、従来型の地形測量および異なるタイミングで取得したセンサデータで作成した地図と比較し、精度と再現性を実証した。さらに、補正情報もしくは衛星情報が取得困難な区間においても IMU を用いた位置補間により 3 次元環境地図構築に成功した。今後は、他の場所においても地図作成を行い、精度や再現性を検証する。また、本手法は様々な移動体に後付け可能なため、ドローンにセンサを搭載して地図構築の検証を考えている。

## 参考文献

- [1] 国土交通省:”生産性革命プロジェクト”(最終閲覧日:2021.07.04)[https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/point/sos\\_ei\\_point\\_tk\\_000021.html](https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/point/sos_ei_point_tk_000021.html).
- [2] 総務省統計局:”労働力調査(基本集計) 2020 年(令和 2 年)平均結果”(最終閲覧日: 2021.06.26) <https://www.stat.go.jp/data/roudou/sokuhou/nen/ft/index.html>.
- [3] 国土交通省:”i-Construction 推進コンソーシアム”(最終閲覧日:2021.06.26) [https://www.mlit.go.jp/tec/i-construction/i-con\\_consortium/index.html](https://www.mlit.go.jp/tec/i-construction/i-con_consortium/index.html).
- [4] 重松文治,野口仁志,清水英範:”GPS とレーザーレベルを用いた空港沈下測量システムに関する研究”,土木学会論文集,no.630,pp.55-64,1999.
- [5] 青山幸男:”建設現場でのドローン空撮ならびにレーザー測量データの活用例”,環境技術学会誌,vol.48,no.3,pp.131-135,2019.
- [6] 井上浩一, 鈴木達朗, 阿部亮吾, 藤木三智成, 西山哲:”標準的な移動計測車両を用いた路面縦断プロファイル計測手法の検討”,土木学会論文集 E1,vol.73,no.3,pp.I-63-I\_70,2017.
- [7] 石川貴一郎,天野嘉春,橋詰匠,瀧口純一,清水聡:”モバイルマッピングシステムによる都市空間モデリング”,計測自動制御学会産業論文集,vol.8,no.17,pp.132-139,2009.
- [8] M. Himmelsbach, Felix v. Hundelshausen and H.-J. Wuensche:”Fast Segmentation of 3D Point Clouds for Ground Vehicles”, Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium, pp.560-565,2010.
- [9] 国土交通省国土地理院:”平面直角座標系(平成十四年国土交通省告示第九号)”(最終閲覧日:2021.06.26)<https://www.gsi.go.jp/LAW/heimencho.html>.