

(29) モバイルセンシングユニットを用いた 3次元計測結果とSLAMの適用結果との 比較研究

塚田 義典¹・窪田 諭²・山本 雄平³・田中 成典⁴・西藤 怜⁵

¹正会員 岩手県立大学講師 ソフトウェア情報学部 (〒020-0693 岩手県滝沢市菓子 152-52)
E-mail:tsukaday@iwate-pu.ac.jp

²正会員 関西大学准教授 環境都市工学部 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35)
E-mail:skubota@kansai-u.ac.jp

³非会員 関西大学特命准教授 先端科学技術推進機構 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35)
E-mail:y.yamamo@kansai-u.ac.jp

⁴正会員 関西大学教授 総合情報学部 (〒569-1095 大阪府高槻市霊仙寺町 2-1-1)
E-mail:tanaka@res.kutc.kansai-u.ac.jp

⁵非会員 関西大学大学院 総合情報学研究科 (〒569-1095 大阪府高槻市霊仙寺町 2-1-1)
E-mail:k971389@kansai-u.ac.jp

国土交通省は、3次元地理空間情報を国家の最重要基盤と位置付け、データ整備の効率化と迅速化に供する技術開発を推進している。しかし、高層ビル街、駅舎、地下空間等では、GNSSを用いて正確な位置を測位できないことから、地理空間情報の整備が進んでいない。このような背景の下、近年では、SLAMを用いた可搬性に優れたセンシングユニットが登場しつつある。しかし、SLAMでは、ブレイクラインが少ない形状特徴の乏しい環境下では自己位置が推定できず、3次元データの生成が困難な課題がある。そこで、本研究では、安価な機器を組み合わせたモバイルセンシングユニットを試作し、追尾型トータルステーションを用いた3次元データの生成手法を提案する。そして、SLAMの適用結果と比較して、各手法の精度、特性、課題について考察する。

Key Words: 3-dimensional measurement, mobile sensing unit, laser scanner, IMU, TS, SLAM

1. はじめに

国土交通省では、3次元地理空間情報を国家の最重要基盤と位置付け、データ整備の効率化と迅速化に供する技術開発を推進^{1,2)}している。道路分野では、レーザスキャナ、カメラ、GNSS (Global Navigation Satellite System)、IMU (Inertial Measurement Unit) 等のセンサを搭載した Mobile Mapping System (以下、MMS) を用いて、道路空間の3次元情報を取得し、自動運転のための高精度3次元地図データを生成する取組が本格化している。一方、高層ビル街、駅舎、地下空間等においては、GNSSを用いて正確な位置を測位できないことから、地理空間情報の整備が進んでいない。

このような背景の下、近年では、可搬性に優れたセンシングユニットが登場しつつある。これらのユニットの

多くは、レーザスキャナ、カメラ、IMUを搭載しており、周辺環境を計測しながら移動して、広域の3次元データを生成する。自己位置は、レーザスキャナやカメラから得られた計測データより推定する。このように、自己位置推定と3次元データの生成を同時に行う研究は、SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) と呼ばれ、様々な手法^{3,4)}が提案されている。しかし、SLAMでは、自己位置の推定誤差が累積する課題と、地物の輝度変化や形状的な特徴の乏しい場所では自己位置が推定できず、3次元データの生成が困難な場合がある。

そこで本研究では、安価な機器を組み合わせたモバイルセンシングユニット (以下、MSU) を試作し、追尾型トータルステーション (以下、TS) を用いた3次元データの生成手法を提案する。MSUは、市販の小型レーザスキャナ、IMU、TS用プリズムで構成される。TS

は、自動化施工の用途で導入が進んでおり、プリズムを自動的に追尾し、その位置情報（以下、TS データ）を連続的に記録する。そのため、TS データと IMU データの時刻を同期することで、レーザスキャナより取得した点群データの補正が可能である。本研究では、MSU より取得したデータに提案手法と SLAM を適用し、各手法の精度、特性、課題について考察する。

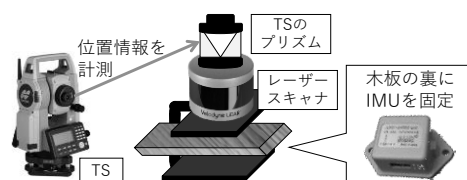


図-1 MSUの機器構成

2. 研究の概要

本研究では、MSU（図-1）と TS データを用いて、各時刻で計測した点群データを補正する。処理フローを図-2 に示す。提案手法では、入力データは TS データ、IMU データ、そして計測位置を原点とする点群データとし、出力データは座標系を統合した点群データとする。SLAM では、計測位置を原点とする点群データのみ入力し、座標系を統合した点群データを出力する。

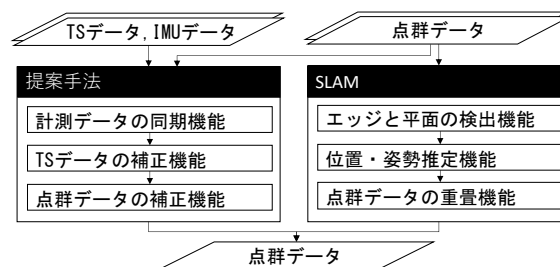


図-2 処理フロー

表-1 使用機器

機器種別	製品名	製造元
レーザスキャナ	VLP-16 Hi-Res	Velodyne
自動追尾型 TS	IS-305	TOPCON
IMU	AMU-Lite	シリコンセンシングシステムズジャパン

(1) 提案手法

提案手法では、MSU の移動に伴う点群データの座標系の変化に対して、その相対的な平行移動量を TS データ、姿勢変化量を IMU データで補正する。提案手法は、計測データの同期機能、TS データの補正機能、点群データの補正機能で構成される。

a) 計測データの同期機能

本機能では、計測開始前に機器全体を水平方向に回転させ、点群データ、TS データと IMU データに生じた計測値の変化に基づき、計測時刻を同期する。計測データに対して PC 時刻を付与できる場合は、PC 時刻に基づきデータを同期する。各機器の計測間隔が異なる場合は、最も間隔の広いデータを基準に計測データを引き合わせる。任意の時刻において、TS データまたは IMU データのいずれかに計測エラーが生じている場合は、同期対象外とする。

b) TS データの補正機能

本機能では、事前に複数地点の点群データを重畳し、任意地点を基準とする座標系に TS データを補正する。TS データは、屋内では設置位置を原点とするローカル座標系が基準となる。そのため、MSU の平行移動量を算出するためには、TS データと点群データの座標系を補正する必要がある。しかし、TS では同時に追尾できるプリズムは 1 点のみであるため、1 地点の点群データから補正に必要なパラメータを算出できない。そこで、複数地点の点群データを重畳した結果と、その各地点の TS データを用いて、MSU の平行移動量を導出する。

c) 点群データの補正機能

本機能では、IMU データと補正した TS データを用い

て、点群データを補正する。

(2) SLAM

SLAM では、連続する二時期の点群データからエッジと平面の特徴を抽出し、これらの対応関係に基づき点群データを補正する。

a) エッジと平面の検出機能

本機能では、まず側線上の点列から曲率を算出し、エッジ上の点を探索する。このとき、レーザの測線方向に対して垂直なエッジのみを選択する。次に、RANSAC (RANdom Sample Consensus) ⁵⁾ を用いて、平面方程式の収束結果に基づき、平面領域上の点を抽出する。これらの処理は、連続して計測された異なる時刻の点群データに対してそれぞれ実行する。そして、連続する二時期で抽出したエッジと平面に対して、近傍に位置し、特徴量が最も類似するものを関連付ける。

b) 位置と姿勢の推定機能

本機能では、前述の機能で関連付けしたエッジと平面とが最も一致する変換パラメータを算出する。座標変換には尺度が不変な剛体変換を用いるものとし、レーベンバーグ・マルカート法 ⁹⁾ により解を得る。

c) 点群データの重畳機能

本機能では、算出した変換パラメータを用いて、点群データを重畳する。

3. システムの実証実験

本実験では、MSU を台車に搭載し、移動しながら取得した計測データを用いて、提案手法と SLAM の精度を確認する。

(1) 使用機器

MSU の搭載機器は、誰もが手軽に用意できるように、小型で可搬性に優れた市販製品を使用することが望ましい。本実験では、表-1 に示すとおり、レーザスキャナは全方位に 16 測線のレーザ照射が可能な Velodyne 社の VLP-16 Hi-Res, IMU はシリコンセンシングシステムズジャパン社の AMU-Lite, TS は TOPCON 社の IS-305, そして精度評価のための最確値の計測には FARO 社の地上レーザスキャナ Focus 3D X-330 を使用した。

(2) 実験データ

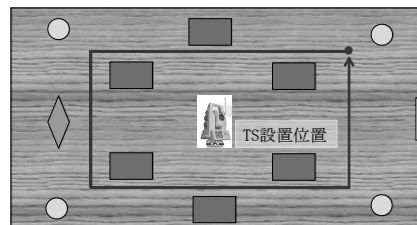
本実験は、関西大学高槻キャンパスの体育館（図-3）で行う。提案手法と SLAM の精度を確認するため、体育館には、ダンボール箱や白板を設置（図-4）した。地上レーザスキャナは、ダンボールを隈なく計測できるように、四方向から計測した。実験では、体育館の中央付近に TS を設置し、MSU を搭載した台車を白線に沿って移動させた。

(3) 評価方法

本実験では、地上レーザスキャナ、提案手法、SLAM で生成した点群データに対して、平面性とダンボールの寸法値の 2 つを確認する。評価箇所を図-5 に示す。平面



図-3 実験環境（関西大学高槻キャンパス体育館）



【凡例】ダンボール箱：■ 白板：◇ 計測経路：→
地上レーザスキャナの設置位置：○

図-4 計測機器と計測対象物の設置状況

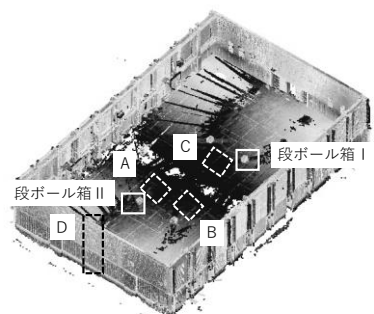


図-5 評価箇所

性の評価では、まず床面と壁面の点群データを抽出し、近似平面を求める。次に、抽出点から近似平面に垂線を引き、交点の座標を算出する。そして、抽出点と交点の距離の二乗平均平方根（RMS）で判定する。ダンボールの寸法値の評価では、点群データから 2 点を選出し、

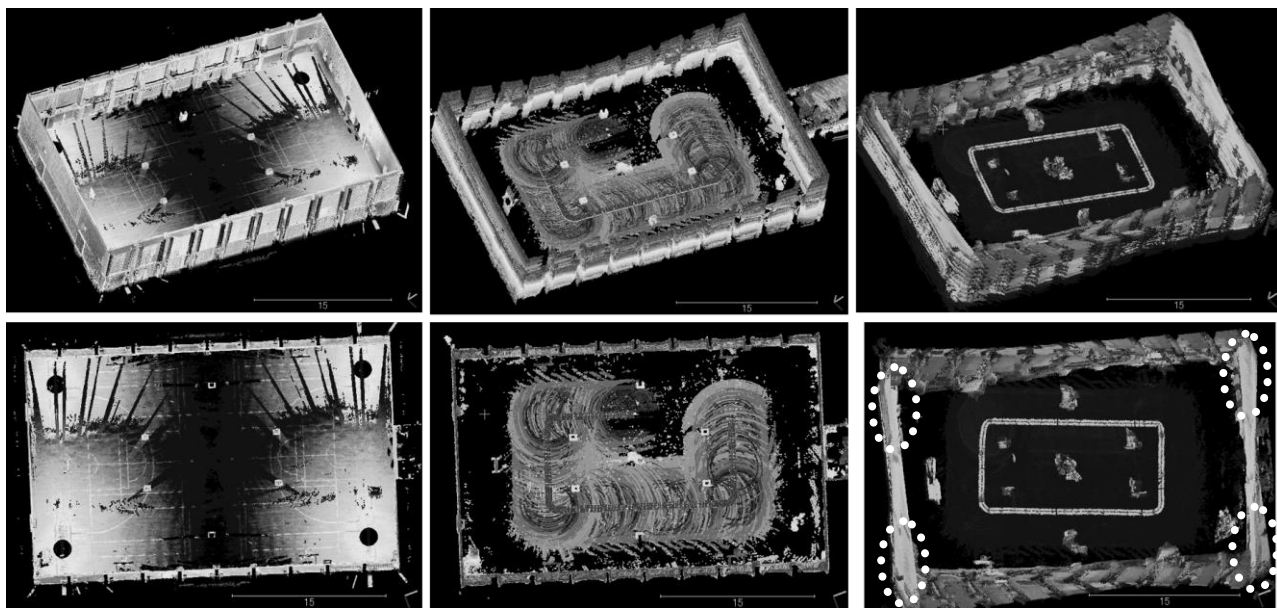


図-6 生成した点群データの可視化結果

左：最確値（地上レーザスキャナ），中央：SLAM，右：提案手法

所定位置にあるダンボールの縦、横、高さを算出する。いずれも地上レーザスキャナの評価結果を最確値として、提案手法と SLAM の精度を比較する。

(4) 結果と考察

SLAM の適用結果を図-6 中央に示す。本実験データでは、1 周分の点群データの処理中に、位置と姿勢が推定できない地点が 3 箇所確認された。このうち、1 箇所は直進中であり、2 箇所は回転中であった。同時刻の IMU の計測値を確認したところ、突発的な振動や極端な姿勢の変化が生じていないことから、いずれも一時的にエッジや平面の対応関係が推定できなかったことが原因と考えられる。SLAM では、位置と姿勢の推定に失敗すると、その地点における点群データを基準として点群データの補正処理を再開するため、出力結果となる点群データの座標系が一致しない。したがって、解析結果（図-6 中央）は、最も長く位置と姿勢を推定できた範囲の点群データの補正結果のみを示している。点群データの平面性の評価結果（表-2）を確認すると、SLAM は平均 0.017m の誤差であった。ダンボールの寸法値を用いた精度の評価結果（表-3）では、地上レーザスキャナと SLAM の寸法差は、最小 0.001m、最大 0.047m となった。本実験で使用したレーザスキャナの誤差が±0.030m であることから、SLAM では、位置と姿勢が推定できた範囲においては高精度な点群データが生成できることが分かる。

提案手法の解析結果を図-6 右に示す。本実験データでは、移動開始から終了までの 1 周分の点群データが出力できた。しかし、体育館の壁面を表す点群データに大きなズレ（図-6 右下の白丸）が生じた。この誤差の発生要因には、時刻の同期誤差、TS データの補正誤差、IMU の計測誤差の 3 つが考えられる。詳しく分析したところ、直進中は点群データの誤差は少なく、回転中に点群データの誤差が大きくなった。そのため、IMU の Yaw の計測誤差により、点群データの補正精度が低下したと考えられる。点群データの平面性の評価結果（表-2）を確認すると、提案手法は平均 0.124m の誤差となった。これは SLAM と比較すると、平均 0.107m 精度が低下している。また、提案手法では、ダンボールの端点の目視判読が困難であったため、ダンボールの寸法値を用いた精度を評価できなかった。

以上の結果から、提案手法では、IMU の Yaw の計測誤差の影響を大きく受けるため、Yaw のみ点群データから推定する等の改良が必要と考えられる。一方、SLAM では、エッジと平面が検出できない場合や精度が低下した場合でも、継続して点群データを補正し続けるためのアルゴリズムの検討が必要である。

表-2 点群データの平面性の評価結果

断面	地上レーザ スキャナ(m)	SLAM (m)	提案手法(m)
A	0.009	0.014	0.112
B	0.010	0.016	0.062
C	0.006	0.016	0.083
D	0.005	0.020	0.237
平均	0.007	0.017	0.124

表-3 ダンボールの寸法値を用いた精度の評価結果

対象	地上レーザ スキャナ(m)	SLAM (m)	地上レーザスキャナ と SLAM の差(m)
I	縦	0.416	0.444
	横	0.561	0.548
	高さ	0.453	0.463
II	縦	0.419	0.466
	横	0.554	0.570
	高さ	0.443	0.444

4. おわりに

本研究では、MSU と TS を用いて、屋内外で利用可能な 3 次元データの生成手法を提案した。そして、計測データを提案手法と SLAM に適用し、各手法の精度、特性、課題について考察した。今後は、2 つの手法を融合し、広域の点群データを高精度に生成可能なアルゴリズムを考案する予定である。

謝辞：本研究を取りまとめるにあたり、関西大学社会空間情報科学研究センターの参画企業から多大なるご尽力を賜った。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 国土交通省：3 次元データ流通・利活用 WG 3 次元データ利活用方針、<<http://www.mlit.go.jp/common/001210739.pdf>>、（入手 2018.6.15）。
- 2) 国土交通省：3 次元地理空間情報を活用した安全・安心・快適な社会実現のための技術開発、<<http://www.gsi.go.jp/chirijoho/chirijoho40073.html>>、（入手 2018.6.15）。
- 3) Zhang, J., and Singh, S. : LOAM: Lidar Odometry and Mapping in Real-time, *Robotics Science and Systems Conference*, Robotics Science and Systems, 2014.
- 4) Raul, M. A., and Juan, D. T. : ORB-SLAM2: an Open-Source SLAM System for Monocular, Stereo and RGB-D Cameras, *Transactions on Robotics*, IEEE, Vol.33, No.5, pp.1255-1262, 2017.
- 5) Fischler, M., and Bolles, R. : Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography, *Communications of the ACM*, ACM, Vol.24, No.6, pp.381-395, 1981.
- 6) Marquardt, D. W. : An Algorithm for Least-Squares Estimation of Non-Linear Parameters, *Journal of the Society of Industrial and Applied Mathematics*, SIAM, Vol.11, No.2, pp.431-441, 1963.