

3DLiDAR と ROS2 を用いた SLAM 実験用プラットフォーム開発

および教材の導入

井組裕貴

Development of an Educational SLAM Robot Platform Using 3DLiDAR and ROS2

Yasutaka Ikumi

As demand for practical SLAM education grows, existing systems often "black-box" advanced processing, hindering students from understanding physical sensor characteristics and real-world disturbances. To address this, we developed an educational SLAM robot platform utilizing 3D LiDAR, 9-axis IMU, and ROS 2. This allows students to learn integrated system design, from low-level motor control to high-level LIO-SAM mapping. In our experiments, students compared digital SLAM estimations with analog measure readings to analyze how object colors and indoor/outdoor environments affect accuracy. This hands-on approach effectively helped students comprehend sensor limitations, cultivating the practical engineering perspectives essential for autonomous system development.

1. はじめに

近年、自動運転技術や自律移動ロボットの社会実装が急速に進展しており、周囲の環境地図作成と自己位置推定を同時に行う SLAM(Simultaneous Localization and Mapping)の重要性が高まっている。教育現場においても、次世代のエンジニア育成に向けて、このシステムを実践的に学ぶ重要性は高い。一方、SLAM を構築・運用するためには、LiDAR や IMU などのセンサに関するハードウェアの知識と ROS2¹⁾などのミドルウェアやアルゴリズムを扱うソフトウェアの知識が統合的に必要となる。学習過程において、既存の完成されたシステムを用いると基幹となる技術がブラックボックス化しやすく、システム全体の理解が深まりにくい。また、シミュレーション空間のみでの学習では、センサの物理的な特性や実環境における誤差(ノイズや外乱要因)を体感しにくいという課題がある。本研究では、学生が低レイヤーの制御から ROS2 による上位処理までを統合的に学べる SLAM 実験用プラットフォームを開発し、実験教材として導入した。本プラットフォームは、3DLiDAR と 9 軸 IMU を搭載しており、LIO-SAM²⁾アルゴリズムを用いて、自己位置推定と 3D 地図生成を行うことが可能である。本稿では、開発した自律移動ロボットシステムのハードウェアおよびソフトウェア構成について詳述する。また、実験においては、SLAM によるデジタルな推定データ

と巻尺などの計測器を用いたアナログな実測値の比較を行う。これにより、対象物の色や計測環境(屋内・屋外)の違いがセンシング精度に与える影響を学生に考察させる実践的な実験内容とし、その教育的効果についても報告する。

2. システム構成

2. 1 ハードウェア構成

車体は校内および舗装された校外路面を走行可能な小型 5 輪車両とした(図 1)。周辺環境の認識には 3DLiDAR を使用し、車体の姿勢推定には 9 軸 IMU を搭載している。これらは LIO-SAM が LiDAR の点群と情報を結合させ、ロバストな自己位置推定を行うために必須の構成要素である。ロボットの諸元や使用器具を表 1 に示す。

制御システムは、上位 PC と下位コントローラの 2 層構造とした。上位 PC では、ROS2 を搭載し、LIO-SAM による SLAM 処理、点群データの処理、および経路生成を担当する。下位コントローラでは、Arduino MEGA を使用し、PC から送信される制御指令(速度・操舵角)を受信し、モータドライバへ PWM 信号を出力して DC モータを駆動する。また、屋外走行時の振動を抑制するため、ばね式の防振インシュレータを取り付けている。バッテリーはモータからのノイズ抑制のため、モータ駆動用と PC や LiDAR 動作用の二系統とした。

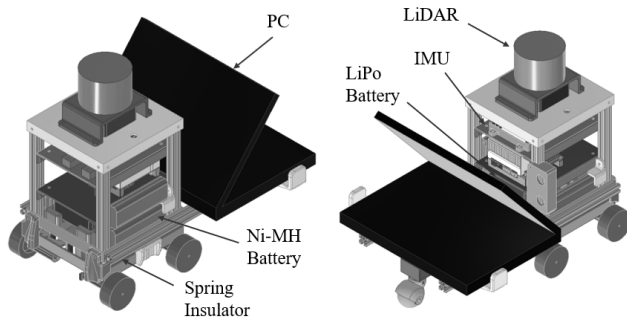


図1 SLAMプラットフォーム3Dデータ

表1 諸元および使用器具

全長×全幅×全高	441.5×265.5×503 [mm]
LiDAR	Velodyne : vlp16
IMU	RT : USB 出力9軸 IMU センサモジュール
モータドライバ	KKHMF : 2ch 直流モータドライブモジュール
モータ	Garosa : DC 6V ギアモーター
駆動バッテリー	Melasta : 7.2V Ni-MH バッテリー
動作バッテリー	DLAM : LiPo バッテリー

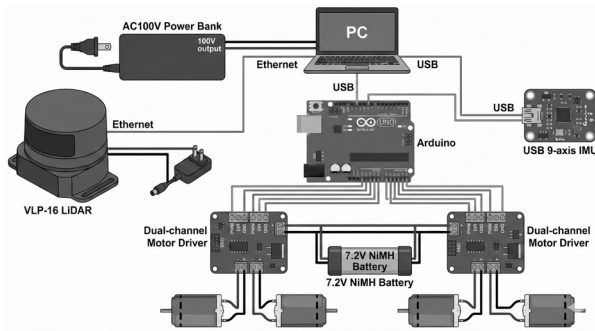


図2 回路構成

2.2 ソフトウェア構成

ミドルウェアには ROS2 を採用し、各センサーデータや制御指令をノード間のトピック通信でやり取りする。SLAM アルゴリズムには LIO-SAM を使用した。LIO-SAM は、LiDAR のオドメトリと IMU の計測値を最適化して統合することで、激しい動きや特徴の少ない環境でも高精度なマップ作成が可能である。図3は ROS2 ノード構成を示したものである。LiDAR から取得された点群データは `velodyne_transform_node` により座標変換処理が行われ、LIO-SAM 処理ノードへ入力される。`rt_usb_9axisimu_driver` により取得された姿勢および加速度データは、`/imu/data_raw` トピックを介して SLAM 処理へ送信される。SLAM 処理は LIO-SAM アルゴリズムに基づき構成されている。

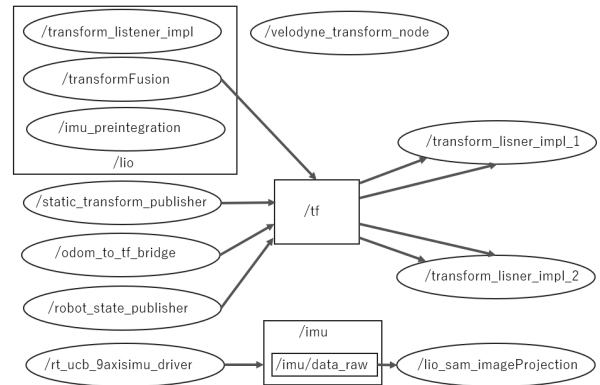


図3 ノード構成図

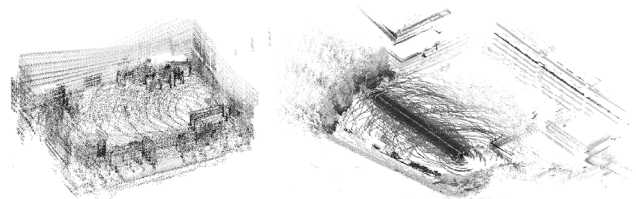
`lio_sam_imageProjection` は点群の前処理および特徴点抽出し、`imu_preintegration` は IMU データの前積分処理による姿勢推定、`transformFusion` は LiDAR および IMU の推定結果を統合した自己位置推定となる。これらのノード間では ROS2 のトピック通信を用いてセンサ情報が共有される。ロボットの座標関係は `robot_state_publisher` および `static_transform_publisher` によって生成され、TF フレームとして `/tf` トピックを介して配信される。オドメトリ情報は `odom_to_tf_bridge` により TF 座標変換として統合され、各ノードは共通の座標系に基づいて処理を行う。この構成により、LiDAR 点群と IMU 情報を統合した高精度な自己位置推定および 3D 地図生成が可能となる。

3. 実験内容と検証方法

本教材を用いた授業では、センサの物理的特性や環境要因がシステム全体の精度に与える影響を考察させることに重点を置いた。学生は以下の手順で実験を行う。

3.1 自律走行とデータ取得

LIO-SAM を用いて教室およびグラウンドの 3D 点群マップを作成する。図4は得られた MAP データである。急加減速や急操舵をすると、MAP がドリフトし、正確な MAP データが得られないため、低速状態で MAP を作成する。



(a) 教室 (b) グラウンド

図4 取得した MAP データ

3. 2 誤差測定実験

SLAM の推定精度を検証するため、以下の比較実験を行った。

① SLAM データと実測値の比較

LIO-SAM によって推定された自己位置座標および作成されたマップ上の距離データと巻尺を用いて物理的に測定した実測値との誤差を測定する。

②対象物の色による影響

LiDAR はレーザー光の反射を利用するため、対象物の反射率に依存する。実験では黒色の障害物(パネル)を配置し、木材色の壁面や白色のサッカーゴールなどとの認識精度の違いを検証した。

③環境による影響

特徴点が豊富で閉鎖的な屋内と、外乱光(日光)の影響を受けやすく特徴点が遠方にある屋外において、SLAM における自己位置推定の誤差を比較した。

4. 実験結果と考察

(1) システムの動作検証

開発したプラットフォームにより、ROS2 を用いて LiDAR や IMU から取得した情報をフィルタリングし、LIO-SAM の SLAM に成功した。これにより、学生は SLAM を実装するためのソフトウェアとハードウェアに関する理解を深めることができた。

(2) 色による測定誤差

実験の結果、屋内・屋外に限らず、木材の壁面間に比べて、黒色の障害物は誤差率が高くなることが確認できた。屋内の壁面間における実測値との誤差は約 0.5% に対し、黒色の障害物に対しては、約 1.1% となり、約 0.6% の差が生じていた。また、屋外においては、黒色障害物は白色に対し、約 0.2% 誤差が増えることが確認できた。これは黒色が赤外線レーザーを吸収しやすいため反射強度が低下し、センサの検出での測定精度が悪化したためと考えられる。この結果から、学生は物理的な光学特性がセンシングに与える影響を学ぶことが伺えた。

(3) 屋内・屋外での誤差比較

屋内環境では壁面などの特徴点が豊富であるため LIO-SAM のスキャンマッチングが安定し、巻尺の実測値との誤差率はおおよそ 0.5% に収まった。一方、屋外の環境下では、特徴点が遠い場合や日光の影響、測定距離の影響により、2.7% を超える誤差が確認された。

5. 教育的効果と結論

本研究では、3DLiDAR, ROS2, LIO-SAM を用いた SLAM 可能なプラットフォームを開発し、実験に導入した。本教材の特長は、SLAM 技術をブラックボックスとして扱うのではなく、低レイヤー制御から ROS2 による上位処理までを統合的に扱える点にある。特に、巻尺などの計測器によるアナログな実測値と SLAM のデジタルデータを比較させるプロセスは、学生に対して「センサは誤差や特性を理解し考慮する必要がある」ことを認識させることができ、良い教育効果を示すものと考えている。今後は、動的障害物の回避や、より複雑な屋外環境でのナビゲーション課題へとカリキュラムを拡張していく予定である。

文献

- 1) M. Quigley et al., "ROS: an open-source Robot Operating System", ICRA Workshop on Open Source Software, 2009.
- 2) T. Shan, B. Englot, D. Meyers, W. Wang, C. Ratti, and D. Rus, "LIO-SAM: Tightly-coupled lidar inertial odometry via smoothing and mapping", 2020 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp.5135-5142, 2020.