

4WD/4WS ロボットと Autoware.universe を用いた屋外自律走行実験

○盛下 泰暉^{†1}, 相川 雄也^{†2}, Ajanth Kumarakuruparan^{†2}, 下里 浩昇^{†1}, 浅井 悠佑^{†1}, 浦野 健太^{†1}

Outdoor Autonomous Driving Experiment using 4WD/4WS Robot and Autoware.universe

*Taiki MORISHITA^{†1}, Yuya AIKAWA^{†2}, Ajanth KUMARAKURUPARAN^{†2}, Hironori SHIMOSATO^{†1}, Yusuke ASAI^{†1}, Kenta URANO^{†1}

名古屋大学 河口研究室

Abstract—近年、自動運転車や自動配送ロボットなど、自律移動体を用いた研究やサービス開発が盛んに行われている。我々もこれまでに、複数の自律移動体の経路計画に関する研究や人間と協調したロボットサービスに関するシミュレーション、屋内の実環境での実験・データ収集を行ってきた。本稿では、我々がつくばチャレンジ 2022 にて屋外における自律走行実験を行った際のシステム構成、実験を通して学んだ知見、および今後の課題について記す。本イベントにて、我々は株式会社 Hakobot の製造する 4WD/4WS 機構を持った四輪ロボットをハードウェアとして用いた。また、自動運転ソフトウェアとして Autoware.universe を用いた。これらを組み合わせてロボットを自律走行させると共に、搭載したセンサより LiDAR 点群データ・カメラデータ・加速度データを取得した。本走行では、ロボットに装備した雨避けビニールが障害物として検知されたため、自律走行は途中で失敗したが、実験を通して屋外実験における様々な注意点や Autoware.universe を利用する上での知見を得られた。

Keywords: つくばチャレンジ 2022, ROS2, Autoware.universe

1. はじめに

ここ数年の間に自動運転車や自動配送ロボット、さらには自律飛行ドローンなど、自律移動体を用いた研究 [1] [2] やサービス開発が盛んに行われ、我々の生活にとって自律移動体が身近な存在となりつつある。我々もこれまでに、自律移動体を対象としたシミュレーションや、大学構内および実際に利用されている物流倉庫内での実験を行ってきた [3] [4] [5] [6]。しかし、いずれも屋内環境を想定したものであり、屋外での自律走行にフォーカスしたものが少ない状況であった。そこで我々は屋外での自律走行実験の実施およびデータ収集を目的としてつくばチャレンジ 2022 に参加した。

参加するにあたり、株式会社 Hakobot の製造する 4WD/4WS 機構を持つ四輪ロボットを用意した。そのロボットに 2 種類の 3D-LiDAR、カメラ、IMU センサおよびそれらのデータ処理を行う PC を搭載し、ハードウェアを構成した。またソフトウェアとして、Robot Operating System2(ROS2)で動作する自動運転ソフトウェア Autoware.universe を導入した。Autoware.universe は 3D-LiDAR を用いた自己位置推定手法である NDT Matching など、自動運転に必要な機能を利用できる。我々はこれらを組み合わせ、ロボットを自律走行させるとともに、搭載したセンサから得られるデータを収集した。本走行では、ロボットに装備したビニールが障害物として検知され、自律走行は途中で失敗したが、実験を通して屋外実験における注意点や Autoware.universe を利用する上での知見を得られた。

本稿の構成は以下の通りである。2 章では関連研究について述べる。3 章では本イベントにて利用したシステムの構成について述べ、4 章では今回の実験結果と得られた知見について述べる。最後に 5 章で今後の展望を述べる。

2. 関連研究

前章で述べた通り、我々は自律移動体を対象とした様々な研究を行っている。浅井らは物流倉庫を対象とした人と配送ロボットの協調のためのセンサシステムを提案した [3]。実際の物流倉庫を模したシミュレーション環境でロボットに搭載したセンサと外部センサを連携させ、人との衝突の危険性を排除できるか検証した。Fukushima らは物流倉庫で人と自律移動ロボットの協調作業を監視、支援するシステムを提案した [4]。実際の物流倉庫にて当該システムを用いた実証実験を行い、その実現可能性を検証した。下里らは屋内空間での自律移動体を用いた人流測定手法を提案した [5]。自律移動ロボットに人流測定用の LiDAR センサを搭載し、固定のセンサで生じる死角を減らし、その測定効率を検証した。

しかし、いずれの研究も屋内を対象としたものであり、自律移動体の屋外での稼働を考慮していない。屋外は屋内と比較して壁や柱などの障害物が少ない一方、自己位置推定の目印となる環境的な特徴点が少なく、正確な自己位置推定が困難となる場合がある。また、走行する路面も屋内より整備されておらず、走行中の振動によってロボットの自律走行に不具合をきたす可能性がある。そこで我々は、屋外での自律走行に必要なノウハウや経験を得るために本イベントに参加した。3 章では、本イベントにて使用したシステムの詳細について述べる。

3. システム構成

本章では、我々がつくばチャレンジ 2022 にて使用したロボットのシステム構成について記す。我々は UCL-Hakobot と名付けたロボットを用いて本実験に参加した。UCL-Hakobot の外観とシステム構成をそれぞれ Fig.1, Fig.2 に示す。ハードウェアとソフトウェアのそれぞれについて、3.1 節, 3.2 節にて説明する。

^{†1} 名古屋大学 大学院 工学研究科

^{†1} Graduate School of Engineering, Nagoya University

^{†2} 名古屋大学 工学部

^{†2} School of Engineering, Nagoya University



Fig. 1 UCL-Hakobot の外観

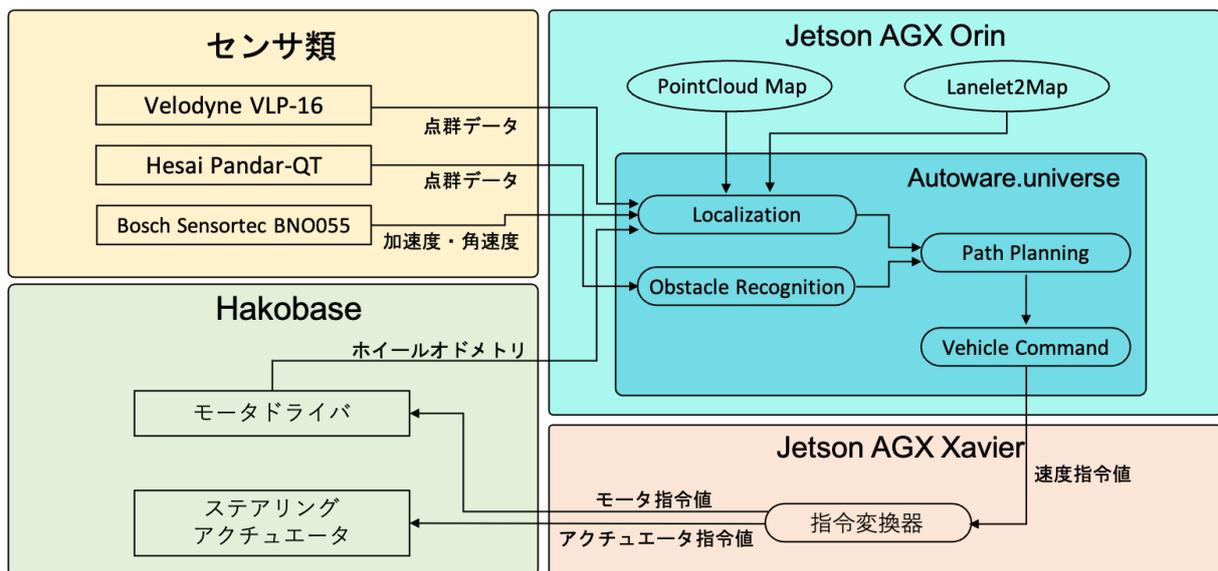


Fig. 2 UCL-Hakobot のシステム構成

3.1 ハードウェア構成

3.1.1 走行ユニット・制御コンピュータ

我々はロボットのプラットフォームとして、株式会社 Hakobot の製造する Hakobase という走行ユニットを用いた。諸元としては長さ 92cm・幅 66cm・高さ 40cm、重量はおおよそ 90kg、最大積載量はおおよそ 100kg である。また、バッテリー容量は 556.6Wh である。このユニットは四輪駆動・四輪操舵 (4WD/4WS) の機構を持ち、高い走行能力を有する四輪駆動と小回りの効く逆位相方式の四輪操舵を掛け合わせた高い走破性を有している。また直径 240mm タイヤを装備しており、走行能力をより高めている。

Hakobase のモータ、アクチュエータはそれぞれシリアル接続、Controller Area Network(CAN) 接続にて制御コンピュータと接続されており、制御コンピュータからの指令によって機体を操作できる。我々は制御コンピュータとして NVIDIA

社の Jetson AGX Xavier と Jetson AGX Orin を用いた。自律走行を実施する際はこの 2 台を接続し、Jetson AGX Orin にて自律走行に必要な処理を行い、Jetson AGX Xavier にて車両の制御を行う形で処理を分散させた。

3.1.2 センサ類

自律走行を実施するため、我々はこのプラットフォームに複数のセンサを搭載した。自己位置推定用センサとして、Velodyne 社製の全方位 3D-LiDAR である VLP-16 を用いた。VLP-16 は 100m 程度の測定距離を有し、遠方の地理的特徴点を捉えられるため、自己位置推定に適していると考えた。また、障害物検知用センサとして Hesai 社製の全方位 3D-LiDAR である Pandar-QT を用いた。Pandar-QT は垂直照射角が 104.2° と VLP-16 の垂直照射角 30° と比較して広く、LiDAR センサの死角となりやすい低い位置の障害物を検知可能である。

自己位置推定の補助センサとしては Bosch Sensortec 社製の慣性計測ユニット (IMU) である BNO055 を用いた。これらを上述した 2 台の制御コンピュータと接続し、ハードウェアを構成した。

3.1.3 その他の搭載物

上述した自律走行に係る搭載物以外にも、様々な装備を取り付けた。我々はロボットの走行状態を外部から確認できるように LED 信号灯および、LED テープライトを装備した。ボタンによって色を変更可能で異常時は赤色、リモコン操縦中は黄色、自律走行中は緑色に点灯させた。

また、Autoware.universe の稼働状態を外部から確認するための LED テープライトを装備した。こちらは自己位置推定、経路計画、自律走行など Autoware.universe の状態を確認でき、我々の実験の効率性を高めた。

また、映像記録用として GoPro 社のカメラである HERO10 を装備した。こちらはロボットからの映像を撮影し、当時の記憶や状況を振り返るために活用した。

3.2 ソフトウェア構成

3.2.1 車両駆動ソフトウェア

我々はロボットの車両駆動ソフトウェアを Python3 およびロボット開発プラットフォームである ROS2 を用いて開発した。ロボットのモータおよびアクチュエータはそれぞれ Serial モジュールと CAN モジュールを通じて制御し、外部からの指令を受けられるように Python ライブラリを作成した。リモコン走行させる際には ROS2 の Joy node [7] によりコントローラの入力を受け、その入力によって Python ライブラリを呼び出して走行させた。自律走行させる際にも同様に Autoware.universe から指令値を受け、Python ライブラリを呼び出した。

3.2.2 Autoware.universe

我々は自律走行のソフトウェアとして Autoware.universe を用いた。Autoware.universe は自動運転ソフトウェア Autoware の最新バージョンである。ROS1 ベースで開発された Autoware.ai に対して、Autoware.universe は ROS2 をベースに開発されている。開発環境として、Autoware.universe を稼働させる Jetson AGX Orin は Ubuntu20.04(ROS Galactic) で、ロボット駆動用の Jetson AGX Xavier では Ubuntu18.04(ROS Dashing) でセットアップした。

我々は自己位置推定手法として、3D-LiDAR を利用した高精度自己位置推定手法である NDT Matching [8] を用いた。事前に用意した 3 次元点群地図とセンサデータを比較し、ロボットの現在位置を推定する手法である。

静的な経路計画としてはベクターマップを利用した計画 [9] を行った。ベクターマップとは、3 次元点群地図上に走行可能領域や信号・一時停止線などを定義した地図であり、Autoware はその情報に基づいて経路計画・動作計画を行う。動的な経路計画としては Elastic Bands [10] と車両運動学線形モデルを利用した。Elastic Bands は経路を滑らかに変形させ、常に障害物とのクリアランスを確保する手法である。この手法と車両運動学モデルを組み合わせ、運動学的に実現可能な経路を生成した。

障害物認識手法については、学習済みモデルを利用して

LiDAR の点群からオブジェクトを検出する手法 [11] を用いた。以上に述べた手法を用いたモジュールは全て Autoware.universe によって提供されている。

また、利用するセンサやホイールベース等の車両情報は yaml 形式および urdf 形式などで Autoware.universe に入力する必要がある。こちらはデフォルトで利用できるサンプルを参考に、我々のロボットやセンサの仕様に合わせて書き換え、Autoware.universe に入力した。以上の機能を稼働させ、Autoware.universe でロボットの自律走行を実現した。

4. 実験結果および得られた知見

本章では我々がつくばチャレンジ 2022 にて 4WD/4WS ロボットを Autoware.universe を用いて自律走行させた結果と得られた知見について述べる。

4.1 実験結果

我々は合計 7 日の実験走行と本走行に参加した。前半の実験走行では Autoware.universe に関する知識不足やハードウェアトラブルにより自律走行を実施できなかったが、後半の実験走行では少しずつ自律走行ができるようになった。最後の実験走行にて確認走行区間の自律走行を達成し、その後は駅前エリア、公園エリアの自律走行テストを実施した。

本走行ではロボットに装備した雨除けのビニールが障害物と認識され、スタート地点から 180m 程度の地点で走行不能となった。その後、雨除けのビニールを調整して自律走行を再開させたが、スタート地点から 480m 程度の信号前エリアにて同様の原因で走行不能となった。以降は距離の計測を行っていないが、リモコン走行と自律走行を繰り返してコースを 1 周した。

4.2 得られた知見

4.2.1 ハードウェアとソフトウェアの相性について

我々は本イベントに参加するにあたり、自律走行を制御するコンピュータや搭載物の選定を実施した。制御コンピュータとして、当初は Neosys Technology 社の産業用コンピュータである Nuvo-5095GC を用いていた。このコンピュータは 4 コア 8 スレッド CPU(Intel Core i7-6700TE) と GPU(NVIDIA GeForce GTX1650) を搭載し、ヒートシンクも備わっているため、自動運転のような複雑な処理に適していると考えた。このコンピュータに Autoware.universe をインストールするため、対応環境である Ubuntu20.04 をインストールしたところ、GPU が認識されないトラブルが起こった。試行錯誤の末、Ubuntu18.04 の環境にて GPU が認識されたため、Ubuntu18.04 環境に Docker を用いて Ubuntu20.04 環境を構築した。

Autoware.universe は Docker インストールに対応しているため、手順に従いながらインストール・ビルドを行なった。その後 Autoware.universe を稼働させると、処理速度が不足する事象が起こった。不要な機能を切って稼働させても、走行中に自己位置推定が外れる・移動指令が断続的に出るなど、自律走行を十分に行えない状態に至った。

以上の状況が実験走行にて確認されたため、制御コンピュータを NVIDIA 社の Jetson AGX Orin に変更し、Ubuntu20.04 環境にて Autoware.universe を稼働させた。これにより、処理速度に関する問題が解決され、自律走行の制御が可能となった。

Jetson AGX Orin は 12 コア 12 スレッド CPU を搭載してお

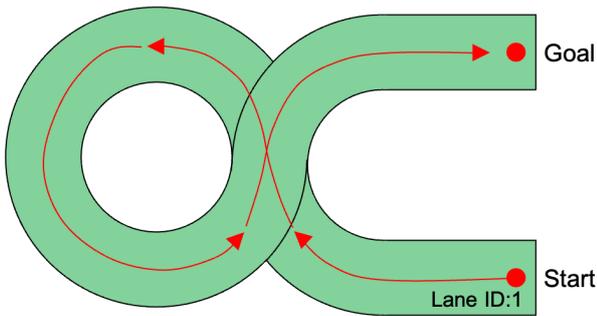


Fig. 3 作成したベクターマップと想定した経路

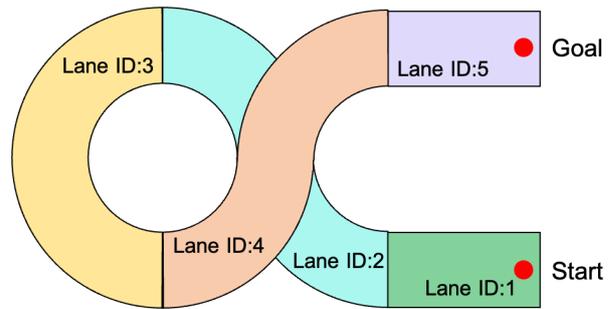


Fig. 5 最終的なベクターマップ

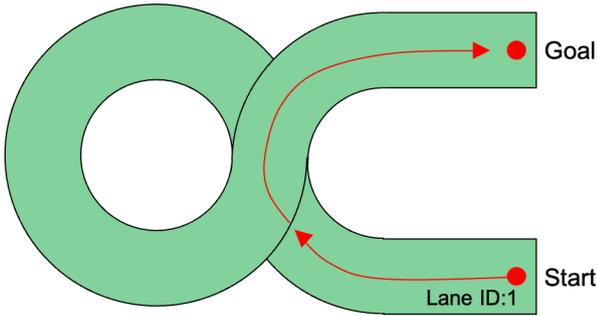


Fig. 4 実際にロボットが通った経路

り, Nuvo-5095GC より処理速度が高いため, 最終的に単純なマシン性能による問題であると考えた. 実験走行の半分はマシン性能不足が原因で自律走行をほとんど実施できなかったが, 普段の研究では得られない学びも多くあった. 例えば, 今回は Docker を利用したため, Docker 環境の構築法やそれを利用した開発などを実施できた. また, OS や GPU 関連のエラー対応にも取り組んだため, それらの対処法などを身につけられた. こうした経験を自律移動体の研究に限らず, 今後の研究および開発に活かしていきたい.

4.2.2 Autoware.universe およびベクターマップについて

我々は自律走行を制御するソフトウェアとして, Autoware.universe を用いた. Autoware.universe は自動車の自律走行時に起こりうる様々な状況に対応できるように設計されているため, 車線変更や路肩停止など, 今回の実験環境では不要な機能は使用しないように設定した.

また, Autoware.universe ではベクターマップとして Lanelet2 の形式のものが使われているが, ベクターマップを適切に作成しないと意図しない挙動を取ることがわかった. 当初の実験では, Fig.3 のような走行エリア全体を1つの長い Lane で構成したベクターマップを用いて実験を行った. しかし, これを用いて自律走行を行うと Lane の交差点を直進すべき状況で, Fig.4 のように最短経路を取る経路を生成した. ベクターマップには Lane 同士の前後関係の情報が含まれるため, 同一の Lane で交差点を形成すると Autoware によって最短経路が生成されることが判明した.

そこで, Lane を Fig.5 のように複数に分け, それぞれの Lane に前後関係を付与させ, 再度実験を行なった. これにより, Autoware は最短経路を形成せず, 想定した経路を走るようになった. 今後は Lane 同士の前後関係などを含め, ベクターマップを正確に作成する必要がある.

4.2.3 自己位置推定について

我々は Autoware.universe の Localization 機能を用いてロボットの自己位置推定を実施した. この機能は LiDAR からの点群データを利用する NDT Matching とホイールオドメトリを組み合わせてロボットの位置を推定する機能である. データを入力し自己位置推定を実施したが, 急な旋回を行うと自己位置推定が失敗する事象が度々確認された. 特につくば市役所周辺の建物など特徴点の少ないエリアでは頻繁に自己位置推定に失敗した.

そこで補助センサとして慣性計測ユニット (IMU) を搭載し, 加速度データを入力した. これにより, 急激な旋回を行っても自己位置を見失いにくくなった. また, 特徴点の少ないエリアでも安定して自己位置を算出できた. このように, 低速移動のロボットであっても, IMU データを用いることで安定的に自己位置推定できることがわかった.

一方で研究学園駅周辺のガラス張りの壁の近くを通る際や, 横断歩道を渡る際に自己位置推定が安定しない現象も見られた. ガラス張りのエリアでは LiDAR から発射される光線が散乱し, 実際には存在しない物体を検知したことが原因だと考えられる. こちらは, ガラス張りのエリア周辺を避けるような経路計画を実施する, IMU などのオドメトリを重視して自己位置推定を実施するなどの対策が考えられる. また, 横断歩道では段差を乗り越える際にロボットが大きく振動して LiDAR データが乱れたことが原因だと考えられる. こちらも, 段差のあるエリアでは速度を落とすなどの対策が考えられる. これら失敗事象も含め, 以降の自律走行実験に活かしていきたい.

4.2.4 LiDAR と車両外装について

我々は最終走行の際, 雨避けのために Fig.6 のようなビニールをロボットに装備して自律走行を行なった. その際, ビニールが LiDAR に障害物として検知されて停止する事象が発生した. 雨具を取り外して走行を再開するとこの現象は発生しなくなったため, 雨避けビニールが LiDAR の発射光を散乱させ, 実際には存在しない物体を検知したことが原因だと推察した.

対策としては Fig.7 のような LiDAR の発射光がロボット自身に当たらないような台座を挟み, 影を作ることが考えられた. また, ロボット後方には LiDAR を照射しないなど, 照射方位を制限することで発射光がロボット自身に当たらないようにできたとも考えられる. 今回のような屋外で実験したからこそ発見出来た事象であったため, この経験を今後の屋外実験に活かしていきたい.



Fig. 6 雨避けのビニール

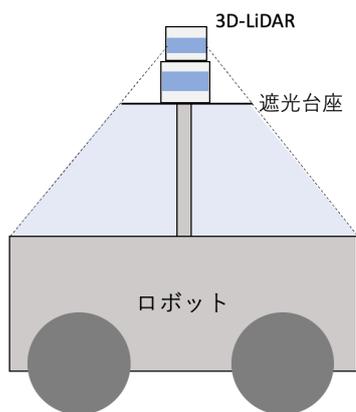


Fig. 7 遮光台座の設置

5. おわりに

本稿では、我々がつくばチャレンジ 2022 にて用いたシステム構成および得られた知見について記した。普段の研究では得られない屋外での実験経験とその知見を得られ、非常に学び

のある実験となった。

今後の展望としては、得られた Autoware.universe や屋外自律走行実験に関する知見を、普段の自律移動体研究に活用していきたい。また、今回参加しなかったメンバーや関係者にも共有し、来年度以降のつくばチャレンジでコースを自律完走できるように研究・開発を進めていきたい。

謝辞

本研究の一部は、NICT 委託研究 (01701) の支援を受けています。

参考文献

- [1] Alatise, Mary B., and Gerhard P. Hancke. "A review on challenges of autonomous mobile robot and sensor fusion methods." *IEEE Access* 8 (2020): 39830-39846.
- [2] Tzafestas, Spyros G. "Mobile robot control and navigation: A global overview." *Journal of Intelligent & Robotic Systems* 91.1 (2018): 35-58.
- [3] 浅井悠佑, et al. "物流倉庫における人・配送ロボット協調のためのセンサ統合システム." *研究報告モバイルコンピューティングとパーベイシブシステム (MBL) 2022.21* (2022): 1-8.
- [4] Fukushima, Yuto, et al. "DigiMobot: Digital twin for human-robot collaboration in indoor environments." *2021 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. IEEE, 2021.
- [5] 下里浩昇, et al. "自律移動ロボットのセンサ機器を用いた人流推定手法の提案." *マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム 2021 論文集 2021.1* (2021): 1335-1340.
- [6] 瀧上昂希, et al. "屋内空間でのロボット配送システムにおける効率的な運用方法." *マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム 2022 論文集 2022* (2022): 662-670.
- [7] <https://index.ros.org/p/joy/>
- [8] Biber, Peter, and Wolfgang Straßer. "The normal distributions transform: A new approach to laser scan matching." *Proceedings 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003)*(Cat. No. 03CH37453). Vol. 3. IEEE, 2003.
- [9] https://github.com/autowarefoundation/autoware.universe/tree/main/planning/mission_planner
- [10] Quinlan, Sean, and Oussama Khatib. "Elastic bands: Connecting path planning and control." [1993] *Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 1993.
- [11] https://github.com/autowarefoundation/autoware.universe/tree/main/perception/lidar_centerpoint/