

小型自律移動ロボットを用いたつくばチャレンジ 2024 での取り組み

○永木 悠暉^{†1}, 吉越 誠^{†2}, 佐々木 新平^{†1}, 中村 啓太郎^{†1}, 鷲尾 優作^{†1},
船井 涼^{†2}, 畑中 優一郎^{†2}, 川原 脩慈^{†1}, 茂 郁良^{†1}, 三浦 璃音^{†1},
林原 靖男^{†1}, 上田 隆一^{†1}

Development for Tsukuba Challenge 2024 with small mobile robots

○ Yuki NAGAKI^{‡1}, Makoto YOSHIGOE^{‡2}, Shinpei SASAKI^{‡1}, Keitaro NAKAMURA^{‡1}, Yusaku
WASHIO^{‡1},
Ryo FUNAI^{‡2}, Yuichiro HATANAKA^{‡2}, Shuji KAWAHARA^{‡1}, Ikuo SHIGE^{‡1},
Rion MIURA^{‡1},
Yasuo HAYASHIBARA^{‡1}, Ryuichi UEDA^{‡1}

千葉工業大学 未来ロボティクス学科 上田研究室 むぎまるチーム/きなこチーム

1. 緒言

我々の所属する千葉工業大学未来ロボティクス学科上田研究室では、簡素なシステムで屋外環境を安全に自律走行できるロボットの開発を目的として 2021 年からつくばチャレンジに参加してきた。今年度のつくばチャレンジ 2024 では、当研究室から「むぎまるチーム」、「きなこチーム」という名義で計 2 チームが出場した。むぎまるチームでは自己位置推定システムの開発に注力し、開発においての目標を「自己位置推定が途中で破綻した場合においても、それを修復できる自己位置推定器の開発」として活動した。またきなこチームでは、開発においての目標を「動的障害物が多い中でも動作する自己位置推定器の開発」として活動した。本稿では、使用及び開発したハードウェア、ソフトウェアの詳細と、つくばチャレンジ 2024 における各チームの取り組みを述べる。

本稿の構成は次の通りである。2 章ではロボットのソフトウェア、ハードウェア構成について説明し、3 章では本走行の結果と見つかった課題を示す。4 章では本年度のつくばチャレンジで利用しなかった研究室での取り組みを紹介し、5 章では結言を述べる。

2. 各チームのロボットの構成

各チームのロボットの外観を図 1 に示す。いずれも、アールティ社製の Raspberry Pi Cat [4] を改造したものである。メンテナンス性の向上と新しいセンサや装置を乗せるため、元々の Raspberry Pi Cat の外装を大幅に拡張した。一方で、元々搭載されているモータや電源回路、Raspberry Pi 4 Model B など

はそのまま使用している。計算機は、ノート PC と Raspberry Pi の 2 台を搭載している。ノート PC で、ナビゲーションのプログラムを実行し、Raspberry Pi で車体の制御を行っている。各ノート PC の諸元を表 1 に示す。

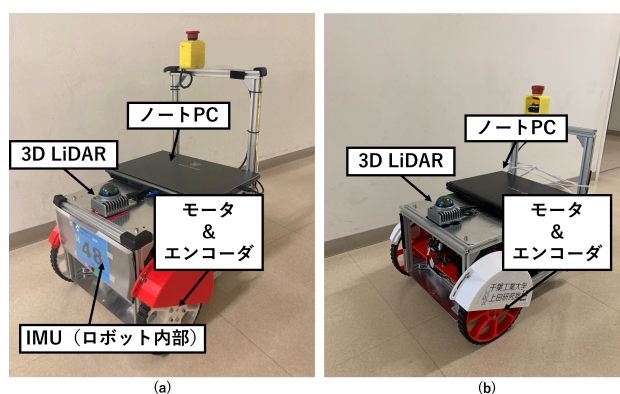


Fig. 1 各チームの機体

Table 1 各チームのノート PC の諸元

| チーム | CPU | RAM |
|------|--|------|
| むぎまる | AMD Ryzen 5 5600h with radeon graphics | 16GB |
| きなこ | | |

センサ構成としては、各チームの機体に外界センサとして 3D LiDAR (Livox Mid-360) を搭載している。内界センサとしては、Raspberry Pi Cat に元から搭載されているエンコーダを使用している。むぎまるチームはさらに、RT 社製の IMU センサモジュール (RT-USB-9axisIMU2) 使用している。

ソフトウェアについては、2 チームとも ROS 2 をベースに構築した。他、ソフトウェアの詳細については、次節以降で説明する。

2.1 むぎまるチーム

2.1.1 概要

むぎまるチームは 1 章の通り、「自己位置推定の破綻を修復できる自己位置推定器の開発」を目標としてシステムを構成した。そのため自己位置推定には、LiDAR ベースの Monte Carlo localization (MCL) と、膨張リセット [7] により破綻を修復する機能が実装された emcl2_ros2 パッケージ [3] を使用した。次項では詳細のシステム構成を説明する。

^{†1} 千葉工業大学先進工学部未来ロボティクス学科

^{†2} 千葉工業大学大学院先進工学研究科未来ロボティクス専攻

^{‡1} Department of Advanced Robotics, Faculty of Advanced Engineering, Chiba Institute of Technology

^{‡2} Department of Advanced Robotics, Graduate School of Advanced Engineering, Chiba Institute of Technology

2.1.2 システム構成

むぎまるチームのシステム構成について説明する。ロボットに搭載した計算機、センサ、アクチュエータの接続の関係及び計算機で実行する ROS 2 ノードの概要を表したものを図 2 に示す。

Raspberry Pi には、IMU とエンコーダ、車輪駆動用のモータを接続した。実行するノードとしては、IMU 用の ROS 2 ドライバノード (rt_usb_9axisimu_driver) と、オドメトリの出力とモータの制御を実施するノード (raspmouse) がある。後者のノードでは、エンコーダの値と前者のノードで配信された IMU の情報からロボットのオドメトリを計算し、トピックとして配信する。モータの制御は、外部のノードからトピックとして受信したロボットの速度指令をもとに実行する。

PC には、3D LiDAR と Raspberry Pi を接続した。実行するノードとしては、3D LiDAR 用のノードが 2 つ、ロボットの自己位置推定とナビゲーションを実行するノードがある。3D LiDAR 用のノードとしては、Livox 用の ROS 2 ドライバノード (livox_lidar_publisher) と、3D LiDAR からの 3 次元点群を 2 次元に圧縮し、トピックとして配信するノード (pointcloud_to_laserscan) がある。自己位置推定には、前項のとおり emcl2_ros2 パッケージ [3] を使用した。図中には、ノード名として「emcl2」と表している。このパッケージでは、走行する環境の地図とオドメトリ、2 次元の LiDAR データを使用して、ロボットの推定位置を tf の形式で出力する。この地図の作成には、slam_toolbox パッケージ [15] を使用した。ナビゲーションには、navigation2 パッケージ [16] を使用した。図中には、このパッケージに内包されるノードをまとめて「navigation2」と表している。

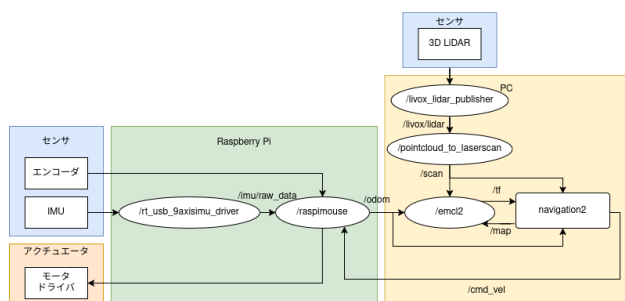


Fig. 2 むぎまるチームのシステム構成

2.2 きなこチーム

2.3 きなこチーム

2.3.1 概要

きなこチームは、3D-LiDAR を用いた自己位置推定の信頼性向上を目的としたシステムを開発した。このシステムは自己位置推定に emcl2、経路計画・走行制御に Nav2 を採用している。

開発の背景には、人や車などの動的障害物による自己位置推定の破綻という課題があった。当初この問題に対し、動的障害物の影響を受けにくい 2m 以上の高さの点群データのみを使用する手法を採用していた。また、3D マップとセンサデータは全て 2 次元に投影して処理を行っていた。しかし、環境の特徴は場所によって異なる高さに存在するため、単一の高さ範囲への投影では重要な特徴が失われ、自己位置推定が不

安定になる問題が発生していた。

この課題を解決するため、ロボットの現在位置に応じて自己位置推定に使用するマップと点群データの高さ範囲を動的に変更できるシステムを新たに開発した。

2.3.2 システム構成

システムの開発のために以下の 2 つのパッケージを作成した。

- map_manager
 - 複数の 2 次元マップを管理し、ロボットの位置に応じて適切なマップと高さ範囲のパラメータを提供
 - ロボットが指定範囲に進入すると、その領域に最適化された 2 次元マップと高さパラメータを自動的に切り替え
- pointcloud_to_dual_scan
 - 3D-LiDAR の点群データから 2 種類の 2 次元スキャンデータを生成
 - * 障害物回避用のスキャンデータ
 - * 自己位置推定用のスキャンデータ (map_manager の指定する高さ範囲に基づく)

マップデータは、GLIM を用いて事前に 3 次元マップを作成し、必要な高さ領域を抽出して 2 次元の占有格子地図に変換している。

2.3.3 システム統合

図に示すように、3D-LiDAR から取得した点群データは pointcloud_to_dual_scan で処理され、2 種類の 2 次元スキャンデータに変換される。map_manager は、ロボットの位置に応じて最適な 2 次元マップと高さパラメータを提供し、emcl2 による自己位置推定を安定させる。Nav2 により生成された速度指令値は raspmouse を介してモータードライバに伝達され、ロボットの制御を実現している。

3. 本走行の結果

つくばチャレンジ 2024 での本走行の結果を表 2 に示す。

Table 2 各チームの本走行の結果

| チーム | 走行距離 | リタイアの理由 |
|---------|-------|--------------------------------|
| むぎまるチーム | 470 m | 横断歩道の途中でロボットが長時間動けなくなりその場でリタイア |
| きなこチーム | 6m | スタート直後に左へ旋回し道路へでたためその場でリタイア |

3.1 むぎまるチーム

3.1.1 本走行・実験走行で見つかった課題

■コストへのロボットの乗り上げにより動作不能になる問題
むぎまるチームのリタイアの原因は、navigation2 が経路生成をする際に参照するコストマップにおいて、ロボットがコストに乗り上げてしまったことである。この状況を Rviz を用いて可視化した際の画像を図に示す。図中のピンク色の範囲は走行不可能領域のコスト、水色の範囲はロボットの内接円半径を考慮した走行不可能領域のコストを表している。つまり、ロボットの中心が水色の範囲に侵入するとロボットが走行不

可能領域にいると判断される。図からロボットの中心は水色の範囲に侵入していることが確認できる。この状態になると、navigation2 は目的地までの経路及び動作を生成しなくなる。この状態になった後、ロボットはリカバリー動作を実行したが、それも有効に働かずナビゲーションを中断してしまった。

この問題への対策として、走行可能領域に入るまで安全に配慮しながら動き回るというリカバリー動作を実装することが一つ挙げられる。図からロボットの前方には走行可能領域があることが確認できる。その場所まで 3D LiDAR により周囲の安全を確認しながら移動可能であれば、この問題が発生した場合にでもナビゲーションを続行できるようになると考える。

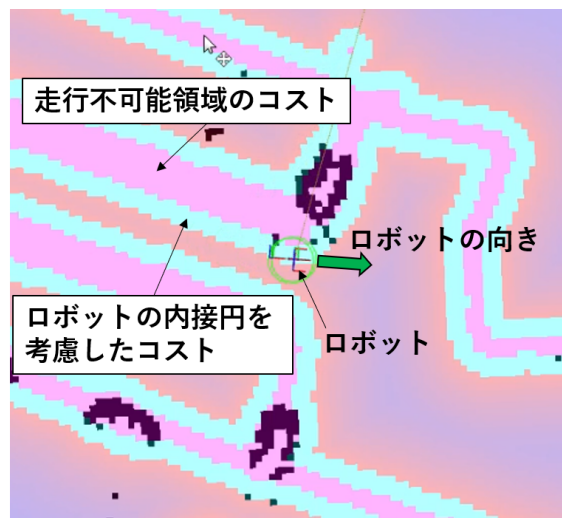


Fig. 3 ロボットがコストマップに乗り上げた状況の図

3.2 きなこチーム

3.2.1 本走行の結果

きなこチームは本走行開始直後、グローバル経路の通りに進まず想定外の左旋回を行い道路に出たため、走行距離 6m で終了となった。このとき、正常なナビゲーションが行われていなかった。大会当日、グローバル経路生成後に緊急停止スイッチを操作し待機状態にすると、Nav2 の更新周期が維持できなくなり、処理遅延やタイムアウトが頻発するという問題が発生した。通常、このような問題は CPU やメモリの過負荷状態で観察される現象である。この問題は大会当日は再現性を持って発生したものの、後日の検証では再現することができなかった。今後、根本的な原因を特定するために、さらなる調査を行っていく予定である。

3.2.2 実験走行で発生した問題

実験走行中に以下の技術的な問題が発生した。

1. 狭所での不具合

実験走行時、狭所でロボットが回転し止まらなくなることが何度あった。Nav2 のログ解析から、以下のプロセスが確認できた。

- 障害物との距離が近い場合ロボットの周囲ローカルコストマップが飽和
- ローカルプランナーのパスを生成できずリカバリーの動作として回転を開始
- 一定時間回転後に速度指令値を 0 にする処理を実行

しかし、実際のロボットは静止せず回転を続けていた。実際の挙動とシステムの指令値の不一致について、原因究明のための追加調査を行っていく予定である。

2. 動的障害物への対応の遅れ

他にも動的障害物に対するグローバル経路の更新が遅く、衝突リスクが発生する場面があった。また、システムが動的障害物の進行方向に経路を設定することがあり、円滑な走行の妨げとなった。

4. その他の試み

つくばチャレンジの環境において試していない研究室での取り組みについて紹介する。紹介したものについては、来年度以降のつくばチャレンジで試すことを考えている。

確率ロボティクス領域には価値反復アルゴリズム [23] がある。当研究室では、このアルゴリズムを移動ロボットの経路計画へ適用したパッケージを開発している [20]。価値反復アルゴリズムは、最適制御問題を解くことができるアルゴリズムである。これを移動ロボットの経路計画へ適用することで、現在地から目的地までの最適な経路（最短時間で移動できる経路）を算出することができる。また、この計算結果を障害物回避にも流用することで大域計画と局所計画が競合することなく回り道をする経路も算出することができる。一方で、価値反復アルゴリズムには、A*など一般によく用いられるアルゴリズムと比べ計算量が多く計算にかかる時間が長いという欠点がある。しかし、近年の計算機の性能の向上によって実時間で経路計画を行うことが可能となっている。

また、価値反復パッケージに関連する研究も行っている。価値反復アルゴリズムと A*を組み合わせる走り出しまでの時間を短縮する研究 [22] では、価値反復アルゴリズムの計算量が多いために目的地に向かって走り出すまで時間がかかる問題の解決に取り組んでいる。

5. 結言

今年度は昨年に引き続き ROS 2 ベースのシステム構成でつくばチャレンジに参加した。それに加え新たな取り組みとして、メンテナンス性と搭載量の向上のためにロボットを拡張した。ソフトウェア開発の面では、自己位置推定の破綻に対処可能なパッケージの開発や動的障害物が多い中でも動作する自己位置推定器の開発に取り組んだ。来年度は今年度の開発内容をもとに、見つかった課題への対策や、4 章で述べたものに取り組み、コースの完走を目指す。

謝辞

つくばチャレンジ実行委員会、つくば市の皆様に感謝申し上げます。林原研究室の皆様には、つくばチャレンジ 2024 の参加にあたりご意見、ご協力頂き感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Macenski, Steven *et al.*: “Robot Operating System 2: Design, architecture, and uses in the wild,” Science Robotics, Vol. 7, No. 66, 2022.
- [2] Ryuichi Ueda: “ryuichiueda/emcl2,” <https://github.com/ryuichiueda/emcl2> (last visit: 2024-01-01).
- [3] Ryuichi Ueda: “CIT-Autonomous-Robot-Lab/emcl2_ros2,” https://github.com/CIT-Autonomous-Robot-Lab/emcl2_ros2 (last visit: 2025-01-22).
- [4] 株式会社アールティ: “Raspberry Pi Cat 屋外でも動かせる中型 2 輪ロボット”, RT Robot Shop Products, <https://rt-net.jp/products/>

raspberrypi-cat/ (last visit 2024-01-05)

- [5] 池邊 龍宏, 内田 璃空, 畑中 優一郎, 白井 温希, 庄司 史門, 松井 大和, 山崎 政光, 登内 リオン, 林原 靖男, 上田 隆一: **Raspberry Pi のみを計算に用いる小型移動ロボットでのつくばチャレンジ 2022 参加レポート**, **つくばチャレンジ 2022 シンポジウム予稿集**, 2022.
- [6] Morgan Quigley *et al.*: “ROS: an open-source Robot Operating System,” Open-Source Software workshop of the International Conference on Robotics and Automation, 2009.
- [7] Ryuichi Ueda *et al.*: “Expansion Resetting for Recovery from Fatal Error in Monte Carlo Localization – Comparison with Sensor Resetting Methods,” Proc. of IROS, pp.2481–2486, 2004.
- [8] Tatsuhiko Ikebe: “uhobeike/ike_nav,” https://github.com/uhobeike/ike_nav (last visit: 2024-01-10).
- [9] 池邊 龍宏: “自作ナビゲーションスタックでつくばチャレンジ 2023 に挑戦してみた話”, <https://qiita.com/BEIKE/items/f3ff141cc25d49c01363> (last visit 2023-1-10).
- [10] D. Fox *et al.*: “Monte Carlo Localization: Efficient Position Estimation for Mobile Robots,” Proc. of AAAI, pp. 343-349, 1999.
- [11] Peter E. Hart and Nils J. Nilsson and Bertram Raphael: “A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimal Cost Paths,” IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics, Vol. 4, No.2, pp. 100-107, 1968.
- [12] Bemporad, Alberto: “Model Predictive Control Design: New Trends and Tools,” Proceedings of the 45th IEEE Conference on Decision and Control, pp. 6678-6683, 2006.
- [13] Ericssii: “Ericssii/FAST_LIO (ros2 branch),” https://github.com/Ericssii/FAST_LIO.git (last visit: 2023-11-19).
- [14] The Autoware Foundation: “autowarefoundation/autoware.universe,” <https://github.com/autowarefoundation/autoware.universe.git> (last visit: 2023-11-19).
- [15] SteveMacenski: “SteveMacenski/slam_toolbox,” https://github.com/SteveMacenski/slam_toolbox (last visit: 2025-1-27).
- [16] ROS Planning: “ros-planning/navigation2 (humble branch),” <https://github.com/https://github.com/ros-planning/navigation2.git> (last visit: 2025-1-22).
- [17] 池邊龍宏: “自作パッケージで屋外自律移動してみた in つくばチャレンジ 2023 (本走行)”, <https://www.youtube.com/embed/k9yxRK0Ca14?si=c7ISmE1wH5W4BhgU&start=1365> (last visit 2024-01-05)
- [18] 上田隆一, 登内リオン, 池邊龍宏, 林原靖男: “移動ロボットのための自己位置の不確かさを考慮したセンシングできない固定障害物の回避手法—価値反復を用いたナビゲーションにおける状態空間の局所拡張—”, 第28 回ロボティクスシンポジウム講演論文集, pp. 118-123, 2023.
- [19] 登内リオン, 池邊龍宏, 林原靖男, 上田隆一: “価値反復を用いた移動ロボットによる屋外ナビゲーション,” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2P1-G06, 2023.
- [20] R. Ueda, L. Tonouchi, T. Ikebe, and Y. Hayashibara: “Implementation of Brute-Force Value Iteration for Mobile Robot Path Planning and Obstacle Bypassing,” J. Robot. Mechatron., Vol.35, No.6, pp. 1489-1502, 2023.
- [21] 池邊龍宏, 林原靖男, 上田隆一: “未知障害物によるモンテカルロ自己位置推定の破綻を防ぐための観測範囲の制限と選択”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2A2-G06, 2023.
- [22] 中村啓太郎, 登内リオン, 永木悠, 林原靖男, 上田隆一: “自律移動ロボットのための価値反復ベースの大域計画器における A*探索による暫定経路の算出”, 第 25 回システムインテグレーション部門講演会 (SI2024), IF1-11, 2024
- [23] 上田隆一: “詳解確率ロボティクス”, 講談社, 2019