

技術・研究報告

ROS 対応移動ロボットを用いた 屋外ロボットチャレンジへの取り組み

梅谷智弘

甲南大学 知能情報学部 知能情報学科
神戸市東灘区岡本 8-9-1, 658-8501

(受理日 2020 年 11 月 16 日)

概要

人とロボットが共存する社会の実現を目的として、移動ロボットに、移動物体の識別や、対象人物の検出、交通法規を遵守するための環境認識など、様々な課題を設けた屋外ロボットチャレンジが実施されている。本稿では、知能化空間システムを構築するための情報収集ロボットの開発を目標とする、ロボットチャレンジを通じた実環境で動作できる自律移動ロボットの検証について報告する。本研究では、課題解決のための手段として、ソフトウェア資産の再利用するためにオープンソースである Robot Operating System (ROS) に対応した移動ロボットフォームを用いてシステムを構築する。これまでの 2 回にわたる屋外ロボットチャレンジへの参加をとおしたシステムの検証を報告し、甲南大学ロボティクス研究室の屋外ロボットシステム構築の展望について述べる。

キーワード: Robot Operating System (ROS), ロボティクスチャレンジ, 移動ロボット

1 はじめに

近年の移動ロボットの自律走行技術の開発とともに、商品を目的地まで宅配する自律運搬ロボットや、屋外を巡回して警備するロボットなど、屋外環境でサービス提供を行うロボットの研究開発がなされている。また、人とロボットが共存する社会の実現を目的として、移動ロボットに、移動物体の識別や、対象人物の検出、交通法規を遵守するための環境認識など、様々な課題を設けたつくばチャレンジ [1] や中之島ロボットチャレンジ [2]-[4] などの屋外ロボットチャレンジが実施されている。屋外ロボットチャレンジでは、人々が普段使っているあるがままの実環境での自律走行技術の進歩を目的としており、移動ロボットの利活用シーンを想定し、そのシーンに必要な要素技術が含まれるように課題が設定されている。また、公開実験の結果と経験を互いに共有することにより、技術レベルの向上を目指しており、ロボット技術の現状を公開することで、正しい理解を得ることも目的としている。

本稿では、中之島チャレンジに参加するために開発した屋外環境に対応する自律移動ロボットの開発 [5], [6] に始まった一連の甲南大学ロボティクス研究室の取り組みについて説明する。本ロボット

チャレンジに対して、我々は、知能化空間システム [7] を構築するための情報収集ロボットとして、実環境で動作できる自律移動ロボットの検証を目標とする。これまで、筆者はロボット研究において特にロボットの知能化に興味を持ち、研究期間の当初は環境への知識埋め込みと呼んでいた、空間知能化技術に関する研究を行ってきた。そのなかで特に、無線 LAN 信号強度を利用した端末の位置推定 [8]、屋外移動ロボットの複数対象物体の検出 [9]、画像と無線 LAN 信号を組み合わせた位置推定 [10] など、位置情報と関連した情報取得、情報インフラ利用に関する研究を行ってきた。これらの位置情報と関連したセンシング、情報収集研究を発展させるために、移動ロボットによる情報収集システムの構築が求められる。また、環境内のセンシングの地図を作るために、現時点での状況を位置情報と関連付けることが必要となり、センシングの自動化技術が重要である。そのため、このロボットチャレンジをとおした、移動ロボット技術の獲得を本研究の目的とする。

本研究では、課題解決のための手段として、ソフトウェア資産の再利用するためにオープンソースである Robot Operating System (ROS) [11], [12] に対応した移動ロボットフォームを用いてシステム構築を行う。システムの安全対策および屋外環境での地図生成実験、屋外移動ロボットチャレンジでの検証を通して本手法の可能性を示す。

2 問題設定

本章では、問題設定としてロボットチャレンジにおける開発目標について説明する。開発目標を立てるにあたって、これまで筆者の研究グループで扱ってきた知能化空間を構築するための移動ロボットについて述べる。あわせて、研究グループにおけるロボットチャレンジの位置付けを紹介する。

2.1 知能化空間構築のための移動ロボット

ロボットの知能化の枠組みとして、これまでの研究で、様々なセンサやネットワークインフラを設置し、ロボットを支援する知的な環境を構築する研究が行われている [7]。これらの環境では、ロボットだけでなく、環境内に配置したセンサから収集したデータをもとに、ロボットが作業を行うための情報面からの支援を行っている。

このような知能化空間において、人間やロボットがセンサデバイスを用いて位置情報を取得し、作業を完了させる場合がある。この場合、知能化空間を構築する際のセンサの配置は、最適な範囲を確保し死角を回避するように計画する必要がある。また、人間やロボットが扱う機器の通信や空間インフラが発信する情報を利用して位置情報を取得する研究においては、人やロボットなど移動する対象が得たセンサ情報と位置情報とを関連付けることで、様々なサービス提供を実現する。そのため、知能化空間を構築するためには、センサ情報を取得した位置とその情報を関連づけるために、移動ロボットなどを用いて環境内をセンシングすることが求められる。これまで、筆者らは無線 LAN 信号を用いた携帯端末の位置推定手法 [8] を開発したが、実験のためのデータ収集には、手押し台車を利用していた。手法を拡張するためには、平面上における位置を測定できる手法が必要となり、現実的には、移動ロボットによる情報収集が必要となる。

また、位置情報とセンサ情報を関連付ける手法は、移動ロボットチャレンジにおける地図生成やナビゲーション技術と密接に関連している。移動ロボットチャレンジでは、環境内へのセンサの設置や

他のセンシングデータで取得した情報の利用など、走行環境の変更は許されないが、ナビゲーション実験を行う前に移動ロボットが取得した計測記録に基づいて地図を構築する。また、移動ロボットは知能化空間でサービスを提供するために利用されており、このような環境を構築するためにはネットワークシステムやミドルウェアが必要であり、環境サービスを構築するためには、ミドルウェア部分のシステム統合が課題となる。したがって、ロボットチャレンジに参加することにより、知能化空間システムを構築するための要素技術を獲得することが期待できる。また、ロボットチャレンジでは安全対策も重要であり、安全な移動ロボットシステムを構築することで、知能化空間での情報収集やサービス提供を行うためのロボットを開発することにつながる。

以上の点から、屋外環境での移動ロボットチャレンジに参加し、知能化空間での情報収集用移動ロボットを開発することとする。

2.2 ロボットチャレンジにおける開発目標

本節では、ロボットチャレンジの目標とタスク設定について説明する。中之島チャレンジに参加するロボットには、ロボットの最大・最小サイズ、視認性、可搬性、汎用性などの安全性に制約がある。また、サービスロボットの知能化空間を構築するためには、個人の電子機器や移動ロボットの物理的な位置を関連付ける情報収集が重要になる。そこで、ロボットチャレンジに参加するための開発課題を以下のように設定する。

- 人がいる環境で自律的に動作するための安全対策を行い、移動ロボットチャレンジで実験走行を行える水準にする。
- 移動ロボットを開発者だけでなく、非専門家でも動かせるようにシステムを開発する。

これらの課題の要件を以下にまとめる。ロボットは人のいる空間で自律的に移動できる安全性が求められている。研究用ロボットは、非常停止スイッチが備えられていない、備えられていても容易に押し止めて停止させることが難しい状況にあるなど、初期状態では安全装置が十分に備えられていないことが多々ある。それに対して、たとえば中之島ロボットチャレンジでは、寸法や質量、形状の規定だけでなく、動力源の停止による非常停止のための機構がアクセスしやすい位置に設置することが求められている。一方、自律走行を行う場合は、建物の規則などの規制を遵守することが求められる。ここで、ロボット自身の安全だけでなく、移動ロボットが人や周囲の別のロボットが容易に検知できるような筐体を使用することが求められる。

次に、ロボットは、開発者だけでなく、専門家ではない人でも操作できるようにする必要がある。このロボットは知能化空間で情報を収集し、サービスを提供するために使用されることが最終的には想定されている。そのため、実験用に開発されたロボットであっても、開発者と利用者が異なる場合がある。筆者のグループでは、デモンストレーション時のハードウェア操作の簡素化とオペレータの負担を軽減するために、デモンストレーション用ロボット制御システムの検討 [13] と複数のロボットシステムの制御インタフェースの統合化 [14]、図書館でのアンドロイド・ロボット司書の開発 [15] などの実績があり、技術の手離れの良さは重要であると考えている。

さらに、開発メンバーが入れ替わるロボット研究室では、オープンで事例が公開されているロボット開発プラットフォームを採用することで、継続的で再現性の高い開発が可能になると期待されている。

る。また、オープンなソフトウェア開発プラットフォーム、ハードウェアを採用することで、他の研究コミュニティとの議論も期待できる。本実施形態では、オープンソースのロボットミドルウェアである Robot Operating System (ROS) を採用している。近年、ROS を用いたロボットの研究開発事例が数多くあり、ロボットチャレンジに限らず実装を伴うロボット研究では ROS が広く用いられている。さらに、ロボットのハードウェアについても、2 回目のロボットチャレンジへの参加では、屋外移動ロボットの技術移転を目的としたオープンなロボットハードウェアである T-Frog プロジェクト [16] の i-Cart mini [17], [18] をベースとした開発を行った。これにより、開発コストの低減、開発期間の短縮を図る。

以下では、これまでに参加した中之島チャレンジ 2019, 2020 における筆者らのグループの取り組みを紹介するとともに、課題と展望を紹介する。

3 中之島チャレンジ 2019 における取り組み

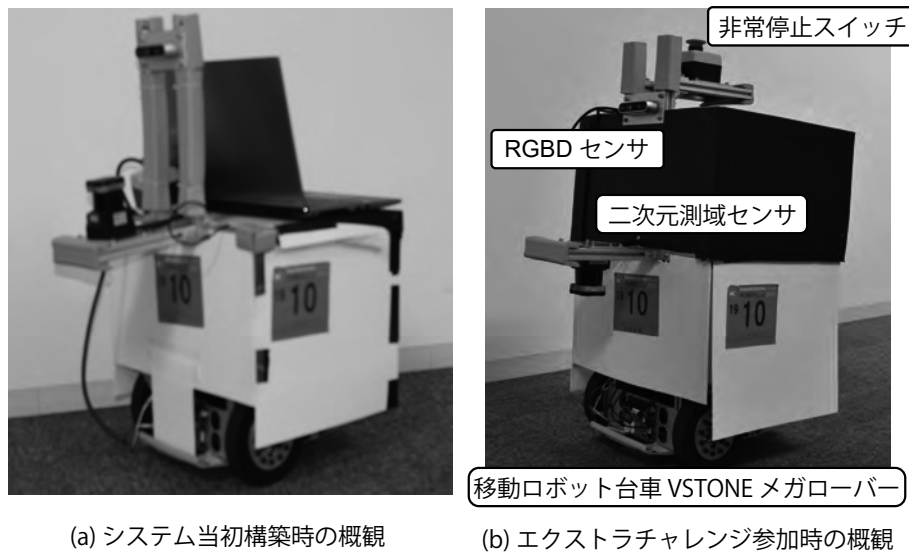
本章では、中之島チャレンジ 2019 における自律移動ロボットの開発について説明する。中之島チャレンジ 2019 では、実験走行が 2019 年 7 月 14, 15 日, 9 月 22, 23 日 (うち 9 月 23 日は本走行として公開実験)、さらにエクストラチャレンジとして 12 月 7, 8 日 (12 月 8 日に本走行) というスケジュールで行われた。筆者のグループは 9 月, 12 月の計 4 回の実験走行に参加した。開発したロボット、走行結果についてまとめる。

3.1 開発したロボット

本研究で開発したロボットの外観を図 1 に示す。実験で使用する移動ロボットは差動式の 2 輪駆動移動台車 VSTONE メガローバー Ver1.2 を採用した。移動ロボットの駆動輪は、幅 30 mm, 直径 150 mm であり、また、ロボット後方に幅 20 mm, 直径 50 mm のパッシブキャストを取り付けている。車輪の材質は硬質ゴムである。パッシブキャストは、ロボットの移動方向に追従して方向を変更できる。一方、キャスト自体は、ロボットのフレームに取り付けられているため、方向は変更できるが、ロボットの高さ方向に対する弾性はない。

ロボットの前方に外界センサである北陽電機 2D 測域センサ UTM-30LX, RGB-D センサ Intel RealSense D435i を、それぞれ地上高 0.4 m, 0.65 m の高さに取り付けた。外界センサは主に環境の地図生成と自己位置推定に使用し、RGB-D センサはサービスタスクミッションでの対象者や物体識別のためのセンシングを想定して取り付けた。

ロボットの上部にはノーマルクローズ接点の押しボタン式の非常停止ボタンを設置した。ロボットに異常が発生した場合や衝突などの危険があった場合には、スイッチを押すことでロボット台車のモータドライバへの電流を遮断することでロボットを完全に停止させる。中之島チャレンジの実験走行 1 回目では、図 1 (a) に示すように非常停止スイッチは PC と同じ高さに据え付けられていた。9 月に行われた実験走行を経て、開発したロボットに対して他グループの参加メンバーと議論し、コメントをいただき、最終段階でのエクストラチャレンジへの参加時では図 1 (b) の配置に改良した。この配置変更により、スイッチを容易に押すことができるようになった。また、それぞれのセンサの固定が改良されたため、地図生成時におけるロボットの安定性が向上した。



(a) システム当初構築時の概観

(b) エクストラチャレンジ参加時の概観

図 1: 中之島チャレンジ 2019 に参加した移動ロボット URI-Konan

移動ロボットの制御は一般的なノート PC で行った。OS は Ubuntu18.04 であり、ロボット制御用マイクロコントローラ VSTONE VS-WRC103LV やセンサ等を USB 経由で直接接続した。開発ソフトには、ロボット用ソフトウェアプラットフォームである ROS Melodic Morenia を用いて、`cartographer` [19], `navigation` パッケージを用いてシステムを構築した。

3.2 中之島ロボットチャレンジ 2019 での走行結果

ロボットチャレンジでの走行結果として、2019 年 9 月、12 月に開催された中之島ロボットチャレンジ 2019 の結果を紹介する。9 月の実験では中之島公会堂周辺の歩行者天国、12 月の実験では大阪市の扇町公園で行われた。9 月の中之島公会堂周辺の会場では、歩道などアスファルトや石畳上を走行する。一方、12 月の扇町公園では、土のグラウンドからスタートし、アスファルトや石畳上の歩行者、自転車用通路を走行する。実験に際しては、参加チームにはスペースが与えられるが、屋根はなく、電源等の設備もロボットチャレンジの会場にはない。そのため、雨や日差しを防ぐテント、非常用電源なども含め、全ての物品を持ち込んで実験を行う必要があった。また、屋外移動ロボットチャレンジは、中之島チャレンジに限らず、雨天決行で行われる。そのため、中之島ロボットチャレンジ 2019 では、会期中の 1 日は小雨の天候であったが、そのときは、防水対応になっている測域センサを除き、ポリ袋でロボットに簡易的な覆いをつけて実験を行った。

実験結果を説明する。中之島ロボットチャレンジ 2019 本走行では `navigation` パッケージによる自律走行で自己推定位置が行えず、スタート地点からの自律移動ができない結果となった。12 月に開催された中之島ロボットチャレンジ 2019 エクストラチャレンジでは自律移動は行えたが、後部キャストが砂地や傾斜地でスタックし、スタートエリア内で移動を中断することになった。原因としては、今回使用した移動ロボット台車は屋内移動を前提としており、路面の傾斜に弱いこと、移動機構が弾性を持たないキャストであったため、路面の変化に追従できていない可能性があった。

一方、12月のエクストラチャレンジの実験では、公園内での平坦な路面環境においては、地図生成やナビゲーション実験を行えることを確認した。地図生成実験では、位置に関連する情報を収集できる可能性を示した。さらに、都市公園で移動ロボットを動かす困難さを確認したものの、屋内ロボットを屋外環境で動作させるために必要となる、安全面など最小限の開発で対応させることができることを確認した。

2019年12月のエクストラチャレンジ終了後、甲南大学西校舎の中庭において、地図生成実験、ナビゲーション実験を行った[20]。地図生成時は13号館の玄関から移動ロボットを直進させ、15号館側のレンガ敷きの通路を走行させた。14号館と15号館の間から13号館に向かってレンガ敷きの通路を走行させ、中央の凹凸のある路面ではなく、13号館側の平坦な石畳の通路を走行させて、13号館玄関まで走行させて、ループを閉じた。一方、自律走行時は、13号館側の平坦な石畳から、レンガ敷きの通路を経由して13号館入口まで走行する経路を計画し、その計画経路に従って、ロボットを自律走行させた。

また、生成した地図を確認したところ、実験場所の全体をほぼ正確に捉えることができることを確認した。続いて物体の検知は木やポールなどの高い障害物は検知され生成地図には含まれるが、椅子などの低い障害物は検知されず、生成地図に登録されないことを確認した。これはレーザーレンジファインダの取り付け高さの問題であり、長椅子の鉛直上方をレーザー光が通過したものと考えられる。

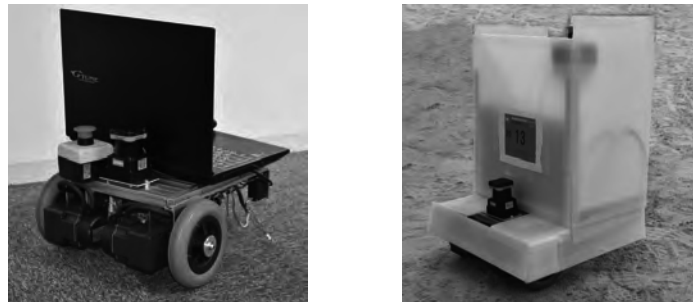
以上より、屋外移動ロボットチャレンジの結果は、ロボットシステムの頑健性の問題や実験経験の蓄積が十分でないことがわかった。一方、次のロボットチャレンジに向けて機構の改良などの課題を見いだせた。今後の課題としては、走破性能の高い移動機構の採用、および、地図生成、経路計画部の改良、インタラクティブに経路生成、指定できるROSパッケージの開発があげられる。また、多くの屋外実験や屋内地図生成、ナビゲーションを通した、移動ロボットの経験の蓄積が課題となった。

4 中之島ロボットチャレンジ2020における取り組み

本章では、中之島ロボットチャレンジ2020における自律移動ロボットの開発について説明する。中之島ロボットチャレンジ2020では、実験走行が2020年8月19,30日、9月22,20日(うち9月20日は本走行として公開実験)、さらにエクストラチャレンジとして11月14,22日12月5,6日(12月8日に本走行としての公開実験)というスケジュールで実施された¹。筆者のグループは年度当初、新型コロナウイルス感染症(COVID-19)対策でロボットの構築など、複数人で行う実験が行えなかったこと、また、12月の実験走行が中止となったため、11月22日の実験走行のみに参加した。

2020年度のロボットチャレンジに向けた開発したロボットの外観を図2に示す。実験で使用する移動ロボットは差動式の2輪駆動移動台車である、T-Frogプロジェクト[16]のi-Cart mini[17],[18]をベースとした開発を行った。i-Cart miniは、屋外移動ロボットであり、つくばチャレンジなどの屋外ロボットチャレンジなどで用いられている。駆動輪は直径150mm、幅30mmの手押し車いす用のキャストであり、パッシブキャストには、幅25mm、直径75mmのスプリングキャストを採用している。このため、10mm程度の段差は乗り越えられる設計になっている。

¹12月5,6日の実験走行は大阪府の新型コロナウイルス感染症対策 大阪モデル 赤信号宣言(2020年12月3日)を受けて中止となった。



(a) i-Cart mini 移動ロボット台車 (非常停止スイッチ取付済) (b) エクストラチャレンジでの実験走行用ロボット

図 2: 中之島ロボットチャレンジ 2020 エクストラチャレンジで走行した移動ロボット URI-KonanII

ロボットの前方に外界センサである北陽電機 2D 測域センサ UTM-30LX を、高さ 150 mm の台車フレーム上に設置した。また、ノーマルクローズ接点の押しボタン式非常停止スイッチを動力源であるバッテリーとスイッチの間に挿入し、スイッチを押すと、移動ロボット台車の電源を遮断できるよう配線を変更した。移動ロボットの制御は一般的なノート PC で行う。OS は Ubuntu20.04 であり、ロボットのモータドライバと測域センサは USB 経由で直接接続した。開発ソフトには、ROS Noetic Ninjemys を用いて、地図生成には gmapping パッケージ群、ナビゲーションには 2019 年度の開発と同じく、navigation パッケージを使用した。標準では、マウス入力でロボットへの速度入力を行えるが、実験走行を行うまでに、ロボットへの速度入力をジョイパッドで行えるようにソフトウェアパッケージを開発し、屋外におけるロボットの操作性の向上を図った。

ロボットチャレンジの実験走行においては、データ収集のための走行であっても、モータの動力を用いて走行させる場合には、寸法、非常停止スイッチの設置に加え、車輪部など巻き込み部分がないこと、電気回路が露出しないこと、など、ロボットの安全対策を施す必要がある。実験走行にあたっては、実行委員による安全確認を行い、確認を終えたロボットのみが走行できることになる。筆者のグループのロボットについても、図 2 (b) に示すように、他のロボットによる検出が容易な形状をし、車輪に覆いをつけることで、巻き込み事故を防ぐ対応を行った。筐体の覆いは、プラスチック段ボールで造形した。

図 3 に、実験走行での地図生成結果を示す。図中の破線はコントローラでの走行記録の概形を伴走者やロボット自身の抽出結果をもとに示したものである。図の灰色部分は未確定領域、白い部分が障害物を検出できなかった領域で、通常は走行可能と判断される領域、黒い点は障害物として検出された領域である。図の経路の長さは約 120 m であり、スタート地点直後の土のグラウンド部分や、走行経路にあった 3% の勾配の路面走行をコントローラを用いて行うことができ、前年度のロボットチャレンジで課題となっていた、屋外での走破性の向上を確認した。また、図中の障害物検出結果、地図の幾何的な形状は、おおむね現地の状況と一致していることが、公園内の通路の検出結果から確認できる。また、実験走行前後で、甲南大学西校舎の中庭で走行させたときも、安定して走行させることができ、ロボットの走行性能の向上という課題を解決した。一方、ロボットチャレンジの実験走行が中止となったため、屋外での地図生成実験、および、走行実験を今後行い、システムの有効性の検証が課題となっている。実験を繰り返し、新たな課題発掘を行うことが今後の課題となる。あわせて、

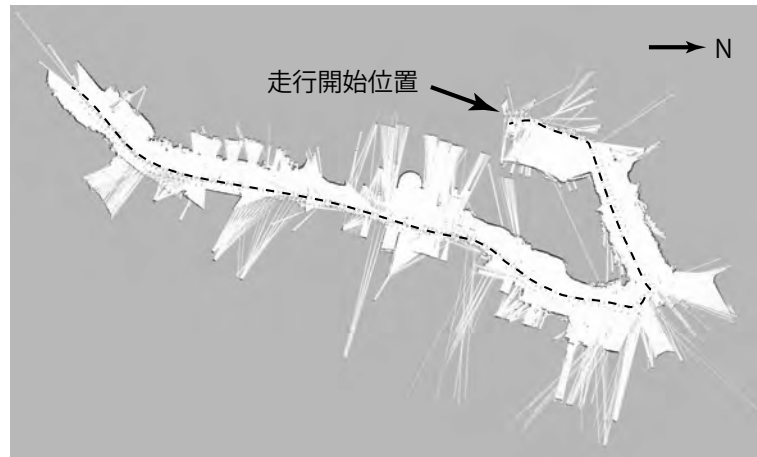


図 3: 実験走行での地図生成結果. 図中の破線はコントローラでの走行記録の概形を示す.

開発した移動ロボットを用いた知能化空間の構築実験や, ロボット開発環境の継続, 継承が課題としてあげられる.

5 おわりに

本稿では, 中之島チャレンジに参加するために開発した屋外環境に対応する自律移動ロボットの開発に始まった一連の甲南大学ロボティクス研究室の取り組みについて説明した. 知能化空間システムを構築するための情報収集ロボットとして, 実環境で動作できる自律移動ロボットの検証を目的として, ロボットチャレンジへの参加を開始した. 本研究では ROS を用いて屋外環境に対応するロボットシステムの構築及び自律移動の検証を行った. ロボットチャレンジの初回では, 路面が平坦でない場合ではロボットの後輪キャストがスタックし, 自律移動を中断せざるを得ない状況となったものの, 自己位置推定, 地図生成, 経路計画を利用した自律移動が可能であることを確認した. また, 2 回目のロボットチャレンジでは, 走破能力の向上, 広い範囲での地図生成を実現でき, 屋外実験, および, 実際のロボットチャレンジでの実験走行をとおして本システムの可能性を示した. さらに, COVID-19 による教育研究活動の制約もあるなかで, 2 回のロボットチャレンジへの参加をとおして, 屋外での実験技術の獲得, 移動ロボット技術の蓄積を実現した.

今後の課題としては, 地図生成, 経路計画部の改良, インタラクティブに経路生成, 指定できる ROS パッケージなど移動ロボット実験の支援ソフトウェア群の開発があげられる. また, 開発した移動ロボットを用いた知能化空間の構築実験や, ロボット開発環境の継続が課題となる.

謝辞

本研究の一部は日本学術振興会科学研究費 (JP17K06280, JP17H01801, JP18K11416, JP19H04414), 私立大学等経常費補助金特別補助「大学間連携による共同支援」の支援を受けた. 本研究は, 甲南大

学知能情報学部卒業生の近藤悠矢氏、徳田拓馬氏、および、甲南大学知能情報学部の武田晟央氏、谷村大士氏との共同で行われました。屋外実証実験において、中之島チャレンジ2019, 2020の関係者の皆様に深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 油田信一, 水川真, 橋本秀紀, 田代泰典, 大久保剛史, “移動ロボットに遊歩道を自律走行させるつくばチャレンジ—公開走行実験の考え方と2010年度の結果,” システム/制御/情報, vol. 55, no. 7, pp. 278–283, 2011.
- [2] 中之島ロボットチャレンジ, <https://nakanoshima-rc.jp/index.html> (2020.11.16 閲覧)
- [3] 田窪朋仁, 青柳誠司, 井上雄紀, 今津篤志, 生駒京子, “大阪市実証事業「中之島チャレンジ2019」の報告,” 第20回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会講演論文集, pp. 1937–1938, 2019.
- [4] 田窪朋仁, “ロボティクスチャレンジ参加のススメ,” 第63回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, pp. 685–688, 2019.
- [5] 梅谷智弘, 近藤悠矢, 徳田拓馬, “中之島チャレンジにおける甲南大学ロボティクス研究室の取り組み,” 第20回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会講演論文集, p. 1934, 2019.
- [6] 梅谷智弘, 近藤悠矢, 徳田拓馬, “ロボットチャレンジにおけるROSを利用した屋外移動システムの構築と検証,” 第64回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, pp. 166–168, 2020.
- [7] J. H. Lee and H. Hashimoto, “Intelligent Space—concept and contents,” *Advanced Robotics*, vol. 16, no. 3, pp. 265–280, 2002.
- [8] T. Umetani, T. Yamashita and Y. Tamura, “Probabilistic localization of mobile wireless LAN client in multistory building based on sparse Bayesian learning,” *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol. 23, no. 4, pp. 475–483, 2011.
- [9] M. Tanaka, M. Wada, T. Umetani and M. Ito, “Detection of mobile objects by mixture PDF model for mobile robots,” *Transactions of the Institute of Systems, Control and Information Engineers*, vol. 25, no. 11, pp. 323–327, 2012.
- [10] T. Umetani, S. Yamane and Y. Tamura, “Indoor localization for augmented reality aided operation and maintenance system based on sensor data integration,” *Plasma and Fusion Research*, vol. 9, article no. 3406054, pp. 1–4, 2014.
- [11] ROS: <http://wiki.ros.org/> (2020.3.17 閲覧)
- [12] 原祥堯, “ROSを用いた自律走行,” 日本ロボット学会誌, vol. 35, no. 4, pp. 286–290, 2017.
- [13] 梅谷智弘, 清瀬大貴, 榊原洋之, 青木哲, 北村達也, “自己完結性を有するコンポーネント駆動型の卓上ロボット環境の構築,” 計測自動制御学会論文集, vol. 54, no. 1, pp. 126–128, 2018.

- [14] T. Umetani, S. Aoki, T. Kitamura and A. Nadamoto, “System integration for component-based Manzai robots with improved scalability,” *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol. 32, no. 2, pp. 459–468, 2020.
- [15] T. Umetani, T. Kikuchi and N. Saiwaki, “Remote reference-desk service system using android robot for university librarian,” in *Proc. 2019 IEEE International Conference on Advanced Robotics and its Social Impacts (ARSO 2019)*, pp. 25–27, 2019.
- [16] T-frog Project, <http://t-frog.com/> (2020.11.16 閲覧)
- [17] 阪東茂, 渡辺敦志, 坪内孝司, 辻信行, 油田信一, “ハードウェア情報もオープンにした研究用プラットフォームとしての標準的小型移動ロボット i-Cart mini,” 第 31 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 3H3-07, DVD-ROM, 4 pages, 2013.
- [18] 渡辺敦志, 阪東茂, 辻信行, 大矢晃久, 油田信一, “移動ロボット用二軸ブラシレスモータドライバの開発とオープンソースプラットフォームを用いた走行制御,” 第 31 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 3H1-01, DVD-ROM, 4 pages, 2013.
- [19] W. Hess, D. Kohler, H. Rapp and D. Andor, “Real-time loop closure in 2D LIDAR SLAM,” in *Proc. 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1271–1278, 2016.
- [20] T. Umetani, Y. Kondo and T. Tokuda, “Rapid development of a mobile robot for the Nakanoshima Challenge using a robot for intelligent environments,” *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol. 32, no. 6, pp. 1211–1218, 2020.