

# 不整地対応 3次元地図作成・自律移動制御システムの開発（第2報）

中込広幸・布施嘉裕・永田靖貴・宮本博永・小谷信司・横塚将志\*1・神村明哉\*1・渡辺寛望\*2・丹沢勉\*2

## Mapping and Navigation Module for an Autonomous Rough-Terrain Mobile Robot (2nd Report)

Hiroyuki NAKAGOMI, Yoshihiro FUSE, Yasuki NAGATA, Hironaga MIYAMOTO, Shinji KOTANI,  
Masashi YOKOTSUKA\*1, Akiya KAMIMURA\*1, Hiromi WATANABE\*2 and Tsutomu TANZAWA\*2

### 要 約

県内企業では、新たな市場開拓のため、自律移動ロボット製品の開発を行っている。本研究では、県内企業の自律移動ロボットの製品化、及び事業化支援のため、自律移動制御システムの研究開発を実施している。自律移動制御システムは、企業の持つロボット又は車両に組み込むことで、屋外不整地における測位及び自律移動を可能とするものである。令和元年度の取り組みとして、3次元環境地図を用いた自律移動制御システム手法、深層学習を利用した路面の判定手法、3次元環境地図の更新方法について開発を行った。3次元環境地図の作成、及び自律移動の実験を行い、目標経路に追従したロボットの自律移動が可能であることを確認した。

### 1. 緒 言

県内企業では、新たな市場開拓のためのロボット製品開発、及び運搬車両の自動化による事業を検討している。さらに、使用環境として、屋内環境のみでなく屋外不整地を含めた環境での利活用が期待されている。屋内及び道路のような整地環境と比較して、屋外不整地では、勾配、車輪の空転、草木などの不定形物の存在などによって、従来法の適用が困難な場合が多く存在する。

本研究では、屋外かつ不整地においても使用できる3次元環境地図作成手法、自律移動制御システムについて開発する。本システムは、各種センサ・情報処理用コンピュータを1つのデバイスに集約したモジュール（以下、自律移動モジュールと呼ぶ）内に実装したものである。この自律移動モジュールを、既存のロボット及び車両に搭載することで、屋外や不整地を含めたさまざまな環境における自律移動を実現する。

本稿では、令和元年度の研究開発において実施された、3次元環境地図を用いた自律移動制御システム手法、深層学習を利用した路面の判定手法、3次元環境地図の更新方法について報告する。

### 2. ハードウェア・ソフトウェア構成

本章では、自律移動モジュールのハードウェア構成、及びソフトウェアの構成を示す。

#### 2-1 自律移動モジュールのハードウェア構成

自律移動モジュールをクローラ型ロボットに搭載した外観を図1に示す。自律移動モジュールは、センサとして、3次元測域センサ(3D-LiDAR)、慣性計測装置(IMU)を搭載している。LiDARとは、赤外線レーザを走査することで周囲の形状を測定するセンサである。3D-LiDARは、複数のレーザを走査することで、立体形状の測定が可能である。IMUとは、角速度、加速度、姿勢を測定するセンサである。3D-LiDAR本体をサーボにより傾斜させることで、測定範囲の拡張を行う。3D-LiDAR・IMU・サーボは組み込みコンピュータに接続され、本研究にて構築したソフトウェアにより、自律移動のための処理が実行され、ロボットへの移動指令値を出力する。

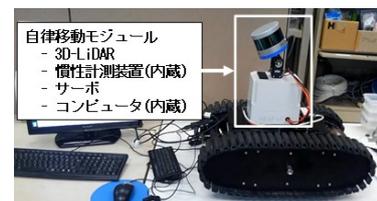


図1 自律移動モジュールを搭載したクローラ型ロボットの外観

\*1 国立研究開発法人産業技術総合研究所

\*2 国立大学法人山梨大学

自律移動モジュールに使用した 3D-LiDAR として Velodyne Lidar 社製 VPL-16, IMU として Xsens 製 MTi 30-HARS, サーボとして Dynamixel 製 RX-64, 組み込みコンピュータとして NVIDIA 製 Jetson Nano を使用した。自律移動化の実験対象として、クローラ型ロボット Y-CRoSAM<sup>1)</sup>を使用した。

## 2-2 ソフトウェア構成

O.S.に Linux for Tegra を使用した。さらに、ロボット用ミドルウェア ROS (Robot Operating System<sup>2)</sup>) を使用した。

## 3. 3次元環境地図を使用した自律移動

本章では、自律移動モジュールの機能として開発した自律移動に係る手法、及び屋内での自律移動実験について述べる。

### 3-1 3次元環境地図

自律移動モジュールでは、周辺環境の形状情報をNDボクセルに変換したものを3次元環境地図として用いる。NDボクセルとは、物体の形状を表す点群を、格子状に分割し、NDT (Normalized Distribution Transform) を用いて形状を近似するものである(図2)。NDTを使用することで、位置推定精度を劣化させずに、地図情報の圧縮及び位置推定の高速化が期待できる。

3次元環境地図の作成手順は、まず、自律移動モジュールをロボットや車両等に搭載し、使用環境において手動操作により走行する。次に、走行時に収集したセンサーデータから周辺の3次元環境地図を自動生成する。最後に、ユーザがウェイポイントを設定することで自律移動を行う経路を登録する。ウェイポイントの設定に換えて、センサーデータ収集時のロボットの位置情報のログを経路として登録することも可能である。

### 3-2 3次元環境地図中の自己位置推定

3次元環境地図におけるNDボクセルと、センサから得られた形状情報を比較することで、3次元環境地図におけるロボットの位置を推定する。各種センサから得られた周辺の点群と、NDボクセルから得られる3次元

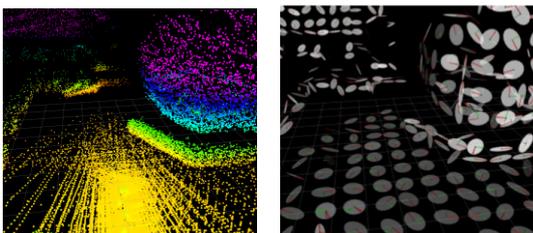


図2 自律移動モジュールが推定した周辺の点群(左図)、及び点群のNDボクセル変換結果(右図)

環境地図の平面・円筒近似情報を比較し、点群とこれら近似平面・円筒との距離が最小となる位置姿勢を、最小二乗法を用いて推定する。

### 3-3 経路に沿った走行制御

自律移動モジュールでは Dynamic window approach(DWA)を使用し、目標経路に沿った走行制御を行う。DWAは現在の速度・角速度から加速、減速した際の走行経路のシミュレーションを行い、評価値(目標経路に対する距離、障害物の接触の有無、最大速度)を算出する。評価値が最大値となる走行経路を選択し、その走行経路を生成した速度・角速度をロボットの指令値として出力することで、ロボットの走行制御を行う。

### 3-4 自律移動実験

自律移動モジュールを用いてロボットを自律移動させ、その際の目標経路に対する位置推定結果の差(偏差)を算出した。実験環境は甲府技術支援センター研究管理棟4階システム研究室及びその廊下とした。実験環境において、ロボットを手動操縦して3次元環境地図を作成し、その走行経路を目標経路とした。作成した3次元環境地図及び目標経路を図3に示す。設定した3次元環境地図を用いて図1のロボットの自律移動を行った。実験時、ロボットの自己位置推定結果と目標経路の位置情報を取得し(図4)、走行距離に対する自律移動時の偏差を算出した(図5)。走行距離76mにおいて、平均誤差0.06±0.05m、最大誤差0.36mとなった。

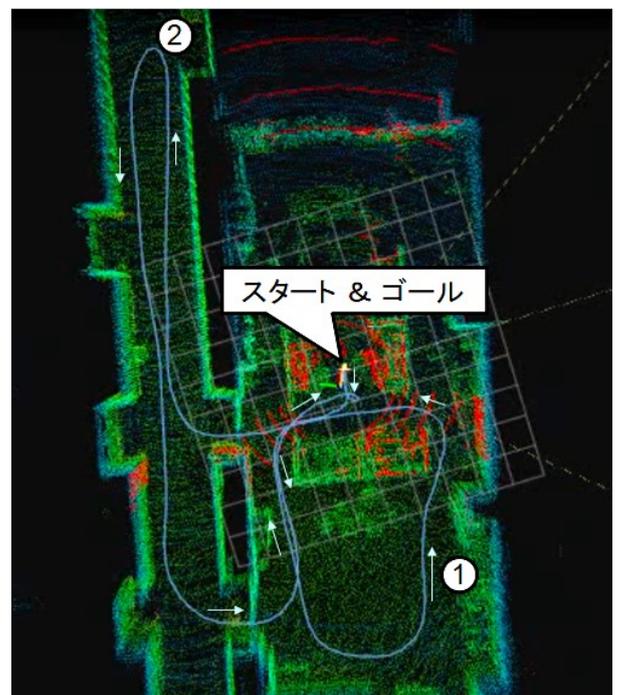


図3 自律移動モジュールを用いて生成した甲府技術支援センター室内の3次元環境地図と目標経路

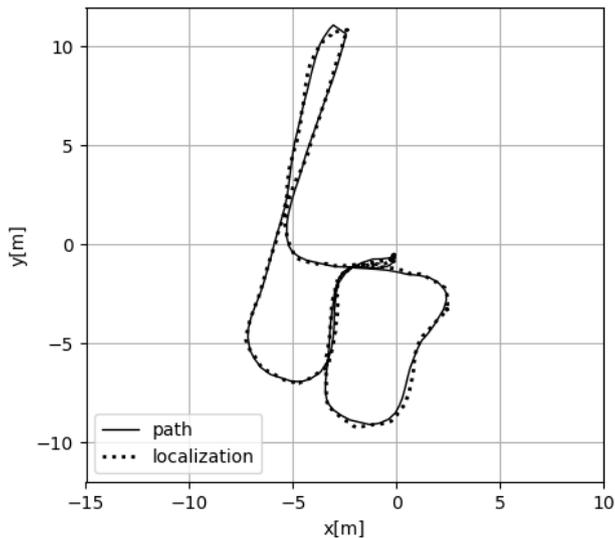


図4 目標経路の座標及び自律移動時の位置推定結果

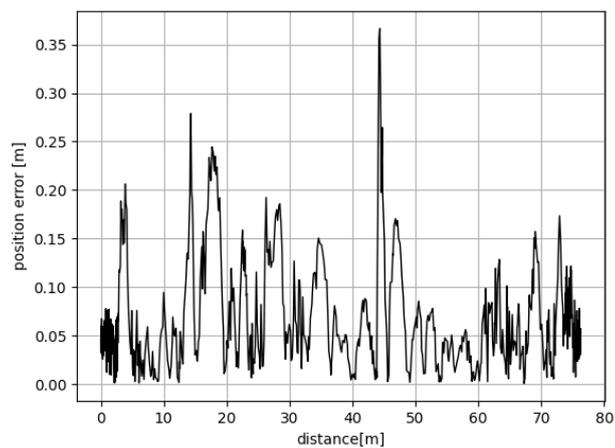


図5 自律移動時の目標経路に対する偏差

### 3-5 自律移動実験に対する考察

屋内環境におけるクローラ型ロボット Y-CRoSAM の自律移動を、目標値に対する平均偏差  $0.06 \pm 0.05$  m で実現した。走行距離に対する自律移動時の偏差を確認したところ、目標経路において緩やかなカーブ状の箇所(図3における地点①)で偏差が増加した。緩やかなカーブ状の箇所では偏差が増加した原因としては、緩やかなカーブでは目標角速度と出力角速度の差が小さいため、ロボット側のフィードバック制御による目標値への追従に時間を要したことが考えられる。

最大偏差を記録した場所は図3における地点②の折り返し地点であった。本実験における DWA の設定では、未到達、かつ半径 2 m 以内で最も距離の離れた経路を目標としてロボットを制御する。図4における地点②では、DWA の設定によりショートカットが発生したため、最大誤差の原因と考えられる。

今後の課題として、屋外不整地で同様の実験を行い、偏差の検証を行う予定である。さらに、今後の課題とし

て、地図作成時の走行結果を収集し、経路ごとに適切な指令値に対するゲインを算出する手法、及び DWA の目標地点を適切に選択できる手法を検討する。

## 4. 深層学習を使用した路面の判別

本章では、屋外不整地において走行が可能な路面を、深層学習を用いて推定する手法、及び屋外不整地での実験結果について述べる。環境として山梨県内の森林作業道(図6)を使用し、路面の検出精度を検証した。

### 4-1 深層学習に使用したデータ

深層学習では一般的に、入力画像と教師画像のペア(図7における a,b)を作成し、複数のペアをデータセットとして使用する。本システムでは、走行時に収集した周辺の点群情報を TopView 画像と呼ばれる 2 次元画像に変換し、入力画像とした。さらに、ドローソフトを使用した色分けを行うことで、路面のみを白色、路面以外を黒色とした教師画像を作成した。

### 4-2 ネットワークの作成

深層学習に使用するネットワークは U-Net を軽量化したものを使用する。自律移動モジュールに搭載されている GPU がエッジデバイス用の低スペックなものであるため、U-Net のネットワークを一部変更した。



図6 実験環境における路面の例

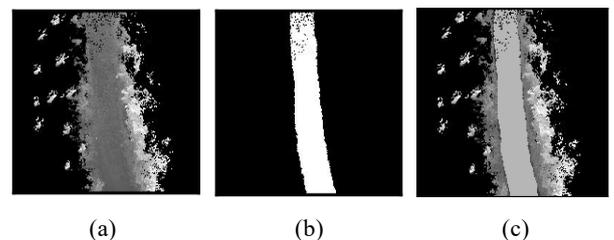


図7 図6の地点において作成した(a)入力画像、(b)教師画像、(c)入力画像に対して深層学習により推定した路面の検出結果

### 4-3 不整地での実験

不整地において3mごとに入力画像と教師画像のペアを作成し、交互に学習用データセット、検証用データセットに振り分けた。データセット数は学習用データセット20ペア、教師用データセット20ペア、学習回数100エポック、学習モデルにAdam、学習率を0.0001として学習と検証を行った。学習用データセットは、-50 deg から+50 deg までの角度範囲で10 deg ずつ回転処理を行い、学習用データセットの拡張を行った。評価として Intersection over Union (IoU) と呼ばれるセマンティック・セグメンテーションに使用される指標を用いて、精度の検証を行った結果、検証用 IoU 値の平均は0.72となり、良好な精度が得られた。今後の課題として、IoU 値がさらに高くなるようネットワーク構造の見直しや、カメラ画像と点群から生成された深度画像を用いて、より高精度な路面検出方法を開発する。

## 5. 3次元環境地図の更新システム

3次元環境地図は、周囲の形状をもとに作成するため、環境が変化した場合には、地図を更新する必要がある。本章では、過去に作成した3次元環境地図（以下、前地図）と整合性のある新しい3次元環境地図を作成する方法について説明する。その手法は、再度訪れた場所（以下、再帰点）を深層学習により検出し、ループ閉じ込み処理と呼ばれる再帰点に到達した際に蓄積した誤差をキャンセルする方法を使用した。

### 5-1 深層学習による再帰点の検出

4章におけるTopView画像を入力とし、各地点を示すノードにおける尤度を出力とするネットワークを作成する。再度同じ場所を訪れた場合、その地点を示すノードから出力される尤度が高くなり、一定の閾値以上高くなった場合、再帰点として出力される仕組みとなっている。同じ地点においても、周辺の形状が変化した場合は尤度が低下するため、前地図から変化の無い地点を再帰点として取得することができる。

### 5-2 再帰点を使用した3次元環境地図の更新

再帰点を使用した3次元環境地図の更新には、前年度開発した、ループ閉じ込み処理による大域的な3次元環境地図の修正システム<sup>3)</sup>を使用した。この修正システムは地図作成時に再帰点を検出し、ループ閉じ込み処理を行うことで3次元環境地図を修正する。3次元環境地図の更新においても、再帰点を検出し、前地図と現地図のループ閉じ込み処理を行うことで、前地図との整合性のある現地図を生成し、これを次回走行時の3次元環境地図として使用する。

### 5-3 検証

同一の森林作業道において約1年の期間を空け、2回のデータ収集を行った。その結果、前地図と2回目に得られた新3次元環境地図の統合が可能であることが確認された。

## 6. 結言

本研究では、3次元環境地図を用いた自律移動制御システム手法、深層学習を利用した路面の判定手法、3次元地図の更新方法について報告した。

今後の取り組みとしては、屋外不整地において3次元環境地図を用いた自律移動制御システム手法の検証を行う。さらに、複数の不整地において深層学習用データセットを取得し、提案した路面の判定手法及び3次元環境地図の更新システムについても検証を行う。

## 参考文献

- 1) 中込広幸, 布施嘉裕, 保坂秀彦, 宮本博永, 中村卓, 米山陽, 小谷信司, 横塚将志, 神村明哉, 渡辺寛望, 丹沢勉: 自律走行可能なロボットの制御手法の開発(第3報), 山梨県産業技術センター平成29年度研究報告 No.1(2018) pp.1-4
- 2) ROS.org: ROS Wiki, < <http://www.ros.org/wiki/> (2020-5-11 参照)
- 3) 中込広幸, 布施嘉裕, 保坂秀彦, 小谷信司, 横塚将志, 神村明哉, 渡辺寛望, 丹沢勉: 不整地対応3次元地図作成・自律移動制御システムの開発, 山梨県産業技術センター平成30年度研究報告 No.2(2019) pp.31-37