

| | |
|------------|--|
| 氏名 | 中込 広幸 |
| 博士の専攻分野の名称 | 博士（工学） |
| 学位記番号 | 医工農博甲第79号 |
| 学位授与年月日 | 令和4年3月18日 |
| 学位授与の要件 | 学位規則第4条第1項該当 |
| 専攻名 | 工学専攻 システム統合工学コース |
| 学位論文題目 | 森林作業道における移動ロボットの自律移動に関する研究 |
| 論文審査委員 | 主査 教授 小谷 信司 委員 教授 鈴木 良弥 委員 教授 島 弘幸 委員 准教授 丹沢 勉 委員 准教授 清水 毅 委員 准教授 石田 和義 |

学位論文内容の要旨

本研究は、森林作業道において車両の自律移動を実現するための研究である。森林作業道とは、林業において木材の搬出作業を行うための道路である。森林作業道は集材作業を行う林業機械や、搬出作業を行うフォワーダの通行を目的に使用される。本研究における自律移動とは、車両が与えられた経路情報に従ってスタート地点からゴール地点まで、自律的な移動制御により到達することを言う。自律移動を実現するには、1) 走行経路に沿った地図の取得、2) 地図に対する現在位置の推定、3) 目標経路に対する誘導制御、の要素技術が統合されなければならない。さらに、これら要素技術は森林作業道という特殊環境において実現されなければならない。

本論文は、これら要素技術についての研究報告、および要素技術を統合したロボットによる自律移動の実験結果について報告し、将来的にフォワーダの無人化を目指すものである。

<目標タスクの設定>

森林作業道は自然を含む環境であることから非常に多様である。すべての森林作業道の自律移動を 100%の確率で確実にできる手法の実現は難しい。そこで、本研究では自律移動の対象とする森林作業道をあらかじめ定め、環境を限定した上で、森林作業道として一般的な特徴をもつ環境を対象とする森林作業道として設定した。将来的に様々な森林作業道の自律移動に応用するための基礎的な手法を構築することを目的とする。実現目標とするタスクは、森林作業道を走行する移動ロボットの自律移動とする。

<対象とする森林作業道>

本研究において対象とする森林作業道は、森林作業道作設ガイドラインを参考に、森林作業道の基本的な特徴を持つ環境を設定した。森林作業道の基本的な特徴とは、1) 木材を搬出する車両が通行することを目的としていること、2) 路面は、土砂を転圧したものであること(アスファルト等での舗装はされていないこと)、3) 森林作業道の幅員は、基本的に、通行する重機の幅に対して片側のクリアランスが最低でも 0.25m 確保されているものとする、4) 斜面に敷設され、谷側斜面・山側斜面が存在すること、である。以上を満たす環境を山梨県内に 2 箇所設定し、実験を行う。

<対象とするロボット>

対象とするロボットは差動駆動型の 4WD 移動ロボットとした。この理由としてフォワードは主にクローラベルトにより走行し、2 自由度のアクチュエータにより駆動するため、独立 2 輪駆動型の移動機構モデルを適用することができる。差動駆動型の 4WD 移動ロボットも同様に、独立 2 輪駆動形の移動機構モデルを適用することができることから、対象とするロボットとして差動駆動型の 4WD 移動ロボットを選択するためである。将来的にフォワードの無人化に応用する際、同じ制御方法を適用することができる。

<目標タスク実現のための基本戦略>

屋内、および屋外整地における自律移動の基本的な方法は既に確立されているが、これらに使用されてきた各要素技術は、森林作業道において利用困難である。例として自己位置推定においては、1) GNSS：衛星電波が地形や森林により遮蔽、2) デッドレコニング：不整地走行時に滑りが発生、3) ビジュアルオドメトリ：環境光の変化が頻繁に発生するためサチレーションが発生、不整地走行時の振動によりモーションブレンダーが発生、4) スキャンマッチング：人工物が少ないため、スキャンマッチング時にローカルミニマムが発生。

さらに、路面の推定においては、1) 未舗装： 走行可能な領域の推定が困難、2) 学習用のデータが市街地と比較して極めて少ない。

このように、森林作業道における自律移動は、これまで使用されていた要素技術は通用せず、森林作業道に対応した新たな手法が必要となる。そこで、本研究では従来使用されてきた要素技術について、森林作業道における自律移動に適用するための改良を行う。

<路面の滑りに影響されないスキャンマッチング>

ICP アルゴリズムを用いたスキャンマッチング法は、ICP アルゴリズムの初期値が解に近い場合にのみ有効な手法である。このため、急旋回や路面の滑りによって初期値と解が離れている場合に使用が困難となる。さらに、森林作業道では周辺の形状に起因した局所解が多く存在しうるため、よりいっそう使用困難となる。

これらに対応するため、本研究では、ICP アルゴリズムにおいて位置・姿勢・速度を同時に推定することで、デッドレコニングなしで次スキャン時に初期値を解に近づける方法を提案する。これにより、路面との滑りに影響されないスキャンマッチングが可能となる。さらに、ICP マッチング時のボクセルを用いた特徴量による重み付けにより、スキャンマッチングの精度を低下させる原因となる、ばらつきの大きい形状の影響を軽減した手法を提案する。

<深層学習を用いた路面推定>

森林作業道における路面の推定方法としては、教師データに基づいてロボットが自動的に路面を推定する方法を提案する。森林作業道の路面は公道と異なり、舗装されておらず、白線や縁石もないので、路肩との境は明確でない。さらに、崩落しないよう、転圧された領域を路面として正確に推定し、そのエリアのみを通行しなければならない。

これらに対応するため、本研究では、LiDAR-SLAM により得られた TopView 画像を基に U-Net による路面の推定方法を提案する。TopView 画像を使用することで、後方を含めた広範囲の形状を基に路面の推定を行うことができる。さらに U-Net を採用することで高精度な路面推定を可能とする。

<森林作業道における自律移動システムの構築>

森林作業道の自律移動を実現するために必要な機能として、3D-LiDAR を用いた SLAM による地図作成、自己位置推定、および経路計画手法を構築し、自律移動システムとする。自律移動システムにより、指定した経路に沿った自律移動を実現する。自律移動システム

のうち、SLAM と自己位置推定を行う機能は、提案したスキャンマッチング法を用いて構築する。さらに、経路計画機能は、提案した路面検出法、および Dynamic Window Approach を用いて実現する。

〈森林作業道における自律移動の実験とその結果〉

目標タスクである森林作業道における自律移動の評価方法を定め、対象とする森林作業道におけるロボットの自律移動実験を行った。スキャンマッチングによる地図作成と自己位置推定により、指定した経路に沿った自律移動を行った。横断方向の位置制御精度を算出したところ、横断方向の位置制御の誤差は 0.25m 以内となり、目標とする精度での自律移動が可能であることを確認した。

〈まとめ〉

本研究では、森林作業道における自律移動を目標タスクに、このタスクが実現可能な自律移動システムの構築を行った。森林作業道に対応したスキャンマッチング法、および路面検出法を提案し、これらを使用した自律移動システムを構築した。目標タスクである森林作業道における自律移動の評価として、自律移動時における横断方向の位置制御の誤差を測定し、目標とする精度での自律移動が可能であることを確認した。

論文審査結果の要旨

本学位論文の審査は、提出論文の内容、口頭発表、および口頭試問の質疑応答に基づき、6名の審査員（主査：小谷 教授、副査：鈴木 教授、島 教授、丹沢 准教授、清水 准教授、石田 准教授）によって行われた。博士論文公聴会において、口頭発表と質疑応答（60分）、その後に審査員全員による最終試験が実施された。

これらの結果をもとに合否を審議した結果、審査員全員一致で合格とした。

本論文は、「森林作業道における移動ロボットの自律移動に関する研究」と題し、6章よりなっている。

第1章「はじめに」では、本研究の背景として、林業における問題、森林作業道における運搬作業と自動化の必要性、およびこれまでの取り組みについて記している。さらに、本

研究の目的、目的を達成するための本研究のアプローチ方法、目的達成のための検証方法、および研究成果の活用方法について記し、最後に、本論文の構成について記している。

第2章「森林作業道において自己位置推定可能なスキャンマッチング」では、要素技術であるスキャンマッチング手法の原理と実装、基礎実験の評価を記している。スキャンマッチングとは、LiDARにより得られた複数の点群を重ね合わせる技術である。本章で提案するスキャンマッチング法は、ボクセルによる特徴量抽出と並進速度の推定を取り入れた位置姿勢最適化により、森林作業道においても精度良く位置を推定する手法である。

関連する従来の研究と提案手法の考え方を述べた後、RTK-GNSSを真値とした自己位置推定結果、および森林作業道での自己位置推定結果から、自己位置推定誤差を従来法と提案手法ごとに比較する。自己位置推定誤差の解析結果から、提案手法の有効性を記している。

第3章「深層学習を用いた路面推定」では、はじめに関連研究と森林作業道の路面検出における課題を整理し、LiDAR-SLAMにより得られた点群情報を使用し、ディープラーニングによる学習結果を使用した路面推定法について提案している。LiDARを使用することで環境光の影響を低減可能であり、かつ物体の形状を高分解能・高精度に測定可能である。高分解能・高精度な形状情報を使用することで、転圧された面の検出を可能とした。実験として、森林作業道において得られた点群を用いたデータセットの作成方法について記している。さらに、得られたデータセットを用いた提案手法の路面推定精度について示している。

第4章「森林作業道における自律移動システムの構築」では、森林作業道の自律移動を実現するために必要な、3D-LiDARを用いたSLAMによる地図作成、自己位置推定、および経路計画手法について提案している。これらの機能を構築することで、自律移動のために必要となる、自己位置の推定、および目標経路に沿う制御が可能となる。森林作業道の自律移動を実現するためには、森林作業道の幅員方向に対して0.25m以内の誤差の自己位置推定、走行制御が必要となる。これを実現するため、自律移動システムのうち、SLAMと自己位置推定を行う機能は、2章において提案したスキャンマッチング法を用いて構築した。さらに、経路計画機能は、3章において提案した路面検出法、およびDynamic Window Approachにより構築している。

第5章「森林作業道における自律移動の実験と評価」では、森林作業道における自律移動

実験の結果について報告している。4 章において構築した自律移動システムを、移動ロボットに搭載し、2 箇所の森林作業道において実施した地図作成、および自律移動の結果を記載した。評価として、自律移動の結果から、目標経路に対する横断方向の位置制御誤差を求め、本研究の目標である、目標経路に対する横断方向の位置制御誤差が最大0.25m 以内となっているかを確認した。さらに、森林作業道の各区間における目標経路に対する横断方向の位置制御誤差を比較し、考察を行っている。

第6章「おわりに」では、本研究で得られた結果を総括して記載している。具体的には、森林作業道の自律移動に必要な要素技術として、新たなスキャンマッチング手法、および路面推定手法を提案したこと。さらに、これら要素技術を組み合わせることで、自律移動に必要な地図作成機能、地図中の自己位置推定機能、および経路計画機能を構築したことが記載されている。

本論文の研究内容は、学術誌の *Electrical Engineering in Japan* に 1 報、電気学会論文誌に 1 報、権威ある国際会議 *IEEE/SICE SII 2021* に 1 報の計 3 報に発表している。

したがって、審査員 6 名の総意により、博士(工学)を授与するにふさわしいものと結論した。