

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

中込広幸・布施嘉裕・保坂秀彦・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

Hiroyuki NAKAGOMI, Yoshihiro FUSE, Hidehiko HOSAKA, Shinji KOTANI,
Masashi YOKOTSUKA*1, Akiya KAMIMURA*1, Hiromi WATANABE*2 and Tsutomu TANZAWA*2

要 約

県内企業のうち一部では、新たな市場開拓のため、自律移動ロボット製品の開発をはじめたところである。本研究では、県内企業の自律移動ロボットの製品化、および事業化支援のため、自律移動モジュールの研究開発を実施している。自律移動モジュールは、移動ロボットおよび車両に搭載することで、屋外不整地における測位、および自律移動を可能とするものである。平成 30 年度の取り組みとして、屋外かつ不整地においても使用可能な、3次元地図作成手法を開発した。屋外整地環境および屋外不整地環境において、その点群推定結果を従来法と比較した。結果、屋外整地環境では従来法と同程度の点群推定精度であり、屋外不整地環境では、従来法と比較して、自己位置推定および点群の推定が破綻することなく実施することが可能であることが分かった。さらに自己位置推定および3次元地図の精度の向上が可能なループクロージャを実装し、屋内での自己位置推定および点群の推定実験により、蓄積した誤差の修正が可能であることを確認した。

1. 緒 言

県内企業のうち一部では、新たな市場開拓のためのロボット製品開発、および車両の電子制御化による業務の自動化を検討している。これらは、最終的に自律移動化することが望まれているが、その使用環境として、屋内環境のみでなく、屋外かつ不整地環境を含めた環境での利用が期待されている。これまで多くの研究開発が行われている屋内、および道路のような比較的平坦な屋外環境と比較して、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ある。

本研究では、屋外かつ不整地においても使用できる地図作成手法、自律移動手法について研究を実施している。各手法はソフトウェアとして、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）内に実装する。既存のロボットおよび電子制御された作業機械に本自律移動モジュールを搭載することで、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。本研究では、平成30年度の研究開発において実施された、自律移動に必

要となる3次元地図の自動作成機能の開発について報告する。

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、およ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小型クローラ型ロボットに搭載した外観を図1に示す。センサとして、LiDAR、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。IMU(慣性計測装置)とは、角速度、加速度、姿勢を測定するセンサである。LiDAR本体をサーボにより回転させることで、周囲の3次元形状のセンシングを行う。LiDARとして北陽電機製TOP-URG、IMUとしてXsens製MTi30-HARS、サーボとしてDynamixel製RX-64を採用した。情報処理のため、NVIDIA製組み込みコンピュータJetson TK1を使用する。CPU、GPU、ストレージ、メモリ等、自律移動に必要な処理系が1つの組み込みコンピュータに集約されている。

*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

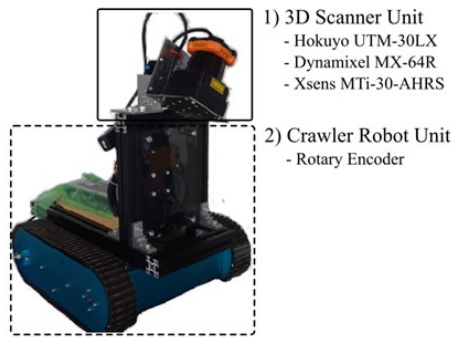


図 1 自律移動モジュールを搭載した小型クローラ型ロボットの外観

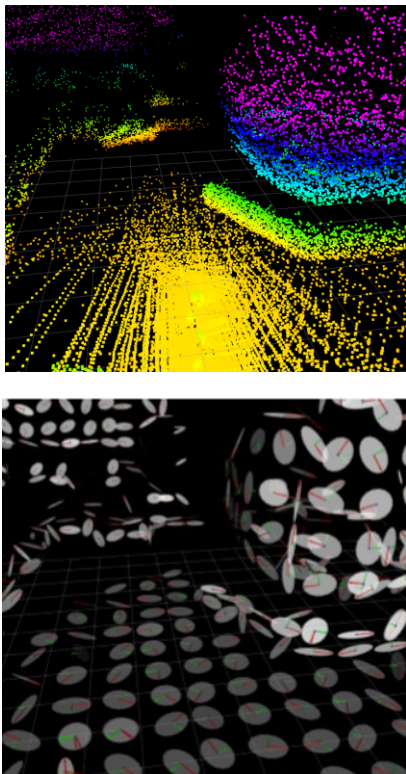


図 2 自律移動モジュールが推定した周辺の点群（上図），および点群から 3 次元形状を平面近似した ND ボクセル（下図）

2-2 ソフトウェア構成

O.S.に Linux for Tegra を使用している。さらに、ロボット用ミドルウェア ROS (Robot Operating System¹⁾) を採用し、本研究において提案する手法を ROS 上に実装する。ROS を使用することで、自律移動モジュールを異なるロボット、および車両に搭載する際、プログラムを再度編集することなく、再利用することが可能となる。

3. 3次元地図の自動作成手法

本章では、3次元地図の自動作成方法について述べる。

その詳細について、NDボクセルを用いた3次元地図の表現方法を説明する。さらに、3次元地図の作成および位置・姿勢・速度の推定を同時に実行する手法を提案する。最後に、NDボクセルの持つ傾き情報を用いた走行可能領域の推定法を説明する。

3-1 NDボクセルを用いた3次元地図

本研究では点群をNDボクセルに変換したものを、3次元地図として用いる。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)。これにより、点群を利用する場合と比較して、情報量の削減、自己位置推定における計算コストの削減が期待できる。NDTは、ボクセル内点群位置の共分散ベクトルを用いて、ガウス分布を求めることで形状の近似を行うが、本手法では、共分散ベクトルを用いて平面近似を行う。これは、スキャンマッチングとよばれる、点群を用いた位置姿勢推定時に、計算コストの低減を図るためである。

3-2 自己位置姿勢速度の推定と3次元地図の生成

本研究では、NDボクセルを用いた自律移動モジュールの位置、姿勢の推定に加え、速度についても推定する手法を提案する。速度を推定する目的は、位置推定精度の向上および次年度実施予定の自律走行に速度情報を使用するためである。本モジュールは、ハードウェアの低コスト化を図るため、2D-LiDARを採用している。2D-LiDARは1回の走査で測定できる範囲が狭いため、複数回の走査結果と、それに対応する複数の位置姿勢を一度のスキャンマッチングで求めなければならない。本手法では、速度推定を組み込むことで、移動時の位置予測が可能となり、少ない計算量で安定した位置推定を行うことが可能となる。また、不整地におけるロボットの自律移動には、車輪の滑りにより車速計の誤差が問題となっているが、本手法によって、車速計に代替して速度を推定することが可能となる。

本手法では、NDボクセルを用いて、自律移動モジュールを搭載したロボットの位置、姿勢、速度および点群を推定する。処理手順としては、

1. 事前に得られた点群のNDボクセル変換
(初回のみロボットが静止した状態で得られた点群を使用)
2. センシングデータとボクセルのマッチング
(NDボクセルに対して、移動時に新たにセンシングした点群をマッチング、位置・姿勢・速度を推定)
3. 推定結果を利用した移動時の点群推定

となっている。1, 2, 3の処理を繰り返し行うことで、

位置、姿勢、速度、および点群の推定が逐次実行される。自律移動モジュールは、サーボによりLiDARを1秒周期で1回転させる。その間を等速直線運動すると仮定し、2, におけるスキャンマッチングにより1秒間の位置姿勢、および速度を推定する。さらに、自己位置姿勢速度の推定精度を向上させるため、点群を多く含むボクセルほど、位置姿勢速度の推定に寄与するよう重みパラメータを設定する。これにより、LiDARによるセンシング時にばらつきの出やすい草木等の不定形物に囲まれる環境や、振動により姿勢推定誤差が瞬間的に増加する環境において、位置姿勢速度推定の誤差低減を図っている。

3-3 ループクロージャによる ND ボクセル地図の修正

ロボットを、ある環境において一周させ、ループ状に地図を生成するとき、地図全体の整合性を調整する手法（ループクロージャ）を導入する。ソフトウェアライ

ブラリとして、GTSAM²⁾を使用した。これにより、ループ状に地図を生成する際、地図精度の向上が見込まれる（図 3）。ループクロージャでは、ロボットが過去訪れたことのある場所（再訪点）に戻ってきたことを検出し、現在位置と再訪点との相対位置姿勢を推定することで、ループを閉じる。現在位置に対する再訪点の相対位置姿勢は点群のスキャンマッチングにより推定する。スキャンマッチングによる相対位置姿勢推定が可能な範囲内であれば、ロボットの現在位置と再訪点の位置が完全に一致する必要は無い。

3-4 ND ボクセルを利用した走行可能領域の推定

ND ボクセルは、点群の共分散値を用いて形状を近似することから、近似平面の傾きを得ることができる。本手法では、近似平面の傾き等を利用し、平坦な路面を自動検出する機能を構築した（図 4）。本機能は、自律移動時の経路設定時に利用可能である。

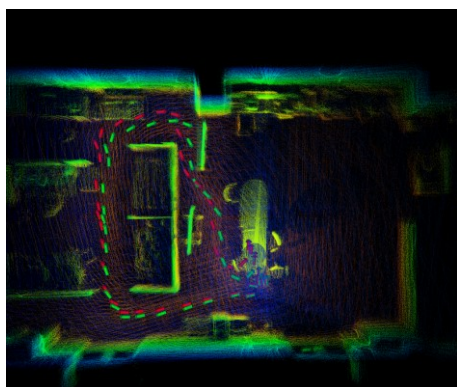
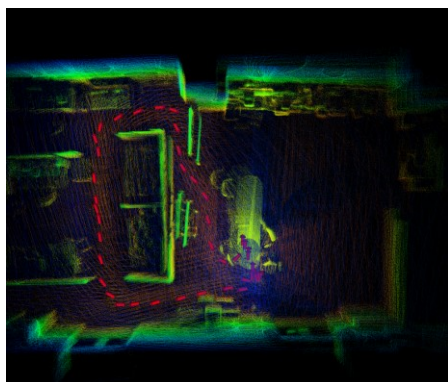


図 3 屋内におけるループクロージャの実行結果

3-2により推定された位置姿勢の軌跡(赤色マーカ)および周辺の点群（上図）、ループクロージャにより修正された位置姿勢の経路（緑色マーカ）および周辺の点群（下図）

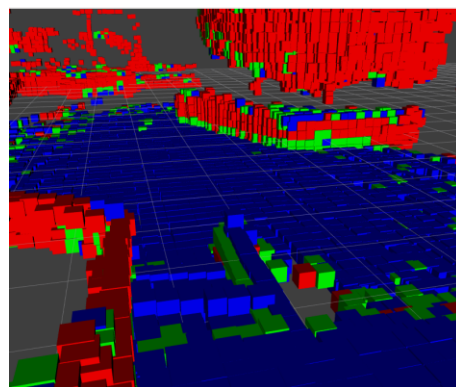
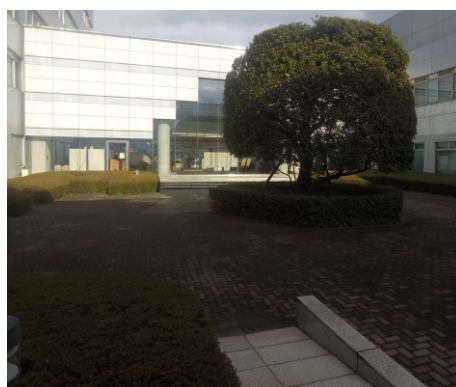


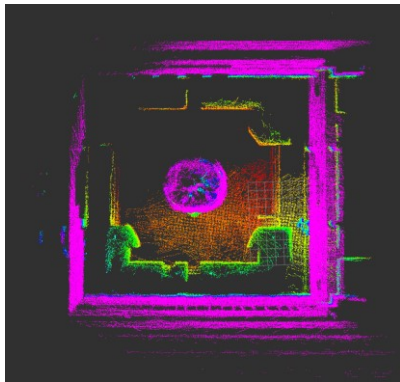
図 4 産業技術センター中庭（上図）および中庭において提案手法により求めた走行可能領域（青色、緑色）（下図）

4. 3次元地図作成実験

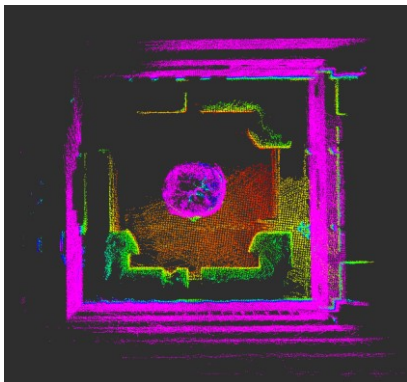
本手法の有用性を確認するため、勾配のある屋外整地環境、および屋外不整地において、3次元地図の作成を行った。提案手法との比較として LOAM³⁾を実装した。LOAM を従来法として、従来法、および提案手法 3-2 により点群を推定し、実環境の周辺形状を表現できているかについて、目視で確認し、両手法の比較を行った。さらに、ループクロージャの有用性を確認するため、提案手法 3-2 による位置推定結果と、 3-3



(a)



(b)



(c)

図5 産業技術センター中庭 (a) における実行結果
従来法 LOAM により得られた点群 (b)、提案手法により得られた点群 (c)

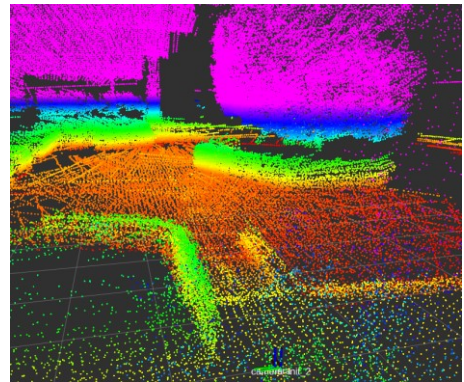
を用いて修正した際の修正量を算出し確認した。

4-1 勾配を含む屋外環境での3次元地図作成

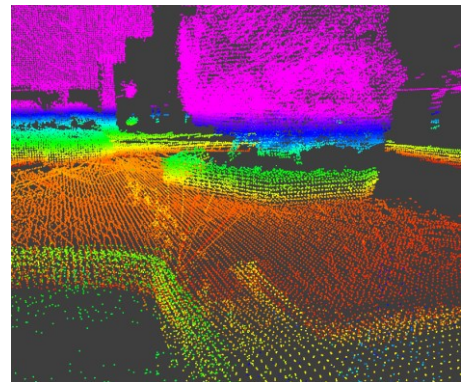
産業技術センター中庭 (図5 (a)) にて自律移動モジュールを搭載したロボットを走行させ、従来法と提案手法を比較した。走行面は整地であるが、走行経路にスロープによる勾配が存在することから、地図作成時にロボット本体が高さ方向にも変化する。各手法から得られた点群 (図5 (b) (c)) (図6 (b) (c)) を比較したが、両手法の大きな差異は認められなかった。



(a)



(b)



(c)

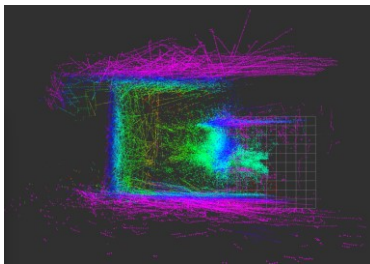
図6 産業技術センター中庭における実行結果
スロープ前から撮影した写真 (a)、従来法 LOAM により得られた点群 (b)、提案手法により得られた点群 (c)

4-2 屋外不整地における3次元地図作成

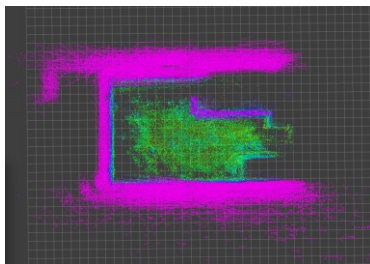
産業技術センター中庭(図7(a))にて、自律移動モジュールを搭載したロボットを走行させ、従来法と提案手法を比較した結果、従来法では、点群および自己位置の推定誤差が増加し、正しい点群が得られなかった(図7(b))。一方で、提案手法では、点群の取得が可能であった。(図7(c))。従来法および提案手法において、特に誤差が増加した地点は生垣周辺であった。生垣周辺の写真(図8(a))および点群を拡大したものを示す(図8(b)(c))。従来法では、点群および自己位置推定誤差が増加し、自己位置姿勢推定と点群推定が破綻してしまっただ。一方で、提案手法では破綻することなく自己位置および点群の推定が可能であった。さらに、生垣周辺の点群のばらつきは従来法より小さく、生垣の輪郭を捉えていた。ただし、自己位置推定誤差が一部増加した箇所があり、その影響で、生垣の輪郭が多重に検出された。



(a)



(b)



(c)

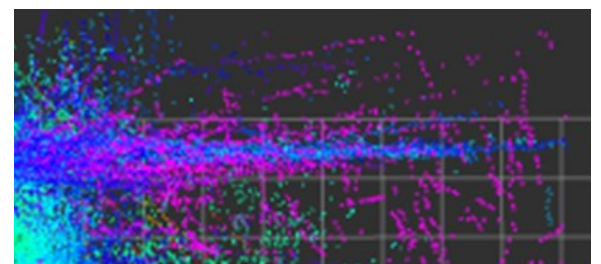
図7 産業技術センター中庭における実行結果
航空写真(a)、従来法 LOAM により得られた点群
(b)および提案手法により得られた点群(c)

4-3 ループクロージャの修正量の確認

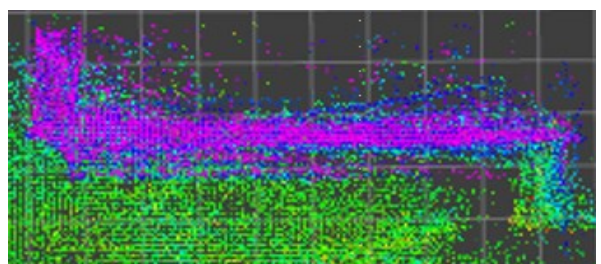
屋内環境において、手法3-2による位置姿勢速度の推定、および手法3-3ループクロージャによる位置姿勢の修正を行い、位置修正量を確認した。図9(a)は、手法3-2による位置姿勢推定結果(赤色マーカ)、および位置姿勢推定結果から求められた点群を表示したものである。図9(b)は、手法3-2による位置姿勢推定結果(赤色マーカ)、ループクロージャ実施後の位置推定結果(緑色マーカ)、修正後位置姿勢から得られた点群を表示したものである。図9(a)では位置推定誤差により、壁の位置を表す点群に誤差が生じ、その結果、壁が多重に検出されてしまっている。図9(b)では、ループクロージャを用いることで、位置姿勢が修正され、結果として多重に検出されていた周囲形状についても修正されている。ループクロージャによる位置修正量について図10に示す。図10における前後、左右および高さとは、修正前の位置姿勢に対する位置の修正方向を表し



(a)

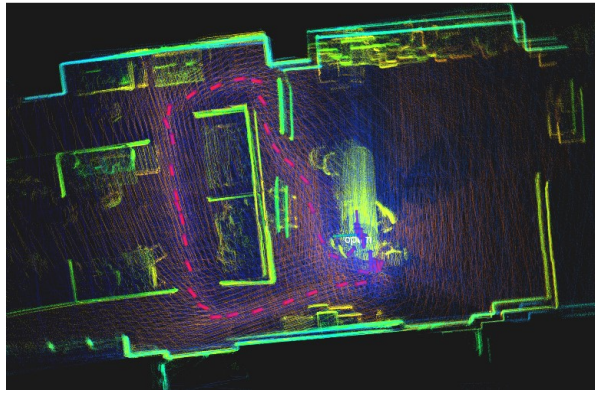


(b)

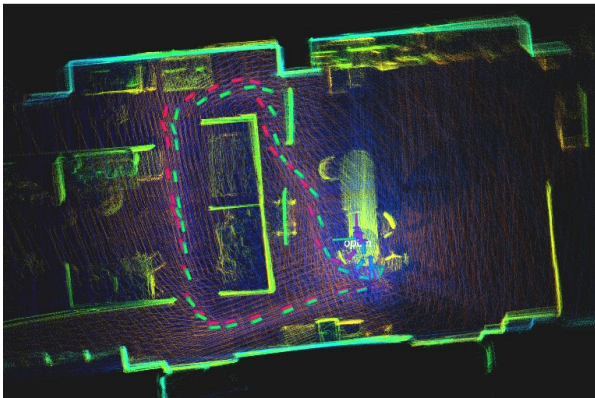


(c)

図8 誤差の増加が確認された位置の実行結果
航空写真(a)、従来法 LOAM により得られた点群
(b)および提案手法により得られた点群(c)



(a)



(b)

図9 ループクロージャの屋内における実行結果

(a) ループクロージャ実行前の位置姿勢（赤色マーカ），および周辺の点群．(b) ループクロージャ実行前の位置姿勢（赤色マーカ），ループクロージャ実行前の位置姿勢（緑色マーカ），および周辺の点群

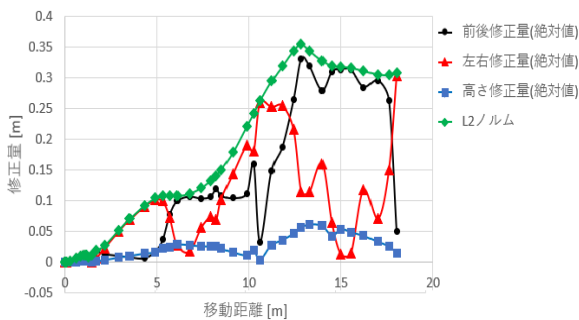


図10 ループクロージャによる位置修正結果

ている．図10におけるL2ノルムとは，全方向に対する修正量のL2ノルムを表示したものである．本実験の結果として，走行距離に対して修正量のノルムが増加した．さらに，図10における前後方向の修正量は，走行距離12~14m程の地点において増加した．図10における左右方向の修正量は，走行距離0~10mの地点で増加した．

5. 考察

実験結果4-1において，整地環境での点群推定結果は，従来法と提案手法の点群推定結果は同程度であった．

実験結果4-2では，提案手法がより安定した点群推定が可能であった．その一方で，自己位置推定誤差が一部増加した箇所があり，生垣の輪郭が多重に検出された．誤差の要因として，不整地における凹凸面走行により，ロボットに大きな角速度が入力されたことが一つの原因である可能性が高い．大きな角速度の入力により，センサの遅れによる姿勢推定誤差の増加，LiDARによる形状の取得密度が小さい箇所が発生するため，自己位置推定に一部失敗した可能性がある．さらに別の要因としては，NDTによる生垣の平面近似結果が，実際の形状と大きく異なる箇所があり，マッチングによる自己位置姿勢速度の推定に誤差が残った可能性がある．本手法では，ボクセル内点群の多いボクセルほど，自己位置姿勢速度の推定に寄与する手法を構築しているため，一時的に推定誤差が増加し推定された点群に外れ値が発生した場合においても，誤差の影響が低減できる．さらに，事前に得られた速度推定結果を利用することで，平面近似が実際の形状と大きく異なる環境においても，自己位置推定誤差の低減が可能となっている．

実験結果4-3では，走行距離に対して修正量のノルムが増加した（図10）．これは，手法3-2が，事前の位置推定結果を使用する手法であるため，移動量に伴い位置推定誤差が蓄積することに起因している．前後方向，左右方向の修正量が増加した原因について実行結果を見直したところ，スキャンマッチングの誤差が残る箇所は，角などの凹凸面が多く存在する形状に囲まれた場所であった．このような環境では，NDボクセルによる平面形状近似が一部不十分となる．スキャンマッチングの位置，姿勢，および速度の推定精度をより向上させるには，凹凸のある面においてはNDボクセルのサイズを自動的に小さくするといった方法を導入することで，さらに高精度な3次元地図作成が可能である．

6. 結言

本研究では，移動ロボットおよび車両に搭載することを目的とした自律移動モジュールの開発を行った．平成30年度の取り組みとして，自律移動に必要とされる，屋外不整地においても使用可能な3次元地図作成手法を開発した．屋外整地環境および屋外不整地環境において，その点群推定結果を従来法と比較した．結果，屋外整地環境では従来法と同程度の点群推定精度であり，屋外不整地環境では，従来法と比較して，自己位置推定および点群の推定が破綻することなく実施することが可能であ

ることが分かった。さらに自己位置推定および3次元地図の精度の向上が可能なループクロージヤを実装し、屋内において自己位置推定および点群の推定実験を行ったところ、蓄積した誤差の修正が可能であることを確認した。

今後の展開としては、3次元地図を利用し、自律走行手法を開発することを検討している。さらに、手法3-4により求められた走行可能領域を用いて、経路設計、および障害物の回避手法について開発を行っていく予定である。

参考文献

- 1) ROS.org : ROS Wiki. <http://www.ros.org/wiki/> , (2019-5-7 参照)
- 2) M. Kaess, H. Johannsson, R. Roberts, V. Ila, J. J. Leonard, F. Dellaert : iSAM2: Incremental smoothing and mapping using the Bayes tree, Int. J. Robot. Res, Vol.31, pp.217-236 (2012)
- 3) J. Zhang and S. Singh : LOAM: Lidar odometry and mapping in real- time, Robotics: Science and Systems Conference, Vol.2, pp.161-195 (2014)