

農業用水路点検のための遠隔操縦ロボットによる 3 次元マッピングシステムの開発

大分工業高等専門学校 情報工学科

重松 康祐

1. はじめに

日本には約 40 万 km に及ぶ農業用水路が存在しており、その多くが老朽化の進行により、定期的な維持管理の重要性が高まっている⁽¹⁾。中でも狭小なトンネル形状の水路では、人手による点検が困難であり、作業者の安全性や作業効率の面で大きな課題を抱えている。

本研究では、四足歩行ロボットを用いた遠隔操縦型の点検プラットフォームを開発し、水路内部の詳細な 3 次元構造を記録・可視化するマッピング技術の確立を目指している。マッピングには LiDAR (Light Detection and Ranging) センサを搭載し、SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) 技術により自己位置推定と同時に地形の 3 次元地図を構築する。さらに、水路の出入り口など GNSS の受信が可能な箇所では GNSS (Global Navigation Satellite System) による高精度な初期位置情報を取得し、これを基に SLAM の精度を向上させることを試みている。

トンネル内部では曲がりくねった構造や視界の制限により、SLAM によるマッピング、位置推定にドリフトが生じやすいため、GNSS の併用による補正は地図精度の安定化において重要な役割を果たす。また、水路はしばしば山間部などアクセス困難な場所に位置しており、高い走破性を持つ四足歩行ロボットを用いることで、現地まで自走可能であるという利点がある。

点検においては、ひび割れや構造劣化などの検出のために水路の 3 次元形状を高精度に取得する必要がある。そのため、SLAM に基づく地図作成は極めて重要である。図 1 に点検対象となる水路トンネルの一例を示す。

近年、国内外においても同様の技術を用いた事例が増加しており、Boston Dynamics 社の Spot を用いた狭隘空間での LiDAR-SLAM による自律点検⁽²⁾、狭小パイプ内部での歩行を強化学習により実現した事例⁽³⁾、地下配管での打音検査や安定歩行を組み合わせたロボット⁽⁴⁾ など、四足ロボットの点検応用に関する研究が進んでいる。また、西松建設と佐賀大学による自律走行型点検ロボット⁽⁵⁾、農研機構による通水中点検ロボット⁽⁶⁾ など、日本国内でも水路トンネル点検を対象とした先行事例が報告されている。

本研究では、これらの既存技術を基盤としつつ、特に GNSS と SLAM の統合による高精度マッピングの実現に焦点を当てており、農業用水路という特殊な環境における実用的な点検システムの確立を目指している。



図1. 狭小な水路トンネル・水路管

2. 開発したシステムの概要

本システムは、Unitree 社製の四足歩行ロボット Go1 に、LiDAR として Livox Mid-360 を、GNSS にはみちびき対応の GNSS (Septentrio mosaic-go CLAS 評価キット) を搭載して構成される。走行時の操作は Wi-Fi による遠隔操縦で行い、将来的には自律走行との切替運用も想定している。なお、現行機では IEEE 802.11ac 等の一般的な Wi-Fi 通信を用いているが、今後の運用においては IEEE 802.11ah (Wi-Fi HaLow) への対応も検討している。Wi-Fi HaLow は従来よりも通信距離が長く、障害物に対する透過性に優れる特長を有しており、トンネル内部や山間部など見通しの悪い環境での通信安定性向上が期待できる。

通信・制御には ROS2 (Humble) を採用し、トピックを通じて LiDAR データや GNSS 情報、ロボットの状態を管理・記録している。LiDAR は 360 度視野を持ち、トンネル内部の壁面や天井を効率よくスキャンできる。GNSS は、CLAS(Centimeter Level Augmentation Service) 方式によって外部基地局を用いずに数 cm の精度を達成できるため、現地設置の手間が少ない利点がある。

運用フローとしては、まずオペレータによる遠隔操縦でロボットを水路トンネル内に進入させ、センサデータ (LiDAR、IMU、GNSS など) をローカルに記録する。現場ではリアルタイムでのマッピングは行わず、主にデータ収集に専念する。その後、取得データを用いてオフライン環境下で SLAM 処理を実行し、詳細な 3 次元マップを構築する。これにより、通信制約や処理負荷の影響を受けずに、高精度な形状データを取得することが可能である。

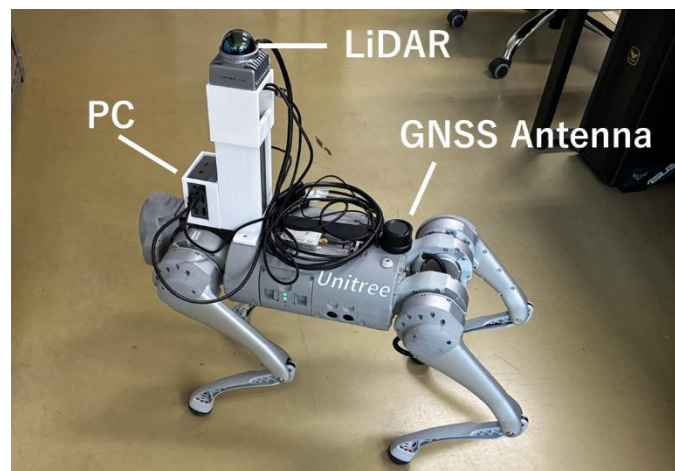


図 2. システムの外観

3. SLAM GNSS

自己位置推定およびマッピングには、Sasaki 氏によるオープンソースの ROS2 パッケージ「lidar slam ros2」⁽⁷⁾をベースとしたグラフベース SLAM に、GNSS 統合機能を追加したアプローチを採用している。本手法では、LiDAR スキャンマッチングによる相対的な位置推定に加えて、トンネル両端の GNSS 観測点を活用した絶対位置補正を行う。

図 3 に本システムの処理フローを示す。まず LiDAR による点群データを取得し、連続フレーム間でのスキャンマッチングを実行する。次に、ロボットの軌跡をノードとエッジで表現す

るポーズグラフを構築する。トンネル入口（ P_1 ）と出口（ P_2 ）で取得した GNSS 位置データを基に、ポーズグラフに対してスケールおよび方位の制約条件を導入している。具体的には、スケール制約として 2 点間距離 $d = \|P_1 - P_2\|$ を、方位制約として方位角 $\theta = \text{Orientation}(P_1, P_2)$ を設定する。最終的に、これらの制約条件下でグラフ全体の最適化を実行する。

この処理により、トンネル内部で蓄積される SLAM の推定誤差を効果的に抑制し、長距離にわたる高精度な 3 次元マッピングを実現する。従来の LiDAR 単独の SLAM では、特に長いトンネルや特徴の少ない環境において累積誤差が問題となるが、本手法では GNSS による絶対位置制約を導入することで、マップの大域的な整合性を向上させることが期待できる。

図 4 に、Teng らのマルチモーダルデータセット⁽⁸⁾を用いた本手法の処理結果を示す。本手法により SLAM が安定して動作し、マップ生成が実行できることが確認された。

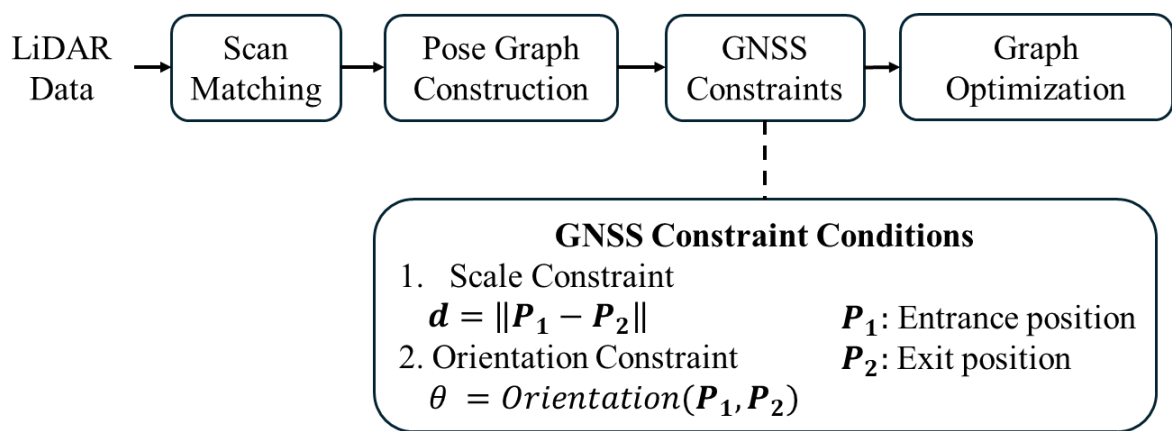


図 3. GNSS-SLAM の処理フロー

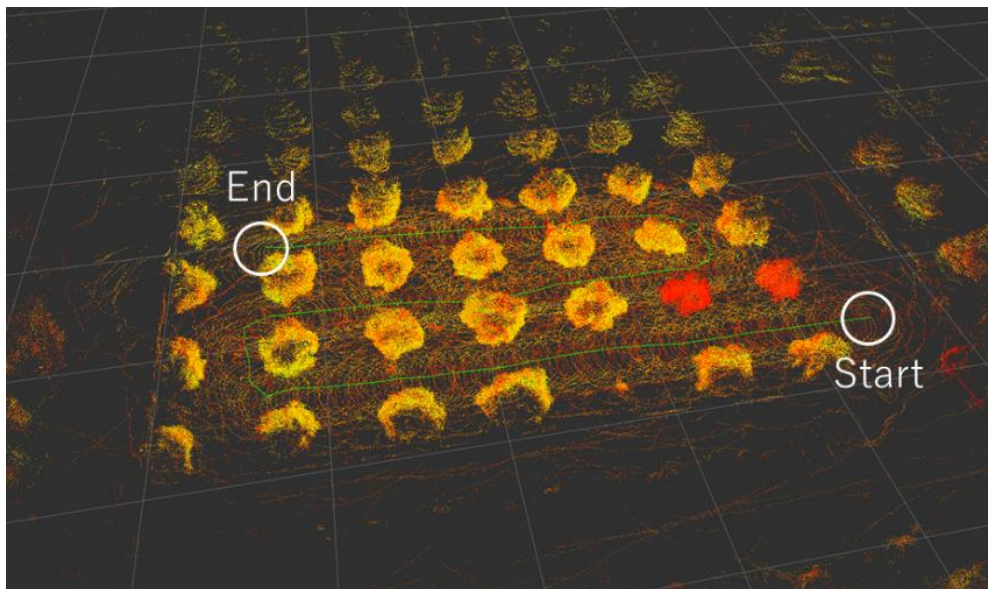


図 4. GNSS-SLAM の処理結果

4. まとめと今後の予定

本研究では、農業用水路の点検を目的とした四足歩行ロボットによる 3 次元マッピングシステムを開発した。Unitree 社製 Go1 に LiDAR (Livox Mid-360) と GNSS (Septentrio mosaic-go CLAS 評価キット) を搭載し、グラフベース SLAM にトンネル入口、出口の 2 点の GNSS 制約を統合したアプローチを実現した。

開発した手法では、トンネル入口と出口の GNSS 位置観測により、スケール制約 (2 点間距離) と方位制約を設定し、ポーズグラフ全体を最適化することで、長距離トンネルにおける SLAM のドリフト誤差を効果的に補正することが期待できる。

現時点では、マルチモーダルデータセット⁽⁸⁾を用いた SLAM 処理の動作確認および地図出力までを完了しており、期待通りの動作が確認されている。次のステップとしては、実際の水路トンネル環境において実地走行を行い、GNSS の取得状況、SLAM 地図の精度評価、通信安定性などを検証する。また、得られた 3 次元マップを用いて、点検対象となる構造物の自動抽出 (例えば、ひび割れ検出や断面形状変化の異常検知) に取り組む予定である。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、(公財) 天野工業技術研究所から多大なご支援を頂きました。ここに記して謝意を示します。

参考文献

- 1) 農 林 水 産 省 関 東 農 政 局 , 「 土 地 改 良 施 設 の 概 要 」 , https://www.maff.go.jp/kanto/nouson/sekkei/kokuei/dogisyo/03_totikairyounouti-nougyouyousui/totikairyou.html, 参照日 : 2025 年 6 月 29 日 .
- 2) Anton Koval et al., "Experimental Evaluation of Autonomous Map-Based Spot Navigation in Confined Environments", Biomimetic Intelligence and Robotics, volume 2, Issue 1, 2022.
- 3) Jing Guo et al., "Learning Quadrupedal Robot Locomotion for Narrow Pipe Inspection," arXiv:2412.13621, 2024.
- 4) Youhyun Jang et al., "Development of Quadruped Robot for Inspection of Underground Pipelines in Nuclear Power Plants", Applied Sciences, vol.11, 2021.
- 5) 西松建設, 「水路トンネルを自律走行し、高精度な画像を取得する水路調査ロボット(turtle)を開発」, <https://www.nishimatsu.co.jp/news/2023/turtle.html>, 参照日 : 2025 年 6 月 29 日 .
- 6) 農研機構, 「通水中の農業用水路トンネルを点検できる無人調査ロボット」, 2015, https://www.naro.go.jp/project/results/laboratory/nkk/2015/15_077.html , 参照日 : 2025 年 6 月 29 日 .
- 7) Ryo Sasaki, "lidarslam_ros2", GitHub, https://github.com/rsasaki0109/lidarslam_ros2, 参照日 : 2025 年 6 月 29 日 .
- 8) Hanzhe Teng, Yipeng Wang, Xiaobao Song, and Konstantinos Karydis, "Multimodal Dataset for Localization, Mapping and Crop Monitoring in Citrus Tree Farms", In Proc. International Symposium on Visual Computing (ISVC), pp. 571–582, 2023. <https://github.com/UCR-Robotics/Citrus-Farm-Dataset>