高精度 GNSS を用いた自律移動草刈りロボットの開発
―第三報　QZSS と Visual SLAM カメラによる位置推定と経路追従実験―

Development of Autonomous Mobile Mowing Robot Using High-Precision GNSS
-3rd Report: Localization with QZSS and Visual SLAM Camera, and Path Following Experiments-

○正　松本耕平（九大）　大城孝弘（OREC R&D Co.,Ltd.）
渡邉　崇（OREC R&D Co.,Ltd.）　下窪　竜（OREC R&D Co.,Ltd.）
小玉尚人（OREC R&D Co.,Ltd.）　正　倉爪　亮（九大）

Kohei MATSUMOTO, Kyushu University, matsumoto@irvs.ait.kyushu-u.ac.jp
Takahiro OHKI, OREC R&D Co.,Ltd.
Takashi WATANABE, OREC R&D Co.,Ltd.
Ryu SHITAKUBO, OREC R&D Co.,Ltd.
Naoto KODAMA, OREC R&D Co.,Ltd.
Ryo KURAZUME, Kyushu University

We have been working on the realization of an autonomous mowing robot to automate weeding work, which is an essential part of agriculture. The robot developed so far can do mowing work in open environments by localization using high-precision GNSS and performing exhaustive sweeping of the work area. This paper reports on the third robot, which is newly equipped with a Visual SLAM camera, and a path following algorithm is implemented to assume use in environments that are difficult to benefit from GNSS.

Key Words: Agricultural Robot, Sensor Fusion, Path Following

1　緒言

人手不足などの社会問題の解決に向け，様々な分野でロボット導入による自動化への期待が高まっている．工場などではロボットを導入することで労働をロボットに代替し，人をより付加価値の高い作業に集中させる事例がある．一方，農業分野は高齢化や後継者不足が顕著であり，自動化による人手不足解消が期待されている．様々な農作業の中でも，除草作業は農作物の生育や農場管理のために必要不可欠であるが，定期的な実施が必要であり，多大な労力が必要，かつ作物の手入れのような職人的な知識や繊細さが不要な作業である．したがって，除草作業をロボットで自動化することで人手不足解決に大きく貢献できる．

これを受けて我々は，除草作業を自動化するために，屋外で自律移動する草刈りロボットの開発を行っている [1, 2]．これまで開発してきた自律移動草刈りロボットは，RTK-GNSS や準天頂衛星システム (QZSS) を利用した高精度測位によって自己位置推定を行い，開けた環境で指定範囲を網羅的に走行することで，草刈りを行うことができる．しかしながら，実際の農作業現場ではビニールハウス内や，木々が生い茂っている果樹園など，GNSS による位置推定が困難であったり，作業領域が狭小な場合も考えられる．

そこで，これまでに開発した 1 号機，2 号機に続き，Visual SLAM カメラを搭載し，経路追従アルゴリズムを実装した 3 号機を開発した．本稿では，この 3 号機に関して，QZSS と Visual SLAM カメラを組み合わせた自己位置推定と，経路追従システムの実験結果について報告する．

2　自律移動草刈ロボット

本節では，開発した自律移動草刈りロボットに構成及び，経路追従アルゴリズムについて述べる．

2.1　ハードウェア構成

開発した自律移動草刈りロボット 3 号機を図 1 に示す．本ロボットは 2 号機 [2] に引き継ぎ，位置推定のための QZSS 受信機 (Chronosphere-L6II：株式会社コア) およびアンテナ (PolaNt-x MF：Septentrio, Inc.)，障害物検出のための 3D-LiDAR (M8-Plus：Quanergy Systems, Inc.)，通信のための Wi-Fi ルータを搭載している．ロボットの左右にそれぞれ独立した三角形のクローラを搭載し，それぞれ駆動用モータにより駆動する．前方に 2 サイクルエンジン，発電用モータ，下部に草刈り用の刃を搭載し，エンジンの動力を用いて発電用モータと草刈り用の刃を回転させる．発電用モータで発電した電力は，後方に搭載している 2 駆動用バッテリに充電される．制御用コンピュータ，QZSS 受信機，3D-LiDAR，Wi-Fi ルータには機体右側に搭載したポータブルバッテリから給電する．さらに 3 号機では，QZSS 単体での位置推定が困難な環境での動作を想定し，Visual SLAM カメラ (SiNGRAY A Exlam80/T) を搭載している．

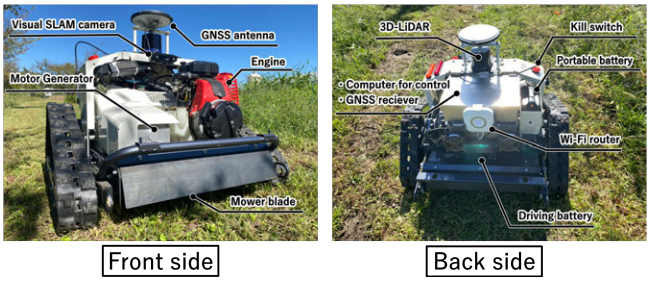

Fig.1 Exterior of the autonomous mobile mowing robot

2.2　ソフトウェア構成

開発した自律移動草刈りロボット 3 号機のソフトウェア構成を図 2 に示す．ソフトウェアは ROS2 を利用して開発されており，大部分は自律移動ロボットナビゲーションフレームワークである Navigation 2 [3] をベースにしている．構成要素の概要を以下に示す．

- **Navigation 2**：3D-LiDAR から取得された点群データをコストマップに反映し，位置推定ノードから得られた位置姿勢情報を用いて，経路計画アルゴリズムによってロボットの誘導を行う．経路計画アルゴリズムは，グローバルパスの計画にダイクストラ法を用いており，ローカルパスの計画には Regulated Pure Pursuit コントローラを使用している．

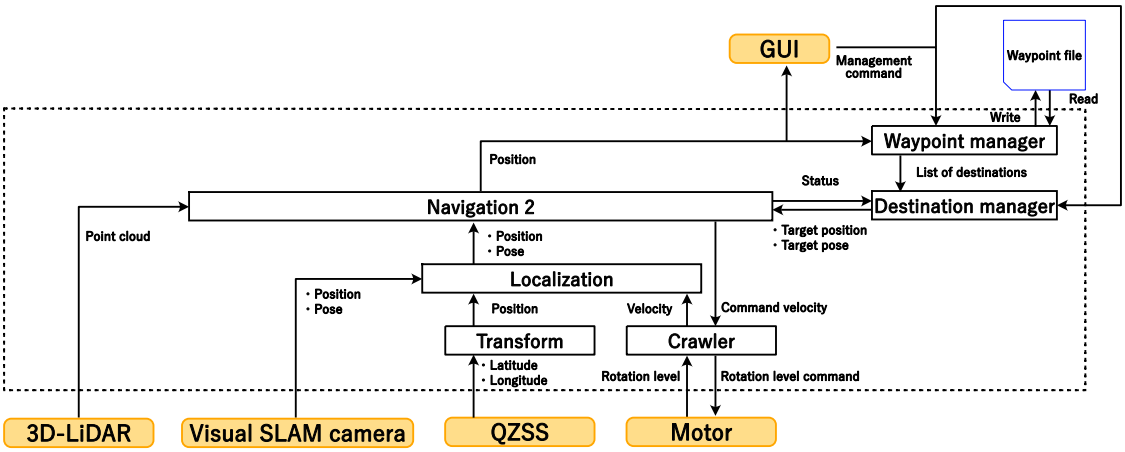

Fig.2 Software configuration diagram of the developed autonomous mowing robot system. Black-framed blocks represent software components and orange blocks represent other elements such as sensors.

- **位置推定ノード**：robot_localization パッケージ [4] の拡張カルマンフィルタを用いて，QZSS，Visual SLAM カメラ，ホイールオドメトリの情報を統合することで位置推定を行う．
- **座標変換ノード**：GNSS によって取得された緯度・経度情報を Navigation 2 内の座標系に変換する．変換には python のライブラリである pyproj を利用している．
- **クローラ制御ノード**：Navigation 2 から出力される速度司令を，正転・逆転のそれぞれ 1 ～ 5 速までの離散的なモータの回転命令 (rpm) に変換し，モータへ出力する．また，モータから得られる回転数情報を並進速度，回転速度に変換し位置推定ノードに送る．
- **経由点管理ノード**：経路追従するための経由点情報を取得・管理する．経由点情報のファイルへの書き出しや，読み込みを行う．
- **目標位置管理ノード**：ロボットが次に目指す目標位置を管理する．経由点管理ノードから得られる経由店情報をもとに，ロボットが追従すべき位置姿勢を計算し，navigate_to_pose アクションによって Navigation 2 に経路計画を実行させる．
- **GUI**：Mapviz [5] をベースにしており，ロボットの位置情報や，追従する経路情報を可視化する．また，経由点管理ノードや，目標位置管理ノードに対して命令を送り，経由点の取得や，追従作業の開始を制御する．

2.3 経路追従アルゴリズム

本研究では，経路が狭い環境において，ロボットが草刈作業を実行できるようにするため，経路追従のアルゴリズムを実装した．経路追従による自動草刈作業は，以下の手順で実行される．それぞれの手順の開始や修了，経由点情報のファイルへの書き出しや読み込みは GUI によって制御される．

1. **経路情報収集**：利用者が手動でロボットを動かし，追従して欲しい経路情報を収集する．収集する情報は，位置推定によって計算されたロボットの位置情報を，緯度経度に変換したものであり，ロボットの移動に応じて一定間隔で収集される．
2. **経由点サンプリング**：収集した経路情報から，経由点をサンプルする．navigate_to_pose アクションで自律移動を行う場合，ゴール判定が必要になる回数をできるだけ減らす方が効率が良い．そこで，ロボットが方向転換する必要がある位置を重要な経由点とみなし，優先的にサンプルする．このサンプリングは，各経由点が同一直線上に存在するかを判定し，同一直線上の端点を取り出すことによって行われる．経由点サンプリングの例を図 3 に示す．
3. **経路追従草刈り**：経由点を逐次的に navigate_to_pose アクションの目標位置として設定し，自律移動しながら草刈を行う．

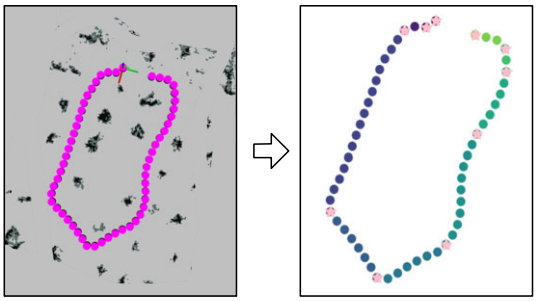

Fig.3 Example of waypoints sampling. The purple markers on the left window represent the collected path information, and the pink stars on the right window describe points that are considered as important waypoints. In addition, the points displayed in the same color in the right window are determined to be on the same straight line.

3 実験

本説では，QZSS と Visual SLAM カメラを利用した位置推定実験と，経路追従の動作確認実験について報告する．

3.1 位置推定実験

本実験では，3 つの農場にてロボットを手動で動作させ，QZSS のみでの位置推定結果と，QZSS と Visual SLAM カメラを組み合わせた場合の位置推定結果を比較する．各農場の様子を図 4 に示す．3 つの農場はそれぞれ以下のような特徴を持っている．なお，本実験の結果の表示に用いている地図画像は Google Maps Platform [6] を用いて作成したプログラムにて取得している．

- **農場 A**：骨組みが太く密なビニールハウスと棚があり，均等に木の葉が茂っている．
- **農場 B**：骨組みが太く密なビニールハウス (骨組みのみ) と棚があり，木の葉があまり茂っていない．
- **農場 C**：骨組みが疎な棚があり，ところどころ木の葉が茂っている．

図 5 に QZSS のみで位置推定した場合の結果の軌跡を示す．この結果より，比較的開けた環境である，農場 B と農場 C では多くの場合，安定した測位結果である Fix 解が得られており，位置推定が安定していることが分かる．しかし，農場 A は上方が覆われているため， Fix 解の割合が少なく，軌跡もばらついていることが分かる．

Fig.4 Pictures of each farm

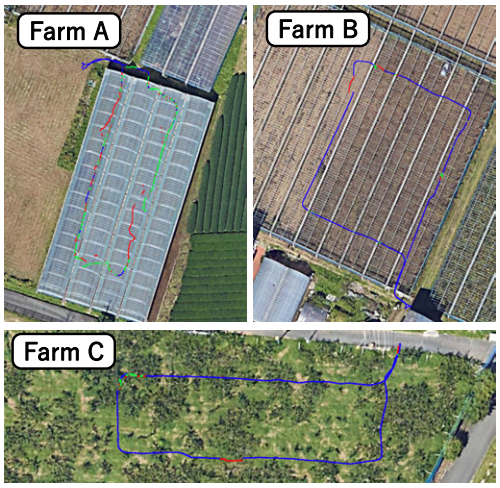

Fig.5 Trajectories of localization results using QZSS. The blue and green markers describe the fixed and float solutions, respectively, and the red markers describe independent solutions.

図 6 に QZSS と Visual SLAM カメラを組み合わせた場合の位置推定結果の軌跡と，QZSS のみでの位置推定結果の軌跡を示す．QZSS と Visual SLAM カメラを組み合わせた場合，特に QZSS のみでの位置推定結果が不安定であった農場 A において，軌跡のばらつきが抑制されており，位置推定がより安定していることが分かる．

3.2 経路追従実験

本実験では，開けたテスト環境とビニールハウス内にて，経路追従アルゴリズムの動作を確認した．

3.2.1 開けたテスト環境での実験

図 7 に経路追従実験を行う，開けたテスト環境を示す．この環境は，最も狭いところで道幅 1.1m ほどであり，開けた環境であるため，QZSS によって精度良く位置推定ができる．また，実験結果を図 8 に示す．この結果より，実装したアルゴリズムによって経路追従タスクが実行できることを確認した．

3.2.2 ビニールハウス内での実験

実験を行ったビニールハウスの様子を図 9 に示す． この環境では，QZSS によって安定した測位結果を得ることが難しく，経路の途中で間隔 1.5m 程度の柱の間を通り抜ける必要がある．実験結果を図 10 に示す．この実験では，経路追従の途中で柱と

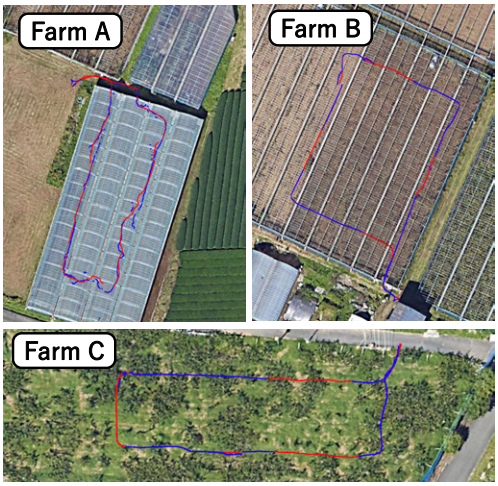

Fig.6 Comparison of localization between QZSS and the Visual SLAM camera combined and QZSS only. The red markers describe results using QZSS and the Visual SLAM camera. The blue markers describe results using QZSS only.

Fig.7 Environment for the path following experiment. The orange line describes the path that the robot is going to follow.

衝突しそうになり，最終地点まで到達することができなかった．ロボットが停止した地点の様子を図 11 に示す．この図のように，ロボットが本来通過するべき経路から，0.5m ほどずれてしまっていたためこのような結果となった．これは，位置推定の誤差によるものであると考えられる．この実験により，経路中にロボットが移動できる範囲が狭い部分があり，QZSS が有効に利用できない環境では，経路追従を完遂することが困難であり，無線ビーコンなどの他の手法を併用する必要があることが分かった．

4 まとめと今後の課題

我々は，農業分野の人手不足改善と生産性向上を目指し，自律移動草刈りロボットを開発している．新たに開発した 3 号機は，Visual SLAM カメラを搭載し．経路追従タスクが実行可能である．実験により，Visual SLAM カメラを QZSS と組み合わせることで，QZSS 単体での位置推定が不安定な環境での，性能が改善できることを確認し，実装した経路追従アルゴリズムの動作を確認した．また，ビニールハウス内のような，上方が完全に覆われているかつ，道幅も狭い部分があるような環境では，課題が残ることも確認した．

今後は，実際の農場での経路追従による草刈り実験や，今回達成できなかった，上方が覆われてかつ，道幅も狭いような．より精度が求められる環境での位置推定精度の改善に取り組んでいく．

謝辞

本研究の一部は，内閣府が進める「戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 第 2 期/フィジカル空間デジタルデータ処理基盤」(管理法人：NEDO) によって実施されました．

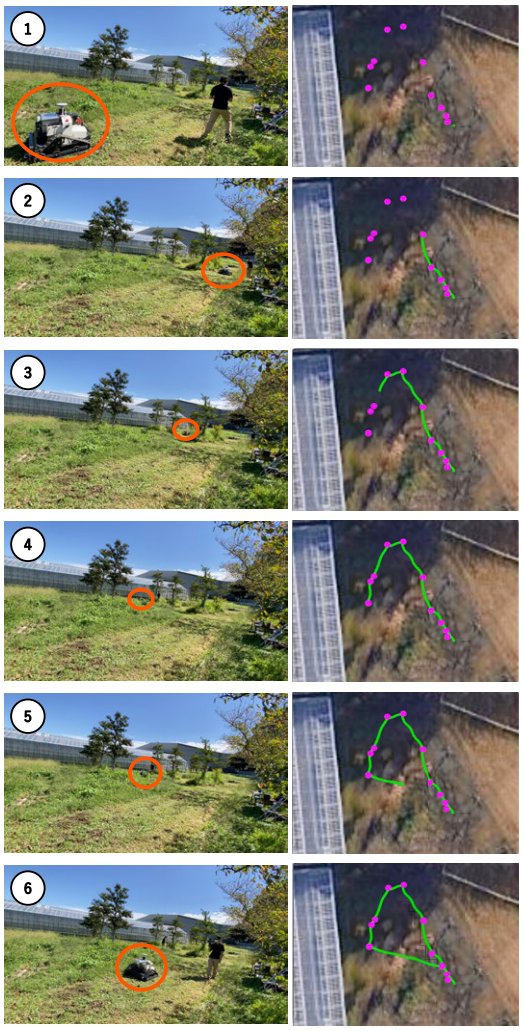

Fig.8 Result of the path following experiment (Map images were obtained by Mapviz). The orange circles describe the robot's position in each picture. The purple markers describe waypoints and the green trajectory describes the movement of the robot.

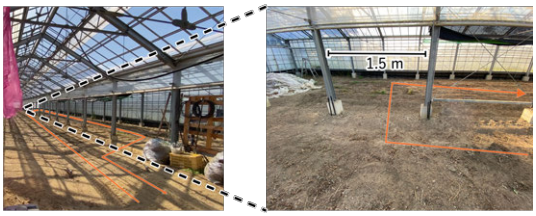

Fig.9 Environment for the path following experiment in a greenhouse. The orange line describes the path that the robot is going to follow.

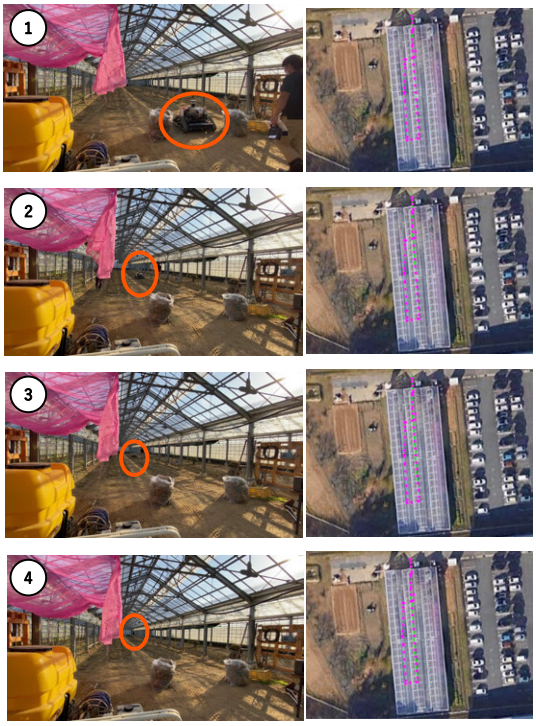

Fig.10 Result of the path following experiment (Map images were obtained by Mapviz). The orange circles describe the robot's position in each picture. The purple markers describe waypoints and the green trajectory describes the movement of the robot.

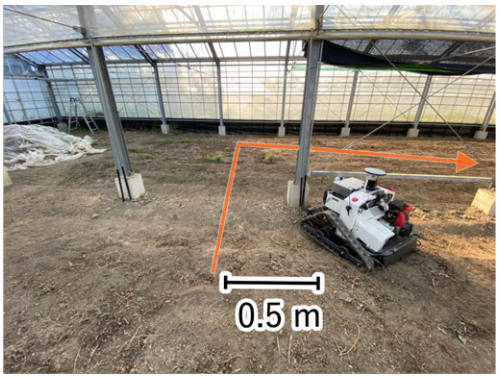

Fig.11 Stopping position of the robot in path following experiment in a greenhouse. The orange line describes the correct path.

参考文献

[1] 林拓真, 大城孝弘, 渡邉崇, 下窪竜, 小玉尚人, 倉爪亮. 高精度 GNSS を用いた自律移動草刈りロボットの開発. 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会 2021, pp. 1P2–A12, 2021.

[2] 林拓真, 大城孝弘, 渡邉崇, 下窪竜, 小玉尚人, 倉爪亮. 高精度 GNSS を用いた自律移動草刈りロボットの開発. 第 22 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 SI2021, pp. 1G3–05, 2021.

[3] Steven Macenski, Francisco Martin, Ruffin White, and Jonatan Ginés Clavero. The Marathon 2: A Navigation System. In *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2020.

[4] T. Moore and D. Stouch. A Generalized Extended Kalman Filter Implementation for the Robot Operating System. In *Proceedings of the International Conference on Intelligent Autonomous Systems (IAS)*, 2014.

[5] Home | Mapviz. `https://swri-robotics.github.io/mapviz/`. (2023 年 3 月 7 日アクセス).

[6] 位置情報 API | Google Maps Platform | Google Cloud. `https://cloud.google.com/maps-platform/`. (2023 年 3 月 7 日アクセス).