

高精度 GNSS を用いた自律移動草刈りロボットの開発 —第二報 QZSS と ROS2 を用いたシステム構築と実証実験—

○林 拓真 (九州大学), 大城 孝弘 (OREC), 渡邊 崇 (OREC),
下窪 竜 (OREC), 小玉 尚人 (OREC), 倉爪 亮 (九州大学)

Development of Autonomous Mobile Mowing Robot Using High-Precision GNSS -2nd Report: Development of System using QZSS and ROS2 and Field Experiment-

○Takuma HAYASHI (Kyushu University), Takahiro OHKI (OREC Corporation),
Takashi WATANABE (OREC Corporation), Ryu SHITAKUBO (OREC Corporation),
Naoto KODAMA (OREC Corporation), and Ryo KURAZUME (Kyushu University)

Abstract : In this research, we developed an autonomous mowing robot. The robot is equipped with QZSS MICHIBIKI for centimeter-level positioning using CLAS and 3D-LiDAR for obstacle detection. Navigation2 in ROS2 is adopted for automatic planning and motion control toward multiple targets. We conducted a field experiment for automatic weeding by the developed autonomous mowing robot.

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単純作業や 3K 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、農業分野でも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。

我々は、数多くある農作業の中でも除草作業に注目した。除草作業は農作物の生育や農場の管理のために必要不可欠であるが、多大な労力が必要で付加価値の低い作業である。そこで我々は、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を開発している [1]。

ロボットを自律移動させるためには、ロボットの正確な位置を推定すること、動的に変化する環境を正しく認識して人に危害を加えないこと、目的地に向かって計画した経路通りに移動装置を制御することが求められる。特に、果樹園など木の枝葉にロボットが隠れてしまう環境での正確な位置推定は難しく、様々な研究が行われている [2, 3]。

[1] で開発した草刈りロボットでは、これらの解決のため、高精度で位置推定が可能なネットワーク型 RTK-GNSS を用いた。また、ROS を用いて経路計画や運動制御システムを開発していた。しかし、僻地など携帯電話のネットワークを利用できない場所ではネットワーク型 RTK-GNSS を使用できない。また、ROS も今後は ROS2 に置き換えられると考えられる。

そこで本稿では新たに開発した草刈りロボットについて

報告する。このロボットでは準天頂衛星システム「みちびき」(QZSS) のセンチメートル級測位補強サービス (CLAS) を利用し、また、制御システムに Navigation2 などの ROS2 を全面的に採用した。また、開発したロボットの有効性を確認するため、屋外フィールドでの自動草刈り実験の結果を報告する。

2. 自律移動草刈りロボット

我々は、ネットワーク型 RTK-GNSS や QZSS といった高精度 GNSS, 3D-LiDAR, ROS2, Navigation2 を用いた自律移動草刈りロボットを開発している。システム全体の概略を Fig. 1 に示す。ユーザはロボットに対して農業クラウドのアプリケーションを通して作業を指示し、ロボットの状態を確認できる。また、農業クラウドは作業計画・作業記録・農機具メンテ情報を処理する。さらに、クラウドはロボットに対して作業指令を出し、ロボットはクラウドに作業状況を送信する。

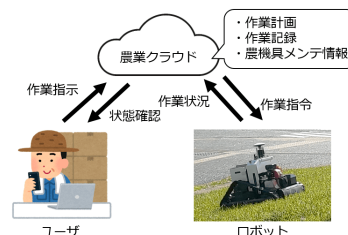


Fig. 1: System concept

2.1 ハードウェア構成

ロボットのハードウェア構成を Fig. 2～6 に示す。

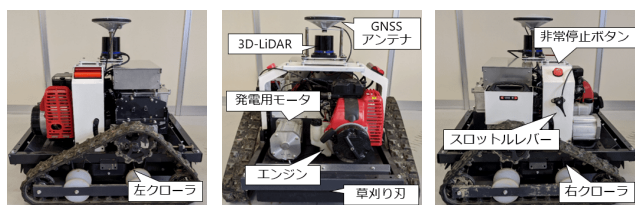


Fig. 2: Left side Fig. 3: Front side Fig. 4: Right side

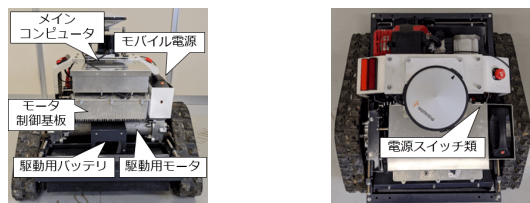


Fig. 5: Back side

Fig. 6: Upper side

[1] で開発したロボットと同様に、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気は後方に搭載している 24 V の駆動用バッテリーに充電される。また、エンジン等が計測の邪魔にならない高さに 3D-LiDAR を搭載し、電波ができる限り遮蔽されない最上部に GNSS アンテナを搭載する。さらに、駆動用バッテリー上部の箱の中に駆動用モータ制御基板、メインコンピュータ、GNSS 受信機、LTE ルータを搭載する。メインコンピュータ等は右側に搭載したモバイル電源から給電する。

2.2 ソフトウェア構成

ロボット制御ソフトウェアは ROS2 Foxy を用いて実装した。ROS2 を用いた開発では、多数公開されているオープンソースパッケージを組み合わせることでコーディング作業を減らし、パラメータ調整のみで複数のロボットに対応できるため、開発ペースを向上できる。

なお、[1] で開発したシステムでは ROS melodic を用いていたが、本システムでは今後普及が見込まれている ROS2 を採用した。これに伴い、ROS で開発していた制御プログラムを全面的に見直し、ROS2 で適切に動作するよう新たに構築した。

2.3 CAN によるクローラー制御

左右の 2 つのモータの回転数を制御するモータ制御基板＝メインコンピュータ間は CAN で接続した。ROS2 のトピックと CAN メッセージを変換するパッケージ“socketcan_bridge”を利用して、CAN メッセージの送受信を行う。モータは正回転と逆回転のそれぞれについて 1 速、2 速、...、5 速と段階的に回転数を調節でき、メインコンピュータから左右それぞれのモータの目標回転数を指令し、モータを回転させる。また、モータからはモータの回転速度 (rpm) と回転方向が送信される。

ROS2 の移動速度指令トピックは並進速度と回転速度で構成されており、これから左右それぞれのモータに必要な回転速度を計算し指令する。また、それぞれのモータから得られる回転速度から、ロボットの並進速度と回転速度を推定し、これをホイールオドメトリとする。

[1] で開発したロボットでは機体下部の草刈り用の刃の回転の開始と停止は機体に取り付けられたハンドルによる手動操作だったが、本システムでは CAN メッセージによって操作可能になった。

2.4 高精度 GNSS を用いた位置推定

ロボットの位置推定のために、誤差最大 5cm 程度で測位可能な高精度 GNSS を使用する。GNSS モジュールとアンテナは、コア社製多周波マルチ GNSS 受信機“Chronosphere-L6 II”と Septentrio 社製多周波アンテナ“PolaNt-x MF”を使用し、ネットワーク型 RTK-GNSS[4]では docomo IoT 高精度 GNSS 位置情報サービスを利用する。また、この受信機は準天頂衛星システム「みちびき」(QZSS) によるセンチメートル級測位補強サービス (CLAS) も利用可能であり、ネットワーク型 RTK-GNSS と QZSS-CLAS を状況によって使い分ける。例えば、都市付近の農地ではネットワーク型 RTK-GNSS を使用し、携帯電話の電波が届かない山間部の農地ではネットワーク型 RTK-GNSS を利用できないため、QZSS-CLAS を使用する。

GNSS 受信機からのデータをトピックとして出力する ROS2 パッケージとして、“nmea_navsat_driver”をカスタマイズした“tms_ss_gnss”を利用する。

GNSS はアンテナ上部が開けている環境では多くの衛星を捉え、正確に測位できるが、果樹園やビニールハウス内では GNSS のアンテナ上部を枝葉が覆い、測位精度が下がることが [1] の実験 1 より分かっている。そこで、GNSS の測位結果とホイールオドメトリのデータを拡張カルマンフィルタ [5] に入力し、GNSS の測位精度が下がったときにホイールオドメトリによって推定位置を補正する。拡張カルマンフィルタの ROS2 パッケージとして、“robot_localization”を利用する。

2.5 障害物検知

ロボットはあらかじめ登録されたマップに従って自律移動するが、農園内にマップ作成時には存在しなかった物が置かれていたり、人がいる可能性があるため、危害を加えないように、これらを検知する必要がある。

そこで、[1] で開発したロボットと同様に、3D-LiDAR を用いて障害物検知を行う。3D-LiDAR はレーザを利用するため、夜間や光源の位置に関わらず周囲の環境を認識できる。使用した 3D-LiDAR は Quanergy Systems 社製 M8 である。鉛直方向に 8 つ LiDAR を搭載し、水平方向は 360 deg、角度分解能は 0.03 deg で測定可能である。

また、取得した 3 次元点群データのうち、ロボットの高さ (地表～1m) の範囲の点群を 2 次元に落とし込み、障害物を経路計画で使用するマップに反映する、

2.6 経路計画と移動制御

2.6.1 Navigation2

ROS2 の Navigation2 を利用し、ロボットを自律移動させる。[1] で開発したシステムでは ROS を利用していたため Navigation Stack を利用していたが、本システムでは ROS2 を利用するため、後継の Navigation2 を利用する。環境地図、センサの出力、ロボットの現在の位置姿勢、目標位置姿勢を入力する。まず、環境地図と 3D-LiDAR のデータからコストマップが計算される。次に、ダイクストラ法を用いてグローバルパス、Dynamic Window Approach[6] を用いてローカルパスが計算される。最後に、ロボットの移動速度指令が出力される。

2.6.2 複数目標位置姿勢

Navigation2 を利用することで 1 つの目標位置姿勢に到達できるが、草刈りロボットはそれだけではなく、農園内を隈なく走行する必要がある。そこで、複数の目標位置を一括で登録し 1 つずつ順番に Navigation2 の目標位置姿勢を指定するノード “nav_manager” を開発した。[1] で開発したノードを ROS2 で動作するように改変した。Navigation2 の移動アクション “navigate_to_pose” を用いて 1 つ目の目標位置姿勢を指定する。アクションの実行結果から目標位置姿勢に到達したことを検知し、次の目標位置姿勢を指定する。これを繰り返すことで複数の目標位置に自律移動できる。また、移動の一時停止、再開、停止の機能も実装した。一時停止指令を受けるとアクションのキャンセル機能を用いて目標位置姿勢をキャンセルし、移動再開指令を受けると再び同じ目標位置姿勢を指定する。

2.6.3 草刈り順路計画

nav_manager により複数の目標位置姿勢への自律移動を実現したが、除草作業では農園内を隈なく走行する必要がある。走行する目標位置を全て手で指定する作業は大きな手間である。そこで、除草作業を行う範囲を指定すると目標位置姿勢を自動で計算するノード “mow_planner” を新規開発した。mow_planner の動作イメージを Fig. 7 に示す。除草作業範囲を示すトピックを受け取る (1) と、まず、 x と y の最小値と最大値を計算し (2)、草刈り刃の直径を幅とするグリッドを作成する (3)。次に、頂点 $A[i]$ と $A[i+1]$ を結ぶ線分が通過するグリッドをマークする (4)。その次に、グリッドの各列に対して、両端のマークを残し、間のマークを外す (5)。そして、マーク済みグリッドを順番に配列に入れていき、目標位置リストとする (6)。最後に、目標位置リストの $P[i]$ から見た $P[i+1]$ の方向を計算し、姿勢情報を付加した目標位置姿勢リストを作成し、nav_manager への指令トピックとして送信する。

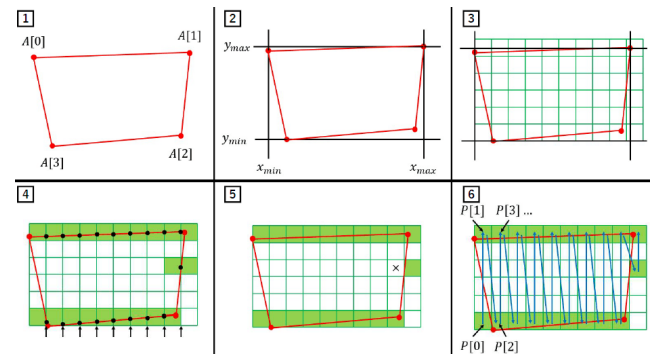


Fig. 7: Algorithm of mow_planner

2.6.4 可視化ツール

除草作業範囲の指定やロボットの現在位置の表示のために、Google マップの航空写真を表示できる可視化ツール “mapviz” (Fig. 8) を使用する。任意の Empty 形式のトピックを送信する mapviz 用のプラグインを開発した。これを利用し、移動の開始・停止、草刈りの開始・停止のトピックを送信する。また、除草作業範囲を示す Polygon 形式のトピックを送信する。さらに、Marker 形式のロボットの現在位置を可視化する。



Fig. 8: mapviz

3. 自動草刈り実験

開発したロボットが自律移動し、指定した範囲内の除草作業をできるか確認する実験を行った (Fig. 9)．実験は九州大学伊都キャンパス構内の空き地にて実施した．携帯電話の電波が届かない場所だったため、高精度 GNSS は QZSS-CLAS を利用した．また、草の背が高く障害物と検知してしまうため 3D-LiDAR は使用しなかった．

まず、mapviz を利用して四角形の除草作業範囲を指定し (1)、除草作業の順路を正しく生成できることを確認した (2)．次に、高精度 GNSS とホイールオドメトリを組み合わせて位置推定を行い、計画した経路通りに自律移動できることを確認した (3)．また、最初の目標位置に到達後、次の目標位置に向けての移動を開始し、複数目標位置姿勢への自律移動ができることを確認した (4-8)．さらに、走行中に経路上の草を刈り取れることを確認した．

4. まとめと今後の課題

我々は農業分野の人手不足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．高精度 GNSS、3D-LiDAR、ROS2、Navigation2 を利用した自律移動ロボットシステムを開発し、空き地での自動草刈り実験を行った．

現在、果樹園やビニールハウス内での位置推定精度、障害物検知における斜面や背が高い草の誤検知、mow_planner の計画における制限が課題である．そこで今後は、LiDAR による SLAM を組み合わせた位置推定手法の開発、草と障害物の識別手法の開発、mow_planner の改良を行い、果樹園での実証実験を実施予定である．

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．

参考文献

- [1] 林 拓真, 大城 考弘, 渡邊 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, 1P2-A12 (2021)
- [2] Omer Shalev, and Amir Degani: “Canopy-Based Monte Carlo Localization in Orchards Using Top-View Imagery”, *IEEE Robotics and Automation Letter*, Vol. 5, Issue 2, pp. 2403-2410 (2020)
- [3] Steven W. Chen, Guilhermr V. Nardari, Elijah S. Lee, Chao Qu, Xu Liu, Roseli A. F. Romero, and Vijay Kumar: “SLOAM: Semantic Lidar Odometry and Mapping for Forest Inventory”, *IEEE Robotics and Automation Letter*, Vol.5, Issue 2, pp. 612-619 (2020)

- [4] 高須知二: “RTK-GPS 及びネットワーク型 RTK-GPS 測位技術”, *GPS/GNSS Symposium*, Vol. 2007, pp.267-278 (2007)
- [5] Moore Thomas and Daniel Stouch: “A Generalized Extended Kalman Filter Implementation for the Robot Operating System”, *Intelligent autonomous systems 13*, Springer, Cham, pp. 335-348 (2016)
- [6] Fox Dieter, Burgard Wolfram, and Thrun Sebastian: “The dynamic window approach to collision avoidance”, *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 4(1):23-33 (1997)

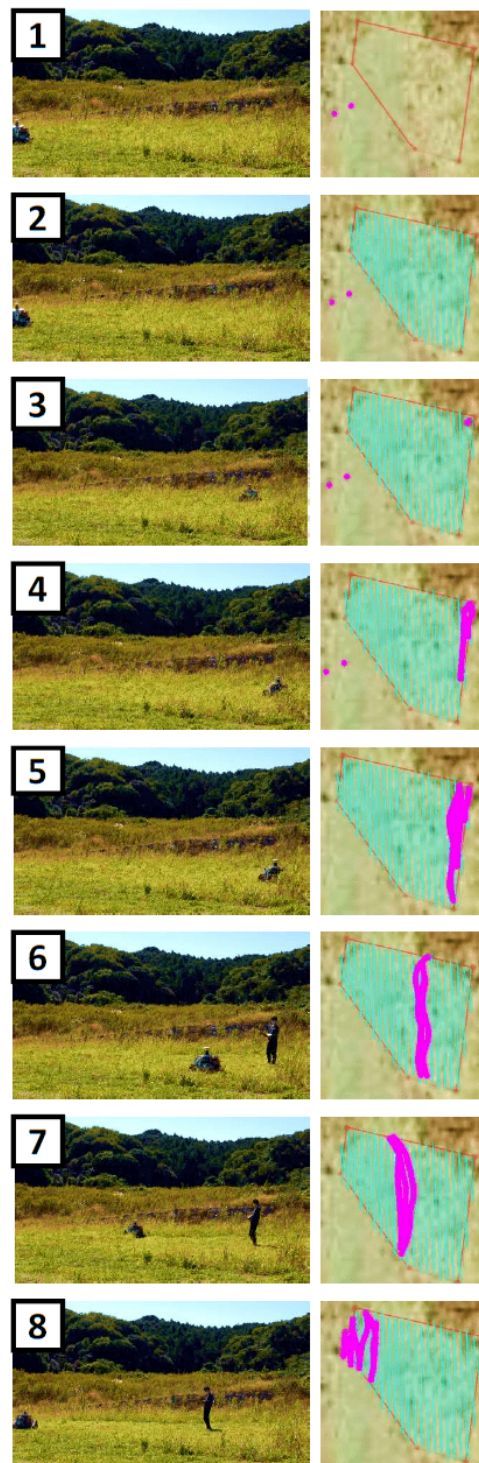


Fig. 9: Automatic mowing experiment