

# 過酷な環境での運用を考慮した 除草作業ロボットの横滑り抑制制御システムの開発

林 倅平・横田 雅司<sup>1)</sup> \*

岡山理科大学大学院理工学研究科修士課程システム科学専攻

1) 岡山理科大学大学情報理工学部情報理工学科

(2024年10月31日受付、2024年12月6日受理)

## 1. 緒言

現在、我が国における農業従事者数の減少と農業従事者の高齢化が少子高齢化の進行に伴い、顕著となっている。食料の安定供給に不可欠な産業である農業分野では、少子高齢化に伴い農業分野における農業従事者の減少や若年層の労働力不足は日本の食料生産基盤を揺るがす大きな問題となっている。農林水産省の農業構造動態調査(標本調査による推計値)によると日本の基幹的農業従事者の推移として、1991年の287.4万人以降減少が続き、2022年には122.6万人と43%も減少している。さらに、基幹的農業従事者の減少だけでなく、従事者の年齢構造も変化してきている。1991年と2022年の基幹的農業従事者数は半数以下となっているにもかかわらず、65歳以上の従事者の割合は27%から70%へと2倍以上増加している[1-3]。つまり、日本の農業は高齢者によって支えられているといっても過言ではなく、更なる農業従事者の減少と高齢化が容易に想像でき、やがて日本の食料供給が不安定になる可能性が考えられる。

高齢者の農業従事を難しくさせる要因の一つとして、除草作業が挙げられる。人と自然が共生するにあたり重要な役割を担う除草作業は、景観を保つだけでなく、農作業において害虫の誘引を抑制する環境の構築や、作物への無駄なき水や養分の分配に寄与し、作物の発育を助ける重要な役割を果たす作業でもある。また、河川敷や堤防では適切な除草作業を行うことで、防犯上の観点からは不法投棄されにくい環境の形成及び犯罪などの誘発を抑制している。除草作業によって堤防の変状を視認しやすくすることで、洪水による災害発生防止に向け、災害予防や堤防の補修を促進し、堤防の状態点検を効果的に実施する手助けとなっている。

このように実生活において重要な役割を果たし、多くの恩恵を受けてくれる除草作業だが、危険性や問題を多く抱えている。この問題を解決するため、多くの研究機関において農業支援を目的とした自律型ロボ

ットの開発が進められている。しかし、急な斜面などの悪路環境において振動や路面摩擦の動的な変化による外乱はロボットに横滑りを生じさせる。このような環境下において生じる横滑りは自律走行の際の直進走行性を損なう大きな要因となっており、この課題を解決すべく、多くの研究機関が横滑り抑制制御に関する研究を行っている[4-11]。クローラの滑りを補償するため従来から様々な研究が行われており、児島らはクローラ型ロボットにおいてロボットの進行方向の滑り特性の検証としてクローラと地面間の摩擦のモデル化を行った[12]。また、吉田らは駆動電流から駆動力を算出し、算出した駆動力情報から滑り率を推定する方法を提案した[13]。これらの手法はロボットの進行方向の滑りのみ考慮しており、ロボットの進行方向と垂直な方向に対する滑りを考慮していないことに加え、滑り率を推定するためには路面とクローラ間の摩擦係数などが必要である。

しかし、本研究で想定している除草作業現場では機構上、刈り取られた草や枝のチップの上を走行することになり、このような路面摩擦が動的に変動する環境においてこれらの手法による滑り率推定は実用的ではない。また、永谷らはロボットの進行方向と垂直な方向に対する滑りを考慮した滑り角を用いた横滑り補償を提案した[14]。これらの制御手法は図2のような横滑り是对応可能である。しかし、図1と図3に示すような姿勢角の変動のない平行移動を含んだ横滑りについて考慮されていない。除草作業現場では刈り取られた草や枝のチップの上を走行するため姿勢角の変動のない雪崩のような図1と図3のような横滑りが起きやすく、上記に述べた提案手法では図1と図3のような横滑りを抑制することができない。

本研究では本機に搭載する直進走行性の向上のための横滑り抑制制御システムの構築と、検証実験を通して本制御システムの有効性を検証する。



図 1 平行移動のみ

図 2 回転移動のみ

図 3 回転移動 + 平行移動

## 2. 除草作業ロボット

### 2-1 除草作業ロボット概要

開発したクローラ型除草作業ロボットの外観図を図4に、主要諸元を表1に示す。本機は、対向二輪駆動型移動ロボットで、左右独立にクローラを駆動させることで超信地旋回が可能であり、不整地においても高い走破性能を有している。本機は農業従事者が運搬しやすいように一般的な軽自動車区分に該当する小型トラックに搭載可能な寸法で設計されている。センサとしては本提案手法に用いる気圧センサ、加速度・ジャイロセンサに加えて、モータの回転数を計測するためのロータリエンコーダ、左右のモータの駆動電流を測定することが可能な電流センサを搭載している。また、24[V]バッテリーによって電源供給が行われており、駆動モータにより最大1200[W]出力可能である。

表 1 主要諸元

Dimensions and weight	Length	800 mm
	Width	950 mm
	Height	660 mm
	Total weight	108 kg
Drive motor	Type	DC Geared Motor
	Voltage	24 V
	Output	600 W
Battery for motor drive	Classification	Pb-acid battery
	Voltage	24 V
	Capacity	20 Ah
Battery for MPU and sensors	Classification	Li-ion battery
	Voltage	14.4 V
	Capacity	6 Ah

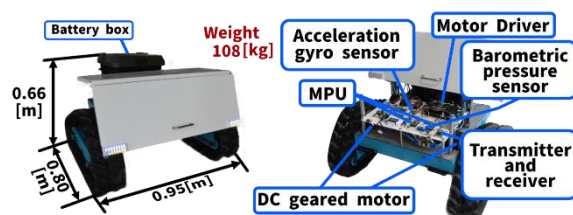


図 4 ロボット概要

本ロボットのシステム図を図5に示す。本機はコントローラで操縦を行い、ZigBee 規格の通信機を用いて行われる。本機はコントローラによって制御を行っている。操縦者がコントローラを操縦し、ロボットの進行方向、駆動モータ速度、制御 ON/OFF コマンドを ZigBee 規格送受信機を通してロボットに指令を送信する。駆動制御処理用とセンサデータ処理用に2つのマイクロコンピュータ(ESP32)を用いており、周期的にセンサデータ処理用マイクロコンピュータがセンサ値を取得・処理を行い、駆動制御処理用マイクロコンピュータに送信する。駆動制御処理用マイクロコンピュータはコントローラから送られてきた指令コマンドとセンサデータ処理用マイクロコンピュータから受信したセンサ値を用いて駆動制御処理を行い、モータドライバに信号を送りロボットを駆動させる構成となっている。

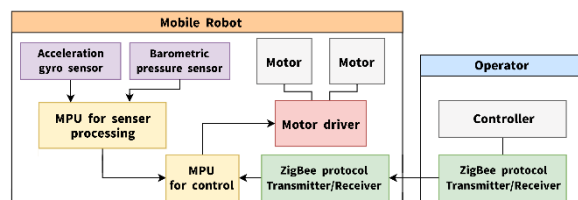


図 5 システム構成図

### 2-2 通信システム

本機における操縦指令は指定のフォーマットによって送信されている。本機はコントローラから ZigBee 規格通信機 Xbee S2C を通して1バイトずつバイナリで動作指令を送り制御している。本機に用いた通信フォーマットを表2に示す。ノイズなどの外乱によってロボットに誤動作が生じないように、最初に0x55のヘッダを2回送信し、次に送信予定のデータ長をバイト数で送信、そのあと動作・速度・制御(有効・無効化)を送信後、チェックサムを送る。受信側はヘッダが正しく2回受信確認できたのち、データ長と送信データからチェックサムを計算し、送られてきたチェックサムと比較し、正しくデータであることが確認でき次第、指令を送る。今回速度データは16ビットデータのため送信時に上位ビットと下位ビットに分割したのち受信側で結合している。

表2 パケットフォーマット

Header	Data length	Action	Speed	Control	Checksum
0x55	0x55	0x05	Lower 8 bits	Higher 8 bits	Control Checksum

### 3. 横滑り抑制制御系

#### 3-1 提案手法

提案した横滑り抑制制御システムを図6に示す。ロボットのyaw軸角度を加速度・ジャイロセンサ、気圧値を気圧センサからそれぞれ計測しフィードバックさせて、PI制御器を用いて制御量を算出したのち、閾値切り替えにより角度制御と気圧制御を切り替えながら横滑りを抑制する。本提案制御系は、横滑りの際に姿勢角のずれを有さない場合に、姿勢角による制御量と気圧値による制御量は相反する制御量を算出する。そのため、図7に示すように、気圧値によって設定した閾値の範囲内に収まっている場合は角度制御のみとなり、気圧値が閾値範囲外になった場合、つまり横滑り変位が大きくなった場合のみ、気圧制御となる閾値切り替えによる制御を用いた。

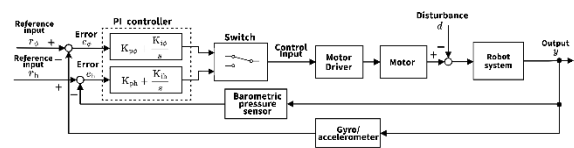


図6 横滑り抑制制御系

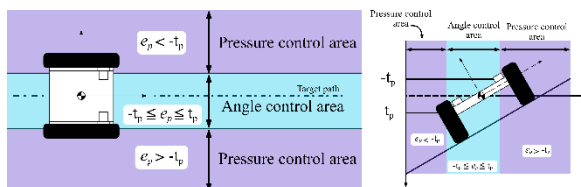


図7 閾値切り替え制御

#### 3-2 横滑り抑制制御検証実験

提案した横滑り抑制制御系の有効性を確認するため図8に示す傾斜角50[deg.]の斜面にて走行実験を行う。本機に直進走行指令コマンドを送り、無制御時と従来の横滑り抑制制御である角度制御時、そして前章で提案した横滑り抑制制御時の3つの条件で実験を行った。実験結果より、無制御時と角度制御時、提案した横滑り抑制制御時の横滑り軌道、横滑り変位をそれぞれ図9と図10に示す。無制御時は重力の影響により斜面を滑り落ち、距離6.0[m]地点に到達する前に斜面下部に到達したため停止させた。また、角度制御時は測定終

了地点付近まで走行することができたが、1900[mm]の横滑りが生じた。そして提案手法は、測定終了地点付近まで走行することができ、横滑りは400[mm]まで抑えることができた。本実験により、距離5.5[m]地点において、無制御時と比較して角度制御時は滑落量を約40%低減できており、提案した横滑り抑制制御時は無制御時と比較して滑落量を約89%低減できていることを確認した。また、提案手法でも400[mm]の横滑りが生じた理由としてセンサの相対誤差や温度ドリフトが考えられる。



図8 横滑り抑制制御実験概要

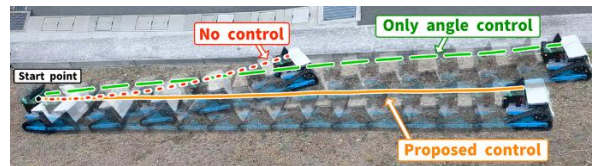


図9 横滑り軌道結果

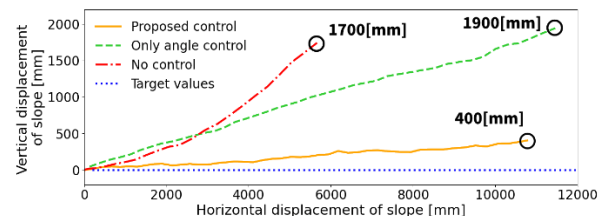


図10 横滑り変位結果

### 4. 気圧センサ補正システム

#### 4-1 システム概要

気圧センサ内部の温度センサにより温度ドリフトは補償されているが、十分にドリフトが補償できていないため、定常状態でも気圧センサ値が下がってしまう問題があることが前章の実験で確認された。そこで、ドローンの高度制御に用いられている気圧センサの校正手法[15]を本システムに構築することでドリフトと外乱に強いシステムを構築する。図11に示すように本機に搭載されている気圧センサと同じ気圧センサを搭載した、設置型気圧センサモジュールを新たに構築した。図12に示すように、ロボットに搭載している気圧センサ値と設置型気圧センサモジュールからの気圧センサ値の差分を気圧センサ値入力としている。

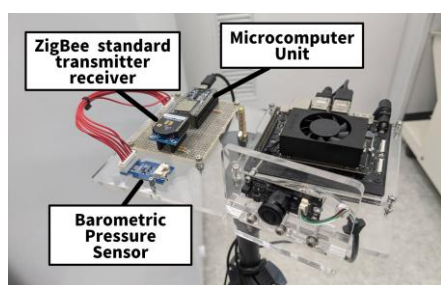


図 11 気圧センサ補正モジュール

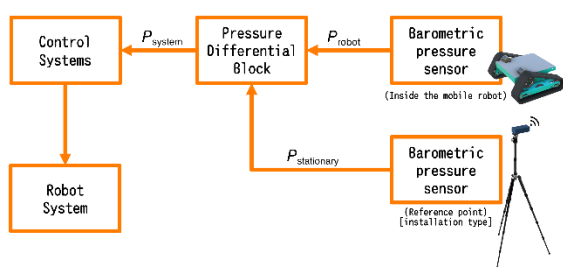


図 12 気圧センサ補正システム

#### 4-2 検証実験

前章で説明したセンサ校正システムについて室内にて検証実験を行った。図 13 に示すように気圧センサを 2 つ用いており、一方を静止(基準点)用、一方を除草作業ロボットに搭載するものと想定し検証実験を行った。今回の検証実験ではロボットに搭載せずに、ロボットに搭載するセンサをステッピングモータによる昇降機によって約 20[cm]ほど上下運動させた。ロボットに搭載する気圧センサのセンサ値と静止用気圧センサのセンサ値によりセンサ値の差分を実際の変位と比較し、検証を行った。実際の気圧センサの高さ変位は、センサモジュールに取り付けられたマーカーを 4 つのモーションキャプチャカメラによって測定したものである。補正システムありと補正システムなしを比較した実験結果を図 14 に示す。本検証により、校正なしの場合は時間経過につれ目標値から値が離れて行っているが校正ありの場合はドリフトが補償できており、実際の変位と同じような値が推定できていることを確認した。

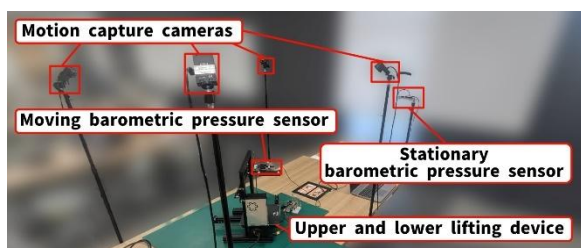


図 13 補正システム検証実験概要

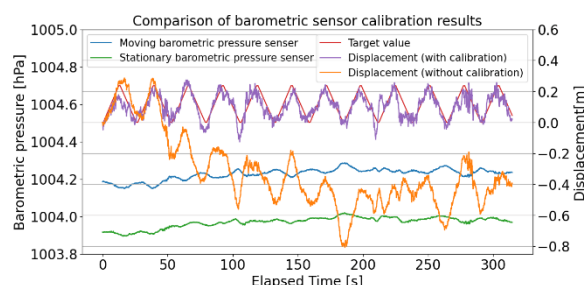


図 14 気圧センサ補正結果

#### 4-3 横滑り抑制制御実験

提案した横滑り抑制制御系の有効性を確認するため傾斜角 10[deg.]のアスファルト斜面にて走行実験を行った。図 15 に実験環境の概要を示す。本機に直進走行指令コマンドを送り、無制御時と従来の横滑り抑制制御である角度制御時、横滑り抑制制御時(設置型気圧の気圧センサモジュールによる補正なし)と横滑り抑制制御時(設置型気圧の気圧センサモジュールによる補正あり)の 4 つの条件で実験を行った。実験結果より、気圧センサの補正によって気圧センサの補正なしと比較して斜面における横滑りが低減できることを確認した。

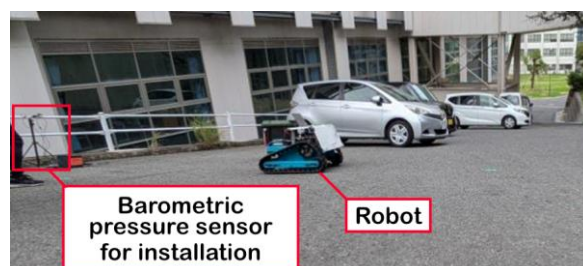


図 15 補正型実験概要

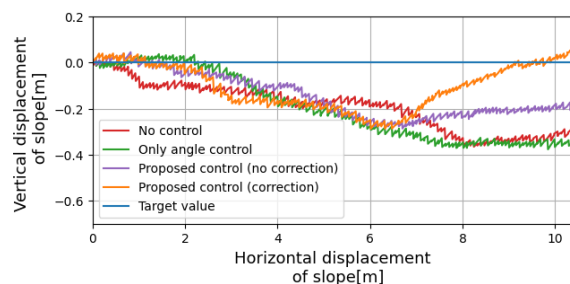


図 16 補正型横実験結果

### 5. 路面摩擦を考慮した横滑り抑制制御系

#### 5-1 路面摩擦によるスリップ

雑草が生い茂る傾斜地では、日照状況、湿度、路面状況(土砂の水分含有量など)によって路面摩擦が変動することが実験で分かっている。前章までの横滑り抑制制御系では路面摩擦までは考慮されていない。そ



のため、路面摩擦が低い場合、つまりスリップが発生しやすい状況の時の不安定性に対応できない。前章までの横滑り抑制制御系は、スリップが発生した際には偏差（横滑り変位）を打ち消すため制御量を大きくし続けるシステムになっている。しかし、スリップ時に制御量を大きくするとさらにスリップ率が大きくなるためスタックする要因になりかねない。そこで、本章では、路面摩擦を考慮した横滑り抑制制御手法を提案する。

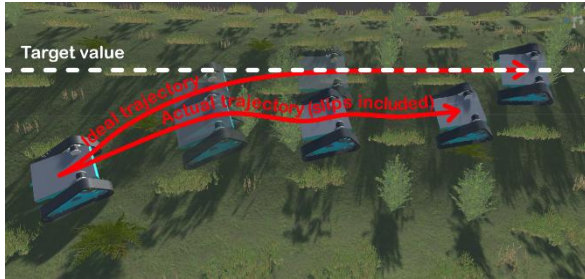


図 17 理想軌道と実際軌道

## 5-2 提案手法

新たに提案する路面摩擦を考慮した横滑り抑制制御系を図 18 に示す。外乱オブザーバに基づき、各モータに加わる外乱トルクを算出し、路面摩擦の推定を行う。左右のモータから算出した路面摩擦を考慮した横滑り抑制制御を行う。

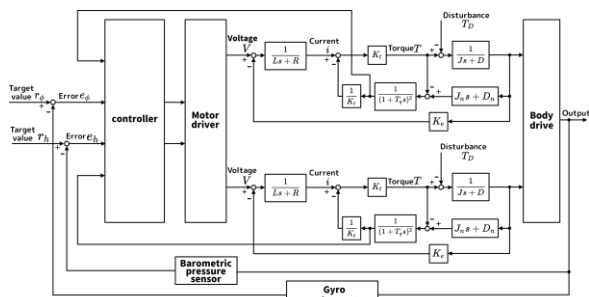


図 18 路面摩擦推定器

## 6. 結言

本研究では、斜面における除草作業ロボットの横滑り抑制制御のため、気圧センサの校正システムを制御系に組み込んだ横滑り抑制制御系の提案及び気圧センサの校正実験を行った。実験結果より、気圧センサの補正によって補正なしと比較して斜面における横滑りが低減できることを確認した。また、新たに路面摩擦を考慮した横滑り抑制制御系の提案を行った。

## 謝辞

本研究は、令和 5 年度および令和 6 年度グリーン成長研究開発プロジェクト創成事業による研究活動費助

成を受けたものである。

## 参考文献

- [1] 農林水産省, “農業構造動態調査長期累年,” 2019.
- [2] 農林水産省, “農業構造動態調査,” 2021.
- [3] 農林水産省, “農業構造動態調査,” 2022.
- [4] M. Yokota, T. Masuda, T. Nozaki, “Guidance system for mobile robot,” The 8th TSME International Conference on Mechanical Engineering, Dec. 2017.
- [5] 平野麻衣子, 天野真輝, 服部義和, 小野英一, 福田光雄, 廣瀬太郎, “GPS と慣性センサを利用した車両姿勢角推定,” 自動車技術会論文集, vol. 46, no. 2, pp. 407–412, 2015.
- [6] G. Ishigami, K. Nagatani, K. Yoshida, “Slope traversal experiments with slip compensation control for lunar/planetary exploration rover,” IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008, vol. 2008, pp. 2295–2300, May 2008.
- [7] 岡田佳都, 永谷圭司, 吉田和哉, “複数センサの融合によるクローラ型ロボットの 3 次元自己位置推定(移動ロボットの自己位置推定と地図構築),” ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, “2P2-C18(1)”-“2P2-C18(4)”, 2008.
- [8] 大谷和彦, 永谷圭司, 吉田和哉, “GPS およびオドメトリ機能を搭載した移動ロボットの不整地フィールドにおける位置推定実験,” 第 10 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論文集, IO2-1, 2009.
- [9] Y. Iwano, D. Sekitori, F. Shi, K. Iizuka, “Research examples of crawler mechanism on the ridge—verification of straight-line stability of the small crawler mobility,” SYSTEMS, CONTROL AND INFORMATION, vol. 65, no. 12, pp. 483–488, Dec. 2021, (in Japanese).
- [10] Y. Iwano, T. Hasegawa, A. Tanaka, K. Iizuka, “Study of trajectory tracking control for mowing system in a ridge,” The Proceedings of JSME annual Conference on Robotics and Mechatronics (Robomec), 2A1-08b4, 2016, (in Japanese).
- [11] 遠藤大輔, 永谷圭司, 吉田和哉, “滑りを考慮したデッドレコニングによるクローラ型移動ロボットの推定位位置精度の向上,” 日本ロボット学会誌, vol. 33, no. 6, pp. 433–440, Aug. 2015.
- [12] 林将大, 石橋良太, 児島晃, “クローラ型ロボットの滑り誤差モデルに関する研究,” 自動制御連合講演会講演論文集, vol. 57, pp. 712–716, 2014.
- [13] 遠藤大輔, 永谷圭司, 吉田和哉, “クローラロボットの自己位置推定を目的とした駆動電流から滑り率を計測する方法の検討,” 日本ロボット学会誌, vol. 33, no. 6, pp.

- 433-440, 2015.
- [14] 今野陽太, 山内元貴, 永谷圭司, “軟弱斜面旋回時におけるクローラ型移動ロボットの横すべり補償制御,” ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 1P2-D08, 2017.
- [15] “Differential Pressure Sensing using ICM-20789 for Altitude-hold in Drons, <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2017/10/AN-000119-Differential-Pressure-Sensing-v1.1-.pdf>

# Development of a Skid Suppression Control System for a Weeding Robot in Consideration of Operation in Harsh Environments

Kohei HAYASHI and Masashi YOKOTA<sup>1)</sup> \*

*Graduate School of Science and Engineering,*

*1) Department of Information Science and Engineering, Faculty of Information Science and Engineering,*

*Okayama University of Science,*

*1-1 Ridai-cho, Kita-ku, Okayama 700-0005, Japan*

(Received October 31, 2024; accepted December 6, 2024)

In Japan, the number of elderly farmers is growing and decreasing rapidly. As a solution to this problem, autonomous weeding robots have gained attention for their potential to reduce the burden of agricultural work. Many types of such devices have been developed by research institutes worldwide. However, actual weeding sites are often on muddy roads, slopes, or other rough terrain, where the sensors and devices used for autonomous operation struggle to obtain accurate data due to vibration noise and other disturbances. As a result, these robots have not yet been widely adopted in practice. Currently, most mowing robots on the market are operator-controlled, requiring the operator to work in hazardous environments.

In this study, we propose a control system that uses a barometric pressure sensor in addition to the conventionally used IMU to reduce skidding when traveling on steep slopes.

**Keywords:** Mobile robot; Agricultural robot; Attitude control.