

2023 年度 情報システムデザイン学系卒業論文

論文番号 ke2023-03

壁面付近の間隙雑草を対象とした
除草ロボットによる除草作業の自動化

河合 悠貴(20RD068)

指導: 神戸 英利 教授

提出日: 2024 年 1 月 1 日

概 要

我々が生活を営む都市環境において大小様々な雑草が見受けられる。このような雑草の多くはコンクリートやアスファルトの劣化によるひび割れや壁面と地面の接合部など特徴的な場所に繁茂する。また、雑草の放置は景観の悪化や交通の安全性低下などの問題が発生する恐れがある。そのため、定期的な除草作業が現在も人間によつて行われているものの、刈払機をはじめとした使用機器による怪我の恐れがあり、非常に危険な作業であるといえる。一方、農業分野では圃場内や周辺環境における除草作業の自動化を目指し、ロボットを用いた様々な研究が行われている。しかし、都市環境特有の壁面と地面により形成される間隙は圃場に存在せず、農業分野の除草ロボットで対処が可能であるか懐疑的である。

本研究ではナイロンコードを用いた除草機構と物体検出が可能なカメラ、さらに壁面との距離をリアルタイムで計測できる距離センサを移動プラットフォームに搭載した除草ロボットを製作し、雑草の検出を行いながら壁面付近に繁茂する雑草の除草作業を自動化することを目的とする。

本研究では壁面を追従しつつ、カメラにより検出された雑草を除草するロボットを作成し、除草作業の自動化が可能であるか評価を行った。雑草を検出し、除草機構であるナイロンコードカッタを動作させることは可能であったが、現状の構成では雑草を十分に処理できないことがわかった。また、壁面の追従では壁面と除草ロボットが接触し、行動不能となることがあった。そのため、より精度の高いセンサを使用することや、複数のセンサを用いて環境認識を行う必要がある。自動化を達成するにはハードウェア、ソフトウェア共にさらなる改良が必要である。

本論文では第1章の序論で研究背景、先行事例・先行研究、課題、研究目的を、第2章で提案手法、第3章で実装、第4章で評価、第5章で考察、第6章で結論を述べる。

目 次

概 要

第 1 章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.2	先行事例・先行研究	4
1.2.1	小型ビニールハウス用雑草除草ロボットの開発	4
1.2.2	農業用栽培管理ロボット	5
1.2.3	舗装道路内の間隙に形成される雑草植生	6
1.3	課題	7
1.4	目的	7
1.5	本文の構成	7
第 2 章	提案手法	8
2.1	システム概要	8
2.2	カメラを用いた雑草認識	9
2.3	距離センサを用いた壁面追従	9
2.4	ナイロンコードを用いた雑草処理	9
第 3 章	実装	10
3.1	概要	10
3.1.1	システムの構成	10
3.1.2	ナイロンコード	15
3.1.3	OAK-D S2	16

3.1.4	Raspberry Pi 4 B (4GB).....	16
3.1.5	ROS2	17
3.2	移動プラットフォームの作成.....	18
3.2.1	台車の作成	18
3.2.2	Raspberry Pi やその他基板の実装・取り付け	21
3.2.3	距離センサの実装・取り付け	23
3.2.4	配線作業.....	25
3.3	ナイロンコードカッタの作成.....	26
3.3.1	回転刃の作成	26
3.3.2	移動プラットフォームへの実装・配線作業	27
3.3.3	回転刃の改良	30
3.4	雑草検出の実装.....	34
3.4.1	Roboflow を利用した雑草検出モデルの作成	34
3.4.2	移動プラットフォームへの実装・配線作業	35
3.5	電源関連の実装.....	38
3.5.1	電源関連の構成図	38
3.5.2	DCDC コンバータを用いた電圧変換	41
3.5.3	移動プラットフォームへの実装・配線作業	43
3.6	ROS2 を用いたシステム統合	47
3.6.1	ROS2 のシステム概要	47

3.6.2	OAK カメラでの雑草検出	49
3.6.3	ナイロンコードカッタの制御	50
3.6.4	距離センサでの壁面間距離の検出	51
3.6.5	駆動輪の制御	52
第 4 章	評価	54
4.1	評価方法	54
4.2	除草ロボットの実装	54
4.3	ナイロンコードカッタの除草性能	54
4.4	1メートルあたりの除草ロボットの移動における衝突回数と時間	57
4.5	雑草の物体検出モデルの性能	59
4.6	除草作業の自動化	60
第 5 章	考察	61
5.1	ナイロンコードカッタの除草性能	61
5.2	除草ロボットの移動	61
5.3	雑草の物体検出モデル	62
5.4	システム全体	62
第 6 章	結論	64
6.1	まとめ	64
6.2	今後の展望	64

第1章 序論

1.1 研究背景

長年に渡り、我々が生活を営む都市環境において大小様々な雑草が見受けられる。このような雑草の多くはコンクリートやアスファルトの劣化によるひび割れや壁面と地面の接合部など特徴的な場所に繁茂している。また、雑草の放置は景観の悪化や交通の安全性低下などの問題が発生する恐れがある。このような現状に対して道路の維持管理を行う行政では道路雑草への対策がおこなわれている。

平成三十一年に熊本市が発行した“熊本市道路除草等基本計画”では道路の維持管理のうち、道路雑草の除草に関する現状と方針が記載されている [1]。図 1 は平成二十四年から平成二十八年における熊本市の道路予算額と除草等決算額の推移を示したグラフである。熊本市では道路予算全体は減少傾向であるものの、除草等の予算は増加傾向にある。これは熊本市が市民の要望により除草等の予算を意図的に増加させた背景がある。しかし、維持管理は十分に行き届いておらず、慢性的な予算不足が生じている。

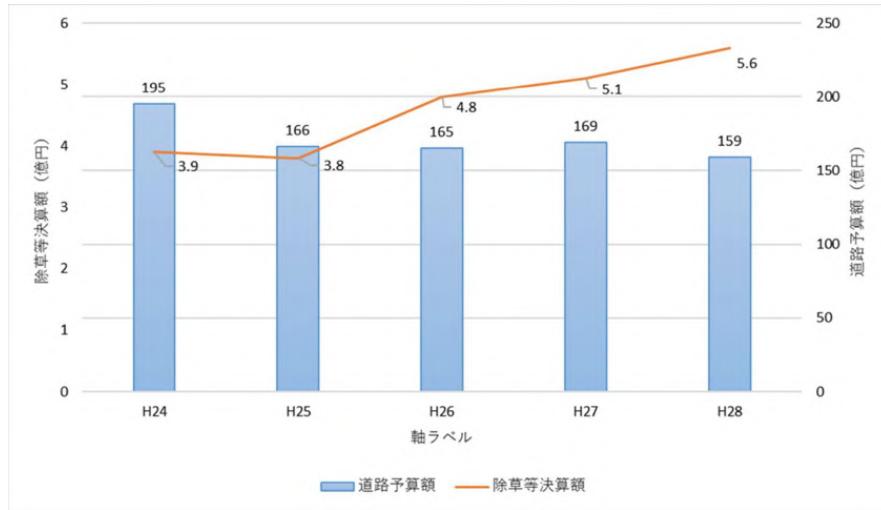


図1 熊本市における道路予算額と除草等決算額の推移

(引用: https://www.city.kumamoto.jp/common/UploadFileDsp.aspx?c_id=5&id=23743&sub_id=1&fid=166239)

除草作業を行う場合に使用される代表的な機器に刈払機がある。一般的な刈払機の例を図2に示す。刈払機は高速回転する刃により草を刈り払う機器である。主に農作業、林業、農園業で利用されていたが、家庭での庭木の手入れや道路脇、公園の除草を手軽に行えることから現在では一般消費者にも広く使用されるようになった。しかし、鋭利な刈刃が高速回転するため危険な機器であり、刈払機による事故が多く発生している[2]。回転中の金属刃へ堅牢な物質が接触することで発生するキックバックは作業者の意図しない方向へ刈払機が飛ばされてしまう。その結果、作業員に刈刃が接触し、重大な事故につながる恐れがある。そのため、国民生活センターではキックバックが起こりづらく、安全性の高いナイロンコードを用いたカッタを金属刃の代わりに使用することを推奨している。

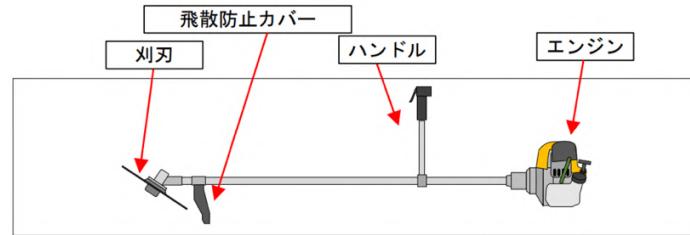


図 2 一般的な刈払機の例

(引用: https://www.caa.go.jp/policies/policy/consumer_safety/release/pdf/consumer_safety_release_170720_0001.pdf)

国土交通省は国道や高速道路における維持管理を行なっており、除草の高効率化や低コスト化に関する検討が行われている [3]。検討されている手法を図 3 に示す。これは道路パトロール時に雑草の画像データを収集し、自動で除草作業を行う場所の解析を行い、自走式の ICT 除草車で作業を行うというものである。この除草車は路面清掃車両を改造し、除草用の刈刃やカメラ、集草装置を搭載することで除草作業の自動化を目指している。



図 3 自走式 ICT 除草車のイメージ

(引用: <https://www.mlit.go.jp/common/001183038.pdf>)

1.2 先行事例・先行研究

1.2.1 小型ビニールハウス用雑草除草ロボットの開発

崇城大学では水田ごぼう畠における除草作業を行うロボットを開発している [4]. ロボットに搭載する自己位置計測システムと除草機構の有効性を検証するために試作機が3機ほど開発された. 除草機構としてレーキやナイロンコード, 自己位置計測手法として超音波センサ, ジャイロセンサ, エンコーダが使用された. ビニールハウス内部の様子を図 4, 試作機を図 5 に示す.



図 4 ビニールハウス内部の写真



図 5 開発された試作3号機

(引用: 崇城大学リポジトリ, <https://sojo-u.repo.nii.ac.jp/records/1443>)

1.2.2 農業用栽培管理ロボット

NTT ドコモらによって開発・実証実験が進められている農業用栽培管理ロボット [5] は畑作と稻作それぞれで除草作業の自動化を目指している。開発されたロボットを図 6 に示す。このロボットは画像認識によって作物列または稲列の認識、作物と雑草の識別を行うことができる。後部に装着された除草機構によって除草を行う。また作物列または稲列の終端を認識することでUターンが可能であり、圃場内の自律走行が可能である。

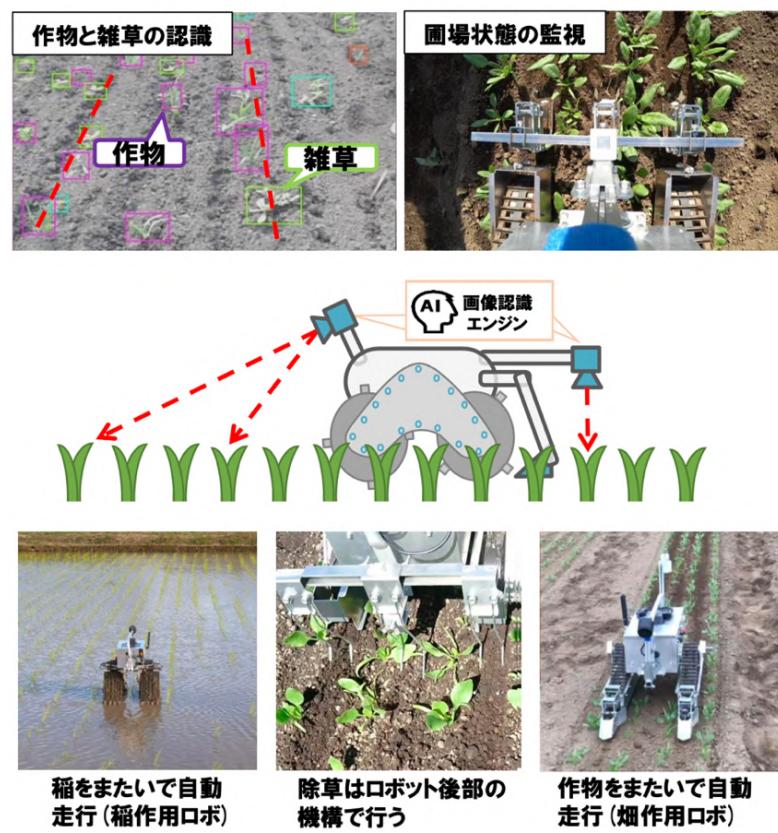


図 6 NTT ドコモによる農業用栽培管理ロボット

(引用:<https://www.nttdocomo.co.jp/binary/pdf/corporate/technology/rd/openhouse/openhouse2020/A/A-20.pdf>)

1.2.3 舗装道路内の間隙に形成される雑草植生

我々が生活する都市空間の中で、雑草が繁茂する代表的な場所である舗装道路内では宇都宮大学の須藤らによる研究で植生の調査が行われた [6]. 舗装道路の間隙を図 7 に示す. この調査では縁石と歩道の境界に形成される間隙(図 4)における植生を調査しており、路面に形成される間隙の幅の平均値は 11.8mm($\pm 1.1\text{mm}$)、深さの平均値は 77.2mm($\pm 7.4\text{mm}$)という結果であった. また、一年生雑草が多年生雑草と比較し明らかに多いことなど、水田や畑の雑草植生とは明らかに異なることが判明した.

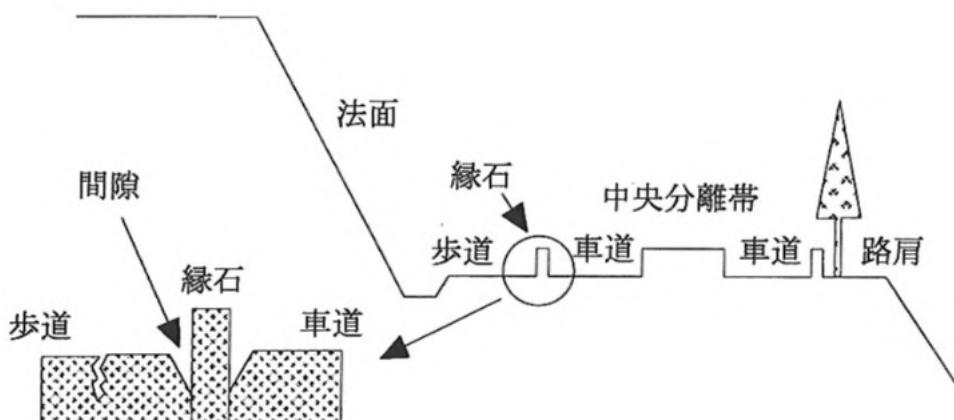


図 7 調査を行なった舗装道路上における間隙

(引用: https://www.jstage.jst.go.jp/article/weed1962/49/1/49_1_8/_pdf/-char/ja)

1.3 課題

都市環境での除草作業は多くの労力と時間を要し、刈払機を用いた除草方法は危険を伴う。また、除草作業には多額の費用が必要な場合もある。圃場と比較し、複雑な形状を持つ都市環境ではロボットを自律移動させることは容易ではなく、都市環境における除草作業の自動化には目を向けられてこなかった。また、壁面と地面により形成される間隙は都市環境固有の環境であり、このような環境は圃場に存在せず、農業分野の除草ロボットで対処が可能であるか懐疑的である。

1.4 目的

本研究ではキックバックが起こらないナイロンコードを用いた除草機構、物体検出が可能なカメラ、さらに垂直な壁面とロボットの距離を計測する超音波センサを移動プラットフォームに搭載した除草ロボットを製作する。このロボットは壁面との距離を一定に保ちつつ自律移動を行い、都市環境特有の壁面と地面の間隙に繁茂する雑草を検出し、除草を行う。これによりロボットによる壁面と地面との間隙雑草に対する除草作業を自動化することを目的とする。

1.5 本文の構成

本論文では第1章の序論で研究背景、先行事例・先行研究、課題、研究目的を、第2章で提案手法、第3章で実装、第4章で評価、第5章で考察、第6章で結論を述べる。

第2章 提案手法

2.1 システム概要

システム概要図を図 8 に示す。本研究では移動プラットフォームにカメラ、除草機構、距離センサ、コンピュータを搭載する。カメラによる画像情報から雑草を検出し、コンピュータから除草機構に指令を出すことで検出した雑草を処理する。また、壁面と地面の間隙雑草を対象とするため、距離センサを用いて壁面と移動プラットフォームの距離を計測しコンピュータから移動プラットフォームへ指令を出すことで壁面に沿った移動を行う。本研究の除草ロボットは外部との通信は行わず、単独で除草作業と移動を行う。

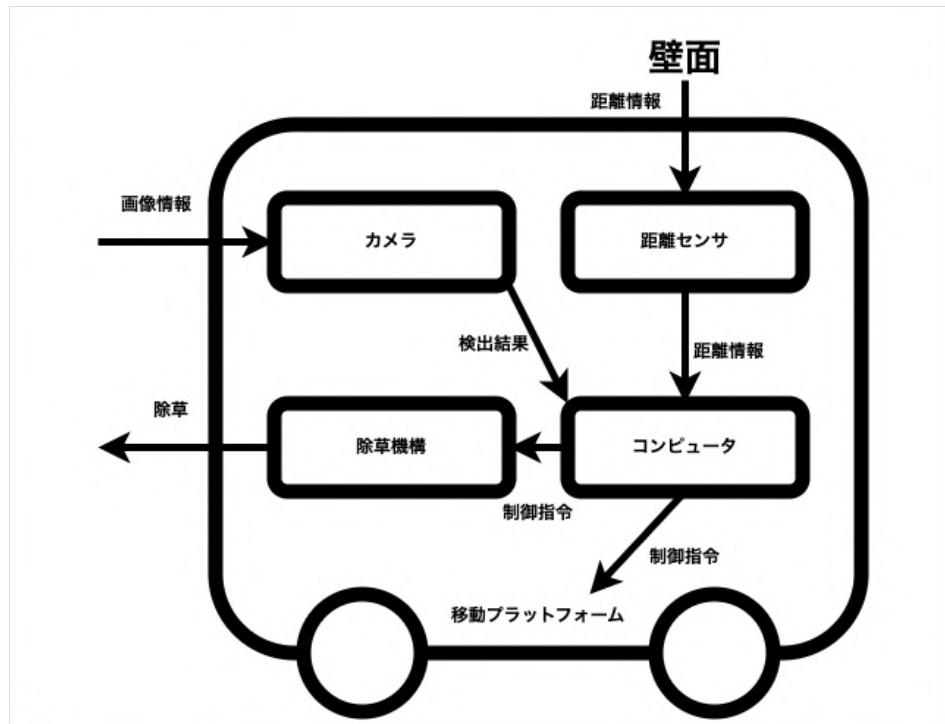


図 8 システム概要図

2.2 カメラを用いた雑草認識

カメラから画像を取得し、物体検出を行う。カメラはロボットの前方が撮影できるよう搭載し、除草機構と進行方向の地面を撮影することが可能である。このカメラから画像を取得し、物体検出を行う。画像内に雑草が検出された時のみ、除草機構を作動させる。

2.3 距離センサを用いた壁面追従

距離センサはロボットの前後に2つ搭載し、壁面に向けて検出を行う。2つの距離センサから計測される距離データにより移動プラットフォームの壁面との距離と角度を求める。この計算結果により移動プラットフォームの移動方向を適宜修正することで壁面にロボットを追従させる。

2.4 ナイロンコードを用いた雑草処理

雑草を処理するための除草機構としてナイロンコードを用いたカッタを使用する。これにより壁面に刃刃が接触した場合でも、ロボット自身がキックバックを起こすことなく除草作業を行うことが可能になる。

第3章 実装

3.1 概要

3.1.1 システムの構成

システム実装の構成図を図 9, 実装環境を表 1, 表 2, に示す. 本研究では雑草の検出を行うカメラとして「OAK-D S2」(以下, 「OAK カメラ」とする)を使用した. 距離データの測定は超音波センサ「HC-SR04」(以下, 「距離センサ」とする)を使用した. 雜草の検出結果と距離データを元に PWM 波形の出力を行うためのコンピュータとして「Raspberry Pi 4 Model B(4GB)」(以下, Raspberry pi とする)を使用した. ナイロンコードカッタを回転させるモータは「タミヤ 540-J モーター」(以下, 「除草用モータ」とする)を使用し, このモータを制御するために GoolRC 電子スピードコントローラーを使用した. 走行用モータは「タミヤ ダブルギヤボックス(左右独立4速タイプ)」(以下, 「ギヤボックス」とする)を使用したため, 付属していた「タミヤ FA-130 タイプノーマルモーター」(以下, 「走行用モータ」とする)を使用した. このモータを制御するためにモータドライバ「DRV8835」(以下, 「モータドライバ」)を使用した.

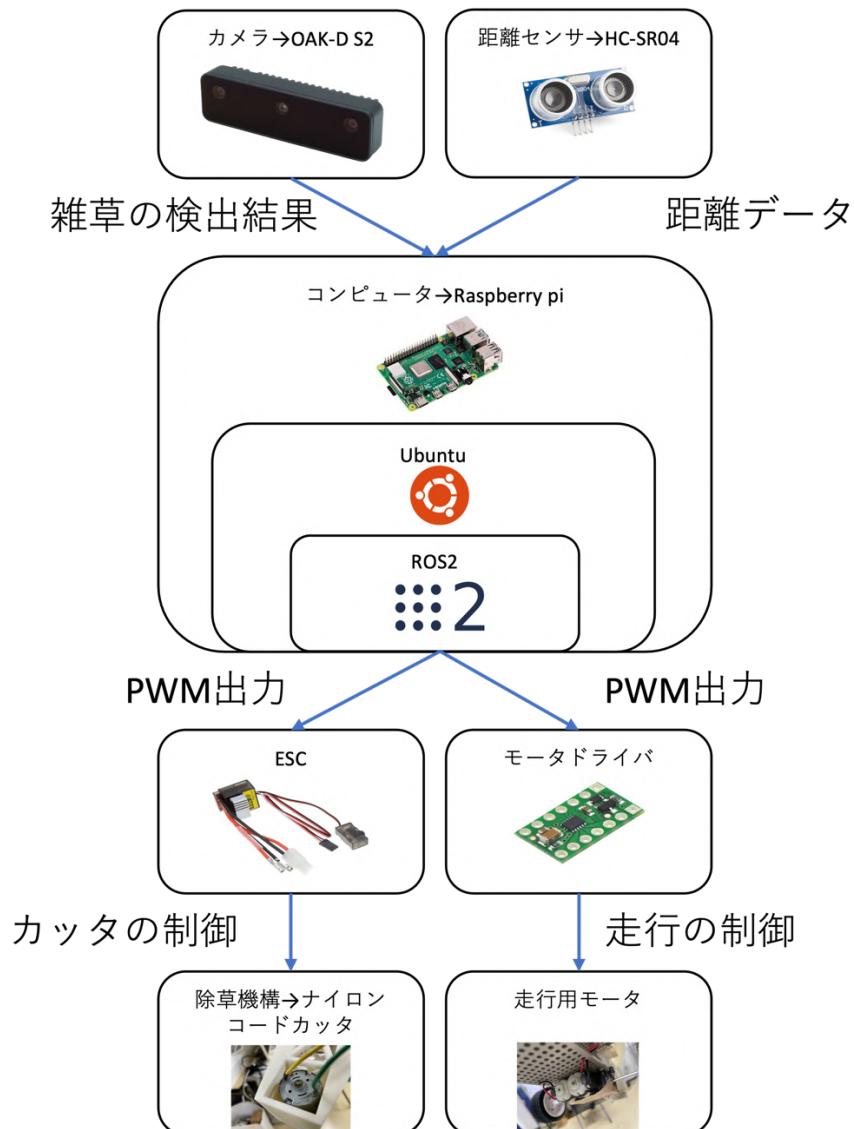


図 9 システム構成図

表 1 使用機器とソフトウェア

使用機器・ソフトウェア	メーカー名	型番・バージョン
PC	不明	Ubuntu 20.04
3D プリンター	Zortrax	M200 Plus
3D 設計ソフトウェア	Autodesk	Fusion360
ライブラリ		ROS 2 Foxy Fitzroy depthai 2.22.0.0 numpy 1.24.4 opencv-python 4.6.0.66 roboflowoak 0.0.12
オシロスコープ	Tektronix	TDS 210
マルチメータ	CUSTOM	CX-04MB

表 2 使用試料

名称	個数	備考
タミヤ ダブルギヤボックス (左右独立4速タイプ)	1	駆動用
タミヤ スポーツタイヤセット	1	駆動用
タミヤ ユニバーサルプレート (2枚セット)	2	ハーツ固定用
タミヤ ユニバーサルプレート用 スライドアダプター	2	基板固定用
タミヤ 3mm 六角シャフトセット	1	シャフト延長用
タミヤ 540 モーター	1	除草用モータ
タミヤ ピニオンギヤ	1	除草用モータ
タミヤ 7.2V カスタムパック	1	モータ用電源
キャスター	1	駆動用
結束バンド	4	キャスター固定用
M3×40mm 六角スペーサー	4	締結部品
M2.6 ナット	8	締結部品
M3 ナット	42	締結部品
M2.6×16mm ネジ	4	締結部品
M2.6×25mm ネジ	4	締結部品

M3×8mm ネジ	10	締結部品
M3×8mm 平ネジ	2	締結部品
M3×12mm ネジ	8	締結部品
M3×18mm ネジ	10	締結部品
M3×25mm ネジ	8	締結部品
M4×20mm ネジ	2	締結部品
OREGON ナイロンコード 1.3mm	1	ナイロンコード
リングスリーブ	2	ナイロンコード固定用
GoolRC 電子スピードコントローラー	1	ESC
M3×15mm ナイロンスペーサー	4	DCDC コンバータ固定用
DC-DE コンバータ 可変キット	1	DCDC コンバータ
モータドライバ DRV8835	1	モータドライバ
Luxonis OAK-D S2	1	OAK カメラ
Raspberry Pi 4 B (4GB)	1	コンピュータ
USB ケーブル	1	OAK カメラ接続用
Anker 511 Power Bank	1	Raspberry Pi 用電源
Z-ULTRAT	-	3D プリンタ素材
ケーブル	-	配線用

3.1.2 ナイロンコード

ナイロンコードは刈払機の先端に装着し、回転させることで除草を行うアタッチメントの一種である。金属刃を用いた場合、除草中に回転している刃に硬いものが接触した時、刈払機ごと飛ばされてしまうキックバックと呼ばれる現象が発生する。また、人体と接触した場合、大怪我をする場合がある。しかし、ナイロンコードを用いた除草ではキックバックが発生せず、人体と接触しても致命的な怪我にはなりにくい。本研究ではオレゴン社製の太さ 1.3mm のナイロンコードを使用した。使用したナイロンコードを図 10 に示す。



図 10 オレゴン社製ナイロンコード

3.1.3 OAK-D S2

「OAK-D S2」は Luxonis 社が開発、販売する AI カメラである [7]. 中央のカメラでカラー画像を、左右2つのカメラで深度情報を取得し、本体内部に搭載されたハードウェアアクセラレータでニューラルネットワークの推論を実行することが可能である。本研究では雑草を検出するモデルを実行し、取得したカラー画像から雑草の有無を判定した。カメラの外観を図 11 に示す。



図 11 Luxonis 社製 OAK-D S2

3.1.4 Raspberry Pi 4 B (4GB)

「Raspberry Pi 4 Model B」は Raspberry Pi 財団が開発、販売しているシングルボードコンピュータである [8]. microSD カードにインストールした Linux 系の OS を起動することが可能で、PC と同様の機能を有している。また、GPIO ピンを使用した電子工作も可能であり、IoT デバイスとして広く使われている。本研究では OS として Ubuntu 20.04 をインストールし、ROS2 foxy を動作させた。Raspberry Pi の外観を図 12 に示す。



図 12 Raspberry Pi 財団製 Raspberry Pi 4 Model B

3.1.5 ROS2

本研究では除草ロボットのシステムを構成するために, ROS2 foxy を用いた. ROS2 は Robot Operating System のことを指し, ロボットの研究・開発に使用されるオープンソースのミドルウェア・フレームワークである [9]. 主に学術用途で ROS が使用され, さらに広い分野での ROS の活用が想定された次世代バージョンとして ROS2 が新たにリリースされた. 本研究では Raspberry Pi に ROS2 環境をインストールし, システムの統合・制御を行なった.

3.2 移動プラットフォームの作成

3.2.1 台車の作成

移動を行うための台車を作成した。タミヤのダブルギヤボックス（左右独立4速タイ

プ）を組み立てた。このギヤボックスはギヤ比を4種類から選べるため、最もギヤ比の高

い 344.2:1 を選択した。また、タイヤと接続する六角シャフトは 72mm のものを別で用

意し、使用した。作成したギヤボックスを図 13 に示す。

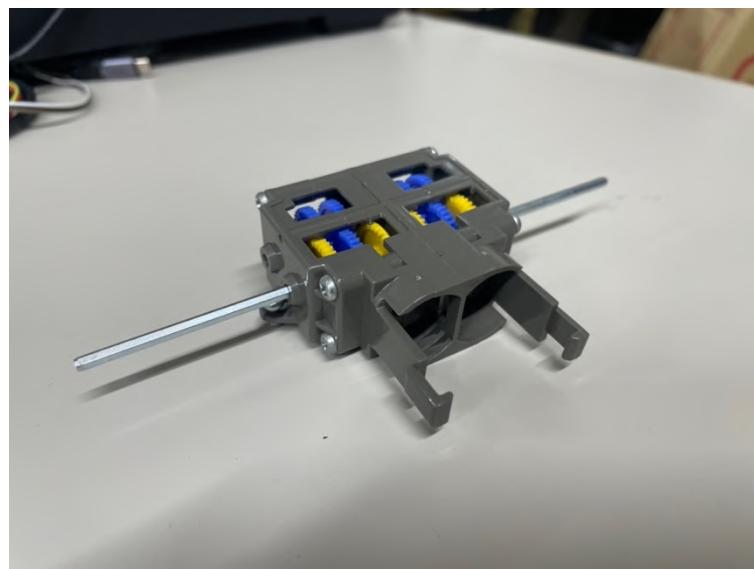


図 13 作成したギヤボックス

作成したギヤボックスに走行用モータを取り付け、ギヤボックスとキャスターをタミヤの
160×60 [mm]ユニバーサルプレートに固定した。固定を行う際に、ユニバーサルプレ
ートの一部を切断した。また、キャスターはユニバーサルプレートのネジ穴の間隔に違
いがあるため、ネジを使わずに結束バンドを用いて固定した。ギヤボックスとキャスター
を固定した様子を図 14 に示す。

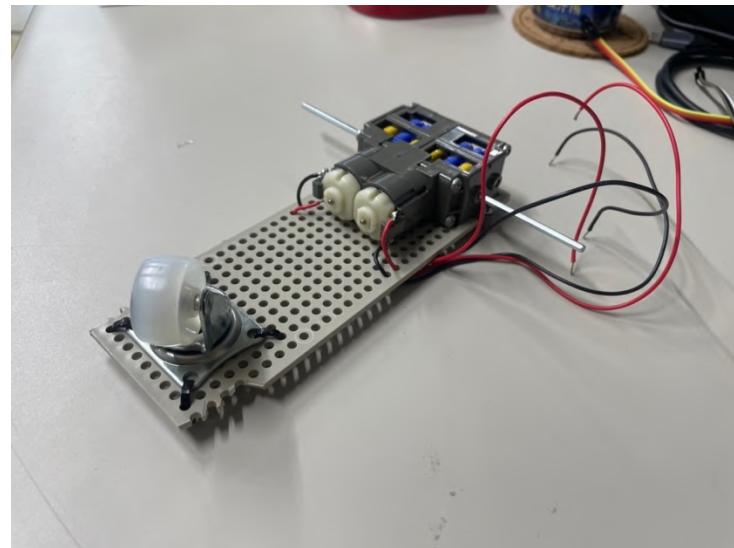


図 14 ギヤボックスとキャスターの固定

160×60mm ユニバーサルプレート2枚を並べ、タミヤのユニバーサルプレート用スライドアダプターを用いて固定した。固定した様子を図 15 に示す。

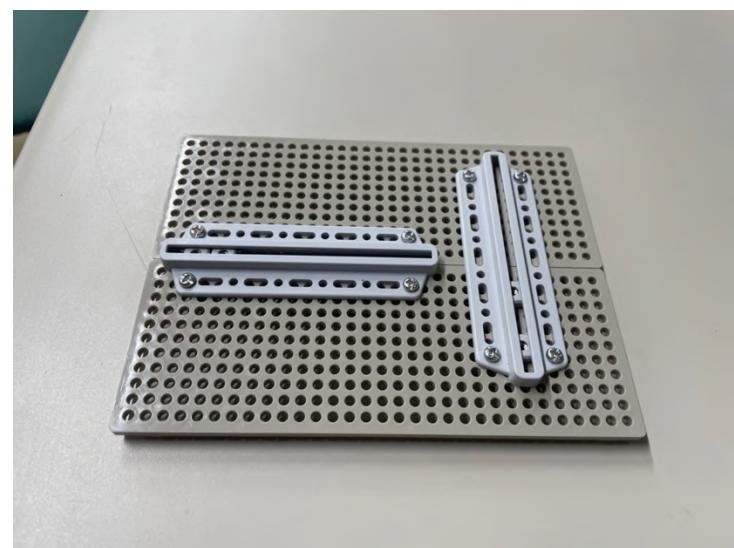


図 15 スライドアダプターの固定

ギヤボックス、キャスターを固定したユニバーサルプレートの上部にスペーサーを用いてユニバーサルプレート2枚を固定し、タミヤの 56 mm 径スポーツタイヤをギヤボックスのシャフトに装着した。取り付けた様子図 16 に示す。

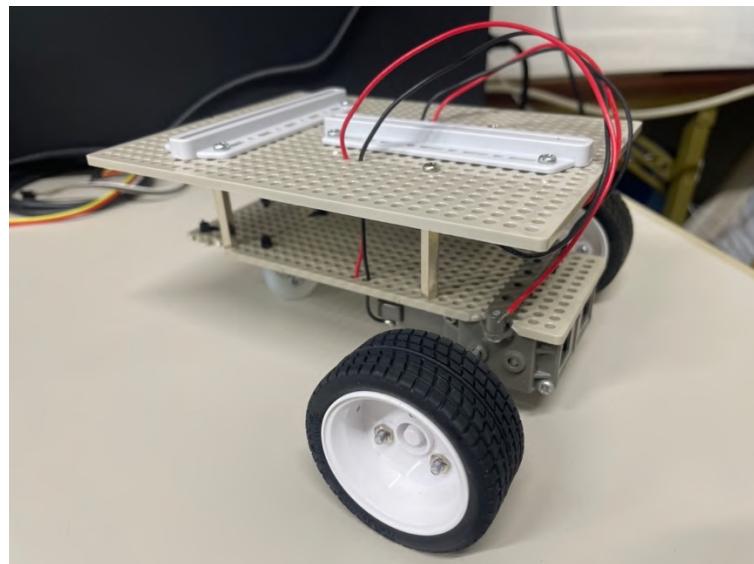


図 16 ユニバーサルプレートとタイヤの取り付け

スライドアダプター上に基板が設置できるよう、部品を固定した。左側のスライドアダプターのナットを M2.6 に、基盤を固定するためのねじを M2.6×16 mm のものに交換した。台車上部の様子を図 17 に示す。

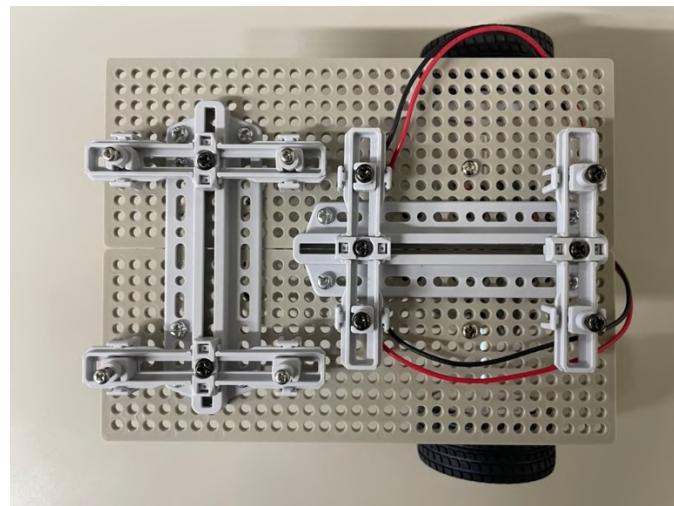


図 17 スライドアダプターの完成

3.2.2 Raspberry Pi やその他基板の実装・取り付け

モータドライバをユニバーサル基板に実装した。XH コネクタやターミナルブロックを用いて配線が着脱できるようにした。作成した基盤を図 18, 図 19 に示す。

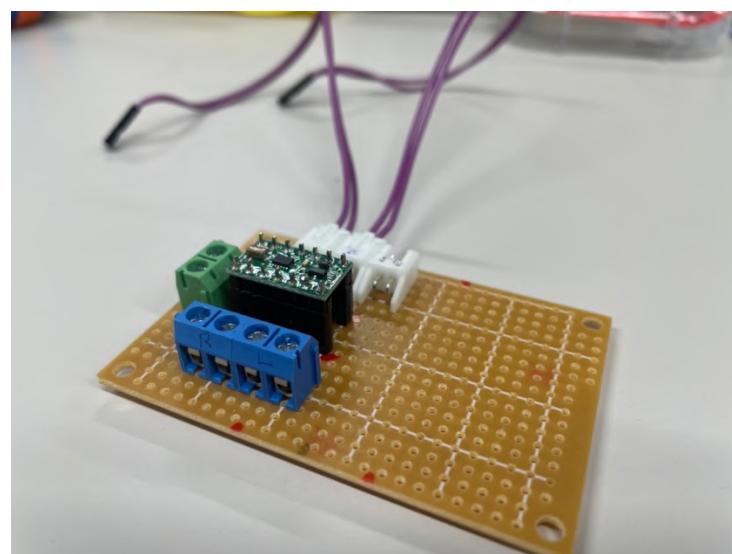


図 18 実装したモータドライバ

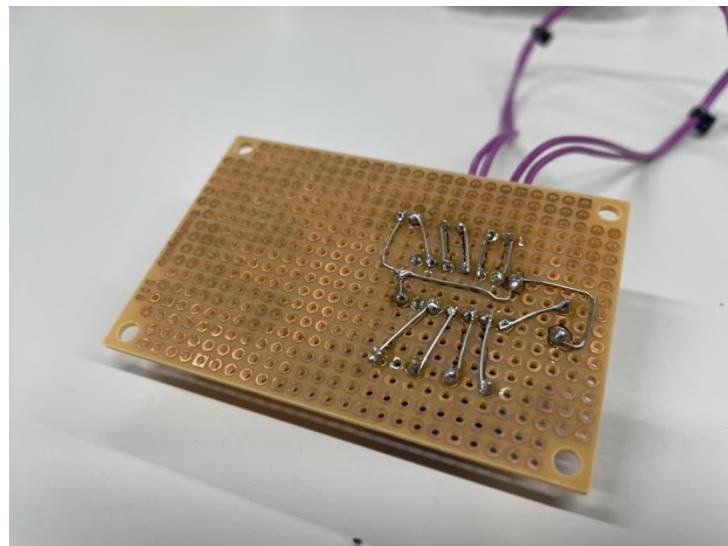


図 19 ユニバーサル基板の裏面

3.2.1 で作成した台車にモータドライバを実装したユニバーサル基板と Raspberry Pi を固定した。ユニバーサル基板は M3 ねじ, Raspberry Pi は M2.6 ねじで固定した。固定した様子を図 20 に示す。

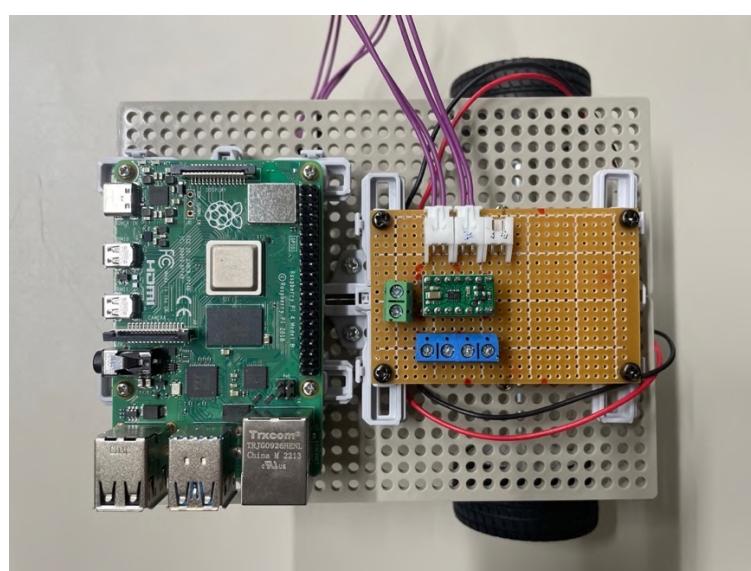


図 20 Raspberry Pi とユニバーサル基板の固定

3.2.3 距離センサの実装・取り付け

本研究で用いる距離センサは出力電圧が 3.7V となっており, Raspberry Pi の GPIO ピンの入力上限となる 3.3V を超えてしまう. Raspberry Pi が信号を High として受け取るには電圧を 1.8V から 3.3V とする必要があるので, 抵抗を用いて分圧を行なった. 分圧を行うための回路図を図 21 に示す.

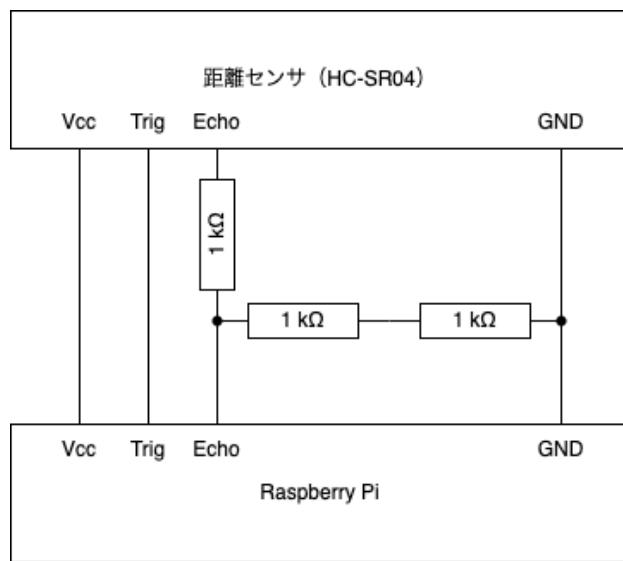


図 21 分圧を行なった回路図

$1\text{k}\Omega$ の抵抗を 3 つ使い分圧した. これにより Raspberry Pi で Echo を受信するときの電圧は

$$3.7 - \frac{2 \times 3.7}{3} = 2.4666 \dots \approx 2.47 [\text{V}]$$

となり, Raspberry pi の GPIO で High として扱うことができるようになった.

距離センサと抵抗をユニバーサル基板へ実装した. 2つのセンサをそれぞれ独立したユニバーサル基板へ実装した. 作成した様子を図 22 に示す.

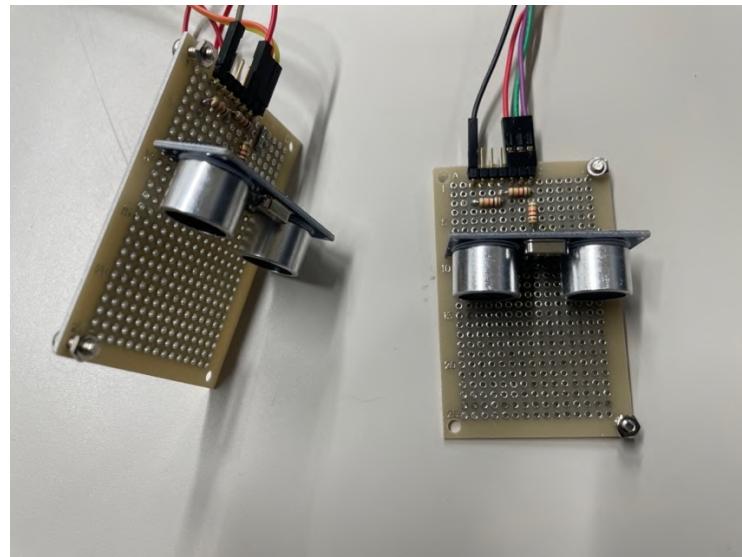


図 22 距離センサと抵抗を実装したユニバーサル基板

実装したユニバーサル基板を 3.2.1 で作成した台車の前後にセンサが右方向の壁面との距離を検出できる形で固定した。取り付けた様子を図 23, 図 24 に示す。

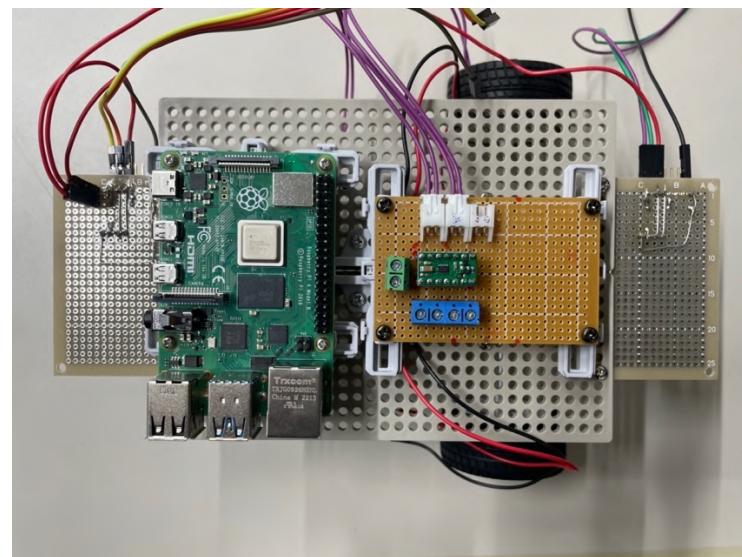


図 23 距離センサの取り付け

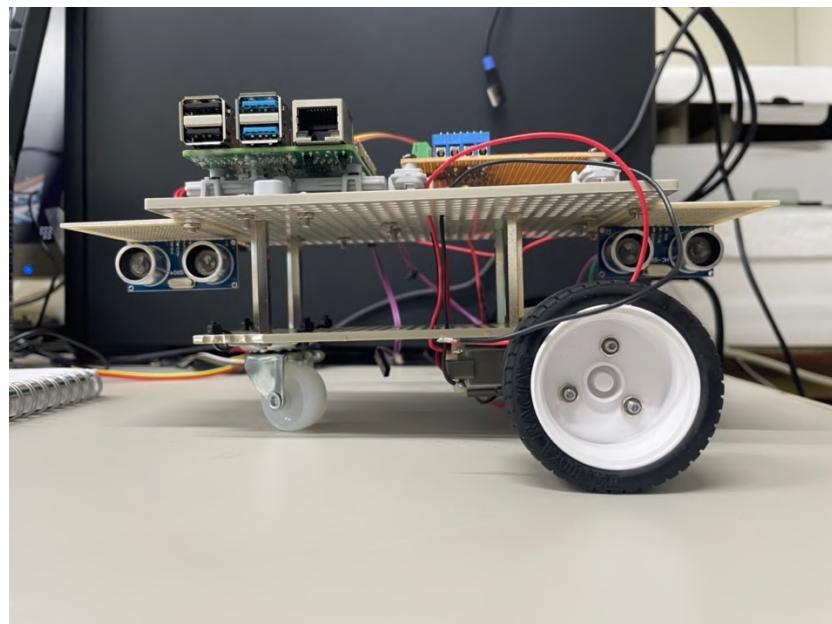


図 24 車体右側から見た図

3.2.4 配線作業

移動プラットフォームの配線を行なった。配線した様子を図 25 に示す。

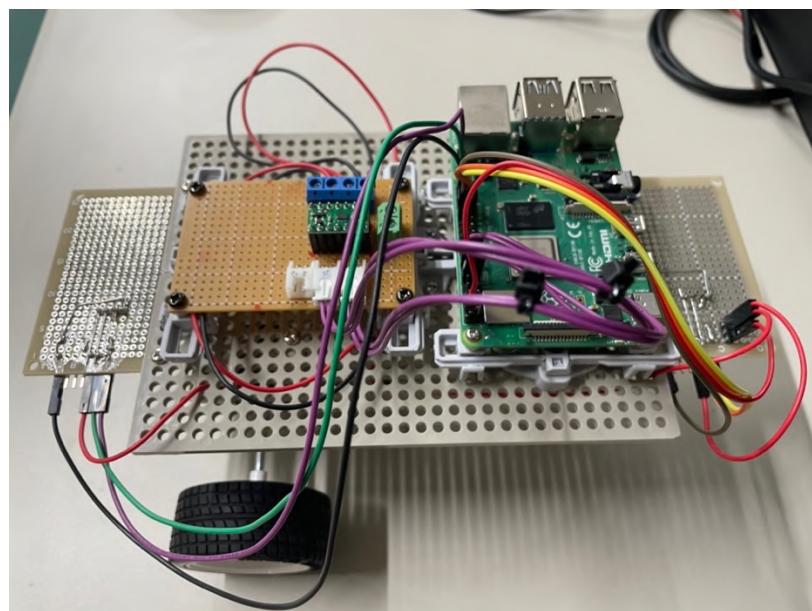


図 25 配線後の移動プラットフォーム

3.3 ナイロンコードカッタの作成

3.3.1 回転刃の作成

ナイロンコードを除草用モータと接続するための部品を Fusion360 で設計し、3D プリンタで印刷した。作成した部品を図 26、図 27 に示す。

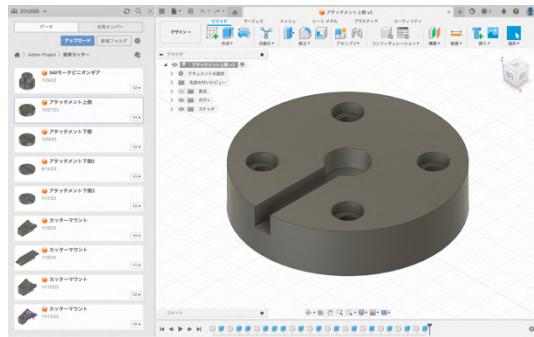


図 26 接続部品の上側

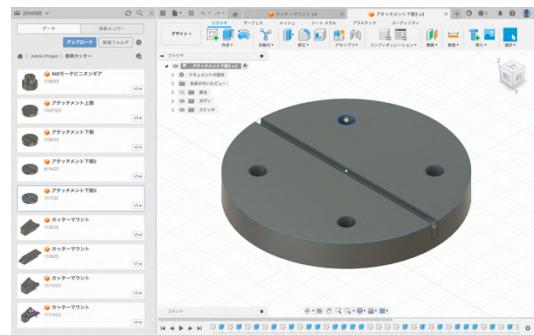


図 27 接続部品の下側

この部品にナイロンコードと除草用モータのピニオンギヤを組み合わせ、回転刃を作成した。作成した回転刃を図 28、図 29 に示す。

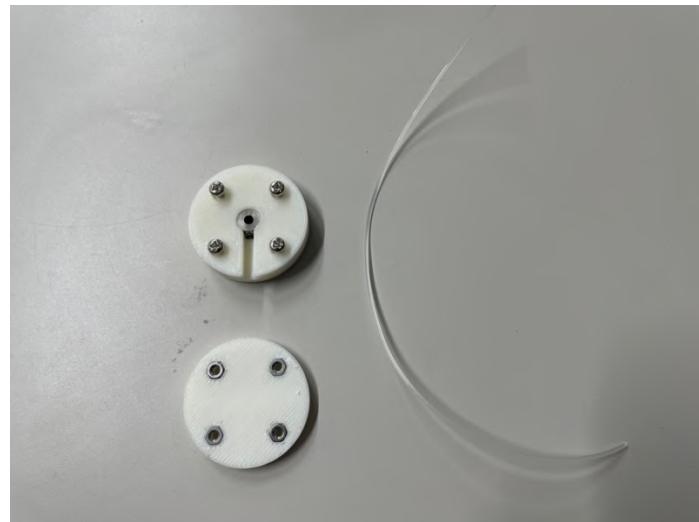


図 28 回転刃の構成部品

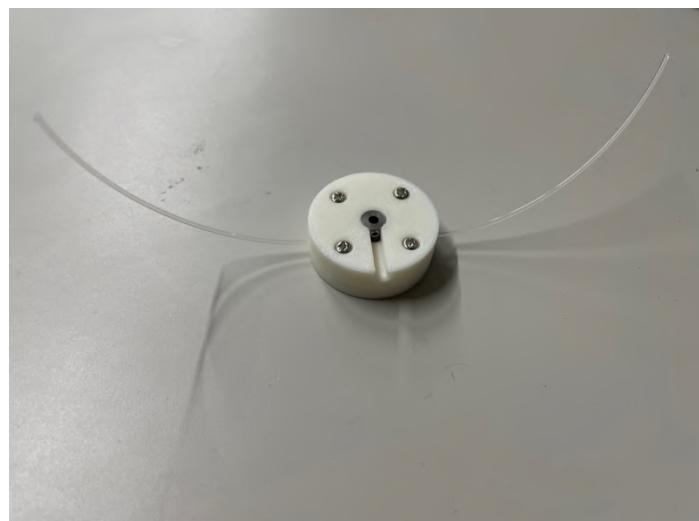


図 29 完成した回転刃

3.3.2 移動プラットフォームへの実装・配線作業

ナイロンコードカッタを 3.2.4 で作成した移動プラットフォームへ実装するための部品を, Fusion360 を用いて設計し, 3D プリンタで印刷した. 作成した部品を図 30, 図 31 に示す.

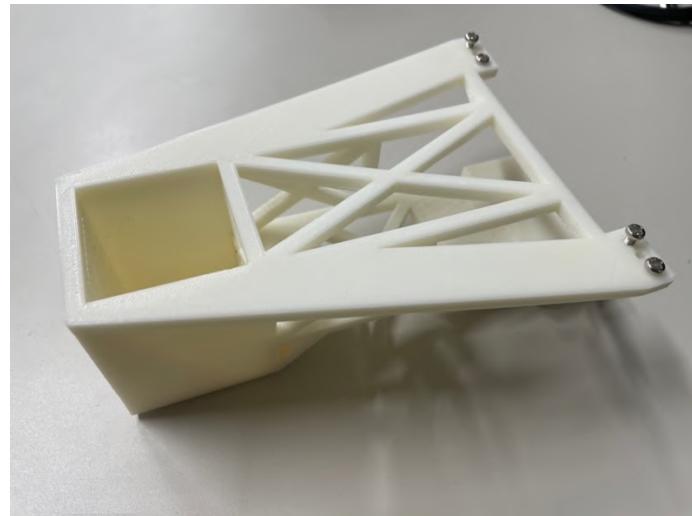


図 30 除草モータ接続部品の上側

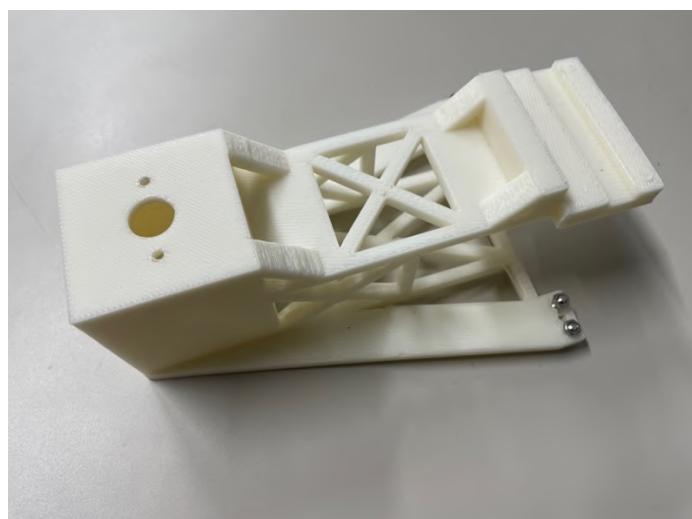


図 31 除草モータ接続部品の下側

この部品に除草用モータを固定した。モータを固定した様子を図 32 に示す。

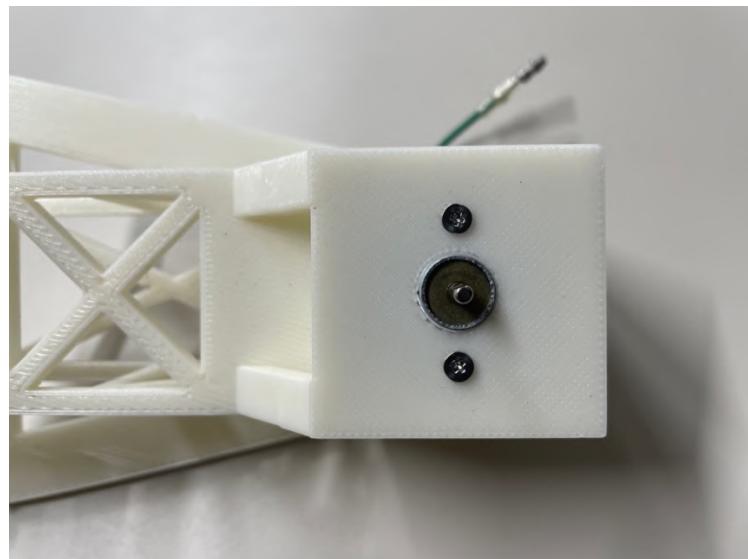


図 32 除草モータの固定

除草用モータの回転軸に 3.3.1 で作成した回転刃を接続した。ピニオンギヤの穴と除草用モータの軸をイモネジで固定した。固定した様子を図 33 に示す。

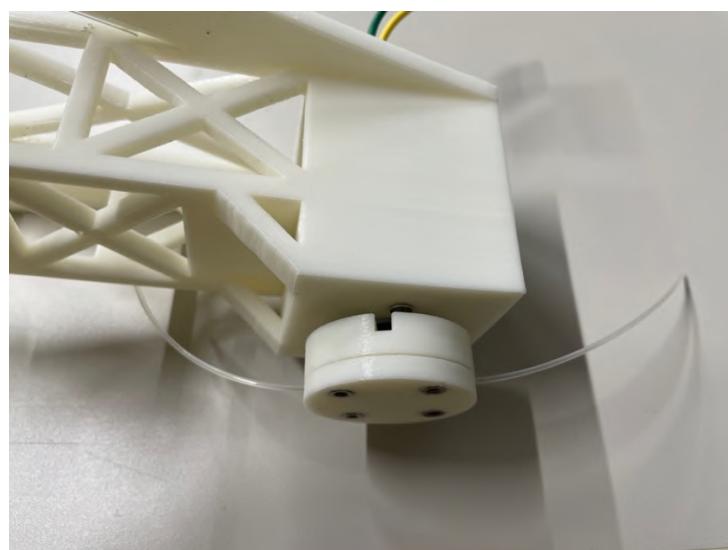


図 33 ナイロンコードカッタの実装

本研究では、ナイロンコードカッタを Raspberry Pi で制御するために ESC を使用し、ナイロンコードカッタと Raspberry Pi の両方に接続した。ESC を接続し、配線を行なった様子を図 34 に示す。

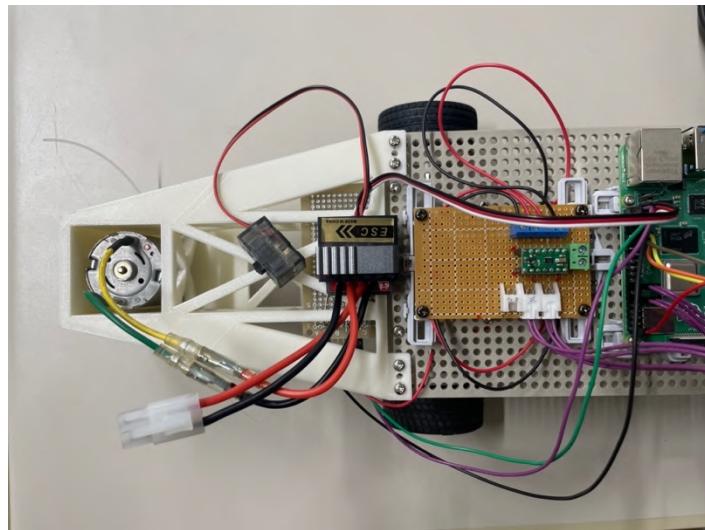


図 34 ESC の配線

3.3.3 回転刃の改良

3.3.1 で作成した回転刃は地表から離れすぎてしまい、十分な除草ができないと判断した。そのため、新たな回転刃を作成した。Fusion360 で再度設計した部品を図 35 に示す。

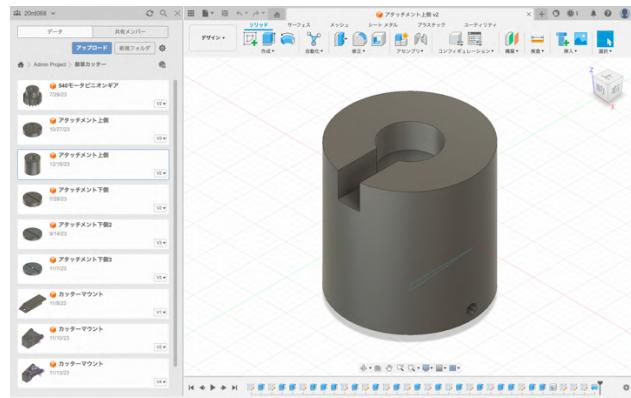


図 35 再度作成した回転刃の部品

3.3.1 で作成した回転刃からピニオンギヤを外し, 図 35 の部品に装着した. その後, ナイロンコードを部品下部の穴に通し, リングスリーブで固定した. 作業の様子を図 36, 図 37 に示す.

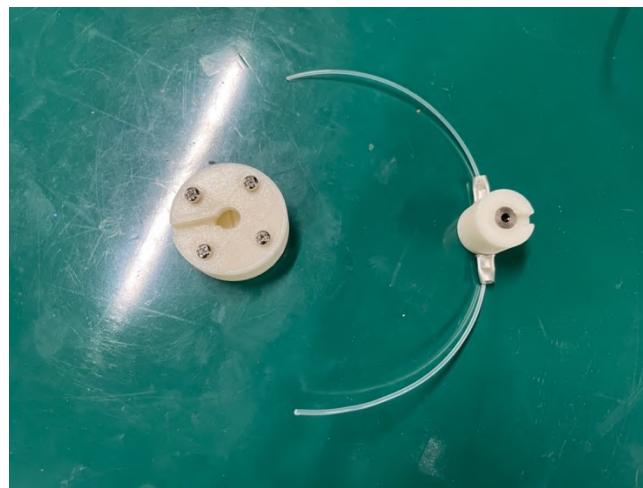


図 36 改良前と改良後の回転刃



図 37 ピニオンギヤとナイロンコードの固定

この回転刃を図 33 のように再度除草用モータにイモネジを用いて接続した。接続後の様子を図 38 に示す。

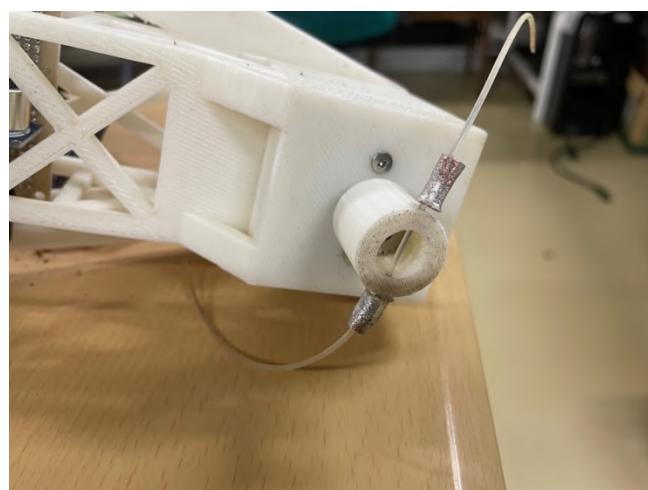


図 38 ナイロンコードカッタの再実装

回転刃の改良により地表からのナイロンコードの高さは改良前の 18 [mm]から改良後は 8 [mm]になった。その結果、より低い位置で回転刃を動作させることができるようになった。改良前と改良後の様子を図 39、図 40 に示す。

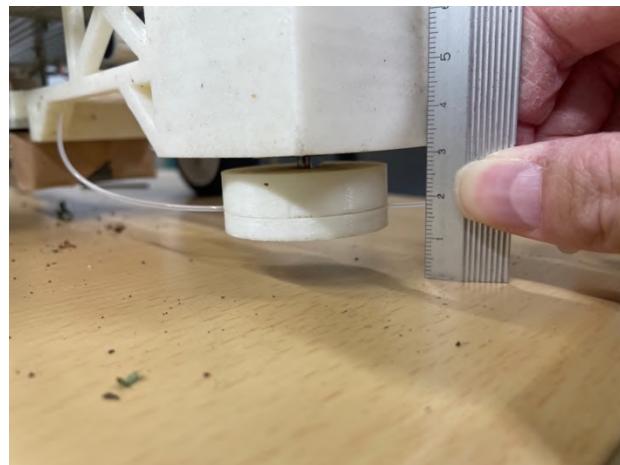


図 39 改良前のナイロンコードの高さ

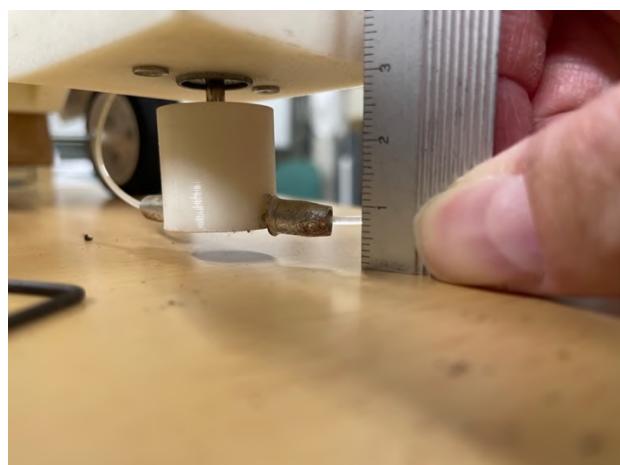


図 40 改良後のナイロンコードの高さ

3.4 雜草検出の実装

3.4.1 Roboflow を利用した雑草検出モデルの作成

本研究では雑草の検出を行うモデルの作成に Roboflow というサービスを利用した。Roboflow はコンピュータビジョンのモデルの作成をコーディングなしで簡単に実装できるサービスである。本研究では Roboflow がデータセットや学習モデルをオープンソースで公開している Roboflow Universe から雑草の物体検出を行うモデルである Weeds-pub-plus Computer Vision Project で公開されているデータセットを再編集、再学習し、本研究で用いる雑草検出モデルを作成した。

Weeds-pub-plus Computer Vision Project [10]で公開されているデータセットを再編集して定義するクラスを「雑草」のみとし、それ以外で設定されていたクラスと割り当てられていた画像を全て削除した。これにより作成したデータセットを表 3 に示す。

表 3 作成したデータセット

Train [枚]	Valid [枚]	Test [枚]	Total [枚]
3773	386	180	4339

このデータセットを使い、Roboflow で学習済みモデルを作成した。学習済みモデルは Roboflow の無料アカウントで学習可能な Roboflow 3.0 Object Detection (Fast)を使用した。

3.4.2 移動プラットフォームへの実装・配線作業

本研究では雑草の認識を OAK カメラで行なった。OAK カメラと Raspberry Pi を USB ケーブルで接続し、物体認識の推論をカメラ内部のハードウェアアクセラレータで実行し、検出結果のみを Raspberry Pi で受け取った。

OAK カメラを移動プラットフォームへ固定する台座を Fusion360 で設計し、3D プリントで印刷した。作成したカメラ台座のモデルを図 41、図 42 に示す。

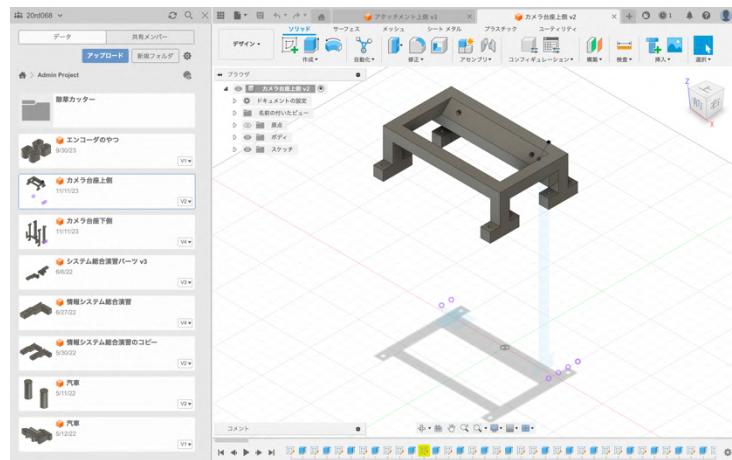


図 41 設計したカメラ台座の上側

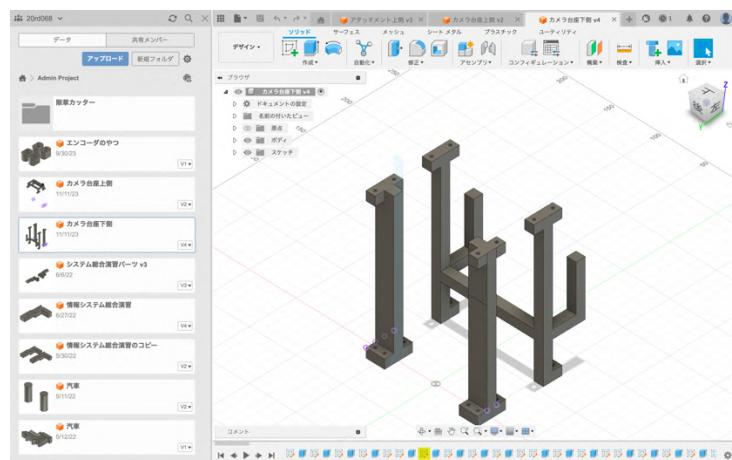


図 42 設計したカメラ台座の下側

カメラ台座の組み立て、OAK カメラの固定を行なった。カメラ台座の組み立てには M3×25 [mm] のネジと M3 ナットを 8 個ずつ使用した。OAK カメラの固定には M4×20 [mm] のネジを 2 本使用した。様子を図 43、図 44 に示す。



図 43 組み立てたカメラ台座



図 44 OAK カメラの固定

カメラ台座を移動プラットフォームへ固定した。M3×20 [mm]のネジとM3ナットを10個ずつ使用した。様子を図45に示す。

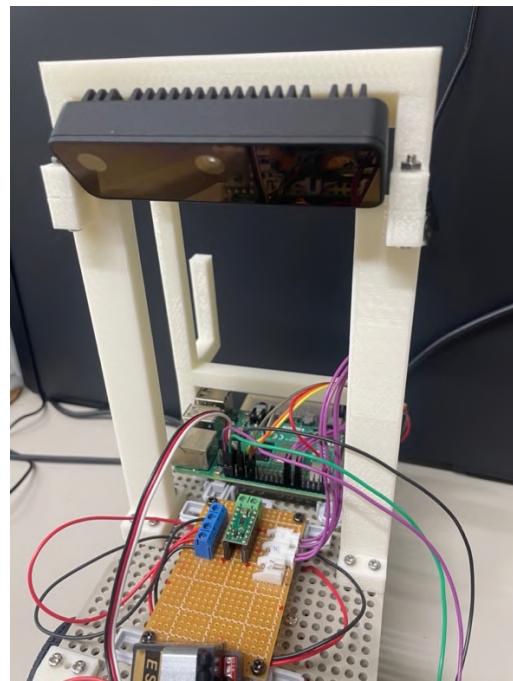


図45 カメラ台座を固定した様子

OAKカメラとRaspberry PiをUSBケーブルで接続した。様子を図46に示す。

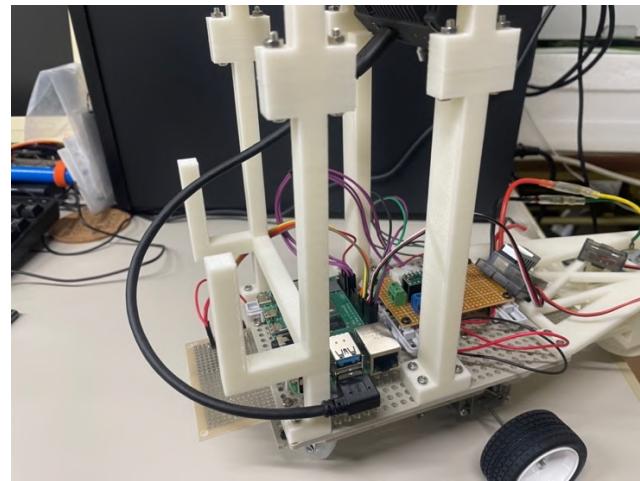


図46 OAKカメラとRaspberry Piを接続した様子

3.5 電源関連の実装

3.5.1 電源関連の構成図

除草ロボットの電源構成を図 47 に示す。

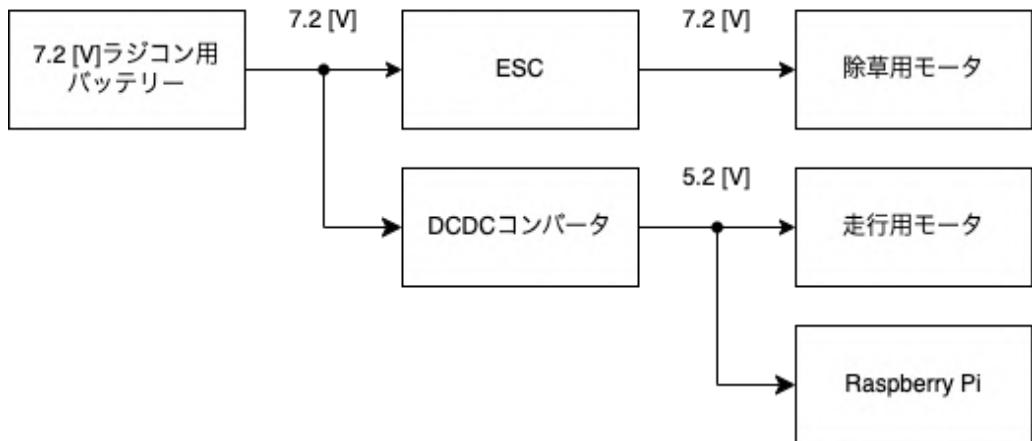


図 47 改良前の電源構成

しかし、図 47 の構成では除草用モータを回転させると Raspberry Pi がシャットダウンしてしまう不具合が発生した。そこでオシロスコープを用いて Raspberry Pi の電圧を観測した。測定した様子を図 48 に示す。

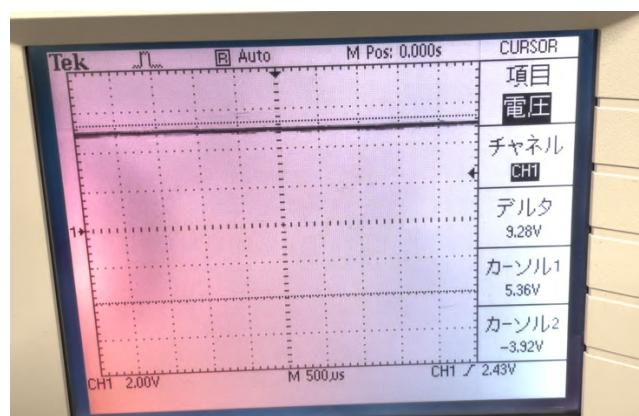


図 48 除草用モータ起動前の Raspberry Pi の電圧

図 48 では Raspberry Pi の電圧が 5 [V]付近となっている。この状態で除草用モータを回転させると徐々に電圧が低下した。電圧が低下している様子を図 49 に示す。

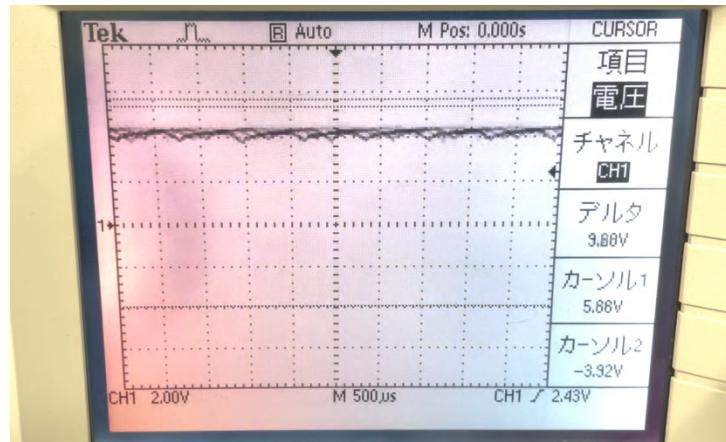


図 49 低下している Raspberry Pi の電圧

Raspberry Pi の電圧が 4 [V]付近まで低下していることがわかる。その直後、Raspberry Pi は再起動した。再起動した時の電圧の様子を図 50 に示す。

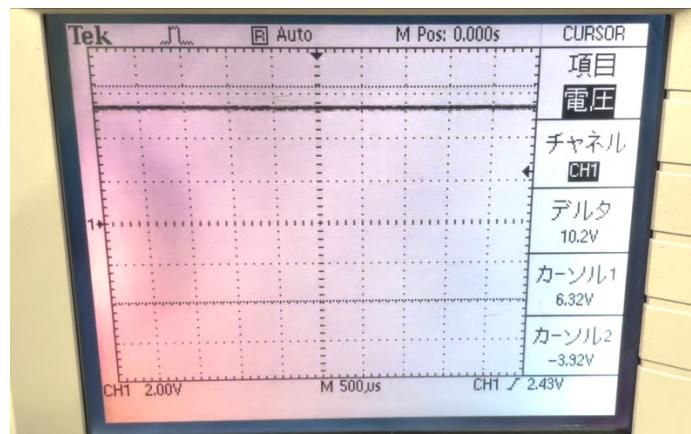


図 50 再起動後の Raspberry Pi の電圧

Raspberry Pi が動作可能な電圧の範囲は 4.0 [V]から 5.5 [V]となっており、オシロスコープで確認した様子と一致する。よって Raspberry Pi が除草用モータの引き起こ

す電圧降下の影響を受けることなく安定した動作を実現するために電源構成を改良した。そこで、改良後の電源構成を図 51 に示す。

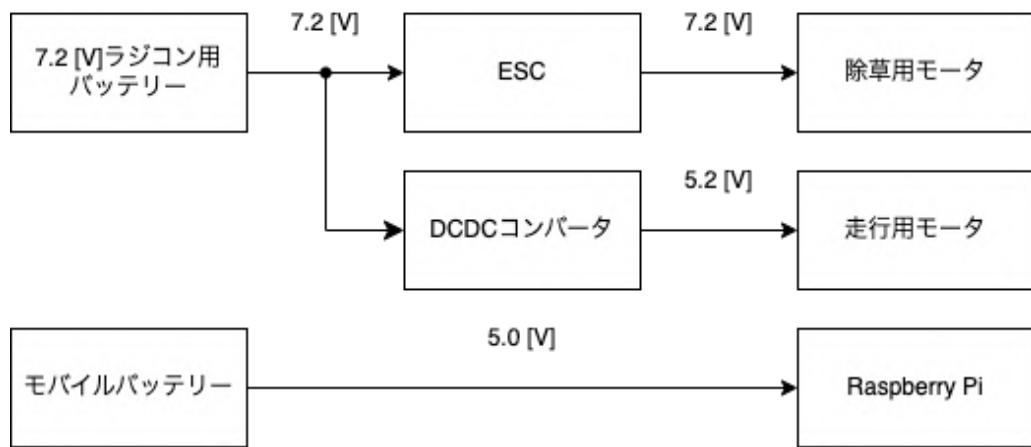


図 51 改良後の電源構成

改良前と比較し、Raspberry Pi の電源としてモバイルバッテリーを追加した。これにより除草用モータの電圧降下の影響を受けずに安定して動作した。

3.5.2 DCDC コンバータを用いた電圧変換

除草用モータ、走行用モータそれぞれに電力を供給するために 7.2 [V]のラジコン用のバッテリーを使用した。しかし、走行用モータに電力を供給するためのモータドライバはモータへの電源供給だけでなく、ロジック電源も必要であった。本研究で使用したモータドライバはロジック電源の上限が 7 [V]となっており、ラジコン用のバッテリーで直接供給することはできない。そこで DCDC コンバータを用いて電圧を下げる処理を行った。使用した DCDC コンバータを図 52 に示す。



図 52 DCDC コンバータの表側

DCDC コンバータを使用して 7.2 [V]の入力電圧を 5.2 [V]まで低下させた。DCDC コンバータの出力側の電圧を計測した結果を図 53 に示す。



図 53 出力電圧の計測結果

3.5.3 移動プラットフォームへの実装・配線作業

3.5.2 で出力電圧を調整した DCDC コンバータの入力と出力を行う配線を作成した。作成した 7.2 [V]を入力するケーブルを図 54 に示す。



図 54 7.2 [V]を入力するケーブル

DCDC コンバータから 5.2 [V]を出力するケーブルを図 55 に示す。



図 55 5.2 [V]を出力するケーブル

DCDC コンバータを移動プラットフォームへ固定した。M2.6×25 [mm]のネジ, M2.6 ナット, 15 [mm]のナイロンスペーサーを 4 個ずつ使用した。その後, 作成したケーブル(図 54, 図 55)を接続した。配線した様子を図 56 に示す。

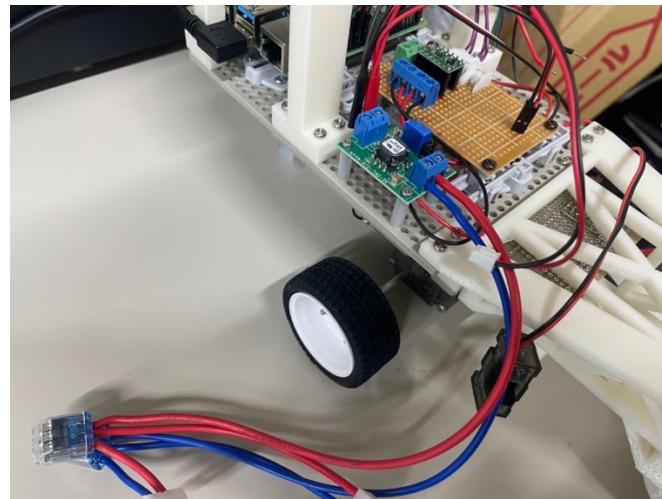


図 56 DCDC コンバータの配線

本研究で使用したバッテリーを図 57 に示す。上が 7.2 [V]ラジコン用バッテリー、下がモバイルバッテリーである。本研究では Raspberry Pi を動作させるため、電圧が 5 [V], 電流が 3 [A]を出力可能なタイプを使用した。



図 57 使用したバッテリー

ラジコン用バッテリーは図 58 のようにカメラ台座の裏側に設置した。

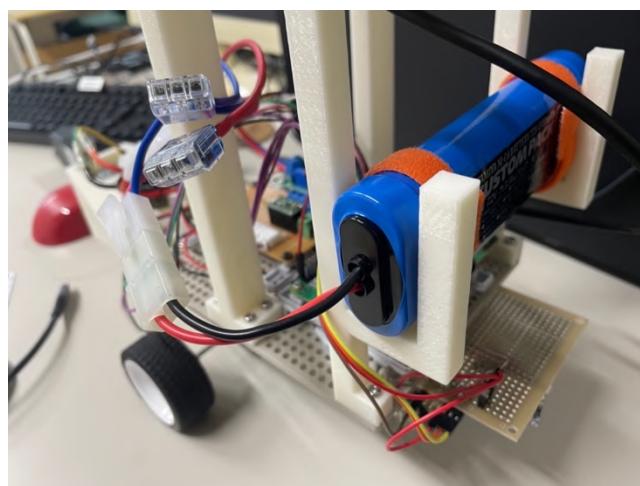


図 58 ラジコン用バッテリーの設置

モバイルバッテリーは図 59 のように移動プラットフォーム内側の空間に設置した。

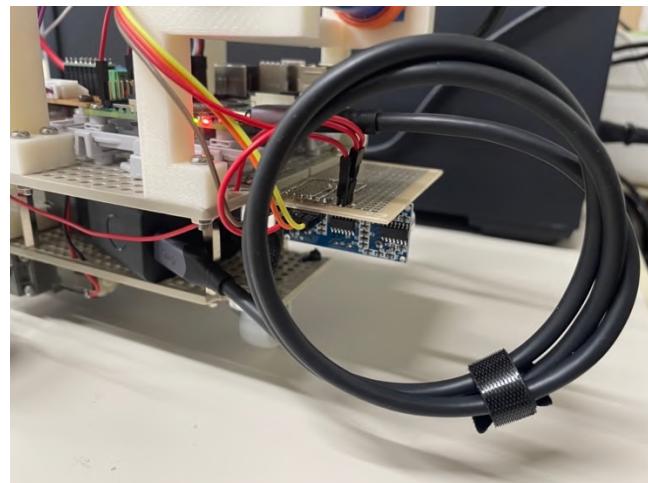


図 59 モバイルバッテリーの設置

作成した電源関連の配線図を図 60 に示す.

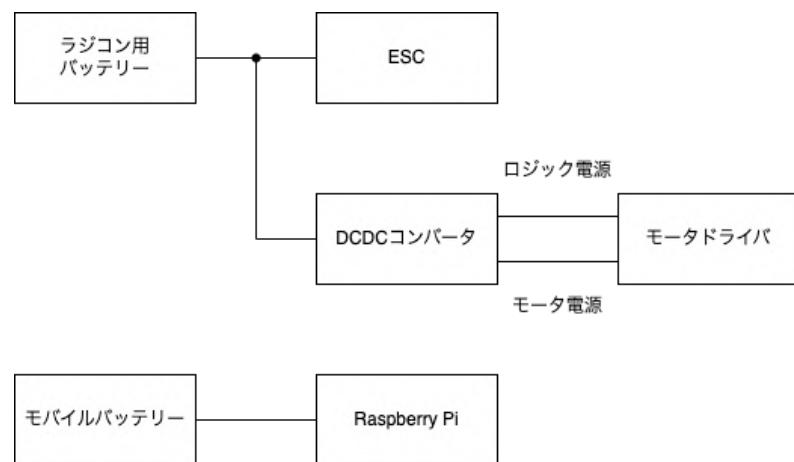


図 60 作成した電源関連の配線図

3.6 ROS2 を用いたシステム統合

3.6.1 ROS2 のシステム概要

本研究で作成した ROS2 のシステム構成を図 61 に示す。

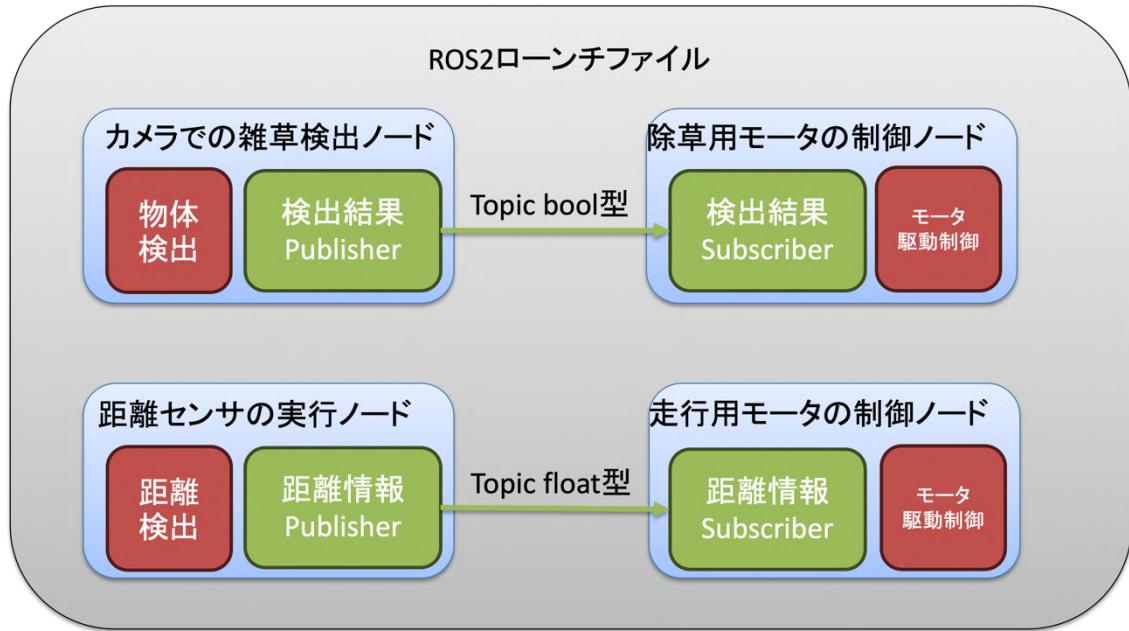


図 61 作成した ROS2 のシステム構成図

図 61 で示された青い部分がノードと呼ばれる単体のプログラムである。ROS2 では特定の機能のみを実装したプログラムをプロセス間通信によって情報の受け渡しを行うことでシステムを構成する。ここでは「カメラでの雑草検出ノード」、「除草用モータの制御ノード」、「距離センサの実行ノード」、「走行用モータの制御ノード」の 4 つのノードを作成し、2つの矢印で示された流れに沿ったトピック通信を行なった。これらのノードは全て ROS2 のローンチファイルにまとめることで、4 つ全てのノードの実行が一度にできるようにした。また、ローンチファイルは Raspberry Pi の電源投入後、自動で起動できるようにした。

カメラでの雑草検出ノードでは OAK カメラを起動させ、雑草の検出を行うノードである。1 [s]ごとに雑草が検出されれば「True」を、検出されなければ「False」をメッセージとして publish した。

除草用モータの制御ノードでは publish された雑草検出の結果を subscribe し、「True」であればナイロンコードを回転させ、「False」であればナイロンコードを停止させる処理を行なった。

距離センサの実行ノードでは 2 つの距離センサから得られた距離データを float64 型のメッセージとして publish した。

走行用モータの制御ノードでは publish された距離データを subscribe し、2つの距離データの差分から壁面と除草ロボットの位置関係を求め、走行用モータを適切に動かす処理を行なった。

3.6.2 OAK カメラでの雑草検出

図 61 の「カメラでの雑草検出ノード」での処理内容を図 62 に示す。

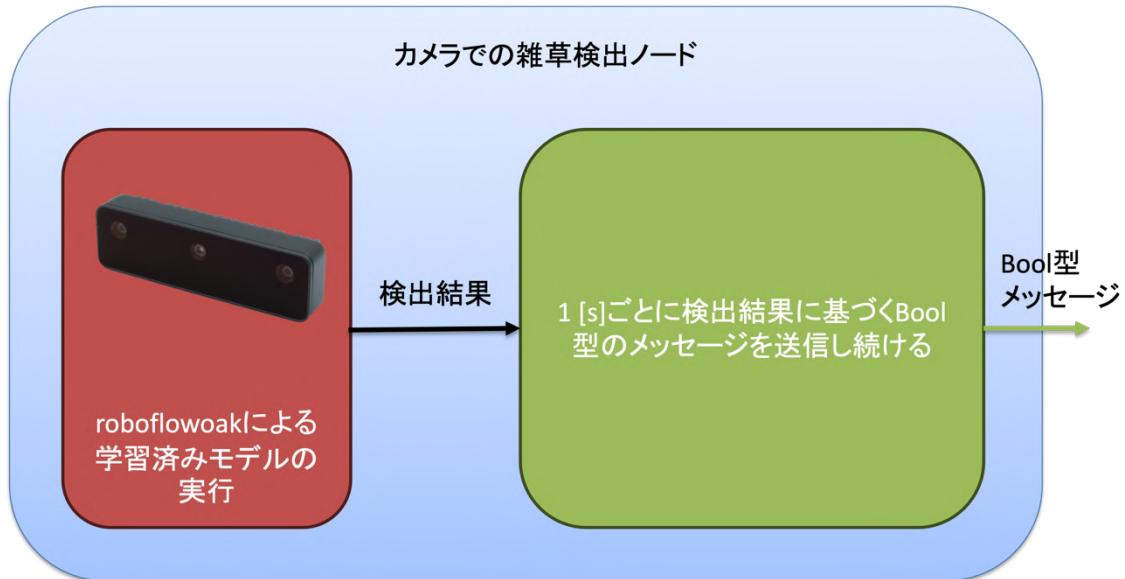


図 62 カメラでの雑草検出ノードの概要図

このノードは OAK カメラによる推論の結果を元にメッセージを publish し続ける機能を実装した。Roboflow にて作成した雑草の検出を行う学習済みモデルを roboflowoak パッケージにより実行を行なった。得られた推論結果を基に 1 [s]ごとに Bool 型のメッセージを送信した。この時、推論結果の中に雑草のクラスとある「Weeds」が存在する場合、Bool 型のメッセージを「True」として送信し、「Weeds」クラスが検出されなかった場合は Bool 型のメッセージを「False」として送信した。

3.6.3 ナイロンコードカッタの制御

図 61 の「除草用モータの制御ノード」での処理内容を図 63 に示す。

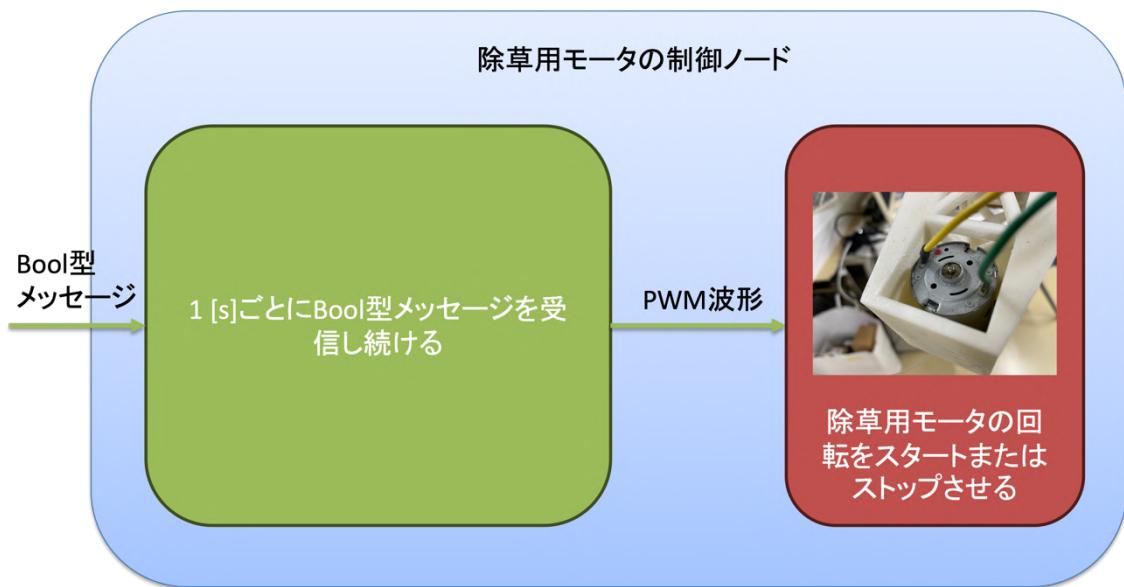


図 63 除草用モータの制御ノードの概要図

このノードは 3.6.2 で実装した「カメラでの雑草検出ノード」より送信される Bool 型メッセージを受信し、受信を行う周期である 1 [s]ごとに除草用モータを回転させるか否かの判定を行なった。受信されたメッセージが「True」であれば除草用モータを回転させ、「False」であれば停止させた。

3.6.4 距離センサでの壁面間距離の検出

図 61 の「距離センサの実行ノード」での処理内容を図 64 に示す。

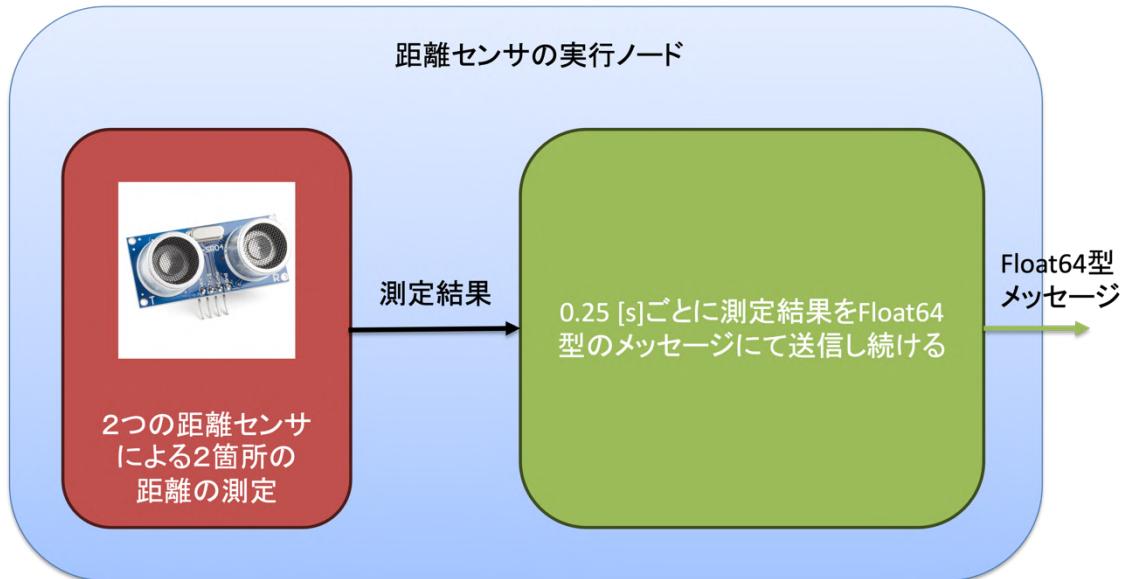


図 64 距離センサの実行ノードの概要図

このノードは2つの距離センサから測定された距離データを Float64 型のメッセージとして 0.25 [s]ごとに送信するノードである。この距離センサでは距離データの取得を1秒間に48回ほど安定して行うことができた。移動プラットフォームの前後に搭載された距離センサから更新され続ける距離データをそれぞれメッセージに格納し送信した。

3.6.5 駆動輪の制御

図 61 の「距離センサの実行ノード」での処理内容を図 65 に示す。

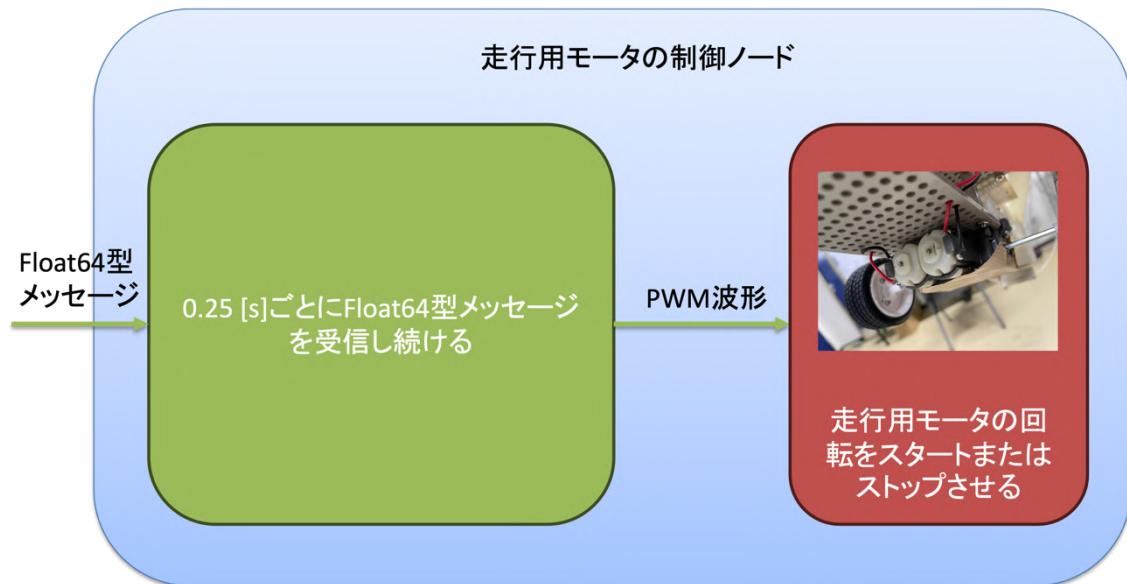


図 65 走行用モータの制御ノードの概要図

このノードは 3.6.4 で実装した「距離センサの実行ノード」より送信される Float64 型メッセージを受信し、受信を行う周期である 0.25 [s]ごとに走行用モータを回転させるか否かの判定を行なった。測定された距離データによりロボットの移動制御を行うフローチャートを図 66 に示す。

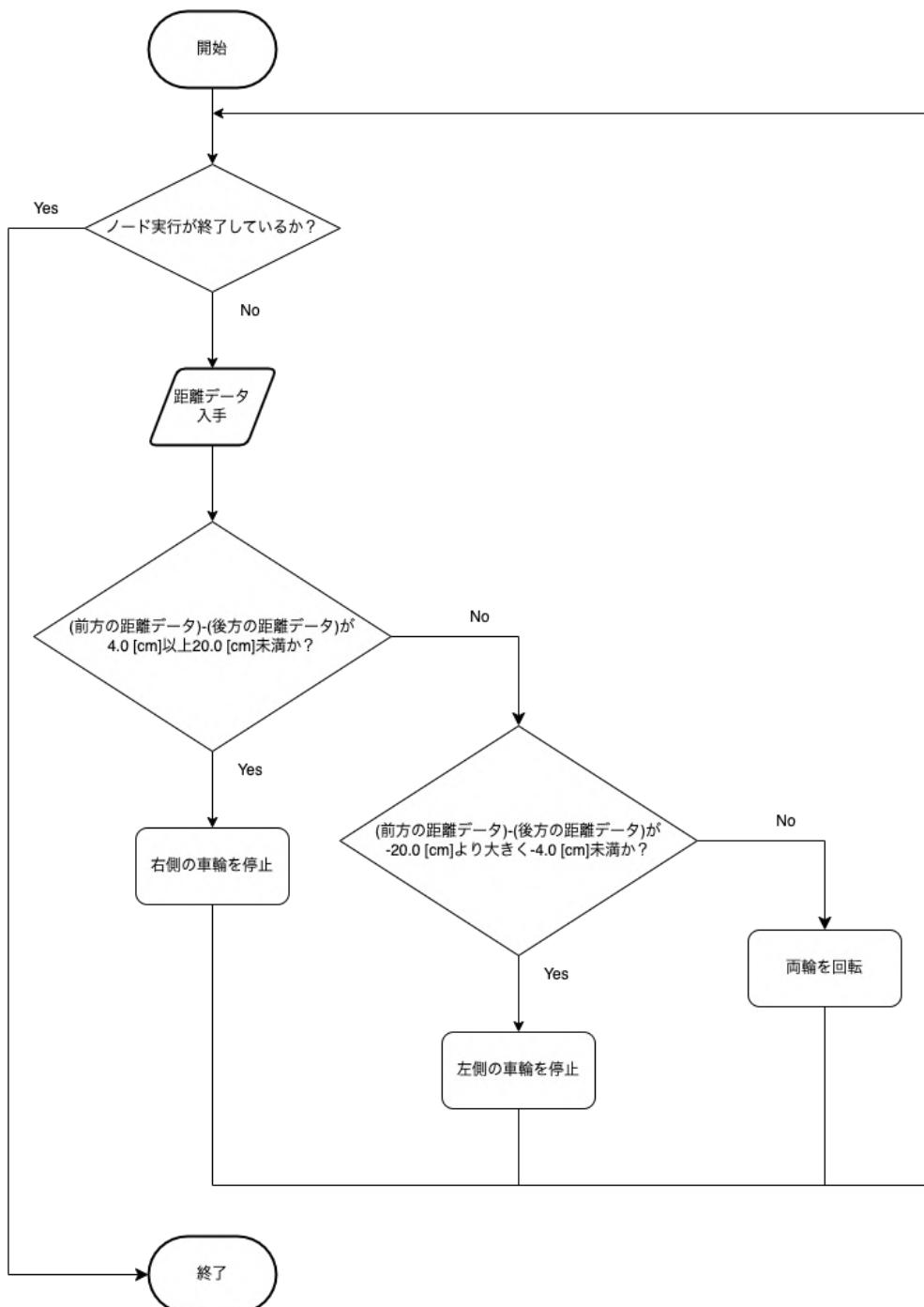


図 66 除草ロボットの移動制御を行う処理のフローチャート

第4章 評価

4.1 評価方法

本研究では壁面と地面の間隙雑草の除草作業において、除草ロボットを用いて自動化することを目的としている。除草ロボットを構成する要素としてナイロンコードカッタ、距離センサを用いたロボットの壁面追従、カメラを用いた雑草の検出が挙げられる。これらの要素を組み合わせて除草作業の自動化における評価のために、評価項目として「除草ロボットの実装」、「ナイロンコードカッタの除草性能」、「1メートルあたりの除草ロボットの移動における衝突回数と時間」、「雑草の物体検出モデルの性能」、「除草作業の自動化」における評価を行なった。評価は大学構内の屋外複数箇所にて除草ロボットを動作させて行なった。

4.2 除草ロボットの実装

本研究にて製作した除草ロボットはハードウェア、ソフトウェア共に必要となるすべての機能を実装することができた。これにより、除草作業の自動化を達成するための実験を行うことが可能となった。

4.3 ナイロンコードカッタの除草性能

本研究にて製作した除草ロボットのナイロンコードカッタは雑草に当たった時、葉を除去することに成功した。しかし、実験環境の雑草は草丈が低く、ナイロンコードカッタが十分に接触しなかつたため一部が除草後に残存していた。

例として図 67 の雑草では一部の葉が地表から 6 [cm] 程の位置にあり、これらを含めた葉の多くはナイロンコードカッタで処理できていた。しかし、図 68 のように地表から 2 [cm] 以下の部分は残存していることがわかる。



図 67 除草前の雑草 1



図 68 除草後の雑草 1

また、草丈が 9 [cm] の図 69 の雑草では上側部分は処理できていたが、図 70 のように地表 3 [cm] 以下では葉の多くが残存しているという結果になった。



図 69 除草前の雑草2



図 70 除草後の雑草2

4.4 1メートルあたりの除草ロボットの移動における衝突回数と時間

除草ロボットの前後に2つの距離センサがあり、2つの距離データを利用することで壁面の追従を行うことに成功した。実験を行なった環境を図 71 に示す。



図 71 除草ロボットの壁面追従を行なった実験環境

図 71において除草ロボットが走行する距離を計測した。距離は 463 [cm] であった。

実験により得られた衝突回数と時間を表 4 に示す。

表 4 衝突回数と走行時間の計測結果

衝突回数 [回]	移動時間 [s]	1 [m]あたりの 衝突回数 [回]	1 [m]あたりの 移動時間 [s]
3	97	0.648	20.95

実験中に除草ロボットが壁面と衝突し、移動ができなくなってしまう問題が発生したため完全な自律移動は達成できなかった。また、1 [m]あたりの衝突回数は 0.648 [回]であり移動時間は 21 [s] であった。

除草ロボットが壁面までの距離を検出し、軌道の修正を行なっている様子を図 72 に示す。



図 72 除草ロボットが軌道を修正する様子

図 72 より左の図では直進すると壁面に衝突してしまう。この時、中央の図のようにロボット右側の車輪のみを前進させることで、右の図のように壁面と進行方向を平行に戻し、再び前進させた。また、この実験では除草ロボットが壁面と衝突し、前進できない現象が発生した。その際、実験者が除草ロボットを壁面から適切な位置まで置き直す作業を行い、計測を続行した。

4.5 雑草の物体検出モデルの性能

本研究では雑草の検出精度の最低値を Precision が 80 [%], Recall が 85 [%]とした。

Roboflow を用いて作成した学習済みモデルの性能を表 5 に示す。

表 5 作成した学習済みモデルの性能

mAP [%]	Precision [%]	Recall [%]
92.6	89.9	90.0

作成した学習済みモデルは目標としていた Precision と Recall を上回る高い精度を出すことができた。

本研究で作成した除草ロボットは雑草の認識結果は GUI による表示を行わず、ナインコードカッタの制御への入力に使用されるため、視覚的に認識結果を確認することができない。そのため、物体検出モデルの評価は ROS2 のノードとして設計されたものではなく、GUI による表示を行うことができる別のプログラムによる同一のモデルの評価を行なった。ホスト PC である Raspberry Pi に接続した OAK カメラで物体検出モデルを動作させ、GUI による表示を行った結果を図 73 に示す。PC の画面上に実際に実験を行なった環境の雑草を OAK カメラの前に表示させたところ、認識させることができた。

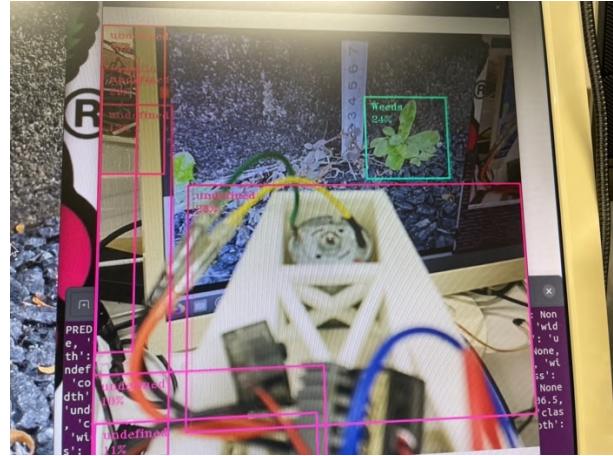


図 73 GUI を用いた雑草検出の確認

本研究ではナイロンコードカッタの ON/OFF を行う周期を OAK カメラからの推論結果の送信周期である 1 [s]として行なった。つまり、1 [s]ごとにナイロンコードカッタの ON/OFF を更新しており、フレームレートは 1 [fps]以上が必要であった。実際のフレームレートを計測したところ、15.42 [fps]となりナイロンコードカッタの制御には十分であった。

4.6 除草作業の自動化

本研究にて製作した除草ロボットは 4.3, 4.4, 4.5 にて行われた実験の結果から除草作業を自動化する目的に対し、十分な性能を持っておらず、目的を達成することはできなかった。

第5章 考察

5.1 ナイロンコードカッタの除草性能

ナイロンコードカッタによる除草は回転するナイロンコードが壁面と接触してもロボットの挙動に影響を与えることはなく、安定した移動と除草の両立が可能であった。しかし、壁面と過剰に接触を続けると、回転刃の回転数が大きく低下し除草を行うのに十分なパワーが確保できなかった。そのため、回転刃の回転数を低下させることなく除草を行うためには除草ロボットと壁面との距離だけでなく、ナイロンコードカッタと壁面との距離も適切に保つ必要があると考えられる。

除草ロボットの移動時に回転刃が地面と接触することを避けるため、ナイロンコードカッタは図 40 のように地面と少し隙間を開けて実装した。しかし、実際に除草を行った雑草の多くは草丈が低く、雑草がナイロンカッタの上部を潜り抜けてしまうことがあった。この結果から草丈が 2 [cm]から 3 [cm]程の雑草を十分に除草するためには、ナイロンコードカッタを的確に雑草に接触させるための改良が必要であると考えられる。

5.2 除草ロボットの移動

本研究で作成した除草ロボットは距離センサを用いて壁面との位置関係を計算し、左右の駆動輪を制御する手法で実装した。しかし、壁面と除草ロボットが衝突したことから本研究の除草ロボットの構成では不十分であり、改良する必要がある。一般的に超音波センサの精度は移動ロボットで使用される LiDAR より精度が低いとされており、超音波センサよりも距離測定の精度が高いセンサへの変更により壁面の認識能力が向上すると考えられる。また、センサからの計測値だけでなく、カメラから得られる画像

情報も利用して計測したデータの正確性を高めることによりロボットが壁面と衝突することなく制御できると考えられる。

5.3 雑草の物体検出モデル

表 5 作成した学習済みモデルの性能より本研究で作成した学習済みモデルは高い精度を達成することができた。しかし、このモデルを学習するために使用されたデータセットは Roboflow Universe で公開されているもののみで構成しているため、本研究の実験環境の雑草の画像を使用していない。図 73 では雑草を認識できているものの、クラス確率は 24 [%]となつており、実験環境の雑草を十分に検出できているとは言い難い。そのため、本研究で使用したデータセットに実験環境の雑草の画像を収集し、追加することで推論モデルにおける雑草の認識率が向上すると見込まれる。

5.4 システム全体

本研究で作成した除草ロボットは、除草作業の自動化を達成する上で多くの課題が挙げられた。除草ロボットは壁面との角度により向きを変化させるため、壁面との距離が一貫せず、ジグザグ走行となっていた。これにより、ナイロンコードカッタを適切な位置で動作させることができていなかつた。そのため、カメラにより検出した雑草を適切に処理するためには、LiDAR を用いてより正確に環境認識を行うことで壁面との接触を減らし、除草ロボットを直線的に走行させる必要があると考えられる。また、本研究で除草を行った雑草は壁面に接触する形で繁茂するため、除草を的確に行うためにはナイロンコードカッタの高さを含めた位置を柔軟に変更できるようにする必要がある。そこ

でロボットアームを移動プラットフォームへ装着し、その先端にナイロンコードカッタを取り付けることで正確な位置決めが可能になると考えられる。

第6章 結論

6.1 まとめ

本研究では壁面を追従しつつ、カメラにより検出された雑草を除草するロボットを作成し、除草作業の自動化が可能であるか評価を行った。雑草を検出し、除草機構であるナイロンコードカッタを動作させることは可能であったが、現状の構成では雑草を十分に処理できないことがわかった。また、壁面の追従では壁面と除草ロボットが接触し、行動不能となることがあった。超音波センサよりも高い精度で距離測定が可能なLiDARを使用する必要や複数のセンサを用いて環境認識を行う必要がある。また、除草作業の自動化を達成するにはハードウェア、ソフトウェア共にさらなる改良が必要である。

6.2 今後の展望

本研究では、超音波センサでは正確な距離検出が困難であったため、今後は超音波センサよりも高い精度で距離検出が可能なLiDARを移動プラットフォームに搭載し、壁面を検出することを目指す。また、除草ロボットの走行制御ではLiDARやカメラなどの他のセンサからの情報を統合することで環境認識の精度を向上させ、直線的な走行を実現する。加えて除草機構部分では、様々な大きさの雑草に対し、適切な位置でナイロンコードカッタを動作させるためにロボットアームを使用することで除草性能の向上を図る。

謝 辞

本研究の遂行に際し、多岐にわたって御指導・御鞭撻を賜りました神戸英利教授に感謝申し上げます。また、研究の遂行と論文の完成において、多くの助言と御協力を頂きました神戸研究室の皆様に深く感謝し、心から御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 熊本市, “熊本市道路除草等計画基本計画,” 14 2019. [オンライン]. Available:
https://www.city.kumamoto.jp/hpKiji/pub/detail.aspx?c_id=5&id=23743&class_set_id=5&class_id=864. [アクセス日: 3 12 2023].
- [2] 独立行政法人国民生活センター, “刈払機(草刈機)の使用中の事故にご注意ください！,” 20 7 2017. [オンライン]. Available:
https://www.kokusen.go.jp/news/data/n-20170720_1.html. [アクセス日: 3 12 2023].
- [3] 国土交通省, “No.19 除草の高効率化・低コスト化(道路除草を例に)①,” [オンライン]. Available: <https://www.mlit.go.jp/common/001183038.pdf>. [アクセス日: 13 12 2023].
- [4] 平 雄一郎, 加藤 大誠, 渡部 光, “小型ビニールハウス用雑草除草ロボットの開発—試作1～3号機の課題抽出と試作4号機の設計—,” 崇城大学紀要, 2021.
- [5] NTT ドコモ, “農業用栽培管理ロボット,” [オンライン]. Available:
<https://www.nttdocomo.ne.jp/binary/pdf/corporate/technology/rd/openhouse/openhouse2020/A/A-20.pdf>. [アクセス日: 5 12 2023].

- [6] 須藤 裕子, 小笠原 勝, 西尾 孝佳, 一前 宣正, “舗装道路内の間隙に形成される雑草植生,” 日本雑草学会, 2004.
- [7] Luxonis, “OAK-D S2,” [オンライン]. Available:
<https://shop.luxonis.com/collections/oak-cameras-1/products/oak-d-s2?variant=42455432233183>. [アクセス日: 23 12 2023].
- [8] Raspberry Pi, “Raspberry Pi 4,” [オンライン]. Available:
<https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/>. [アクセス日: 23 12 2023].
- [9] Open Robotics, “ROS 2 Documentation: Foxy,” [オンライン]. Available:
<https://docs.ros.org/en/foxy/index.html>. [アクセス日: 23 12 2023].
- [10] Roboflow, “Weeds-pub-plus Computer Vision Project,” [オンライン]. Available: <https://universe.roboflow.com/russ-hall/weeds-pub-plus>. [アクセス日: 31 12 2023].