

2022（令和4）年度 修士学位論文

車幅可変機構を備えた農作業ロボットの移動機構の提案

Proposal of automatic vehicle for agriculture using variable width mechanism of wheel

2023 年 3 月 3 日

高知工科大学大学院 工学研究科基盤工学専攻
知能機械工学コース

1255018 長瀬 弘武

指導教員：岡 宏一

目次

第1章 序論	- 1 -
1.1 研究背景	- 1 -
1.2 農業ロボットの現状	- 1 -
1.3 研究目的	- 3 -
1.4 本論文の構成	- 4 -
第2章 提案する移動機構	- 5 -
2.1 ロボットの概要	- 5 -
2.2 走行方法	- 5 -
第3章 試作機	- 8 -
3.1 試作機の概要	- 8 -
3.2 試作機の製作	- 8 -
3.2.1 モータの必要トルク	- 8 -
3.2.2 構造系	- 9 -
3.2.3 電装系	- 13 -
3.3 各機器・部品の詳細	- 13 -
3.3.1 モータ	- 13 -
3.3.2 エンコーダ	- 14 -
3.3.3 ポテンショメータ	- 15 -
3.3.4 バッテリー	- 15 -
3.3.5 マイコン	- 16 -
3.3.6 モータドライバ	- 16 -
第4章 走行実験	- 17 -
4.1 実験内容	- 17 -
4.2 実験結果と考察	- 17 -
第5章 RGB+深度カメラ	- 20 -
5.1 RGB+深度カメラの概要	- 20 -
5.2 RGB+深度カメラを使用した畝認識実験	- 20 -
5.3 RGB+深度カメラを使用した畝間走行実験	- 22 -
第6章 結論	- 25 -
謝辞	- 26 -
参考文献	- 27 -

第1章 序論

1.1 研究背景

日本の農林水産省が公表しているデータ⁽¹⁾によると日本の農業就業人口は 2015 年では 175.7 万人に対し、2020 年では 136.1 万人となっており、5 年間をかけて農業就業人口は減少し、人手が不足してきていると考えられる。また、農業における作業は野菜の収穫や運搬など手作業に頼ることが多く、農業従事者の大きな負担となることから、作業の機械化・自動化が望まれている。

近年、作業の自動化・省力化のためにスマート農業と呼ばれる次世代の農業が推進されている。スマート農業とは、農林水産省によると「ロボット技術や ICT を活用して超省力・高品質生産を実現する新たな農業」とされており、事例として、耕運機や田植え機などの作業機械の無人自動運転、飛行ドローンによる生育診断や農薬散布などが挙げられる。

スマート農業は、企業や大学、研究機関が活発に研究開発を行っており、今後の農業のシステムや雇用形態に変化をもたらすことが期待されている。また、スマート農業によって生産量の向上や、軽労化が進むことで農業就業者の新規参加が増加し、日本の農業の課題解決が進むことも期待されている。

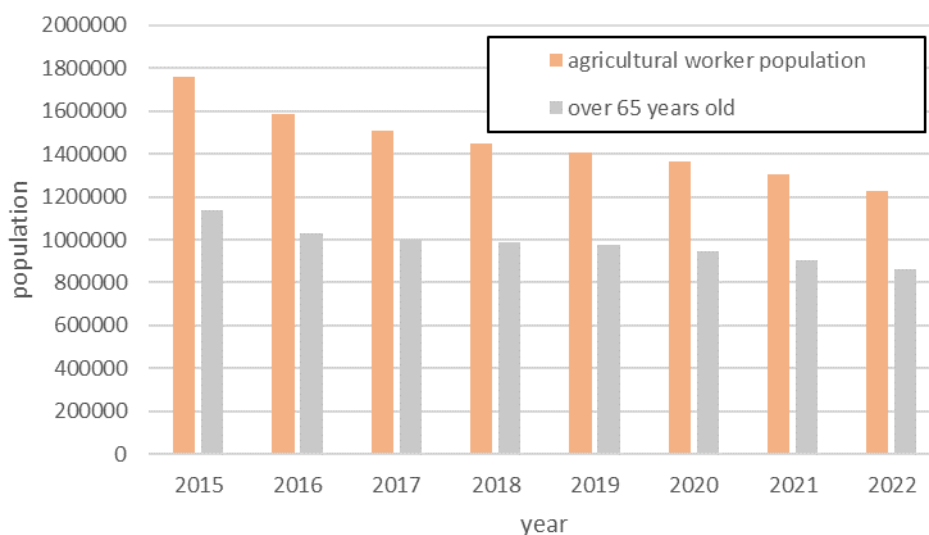


Fig.1.1 基幹的農業従事者数の推移

1.2 農業ロボットの現状

スマート農業が推進されている中で、様々な農業ロボットが開発されており、農業ロボットの移動機構には、車輪型、クローラ型、レール型等が存在している。それぞれの移動機構を採用している農業ロボットを図 1.2 に日本総合研究所が開発した多機能型農業ロボット「Donkey」、図 1.3 に立命館大学・オサダ農機が開発したキャベツ収穫ロボット、図 1.4 にパナソニック株式会社が開発したトマト収穫ロボット、図 1.5 に農研機構農業技術革新工学研究センターが開発したトマト着果モニタリング装置を示す。

図 1.1 の Donkey は 4 輪駆動の車輪型ロボットで、機能として、作物や除草剤の運搬や機体上部に設置しているセンサによって人を検知し、農業従事者の後方を追従することが可能である。図 1.2 のキャベツ収

穫ロボットはクローラ型の移動機構で、収穫から運搬まで自動で行うことが可能である。図 1.3 のトマト収穫ロボットは、トマトの検知から収穫、運搬をこなす車輪型の農業ロボットである。図 1.4 のトマト着果モニタリング装置はレール型の農業ロボットで、レール上を自動走行することが可能であり、農業ロボットが一定速度で移動しながら作物の画像を取得し、収穫可能な果実数を検出することが可能である。



Fig.1.2 Donkey⁽²⁾



Fig.1.3 Cabbage harvesting robot⁽²⁾



Fig.1.4 Tomato harvesting robot⁽²⁾



Fig.1.5 Tomato fruit set monitoring device⁽²⁾

車輪型の特徴として、車輪の回転により機体を移動させ、直進、旋回が可能であり、移動機構として簡素に仕上がることで、様々な用途に合わせたロボットが開発されている。また、車輪の特性を生かし、平地、傾斜など様々な環境に適応できるロボットが開発されている。欠点として、接地面積が小さいことから、農地の環境によってスリップが生じる可能性がある。その解決案として、車輪数を増やすことで接地荷重を分散させる方法がある。しかし、車輪数が増えると機構の複雑化と機体が大きくなる等の問題点が挙げられる。

クローラー型の特徴として、接地面積が大きくなることから、泥などの軟弱な地盤に強く、スリップする可能性は低い。また、接地面積が大きくなり接地圧が低くなることから荷台に積載できる量を多くすることができる。欠点として、接地面積を大きくするためのベルトなどの幅が広く、機体が大型化してしまい、畝幅が狭い農地への進入や農地の端での旋回時に畝を傷つけてしまう可能性がある。

レール型の特徴として、予め農地にロボットが進行するためのレールを配備し、そのレール上を進行しながら作業を行う。車輪型、クローラー型と比べ、決められたレール上を進行するため、自律走行する際の経路探索が必要ない。このことから経路探索のためのセンサが必要ないため、コストの削減ができる。欠点として、レールの設備が予め必要であり、農地の形状の変化に対応が難しい点である。

現状の農業ロボットの移動機構には用途、作業環境に合わせた機構の利用がある。しかし、現状の農業ロボットでは特定の農場に対して特定のロボットを導入し、研究開発が行われている。農場 A に導入可能な農業ロボットであっても農場 B には導入できない可能性がある点で汎用性に問題があるのではないかと考える。本大学の付近には多くの農場が点在し、農場の調査を行ったところ、最小の畝間は 200 mm で形成されており、最大でも 500mm~700mm の範囲であった。

本研究では、車輪型ロボットの車輪の特性の様々な環境に適応できるという特徴を軸に、機械的に作業環境に対応し、独立ステアリング機構を各車輪に取り付けた車輪型ロボットを提案する。

1.3 研究目的

本研究では、作物の背丈が低い葉茎菜類(ニラ、ネギ等)の農場と作物の背丈が高く育つ果菜類(ピーマン、キュウリ等)の農場のどちらの農場にも導入可能である車幅可変機構と独立ステアリング機構を備えた農作業用ロボットの移動機構の開発を目的としている。様々な農場に適応するために移動機構に車輪を採用し、各車輪には独立ステアリング機構を組み合わせ、葉茎菜類農場と果菜類農場の農場の作りの違いに対

応させるために車幅可変機構を搭載することを考えた．本稿では，その試作機の製作と実験，今後の課題について述べる．

1.4 本論文の構成

本論文の第2章では，提案するロボットの概要と提案する2種類の走行方法について述べる．第3章では，製作した試作機の詳細について述べる．第4章では，製作した試作機を用いた走行実験について述べる．第5章では，使用するカメラとカメラを使用した走行実験について述べ，第6章では，本論文のまとめと今後の課題について述べる．

第2章 提案する移動機構

2.1 ロボットの概要

開発する自律駆動ロボットのモデルを図 2.1 に示す。自律駆動ロボットは車輪に接続されている DC モータが駆動用であり、機体を安定させるために各車輪の後方にキャスターを 2 つ取り付け、地面と 3 点で接地している。各車輪には独立ステアリング機構を取り付けている。この独立ステアリング機構にも DC モータをしようしており、ホイールの舵角を制御することで機体の進行方向を決定する。図 2.1 に示すような車幅可変機構を用いることで畝の幅に合わせた車幅を調整し、その上にフリーの回転軸を設けることで旋回時に車幅の伸縮を行い、小スペースな旋回運動を可能にする機構とした。

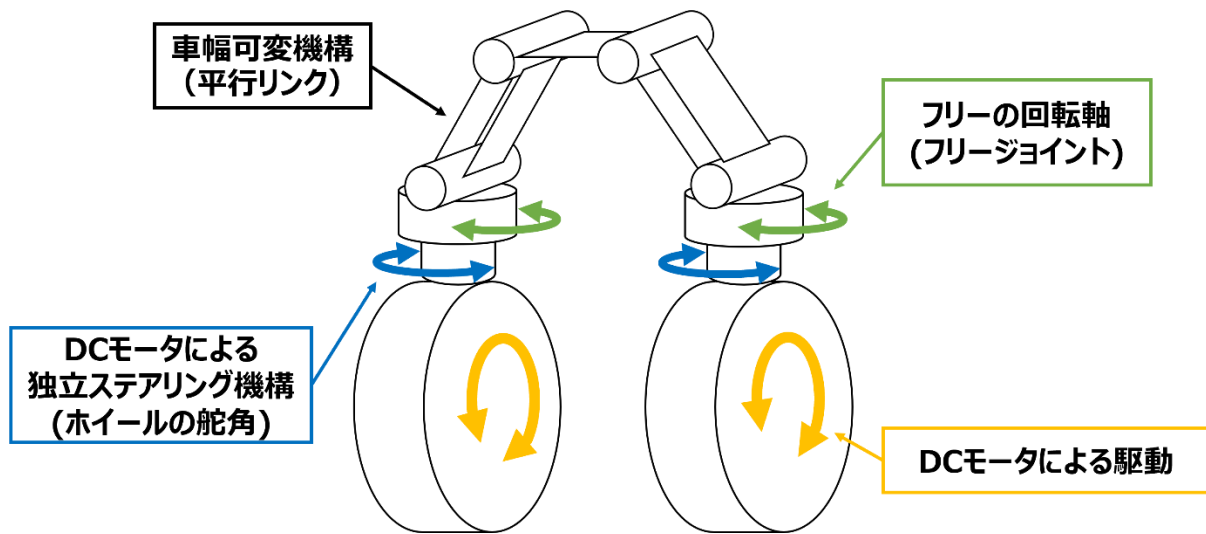


Fig.2.1 model of robot

2.2 走行方法

提案する農作業用ロボットの走行方法を図 2.2, 図 2.3 に示す。図ではアルファベット順にロボットが移動する様子を示す。提案するロボットは農場の畝間を利用し、移動を行う。図 2.2 が示すのは、作物の背丈が低い葉茎菜類(ニラ, ネギ等)の農場に対応した走行方法で、これを走行モード A と呼ぶ。走行モード A では図 2.2 の(a)に示すように左右の車輪を同時に駆動させ農場の端まで直進移動する。次に(b)に示すように右車輪は固定, 左車輪のみに舵角を付け, 旋回を始める。(c)~(e)にかけて車輪を農場の端と平行に走行し, 隣の畝の進入口まで移動する。最後に(f)に示すように車輪に舵角を付け, 隣の畝間に進入し旋回運動を完了する。走行モード A では旋回運動をしているとき, 車幅可変機構が受動的に動作し車輪幅を短くすることで, 旋回運動に必要な場所を小さくすることができる点が特徴である。

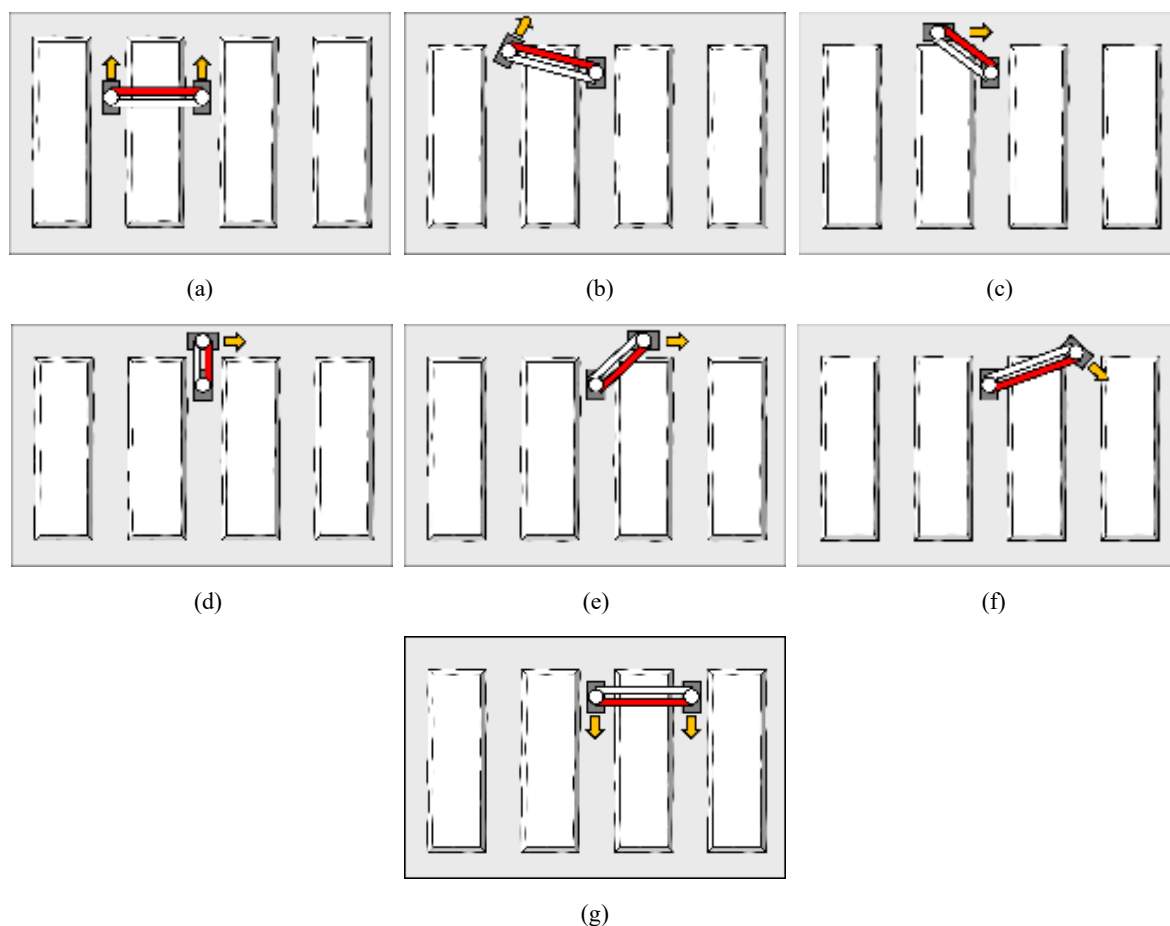


Fig2.2 Driving Mode A Driving Method

図 2.3 が示すのは、比較的作物の背丈が高く育つ果菜類(ピーマン、キュウリ等)の農場に対応した走行方法でこれを走行モード B と呼ぶ。果菜類の農場では畝の中心に背の高い苗が育てられている。そういった環境の中で走行モード A のように畝を跨ぐことが物理的に不可能である。走行モード B では、車輪を前方後方に配置し走行を行うことで果菜類の農場の畝間の中を移動できるように対応させた。最初に図 2.3 の(a)に示すように畝間の中を走行し、農場の端まで移動する。次に(b)に示すように前輪のみに舵角を付ける。(c)から(d)にかけて前輪は農場の端と平行になるように走行し、後輪は旋回開始地点まで前進する。(e)から(f)では後輪と前輪に舵角を付け旋回していき、隣の畝間の中に進入し旋回運動を完了する。走行モード B では畝間の中を走行するため畝の幅に関係なく走行が可能になる点で走行モード A との違いがある。上述のように走行モード A、走行モード B の旋回運動をそれぞれ繰り返すことで各農場の全範囲を移動することが可能になる。

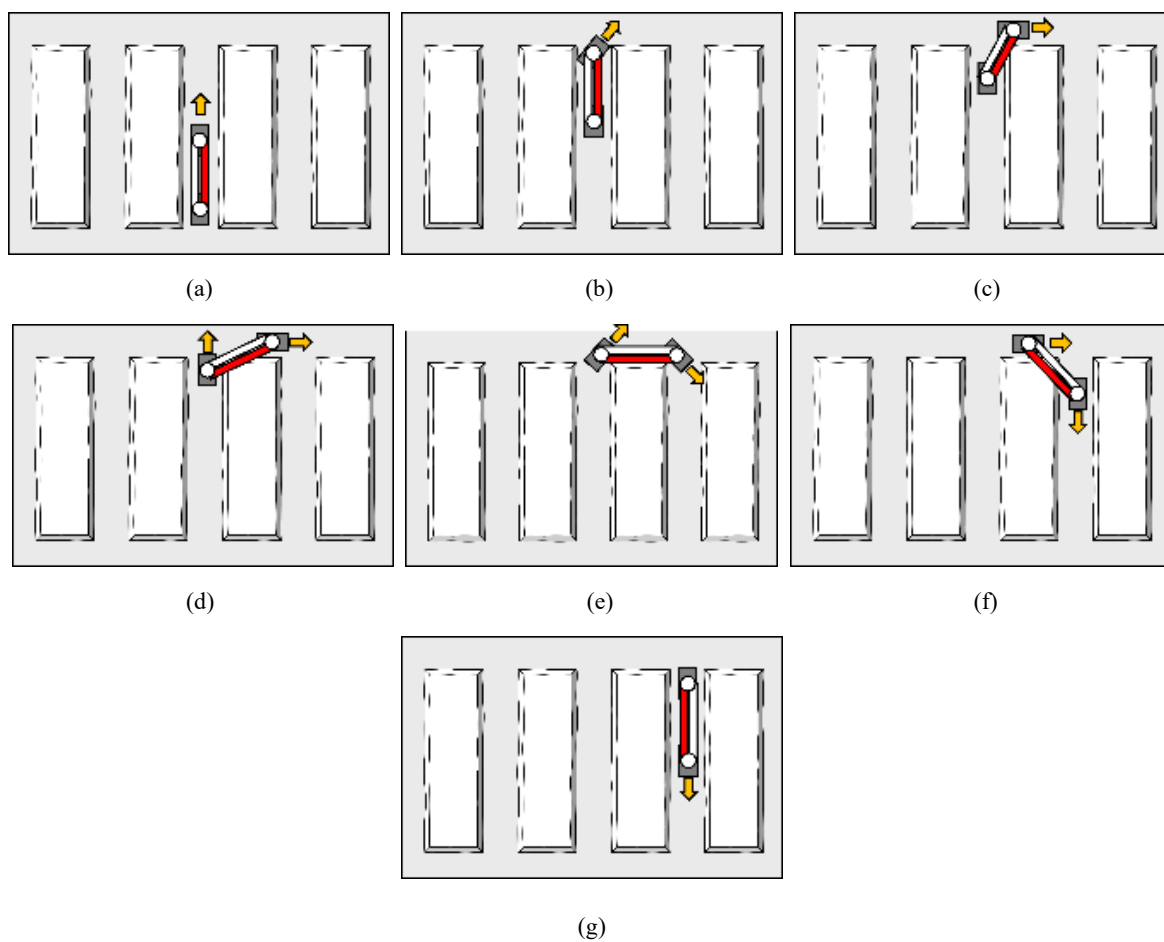


Fig.2.3 Driving Mode B Driving Method

第3章 試作機

3.1 試作機の概要

設計・製作した試作機を図 3.1 に示す。機体構造部分は軽量化と組み立てしやすさを考慮し、MISUMI 製のアルミフレームを使用した。車輪部の上部に接続されている台形に組み込まれているアルミフレーム部材が車幅可変機構である。車幅可変機構と車輪駆動部をターンテーブル型のフリージョイントを用いて接続されている。前方の車輪が駆動用の車輪となっており、後方の小さい車輪がキャスターである。

機体には、電源用の鉛蓄電池、各モータ用のアンプ、モータ制御及び PC と通信用のマイクロコンピュータ(Arduino Mega)が搭載されており、第 3 章の 3.4 項にて各部品の詳細を説明する。

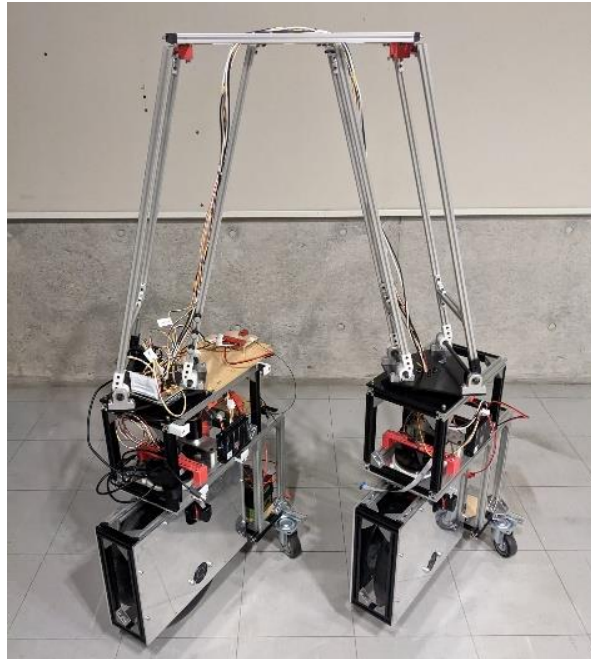


Fig.3.1 prototype

3.2 試作機の製作

3.2.1 モータの必要トルク

試作機を製作するにあたり、モータの必要トルクの計算を行う。

車輪は 2 輪独立駆動であり、質量 m の農業ロボットが角度 θ の傾斜に登攀するとき、摩擦係数を μ 、重力加速度を g とすると、駆動力(負荷) F は、

$$F = mgsin\theta + \mu mg \quad (3.1)$$

で求めることができる。また、車輪直径を d 、減速比を i 、伝達効率を η 、接地車輪数を n とするとモータの必要トルク T_m は、

$$T_m = \frac{Fd/2}{n} \quad (3.2)$$

で求めることができる．農業ロボットの移動速度は農業従事者の補助を考えた時，人間の歩行速度と同等とする．また，農地での走行，荷物の運搬を考えるため，高トルクのモータを採用する．これらをもとに，農業ロボットの実験機における計算条件を以下に定める．

- ・ 農業ロボットの質量を 62.5 kg とする．
- ・ 重力加速度は 9.81 m/s² とする．
- ・ 傾斜角度は 0° の平らな地面の農地とする．
- ・ 摩擦係数 μ はより厳しい条件として 1.0 とする．
- ・ 車輪直径は 300 mm とする．
- ・ 接地車輪数は 2 つの駆動輪と 4 つのキャスターから 6 とする．

以上より，農業ロボットにかかる負荷は 613.1N となり，農業ロボットが初動するためのモータの必要トルクは 15.3 Nm となる．この計算結果をもとに，ギヤヘッド付きモータの選定を行った．選定したモータの最大トルクは 2.42 Nm，ギヤヘッドの減速比が 43:1 で，ギヤヘッド付き DC モータの出力トルクは 104 Nm となり，条件を満たしている．

3.2.2 構造系

本研究で製作した農作業用ロボットの試作機は大きく分けて 4 種類の構造部で構成されている．図 3.2 に試作機の構成部品をバールンで示した．3.2.2 項に各構成部品の詳細について示す．①は駆動部，②は独立ステアリング機構，③はフリージョイント，④は車幅可変機構を指している．

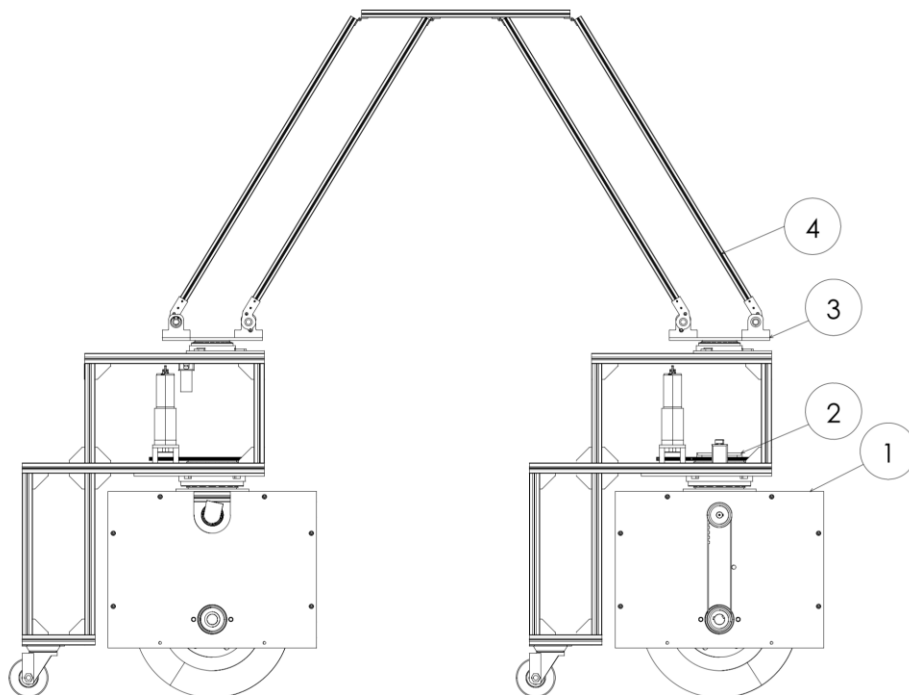


Fig.3.2 Components of the prototype

Table 3.1 List of Component

Number	Item
①	Drive part
②	Steering mechanism
③	Free joint
④	Variable width mechanism of wheel

表 3.1 の構成部品①の農業ロボットの車輪部分の詳細を図 3.3 と表 3.2 に示す。車輪部分は構造として、アルミフレームと A7075 製のアルミ板で組み立てられ、M5 ボルトと先入れナットにより締結している。また、⑤に示している配置したギヤヘッド付き DC モータで④のタイミングベルトを介してホイールを駆動させる。駆動側と従動側の伝達比は 1:1 で、モータの回転速度が車輪の回転速度となる。

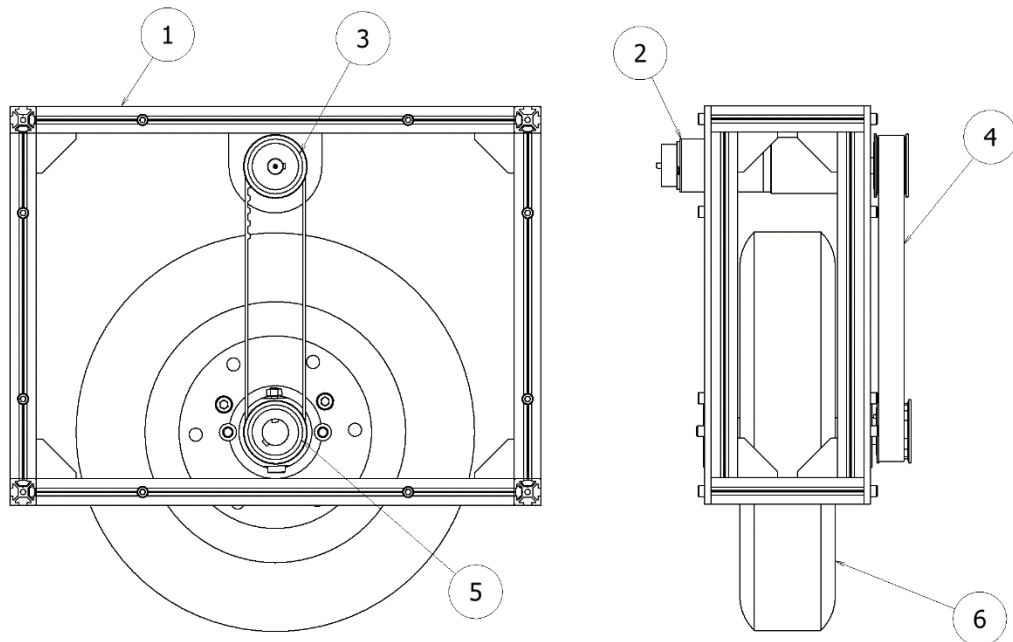


Fig 3.3 Drive part(CAD)

Table 3.2 List of Steering mechanism

Number	Item	Material
①	Aluminum frame	Aluminum
②	Motor	
③	Drive pulley	SUS304
④	Timing belt	Rubber
⑤	Driven pulley	SUS304
⑥	Wheel	Rubber, Aluminum

次に、表 3.1 の構成部品②の独立ステアリング機構について述べる．独立ステアリング機構の詳細を図 3.4 と表 3.3 に示す．まず、ステアリング機構とは、進行方向を変化させる操舵装置のことである．主に自動車に搭載されており、前輪の角度を変化できるステアリング機構が一般的である．本研究で採用した独立ステアリング機構とは、ステアリング機構と同様に進行方向を変化させる操舵装置のことで、ステアリング機構とは違い、車輪の角度をそれぞれ独立して変化させることができる機構のことである．

製作した独立ステアリング機構は、上述した車輪部分に舵角を付ける機構であり、舵角を付けるためのトルクの算出が難解なため、バネばかりによって、トルクを計測し、モータの選定を行った．ギヤのピッチ円直径 120mm でバネばかりを取り付け、計測したバネばかりの平均値は1.3Nであり、独立ステアリング機構に必要なトルクは、78 mNm であった．このトルクより大きいトルクを出力できるモータを選定した．その結果、独立ステアリング機構はギヤヘッド付き DC モータで駆動させ、図 3.4 に示すようにモジュール 1 のギヤを介してトルクを伝達している．伝達比は 2:1 にしており、高トルクを出力する．

独立ステアリング機構は図 3.4 で示す④のギヤの下部に図 3.4 の⑤の円錐ころ軸受けを配置し、ベースプレートを同じ円錐ころ軸受けで挟むように固定している．円錐ころ軸受けはラジアル荷重とアキシャル荷重の両方を受け持つことが可能な軸受けである．車輪の駆動用モータは円錐ころ軸受けに対して、ラジアル荷重を加える．また、自重や積載物は円錐ころ軸受けに対してアキシャル荷重を加えることになる．これらを解決するために円錐ころ軸受けを採用しており、滑らかなステアリングを実現できている．そして、図 3.5 の⑥の接続プレートと図 3.4 の①のアルミフレームを M5 ボルト、先入れナットにより締結している．

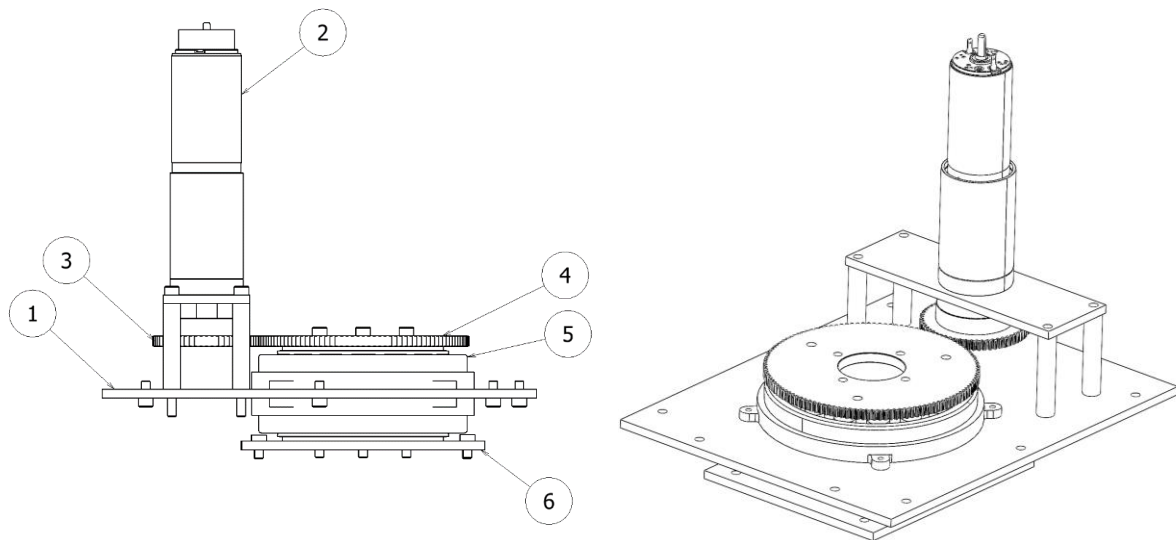


Fig 3.4 Steering mechanism(CAD)

Table 3.3 List of Steering mechanism

Number	Item	Material
①	Base plate	Aluminum
②	Motor	
③	Drive gear	S45C
④	Driven gear	S45C
⑤	Tapered roller bearing	Aluminum
⑥	Connection plate	

次に、表 3.1 の構成部品③のフリージョイントについて述べる．フリージョイントの詳細を図 3.5，表 3.4 に示す．フリージョイントは車輪駆動部と車幅可変機構を繋ぐ重要な構成部品である．ターンテーブルのように自由に回転できることで車幅可変機構側の回転が車輪駆動部への影響を無くすることができる．この特徴によって、車幅を可変する際、機体が旋回する際に拘束なく動くことができる．

製作したフリージョイントは、図 3.5 に示す①の車幅可変機構と接続される接続プレートと駆動部と接続されるベースプレートで③の円錐ころ軸受けを挟み込むように固定している．また、円錐ころ軸受けとスラストベアリングで②のベースプレートを両持ちで固定することで軸方向の誤差を減らしている．

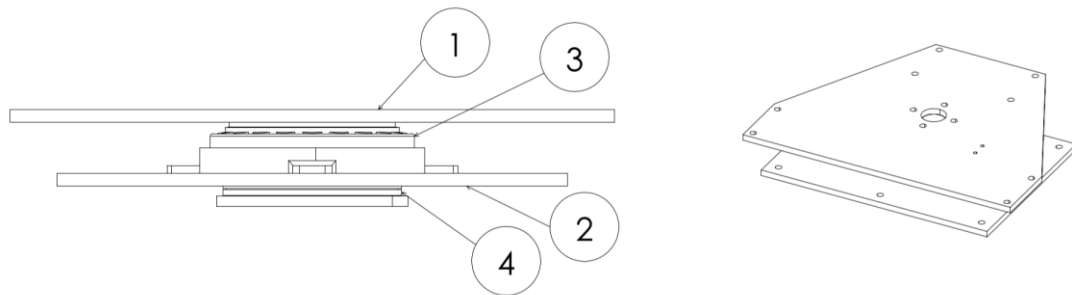


Fig.3.5 Free joint

Table 3.4 List of Free joint

Number	Item	Material
①	Connection plate	POM
②	Base plate	POM
③	Tapered roller bearing	S45C
④	Thrust bearing	S45C

次に、表 3.1 の構成部品④の車幅可変機構について述べる．車幅可変機構を図 3.6 に示す．車幅可変機構は MISUMI 製のアルミフレームで構成している．構造としては平行リンクで組まれており、400mm の上部の部材が地面と平行にしながら長手の部材が地面との傾きを増減することで、車幅を変化させることができる．車幅の変化量は、機械的拘束を含め、630mm～1500mm まで変化させることができる．

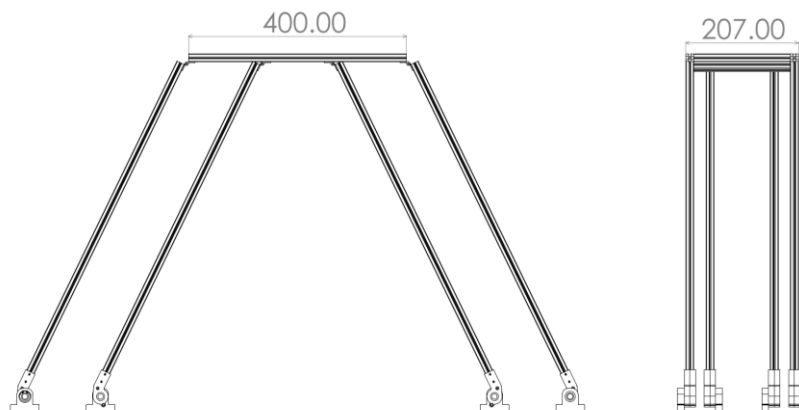


Fig.3.6 Variable width mechanism of wheel

3.2.3 電装系

図 3.7 に製作した農作業ロボットの電装系の接続構成を示す。駆動用モータとステアリング用モータはマクソン社のサーボアンプである ESCON 50/5 を用いて駆動させる。サーボアンプには、Arduino Mega から duty 比を入力することでモータを制御している。駆動用モータは農作業ロボットの機体速度に影響するため、速度制御を行い、一定速度で走行させる制御を行う。また、ステアリング用モータは車輪の舵角を制御するため、位置制御を用いる。この時、ステアリング用の ESCON にはモータから伸びるエンコーダを接続せずにポテンショメータの値をフィードバックすることで、位置制御を行っている。

操舵角、フリージョイントの回転角、車幅可変機構の傾斜角をポテンショメータによって絶対角を入力し、アナログ電圧信号により Arduino Mega が A/D 変換をし、各角度を取得する。それらのデータを USB ケーブルで PC と Arduino Mega を接続し、シリアル通信によって PC にデータを保存する。

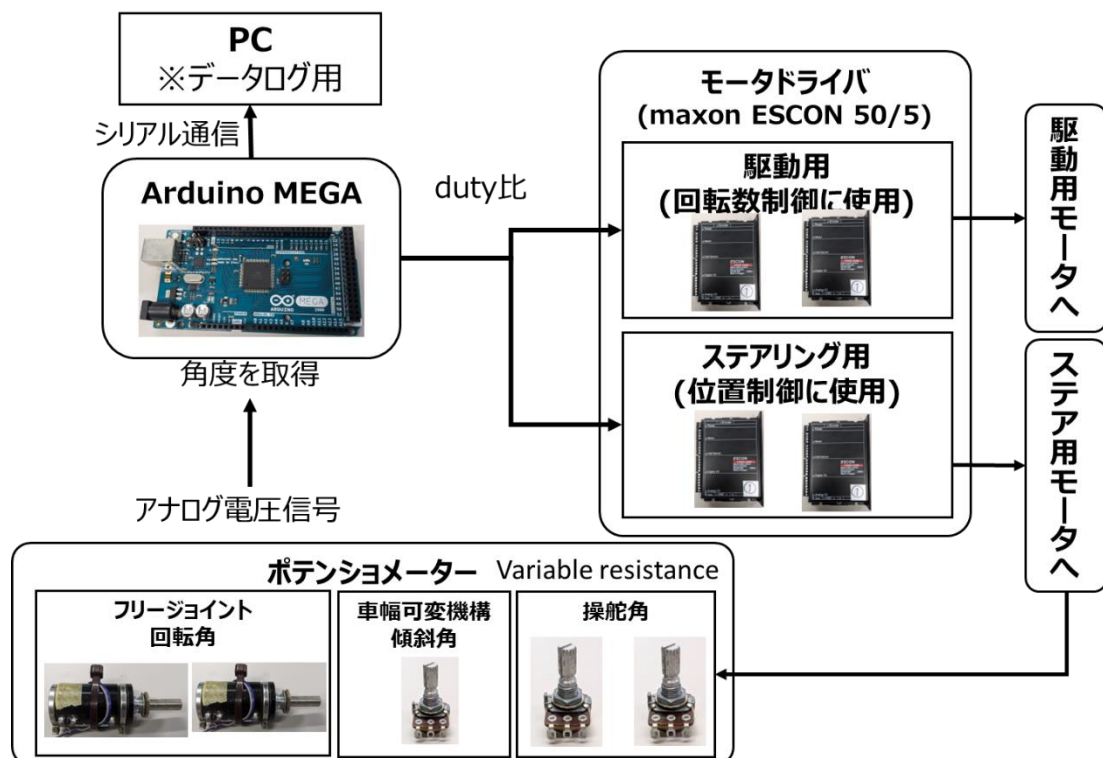


Fig.3.7 電装系の接続構成

3.3 各機器・部品の詳細

3.3.1 モータ

農作業ロボットの搭載されているモータについて述べる。図 3.8 に駆動用モータ、図 3.9 にステアリング用モータを示し、表 3.5 に各モータの諸元を示す。駆動用モータは maxon 社の RE40、ステアリング用モータは maxon 社の RE35 を使用している。定格電圧は 24V であり、3.3.6 項で示す対応したサーボアンプによって制御を行う。

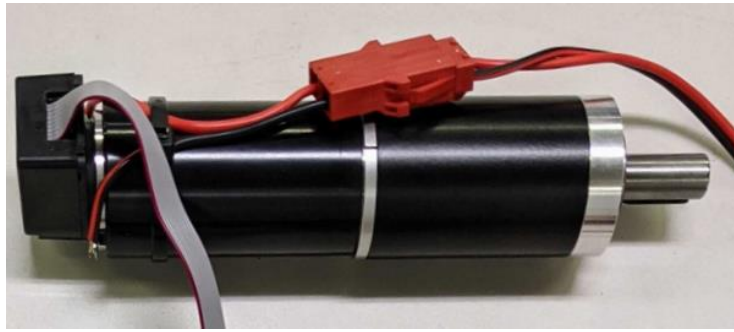


Fig.3.8 駆動用モータ RE40



Fig.3.9 ステアリング用モータ RE35

Table.3.5 Motor spec

Specification		
Wheel part	Two wheel independent drive	
	DC Motor (Drive)	Maxon RE40 24V ×2
	Gear head (Drive)	43:1
	Max speed	2.8 m/s
Steering mechanism	Independent steering mechanism	
	DC Motor (Steer)	Maxon RE35 24V ×2
	Gear head (Steer)	156:1

3.3.2 エンコーダ

駆動用のモータの速度制御をするために、モータの終端にエンコーダが取り付けられている。その様子を図 3.10 に示す。エンコーダ HEDL5540 は 1 回転で 500 カウントを出力することができる。



Fig.3.10 エンコーダ HEDL 5540.

3.3.3 ポテンシオメータ

図 3.11 と図 3.12 に農作業ロボットに使用しているポテンシオメータを示す．図 3.12 に示すポテンシオメータは 270° の回転角を有しており，独立ステアリング機構の操舵角，車幅可変機構の傾斜角の検出に用いる．この 2 つの角度は 180° 以下の範囲で角度が変化するのみである．しかし，フリージョイントは HP-12B は 3600° の回転角を有している．製作したフリージョイントは 180° より大きく可動するため，HP-12B を選定する必要があった．しかし，Arduino の A/D 変換の分解能は 10bit であり，HP-12B は精度が悪くなってしまうことがあるが，検出角度範囲の優位性から，このポテンシオメータを使用する．



Fig.3.11 HP-12B



Fig.3.12 ポテンシオメータ

Table.3.6 Potentiometer spec

Specification		
HP-12B	measuring angle	3600°
potentiometer	measuring angle	270°

3.3.4 バッテリ

サーボアンプ及びモータの電源として，LONG の WP5-12 を 2 個直列に接続し，24V を供給している．このバッテリーは鉛蓄電池であり，安全性に優れている．試作機には 5Ah の小容量のバッテリーであるが，実験上では運用に問題ない．しかし，今後バッテリーの容量を大きくし，長時間の運用ができるように改善が必要であると考えている．



Fig.3.13 LONG WP5-12

Table.3.6

Specification		
Battery	Lead-acid battery	12V5Ah ×2
	Size	90×70×101 mm
	Weigh	2kg

3.3.5 マイコン

試作機の心臓部と言えるマイコンは Arduino Mega を用いている。Arduino Mega は ATmega2560 を搭載した開発ボードであり、54 個のデジタル入出力ピン、そのうちの 15 このピンは PWM 出力が可能で、モータの制御、センサのサンプリングなどを運用する際に優秀である点から Arduino Mega を採用した。



Fig.3.14 Arduino Mega

3.3.6 モータドライバ

各モータを駆動するためのアンプとして、maxon 社のサーボアンプ ESCON50/5 を計 4 つ使用している。ESCON50/5 は DC モータ、ブラシレス DC モータの速度制御、電流制御が可能なコントローラである。最大出力が 250W であり、大きい出力のモータ駆動に適しており、今回は駆動用モータに速度制御を用いている。ステアリング用モータには電圧制御を行い、エンコーダを接続せずにポテンショメータから得られた角度をマイコンで処理を行い、ESCON に入力し、フィードバック制御を行っている。



Fig.3.15 ESCON 50/5

第4章 走行実験

4.1 実験内容

今回の走行実験では室内の実験環境で走行モード A、走行モード B の 2 パターン行った。

走行モード A では、 $t=0$ から舵角を 45° に変化させ、旋回運動を開始する。フリーの回転軸が 45° になったとき舵角を 0° に戻し農場の端と平行に走行を行う。車幅可変機構には平行リンクと呼ばれるリンク機構を採用しており、リンクの長さや地面との傾きにより車幅の距離が以下の式によって決定される。

$$L = l_0 + 2l_1 \cos \theta \quad (1)$$

L : 車幅

l_0 : 地面と平行なリンク 400mm

l_1 : その他のリンク 600mm

θ : l_1 と地面との傾斜角

走行モード B では、 $t=0$ から前輪の舵角を 45° に変化させ、旋回運動を開始する。前輪のフリーの回転軸が 45° 回転した時、後輪を駆動させ、フリーの回転軸が元の角度に戻るまで前進を行う。その後、前輪と後輪の舵角を 45° に変化させ、旋回運動を行う。

走行速度は農業従事者への危害を最小限にすることや収穫等の農作業を行うマニピュレータが動作することを想定し、0.2m/s 程度の低速で走行させた。速度はフィードバック制御によって一定速度で直進、旋回を行っている。

4.2 実験結果と考察

図 7 に走行モード A の走行実験の様子を示す。また、図 8 に走行モード A の旋回運動時のステアリング角度、フリーの回転軸の角度、車幅可変機構の角度の履歴を示す。 $t=5$ 以降から図 7 の右側の駆動輪のみが旋回運動を行っていることが確認できる。フリーの回転軸が 45° になるまで舵角を固定し旋回を行う。その後フリーの回転軸の角度に応じて次の旋回タイミングを決定できる。フリーの回転軸が 90° (車輪同士が重なる)の時、車幅可変機構の傾斜角の最大になる。車幅は式(1)から 1000mm とわかり、車幅可変機構が省スペースでの旋回動作を可能にしていることが確認できた。走行モード A では片方の駆動輪を動作させ車幅可変機構の平行リンクをたたむようにして車幅を短くできる点で農場の端での旋回運動に有効性があると考えられる。

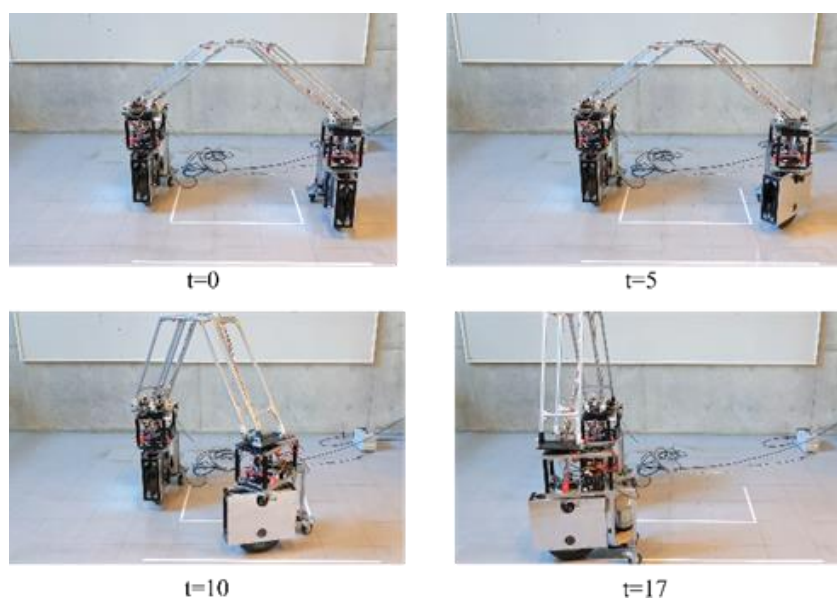


Fig.4.1 走行モード A の動作実験

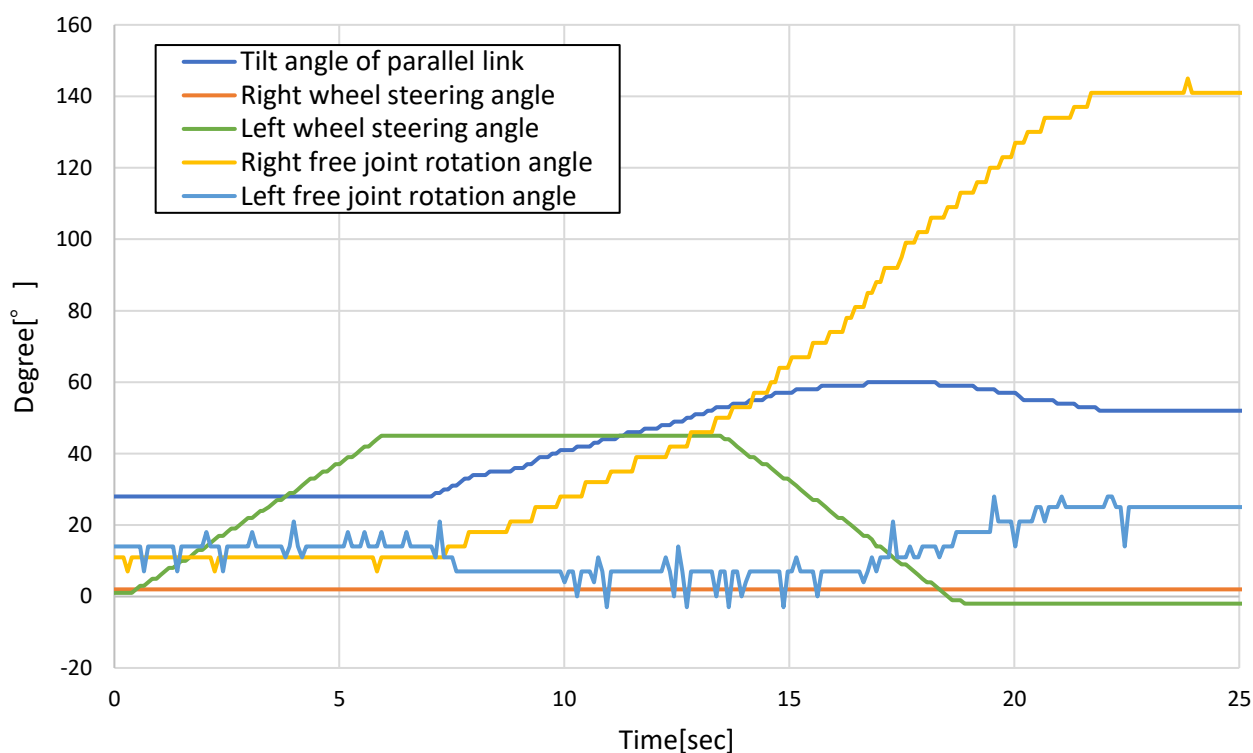


Fig.4. 走行モード A の各種角度の時間履歴

図 9 に走行モード B の走行実験の様子を示す。また、図 10 に走行モード B の旋回運動時の前後輪のステアリング角度、前後輪のフリーの回転軸の角度、車幅可変機構の角度の履歴を示す。図 9、図 10 から、 $t=0$ から前輪の舵角を 45° に変化させ、旋回運動を開始する。 $t=0 \sim t=30$ にかけて、前後輪のフリーの回転軸が逆方向に角度が変化している。 $t=20$ 程度の時、車幅可変機構の傾斜角が最小となり、車幅は式(1)から約 1320mm とわかる。これらの結果は前輪の旋回運動を妨げずに車幅可変機構とフリーの回転軸が受動的に稼働することで実現できた動きである。車幅可変機構、フリーの回転軸を設けることで前輪は農場の端

と平行に走行しながら，後輪は畝間を沿った走行を行うといった柔軟な走行を可能にしていることが確認できた。

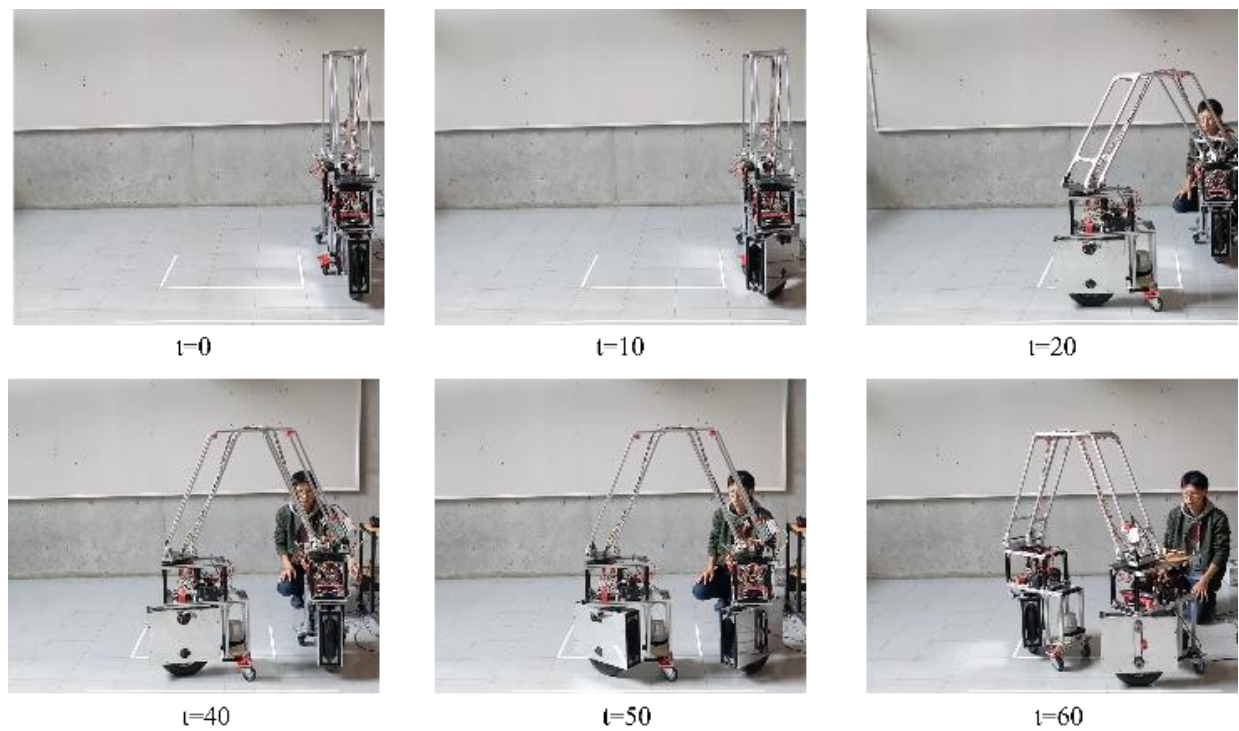


Fig.4. 走行モード B の動作実験

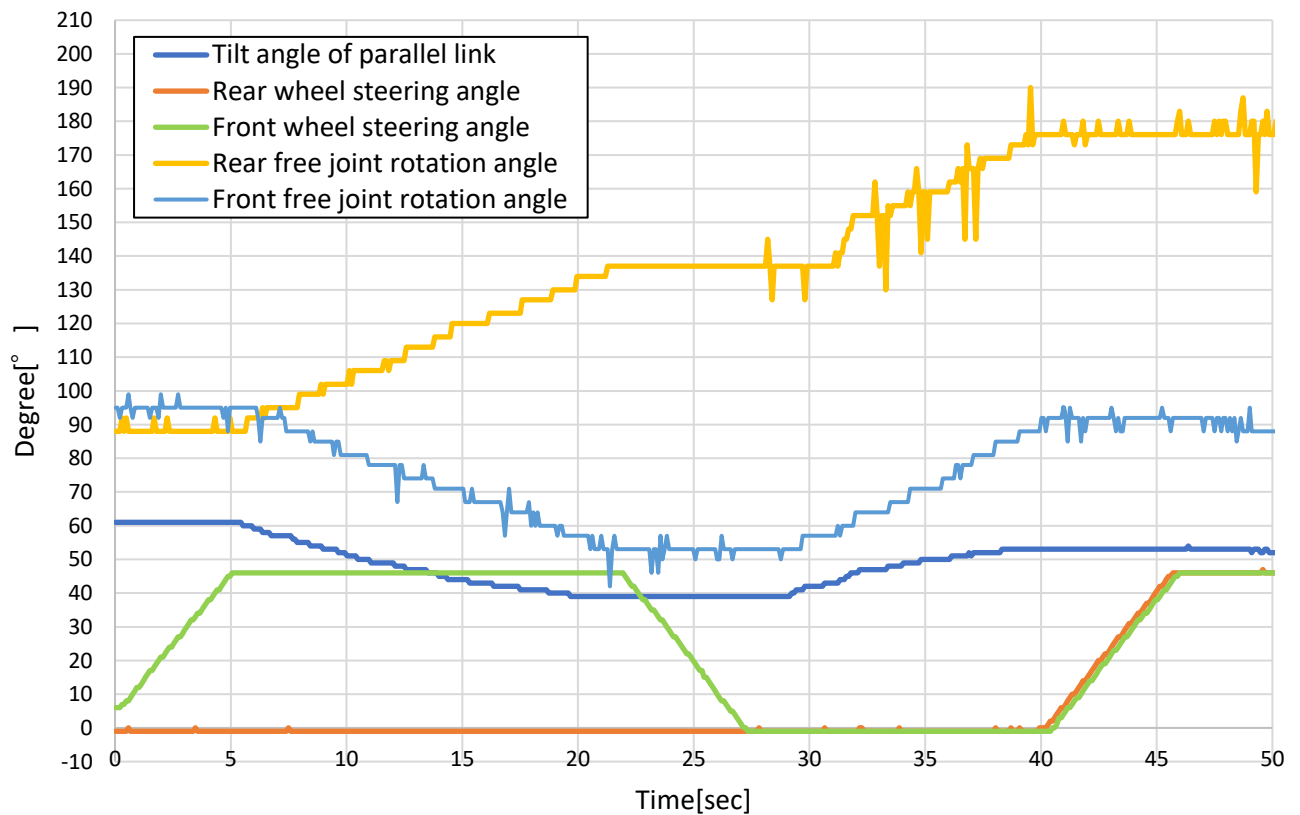


Fig.4. 走行モード B の各種角度の時間履歴

第5章 RGB+深度カメラ

5.1 RGB+深度カメラの概要

農作業用ロボットを自律的に運用する際には外部の認識が大変重要である．障害物や経路の認識を行い，ロボットを自律的に走行させる．本研究では，外部認識において色(RGB)とカメラからの距離を読み取ることのできる RGB+深度カメラを用いることとした．使用する RGB+深度カメラを図 5.1 に示す．



Fig.5.1 intel Realsense depth camera D435

Table.5.1 depth camera D435 spec

Specification	
Active Pixels	1280×800 ～ 256×144
Minimum depth distance	0.2m
Maximum depth distance	10m
Horizontal Field of View	69.4°
Vertical Field of View	42.5°
Diagonal Field of View	77°

5.2 RGB+深度カメラを使用した畝認識実験

今回，高知工科大学が所有する KUT ハウスのピーマン農場で畝認識実験を行った．KUT ハウスの様子を図 5.2 に示す．



Fig.5.2 KUT House

図 5.2 に示すようなピーマン畑のうち、畝間が窪んでいることが見て取れる。畝と畝間との高低差を利用し、畝間の検出が可能になるのではないかと考えた。今回、畝認識実験ではカメラのみを農作業ロボットに取り付ける予定の位置に固定し認識実験を行った。農作業ロボットのカメラ接続位置は地面から 590mm である。行った認識の実験として、閾値を 590mm に設定し、障害物(畝)が 590mm より小さくなったら畝と認識させることとした。

実験で得られた RGB 画像、深度画像を図 5.3, 図 5.4 に示す。図 5.3 は RGB 画像で一見、土と落ち葉しか見えておらず、畝の高低差はわかりづらい。このことから、RGB 画像のみの畝の認識は難しいのではないかと考える。図 5.4 は赤から青の濃淡によってカメラからの距離を示している。赤がカメラからの距離が近く、青色になるにつれ、距離が遠くなっている。RGB 画像では分かりにくかった畝の高低差が存在することが深度カメラによって判別できる成果が得られた。



Fig.5.3 RGB カメラの画像

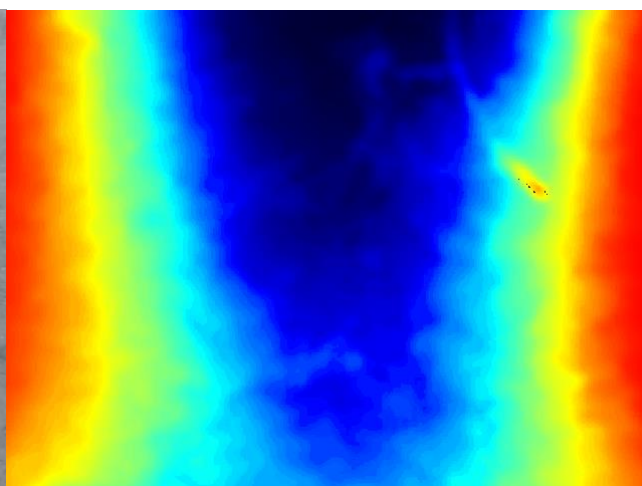


Fig.5.4 深度カメラの画像

また、実験時の畝の深度データ(カメラ中心座標)を図 5.5 に示す。

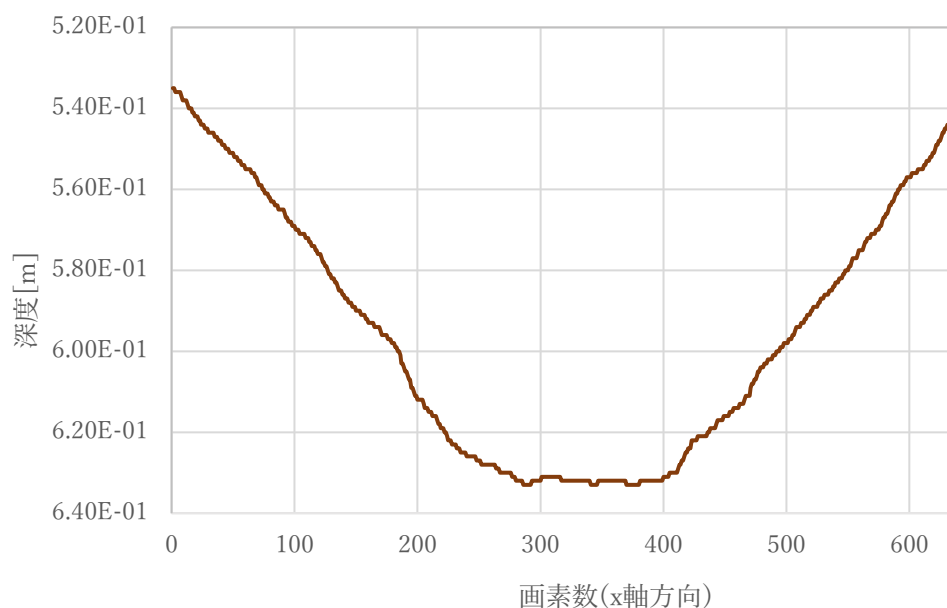


Fig.5.5 深度データ

RGB 画像と深度カメラの画像の取得に加え，リアルタイムでの画像処理を行う実験も行った．図 5.6 に距離の閾値を用いた画像を示す．図 5.6 は閾値の 590mm より小さい値，つまり，カメラからの距離が近い点群のピクセルを黒く表示させ，590mm より大きい値は深度カメラのピクセル位置を RGB 画像のピクセル位置に合わせて画像を張り付けることを行った．



Fig.5.6 距離の閾値を用いた RGB 画像

5.3 RGB+深度カメラを使用した畝間走行実験

試験機にカメラを取り付け，走行実験を行った．試験機にカメラを取り付けた様子を図 5.7 に示す．また，実験を行った環境を図 5.8 に示す．地面から 590mm の高さにカメラを独立ステアリング機構に接続されている車輪駆動部に取り付けた．実験時は畝の深さによって閾値を設定し自律走行させるために，まずはカメラを地面へ向けるように下向きに設置した．カメラの仕様上，図 5.1 の左から 3 つ目のレンズがカメラの中心となっているため，カメラの取り付け位置は左に寄っている．



Fig.5.7 試験機に取り付けた RGB+深度カメラ



Fig.5.8 実験環境

実験の概要を図 5.9 に示す．行った走行実験は畝間の中心を走行する直進走行のみである．段ボールで作製した箱を畝に見立て，走行実験を行った．カメラは畝の閾値から畝間と畝の判断を行い，畝間の始点と終点のピクセル座標を割り出す．求められたピクセル座標から畝の中心を求め，カメラの中心を独立ステアリング機構によって畝の中心に移動させる制御を行った．

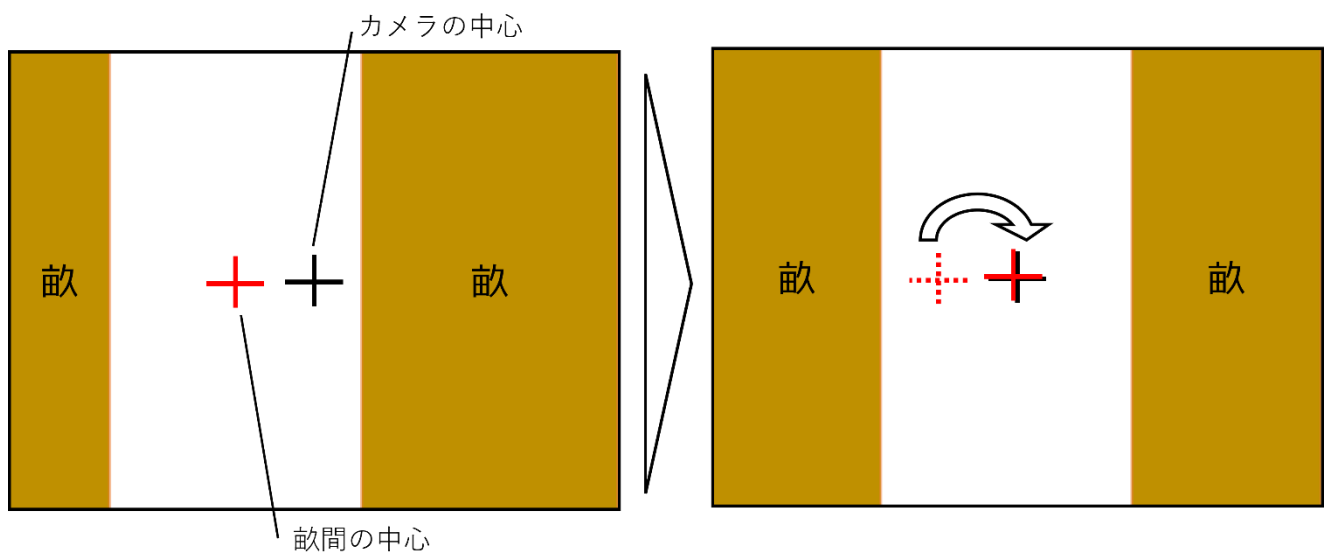


Fig.5.9 畝間走行実験の概要

畝間走行実験の結果を図 5.10 に示す。図 5.10 は畝間走行実験時の独立ステアリング機構の各操舵角を示している。開始直後、操舵角は 0° 付近から走行を開始し、5 秒程度から畝を避けるように舵角を切り、 0° に戻るようなステアリングの動きが見ることができた。右車輪の最大操舵角が約 22° ，左車輪の最大操舵角が約 39° となり、低速な走行という条件の下で、畝間走行が可能であると言える。

畝間の走行実験を行うことができたが、カメラを使用した旋回実験は成果が得られなかった。今後はカメラを使用した畝間の旋回実験を行っていく。

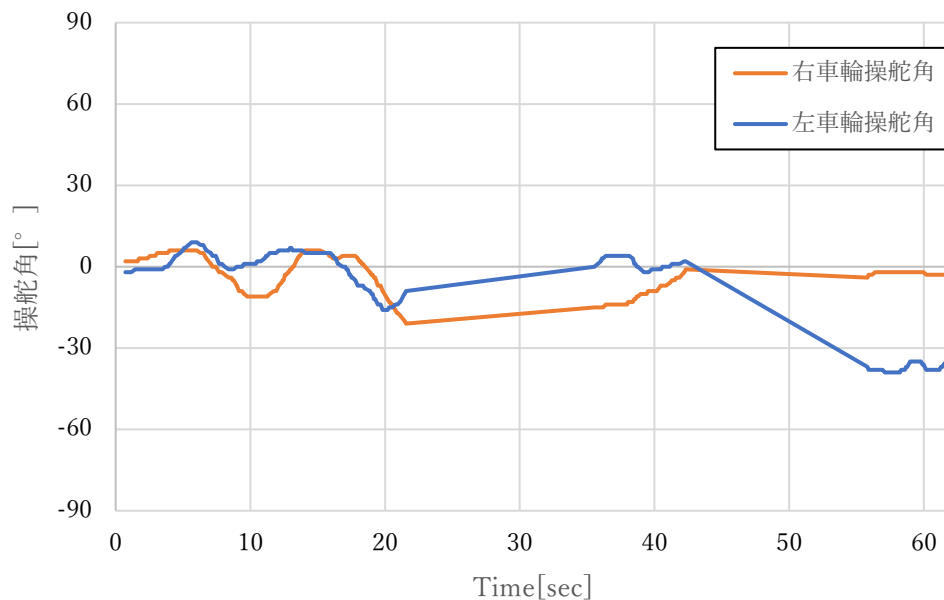


Fig.5.10 畝間走行における操舵角の時間履歴

第6章 結論

本研究では、車幅可変機構を接続した自律駆動ロボットを提案し、その試作機を設計し製作を行った。室内での走行実験を行い、車幅可変機構を取り付けたロボット内部の角度の履歴を取得することができた。また、RGB+深度カメラによる畝間の認識実験を行った。RGB カメラのみでは畝間の認識は限界があることが分かった。それに比べ、深度カメラは有効性が確認できた。試作機に深度カメラを取り付け、畝を模した段差の畝間認識を行った。畝間の認識は可能になり、畝間の中心を走行する、畝間走行実験を行った。畝間の中心を走行するようにステアリングを切り、低速走行という条件付きで畝間走行が可能であることを実証した。

今後は試作機に深度カメラを取り付け、旋回走行実験を行い、走行能力を実験的に評価し本ロボットの有効性を検証する。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、高知工科大学システム工学群岡宏一教授には、本研究の契機を与えて下さったこと、3年間の短い間でしたが、終始懇切丁寧に御指導、御鞭撻を頂きましたことに心より感謝の意を表します。

日頃より研究活動を共にし、たくさんの助言や励ましの言葉を頂いた多田直也氏、丹羽拓巳氏をはじめとする高知工科大学 機械・航空システム制御研究室の皆様にも心より感謝申し上げます。

本研究は高知県の「IoP が導く Next 次世代型施園芸農業への進化プロジェクト」の助成を受けております。この場をお借りして感謝申し上げます。

最後に、6年間の長期にわたり大学及び大学院に進学させていただき、多大なる支援をして頂きました両親に心より感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 農林水産省ホームページ 農業労働力に関する統計
<https://www.maff.go.jp/j/tokei/sihyo/data/08.html> (参照日 2023 年 2 月 12 日)
- (2) 農林水産省ホームページ 2019 国際ロボット展
https://www.maff.go.jp/j/kanbo/smart/maff_irex.html (参照日 2023 年 2 月 12 日)
- (3) 岡宏一，谷口雄司，北村晋助，島田真志 “不整地狭路のための独立操舵型移動機構” (2009)