

令和5年度 博士学位論文
移動ロボットにおける省人・省力化技術
に関する研究

指導教員 朱 赤 教授



前橋工科大学大学院
環境・生命工学専攻 博士後期課程

2056504

李 沛讓

Peirang Li

審査委員

主査：松本浩樹 教授

副査：野村保友 教授

王 鋒 教授

田中恒夫 教授

和田正義 教授

朱 赤 教授

謝辞

本論文は、筆者が前橋工科大学大学院工学研究科博士後期課程環境・生命工学専攻在学中に朱研究室において行った研究をまとめたものです。本論文を終えるにあたり、本研究に関して終始ご指導ご鞭撻を頂きました本学朱赤教授に心より感謝致します。担当教員である朱赤教授は研究の初歩からお教えくださるとともに、その着眼点や重要性を説いてくださり、多くの面から立派な研究者になる心得を教えてくださいました。さらに、研究を遂行するにあたってのさまざまな移動ロボットの開発に必要な環境や装置を揃えていただき、論文執筆にあたっては多くの助言やサポートもいただきました。その貴重な時間、アイデア、研究費用のすべての大きな貢献に誠に感謝いたします。朱赤教授の学生であったことは大変光栄なことであり、その献身で勤勉な姿勢は常に私を励ましてくれました。

また本論文を審査して頂いた審査委員会の松本教授、和田教授、野村教授、王教授、田中教授に深く感謝いたします。多忙な委員会の先生方から制御工学、ロボティクス、電気電子回路、機械構造などに関する専門的な知識の教示や丁寧なご指導、励ましを頂き、私の研究の進展に大いに役立てることができました。ここに深く感謝を申し上げます。

本論文の執筆にあたってご助言、また本研究に対し多大な支援を頂きました朱赤研究室の諸氏に深く感謝いたします。また、本研究に関して一緒に学び研究を行った学生諸氏、金澤雄一郎氏、宇野健二郎氏、康飛氏、武士博氏、小林陸氏、藤本喬也氏、孫易博氏、上田直哉氏、劉暢氏、梁宏博氏、田島利基氏、澤入良樹氏、羽田野太希氏、小川尚之氏には大変感謝をしております。

また、本研究を遂行するにあたり、株式会社サンデン・リテールシステム、株式会社オリエンタル群馬、有限会社昌立、リソー株式会社から多くの技術的なご意見やご支援をいただきました。深く感謝の意を申し上げます。

そして、私が大学学部から大学院博士後期課程まで数多くのご指導をいただいたシステム生体工学科および専攻の先生の方々、そして前橋工科大学の事務局員の方々に心から感謝の気持ちと御礼を申し上げます。最後に家族や友人から

の無条件の愛とサポートに感謝致します。

研究概要

現在、先進国をはじめとして世界中の多くの国で少子高齢化が進んでいる。日本は世界的で最も高齢化率が高く、将来も増加傾向にあると予測されている。人口の高齢化により物流、輸送、製造、設備などの現場や介護福祉施設では人手不足と作業者の高齢化が懸念されており、将来を見据えた省人・省力化が求められている。これらの作業現場では大きな負担がかかるほか、長時間の作業が行われるため、長年の労働により腰痛などの業務上疾病も多く発生している。特にこれらの作業では重量物を移動させるもしくは介護者を車いすで移動させることが頻繁にあり、作業者への身体的負担が大きい。さらに将来的な高齢作業者の増加も見込まれるため、移動負担を軽減できる支援技術を開発していくことは現在の重要な課題である。

これまで移動ロボットにおける省人・省力化技術としては車いすや台車などの電動化、無人搬送機の導入が主に介護福祉施設や工場などで実用化されている。このような作業現場では移動機器の故障や不調による作業停止が懸念されるため、電磁誘導式やモノレール式の無人搬送機や人手で操縦する電動車いすや電動台車などのような確実性が高いものが利用されてきた。電磁誘導式やモノレール式は確実な自律走行を保証できる一方で、ガイド線やレールを地面に設置する必要があり、コスト面での負担が大きく、設置後の移動経路変更は容易にできない。そこで、LiDARやカメラなどの環境認識センサやGPS測位を利用して、環境を変更せずに自動走行する研究も多くなされてきた。車体のセンサのみで実現する自動走行技術の確立が期待されているが、強い外乱(太陽光など)に対するセンサデータの劣化が避けられないため、従来使われてきた電磁誘導式やモノレール式のような確実性を保証することは困難である。また、自動走行は予め定められたルートで走行するため、状況に応じて作業者が即時に意図した場所や経路に移動することは困難であり、人との共同作業に対する柔軟性が低いと思われる。そこで、ロボットによる省人・省力化技術を統合以下の3点の支援技術を統合することで作業支援に適した移動ロボットの省人・省力化技術システムを構築していく。

1. 作業員への移動パワーアシスト
2. 重力補償の昇降アシスト
3. 特定環境での自動走行

複雑環境下での自動走行は確実ではなく、作業員が状況に合わせて作業位置を変更することも困難である。また、車いす介護で安全性の確保が必須であるために作業員がパワーアシスト機能を用いて移動機器を動かすことは不可欠である。また、移動作業の自動化は複雑でなく、センサへの外乱が少ない特定の環境で行うことは確実であり、実用的であると考えられる。さらには移動の前後で重量物の積み下ろしの際、もしくは介護の場合は被介護者を移乗させる際には大きな負担が上肢や腰にかかる。そこで移動支援は平面上の移動だけでなく高さ方向にも拡張することで負担を軽減する。

本研究ではまず移動支援のためのパワーアシスト技術を提案する。まずは介護者が車いすを水平面で操縦する際の負荷をモデル化することで、定常速度時の負荷と始動時や停止時の負荷に分けてアシスト率を調整するアドミタンス制御の手法を提案した。本手法では定常負荷のアシスト率と加減速時のアシスト率を決めることで、介護者の身体能力に適したアシストを行うことができる。パワーアシストでは介護者の力が車いすに加わると力覚センサで計測され、アドミタンス制御により目標の速度が算出される。このように目標速度を算出して実際の速度をPID制御器で目標速度に制御することで、スロープの勾配、路面上の摩擦、段差による抵抗力などのような外乱力はPID制御器内部で吸収される。そのため、介護者は走る路面状況や路面勾配が異なっても、操作感覚は一定になる。特にスロープ上は重力に関わらず、水平面と同様な走行感覚を実現できる。そのため、力を加えていない状態でも車いすはスロープで静止することができ、安全性も高い。このようにアドミタンス制御によるパワーアシストは水平面上やスロープ上では非常に有効である。しかし、車いすが水平面からスロープに突入する際、もしくはスロープ上から水平面に移動する際に介護者の操作感が変化することを本研究で発見した。スロープの突入時とスロープの乗り越え時はそれぞれ力の増加と減少が見られ、水平面上の操作感と異なる。この理由として、走行路面が水平面やスロープなどの平面であれば、介護者の操作するハンドルと制御する駆動輪の速度は同じであるが、走行路面が水平面とスロープの中間のような非同一平面である場合はこれらの速度が異なるためである。そのため、水平面からスロープに移動

する際、ハンドルは車輪速度より低下して、操縦感覚に抵抗感が生じる。一方でスロープから水平面に移動する際は、ハンドルの速度が駆動輪の速度を超えるため、ハンドルが軽くなった感覚を与える。このようなハンドルの速度変動が生じるため、車いすをモデル化し、駆動輪の目標速度に補正速度を加えることで、ハンドルの速度変動を抑制した。そして、検証実験ではパワーアシスト手法の有効性と速度補正の有効性を検証し、理論通りの結果が得られた。以上で水平面からスロープまでのパワーアシスト手法の有効性を確認した。

本アドミッタンス制御手法は外乱トルクをすべて駆動モータが負担することで、スロープ走行じでも水平面と同じ操作感覚を維持することができるが、屋外の環境では急勾配のスロープも多く、このときの重力負担がモータの駆動力を超えた場合はアドミッタンスモデルに基づいた操作感覚が実現されず、暴走や意図しない動きになる危険性がある。また、急勾配での車いす介護は通常後退してスロープを下っていくが、アドミッタンス制御は後退の際にも車いすを引っ張る必要があり、介護者にとって直感的ではない。そこで、本研究ではアドミッタンス制御を急勾配に対応できるように拡張した。提案した拡張アドミッタンス制御手法は重力の一部をユーザに分担することで急勾配スロープの走行に対応している。また、車いすと搭乗者の総重量を推定するオブザーバを用いることで、自動的にアシスト率を決定し介護者に最大のアシスト力を提供することができる。

以上のパワーアシスト手法は介護者に有効的であるが、介護者の加えた力を検出する力覚センサを車いすのハンドル部分に組み込む必要があり、コスト面の負担が高く、センサの故障なども懸念される。そこで、力覚センサを用いずに、駆動輪のモータから介護者の力を推定するセンサレス力推定手法を提案した。本手法を用いたセンサレスパワーアシストはアシスト効果が確認され、またスロープ上では静止することができることも確認された。

以上のパワーアシスト手法に加えて、次に人の操作が不要な場合を想定して、屋内と屋外環境での自律移動手法を提案した。走行地点が決定しておりかつセンサに対する外乱が少ない環境では、LiDARやGPSなどのセンサを用いた自律移動技術は実用的であり、省人・省力化に貢献できる。本研究では室内と室外の用途に分けて自律移動手法を考え、室外では遮蔽物がない環境ではDual RTK-GNSSのみを用いた自律走行システムを提案した。また室外の移動作業には人が操縦するハンドルやペダルがついたトラクタが使用されることを想定し、ハンドル操縦とペダル操縦ロボットを提案した。ケーススタディとして芝刈り作業を想定し、芝刈り作業の環境と走行ルートで簡易機を用いた検証実験を行い、安定した高精度の自

律走行が確認できた。一方で室内の自律走行については LiDAR を用いて周囲の壁を認識しながら走行する手法を提案した。室内では走行するスペースの制限があるため、シンプルで信頼性がありかつ高精度の自己位置推定手法を提案した。こちらもケーススタディとして、ゴルフバッグの搬送作業を対象としており、開発したゴルフバッグ搬送機を用いて狭い空間内での走行検証を行った。複数回の走行実験を重ねた結果、衝突やコースから逸れることなく高精度の追従ができたことを確認した。

最後に移動支援の前後での荷物の移乗作業もしくは福祉施設であれば車いすからの移乗作業に対して、台車の台面(車いすであれば座面に当たる)の高さを調整できる新たな昇降機構を提案した。従来の昇降機構は重量物を載せた際に低位置では駆動モータに大きな力がかかり、高位置ではモータへかかる力が小さくなる性質があった。またモータが定速で回転しても、昇降時の速度が変動していくため、大型のモータが必要であった。そこで、本研究は新たな構造を利用することで、重量物を昇降させる際に高さによらず駆動モータに加わる力が一定で速度も変動しない昇降機構を提案した。

以上が本論文の概要であり、論文の最後には従来研究との比較を行い、本研究で得られた成果についてまとめて、今後の展望についても述べる。

Abstract

Currently, the declining birthrate and aging population are progressing in many countries around the world, including developed countries. Japan has a high aging rate in the world, and it is predicted that the aging of the population will continue to increase in the future. Due to the aging of the population, there are concerns about labor shortages and aging workers in logistics, transportation, manufacturing, equipment, etc., as well as in nursing care and welfare facilities, and labor saving with an eye on the future is required. Many work-related diseases such as low back pain occur due to years of work. This imposes a heavy burden on workers, especially those who frequently lift heavy objects or caregivers who assist wheelchair-bound individuals. In addition, the number of elderly workers is expected to increase in the future. Therefore, it is an important issue to develop labor-saving and manpower-saving technologies for mobile robots that can reduce the burden of labor.

Conventional mobility support technologies include electrification of wheelchairs and trolleys. Given the significant apprehension regarding work stoppages resulting from malfunctions in mobile equipment at various work sites, there is a preference for highly reliable options. These include electromagnetic induction-type and monorail-type automated guided vehicles, as well as manually operated electric wheelchairs and trolleys. While electromagnetic induction and monorail types are reliable, the installation of guide lines and rails on the ground incurs significant costs and presents challenges in modifying the movement route post-installation. There have been many studies on automatic driving without changing the environment using environmental recognition sensors such as LiDAR and cameras, and GNSS. It is expected to establish autonomous driving technology that can be realized only with vehicle body sensors, but deterioration of sensor data against strong disturbances (sunlight, etc.) is unavoidable. In addition, since autonomous driving runs on a predetermined route, it is difficult for workers to immediately move to the intended location or route according to the situation, and it

seems that flexibility in collaborative work with people is low. By integrating the following three assistive technologies, we believe that an interpersonal mobility support system suitable for work support will be constructed.

1. Power assist to the operator
2. Autonomous driving in specific environments
3. Lifting assist of height

Automation of mobile work is assuredly feasible in specific environments with minimal sensor interference. On the other hand, there is a risk that the operation will be stopped due to unpredictable disturbances during automatic driving. In addition, when the operator changes the work position according to the situation or when human work is required to ensure safety in wheelchair care, the operator can move using the power assist function. In the context of nursing care, a large burden is placed on the upper limbs and lower back when transferring the care recipient, so the mobility support is extended not only to horizontal movement but also to the vertical direction to reduce the burden.

In this study, we initially proposed a power assist technology for mobility support. Our first proposition involves an admittance control method that modulates the assist rate by dividing the load at steady speed and the load at start and stop by modeling the load when the caregiver maneuvers the wheelchair on the horizontal plane. In this method, the assist rate for the steady load and during acceleration and deceleration are determined by measuring the force applied by the caregiver to the wheelchair using a force sensor. By calculating the target speed in this way and controlling the actual speed to the target speed with the PID controller, external disturbance forces such as gravity on the slope, friction on the road surface, resistance force due to step-passage, etc. are absorbed inside the PID controller. The wheelchair can be stationary on a ramp even without applying force. Meanwhile, we found that power assist by admittance control is very effective on horizontal surfaces and slopes. However, it was noted that the caregiver's operational experience undergoes changes when dealing with non-planar road surfaces. For example, when the wheelchair plunges from a horizontal surface into a slope or moves from a slope to a horizontal surface, the speed of the drive wheel is not same with the handle. Therefore, when moving from a horizontal plane to a slope,

the steering wheel is lower than the wheel speed, which causes resistance to the steering sensation. The experiment confirmed the effectiveness of the power assist method and validated the benefits of speed correction, with results consistent with theoretical expectations.

This admittance control method assists the caregiver by having the wheelchair bear entire gravitational load on the slope. However, there are many steep slopes in the outdoor environment, and the power assist method cannot be applied if the gravity burden exceeds the driving force of the motor. In this study, the admittance control method was extended to address steep gradients. The proposed extended admittance control method facilitates movement on steep slopes by redistributing a portion of the gravitational load with the user. In addition, using an observer that estimates the combined weight of the wheelchair and the passenger, allows for the automatic determination of the gravity assist rate and provide the maximum assist force to the caregiver. Although the aforementioned power assist method is effective for caregivers, it is necessary to incorporate a force sensor that detects the force applied by the caregiver into the handle of the wheelchair, which is cost-effective. Hence, we introduced a sensorless force estimation method that estimates the power of the caregiver from the motor of the drive wheel without relying on a force sensor. The assist effect of sensorless power assist using this method was validated, and it was also confirmed that it can be stationary on a slope.

In addition to the above power assist method, we proposed an autonomous mobile system designed for both indoor and outdoor environments assuming that human operation is not required. In an environment where the driving point is determined and there is little disturbance to the sensor, autonomous mobile technology using sensors such as LiDAR and GPS is practical and can contribute to labor saving. In this study, we consider an autonomous mobile system divided into indoor and outdoor applications. We proposed an autonomous mobile system using RTK-GNSS (Real-time kinematic GNSS) in an environment where there is no shielding outside. In addition, assuming that a tractor with a steering wheel or pedal operated by a person will be used for outdoor movement work, we proposed a steering wheel and a pedal-controlled robot. As a case study, we considered a lawn mowing operation and conducted a verification experiment using a straightforward apparatus within the lawn mowing work environment and driving route. Conversely, for the indoor autonomous mobile system, we proposed a method to navigate while recognizing the surrounding walls by the LiDAR. Given

the spatial constraints for indoor mobility, we proposed a simple, reliable, and highly accurate self-position estimation method. As a case study, we also addressed the task of transporting golf bags and validated the maneuvering capabilities in confined spaces using the developed golf bag conveyor. Results of multiple running tests confirmed that high-precision tracking was possible without collision or deviation from the intended course.

Finally, we proposed a novel lifting mechanism that capable adjusting adjust the height of the platform surface of the trolley (seat surface if it is a wheelchair) for luggage transfer work before and after mobility support from a wheelchair, particularly in a welfare facility. Conventional lifting mechanisms exhibit a characteristic of applying a large force to the drive motor at a low position and reducing the force applied to the motor at a high position, especially when handling heavy loads. Moreover, even with a motor rotating at a constant speed, the lifting speed fluctuates, necessitating a sizable motor. Therefore, in this study, we proposed a lifting mechanism in which the force applied to the drive motor is constant and the speed does not fluctuate regardless of height when lifting and lowering heavy objects by using a new structure.

The above is the outline of this paper, and at the end of the paper, a comparison with the previous research is made, the results obtained in this research are summarized, and the future prospects are also described.

目次

謝辞	i
研究概要	iii
Abstract	vii
第1章 序論	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究目的	5
1.3 本論文の構成	8
第2章 関連研究	10
2.1 パワーアシスト型移動支援ロボット	10
2.1.1 自走型電動車いす	11
2.1.2 介助型電動車いす	13
2.1.3 まとめ	14
2.2 パワーアシスト手法の調査	15
2.2.1 力制御型	15
2.2.2 速度制御型	16
2.2.3 まとめ	18
2.3 自律移動ロボットの調査	19
2.3.1 AGV	19
2.3.2 掃除ロボット	20
2.3.3 芝刈りロボット	20
2.3.4 農業トラクタロボット	21
2.3.5 まとめ	22
2.4 自律移動手法の調査	23
2.4.1 自律走行システム	23

2.4.2	自己位置推定	23
2.4.3	経路計画法	27
2.4.4	まとめ	29
2.5	本研究の概要と目的	30
第3章	パワーアシスト手法	32
3.1	水平面上とスロープ上のパワーアシスト手法	33
3.1.1	アドミッタンス制御	33
3.1.2	制御システム	35
3.2	水平面とスロープ間の遷移区間でのパワーアシスト	37
3.2.1	水平面とスロープの遷移区間での速度変動	37
3.2.2	遷移区間での速度補正手法	41
3.3	急勾配スロープ上でのアシスト手法	44
3.3.1	拡張アドミッタンス制御	45
3.3.2	モータの最大パワーを引き出す手法	46
3.4	実験検証	47
3.4.1	力計測機構を搭載した電動アシスト車いす	47
3.4.2	水平面とスロープのアドミッタンス制御の効果検証	50
3.4.3	水平面からスロープに遷移する際の速度補正型アシスト手法のシミュレーション検証	52
3.4.4	水平面からスロープに遷移する際の速度補正型アシスト手法の実験検証	55
3.4.5	急勾配における拡張アドミッタンス制御手法の検証	57
3.5	まとめ	60
第4章	センサレスパワーアシスト手法	62
4.1	センサレス力推定	62
4.1.1	モータモデルと速度推定	62
4.1.2	センサレス力推定手法	63
4.2	センサレスパワーアシストの実験検証	67
4.2.1	検証機の後付け電動駆動ユニット	67
4.2.2	水平面における実験検証	68
4.2.3	スロープにおける実験検証	72

4.3	総質量の推定手法と検証	74
4.3.1	総質量推定手法	74
4.3.2	実験検証	77
4.4	まとめ	78
第5章	高さ方向への昇降アシスト	79
5.1	従来の昇降リフト機構の解析	79
5.2	新たな昇降機構の設計法	84
5.3	積載物の重量推定手法	88
5.4	検証実験	90
5.4.1	リフトのミニチュアモデルを用いた検証	90
5.4.2	電動リフトを用いたアシスト台車	94
5.5	まとめ	99
第6章	特定環境での移動ロボットの自律走行	100
6.1	屋外での自律走行	100
6.1.1	後付け自動運転装置の構成	102
6.1.2	自律移動システム	106
6.1.3	RTK-GNSSを用いた自己位置推定	108
6.1.4	経路追従法	111
6.1.5	簡易機を用いた実験検証	115
6.1.6	芝刈りトラクタの模擬機を用いた実験検証	118
6.1.7	芝刈りトラクタを用いた実験検証	121
6.2	屋内での自律走行	123
6.2.1	ゴルフバッグ搬送機の構成	123
6.2.2	LiDARを用いた自己位置推定手法	125
6.2.3	オドメトリでの自己位置推定手法	130
6.2.4	追従手法	131
6.2.5	実験検証	134
6.3	まとめ	137
第7章	結言	138
7.1	本研究のまとめ	138
7.2	今後の展望	141

参考文献	142
研究業績	152

目次

1.1	省人・省力化技術	5
1.2	本論文の構成	9
2.1	力制御型のパワーアシストシステム	16
2.2	速度制御型のパワーアシストシステム	17
2.3	自律走行システムの構成	24
2.4	ポテンシャル法による障害物回避	28
2.5	DWA(Dynamic Window Approach)による障害物回避	28
3.1	アドミタンスモデル	33
3.2	アドミタンスモデルのステップ応答	35
3.3	アドミタンス制御を用いたパワーアシストシステム	35
3.4	2つの異なる傾斜角度のスロープ上で車いすを操作している介護者のモデル. V_R は後輪の速度, V_U は介護者が把持しているハンドルの速度, θ 車いすの傾斜角度, θ_U は後輪が接している1つ目のスロープの傾斜角度, ϕ は1つ目のスロープと2つ目のスロープのなす角, V_{HR} 車輪中心 R に対するハンドル中心 H の相対速度である.	38
3.5	水平面からスロープまでの5 phases	39
3.6	水平面とスロープ間の遷移区間での車いすモデル. (a), (b) はそれぞれ Phases 2 と 4 である.	40
3.7	構築した速度補正型パワーアシストシステム	43
3.8	急勾配スロープでの車いす介助	44
3.9	拡張アドミタンス制御を用いたパワーアシストシステム	45
3.10	開発した介助者用電動車いす	47
3.11	力検出機構 (FSM) の構成	48
3.12	FSM の精度検証実験の構成	49
3.13	負荷重量と FSM から計測された力の関係	50

3.14	介護者が水平面上で車椅子を押している様子	51
3.15	水平面上をパワーアシストなしの電動車いすで走行させた結果	51
3.16	水平面上をパワーアシストあり (M=45,D=5.5) の電動車いすで走行 させた結果	51
3.17	シミュレーションで用いた力算出手法	52
3.18	速度と力の関係のシミュレーション結果	54
3.19	スロープ上で介護者車いすを押して走行する様子	55
3.20	スロープでのパワーアシスト結果 (速度補正なし)	56
3.21	スロープでのパワーアシスト結果 (速度補正あり)	57
3.22	走行するスロープの構成	58
3.23	急勾配スロープでの実験風景	58
3.24	パワーアシストなしで 17 度勾配のスロープを走行した結果 (上り)	59
3.25	パワーアシストありで 17 度勾配のスロープを走行した結果 (上り)	59
3.26	パワーアシストなしで 17 度勾配のスロープを走行した結果 (下り)	60
3.27	パワーアシストありで 17 度勾配のスロープを走行した結果 (下り)	60
4.1	モータモデル	63
4.2	スロープで走行する車いすモデル	64
4.3	センサレス力推定手法	65
4.4	センサレスパワーアシスト手法	66
4.5	車いすと後付けの電動駆動ユニット	67
4.6	駆動ユニットの取り付け	67
4.7	開発した電動駆動ユニット (PAU) の構成	68
4.8	駆動ユニットの圧着機構	68
4.9	車いすに装着されたセンサの位置	70
4.10	水平面上での車いす介護負担 (アシストなし)	70
4.11	水平面上でのパワーアシスト結果	71
4.12	スロープでの車いす介助負担 (アシストなし)	73
4.13	スロープでのパワーアシスト結果	73
4.14	スロープを走行する車いすモデル	75
4.15	水平面上でのパワーアシスト走行	77
4.16	推定した総質量 (真値は 97kg)	78

5.1	アクチュエータが水平配置のリフトモデル	80
5.2	シーザーリフトモデル	81
5.3	n段のシーザーリフトモデル	81
5.4	アクチュエータが斜め配置のリフトモデル	82
5.5	アクチュエータが垂直配置のリフトモデル	83
5.6	提案した昇降機構案(伸展時)	84
5.7	提案した昇降機構案(収縮時)	85
5.8	提案した昇降機構のモデル	85
5.9	設計した関節 A の軌道	87
5.10	リフトモデル	88
5.11	ボールネジの摩擦モデル	89
5.12	製作したミニチュアモデル	90
5.13	摩擦項同定の実験	91
5.14	粘性摩擦項同定の実験	91
5.15	転がり摩擦項同定の実験	92
5.16	搭載負荷なしの際の力推定結果	92
5.17	10.2N ダンベル搭載時の際の力推定結果	93
5.18	22.3N ダンベル搭載時の際の力推定結果	93
5.19	開発した電動リフト台車	94
5.20	電動リフト台車の駆動機構の設計	95
5.21	製作した電動リフト台車の駆動機構	95
5.22	モータ電流より計測した昇降に必要な力	96
5.23	上昇時に推定した積載負荷	96
5.24	下降時に推定した積載負荷	97
6.1	芝刈りトラクタ X710(Deere and Company 社) [92]	101
6.2	後付け自動運転装置全体の設計案	103
6.3	ハンドル操縦部の案	104
6.4	ペダル操縦部の案	105
6.5	芝刈り回転刃操縦部の案	105
6.6	駆動系の構成と減速比	106
6.7	芝刈りトラクタの自律走行システム	107
6.8	芝刈りの経路	107

6.9	Dual RTK-GNSS を用いた姿勢計測	109
6.10	Dual RTK-GNSS を用いた姿勢計測	110
6.11	Dual RTK-GNSS の設置位置	111
6.12	モードによる芝刈り経路の分割	112
6.13	直線と旋回経路の寸法	112
6.14	芝刈りトラクタのモデル化	113
6.15	経路追従の目標点と制御点	114
6.16	簡易機と基準局の構成	116
6.17	簡易機の制御システム	118
6.18	簡易機と基準局の位置	119
6.19	簡易機での走行実験結果	119
6.20	芝刈りトラクタの模擬機の構成	120
6.21	開発したステアリング操縦装置	120
6.22	模擬機での検証結果	121
6.23	後付け自動運転装置を取り付けたトラクタ	122
6.24	後付け自動運転装置を取り付けたトラクタの直線走行結果	122
6.25	ゴルフバッグの搬送径路	124
6.26	開発したゴルフバッグ自動搬送機	125
6.27	自律走行の経路	127
6.28	LiDAR による自己位置推定手法	128
6.29	ロボット座標系でのモデル	131
6.30	世界座標系でのモデル	132
6.31	目標経路への追従手法	133
6.32	自律移動環境の構成	134
6.33	経路全体の走行結果	134
6.34	1つ目の直線区間の走行結果	135
6.35	カーブ区間の走行結果	135
6.36	1つ目の直線区間の走行結果	135
6.37	急勾配のスロープ環境	136

第1章 序論

1.1 研究背景

現在世界的に多くの国家で高齢化が深刻な問題となっており，UN(United Nations)によると世界の65歳以上の高齢者人口は2019年に9.1%であったのに対して，2050年には15.9%まで増加すると予測されている [1]．一方で日本の高齢者人口は2023年で総人口の29.1%まで増加しており，既に超高齢化社会に突入している [2]．さらに2050年に日本の高齢者は37.7%まで増加すると見込まれている．高齢化に伴い，介護や支援が必要な高齢者が増加する一方で社会を支える若者が減少することが懸念される．将来の労働者不足を懸念して定年年齢の延長も考えられているが，高齢者への負担が大きい．介護分野ではすでに家庭内介護で高齢者が自分のパートナーを介護する老老介護がよく見られている．老々介護は肉体的・精神的な負担が大きく，介護疲れにより共倒れになるケースがあり，大きな社会問題となっている．また，物流，輸送，製造などの現場仕事では重量物を扱うことが多く，肉体負担が大きいため作業員不足が懸念されている．こうした人手不足を補うために，海外人材を積極的に採用しているが，コミュニケーション面などで大きな障壁があるほか，短い雇用期間の中での実習指導も非効率である．

このように将来の人手不足が懸念され，現在ロボットを用いた省人・省力化の技術開発が急務となっている．人への支援技術として，作業員の上肢，下肢，腰の筋力をパワーアシストできる外骨格ロボットが開発されている．1960年代から現在まで様々な外骨格ロボットが研究開発されており，実用化されればさまざまな分野での労働負担の軽減が期待できるが，パワーアシスト用途のものは発売されているものの普及には至っていない．一方で，移動ロボットを用いた支援技術は近年注目を集めており，自律移動技術を用いたお掃除ロボット，食事の配膳ロボット，工場内の搬送ロボット，家庭用芝刈りロボット等が開発され，早いスピードで広く普及している．今後の急激な高齢化に早期に対応するため，日本国内では技術のスピーディな開発と移動支援ロボットの積極的な利用が求められている．

現在、移動支援ロボット技術は幅広く研究開発されているが、その主な目的は移動の自律化と、操作者の負担軽減と認知補助である。操作者の負担軽減のために実用化され、幅広く利用されているものとして介護福祉分野の電動車いすが挙げられる。電動車いすの開発のきっかけは1950年代に戦争で負傷した軍人の移動支援のために開発・販売されるようになった[3]。初期の電動車いすでは直進と旋回を操作するために2自由度のジョイスティックを用いた操作方式を採用しており、後輪を2つの電動モータで駆動する形になっている。その後、1970年代以降ではシングルボードのプロセッサなどが販売されるようになったため、電動車いすにも搭載され、その操作性と安全性はより一層改善され、高度で精密な制御もできるようになった。ジョイスティックは小型、安価であり、また操縦者は手指の運動機能のみがあれば操縦することができるメリットがある。その汎用性と実用性から現在も一般的に使用されている。一方で2000年代からはプッシュリムに操縦者の力を検知するセンサを内蔵して、プッシュリムを漕ぐ力に電動モータで補助をするパワーアシスト型の電動車いすも登場した。プッシュリムは手動車いすを駆動する際に用いるため、この方式を使うことで手動車いすと同じ方法で車いすを操縦できるようになった。また、上肢の運動能力が残存しているユーザに対して、身体能力に合うようにモータの補助力を調節できる。そのため、ジョイスティック操縦式のインターフェイスと比較して、プッシュリムを用いるため上肢のリハビリやトレーニングになり健康維持ができるほか、トレーニングを重ねることで手動車いすを利用できるようにもなると期待できる。一方で、認知能力が低いもしくは運動機能が残っていない障害者など自身で操作ができない場合は介護者が車いす後方のハンドルを操縦して移動を補助してもらう必要がある。また、高齢者は加齢に伴い身体能力と認知機能が低下して、介助用の車いすを利用する機会も多くなっている。特に今後日本など高齢化率が増加傾向の国では、車いす介護の需要が高くなると見込まれる。介護者の負担軽減のために、介護ハンドルに電動補助のボタンを取り付けた介助型電動車いすが開発された。電動補助ボタンによる操作は設定された一定の速度で走行するのみであり、モータによる補助力も直進方向のみであることが多い。そのため、介護者は走行速度を車いすに合わせる必要があり自然な歩行がし難く、回転動作の補助もほとんどない。そこで、介護型電動車いすでもハンドルに力覚センサを組み込んで、介護者の操作力のみで車いすの直進と回転を制御できるパワーアシスト技術が導入された。パワーアシスト技術は使用者が直感的に操縦でき、使用者の身体能力に合った適切な補助を行うことができ、またこれらは走行する路面環境によって損なわれないようにしなけ

ればならない。さまざまな操作感や負担軽減の手法が提案されているが、本研究ではさらに走行するスロープ環境での操作感覚の変化を明らかにして、その環境で操作感覚が変動しないようにする手法を提案する。介助型電動車いすのパワーアシスト技術は、作業者が重量物を搬送する電動台車や電動カート等にも応用でき、このパワーアシスト技術を研究開発していくことは現在の重要なテーマであると考えている。

電動車いすや電動台車に対するパワーアシスト技術が開発されている一方で、自律移動機能を搭載したロボットも近年実用化され広く普及し始めている。自律走行ロボットは1950年代ごろから開発されており、初期の自律移動ロボットとしてジョンズ・ホプキンス大学が開発した **Beast** やウォルターが製作した自律移動ロボットが挙げられる [3]。初期の自律移動ロボットはコンピュータやマイコンではなくシンプルなトランジスタ回路で構成されたが、環境認識や自動充電などの高度な機能も実装されていた。特に **Beast** は超音波センサでの障害物検知・回避やドアなどを認識することもできた。このように半世紀以上も前に自動走行の概念が存在しており、超音波センサやトランジスタの回路で実現されていた。やがて1980年代には移動ロボットに対する社会的関心が高まり、マイクロプロセッサの販売も開始されたため、家庭向け学習用の自律移動ロボットなども販売されるようになった。1995年ごろにはプログラム可能な移動ロボットが低コストで入手できるようになったため、移動ロボットの研究が盛んに行われた。そして、2002年には **iRobot** 社から家庭用自動掃除ロボットが発売され、多くの家庭に導入されたことで、自律移動ロボットはより身近な存在になった。

一方で産業界からは1980年代ごろに **Automated Guided Vehicle (AGV)** が開発され、広く工場や倉庫などで使われるようになった。これらのAGVは走行路に電磁誘導線を埋め込んだ電磁誘導方式やモノレール・ガイドレールを引いて搬送機を走らせるレール方式が主であった。ガイド線やレールの利用に加えて、走行経路には障害物もないため、目的地まで搬送できる確実性があり、利用者にも理解されやすい仕組みであった。またモノレール方式は重量物を載せたスロープ走行など高負荷がかかる場合にも対応できる、しかし、電磁誘導線やガイドレールの設置コストが高く、設置後のルート変更には走行路の再工事が必要になる。また、モノレール式は機械的消耗が激しく、頻繁なメンテナンスが必要で利用者はさらなる費用や手間がかかる。このようなAGVに対して誘導ガイドの設置を必要とせず、カメラやLiDARなどの環境認識センサや衛星測位システムを利用して自律移動するロボットは **Autonomous Mobile Robot (AMR)** と呼ばれ、近年実用化されてい

る。このような AMR は環境を変更することなく、外乱がある程度安定しているような環境では優れた精度で自律走行が可能である。AMR による自律走行は高精度なレーザー距離センサである LiDAR や深度カメラ，GPS，慣性センサなどを使用環境に合わせて適宜組み合わせ、自己位置推定手法や障害物回避手法を構築している。任意的にルートを変更できる AMR は社会的な期待があり，工場や倉庫などの作業現場だけでなく，人が立ち入れないような危険な場所での移動にも有用である。しかし，一方で現状は整備されていない環境での確実的な自律走行を保証することができない，自律走行中で発生した事故に対する責任や倫理面，法整備などの障壁も残っている。一般的に自律移動ロボットを導入する際にはルートを予め計画しておき，人が確認して問題がないことを確認した上でロボットに実装しているが，現場で作業者の意図をすぐに反映して移動支援することが難しい。また，自律移動ロボットが外乱などで動作停止して工場や生産現場の作業に影響をきたす恐れもある。そのため，移動経路が決まっている移動作業に対しては自律移動技術を応用して，その場の判断で経路が変更する場合は人が主体になって，パワーアシスト技術を利用して移動することが適切だと考える。

さらには移動作業の前後ではロボットへの重量物の積み下ろしもしくは介護であれば車いすに被介護者を移乗させる作業が必要になる。この積み下ろしは作業員への身体負担が大きいため，移動ロボットが台面の高さを調節できるようになれば作業員の負担が大きく軽減する。従来の昇降機構はシザーリフト等の機構は機構上，台面が低位置ではアクチュエータに大きな負担がかかり，高位置ではアクチュエータへの負担が小さいという特性を持っていた。一方で昇降の速度は低位置で速く，高位置で遅いという逆の性質がある。そのため，同じ重量物でも低い位置で必要な力が大きく，目標の速度で昇降させるためには高速に動く大型のアクチュエータを用いてきた。本研究では低位置から高位置まで昇降する際に，力と速度の特性が変わらないような新たな昇降機構を提案する。本機構を用いることで重量物を昇降させる際の効率が改善され，小型のアクチュエータでも重量物をすばやく昇降させることが可能となる。

1.2 研究目的

人手不足により作業員一人当たりの負担が増加している中でロボットによる省人・省力化技術の研究開発が重要となっている。省力化では作業員が新しくロボットを操作する方法を習得する必要がなく、従来のマニュアル操作と同じ作業動作でロボットによる力補助をしてもらうことが望ましい。移動ロボットであればスイッチやジョイスティックなどの操作をせずに、操作ハンドルに力覚センサを組み込み、パワーアシストすることでマニュアル操作と同じ方法になる。また、移動前後の荷物の積み降ろしはロボットが作業高さを調節するなどのタスクを行うことで、作業員の負担軽減になる。省人化技術は自律走行などの自動制御技術が研究開発されているが、動作の確実性や安全性の確保が困難であり、また作業員の意図を即時的に反映することが困難である。そこで Fig.1.1 のような自動制御技術の前に半自動制御やパワーアシストを取り入れて、ロボットが作業を学習及び人がロボットの振る舞いを理解することが必要である。本研究では移動ロボットにおける省力化技術としてパワーアシスト、重力アシスト、省人化技術として自律移動を提案・検証することを目的とする。

はじめに介助用電動車いすを対象にしたパワーアシスト手法を提案する。本研究で用いるアドミタンスモデルベースのパワーアシストは水平面上での走行開始/停止のような過度時と、ほぼ一定の速度に到達した定常時のアシスト率を変更することができる。また、速度制御により、外乱によらず車いすの速度は介護者の力のみで決まる。そのため、スロープの重力や摩擦による抵抗力は介護者の負担

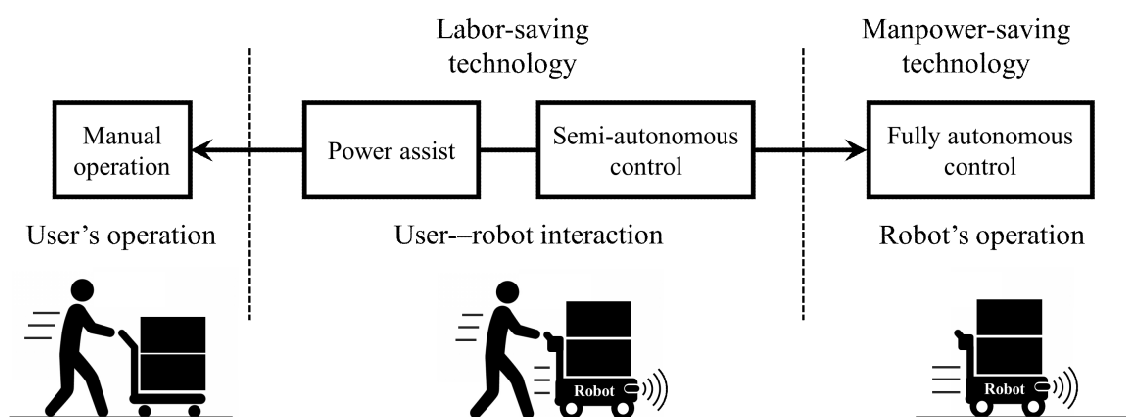


Fig. 1.1: 省人・省力化技術

に影響されず、同じ操縦感覚を実現できる。しかし、水平面からスロープに移る際、車いすの傾斜角度はある回転速度で徐々に増加していくため、介護者が持つハンドルの速度と車輪の速度は異なる。また、逆にスロープから水平面に移動する際も同様に速度が異なる。これらのケースでは車輪が一定速度で走行している場合、ハンドルの速度が変動して、介護者の操縦感覚が異なる。そこで、本研究ではこの速度変動によって操縦者の負担感覚が変動することを確認し、新たな速度補正手法を提案・検証していく。

アドミタンスモデルベースのパワーアシスト手法はスロープの重力などを補助することができるが、急勾配のスロープでは重力が大きく速度制御が実現できず、操作感覚の変化や暴走する危険性もある。そこで急勾配のスロープでのパワーアシストが実現できるように重力アシスト率を導入した拡張アドミタンス制御を提案する。

まずは省力化技術のパワーアシストは介護者の力を検出する必要があるが、力覚センサは高価であり、振動や衝撃で故障するリスクもある。外乱オブザーバはモータに加わる外力を検知できる手法で、この手法をもとにして力覚センサを用いずに介護者の力を推定する手法を提案する。センサレス力推定手法が実現すれば、利用者の経済負担が減り、故障のリスクも減ると期待できる。

次に路面上での移動だけでなく、移動前後の荷役に伴う重力負担を軽減するために高さの昇降システムも提案する。従来の昇降機構は高さ位置によってアクチュエータにかかる力が変化しているため、大型の電動モータや油圧アクチュエータを用いている。そこで、本研究では力と速度が昇降高さに依然しないような昇降機構を提案する。また、提案機構に外乱オブザーバを用いることで台車台面上の重量物を推定する手法を提案し、作業者に適した高さ昇降する電動リフト台車でその効果を検証する。

そして、省人化技術として実用的な自律移動手法を構築する。自律移動はパワーアシストのように現場の作業者の意図したルートで即座に対応することはできないが、移動目的地が明確に決まっている場合は省人化になる。また、自律走行のセンサに対する走行環境の外乱が少ない場合は走行精度が高い。本研究では屋内と屋外の特性環境に対して、高い処理性能を持つコンピュータを必要としない軽量の自律移動システムを提案する。そして、屋内で用いる自動搬送機と屋外で使用する自動芝刈りトラクタで提案システムを検証して提案する手法の有効性を示す。

本研究を通して、提案手法と実機を利用した検証から対人移動支援ロボットの实用化・発展に必要な技術を明らかにし、今後の移動ロボットの研究開発に貢献

できれば幸いである。

1.3 本論文の構成

本論文の構成を Fig. 1.2 に示す。第2章では関連研究を調査し、これまでの電動車いす及びそのパワーアシスト手法をまとめ、現状での課題を示す。また自律移動ロボットは非常に多く開発されているが、代表的なロボットと制御手法を示す。第3章では本研究における操作者へのパワーアシスト手法の基本方針と水平面とスロープ上での有効性を説明する。また、水平面からスロープに遷移するもしくはその逆の走行区間では速度変動が生じて、操作者の操縦感覚が変わるため、その補正手法を示す。そして、提案するパワーアシスト手法が急勾配のスロープにも対応できるように手法を拡張することで室外の走行環境にも対応できるようにしている。第4章では提案したパワーアシスト手法をもとに、力覚センサを用いないセンサレスの手法を取り入れることで、電動車いすにさらに力覚センサを取り付けないで行えるセンサレスパワーアシスト手法を考案した。

第5章では平面上の移動支援に加えて、対人支援で必要な高さ方向の昇降アシスト手法と駆動アクチュエータを小型高効率化するための昇降機構の設計方法を提案・検証した。

第6章では移動の自動化を外乱が安定している特定環境で行う手法と実機のシステムを説明する。特定環境としては屋外と室内に分けて、それぞれの環境と用途に合った自律走行手法を構築して検証した。

最後に第7章には、本研究で構築した移動支援ロボットシステムの特徴をまとめ、今後の展望について述べた。

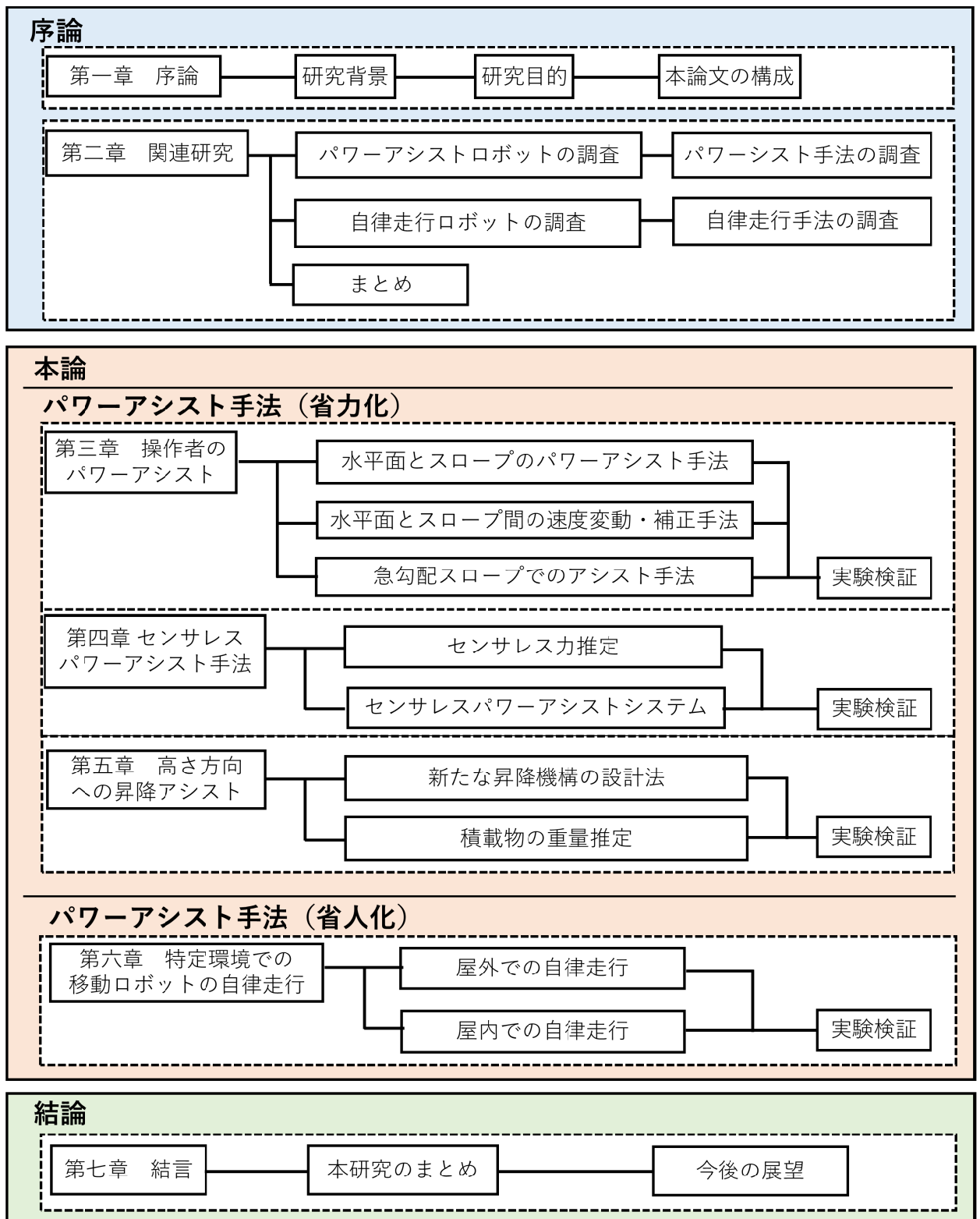


Fig. 1.2: 本論文の構成

第2章 関連研究

本章では主に実用的なパワーアシスト型移動ロボット及び自律移動ロボットとそれらで用いられているパワーアシスト手法と自律移動手法について調査した。パワーアシスト型の移動ロボットでは搭乗者が移動ロボット上から操縦するタイプと介助者のような移動ロボットを押して操作するタイプがある。操縦者と移動ロボットの操作インターフェイスを調査することで、現在のパワーアシストインターフェイスの特徴と将来の課題を明らかにする。また、これまでのパワーアシスト手法を分類し、アシスト効果や特徴、また走行する環境に左右されないロボスタ性等の手法特徴と発展についてまとめる。

自律移動ロボットは走行環境ごとに適したセンサとシステムが搭載されている。本調査では実用化された自律移動ロボットを調査して、環境に左右されずに自律走行を実現するシステムを明らかにする。また、自律走行手法を構成する自己位置推定と経路計画法について代表的なものをまとめ、実用化に向けた今後の課題について述べる。

2.1 パワーアシスト型移動支援ロボット

人が主体となって操作するパワーアシスト型の移動支援ロボットは操縦者の負担を軽減させることが主な目的である。また、場合によっては一部の適切な負担を操縦者に残すことで、トレーニングやリハビリにもなり長期間での健康維持にも貢献することができる。例えば車いすの利用者であれば、下肢障害者の上肢が健常である場合にパワーアシストを用いて、プッシュリムを駆動することで健康維持にも貢献できる。本章では電動車いすに乗っている搭乗者が自律して操縦する搭乗型の移動ロボットや、介護者が電動車いすをハンドルで操縦する移動支援ロボットを分類した。電動車いすは一種の移動支援ロボットであり、電動台車などのような重量物搬送作業のための移動支援機器とは技術面ではほぼ共通していると考えている。また、パワーアシスト手法に関しては狭義的には操作者の力計

測して、それを増幅するようにモータで補助力を加える手法を指すことがあるが、これまでジョイスティック等の操縦インターフェースはその実用性から広く普及しており、手指の力を増幅して操作者を力補助するという意味では広義的にパワーアシスト型の1つであると考えられる。以下に自走型と介護型の電動車いすの調査を行った。

2.1.1 自走型電動車いす

ジョイスティック操縦式

手動車いすは下肢の不自由な障がい者や筋力が衰弱した高齢者にとって重要な移動手段である。ハンドリムで駆動する手動車いすは上肢の運動になり、使用者の健康維持に貢献できるが、上肢の筋力が低下した高齢者や上肢が不自由な障害者は使用が困難である。そこで、ジョイスティックとボタンで構成されたコントローラを用いた電動車いすが開発され、2自由度のジョイスティックで直進速度と回転速度を操作する [4-7]。ジョイスティックはコンパクトな構造で利き手のアームレストに取り付けることで、片手のみで操作できる利便性があり、安価であるため、2022年度では電動車いすの出荷台数で約24%（日本国内）を占めている [8]。一方で使用経験が浅い使用者は車いすの動きを考えながら操作する必要があり、また走行時には路面からの振動も操縦に伝わるため、操作には一定時間の訓練と慣れが必要である [9, 10]。そのため、瞬時の判断を要する場面では操作ミスによる事故の要因にもなりうる。

市販されているジョイスティック操縦式の電動車いすはコンパクトであり、折り畳みが可能な機種は自動車のトランクに積んで遠距離の移動もしやすい仕様になっている。また、安全面として歩道を走行するため、最大速度は6km/hに設定されている。電動車いすの制動には電磁ブレーキが搭載されており、バッテリーが切れた際にスロープで減速・停止することができる仕様となっている。しかし、電磁ブレーキは過大な負荷が長時間かかると過熱になり、ブレーキ力が低下する危険性もある。

ジョイスティックやボタンによる操作は残存している運動機能が手のみであれば有効的な操作方法である一方で、未経験者がすぐに操縦できるような直観的な操縦方法ではない。搭乗者の上肢の運動能力が残存している場合は以下のハンドル式及びプッシュリムのパワーアシスト方式は操作性が高く使いやすい。

ハンドルレバー操縦式

高齢な搭乗者にとって指先で操縦するジョイスティックのような敏感な操作インターフェースは使いにくく、また走行路面の振動も操作に影響してしまう。そこで、自動車やバイクの運転経験があるユーザに着目して、自動車やバイクのようなハンドルで回転を操縦する方式のシニアカーが開発された。シニアカーではハンドルを進行方向に向けることで回転角度を調節し、ハンドル上のアクセルレバーを引くことで直進速度を決める [11,12]。この方式は運転経験があるユーザにとっては安心して操縦できるため、2022年度では日本国内で年間約1.4万台販売されている [8]。一方でデメリットとして運転経験がないユーザーにとってはやはり操縦の訓練が必要であり、また認知能力が低下した高齢者や危険にさらされたとき、予定外の事態になり混乱してアクセルレバーを握るなどの誤操作が生じて事故になった報告もある [13,14]。一般的に電動車いすと比較すると、シニアカーにはハンドルで前輪を旋回させるステアリング機構があり、サイズが大きく旋回半径が長い。そのため、一般仕様の自動車への積載は難しく、利用者の遠距離移動は困難である。安全面に関しては近年障害物検知機能が搭載され、衝突の危険がある場合は速度を制限することができるなどの高機能化が図られている。

トルクセンサ内蔵型ハンドリム

上肢が健常なユーザは自分でハンドリムを回転させて移動することができるが、加齢や負傷により筋力が低下したユーザはハンドリムの操縦が困難な場合がある。ジョイスティック操縦式やハンドル操縦式の電動車いすはほとんど負担なく操縦できるが、長期間の使用はさらに筋力低下を招く。そこでトルクセンサをハンドリムに内蔵して、操縦者が加えたトルクを増幅して、駆動輪で補助するパワーアシストの電動車いすが開発されている [15-17]。この方式は操縦者の現在の運動能力に合わせて、パワーアシスト率を変更することができるため、個人に合わせたトレーニングやリハビリテーションができる。また、この操作方法はハンドリム操作の電動車いすは手動車いすと同じ操作方法であり、直感的に操作できるため操作ミスを防止することができる。一方でトルクセンサは高価なセンサであり、ユーザが電動車いすを導入する際の大きな経済負担になる。

市販のハンドリム駆動の電動車いすはユーザが操縦しやすいように多機能化されており、スロープを下る際のブレーキアシストやスロープを横断する際の横流れ防止、左右の腕の筋力に合わせてアシスト率調整が可能になっている [15]。

2.1.2 介助型電動車いす

認知機能が低下した下肢障害者や高齢者は自立して電動車いすを操作することが困難であるため、介護者による車いす介護を行ってもらうことが必要である。これまで車いす介助が行いやすいように走行路面のバリアフリー化が行われており、スロープなどは5度以下になるように設計されてきたが、未だに屋外では急勾配のスロープが存在しており、車いす介護の大きな障害となっている。さらに近年の介護職離れによる人手不足が進み、将来も働き世帯の減少による労働力不足が懸念される。介助型の電動車いすを用いることで作業効率を改善することができるため、今後の開発はますます重要になると思われる。

レバー/ボタン操縦式

介助型電動車いすは自走型とは違い、介護をする操縦者は走行しながら操作をするため、手指が安定しないためジョイスティックを用いず、手押しハンドル部分にレバーやボタンなどを設けて押すと走り出すようになっている [18, 19]。また、速度変更をする際はロータリースイッチやボタンで調節するようなインターフェースになっている。このようにレバーやボタンのみで構成された操作インターフェースはシンプルで実用的であるが、走行中には速度調節ができず一定の速度で歩行する必要があるため介護者は歩きにくく、障害物回避等の危険回避も困難になる。そこで、ハンドル内部に力覚センサを組み込んで介護者の加えて力によって速度を自在に変更できる方式も開発された [20]。

力センサ内蔵ハンドル式

手動車いすによる介助は車いす後部のハンドルを介護者が操作するため、本方式は両手のハンドル内部に力計測のセンサを組み込んで、介護者が加えた力に応じたアシスト力を補助する。電動車いすの後輪2輪に駆動モータが組み込まれている場合は、ハンドルの両手に加わる力の合計が直進の速度、両手の力の差分は回転速度にそれぞれ変換される。

本方式は手動車いすと同じ操作方法で直感性があり、介護者の走行速度に合わせることができるため、電動車いすを操作しながらも歩行しやすい。近年では介護の人手不足により高齢者が高齢なパートナーに介護をしてもらう老老介護が増加する見込みがあり、高齢な介護者に対して適切なパワーアシスト率を設定する

ことで介護負担を最適に軽減できるほかトレーニングにもなり、介護者の体力向上のトレーニングにも貢献できる。

このような力センサを用いたパワーアシストは介護者が使いやすいように高性能化し、エネルギー消費も少ないメリットがあるが、力覚センサのコスト負担が大きい。また、市販の製品に関してはパワーアシスト手法が明らかにされておらず、アシスト効果が不明慮な部分が多い。

2.1.3 まとめ

2.1 節では人へのパワーアシストが可能な電動車いすを自走式と介助式に分類して、それぞれの操縦方法についてまとめた。現状では主にジョイスティックやボタンなどのような簡易的で安価なコントローラを持つ電動車いすが多く普及している。一方で高価ではあるがハンドリムやハンドル内部に力覚センサを内蔵して作業者の力に対応した駆動力を補助する操縦方式は手動車いすと同じ操縦方法であるため直観性があり、操縦者の力に対応した速度を出力することができるため、介助者の歩行の妨げにもならない。次の2.2 節では力覚センサを用いたパワーアシスト手法についてまとめ、現在の手法の問題点について述べる。

2.2 パワーアシスト手法の調査

先節で述べたように力覚センサを用いたパワーアシスト方式は操縦の直観性があり，介護者の歩行を妨げないため障害物回避などの危険回避もしやすい．本2.2節では力覚情報を用いて電動車いすの走行制御をするパワーアシスト手法を分類してまとめ，現在の課題点を明らかにする．以下にパワーアシストを力制御と速度制御に分けて基本的なアシスト手法をまとめる．

2.2.1 力制御型

介護者の力を補助する基本的なパワーアシスト手法として，モータを力制御する手法がまず挙げられる [21–23]．利用者はパワーアシスト率を調節することで，低下した筋力をモータの駆動力で補助することができる．力制御型のパワーアシストの基本式を以下に示す．

$$F_D = K \cdot F \quad (2.1)$$

ここで F_D はモータの駆動力， K はアシスト率， F は介護者の力である．駆動用モータの牽引力は電流と比例関係にあるため，力制御ではモータの電流を制御する．また，モータを駆動するモータドライバには一般的に電流センサが組み込まれ，電流制御ができるようになっている．そのため，力制御のパワーアシストは単純な制御システムで実現可能である．

また，一般的に力覚センサには微小変位で生じる電圧変化を増幅するため，信号にノイズが存在する．そのため，介護者がセンサに触れていない状態でも，ノイズが力センサから検出される．そこで，センサのノイズの大きさを計測してセンサが反応しないデッドゾーンを設ける．加えて力制御では衝突などの急激な力変動があると，車いすが急加速/減速する恐れがあるため，一般的には一次のローパスフィルタが用いられる [22]．

力制御は特に搭乗型の電動車いすでよく用いられており，搭乗者は断続的にハンドリムに力を加えるため，力が上昇する場合と減少する場合に分けて係数が異なる1次ローパスフィルタにすることで，力が加わっていない時間に停止しないように工夫されている [21]．

力制御型のパワーアシストの一般的な制御システムを Fig.2.1 に示す．介護者の力が入力され，アシスト力 F_D が計算され，モータのトルク制御器に入り制御される．この制御は水平面上の走行のような低負荷の場合は有効的であるが，スロー

プなどを走行する場合は重力を外力 (Fig.2.1 の τ_{Dis}) として受けるため、利用者に大きな力負担がかかってしまう。そこで、傾斜センサを用いて車いすの傾斜角度を計測して、重力補償を行うことで負担軽減される [24,25]。また、重力補償によってスロープ上で手放しにしても停止することが可能になる。計測されてスロープの傾斜角度及び設定した搭乗者の体重が少しずれていても、路面との摩擦力があるため、スロープでは静止できることも報告されている [24]。しかし、搭乗者と車いすの総重量を予め計測しておく必要があり、また高精度の傾斜センサが必要になる。一方で総重量と傾斜角度を計測せずに、ジャーク等価外乱を利用して重力に影響されない制御手法も研究されているが、等勾配でないスロープには適応できない [26]。また、Ohらは直進方向と回転方向に制御を分けて外乱減衰制御を適用することで、スロープを横断する際の横流れを抑制した [25]。このように重力補償が導入されたことで、車いすが自然にスロープを下ることはなくなり安全性が向上する。

力制御はモータに流れる電流フィードバックして制御するシンプルな制御システムであるため、応答速度が速いメリットがある。一方で速度のフィードバックがないことから、走行時に車輪がスリップする危険性がある。また重力補償の手法も提案されているが、走行路面の転がり摩擦などの抵抗がある場合は利用者の負担になってしまうデメリットがある。

2.2.2 速度制御型

速度制御を用いたパワーアシストは介護者の力を入力として、目標速度を計算して、モータのエンコーダを用いて回転速度を算出して制御する。速度制御は力制御と異なり、重力や摩擦力などの外乱に影響されにくく、急な加減速がないためスリップしにくい特徴がある。速度制御型のパワーアシストは介護者の力を車

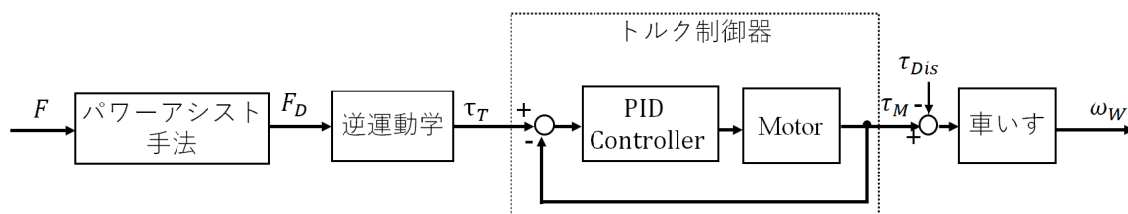


Fig. 2.1: 力制御型のパワーアシストシステム

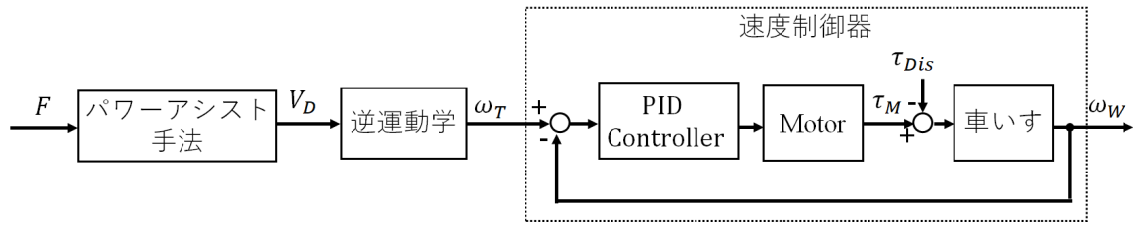


Fig. 2.2: 速度制御型のパワーアシストシステム

いすの速度に変換するが、1次遅れのローパスフィルタを用いた方式 [28] と物理モデルを用いた方式 [29, 32, 33] があるが、両者は同じ1次のダイナミクスに基づいた方程式である。以下に1次遅れのローパスフィルタを用いた式を示す。

$$V(s) = \frac{K}{Ts + 1} \cdot F(s) \quad (2.2)$$

ここで、 $V(s)$ は車いすの走行速度、 $F(s)$ は介護者の力、 K はアシスト率、 T は時定数である。このように1次遅れのローパスフィルタを用いた速度制御は比例ゲインで力と定常速度の比率を決定し、フィルタ係数で応答時間を変更する。これらのパラメータは使用者の操作感覚によって逐次調整して決定される。

一方で物理モデルに基づいた速度制御では、質量とダンパーからなる物理モデルにかかる力と運動する速度の関係を利用する。ここでの質量とダンパーは仮想的なものであり、それぞれ介護者が車いすを動かす際の慣性力と摩擦力を表している。この制御手法は介護者の力を入力とし、速度を出力しているため、アドミタンス制御とも呼ばれる。アドミタンスが大きいことは小さい力に対しても大きな速度を出力できることを意味する。利用者はアドミタンス制御のパラメータを変更することでパワーアシストの感覚を調節する。速度制御型のパワーアシストを Fig.2.2 に示す。介護者の力が入力され、アシスト速度 V_D が計算され、モータの速度制御器に入り制御される。本手法はモデルに基づいた負荷感覚を利用者に与えることができ、また速度制御器では重力、路面上の摩擦などの外力を相殺することができるため、介護者には影響せず、同じ負荷特性を維持することができる。Miyata らは走行する際に、直進モードと回転モードに分けて速度制御をすることでより安定的に直進や回転を維持できることを示した [34]。Tashiro らは速度制御を用いることで、段差の乗り越えも可能であることを示している [35]。

速度制御は外乱を抑制できる分、外乱が大きい場合は達成できる速度性能が限定される。本研究では特に負荷が大きいスロープでの走行に着目して、アドミタンス制御の課題点と解決手法を提案・検証する。

2.2.3 まとめ

以上のように車いすのパワーアシスト手法は主に力制御と速度制御に分けられる。力制御はシンプルな制御手法である一方で、外乱を補正する制御が必要になり、またスリップの危険性がある。速度制御はエンコーダによる速度計測とフィードバックが必要であるが、補償手法を用いずに外乱を抑制でき、スリップの危険性も低い。しかし、車いすが水平面からスロープに遷移する際のアシスト効果が確認されていない。また、速度目標値が実現できないような急スロープもしくは高負荷で走行する場合への対応も対応が必要であるが、関連研究での言及が見当たらない。そこで、本研究はスロープでのパワーアシスト手法の課題点を中心に拡張した手法を提案する。また、パワーアシストの実用化のために、力計測に用いられてきた高価な力覚センサを用いないセンサレスパワーアシスト手法も検討する。

2.3 自律移動ロボットの調査

2.3.1 AGV

従来の物流現場や生産工場での物品運搬，ゴルフ場でのゴルフバッグ搬送などは20世紀後半ごろからモノレールや電磁誘導線を用いた無人搬送車のAGV(Automated guided vehicle)が用いられてきた [37,38]。移動環境内にガイドを設置することで，AGVは高精度で信頼性のある自律走行を実現し，広い範囲で省人・省力化に貢献してきた。そのうち電磁誘導方式は最も広く普及しており，路面の下数cmの場所にケーブルを設置して電流を流すことで電波を発生し，移動するAGV本体ではピックアップコイルで電波を検知することで経路上を走行するようにしている。電磁誘導式と比較してモノレール式は路面上にレールを設置する必要があるが，移動範囲をレール上に制限でき，狭い環境での利用が可能である。また，レール式は負荷が高いスロープでも利用が可能で，車輪のようにスリップして滑り落ちるリスクもない。しかし，モノレールや電磁誘導線を利用した自律移動は初期整備の費用が高価で，一度走行経路を決定するとのちの変更が困難になる。ガイドを複数設置することで誘導先をフレキシブルに変更するようなAGVも開発されているが，環境を大幅に変更することが求められる [39]。また，レールなどのガイドは経年劣化するため，メンテナンス費用の負担もユーザにかかる。

一方で近年ではLiDARやカメラを搭載して自律走行ロボットも実用化されており，今後のオートメーションが期待されている。このような内部センサによって環境認識する移動ロボットは倉庫や工場など特定の環境下であれば，環境変化や大きな外乱が生じないため安定して動作することが期待される。これらの環境認識センサを搭載した自律走行ロボットに対して，一般的にAGVは次の用途に適していると言える。

1. 狭い経路や指定経路で高精度な制御が必要な場合
2. 重量物を搬送する場合
3. 搬送時間の厳守が必要な場合

2.3.2 掃除ロボット

掃除ロボットは2000年代はじめころから販売され、私たちの日常生活に早い段階から普及した自律移動ロボットの1つである [40]。掃除作業は多種多様な家庭内の環境に対して、まんばんなく行き渡る必要がある。そこで、ロボットはランダムな走行経路を作成していくことで、掃除すべき空間の全領域をカバーしている [41]。ただし、ランダムパターンは空間全体をカバーするための効率が悪く、時間がかかるデメリットがある。搭載されるセンサは一般的にカメラや赤外線センサ、超音波センサなどであり、主に障害物検知と自身の安全確保のために使われている。また、近年ではレーザー距離センサやカメラを用いて環境地図の作成や自己位置を行う SLAM(Simultaneous Localization and Mapping) 機能も一部のロボットで搭載され、掃除する経路の最適化や移動のムラを減らすことができる。使用されるカメラは変化が少ない天井向きに設置されることも多く、天井の変化から部屋内の地図を作成して自己位置を推定する。赤外線センサは逆に床面上に向けており、光学式のマウスのように移動した変位を計測することで移動量を算出する。

現在家庭用の小型掃除ロボットが導入されたことで、人が行う掃除の回数は減ったものの人による掃除の必要性もまだある [42]。そこで、大型の業務用掃除ロボットも導入されており [43]、作業者が事前にルートを教示することで掃除の範囲を把握する。

2.3.3 芝刈りロボット

芝刈りロボットは家庭用の小型のものとゴルフ場のような大型のものに分けられる。小型の芝刈りロボットは既に販売され、庭の芝管理に利用されている [44]。小型なため、刈り取る芝の高さには限界があり、また刈り取った芝は回収せずに土に落す仕様になっている。また、芝刈りの範囲の設定は電流が流れるエリアワイヤを設置してロボットがワイヤを流れる磁場を読み取ることで、作業範囲を把握する。芝刈り作業は掃除ロボットと同様な原理でランダムな方向に刈り取ることで、全体をまんばんなくカバーしている [45]。また、前進方向には木や岩などの障害物検知のために超音波センサとタッチセンサを搭載している。

一方でゴルフ場や運動場では定期的な芝の管理が必要であるが、管理者が不足が問題になっており [47]、小型の芝刈りロボットは使用範囲が最大で約数千平米で

あるため大型の芝刈りロボットが開発されている [48]. 小型の芝刈りロボットはランダム方向に移動する経路計画であるが, 大型のゴルフ場では短時間で効率よく芝を刈る必要があるため, 作業マップと自己位置の把握をして移動ルートを最適化する必要がある. しかし, ゴルフ場のような場所では周囲の景色が同様に目印がはっきり少ないため, カメラや LiDAR のセンサは不適切であるが, 衛星信号を遮る障害物がないため GNSS(全地球航法衛星システム)を用いる方法がメジャーである. GNSS 測位の中には, 固定された位置で GNSS 信号を計測する基準局を設けて, また移動する芝刈り機も GNSS 信号を受信し, これらの GNSS 信号の差分を利用して自己位置推定をする RTK-GNSS(Real Time Kinematic GNSS)がある [56]. RTK-GNSS はリアルタイムで数 cm 以内の誤差で自己位置を計測できる. さらにゴルフ場の路面は傾きがあるため慣性センサの IMU を用いて車体姿勢と芝刈り刃の位置を推定することで, 芝刈り位置を高精度に調節することができる.

現在芝刈りトラクタを用いた自動走行は実用化され初めているが [48], 導入のためには新規で自律作業の芝刈りトラクタを購入しなければならず, 1 台の価格も非常に高価でユーザの経済負担は大きい点が現在の実用化の課題になっている.

2.3.4 農業トラクタロボット

少子高齢化の影響により農業に携わる作業員も高齢化が進んでおり, 基幹的農業従事者数は 2005 年の 224 万人は 2020 年では 122 万人にまで減少している [50]. 将来の農業分野での人手不足を解消するために, 耕うんや田植えなどの農作業トラクタの自動化が開発されている [51, 52]. 農地は一般的に見晴らしが良いため, 自己位置の計測には cm 級の測位精度をもつ RTK-GNSS を用いる. しかし, 農地は路面の凹凸が多い不整地であり, 車体が傾くことも多い. そこで, IMU を用いて車体の姿勢を高精度で計算する. また, 高精度な走行を実現するためには, 車両制御も工夫が必要になる.

一方で無人走行時の安全性の確保のために, LiDAR と超音波センサを用いて周囲の状況を自動センシングするほか, カメラを用いて人がモニタリングできるようになっている.

農作業トラクタロボットは夜間などにも作業が可能であり, 将来的に農業従事者の減少を補うことが期待できる. しかし, 芝刈りトラクタと同じく導入時の経済負担が実用化の大きな課題となっている.

2.3.5 まとめ

本2.3節では自律移動ロボットとして、AGV、掃除ロボット、芝刈りロボット、農業トラクタロボットについて調査を行った。AGVは工場や物流現場等で使用されており、ガイドにより高精度な位置制御、高負荷の搬送、搬送時間の厳守ができるメリットがあるため実用性が高い。掃除ロボットや小型の芝刈りロボットはランダムな方向に走行することで作業範囲内をカバーすることが可能で、正確な自己位置推定は必要ない。作業効率改善の余地はあるが、小規模の作業範囲であれば十分に実用的である。一方で大型の芝刈りトラクタや農作業用トラクタは高精度な自己位置推定を行って、効率的な移動ルートを計画して作業するため大規模な作業場に適している。しかし、ユーザは自律移動機能が搭載されたトラクタを新規に導入する必要があるが、経済的な負担が大きい問題点がある。

以上の自律移動ロボットはそれぞれ使用環境に適した自己位置推定・障害物検知センサを用いている。また、作業者はタッチパネルなどを用いることで、任意の走行ルートを決めることができるが、作業中に即時的に作業者の意図を理解して移動することが困難であり、そのような場合にはやはりパワーアシスト型の移動ロボットを用いることが適切であると考えている。

2.4 自律移動手法の調査

工場や倉庫などでは移動の地点が定まっており、かつ外乱が少ない環境であれば信頼性の高い自律走行が実現可能になる。本節では現状利用されている基本的な自律走行手法についてまとめる。

2.4.1 自律走行システム

従来の電磁誘導線やモノレールなどを用いてきたAGVに対して、環境を識別する内部センサを搭載して自律走行する移動ロボットは特にAMR(Autonomous Mobile Robot)と呼ばれている。AGVと比較してAMRは内部センサによる自己位置推定手法及び障害物の認知が可能であり、指定経路上を高精度で走行する点ではAGVに劣るが、走行状況に合わせて障害物回避をするもしくは手軽に目的地を変更できる柔軟性がある。このような柔軟的な自律移動を実現するためには、環境認識センサによる高度な自己位置推定、障害物検知、経路計画が利用されている。AMRで用いられる自律走行システムの一般的な構成をFig.2.3に示す。ユーザは予め走行するマップ情報を作成もしくは走行環境を探索して作成する。目的地を設定することで、経路計画により目的地までの走行経路を決定する。ロボットの自己位置は環境認識センサ、衛星測位、内界センサなどから推定され、経路追従制御により目標経路に一致させるようにロボットを制御していく。環境から自己位置を高い信頼性で推定するには通常複数のセンサ情報を統合して、センサの信頼性が低下した場合に互いに補完する。移動中に障害物などがある場合は、環境認識センサから検出され、マップ上に障害物を反映させて障害物を避けるような経路計画を再び行っていく。AMRの自律移動技術は主に自己位置推定手法と経路計画手法と言えるため、次にこれらの主要な手法をまとめていく。

2.4.2 自己位置推定

ロボットが自己位置を取得するには衛星測位システムや、環境認識センサ、内界センサを利用した自己位置の推定システムに分けられる。また、センサにはロボット自身の移動量を計測できる内界センサと外部環境を計測する外界センサに分別することができる。

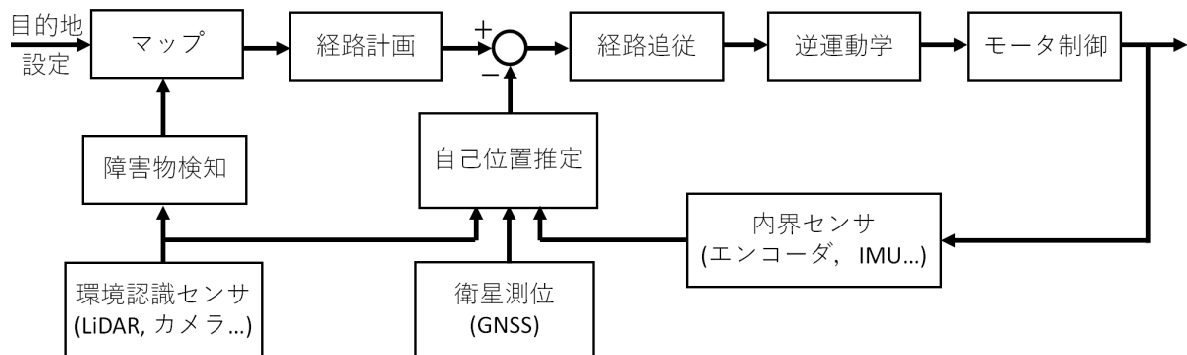


Fig. 2.3: 自律走行システムの構成

衛星測位ベース

衛星による測位は宇宙空間にある複数個の衛星から発射される信号を地上の受信機で受け取り、受け取り場所の絶対位置を推定する方法である。衛星による測位システムはGNSS(Global Navigation Satellite System)と呼ばれ、アメリカのGPS、ロシアのGLONASS、EUのGalileo、中国のBDSなどが運用されている。GNSSによる測位の方法として、単独測位、DGPS(Differential GPS)、RTK(Real Time Kinematic)測位などが存在しているが、単独測位やDGPSは精度が数十cmから数m程度である一方で安定しており、RTK測位はcm級の精度とリアルタイム性を持つ。RTK測位は測位計算プログラムのRTKLIB [56]を用いて衛星信号の搬送波位相を利用して測位を行う。RTK計測の開始時には高精度で収束したFix解を得るまでに時間がかかるほか、比較的に良い信号の受信環境が要求される。単独測位は精度が数mと劣るものの安定しているため広い範囲で移動する際の大域的な位置測定やナビゲーションの用途に適し、RTK測位はcm単位の車体制御に使用されることが多い。環境認識センサとは違い、GNSSは周囲環境のランドマークが少ない見晴らしの良い環境で自己位置を推定できる点や天候に影響されにくいという点では大きなメリットである。しかし、GNSSの信号電力は非常に微力であり、山間部の森林や都市部の建築物で信号が遮断されたり、信号が障害物に当たり反射して計測されてしまう(マルチパス)などの問題によりGNSS計測が安定しない問題がある [57]。

GNSSを用いた測位は障害物がなくひらけた場所では優れた性能を発揮するため、農地で用いられることが多い。通常はRTK-GNSSに加えて、他の安定的なセンサ(IMUやエンコーダ)を用いた自己位置推定と統合して使用するケースが一

般的である [58,59].

LiDAR ベース

周囲がひらけていた環境で有効な測位が可能な GNSS に対して、LiDAR やカメラなどの環境認識のセンサであり、周囲に建築物や木などの特徴的なランドマークが多い場合に有効的に自己位置を推定することができる。一般的に用いられるパルス ToF 式の LiDAR は近赤外光のパルス光を照射し、対象物からの反射時間を計測する ToF(Time of flight) の原理で距離を計測する。LiDAR は周囲環境の距離を計測するために多数の発光と受光素子を搭載したソリッドステート型と1つもしくは少数の発光と受光素子をモータで回転させて周囲の距離を計測する回転式 LiDAR に分けられる [60]。ソリッドステート式は回転部分がないため機械的な故障リスクが少ないが、長距離計測と広い視野角を確保することが現在の課題となっている。一方で回転式は 360 度の広い視野角度と高出力で長い距離の測距を実現できるが、摩耗が発生するため長期間の使用で故障のリスクがあり小型化も困難である。LiDAR は大きな外乱要因である太陽光の影響を減らすために、日光の近赤外領域では 905nm 波長で分光エネルギーが極小値を取るため、多くの製品はこの波長のレーザを光源にしている。

LiDAR は周囲の壁や障害物との距離情報を得られ、これまで ICP(Iterative Closest Point) [61] や NDT(Normal Distributions Transform) [62] などの SLAM 手法により地図作成と自己位置推定を実現した。ICP や NDT などの手法は認識した環境を逐次マッチングする手法であり、周回ルートのような場合はループ閉じこみの手法を用いることで推定誤差を減らすことができる [65]。これに対し環境内の既定のランドマークとの相対位置から自己位置推定をする手法もある [63,64]。

LiDAR による環境認識は外界との距離情報であるため、ひとたび環境に変化が起こった際に走行している場所を見失う可能性もある。そのため、LiDAR を自己位置推定に用いる場合はロボットの高い位置に取り付けて、環境変化が極力ないようにしている。また、光を吸収する黒色物体を検知することが困難であり、雨や雪、霧の影響に影響を受けやすいデメリットもある。これらの不確定性に加えて、価格面でも 2D-LiDAR は数万から数十万円、3D-LiDAR は数百万円と非常に高価であり、ユーザが自律移動ロボットを導入する障壁にもなっている。

カメラベース

カメラはLiDARと違って直接奥行距離を計測できないが、縦と横方向の分解度は高く、色情報も計測されるため物体や歩行者などの認識にも使われる。単眼カメラを用いた自己位置推定はランドマークのサイズと位置が記されたマップに対して、観測されたランドマークとの比較するテンプレートマッチングを行うことで現在値を推定する [67]。しかし、長さ情報が計測できない単眼カメラによる自己位置推定はスケールが定まらないため、対象ランドマークの位置と大きさを事前に設定する必要である [68,69]。またランドマークが視界にない場合は内界センサなどで補う必要がある。

単眼カメラを複数用いて三角計測の原理で奥行距離を計測できるステレオカメラも開発された。ステレオカメラによって自己位置と地図作成する Visual SLAM [71] は単眼カメラのようなスケール不定性が改善される。しかし、距離によらず高精度に測距が可能な LiDAR とは違い、ステレオカメラの測距誤差は距離の二乗に比例する [72]。そのため、ステレオカメラは比較的近距离の計測に向いている性質がある。また、カメラは直射日光や車のヘッドライトなどの強い光で飽和したり、パッシブセンサであるため暗すぎると環境を認識できないデメリットがある。

以上のようにステレオカメラによる自己位置推定は安価に構築でき、ほぼ一定の明るさの屋内であれば、外乱光の影響が少なく実用的である。

内界センサ

ロボットの状態を計測する内界センサとして加速度や角速度を計測する慣性センサの IMU(Inertial Measurement Unit) や車輪の回転を計測するエンコーダ、地磁気センサが挙げられる。

IMU は角速度を計測するジャイロセンサと加速度を計測する加速度計から構成されており、自己位置推定では加速度と角速度とをそれぞれ積分してロボットの現在位置と姿勢を計算する。加速度計は圧電式や静電容量式などがあり、圧電式は高加速度、静電容量式は低下速度の計測範囲を持っており、使用用途によって選定する。一方でジャイロセンサでは光学式や振動式などがあり、光学式の IMU は高い精度検出精度を持っているが、非常に高価である。コリオリ力を利用した振動式は小型化が容易であるが、精度の面で劣る。

IMU は MEMS 技術で開発・量産され、安価に販売されて幅広く利用されている。MEMS 式の IMU はコスト負担が低いが、温度や湿度などの要因による計測値のバ

イアスが存在する．そのため，積分して位置や角度を計算する際に誤差が蓄積され，時間経過とともに正しい位置からズレていく．しかし，短時間であれば位置ズレは小さく，安定しているため，絶対位置が計測可能な外界センサと統合して自己位置推定に使用されている [73–75]．

エンコーダは通常電動モータ内に組み込まれて速度制御に利用されている．エンコーダを用いた自己位置推定はオドメトリと呼ばれ，車輪の移動速度を計測し，車輪間の距離や車輪径などの移動ロボットの寸法を用いることでロボットの移動速度と角速度を運動学から計算することができる．移動速度と角速度を積算することで自己位置をもとめることができる [75]．オドメトリは車輪のスリップや車輪径の変形などによって自己位置推定の誤差が蓄積するが，短時間で急激に変化することがなく安定的であり，IMUと同様に外界センサと統合して使用されている [75]．

2.4.3 経路計画法

経路計画法は障害物を避けながら現在位置から目的地までの経路を自動で計画する．また，走行途中に意図しない障害物に遭遇した際には再度経路計画を行い，障害物をすばやく回避する必要がある．経路計画法は多く存在するが，ここでは基本のポテンシャル法とDWA(Dynamic Window Approach)について調査した．

ポテンシャル法

ポテンシャル法は古くからロボットの動作計画に使われており，Fig. 2.4のようなポテンシャル関数を用いて障害物には斥力場を与え，目的地には引力場を設けてロボットは引力に沿って移動して目的地に向かう [76–78]．ポテンシャル法は理解しやすく実時間性にも優れているが，障害物回避は局所解に陥る場合があり，ゴールに到達できる保証がない．そこで，ラプラスの微分方程式が局所解にならないようなポテンシャル法を提案した [79,80]．しかし，ポテンシャル法は環境にのみ依存した経路計画法であるため，車体の自由度やダイナミクスを考慮していないため急激な方向転換や速度変化がある軌道になる可能性があった．そこで，ダイナミクスを考慮したポテンシャル法も提案されている [81,82]．

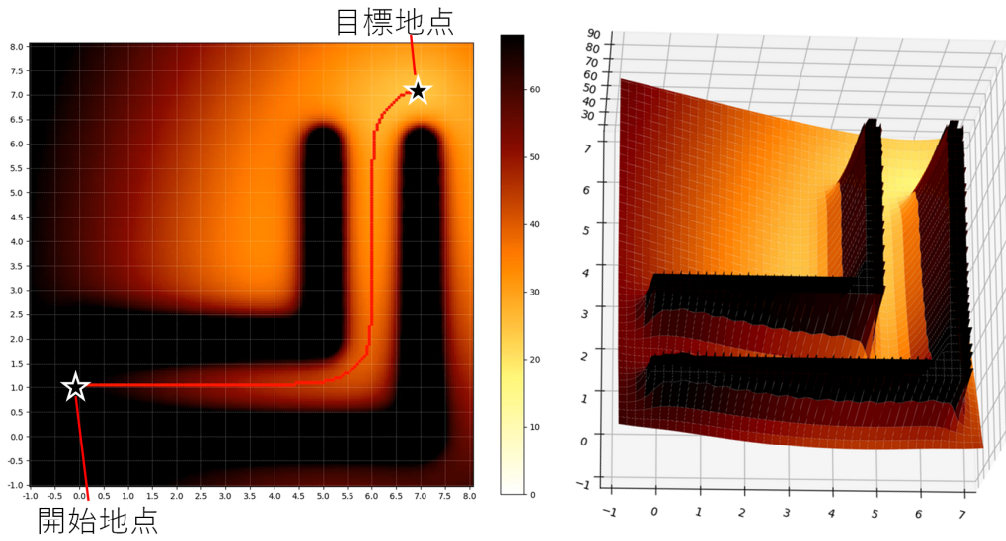


Fig. 2.4: ポテンシャル法による障害物回避

DWA

DWA(Dynamic Window Approach) [83] は Fig. 2.4 のような障害物位置とロボット自身の到達可能な速度と角速度を考慮した軌道計画を行うことができる。DWA ではまず現在の移動速度と角速度をベースにロボットの最大加速度と角加速度から次のステップ時間に到達できる速度と角速度の範囲(ダイナミックウィンドウ)を計算する。次の速度と角速度範囲の中で評価関数を用いて最適な速度と角速度を

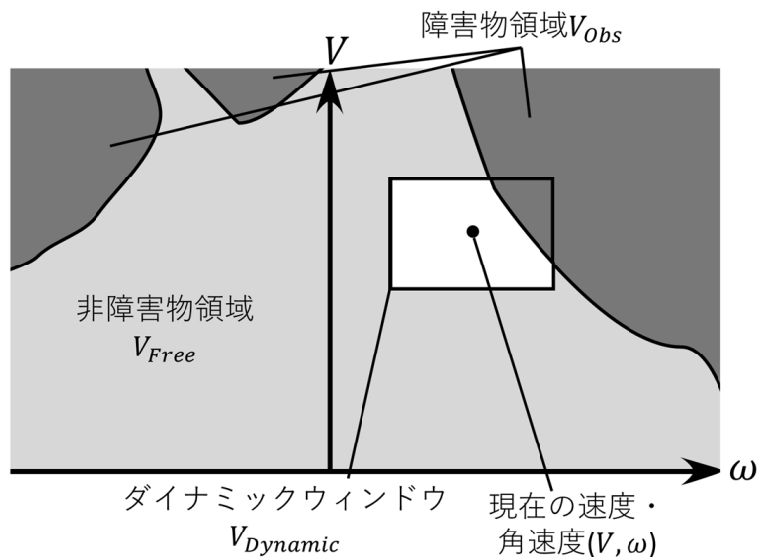


Fig. 2.5: DWA(Dynamic Window Approach) による障害物回避

決めていく。評価関数は次式のように目標地点の方向、速度の大きさ、最も近い障害物からの距離から構成されており、最大になるときの速度と角速度を選定する。

$$G(v, \omega) = \sigma(\alpha \cdot H(v, \omega) + \beta \cdot D(v, \omega) + \gamma \cdot V_m(v, \omega)) \quad (2.3)$$

ここで、 v は次ステップの速度、 ω は角速度、 σ は平滑化関数、 $H(v, \omega)$ は目標地点の方向との一致度、 $D(v, \omega)$ は最も近い障害物との安全距離、 $V_m(v, \omega)$ は速度の大きさ、 α, β, γ はそれぞれの重み係数である。このように車両のダイナミクスを考慮しながら逐次的に速度と角速度を計算することができるが、目標地点までの到達を保証できない。そこでDWAを拡張したグローバルDWA [84, 85]が提案されている。グローバルDWAでは評価関数内に局所解にならずに目標地点に到達できる経路計画法をさらに導入しており、経路計画の方向と一致した場合は評価関数が大きくなるような手法となっている。

2.4.4 まとめ

2.4節では自律移動システムにおける基本的な自己位置推定と経路計画法について調査を行った。自己位置推定では屋外の開けた環境では衛星測位を利用した自己位置推定が有用であり、リアルタイム性があり高精度の測位が可能なRTK-GNSSの利用が有効的である。一方で屋内や周囲の建築物が多い場合はLiDARやステレオカメラを用いて距離地図との比較から自己位置推定を行う手法が有用である。そして、ロボットの内界センサを用いた手法は安定性が高いが、時間と共に推定誤差が蓄積するため、GNSSやLiDAR、ステレオカメラと統合して用いることで、高精度で安定した自己位置推定が実現しやすくなる。しかし、環境認識センサは外乱によって精度低下や測定不可能になることもあるため、実用化のためには外乱が少なく安定している環境での使用が適していると考えている。

移動ロボットの経路計画法はこれまで様々なものが提案されているが、基本的なポテンシャル法とDWAについて調査した。これまで経路計画法はリアルタイムの障害物回避が可能になっており、車体ダイナミクスも考慮されている。応用的な課題はまだ存在するものの、既に工場や生産現場では実用性があると思われる。

2.5 本研究の概要と目的

本章では実用的なパワーアシスト型移動ロボット及び自律移動ロボットとそれらで用いられているパワーアシスト手法と自律移動手法について調査した。パワーアシスト型の移動ロボットの調査より、力覚センサを用いたパワーアシスト方式は直感的な操縦が可能であり、介護者の歩行を妨げることがない。また、これまでのパワーアシスト手法については力制御と速度制御に分類し、速度制御型の手法は重力や摩擦力などの外力に作用されず同じアシスト感(操縦性)を維持することができる。環境に作用されず同じアシスト感を維持することは重要であり、本研究では水平面からスロープまでのパワーアシスト感を明らかにするとともに、アシスト感の変動しないような補正手法を提案する。例として、水平面からスロープに遷移する区間では電動車いすはある角速度で傾き、スロープ上に完全に移動したときにスロープと同じ勾配にある。このような電動車いすに生じる角速度が操作者に与える影響は明らかにされておらず、本研究はこの遷移区間での操縦性の変化を明らかにする。次に速度制御型のパワーアシストは急勾配スロープのような環境で、速度制御性能が劣化し、アシスト感覚が損なわれるリスクがある。急勾配のスロープへの対応を考慮して、拡張したパワーアシスト手法を提案する。そして、パワーアシストが普及されやすいように、高価な力覚センサを用いずにセンサレスの力推定手法と提案し、センサレスパワーアシストの実現を目指す。

次に調査した自律移動ロボットは走行環境ごとに適したセンサとシステムが搭載されている。小型の掃除ロボットや芝刈りロボットはランダムな方位に移動することで作業範囲内をカバーできるが、作業効率の面で課題がある。大型の芝刈り機や農作業トラクタは効率の良い経路で作業を行うことができるが、自動化された大型の作業機を導入する必要がある。ユーザに大きな経済コストがかかる。一方で、自律移動手法は自己位置推定と経路計画法について代表的なものを調査した。自己位置推定は環境の特徴に応じて GNSS, LiDAR, ステレオカメラを使い分ける必要がある。また外乱によって精度が低下するため内界センサなどと統合して用いられる。実用の視点ではシステムの停止は工場や生産現場では作業停止につながるリスクがあるため、確実に動作させなければならない。そのため、本研究では外乱が少なく安定した環境で、狭路環境下での自律移動システムを提案する。提案したシステムはシンプルな自己位置推定手法でリアルタイム性があり、多数に渡る検証実験により確実性を確認する。また、自律移動が停止するような非常時にはパワーアシスト手法を用いて人が重量物を搬送することも可能である

ため、ユーザは作業停止の事態を避けられるようになる。

そして、移動作業の前後ではスムーズにロボットに搬送物を移乗させる必要があるため、ロボットの台面を昇降させる機構を提案する。従来の昇降機構は大型なアクチュエータが必要であったが、本研究では小型のモータで重量物を効率よく昇降できる機構を新たに提案し、自動的に荷物の高さを調節する昇降システムを構築する。

以上のような移動ロボットにおける省人・省力化技術技術を提案することで、工場や生産現場の運搬作業に対して、スムーズに移乗させて目的地に自律移動/パワーアシスト移動することができるようになる。介護現場では搭乗者の安全性を重視するため、主にパワーアシストを用いることになるが、操作感が走行環境に作用されないパワーアシスト手法を利用することで負担が減り、誤操作による事故防止にもつながると期待する。

第3章 パワーアシスト手法

第2章では力制御ベースと速度制御ベースのパワーアシスト手法についてまとめた。力制御はモータのトルクと比例関係にある電流値を制御するシンプルな制御手法であるが、スロープでは重力補償の必要性があり、また走行中にスリップする危険性がある。一方で速度制御はモータに内蔵されたエンコーダを用いて速度を計測して指令値に制御を利用する方式で、スロープ走行時の重力負担や路面の凹凸による抵抗力は速度制御器に吸収されるため、操作者に影響はなく、車輪がスリップする危険性も低い。従来の研究では水平面での介護者へのアシスト効果の検証はされ、スロープでは重力補償の手法や転倒防止手法が提案されてきた [24–27]。しかし、水平面からスロープを移動する際の一連のアシスト効果の検証がされていない。本章では水平面やスロープ上など同一平面上で走行する際の基本的なパワーアシスト手法を導出し、さらには車いすが水平面からスロープに移る際のような2平面上に車いすがある場合のアシスト手法に拡張する。2平面上に車いすがある場合は基本のパワーアシスト手法に対してさらに速度を補正する必要があり、本章では補正がない場合の介護者に対する影響と提案した速度補正手法の効果検証を行った。

また、速度制御型のパワーアシスト手法は高負荷がかかる急勾配スロープのような環境で走行する場合に、モータの駆動力を越えた速度目標値が与えられることがある。速度の飽和が起こるとモータの負荷が軽減された時に加速して暴走する危険があったり、左右のモータ負担が異なるとスロープから転落する危険もある。また、急勾配の下り坂では介護者は通常、車いすを支える形で後退して進むが、従来のアドミッタンス制御を用いたパワーアシストを用いて後退する際は車いすを引っ張る必要があり、直感的な操作ができないほか、モータに追加の負担を加えることになる。そこで、本章ではさらに急勾配スロープ走行時に対応できる拡張アドミッタンス制御を導入して検証した。

3.1 水平面上とスロープ上のパワーアシスト手法

本3.1節ではまず水平面上を介護者が車いすを押して走行することを想定し、走行時介護者に加わる負担を物理モデルとして表現する。この物理モデルをもとに介護者のためのパワーアシスト手法を提案する。

3.1.1 アドミッタンス制御

介護者が車いす介護をする際に、加える力と車いすの速度の関係は搭乗者が載った車いすモデルと走行環境のモデルから計算する必要があるが、走行路面が水平面である場合に介護者が受ける負担は主に慣性負荷と摩擦負荷である。この2つの負荷は簡易的に Fig.3.1 のような質量-ダンパシステムで表現することができる。時刻 t における入力を力 $F(t)$ とし、出力を速度 $V_D(t)$ とすると、運動方程式は以下のように表される。

$$F = M \frac{dV_D}{dt} + DV_D \quad (3.1)$$

ここで M は仮想質量、 D は仮想ダンピング係数（粘性摩擦係数とも）である。手動車いすで搭乗者と車いすを含む総質量を M_a 、路面の摩擦係数を D_a であるとすると、パワーアシストの際は $M < M_a$ 、 $D < D_a$ に設定することでアシスト感覚が得られる。アドミッタンスモデルを用いて介護者に加わる走行時の負担を調べるために、式 (3.1) から出力と入力の比で表される伝達関数を求めると以下のような一遅れ系の形になる。

$$G(s) = \frac{V_D(s)}{F(s)} = \frac{1}{Ms + D} \quad (3.2)$$

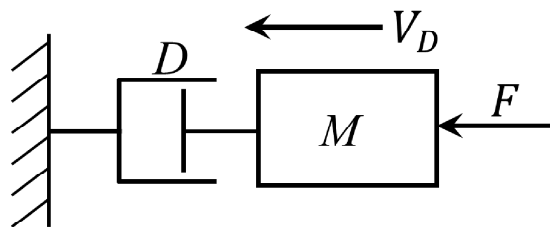


Fig. 3.1: アドミッタンスモデル

ここで伝達関数 $G(s)$ は入力 $F(s)$ に対する出力 $V_D(s)$ の比率を表しており、アドミタンス（インピーダンスの逆数）と呼ばれる。式(3.2)よりアドミタンス $G(s)$ の振幅が小さい場合は、大きな介護者の力 $F(s)$ に対して応答速度 $V_D(s)$ が小さく、介護者が走行する際の抵抗力が大きいことを意味している。逆にアドミタンス $G(s)$ の振幅が大きい場合は小さい介護者の力 $F(s)$ に対して応答速度 $V_D(s)$ が大きいため、走行する際の抵抗力は小さい。また、この一次遅れ系での時定数は M/D であり、応答時間の遅れの目安を表している。

簡易的に介護者の力は大きさ F のステップ入力と仮定し、式(3.2)の伝達関数のステップ応答を求めると以下の式が求まる。

$$V_D = \frac{F}{D}(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (3.3)$$

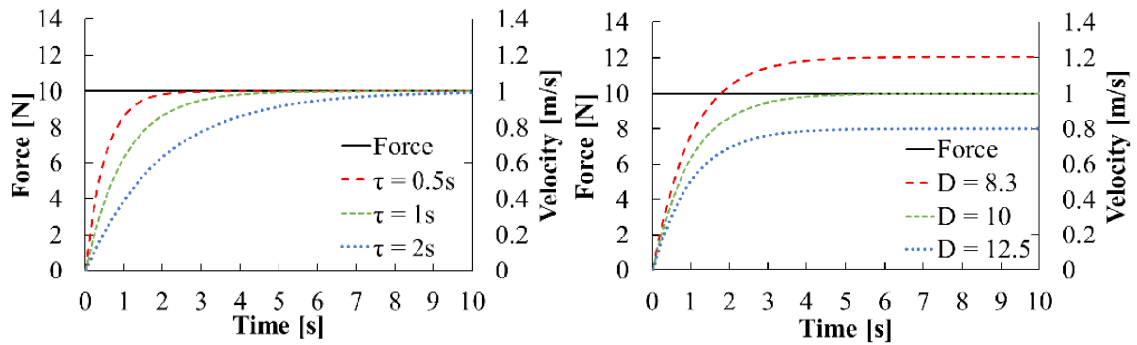
$$\tau = \frac{M}{D} \quad (3.4)$$

ここで τ は時定数であり、仮想質量と仮想ダンピング係数の比になっている。時定数 τ を小さく設定することで定常速度に達する時間が早まり、 τ が大きい場合は定常速度までの時間がかかる。つまり、時定数を調節することで介護者の操作感覚に合わせたパワーアシストシステムの応答性を変更することができる。定常状態では速度と力の関係は $V_D = F/D$ になるため、定常状態での操縦者の走行負荷は以下のように求まる。

$$F = D \cdot V_D \quad (3.5)$$

介護者の力として 10N を加えられた際のアドミッタンスモデルの速度応答を Fig.3.2(a) と (b) に示した。Fig.3.2(a) は仮想ダンピング係数 $D=10$ とし、そのときの仮想質量 M を変更して時定数 τ が 0.5, 1, 2 になるように設定した。それぞれ 0.5s, 1s, 2s に最大速度 1m/s の約 63% に達していることが確認できる。また、Fig.3.2(b) は時定数 $\tau = 1$ として、仮想ダンピング係数 D を 8.3, 10, 12.5 に変更した。式(3.5)より定常速度は $V=F/D$ であるため、 $D=8.3$ のときは約 1.2m/s、 $D=10$ のときは約 1m/s、 $D=12.5$ のときは約 0.8m/s の定常速度に収束していることが確認できる。

以上のように本アドミタンスベースの制御を用いることで、介護者の走行開始時や停止、走行途中の加減速時の応答感覚を時定数 τ で調節することができ、歩行速度がほぼ一定に収束した際の走行負担を仮想ダンピング係数 D で変更できる。以降はアドミタンスモデル内の仮想パラメタ M と D を調整してパワーアシスト感覚が得られる制御をアドミッタンス制御と呼ぶこととする。



(a) 時定数 τ の変更 ($D=10$) (b) 仮想ダンピング係数 D の変化 ($\tau=1$)

Fig. 3.2: アドミタンスモデルのステップ応答

3.1.2 制御システム

アドミタンスベース制御に基づいたパワーアシストは Fig. 3.3 の制御システムで実現することができる。介護者の力が電動車いすに加わると、力覚センサから計測されアドミタンスモデルを経て車いすの速度目標値に変換される。速度目標値はさらに回転速度に変換され、速度制御器に入力される。速度制御器内では目標回転速度とモータのエンコーダから計算された実際の回転速度の偏差を用いて PID 制御で電圧がモータに印加される。モータの出力軸には摩擦力や慣性力、重力といった外乱が加わるが、PID 制御器によって実際速度は目標速度に維持されるようになる。そのため、本パワーアシスト制御は重力などの外乱成分の影響が介護者に伝達されず、スロープ上で走行も水平面と同様な操作感覚を実現できる。

以下にアドミタンス制御を用いたパワーアシストの特徴をまとめる。

1. アドミタンス制御は走行開始時などの加減速時で介護者に加わる負荷を仮想質量 M としてモデル内に取り入れており、仮想質量 M を変更することで走

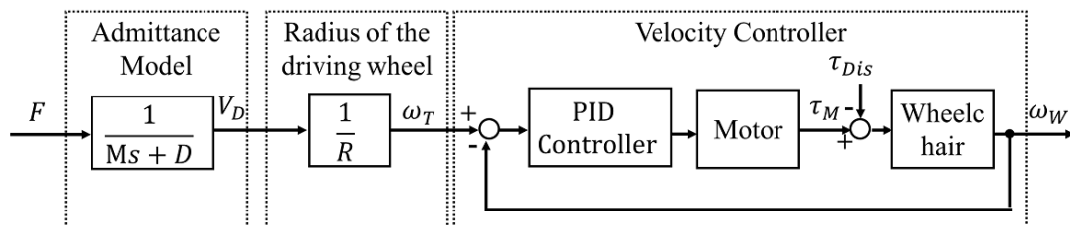


Fig. 3.3: アドミタンス制御を用いたパワーアシストシステム

行開始時や停止時の負荷を変更することができる。

2. 介護者が車いす介護をする際，時間経過とともに移動速度がほぼ一定値に収束した定常状態になる．定常状態ではアドミタンスモデルの仮想ダンパ D を調節することで定常負担を使用者の身体能力に合わせて任意に調整することができる．
3. 速度制御器によってモータの回転速度は常に目標速度に制御されるため，環境による外乱力は介護者に伝達されない．そのため，異なる搭乗者が車いすを使用する場合やスロープ・段差を走行する場合などに関わらず，介護者の操作感覚は変わらずに維持することができる．

3.2 水平面とスロープ間の遷移区間でのパワーアシスト

先述のアドミタンス制御を用いたパワーアシストシステムは水平面やスロープなどでは有効であるが、車いすが水平面からスロープに遷移する際は車いすの姿勢はある傾きの角速度でスロープの傾斜角度に近づく。この傾きの角速度があることにより、介護者が把持しているハンドルと後輪駆動輪間の速度に差が生まれて、介護者の操作に影響を与える。従来の制御方法はほとんど車輪の速度にのみ着目しており、介護者が持つハンドルの速度変動と介護者の操作感覚変化については研究されていない。本3.2節ではこの遷移区間での介護者が把持するハンドルの速度変動を明らかにし、速度変動の補正手法を提案する。本速度補正手法を用いることで遷移区間での介護者の操作感覚変化が抑えられ、常に同じ操作感覚が実現される。

3.2.1 水平面とスロープの遷移区間での速度変動

まず、一般的な走行環境を想定するために Fig.3.4 のような異なる2つの傾斜角度をもつスロープ上で介護者が車いすを操作しているモデルを考える。Fig.3.4 のモデルは簡単化のため、ハンドルバーの高さや前後輪のホイールベース間距離などの主な寸法をモデルに取り入れている。Fig.3.4 では車いすの後輪が第1スロープ、前輪が第2スロープ上に接しており、また車いすの傾斜角 θ は車いすの走行につれて角速度 $d\theta/dt$ で θ_U から $\theta_U + \phi$ に変化していく。もし、第2のスロープが第1のスロープよりも急な勾配を持つ場合($\phi > 0$)、車いすは正の角速度 $d\theta/dt$ で反時計回りに回転する。これは車いすのハンドルは車輪に対して相対的に減速していると言える。逆に第1スロープが第2スロープより急な勾配を持つ場合($\phi < 0$)、車いすは負の角速度 $d\theta/dt$ で時計回りに回転する。この場合はハンドルの速度は車輪よりも速くなる。Fig.3.4 のような介護者が車いすを押しながら第1スロープを歩くとき、介護者が把持しているハンドグリップHの速度 V_U (介護者の歩行速度とほぼ同じとみなせる)は、第1スロープと同じ傾き θ_U になる。つまり、速度 V_U のは後輪の速度 V_R の方向と同じ向きである。ここで、後輪の中心Rに対するハンドル中心Hの相対速度 V_{HR} は、 $V_{HR} = L_{HR} \cdot d\theta/dt$ の関係でなる。Fig.3.4 から介護者の速度 V_U は、 V_{HR} の V_R 方向への投影と V_R の和になっている。したがって、 V_U は次のように表される。

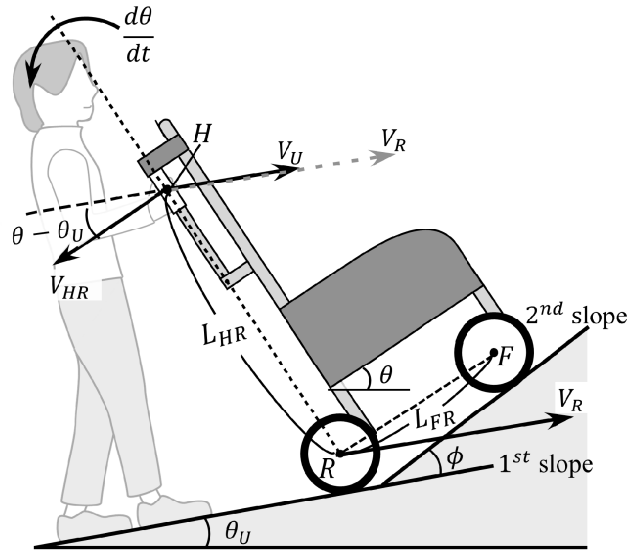


Fig. 3.4: 2つの異なる傾斜角度の slope 上で車いすを操作している介護者のモデル. V_R は後輪の速度, V_U は介護者が把持しているハンドルの速度, θ 車いすの傾斜角度, θ_U は後輪が接している1つ目の slope の傾斜角度, ϕ は1つ目の slope と2つ目の slope のなす角, V_{HR} 車輪中心 R に対するハンドル中心 H の相対速度である.

$$\begin{aligned} V_U &= V_R - V_{HR} \cos(\theta - \theta_U) \\ &= V_R - L_{HR} \frac{d\theta}{dt} \cos(\theta - \theta_U) \end{aligned} \quad (3.6)$$

ここで, θ は車椅子の傾斜角度であり, θ_U は後輪が接している第1 slope の傾斜角度である. 式 (3.6) より角速度 $d\theta/dt$ が正である場合, ハンドル速度 V_U は後輪速度 V_R よりも遅くなる. また, 角速度 $d\theta/dt$ が負である場合, ハンドル速度 V_U は後輪速度 V_R よりも速くなる, このように2つの slope の遷移区間ではハンドル速度と後輪速度に差異があるため, 介護者の操作感は平面での走行時の操作感とは異なる. slope を登る際のハンドル速度変化を明らかにするために, 水平面と坂道の間を走行する車いすを Fig.3.5 の5段階に分けて分析を行った.

以下に水平面から slope へ移動する際の5つの状態を定義した.

1. Phase 1 : 水平面上で走行している. すべての車輪は同じ水平面上にある.
2. Phase 2 : slope に差し掛かっている. 前輪は slope に接触しているが, 後輪はまだ水平面上にある.

3. Phase 3 : 完全にスロープ上で走行している．すべての車輪はスロープ上にある．
4. Phase 4 : スロープ後の水平面に到達している．前輪はスロープを通過して水平面に達し，後輪はまだスロープ上にある．
5. Phase 5 : 水平面上で走行している．すべての車輪は同じ水平面上にある．

Phases 1, 3, 5では，すべての車輪が同じ平面上にあるが，Phase 2とPhase 4は前輪が後輪と同じ平面上になく，車いすはある角速度をもって傾いている．車いすの角速度はFig.3.6(a)と(b)に示すように，Phase2とPhase 4の車いすモデルから導出することができる．スロープを登る際，車いすの瞬間回転中心Pは，後輪が接地している水平面と前輪が接地しているスロープから垂直に延びた2本の線の交点である．瞬間回転中心Pから車輪中心Rまでの距離は L_{PR} であるため，後輪の速度 V_R は以下のように表される．

$$V_R = L_{PR} \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (3.7)$$

Fig.3.6(a)に示す ΔPFR に着目すると， $\angle PFR = 90^\circ - (\theta_S - \theta)$ という関係が成り立つ．よって， L_{PR} は以下の関係で表される．

$$L_{PR} = \frac{L_{FR} \cdot \cos(\theta_S - \theta)}{\sin\theta_S} \quad (3.8)$$

ここで， θ_S はスロープの傾斜角度， θ は車いすの傾斜角度である．式(3.7)と式(3.8)より，Phase 2での角速度 $d\theta/dt$ は以下のように表される．

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{\sin\theta_S}{L_{FR} \cdot \cos(\theta_S - \theta)} V_R \quad (3.9)$$

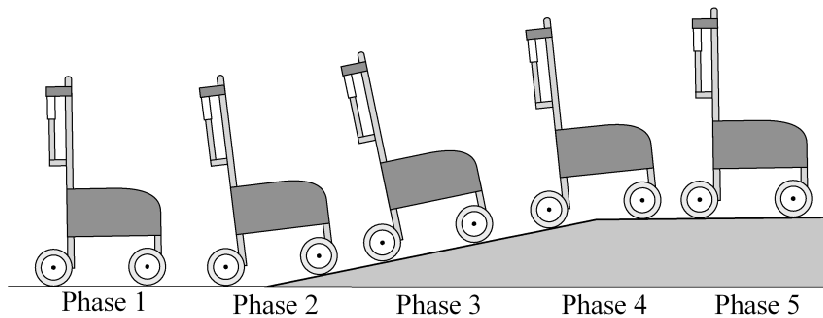


Fig. 3.5: 水平面からスロープまでの5 phases

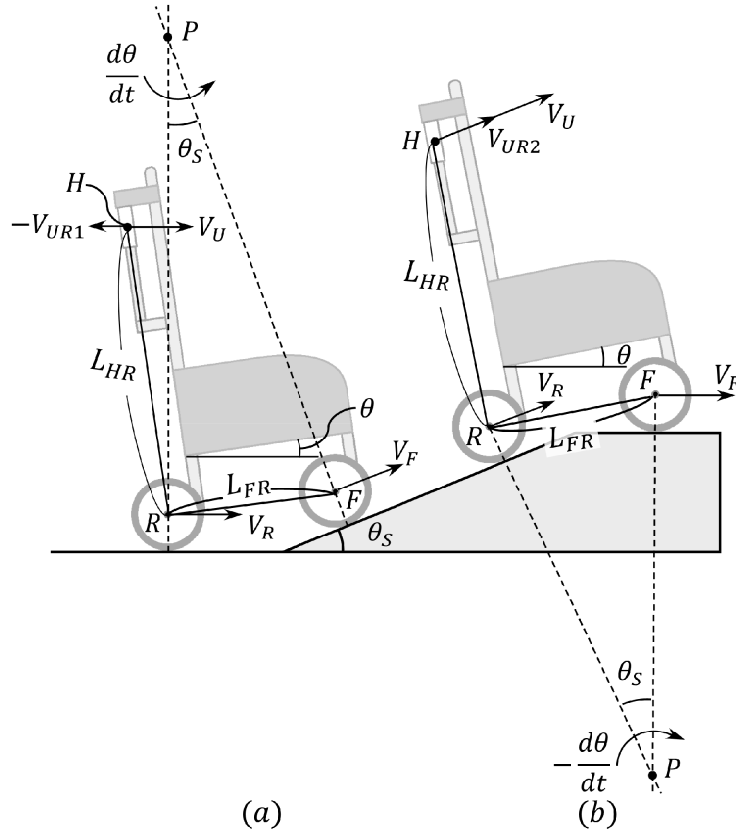


Fig. 3.6: 水平面とスロープ間の遷移区間での車いすモデル. (a), (b) はそれぞれ Phases 2 と 4 である.

式 (3.9) を式 (3.6) に代入すると, 介護者の速度 V_U は次のように導出される.

$$V_U = V_R + V_{UR1} \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned} V_{UR1} &= -L_{HR} \frac{d\theta}{dt} \cos(\theta - \theta_U) \\ &= -\frac{L_{HR} \cdot \sin\theta_S \cos\theta}{L_{FR} \cdot \cos(\theta_S - \theta)} V_R \end{aligned} \quad (3.11)$$

ここで, Phase 2 では Fig. 3.4 の第 1 スロープは水平面であるため, $\theta_U = 0$ となる. また, Phase 2 での車いす傾斜角度 θ の範囲は, 常にスロープの傾斜角度 θ_S よりも小さいため, $0 < \theta < \theta_S < 90$ の関係が成り立つ. よって, Phase 2 では後輪に対するハンドルの相対速度である V_{UR1} は常に負の値をとり, ハンドル速度 V_U は後輪速度 V_R よりも常に遅い. Phase 1 で介護者が一定速度で歩行していると仮定して,

Phase 2 に突入した際は介護者が把持するハンドル速度が低下して、介護者に抵抗感を与えると予測される。

一方で Phase 4 では Fig. 3.6(b) に示すように、瞬間回転中心 P が車いすの下側にあるため、角速度 $d\theta/dt$ と後輪速度 V_R の関係は次式で与えられる。

$$V_R = -L_{PR} \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (3.12)$$

Fig. 3.6(b) の ΔPFR において、 $\angle PFR = 90^\circ - \theta$ の関係が成り立つため、ハンドル中心と瞬間回転中心の距離 L_{PR} は以下の式で表される。

$$L_{PR} = \frac{L_{FR} \cdot \cos\theta}{\sin\theta_S} \quad (3.13)$$

式 (3.12) と式 (3.13) から、Phase 4 での車いすの角速度 $d\theta/dt$ は、

$$\frac{d\theta}{dt} = -\frac{\sin\theta_S}{L_{FR} \cdot \cos\theta} V_R \quad (3.14)$$

式 (3.14) を式 (3.6) に代入すると、介護者の速度 V_U の関係式が導出される。

$$V_U = V_R + V_{UR2} \quad (3.15)$$

$$\begin{aligned} V_{UR2} &= -L_{HR} \frac{d\theta}{dt} \cos(\theta - \theta_U) \\ &= \frac{L_{HR} \cdot \sin\theta_S \cos(\theta - \theta_S)}{L_{FR} \cdot \cos\theta} V_R \end{aligned} \quad (3.16)$$

ここで、Fig. 3.4 の第 1 スロープは Phase 4 で θ_S の傾きを持つスロープであるので、 $\theta_U = \theta_S$ となる。Phase 4 では $0 < \theta < \theta_S < 90$ の関係であるため、 V_{UR2} は常に正の値をとる。そのため、介護者が把持しているハンドルの速度 V_U は車輪速度 V_R よりも常に速い。このことから Phase 4 では介護者に車いすが引っ張っているような感覚を与えると予測される。

3.2.2 遷移区間での速度補正手法

3.2.1 では遷移区間の Phase 2 と Phase 4 における車輪速度と介護者の速度の関係として式 (3.10) と式 (3.11)、式 (3.15) と式 (3.16) を導出した。これらの結果より、遷移区間ではハンドル速度が変動して、介護者の操作感が変わることが予測された。遷移区間でも水平面やスロープのような操作感を維持するためには、変動し

たハンドル速度を補正する必要がある、そのためには Phase 2 と Phase 4 での車輪の走行速度を変更しなければならない。この 3.2.2 節では速度補正の手法を提案する。アドミタンス制御から定まった後輪駆動輪の目標速度 V_D に対して、Phase 2 では変動した速度分の V_{UR1} 、Phase 4 では変動した速度分の V_{UR2} を車輪の目標速度から引くことでハンドルの速度が補正される。補正後の車輪の目標速度 V_T は次式で表される。

$$V_T = V_D + V_C \quad (3.17)$$

$$V_C = \begin{cases} 0 & \text{if } \left| \frac{d\theta}{dt} \right| \leq \omega_{TH}, \\ -V_{UR1} & \text{if } \frac{d\theta}{dt} > \omega_{TH}, \\ -V_{UR2} & \text{if } \frac{d\theta}{dt} < -\omega_{TH} \end{cases} \quad (3.18)$$

ここで V_D は式 (3.1) のアドミタンスモデルから算出される後輪の目標速度、 ω_{TH} は車いすが傾く角速度の閾値、 V_C は補正速度、 V_{UR1} 及び V_{UR2} は、それぞれ Phase 2 及び Phase 4 における後輪に対するハンドルの相対速度である。水平面からスロープに走行する際に Phase 2 と Phase 4 の区間を区別するために IMU を使用して、角速度が正の値をとるときは Phase 2、角速度が負の値をとるときは Phase 4、0 に近い値をとる場合は速度補正をしないようにした。しかし、IMU で測定される車いすの角速度 $d\theta/dt$ は Phase 1, 3, 5 で理論的に 0 になるが、実際にはセンサーノイズや走行中のタイヤ変形などの影響により 0 にはならない。そこで、角速度の閾値 ω_{TH} を導入することで、角速度 $d\theta/dt$ にある程度のマージンを持たせて、Phase 1, 3, 5 では速度補正をしないようにしている。角速度の閾値 ω_{TH} は介護者が車いすを水平面上で走行させたときの IMU の最大ノイズ振幅を測定し、その値を参照して ω_{TH} を決定した。

提案した速度補正のパワーアシストシステムを Fig.3.7 に示す。介護者が車いすに力 F_U を加えると FSM で力 F が測定され、アドミタンスモデルに入力して目標速度 V_D を生成する。後輪の目標速度 V_T は、目標速度 V_D に補正速度 V_C を加算することで算出される。補正速度 V_C は式 (3.18) で決定し、車いすに設定されている IMU から傾斜角 θ を算出する。後輪の目標角速度 ω_T は V_T/R から算出され、モータの速度制御器に入力される。これにより介護者が持つハンドルの速度 V_U をアドミタンスモデルの目標速度 V_D に制御することができる。よって、提案する速度補

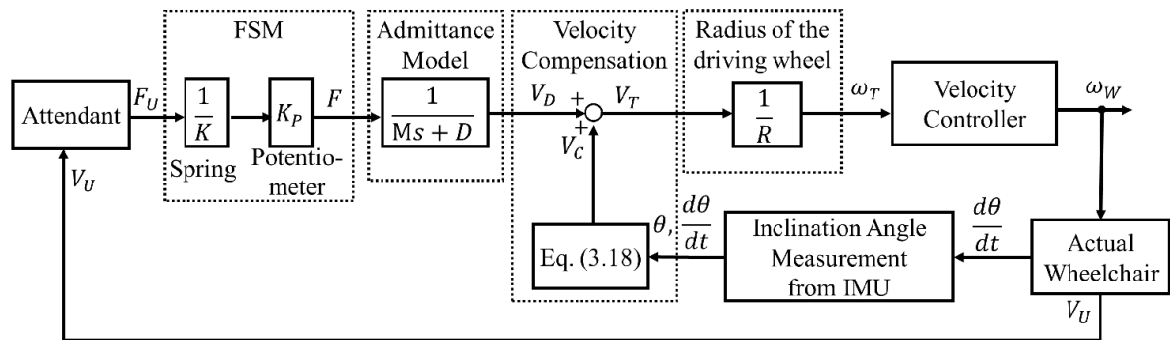


Fig. 3.7: 構築した速度補正型パワーアシストシステム

正型パワーアシストシステムを用いることで、車いすが水平面からスロープを上り切るまでの区間で、水平面上と同じ操作感覚を実現できるようになる。

3.3 急勾配スロープ上でのアシスト手法

先述のように、アドミタンス制御を用いることでスロープ上を走行する際の重力負担を完全に車いすが負担して、介護者は水平面と同じようなアシスト感覚で操縦ができる。一般的に走行するスロープに関する規則は国内では「高齢者、障害者等の移動等の円滑化の促進に関する法律」(バリアフリー法) [88]、海外では例えばアメリカの ADA(Americans with Disabilities Act) [87] より、1:12(約5度)以内にスロープ勾配を設計することが推奨されている。勾配が5度程度のスロープは多く見られるが、屋外では空間上の制限などの理由で5度以上のスロープも多く存在している。例えば、Fig.3.8は検診バスに搭載されている簡易スロープで、勾配は約17度と非常に急である。そのため、2人の介護者で車いすを車内に押し上げなければならない。こうした急勾配のスロープに対して、アドミタンス制御を適応させた場合は、車いすのモータは重力をすべて補償する必要があるが、モータの牽引トルクが不足して目標速度に到達できずアドミタンス制御の特性が失われて、暴走する危険がある。また、検診車から降りる際はアドミタンス制御を用いるとさらに引いて操作しなければならない。そこで、本3.3節ではモータの牽引力を越えるような急勾配スロープにおけるアシスト手法として拡張アドミタンス制御を提案し、急勾配でかかる負荷を計算することで介護者に提供できる最大アシスト率を導出する。



Fig. 3.8: 急勾配スロープでの車いす介助

3.3.1 拡張アドミッタンス制御

急勾配スロープにおいてもアドミッタンス制御は重力負荷を完全に補償するため、モータの駆動力が不足して理論通りのアシスト制御ができなくなる。また、スロープを下る際にアドミッタンス制御を使用すると急勾配で車いすを後ろに引っ張らなければならない、介護者に恐怖感を与える恐れがある。急勾配スロープのような走行環境では後退する際は車いすを引っ張らずに支える形下りれることが理想であるため、ある程度重力に従った目標速度が生成させるべきである。ここでは従来のアドミッタンス制御にさらに重力項を取り入れた式(3.3)を拡張アドミッタンス制御と呼ぶこととする。

$$F - (1 - \alpha)F_g = M \frac{dv}{dt} + Dv \quad (3.19)$$

$$F_g = mg \sin\theta \quad (3.20)$$

ここで、 m は搭乗者と車いすを含めた総質量、 g は重力加速度、 θ は車いすの傾斜角度、 α は重力負荷のアシスト率である。重力項を用いることで、下り坂では支えて後退する形で下ることができるようになる。重力アシスト率 α は介護者個人の身体能力によって任意に調節可能である。また、スロープでのアシストのために設計した α は水平面時に全く影響しないので、同じパラメータを用いて水平面と斜面でアシストができる。拡張アドミッタンス制御システムをFig. 3.9に示す。重力負担 F_g は重力アシスト率によって重力アシスト力 αF_g と重力負担 $(1 - \alpha)F_g$ に分けられ、 αF_g はトルクに変換され、速度制御器に外乱トルクの一部として加えられる。一方で介護者は $(1 - \alpha)F_g$ を負担している。

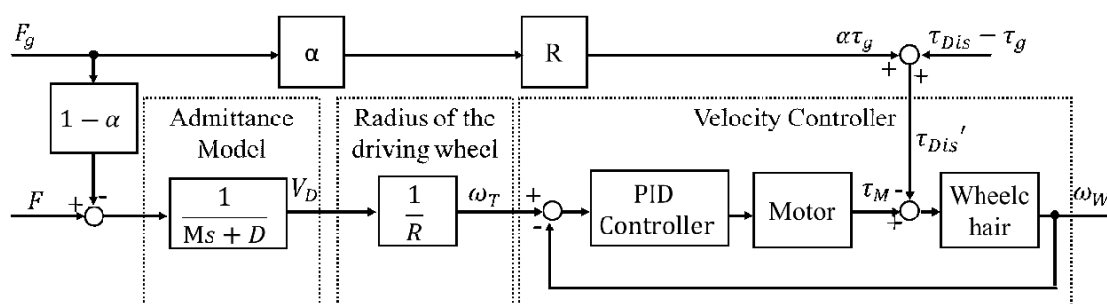


Fig. 3.9: 拡張アドミッタンス制御を用いたパワーアシストシステム

3.3.2 モータの最大パワーを引き出す手法

拡張アドミッタンス制御手法を用いることで、急勾配スロープでの走行が実現できる。ここでは急勾配スロープでの重力アシスト率の上限値を α_{max} を求める。車いすに働く全体の合力を F 、電動車いすと搭乗者の総質量を m 、車いすの加速度を a 、力計測機構から計測された介護者の力を F_h 、車いすの駆動力を F_M 、車輪の摩擦力を $F_r(\theta)(=F_{r1} + F_{r2})$ 、重力による負荷を $F_g(\theta)$ とすると以下の式 (3.4) 式が得られる。

$$F = ma = F + F_M - F_r(\theta) - F_g(\theta) \quad (3.21)$$

ここで加速度 a は左右の駆動輪であるインホイールモータに内蔵されているエンコーダから算出している。車いすでの摩擦力 $F_r(\theta)$ はころがり摩擦と粘性摩擦と仮定し、その近似式を以下に示す。

$$F_r(\theta) = c \cdot mg \cdot \cos\theta + d \cdot r \cdot \omega \quad (3.22)$$

ここで、 c は車いすのころがり摩擦係数、 d は車いすの粘性摩擦係数である。スロープ上での車いすの走行が定常状態であり、モータの最大駆動力を F_{max} とすると、式 (3.19)、式 (3.20)、式 (4.6)、式 (3.22) から最大アシスト率 α は式 (3.8) のように算出できる。

$$\alpha = \frac{F_{max} - \{(d - D)r\omega + c\bar{m}g\cos(\theta_{max})\}}{\bar{m}g\sin(\theta_{max})} \quad (3.23)$$

ここで、 θ_{max} は走行するスロープの傾斜角度である。

以上のように、アドミッタンス制御はスロープ上でも水平面と同様な操作感覚を実現できる手法ではあるが、スロープの勾配が急であるときは重力が大きく目標通りの制御が実現できないことを述べた。そこで、その対策として重力アシスト項を導入した拡張アドミッタンス制御を提案し、重力アシスト率 α を最大化する手法を書き述べた。このようなシステムを用いることで、電動車いすは急勾配スロープにおいても最大限のアシストを行うことができ、また水平面上で走行する場合は通常のアドミッタンス制御を実現できるようになる。

3.4 実験検証

本3.4節では本研究で開発した電動アシスト車いすを用いて、提案したパワーアシスト手法の効果を検証する。

3.4.1 力計測機構を搭載した電動アシスト車いす

開発した電動アシスト車いすを Fig.3.10 に示す。本電動車いすはハンドルに内蔵されている力計測機構 (FSM) から介護者が加えて力を検出する。駆動には後輪2輪にダイレクトドライブのインホイールモータ (8 インチ径の BLDC モータ, Shenzhen ZhongLing Technology Co., Ltd) を使用しており、モータの性能を Table 3.1 に示す。制御ユニットの構成はマイコン (ATmega2560), 2つのモータドライバ, 24V バッテリ, インターフェスボードになっている。また、車いすの傾斜角度を計測するために、IMU(inertial measurement unit) も制御ユニット内に組み込まれている。制御ユニットの構成部品の詳細を Table 3.2 に示す。

介護者の力を計測する FSM(Force-sensing mechanism) の開発コンセプトは十分に計測精度がありかつ従来の力覚センサより安価であることを目指した。開発した FSM は Fig.3.11 のように2つのバネと1つのリニアポテンシオメータ (Midori Precisions Co., Ltd. LP-20FP) から構成されている。FSM は縦型のハンドルの上部

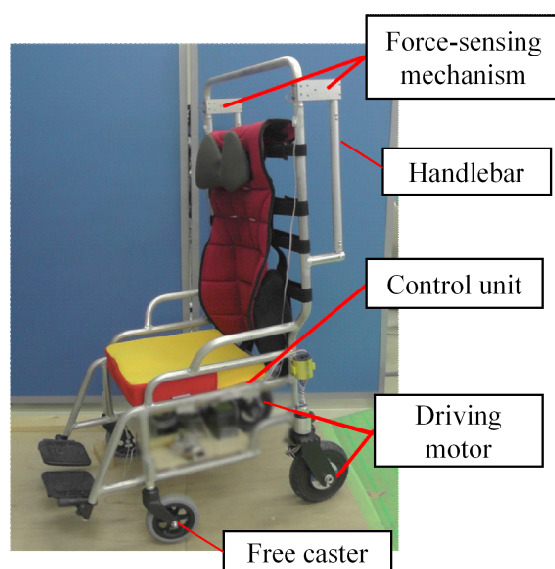


Fig. 3.10: 開発した介助者用電動車いす

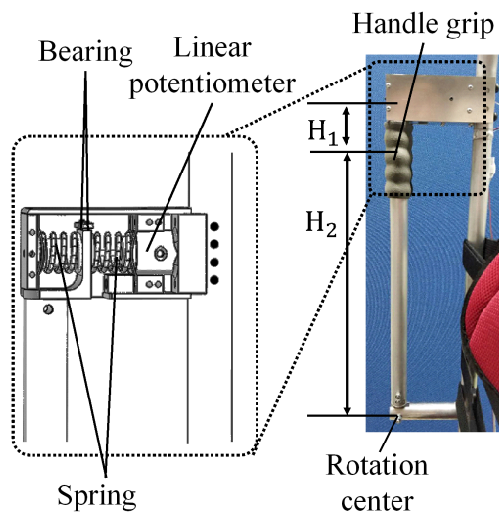


Fig. 3.11: 力検出機構 (FSM) の構成

Table 3.1: インホイールモータの性能

Motor power	250W
Nominal voltage	24V
Nominal torque	5.5Nm
Nominal speed	200RPM
Wheel radius	0.1m
Gear ratio	1
Encoder resolution	1024PPR

Table 3.2: ハードウェアの詳細

Microcontroller	ATmega2560 (Microchip Technology Inc.)
Inertial measurement unit	MP-M6-06/2000C (MicroStone Co., Ltd.)
Battery	24V 9Ah Lead-acid battery (Kung Long Batteries Industrial Co., Ltd.)
Motor driver	ZLAC706 (Shenzhen ZhongLing Technology Co., Ltd.)

にあり，下部には回転中心がある．回転中心からハンドルグリップの中心までの距離は H_2 ，ハンドルグリップ中心からリニアポテンシオメータ軸までの距離は H_1 である．リニアポテンシオメータの変位を Δx ，計測する力を F とすると，以下の関係式になる．

$$F = k \cdot \Delta x \frac{H_1 + H_2}{H_2} \quad (3.24)$$

ここで， k はバネ係数であり，15.24N/mm のものを選定している．リニアポテンシオメータの最大変位は $\pm 10\text{mm}$ であり， H_1 ， H_2 はそれぞれ 70mm と 380mm である．よって，式 (3.24) より 1 つの FSM で計測できる力の範囲は約 $\pm 180\text{N}$ である．両手で 2 つの FSM を用いているため，全体としては約 $\pm 360\text{N}$ の力計測が可能になる．

設計した力計測機構の精度を検証するため，Fig.3.12 のような計測環境を構築し，検証実験を行った．検証実験ではハンドルにワイヤの一端を固定して，もう一端はプーリを介して吊り下げられた重りに接続している．使用した重りは約 1kg から 18kg まで，1kg ずつ異なる 18 個の重りを使用した．ここで使用した重りの精確的な重量を図るため，Mettler Toledo 株式会社の PM34 DeltaRange を用いて重量の計測を行った．実験結果は Fig. 3.13 のように求まり，18 点のデータで近似直線を描きデータと近似直線の誤差を求めた．誤差の平均は約 -0.01N であり，標準偏差は 1.61N^2 であった．また，18 点のデータ中の最大誤差は 3.4N であり，介護者スロープを上る際の負荷よりかなり低いため，本力計測機構はパワーアシスト用途では十分な精度を持つといえる．

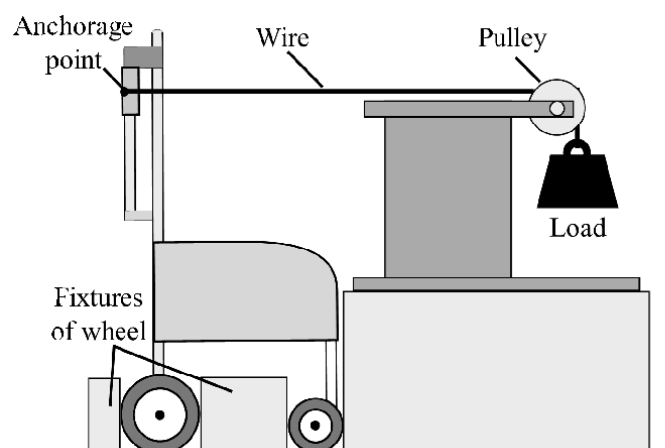


Fig. 3.12: FSM の精度検証実験の構成

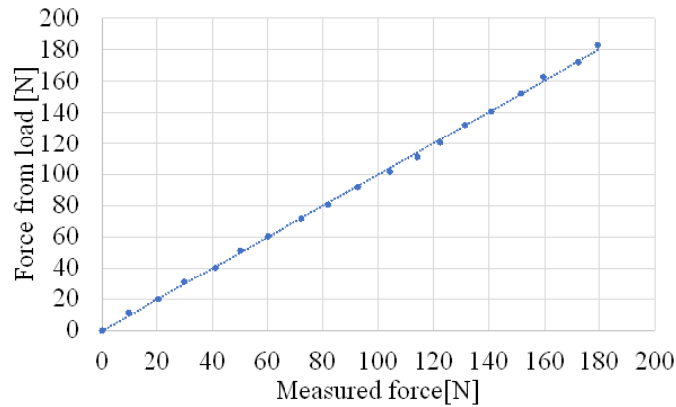


Fig. 3.13: 負荷重量と FSM から計測された力の関係

3.4.2 水平面とスロープのアドミタンス制御の効果検証

初めに水平面上でのアドミタンス制御の効果を検証する。検証実験では Fig. 3.14 のように重量 30kg の電動車いすに 60kg の被験者を乗せて水平面上を走行した。パワーアシストなしの状態での力を計測することで、アドミタンス制御のアシスト率 (M,D) を決めていく。実験結果を Fig.3.15 に示す。結果より介護者の力と速度は時間と共に定常状態に入り、おおよそ一定の値をとっている。介護者の力と車いすの速度の平均（6 秒から 12 秒までの間）はそれぞれで約 11N と 1m/s である。式 (3.5) より、定常状態での介護者の負担は $F = D \cdot V$ である。パワーアシスト率を 100·P[%] とすると、仮想ダンピング係数は $D=(1-P) \cdot F/V$ で計算される。アシスト率 P は通常使用者の身体能力によって決定されるが、ここでは 50% のアシスト率を想定して、 $P=0.5$ とした。このとき、ダンピング係数 D は $D=0.5 \cdot 11=5.5\text{N} \cdot \text{s/m}$ と算出される。仮想質量 M に関しては搭乗者と車いすの総量である 90kg の 50% である 45kg に設定した。次にアドミタンス制御を用いたパワーアシスト (M=45, D=5.5) をした状態で水平面上で同様に走行を行った。パワーアシストありの結果を Fig.3.16 に示す。パワーアシストありの場合は初期の力が 32.3N、定常状態時の力は約 5.5N であり、パワーアシストなしの約半分の力に軽減されていることが確認できた。



Fig. 3.14: 介護者が水平面上で車椅子を押している様子

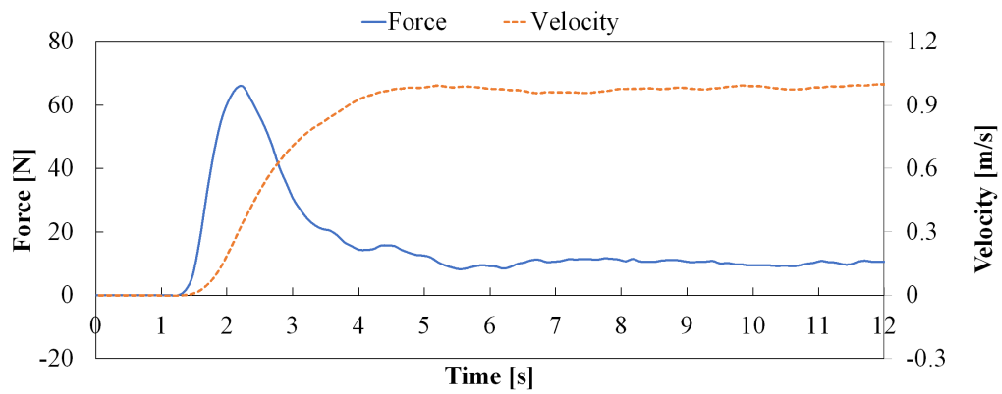


Fig. 3.15: 水平面上をパワーアシストなしの電動車いすで走行させた結果

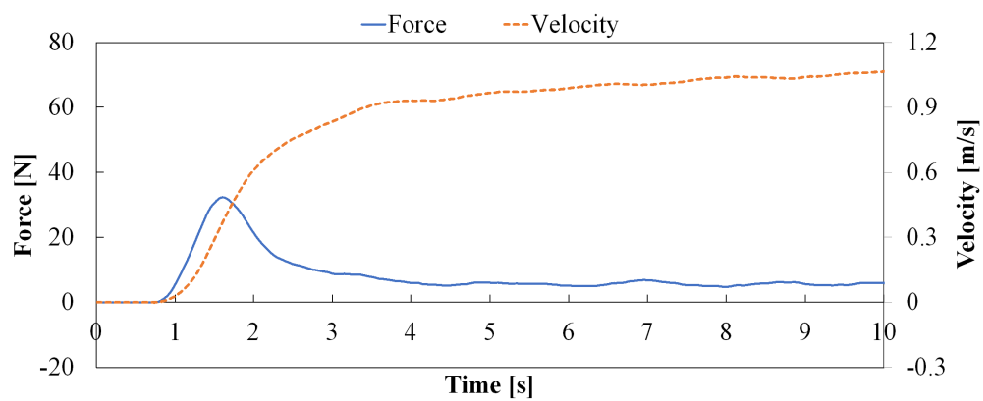


Fig. 3.16: 水平面上をパワーアシストあり ($M=45, D=5.5$) の電動車いすで走行させた結果

3.4.3 水平面からスロープに遷移する際の速度補正型アシスト手法のシミュレーション検証

次に水平面からスロープに遷移する際の速度補正の効果を実験より検証する。水平面上での走行結果のように介護者に力と速度は時間と共に一定値に収束する。本シミュレーションでは一般性を損なわないために、介護者が把持するハンドル速度 V_U が一定であると仮定し、これを達成するために必要な力 F を逆算する。シミュレーションの構成は Fig.3.17 に示しており、これは構築した速度補正型パワーアシストシステムの Fig.3.7 の逆モデルになっている。シミュレーションでは車いすモデルを用いて、ハンドル速度 V_U を後輪速度 V_R に変換し、車輪の回転速度 ω_W を算出している。ここで速度制御器の性能が十分に良いと仮定すると、車輪の回転速度は目標の回転速度と一致する ($\omega_W = \omega_T$)。傾斜角度と電動車いすの角速度はスロープに対する現在の位置 X_R に依存して変化するため、予め位置 X_R と θ , θ_U , $d\theta/dt$ の関係を求めておき、Slope Model にその関係を記述した。インバースアドミタンスモデル(つまりインピーダンスモデル)には介護者の一定の歩行速度を維持するために必要な後輪目標速度 V_D が入力されて介護者の力を逆算する。このシミュレーションでは速度補正 (Velocity compensation, 以下 VC とする) ありとなしの場合の介護者の力 F が計算され、比較により速度補正の効果を検証する。シミュレーションでは 3.4.3 のパワーアシストパラメータ $M=45$, $D=5.5$ を用いて、介護者の歩行速度も 1m/s であると仮定した。シミュレーション

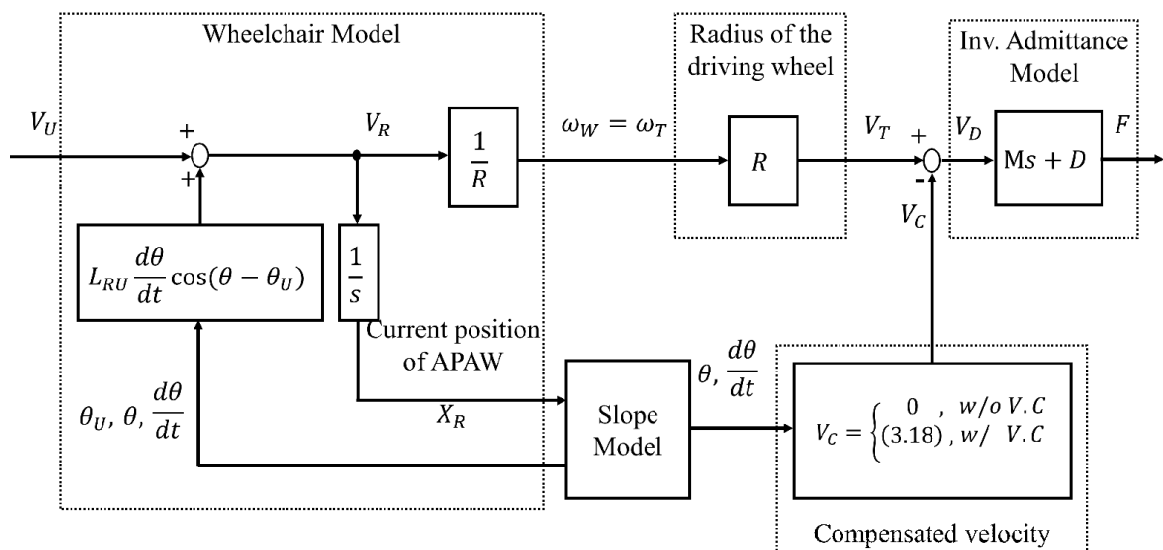


Fig. 3.17: シミュレーションで用いた力算出手法

で用いられたパラメータを Table 3.3 に示す。

Fig.3.18 にシミュレーションの結果を示した。Fig.3.18(a) の後輪速度 V_R は介護者の速度 $V_U = 1$ と式 (3.6) から計算されている。Fig.3.18(b) は Phase 1 から Phase 5 までの介護者の力を示している。結果より Phase 1 では介護者の速度は後輪速度と同じく 1m/s を示しており、必要な力は VC ありとなし両方で 5.5N である ($F = D \cdot V$)。Phase 2 では後輪速度 V_R は B 点で急激 1.18m/s まで加速しており、遷移区間の終わりの C 点では 1m/s に戻っている。このとき、式 (3.10) と式 (3.11) からの計算より、B 点と C 点での加速度はそれぞれ正の無限大と負の無限大になる。Fig.3.17 より、VC なしでは駆動輪の目標速度 $V_T (= V_R)$ はアドミタンスへの入力速度 V_D と等しい値となる。そのため、介護者の力 F は B 点で瞬間的に無限大の抵抗力が生じ、C 点では瞬間的に負の無限大の力が生じている。現実的には介護者はこのような大きな力を加えることは不可能である。また B 点と C 点間の定常的な力は 6.3N であり、Phase 1 の力 5.5N より大きい。一方で速度補正は Phase 2 の区間でずっと 5.5N を維持している。この理由としては目標速度 V_T に補正速度 V_C が加えられ、アドミタンスに入力される速度 V_D は介護者の速度 $V_U = 1\text{m/s}$ と等しい値をとっているためであると考えられる。

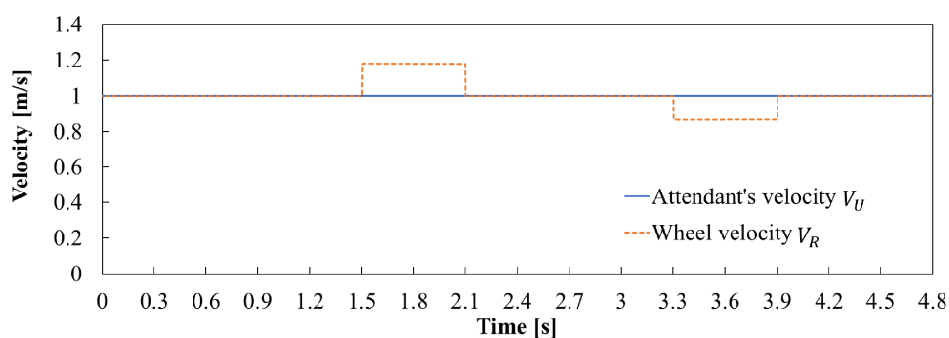
Phase 3 では VC に関わらず、後輪の速度 V_R と力 F は Phase 1 の水平面と同様な速度と力の値をとっている。Phase 4 では D 点で V_R は 0.8m/s にまで低下し、E 点では速度 1m/s に戻っている。Phase 2 とは反対に、式 (3.15) と式 (3.16) より D 点では負に無限大の加速度、E 点では正の無限大の加速度をとっている。そのため、

Table 3.3: シミュレーションで用いたパラメータ

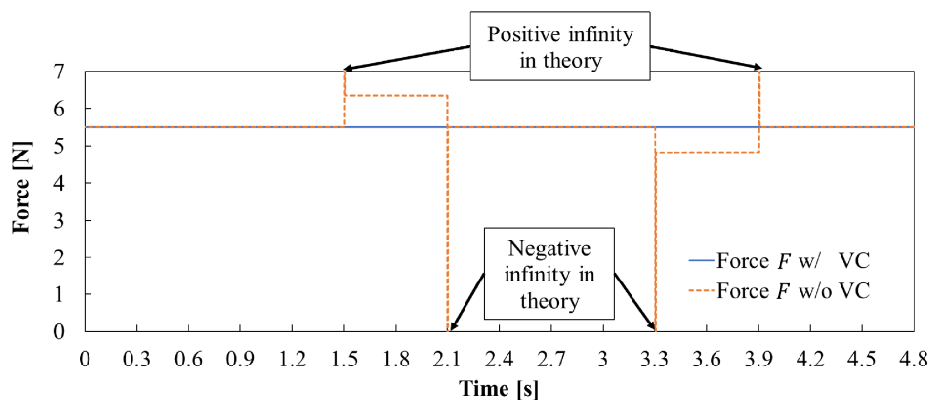
Height of the handle grip	$L_{HR} = 1.05\text{m}$
Length of the wheelbase	$L_{FR} = 0.6\text{m}$
Radius of the driving wheels	$R = 0.1\text{m}$
Inclination angle of the slope	$\theta_S = 5^\circ$
Virtual mass	$M = 45\text{kg}$
Virtual dumping coefficient	$D = 5.5\text{Ns/m}$
Distance of the horizontal plane before the slope	$X_1 = 1.5\text{m}$
Distance of the slope	$X_2 = 1.8\text{m}$
Distance of the summit horizontal plane	$X_3 = 1.5\text{m}$

VCなしでは介護者の力 F は D 点で負の無限大になり、その後 4.8N に減少し、E 点では正の無限大になっている。

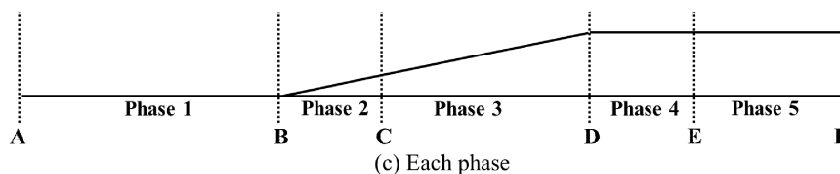
結論として、介護者が一定速度で車いすを水平面からスロープに走行させる際には、Phase2 では車輪速度が低下し、Phase 4 では車輪速度が増加する結果が得られた。もし、アドミタンス制御のパワーアシスト手法に速度補正を適応しなければ、Phase 2 と Phase4 では介護者の力が変動することが確認され、水平面上での操作感覚を維持できないことが結論付けられた。一方で提案した VC を用いることで、Phase 2 と Phase 4 での介護者の力変動が抑えられ、遷移区間においても水平面上での操作感覚を維持できることを示した。



(a) Wheel velocity and attendant's velocity



(b) Force with/without velocity compensation



(c) Each phase

Fig. 3.18: 速度と力の関係のシミュレーション結果

3.4.4 水平面からスロープに遷移する際の速度補正型アシスト手法の実験検証

シミュレーションの結果より VC なしでは Phase 2 と Phase 4 では介護者の力が急激に変化することが確認できた。しかし、現実には介護者はそのような瞬時の無限大の力を発揮することができない。ここでは実機を用いた検証実験より、介護者の力変化を確認し、提案した速度補正型のパワーアシスト手法の有効性を検証する。VC ありと VC なしはそれぞれ Fig.3.7 と Fig.3.3 のパワーアシストシステムを使用した。

検証実験では Fig. 3.5 のスロープ環境を想定して、介護者が水平面からスロープ、そして水平面に入るような経路とした。電動車いすには 60kg の搭乗者を載せており、アドミタンス制御のパラメータは水平面上でアシストと同様に $M=45$, $D=5.5$ とした。検証実験の様子は Fig. 3.19 にしており、最初の水平面、スロープ、最後の水平面はそれぞれ長さが約 1.5m, 1.8m, 1.5m である。また、スロープの勾配角度は 5° とした。検証実験では VC ありと VC なしの際の介護者の力、ハンドル速度を比較した。

VC なしと VC ありの実験結果をそれぞれ Fig. 3.22 と Fig. 3.21 に示す。図内の目標速度 V_D は介護者の力 F をアドミタンス制御に入れて計算された目標速度である。介護者の速度 V_U が V_D に近いほど、介護者の操作感覚が $D=5.5$, $M=45\text{kg}$ の



Fig. 3.19: スロープ上で介護者車いすを押して走行する様子

アドミタンスモデルに近いことを意味している。VCなしの実験結果より、 V_U はPhase 2で V_D より低くなり、介護者の力は最大30.9Nにまで増加しており、平均も18.6Nと水平面上の定常走行時の5.5Nより高い結果になっている。この結果よりPhase 2では介護者に走行の抵抗感が生じたことがわかる。Phase 3では介護者の力は徐々に低下していき、介護者の速度も目標速度 V_D に近づいている。Phase 3で力の減少が見られた理由としては、Phase 2での力増加が大きく、後輪の目標速度は約1.1m/sにまで上昇し、介護者の定常速度1.0m/sより大きいためであると考えられる。Phase 4に到達した後、D点では車いすの速度は増加したため、介護者の力は減少している。Phase 4での介護者の力の最小値は約-19.8Nであり、Phase 4の平均力は-15.6Nであった。この結果より、Phase 4では介護者は車いすを引っ張り必要があることがわかった。Phase 5では車いすが完全に平面に戻っている。シミュレーションとは違い介護者は無限大の力を入力することができないためPhase 2とPhase 4では車いすの速度には変化が見られた。これにより、Phase 2では介護者に抵抗力Phase 4では引っ張られるような操作感覚の変化が確認された。

VCありの実験結果はFig. 3.21に示している。VCなしの結果と比較すると介護者の速度 V_U はほぼ V_D に一致しており、介護者の操作感覚の変化がないことがわかる。遷移区間のPhase 2における介護者の最大の力は約10.6Nであり、平均の力は7.7Nであった。これはVCなしの結果（最大30.9N，平均18.6N）よりも大きく改善され、水平面走行時の負荷である5.5Nに近い結果になった。Phase 3では平均の力は約6.8Nであり、これは水平面走行時の5.5Nより大きい結果になっている。また、介護者の速度 V_U も目標速度 V_D より小さい結果になっている。Phase 4

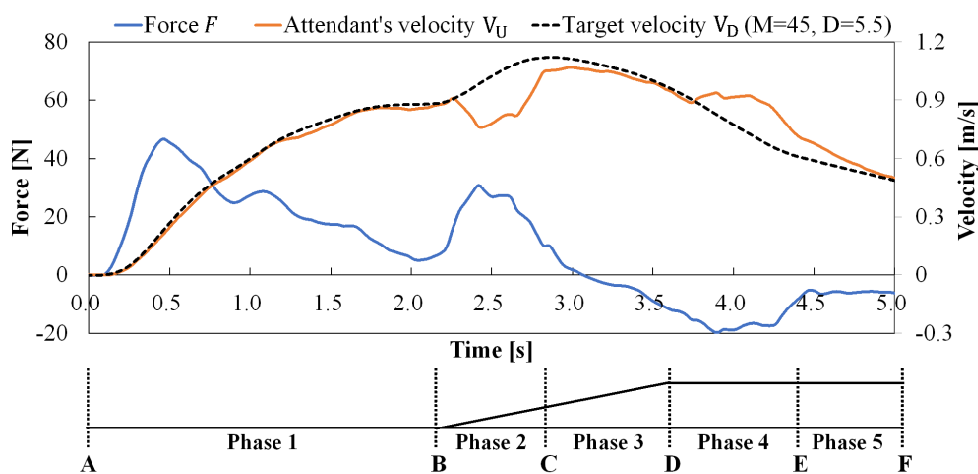


Fig. 3.20: スロープでのパワーアシスト結果 (速度補正なし)

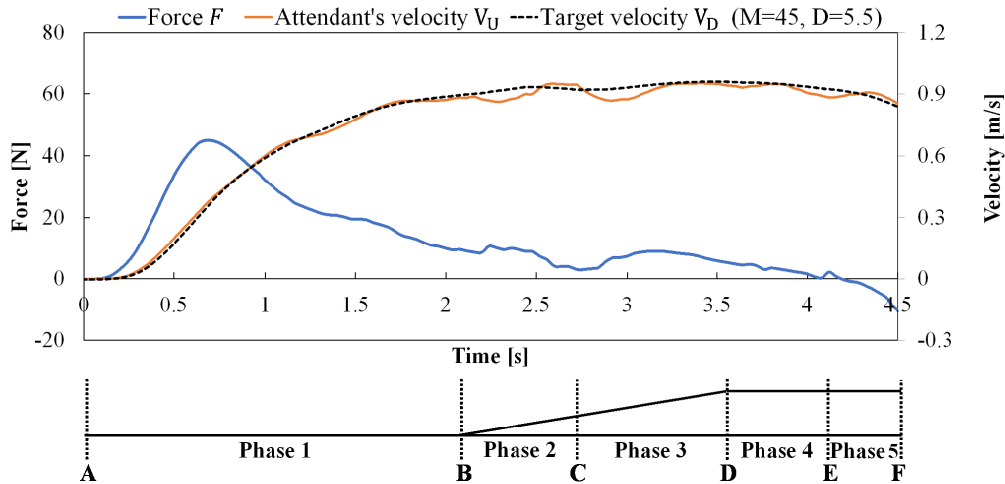


Fig. 3.21: スロープでのパワーアシスト結果 (速度補正あり)

では最小の力は約-0.8N，平均の力は約2.2Nであった．この結果も VCなしの場合 (最小-19.8N，平均-15.6N) よりも改善されている．そして，Phase 5ではスロープを乗り越えて水平面に到達している．Phase 5では力の減少が見られるが，これは直ぐに停止動作に入っているためである．全体として，介護者の速度 V_U は目標速度 V_D と少し誤差が生じていたが，これは VCを用いても補正が困難であることを示している．この原因として，後輪の目標速度 V_R は Fig. 3.18 のシミュレーションのように急激に変化しており，速度制御器で完全達成できないからであると考えられる．

結論として，VCを用いることで介護者の速度はアドミタンスモデルの目標速度とほぼ一致し，介護者の力変化もほぼ抑制された．この結果から提案した速度補正手法を用いることで，水平面のパワーアシスト感覚を遷移区間でも維持できると言える．

3.4.5 急勾配における拡張アドミタンス制御手法の検証

これまでは水平面からスロープのパワーアシスト手法を提案したが，スロープの勾配は5度以下の建築基準で推奨されているものであった．しかし，日常生活では5度以上のスロープ勾配もよく見られるため，ここでは提案した拡張アドミタンス制御手法を検証する．

検診車で使用されている17度のスロープ上でのアシスト効果を検証するために，Fig. 3.22のような環境で実験を行った．まずはパワーアシストをしないでスロープ

を上るときの介護者にかかる負荷を計測し、後に行うアシスト実験の基準とする。実験では63kgの搭乗者を車いすに乗せて、Fig. 3.22の環境で20代男性に車いすを押しもらった。Fig. 3.23に実験風景を示す。アシストがない場合の実験結果をFig. 3.24示す。結果よりスロープ上では最大で約282Nほどの負荷が見られ、スロープの途中での走行速度は約0.3m/sであった。車いすと搭乗者の総重量は97kgであるため、式(3.23)より最大アシスト率 $\alpha = 0.54$ と計算されるため、54%の軽減を目標とした。実験結果をFig. 3.25に示す。結果よりスロープ区間では最大で126Nの力が計測された。アシスト率は約55.3%となりほぼ目標通りのアシスト性能が得られた。

一方でスロープの下りでは、車いすを支える形で介護者が後ろ向きに降りていくようにスロープを下る実験を行った。アシストなしの結果をFig. 3.26に示す。スロープの下りでは最大271Nほどの負荷が観測された。下りのアシストでは上り

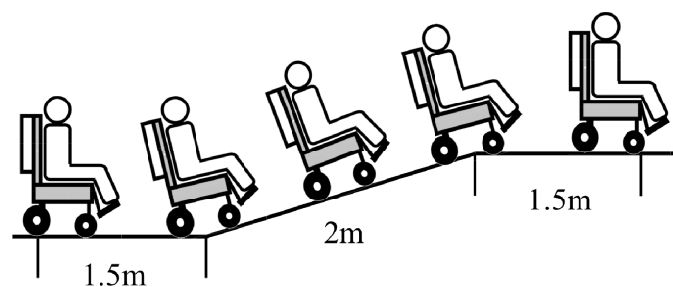


Fig. 3.22: 走行するスロープの構成



Fig. 3.23: 急勾配スロープでの実験風景

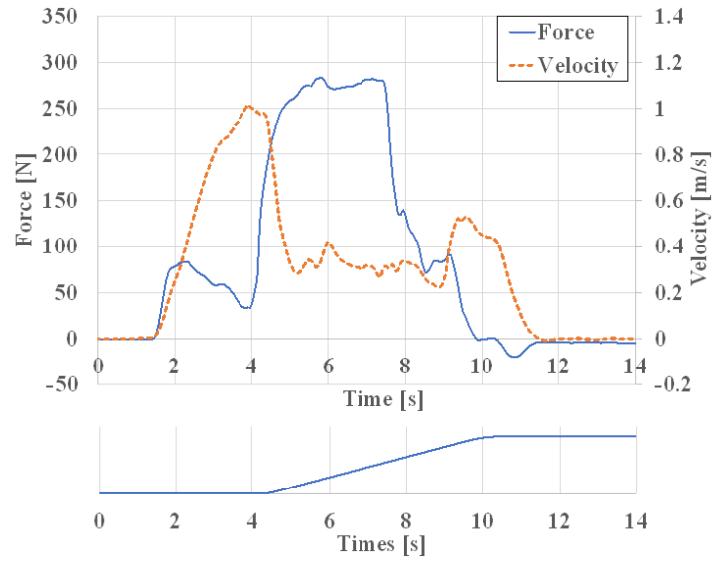


Fig. 3.24: パワーアシストなしで17度勾配の Slope を走行した結果(上り)

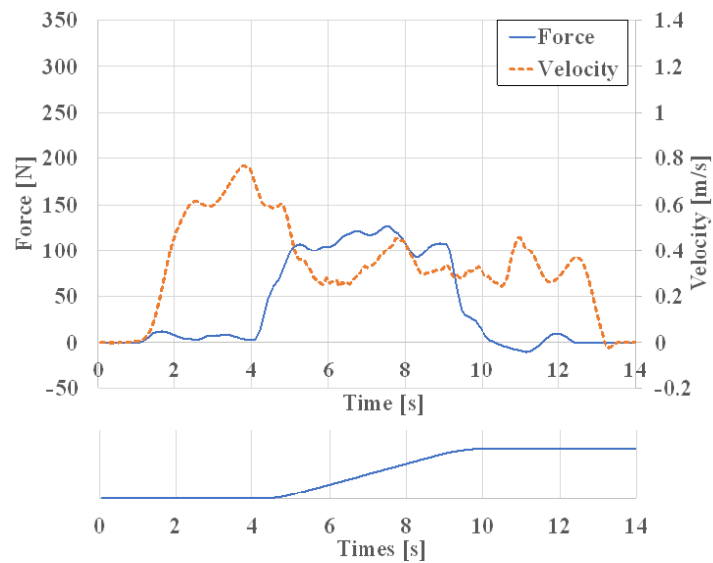


Fig. 3.25: パワーアシストありで17度勾配の Slope を走行した結果(上り)

と同様にアシスト率 a を 0.54 として実験を行った。そして、得られた結果を Fig. 3.27 に示し、Slope 途中では平均 116N ほどの負荷が観測された。よって、下り坂でもアシスト率は約 57.2% となりほぼ目標通りのアシスト結果が得られ、提案手法の有効性が確認された。

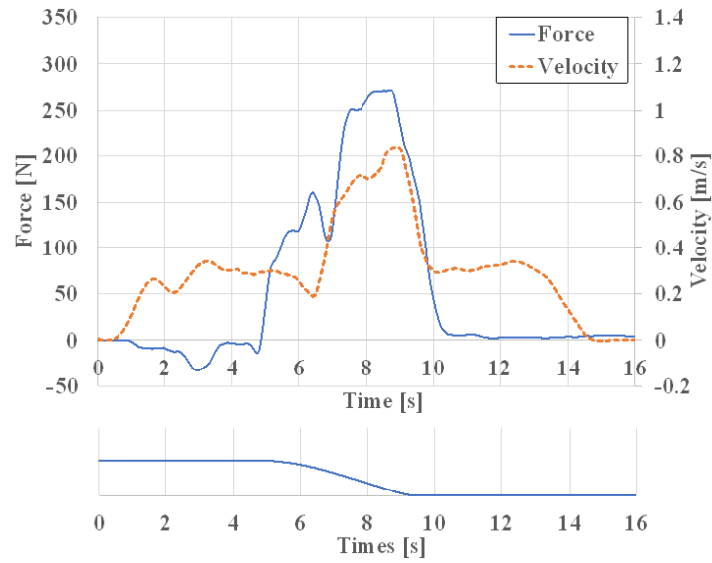


Fig. 3.26: パワーアシストなしで17度勾配の Slope を走行した結果(下り)

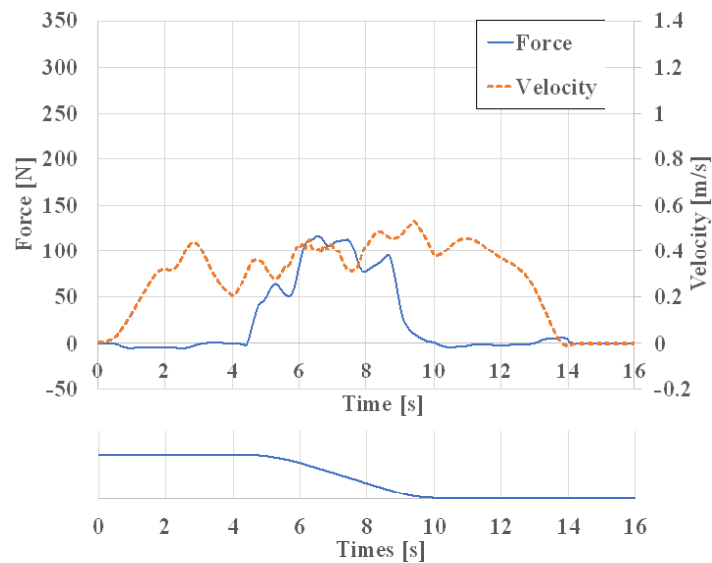


Fig. 3.27: パワーアシストありで17度勾配の Slope を走行した結果(下り)

3.5 まとめ

本章では水平面や Slope 上で走行する際の基本的なパワーアシスト手法としてアドミタンスモデルを用いたパワーアシスト手法を導出した。アドミタンス制御は定常負荷と初期負荷をそれぞれ軽減でき、また Slope を走行する際も水平面と同じ操作感覚を実現できることを説明した。次に水平面から Slope に

車いすが移動する際に水平面とスロープの遷移区間では2平面上にあるため、速度変動が起きることについて初めて着目した。遷移区間での速度変動を明らかにするため、モデルより関係式を導出して、シミュレーションより速度変動の影響を明らかにした。また、検証実験では提案した速度補正型のパワーアシスト手法を用いることで速度変動による介護者の操作感覚の変化を抑制して、遷移区間走行時にも水平面と同様な走行感覚を実現できることを示した。ハンドルの位置は搭乗者の頭部に近く、頭部には加速度を検知できる感覚器官が存在するため、本提案手法を用いることにより搭乗者の乗り心地向上も期待できる [89]。

そして、最後にパワーアシスト手法を高負荷がかかる急勾配スロープにも対応できるように拡張アドミッタンス制御と最大アシスト率の計算法を提案した。拡張アドミッタンス制御を用いることで目標のパワーアシスト率で制御できることを検証実験では示した。本章で提案したパワーアシスト手法は車いすで検証されたが、物流現場や工場での電動台車や搬送機にも応用することができ、移動の自動化が困難な状況では有効である。

第4章 センサレスパワーアシスト 手法

前章で導入したアドミッタンス制御や拡張アドミッタンス制御は介護者の力情報を用いて目標速度を算出するため、前提として力覚センサを車いすに取り付ける必要がある。しかし、力覚センサは高価で簡単に後付けできない等の問題がある。そこで、本研究では比較的安価な力計測機構を開発し、介護型電動アシスト車いすに搭載した。力覚センサと比較して力計測機構は経済的な負担は軽減されたが、小型化などの問題も存在する。そこで、本章では力覚センサや力計測機構を使用せずに、モータのオブザーバと車いすの運動モデルを用いて介護者の力を推定する手法を提案する。従来では外乱オブザーバを用いて反力推定を行っている研究が存在するが、速度センサが必要であり完全なセンサレス制御とは言えない。本研究はエンコーダを利用せずに、速度も推定して力推定に利用する。また、4.2節ではオブザーバを用いて搭乗者と車いすを含む総質量を推定できる手法を提案する。総質量を自動で推定することで、拡張アドミッタンス制御を用いる際のスロープで最大の重力アシストが自動的に計算できるようになる。

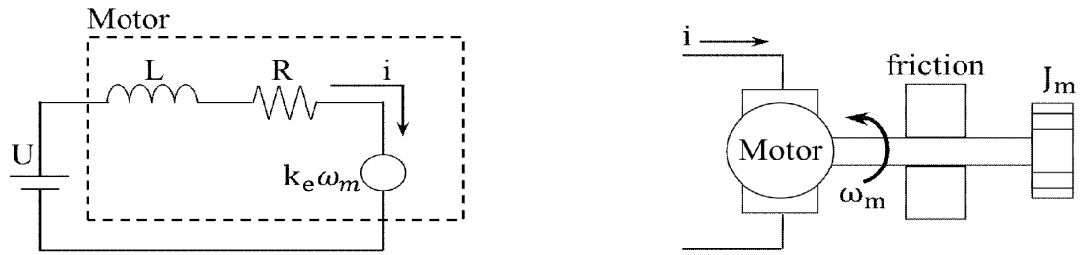
4.1 センサレス力推定

4.1.1 モータモデルと速度推定

本研究ではまず1自由度の力推定と速度推定を考える。駆動用のモータはギア付きのDCモータを想定する。車いす駆動用のモータにはエンコーダが組み込まれておらず、速度の制御が困難なものがあるため、まずはここではモータモデルに基づいた速度オブザーバを構築し、モータの回転速度を推定する手法を提案する。

DCモータのモデルをFig.4.1に示す。Fig.4.1(a)のモータモデルでは以下のような関係式が成り立つ。

$$U = L \cdot \frac{di}{dt} + R \cdot i + K_e \cdot \omega_m \quad (4.1)$$



(a) DC モータの電氣的モデル

(b) DC モータの力学的モデル

Fig. 4.1: モータモデル

ここで、 U はモータの端子間電圧、 i はモータに流れる電流、 L はインダクタンス、 R は電機子抵抗、 K_e は逆起電力定数、 ω_m はモータの回転速度である。ここで使用する高トルクモータではインダクタンス L が非常に小さいため、ここではその影響を無視すると式 (4.2) のように式変形でき、モータの回転速度 ω_m は電流値と電圧値より推定できる。

$$\omega_m = \frac{U - Ri}{K_e} \quad (4.2)$$

4.1.2 センサレス力推定手法

外乱オブザーバは Fig.4.1(b) のモータモデルを利用して、モータにかかる外力を推定する手法である [90]。Fig.4.1(b) のモデルは以下のように定式化できる。

$$T_m = K_\tau i = J_m \frac{d\omega_m}{dt} + T_x \quad (4.3)$$

ここで、 T_m はモータの発生トルク、 K_τ はモータのトルク係数、 J_m は慣性モーメント、 T_x は負荷トルクである。式 (4.3) において、負荷トルク T_x は以下のようなトルク成分が含まれる。

$$T_x = D_m \omega_m + T_f + T_i + T_L \quad (4.4)$$

ここで、 D_m は粘性摩擦係数、 T_f は静摩擦トルク、 T_i は内部干渉トルク、 T_L は外部からの反作用トルクである。 T_i の内部干渉トルクはコリオリ力や遠心力が含まれるが、電動車いすのような場合は無視することができる。式 (4.3) と式 (4.4) を用

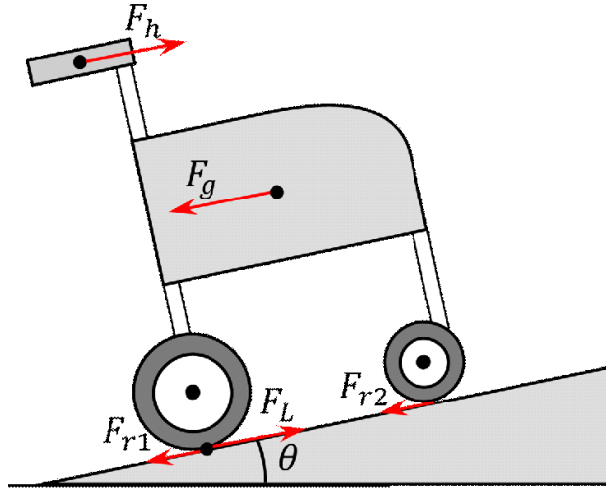


Fig. 4.2: スロープで走行する車いすモデル

いることで以下のように外部トルクを推定することができる。

$$T_L = K_\tau i - (J_m \frac{d\omega_m}{dt} + D_m \omega_m + T_f) \quad (4.5)$$

次に Fig.4.2 のような電動車いすがスロープを上るような運動モデルを構築した。電動車いすに働く全体の合力 F は介護者がハンドルに加えた力 F_h 、モータの駆動力 F_L から車輪で生じる摩擦力 F_r 、傾斜による重力 F_g を引いた力である。関係式を以下の式 (4.6) に示す。

$$F = mr \frac{d\omega}{dt} = F_h + F_L - F_r - F_g \quad (4.6)$$

ここで m は被介護者と電動車いすを含んだ総質量、 r はインホイールモータの半径である。式 (4.6) を介護者の力を求める式 (4.7) に変形させる。

$$F_h = mr \frac{d\omega}{dt} + F_r + F_g - F_L \quad (4.7)$$

次に式 (4.7) 内の F_r は車いすに働く摩擦力 F_r は転がり摩擦と粘性摩擦と仮定して、式 (4.8) のような近似式を用いた。

$$F_r = c \cdot m \cdot g \cdot \cos\theta + d \cdot r \cdot \omega \quad (4.8)$$

ここで c は転がり摩擦係数、 d は粘性摩擦係数、 θ は電動車いすの傾斜角度である。これらのパラメータは予備実験より値を同定して、Table4.1 に示している。また、式 (4.6) におけるモータの駆動力 F_L は式 (4.5) より、以下のように表せる。

$$F_L = \frac{G}{r} \cdot T_L = \frac{G}{r} (K_\tau i - J_m \frac{d\omega_m}{dt} - D_m \omega_m - T_f) \quad (4.9)$$

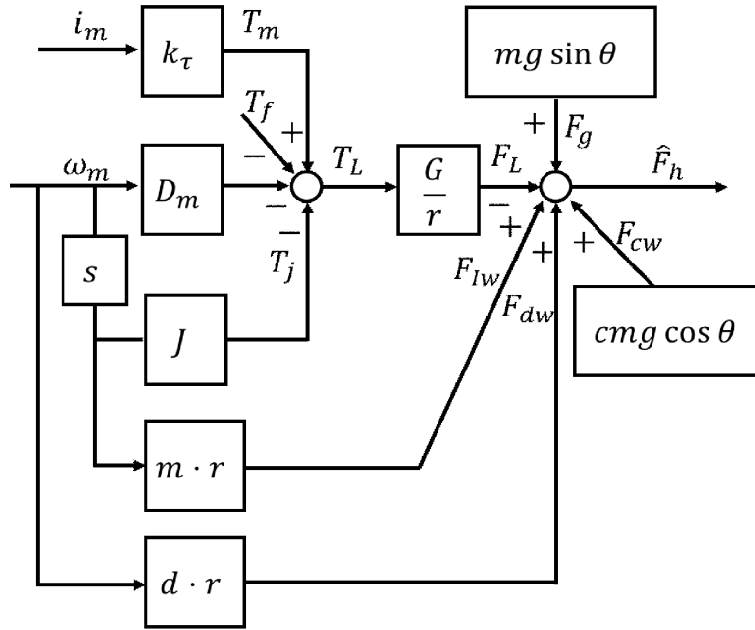


Fig. 4.3: センサレス力推定手法

ここで、 G はモータに接続されている減速機構のギア比を示している。次に重力 F_g を以下のように表す。

$$F_g = m \cdot g \cdot \sin\theta \quad (4.10)$$

そして、式(4.7)に式(4.8)、式(4.9)、式(4.10)を代入すると以下のように介護者の力の推定値 \hat{F}_h を導出することができる。

$$\begin{aligned} \hat{F}_h = & mr \frac{d\omega}{dt} + cmg \cos\theta + dr\omega \\ & - \frac{G}{r} (K_\tau i - J_m \frac{d\omega_m}{dt} - D_m \omega_m - T_f) + mgsin\theta \end{aligned} \quad (4.11)$$

このとき式(4.11)内のパラメータは Table.4.1 のように同定してあるが、総質量 m は搭乗者の体重の大きさによるため、 m は事前に使用者が設定しているとする。以上で、力覚センサを用いずに後付けの電動駆動ユニットから介護者の押す力を推定することが可能になった。そして、本4.1節で構築したセンサレス力推定手法の制御ブロックを Fig.4.3 に示す。

Fig.4.3 のセンサレス力推定手法を利用して介護者の力を推定しながらアドミタンス制御でパワーアシストを行うセンサレスパワーアシスト手法の制御ブロックを Fig.4.4 に示す。制御する電動車いすはエンコーダなどの速度計測センサを搭載

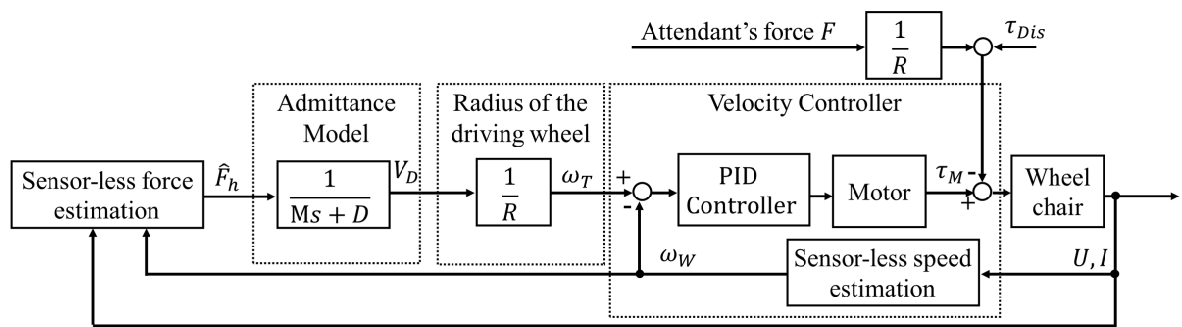


Fig. 4.4: センサレスパワーアシスト手法

しておらず，速度オブザーバからモータの回転速度を推定して速度制御と力推定に用いている。

4.2 センサレスパワーアシストの実験検証

4.2.1 検証機の後付け電動駆動ユニット

本4.1.3節では電動車いすの実機を用いたセンサレスパワーアシスト手法の検証を行う。初めに使用する電動車いすについて述べる。使用する実機として Fig. 4.5 に示すような手動車いすに後付け可能な電動駆動ユニットを用いた。本駆動ユニットは Fig.4.6 のように手動車いすのティッピングレバーに固定することで、多くの市販されている手動車いすに容易に取り付けが可能になっている。

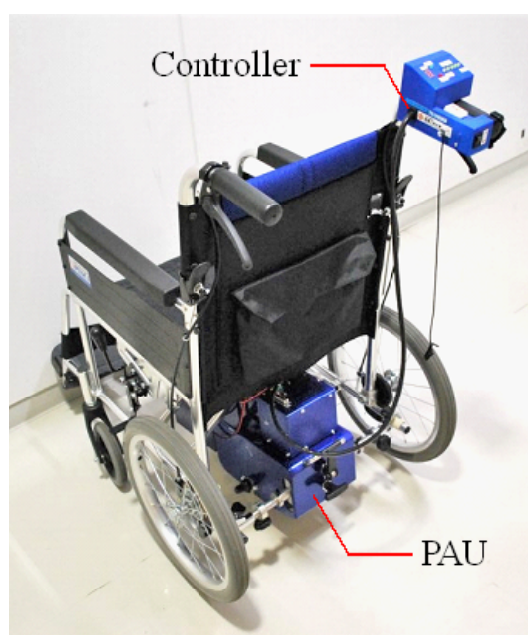


Fig. 4.5: 車いすと後付けの電動駆動ユニット

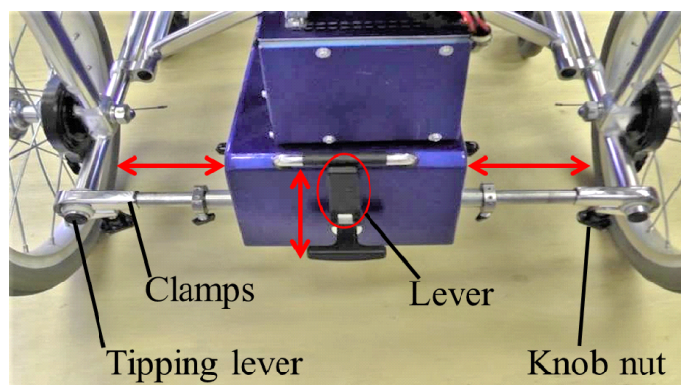


Fig. 4.6: 駆動ユニットの取り付け

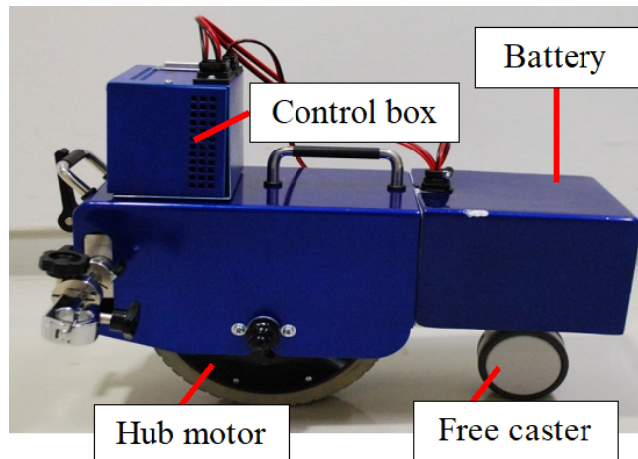


Fig. 4.7: 開発した電動駆動ユニット (PAU) の構成

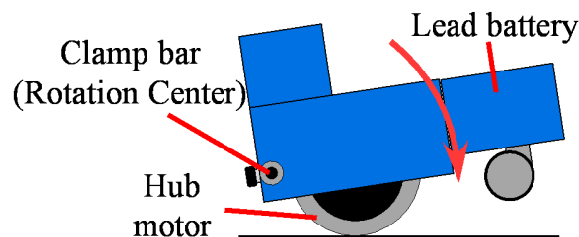


Fig. 4.8: 駆動ユニットの圧着機構

本駆動ユニットは簡易化と軽量化のために1つの駆動モータを用いており、直進方向のみアシストすることができる。駆動ユニットの構成はFig. 4.7のように制御ボックス、バッテリー、インホイールモータ、自在キャスタから構成されている。走行時はFig. 4.8のように前輪は空中に浮き、クランプバーを支点として鉛バッテリーの重量により駆動輪を地面に圧着して走るため空転を防ぐ仕組みになっている。

制御ではFig. 3.3のパワーアシストシステムとセンサレス速度推定と力推定を実装する必要があるため、実装用のマイコン、傾斜角度を計測するジャイロと加速度計、モータ駆動用のモータドライバを用いた。それぞれの詳細をTable 4.1に示す。

4.2.2 水平面における実験検証

次に駆動ユニットを取り付けた電動車いすで4.1節で提案したセンサレスパワーアシスト手法の検証実験を行った。ここで、センサレス速度推定及び力推定に用

Table 4.1: 駆動ユニットのハード構成

Microcontroller	SAM3X8E (Microchip Technology Inc.)
Gyrosensor	L3G4200D (MicroStone Co., Ltd.)
Accelerometer	ADXL362 (MicroStone Co., Ltd.)
Battery	24V 9Ah Lead-acid battery (Kung Long Batteries Industrial Co., Ltd.)
Motor driver	Advanced Motor Driver type- S (Zuco LLC.)

Table 4.1: Identified parameters

Parameter	Value
$R[\Omega]$	0.92
$K_e[V \cdot s/rad]$	1.2
$K_\tau[N \cdot m/A]$	1.03
$J_m[kg \cdot m^2]$	0.05
$D_m[N \cdot m/(rad/s)]$	0.027
$T_f[N \cdot m]$	0.24
c	0.16
$d[N \cdot s]$	0.313

いるパラメータは予備実験より同定して Table4.1 にまとめた。

駆動ユニットは検証用に Fig.4.9 のような力覚センサ、加速度センサ、ジャイロセンサを搭載している。力覚センサは力推定手法を評価するためにハンドル部分に装着しており制御には使用していない。また、ジャイロセンサと加速度センサは車いすの傾斜角度の推定に使用している。

検証実験では車いすには 50kg の重りを載せて、初めにパワーアシストなしの状態では介護者に車いすを水平面上で 20m ほど直進させた。パワーアシストの実験結

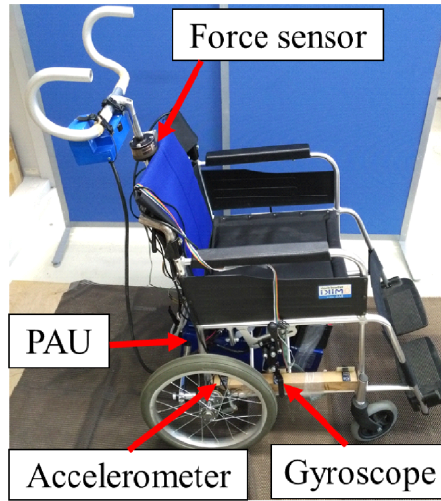


Fig. 4.9: 車いすに装着されたセンサの位置

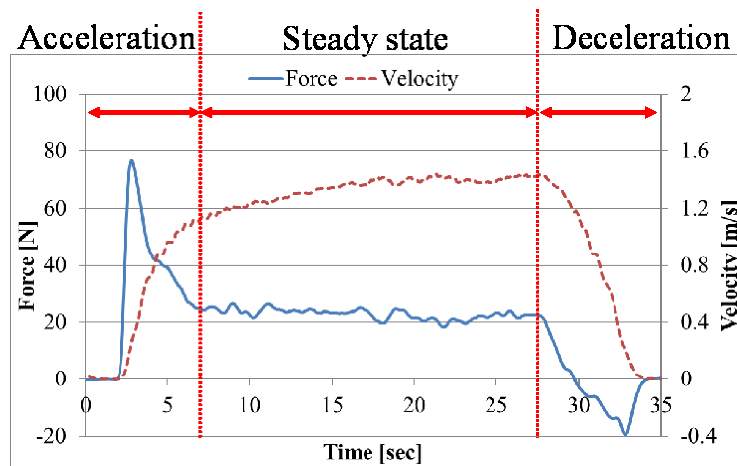
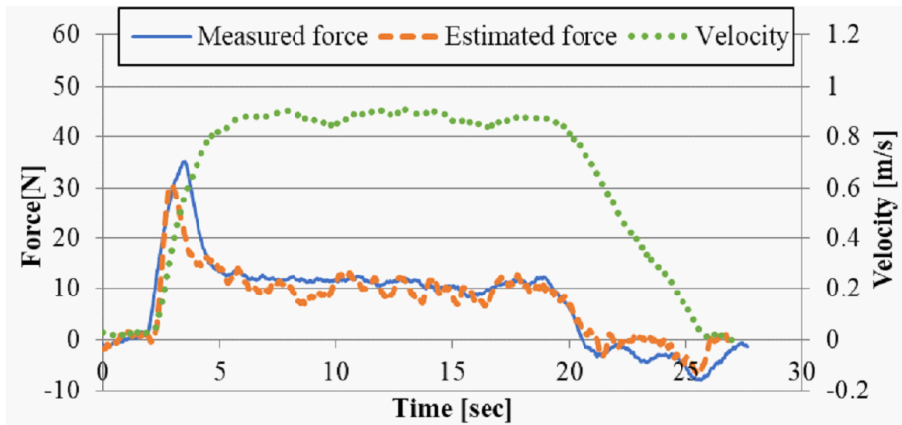


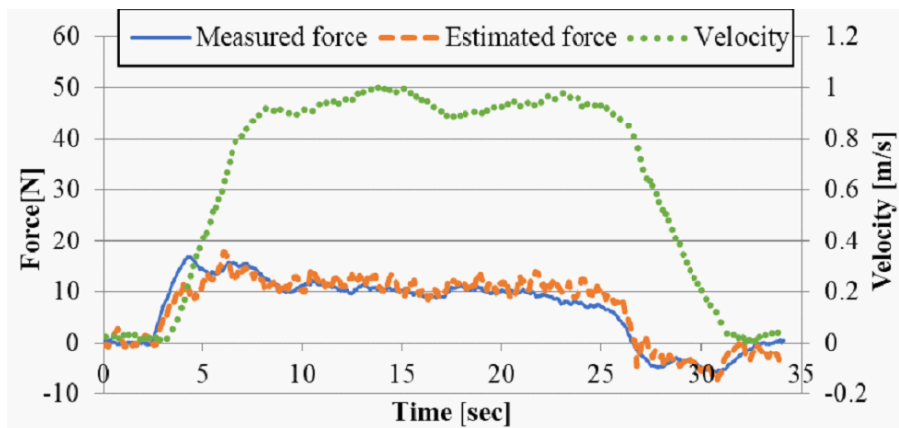
Fig. 4.10: 水平面上での車いす介護負担 (アシストなし)

果を Fig.4.10 に示す. この結果をもとにアドミッタンスパラメータ D と M を決めていく. Fig.4.10 のグラフは走行初期・停止時と, 定常時の2部分に分けて考えていく. 式 (3.5) より定常状態時に $F = DV$ が成り立つ. Fig.4.10 では定常速度 V は約 1m/s, 定常負荷 F が約 25N であるため, D は 25 とした. また, 車いす上の重りは 50kg であるため, アシストなしの時では $M = 50\text{kg}$, $D = 25$ としたアドミッタンスモデルで記述できる. ここで定常負荷の 50% の軽減を考えると, $F = DV$ より D はアシストなしの場合の 50% の 12.5 に設定し, M は 50kg のままとした. このときのアシスト結果を Fig.4.11(a) に示す. Fig.4.11(a) より定常状態での走行速



(a)

パワーアシスト結果 (D=12.5, M=50)



(b)

パワーアシスト結果 (D=12.5, M=25)

Fig. 4.11: 水平面上でのパワーアシスト結果

度は約 0.9m/s であり，定常負荷は約 50%の 12N にまで軽減される結果が確認できた．またこの時の初期負荷は約 35N で，全体の力推定結果は力覚センサの計測値と比較して相関係数が 0.92 なり，強い正の相関が得られた．

次に走行初期の負荷のアシストを考える．初期の負荷はアドミッタンス制御の仮想質量 $M(= \tau/D)$ を変更して負荷軽減を図る．約 50%の負担軽減を想定して，仮想質量 $M = 25\text{kg}$ とした．また D は変更せず 12.5Ns としている．Fig.4.11(b) にアシスト結果を示す．グラフより始動時の最大負荷は約 18N で， $M = 50\text{kg}$ の時より負荷が半分程度軽減されていることが確認できる．また，定常負荷は約 11N に軽減されており，力推定と計測された力の相関係数は 0.93 で強い正の相関が得られた．

以上より，平面上でのセンサレス力推定は 0.9 以上強い正の相関が得られ，アドミッタンス制御ではダンピング係数 D と仮想質量 M を適切に調節することで，定

常負荷と初期負荷は事前に定めた 50%の軽減を達成することが結果より確認され、手法の有効性が検証された。

4.2.3 スロープにおける実験検証

次にスロープ上におけるパワーアシスト走行の検証実験について述べる。ここではバリアフリー法で定められている 5 度の傾斜勾配のスロープを用いる。

はじめにアシストなしでスロープを上る際の負荷と走行速度を計測して、後にアシストありの場合と比較を行う。走行環境は最初に 2m の水平面を走行して、スロープに上がり 2m 走行して、上り切って水平面にたどり着くようになっている。車いすには 50kg の重りを載せて実験を行った。アシストなしの実験結果を Fig.4.12 に示す。車いすは 6 秒あたりでスロープに入り、同時に重力負荷の急増加が見られ、走行速度が低下した。スロープ走行中では速度の勢いが低下するとともに、負荷の増加が見られた。そして、スロープ上での最大負荷は約 108N で、平均速度は約 0.54m/s であった。

Fig.4.12 のアシストなしの結果を踏まえて、次にアドミッタンス制御によるアシストとセンサレス力推定手法の有効性を確認する。スロープ上での走行は水平面と比べ転落など危険があるため、車輪の加減速を抑えるためにアドミッタンス制御の仮想質量 $M = 50\text{kg}$ 、仮想ダンピング係数 $D = 25\text{Ns}$ とした。スロープ上でのアシスト結果を Fig.4.13 に示す。

Fig.4.13 の結果から、スロープに突入した 6.3 秒あたりでは重力負荷による力の上昇は見られず、スロープ上での平均負荷も約 14N に軽減されていた。そのため、アドミッタンス制御によって介護者はアシストされ、スロープ上でも水平面と同様な操作負担を実現できることを示すことができた。一方で、センサレス力推定値も力センサの計測値とほぼ一致しており、相関係数は 0.95 と強い相関が得られた。

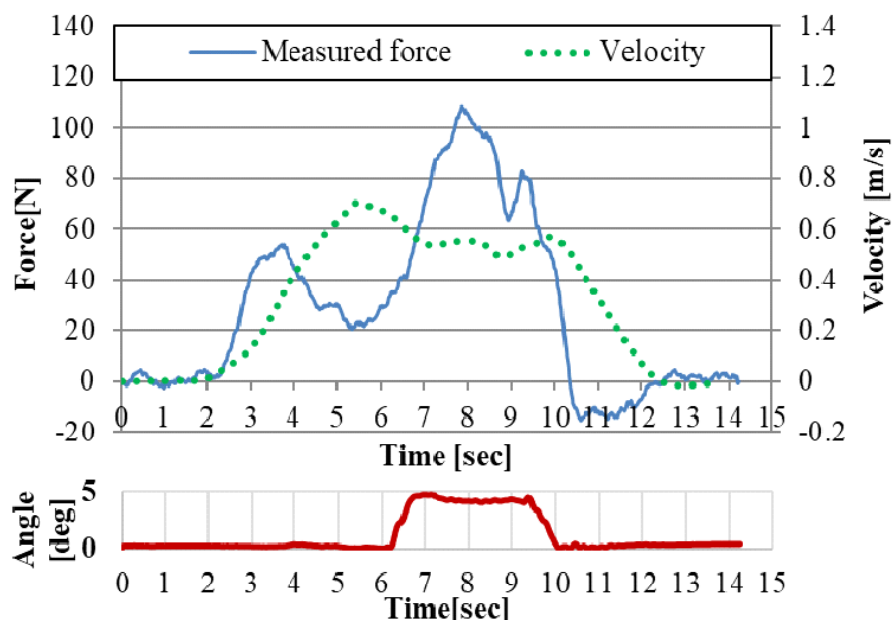


Fig. 4.12: スロープでの車いす介助負担 (アシストなし)

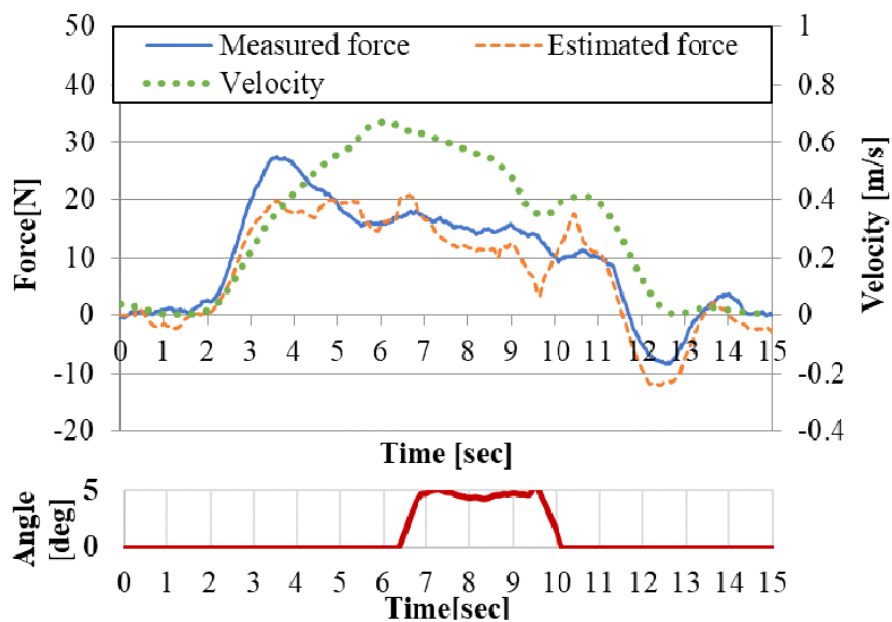


Fig. 4.13: スロープでのパワーアシスト結果

4.3 総質量の推定手法と検証

4.3.1 総質量推定手法

先述のように急勾配のスロープではアドミタンス制御の速度制御が完全には実現されないため暴走の危険があり、また下り坂を後退して降りる際も車いすを引っ張る必要がある。そこで、急勾配スロープに対応した拡張アドミッタンス制御を提案した。提案する拡張アドミッタンス制御はアシスト率 α と総質量 m を変更することで、スロープでの重力負荷を調節できる。平成 29 年度の国民健康・栄養調査 [91] によると、20 歳以上の成人男性の体重平均は 67kg であり、標準偏差 σ は 11.5kg である。 $\pm 2\sigma$ の 95% の使用者をカバーすることを考えると、搭乗者の体重は 44kg から 90kg の幅で変化する。そのため、アシスト率を一定にすると、重い搭乗者を載せる場合にアシスト力が不足することが懸念される。また、アシスト率が大きすぎると、速度制御が実現できない問題もある。そのため、搭乗者ごとの体重に合わせてアシスト率 α を変更する必要がある。そこで、本研究ではモータの外乱オブザーバ [90] を用いて搭乗者と車いすの総質量 m を自動で推定し、スロープでアクチュエータの駆動能力を超えない範囲で最大のアシスト率 α を算出する手法を提案する。この手法を用いることで、検診車で検診する際に介護施設からスロープまでの水平面の走行でアシスト率 α を更新し、スロープでは拡張アドミッタンス制御を用いて最大のアシスト率で介護者をアシストすることが可能になる。

総質量 m を推定するために、Fig. 4.14 のような電動車いすの運動モデルを考える。

車いすに働く全体の合力を F 、電動車いすと搭乗者の総質量を m 、車いすの加速度を a 、力計測機構から計測された介護者の力を F_h 、モータの外乱オブザーバから推定した力を F_L 、車輪の摩擦力を $F_r(\theta)(=F_{r1} + F_{r2})$ 、重力による負荷を $F_g(\theta)$ とすると以下の式 (4.12) 式が得られる。

$$F = ma = F_h + F_L - F_r(\theta) - F_g(\theta) \quad (4.12)$$

ここで、 a は車いすの加速度であり、 a は左右の駆動輪であるインホイールモータに内蔵されているエンコーダから算出している。外乱オブザーバはモータに加わる外力をモータのモデルから推定する手法であり、電動車いすのインホイールモー

タに加わる外力の推定値 F_L の関係式を式 (4.13) に示す.

$$F_L = \frac{g_r}{r} \cdot (K_\tau \cdot i - J_m \frac{d\omega_m}{dt} - D_m \omega_m) \quad (4.13)$$

ここで, g_r はギア比, r はインホイールモータの半径, K_τ はモータのトルク定数, i はモータに流れる電流, J_m はインホイールモータの慣性モーメント, D_m はインホイールモータの粘性摩擦係数, ω_m は回転速度である.

電動車いすに働く摩擦力 $F_r(\theta)$ はころがり摩擦と粘性摩擦と仮定し, その近似式を式 (4.14) に示す.

$$F_r(\theta) = c \cdot mg \cdot \cos\theta + d \cdot r \cdot \omega \quad (4.14)$$

ここで, c は車いすのころがり摩擦係数, d は車いすの粘性摩擦係数である. また, 重力による負荷 $F_g(\theta)$ の関係式を式 (4.15) に示す.

$$F_g(\theta) = mg \sin\theta \quad (4.15)$$

総質量 m の推定は水平面の走行で推定することを目指しているため, ここでは $\theta = 0$ とする. 式 (4.12), 式 (4.14), 式 (4.15) を用いて, 以下の式 (4.16) に式変形し, 総質量を推定する.

$$m = \frac{F_h + F_L - dr\omega}{a + cg} \quad (4.16)$$

ここで, 段差などの瞬間的な外乱で推定質量が異常値を取らないように, 推定質量の範囲として 70kg から 150kg に推定質量を制限する. この範囲を超えた場合は

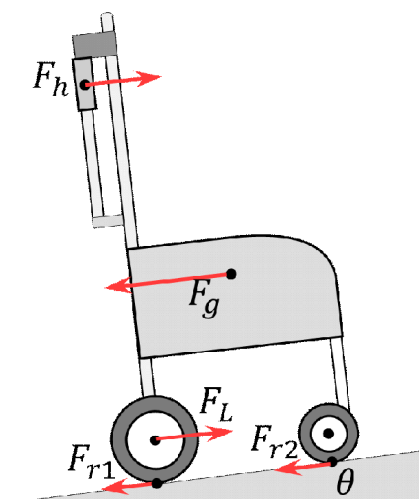


Fig. 4.14: スロープを走行する車いすモデル

異常値として除去する。そして総質量の推定値は平均した \bar{m} を用いる。この総質量の推定手法を用いることで、事前に搭乗者と車いすの重量を計測することなく、前章で提案した拡張アドミッタンス制御における最大アシスト率を自動的に計算できるようになるため、ユーザが急勾配スロープを走行する際の安全性を確保できる。

4.3.2 実験検証

本研究では介護者が水平面を走行する間に車いすと搭乗者の総質量を推定し、最大のアシスト率になるように α を更新して、拡張アドミッタンス制御を用いてスロープで介護者をアシストすることを目指している。まずは質量 m の推定を実験検証する。実験では搭乗者の体重が63kg, 74kg, 90kgの20代男性3名として、搭乗者が乗っている車いすを3mほどアシストありで介護者に押しもらった。走行時のアシストパラメータは仮想質量 M を13.2kg, ダンピング係数 D を6.6Ns/mとした。平均体重に近い63kgの搭乗者で行った実験での介護者の力と走行速度をFig. 4.15に示す。Fig. 4.15より走行初期の1秒前後で顕著な加速度と力変化が見られた。走行中の質量推定結果をFig. 4.16に示す。搭乗者は63kgであり、電動車いすは34kgであるため、総質量は97kgである。結果より走行はじめの1秒以内に推定質量はすでに93kgに収束し、実質量である97kgとは4.1%の差があった。さらに搭乗者の質量推定は1秒以内に十分に推定できることも見られた。また、ほかの3名の質量推定結果をTable 4.2にまとめる。それぞれ体重の異なる搭乗者に対しても推定精度4.1%以内の誤差率で推定することができた。収束速度の評価として、動作開始時間から推定値が定常値の約95%に達する時間をそれぞれの結果で算出し、全ての被験者で走行開始時の1秒以内に十分に推定質量に収束したことも確認できる。そして、推定質量をもとに17度のスロープでの最大アシスト率 α も算出できている。

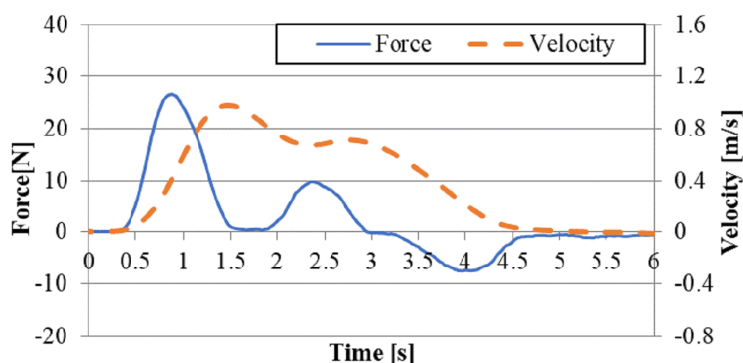


Fig. 4.15: 水平面上でのパワーアシスト走行

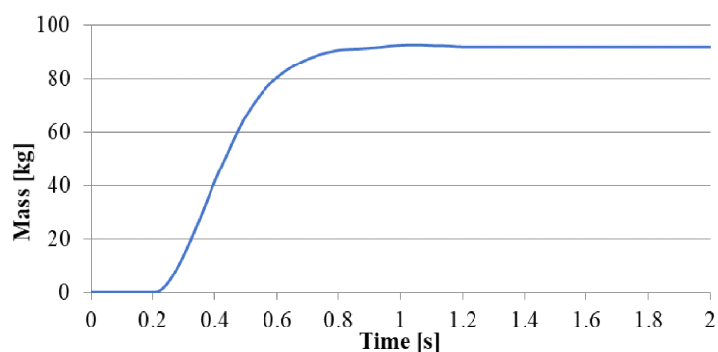


Fig. 4.16: 推定した総質量 (真値は 97kg)

Table 4.2: 総重量推定の結果

True mass [kg]	Estimated mass [kg]	Convergent time [s]	Error rate [%]	α
97	93	0.51	4.1	0.54
108	104	0.57	3.7	0.49
124	127	0.66	-2.4	0.40

4.4 まとめ

本章ではパワーアシストを行うにあたり、力覚センサを用いずにモータの外乱オブザーバを用いて介護者の力情報を推定して、パワーアシストする手法を提案した。本センサレスパワーアシスト手法を用いることで、ユーザの経済的な負担を抑えられ、ハンドルを改造して力覚センサを取り付ける必要性がなくなる。本センサレス力推定手法はさらにエンコーダを用いずに速度オブザーバを用いて実現することができた。センサレスパワーアシストの検証では定常負荷と初期負荷が理論通りに軽減されたほか、推定された力と力覚センサから計測された力と高い精度で一致していることが確認できた。

4.2節では外乱オブザーバを用いて急勾配スロープで搭乗者と車いすを含む総質量を推定できる手法を提案することで、総質量を推定できるようになり、自動的に急勾配スロープでの最大の重力アシスト率が計算できるようになった。検証実験では水平面での走行を行い、3名の異なる体重の搭乗者の重量を5%以内の精度で推定することができた。

第5章 高さ方向への昇降アシスト

これまで移動ロボットを用いたパワーアシスト手法を提案し、その有効性を検証した。物流での対人支援においては移動だけでなく、移動作業の前後ではロボットへの重量物の積み下ろしもしくは介護であれば車いすに被介護者を移乗させる作業が必要になる。この積み下ろしは作業員への身体負担が大きいため、移動ロボットが台面の高さを調節できるようになれば作業員の負担が大きく軽減する。従来の昇降リフトはその構造上リフト高によって出力できる力と速度が異なるため、効率が悪いというデメリットがあった。本研究では昇降高さによらず力と速度の特性が変わらないような新たな昇降機構を提案する。本機構を用いることで重量物を昇降させる際の効率を改善し、小型のモータでも重量物をすばやく昇降させることが可能となる。また、高さによらず台面上の重量とモータにかかる力は常に同じであるため、モータの外乱オブザーバを用いることで台面上の積載物の重量を推定することが可能になる。これを利用して予め積載物の重さと高さを入力しておくことで、重量で搭載段数を予測して、ユーザの作業しやすい位置に移動させることができ、荷役の負担軽減ができるようになる。これらの手法は作成された検証モデルで検証され、実際の電動リフト台車にも搭載して提案機構の有効性を検証する。

5.1 従来の昇降リフト機構の解析

台車におけるリフト機構は一般的に Fig.5.1 のようにシザーリフト機構を用いて自由度を上下に制限して、リニアの油圧アクチュエーターや大型の電動モータを接続して昇降をさせる。アクチュエーターはリフトが最低位置にある際にも収納できる位置に配置する必要がある。Fig.5.1 のような水平方向へ配置した場合は昇降の妨げにならないが、高さごとに負担できる荷物重量及び昇降速度が変化する。

1 段のシザーリフト機構をモデル化すると Fig.5.2 に示す。リフト台面の荷物重量 W に対して、リニアポテンショメータの力 F の関係を次に導出する。リンクの

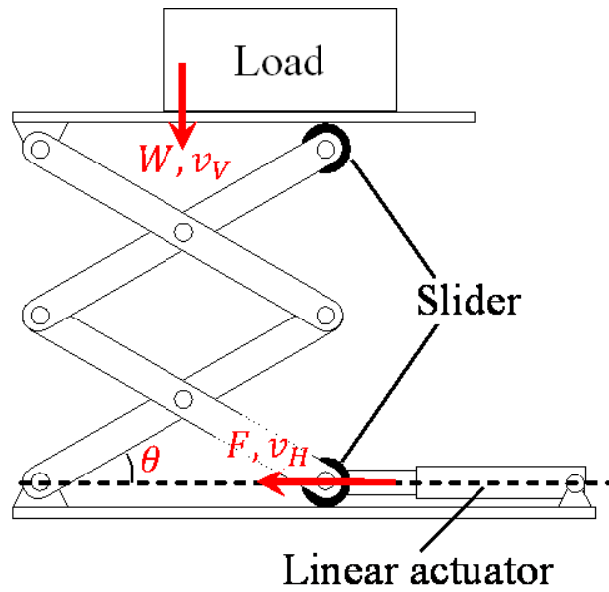


Fig. 5.1: アクチュエータが水平配置のリフトモデル

座標 x, y はリンク長 L とリンク角度 θ で次のように表される.

$$x = L \cdot \cos\theta \quad (5.1)$$

$$y = L \cdot \sin\theta \quad (5.2)$$

ここで角度に関して微分して、微小角度に対する位置の変化率の式を次に示す.

$$\frac{dx}{d\theta} = -L \cdot \sin\theta \quad (5.3)$$

$$\frac{dy}{d\theta} = L \cdot \cos\theta \quad (5.4)$$

式 (5.3) と式 (5.4) より x と y の微小変位の関係は以下ようになる.

$$\frac{dy}{dx} = \frac{1}{\tan\theta} \quad (5.5)$$

また仮想仕事の原理より、搭載重量 W とアクチュエータの力 F の関係は以下のようなになる.

$$W \cdot dy - F \cdot dx = 0 \quad (5.6)$$

式 (5.5) を式 (5.6) に代入すると、 F と W の関係が求まる.

$$F = \frac{dy}{dx} W = \frac{W}{\tan\theta} \quad (5.7)$$

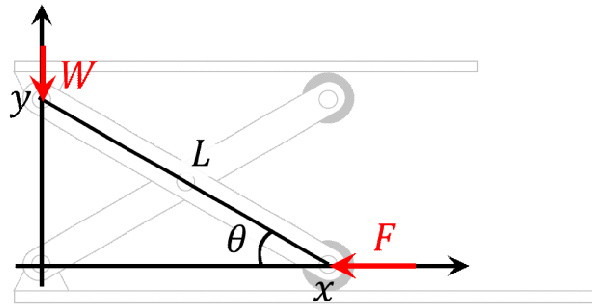


Fig. 5.2: シーザーリフトモデル

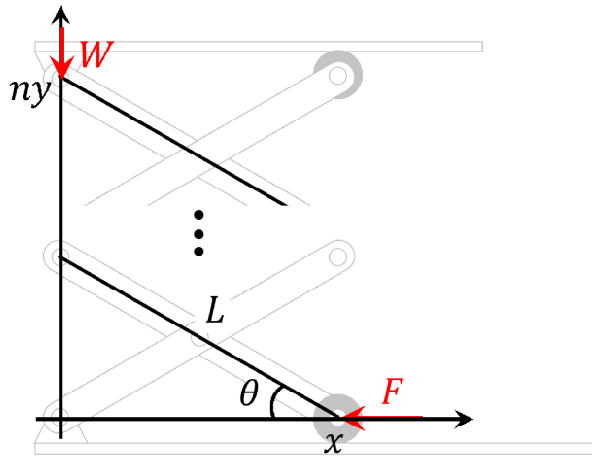


Fig. 5.3: n 段のシーザーリフトモデル

また式 (5.5) を積分することによりアクチュエータ速度 v_H と台面速度 v_V は以下の関係になる。

$$v_H = v_V \cdot \tan\theta \quad (5.8)$$

また、一般的にシザーリフトは2段以上で使用されることもあるため、 n 段の力関係を以下に示す。

$$F = \frac{nW}{\tan\theta} \quad (5.9)$$

ここで、 n はシザーリフトの段数、 θ はシザーリンクの角度である。またリニアアクチュエータの動作速度 v_H とリフト台面の昇降速度 v_V は以下の関係である。

$$v_H = \frac{\tan\theta}{n} v_V \quad (5.10)$$

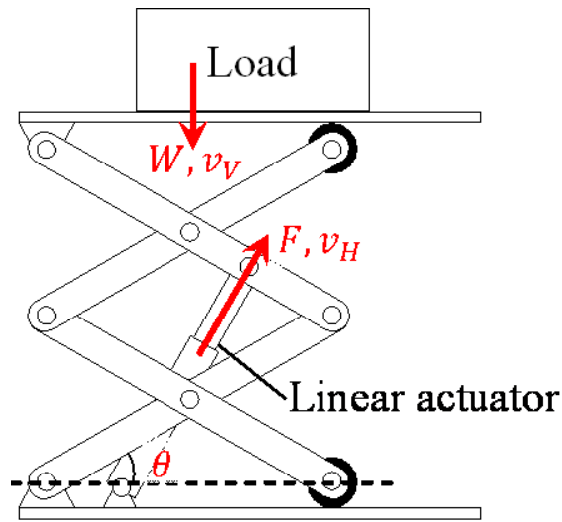


Fig. 5.4: アクチュエータが斜め配置のリフトモデル

一定の速度で一定重量の荷物を上昇される場合，式 (5.10) よりリフトは高い位置になるほど，角度 θ は大きくなる．そのため，低い位置でのアクチュエータの負担は非常に大きくなる．一方で低い位置では低速で動作すれば台面の上昇速度を満たせるが，高い位置では高速な動作が求められる．そのため，ある荷物を低速で持ち上げる際には最低位置で必要な力と最高位置で必要な速度をかけたパワーのアクチュエータが必要になり，電動モータであれば大型のものになる．

リフト高さ変化によってアクチュエータにかかる力と必要な速度が変動しにくい機構として，Fig.5.4のようなアクチュエータを斜めに配置したものがある．水平方向の配置と比較して斜め配置の場合は力と速度の変動はある程度抑制できるが，完全に力が速度の変動を抑えるにはFig.5.5のような完全に垂直方向にアクチュエータを配置する必要がある．しかし，垂直方向の配置はリフトの昇降幅が大きい場合，その分アクチュエータの収納空間が必要になるため，実用性が低い．本研究では収納時に必要な空間が小さくかつリフト高によらず力と速度が変動しないようなリフト機構を提案する．

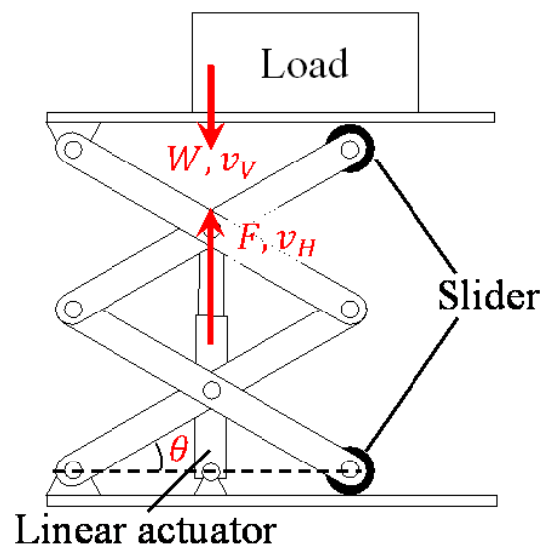


Fig. 5.5: アクチュエータが垂直配置のリフトモデル

5.2 新たな昇降機構の設計法

先述のように従来のリフト機構は空間的な制限により斜めもしくは水平方向に取り付けられるようになった。しかし、そのような配置ではアクチュエータが台面に伝達する力と速度は変動して、大型のアクチュエータを用いる必要があった。アクチュエータの力と台面の力関係を任意に変更できる機構を検討したところ、Fig.5.6のような機構を提案した。本提案機構の主な考え方は水平に配置されたアクチュエータに2つのリンクを接続し、リンクからシザーリフトに接続する。このような配置にすることで、Fig.5.7のように収縮時にもリンクを取めることができるようになる。しかし、2つのリンク間の関節Aは拘束されておらず自由に動くため、アクチュエータの力を伝達できない。また、アクチュエータと台面の力関係も定まっていない。そこで、自由度をもつ関節Aにその動作軌道を設けることで関節Aの動きを制限してアクチュエータから台面に力伝達を可能にさせる。また、その際の動作軌道の設計方針として、アクチュエータと台面の力が一定になるような形状に設計する。関節Aの軌道の設計方法を以下で述べる。

Fig. 5.8 のモデルより水平方向の力 F_B と垂直方向の力 F_L の関係は仮想仕事の原理より以下のように表される。

$$F_B = -\frac{dy_L}{dx_B} F_L \quad (5.11)$$

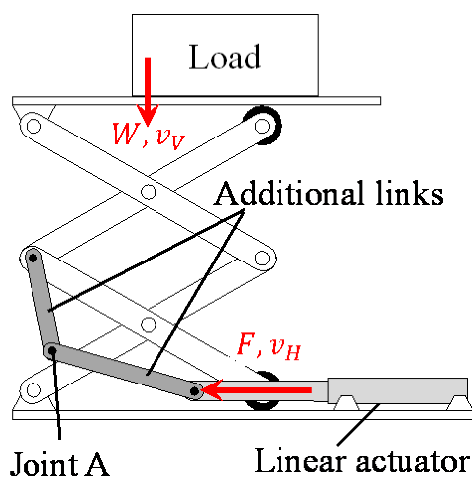


Fig. 5.6: 提案した昇降機構案 (伸展時)

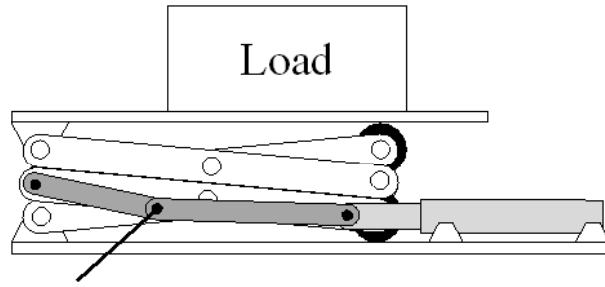


Fig. 5.7: 提案した昇降機構案 (収縮時)

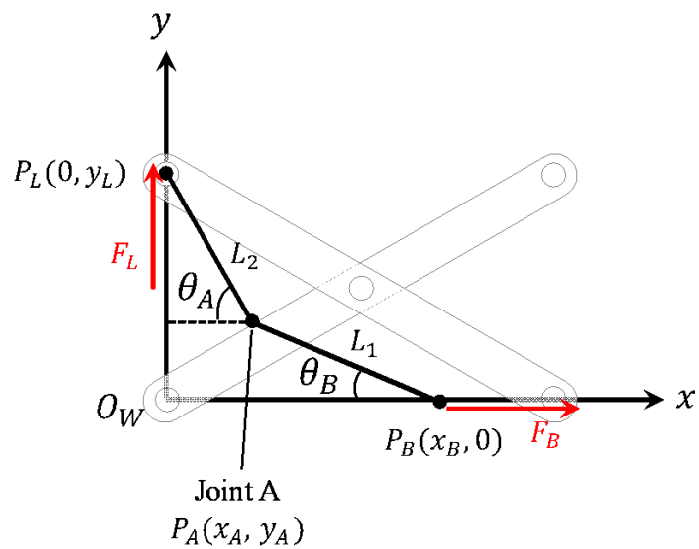


Fig. 5.8: 提案した昇降機構のモデル

ここで、 dx_B 、 dy_L はそれぞれ点 P_B と P_L の微小変位である。

$$K = -\frac{dy_L}{dx_B} \quad (5.12)$$

ここで、 K は水平方向の力 F_B と垂直方向の力 F_L の比率である。本研究では高さによらず定駆動力の実現を目指しているため、 K を定数とする。式 (5.12) を解くと以下のような関係式になる。

$$y_L = C - K \cdot x_B \quad (5.13)$$

ここで、 C は初期条件で決まる任意定数である。Fig.5.8 の2リンクに着目すると、 P_L の位置は P_B を中心として、 θ_A と θ_B から以下のように計算される。

$$x_B = L_1 \cdot \cos\theta_B + L_2 \cdot \cos\theta_A \quad (5.14)$$

$$y_L = L_1 \cdot \sin\theta_B + L_2 \cdot \sin\theta_A \quad (5.15)$$

式(5.16)と式(5.15)は2リンクマニピュレータの運動学を表しており，この逆運動学を算出することで， θ_A と θ_B が求まる．関節Aの軌道計算に θ_B を使用するため， θ_B のみを以下に示す．

$$\theta_B = \tan^{-1} \frac{y_L}{x_B} \pm \tan^{-1} \frac{\sqrt{(x_B^2 + y_L^2 + L_1^2 + L_2^2)^2 - 2(x_B^2 + y_L^2)^2 + L_1^4 + L_2^4}}{x_B^2 + y_L^2 + L_1^2 - L_2^2} \quad (5.16)$$

そして，関節Aの軌道 $[x_A, y_A]$ はFig.5.8より以下のように求められる．

$$x_A = x_B - L_1 \cdot \cos\theta_B \quad (5.17)$$

$$y_A = L_1 \cdot \sin\theta_B \quad (5.18)$$

以上で提案した機構と使用する軌道の設計について述べた．次にリフトの昇降幅とリニアアクチュエータの伸縮長から定数Kを決めていく．本研究は企業との共同研究であり，リフトの昇降幅は600mm以上という指定があった．昇降に余裕を持たせるために640mmとした．提案機構はFig.5.6より，2段あるシザーリフトの1段目に接続されており，2段目で640mm移動する際は1段目の移動量は320mmである．またアクチュエータは280mmの可動域とする．台車の実際寸法を考慮してリフト収納時は $x_B = 0.75m, y_L = 0.15m$ ，リフト昇降時は $x_B = 0.47m, y_L = 0.47m$ であった．この2つの条件を式(5.13)に代入して，KとCについて解くと， $K = 1.14, C = 1.0$ が得られる．よって，アクチュエータにかかる力は1段目のシザーリフトの負荷の1.14倍である．今回のリフトは2段のシザーリフトであるため，負荷はさらに2倍した2.28倍がかかることになる．また，リフト内に収納ができるように2つのリンクの寸法 L_1, L_2 はそれぞれ0.42mと0.35mとした．設計した実際の軌道の6次近似式をFig.5.9に示す．

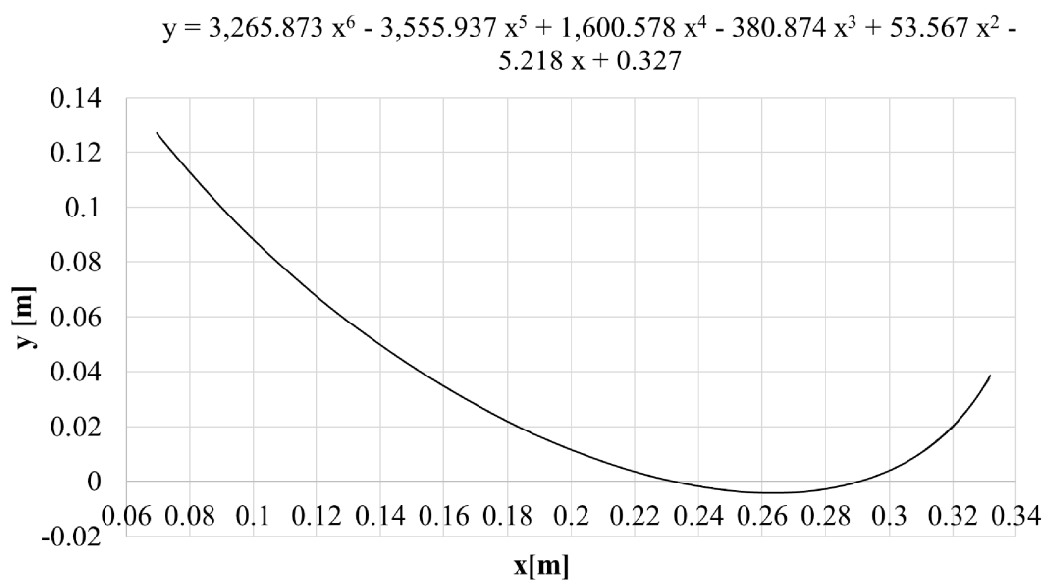


Fig. 5.9: 設計した関節 A の軌道

5.3 積載物の重量推定手法

先述のように台車上の積載物の重量を推定できれば，台面上に乗っている荷物の段数を推定することができるようになる．よって，本節では台面上の荷物重量を推定する手法を提案する．

Fig.5.10 では台面にかかる力 W とリニアアクチュエータの駆動力 F_B の関係を表しており，関係式を以下に示す．

$$F_B = P \cdot F_M = m \frac{dv}{dt} + F_f + W \quad (5.19)$$

ここで， P はアクチュエータとリフト面の力の変換係数， F_M はモータの駆動力， m は質量， v_V はリフト面の動作速度， F_f は摩擦である．実際の台車のモデルは複雑なものであるが，このように慣性と摩擦項にまとめることができる．摩擦項についてはモータなどで粘性摩擦や静止摩擦があることが知られているが，リニアアクチュエータの場合はボールネジ自体にも摩擦力が存在している．ボールネジのモデルは Fig.5.11 で表される．ボールネジとその上を移動するガイドは Fig.5.11 の右図のようなスロープモデルに変換することができる．ここでボールネジに加わる力を F_B とすると，生じる摩擦 f は以下の式で表される．

$$f = \mu \cdot F_B \cdot \cos\theta \quad (5.20)$$

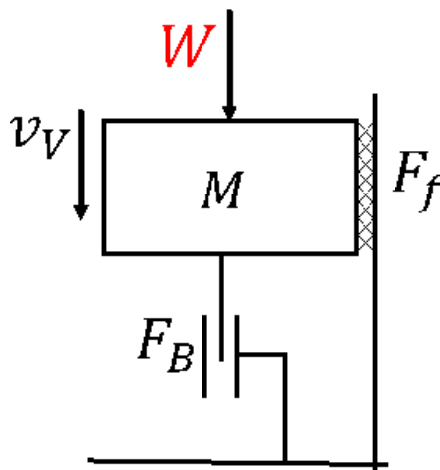


Fig. 5.10: リフトモデル

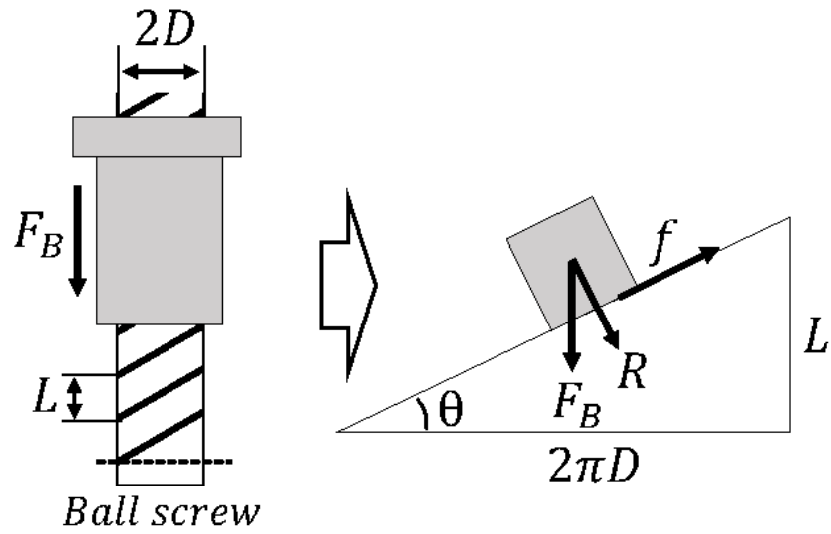


Fig. 5.11: ボールネジの摩擦モデル

$$\theta = \tan^{-1} \frac{L}{2\pi D} \quad (5.21)$$

式 (5.20) より摩擦項には積載重量に比例した摩擦が生じている．従って摩擦項は以下のように表される．

$$F_f = F_c + d \cdot v_V + c \cdot W \quad (5.22)$$

ここで， F_c は摩擦オフセット， d は粘性摩擦係数， c は転がり摩擦係数である．式 (5.19) と式 (5.22) より積載物の重量は以下の式で推定される．

$$W = \frac{P \cdot F_M - (m \frac{dv_V}{dt} + dv_L + F_c)}{1 + c} \quad (5.23)$$

5.4 検証実験

2.2 節では高さによらずに定駆動力で昇降できる機構を提案し、2.3 節では積載物の重量を推定する手法を提案した。本節では提案手法を検証するために製作したリフトのミニチュアモデルを用いて、荷物を載せた際のモータ駆動力が一定であるかを検証する。そして、製作した電動リフト台車でも駆動力検証を確認する。

5.4.1 リフトのミニチュアモデルを用いた検証

初めに製作したリフトのミニチュアを Fig.5.12 に示す。ミニチュアモデルはモータ (EC90, Maxon) がボールネジに接続され水平方向に直線移動を行う。その後提案した2つのリンクとリンク間の関節の動きを制限する軌道を経由し、シザーリフトの1段目に接続されている。軌道は3DプリンタによりABS樹脂で製作した物を使用している。ミニチュアモデルで使用した駆動機構の減速比を Table 5.1 に示す。駆動機構で使用したボールネジはモータのトルクを直動の力に628倍で変換する。提案機構ではシザーリフトの1段目の垂直力がボールネジに1.14倍で伝達されるため、逆にボールネジから見ると約0.9($\approx 1/1.14$)で増幅される。提案した2リンクはシザーリフトの1段目に接続されており、1段目の力は2段目で1/2倍になる。

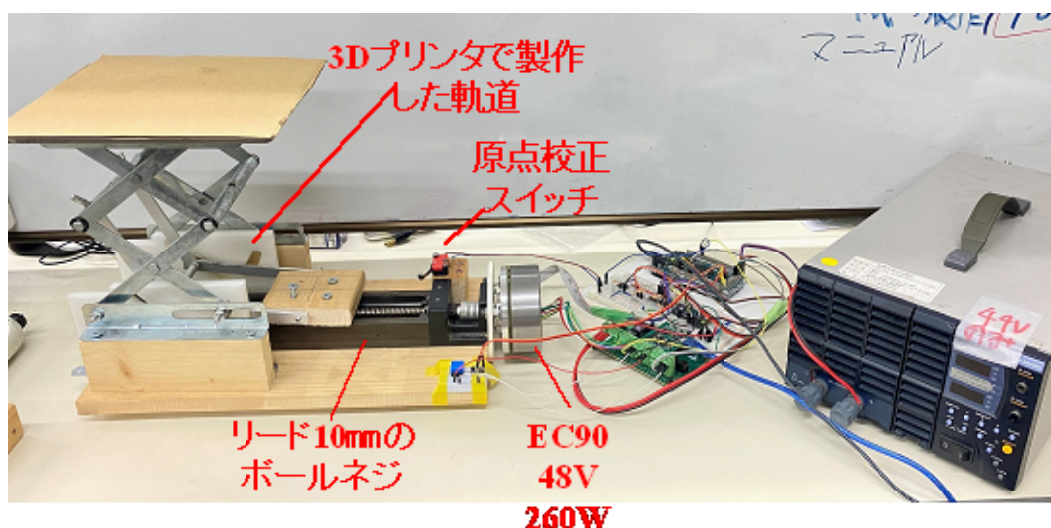


Fig. 5.12: 製作したミニチュアモデル

式(5.22)の摩擦パラメータを同定のために、ミニチュアモデルのモータ速度を-50rad/sから50rad/sまで10rad/sで変化させ、リフト上にはFig.5.13のようにリフト上は0N(積載物なし), 10.2Nのダンベル, 22.3Nのダンベルを載せたときの計30回のデータを取得した。検証実験の結果をFig.5.14とFig.5.15に示す。Fig.5.14の結果を見ると摩擦トルクは正転と逆転で異なるオフセットを持ち、角速度に比例している。また、重量と摩擦の関係を示したFig.5.15では重量に比例した摩擦も

Table 5.1: ミニチュアモデルの駆動機構の減速比

ボールネジ	$K_1=628$
提案の2リンク機構	$K_2=0.9$
シザーリフト	$K_3=0.5$
合計減速比	$P = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \approx 282$

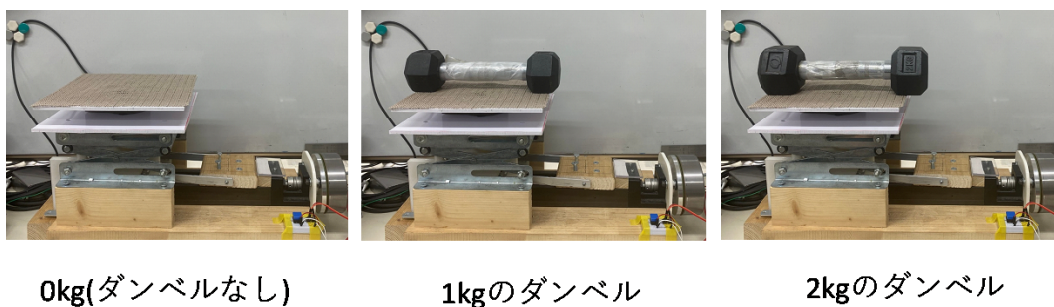


Fig. 5.13: 摩擦項同定の実験

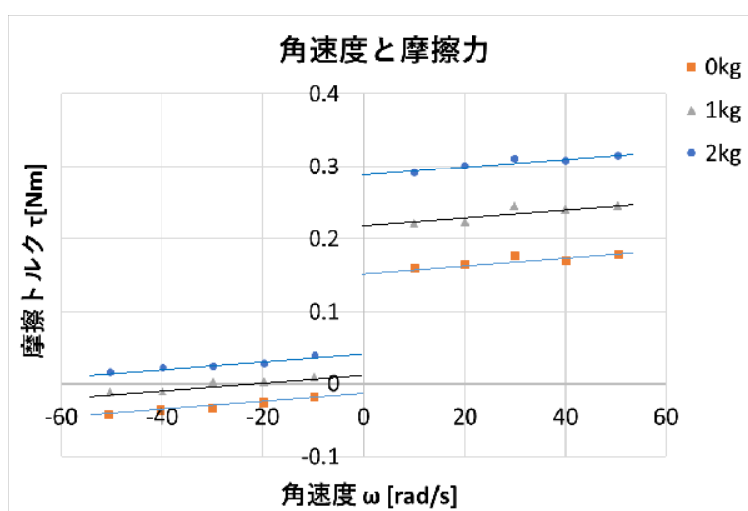


Fig. 5.14: 粘性摩擦項同定の実験

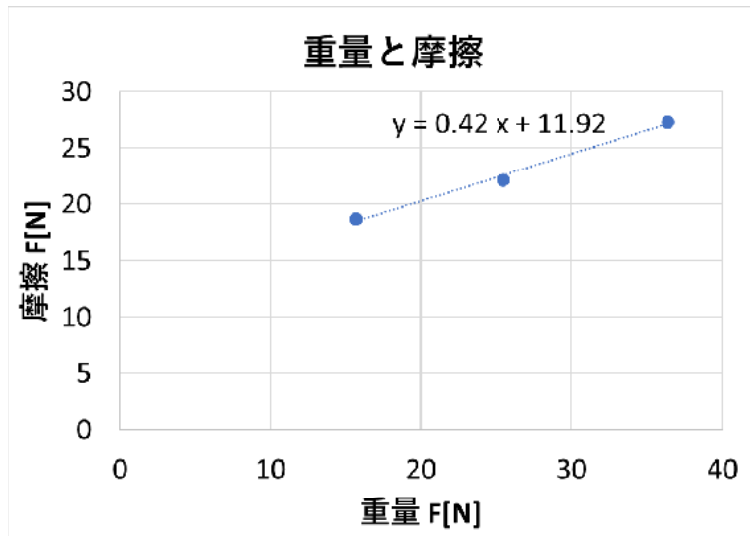


Fig. 5.15: 転がり摩擦項同定の実験

観測された。実験結果より，得られた粘性係数は0.077，静止摩擦力は11.9N，転がり摩擦係数は0.42であった。

以上で式(5.23)の搭載物の摩擦項を同定した。次にリフト上のダンベル重量を推定して提案手法を検証する。Fig.5.14やFig.5.15の結果よりリフトが動かない場合には11Nほどの摩擦力があり，この領域内では積載重量を検出することが困難である。そこで，低速で上昇させた際に0N, 10.2N, 22.3Nの積載物重量を推定する実験を行った。実験結果をそれぞれFig.5.16, Fig.5.17, Fig.5.18に示す。

推定値の平均と標準偏差をTable 5.2に示す。結果よりそれぞれの推定結果はお

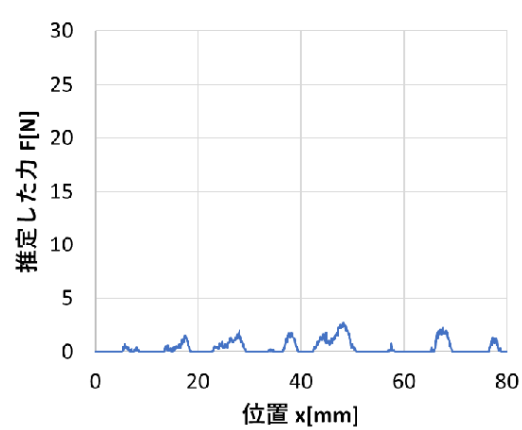


Fig. 5.16: 搭載負荷なしの際の力推定結果

およそダンベル重量と一致していることが確認できた。しかし、初期の5mm以内の位置では力推定値が0及び大きなピークが見られた。この原因として3Dプリンタで作成したガイド軌道に誤差があり、遊びもあったためだと思われる。

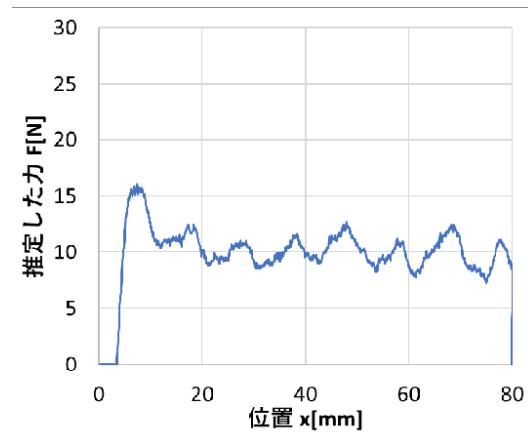


Fig. 5.17: 10.2N ダンベル搭載時の際の力推定結果

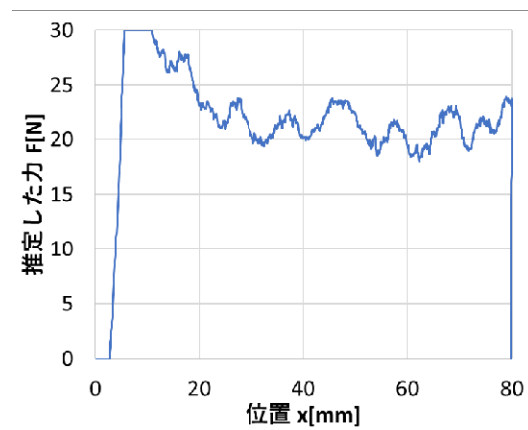


Fig. 5.18: 22.3N ダンベル搭載時の際の力推定結果

Table 5.2: 積載物の重量の推定結果

Load	Estimated value
0N	$0.3 \pm 0.6N$
10.2N	$10.4 \pm 1.7N$
22.3N	$22.7 \pm 3.2N$

5.4.2 電動リフトを用いたアシスト台車

6.4.1節ではミニチュアモデルを用いた力推定手法の検証を行い、その有効性が確認された。ここでは電動リフトに提案した昇降機構を搭載して、高さによらず定駆動力であることを確認し、提案した力推定手法によりリフト上の積載物の重量を推定する。開発した台車の外観を Fig.5.19 に示した。リフト台車の内部に製作した定駆動力機構を組み入れている。定駆動力機構の設計を Fig.5.20 と Fig.5.21 に示す。駆動機構はモータからタイミングベルトを介して遊星ギアに接続されている。遊星ギアで減速後はリニア駆動ができるボールネジに接続され、ボールネジのキャリア部は2リンクと設計した軌道に接続されている。リフト台車の駆動機構の減速比を Table 5.3 に示す。ミニチュアモデルと比較して、遊星ギアによる減速があるため、モータからリフト台面までの減速比は5800となっている。

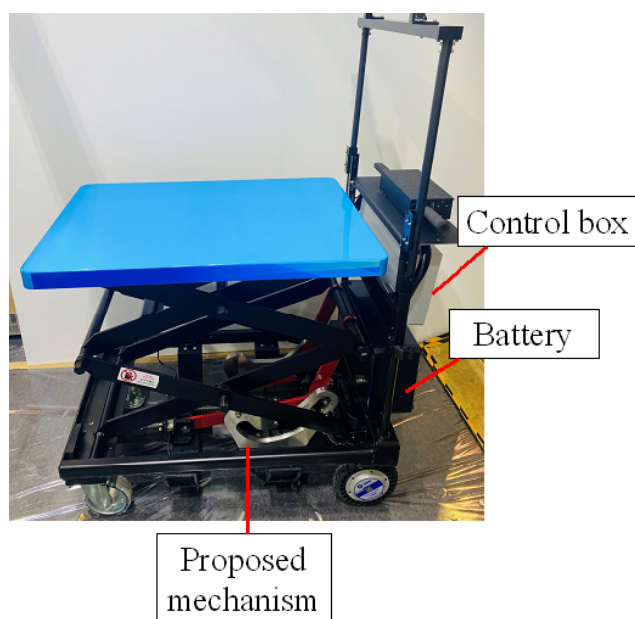


Fig. 5.19: 開発した電動リフト台車

Table 5.3: リフト台車の駆動機構の減速比

遊星ギア	$G = 3 \cdot 7 = 21$
ボールネジ	$K_1 = 628$
提案の2リンク機構	$K_2 = 0.9$
シザーリフト	$K_3 = 0.5$
合計減速比	$P = G \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \approx 5800$

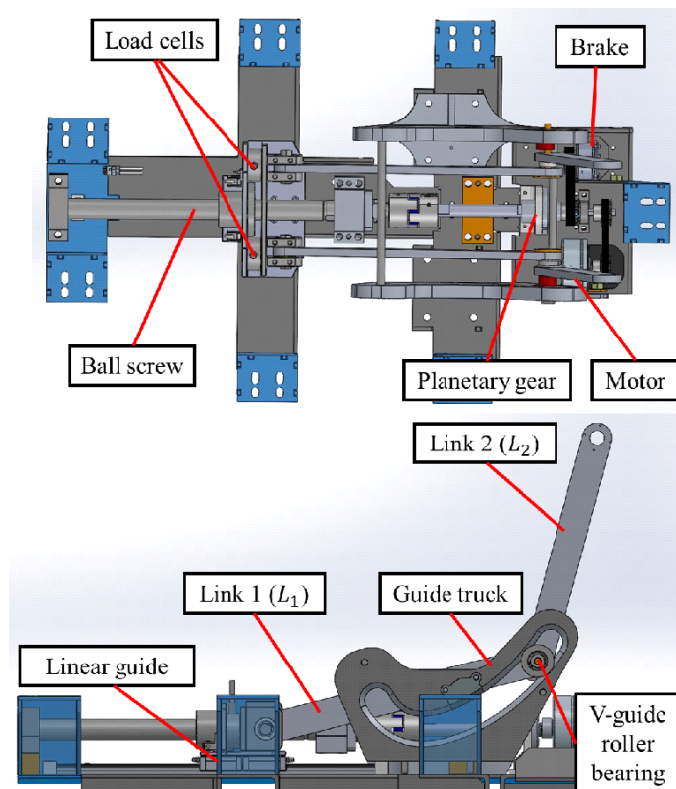


Fig. 5.20: 電動リフト台車の駆動機構の設計

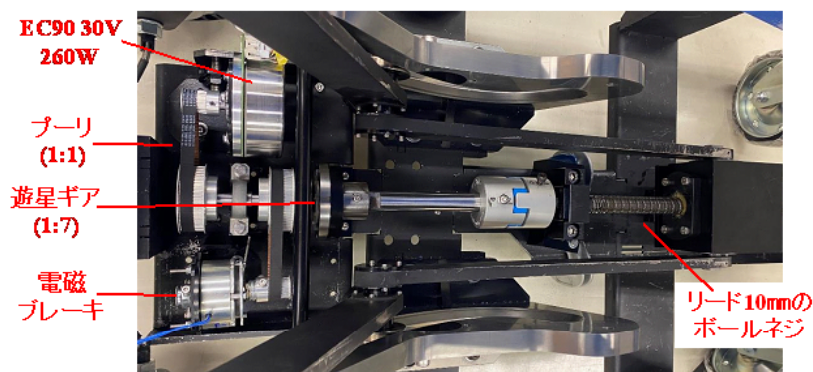


Fig. 5.21: 製作した電動リフト台車の駆動機構

提案した定駆動力機構の検証を行うために、駆動モータの電流を計測して、モータトルクと昇降の高さの変化を記録した。リフトを低速上昇と下降をさせた結果を Fig.5.22 に示す。結果より上昇時と下降時及び上昇と下降の平均値の電流から算出された力はほぼ一定の結果になり、高さによらない定駆動の特性を確認することができた。

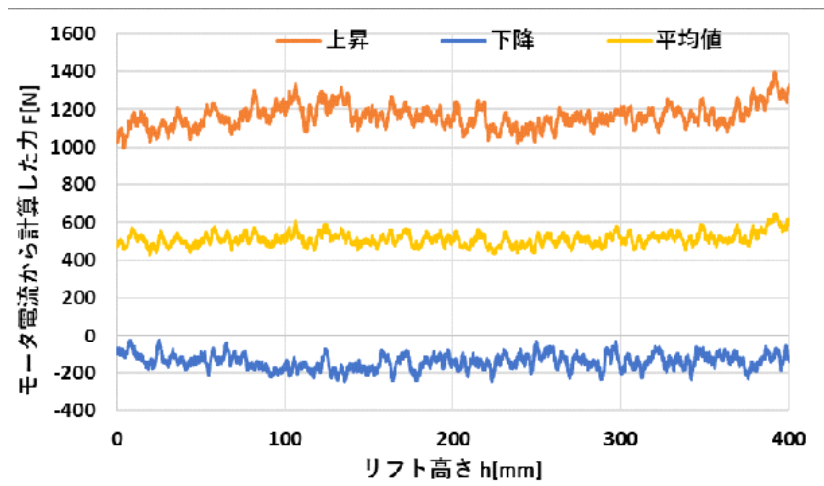


Fig. 5.22: モータ電流より計測した昇降に必要な力

最後に積載物の重量を推定する手法を検証する。リフト台車には0kg,10kg, 20kg, 30kg, 40kg, 50kg までの積載物を載せて上昇時と下降時の検証を行った。検証結果を Fig.5.23 と Fig.5.24 に示す。また、それぞれの積載物の重量の推定誤差の評価を Table 5.4 と Table 5.5 に示す。推定結果よりほぼ 1kg 程度の誤差に抑えることができた。

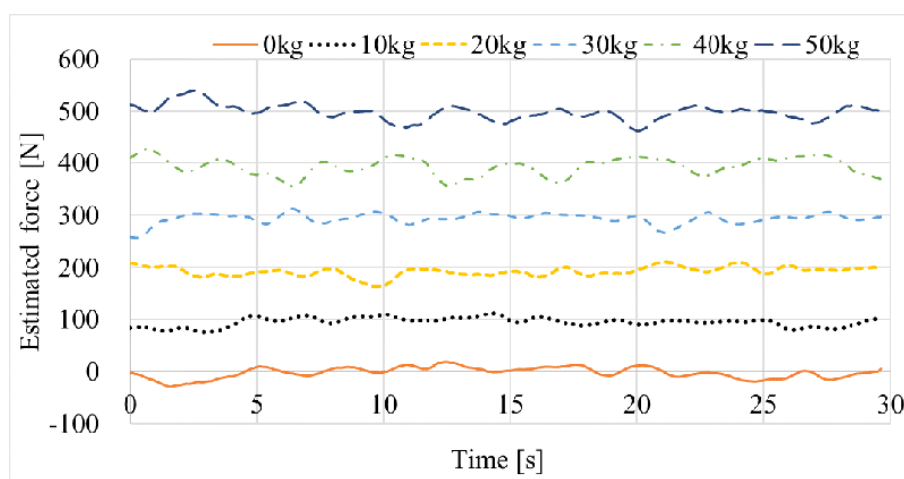


Fig. 5.23: 上昇時に推定した積載負荷

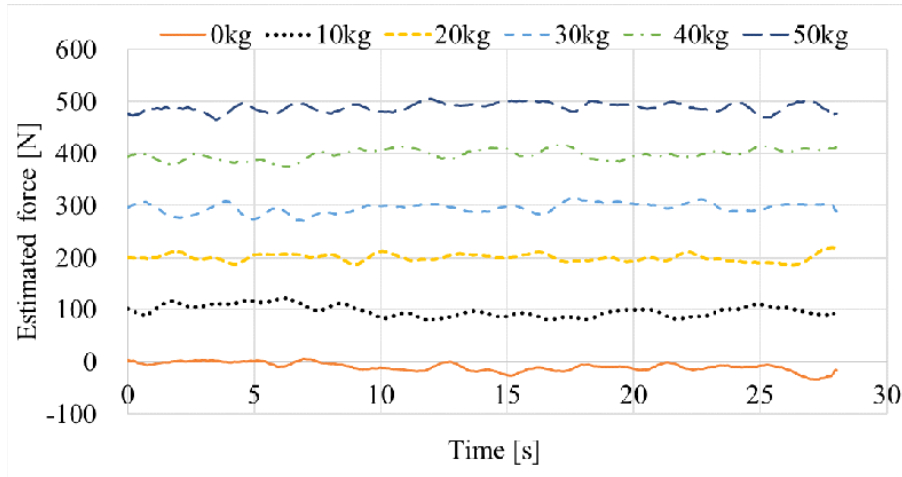


Fig. 5.24: 下降時に推定した積載負荷

Table 5.4: 上昇時に推定した積載負荷の評価

Weight	Error Average[N]	SD [N]	RMS [N]
0	2.3	10.4	8.6
10	3.4	8.6	7.2
20	3.0	9.0	7.1
30	0.2	9.7	7.1
40	-0.6	16.6	14.0
50	-8.3	14.8	13.7

Table 5.5: 下降時に推定した積載負荷の評価

Weight	Error Average[N]	SD [N]	RMS [N]
0	9.7	8.3	10.2
10	1.0	10.8	9.3
20	-4.4	6.9	6.5
30	-1.3	9.5	8.1
40	-5.6	10.0	9.7
50	0.6	8.5	7.1

5.5 まとめ

本章では移動作業の前後での重量物の積み下ろしの負担を軽減するために、移動ロボットが台面の高さを調節できることを目指した。従来の昇降リフトはその構造上リフト高によって出力できる力と速度が異なるため、効率が悪いというデメリットがあった。本研究では昇降高さによらず力と速度の特性が変わらないような新たな昇降機構を提案した。本機構を用いることで重量物を昇降させる際の効率を改善し、小型のモータでも重量物をすばやく昇降させることが可能となった。また、モータのオブザーバを用いることで台面上の積載物の重量を推定手法を提案し、積載物の重量の推定を検証した。検証結果より、これらの手法はの有効性は検証された。

第6章 特定環境での移動ロボットの自律走行

第3章と第4章では介護者などの移動ロボットを直接操縦する際の負担を軽減するパワーアシスト手法を提案して検証した。また、第5章では荷物を作業しやすい高さに昇降アシストする手法を提案・検証した。これらの省力化技術は人の労働負担を軽減して、作業効率を向上させるためである。これに対して本章では人の操縦が必要ないようなケースに対して、屋内と屋外環境での自律移動手法を提案・構築することで省人化を測る。自律移動システムは屋外用と屋外用に分けて考え、屋外はGPSなどのGNSSシステムを用いて、屋内はLiDARなどの測距センサを用いることで自己位置を推定して自律走行ができる。本研究ではケーススタディとして屋外用自律移動ロボットには自動芝刈りトラクタ、屋内用自律移動ロボットにはゴルフバッグ自動搬送機を開発して、提案システムの有効性を検証する。

6.1 屋外での自律走行

屋外での自律移動ロボットのケーススタディとして芝刈りトラクタの自律移動システムを開発した。本開発は企業から協力をいただいております、実用化の面も考慮して共同研究を進めてきた。共同研究の背景として、現在の芝生グラウンドでは均一の仕上がりを保証するために、1人の運転手がトラクタを運転し、2人のスタッフが走行する直線をロープでライン作っているような3人体勢である。また、芝刈りトラクタの運転手は長時間の姿勢維持が必要であり、大きな負担になっている。芝刈りトラクタの自動化を行うことで人手を削減できるほか、作業が困難だった夜間や早朝にも作業ができるようになるため効率的な運営も可能になる。既に自動運転が可能なトラクタ [51,52] は販売されているものの、トラクタ内部に制御アクチュエータやセンサを設置しており、販売コストが非常に高く、既に芝刈りトラクタを保持しているユーザには導入の負担が高い。そこでユーザが既に所



Fig. 6.1: 芝刈りトラクタ X710(Deere and Company 社) [92]

持っている芝刈りトラクタに後付け可能な自動運転装置を開発した。本研究で対象とする芝刈りトラクタを Fig.6.1 に示す。

以下に開発した芝刈りトラクタの自動運転装置の開発コンセプトを示す。

1. ハンドル，アクセル・ブレーキペダル，芝刈り回転刃スイッチの自動操縦が可能である
2. 市販の芝刈りトラクタに装置を後付けできる
3. 簡単に取り付け/取り外しが可能である
4. 装着後も人による手動の運転作業ができる

まず，トラクタの自律作業を実現するにはステアリングハンドル，アクセルペダル，ブレーキペダルを操縦する必要であり，芝刈りの回転刃スイッチを操縦する。市販のトラクタでこれらの操縦をするためにはアクチュエータで接続する必要があるが，ユーザの装置の導入しやすさを考慮するとスタッフを必要とせずにトラクタに簡単に取り付け/取り外しできることをコンセプトとした。また，本研究では芝刈り作業自体を自動化しているが，完全自動化ではなく倉庫の出庫から作業場への移動など人の作業員による運転が必要となる場合もあると想定される。そこで，ユーザがトラクタを移動させる際に装置を外さずに装置上から運転できる

ように考慮して設計した。装置の取り付け後にも運転手がハンドルを把持できるようにハンドル部分はコンパクトにされている。また装置上からトラクタを運転する際に装置の動力は切断されており回転時に負担が生じるため、回転時の負担を減らすために逆駆動効率の良い駆動機構を設計している。

6.1.1 後付け自動運転装置の構成

後付け自動運転装置の全体の設計案を Fig.6.2 に示す。装置はハンドル操縦部 (Fig.6.3)、ペダル操縦部 (Fig.6.4)、芝刈り回転刃操縦部 (Fig.6.5) に分けられる。開発コンセプトは装置取り付け時にも有人運転ができるするため、アクチュエータや減速機を含む大きな駆動部と制御マイコンなどは座席の下に配置し、ワイヤにより力伝達を行うことでハンドル操作を実現している。これによりハンドル部はかさばらず、運転手の妨げにならないようにしている。ペダル操縦は押す操作が必要になるため、リニアアクチュエータを用いており、座席下からペダルを駆動し、ユーザの足を避けた配置になっている。そして、芝刈りの回転刃を操縦スイッチは引くことで回転し、押すことで回転が停止する仕様になっている。次にそれぞれの部位の動作原理について説明していく。

ハンドル操作部の詳細案は Fig.6.3 に示している。座席部下からの駆動ワイヤは 2 本あり、それぞれ独立したモータで駆動してハンドルまで伸びている。ハンドルの上には装置のアームが伸びており、ステアリングホイールに固定される。ハンドルを回転させる際は 2 本のワイヤによりハンドル中央のプーリを回転させる。

次に Fig.6.4 芝刈りトラクタのペダル操縦部の駆動案を説明する。芝刈りトラクタはブレーキペダル、前進ペダル、後退ペダルの 3 種類のペダルが存在する。ペダルの踏む動作には 2 自由度が必要となるため、操縦部は直線駆動ができるリニアアクチュエータとその両端に回転自由度を設けた案を用いた。また、装置を取り付けたまま有人運転ができるように対応するために、ペダル上にカバーがかぶさるようにし、アクチュエータの接続先は側面になっている。

最後に芝刈りの回転刃はレバーを押す/引くことで作動/停止するため、ソレノイドのような直動駆動機構を用いることを考えている。また、装着がズレ際にもスムーズに動作するように直動リンクの両端に球ジョイントを用いた。

次にハンドル操縦部の駆動系について説明する。予備実験より芝刈りトラクタの運転でハンドルを操作するために必要な最大トルク τ_H は約 $\pm 4\text{Nm}$ 、最大回転速度 ω_H は 2.1rad/s であることを確認した。ここより駆動系で用いる最小の電力は $P =$

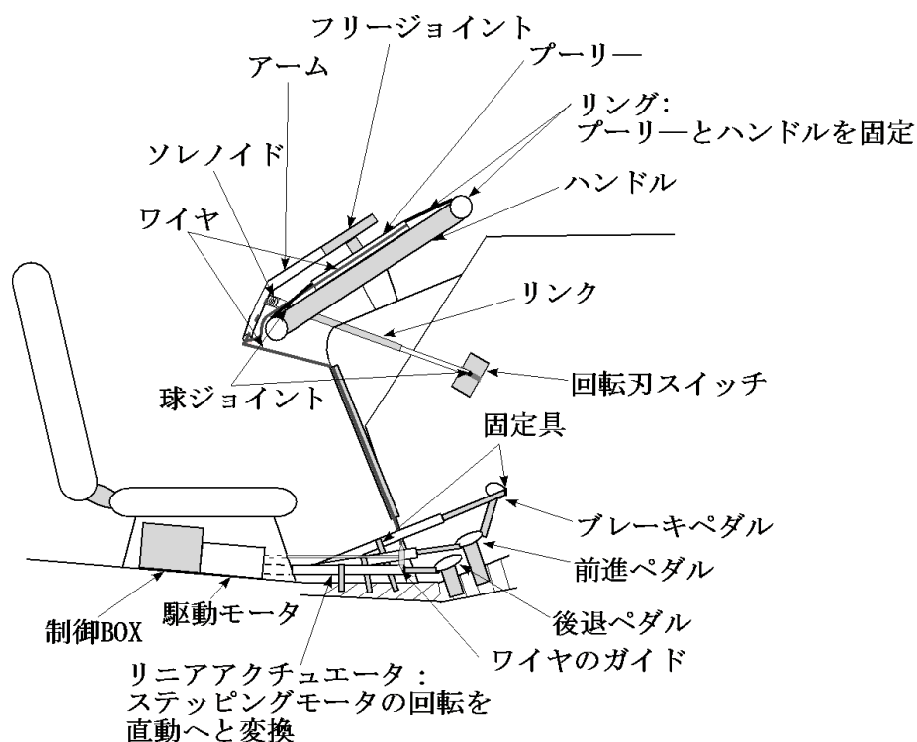


Fig. 6.2: 後付け自動運転装置全体の設計案

$\tau_H \cdot \omega_H = 4 \cdot 2.1 = 8.2W$ である。駆動系の減速機やモータには効率があるため、余裕をもって駆動系の効率を 0.5 と見積もると、必要な最小電力は約 16.4W 程度である。本制御装置はプロトタイプであり、その自動化手法も運転手の操作方法と異なるため、実機の制御系の電力は余裕をもって 100W として構築した。また駆動系は有人操縦も想定しているため、装置を取り付けた上で運転手がハンドルを回せるようにしなければならない。そのためには、ハンドル側から見た摩擦や完成などの抵抗力を低く保つ必要がある。モータ側を駆動してハンドルを回転させることに対して、逆に運転手がハンドルを駆動してモータを回転させることをバックドライブと言い、その運動のしやすさはバックドライブ性と呼ばれている [93]。バックドライブ時の抵抗力 τ_H は主に駆動システムの摩擦と慣性であり、その関係を次の式に示す。

$$\tau_H = G^2 \cdot I \cdot \omega_H + G \cdot \tau_{Friction} \quad (6.1)$$

ここで、 G は減速比、 I はモータの慣性モーメント、 ω_H はハンドルの回転速度、 $\tau_{Friction}$ はモータの摩擦である。減速比 G はその 2 乗が慣性モーメント I にかかっており、1 乗が摩擦 $\tau_{Friction}$ にかかっている。そのため減速機構の減速比を低く保つ

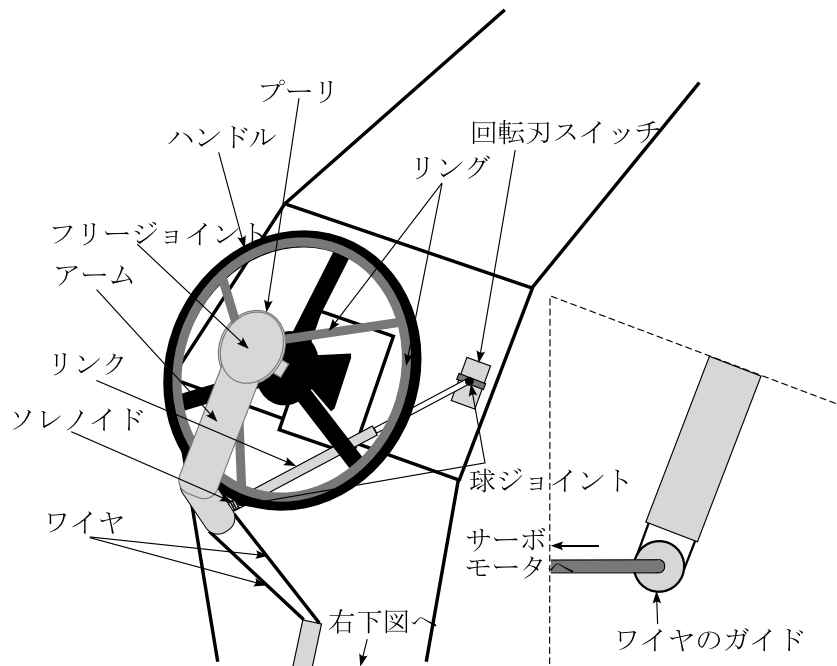


Fig. 6.3: ハンドル操縦部の案

Table 6.1: Motor specification (EC 60 flat, maxon)

Motor power	100W
Nominal voltage	24V
Nominal torque	0.27Nm
Nominal speed	3730RPM
Radius	0.3m
Encoder resolution	1024PPR

ことで高いバックドライブ性が実現される。そこで、本装置では高トルクのモータと低減速比の駆動機構を構築した。

選定したモータは制御がしやすく、メンテナンスフリーのBLDCモータであり、低速高トルク性がある扁平型を採用した。選定したBLDCモータ(EC 60 flat, maxon)の性能を Table 6.1 に示す。先述したハンドル駆動に必要な条件を以下に示す。

$$\tau_H = \tau_M \cdot G \geq 4Nm \quad (6.2)$$

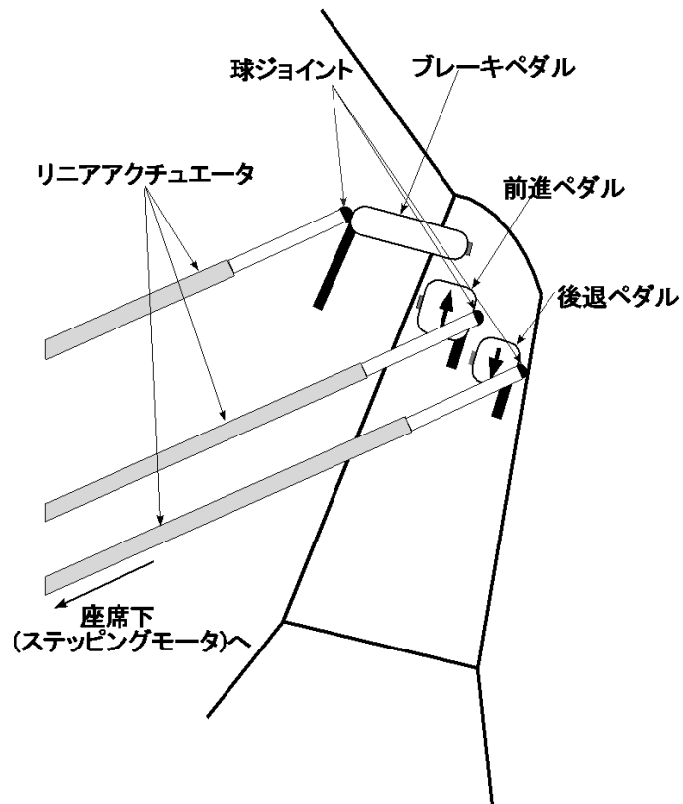


Fig. 6.4: ペダル操縦部の案

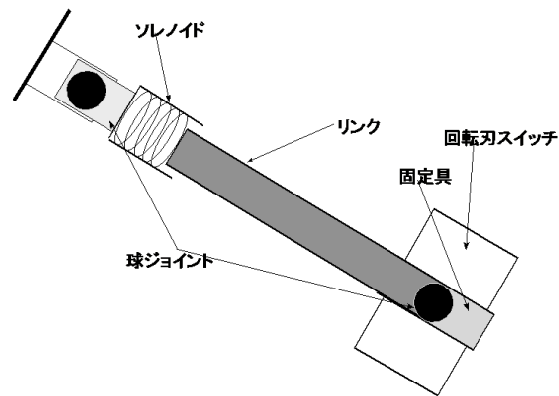


Fig. 6.5: 芝刈り回転刃操縦部の案

$$\omega_H = \frac{\omega_M}{G} \geq 2.1 \text{ rad/s} \quad (6.3)$$

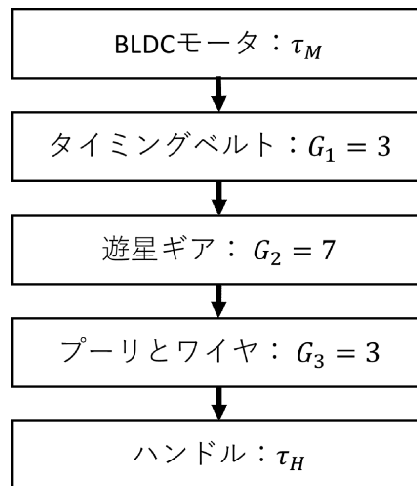


Fig. 6.6: 駆動系の構成と減速比

式 (6.2) と式 (6.3) を満たすために、減速比 G は以下の範囲に設定する必要がある。

$$\frac{4}{\tau_M} \leq G \leq \frac{\omega_M}{2.1} \quad (6.4)$$

Table 6.1 より、公称トルク 0.27Nm と公称角速度 $390\text{rad/s}(\approx 3730\text{RPM})$ を式 (6.4) に代入すると減速比 G の選定範囲が求まる。

$$15 \leq G \leq 187 \quad (6.5)$$

減速機構は設計上の配置やサイズ、バックドライブ性を考慮して Fig. 6.6 に示した。駆動機構はモーターからタイミングベルト(タイミングプーリ)、遊星ギア、プーリとワイヤを介してハンドルを回転させる。予備実験より遊星ギア、プーリとワイヤ機構はバックドライブ性が高い傾向にあるが、小型化が困難である。また、遊星ギアはバックドライブ性が相対的に低いが高減速比を実現できる。それぞれの機構の最大許与トルクも考慮して、Fig.6.6 の構成とした。総減速比 G は 63 であり、式 (6.5) を満たす。遊星ギアはマテックス株式会社の減速比 7 の LGU75-7MLD [94] を使用した。そして、最終的な駆動系の性能として、最大駆動トルクは $\tau_{Hmax} = G \cdot \tau_M \approx 17\text{Nm}$ 、最大回転速度は $\omega_{Hmax} = \omega_M/G \approx 6.2\text{rad/s}(= 60\text{RPM})$ である。

6.1.2 自律移動システム

本 5.1.2 節から 5.1.4 節では芝刈りトラクタの後付け装置の自律移動システムについて説明する。芝刈り作業では基本的にユーザの指定したルートに従って走行

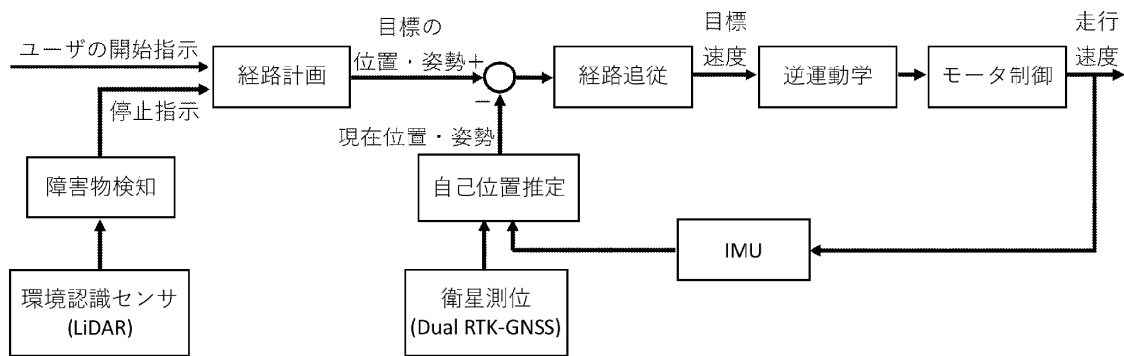


Fig. 6.7: 芝刈りトラクタの自律走行システム

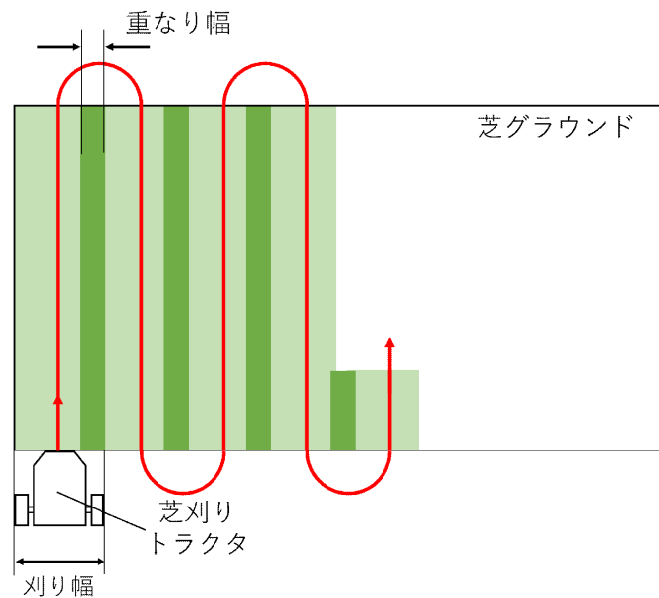


Fig. 6.8: 芝刈りの経路

しながら芝刈りをしていく。そのため、自律走行をするには芝刈りトラクタの位置推定を行って、ルート上から外れないように制御する。また、芝刈り中は人が入ってくることや作業グラウンド上のスポーツ用具があるなどが想定されるため、環境認識センサのLiDARを用いて障害物検知をする。構築した自律走行システムをFig.6.7に示す。ユーザの開始指示が入力されることで、予め設定された経路に従って走行を開始する。芝刈りの経路はさまざまあるが、グラウンド上ではFig.6.8のような直線軌道で行われる。直線走行時には多少のブレが存在するため、刈り残しがないように往路と復路である程度の重なり幅を設けることが一般的である。よって、本研究ではまず直進走行と旋回走行の経路計画を用いる。

次に芝刈りトラクタの自己位置を推定して目標経路に追従させるために、Dual RTK-GNSS と IMU を用いている。Dual RTK-GNSS を用いることで芝刈りトラクタの姿勢と位置をリアルタイムで取得できるが、路面が傾いている場合や高速走行の場合には IMU による傾斜角度の計測や位置・姿勢データの補間に用いる。Dual RTK-GNSS による自己位置推定の詳細は次の 5.1.3 節で述べる。目標経路への追従は高精度が要求されるほか、ハンドルの回転速度の変化がスムーズであることが理想的である。目標経路計画の手法は 5.1.4 節で述べる。そして、芝刈りトラクタの目標速度が計算されると、逆運動学によりモータの目標角速度に変換されて、位置制御される。

6.1.3 RTK-GNSS を用いた自己位置推定

自己位置推定ではトラクタの位置と姿勢を推定する。見晴らしの良いグラウンド上での走行を想定しているため、GNSS(Global Navigation Satellite System, 衛星測位システム)を用いた自己位置推定を採用した。GNSS にはアメリカの全地球測位システム GPS, ロシアの GLONASS, EU の Galileo, 中国の BeiDou がある。このような GNSS システムを用いた測位は良好な環境でも数 m 程度の誤差が存在している。そこで GNSS の測定位置を補強した D-GPS(Differential GPS), PPP(Precise Point Positioning), K-GPS(Kinematic GPS), RTK-GNSS(Real-time kinematic GNSS)などが利用されている。本装置は芝刈り作業を行うため、数 cm 以下の測位精度と制御のためにリアルタイム性を持つ必要がある。測位精度が優れるのは PPP, K-GPS, RTK-GNSS であり、リアルタイム性があるのは DGPS, RTK-GNSS である。よって、本装置では RTK-GNSS を用いた測位を利用する。

RTK-GNSS による測位は測位を利用する移動体に加えて、もう一つの基準局を設けて GNSS 信号を受信する必要がある。自律走行の際には基準局で受信した GNSS 信号と芝刈りトラクタで受信した GNSS 信号の位相差と波数を計算することで、芝刈りトラクタと基準局の相対位置を計測する。予め基準局の精確な位置を計測しておくことで、移動している芝刈りトラクタの絶対座標が得られる。RTK 測位は GNSS で用いられる C/A コードの搬送波を利用しており、搬送波は通常 1.5GHz 以上の高周波であり、波長は約 200mm である。RTK 測位では波長の 1-10% の精度の識別が可能であり、測位精度は理論上で約 2mm-20mm の測位が可能であると言われている。しかし、一方で位置推定には RTK 内のパラメタを決定させる必要であり、測位開始時には時間を要する。また、安定した測位には GPS だけでなく、

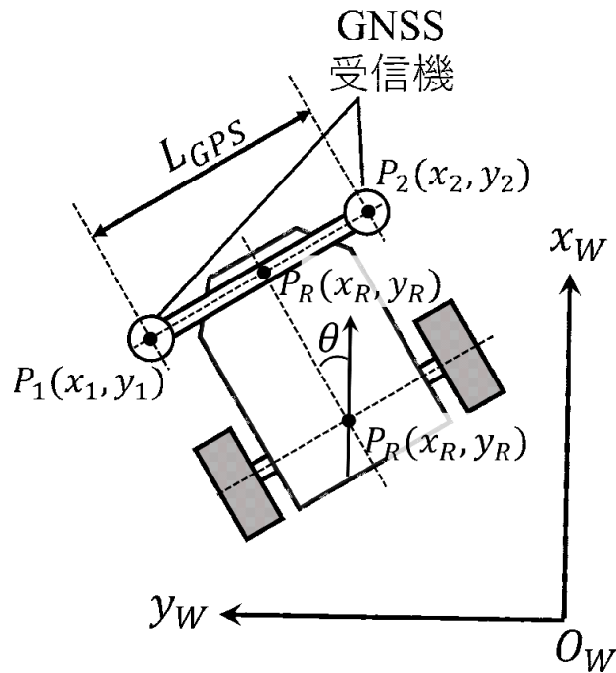


Fig. 6.9: Dual RTK-GNSS を用いた姿勢計測

GLONASS, BeiDou など複数の衛星システムも利用することが良いとされている。一度初期化を行うと、その後は比較的安定した測位が可能となる。

RTK-GNSS を用いた測位で芝刈りトラクタの位置を推定することが可能になるが、芝刈りトラクタの姿勢の推定について次に述べる。

1. 2つの GNSS 受信機を使用して受信機間相対位置から姿勢を計算する
2. GNSS 受信機の移動軌跡から現在の姿勢を推定する

1つ目の姿勢推定には2つの GNSS 受信機を用いる。RTK-GNSS による測位は絶対座標系であるため、まず2つの受信機の間中点を位置制御点として下式で計算する。

$$x_R = \frac{1}{2}(x_1 + x_2) \quad (6.6)$$

$$y_R = \frac{1}{2}(y_1 + y_2) \quad (6.7)$$

ここで、 x_R , y_R は位置制御点（受信機中間点）、 x_1 , y_1 は GNSS 受信機 1 で計測された位置、 x_2 , y_2 は GNSS 受信機 2 で計測された位置である。次に姿勢推定は絶対座標での2つの受信機の相対位置の差から芝刈りトラクタの姿勢を求めるこ

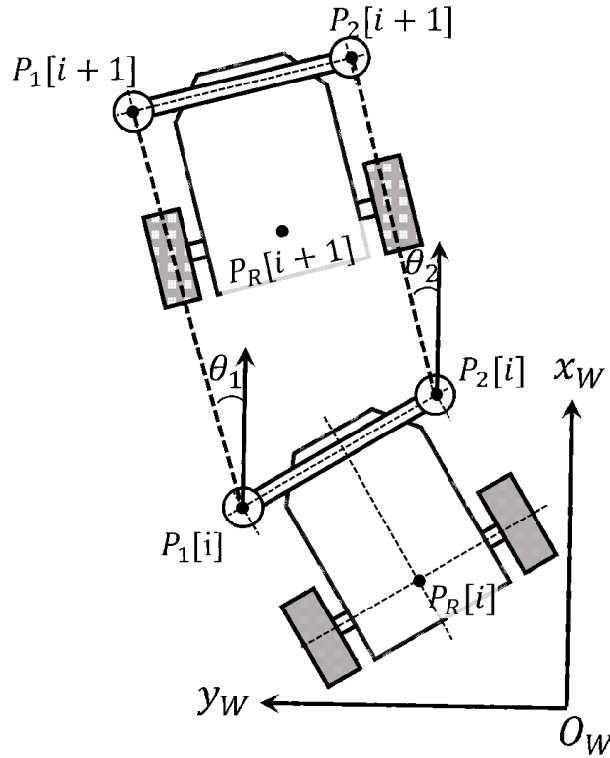


Fig. 6.10: Dual RTK-GNSS を用いた姿勢計測

とができる。

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}\right) + \frac{\pi}{2} \quad (6.8)$$

ここで、 θ は芝刈りトラクタの姿勢、 (x_1, y_1) と (x_2, y_2) はそれぞれのGNSS受信機の位置である。また、GNSS受信機はFig. 6.9のように芝刈りトラクタの姿勢と90度のズレがあるため、 $\pi/2$ を加算している。このような2つのDual RTK-GNSSによる姿勢計算はリアルタイム性があるが、高速走行時には左右の時間同期が必要となる。時間同期がされていないと、姿勢推定に誤差が生じる。RTK測位は200ms(5Hz)で行われており、左右の測位で最大100ms以下の時間ズレが生じる。この時間ズレにより直進方向で進んでいる際も傾いていると誤推定される。

一方で2つ目の姿勢計測はFig.6.10のようにGNSS受信機の1つ前の位置と現在位置の変化から計測する方法である。芝刈りトラクタの姿勢は以下のように計算される。

$$\theta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{y_1(i+1) - y_1(i)}{x_1(i+1) - x_1(i)}\right) \quad (6.9)$$

$$\theta_2 = \tan^{-1}\left(\frac{y_2(i+1) - y_2(i)}{x_2(i+1) - x_2(i)}\right) \quad (6.10)$$

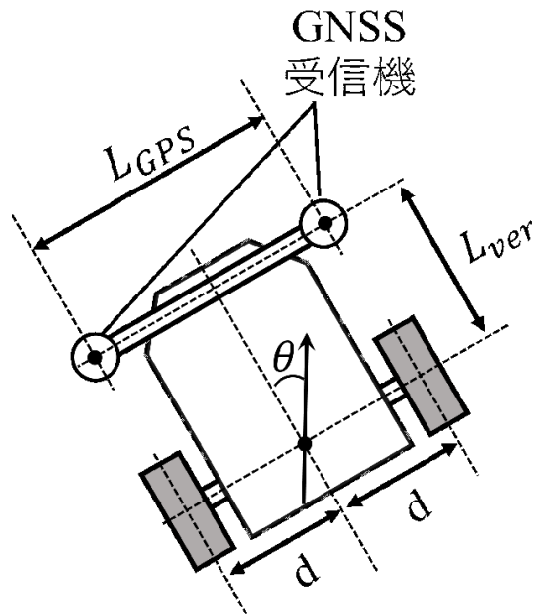


Fig. 6.11: Dual RTK-GNSS の設置位置

ここで、 θ_1 、 θ_2 はそれぞれGNSS受信機1と2から計算された向きであり、 $x_1(i), y_1(i)$ は受信機1の現在位置、 $x_2(i), y_2(i)$ は受信機2の現在位置、 i は計測データの番号である。この姿勢計測は1つ目の計測手法と比べて高速走行時でも誤差が増加するなく姿勢推定することが可能であり、また2つのRTK-GNSSの時間同期がされていない状態では200ms(5Hz)より高速に姿勢推定が可能になる。しかし、反対に低速走行時や停止時の測定はRTK-GNSS測位の誤差により計算される姿勢誤差が大きくなる。そのため、本システムでは低速走行時には1つ目の姿勢推定、高速走行時には2つ目の姿勢推定を積極的に使用する方法を構築した。

6.1.4 経路追従法

本5.14節では本芝刈りトラクタの走行経路から経路計画について説明する。走行経路はFig.6.8のような芝刈りを行う直線区間と旋回の区間に分けられる。直線区間と旋回を繰り返し行うため、Fig.6.12のように走行モードを設けて、モード n は1から増加していく。モード n が奇数の場合は直線走行、 n が偶数の場合はUターン走行になる。全体の走行経路の寸法はFig.6.13に示しているように直線区

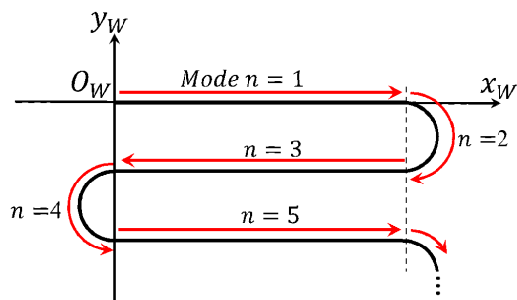


Fig. 6.12: モードによる芝刈り経路の分割

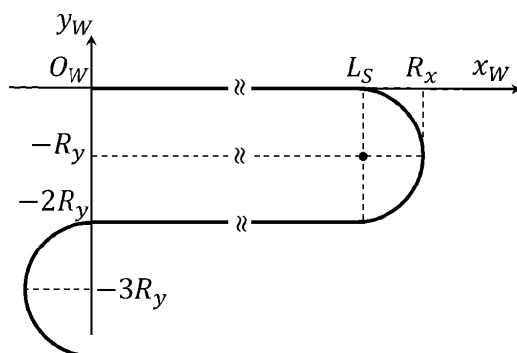


Fig. 6.13: 直線と旋回経路の寸法

間は距離が長さ L_S で、カーブは x 軸と y 軸に短軸と長軸を持つ楕円軌道である。

$$x_{Tar} = \begin{cases} x_{TL} & \text{if } n \text{ is an odd number,} \\ x_{TC} & \text{if } n \text{ is an even number} \end{cases} \quad (6.11)$$

$$y_{Tar} = \begin{cases} y_{TL} & \text{if } n \text{ is an odd number,} \\ y_{TC} & \text{if } n \text{ is an even number} \end{cases} \quad (6.12)$$

ここで、 x_{Tar} , y_{Tar} は芝刈りトラクタの目標位置、 x_{TL} , y_{TL} は直線軌道の目標位置、 x_{TC} , y_{TC} は旋回軌道の目標位置である。直線軌道の目標位置は Fig.6.13 より以下の数式で記述できる。

$$x_{TL} = x_{St} + \text{sgn}(n) \cdot v_{Tar} \cdot \Delta T \quad (6.13)$$

$$\text{sgn}(n) = -1^{\frac{1}{2}(n-1)} \quad (6.14)$$

$$y_{TL} = -(n-1) \cdot R_y \quad (6.15)$$

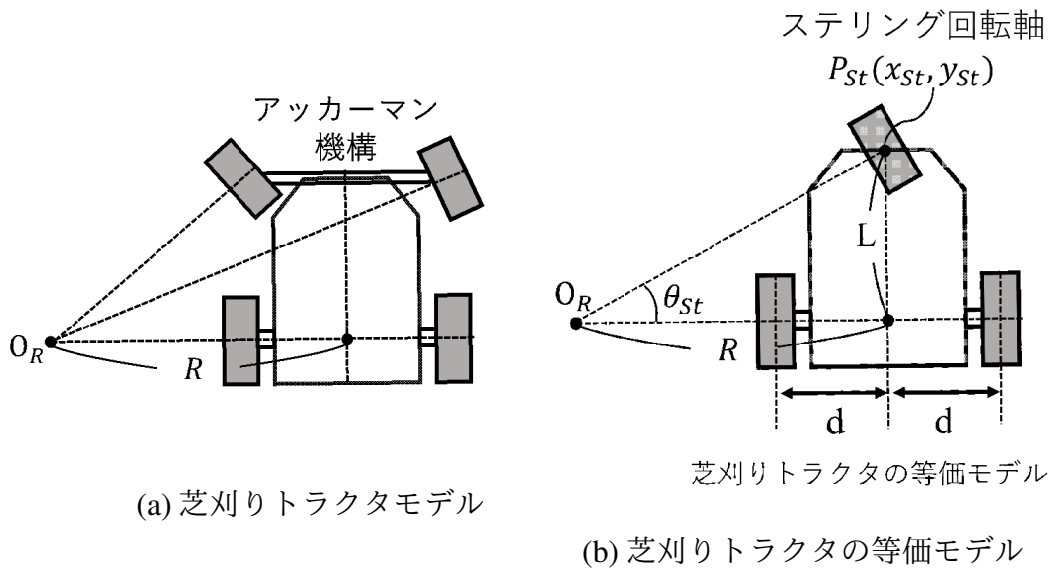


Fig. 6.14: 芝刈りトラクタのモデル化

ここで、 x_{TL} , y_{TL} は直線経路上の芝刈りトラクタの次の目標位置、 x_{St} は芝刈りトラクタの現在位置、 v_{tar} はユーザが設定した走行目標速度、 ΔT はマイコンの制御周期、 R_y は Fig. 6.13 の楕円軌道の y 方向の半径である。直線軌道では往路と復路があるため、往路には $sgn(n) = 1$ になり、復路の際には $sgn(n) = -1$ になることで走行目標の向きを反転させている。また、走行目標経路は芝刈りトラクタの現在位置から次の位置が計算されるため、急激な速度変化がなく追従できる。

次に旋回時の楕円軌道の目標位置を以下に示す。

$$x_{TC} = R_x \cdot \cos\theta_C + L_S(1 - 1^{\frac{1}{2}n-1}) \quad (6.16)$$

$$y_{TC} = R_y \cdot \sin\theta_C - R_y(n - 1) \quad (6.17)$$

$$\theta_C = \frac{\pi}{2} + (-1)^{\frac{1}{2}n} \left(\tan^{-1} \left(\frac{y_R - R_y(1 - n)}{x_R - L_S(1 - 1^{\frac{1}{2}n-1})} \right) + \omega_R \cdot \Delta T \right) \quad (6.18)$$

ここで、 x_{TC}, y_{TC} は楕円軌道の目標位置、 R_x , R_y は楕円の x 方向の軸と y 方向の軸の半径で、 θ_C は次の時間ステップにおける楕円の目標角度、 ω_R はユーザが設定した芝刈りトラクタの回転角速度、 ΔT はマイコンの制御周期である。

次に目標位置に対する芝刈りトラクタの経路追従方について説明する。芝刈りトラクタをモデル化すると Fig.6.14(a) のように後輪は同軸の向きで、前輪はアッカーマン機構により常に後輪軸と 1 点で交わるようになっている。後輪の中心から

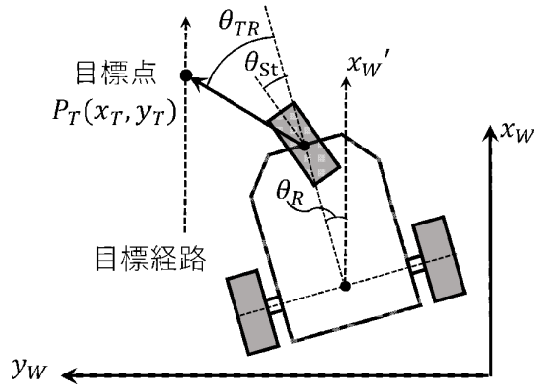


Fig. 6.15: 経路追従の目標点と制御点

回転中心 O_R までの位置を R はトラクタの旋回半径である。Fig.6.14(a) のアッカーマン機構は Fig.6.14(b) のように 1 つのステアリング車輪によって表現することもでき、同様に回転半径 R で旋回する。事前実験により芝刈りトラクタのハンドルと Fig.6.14(b) のステアリング角度 θ_{St} とハンドル角度 θ_H は $\theta_{St} = 9 \cdot \theta_H$ の関係があることが確認された。また、Fig.6.14(b) で走行経路に追従させる制御点 P_{St} は後輪間中心から L の距離があるとする。次に制御点 P_{St} を直線と楕円の目標位置上に制御することについて述べる。ここで簡易化のために初めにトラクタは一定速度で走行しているとして、ハンドル駆動によるステアリング操作のみを用いて経路追従することを考える。目標位置は先述のように芝刈りトラクタの現在位置からユーザが設定した走行速度と角速度に基づいて目標軌道上の次の目標点位置を決定する。芝刈りトラクタの到達可能な最高速度と最高角速度以内に設定することで、制御周期内に目標位置に到達できる。Fig.6.15 に目標点と芝刈りトラクタの位置・姿勢を示した。ここで目標点に追従する方法として、以下の式のように前輪のステアリングを目標点に向けることで追従することができるが、ハンドル駆動の装置と芝刈りトラクタの間で取り付けの誤差が必ず存在しており、また GNSS による芝刈りトラクタの姿勢推定の誤差も存在する。このような誤差がある場合には走行経路に収束できずオフセットが残るため、目標経路との誤差を積分した Δe に重みを付けた項も導入する。

$$\theta_{St} = \theta_{TR} + K \cdot \Delta e \quad (6.19)$$

$$\theta_{TR} = \tan^{-1} \left(\frac{y_{tar} - y_{St}}{x_{tar} - x_{St}} \right) - \theta_R \quad (6.20)$$

ここで、 θ_{St} はステアリング角度、 θ_{TR} は目標点の向きと芝刈りトラクタの向きの差、 K はゲイン係数、 Δe は目標位置と現在位置の誤差、 x_{tar} 、 y_{tar} は目標位置、 x_{St} 、 y_{St} はステアリング軸の位置、 θ_R は芝刈りトラクタの向きである。誤差の積分 Δe は経路の法線方向としており、直線経路であれば進行方向は x 軸方向であるため、 Δe は以下の式で計算される。

$$\Delta e = \int_0^{t_i} (y_{tar}(t) - y_{St}(t)) dt \quad (6.21)$$

また、旋回時の楕円経路に対しては楕円の法線方向の誤差は以下の Δe で計算される。

$$\Delta e = \int_0^{t_i} \left(\sqrt{(y_{NC} - y_{St})^2 + (x_{NC} - x_{St})^2} \right) dt \quad (6.22)$$

$$x_{NC} = R_x \cdot \cos\theta_{NC} + L_S(1 - 1^{\frac{1}{2}n-1}) \quad (6.23)$$

$$y_{NC} = R_y \cdot \sin\theta_{NC} - R_y(n - 1) \quad (6.24)$$

$$\theta_{NC} = \frac{\pi}{2} + (-1)^{\frac{1}{2}n} \tan^{-1} \left(\frac{y_R - R_y(1 - n)}{x_R - L_S(1 - 1^{\frac{1}{2}n-1})} \right) \quad (6.25)$$

ここで、 θ_{NC} は旋回時の楕円軌道中心から見た芝刈りトラクタの方角であり、 x_{NC} 、 y_{NC} は θ_{NC} の方角上の楕円の位置である。

以上のような経路追従法を用いることで計画された芝刈り経路上で自律移動が可能になる。本手法の有効性は 5.1.6 と 5.1.7 節で実機を用いて検証された。

6.1.5 簡易機を用いた実験検証

芝刈りトラクタでの実験検証を行う前に 1 つの RTK-GNSS を用いた自律走行の精度とその精度による自律走行が可能であるについて検証した。既にエンコーダがロボットに取り付けられている場合には 1 つの RTK-GNSS のみを使用する場合は、エンコーダと RTK-GNSS を組み合わせることで自律走行が可能であることを示す。開発した簡易機と基準局を Fig.6.16 に示す。開発した簡易機は後輪にある 2 つのインホイールモータを用いることで、直進と旋回の 2 自由度をもつ。簡易機は GNSS 信号を受信するアンテナ、制御ボックスから構成されており、RTK 演算を行うモジュールやモータ制御を行うマイコン、表示用ディスプレイは制御ボックス内に収納されている。また、モータ制御は速度制御を利用しており、モータ

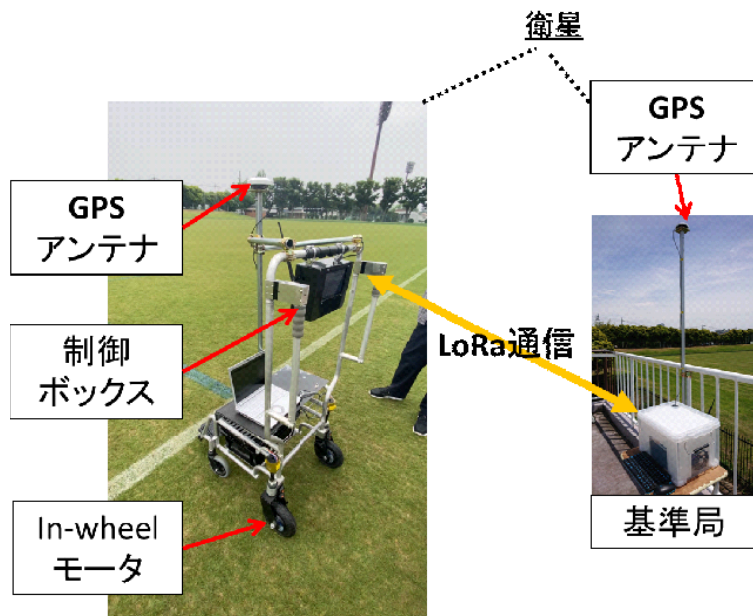


Fig. 6.16: 簡易機と基準局の構成

に内蔵されている 10bit のエンコーダを用いてマイコンでモータドライバを介して制御している。簡易機の電装品類の構成は Table 6.2 に示す。マイクロコンピュータは移動局と基準局から得られた GNSS 信号をもとに GNSS 測位のオープンソースライブラリ群の RTKLIB を用いて RTK 演算を行って測位を行う。一方でマイクロコントローラはモータ制御等のローレベルの処理を行うほか、測位結果に基づいた経路追従制御をリアルタイムで処理する。また、移動局である簡易機と基準局の間は 920MHz 帯 LoRa(Long Range) モジュール ES920LR を使用することで基準局が簡易機と数 km 離れた場合でも RTK 測位が可能となる。また、この通信規格は通信速度が比較的に低いとされているが、事前実験より RTK 測位には十分な速度と距離範囲を持ち、遅延もないことが確認されている。

本簡易機では 1 つの RTK-GNSS モジュールの精度確認およびその精度が自律走行に用いることができるかを確認することを目的としているため、ロボットの制御システムは Fig.6.17 のように構築した。自律走行の経路計画は先述のようなものとなっているが、ロボットの位置情報は基本的に 1 つの RTK-GNSS モジュールから取得しており、姿勢情報は左右の駆動モータからの差分により計算されている。また、モータ制御は速度制御となっている。経路計画に関しては芝刈りトラクタとは異なり、後輪差動駆動であるため、以下の手法を用いた。

まず、ロボットの現在位置目標位置を $Z_t = (x_t, y_t)$ 、RTK-GNSS から計算された

Table 6.2: 簡易機の電装品類

Microcomputer	Raspberry Pi 4 Model B (Raspberry Pi Foundation)
Microcontroller	SAM3X8E (Microchip Technology Inc.)
GNSS modules	NEO-M8P-2 (U-blox)
GNSS アンテナ	QZG1a (小峰無線電機)
無線モジュール	ES920LR (EASEL Inc.)
Battery	24V 9Ah Lead-acid battery (Kung Long Batteries Industrial Co., Ltd.)
Motor driver	ZLAC706 (Shenzhen ZhongLing Technology Co., Ltd.)

現在位置を $\mathbf{Z}_a = (x_a, y_a)$ とすると偏差 $\Delta\mathbf{Z}_t$ は復帰の経路であり，以下のように3次の時間 t に関する方程式として表すことができる．

$$\Delta\mathbf{Z}_t = \mathbf{Z}_t - \mathbf{Z}_a = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 \quad (6.26)$$

ここで， t は経過時間， a_i は時間に対する係数であり， $\mathbf{a}_i = (a_{xi}, a_{yi})$ である．また，式(6.26)を微分して速度偏差 $\Delta\dot{\mathbf{Z}}_t$ は以下のように得る．

$$\Delta\dot{\mathbf{Z}}_t = \dot{\mathbf{Z}}_t - \dot{\mathbf{Z}}_a = a_1 + 2a_2t + 3a_3t^2 \quad (6.27)$$

現時刻を0として T 秒後に実際位置に到達できると仮定すると，位置偏差と速度偏差に方程式が求まる．以下の x 方向のみを示す．

$$a_{0x} + a_{1x}t + a_{2x}t^2 + a_{3x}t^3 = x_t - x_a \quad (6.28)$$

$$a_{1x} + 2a_{2x}t + 3a_{3x}t^2 = \dot{x}_t - \dot{x}_a \quad (6.29)$$

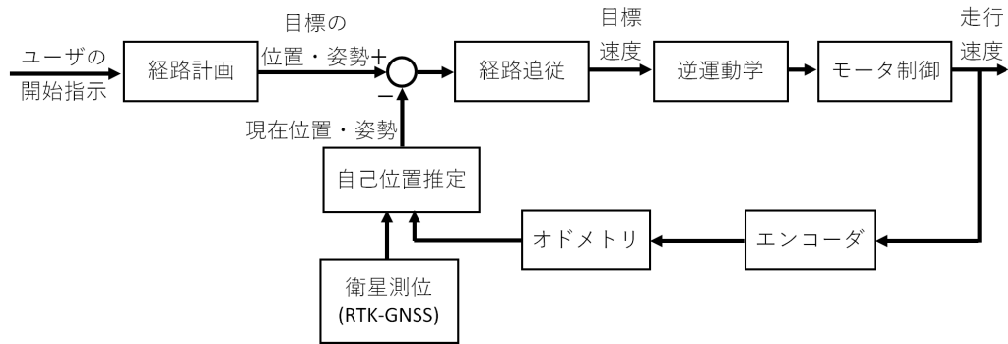


Fig. 6.17: 簡易機の制御システム

ここで、 \dot{x}_t は目標の速度． \dot{x}_a は実際の速度である．現在時刻 $t=0$ と目標位置に到達する時刻 $t=T$ を考えると，以下のように係数 a_{ix} を求めることができる．

$$a_{0x} = x_t(0) - x_a(0) \quad (6.30)$$

$$a_{1x} = \dot{x}_t(0) - \dot{x}_a(0) \quad (6.31)$$

$$a_{0x} + a_{1x}T + a_{2x}T^2 + a_{3x}T^3 = x_t(T) - x_a(T) \quad (6.32)$$

$$a_{1x} + 2a_{2x}T + 3a_{3x}T^2 = \dot{x}_t(T) - \dot{x}_a(T) \quad (6.33)$$

式 (6.30) から式 (6.33) の方程式を解くことで係数 a_{ix} を求めることができる．また， y 方向のパラメータも同様の方法で決められる．

簡易機と基準局，走行経路は Fig.6.18 のような位置に設置して検証実験を行った．走行経路は直線方向で 30m，旋回時の回転半径は 1m とした．また，目標速度は 1m/s と設定した．検証実験の結果を Fig. 6.19 に示す．結果を解析したところ，RMS(二乗平均平方根誤差) は 2cm であり，平均誤差と標準偏差は 3mm と 2.6cm であった．この結果より 1つの RTK-GNSS とエンコーダによるオドメトリで十分な走行精度を得られたことを確認できた．

6.1.6 芝刈りトラクタの模擬機を用いた実験検証

次に芝刈りトラクタのための Dual RTK-GNSS による位置・姿勢推定及び経路追従法の検証を行う．芝刈りトラクタに取り付ける前に芝刈り機を模した Fig. 6.20

のような模擬機を作成して検証を行った。模擬機は芝刈りトラクタと同じように前輪に操舵輪があり、後輪は1つの駆動輪が配置されている。前輪の総舵輪はハンドルと結合しており、総舵輪とハンドルの回転比率は芝刈りトラクタを計測した結果から、ハンドル回転数：総舵輪回転数=1：9とした。操縦ハンドルには製作したステアリング操縦装置が取り付けられている。また、後輪には1つの電動モータが取り付けられており、定速での走行が可能である。製作したステアリング操縦装置を Fig.6.21 に示す。

一方で実機の位置・姿勢推定のために、Fig.6.20Dual GNSS のようにアンテナが前方に取り付けられており、演算モジュールやマイコンなどは制御ボックス内に組み込まれている。マイコンなどや電装品は簡易機と同様に Table 6.2 の構成となっている。

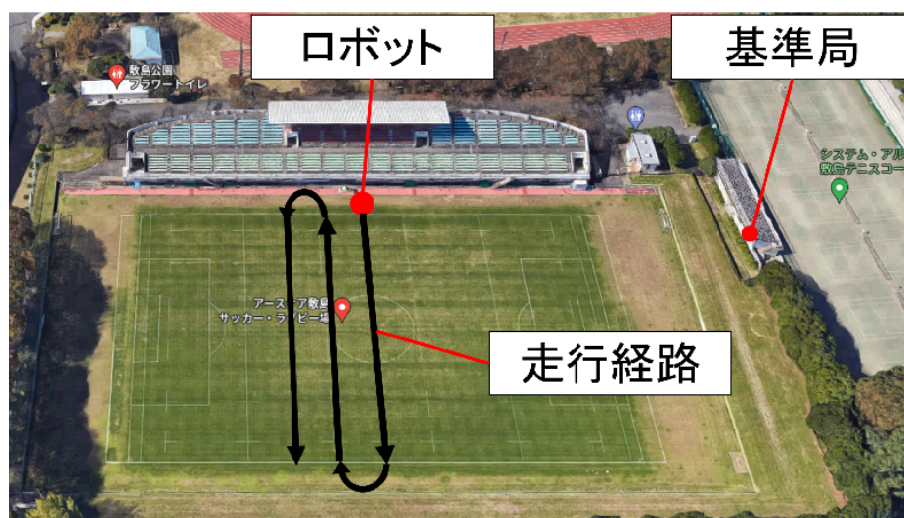


Fig. 6.18: 簡易機と基準局の位置

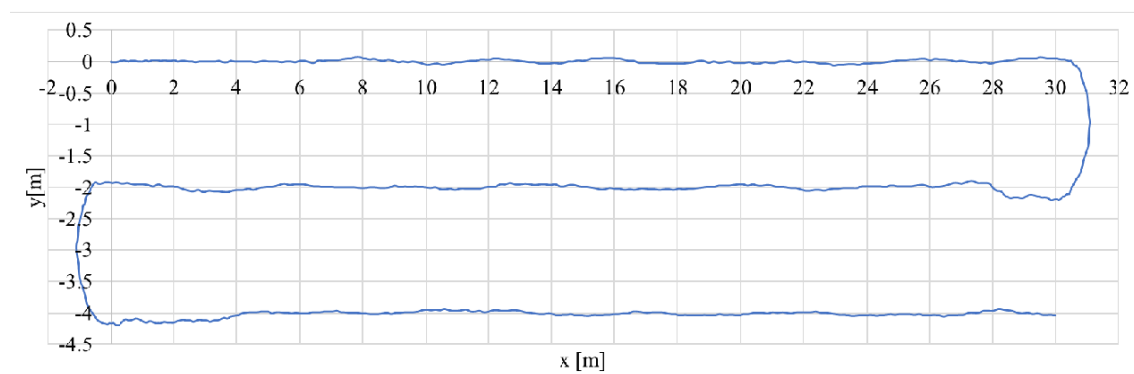


Fig. 6.19: 簡易機での走行実験結果

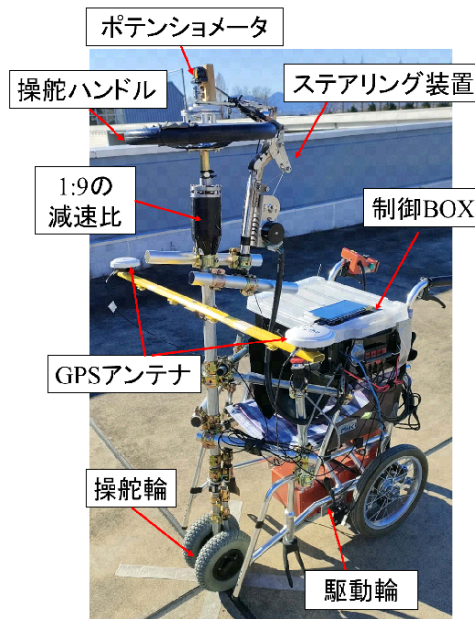


Fig. 6.20: 芝刈りトラクタの模擬機の構成

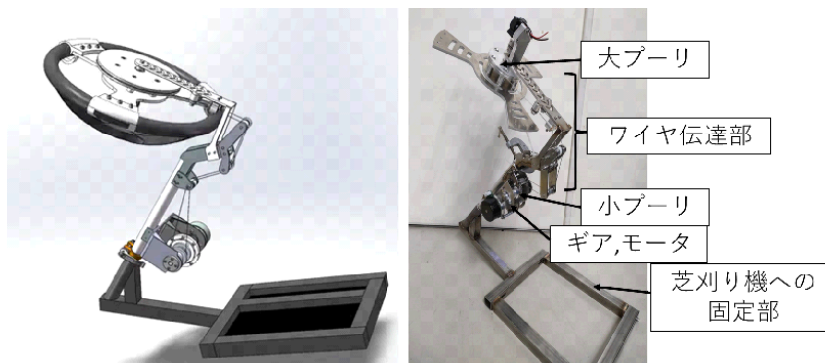


Fig. 6.21: 開発したステアリング操縦装置

模擬機での走行検証実験を行ったところ、Fig.6.22のような結果が得られた。模擬機での走行精度を直線区間と旋回区間で評価した。評価方法として、経路にたいしての垂直方向の誤差とし、進行方向に対して左側であれば正の誤差、右側であれば負の誤差とする。分析結果では経路の垂直方向の誤差は直線区間で平均2.9cm、標準偏差3.4cm、RMSは2.9cmである。また旋回区間での誤差は平均9.8cm、標準偏差6.3cm、RMSは9.8cmであった。実験結果での誤差はほぼ経路の方向に対して左側にある結果が得られたため、平均とRMSが同じ値になった。このことから時計回りへのハンドル操作量が不足していることが明らかになった。旋回区間での誤差が直線区間より大きい結果になってしまったが、芝刈りが必要な直線区

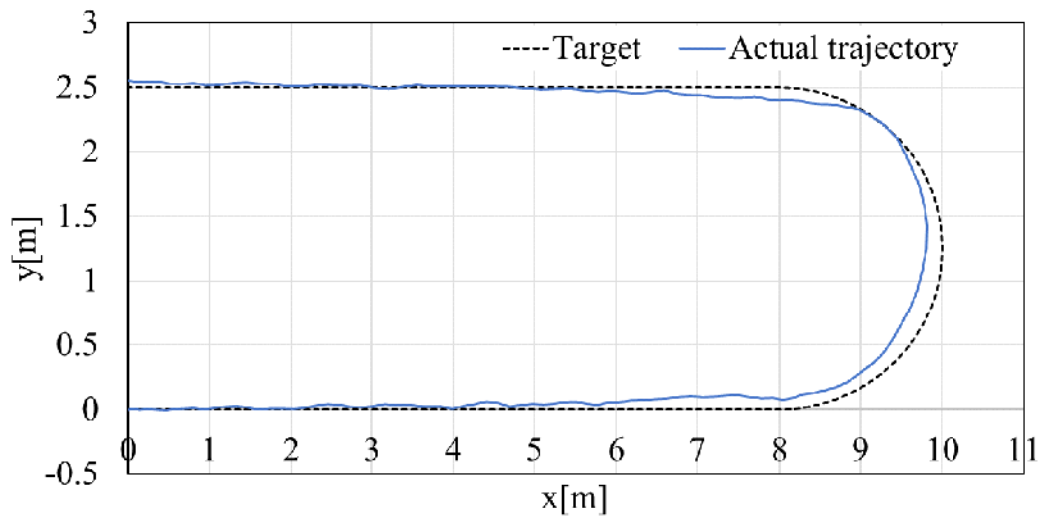


Fig. 6.22: 模擬機での検証結果

間においては誤差が小さく芝刈り用途では刈り幅をある程度のマージンで重ねるため、十分な精度であったと言える。

6.1.7 芝刈りトラクタを用いた実験検証

最後に芝刈りトラクタでの検証を行った。ステアリング操縦装置のシステム構成は模擬機と同様であり、取り付け後の様子を Fig. 6.23 に示す。芝刈りトラクタは共同研究先の実機であり業務にも使用されるため自由に検証実験を行うことが困難であり、ここでは直線経路の検証結果のみを示す。走行環境は Fig.6.18 のようなグラウンド上であり、走行速度はドライバの肩にペダルを操縦してもらい速度は約 0.7m/s 程度であった。芝刈りトラクタでの検証実験結果を Fig. 6.24 に示す。検証結果より、誤差は RMS で 3.3cm，平均誤差 2.6cm，標準偏差 3.1cm であった。この結果はおおよそ簡易機の直線上での走行結果（平均 2.9cm，標準偏差 3.4cm，RMS は 2.9cm）に一致している。

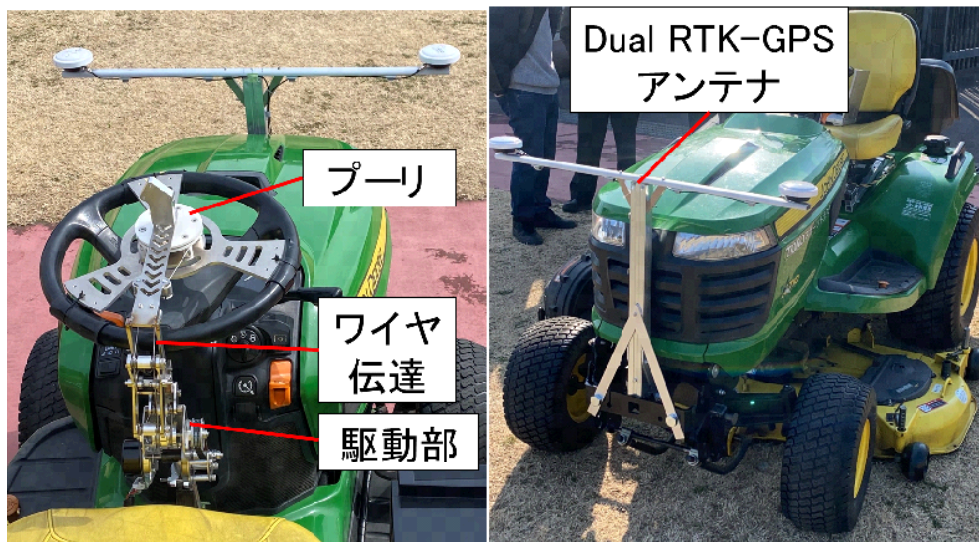


Fig. 6.23: 後付け自動運転装置を取り付けたトラクタ

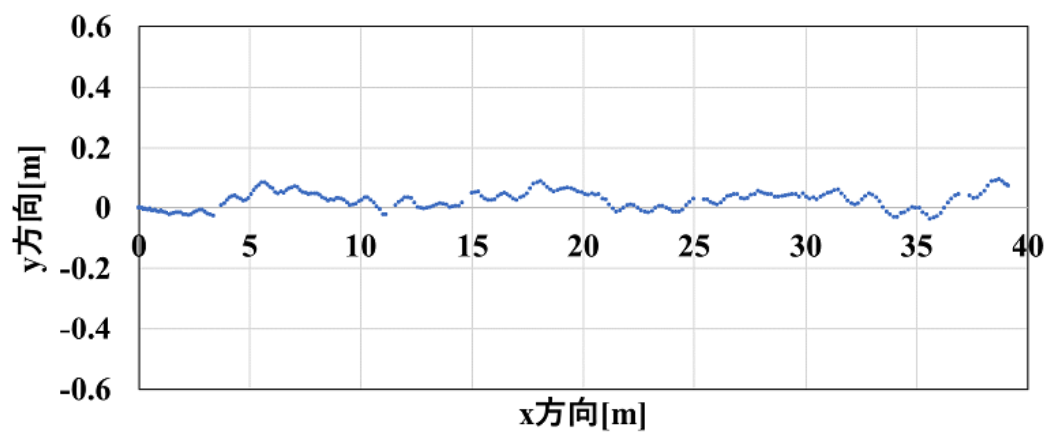


Fig. 6.24: 後付け自動運転装置を取り付けたトラクタの直線走行結果

6.2 屋内での自律走行

5.1 節では GNSS 信号が届く見晴らしが良い屋外環境で Dual RTK-GNSS を用いた自己位置推定手法，直線と旋回軌道の芝刈り経路，芝刈りトラクタのハンドルを操縦して経路に追従する手法を提案・検証した．芝刈り簡易機や模擬機，実機での検証を経て，芝刈りに十分なる走行精度を実現することができた．この 2.2 節では屋内での自律走行を考える．屋内は GNSS 信号が届かないため，LiDAR などの測距センサを用いた自己位置推定を利用した自律走行を提案する．本研究ではケーススタディとして屋外用自律移動ロボットには屋内ではゴルフバッグの自動搬送機を開発して，実機検証を経て提案システムの有効性を検証する．

6.2.1 ゴルフバッグ搬送機の構成

本ゴルフバッグ搬送機の自律移動システムは企業から協力をいただいております，実用性も考慮して共同研究を進めてきた．共同研究の背景として，現在の一部のゴルフ場では Fig.6.25 のように顧客のゴルフバッグを受付からゴルフコースまで搬送する際に狭い屋内を通り搬送する必要がある．また山間部に位置しているため，屋内で複数のゴルフバッグを搭載した状態で急勾配なスロープ（一部のゴルフ場では）を乗り越えて走行する必要がある．これまでは狭路を確実に移動できるかつ急勾配を上れるようにモノレール式の搬送機を用いてきた．モノレール式の搬送機は走行経路から外れないことと高負荷にも対応できるが，機械的な摩耗が激しく経年劣化がしやすいため，毎月のメンテナンスが必要である．また，初期導入時や撤去時には手間とコストがかかる．そこで，本研究では測距センサの LiDAR を用いて自己位置推定を行い，4 輪駆動にすることで急勾配スロープでのスリップを防止して安全に走行できる自動搬送機を開発した．

本 5.2 節では LiDAR による自己位置推定手法と 4 輪駆動の搬送機の経路計画手法を提案して検証を行う．LiDAR の自己位置推定手法はパーティクルフィルタに基づく手法 [101–103]，繰り返し計算が必要となる ICP 等のスキャンマッチング手法 [61,62] が存在しており，複雑な環境に対応できる汎用性があるが，リアルタイムで高速な走行を行うためには高性能な制御用 PC が必要になる．本研究は最小二乗法をベースとした自己位置推定手法と 4 輪駆動車両の経路追従法を提案し，狭路で高い走行精度と数十回の走行試験でその走破の確実性を検証した．

ゴルフバッグ搬送機の設計と開発した実機を Fig.6.26 に示す．開発した搬送機は前

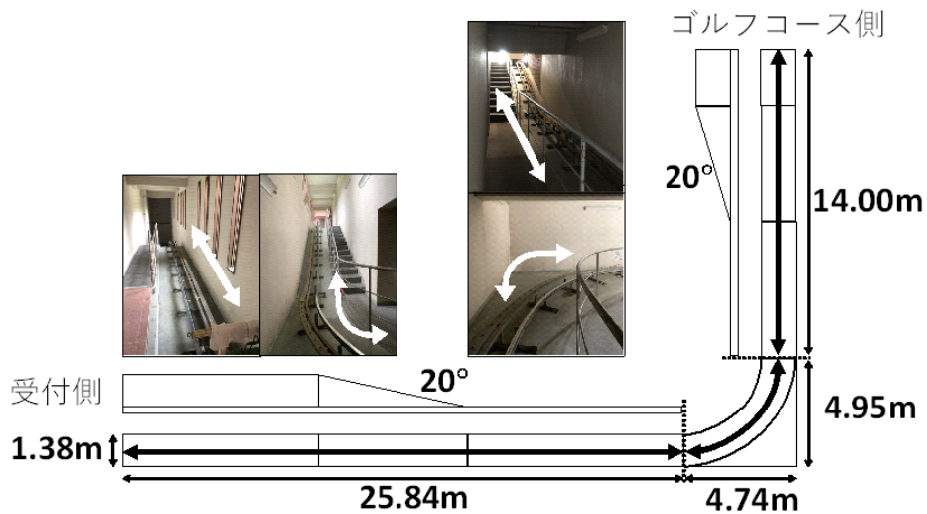


Fig. 6.25: ゴルフバッグの搬送径路

輪にステアリングモジュールがあり，後輪は車体に固定させている．それぞれの車輪には大型のインホイールモータ (ZLLG10ASM800-R, Shenzhen Zhongling Technology Co., Ltd) を使用しており，1つあたりの定格トルクは 40Nm で合計 160Nm のトルクを出力することができる．インホイールモータの性能の詳細を Fig. 6.4 に示す．ゴルフバッグ搬送機と搭載されるゴルフバッグの重量はそれぞれ 250kg と 120kg を想定しており，走行するスロープは 20度の勾配であるため，必要なトルクは約 150Nm ($\cong 370 \cdot g \cdot r \cdot \sin(20^\circ)$)， g は重力加速度， r は車輪径 0.12m) である．また，電装品の詳細を Table 6.5 に示す．室内での自律走行には 2D-LiDAR を用いており，車体の前後に 1つずつの 2D-LiDAR を配置することでコース内を往復走行する．選定した 2D-LiDAR の性能を Table にまとめる．2D-LiDAR の走査範囲は 240度であるが，搬送機に取り付けることで最大約 180度になっている．LiDAR データの受信と処理にはマイクロコンピュータのラズベリーパイ 4 Model B を使用した．また，マイクロコントローラ (SAM3X8E) では 4つの駆動輪の速度制御，ステアリングモジュールの角度制御，走行経路の追従を行っている．ステアリングモジュールの角度範囲は $\pm 20^\circ$ であり，これを検出するために非接触のロータリポテンシオメータ (CP-3HABS) を使用した．一方で駆動モータと制御回路の電源供給には 48V160Ah のリチウムイオンバッテリーを使用する．

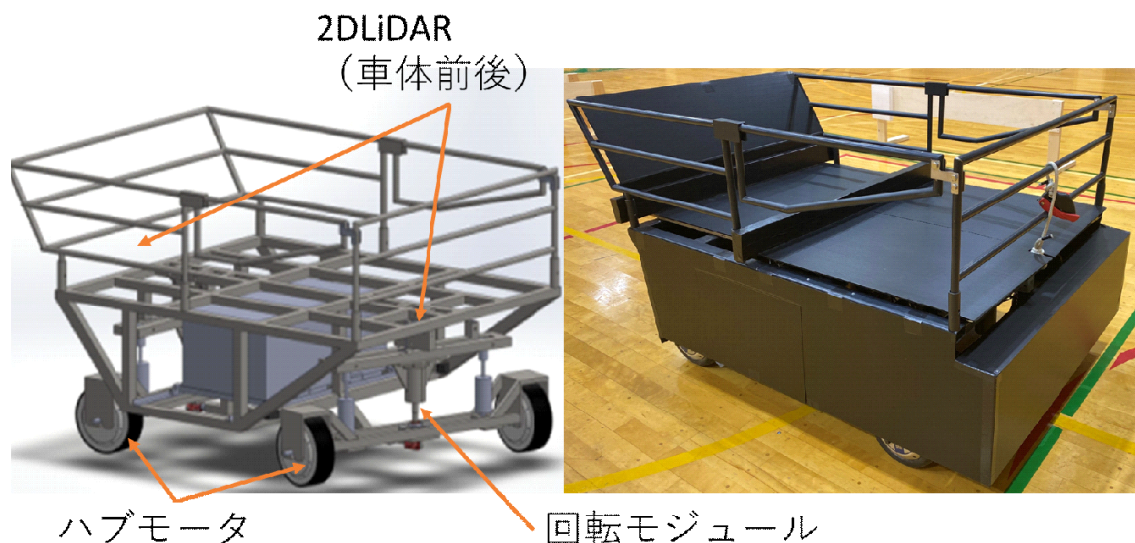


Fig. 6.26: 開発したゴルフバッグ自動搬送機

Table 6.3: Motor specification (ZLLG10ASM800-R, Shenzhen Zhongling Technology Co., ltd)

Motor power	800W
Nominal voltage	48V
Nominal torque	40Nm
Nominal speed	200RPM
Wheel radius	0.12m
Encoder resolution	1024PPR

6.2.2 LiDAR を用いた自己位置推定手法

本搬送機で想定している使用状況は Fig. 6.25 のような環境であり，作業座標系で表すと Fig. 6.27 になる．往路走行は始点 P_s から直線走行し， x_w 方向に S_1 進むと楕円のカーブに差し掛かる．そして，カーブ区間が終わると y_w 方向に S_2 進み，終点の P_g に到達する．復路は逆の手順で P_g から P_s に向かって走行をしていく．走行経路には 1st Wall, 2nd Wall, 3rd Wall の3つの壁があり，LiDAR によって認識される．しかし，内側にある壁 3rd Wall は Fig. 6.25 からわかるように柵になっており，柵の向こうには人の通行もある．1st Wall, 2nd Wall は固体の壁であり，外乱が入って変化することもないため，この2つの壁を LiDAR でスキャンして自己位

Table 6.4: 2D-LiDAR specification (URG-04LX, Hokuyo Automatic Co., Ltd) [104]

検出距離	0.02-5.6m
距離精度	0.06-1m : $\pm 10mm$ 1-4m : 1%
距離分解能	1mm
走査角度範囲	240度
角度分解能	約 0.36度
走査時間	0.1s/scan

Table 6.5: ゴルフバッグ搬送機の電装品類

Microcomputer	Raspberry Pi 4 Model B (Raspberry Pi Foundation)
Microcontroller	SAM3X8E (Microchip Technology Inc.)
Potentiometer	CP-3HABS (Midori Precisions Co., Ltd)
Battery	48V 160Ah Lithium-ion battery (ChangZhoushi Jiulian Xinnengyuan LLC)
Motor driver	ZLAC706 (Shenzhen ZhongLing Technology Co., Ltd.)

置推定を行うことを考える。

往路では Fig. 6.28 のように前方の LiDAR を用いて 2 つの壁を認識する。1st Wall 上の点を P_i から P_j の点群を識別しており、2nd Wall 上の点では P_m から P_n の点群を認識しているとする。1st Wall は x_W 軸上にあるためその距離を求めることで、搬送機の前 LiDAR の位置 P_F の y_W 座標を求めることができる。また、2nd Wall は y_W 軸から $S_1 + R_{cx} + W$ の距離離れて平行しているため、2nd Wall との距離を求めることで、 P_F の x_W 座標を求めることができる。Fig.6.27 の走行経路より走行開始時は 2nd Wall は LiDAR で検知できず、1st Wall のみを検出して y_W 方向の位置 y_F を推定する。カーブ区間前に入ると LiDAR で 2nd Wall も検出できるようになり、 x_W 方向の位置 x_F が推定される。 (x_F, y_F) 位置が回転経路に入ると、1st Wall がや

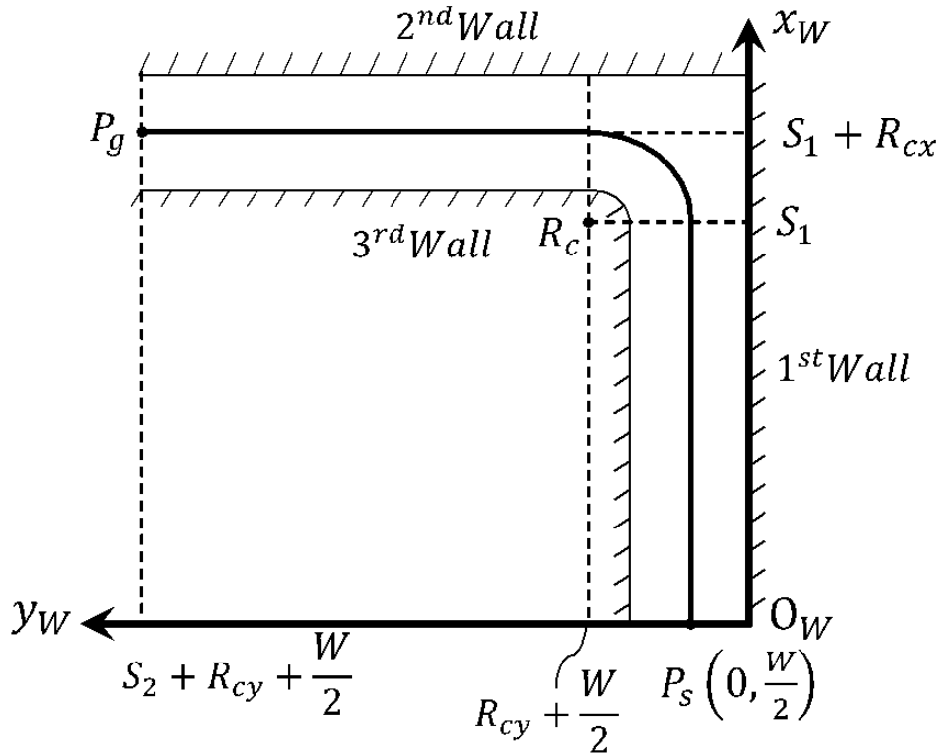


Fig. 6.27: 自律走行の経路

が検出できなくなり、 x_W の方向の位置のみを更新する。そして、2つ目の直線区間では 2^{nd} Wall のみを検出して経路を追従して目標点に到達する。以上のように 2D-LiDAR のみでも必要な区間での自己位置推定が可能であるが、LiDAR のスキャン周期は最大 0.1s であり、高速で走行することが困難である。そこで、本搬送機では駆動モータのエンコーダを用いたオドメトリと組み合わせることで、ミリ秒単位の自己位置推定と制御を行い、LiDAR による自己位置推定でオドメトリの誤差を校正する。

$$x_F = S_1 + R_{cx} + \frac{W}{2} - L_x \quad (6.34)$$

$$y_F = L_y \quad (6.35)$$

ここで、 S_1 は1つ目の直線区間の距離、 R_{cx} は楕円区間の x 軸の径、 W は通路の道幅である。また、 L_x 、 L_y はそれぞれ 2^{nd} Wall と 1^{st} Wall との垂直距離であり、2D-LiDAR から推定される。はじめに 1^{st} Wall から L_y を推定する方法を述べる。Fig. 6.28 での点群 P_i から P_j は 1^{st} Wall の一部であり、これを直線式に変換して LiDAR

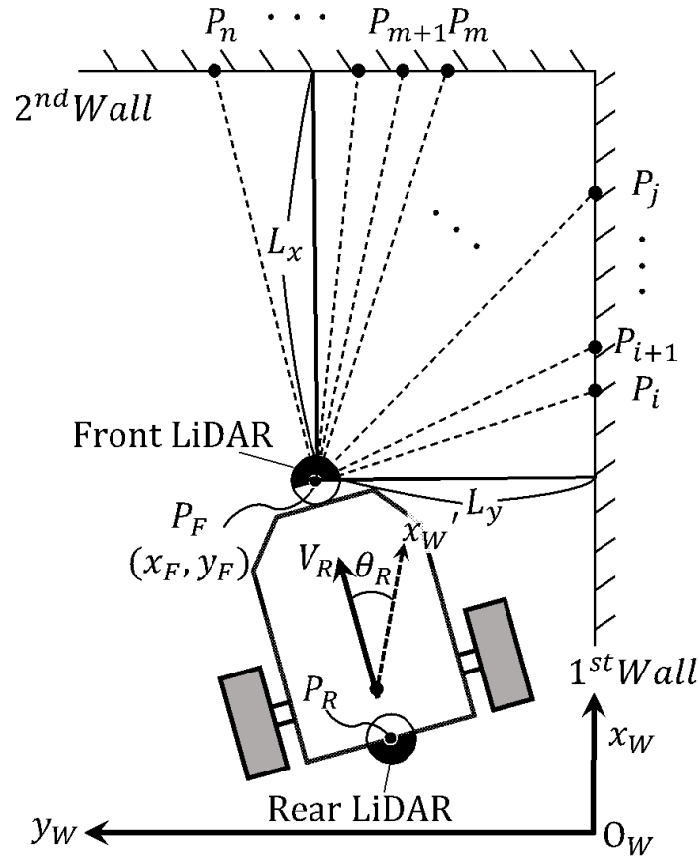


Fig. 6.28: LiDAR による自己位置推定手法

の原点との垂直距離を計算していく．また，直線式が得られれば直線の傾きからロボットの姿勢 θ_R を推定することが可能になる．

点群 P_i から P_j はを1つの直線で表すには誤差を最小にする最小二乗法が用いられるが，最小にする誤差は関数の出力の誤差であり，例えば $y = ax + b$ という関数であれば， y 方向の誤差が最小になる．しかし，壁の点群位置は y 方向のみでなく， x 方向にも誤差を持っている．そこで，媒介変数を用いて y 方向の誤差だけでなく， x 方向の誤差も低い条件で算出される直線を導出する．まず，時間 t と点の x 座標， y 座標の関係を以下の式とする．

$$x = \hat{A}t + \hat{B} \quad (6.36)$$

$$y = \hat{C}t + \hat{D} \quad (6.37)$$

ここで， \hat{A} ， \hat{B} ， \hat{C} ， \hat{D} は係数であり，最小二乗法により推定される．媒介変数の t

を消した x と y の関係は以下ようになる。

$$y = \frac{\hat{C}}{\hat{A}}x + \frac{\hat{A}\hat{D} - \hat{B}\hat{C}}{\hat{A}} \quad (6.38)$$

係数 \hat{A} , \hat{B} は以下の最小二乗法で計算される。

$$\hat{A} = \frac{\sigma_{xt}}{\sigma_t^2} \quad (6.39)$$

$$\hat{B} = \bar{x} - \hat{A} \cdot \bar{t} \quad (6.40)$$

ここで σ_{xt} は x と t の共分散. σ_t^2 は t の分散, \bar{x} は x の平均, \bar{t} は t の平均である, また, 係数 \hat{C} , \hat{D} も同様に以下の最小二乗法で計算される。

$$\hat{C} = \frac{\sigma_{yt}}{\sigma_t^2} \quad (6.41)$$

$$\hat{D} = \bar{y} - \hat{C} \cdot \bar{t} \quad (6.42)$$

ここで σ_{yt} は y と t の共分散. \bar{y} は y の平均である. 式 (6.39) から式 (6.42) を式 (6.38) に代入することで, 計測された点群から壁の近似式を導出することができる. そして, 搬送機と壁の垂直向き方向の距離 d_R は以下の式で計算される。

$$d_R = \frac{|\hat{C}x_0 - \hat{A}y_0 + \hat{A}\hat{D} - \hat{B}\hat{C}|}{\sqrt{\hat{A}^2 + \hat{C}^2}} \quad (6.43)$$

ここで, 検出している壁が 1st Wall である場合は式 (6.35) で $L_y = d_R$, 2nd Wall である場合は式 (6.34) で $L_x = d_R$ となる. 式 (6.34) と式 (6.35) を計算することで, 搬送機の自己位置推定が行われる. また, 搬送機の姿勢 θ_R は壁の近似直線の推定式 (6.38) より, 以下のように計算される。

$$\begin{aligned} \theta_R &= -\tan^{-1} \frac{\hat{C}}{\hat{A}} + \theta_{Wall} \\ &= -\tan^{-1} \frac{\sigma_{yt}}{\sigma_{xt}} + \theta_{Wall} \end{aligned} \quad (6.44)$$

$$\theta_{Wall} = \begin{cases} 0 & \text{if Wall 1} \\ \frac{\pi}{2} & \text{if Wall 2} \end{cases} \quad (6.45)$$

6.2.3 オドメトリでの自己位置推定手法

オドメトリは車輪の回転量からロボットの瞬時の姿勢変化と速度を計算して、それを積算することで自己位置推定を行う方法である。LiDARによる自己位置推定と比較してオドメトリの誤差にはタイヤのスリップによる計測誤差や走行する非平面の路面に由来する誤差がある。オドメトリは積算処理であるためロボットの移動につれ誤差が蓄積され、実際の位置から離れていくことが知られている。本搬送機は室内で走行する4輪駆動であり、重量物を搬送するためスリップは発生する危険性は比較的少ないと思われるが、重量物によるタイヤの変形があり誤差要因になっている。しかし、短時間であれば誤差の蓄積は少ないため、先述したLiDARによる自己位置推定と組み合わせて使用する。LiDARによる自己位置推定は0.1秒ごとであるため、オドメトリは0.1以内で0.001秒ごとの自己位置推定を行い経路追従をしていく。このとき、搬送機を速度を1m/sとすると追従の分解能は理論上で1mm単位(=1m/s・0.001s)である。

オドメトリでより自己位置推定について関係式を導出する。Fig. 6.29の搬送機モデルより搬送機速度 $[\dot{x}_R, \dot{y}_R]$ は以下のように表される。

$$\begin{aligned} \dot{P}_R &= \begin{bmatrix} \dot{x}_R \\ \dot{y}_R \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \cos\theta_{St} & \cos\theta_{St} \\ \sin\theta_{St} & \sin\theta_{St} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{Fl} \\ v_{Fr} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6.46a)$$

$$= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -\frac{L}{d} & \frac{L}{d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{Rl} \\ v_{Rr} \end{bmatrix} \quad (6.46b)$$

ここで、 θ_{St} はステアリング角度、 $v_{Fl}, v_{Fr}, v_{Rl}, v_{Rr}$ はそれぞれ前左輪、前右輪、後左輪、後右輪の速度である。ステアリングの角度はステアリング軸にあるポテンシオメータから計測され、車輪の速度はインホイールモータに内蔵されているエンコーダにより算出する。搬送機は前2輪と後2輪があるため、前輪を用いた計算式(6.46a)は後輪を用いた計算式(6.46b)と理論上で一致する。しかし、前輪もしくは後輪でスリップなどが起こる場合も考えられるため、スリップが起きた際にはスリップしていない方の式を使用することで正確なより位置推定ができる。Fig. 6.30のような世界座標系での搬送機のx方向とy方向の微小変位を積算することで搬送機の位置 P_R を求めることができる。

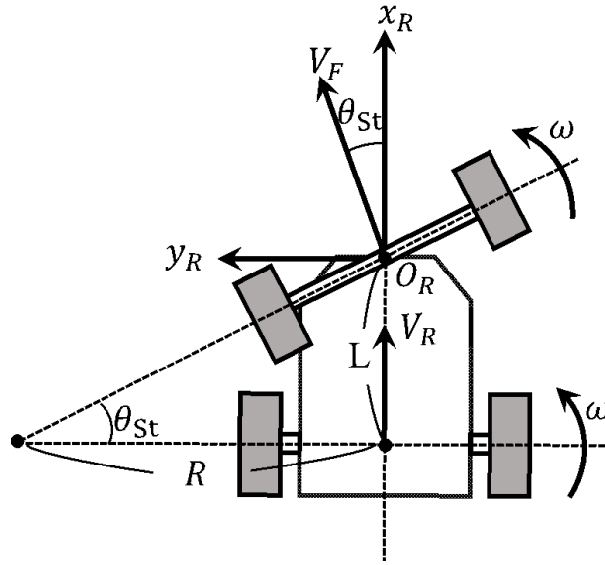


Fig. 6.29: ロボット座標系でのモデル

$$x_R = \int_0^T \dot{x}_R \cdot \cos\theta_R dt \quad (6.47)$$

$$y_R = \int_0^T \dot{y}_R \cdot \sin\theta_R dt \quad (6.48)$$

$$\theta_R = \int_0^T \frac{\dot{y}_R}{L} dt \quad (6.49)$$

ここで、 θ_R は搬送機の世界座標系での搬送機の姿勢、 T は現在時間である。式(6.47)から式(6.49)を用いることでオドメトリにより搬送機の位置と姿勢を求めることができる。先述のようにオドメトリによる自己位置推定は積算誤差があるため、LiDARによる自己位置推定の補間として用いる。

6.2.4 追従手法

搬送機の走行経路は Fig.6.27 のような2つの直線区間と1つのカーブ区間から構成されている。走行経路は次のように記述される。

$$x_{Tar} = \begin{cases} x_R + V_{Tar} \cdot \Delta T & \text{if in 1}^{st} \text{ straight-path section} \\ S_1 + R_{cx} \cdot \cos(\theta_c + \omega_{Tar} \cdot \Delta T) & \text{if in curve-path section} \\ S_1 + R_{cx} & \text{if in 2}^{nd} \text{ straight-path section} \end{cases} \quad (6.50)$$

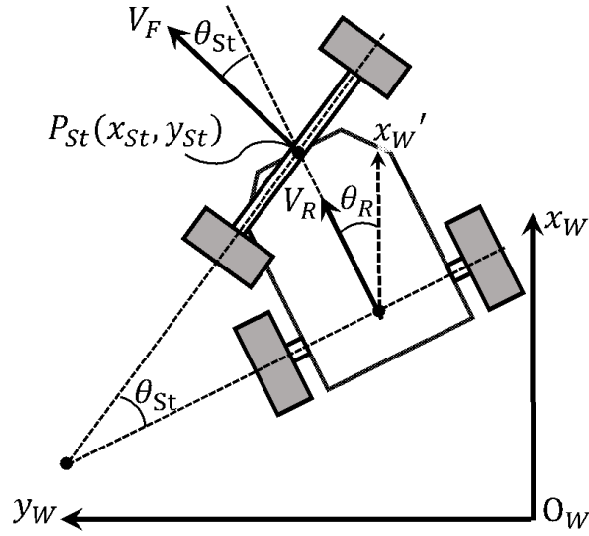


Fig. 6.30: 世界座標系でのモデル

$$y_{Tar} = \begin{cases} \frac{W}{2} & \text{if in 1}^{st} \text{ straight-path section} \\ \frac{W}{2} + R_{cy} \cdot (1 + \sin(\theta_c + \omega_{Tar} \cdot \Delta T)) & \text{if in curve-path section} \\ \frac{W}{2} + R_{cy} + V_{Tar} \cdot \Delta T & \text{if in 2}^{nd} \text{ straight-path section} \end{cases} \quad (6.51)$$

$$\theta_c = \tan^{-1} \frac{y_R - R_{cy} - W/2}{x_R - S_1} \quad (6.52)$$

ここで、 V_{Tar} 、 ω_{Tar} はそれぞれユーザ設定した搬送機の目標走行速度と目標回転速度である。

Fig. 6.31 のように走行経路上の目標点 $[x_{Tar}, y_{Tar}]$ に追従することを考えると、追従方位にステアリングを旋回させることで目標点に到達することができる。ステアリングの目標角度は以下のように算出される。

$$\theta_{tar} = \tan^{-1} \frac{y_{Tar} - y_R}{x_{Tar} - x_R} - \theta_R \quad (6.53)$$

ステアリングの目標角度 θ_{Tar} とユーザの設定した走行速度を用いることで、搬送機の目標速度 $[\dot{x}_{Tar}, \dot{y}_{Tar}]$ が定まる。

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{Tar} \\ \dot{y}_{Tar} \end{bmatrix} = v_{Tar} \begin{bmatrix} \cos\theta_{Tar} \\ \sin\theta_{Tar} \end{bmatrix} \quad (6.54a)$$

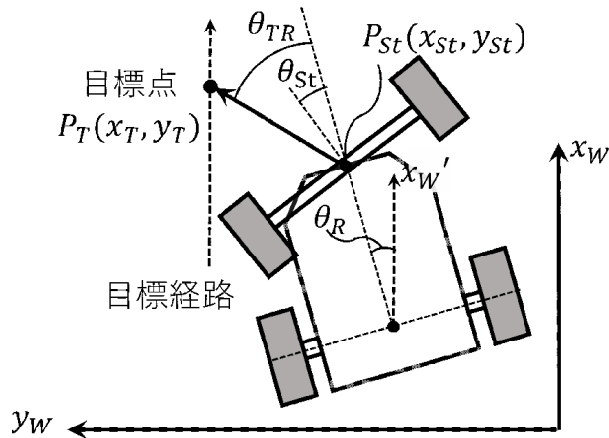


Fig. 6.31: 目標経路への追従手法

$$\begin{bmatrix} v_{Fl} \\ v_{Fr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\cos\theta_{Tar}} & -d \\ \frac{1}{\cos\theta_{Tar}} & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_{Tar} \\ \omega_{Tar} \end{bmatrix} \quad (6.55a)$$

ここで、Fig. 6.29 より搬送機のステアリング角度 θ_{St} 、速度 V_F 、角速度 ω_R は拘束条件より以下の関係になる。

$$\tan\theta_{St} = \frac{L}{R} = L \frac{\omega_R}{V_F} \quad (6.56)$$

$$\omega_R = \frac{V_F}{L} \cdot \tan\theta_{St} \quad (6.57)$$

式 (6.57) より速度 V_F とステアリング角度 θ_{St} が決まることで角速度も決定される。つまり、ユーザが設定した速度 V_{Tar} 、経路復帰のためのステアリング目標角度 θ_{Tar} が決まると、式 (6.55) より前輪の目標速度が決定される。また、後輪は以下の式により目標速度が決定される。

$$\begin{bmatrix} v_{Bl} \\ v_{Br} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{d}{L} \\ 1 & \frac{d}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_{Tar} \\ \dot{y}_{Tar} \end{bmatrix} \quad (6.58a)$$

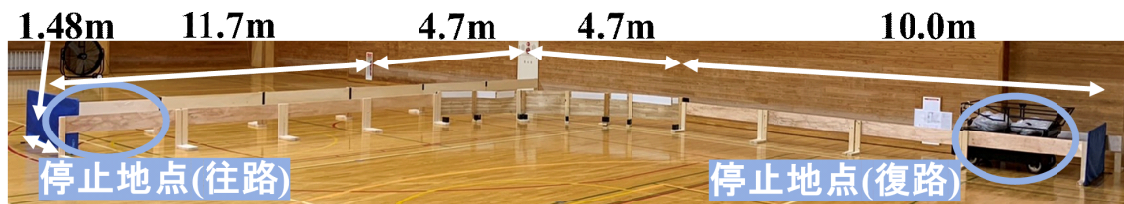


Fig. 6.32: 自律移動環境の構成

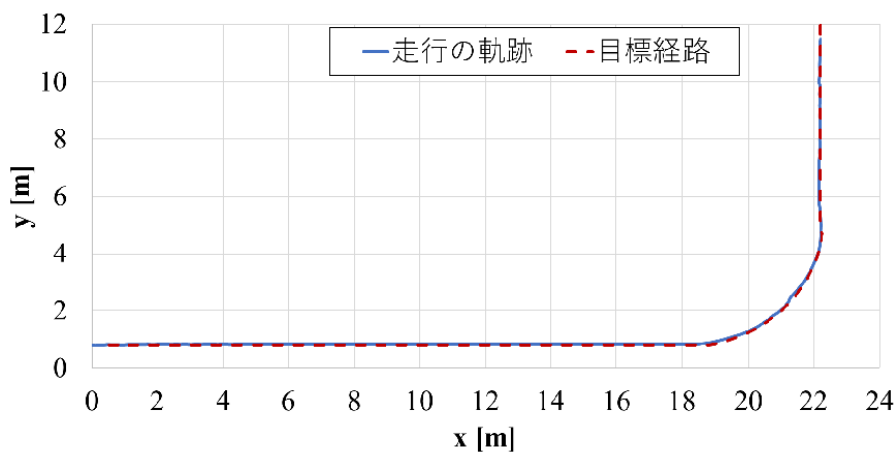


Fig. 6.33: 経路全体の走行結果

6.2.5 実験検証

自動搬送機及び提案した自律走行手法の検証のために、まずは水平面上で Fig.6.32 のような検証環境を構築した。この走行経路には 1.38m 幅の通路で幅 1.1m の搬送機の自動走行させた。搬送機間と壁の安全距離は $\pm 19\text{cm}$ のみである。本実験では搬送機に 120kg の負荷を載せて速度約 3.6km/h で走行検証を行った。また、再現性の確認のために 30 往復で衝突や停止があるか確認を行った。結果では往復で衝突及び動作停止せずすべての試行で経路を走破した。走行結果の一例の結果を Fig. 6.33 に示す。走行の軌跡と目標経路は軌部一致している結果が確認できた。また、さらに 1 つ目の直線区間、カーブ区間、2 つ目の直線区間と分けて拡大した図をそれぞれ Fig. 6.34, Fig. 6.35, Fig. 6.36 に示す。搬送機位置から見た走行経路への垂直距離を評価したところ、1 つ目の直線区間、カーブ区間、2 つ目の直線区間の誤差 RMS はそれぞれ、1.2cm, 11cm, 3.2cm であった。カーブ区間では誤差が大きい結果になったが、安全距離の 19cm 以内に収まっている。以上での自律走行手法の精度と繰り返し再現性を検証することができた。

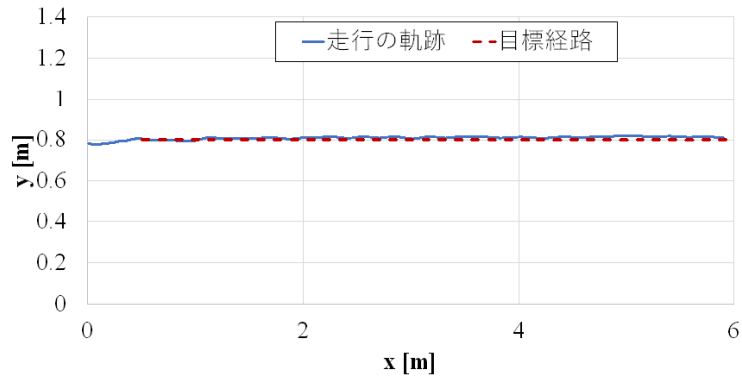


Fig. 6.34: 1つ目の直線区間の走行結果

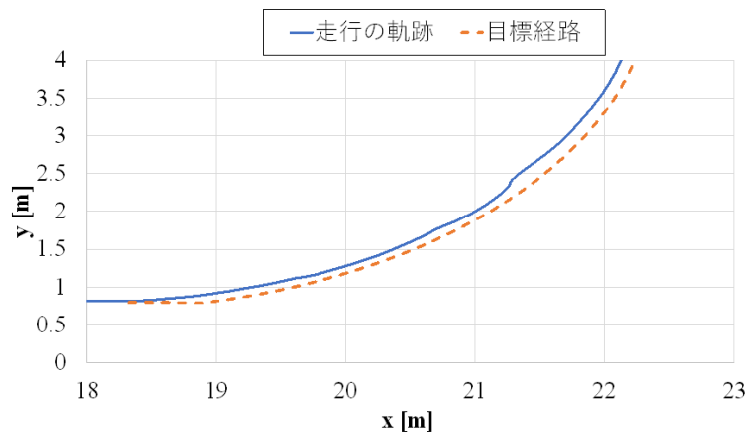


Fig. 6.35: カーブ区間の走行結果

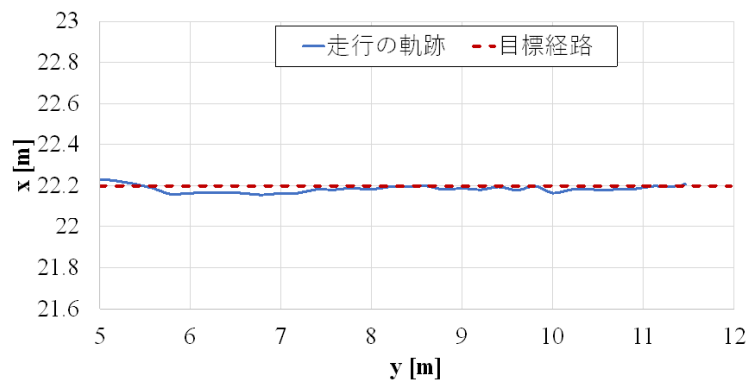


Fig. 6.36: 1つ目の直線区間の走行結果

最後にスロープでの走行検証についても述べる。スロープ環境は Fig. 6.37 のように勾配が20度あるものを設置して検証を行った。検証実験では約120kgの負荷物を搬送機に載せて、30試行の自動走行させた。この結果としても30試行すべて



Fig. 6.37: 急勾配のスロープ環境

で成功したことが確認された。

6.3 まとめ

本章では人の操縦が必要ないようなケースに対して，屋内と屋外環境での自律移動手法を提案・構築した．提案した自律移動システムは屋外用と屋外用に分けて，屋外は Dual RTK-GNSS システムをベースにした自己位置推定及び経路追従法を提案し，芝刈りトラクタ用の後付け操縦装置を用いて検証を行った．結果としては芝刈りの走行経路を高精度で走行することが確認し，有効性が示された．一方で，屋内の狭路での自律走行は LiDAR などの測距センサを用いることで自己位置を推定して自律走行する手法を提案した．検証では屋内用のゴルフバッグ自動搬送機を開発して，狭路での直線及びカーブ走行を経て，高精度の自律走行が可能であることを示した．

第7章 結言

本研究では移動作業の省人・省力化を目指して、移動ロボットにおけるパワーアシスト、重力アシスト、自律移動手法を提案し、検証を行った。本論文ではそれぞれの用途に対して手法を提案して、シミュレーションや実機検証よりその有効性を検証した。以下に本研究のまとめと今後の展望について述べる。

7.1 本研究のまとめ

本研究ではまず移動に伴う負担を支援するために、介助用電動車いすを対象にしたパワーアシスト手法を提案した。提案したパワーアシスト手法は速度制御を用いたアドミタンス制御をベースにしており、アドミタンス制御は走行するスロープ勾配に関わらず水平面と同様な操作感覚を実現できるほか、走行時の初期負荷と定常負荷を使用者の身体能力に合わせて調節することができる。しかし、水平面からスロープに遷移する（もしくはその逆の）際に介護者が把持するハンドルと制御する駆動輪の距離により、ハンドルと駆動輪間で速度差が生じる。この速度差は介護者の操作感覚に作用するため、本稿ではスロープを上る際の車いすモデルを立て、速度変動を調査した。その結果スロープの突入時及び乗り越え時の遷移区間ではそれぞれ、駆動輪に対してハンドル速度が減速と加速することを関係式より確認した。また、介護者がスロープで一定速度で歩行している場合にハンドルに加わる力を算出するシミュレーションを行い、スロープに突入する遷移区間では大きな抵抗力、スロープから水平面に戻る遷移区間では車いすから余分に引っ張る力が見られた。これは遷移区間での操縦感覚が変動することを意味しており、パワーアシスト手法の操作性を維持するために新たに速度補正手法を用いたパワーアシスト手法を提案した。シミュレーションより提案した速度補正型のパワーアシスト手法を用いることでこれらの遷移区間の力変動・速度変動を抑える結果が確認された。また、電動車いすを用いた検証実験では提案した速度補正を用いない場合ではスロープ突入時の遷移区間でハンドル速度低下による大き

な抵抗力。スロープ乗り越え時の遷移区間ではハンドル速度の加速による引っ張り力(負の力)が見られた。提案した速度補正型のパワーアシスト手法ではこれらの速度変動や力変動はほぼ抑制することができ、水平面上走行時の力及び速度と同じ結果が得られ、操縦感が維持する結果が確認された。

以上のように速度補正型のアドミタンス制御を用いることで水平面からスロープでの操縦感覚を維持することができたが、速度制御を用いたアドミタンス制御は外乱トルクをすべて抑制するため、外乱トルクが駆動モータトルクを越えるような場合には制御が困難になり、暴走や意図しない方向に移動する危険性がある。特に急勾配のスロープでは外乱の重力が大きく車いすがスロープから転倒する危険があるほか、急勾配から後退して下る際には車いすを引っ張る必要があり、介護者にとっては操縦が非直感的である。そこで、車いすの駆動能力と介護者の身体能力を考慮して、介護者と車いすでそれぞれ重力を分担する拡張アドミタンス制御を提案した。拡張アドミタンス制御は水平面上では通常のアドミタンス制御と同じ操作感覚であるが、急勾配スロープである場合に電動車いすが負担できない分の重力を介護者に分担させることで、モータにかかる負荷を制御範囲内にする。さらにモータの外乱オブザーバを用いることで、搭乗者と車いすの総重量を自動的に推定することが可能になり、急勾配スロープ上での最大重力アシスト率を自動調整できるようになる。

パワーアシストによる移動支援手法は本研究以外にも多く行われている一方で、パワーアシスト制御には介護者の加えた力/トルクを検出する必要がある。しかし、力覚センサは高価で衝撃に弱い等のデメリットがあり、また既存の電動車いすに後付けできない。これまでは自走式の電動車いすで駆動モータの外乱オブザーバを用いた操作者の力推定手法が提案されてきたが、従来の力推定手法ではモータの駆動速度を精密に計測するための速度センサが用いられていた。しかし、モータに速度センサの取り付けがない電動車いすも多い。そこで本研究では速度センサーの代わりに速度オブザーバをさらに用いて、車いすの速度を推定して介護者の力を推定する速度センサレス力推定手法を提案し、アドミタンス制御のパワーアシスト手法と統合したセンサレスパワーアシスト手法に拡張した。検証実験では提案したセンサレスパワーアシスト手法の力推定の精度とパワーアシスト効果が確認された。

次に移動ロボットへ荷物の積載する際、もしくは被介護者を車いす等の移乗させる際に必要な昇降リフトのシステムについてまとめる。移動ロボットを用いて重量物を搬送する場合に積載負担を軽減するためにシザーリフトを用いた台車な

どが使用されてきているが、パワフルな油圧アクチュエータや大型の電動モータで駆動されていた。従来のアクチュエータ配置はシザーリフトが収納できるように水平方向もしくは斜め方向で接続されているが、アクチュエータが台面に伝達する力と速度はリフトの高さによって大きくことなる。そこで、本研究では力と速度が昇降高さに依存しないような昇降機構を提案した。提案した昇降機構は2つのリンクを用いており、2リンク間の関節位置を制限する軌道を設計する手法を提案した。提案した機構と設計手法を用いることで高さごとに任意の力特性を実現できる。ここでは高さによらない定駆動を目指していたため、定駆動の軌道設計と製作をした。また、リフト駆動のモータの外乱オブザーバを用いることで、リフト上荷物重量を推定する手法を提案した。そして、ミニチュアモデルとリフト台車を用いた検証で、提案した昇降機構は定駆動力を実現し、リフト面の荷物重量を推定することができた。

最後に特定環境での自律移動手法についてまとめる。移動支援で人の介入が必要な場合はパワーアシスト手法を用いることが有効であるが、人の介入を必要としない単純な移動作業では自律移動が求められている。本研究では走行精度を確保した安定的な自律移動システムを構築することを目的として、ひらけた屋外では Dual RTK-GNSS を用いた後付け自動運転装置の自律移動システム、屋内では 2D-LiDAR を用いた自律移動システムをそれぞれ提案した。まず、屋外ではケーススタディとして芝刈りトラクタの自動化を目的とした。提案した後付け自動運転装置は既存のトラクタに後付けすることで自動化でき、自動運転時には運転手が装置上から操縦を修正することが可能になっている。これはワイヤを用いたコンパクトで運転手の邪魔にならない機構に設計し、駆動部はバックドライブ性を考慮した上で設計を行う運転手に与える抵抗が少ないようにしている。また、自律移動システムとして GNSS 信号を受信しやすい屋外を想定しており、Dual RKT-GNSS システムを用いることで自己位置・姿勢を推定する手法を提案した。特に姿勢推定では2つの GNSS アンテナを両方用いた方法と GNSS アンテナの移動軌跡から推定する方法を走行速度によって切り替えることで、高精度に姿勢を推定する方法を提案した。また、自動運転装置の制御では走行経路への追従手法も提案した。実機を用いた検証実験では芝刈りトラクタの模擬機を用いて芝刈り経路を高精度で追従することができた。

屋内での自律走行ではゴルフバッグ搬送機を対象としたケーススタディを行った。屋内環境では走行スペースが限定されており走行精度の要求が高い。また、搬送環境であるゴルフ場は山間にあり、屋内で急勾配のスロープを走破する必要がある

ある。従来このゴルフ場では高精度な自律走行を行うためにモノレール式の搬送機を使用していたが、メンテナンス費用や手間が負担となっていた。従来の研究では LiDAR やカメラを用いた自己位置推定手法が提案されており、複雑な環境に対応できる汎用性があるが、リアルタイム制御には高精度の制御用 PC が必要である。本研究では 2D-LiDAR を用いた最小二乗法ベースの自己位置推定と 4 輪車輪のオドメトリを用いた自己位置推定手法と 4 輪駆動搬送機の経路追従法を提案した。本手法を用いることで狭路での高精度な走行が可能になり、狭路での検証実験では 30 回の往復走行がすべて成功している。また、スロープでの自律走行検証は 20 度のスロープで 30 試行の往復走行が成功した。

7.2 今後の展望

本研究では移動ロボットにおける省人・省力化技術技術として、移動パワーアシスト、特定環境での自律移動、高さ方向の昇降アシスト手法を提案し、それぞれ実機で有効性が検証された。今後日本ではさらに高齢化が進み、認知能力が低下した高齢作業が増加すると思われる。移動ロボットの操作時は作業者の見えない死角も存在するため、今後はパワーアシスト技術に加えて LiDAR 等の環境認識センサを用いて見えない段差や障害物もしくは路面の凹みを検出することで、作業者の操作ミスによる衝突や転倒を防ぐ認知面のアシストを行っていくことを考えている。自律移動技術については今後は高精度な自己位置と経路追従の精度を維持したまま、特定環境だけでなく汎用的な環境にも適用させていく考えである。そして、昇降アシストは搭載時に発生する衝撃をセンサレス力推定により検出して、荷役時の荷物に与える衝撃を吸収する制御に発展させていきたいと考えている。

参考文献

- [1] World Health Organization, "Ageing and health", October. 2023. Available from: <https://www.who.int/>.
- [2] Government of Japan Cabinet Office, "Annual Report on the Ageing Society in 2022". 2022. Available from: <https://www.cao.go.jp/index-e.html>.
- [3] D. P. Watson, D. H. Scheidt, "Autonomous Systems", Johns Hopkins APL Technical Digest, Volume 26, Number 4, 2005
- [4] WHILL 株式会社, "WHILL Model C2", <https://whill.jp/>, 2023 年 10 月 10 日アクセス.
- [5] ヤマハ発動機株式会社, "JW アクティブ PLUS+", <https://www.yamahamotor.co.jp/>, 2023 年 10 月 10 日アクセス.
- [6] IMASEN, "電動車いす", <https://www.imasengiken.co.jp/>, 2023 年 10 月 10 日アクセス.
- [7] SUNRISE MEDICAL, "Power Wheelchair", <https://www.sunrisemedical.com/>, 2023 年 10 月 10 日アクセス.
- [8] 電動車いす安全普及協会, "電動車いす国内出荷台数", <https://www.denankyoo.org/index.html>, 2023 年 10 月 10 日アクセス
- [9] 比嘉聖, 神里志穂子, 山田孝治, 眞喜志隆, 佐竹卓彦, 山田親稔, "反応角度を自動調節可能なジョイスティック型コントローラの開発", 電気学会論文誌D (産業応用部門誌), Vol. 136, No. 10, pp.703-710, 2016.
- [10] 蓑毛博一, 宮本 弘之: "電動車いす操作における直観的なインターフェースの開発", 電子情報通信学会技術研究報告 ニューロコンピューティング, Vol.111, No.241, pp.137-142, 2011.

- [11] スズキ株式会社, "ET4D", <https://www.suzuki.co.jp/>, 2023 年 10 月 10 日アクセス.
- [12] WHILL 株式会社, "WHILL Model S", <https://whill.jp/>, 2023 年 10 月 10 日アクセス.
- [13] NITE (独立行政法人 製品評価技術基盤機構), "踏切での電動車いすの死亡事故が多発 2018 年 12 月 20 日", <https://www.nite.go.jp/>, 2023 年 10 月 10 日アクセス.
- [14] 大沼八重子, "普及するシニアカーと増加する事故 ～シニアカーのリスクに備える 3 つの保障～", 共済総研レポート, 2014 年 8 月.
- [15] ヤマハ発動機株式会社, "JW スウィング"<https://www.yamaha-motor.co.jp/>, 2023 年 10 月 10 日アクセス.
- [16] Rory A. Cooper, Thomas A. Corfman, Shirley G. Fitzgerald, Michael L. Boninger, Donald M. Spaeth, William Ammer, and Julianna Arva, "Performance assessment of a pushrim-activated power-assisted wheelchair control system", IEEE TRANSACTIONS ON CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY, VOL. 10, NO. 1, pp.121-126, 2002.
- [17] Alber GmbH, "e-motion the push rim activated add-on that takes the strain off", <https://www.alber.de/en/>, 2023 年 10 月 10 日アクセス.
- [18] ヤマハ発動機株式会社, "ダウニジョイ X PKUS+"<https://www.yamaha-motor.co.jp/>, 2023 年 10 月 10 日アクセス.
- [19] TGA Mobility, Ltd, "Wheelchair Powerpack Solo", <https://www.tgamobility.co.uk/>, 2023 年 1 月 10 日アクセス.
- [20] 株式会社セリオ, "電動車いす;介助タイプ;"<https://serio888.net/>, 2020 年 1 月 10 日アクセス.
- [21] Rory A. Cooper, Thomas A. Corfman, Shirley G. Fitzgerald, Michael L. Boninger, Donald M. Spaeth, William Ammer, and Julianna Arva, "Performance Assessment of a Pushrim-Activated Power-Assisted Wheelchair Control System", IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 10, No. 1, 2002.

- [22] Tatsuto Suzuki, Hironobu Uchiyama, Catherine Holloway, Nick Tyler, "Assisting Control for Attendant Propelled Wheelchair based on Force Velocity Relationship", 34th Annual International Conference of the IEEE EMBS San Diego, California USA, 2012.
- [23] Sehoon Oh, and Yoichi Hori, "Disturbance Attenuation Control for Power-Assist Wheelchair Operation on Slopes", IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 22, No. 3, 2014.
- [24] Lee K, Lee C, Hwang S, Choi J, Bang Y, "Power-Assisted Wheelchair With Gravity and Friction Compensation", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.63, No.4, pp.2203-2211, 2016.
- [25] Sehoon Oh, Naoki Hata, Yoichi Hori, "Control Developments for Wheelchairs in Slope Environments", 2005 American Control Conference, USA, 2005.
- [26] Shinsuke NOMURA, Toshiyuki MURAKAMI, "Power Assist Control of Electric Wheelchair Using Equivalent Jerk Disturbance under Slope Environment", The 11th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control, Nagaoka, Japan, 2010.
- [27] Sehoon Oh, Naoki Hata, Yoichi Hori, "Integrated Motion Control of a Wheelchair in the Longitudinal, Lateral, and Pitch Directions", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.55, No.4, pp.1855-1862, 2008.
- [28] Yuki Deno, Hideo Kitagawa, Kiyooki Kakihara and Kazuhiko Terashima, "Development of Collision Avoidance Supporting System for Power Assist System in Omni-directional Mobile Robot", SICE Annual Conference 2011, Japan, 2011.
- [29] 垣本映, "高齢者の移動支援のための制御技術", 計測と制御, Vol. 40, No. 5, 2001年5月.
- [30] 垣本映, 二宮敬一, 鈴木重信, 関口行雄: "トルクセンサを用いた介助型パワーアシスト車いすの開発", ライフサポート, Vol. 16, No. 3, pp. 104-111 2004年.
- [31] 垣本, 松田, 関口, "介助型パワーアシスト車椅子の開発", 精密工学会誌, Vol.65, No. 8, pp.1126-1130, 1999.

- [32] T. Suzuki, C. Zhu, T. Sakai, Y. Okada, Y. Yoshikawa, M. Yoshioka, Y. Yang, H. Yu, and F. Duan: “Power assistance of an omnidirectional hybrid walker and wheelchair with admittance model and Iterative Learning Control”, Proc. of the 2014 IEEE 13th International Workshop on Advanced Motion Control(AMC), pp.974-979, Yokohama, Japan, 2014.
- [33] C. Zhu, M. Oda, M. Yoshioka, T. Nishikawa, S. Shimazu, X. Luo: “Admittance control based walking support and power assistance of an omnidirectional wheelchair typed robot”, Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Robotics and Biometrics, pp.381-386 ,Tianjin, China, 2010.
- [34] Junichi Miyata, Yukiko Kaida, and Toshiyuki Murakami, ” v - ϕ -Coordinate-Based Power-Assist Control of Electric Wheelchair for a Caregiver”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55, No. 6, pp.2517-2524, 2008.
- [35] Sakiko Tashiro and Toshiyuki Murakami, ”Step Passage Control of a Power-Assisted Wheelchair for a Caregiver”, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, Vol. 55, No. 4, pp.1715-1721 ,2008
- [36] Ding D and Cooper RA, ”Electric-powered wheelchairs”. IEEE Control Systems Magazine, Vol. 25, No. 2, pp.22-34, 2005.
- [37] 宝商株式会社, ”YAMAHA ゴルフカー ゴルフバッグ自動運搬システム”, <https://www.hosho.ne.jp/>, 2023年10月12日アクセス.
- [38] トライシステムエンジニアリング株式会社, ”屋外の急傾斜地の移送に4人乗りフルカバータイプモノレール”, https://premium.ipros.jp/trysystem_eng/, 2023年10月12日アクセス.
- [39] 津村俊弘, ”無人搬送車とその制御”, 計測と制御, Vol. 26, No. 7, pp.43-48, 1987.
- [40] iRobot Corporation, ”ロボット掃除機 ルンバ”, <https://www.irobot-jp.com/>, 2023年10月12日アクセス.
- [41] 妹尾敏弘, 三木一浩, 阪本実雄, ”掃除ロボットが持つ課題と将来”, 日本ロボット学会誌, Vol. 32, No. 3, pp.214-217, 2014.

- [42] Julia Fink, Valerie Bauwens, Frederic Kaplan, Pierre Dillenbourg, "Living with a Vacuum Cleaning Robot", *International Journal of Social Robotics*, Vol. 5, No. 3, pp.389-408, 2013.
- [43] アイリスオーヤマ, "DX 清掃ロボット Whiz i (ウィズアイ) IRIS EDITION", <https://www.honda.co.jp/>, 2023 年 10 月 12 日アクセス.
- [44] 本田技研工業株式会社, "Honda ロボット草刈機", <https://www.honda.co.jp/>, 2023 年 10 月 12 日アクセス.
- [45] 鎌田征丞, "特集 保全技術 その1 (要素技術) 4 自律型除草ロボット", *電気設備学会誌*, Vol. 40, No. 4, 2020 年 4 月.
- [46] 鈴木大翔, 帖佐直, 東城清秀, 藤井義晴, "乗算優占度を用いたロボット除草の作業能率評価", *農作業研究 (Japanese Journal of Farm Work Research)*, Vol. 57, No. 3, pp.171-178, 2022.
- [47] 一般社団法人日本ゴルフ場経営者協会, "ゴルフ場業高齢者活躍に向けたガイドライン", <https://www.golf-ngk.or.jp/>, 2023 年 10 月 12 日アクセス.
- [48] 西武造園株式会社, "無人・自律走行システム I-GINS 搭載芝刈機を導入", <https://www.seibu-la.co.jp/>, 2023 年 10 月 12 日アクセス.
- [49] Marco Pini, Gianluca Marucco, Gianluca Falco, Mario Nicola, and Wim De Wilde, "Experimental Testbed and Methodology for the Assessment of RTK GNSS Receivers Used in Precision Agriculture", *IEEE Access*, Vol. 8, pp.14690-14703, 2020.
- [50] 農林水産省, "特集 変化する我が国の農業構造", <https://www.maff.go.jp/index.html>, 2023 年 10 月 18 日アクセス.
- [51] 株式会社クボタ, "Agri Robo", <https://www.kubota.co.jp/>, 2023 年 10 月 12 日アクセス.
- [52] ヤンマーホールディングス株式会社, "トラクタ YT488R YT498R YT4104R YT5114R", <https://www.yanmar.com/jp/>, 2023 年 10 月 18 日アクセス.
- [53] 富士工業株式会社, "多目的用自律走行ロボット", <https://www.ozax.co.jp/fkk/>, 2023 年 10 月 12 日アクセス.

- [54] ELMO, "BellaBot", <https://www.elmo.co.jp/>, 2023 年 10 月 12 日アクセス.
- [55] ZMP, "宅配ロボ DeliRo Truck", <https://www.zmp.co.jp/>, 2023 年 10 月 12 日アクセス.
- [56] Tomoji Takasu, "RTKLIB: An Open Source Program Package for GNSS Positioning", <https://www.rtklib.com/>, 2023 年 10 月 15 日アクセス.
- [57] 小島祥子, "自動車運転支援のための高精度自車位置推定に関する研究", 博士論文, 名古屋大学, 2015.
- [58] Guowei Wan, Xiaolong Yang, Renlan Cai, Hao Li, Yao Zhou, Hao Wang, Shiyu Song, "Robust and Precise Vehicle Localization Based on Multi-Sensor Fusion in Diverse City Scenes", 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Australia, 2018.
- [59] Qijin Chen, Quan Zhang, and Xiaoji Niu, "Estimate the Pitch and Heading Mounting Angles of the IMU for Land Vehicular GNSS/INS Integrated System", IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 22, No. 10, pp.6503-6515, 2020.
- [60] Jingyun Liu, Qiao Sun, Zhe Fan, Yudong Jia, "TOF Lidar Development in Autonomous Vehicle", 2018 IEEE 3rd Optoelectronics Global Conference (OGC), China, 2018.
- [61] Javier Minguez, Luis Montesano, and Florent Lamira, "Metric-based iterative closest point scan matching for sensor displacement estimation", IEEE Transactions on Robotics, Vol. 22, No. 5, 2006.
- [62] P. Biber, W. Strasser, "The normal distributions transform: a new approach to laser scan matching", Proceedings 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003), USA, 2003.
- [63] D. Losada, F. Matia, A. Jimenez and R. Galan, "Consistency improvement for SLAM-EKF for indoor environments", Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA 2006), 2006.

- [64] M. Montemerlo, S. Thrun, D. Koller and B. Wegbreit, "Fast-SLAM: A Factored Solution to the Simultaneous Localization and Mapping Problem," Proceedings of the AAAI National Conference on Artificial Intelligence, 2002.
- [65] 友納正裕, 原祥堯, "SLAM の現状と今後の展望", システム/制御/情報, Vol. 64, No. 2, pp.45-50, 2020.
- [66] 有水賢吾, "測域センサおよび RGBD カメラを用いた森林内自己位置推定", 森林利用学会誌, Vol. 36, No. 1, pp.63-68, 2021.
- [67] 張捷強, 上田隆一, "レンガ敷きの路面からのビジュアルオドメトリ", Proceedings of the 2022 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, Japan, 2022.
- [68] 小林祐一, "単眼カメラによる Visual SLAM の原理と 3 次元再構成の実装例". システム/制御/情報, Vol. 64, No. 2, pp.57-62, 2020.
- [69] 有水賢吾, "測域センサおよび RGBD カメラを用いた森林内自己位置推定", 森林利用学会誌, Vol. 36, No. 1, 2021.
- [70] Andrew J. Davison, Ian D. Reid, Member, IEEE, Nicholas D. Molton, and Olivier Stasse, "MonoSLAM: Real-Time Single Camera SLAM", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 29, No. 6, pp.1052-1067, 2007.
- [71] 大津恭平, 久保田孝, "特徴の少ない地形における惑星探査ローバのビジュアルオドメトリ", 日本ロボット学会誌, Vol. 32, No. 9, pp.825-831, 2014.
- [72] 梅田和昇, 寺林賢司, "アクティブステレオ法による距離画像センサー", 光学 (Japanese journal of optics), Vol. 41, No. 5, pp.275-280, 2012.
- [73] Junichi Meguro, Takuya Arakawa, Syunsuke Mizutani, Aoki Takanose, "Low-cost Lane-level Positioning in Urban Area Using Optimized Long Time Series GNSS and IMU Data", 2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), USA, 2018.
- [74] Mingyang Li and Anastasios I. Mourikis, "High-precision, consistent EKF-based visual-inertial odometry", The International Journal of Robotics Research, Vol. 32, No. 6, pp.690-711, 2013.

- [75] 小松大生, "GNSS/IMU/Odometer を用いた統合測位手法に関する研究", 東京海洋大学大学院 海洋科学技術研究科 修士学位論文, 2022.
- [76] O. Khatib, "Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots", Proceedings. 1985 IEEE International Conference on Robotics and Automation, USA, 1985.
- [77] Elon Rimon, and Daniel E. Koditschek, "Exact robot navigation using artificial potential functions", IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 8, No. 5, 1992.
- [78] 佐藤圭祐, "極小点のないポテンシャル場を用いたロボットの動作計画", 日本ロボット学会誌, Vol. 11, No. 5, pp.702-709, 1993.
- [79] C.I. Connolly, J.B. Burns, R. Weiss, "Path planning using Laplace's equation", Proceedings., IEEE International Conference on Robotics and Automation, USA, 2002.
- [80] 佐藤圭祐, "ラプラスポテンシャルを使った経路計画法に関する研究", 東京大学大学院博士学位論文, 1994.
- [81] 辻敏夫, 千種和幸, 金子真, "人工ポテンシャル場の変形を用いた移動ロボットの軌道生成法", 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 62, No. 597, pp.1905-1911, 1996.
- [82] Wesley H. Huang, Brett R. Fajen, Jonathan R. Fink, William H. Warren, "Visual navigation and obstacle avoidance using a steering potential function", Robotics and Autonomous Systems, Vol. 54, No. 4, pp.288-299, 2016.
- [83] D. Fox, W. Burgard, S. Thrun, "The dynamic window approach to collision avoidance", IEEE Robotics & Automation Magazine, Vol. 4, No. 1, 1997.
- [84] O. Brock, O. Khatib, "High-speed navigation using the global dynamic window approach", Proceedings 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation, USA, 1999.
- [85] 後藤清宏, 根和幸, 松野文俊, "速度制約領域を考慮した自律移動ロボットの行動計画", 日本ロボット学会誌, Vol. 28, No. 8, pp.930-937, 2010.

- [86] Petter Ogren, and Naomi Ehrich Leonard, "A Convergent Dynamic Window Approach to Obstacle Avoidance", IEEE Transactions on Robotics, Vol. 21, No. 2, 2005.
- [87] ADA (The Americans with Disabilities Act). National network. A Planning Guide for Making Temporary Events Accessible to People with Disabilities; 2023 May; Available .from: <https://adata.org/>
- [88] Japanese Ministry of Land, Infrastructure. Transport and Tourism, Act on Promotion of Smooth Transportation, etc. of Elderly Persons, Disabled Persons, etc.. 2006 December; Available from: <https://www.mlit.go.jp/index.html>.
- [89] Christopher M. Smith, Ian S. Curthoys, and Jeffrey T. Laitman, "First evidence of the link between internal and external structure of the human inner ear otolith system using 3D morphometric modeling", Scientific Reports, Vol. 13, No. 4840, 2023.
- [90] 大西 公平:“外乱オブザーバによるロバスト・モーションコントロール”, 日本ロボット学会誌, Vol.11, No. 4, pp. 486-493, 1993.
- [91] 政府統計の総合窓口 (e-Stat) : “平成 29 年国民健康・栄養調査結果”, 2019 年 6 月 15 日アクセス.
- [92] Deere and company, "X710 Signature Series Lawn Tractor", <https://www.deere.ca/en/index.html>, 2023 年 11 月 1 日アクセス.
- [93] 鈴森康一, "ロボットとアクチュエータのバックドライバビリティ", 日本ロボット学会誌, Vol.31, No.6, pp.548-551, 2013.
- [94] マテックス株式会社, "電子カタログ ユニット一覧", <https://www.matex-japan.com/>, 2023 年 11 月 1 日アクセス.
- [95] 北川 秀夫・西坂 晋・三好 孝典・寺嶋 一彦:“介助式全方向移動車椅子のためのパワーアシストシステムの構築”, 日本ロボット学会, Vol. 23, No. 3, pp. 321-329, 2005.
- [96] 開田 有紀子・村上 俊之:“電動車椅子における人の入力トルクのセンサレス検出とパワーアシスト”, 電気学会論文誌 D, Vol. 126, No. 2, pp. 137-142, 2006.

- [97] S. Oh, Y. Hori: "Sensor Free Power Assisting Control Based on Velocity Control and Disturbance Observer", Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, pp. 1709-1714, 2005.
- [98] C. Zhu, T. Nakayama, M. Shibayama, M. Yoshioka, H. Liang, Y. Yan, H. Yu, J. Nakajima, H. Shibasaki: "A novel power add-on unit for attendant propelled wheelchairs with Sensorless Speed Control and Power Assistance", Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics, pp. 786-791, Singapore, Singapore, 2015.
- [99] E. Abel, T. Frank, G. Boath, N. Lunan: "An Evaluation Of Different Designs Of Providing Powered Propulsion For Attendant Propelled Wheelchairs", Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Vol. 13, No. 4, pp.1863-1864, 1991.
- [100] R.A. Cooper, T.A. Corfman, S.G. Fitzgerald, M.L. Boninger, D.M. Spaeth, W. Ammer, and J. Arva: "Performance assessment of a pushrim-activated power-assisted wheelchair control system", IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 10, No. 1, pp. 121-126, 2002.
- [101] F. Dellaert, D. Fox, W. Burgard, S. Thrun, "Monte Carlo Localization for Mobile Robots", Proceedings 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA), USA, 2002
- [102] 上田隆一, 新井民夫, 浅沼和範, 上田和昇, 大隈久, パーティクルフィルタを利用した自己位置推定に生じる致命的推定誤りからの回復法, 日本ロボット学会誌, Vol. 23, No. 4, pp.466-473, 2005.
- [103] 小林亮, 星野智史, "移動ロボットのための環境変化にロバストなパーティクルフィルタに基づく自己位置推定の観測もモデル", 日本ロボット学会誌, Vol.41, No. 1, pp.92-101, 2023.
- [104] 北陽電機株式会社, "測域センサ URG-04LX", <https://www.hokuyo-aut.co.jp/>, 2023年11月1日アクセス.

研究業績

投稿論文(査読つき)

1. P. Li, N. Ueda, C. Zhu, "Power-Assist on Slope with Velocity Compensation for Attendant-Propelled Electric Wheelchairs", *Advanced Robotics*, 査読済み, 微修正判定. (エディタからのコメントより採択がほぼ確定していると思われます)
2. 李沛讓, 劉暢, 松澤隆一, 梁宏博, 上田直哉, 渡邊大貴, 朱赤, 急勾配スロープにおける電動車いすのアシスト及びアシスト率の自動調節法, *電気学会論文誌*, 140 巻, 第 5 号, pp.364~371, 2020.
3. 李沛讓, 朱赤, "簡易型電動駆動ユニットのためのセンサレス力推定およびスロープにおけるパワーアシスト", *計測自動制御学会論文集*, 55 巻第 11 号 pp.726~732, 2019.
4. 李沛讓, 朱赤, 小川尚之, 劉暢, 梁宏博, "手動車いすに後付け可能な簡易型電動駆動ユニットにおけるセンサレス力推定及び登坂の負担軽減", 第 24 回ロボティックスシンポジウム論文集, pp.301-302, 2019.
5. 上田直哉, 朱赤, 李沛讓, 装着型下肢外骨格ロボットにおける機構の冗長性を利用した擦れを軽減するベルト保持機構および制御の提案, 第 27 回ロボティックスシンポジウム講演論文集, 2022.
6. 田島利基, 李沛讓, 朱赤, 車いす型全方向移動支援ロボット用簡易力検出機構を用いた 3 自由度 HMI の開発, *日本機械学会論文集*, 87 巻, 第 896 号, pp.20-00372, 2021.
7. C. Liu, H. Liang, Y. Murata, P. Li, N. Ueda, R. Matsuzawa, C. Zhu, "A Wearable Lightweight Exoskeleton with Full Degrees of Freedom for Upper-limb Power Assistance", *Advanced Robotics- Special Issue on Cyborg and Bionic Systems*, pp.413-424, 2020.

8. C. Liu, H. Liang, N. Ueda, P. Li, Y. Fujimoto, C. Zhu, "Functional Evaluation of a Force Sensor-Controlled Upper-Limb Power-Assisted Exoskeleton with High Backdrivability", *Sensors* 2020, Volume 20, Issue 21, pp.1-21, 2020.
9. H. Liang, Y. Yu, M. Mochida, C. Liu, N. Ueda, P. Li, C. Zhu, "EEG-Based EMG Estimation of Shoulder Joint for the Power Augmentation System of Upper Limbs", *Symmetry* 2020, Volume 12, Issue 11, 2020.
10. H. Liang, C. Zhu, Y. Iwata, S. Maedono, M. Mochita, C. Liu, N. Ueda, P. Li, H. Yu, Y. Yan and F. Duan," Feature Extraction of Shoulder Joint's Voluntary Flexion-Extension Movement Based on Electroencephalography Signals for Power Assistance", *Bioengineering*, Volume 6, Issue 1(2), 2019.

国際会議 (査読つき)

11. P. Li, C. Liu, H. Liang, N. Ogawa, C. Zhu, "Development of Power Add-on Unit for Manual Wheelchair and Its Sensorless Power Assistance Control", *The 12th International Convention on Rehabilitation Engineering and Assistive Technology*, pp. 324-328, China, 2018.
12. N. Ogawa, Y. Ueta, T. Watanabe, T. Kaneko, P. Li, C. Liu, H. Liang, N. Ueda, C. Zhu, W. Zhang, Y. Shibusawa, N. Tago and K. Deguchi, "Sensorless Power Assistance Control for a Lumbar Assist Device", *2019 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, China, 2020. **The Best Paper Finalist.**
13. R. Tajima, C. Zhu, H. Liang, C. Liu, N. Ueda, P. Li, T. Watanabe, "A New Type of Foldable and Omnidirectional Mobile Assistive Robot", *The 2019 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics (RCAR)*, Russia, 2019. **The Best Student Paper Award.**
14. N. Ogawa, C. Liu, R. Chiba, P. Li, C. Zhu, "Sensorless Power Assistance Control for an Upper Limb Exoskeleton Robot", *The 12th International Convention on Rehabilitation Engineering and Assistive Technology*, pp. 329-333, China, 2018.

国内会議(査読つき)

15. 李沛讓, 朱赤, ”手動車いすに後付け可能な簡易型電動駆動ユニットにおけるセンサレス力推定及び登坂の負担軽減”, 第24回ロボティックスシンポジア, 2019年3月.
16. 上田直哉, 朱赤, 李沛讓, ”装着型下肢外骨格ロボットにおける機構の冗長性を利用した擦れを軽減するベルト保持機構および制御の提案”, 第27回ロボティックスシンポジア, 2022年3月.

国内会議

17. 李沛讓, 澤入良樹, 朱赤, ”定駆動力機構を用いた新たな電動リフト台車におけるセンサレス制御の実現”, ロボティクス・メカトロニクス講演会2022, 1A1-H12, 2022年6月.
18. 李沛讓, 朱赤, ”急勾配スロープにおける電動車いすの介助アシスト及びアシスト率の自動調整法”, 先端ロボット工学共同ワークショップ2019, 2019年12月.
19. 李沛讓, 朱赤, ”電動車いすにおける急勾配スロープでのアシスト技術の開発”, 第22回2019年度9大学合同パワーエレクトロニクス・モーションコントロール研究会, 2019年11月.
20. 李沛讓, 劉暢, 松澤隆一, 梁宏博, 上田直哉, 渡邊大貴, 朱赤, ”急勾配スロープでアシスト可能な検診車用電動車いすの開発”, 2019年度電気学会産業応用部門大会, 2019年8月.
21. 李沛讓, 朱赤, ”車いす用簡易型電動駆動ユニットの開発 外乱オブザーバによる力推定及びセンサレスパワーアシストの実現”, ロボティクス・メカトロニクス講演会2018, 2A2-G04, 2018年6月.
22. 李沛讓, 朱赤, ”手動車いす用簡易型電動駆動ユニットにおけるセンサレスパワーアシスト技術の開発”, 2017年度電気学会東京支部 栃木・群馬支所合同研究発表会, 2018年3月.

23. 李沛讓, 朱赤, ”車いす用簡易型電動駆動ユニットのためのセンサレスパワーアシストの実現”, 先端ロボット工学合同ワークショップ 2017, 2017 年 11 月.
24. 澤入良樹, 李沛讓, 朱赤, ”距離センサによる積載部の高さ保持機能を持つ定駆動力リフト台車の動作検証”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2022, 2P1-E01, 2022 年 6 月.
25. 金澤雄一郎, 李沛讓, 朱赤, ”狭路および急勾配で重量物を運搬する自律移動ロボットの開発”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2022, 2A1- T01, 2022 年 6 月.
26. 宇野健二郎, 李沛讓, 澤入良樹, 朱赤, ”無人運転の両立を可能とする後付け自動運転システムの開発 / 有人”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2022, 2P1-D08, 2022 年 6 月.
27. 金澤雄一郎, 李沛讓, 朱赤, ”狭路および急勾配で重量物を運搬する自律移動ロボットの開発”, 2021 年度電気学会東京支部 栃木・群馬支所合同研究発表会, 2022 年 3 月. 優秀発表賞.
28. 宇野健二郎, 朱赤, 李沛讓, 澤入良樹, ”RTK-GNSS を用いた乗用式芝刈り機の後付け運転システムの開発”, 2021 年度電気学会東京支部 栃木・群馬支所合同研究発表会, 2022 年 3 月.
29. 澤入良樹, 朱赤, ”バックドライブ性に基づいたコンプライアンス制御が可能な積載部の高さ保持機能を持つ定駆動力リフト台車の開発”, 先端ロボット工学合同ワークショップ 2021, 2021 年 12 月. 最優秀発表賞. (原稿の形式上、名前は非記述)
30. 澤入良樹, 李沛讓, 田島利基, 朱赤, ”積載部定高さ保持機能を持つ定駆動力リフト台車の開発”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2021, 1P1-K02, 2021 年 6 月.
31. 金子剛, 植田裕介, 渡邊大貴, 小川尚幸, 李沛讓, 朱赤, 澁澤康之, 多胡直紀, 出口耕衛, ”人間の自然動作可能な腰パワーアシスト装置の開発 -モーションキャプチャを用いた腰の屈曲伸展動作の解析と再現-”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2020, 2P1-C10, 2020 年 6 月.

32. 澤入良樹, 李沛讓, 徐 俊, 羽田野太希, 田島利基, 朱赤, ”急スロープを走行できるゴルフバッグ自動搬送機の開発”, 2020 年度電気学会東京支部 栃木・群馬支所合同研究発表会, 2020 年 3 月.
33. 植田裕介, 朱赤, 渡邊大貴, 李沛讓, 金子剛, 澁澤康之, 多胡直紀, 出口 耕衛, ”ワイヤ駆動を用いた高バッグドライブ性を有する腰パワーアシスト装置の開発と評価”, 第 37 回 日本ロボット学会学術講演会, 2019 年 9 月.
34. 松澤隆一, 李沛讓, 小川尚幸, 金子剛, 劉暢, 朱赤, 板山寛昭, ”高勾配のスロープ上をアシスト可能な検診車用電動車いすの開発”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2019, 2A1-A06, 2019 年 6 月.
35. 渡邊大貴, 植田裕介, 李沛讓, 朱赤, 澁澤康之, 多胡直紀, 出口耕衛, ”バックドライブ性を有する腰補助用ロボットの制御システムの構築と性能評価”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2019, 1A1-H09, 2019 年 6 月.
36. 田島利基, 朱赤, 梁宏博, 劉暢, 李沛讓, 渡邊大貴, ”コンパクトに折りたたみ可能な全方向移動車椅子ロボットの開発”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2019, 2P1-A04, 2019 年 6 月.
37. 植田裕介, 朱赤, ”バックドライブ性を有するワイヤ駆動を用いた腰パワーアシスト装置の設計と開発”, 先端ロボット工学共同ワークショップ 2018, 2018 年 10 月. 最優秀発表賞. 口頭 (原稿の形式上、名前は非記述)
38. 植田裕介, 朱赤, 李沛讓, 渡邊大貴, 劉暢, 高林佑介, ”バックドライブ性を有するワイヤ駆動を用いた腰パワーアシスト装置の開発”, 平成 29 年度第 8 回栃木・群馬支所合同研究発表会, 2018 年 3 月.

特許

39. 朱赤, 中埜智親, 平野曜伯, 李沛讓, 澤入良樹, 宇野健二郎, ”自動運転ユニット及び自動芝刈りシステム”, (出願中)
40. 朱赤, 李沛讓, 木村栄輝, 田近基孝, 角田勝, ”昇降装置” (出願中)
41. 朱赤, 李沛讓, 木村栄輝, 田近基孝, 角田勝, ”運搬台車” (出願中)

42. 朱赤, 李沛讓, 澤入良樹, 木村栄輝, 田近基孝, 角田勝, ”運搬台車” (出願中)
43. 朱赤, 田島利基, 李沛讓, 澤入良樹, ”操作インターフェス” (出願中)

コンテスト

1. C. Zhu, C. Liu, P. Li (発表者), N. Ogawa, ”Development of a Light Wearable Exoskeleton for Upper Limb Rehabilitation with Force Sensor”, Global Student Innovation Challenge for Assistive Technology, 2018, **Merit Award of the robot contest.**