

全方向移動ロボットのための差動駆動操舵機構の開発

2014年1月

博士（工学）

上野 祐樹

豊橋技術科学大学

和文要旨

全方向移動ロボットのための差動駆動操舵機構の開発

産業分野で培われてきたロボット技術は、医療・福祉分野を含む様々な分野への応用が進んでいる。少子高齢化の問題は今や日本だけでなく世界中で注目を集めてきており、特に介護分野では高齢者の高齢者による介護を意味する「老老介護」が問題となっており、この問題の改善策として要介護者の自立的な生活の支援や介護者の身体的負担軽減を目的とした福祉分野のロボットの開発が期待されている。

ロボットの移動性能はロボットの活動範囲に直結する。車輪移動機構は、リンク機構による移動などに比べ実現が容易でありエネルギー効率も高いため、様々な機器の移動機構として応用されている。さらに車輪移動機構の中でもホロノミックな全方向移動機構は、平面上の並進2自由度と旋回1自由度をいかなる姿勢においても独立に操作可能であり、動作方向に制限のない自由な移動能力をロボットにもたらす。全方向移動機構はこれまで、フリーローラを車輪の周囲に配置したオムニホイールやメカナムホイールなどが市販されており一般的であったが、段差乗り越え性能などの運動性能が低いことや、振動や騒音の発生、車輪のスリップやそれによる位置計測誤差が大きいなどの問題を抱えている。一方キャスト駆動輪と呼ばれる自在キャストをモータにより駆動輪化した機構は、通常のゴムタイヤや空気入りタイヤなどを用いることが可能であり、高い運動性能や振動吸収性能などの利点有するため、幅広い範囲での活用が期待できる。しかし、一車輪あたり二台のモータを使用するためモータの使用台数が増えることや、直進中には車輪駆動用モータしか使用しない状況が発生することからモータ運用率が低下するなどの問題を抱えている。つまり全方向移動機構には、運動性能とモータ運用率の間に二律背反の関係があることが分かる。

本研究ではこれらの課題を同時に解決可能な、差動駆動操舵機構 (Differential Drive Steering System: DDSS) を提案する。DDSSは、キャスト駆動輪に差動歯車機構を応用した全方向移動機構である。差動歯車機構は、二つの動力を一度合成し、独立した二つの出力へ分配可能な機構である。本機構をキャスト駆動輪へ応用することで、高い移動性能を維持したままモータ運用率の向上が可能となる。本研究では、機構の特性解析やそれを基にした設計手法の提案を行う。またDDSSを用いた応用機器として、電動車いすや全方向移動ベッド、3輪全方向移動プラットフォームなどの開発を行う。各機器にはパワーアシストによる操作支援システムが応用されており、DDSSそのものやパワーアシスト操作型の全方向移動機器について、実験により応用性や有効性の検証を行った。本研究における新規性は、運動性能向上やモータ運用率向上を両立できる全方向移動機構の提案、及び本機構を有するパワーアシスト機器の開発と応用性の検証である。

Development of Differential Drive Steering System for Omni-Directional Mobile Robot

Yuki Ueno

*Department of Information and Electronics Engineering, Toyohashi University of Technology
Jan 2014*

ABSTRACT

Robot technology is being applied in various fields, not only in industry but also in medicine, welfare, agriculture and so on. In societies experiencing population ageing, increasing numbers of elderly people become caregivers of other elderly people, giving rise to a social issue, this trend will become more pronounced population ageing proceeds and birth rates continue to decline. Given this context, the development of welfare robot capable of supporting both people requiring care and their caregivers is desired.

The mobility of a robot is directly linked to its working range. Wheel locomotion is applied as a mobile mechanism for many robots, because it is easy to realize and more efficient than a link mechanism. Since a mobile platform subject to holonomic constraints can control three degrees of freedom independently in an arbitrary pose on a flat plane, a robot is able to move freely in tight spaces. A free-roller mechanism that has free rollers on the circumference of the wheel, such as an omni-wheel or a Mecanum-wheel, is the most common mechanism owing to the ease of realizing holonomic movement. However, a mechanism of this type is subject to problems such as low mobility capability and generation of vibration and noise. An active-caster mechanism can ameliorate the problems of the free-roller mechanism because conventional tires can be used for locomotion. However, the active-caster mechanism is also subject to problems in that greater motor capacity is required and motor efficiency decrease.

As is evident from the above, an omni-directional mobile mechanism is subject to antinomy in that the mobility capability and the motor capacity or motor efficiency are in conflict. Therefore, in this study, the Differential Drive Steering System (DDSS) capable of transcending that antinomy is proposed. DDSS involves the application of a differential gearing mechanism to the active-caster mechanism. The differential gearing mechanism, which is a type of energy distribution mechanism, synthesizes two inputs and distributes them to two independent outputs. This paper presents an analysis of the mechanism's characteristics and a design method based on the analysis. In addition, an omni-directional mobile wheelchair, an omni-directional mobile bed and a three-wheeled platform are developed in order to verify the effectiveness of the proposed mechanism.

Keywords: omni-directional mobile robot, differential gearing mechanism, power assist system

目次

第1章 緒言	1
1.1 研究背景	1
1.2 関連研究	3
1.2.1 全方向移動機構	3
1.2.2 操作支援システム	6
1.2.3 本研究室内の研究	8
1.3 解決すべき課題	9
1.4 研究目的と論文構成	9
第2章 差動駆動操舵機構	11
2.1 キャスタ駆動輪	11
2.1.1 機構動作原理	11
2.1.2 運動学モデル	12
2.2 差動駆動操舵機構	13
2.2.1 差動歯車機構	14
2.3 遊星歯車型 DDSS	16
2.3.1 機構概要	16
2.3.2 運動学モデル	16
2.3.3 トルクモデル	18
2.3.4 モータの出力比に関する考察	18
2.4 平歯車型 DDSS	20
2.4.1 機構概要	20
2.4.2 運動学モデル	20
2.4.3 トルクモデル	22
2.4.4 モータの出力比に関する考察	22
2.5 機構設計	23
2.6 モータ出力の比較	25
第3章 全方向移動ロボット	29
3.1 全方向移動車いす	29
3.2 全方向移動ベッド	30
3.3 3輪全方向移動プラットフォーム	31
3.4 車両運動学モデル	32

3.4.1	順運動学モデル	33
3.4.2	逆運動学モデル	33
3.5	各全方向移動システムの運動学モデル	39
3.5.1	OMW の運動学モデル	39
3.5.2	OMB の運動学モデル	41
3.5.3	3輪プラットフォームの運動学モデル	42
3.6	車両制御システム	44
第4章	車輪横力に着目した旋回時モータ出力低減化運動学モデルの導出	45
4.1	3D-OMP を用いた実験	45
4.2	力学解析	47
4.3	タイヤ横力の概念を用いた解析	48
4.4	旋回時モータ出力低減化手法	48
4.5	実験による検証	50
4.5.1	車輪角度と操舵トルクの関係について	53
4.5.2	遠心力の影響の検証	53
4.5.3	路面の影響の検証	54
第5章	操作支援システム—パワーアシスト&スキルアシスト—	57
5.1	全方向移動パワーアシストシステム	57
5.1.1	パワーアシストシステムの原理	57
5.1.2	ファジィ推論による操作意図推定	58
5.1.3	操作力の検証	61
5.2	ファジィ推論のパラメータに関する考察	64
5.3	従来のスキルアシストシステム	68
5.3.1	従来研究におけるスキルアシストシステム	68
5.4	スキルアシストシステムの改良と全方向への拡張	72
5.4.1	従来システムの改良	73
5.4.2	スキルアシストシステムの全方向への拡張	74
5.4.3	検証実験	79
第6章	結言	93
6.1	結論	93
6.2	残された課題と今後の展望	94
	参考文献	97
	研究業績	109
	謝辞	111

付録 A	重ねあわせ方による差動歯車機構の運動学モデルの導出	115
A.1	遊星歯車型差動歯車機構の運動学モデル	115
A.2	平歯車型差動歯車機構の運動学モデル	117
付録 B	全方向移動車いすの構成	121
B.1	駆動ユニット	121
B.2	制御ユニット	124
B.3	操作インタフェース	127
B.3.1	ハプティックジョイスティック	127
B.3.2	パワーアシストハンドル	129
B.4	制御システムの構成	130
付録 C	全方向移動ベッドの構成	131
C.1	駆動ユニット	131
C.2	制御ユニット	133
C.3	パワーアシストハンドル	134
C.4	制御システムの構成	135
付録 D	3輪全方向移動プラットフォームの構成	139
D.1	駆動ユニット	139
D.2	制御ユニットおよびシステムの構成	139

第1章 緒言

1.1 研究背景

日本は現在、団塊世代の定年退職による人材・技術の流出、国民年金保険料の引き上げの問題などに代表されるように少子高齢化による問題を数多く抱えている。日本の2012年における総人口に占めるおおむね65歳以上の老年人口の割合(高齢化率)は24.1%であり、2050年にはおよそ40%まで増加することが予測されている^[1]。この問題は日本だけに限らず、欧米諸国を含む先進国で共通する社会問題として取り上げられており、さらに、中国やアフリカ諸国などの発展途上国においても年々高齢者の割合は増加してきており、発展に伴う少子高齢化の加速が予測されている^[2]。このことから、高齢化社会の問題は全世界共通の問題となりつつあることがわかる。現時点で最も高齢化率の進んでいる我が国は、他の先進国やこれから高齢社会を迎える諸外国に先行して様々な対抗策を講じることが可能であり、この成功こそが今後全世界を牽引し得る国となるための重要な鍵となる。

日本はこれまで自動車や電機・電子産業等の成長とともに発展をつづけてきたが、その陰には産業用ロボットの発展があった。2011年の産業用ロボットの世界市場で日本企業の占める割合は50.2%であり、世界最大規模を誇る^[3]。しかし直近5年間の台数ベースの統計では、中国市場の急速な発展もあり、約25%縮小しており、競争力の強化が必須である。

経済産業省の掲げるロボット分野の技術戦略マップでは、ロボット産業の市場は2010年時点

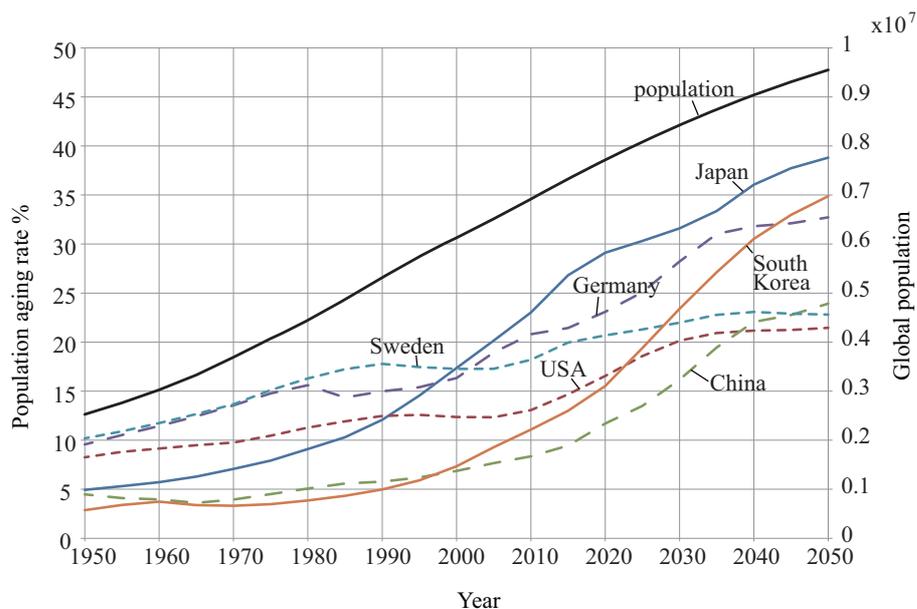


Fig. 1.1 Population and aging rate

で8,600億円であるのに対して、2035年には最大9.7兆円まで拡大するとされている^[4]。先にあげた高齢化の問題や大規模災害への対応など社会的課題の解決や社会ニーズの対応に、これまで蓄積されてきたロボット技術(RT)の活用が期待されており、そのためにRTの高度化や次世代ロボット市場の創出・拡大、安全性基準の制定等が重要であると述べられている。

ロボットは主に「産業用ロボット」と「サービスロボット」に大別される。前者は、先にも述べた工場にて用いられるロボットの事を指し、後者は医療・福祉や防災、生活支援、アミューズメント等の多様な用途へ活用される。またサービスロボットはさらに、以下の5種類に大別され、それぞれ異なる機能を駆使し我々の生活の支援を行う。

1. コミュニケーション型
2. 移動作業型(操縦中心, 自律中心)
3. 人間装着・密着型
4. 搭乗型
5. 汎用型

コミュニケーション型ロボットは、人との言語・非言語コミュニケーションをとることを目的としたロボットであり、マスコットロボットのものから心理学の解析に用いられるもの、医療福祉施設におけるセラピーに用いられるものなどもある^{[5][6]}。移動作業型は、操縦中心型と自律中心型に分けられ、パワーアシスト型の台車や、病院内での薬品の搬送や清掃作業、警備などを行うロボットなどがある^{[7][8]}。人間装着・密着型は、ロボットスーツや操作支援ロボットに代表されるように、人の能力を増幅するなどして人の作業の補助を行うロボットである^{[9]~[11]}。搭乗型は、セグウェイやトヨタのMOBIRO, Wingletなどのように中近距離移動支援を対象としたロボットである^{[12][13]}。最後に汎用型は、主にヒューマノイドロボットを指し、高い自由度を駆使し様々な環境へ対応することができる^{[14][15]}。

内閣府は高齢化問題の対策としてロボット技術の応用を推進しており、閣議決定された国家成長戦略では「国民の『健康寿命』の延伸」の重点施策として「ロボット介護機器開発5ヶ年計画の実施」が掲げられている^[16]。また経済産業省は上に挙げたロボットのうち、要介護者の自立支援促進と介護従事者の負担軽減に対して有効かつ実現可能性の高い分野を「ロボット技術の介護利用における重点分野」として以下5項目に重点を置いて開発の支援を行っている^[17]。

1. 移乗介助
 - ロボット技術を用いて介助者のパワーアシストを行う装着型の機器
 - ロボット技術を用いて介助者による抱き上げ動作のパワーアシストを行う非装着型の機器
2. 移動支援
 - 高齢者等の外出をサポートし、荷物等を安全に運搬できる技術を用いた歩行支援器
 - 高齢者等の屋内移動や立ち座りをサポートし、特にトイレへの往復やトイレ内での姿勢保持を支援するロボット技術を用いた歩行支援器
3. 排泄支援
 - 排泄物の処理にロボット技術を用いた設置位置の調節可能なトイレ
4. 認知症の方の見守り

- 介護施設において使用する，センサーや外部通信機能を備えたロボット技術を用いた機器のプラットフォーム
- 在宅介護において使用する，転倒検知センサーや外部通信機能を備えたロボット技術を用いた機器のプラットフォーム

5. 入浴支援

- ロボット技術を用いて浴槽に出入りする際の一連の動作を支援する機器

介護現場には人を抱きかかえるなどの身体的負担の大きく掛かる動作が数多く存在するため、腰痛などの作業関連性筋骨格系障害が多発し、作業の非効率化や早期退職などが問題となっている。リフトなどの介護機器は正しい使用方法を身につけることで腰痛対策や経済効果が見込めることがわかっており、施設の保有率はほぼ半数であるのにも関わらず、日常的に使用される割合は15.4%程度であることが報告されている^{[18]~[20]}。この要因として機器の使用に手間が掛かることや、「介護の基本は人の手で行うもの」という方針からロボット技術の導入に懐疑的であること、要介護者の安全等には気を配るものの介護者自身の負担軽減やリスクに対する意識が低いことが挙げられ、介護に対する意識改革が必要であるとの見解がある^[21]。またこのような背景から、経済産業省の「介護・福祉ロボット開発・普及支援プロジェクト^[22]」では、介護ロボットの普及に対人安全性の技術や基準の確立も重要な課題として挙げられている。

以上の背景から、将来高齢化の進行により訪れる深刻な介護士不足や老老介護に対抗する手段として、高齢者の自立生活支援や介護者の負担軽減が可能な機器の開発の重要性が窺える。特に、先に挙げたサービスロボットの分類の中でも、移動作業型(操縦中心、自律中心)、人間装着・密着型、搭乗型の移動支援を主とする生活支援ロボットの国際安全規格(ISO/DIS 13482)が制定されたこともあり^[23]、今後実用化に向けた動きも加速することが予想できる。

これら機器の移動に関しては、移動機構の性能がロボットの適応範囲や操作性を決める要素であるため、性能の向上は機器の可能性の向上に繋がる。移動機構には車輪移動機構やクローラ機構、リンク機構などがあるが、エネルギー効率や実用可能性などから車輪移動機構が一般的である。車輪移動機構は通常、平行二輪駆動タイプのものが一般的であるが、狭所にて切返し動作が必要になるなどの問題を抱える。全方向移動機構はロボットが如何なる姿勢であっても任意の方向へ移動できるため、狭所においても切返し動作が必要なく、自由な移動を実現できる。またこれら機器を、身体機能の障害により自身で自由にもしくは全く操作できない要介護者もいるため、自動もしくは半自動化された操作支援も重要な課題であると言える。

以降では、それぞれ全方向移動機構・機器や移動支援、研究室内における従来研究について述べ、残された課題や問題点について明らかにする。

1.2 関連研究

1.2.1 全方向移動機構

全方向移動機構は、フリーローラ型と球状車輪型、キャスト型の3種類に大別される^{[24][25]}。フリーローラ機構は、Fig. 1.2(a)及び(b)に示すオムニホイールやメカナムホイールに代表

されるように、車輪の外周にフリーローラを設けることにより車輪回転方向以外の外力を逃がし、全方向移動を実現する機構である^{[26]~[29]}。本機構は構造が簡素で制御も比較的容易に実現できるため、一般的に広く用いられている^{[30]~[33]}。しかしこれらの機構はフリーローラの影響により、段差越え能力や不整地走行性などの運動能力が低いという問題を抱える。またフリーローラの影響により車輪を真円にできず、振動や騒音が発生することや、ローラの材質によっては滑りが生じるなどの問題もある。

この問題に対し、Chugoらは車体にリンクを設けることにより段差適応能力を向上させる機構を開発したが、車輪回転面に対して垂直方向(フリーローラの回転方向)への段差適応能力は従来と変わらず低い^[34]。多田隈らはFig. 1.2(c)に示す”Omni-Ball”と呼ばれる球状フリーローラを用いた機構を開発し、段差踏破性や溝に対する走行性能、斜面走行などにおいて従来のオムニホイールとの比較を行い走破性の向上が確認された^[35]。しかし、車輪製作が困難であることや車輪の材質・強度の最適化などの課題も残されている。また小森らは、フリーローラを駆動させる機構を開発し、フリーローラが原因で起こる動作の不具合や駆動力の向上を可能とした^[36]。しかし、機構が複雑で巨大化することや、フリーローラの回転方向に対する段差乗り越え能力が低いなどの課題も残されている。この他にも、広瀬の「VUTON」ようにフリーローラをクローラの外周に配置し耐荷重性を高めた機構^[37]や、多田隈らのように、筒状のクローラを回転させることで横方向への移動を可能とした機構^[38]などもある。

次に、球状車輪機構は球状の車輪を用いた全方向移動機構であり、Fig. 1.3(a)のように二台のモータにより車輪を摩擦駆動するものや^{[39][40]}、Fig. 1.3(b)のように三つ以上の球状車輪にそれぞれ一台のモータを、駆動方向が異なるように搭載することでモータ数が削減可能なものもある^{[41][42]}。本機構は車輪の連続した接地が可能であるため滑らかに移動できるという特徴を持つ。しかし前者の場合、二台のモータは互いに違う方向へ力を発生させるため動力の干渉について対策を講じる必要があることや、機構全体的な課題として、摩擦により車輪を駆動させるため車輪構造内部への砂埃や水などの異物の混入に弱いなどの問題も抱えている。

最後にキャスタ駆動輪は、自在キャスタを駆動輪化した機構である^{[43][44]}。Fig. 1.4(a)に示すように車輪軸と操舵軸をモータにより駆動し、車輪接地点と操舵中心点間に設けられたオフ

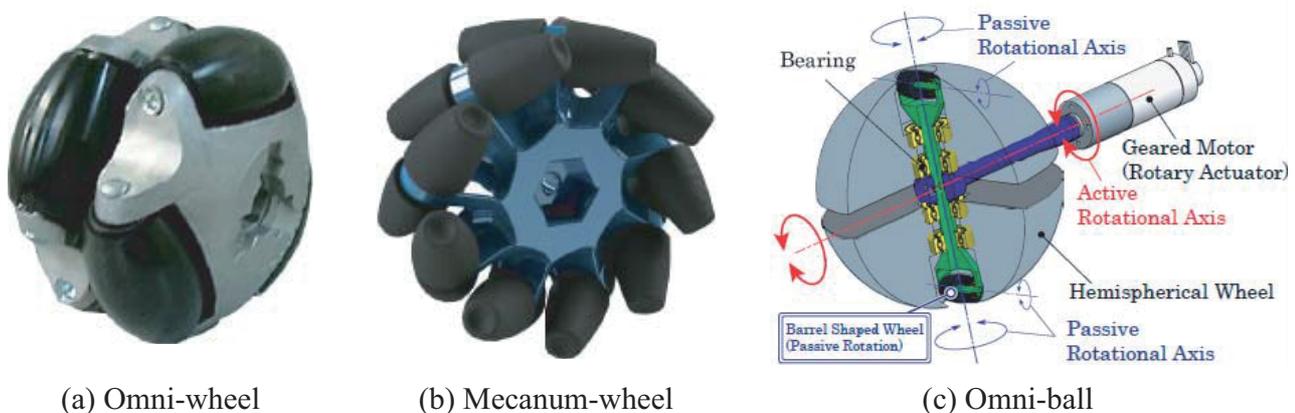


Fig. 1.2 Free roller mechanism

セットにより独立した2自由度の出力が得られる機構である。通常車輪による移動が可能ながことが最大の特徴であり、高い段差乗り越え性能や振動・衝撃・騒音の吸収が可能である。そのことから搬送作業にも適しており、Fig. 1.4(b)に示すような移動マニピュレータの移動機構として用いられている例もある^[45]。しかし本機構は、モータ容量が増加することや、走行状況に応じて使用しないモータが存在するためモータ運用率が低いという問題がある。Wadaらは車輪と操舵の制御則が複雑であるという問題に対して、Fig. 1.4(c)のような球状伝達機構を応用することで動力を進行方向ごとに分配可能とする全方向移動機構”ACROBAT”を開発した^[46]。しかし機構性能の検証は十分されておらず、機構の伝達効率や材質の検討などの多くの課題が残されている。

全方向移動を実現するためには最低3自由度の駆動力が必要になるが、オムニホイールを四輪以上用いる場合や、2自由度有する球状車輪機構やキャスト駆動輪を二輪以上用いる場合は

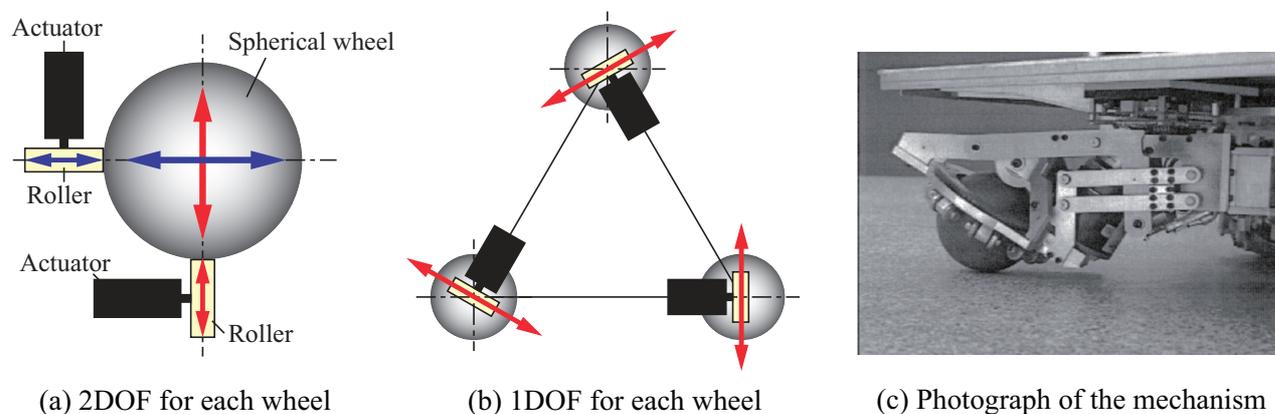


Fig. 1.3 Ball wheel mechanism

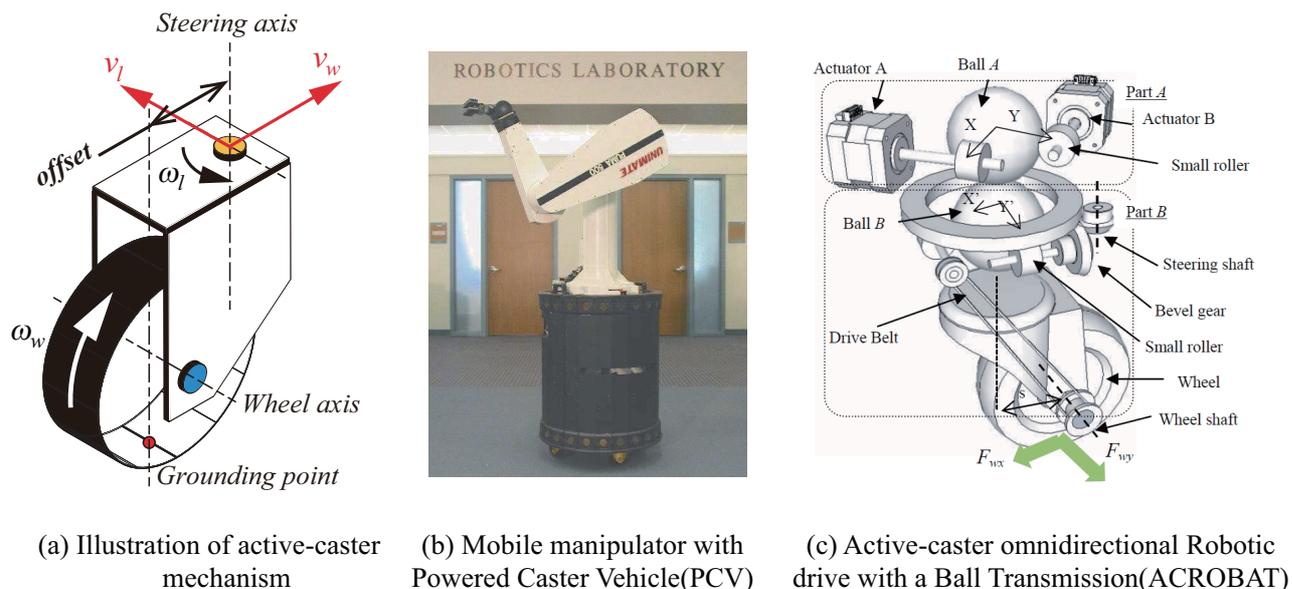


Fig. 1.4 Active caster mechanism

自由度が3以上となり、冗長システムとなる。そこでオムニホイールを四輪用いた移動ユニットに差動歯車機構を応用することで3自由度駆動としたものや^[47]、双輪型のキャスト駆動輪を応用したもの^[48]、各車輪を協調駆動させるもの^[49]などがある。ただしこれらは機構上、車輪の配置等に制約がある。

全方向移動機構を用いた機器は数多く存在するが、福祉分野に絞ると車いす^{[50] [51] [48]}や歩行支援装置^{[52]~[54]}、配膳用の台車^{[55] [56]}、移乗支援ロボット^{[30] [31]}などがある。

車いすは住宅内などの限られた空間の中で移動するのに有効であり、フリーローラ型機構や球状車輪機構、キャスト型機構などを用いたものが開発されている。歩行支援装置は起立支援や転倒防止にも活用され、廊下でのすれ違いなどの時に真横に移動する必要があるため全方向移動機構を応用したものが多く、また機構の専有スペースの小さいフリーローラ型機構や球状車輪機構が応用されている例が多い。Panasonicが開発した配膳用台車はオムニホイールによる全方向移動機構が応用されており、パワーアシストによる操作により700kg程度の重量のある本機器を一人で楽に操作できるようになっている^{[55] [56]}。また本機器はハンドルを片手で持つか両手で持つかで車両挙動を非ホロノミックとホロノミックな動作に切り替えることで、誤操作を防ぎ安全性を高める配慮がされている。理研-東海ゴム人間共存ロボット連携センターが開発したRI-MANやRIBAと呼ばれる双腕型移動マニピュレータには、人の形に近いロボットによる移乗介護により、要介護者に安心感を与えるシステムとして開発され、移動機構にはフリーローラ型の全方向移動機構が使用されている^{[30] [31]}。

また全方向移動機器ではないが、移動方向に制約の無い全方向移動機構の特徴を活用し、和田らはキャスト駆動輪一輪を通常の車いすに搭載することで、簡単に電動化が可能なシステムを開発した^[57]。

1.2.2 操作支援システム

電動車いすやセニアカーは容易に移動能力を補うことができる自立支援のための移動機器である。しかしながら状況判断や咄嗟の対応が遅れる操作者もあり、利用中の事故は少なくはなく、走行中の安全性や安定性は重要な課題として挙げられる^{[58] [59]}。移動支援システムは、自力での操作が困難か、状況判断が十分にできない利用者の操作負担軽減のために用いられ、自動化もしくは半自動化されたものがある。自動化された機器は、搭乗者や操作者の意思に関係なく環境センシングを行いながら目的の動作を実現するものであり、車いすなどの自動走行に関する研究がある^{[60] [61]}。一方半自動化された機器は、基本的には操作者の意思を尊重しながら操作力のアシスト(パワーアシスト)や衝突回避、移動方向の補正など状況に応じて操作性の向上や危険回避などを行う機器であり、操作者の意図推定や特性解析、環境認識などの研究が行われている^{[62]~[64]}。

パワーアシストとは、機器により人の身体機能を補助もしくは増幅するシステムであり、人の力では扱えない重量物であっても軽い力で扱うことが可能となる。また加えた力に応じて機器が動作するため、リモコンなどのコントローラを用いる必要が無く、直感的な操作が可能であり、かつ制御的に動作制限などを設けることで安全性や精確性を高めることもできる^{[65]~[67]}。

身体的負担軽減とそれがもたらす様々な利点から多くの機器の操作インタフェースとしても用いられている。例えば車いすでは、搭乗者の場合は操作負担軽減とそれによる行動範囲拡大が、介護者の場合も同様に身体的負担軽減と作業の効率化が可能となるという利点がある。

ヤマハ発動機や今仙技術研究所は、通常の車いすのホイールをモータ付きのものに取り換えることで電動化が可能なユニットを販売している^{[68][69]}。これは、ホイールに加えられた力を計測し、閾値を超えた場合に力に比例したトルクを発生させるものであるが、路面傾斜に対する補正機能は無く、意図通りに操作できない場合があり、事故を招く恐れがある。馬場らはヤマハ発動機の「JW-II」を用いてジャイロセンサによって検出した傾斜角度からアシスト力を変化させ、平坦路と同様の力で操作できるシステムを開発した^[70]。また Seki らは、推定した路面状況に応じて車輪トルクを補正することで、直進性を保ちながら、同様の感覚を操作可能なシステムを構築した^[71]。ヤマハ発動機からはさらに、介助者に対するアシストシステムも実用化されており、同様の機器を用いた研究も多数見受けられる。垣本らは、軽量車いすと同様の操作感で操作可能な介助型車いすのパワーアシスト制御の開発を行った^{[72][73]}。Tashiro らは、反力推定オブザーバを用いることで、力センサを用いず操作が可能なパワーアシスト制御を開発し、段差越え手法の開発も行った^[74]。

車いすを使用するためにはベッド-車いす間の移乗作業が必要になるが、介護施設で行ったヒアリングでは、移乗作業の必要性を取り除くことのできる機器への要望があった。Mascaro らや Panasonic は、Fig. 1.5 のような、ベッドの一部を車いすに変形させる機器を開発した^{[75][32][33]}。しかしながら本機器は、変形に時間を要することや、実証実験が行われていないため、実用性が分からないなどの課題が残されている。施設介護の現場では、作業の手間を省略するために要介護者をベッドに寝かせたまま移動する場合がある。これは通常2名以上の介護者で行われるが、人手が失われるうえ、重量が大きいため取り回しが困難であり操作に神経を使い、かつ身体的な負担が大きい。ベッドの電動駆動化はこれらに対する有効な手段であり、Burke Inc. からはジョイスティックにより操作可能な電動ベッドが市販化されている^[76]。しかし本機器は、平行二輪駆動であるため前後並進と旋回動作しか行えず、操作に熟練を要するなどの問題点が挙げられる。

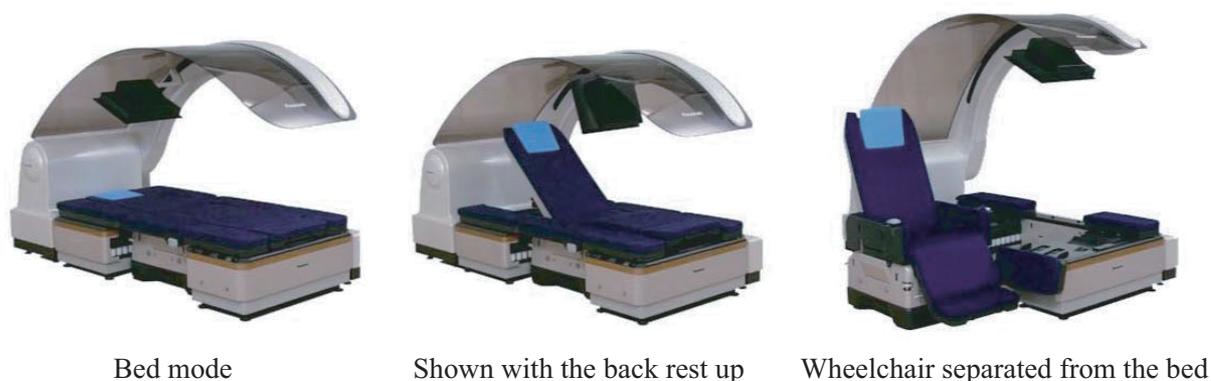


Fig. 1.5 Panasonic "Robotic Bed"

1.2.3 本研究室内の研究

本研究室では、別府により、オムニホイールを用いた全方向移動車いす (Omni-directional Mobile Wheelchair: 以下, OMW) が開発され^{[77][78]}, これを用いた搭乗者と介助者に対する操作支援システムの開発が行われてきた。

搭乗者のためのシステムとして、小林は赤外線センサや超音波センサを用いた環境認識システムにより得られた障害物データをハプティックジョイスティックにより操作者へ提示し、回避を促すシステムの研究を行った^[79]。また横山は、ジョイスティックでの操作時に生じる急激な操作入力に対してリファレンスガバナを用いることで急加速を抑制する研究を行った^[80]。近藤は、レーザ測域センサを用いたオンライン全方位測域システムを構築し、ハプティックジョイスティックを用いた誘導システムを構築した^{[81][82]}。また佐藤は、近藤の構築したシステムを、3軸ハプティックジョイスティックを用いた全方向移動用のシステムへ拡張した^[83]。

介助者に対するシステムとして、パワーアシストシステムに関する研究が行われている。パワーアシストシステムは、車両後方に取付けられたハンドルに加えられた力をセンサにより計測し、モータを駆動させることで操作力の補助を行うシステムである。西坂は、ファジィ推論を用いた操作意図推定システムを開発し、直進・真横並進・その場旋回における操作性を改善した^{[84][85]}。Juan, 北村らは、操作者ごとに異なる操作特性を考慮し、ファジィ推論パラメータをANFIS(Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System)^[86]によりオフライン調節するシステムを開発した^{[87]~[89]}。また渡邊は、操作の安定性について、操作入力と車両速度から加速・定速・減速の三つの走行状態を推定し、状態に応じて時定数とゲインを調節することで安定した走行を可能とするスキルアシストシステムを構築した。また本システムには、定速時の車両速度の標準偏差から操作の熟練度推定し、アシストの度合いを調節することで操作者の慣れに対応するシステムも含まれている^{[90][91]}。

また従来のOMWは、オムニホイールを使用していたため、運動性能や振動・騒音の問題を抱えていた。そこで大野は、キャスト駆動輪と遊星歯車による差動歯車機構を利用した差動駆動操舵機構 (Differential Drive Steering System: 以下, DDSS) を提案した^{[92][93]}。しかし遊星歯車機構は動力の分配率を均一にできず、効率的ではないという問題があった。



Fig. 1.6 Photograph of conventional OMW

その他にも全方向移動に関わらず車いすに関する研究が行われており、小笠原は、市販の介助用車いすを電動駆動化し、 H_{∞} 制御を用いたパワーアシストシステムを開発し、搭乗者の体重や、路面状況の変化に対応可能なシステムを構築した^{[94][95]}。また佐藤は、市販の電動車いすにおける乗り心地や快適性の向上を目的とした搭乗乗車の人体挙動の解析として、人体挙動モデルの構築と快適走行パターンの生成手法を提案した^{[96][97]}。またこれに対する快適性の主観的・客観的な評価手法の構築や、モデルパラメータの傾向解析などの研究も行われている^{[98]~[101]}。

1.3 解決すべき課題

関連研究の調査から、全方向移動機構を操作支援システムそれぞれに解決すべき課題が存在することがわかる。

まず全方向移動機構については、実用性の高いフリーローラ型機構とキャスタ型機構を比較すると、前者は容易に移動を実現できるものの他の機構に比べ運動性能に問題がある。また後者は運動性能の向上は見込めるもののフリーローラ機構に比べてモータ容量増加や運用率低下などが問題となる。つまりこれらの機構の間には、運動性能向上とモータ容量低減化および運用率向上の二律相反な課題が存在することがわかる。

次に操作支援システムについては、従来研究では特定の機器に対する応用についてのみ述べられており、他の機器への応用性については言及されていなかったことが課題として挙げられる。本研究室内で開発されたスキルアシストシステムについても、前進方向にのみ構築され検証が行われていたが、様々な方向への操作を行った場合については検討されていなかった。手漕ぎ型車いすのアシストシステムを他の同様な構成の車いすへ応用するなどであれば、問題なく実装でき効果を得られることは予想できるが、異なる対象に適用可能であるかは検証を行う必要がある。また逆に、異なる機器への適用性を実証することができれば、今後様々な機器に対する移動支援システムとしての活用が期待できる。

1.4 研究目的と論文構成

本研究では、全方向移動機構における運動性能向上とモータ容量低減化および運用率向上の二律相反な課題に対して、新たなDDSSを提案する。従来研究では遊星歯車機構を用いたDDSSが開発されたが、本研究では新たに平歯車機構を応用したDDSSを提案する。DDSSはキャスタ駆動輪に差動歯車機構を応用した機構である。差動歯車機構は動力分配機構とも呼ばれ、二つの動力を合成し二つの独立した出力へ分配可能な機構である。これをキャスタ駆動輪に应用することで常に二台のモータの合力により駆動できるため、モータ容量の低減を可能とする。本研究では、機構の特性解析や運動学モデルの導出、設計手法の提案、DDSSを用いた応用機器として全方向移動車いすや全方向移動ベッド、3輪DDSSプラットフォームなどの開発を行う。また、操作支援システムの課題に対しては、DDSSの応用機器として開発したOMWとOMBの車両サイズや重量等が異なる車両に対して同様のシステムを実装し、操作性に関する検証実験を行うことで、システムの汎用性や実装上の課題を検討する。

本論文の主要成果は、(1) 平歯車型差動駆動操舵機構の開発、(2) それを用いた複数の全方向移動機器の開発および検証、(3) 全方向移動操作に対する操作支援システムの構築である。本論文はこれまでにない新機構により、全方向移動機器の問題点であった運動性能とモータ運用率を同時に改善可能な点において独創的であり、新規性がある。学術的な面では、機構の運動学モデルや静力学モデルの導出とそれらを用いた出力の解析から提案機構の有用性を比較・検証した点に新規性・独創性がある。応用的には、通常車輪利用による高い運動性能やモータを効率的に利用可能な全方向移動機構であるという点に有用性があり、産業界にも貢献できるものである。

本論文の構成を Fig. 1.7 に示す。本章では、研究背景および研究目的について述べた。第2章では、本研究で提案する差動駆動操舵機構の基本原理および運動学モデル、トルクモデル等の導出、またそれらを用いた解析結果について述べる。第3章では、本研究にて開発した機器について説明し、異なる車輪数に応じた車両運動学モデルの導出および疑似逆行列を用いた逆運動学モデルの導出について述べる。さらに第4章では、キャスト駆動輪特有の車輪接地点と操舵中心点間のオフセットにより生じる旋回時のモータ出力上昇問題の発見と、解析および改善手法について述べる。また第5章では、移動支援システムとしての全方向移動パワーアシストシステムおよびスキルアシストシステムについて実験結果とともに述べる。最後に、結言・今後の展望を述べ、本論文を締めくくる。

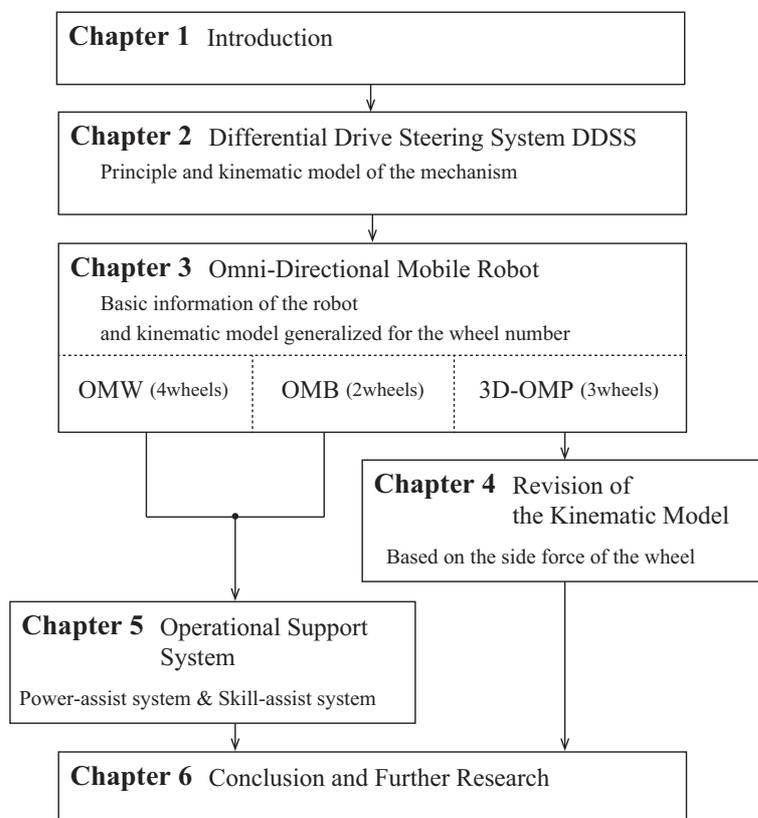


Fig. 1.7 Outline of this dissertation

第2章 差動駆動操舵機構

差動駆動操舵機構 (DDSS) は、キャスト駆動輪に差動歯車機構を応用した全方向移動機構である。キャスト駆動輪は通常の車輪を用いて移動できるため高い移動性能を有するが、モータ容量の増加や運用率の低下などの問題を抱えている。

本研究では、動力分配機構とも呼ばれる差動歯車機構を用いることで、これらの問題点を改善可能な機構を提案する。本章では、提案する DDSS の動作原理や運動学モデルについて述べる。

2.1 キャスタ駆動輪

2.1.1 機構動作原理

キャストは通常、従動輪 (補助輪) として用いられる受動的な機械要素である。搬送台車やオフィスチェア、ショッピングカートなどにも用いられており、全方向に対して受動的に動作する能力を有することがわかる。キャスト駆動輪は、車輪軸と操舵軸にそれぞれアクチュエータ付加することで駆動輪化した全方向移動機構である。全方向移動を実現するキャストは車輪の接地点と操舵軸の間にオフセットが設けられていることが特徴であるが、オフセットの方向や、各モジュールに用いられる車輪の数などで機構の特徴が異なる。オフセットを持たずに車輪を操舵する機構も存在するが^[102]、車輪操舵後にしか移動できずホロノミックな全方向移動機構とは言えないため本稿では取り扱わない。

最も一般的なキャストは、Fig. 2.1(a) に示すように、オフセットが車輪回転に対して設けられているものである。車輪回転により前後方向への駆動力が発生し、操舵回転により垂直方向へ駆動力が発生する。一方、Fig. 2.1(b) のように、オフセットの方向を車軸方向に設けたキャスト型機構も存在する^{[103] [104]}。本機構は車軸方向への移動が制約されるため、車輪を進行方向へ操舵した後でなければ移動できず、本稿にて表現するところの全方向移動機構とは異なる。しかしオフセットを設けることで車輪を回転させながら操舵を行うため、オフセットが存在せず車輪接地点を中心に車輪を操舵する機構^[102]に比べて車輪接地点に生じるねじりが少なく滑らかな操舵が行える特徴を持つ。上記二項はいずれも、各モジュールの有する車輪は一輪のみであったが、Fig. 2.1(c) に示すような二輪用いた双輪キャスト駆動輪も存在する^{[105] [106]}。本機構は二つの駆動輪が平行に配置され、操舵中心点は車輪回転軸から車輪回転方向へオフセットを持たせて配置される。二つの車輪の回転数を制御することで二自由度の速度を発生できるため操舵軸のアクチュエータが不要となる。

本研究にて開発する全方向移動機構は、機構が比較的簡素であるという理由などから、一番目に例として挙げた単輪型で車輪回転方向にオフセットを持つ機構をキャスト駆動輪として用いる。

2.1.2 運動学モデル

キャスト駆動輪のモデルを Fig. 2.2 に示す. また各変数を, $O_w(x_w, y_w)$: 操舵中心点の座標 [m], θ_w : 車輪操舵角度 [rad], \dot{x}_w : 車輪 X 軸方向速度 [m/s], \dot{y}_w : 車輪 Y 軸方向速度 [m/s], ω_w :

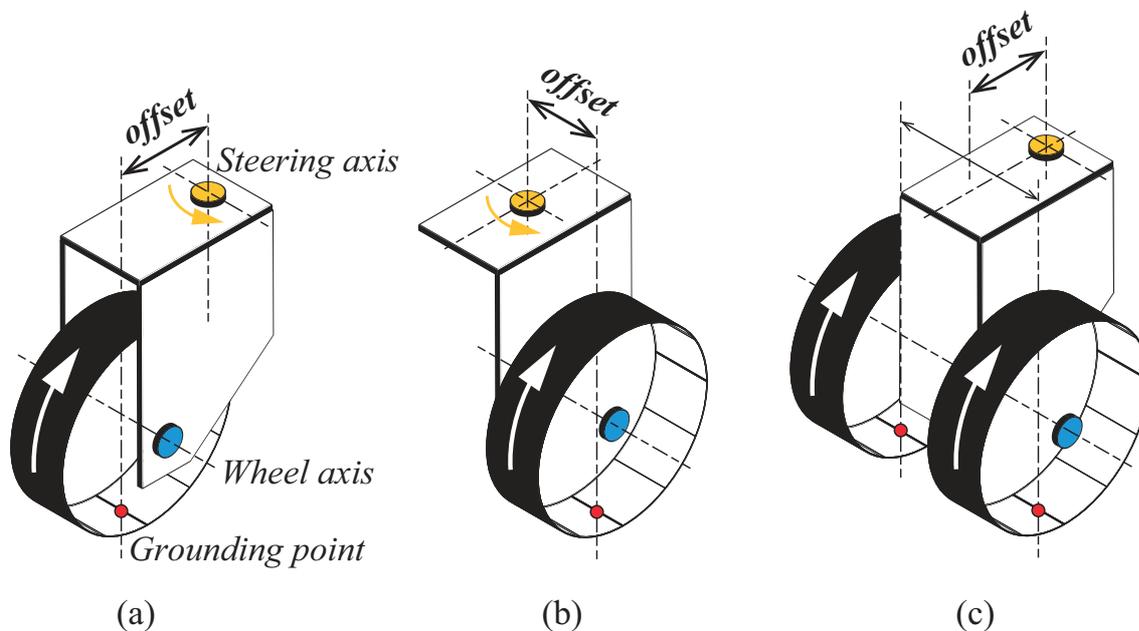


Fig. 2.1 Types of the active-caster mechanism: Type of caster (a) has an offset in the direction of the rotation of the wheel, (b) has an offset in the direction of wheel axis and (c) has dual wheels with an offset in the direction of wheel rotation.

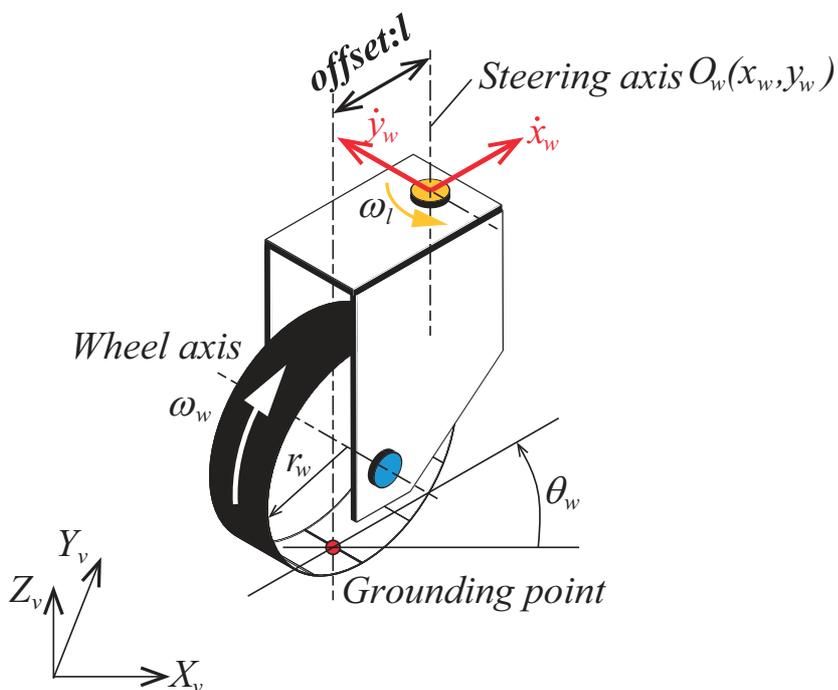


Fig. 2.2 Model of active-caster mechanism

車輪回転角速度 [rad/s], ω_l : 車輪操舵角速度 [rad/s], r_w : 車輪半径 [m], l : オフセット量 [m], と定義する.

キャスト駆動輪は車輪軸と操舵軸の角速度を制御することで, 操舵軸上に発生する独立した二自由度の駆動を制御できる. 従来研究より^[43], 機構の運動学モデルは車輪の状態ベクトル x_w , 入力ベクトル u_w をそれぞれ $x_w = [x_w, y_w]^T$, $u_w = [\omega_w, \omega_l]^T$ とすると, 以下のように導出される.

$$\dot{x}_w = B_w u_w \quad (2.1)$$

$$B_w = \begin{bmatrix} r \cos \theta_w & -l \sin \theta_w \\ r \sin \theta_w & l \cos \theta_w \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

また, 逆運動学モデルは,

$$u_w = B_w^{-1} \dot{x}_w \quad (2.3)$$

$$B_w^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{r} \cos \theta_w & \frac{1}{r} \sin \theta_w \\ -\frac{1}{l} \sin \theta_w & \frac{1}{l} \cos \theta_w \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

となる.

2.2 差動駆動操舵機構

キャスト駆動輪は通常, Fig. 2.3(a) に示すように, 車輪軸と操舵軸を別個のモータで駆動する. ロボットアームなどの場合は各自由度を個別に駆動する方式は「非干渉駆動」と呼ばれ, モータ容量の増加やそれに伴うロボット全体の質量の増加が生じる. キャスタ駆動輪の場合, 操舵軸の駆動は進行方向を転換する場合しか用いないため, 定常走行期は車輪軸の駆動のみとなり, モータ搭載容量に対する使用容量が小さくなりモータの運用率の低下が生じる. これに対し, ワイヤ駆動のロボットアームなどのように, 他軸からの影響を受けるものの機構の設計次第で軽量化やモータ容量の削減が可能となる「干渉駆動 (Coupled-drive)」方式も存在する^[107]. DDSS は, 差動歯車機構によりキャスト駆動輪の車輪・操舵の駆動自由度を「干渉化」させることで運用率低下の問題を解決する機構である.

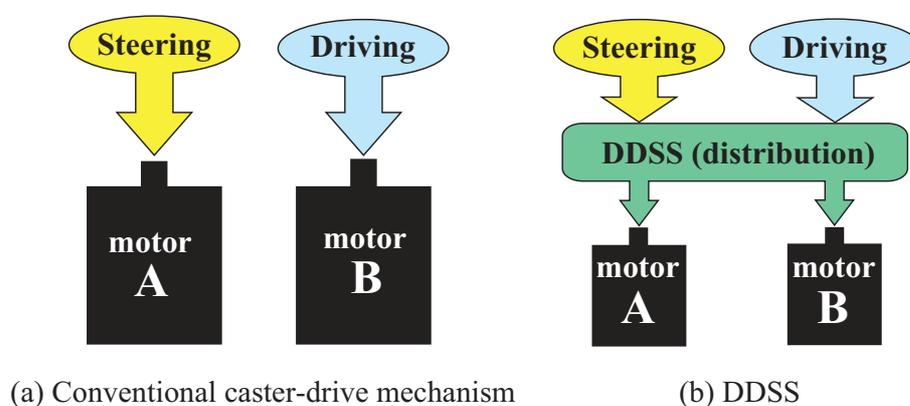


Fig. 2.3 Conceptual diagram of the DDSS

差動歯車機構は減速機構や内輪差吸収機構，動力分割機構などとして用いられる．DDSSでは差動歯車機構の動力分割能力を利用し，Fig. 2.3(b)に示すように，二台のモータからの入力を一旦合成し車輪および操舵駆動出力へ分配することでモータ容量の低減を可能とする．二台のモータを常に協調駆動させながら動作するため，モータ運用率の改善が可能となる．

2.2.1 差動歯車機構

差動歯車機構は傘歯車や遊星歯車，平歯車を用いた機構が存在する．以下では，それぞれの機構の特徴について述べる．

傘歯車型機構

Figure 2.4に示す傘歯車による差動歯車機構は，自動車の内外輪の回転数差の吸収装置としても用いられる機構である．自動車の場合，回転軸AおよびBに左右の車輪が取り付けられ，キャリアDに駆動力が伝達される．歯車Cをフリーにすることで，左右の車輪の回転数差を吸収する．またマニピュレータの関節機構に用いられている例もあり，アクチュエータを根元に近い部分に集中して配置できるため先端重量を軽減できるという特徴を持つ^{[108]~[110]}．

DDSSでは，歯車A・Bにモータからの動力を伝達し，歯車CおよびキャリアDから得られる出力をそれぞれキャスト駆動輪の車輪・操舵の駆動出力として用いる．二入力互いに逆方向へ同速度で回転している場合，歯車Cがその場で回転するため一つの出力となり，これを車輪駆動に用いる．また二入力互いに同方向へ同速度で回転している場合，キャリアを含めた機構全体が回転しこれがもう一つの出力となり，操舵駆動として用いる．どちらの出力を得る場合であっても，二台のモータを使用していることが特徴である．しかしながら，機構がかさ張ることや一般的に小径になる歯車Cの摩耗，伝達効率などが欠点として挙げられる．

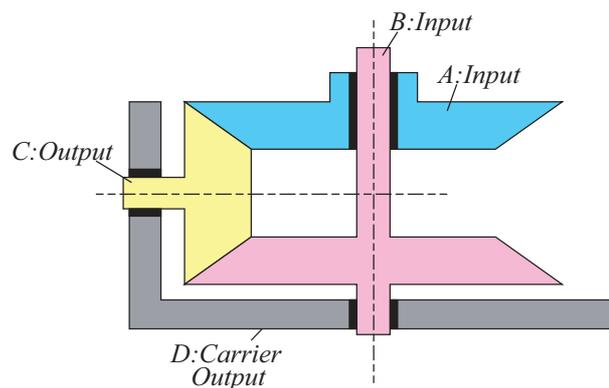


Fig. 2.4 Bevel gear type differential gearing mechanism.

遊星歯車型機構

遊星歯車機構は減速機として利用されることが多いが、ハイブリッド車のエンジンとモータの動力切り替え機構として用いられている例がある^[111]。本機構をDDSSに用いる場合は、Fig. 2.5に示すように、リングギヤAとサンギヤBへモータからの動力が入力され、プラネタリギヤCとキャリアDから機構出力が得られる。

傘歯車と同様に、入力の歯車が互いに逆方向へ同速度で回転する場合、プラネタリギヤのみが回転し駆動出力となり、同方向へ同速度で回転する場合、キャリアを含めた機構全体が回転し操舵出力となる。

本機構は他の機構に比べ差動歯車部を薄くできるという特徴を持つ。しかし、サンギヤとリングギヤのギヤ比の影響で負荷を二台のモータへ等分配できないため、状況によって二台のモータの出力比に偏りが生じるという欠点がある。

平歯車型機構

平歯車型機構は、平歯車5枚により構成される機構である。傘歯車に変わる差動歯車機構として開発された例がある^[112]、実用化された例は調査した限りでは見られなかった。機構の概略図をFig. 2.6に示す。動作原理は傘歯車機構や遊星歯車機構と同じく、中心に配置された二つのギヤA・Bにモータからの入力を与えられ、互いに逆方向に同速度で回転する場合、歯車C(上下で連結)のみが回転することになり車輪駆動出力を得られる。一方入力が同方向かつ同速度であった場合、機構全体が一体となりキャリアDとともに回転し操舵出力となる。

本機構は、遊星歯車機構と異なり、二台のモータへ負荷を等分配可能であるという特徴を持つ。以降では、遊星歯車機構と平歯車機構について取り上げ、両者の比較を行う。

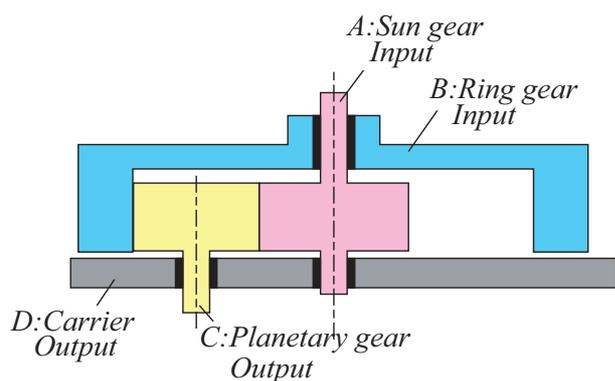


Fig. 2.5 Planetary gear type differential gearing mechanism.

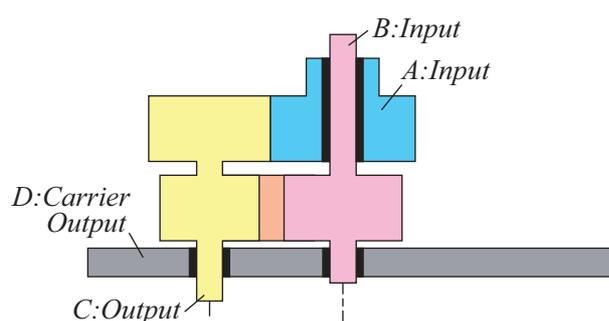


Fig. 2.6 Spur gear type differential gearing mechanism.

2.3 遊星歯車型 DDSS

2.3.1 機構概要

従来研究では、差動歯車機構として、機構の厚みを少なくできる遊星歯車機構が用いられた^{[92][93]}。Fig. 2.7に遊星歯車機構の概略図を示す。A, B, C, Dはそれぞれサンギヤ、リングギヤ、プラネタリギヤ、キャリアである。

Fig. 2.7(a)は、サンギヤとリングギヤへ互いに逆方向への入力を与えられた場合の歯車の動作例を示し、プラネタリギヤのみがその場で回転することがわかる。一方、Fig. 2.7(b)のようにサンギヤとリングギヤへ互いに同方向への入力を与えられた場合、動力の伝達を考慮すると歯車がすべてロックされる。しかしこのとき、機構中心のサンギヤとリングギヤには動方向のトルクが掛けられているため、歯車がロックされたままキャリアを回転させることとなる。

2.3.2 運動学モデル

次に、遊星歯車機構の運動学モデルを導出する。遊星歯車機構のモデルをFig. 2.8に示す。まず、A, B, C, Dの角速度をそれぞれ $\omega_A, \omega_B, \omega_C, \omega_D$ とし、歯車の歯数をそれぞれ Z_A, Z_B, Z_C とする。

機構の状態ベクトル ω_P と入力ベクトル u_P をそれぞれ $\omega_P = [\omega_C, \omega_D]^T$, $u_P = [\omega_A, \omega_B]^T$ とすると、運動学モデルは、

$$\omega_P = B_P u_P, \quad B_P = \begin{bmatrix} \frac{Z_A(Z_B - Z_C)}{Z_C(Z_A + Z_B)} & \frac{Z_B(Z_A + Z_C)}{Z_C(Z_A + Z_B)} \\ \frac{Z_A}{Z_A + Z_B} & -\frac{Z_B}{Z_A + Z_B} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

となる。また、逆運動学モデルは

$$u_P = B_P^{-1} \omega_P, \quad B_P^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{Z_C}{Z_A} & \frac{Z_A + Z_C}{Z_A} \\ \frac{Z_C}{Z_B} & \frac{Z_C - Z_B}{Z_B} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

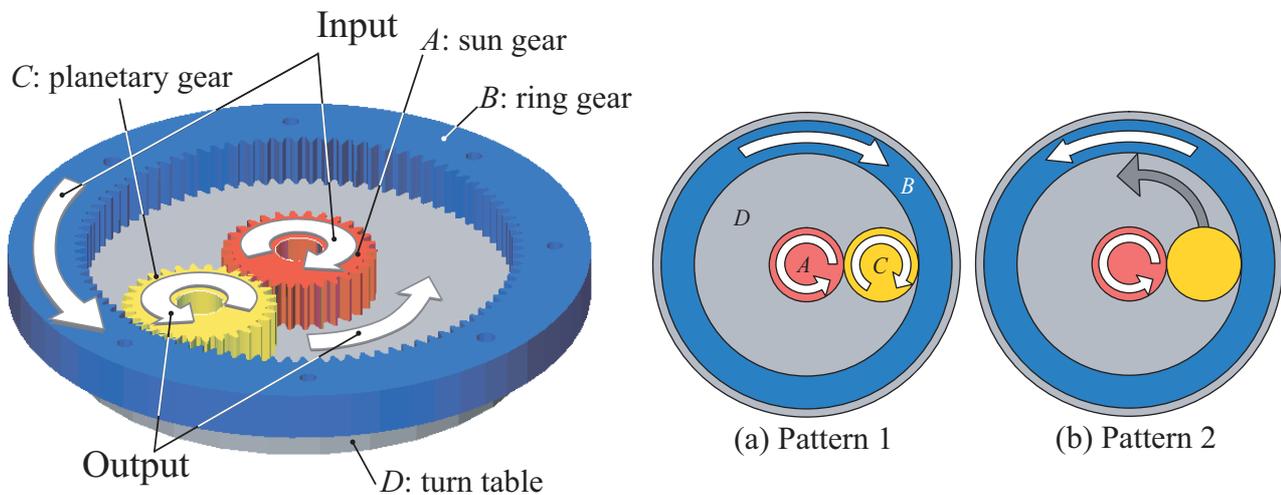


Fig. 2.7 Illustration of planetary gear

となる。上記モデルは、遊星歯車機構のギヤ比を求める際に使用される、重ねあわせ法により求められる^[113]。導出の詳細については付録 A に示す。

以上より、二つの機構出力は、二つの入力によって独立して調整可能であることがわかる。

キャスト駆動輪と遊星歯車機構のモデルの融合

遊星歯車機構の運動学モデルにて、 ω_C と ω_D はそれぞれ、機構外部から見た、所謂グローバル座標系における角速度である。歯車 C の角速度をゼロとし、ターンテーブル D をある角速度 ω_D で回転させる指令を出した場合、Fig. 2.9 に示すように、歯車 C はグローバル座標系から見ると回転していないように振る舞う。しかし、ターンテーブルから相対的に見ると回転しており、DDSS として使用した場合は車輪が回転することになる。

そこで遊星歯車機構の出力 $\omega_P = [\omega_C, \omega_D]^T$ からキャスト駆動輪の入力 $u_w = [\omega_w, \omega_l]^T$ までの

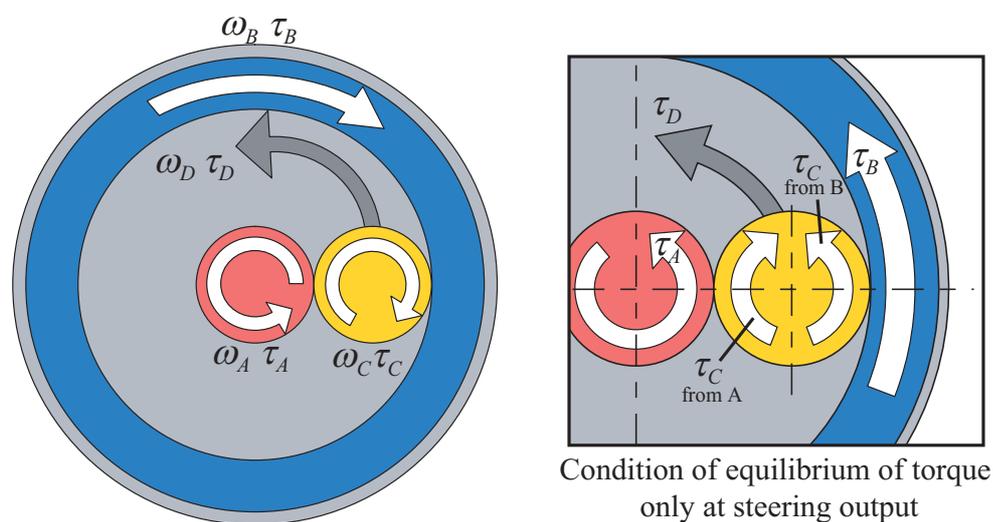


Fig. 2.8 Model of planetary gear type DDSS

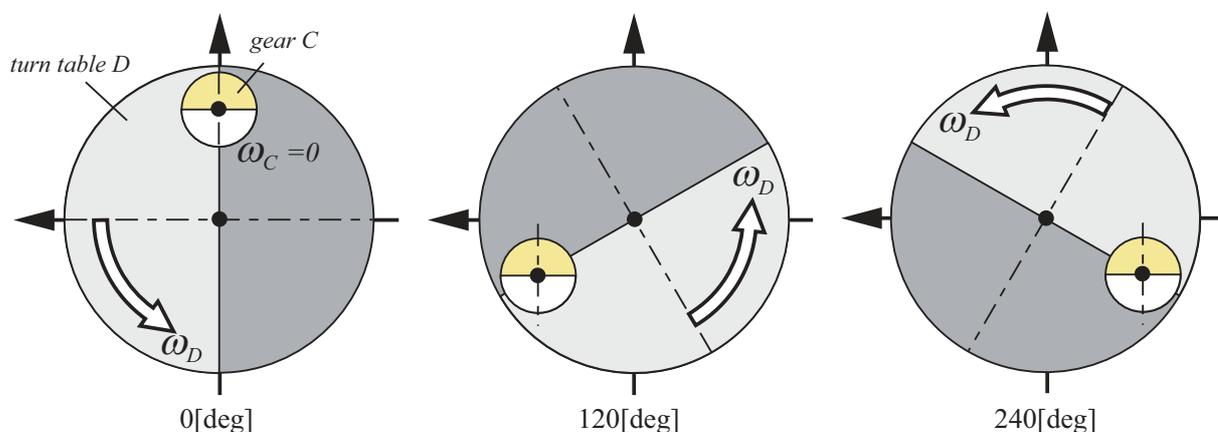


Fig. 2.9 Global and local movement of gear C and C'

間に次の関係式を導入する.

$$\begin{bmatrix} \omega_w \\ \omega_l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_C \\ \omega_D \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

上式と式(2.5)を用いて, 入力ベクトルを $u_p = [\omega_A, \omega_B]^T$, 出力ベクトルを $u_w = [\omega_w, \omega_l]^T$ とする DDSS の運動学モデルを求めると,

$$u_w = B_D u_p, \quad B_D = \begin{bmatrix} \frac{Z_A Z_B}{Z_C(Z_A+Z_B)} & \frac{Z_A Z_B}{Z_C(Z_A+Z_B)} \\ \frac{Z_A}{Z_A+Z_B} & -\frac{Z_B}{Z_A+Z_B} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

となる. また, 逆運動学モデルも同様に,

$$u_p = B_D^{-1} u_w, \quad B_D^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{Z_C}{Z_A} & 1 \\ \frac{Z_C}{Z_B} & -1 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

となる.

2.3.3 トルクモデル

次に, 遊星歯車型 DDSS の入出力トルクについて考える.

まず, 機構に駆動トルク τ_w のみ加えられた場合を考える. 駆動トルクは歯車 C に直接入力されるため, $\tau_w = \tau_C$ となる. 歯車 C がその場で回転するためには, 歯車 A と B から伝達されるトルクが互いに等しくなければならない. このことから, $\tau_A = \frac{Z_A}{2Z_C} \tau_w$ および $\tau_B = \frac{Z_B}{2Z_C} \tau_w$ という関係が導き出せる.

次に, 機構に操舵トルク τ_l のみ加えられた場合, 歯車 C を回転させずにキャリア D を回転させることを意味し, Fig. 2.8 右側の図に示すように歯車 C に歯車 A と B から互いに逆方向に同じ大きさのトルクが掛かっており, $\tau_A = \frac{Z_A}{2Z_C} \tau_l$ および $\tau_B = \frac{Z_B}{2Z_C} \tau_l$ という関係が導き出せる.

以上から, トルクモデルは,

$$\begin{bmatrix} \tau_A \\ \tau_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Z_A}{2Z_C} & \frac{Z_A}{2Z_C} \\ \frac{Z_B}{2Z_C} & -\frac{Z_B}{2Z_C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_w \\ \tau_l \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

となり, また, 逆モデルは,

$$\begin{bmatrix} \tau_w \\ \tau_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2\frac{Z_C}{Z_A} & 2\frac{Z_C}{Z_B} \\ 2\frac{Z_C}{Z_A} & -2\frac{Z_C}{Z_B} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_A \\ \tau_B \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

となる.

2.3.4 モータの出力比に関する考察

導出された遊星歯車型 DDSS の運動学モデルとトルクモデルから, 用いられる二台のモータの出力比を考える.

まず、DDSS が車輪駆動出力のみ行う場合 ($\omega_l = 0$, $\tau_l = 0$) について考える. 入力を示す歯車 A および B の角速度とトルクは,

$$\omega_A = \frac{Z_C}{Z_A} \omega_w \quad , \quad \omega_B = \frac{Z_C}{Z_B} \omega_w \quad (2.12)$$

$$\tau_A = \frac{Z_A}{2Z_C} \tau_w \quad , \quad \tau_B = \frac{Z_B}{2Z_C} \tau_w \quad (2.13)$$

となり, 出力比は,

$$P_A : P_B = 1 : 1 \quad (2.14)$$

であり, 必要とする車輪駆動出力に対して各モータは 50% ずつ分担し出力すれば良いことがわかる.

次に, 操舵駆動出力のみ行う場合 ($\omega_w = 0$, $\tau_w = 0$) について, 同様に出力比を導出すると,

$$\omega_A = \omega_l \quad , \quad \omega_B = -\omega_l \quad (2.15)$$

$$\tau_A = \frac{Z_A}{2Z_C} \tau_l \quad , \quad \tau_B = -\frac{Z_B}{2Z_C} \tau_l \quad (2.16)$$

より,

$$P_A : P_B = Z_A : Z_B \quad (2.17)$$

となる. 必要とする操舵駆動負荷に対して, 二台のモータの出力比は Z_A と Z_B の比に依存することになる. $Z_A = Z_B$ であれば, 駆動出力のみの場合と同様に各モータ 50% ずつの出力が良いが, 機構上歯車 A と歯車 B の歯数を等しくすることは不可能であり, 通常 $Z_B > Z_A$ であるため, 歯車 B を駆動するモータに大きな出力が要求されることになる.

遊星歯車型 DDSS は, 歯車部の構造を薄くできることが特徴であった. しかし, 二台のモータに出力を等分配できないため, 片方のモータ出力に偏りが生じ, 効率的な使用ができないことが分かった.

2.4 平歯車型 DDSS

先に述べた遊星歯車機構の欠点を解消するために本研究では、平歯車を用いた差動歯車機構による差動駆動操舵機構 (以下、平歯車型 DDSS) を開発した。

2.4.1 機構概要

平歯車型 DDSS の概略図を Fig. 2.10 に示す。平歯車型 DDSS は、平歯車を 5 個組み合わせた機構で、遊星歯車機構と同様の機能を果たすことができる。歯車 A および B に動力が入力され、遊星歯車機構におけるサンギヤおよびリングギヤと同様の役割を持つ。また、歯車 C および C' は上下で固定され一体となり回転し、プラネタリギヤと同様の役割を持つ。遊星歯車型 DDSS と同様に、歯車 A および B を互いに逆方向へ回転させると、歯車 C はその場で回転するため、これを駆動出力として用いることができる。また、歯車 A および B 同方向へ回転させると、全体が一体となってキャリア D を回転させるため、操舵出力として用いることができる。

2.4.2 運動学モデル

ここで、平歯車型 DDSS の運動学モデルの導出を行う。

平歯車型差動歯車機構のモデルを Fig. 2.11 に示す。A, B, C, C', D の角速度をそれぞれ ω_A , ω_B , ω_C , $\omega_{C'}$, ω_D とし、歯車の歯数をそれぞれ Z_A , Z_B , Z_C , $Z_{C'}$ とする。機構の状態ベクトル ω_S および入力ベクトル u_S をそれぞれ、 $\omega_S = [\omega_C, \omega_D]^T$ および $u_S = [\omega_A, \omega_B]$ とすると、運動学モデルは、

$$\omega_S = B_S u_S, \quad B_S = \begin{bmatrix} \frac{(Z_B - Z_C)Z_A}{Z_A Z_C + Z_B Z_{C'}} & \frac{(Z_A + Z_{C'})Z_B}{Z_A Z_C + Z_B Z_{C'}} \\ -\frac{Z_A Z_C}{Z_A Z_C + Z_B Z_{C'}} & \frac{Z_B Z_{C'}}{Z_A Z_C + Z_B Z_{C'}} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

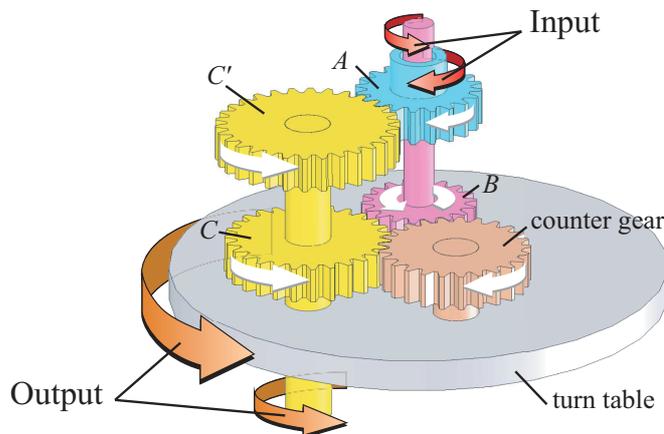


Fig. 2.10 Illustration of proposed spur-gear type DDSS

となる。また、逆運動学モデルも同様に、

$$u_s = B_S^{-1} \omega_s, \quad B_S^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{Z'_C}{Z_A} & -\frac{Z_A+Z'_C}{Z_A} \\ \frac{Z_C}{Z_B} & \frac{Z_B-Z_C}{Z_B} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

となる。平歯車型機構の場合も、遊星歯車機構と同様に重ねあわせ法により運動学モデルが求められる。導出方法については付録 A に示す。なお上式において、歯車 C と C' は機械的に拘束されているため、 ω_C として統一して表している。

キャスト駆動輪と平歯車型機構のモデルの融合

平歯車型 DDSS においても遊星歯車型 DDSS の場合と同様に、式 (2.7) を用いて、機構入力ベクトル $u_s = [\omega_A, \omega_B]^T$ からキャスト駆動輪の入力ベクトル $u_w = [\omega_w, \omega_l]^T$ を導く関係式を導出する。

$$u_w = B_D u_s, \quad B_D = \begin{bmatrix} \frac{Z_A Z_B}{Z_A Z_C + Z_B Z'_C} & \frac{Z_A Z_B}{Z_A Z_C + Z_B Z'_C} \\ -\frac{Z_A Z_C}{Z_A Z_C + Z_B Z'_C} & \frac{Z_B Z'_C}{Z_A Z_C + Z_B Z'_C} \end{bmatrix}. \quad (2.20)$$

逆行列は、

$$u_s = B_D^{-1} u_w, \quad B_D^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{Z'_C}{Z_A} & -1 \\ \frac{Z_C}{Z_B} & 1 \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

となる。

ここで、

$$Z_A : Z'_C = Z_B : Z_C \quad (2.22)$$

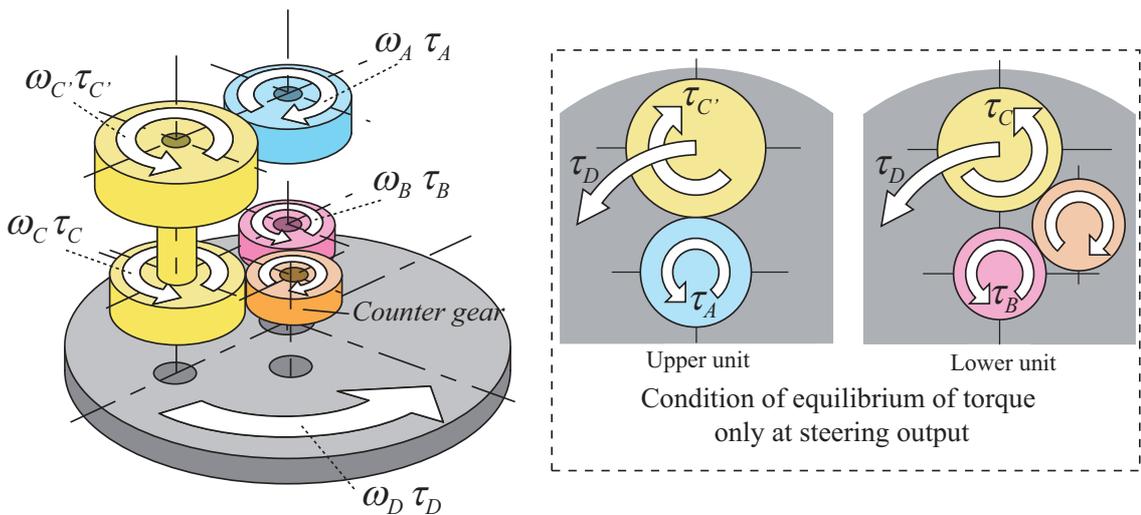


Fig. 2.11 Model of spur-gear type DDSS

を条件として与えると、式 (2.20) および、式 (2.21) の B_D および B_D^{-1} は以下のように書き換えられる。

$$B_D = \begin{bmatrix} \frac{Z_A}{2Z'_C} & \frac{Z_A}{2Z'_C} \\ -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}, \quad B_D^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{Z'_C}{Z_A} & -1 \\ \frac{Z'_C}{Z_A} & 1 \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

条件式は、上段の歯車列 A-C' と下段の歯車列 B-C の歯数比が等しい場合を示す。

2.4.3 トルクモデル

次に、平歯車型 DDSS のトルクモデルを導出する。

まず、遊星歯車機構の場合と同様に、機構に駆動トルク τ_w のみ加えられた場合を考える。駆動トルクは歯車 C に直接入力されるため、 $\tau_w = \tau_C$ となる。歯車 C がその場で回転することを考えると、歯車 A と B から伝達されるトルクは互いに等しいことを意味し、 $\tau_A = \frac{Z_A}{2Z'_C} \tau_w$ および $\tau_B = \frac{Z_B}{2Z'_C} \tau_w$ という関係が得られる。

一方、機構に操舵トルク τ_l のみ加えられた場合、Fig. 2.11 右側の図に示すように、歯車 C 及び C' の軸に歯車 A と B から互いに逆方向に同じ大きさのトルクが掛かる。 $Z_A Z_C = Z_B Z'_C$ とすれば、 $\tau_A = -\frac{1}{2} \tau_l$ 、 $\tau_B = \frac{1}{2} \tau_l$ として分配される。

以上より、トルクモデルを求めると、

$$\begin{bmatrix} \tau_A \\ \tau_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Z_A}{2Z'_C} & -\frac{1}{2} \\ \frac{Z_B}{2Z'_C} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_w \\ \tau_l \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{Z_A}{2Z'_C} & -\frac{1}{2} \\ \frac{Z_A}{2Z'_C} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_w \\ \tau_l \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

となり、逆モデルは、

$$\begin{bmatrix} \tau_w \\ \tau_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Z'_C}{Z_A} & \frac{Z_C}{Z_B} \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_A \\ \tau_B \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{Z'_C}{Z_A} & \frac{Z'_C}{Z_A} \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_A \\ \tau_B \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

となる。式 (2.25) および (2.27) は、前節にて与えた条件式 (2.22) を同様に与えた場合の式である。

2.4.4 モータの出力比に関する考察

導出された平歯車型 DDSS の運動学モデルとトルクモデルから、用いられる二台のモータの出力比を考える。

まず、DDSS が車輪駆動出力のみ行う場合 ($\omega_l = 0$, $\tau_l = 0$) について考える。入力を示す歯車 A および B の角速度とトルクは、

$$\omega_A = \frac{Z'_C}{Z_A} \omega_w \quad , \quad \omega_B = \frac{Z'_C}{Z_A} \omega_w \quad (2.28)$$

$$\tau_A = \frac{Z_A}{2Z'_C} \tau_w \quad , \quad \tau_B = \frac{Z_A}{2Z'_C} \tau_w \quad (2.29)$$

となり、出力比は、

$$P_A : P_B = 1 : 1 \quad (2.30)$$

となる。遊星歯車型 DDSS と同様に、車輪駆動出力のみ行う場合は、必要な車輪駆動負荷に対して各モータは 50% ずつ負担して出力すれば良いことがわかる。

次に、操舵駆動出力のみの場合 ($\omega_w = 0$, $\tau_w = 0$) の歯車 A 及び B の出力比は、

$$\omega_A = -\omega_l \quad , \quad \omega_B = \omega_l \quad (2.31)$$

$$\tau_A = -\frac{1}{2} \tau_l \quad , \quad \tau_B = \frac{1}{2} \tau_l \quad (2.32)$$

より、

$$P_A : P_B = 1 : 1 \quad (2.33)$$

となり、遊星歯車型 DDSS の場合とは異なり、必要な操舵駆動負荷に対して各モータは 50% ずつ負担して出力すれば良いことがわかる。

以上の結果は、条件式 (2.22) を満たすことで得られる。遊星歯車型 DDSS では、サンギヤとリングギヤの歯数を等しく出来ないために、出力を等分配できなかったが、平歯車型 DDSS ではそれが可能となる。同型のモータを二台使用できるため、設計が容易で、かつコスト削減も期待できる。

2.5 機構設計

DDSS のギヤ比やオフセット量は、先に導出したトルクモデルを基に決定できる。以下にその手順を示す。

キャスト駆動輪における車輪・操舵駆動力 F_w および F_l は、DDSS 機構出力トルクを用いて以下のように導出される

$$F_W = \tau_w \cdot r \quad (2.34)$$

$$F_W = \tau_l \cdot l. \quad (2.35)$$

車輪・操舵駆動力は、Fig 2.12 に示すように、操舵中心点上に作用する。これら二つの力を等しくすることで、図上に赤色の円で示すように、全方向に対する出力を均等にでき、滑らかな移動が可能になる。

式(2.35)は、DDSSのトルクモデル式(2.27)を用いて、以下のように展開できる

$$\begin{bmatrix} F_w \\ F_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{r} \frac{Z'_C}{Z'_A} & \frac{1}{r} \frac{Z'_C}{Z'_A} \\ \frac{1}{l} & -\frac{1}{l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_A \\ \tau_B \end{bmatrix}. \quad (2.36)$$

ただし、車輪角度は便宜上0度として考える。

上式において、

$$l = r \frac{Z'_A}{Z'_C} \quad (2.37)$$

とすると、

$$\begin{bmatrix} F_w \\ F_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{r} \frac{Z'_C}{Z'_A} & \frac{1}{r} \frac{Z'_C}{Z'_A} \\ \frac{1}{r} \frac{Z'_C}{Z'_A} & -\frac{1}{r} \frac{Z'_C}{Z'_A} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_A \\ \tau_B \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

となり、車輪および操舵駆動負荷に対する二台のモータトルクが互いに等しくなることがわかる。以上を用いたDDSSの設計手順を以下に示す。

1. 車両目標速度を決定する。
2. 使用する車輪 (r_w) を選定する。
3. 車輪駆動による出力速度 $\omega_w r_w$ と操舵による機構出力速度 ω_l が等しくなるようにDDSSのギヤ比 $\frac{Z'_C}{Z'_A}$ を決定する。
4. 式(2.37)よりオフセット量を求める。

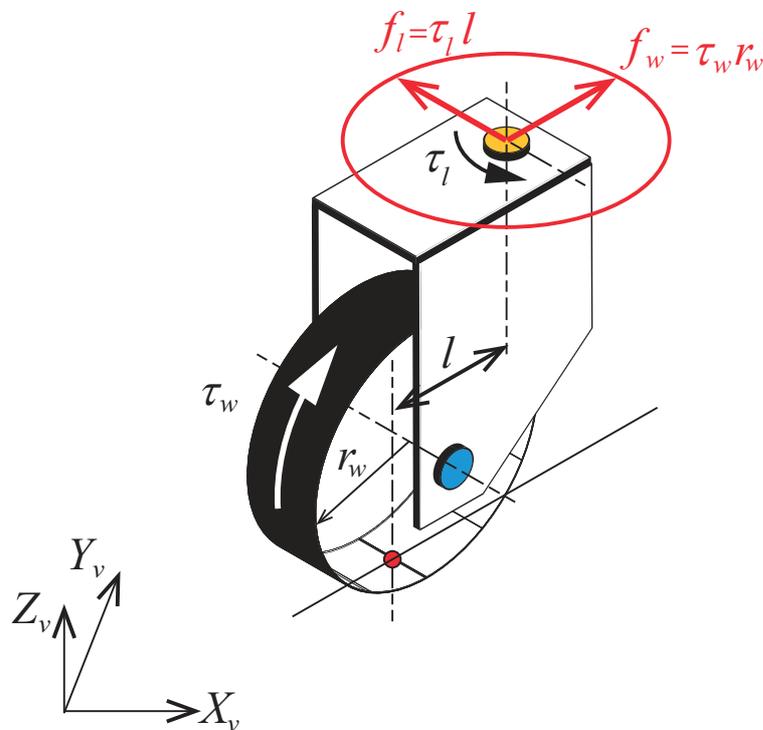


Fig. 2.12 Model of caster-drive wheel

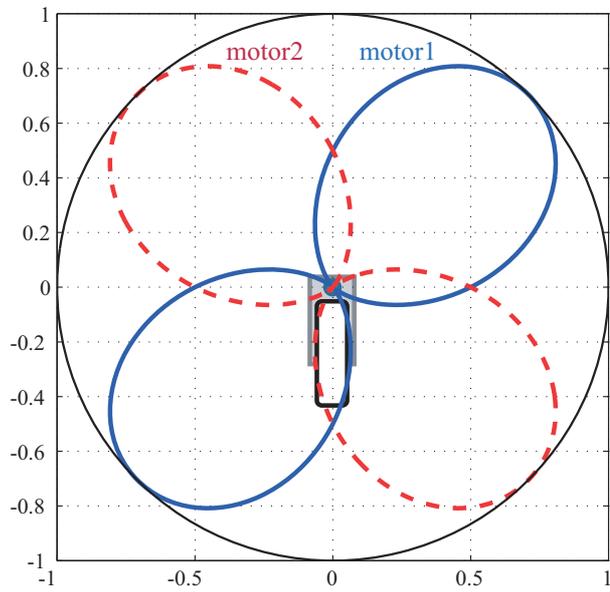
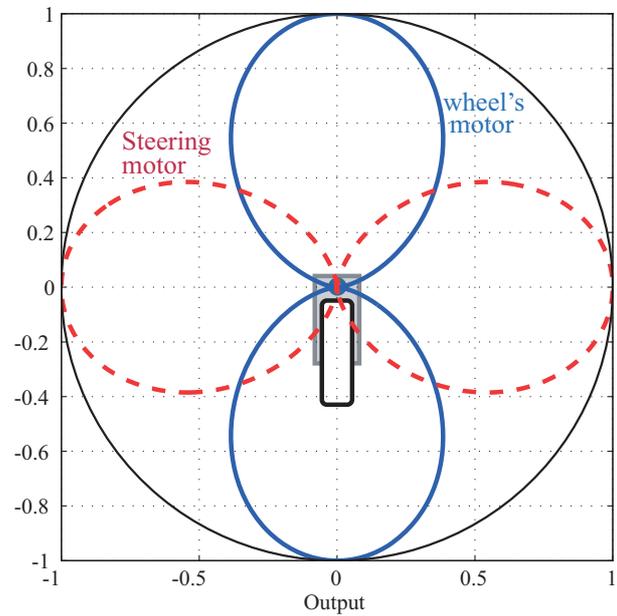
車輪や歯車、およびモータは市販品を使用する機会が多いことが考えられるため、車輪半径を先に決定し、次にギヤ比を決定する。オフセット量は設計により唯一変更可能な部分であるため、最後に設計する。

2.6 モータ出力の比較

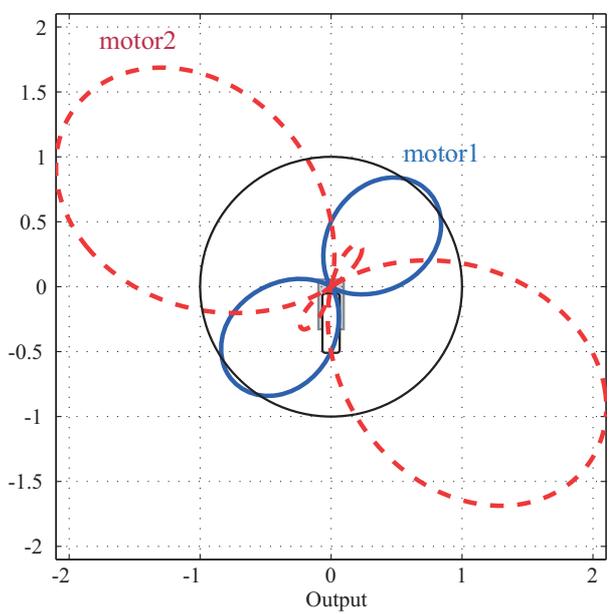
前節にて述べた設計基準をもとに設計した平歯車型 DDSS の出力に関してシミュレーションによる評価を行った。シミュレーション内容は、ある車輪角度において、操舵中心点上の全周囲に対して車輪および操舵駆動出力の合力が 1 になるよう出力 (単位出力) した際のモータ出力をシミュレートするものである。比較対象として、設計基準を用いて設計した ($l = 55[mm]$) 平歯車型 DDSS に加え、通常のキャスト駆動輪、遊星歯車型 DDSS ($Z_A : Z_B : Z_C = 1 : 3 : 1$)、オフセット量を基準よりも大きくした場合 ($l = 100[mm]$) の平歯車型 DDSS を用いた。結果をそれぞれ Fig. 2.13(a) から (d) に示す。図において、半径を 1 とした円は単位出力を示し、実線と破線はそれぞれ、二台のモータの出力を示す。

Figure 2.13(a) から、平歯車型 DDSS は前後左右方向に対して各モータは 50% ずつ出力を負担し、45 度方向はどちらか片方のモータのみ全出力を負担することがわかる。一方 Fig. 2.13(b) のキャスト駆動輪は、前後左右方向に対して片方のモータが全出力を負担し、45 度方向に関しては各モータが 50% ずつ負担することになる。また、Fig. 2.13(c) の遊星歯車機構は、前後方向は各モータ 50% ずつの出力となるものの、その他の方向に関してはモータ 2 に出力が著しく偏っていることが確認できる。また、Fig. 2.13(d) のようにオフセット量を基準からずらすと、単位出力に対してモータに必要な出力が大きくなるため、モータ出力に無駄が生じることがわかる。

平歯車型 DDSS では、45 度方向に対してはどちらか片方のモータに出力が集中するという結果となった。そこで Fig. 2.14 に、車輪が初期角度に対して 90 度方向へ移動する場合の DDSS と従来のキャスト駆動輪に用いられる二台のモータのシミュレーションを行った結果を示す。各グラフ上に縦に引かれた破線は、車輪が 45 度方向に出力している瞬間である。結果からもわかるように、45 度方向への出力は過渡期に瞬間的に生じるものであり、むしろ定常期の車輪駆動のみで移動する場合は圧倒的に多いことがわかる。DDSS は定常期において従来のキャスト駆動輪に比べ、二台のモータの運用率が高くなることが確認できた。

(a) Spur gear type DDSS ($l=55[mm]$)

(b) Conventional active caster



(c) Planetary gear type DDSS

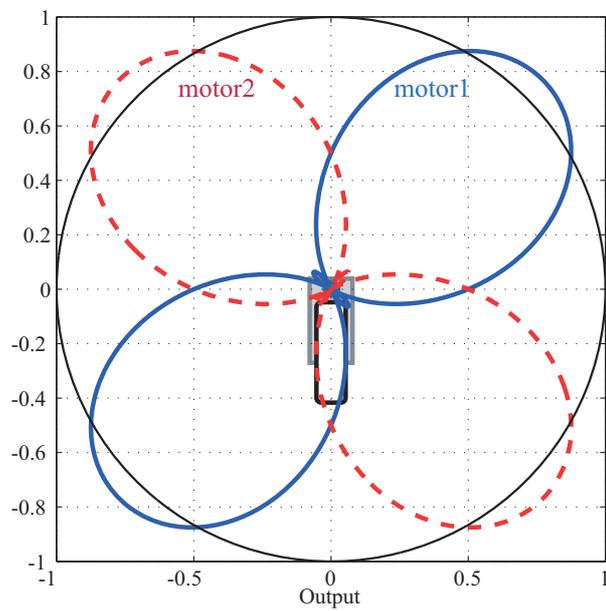
(d) Spur gear type DDSS ($l=100[mm]$)

Fig. 2.13 Comparison of two motors output

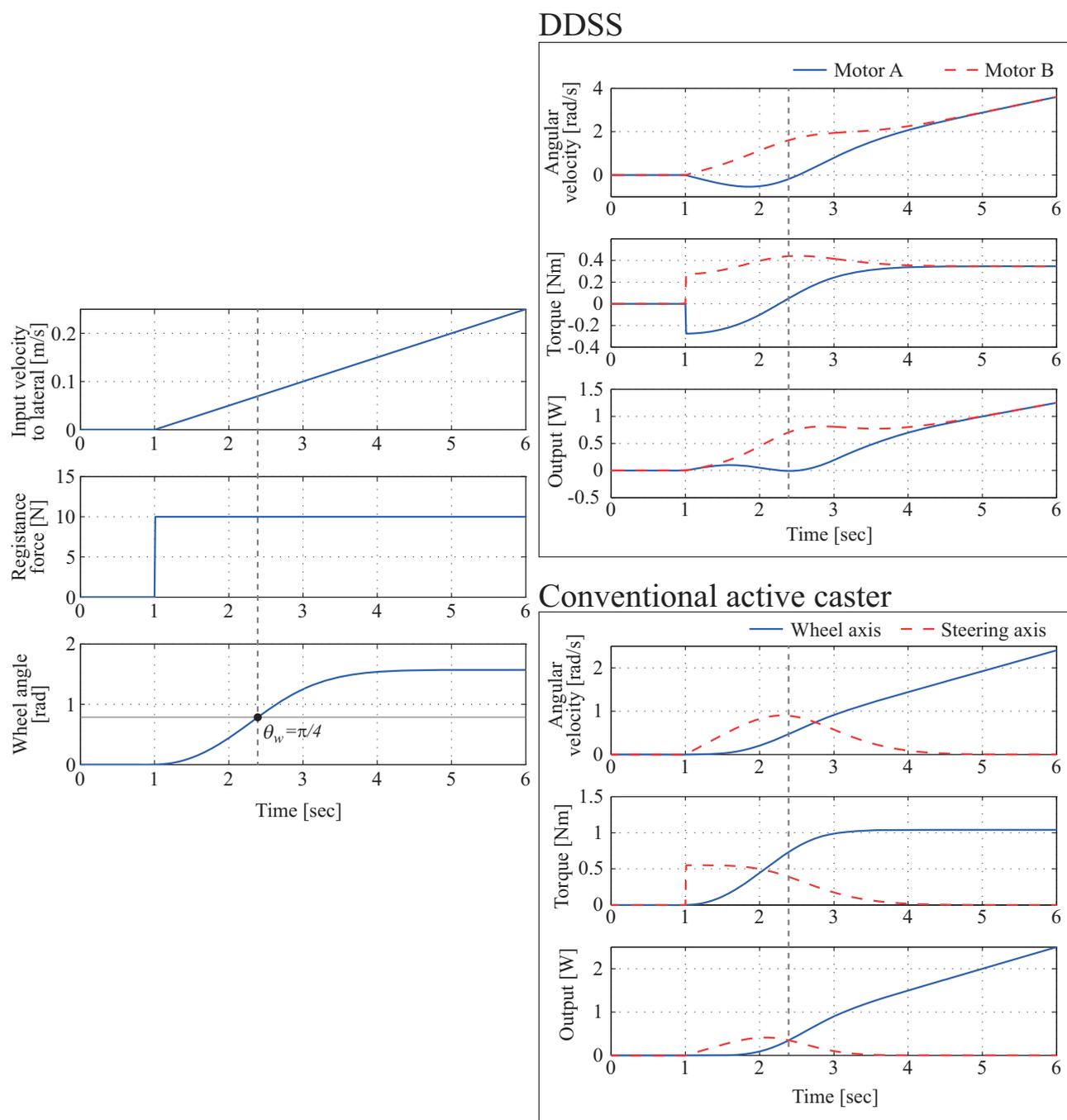


Fig. 2.14 Simulation result of lateral movement of wheel

第3章 全方向移動ロボット

本研究では，DDSSを用いた全方向移動ロボットとして，全方向移動車いすや全方向移動ベッド，3輪全方向移動プラットフォームを開発した．本章では，それぞれのロボットの仕様や運動学モデルについて述べる．

3.1 全方向移動車いす

全方向移動車いす(OMW)は，障がい者や介助者の移動支援装置として開発された．外観および仕様を Fig. 3.1 および Table 3.1 に示す．

本研究室では従来，搭乗者と介助者の両者に対する操作支援システムに関する研究が行われていたが，移動機構としてオムニホイールを使用していたため段差越え性能の低さや振動・騒音などの問題を抱えていた．本研究では新たに DDSS を応用した OMW を開発した．DDSS の応用による運動性能の飛躍的な向上により，これまで屋内に限られていた移動範囲を，不整地を含む屋外まで拡張することが可能となった．本機器は従来のシステムと同様に，ジョイスティックやパワーアシストシステムによる移動を行う．パワーアシストシステムについては，第5章にて説明する．OMW は DDSS を四輪用いた駆動システムを有する．DDSS は最低二輪で全方向移動を可能とするが，OMW では不整地走行性能や段差越え能力などを考慮し四輪とした．

なお，本機器に使用される機械要素や制御機器の詳細については付録 B に示す．



Fig. 3.1 Picture of the OMW

Table 3.1 Specification of the OMW

Size (D × W × H)	800 × 700 × 1280 [mm]
Weight	80 [kg]
Motor power	150 [W] × 8
Max. velocity	1.67 [m/s]
Max. acceleration	2.0 [m/s ²]
Max. slope angle	20 [deg]
Max. step difference	70 [mm]

3.2 全方向移動ベッド

全方向移動ベッド (Omni-directional Mobile Bed: 以下, OMB) は, 介護現場の意見から実現した機器である. 外観および仕様を Fig. 3.2 および Table 3.2 に示す.

施設内での要介護者の移動には通常車いすが用いられる. しかし, ベッドから車いすへの移乗には大きな身体的負担を要するため, ベッドに要介護者を寝かせたまま移動することがある. この場合二名の介護士により搬送されるが, 人手が必要になるうえ, 重量が大きい狭所での取り回しが困難であるという問題があった. OMB は, 電動駆動化したベッドにパワーアシストシステムを応用することで, 一名の介護士でも容易にベッドを搬送できるようにしたシステムである. OMB は介護施設内等での使用を想定しており路面は比較的平坦で段差は十分小さいことが想定されるため, DDSS と補助輪をそれぞれ二輪ずつ用いた駆動システムを構築した. 二台の DDSS は長方形のフレームの対角に配置される.

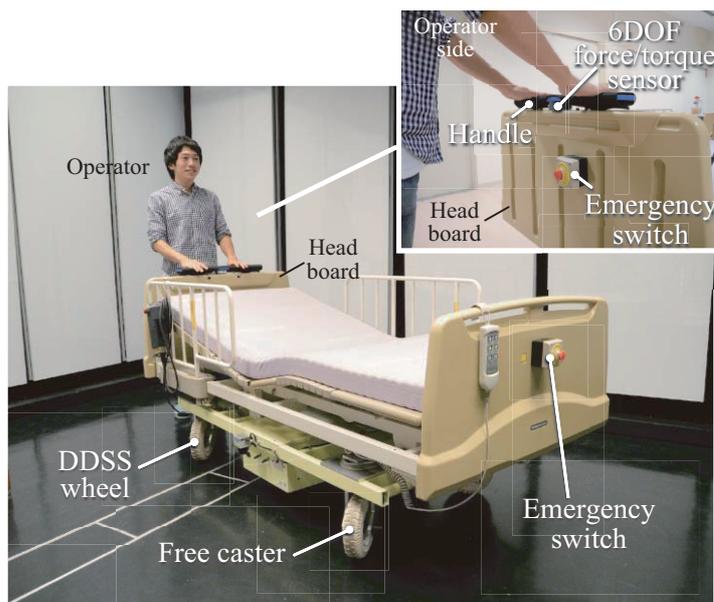


Fig. 3.2 Picture of the OMB

Table 3.2 Specification of the OMB

Size (D × W × H)	2070 × 960 × 900 [mm]
Weight	150 [kg]
Motor power	150 [W] × 4
Max. velocity	1.25 [m/s]
Max. acceleration	1.5 [m/s ²]
Max. loading weight	80 [kg]

なお，本機器に使用される機械要素や制御機器の詳細については付録Cに示す。

3.3 3輪全方向移動プラットフォーム

3輪全方向移動プラットフォーム (3wheel-Drive Omni-directional Mobile Platform: 3D-OMP) は，DDSS やパワーアシストシステムの基本的な検証を行うための標準システムとして開発された。外観および仕様を Fig. 3.3 および Table 3.3 に示す。

OMW と OMB はそれぞれ，DDSS を四輪および二輪用いた駆動システムを有する。OMB の場合は補助輪を持ちいなければならないが，走行時に補助輪による影響が発生する可能性がある。補助輪を用いずに信頼性高く全方向移動を保障するには，構成要素としてDDSSを三輪用いればよく，OMW では一輪余分になっている。そこで本研究では，DDSS を三輪用いた全方向移動プラットフォームを開発した。

3D-OMP のなお，本機器に使用される機械要素や制御機器の詳細については付録Dに示す。

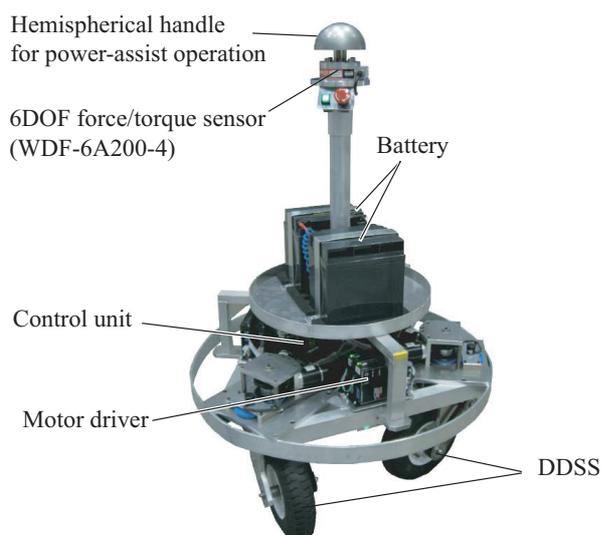


Fig. 3.3 Picture of the 3D-OMP

Table 3.3 Specification of the 3D-OMP

Size (Diameter × Height)	$\phi 680 \times 900$ [mm]
Weight	60 [kg]
Motor power	150 [W] × 6
Max. velocity	1.12 [m/s]
Max. acceleration	2.0 [m/s ²]
Max. loading weight	100 [kg]

3.4 車両運動学モデル

本章では、DDSSのように、各駆動輪が2自由度を有する場合の車両の運動学モデルについて述べる。DDSSのような機構を使用する場合、最低二台で全方向移動を実現できる。しかし車両の自由度は4となり、平面上の移動に必要な3自由度を超え、冗長性を有することになる。本研究では機器の特性に応じてDDSSをそれぞれ二輪から四輪用いる全方向移動システムを開発した。四輪の場合は自由度が8となり大幅に冗長自由度を有することになり、車輪数が増えればさらに冗長自由度は増加する。

以降では、車輪数に拘らず一般的な議論を行うために、車輪数を n とした場合の運動学モデルと、逆運動学モデルの導出について述べる。

Fig. 3.4に駆動システムのモデルを示す。また以下に車両運動学モデルで用いる変数を示す。

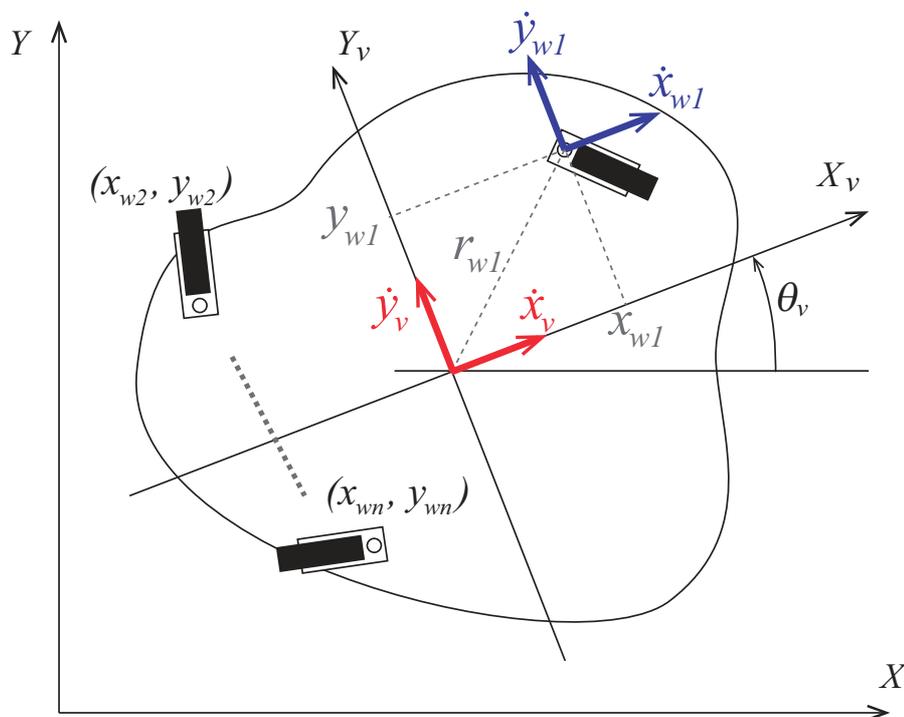


Fig. 3.4 Model of the vehicle

ただし, $(i = 1, 2, \dots, n)$ である.

$X_v - Y_v$: 車両座標系

θ_v : 車両姿勢 (角度)[rad]

\dot{x}_v, \dot{y}_v : X_v, Y_v 方向速度 [m/s]

$\dot{\theta}_v$: 車両回転角速度 [rad/s]

x_{wi}, y_{wi} : 車両座標系における車輪操舵中心点の位置 [m]

r_{wi} : 原点から車輪操舵中心点までの距離 $r_{wi} = \sqrt{x_{wi}^2 + y_{wi}^2}$ [m]

3.4.1 順運動学モデル

車両座標系 $O_v(x_v, y_v)$ における車両の状態ベクトル x_v と, 入力ベクトル u_v をそれぞれ $x_v = [x_v, y_v, \theta_v]^T$, $u_v = [\dot{x}_{w1}, \dot{y}_{w1}, \dot{x}_{w2}, \dot{y}_{w2}, \dots, \dot{x}_{wn}, \dot{y}_{wn}]^T$ とすると, 運動学モデルは以下のように導出される.

$$\dot{x}_v = B_v u_v \quad (3.1)$$

ただし,

$$B_v = \frac{1}{n} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & \dots & 0 & 1 \\ -\frac{y_{w1}}{r_{w1}^2} & \frac{x_{w1}}{r_{w1}^2} & -\frac{y_{w2}}{r_{w2}^2} & \frac{x_{w2}}{r_{w2}^2} & \dots & -\frac{y_{wn}}{r_{wn}^2} & \frac{x_{wn}}{r_{wn}^2} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

である. 本モデルは並進指令速度に対して全車輪が等しい速度を発生させることや, 旋回指令速度に対しては接線方向に車両中心点から操舵軸までの距離を乗じた速度を発生させるという拘束条件のもと導出されている. この条件は車輪に滑りが生じない条件であり, 妥当である.

3.4.2 逆運動学モデル

B_v は $3 \times 2n$ 行列であり, 正方行列でないため逆行列が存在しないことがわかる. そこでムーア・ペンローズの疑似逆行列を用いて逆運動学モデルを導出する.

疑似逆行列をここでは A^\dagger とし, 正方でない行列 A に対して逆行列的な性質を持つものとして定義する. ある $m \times n$ 行列 A に対し,

$$AA^\dagger A = A \quad (3.3)$$

$$A^\dagger AA^\dagger = A^\dagger \quad (3.4)$$

$$(AA^\dagger)^T = AA^\dagger \quad (3.5)$$

$$(A^\dagger A)^T = A^\dagger A \quad (3.6)$$

を全てを満たす $n \times m$ 行列 A^\dagger がただ一つ存在し, これを疑似逆行列と言う.

また、もし行列 A が $m \geq n$ で、かつ $A^T A$ に逆行列が存在すれば、

$$A^\dagger = (A^T A)^{-1} A^T \quad (3.7)$$

は疑似逆行列の定義を満たす。逆に、もし行列 A が $m \leq n$ で、かつ AA^T に逆行列が存在すれば、

$$A^\dagger = A^T (AA^T)^{-1} \quad (3.8)$$

は疑似逆行列の定義を満たす。

B_v は、 $3 \times 2n$ 行列で $n \geq 2$ であるため、疑似逆行列は式 (3.8) を用いて

$$B_v^\dagger = B_v^T (B_v B_v^T)^{-1} \quad (3.9)$$

として導出される。

$B_v B_v^T$ は、 3×3 行列であり、逆行列は以下の公式により導出できる。

$$(B_v B_v^T)^{-1} = \frac{1}{\det(B_v B_v^T)} \widetilde{B_v B_v^T} \quad (3.10)$$

なお、

$$B_v B_v^T = \begin{bmatrix} \frac{1}{n} & 0 & -\frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \frac{y_{wi}}{r_{wi}^2} \\ 0 & \frac{1}{n} & \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \frac{x_{wi}}{r_{wi}^2} \\ -\frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \frac{y_{wi}}{r_{wi}^2} & \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \frac{x_{wi}}{r_{wi}^2} & \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \frac{1}{r_{wi}^2} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

であり、 $\det(B_v B_v^T)$ および $\widetilde{B_v B_v^T}$ は、それぞれ行列式と余因子行列であり、

$$\det(B_v B_v^T) = \frac{1}{n^5} \left\{ n \sum_{i=1}^n \frac{1}{r_{wi}^2} - \left[\left(\sum_{i=1}^n \frac{x_{wi}}{r_{wi}^2} \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n \frac{y_{wi}}{r_{wi}^2} \right)^2 \right] \right\} \quad (3.12)$$

$$\widetilde{B_v B_v^T} = \begin{bmatrix} \frac{1}{n^4} \left[n \sum_{i=1}^n \frac{1}{r_{wi}^2} - \left(\sum_{i=1}^n \frac{x_{wi}}{r_{wi}^2} \right)^2 \right] & -\frac{1}{n^4} \sum_{i=1}^n \frac{x_{wi}}{r_{wi}^2} \sum_{i=1}^n \frac{y_{wi}}{r_{wi}^2} & \frac{1}{n^3} \sum_{i=1}^n \frac{y_{wi}}{r_{wi}^2} \\ -\frac{1}{n^4} \sum_{i=1}^n \frac{x_{wi}}{r_{wi}^2} \sum_{i=1}^n \frac{y_{wi}}{r_{wi}^2} & \frac{1}{n^4} \left[n \sum_{i=1}^n \frac{1}{r_{wi}^2} - \left(\sum_{i=1}^n \frac{y_{wi}}{r_{wi}^2} \right)^2 \right] & -\frac{1}{n^3} \sum_{i=1}^n \frac{x_{wi}}{r_{wi}^2} \\ \frac{1}{n^3} \sum_{i=1}^n \frac{y_{wi}}{r_{wi}^2} & -\frac{1}{n^3} \sum_{i=1}^n \frac{x_{wi}}{r_{wi}^2} & \frac{1}{n^2} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

となる。式 (3.12) から、疑似逆行列が存在する条件は $\det(B_v B_v^T) \neq 0$ であることがわかる。

以上より疑似逆行列は以下のように導出される.

$$B_v^\dagger = B_v^T (B_v B_v^T)^{-1} \quad (3.14)$$

$$= b \begin{bmatrix} b_{11}^1 & b_{12}^1 & b_{13}^1 \\ b_{21}^1 & b_{22}^1 & b_{23}^1 \\ b_{11}^2 & b_{12}^2 & b_{13}^2 \\ b_{21}^2 & b_{22}^2 & b_{23}^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ b_{11}^n & b_{12}^n & b_{13}^n \\ b_{21}^n & b_{22}^n & b_{23}^n \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

ただし,

$$b = \frac{1}{n \sum_{i=1}^n \frac{1}{r_{wi}^2} - \left[\left(\sum_{i=1}^n \frac{x_{wi}}{r_{wi}^2} \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n \frac{y_{wi}}{r_{wi}^2} \right)^2 \right]} \quad (3.16)$$

$$b_{11}^1 = n \sum_{i=1}^n \frac{1}{r_{wi}^2} - \left(\sum_{i=1}^n \frac{x_{wi}}{r_{wi}^2} \right)^2 - n \frac{y_{w1}}{r_{w1}^2} \sum_{i=1}^n \frac{y_{wi}}{r_{wi}^2} \quad (3.17)$$

$$b_{12}^1 = - \sum_{i=1}^n \frac{x_{wi}}{r_{wi}^2} \sum_{i=1}^n \frac{y_{wi}}{r_{wi}^2} + n \frac{y_{w1}}{r_{w1}^2} \sum_{i=1}^n \frac{x_{wi}}{r_{wi}^2} \quad (3.18)$$

$$b_{13}^1 = n \left(\sum_{i=1}^n \frac{y_{wi}}{r_{wi}^2} - n \frac{y_{w1}}{r_{w1}^2} \right) \quad (3.19)$$

$$b_{21}^1 = - \sum_{i=1}^n \frac{x_{wi}}{r_{wi}^2} \sum_{i=1}^n \frac{y_{wi}}{r_{wi}^2} + n \frac{x_{w1}}{r_{w1}^2} \sum_{i=1}^n \frac{y_{wi}}{r_{wi}^2} \quad (3.20)$$

$$b_{22}^1 = n \sum_{i=1}^n \frac{1}{r_{wi}^2} - \left(\sum_{i=1}^n \frac{y_{wi}}{r_{wi}^2} \right)^2 - n \frac{x_{w1}}{r_{w1}^2} \sum_{i=1}^n \frac{x_{wi}}{r_{wi}^2} \quad (3.21)$$

$$b_{23}^1 = n \left(\sum_{i=1}^n \frac{x_{wi}}{r_{wi}^2} - n \frac{x_{w1}}{r_{w1}^2} \right) \quad (3.22)$$

$$b_{11}^2 = n \sum_{i=1}^n \frac{1}{r_{wi}^2} - \left(\sum_{i=1}^n \frac{x_{wi}}{r_{wi}^2} \right)^2 - n \frac{y_{w2}}{r_{w2}^2} \sum_{i=1}^n \frac{y_{wi}}{r_{wi}^2} \quad (3.23)$$

$$b_{12}^2 = - \sum_{i=1}^n \frac{x_{wi}}{r_{wi}^2} \sum_{i=1}^n \frac{y_{wi}}{r_{wi}^2} + n \frac{y_{w2}}{r_{w2}^2} \sum_{i=1}^n \frac{x_{wi}}{r_{wi}^2} \quad (3.24)$$

$$b_{13}^2 = n \left(\sum_{i=1}^n \frac{y_{wi}}{r_{wi}^2} - n \frac{y_{w2}}{r_{w2}^2} \right) \quad (3.25)$$

$$b_{21}^2 = - \sum_{i=1}^n \frac{x_{wi}}{r_{wi}^2} \sum_{i=1}^n \frac{y_{wi}}{r_{wi}^2} + n \frac{x_{w2}}{r_{w2}^2} \sum_{i=1}^n \frac{y_{wi}}{r_{wi}^2} \quad (3.26)$$

$$b_{22}^2 = n \sum_{i=1}^n \frac{1}{r_{wi}^2} - \left(\sum_{i=1}^n \frac{y_{wi}}{r_{wi}^2} \right)^2 - n \frac{x_{w2}}{r_{w2}^2} \sum_{i=1}^n \frac{x_{wi}}{r_{wi}^2} \quad (3.27)$$

$$b_{23}^2 = n \left(\sum_{i=1}^n \frac{x_{wi}}{r_{wi}^2} - n \frac{x_{w2}}{r_{w2}^2} \right) \quad (3.28)$$

$$b_{11}^n = n \sum_{i=1}^n \frac{1}{r_{wi}^2} - \left(\sum_{i=1}^n \frac{x_{wi}}{r_{wi}^2} \right)^2 - n \frac{y_{wn}}{r_{wn}^2} \sum_{i=1}^n \frac{y_{wi}}{r_{wi}^2} \quad (3.29)$$

$$b_{12}^n = - \sum_{i=1}^n \frac{x_{wi}}{r_{wi}^2} \sum_{i=1}^n \frac{y_{wi}}{r_{wi}^2} + n \frac{y_{wn}}{r_{wn}^2} \sum_{i=1}^n \frac{x_{wi}}{r_{wi}^2} \quad (3.30)$$

$$b_{13}^n = n \left(\sum_{i=1}^n \frac{y_{wi}}{r_{wi}^2} - n \frac{y_{wn}}{r_{wn}^2} \right) \quad (3.31)$$

$$b_{21}^n = - \sum_{i=1}^n \frac{x_{wi}}{r_{wi}^2} \sum_{i=1}^n \frac{y_{wi}}{r_{wi}^2} + n \frac{x_{wn}}{r_{wn}^2} \sum_{i=1}^n \frac{y_{wi}}{r_{wi}^2} \quad (3.32)$$

$$b_{22}^n = n \sum_{i=1}^n \frac{1}{r_{wi}^2} - \left(\sum_{i=1}^n \frac{y_{wi}}{r_{wi}^2} \right)^2 - n \frac{x_{wn}}{r_{wn}^2} \sum_{i=1}^n \frac{x_{wi}}{r_{wi}^2} \quad (3.33)$$

$$b_{23}^n = n \left(\sum_{i=1}^n \frac{x_{wi}}{r_{wi}^2} - n \frac{x_{wn}}{r_{wn}^2} \right). \quad (3.34)$$

よって、逆運動学モデルは、

$$u_v = B_v^\dagger \dot{x}_v \quad (3.35)$$

となる。

ここで、次の式を条件として与えると、

$$r_{w1} = r_{w2} = \cdots = r_{wn} \quad (3.36)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{wi} = \sum_{i=1}^n y_{wi} = 0 \quad (3.37)$$

疑似逆行列は以下ようになる.

$$B_v^\dagger = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -y_{w1} \\ 0 & 1 & x_{w1} \\ 1 & 0 & -y_{w2} \\ 0 & 1 & x_{w2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & -y_{wn} \\ 0 & 1 & x_{wn} \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

式 (3.37) および (3.37) は, 車両中心から各駆動輪までの距離が等しく, かつ車両中心は各車輪中心点の重心に位置するという条件を示す. ただし, $r_{w1} = r_{w2} = \dots = r_{wn} \neq 0$ である.

n=2 の場合

$n = 2$ の場合を考えると上の条件は, Fig. 3.5 のように, 車両中心点を通る直線上に, 車両中心点から等距離で配置される場合であり, 疑似逆行列は,

$$B_v^\dagger = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -y_{w1} \\ 0 & 1 & x_{w1} \\ 1 & 0 & y_{w1} \\ 0 & 1 & -x_{w1} \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

となる. 一方, 車輪配置を Fig. 3.6 に示すように等距離で平行に配置した場合 ($x_{w1} = x_{w2} \neq 0$ および $y_{w1} = -y_{w2} \neq 0$, $r_{w1} = r_{w2} = r_w$), 疑似逆行列は以下ようになる.

$$B_v^\dagger = \begin{bmatrix} 1 & \frac{x_{w1}}{r_w} & -\frac{r_w^2}{y_{w1}} \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & -\frac{x_{w1}}{r_w} & \frac{r_w^2}{y_{w1}} \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

上式より, 各車輪は X_v 軸方向速度に対しては指令値と同速度が良いが, 横移動時には Fig. 3.37(a) のように, 車両中心点に向かって速度を発生させなければならない. また旋回時には, Fig. 3.37(b) のように, X_v 軸方向だけの出力になるが Fig. 3.5 の条件のときよりも速度が大きくなる. そのため, 車輪を対角に配置する場合に比べ機構出力に無駄が生じることがわかる.

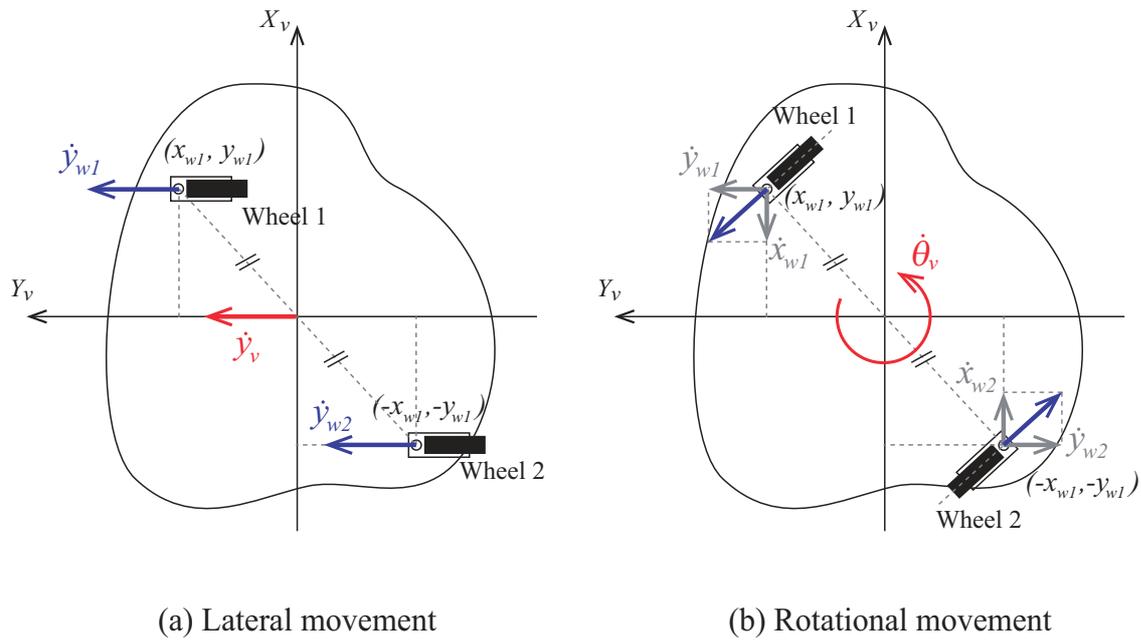


Fig. 3.5 Examples of the wheel velocity in the case that wheels are fixed in parallel with the same distance from the center of the vehicle

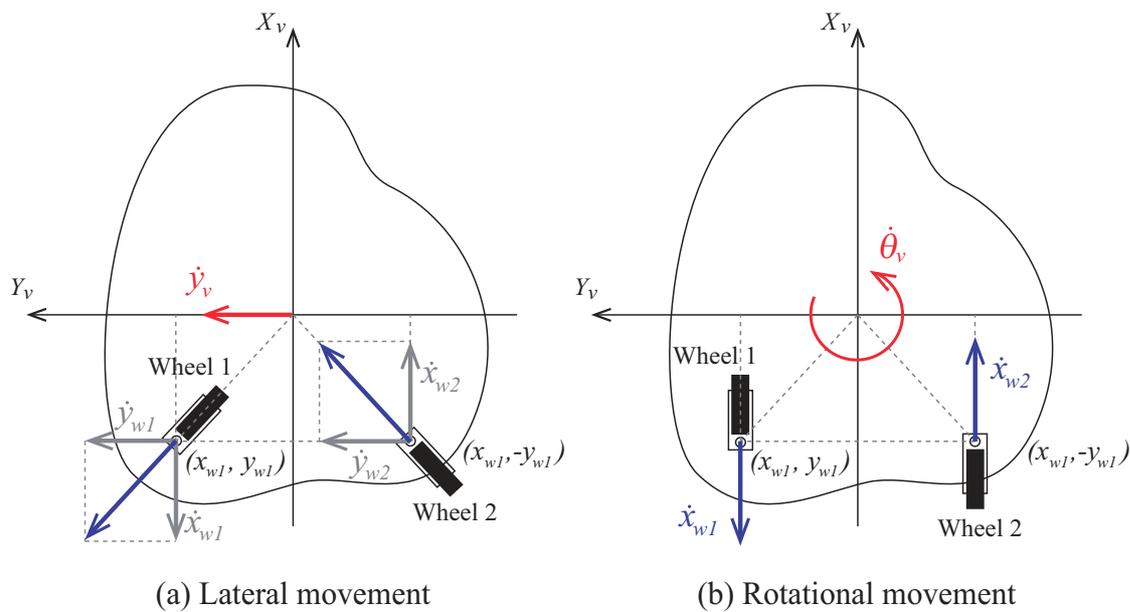


Fig. 3.6 Examples of the wheel velocity in the case that wheels are fixed in a diagonal line with the same distance from the center of the vehicle

3.5 各全方向移動システムの運動学モデル

一般化した運動学モデルおよび逆運動学モデルの導出は本章にて説明した．ここでは，本研究にて開発した各ロボットの運動学モデルについて記述する．

3.5.1 OMW の運動学モデル

OMW は，DDSS を四輪用いた駆動システムを有する．そのモデルを Fig. 3.7 に示す． X_v 軸は車両の前方に一致させ，車輪は下式を満たすよう配置される．

$$r_{w1} = r_{w2} = r_{w3} = r_{w4} \quad (3.41)$$

$$x_{w2} = x_{w3} = -x_{w1}, \quad x_{w4} = x_{w1}, \quad \left(\sum_{i=1}^4 x_{wi} = 0 \right) \quad (3.42)$$

$$y_{w2} = y_{w1}, \quad y_{w3} = y_{w4} = -y_{w1}, \quad \left(\sum_{i=1}^4 y_{wi} = 0 \right) \quad (3.43)$$

車両の状態ベクトル x_v と，入力ベクトル u_v をそれぞれ $x_v = [x_v, y_v, \theta_v]^T$ ， $u_v = [\dot{x}_{w1}, \dot{y}_{w1}, \dot{x}_{w2}, \dot{y}_{w2}, \dot{x}_{w3}, \dot{y}_{w3}, \dot{x}_{w4}, \dot{y}_{w4}]^T$ とすると，運動学モデルは，

$$\dot{x}_v = B_v u_v \quad (3.44)$$

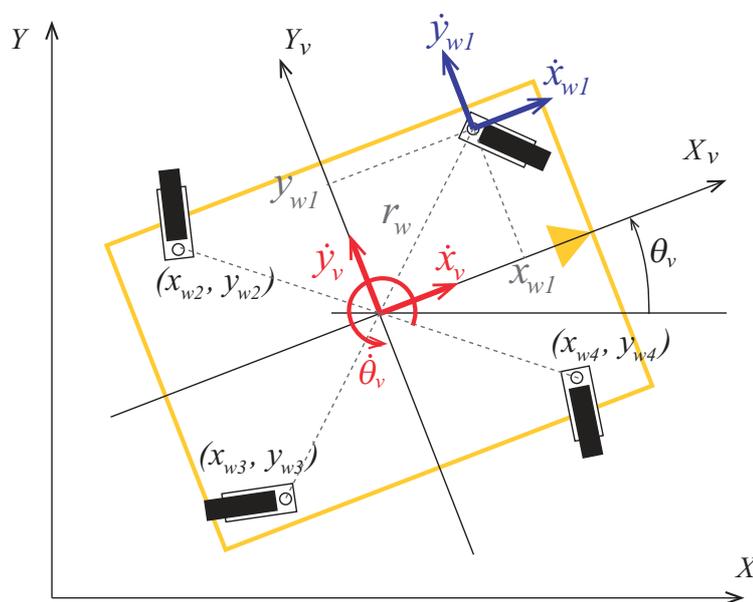


Fig. 3.7 Model of four-wheeled vehicle (OMW)

ただし,

$$B_v = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ -\frac{y_{w1}}{r_{w1}^2} & \frac{x_{w1}}{r_{w1}^2} & -\frac{y_{w2}}{r_{w2}^2} & \frac{x_{w2}}{r_{w2}^2} & -\frac{y_{w3}}{r_{w3}^2} & \frac{x_{w3}}{r_{w3}^2} & -\frac{y_{w4}}{r_{w4}^2} & \frac{x_{w4}}{r_{w4}^2} \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

$$= \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ -\frac{y_{w1}}{r_{w1}^2} & \frac{x_{w1}}{r_{w1}^2} & -\frac{y_{w1}}{r_{w1}^2} & -\frac{x_{w1}}{r_{w1}^2} & \frac{y_{w1}}{r_{w1}^2} & -\frac{x_{w1}}{r_{w1}^2} & \frac{y_{w1}}{r_{w1}^2} & \frac{x_{w1}}{r_{w1}^2} \end{bmatrix} \quad (3.46)$$

となる.

また, 逆運動学モデルは,

$$u_v = B_v^\dagger \dot{x}_v \quad (3.47)$$

ただし,

$$B_v^\dagger = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -y_{w1} \\ 0 & 1 & x_{w1} \\ 1 & 0 & -y_{w2} \\ 0 & 1 & x_{w2} \\ 1 & 0 & -y_{w3} \\ 0 & 1 & x_{w3} \\ 1 & 0 & -y_{w4} \\ 0 & 1 & x_{w4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -y_{w1} \\ 0 & 1 & x_{w1} \\ 1 & 0 & -y_{w1} \\ 0 & 1 & -x_{w1} \\ 1 & 0 & y_{w1} \\ 0 & 1 & -x_{w1} \\ 1 & 0 & y_{w1} \\ 0 & 1 & x_{w1} \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

となる.

3.5.2 OMBの運動学モデル

OMBは、DDSSを二輪用いた駆動システムを有する。そのモデルをFig. 3.8に示す。四輪の場合と同様に、 X_v 軸は車両の前方に一致させ、駆動車輪は下式を満たすよう配置される。

$$r_{w1} = r_{w2} \quad (3.49)$$

$$x_{w2} = -x_{w1} \quad (3.50)$$

$$y_{w2} = -y_{w1} \quad (3.51)$$

車両の状態ベクトル x_v と、入力ベクトル u_v をそれぞれ $x_v = [x_v, y_v, \theta_v]^T$, $u_v = [\dot{x}_{w1}, \dot{y}_{w1}, \dot{x}_{w2}, \dot{y}_{w2}]^T$ とすると、運動学モデルは、

$$\dot{x}_v = B_v u_v \quad (3.52)$$

ただし、

$$B_v = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ -\frac{y_{w1}}{r_{w1}^2} & \frac{x_{w1}}{r_{w1}^2} & -\frac{y_{w2}}{r_{w2}^2} & \frac{x_{w2}}{r_{w2}^2} \end{bmatrix} \quad (3.53)$$

$$= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ -\frac{y_{w1}}{r_{w1}^2} & \frac{x_{w1}}{r_{w1}^2} & \frac{y_{w1}}{r_{w1}^2} & -\frac{x_{w1}}{r_{w1}^2} \end{bmatrix} \quad (3.54)$$

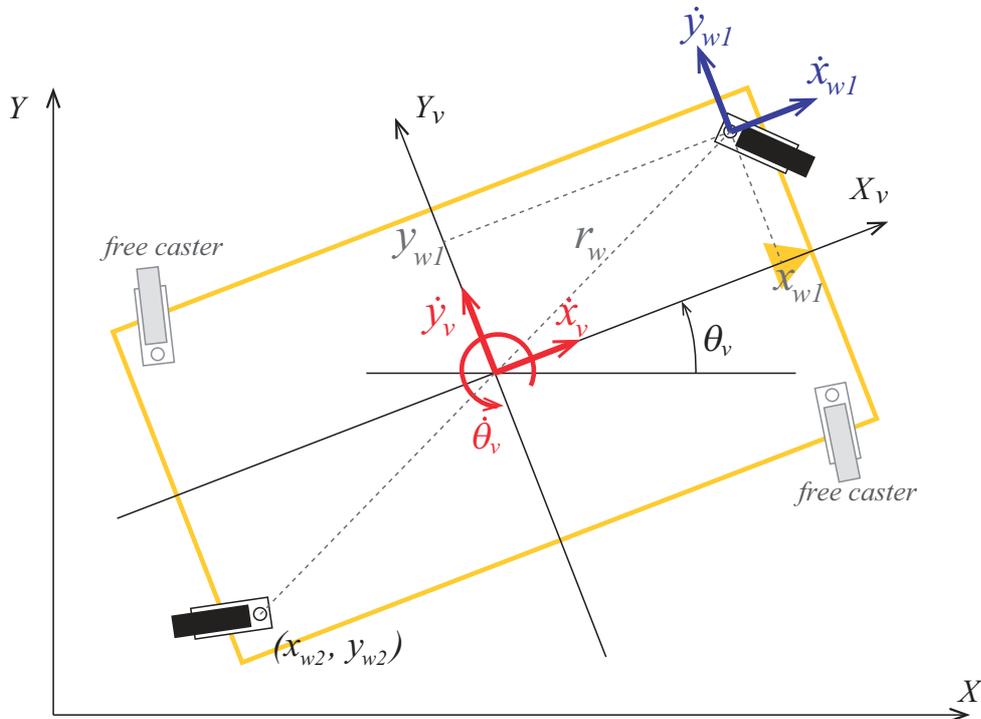


Fig. 3.8 Model of two-wheeled vehicle (OMB)

となる.

また, 逆運動学モデルは,

$$u_v = B_v^\dagger \dot{x}_v \quad (3.55)$$

ただし,

$$B_v^\dagger = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -y_{w1} \\ 0 & 1 & x_{w1} \\ 1 & 0 & -y_{w2} \\ 0 & 1 & x_{w2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -y_{w1} \\ 0 & 1 & x_{w1} \\ 1 & 0 & y_{w1} \\ 0 & 1 & -x_{w1} \end{bmatrix} \quad (3.56)$$

となる.

3.5.3 3輪プラットフォームの運動学モデル

3D-OMP は DDSS を三輪用いたプラットフォームを有する. そのモデルを Fig. 3.9 に示す. 四輪の場合と同様に, X_v 軸は車両の前方に一致させ, 車輪は下式を満たすよう配置される.

$$r_{w1} = r_{w2} = r_{w3} \quad (3.57)$$

$$x_{w2} = x_{w3} = -\frac{1}{2}x_{w1} \quad (3.58)$$

$$y_{w1} = 0, \quad y_{w2} = -y_{w3} = \frac{\sqrt{3}}{2}x_{w1} \quad (3.59)$$

車両の状態ベクトル x_v と, 入力ベクトル u_v をそれぞれ $x_v = [x_v, y_v, \theta_v]^T$, $u_v = [\dot{x}_{w1}, \dot{y}_{w1}, \dot{x}_{w2}, \dot{y}_{w2}]^T$ とすると, 運動学モデルは,

$$\dot{x}_v = B_v u_v \quad (3.60)$$

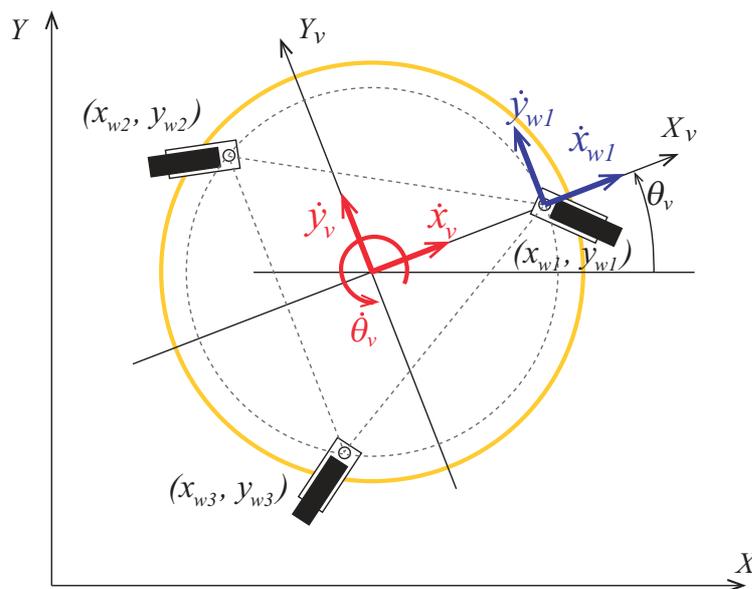


Fig. 3.9 Model of three-wheeled vehicle (3D-OMP)

ただし,

$$B_v = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ -\frac{y_{w1}}{r_{w1}^2} & \frac{x_{w1}}{r_{w1}^2} & -\frac{y_{w2}}{r_{w2}^2} & \frac{x_{w2}}{r_{w2}^2} & -\frac{y_{w3}}{r_{w3}^2} & \frac{x_{w3}}{r_{w3}^2} \end{bmatrix} \quad (3.61)$$

$$= \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{x_{w1}}{r_{w1}^2} & -\frac{\sqrt{3}x_{w1}}{2r_{w1}^2} & -\frac{x_{w1}}{2r_{w1}^2} & \frac{\sqrt{3}x_{w1}}{2r_{w1}^2} & -\frac{x_{w1}}{2r_{w1}^2} \end{bmatrix} \quad (3.62)$$

となる.

また, 逆運動学モデルは,

$$u_v = B_v^\dagger \dot{x}_v \quad (3.63)$$

ただし,

$$B_v^\dagger = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -y_{w1} \\ 0 & 1 & x_{w1} \\ 1 & 0 & -y_{w2} \\ 0 & 1 & x_{w2} \\ 1 & 0 & -y_{w3} \\ 0 & 1 & x_{w3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & x_{w1} \\ 1 & 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2}x_{w1} \\ 0 & 1 & -\frac{1}{2}x_{w1} \\ 1 & 0 & \frac{\sqrt{3}}{2}x_{w1} \\ 0 & 1 & -\frac{1}{2}x_{w1} \end{bmatrix} \quad (3.64)$$

となる.

3.6 車両制御システム

第2章にて述べた DDSS の運動学モデルと、車両運動学モデルを用いた車両制御システムのブロック図を Fig. 3.10 に示す。

図中において、上付きの r および e はそれぞれ指令値と実測値を意味する。

与えられた速度指令値は、車両逆運動学を介して各車輪の速度へと変換され、それらは更に、DDSS の逆運動学モデルを介して各モータの角速度へと変換される。また、車両システムより得られる各モータの角速度は、DDSS の順運動学モデルにより車輪速度へと変換され、車両順運動学モデルにより車両速度へと変換される。また、得られた車両速度を積分することで車両位置が得られる。

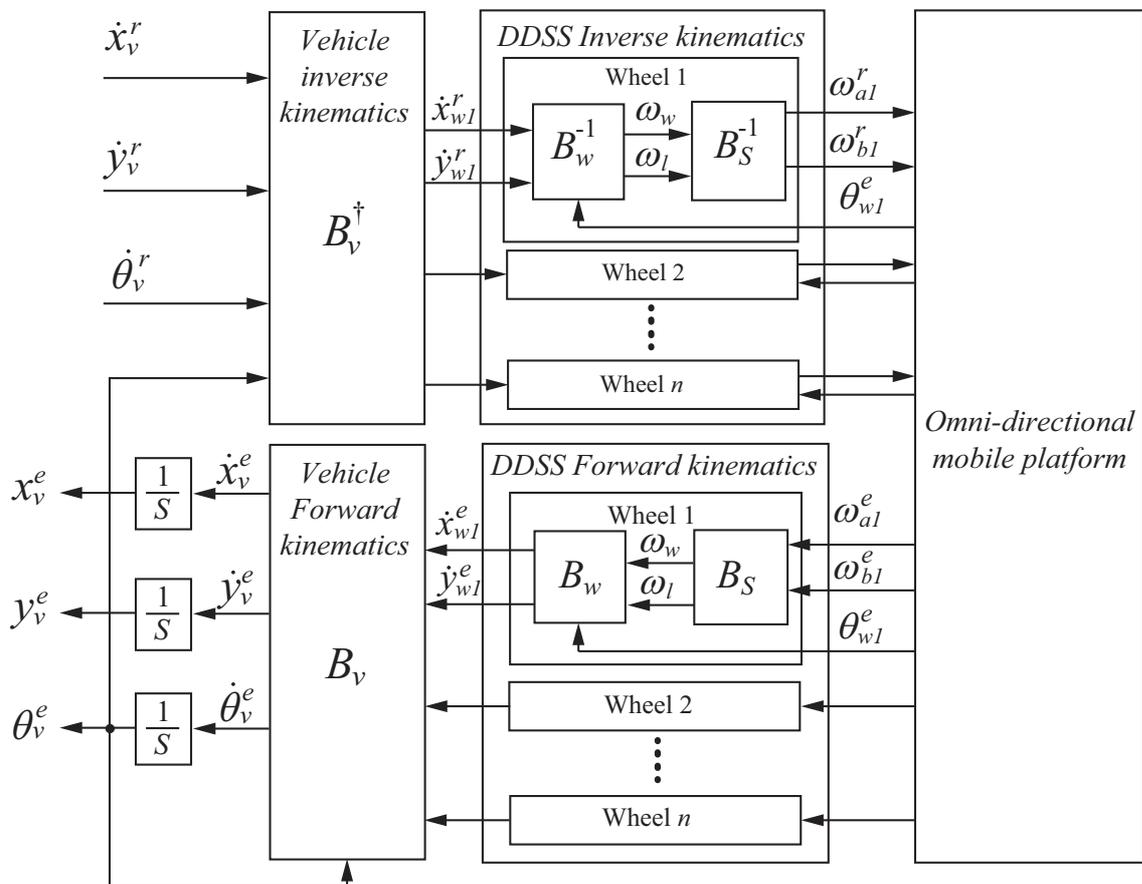


Fig. 3.10 Model of four-wheeled vehicle

第4章 車輪横力に着目した旋回時モータ出力低減化運動学モデルの導出

DDSSの検証のために3D-OMPを用いてモータ出力の計測を行ったところ、旋回時のモータ出力が、直進時に比べ大幅に増加することが確認された。また解析の結果から、従来より使用されている運動学モデルに原因があることがわかった。本章では、解析結果や提案する改善手法、実験により得られた結果について述べる。

4.1 3D-OMPを用いた実験

モータ出力の検証のために、自動走行による実験を行った。実験内容は、あらかじめ生成された速度指令により、それぞれ直進動作と反時計方向・時計方向へ旋回動作を行うものである。

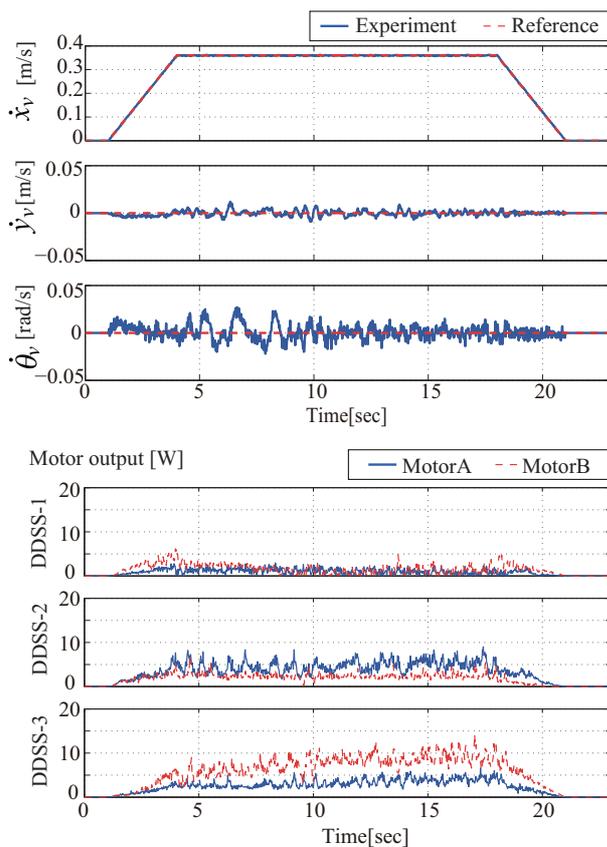


Fig. 4.1 Experimental result of translation movement

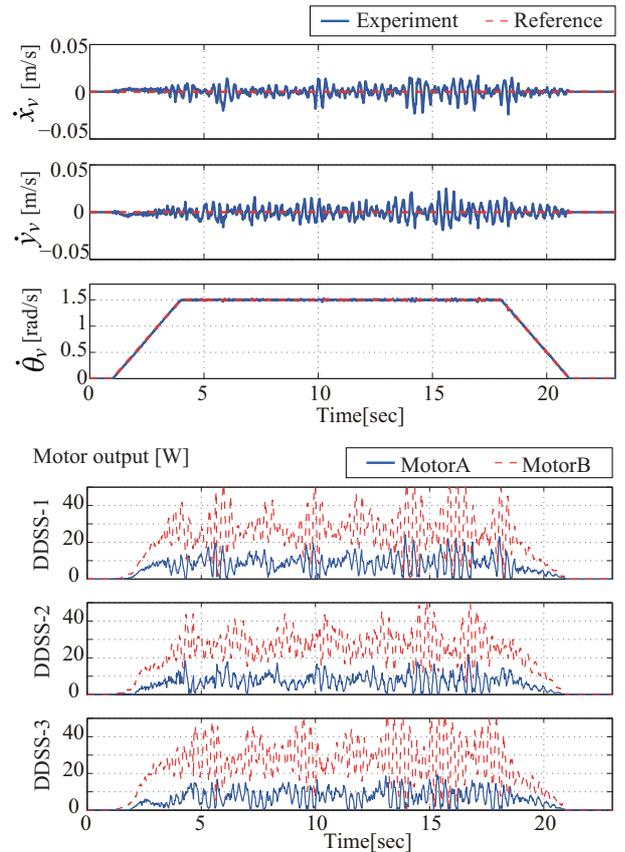


Fig. 4.2 Experimental result of CCW direction rotational movement

Table 4.1 Experimental result of output of mechanism

	Angular velocity [rad/s]				Torque [Nm]			
	Motor A	Motor B	Wheel axle	Steering axle	Motor A	Motor B	Wheel axle	Steering axle
Translation	5.76	5.76	3.07	-0.001	0.432	0.492	1.73	0.060
CCW direction	5.81	5.80	3.10	0.002	-1.28	4.34	5.74	5.62
CW direction	5.81	5.81	3.10	0.000	4.41	-1.20	6.01	-5.61

	Output [W]			
	Motor A	Motor B	Wheel axle	Steering axle
Translation	2.76	3.62	6.18	0.015
CCW direction	7.42	24.9	17.7	0.92
CW direction	25.5	7.18	18.7	1.19

速度指令は台形速度で与えられ、それぞれ最大値は0.36[m/s]および $(\pm)1.5$ [rad/s]とし、定速時のモータ角速度は両者で等しくなるよう配慮した。

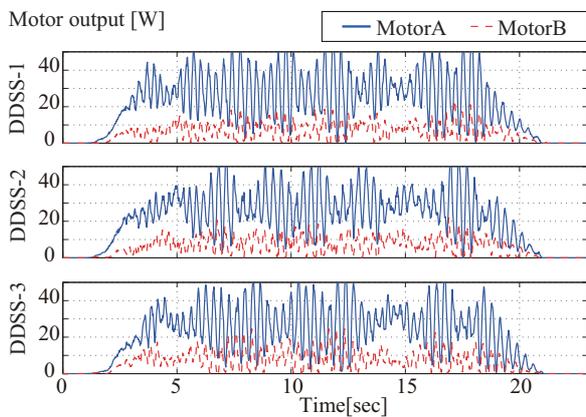
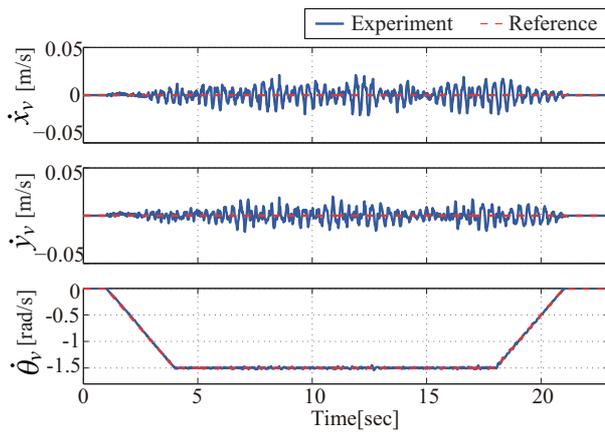
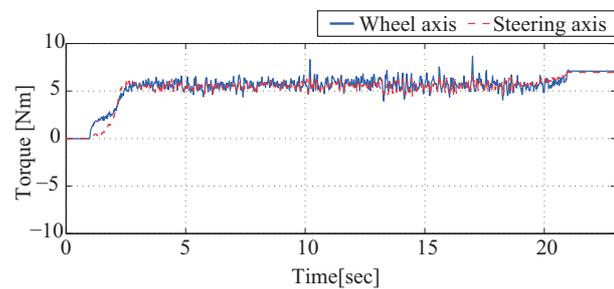
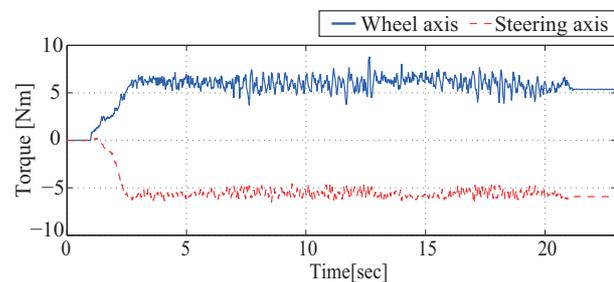


Fig. 4.3 Experimental result of CW direction rotational movement



(a)CCW direction



(b)CW direction

Fig. 4.4 Experimental results of the torque of a wheel and a steering axis

実験結果をそれぞれ、Fig. 4.1 から Fig. 4.3 に示す。上段三つの図は車両速度を、下段三つの図は各 DDSS に搭載されたモータの出力を示す。なおモータ出力の結果は、直進と旋回動作で縦軸の範囲が異なるので注意されたい。また Table 4.1 に、直進動作と反時計および時計方向への旋回動作をそれぞれ二回ずつ行ったときの角速度およびトルク、出力の、定常状態である 4[sec] から 17[sec] の間の平均値を示す。表にて “Motor A” および “Motor B” と示した結果はモータ出力軸のものであり、“Wheel axis” および “Steering axis” と示したものは運動学モデルやトルクモデルを用いてキャスト駆動輪の車輪軸と操舵軸へ換算したものである。トルクモデルは静力学の範囲で成り立つものであるが、定常状態を静的な状態として利用している。

図から、旋回時のモータ出力は、直進時に比べ明らかに大きいことがわかる。また、旋回時のモータ出力の結果が振動的になっている。この時の車両は上下に激しく振動しており、これによる影響が現れと思われる。

表から、角速度に関しては全結果で同様の結果が得られており、どれも指令通りの結果が得られていることがわかる。しかしトルクの結果には有意差が見られ、これが出力に影響を与えていることがわかる。また直進時のモータ出力の結果はどちらも近い値となっており、第 2 章にて示したとおり、DDSS により車輪に掛かる負荷を二台のモータへ等分配できていることが確認できる。しかし旋回時の結果では、Fig. 4.4 にも示すように、車輪の回転のみで移動しているのにも関わらず操舵トルクが発生しており、二台のモータ出力に偏りが生じていることが確認できる。二台分のモータ出力の合計値を、直進時と反時計および時計方向への旋回時とで比較すると、それぞれ 5.06 倍、5.13 倍増加していることがわかった。旋回時であっても、例えば平行二輪駆動機構であれば、互いの車輪が逆方向へベクトルを発生させていればモータ出力が増加することは無い。しかしキャスト駆動輪ではこれが発生しており、かつ操舵トルクが余分に必要になることを考えると、そこから本現象の要因を割り出せる可能性がある。

4.2 力学解析

先述のとおり、平行二輪駆動機構であれば本現象は生じないことから、キャスト駆動輪特有のオフセットに原因がある可能性が高い。キャスト駆動輪の運動学モデルは操舵中心点上で考えられているが、車輪が実際に外界に作用を与える点は車輪接地点である。そこで Fig. 4.5 に示すように、操舵中心点と車輪接地点に着目した力学解析を行った。図中の O_{rc} および O_{steer} 、 O_{gp} 、 f_r 、 f_c 、 τ_c は、それぞれ旋回中心点および操舵中心点、車輪接地点、摩擦抵抗力、 f_r の分力、 f_c により発生するトルクである。

旋回中の車輪の向きは、 $O_{rc}O_{steer}$ に対して垂直方向となる。機構に設けられたオフセットの影響により、旋回時に操舵中心点と車輪接地点が描く軌道には差があり、車輪接地点には摩擦力 f_r が生じる。 f_r は、車輪接地点の旋回軌道の接線方向に発生し、この分力 f_c がオフセットの影響により負荷トルク τ_c として操舵中心点に作用する。機構は車輪角度を維持するよう制御されるため、負荷と反対方向へトルク τ_l を発生させなければならない。 τ_l の方向は、反時計方向へ旋回するときに反時計方向(正方向)となり、時計方向の場合はその逆になる。これは、先に示した実験結果と一致する。

4.3 タイヤ横力の概念を用いた解析

本現象は、タイヤ工学における横力の発生現象に置き換えることもできる。横力とは、自動車でハンドルを切ったときに生じるタイヤの接地点(面)に発生する力であり、これにより車両が旋回できる^{[114][115]}。Fig. 4.6に示すように、車両進行方向とタイヤの回転方向にズレが生じたときにタイヤ回転面に対して垂直方向に生じる力が横力 f_{side} である。またこのズレの大きさはスリップ角 θ_{slip} として定義され、スリップ角がある範囲内であれば横力はスリップ角の大きさに対して線形に変化し、スリップ角がゼロになれば横力もゼロになる。

この現象をキャスト駆動輪に置き換えると、Fig. 4.7のようになる。タイヤの接地点における車両進行方向は、 $O_{rc}O_{gp}$ に対して垂直方向である。図からもわかるとおり、タイヤ回転方向と車両進行方向の間でスリップ角が生じており、接地点に横力 f_{side} を発生させ、操舵軸にトルク τ_{side} を発生させることがわかる。

また、実験中に車体が上下に振動したことについては、横力とタイヤの最大摩擦力から説明できる^[116]。横力が発生した状態で旋回し続けると、車輪接地面が変形する。これはタイヤの最大摩擦力に到達するまで起こり、それを越えた瞬間に車輪は弾性力により元の形状へ戻ろうとする。これを各車輪が繰り返しながら旋回を行ったため実験中に上下振動が発生したと考えられる。

4.4 旋回時モータ出力低減化手法

前節の解析により車輪に作用する横力からモータトルクが上昇していることが確認できた。車輪角度を、Fig. 4.8に示すように、スリップ角がゼロになるよう修正できれば旋回時のモー

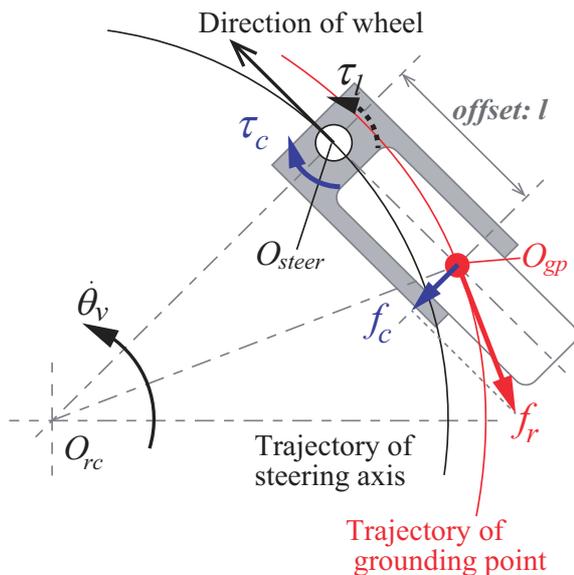


Fig. 4.5 Analysis of the resistance force

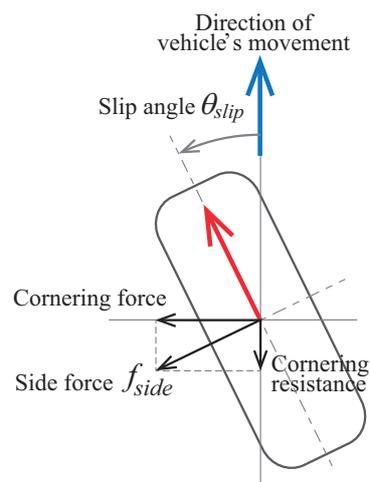


Fig. 4.6 Schematic model of the side force

タ出力上昇の問題を解決できる可能性がある。本節では、それを実現する運動学モデルの導出を行う。

スリップ角がゼロになる条件は、 $O_{rc}O_{gp} \perp O_{gp}O_{steer}$ である。 $O_{rc}(x_{rc}, y_{rc})$ は、車両速度入力から以下のように求められる。

$$x_{rc} = -\frac{\dot{y}_v}{\dot{\theta}_v}, \quad y_{rc} = \frac{\dot{x}_v}{\dot{\theta}_v} \quad (4.1)$$

ただし、 $\dot{\theta}_v \neq 0$ である。

また旋回中心点から操舵中心点までの距離 $r_{steer}^i = O_{rc}O_{steer}$ 、および旋回中心点から車輪接地地点までの距離 $r_{gp}^i = O_{rc}O_{gp}$ は、旋回中心点と車両座標系上の車輪位置から以下のように導出される。

$$r_{steer}^i = \sqrt{(x_{wi} - x_{rc})^2 + (y_{wi} - y_{rc})^2} \quad (4.2)$$

$$r_{gp}^i = \sqrt{(r_{steer}^i)^2 - l^2} \quad (4.3)$$

ただし、 $r_{steer} \geq l$ である。

車両速度は駆動力の発生する車輪接地点上で考えなければならないため、 r_{gp} を考慮し、

$$v_{tan}^i = r_{gp}^i \dot{\theta}_v \quad (4.4)$$

$$x_{wi} = v_{tan}^i \sin(\theta_1 + \theta_2) = \frac{((x_{wi} - x_{rc})l + (y_{rc} - y_{wi})r_{gp}^i)r_{gp}^i \dot{\theta}_v}{(r_{steer}^i)^2} \quad (4.5)$$

$$y_{wi} = v_{tan}^i \cos(\theta_1 + \theta_2) = \frac{((x_{wi} - x_{rc})r_{gp}^i + (y_{wi} - y_{rc})l)r_{gp}^i \dot{\theta}_v}{(r_{steer}^i)^2} \quad (4.6)$$

となる。 v_{tan} は旋回中心点から見た、 $O_{rc}O_{gp}$ の垂直方向への車輪速度である。

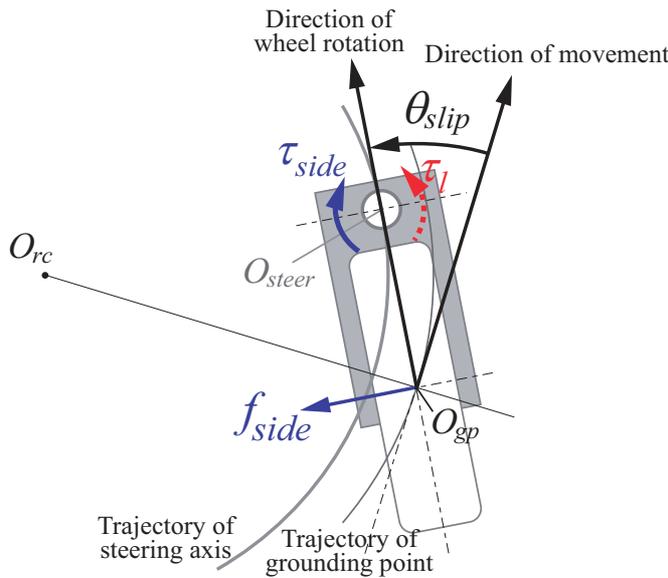


Fig. 4.7 Application of the side force to the active caster mechanism

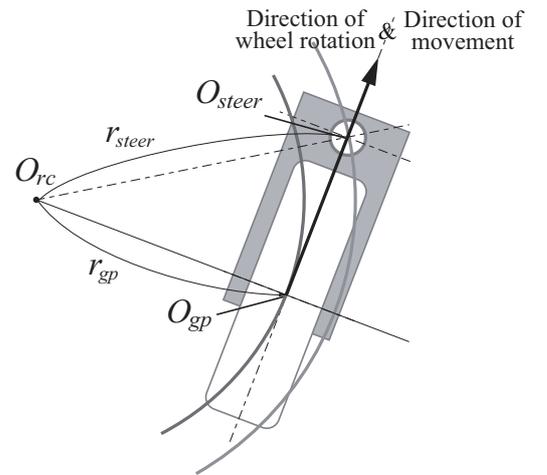


Fig. 4.8 Basic idea for improvement

以上より、スリップ角をゼロとする速度入力を与えることが可能となる．なお上式は一つの車輪 i に対するものであるが、実際には各車輪に対して導出する必要がある．

4.5 実験による検証

提案手法の効果を検証するために、4.1節と同様の条件にてロボットを反時計方向および時計方向にその場旋回させる実験を行った．結果をそれぞれ Fig. 4.10 および Fig. 4.11 に示す．また Table 4.2 に、提案手法を用いて反時計方向・時計方向への旋回をそれぞれ二回ずつ行ったときの角速度およびトルク、出力の、4[sec] から 17[sec] の間の平均値を示す．

結果より、計測された車両角速度は指令値と一致しており指令通りに車両を制御できていることが確認できる．また、従来手法による結果 (Fig. 4.2, Fig. 4.3) と比較すると、振動もなくなり、モータ出力も低減できていることが確認できる．二台のモータの出力の平均値の和を従来の結果と比較すると、反時計方向のときに 35.2%，時計方向のときに 32.6%それぞれ低減できていることがわかった．

Figure. 4.12(a) および (b) に示す反時計・時計方向へ旋回時の車輪・操舵軸の換算トルクの結果を、従来手法による結果である Fig. 4.4 と比較すると、操舵トルクの正負の関係性が逆になっており、また直進時の結果である Fig. 4.12(c) と比べても、操舵トルクが余分に発生してい

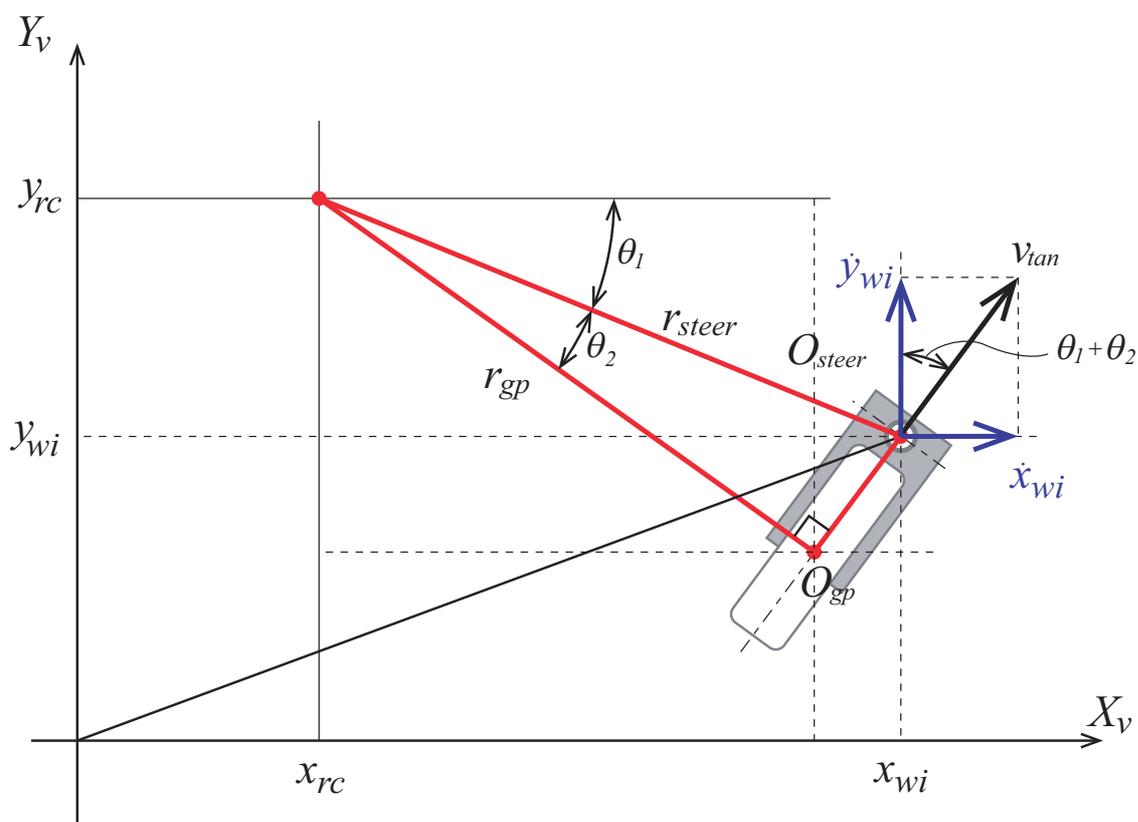


Fig. 4.9 Model of the revision of the steering angle

Table 4.2 Experimental result of output of mechanism with proposed method

	Angular velocity [rad/s]				Torque [Nm]			
	Motor A	Motor B	Wheel axle	Steering axle	Motor A	Motor B	Wheel axle	Steering axle
CCW direction	5.96	5.96	3.18	-0.000	2.27	-0.821	2.71	-3.09
CW direction	5.96	5.95	3.18	0.002	-1.22	2.87	3.08	4.09

	Output [W]			
	Motor A	Motor B	Wheel axle	Steering axle
CCW direction	13.7	4.81	8.91	0.127
CW direction	7.23	17.2	9.97	0.223

ることがわかる。しかし操舵トルクの大きさのみを比較すると反時計方向の場合に 45.0%，時計方向の場合に 27.1%低減できていることがわかった。

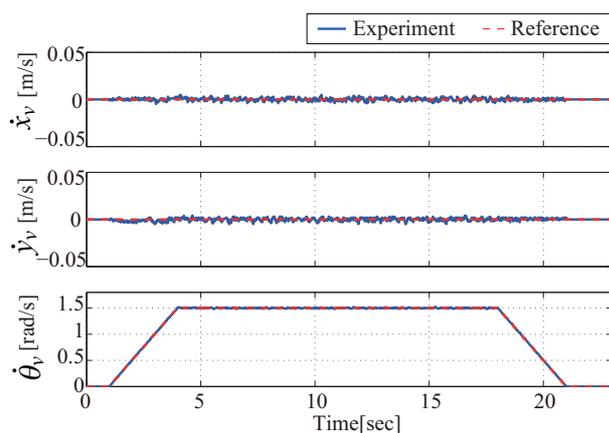


Fig. 4.10 Experimental result of CCW direction rotational movement with proposed method

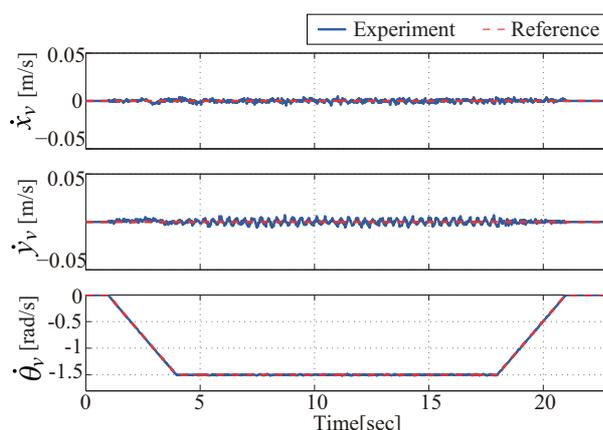


Fig. 4.11 Experimental result of CW direction rotational movement with proposed method

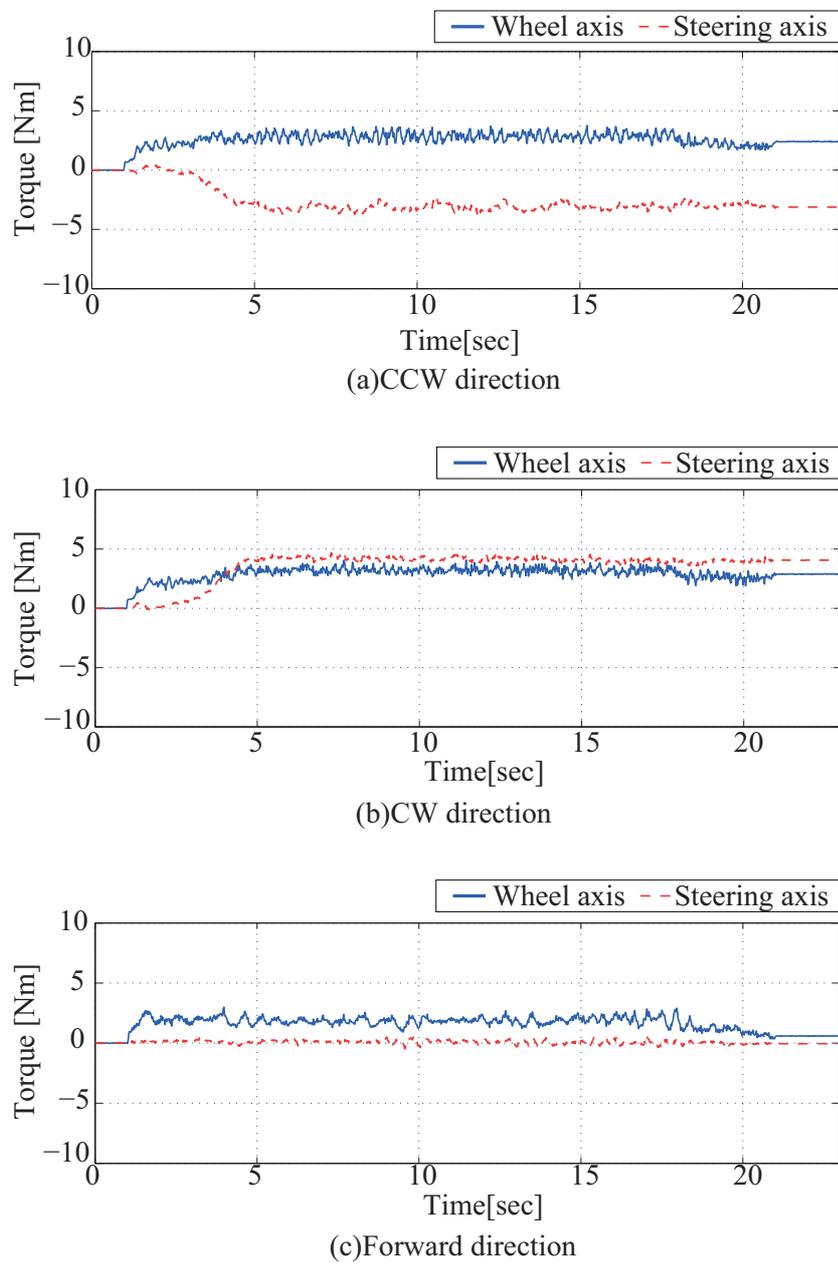


Fig. 4.12 Experimental result of the torques of a wheel and steering axis with proposed method

4.5.1 車輪角度と操舵トルクの関係について

先の実験結果にて、スリップ角をゼロにした場合でも余分な操舵トルクが発生していることがわかった。これには車両速度や摩擦などが影響している可能性が考えられるが、そもそも操舵トルクを直進時と同様に0[Nm]に近づけることが可能か検証する必要がある。そこで、提案手法を用いたその場旋回動作(反時計方向)において、車輪角度を強制的に変更させ、操舵トルクを計測する実験を行った。車輪角度の変更は、導出された旋回に対する接線方向速度 v_{tan} から法線方向成分を計算し、その値にそれぞれ1.0から0.8まで、0.05刻みで係数を掛けることで行う。結果を Fig. 4.13(a) に示す。

結果より、係数を変化させることでトルクがゼロに近づき、0.85からは符号が反転していることがわかる。Fig. 4.13(b) は、車輪角度を横軸に、操舵トルクを縦軸に取ったグラフである。なお、プロットされた値は4-17[sec]間の平均値である。車輪角度に対して操舵トルクが線形に変化していることがわかり、操舵トルクが0[Nm]になる車輪角度が存在することが確認できた。

4.5.2 遠心力の影響の検証

先の実験により、旋回動作であっても車輪の操舵トルクを0[Nm]にできることが確認されたが、提案手法でスリップ角をゼロにしたのにも関わらず余分な操舵トルクが発生していた原因については明らかではない。

考えられる一つの原因として、遠心力が挙げられる。これは、車両が反時計方向へ回転している場合、遠心力は車輪を外側へ押し出すように作用し、これは操舵軸に反時計方向のトルクを発生させる。これに対して機構は時計方向のトルクを発生させなければならず、先に示した

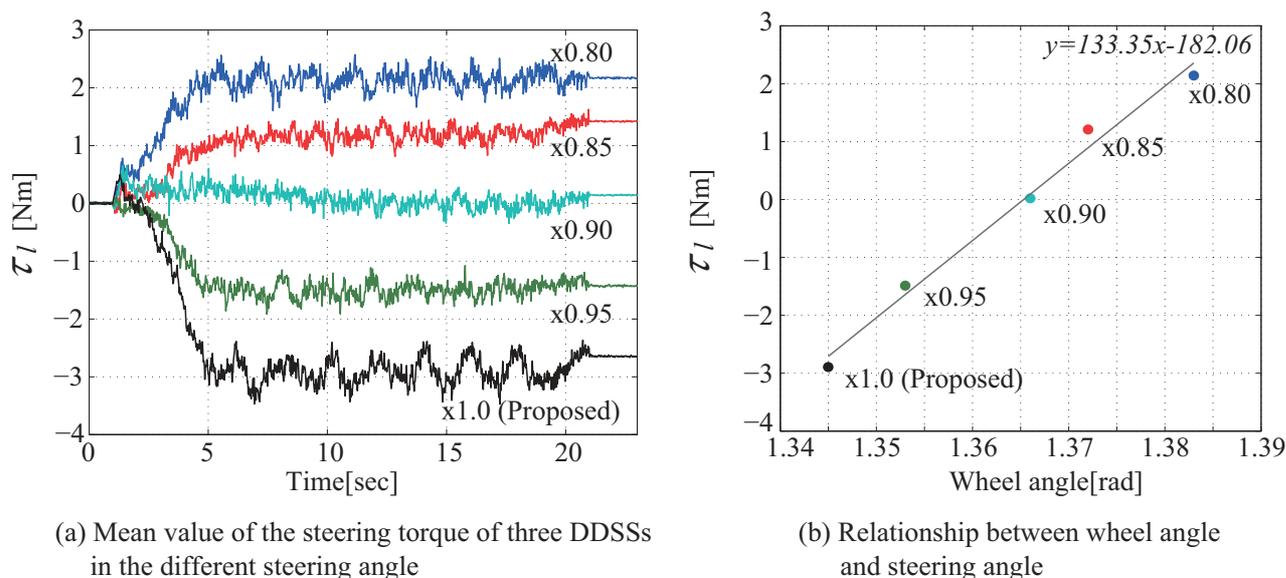


Fig. 4.13 Experimental result of the difference of the steering torque regarding to the steering angle

結果と一致する．そこで本節では，様々な旋回角速度にて実験を行い，その時の操舵トルクの変化について検証を行った．実験はこれまでと同様の条件にて，最高旋回角速度を $0.5[\text{rad/s}]$ から $3.5[\text{rad/s}]$ まで，また $-0.5[\text{rad/s}]$ から $-3.5[\text{rad/s}]$ まで $1.0[\text{rad/s}]$ 刻みで変化させて行う．結果を Fig. 4.14 に示す．

結果より，旋回角速度に対する操舵トルクの変化に有意差は無く， $\pm 3.5[\text{rad/s}]$ までの旋回角速度の範囲では遠心力による影響を受けないことが確認できた．

4.5.3 路面の影響の検証

その他の要因として，路面による違いが考えられる．これまでは同条件で実験を行えるよう，合板の上で実験を行っていた．実験では，Fig. 4.15 に示すように，従来の合板に加えビニル床シートとタイルカーペットを用いて実験を行った．実験は，これまでと同様に反時計方向へ $1.5[\text{rad/s}]$ の台形角速度パターンで走行させるものである．結果を Fig. 4.16 に示す．

3種類の床面でそれぞれ異なる結果が得られた．Table 4.17 に示すように，操舵トルクの様子は，木材-ビニル床シート-タイルカーペットの順で大きく，駆動トルクについても同様の結果が得られた．カーペット上での車輪移動は通常，抵抗が大きく大きな負荷が掛かると言われているが^{[117][118]}，実験では異なる結果が得られた．その原因として，従来の報告では補助輪の影響が主に指摘されており，駆動輪に対してではないことと，後にも説明するが，タイヤの変形よりも先にタイルカーペット表面の突起の変形が起こるため，横力の影響が小さくなったことが考えられる．

提案手法はタイヤの接地を点で考えていたが，実際には面で設置する．走行時の横力は，接地面の変形に対する復元力が引き起こすものであり，タイヤの材質や路面の摩擦係数，空気入りタイヤであれば空気圧などの条件により異なる．本節にて得られた結果からは，路面摩擦係

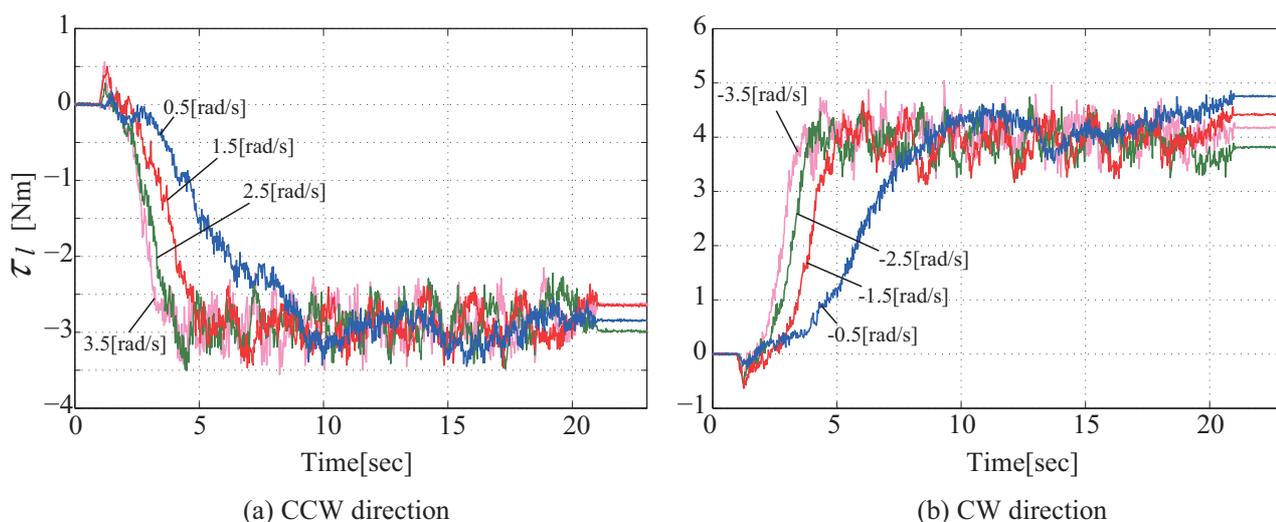


Fig. 4.14 Experimental result of the difference of the steering torque regarding to the angular velocity

数の違いによる横力の変化が観測されただけであり、その他の条件が異なれば、さらに異なった結果が得られることは必至である。それらの条件を統合的に評価することで接地の中心点を割り出し、提案手法に組み込むことも可能かもしれない。しかし従来手法に比べると十分な改善結果が得られたため、これ以上の追及は行わない。更なる改善を望む場合は、諸条件により傾向が大きく変化するため、操舵トルクのフィードバック制御等が有効であると言える。

本章では旋回時の操舵トルク上昇問題について3D-OMPを中心に議論を展開してきたが、従来の運動学モデルが車輪操舵軸上に旋回軌道の接線方向へ速度を発生させるようになっていることで生じるものであるため、3D-OMPやDDSSによるものでなく、キャスタ駆動輪で同様の運動学を用いて制御を行うロボットにて生じる一般的な問題である。しかし文献調査を行った範囲では本問題について取り扱われた例は存在しなかったため、全てのキャスタ駆動輪を用いたロボットが潜在的に抱えている問題であると言える [43]~[46] [105] [106] [119]~[121]。



Fig. 4.15 Photograph of the floor

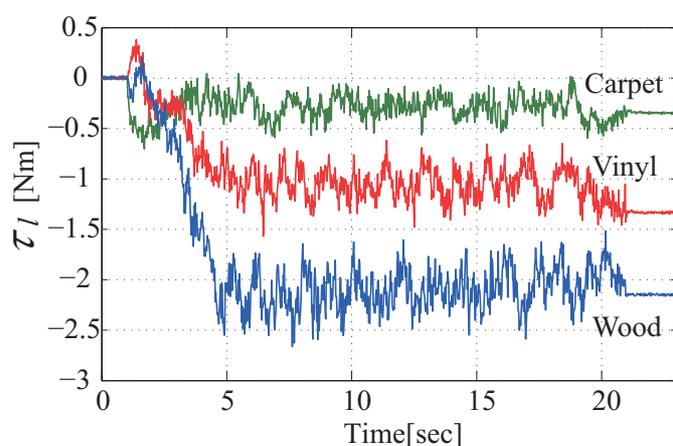


Fig. 4.17 Mean value of the steering and the wheel torque in the experiment

	τ_l [Nm]	τ_w [Nm]
Wood plate	-2.07	2.22
Vinyl sheet	-1.07	1.85
Tile carpet	-0.294	1.73

Fig. 4.16 Experimental result of the difference of the steering torque regarding to the floor

第5章 操作支援システム—パワーアシスト & スキルアシスト—

パワーアシストシステムは、人の能力を補助もしくは増幅できるシステムであり、身体的負担軽減の手段として用いられる。本章では、全方向移動機器に対するパワーアシストシステム (Power-Assist System for Omni-directional mobile robot: 以下, Omni-PAS) および、操作性を改善するためのスキルアシストシステムについて述べる。

5.1 全方向移動パワーアシストシステム

Omni-PAS は、従来の OMW を用いた研究にて開発された^[84]。他のパワーアシスト制御に関する研究とも共通するが、基本的に特定の機器に対する応用であり、他の機器への応用性については検証されていない。本研究では、DDSS を用いた OMW, OMB に Omni-PAS を実装し、応用性の検証を行う。

5.1.1 パワーアシストシステムの原理

パワーアシスト制御は、力覚センサの情報を用いたインピーダンス制御が一般的である。インピーダンス制御は、与えられた機械的なインピーダンス (慣性, 減衰係数, 剛性) を実現するよう機器を制御するものである。インピーダンス制御は、力制御ベース^[122]と位置制御ベース^[123]に分類され、前者は減速機を含むと操作性が悪化するため、一般的にダイレクトドライブモータが必要となり装置が高価になるという欠点がある。一方後者は、アドミッタンス制御とも呼ばれ、減速機付きのモータを使用できるため比較的安価に装置を実現できるという特徴を持つが、センサに力が加えられない限り動かないという欠点を持つ。本研究では主に、減速機を利用できる理由から、位置制御型のパワーアシスト制御を取り扱う。

Omni-PAS のブロック図およびモデルを、Fig. 5.1 と Fig. 5.2 に示す。操作者は、6軸力覚センサを介して車体に取り付けられハンドルを持って操作を行う。6軸力覚センサからは操作力

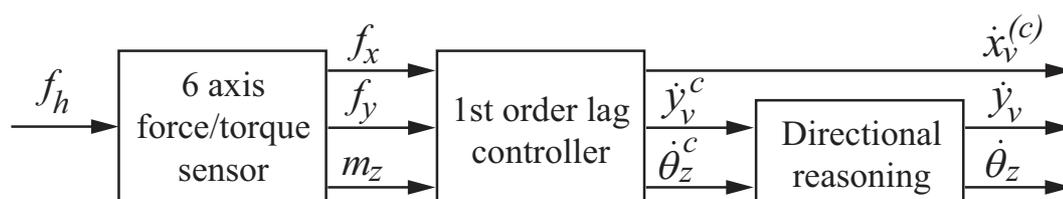


Fig. 5.1 Block diagram of power assist system

$f_h = [f_x f_y m_z]^T$ を取得し、以下に示す質量 $\mathbf{m} = \text{diag}(m_x, m_y, m_z)$ および粘性 $\mathbf{c} = \text{diag}(c_x, c_y, c_z)$ を考慮した運動学モデルをもとに、車両速度 $\dot{x}_v^c = [\dot{x}_v \dot{y}_v \dot{\theta}_v]^T$ へ変換する。

$$f_h = m\ddot{x}_v + c\dot{x}_v \quad (5.1)$$

ここで、 $v_v^c = \dot{x}_v^c$ とすると、

$$f_h = \mathbf{m}v_v^c s + \mathbf{c}v_v^c = (\mathbf{m}s + \mathbf{c})v_v^c \quad (5.2)$$

より、

$$v_v^c = \frac{1}{\mathbf{m}s + \mathbf{c}} f_h \quad (5.3)$$

を得る。

さらに、 $\mathbf{T} = \mathbf{m}\mathbf{c}^{-1} = \text{diag}(T_x, T_y, T_z)$, $\mathbf{K} = \mathbf{c}^{-1} = \text{diag}(K_x, K_y, K_z)$ とすることで、1次遅れ系の変換式：

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_v^c \\ \dot{y}_v^c \\ \dot{\theta}_v^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{K_x}{T_x s + 1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_y}{T_y s + 1} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{K_z}{T_z s + 1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ m_z \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

を得る。本システムは、力が加えられていない限りロボットは動作しないため、搭載重量が変化した場合や斜面上を走行する場合であっても、同様の操作感で操作でき、力を加えることをやめれば、最終的に速度はゼロに収束する。

5.1.2 ファジィ推論による操作意図推定

Omni-PAS では、前節の変換式から導出された速度入力を用いて操作意図推定を行い操作性の改善を行う。Fig. 5.2に示すように、センサの検出中心点と車両中心点との間にオフセットが存在する場合、操作者の意図しない動作が発生する。例えば、左方向へ操作しようと思った場

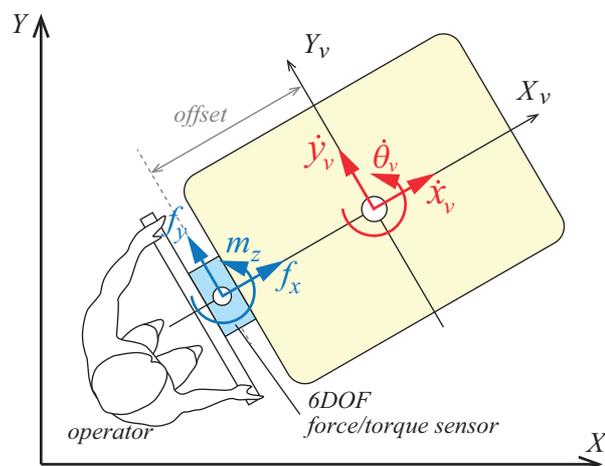


Fig. 5.2 Model of Omni-PAS

Table 5.1 Fuzzy reasoning rule

No.(name)	Antecedent	Consequent
1(LS)	if($\dot{y}_v^c > 0$ and $\dot{\theta}_z^c > 0$)	then $\dot{y}_v > 0$
2(RS)	if($\dot{y}_v^c < 0$ and $\dot{\theta}_z^c < 0$)	then $\dot{y}_v < 0$
3(NS)	if($\dot{y}_v^c \approx 0$ and $\dot{\theta}_z^c \approx 0$)	then $\dot{y}_v = 0$
4(RT)	if($\dot{y}_v^c > 0$ and $\dot{\theta}_z^c > 0$)	then $\dot{\theta}_z > 0$
5(LT)	if($\dot{y}_v^c < 0$ and $\dot{\theta}_z^c < 0$)	then $\dot{\theta}_z < 0$
6(NT)	if($\dot{y}_v^c \approx 0$ and $\dot{\theta}_z^c \approx 0$)	then $\dot{\theta}_z = 0$

R: Right, L: Left, N: No, S: Slide, T: Turn

合、センサへは左方向の力とともに反時計方向へのモーメントも加えられる。また反時計方向へ旋回しようとした場合、反時計方向へのモーメントとともに右方向への力が加えられる。力センサ各軸の入力から導出された速度を直接車両の指令速度とすると、横方向移動と旋回動作が同時に発生することになる。座標変換により車両中心点へ変換する手法が一般的であるが、実際は操作者ごとに力とモーメントの加減が異なるため、操作者の意図と車両の動作が必ずしも一致しないことがある。そこで従来研究では、ファジィ推論を用いた操作意図推定手法が構築された。

ファジィ推論は精密にモデル化できないが if-then 形式にて表現できるものに対して演繹的に一つの結論を導く手法である。手漕ぎ型アシスト車いすにおいて、左右のリムを押す力から操作意図を推定し、路面状況の変化に応じて損なわれる直進安定性を高めるためにファジィ推論が用いられる例もあり^[71]、人の行動パターンや環境変化など、モデル化は困難であるが傾向などが既知である場合に有効である。

従来研究では、実験により明らかとなった操作入力の傾向から、Table 5.1 のようなファジィルールが構築された^{[84][85]}。それぞれ、

- ルール1 (LS) では、「もし、加えられた力が左方向で、かつモーメントが反時計方向ならば、そのとき、左並進せよ」、
- ルール2 (RS) では、「もし、加えられた力が右方向で、かつモーメントが時計方向ならば、そのとき、右並進せよ」、
- ルール3 (NS) では、「もし、加えられた力がほぼゼロで、かつモーメントもほぼゼロならば、そのとき、停止せよ」、
- ルール4 (LT) では、「もし、加えられた力が右方向で、かつモーメントが反時計方向ならば、そのとき、左旋回せよ」、
- ルール5 (RT) では、「もし、加えられた力が左方向で、かつモーメントが時計方向ならば、そのとき、右旋回せよ」、
- ルール6 (NT) では、「もし、加えられた力がほぼゼロで、かつモーメントもほぼゼロならば、そのとき、停止せよ」、

という意味を持つ。入力に対する各ルールへの適合度は、正接関数と指数関数を用いて導出さ

Table 5.2 Name of membership function

Rule number	Antecedent		Consequent	
	Condition	FN	Condition	name
1	$\dot{y}_v^c > 0$	LS_y	Left Slide	LS
	$\dot{\theta}_z^c > 0$	LS_θ		
2	$\dot{y}_v^c < 0$	RS_y	Right Slide	RS
	$\dot{\theta}_z^c < 0$	RS_θ		
3	$\dot{y}_v^c \approx 0$	NS_y	No Slide	NS
	$\dot{\theta}_z^c \approx 0$	NS_θ		
4	$\dot{y}_v^c \leq 0$	LT_y	Left Turn	LT
	$\dot{\theta}_z^c > 0$	LT_θ		
5	$\dot{y}_v^c \geq 0$	RT_y	Right Turn	RT
	$\dot{\theta}_z^c < 0$	RT_θ		
6	$\dot{y}_v^c \approx 0$	NT_y	No Turn	NT
	$\dot{\theta}_z^c \approx 0$	NT_θ		

れる。それぞれの関数の形状を Fig. 5.3 に示す。正接関数は、並進、旋回移動を表すルール1, 2, 4, 5 に対して適用される。

$$\mu_{FN} = \pm \frac{\tan^{-1} \{a_{FN}(u - b_{FN})\}}{\pi} + 0.5 \quad (5.5)$$

ここで、 μ_{FN} は前件部の適合度であり、 FN はそれぞれの関数名を示す。Table 5.2 に示すように、 y_v , θ_z 軸に応じて y もしくは θ を付加し μ_{LSy} もしくは $\mu_{LS\theta}$ のように表される。また、 u にはそれぞれの関数名に従って、 \dot{y}_v^c や $\dot{\theta}_z^c$ が与えられる。式 (5.5) はパラメータ a_{FN} および b_{FN} を含むが、これは Fig. 5.3(a) と (b) に示すように、それぞれ関数の傾きや左右方向のオフセット量を決定するものである。

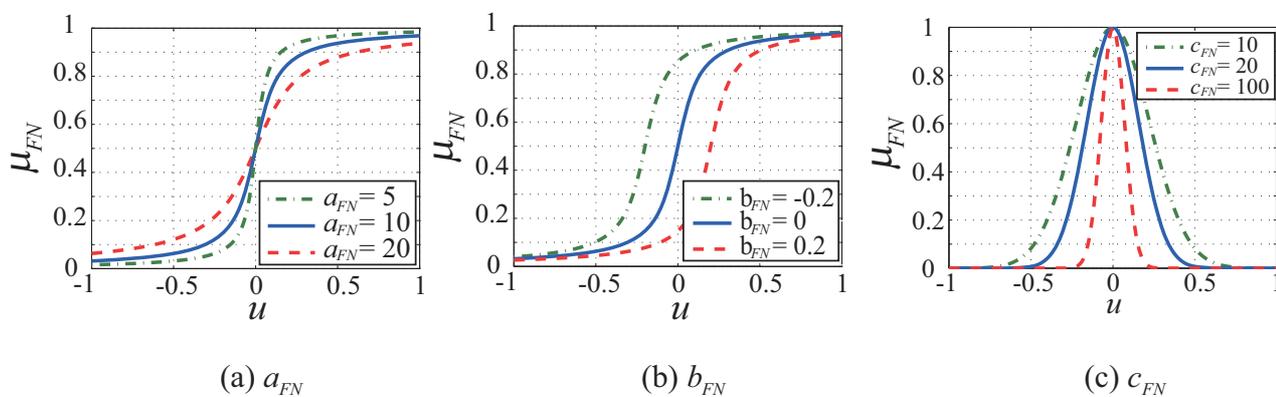


Fig. 5.3 Difference of membership functions from each parameter

一方指数関数は、停止動作を表すルール 3, 6 に対して適用される。

$$\mu_{FN} = \exp(-c_{FN} \cdot u^2) \quad (5.6)$$

この関数は 0 点付近で凸形状となる関数であり、Fig. 5.3(c) に示すように、パラメータ c_{FN} により尖度が決まる。以降、特に記述が無い限り、単に“パラメータ”と書かれた場合は、メンバーシップ関数に用いられるパラメータとする。

前件部の推論結果 α_{name} および後件部の推論結果 y_{name} は次のように表わされる。

$$\alpha_{LS} = \mu_{LSy} \cdot \mu_{LS\theta} \quad , \quad y_{LS} = \dot{y}_v^{max} \alpha_{LS} \quad (5.7)$$

$$\alpha_{RS} = \mu_{RSy} \cdot \mu_{RS\theta} \quad , \quad y_{RS} = -\dot{y}_v^{max} \alpha_{RS} \quad (5.8)$$

$$\alpha_{NS} = \mu_{NSy} \cdot \mu_{NS\theta} \quad , \quad y_{NS} = 0 \quad (5.9)$$

$$\alpha_{LT} = \mu_{LTy} \cdot \mu_{LT\theta} \quad , \quad y_{LT} = \dot{\theta}_z^{max} \cdot \alpha_{LT} \quad (5.10)$$

$$\alpha_{RT} = \mu_{RTy} \cdot \mu_{RT\theta} \quad , \quad y_{RT} = -\dot{\theta}_z^{max} \cdot \alpha_{RT} \quad (5.11)$$

$$\alpha_{NT} = \mu_{NTy} \cdot \mu_{NT\theta} \quad , \quad y_{NT} = 0 \quad (5.12)$$

ルール 1, 2, 4, 5 の後件部メンバーシップ関数は、前件部の適合度 α_{name} に応じて速度を出力する線形関数とする。また、ルール 3, 6 の後件部メンバーシップ関数は常に推論結果を 0 にする。なお、 \dot{y}_v^{max} および $\dot{\theta}_z^{max}$ は、使用する機器の並進と旋回の最高速度である。

以上より導出された各ルールに関する値は、以下の式に示す重量平均法を用いて非ファジィ化され、最終的に出力 \dot{y}_v , $\dot{\theta}_z$ を得る。

$$\dot{y}_v = \frac{\alpha_{RS}y_{RS} + \alpha_{LS}y_{LS} + \alpha_{NS}y_{NS}}{\alpha_{RS} + \alpha_{LS} + \alpha_{NS}} \quad (5.13)$$

$$\dot{\theta}_z = \frac{\alpha_{LT}y_{LT} + \alpha_{RT}y_{RT} + \alpha_{NT}y_{NT}}{\alpha_{LT} + \alpha_{RT} + \alpha_{NT}} \quad (5.14)$$

5.1.3 操作力の検証

パワーアシスト制御により軽減可能な操作負担に関する検証を行った。実験は OMB を用いて、直進および旋回動作を下記二種類の条件で三回ずつ行った。

1. パワーアシスト制御あり
2. パワーアシスト制御なし (機構からモータ動力を切り離れた状態)

直進動作は 2[m] 前方へ、旋回動作は反時計方向へ 1 回転行った。なお横方向に関しては、パワーアシストを用いない場合に操作力がセンサの許容値を超えるため行わなかった。

Figure 5.4 および Fig. 5.5 に、操作時の力とモーメントの大きさおよび力積と角力積の結果を示す。また、それぞれ三回行った実験の最大力およびモーメントの平均値を Table 5.3 に示す。式 (5.4) のゲインおよび時定数はそれぞれ、自然な操作感になるよう事前に調節し、 $K = [0.020, 0.018, 0.39]$ および $T = [1.20, 1.20, 1.20]$ とした。

結果より、パワーアシストを用いることで操作力や要するエネルギーを大きく低減可能であることがわかる。操作時の力およびモーメントの最大値を比較すると、直進時は力を 77.0 %、

Table 5.3 Max. force and moment of power-assist and non-power-assist operation.

Motion Condition	Straight		Rotation	
	with PA	non PA	with PA	non PA
Max. force N	19.93	86.77	30.46	76.53
Max. moment Nm	1.22	4.09	2.53	12.62

モーメントを70.2%，回転時は力を60.3%，モーメントを80.0%軽減できていることが確認できる。また力積および角力積についても、直進時は、力積は74.3%，角力積は68.0%，巡回

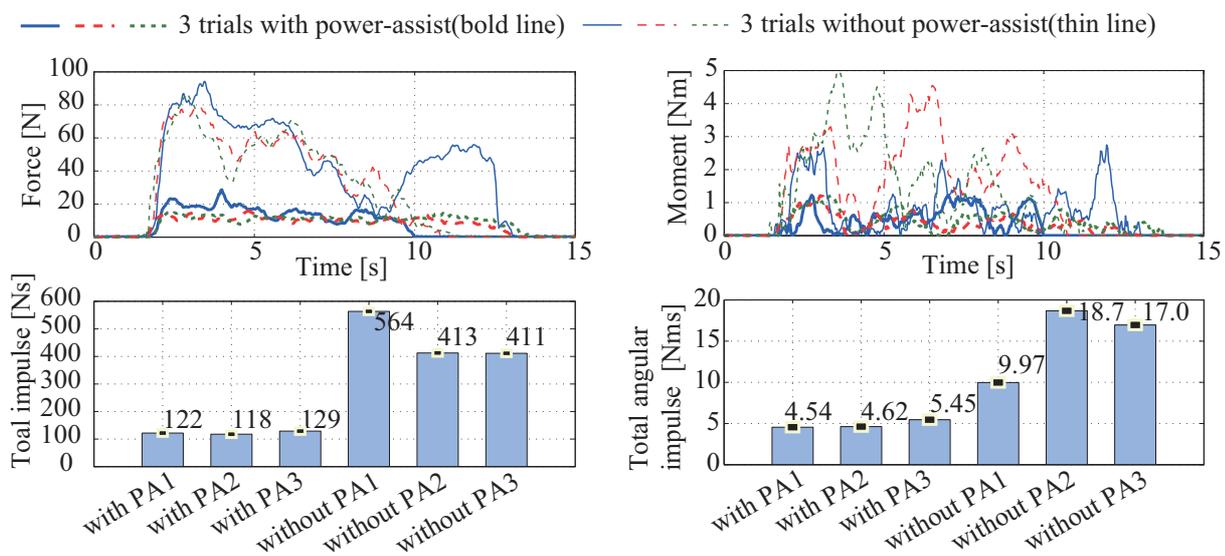


Fig. 5.4 Experimental result of straight movement.

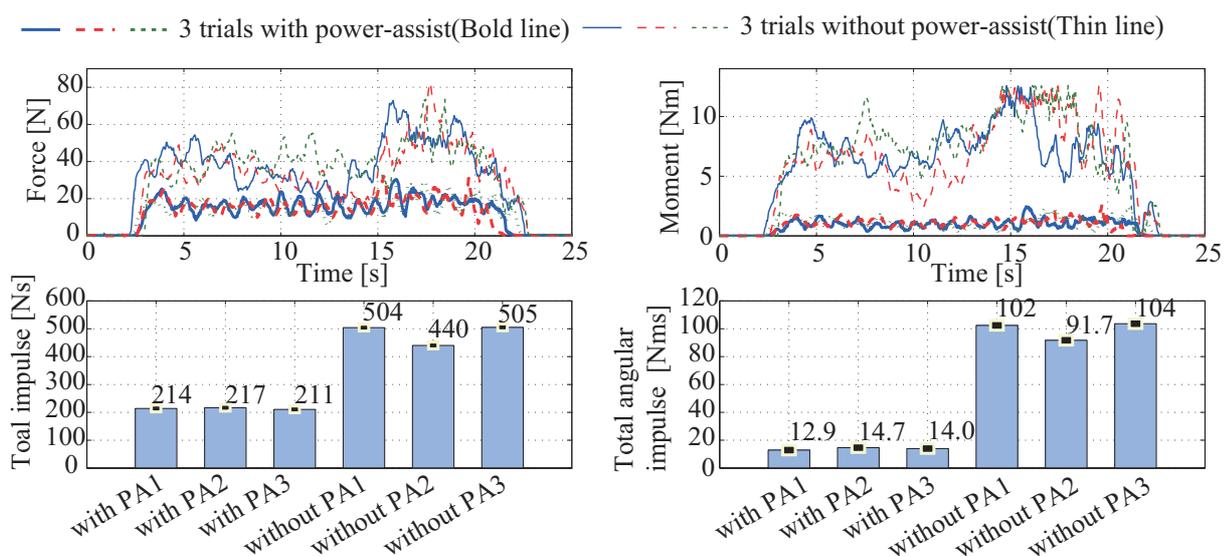


Fig. 5.5 Experimental result of rotation movement.

時についても、力積は60.3%，角力積は80.0%軽減できており、大幅に操作負担を軽減できることが確認された。

位置(速度)制御型のパワーアシスト制御の場合、加えられた力の大きさに対する速度の大きさはコントローラのゲインによってのみ変化する。つまりゲインが一定であれば、操作力に車体重量は影響しないため、車体重量が変化したとしても常に同様の操作感で操作可能であり、重量が増加するほど操作力軽減効果は大きくなる。これは、斜面走行時においても操作感が変化することがなく、平面走行時と同様に操作可能であることを意味する。また、大きな操作力を発揮できない人であっても、ゲインを大きくすることで、少ない力で操作することが可能となる。

5.2 ファジィ推論のパラメータに関する考察

ファジィ推論のパラメータは全てで20個あり、現状ではこれを試行錯誤により調整している。従来研究では、ファジィニューラルネットを応用したパラメータのオフラインチューニングシステムが開発されているが、チューニングに手間が掛かることや操作の慣れにより最適なパラメータが変化することなどの課題があり、オンラインには対応できず計算負荷の問題もあったため実装しなかった。本節は、OMWとOMBで試行錯誤により調節されたパラメータを比較し、その傾向や特徴を解析することでパラメータ設定の基礎的知見を得ることを目的とする。

実験は二名の被験者の協力を得て行った。パラメータ調節は、各被験者にパラメータが操作に与える影響(重量感や応答速度)について説明した後、被験者自らが試行錯誤にて行った。なお、OMWの最高速度は1.67[m/s]とOMBの2倍以上大きいため、OMWの最高速度をOMBと同じの0.8[m/s]に制限し、実験を行っている。1次遅れコントローラのパラメータは、両車両で同一のものを用いた。

Table 5.4 Parameters for fuzzy reasoning.

Function name		Parameters for lateral movement						Parameters for rotational movement					
		LSy, RSy		LSz, RSz		NSy	NSz	LTy, RTy		LTz/RTz		NTy	Ntz
Parameter		a	b	a	b	c	c	a	b	a	b	c	c
Sub. 1	OMW	20	± 0.20	5.0	± 0.01	500	500	10	∓ 0.10	20	± 0.20	500	500
	OMB	20	± 0.30	5.0	± 0.30	500	500	7.0	∓ 0.40	5.0	± 0.30	500	500
Sub. 2	OMW	12.0	± 0.10	1.0	± 0.05	500	500	2.0	∓ 0.10	10	± 0.30	500	500
	OMB	10	± 0.15	7.0	± 0.15	500	500	10	∓ 0.25	7.0	± 0.25	500	500

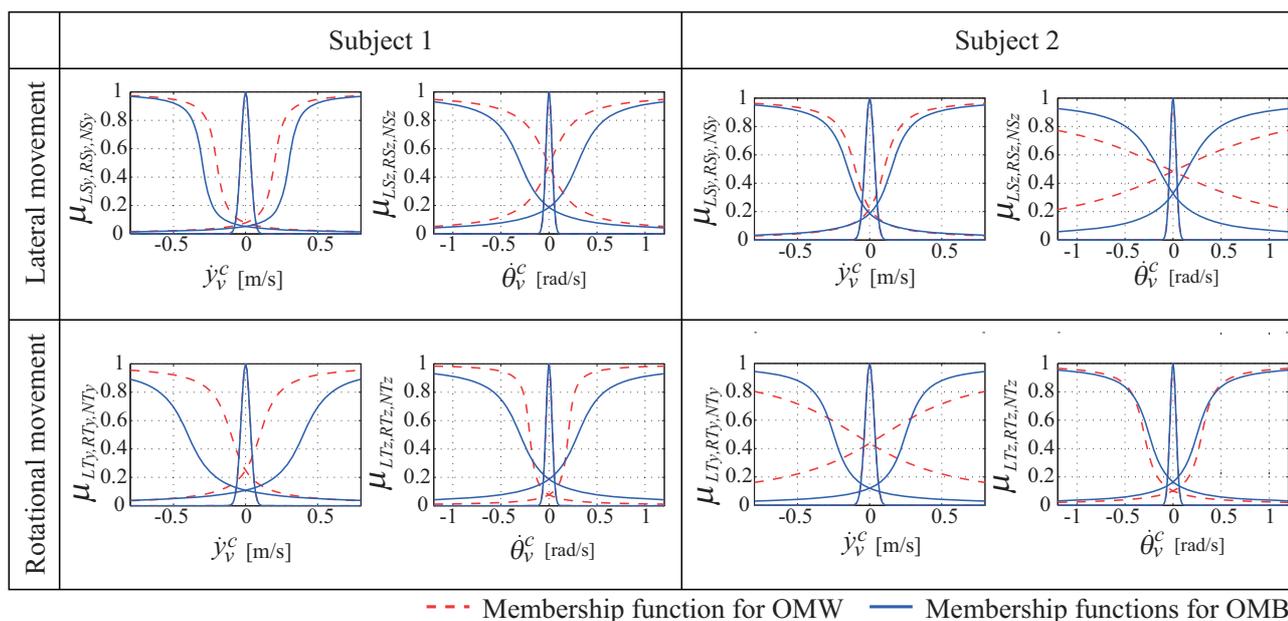


Fig. 5.6 Difference of the membership function

OMBとOMWにて調節されたパラメータおよびメンバーシップ関数の形状を、Table 5.4およびFig. 5.6に示す。

両被験者間で共通する傾向として、パラメータ b の値がOMWの方が小さくなっていることが挙げられる。パラメータ b は、入力に対する関数のオフセット量を決定する値であり、大きいほど反応が鈍くなる、つまり重量感が増えることになる。特にLSz, RSzおよびLTy, RTyでその差は大きく、メンバーシップ関数の形状の違いからも確認できる。これは、OMBの方が、起動するために大きな力を発揮する必要があることを意味する。これはさらに、真横移動の場合にはモーメントの入力に、旋回動作の場合には横方向の力入力に、顕著な差が現れることを意味する。

真横移動時に、OMBの方が加えるモーメントが大きくなることについては、センサ検出中心点と車両中心点間のオフセット量から説明できる。OMWとOMBでは、Fig. 5.7に示すように、オフセット量 l_{OMW} と l_{OMB} が異なる。車両を横方向へ移動させるための力が両者で同じ f_y^v だと仮定した場合、センサに加えるべき Y_v 軸方向の力および θ_v 軸方向のモーメントは、

$$OMW : f_y^s = f_y^v, \quad m_z^s = f_y^v l_{OMW} \quad (5.15)$$

$$OMB : f_y^s = f_y^v, \quad m_z^s = f_y^v l_{OMB} \quad (5.16)$$

となる。 Y_v 軸方向の力は両者同じだが、モーメントに関しては、オフセット量の大きいOMBは、より大きなモーメントを加えなければならないことになり、パラメータから読み取れる傾向と一致する。

一方、旋回動作については、真横移動の場合度同様に、旋回させるためのモーメント m_z^v が

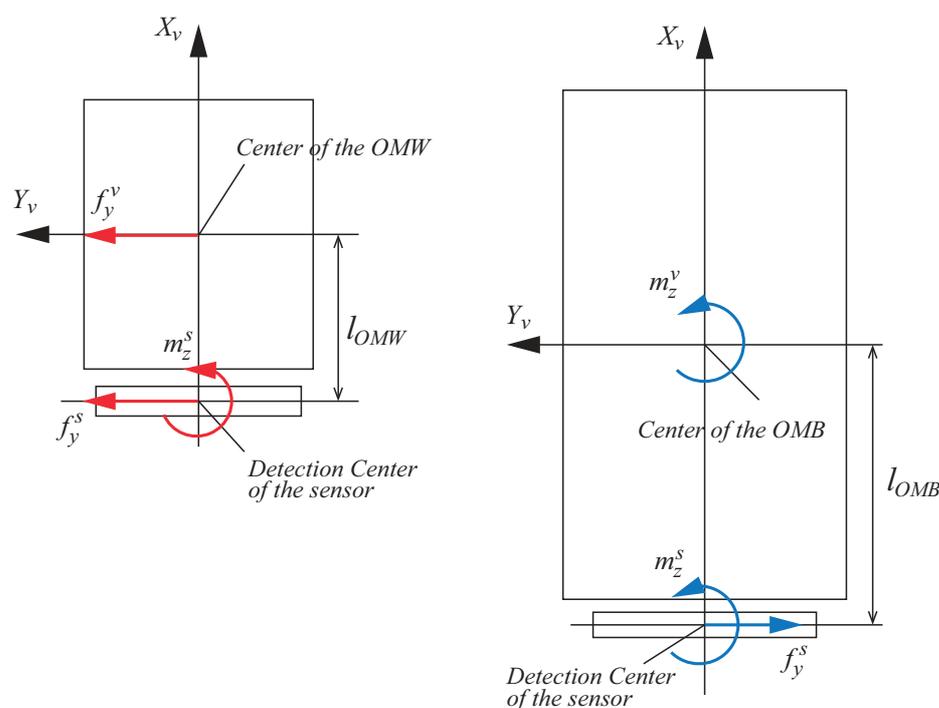


Fig. 5.7 Offset between the sensor detection center and the vehicle body center

両者で同じとし、センサに加えるべき力およびモーメントを導出すると、

$$OMW: \quad f_y^s = -\frac{m_z^v}{l_{OMW}}, \quad m_z^s = m_z^v \quad (5.17)$$

$$OMB: \quad f_y^s = -\frac{m_z^v}{l_{OMB}}, \quad m_z^s = m_z^v \quad (5.18)$$

となり、OMBの方がより少ない横方向の力で操作できることになる。しかしこれは、パラメータの傾向とは逆の関係になっている。旋回動作については、同じ角速度であっても、オフセットの大きいOMBの方が人の移動距離は多くなる。少ない力で動けるようにした場合、わずかな力の変化にも車両が応答して動作してしまうため、その分人も動かなければならなくなる。そのため被験者は、自身の動きと力の掛け具合が釣り合うように、パラメータの調節を行ったものと思われる。

この現象の確認のために、OMWとOMB両方のパラメータを用いて、OMBを Y_v 軸方向への移動および旋回動作をさせる実験を行った。 Y_v 軸方向への移動の実験では、左方向に合計4[m]の距離を、前半の2[m]は0.2[m/s]で、後半の2[m]を0.6[m/s]になるよう操作を行う。一方旋回動作の実験では、その場で反時計方向へ1回転するうち、半周を0.3[rad/s]で、残り半周を0.6[rad/s]になるよう操作を行う。被験者は、ディスプレイ上に表示された車両速度を確認しながら目標速度に近づけるよう操作する。本実験では、目標速度や位置に対する精度は特に重要ではなく、自然な力の加え方で操作できているかが重要になる。被験者がロボットの特性に合わせて操作しないよう、あえて目標位置と速度を確認するという作業を与えることで自然な操作入力を得られるようにした。

真横並進移動と旋回動作の結果を、それぞれFig. 5.8およびFig. 5.9に示す。

結果より、真横並進動作について、両被験者でOMWのパラメータを用いた場合に速度の乱れが生じており、特に被験者2は大きい。一方旋回動作については、被験者1はOMWのパラメータを用いた場合に速度に脈動が大きく発生しているが、被験者2はどちらの結果も同様の結果が得られた。操作後に行ったアンケートでは、OMWのパラメータを用いた場合に操作感が軽く予想よりも大きく動くため操作しにくいという感想が得られた。

以上より、機器による方向推論のパラメータの違いについて、aおよびcの大きな違いはなく、bは車両の長さ(オフセット)によって、増加させることで操作性の改善が可能になることがわかった。

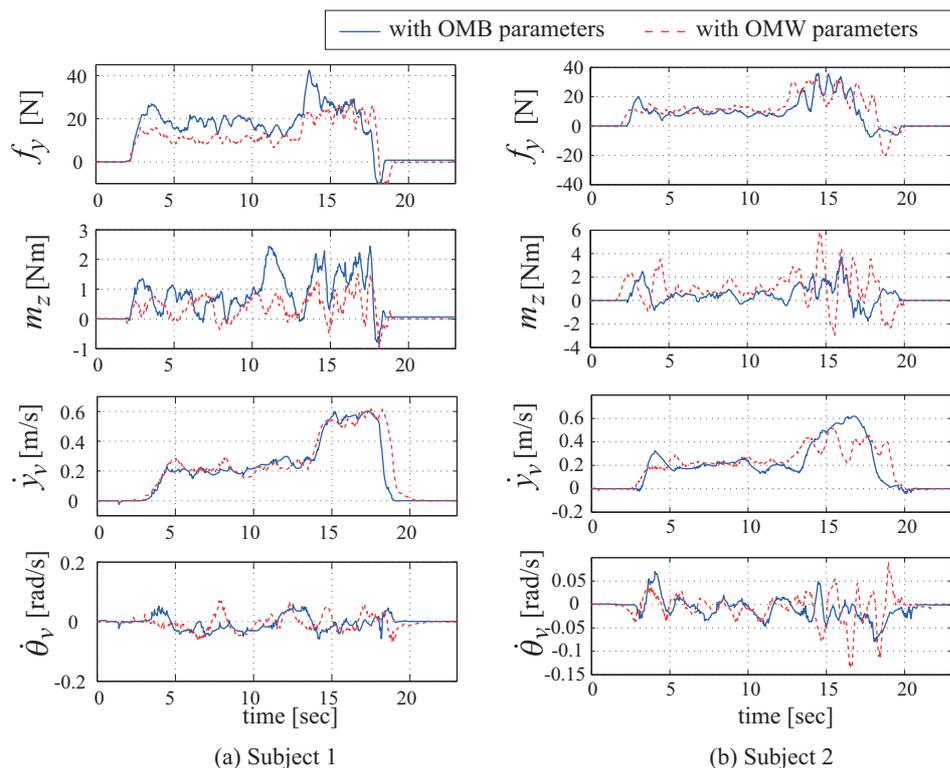


Fig. 5.8 Experimental result of lateral movement

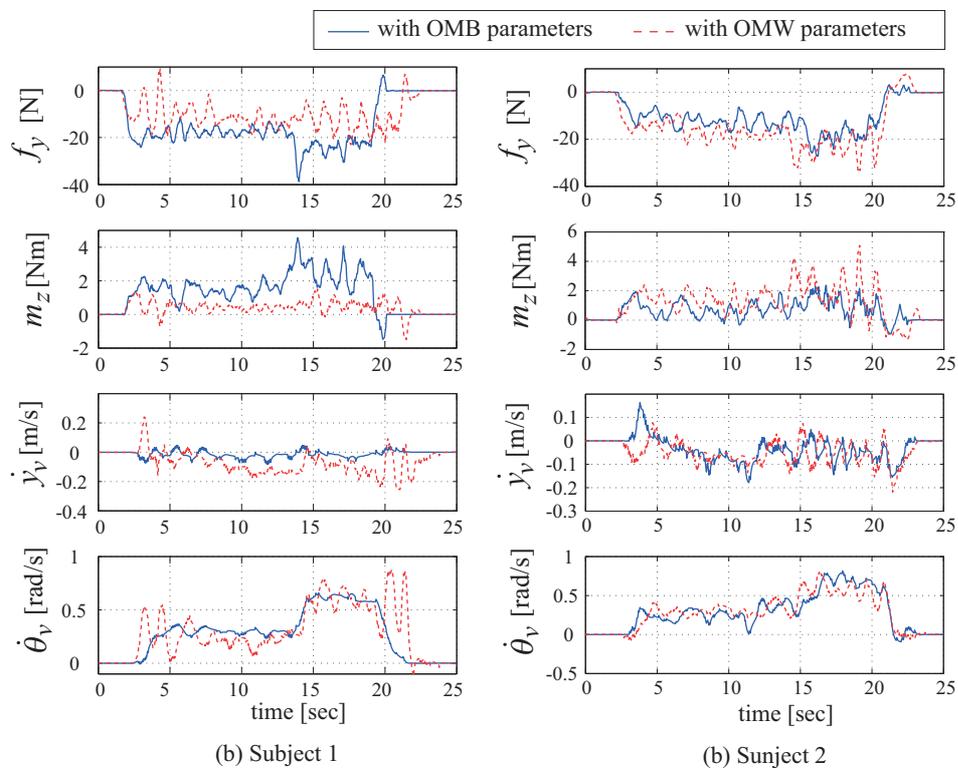


Fig. 5.9 Experimental result of rotational movement

5.3 従来のスキルアシストシステム

従来研究においてファジィ推論のパラメータは、試行錯誤で決定されることや、ANFISを用いたパラメータの自動的調節システムにより導出されていた。これにより操作方向に対する操作性は改善されたが、依然として固定値であった1次遅れコントローラのパラメータのため、操作が振動的になることがあった。

インピーダンス(パラメータ)可変制御はこれに対する有効な手段である。Yamadaらは、二点間の位置決め過程を1) 起動・2) 定速搬送・3) 位置決め の3段階に分け、1) から3) に向かうにつれ、コントローラのインピーダンス特性を慣性支配から粘性支配に変化させることで快適な操作を実現した^[66]。またIkeuraらは、ロボットと人の協調搬送において、人の持つ粘性係数が目標位置に近づくにつれ減少することを明らかにし、ロボットの制御則に組み込むことで搬送軌道が躍度最小軌道になることを示した^[124]。躍度は位置の2階微分のことを示し、躍度最小軌道とは、躍度評価基準としそれを最小化する軌道であり、人が物体を二点間で移動させる時の手先軌道が躍度最小軌道になることが良く知られており^[125]、上記のように人の動作の評価指標として用いられることや、Maedaらのように躍度最小軌道を用いた人の動作予測によるアシスト機器の操作性の改善例もある^[126]。

本研究室ではYamadaらの研究により得られた知見から、OMWの走行状態に応じて1次遅れコントローラの時定数およびゲインを調節することで安定した操作を実現するシステムが構築された^[90]。しかし本システムは前進方向(X_v 軸方向)にのみのものであったため、本研究では全方向へ拡張を行い操作性の検証実験を行った。

5.3.1 従来研究におけるスキルアシストシステム

スキルアシストシステムを含むパワーアシストシステムのブロック図をFig. 5.10に示す。スキルアシストシステムは、Fig. 5.11に示すように、走行状態推定部とパラメータ調節部、熟練度推定部に分かれる。

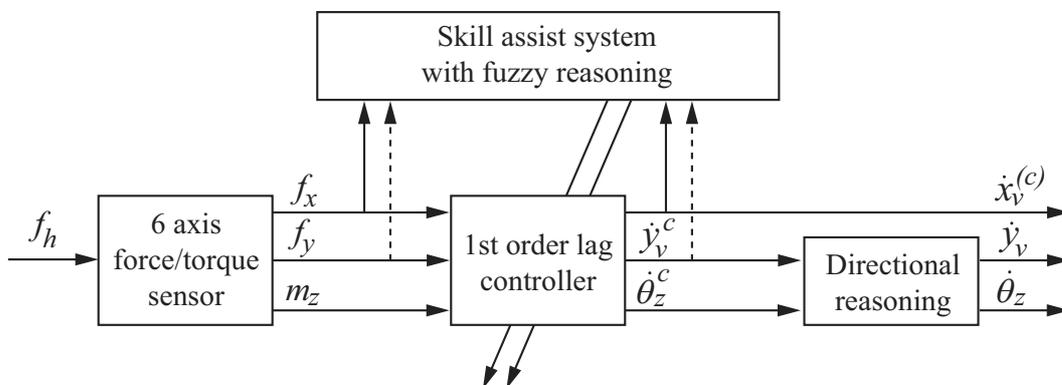


Fig. 5.10 Block diagram of the power-assist system with skill assist system

Table 5.5 Fuzzy rules of the running state estimation

RN	Antecedent	Consequent
1	if ($f_x > 0$ and $\dot{x}_v^c \approx 0$),	then T_x : small
2	if ($f_x > 0$ and $\dot{x}_v^c > 0$),	then T_x : large
3	if ($f_x \approx 0$ and $\dot{x}_v^c > 0$),	then T_x : small
4	if ($f_x < 0$ and $\dot{x}_v^c > 0$),	then T_x : K_x : small
5	if ($f_x < 0$ and $\dot{x}_v^c \approx 0$),	then T_x : small
6	if ($f_x < 0$ and $\dot{x}_v^c < 0$),	then T_x : large
7	if ($f_x \approx 0$ and $\dot{x}_v^c < 0$),	then T_x : small
8	if ($f_x > 0$ and $\dot{x}_v^c < 0$),	then T_x : K_x : small

走行状態に応じたパラメータ自動調節システム

走行状態推定部およびパラメータ調節部は、ファジィ推論を用いて一括で処理される。走行状態は力入力と1次遅れコントローラの出力の関係性から、1)加速、2)定常走行、3)減速、4)急停止、の4種類に分類され、それぞれの適合度に応じてパラメータが調節される。ファジィルールを Table. 5.5 に示す。Rule1 から 4 は、それぞれ、

- ルール1は、力が正の値を取り、速度がほぼゼロであった場合、1)加速期であり、時定数を小さくすることで、応答性を向上させる、
- ルール2は、力と速度が正の値を取る場合、2)定常走行期であり、時定数を大きくすることで、安定性を向上させる、

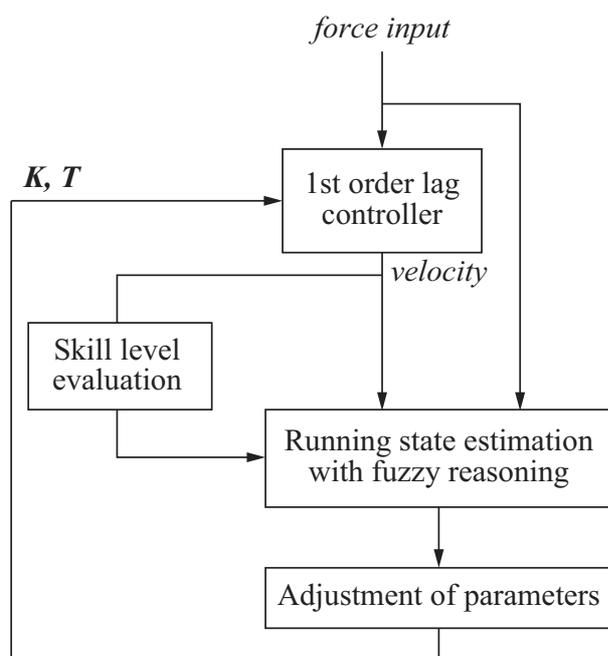


Fig. 5.11 Schematic model of skill assist system

- ルール3は、力がほぼゼロであり、速度が正の値を取る場合、3)減速期であり、時定数を小さくすることで、応答性を向上させる、
- ルール4は、力が負の値で、速度が正の値を取る場合、4)急停止期であり、時定数およびゲインを小さくすることで、車両を停止させる、

という意味を持つ。

以上の要件を満たすよう、それぞれのルールに対する前件部のメンバーシップ関数は以下のように設計された。

- Rule1

$$\mu_{fx1} = \frac{\tan^{-1}\{a_{fxt1}(K_x f_x - b_{fxt1})\}}{\pi} + 0.5 \quad (5.19)$$

$$\mu_{vx1} = \exp(-c_{vxt1}(\dot{x}_v^c)^2) \quad (5.20)$$

- Rule2

$$\mu_{fx2} = \frac{\tan^{-1}\{a_{fxt2}(K_x f_x - b_{fxt2})\}}{\pi} + 0.5 \quad (5.21)$$

$$\mu_{vx2} = \frac{\tan^{-1}\{a_{vxt2}(\dot{x}_v^c - b_{vxt2})\}}{\pi} + 0.5 \quad (5.22)$$

- Rule3

$$\mu_{fx3} = \exp(-c_{vxt3}(K_x f_x)^2) \quad (5.23)$$

$$\mu_{vx3} = \frac{\tan^{-1}\{a_{vxt3}(\dot{x}_v^c - b_{vxt3})\}}{\pi} + 0.5 \quad (5.24)$$

- Rule4

$$\mu_{fx4} = \frac{\tan^{-1}\{a_{fxt4}(K_x f_x - b_{fxt4})\}}{\pi} + 0.5 \quad (5.25)$$

$$\mu_{vx4} = \frac{\tan^{-1}\{a_{vxt4}(\dot{x}_v^c - b_{vxt4})\}}{\pi} + 0.5 \quad (5.26)$$

後件部は、それぞれ時定数およびゲインの最小・最大値を与え、前件部の適合度に対して線形出力するよう設計された。メンバーシップ関数の形状を Fig.5.12 に示す。

最終的に時定数は重量平均法より導出される。なおゲインについては、ルールが一つだけなのでルール4に関する推論結果が直接出力される。

$$T_x = \frac{\sum_{i=1}^4 \mu_{fti} \mu_{vti} T_{vxi}}{\sum_{i=1}^4 \mu_{fti} \mu_{vti}} \quad (5.27)$$

操作者の熟練度を考慮したスキルアシストシステム

走行中にパラメータを変化させると、熟練の操作者にとっては逆に操作性が悪いと感じさせる要因となった。そこで、操作者の熟練度に応じて時定数の上限値を減少させ、パラメータの変化幅を調節するシステムが構築された。

熟練度の評価は、車両速度の標準偏差を用いてファジィ推論にて求められる。まず、車両速度の履歴から式(5.28)によりサンプリング毎に逐次標準偏差 σ_{vx} を求める。

$$\sigma_{vx}(t) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (\dot{x}_v^c(t-i) - \overline{\dot{x}_v^c})^2} \quad (5.28)$$

なお、データ参照数 n は、機器のサンプリング周期などに応じて変更可能であり、従来研究では、0.02[s]のサンプリング周期に対して $n = 50$ とし、データ参照時間が1[s]となるよう設定された。

操作中の標準偏差を閾値 σ_{vx0} で区切り、閾値以下であれば熟練度は高く、閾値を超えれば熟練度は低いとし、Tabel 5.6に示すファジィルールを用いて熟練度が評価された。

メンバーシップ関数は、前件部の \dot{x}_v^c に関する条件が2ルールで共通することと、 σ_{vx} については不等号が互いに逆なだけであることから、以下のように設計された。

$$\mu_{vx1} = \frac{\tan^{-1}\{a_{vxs}(\dot{x}_v^c - b_{vxs})\}}{\pi} + 0.5 \quad (5.29)$$

$$\mu_{\sigma xs1} = -\frac{\tan^{-1}\{a_{\sigma xs}(\sigma_{vx} - \sigma_{vx0})\}}{\pi} \quad (5.30)$$

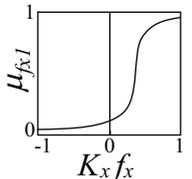
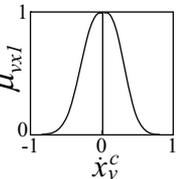
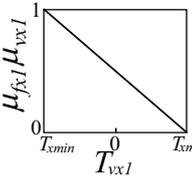
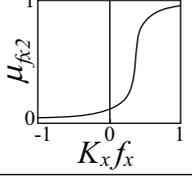
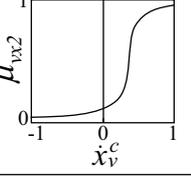
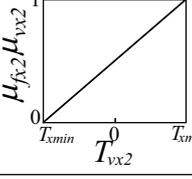
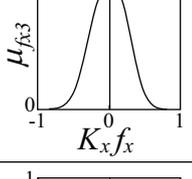
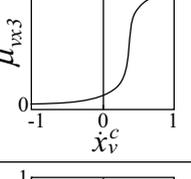
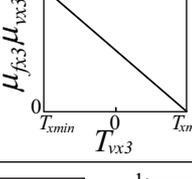
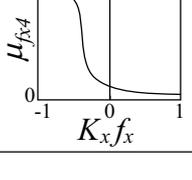
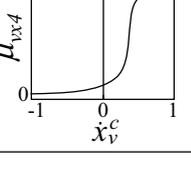
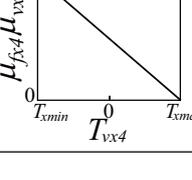
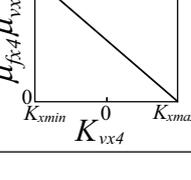
Rule	Antecedents		Consequents	
1				
2				
3				
4				

Fig. 5.12 Membership function of the running state estimation

Table 5.6 Fuzzy rules of the skill level evaluation

RN	Antecedent	Consequent
1	if ($\dot{x}_v^c > 0$ and $\sigma_{vx} < \sigma_{vx0}$),	then skill : high
2	if ($\dot{x}_v^c > 0$ and $\sigma_{vx} > \sigma_{vx0}$),	then skill : low

なお, a_{vxs} , b_{vxs} , $a_{\sigma xs}$ はメンバーシップ関数のパラメータである. 後件部は, 前件部の出力に応じて, -1 から 1 の範囲で線形出力する. メンバーシップ関数の形状を Fig. 5.13 に示す.

導出された σ_{vxs} は, 以下の式を用いて積算評価され, 最終的に熟練度評価指数 S_{vx} を算出する.

$$S_{vx(t)} = S_{vx(t-1)} + \frac{\sigma_{vxs}}{T_s} \quad (0 \leq S_{vx} \leq 1) \quad (5.31)$$

T_s は, S_{vx} の変動する早さを調節する忘却時間(更新係数)であり, この値を大きくすると変動が緩やかになり, 小さくすると変動が急激になる. S_{vx} は, 操作者の熟練度が高いほど大きくなる.

最終的に時定数の制限値 T_{vxmax} は, S_{vx} を用いて以下のように求められる.

$$T_{vxmax} = T_{xmax} - (T_{xmax} - T_{xmin})S_{vx} \quad (5.32)$$

操作者の熟練度が高ければ, T_{vxmax} は小さくなり, 最終的に T_{xmin} となる. また熟練度が低ければ, T_{vxmax} は T_{xmax} に近づき, 入力に対する応答性を減少させ, 操作の安定性を高めるように作用する.

5.4 スキルアシストシステムの改良と全方向への拡張

従来研究にて開発されたスキルアシストシステムは, 前進方向にのみ対応していた. 本節では, 全方向に拡張するための改良点と, Y_v 軸方向(真横並進動作)と θ_v 軸方向(旋回動作)に対するシステムの拡張について述べる.

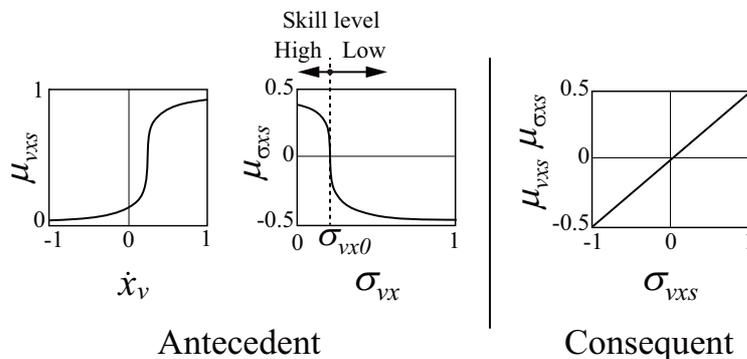


Fig. 5.13 Membership function of the skill level evaluation

Table 5.7 Improved fuzzy rules of the running state estimation

RN	Antecedent	Consequent
1	if ($f_x > 0$ and $\dot{x}_v^c > 0$),	then $T_{vx}, K_{vx} : \text{large}$
2	if ($f_x < 0$ and $\dot{x}_v^c < 0$),	then $T_{vx}, K_{vx} : \text{large}$

5.4.1 従来システムの改良

スキルアシストシステムを前後方向に拡張・実装し、実験を行うと以下の二点の問題が発覚した。

1. 操作入力ゼロになり、車両速度を減少させる過程で時定数が増加し、車両が停止するまでに時間が掛かる。
2. 操作ハンドルを強く握った状態で操作をすると車両が発振し、操作不能に陥る。

一点目の問題に関しては、ルールの設計方法に問題があることがわかった。最終的にパラメータを決定する際には重量平均法を用いられるが、操作入力と速度が共にゼロの場合に適合するルールが無く、多数を占める時定数を増加させるルールの影響で時定数が増加することがわかった。

二点目の問題に関しては、以下のようなループが見られ、発振することがわかった。

1. 操作者から力が加えられ、車両が動作し始める。
2. 強く握ることで、車両の動作とは逆方向へ力が加わる。
3. システムは急停止期と判断し、即座に停止する。
4. 1へ戻り、これを繰り返す。

これらの問題は、走行状態の推定およびパラメータ調節の部分で発生している。そこでこれら解決するために、走行状態推定およびパラメータ調節のファジィルールの改良を行った。Table 5.7に改良したファジィルールを示す。改良したファジィルールは、二つのルールから成る。ルール1・2はそれぞれ、前進定常走行期と後進定常走行期を示す。ルール1もしくはルール2の適合度が高いときは、時定数とゲインを大きくすることで、手ぶれなどの細かな入力の変化が速度入力へ反映されにくくなる。またどちらも適合しない場合には、時定数とゲインを小さくすることで、応答性を確保しながら停止を促すように作用する。メンバーシップ関数は以下のように設計した。

- Rule1

$$\mu_{fxt1} = \frac{\tan^{-1} \{a_{fxt1}(Kf_x - b_{fxt1})\}}{\pi} + 0.5 \quad (5.33)$$

$$\mu_{vxt1} = \frac{\tan^{-1} \{a_{vxt1}(\dot{x}_v^c - b_{vxt1})\}}{\pi} + 0.5 \quad (5.34)$$

- Rule2

$$\mu_{fxt2} = -\frac{\tan^{-1} \{a_{fxt2}(Kf_x - b_{fxt2})\}}{\pi} + 0.5 \quad (5.35)$$

$$\mu_{vxt2} = -\frac{\tan^{-1} \{a_{vxt2}(\dot{x}_v^c - b_{vxt2})\}}{\pi} + 0.5 \quad (5.36)$$

a_{fxt1} , b_{fxt1} , a_{vxt1} , b_{vxt1} , a_{fxt2} , b_{fxt2} , a_{vxt2} , b_{vxt2} はメンバーシップ関数のパラメータである.

後件部は従来と同様に, 時定数およびゲインの最小・最大値から前件部の適合度に対して線形出力するよう設計した.

$$T_{vxi} = T_{xmin} + \mu_{fxi}\mu_{vxi}(T_{xmax} - T_{xmin}) \quad (5.37)$$

$$K_{vxi} = K_{xmin} + \mu_{fxi}\mu_{vxi}(K_{xmax} - K_{xmin}) \quad i = 1, 2 \quad (5.38)$$

メンバーシップ関数の形状を Fig. 5.14 に示す.

最終的に時定数およびゲインは, 重量平均法により導出される.

$$T_x = \frac{\mu_{fx1}\mu_{vx1}T_{vx1} + \mu_{fx2}\mu_{vx2}T_{vx2}}{\mu_{fx1}\mu_{vx1} + \mu_{fx2}\mu_{vx2}} \quad (5.39)$$

$$K_x = \frac{\mu_{fx1}\mu_{vx1}K_{vx1} + \mu_{fx2}\mu_{vx2}K_{vx2}}{\mu_{fx1}\mu_{vx1} + \mu_{fx2}\mu_{vx2}} \quad (5.40)$$

また, 熟練度の推定についても, 従来は直進のみに対応していたため変更する必要がある. 変更は, 速度に関するルールを負の方向も対応できるようにするだけで良いため, ファジィルールを Table 5.6 から Table 5.8 のように, 式 (5.29) および (5.30) を以下のように変更する.

$$\mu_{vxs} = 1 - \exp(-c_{vxs}(\dot{x}_v^c)^2) \quad (5.41)$$

$$\mu_{\sigma xs} = -\frac{\tan^{-1}\{a_{\sigma xs}(\sigma_{vx} - \sigma_{vx0})\}}{\pi} \quad (5.42)$$

なお, c_{vxs} , $a_{\sigma xs}$ はメンバーシップ関数のパラメータである. メンバーシップ関数の形状を Fig. 5.15 に示す.

ファジィ推論の後件部の処理, および熟練度評価指数の導出は 5.3.1 節と同様である.

5.4.2 スキルアシストシステムの全方向への拡張

改良されたスキルアシストシステムを, Y_v 軸方向と θ_v 軸方向へ拡張した. X_v 軸方向の場合, 力入力 f_x と 1 次遅れコントローラ出力 \dot{x}_v^c を用いて走行状態の推定が行われていた. $Y_v \cdot \theta_v$ 軸

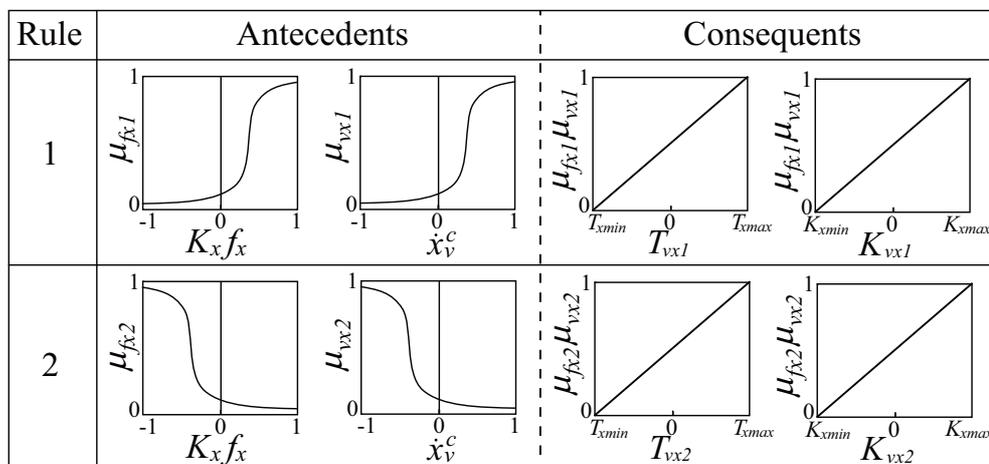


Fig. 5.14 Improved membership function of the running state estimation

Table 5.8 Improved fuzzy rules of the skill level evaluation

RN	Antecedent	Consequent
1	if ($\dot{x}_v^c \neq 0$ and $\sigma_{vx} < \sigma_{vx0}$),	then skill : high
2	if ($\dot{x}_v^c \neq 0$ and $\sigma_{vx} > \sigma_{vx0}$),	then skill : low

Table 5.9 Fuzzy rules of the running state estimation for Y axis

RN	Antecedent	Consequent
1	if ($f_y > 0$ and $\dot{y}_v^c > 0$),	then T_y, K_y : large
2	if ($f_y < 0$ and $\dot{y}_v^c < 0$),	then T_y, K_y : large

方向の場合は、操作意図推定を通して最終的な車両速度が得られるが、これを用いた場合、入力と出力の傾向が必ずしも一致しないことが考えられる。また、 $Y_v \cdot \theta_v$ 軸方向の操作意図推定両方に対して Y_v 軸方向の力入力 f_y が使用されていたことを考えると、 $Y_v \cdot \theta_v$ 軸方向両方のスキルアシストシステムに対して、 Y_v 軸方向の力入力 f_y と 1 次遅れコントローラより得られる速度 \dot{y}_v^c を用いた走行状態の推定やパラメータ調節、操作熟練度の評価が可能であると考えられる。よって、これまでに提案した X_v 軸方向に対するスキルアシストシステムの入出力を、それぞれ Y_v 軸方向と θ_v 軸方向に置き換えることで全方向への拡張を行う。

Y_v 軸方向へのスキルアシストシステムの拡張

まず、 Y_v 軸方向のファジイルールについて、Table 5.7 内の変数中の x の部分を y に置き換えることで Table 5.9 のように構築した。

また、メンバーシップ関数も同様に、式 (5.33) から (5.36) を基に、次のように設計した。

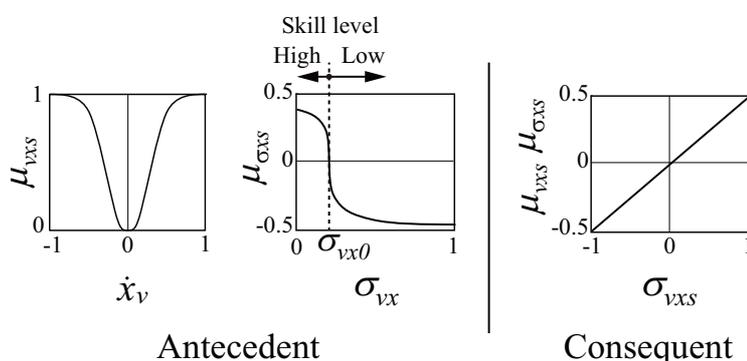


Fig. 5.15 Improved membership function of the skill level evaluation

• Rule1

$$\mu_{fyt1} = \frac{\tan^{-1}\{a_{fyt1}(Kf_y - b_{fyt1})\}}{\pi} + 0.5 \quad (5.43)$$

$$\mu_{vyt1} = \frac{\tan^{-1}\{a_{vyt1}(\dot{y}_v^c - b_{vyt1})\}}{\pi} + 0.5 \quad (5.44)$$

• Rule2

$$\mu_{fyt2} = -\frac{\tan^{-1}\{a_{fyt2}(Kf_y - b_{fyt2})\}}{\pi} + 0.5 \quad (5.45)$$

$$\mu_{vyt2} = -\frac{\tan^{-1}\{a_{vyt2}(\dot{y}_v^c - b_{vyt2})\}}{\pi} + 0.5 \quad (5.46)$$

なお, a_{fyt1} , b_{fyt1} , a_{vyt1} , b_{vyt1} , a_{fyt2} , b_{fyt2} , a_{vyt2} , b_{vyt2} は各関数のパラメータである. 後件部は従来と同様に, 時定数およびゲインの最小・最大値から前件部の適合度に対して線形出力するよう設計した. メンバシップ関数の形状は, Fig. 5.16 のようになる.

最終的に時定数およびゲインは, 重量平均法により導出される.

$$T_y = \frac{\mu_{fy1}\mu_{vy1}T_{vy1} + \mu_{fy2}\mu_{vy2}T_{vy2}}{\mu_{fy1}\mu_{vy1} + \mu_{fy2}\mu_{vy2}} \quad (5.47)$$

$$K_y = \frac{\mu_{fy1}\mu_{vy1}K_{vy1} + \mu_{fy2}\mu_{vy2}K_{vy2}}{\mu_{fy1}\mu_{vy1} + \mu_{fy2}\mu_{vy2}} \quad (5.48)$$

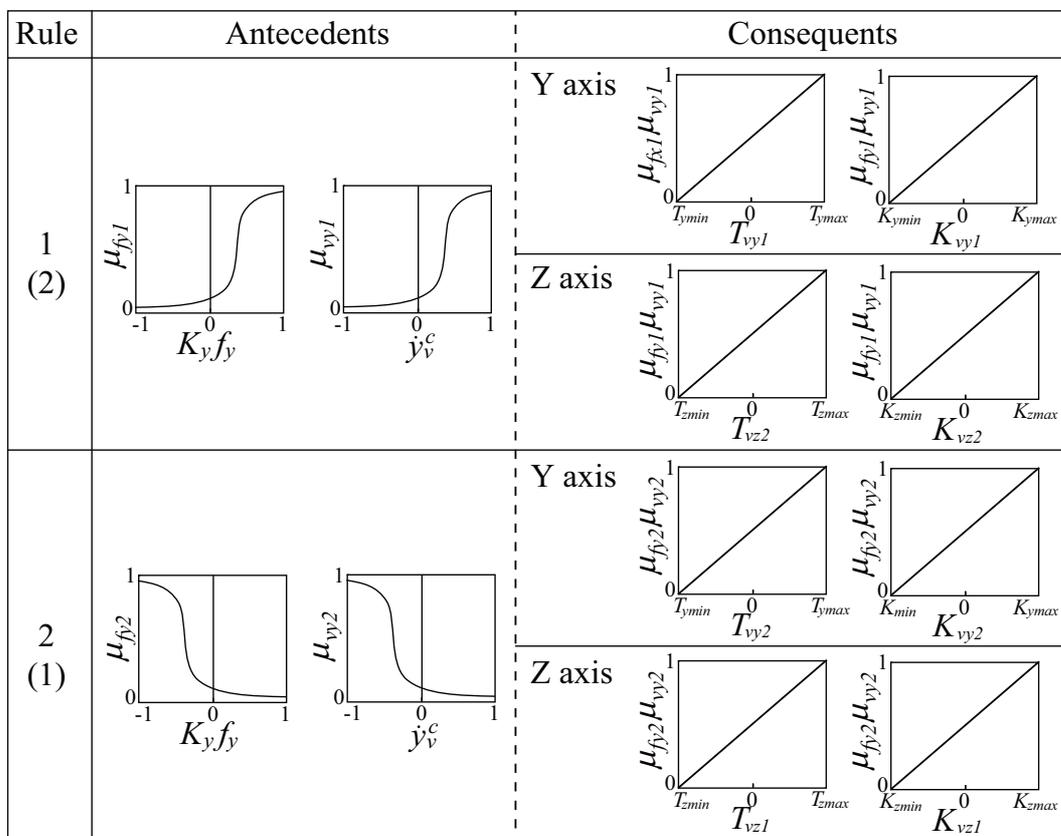


Fig. 5.16 Membership function of the running state estimation for Y and Z axis

Table 5.10 Fuzzy rules of the skill level evaluation for Y axis

RN	Antecedent	Consequent
1	if ($\dot{y}_v^c \neq 0$ and $\sigma_{vy} < \sigma_{vy0}$),	then skill : high
2	if ($\dot{y}_v^c \neq 0$ and $\sigma_{vy} > \sigma_{vy0}$),	then skill : low

Table 5.11 Fuzzy rules of the running state estimation for Z axis

RN	Antecedent	Consequent
1	if ($f_y < 0$ and $\dot{y}_v^c < 0$),	then T_z, K_z : large
2	if ($f_y > 0$ and $\dot{y}_v^c > 0$),	then T_z, K_z : large

次に、熟練度に応じた時定数最大値の調節についても同様に、ファジイルールについては Table 5.8 を基に Table 5.10 のように設計する。

以降も同様に、速度の標準偏差は、

$$\sigma_{vy} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (\dot{y}_v^c(i-n) - \overline{\dot{y}_v^c})^2} \quad (5.49)$$

メンバーシップ関数は、

$$\mu_{vys} = 1 - \exp(-c_{vys} \cdot (\dot{y}_v^c)^2) \quad (5.50)$$

$$\mu_{\sigma ys} = -\frac{\tan^{-1}\{a_{\sigma ys}(\sigma_{vy} - \sigma_{vy0})\}}{\pi} \quad (5.51)$$

熟練度評価指標は、

$$S_{vy(t)} = S_{vy(t-1)} + \frac{\sigma_{vys}}{T_s} \quad (0 \leq S_{vy} \leq 1) \quad (5.52)$$

となり、最終的に時定数の最大値は、

$$T_{vy\max} = T_{y\max} - (T_{y\max} - T_{y\min})S_{vy} \quad (5.53)$$

から得られる。

θ_v 軸方向へのスキルアシストシステムの拡張

旋回動作に対するスキルアシストシステムも、Y 軸方向と同様に構築する。注意すべき点は、前件部の入力に Y_v 軸の力と速度を使用していることである。 θ_v 軸方向の走行状態推定のファジイルールは、Table 5.11 のようになる。

表からもわかるとおり、Table 5.9 の Y_v 軸方向に対するファジイルールのルール1と2を入れ替えただけのものとなっているため、前件部の推論結果は共有することができる。後件部は、

最大・最小時定数を考慮し線形出力すればよく、最終的にZ軸方向のパラメータは以下のよう
に導出される。

$$T_z = \frac{\mu_{fy1}\mu_{vy1}T_{vz2} + \mu_{fy2}\mu_{vy2}T_{vz1}}{\mu_{fy1}\mu_{vy1} + \mu_{fy2}\mu_{vy2}} \quad (5.54)$$

$$K_z = \frac{\mu_{fy1}\mu_{vy1}K_{vz2} + \mu_{fy2}\mu_{vy2}K_{vz1}}{\mu_{fy1}\mu_{vy1} + \mu_{fy2}\mu_{vy2}} \quad (5.55)$$

メンバーシップ関数の構成および形状は、Fig. 5.16 のようになる。

なお、熟練度に応じた時定数最大値の調節については、旋回方向では大きな効果が得られな
かったため、実装していない。

Table 5.12 Fixed parameters of the 1st order lag controller

X_v axis		Y_v axis		θ_v axis	
T_x	K_x	T_y	K_y	T_z	K_z
1.1	0.030	1.1	0.028	1.2	0.25

Table 5.13 Parameters for directional reasoning

RN	Antecedent				RN	Antecedent			
	name	a	b	c		name	a	b	c
1	LS_y	7	0.4	-	4	LT_y	7	-0.05	-
	LS_θ	3	0.05	-		LT_θ	3	1	-
2	RS_y	7	-0.4	-	5	RT_y	7	0.05	-
	RS_θ	3	-0.05	-		RT_θ	3	-1	-
3	NS_y	-	-	1000	6	NT_y	-	-	1000
	NS_θ	-	-	1000		NT_θ	-	-	1000

5.4.3 検証実験

本節では、改良し拡張を行ったスキルアシストシステムを用いて行った実験について述べる。実験はOMWを用いて行い、 $X_v \cdot Y_v \cdot \theta_v$ 軸方向へ動作、およびこれらを組み合わせて行う動作(複合動作)で実施した。それぞれ、パラメータをTable 5.12の値で一定にした場合と、スキルアシストを用いた場合で比較した。

実験で用いたパラメータを、Table 5.13からTable 5.15に示す。表はそれぞれ、方向推論、走行状態推定およびパラメータ調整、熟練度推定のものである。

直進動作

直進走行の実験では、被験者二名を用いて、前方15[m]まで走行する実験を行った。その際被験者には、日常の歩行速度を意識しながら操作するよう指示を出した。スキルアシストを用いない場合と用いた場合の被験者1の結果を、Fig 5.17およびFig. 5.18に示す。また同様に被験者2の結果を、Fig 5.19およびFig. 5.20に示す。

結果より、被験者1は、スキルアシストが無い場合に車両の脈動が発生しており、熟練度は低いと判断できるが、スキルアシストを用いることで脈動を抑制できていることが確認できる。また被験者2は、スキルアシストが無い場合でも比較的脈動が少ないため熟練度は高いと判断でき、スキルアシストを用いた場合に時定数の最大値が被験者1よりも大きく減少していることがわかる。被験者2が連続して操作した場合の結果をFig. 5.21に示すが、最終的に時定数の最大値が設定した最小値まで近づいていることが確認できる。

スキルアシストを用いない場合の二名の被験者の結果を比較すると、力の加え方に大きな違

Table 5.14 Parameters for fuzzy reasoning of the running state estimation

X_v axis					
RN	Antecedent			Consequent	
	name	a	b	$T_{xmin}-T_{xmax}$	$K_{xmin}-K_{xmax}$
1	$fx1$	20	0.2	0.4-3.0	0.005-0.034
	$vx1$	20	0.2		
2	$fx2$	20	-0.2		
	$vx2$	20	-0.2		
Y_v and θ_v axis					
RN	Antecedent			Consequent	
	name	a	b	$T_{ymin}-T_{ymax}$	$K_{ymin}-K_{ymax}$
1	$fy1$	15	0.2	0.4-3.0	0.008-0.028
	$vy1$	15	0.2		
2	$fy2$	20	-0.2	$T_{zmin}-T_{zmax}$	$K_{zmin}-K_{zmax}$
	$vy2$	15	-0.2	0.4-3.7	0.09-0.23

Table 5.15 Parameters for fuzzy reasoning of the skill level evaluation

X_v axis				Y_v axis			
name	c_{vxs}	$a_{\sigma xs}$	σ_{vx0}	name	c_{vys}	$a_{\sigma ys}$	σ_{vy0}
vxs	5	-	-	vys	10	-	-
σxs	-	20	0.045	σys	-	10	0.030

$$n = 50, T_s = 250$$

いがあることがわかる。被験者1は常に力の調節幅と周期が大きい、被験者2は加速時に力を加えて以降は、細かく力を調節しながら操作していることがわかる。スキルアシストを用いた場合の力入力の結果を比較すると、二名の被験者とも、スキルアシスト無しの場合に被験者2の結果に見られた傾向の入力となっていることが確認できる。この入力の傾向を熟練者が“スキル”を発揮した結果とすれば、スキルアシストは力入力を熟練者のそれへ近づけるようアシストすることで熟練者と同様の結果を得ることが可能となるシステムであり、本実験にて実際に操作性の改善効果が得られることが実証された。

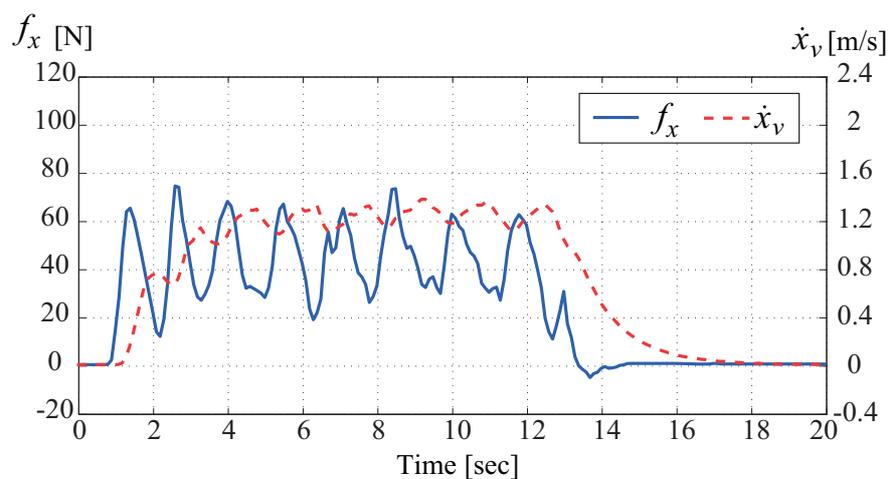
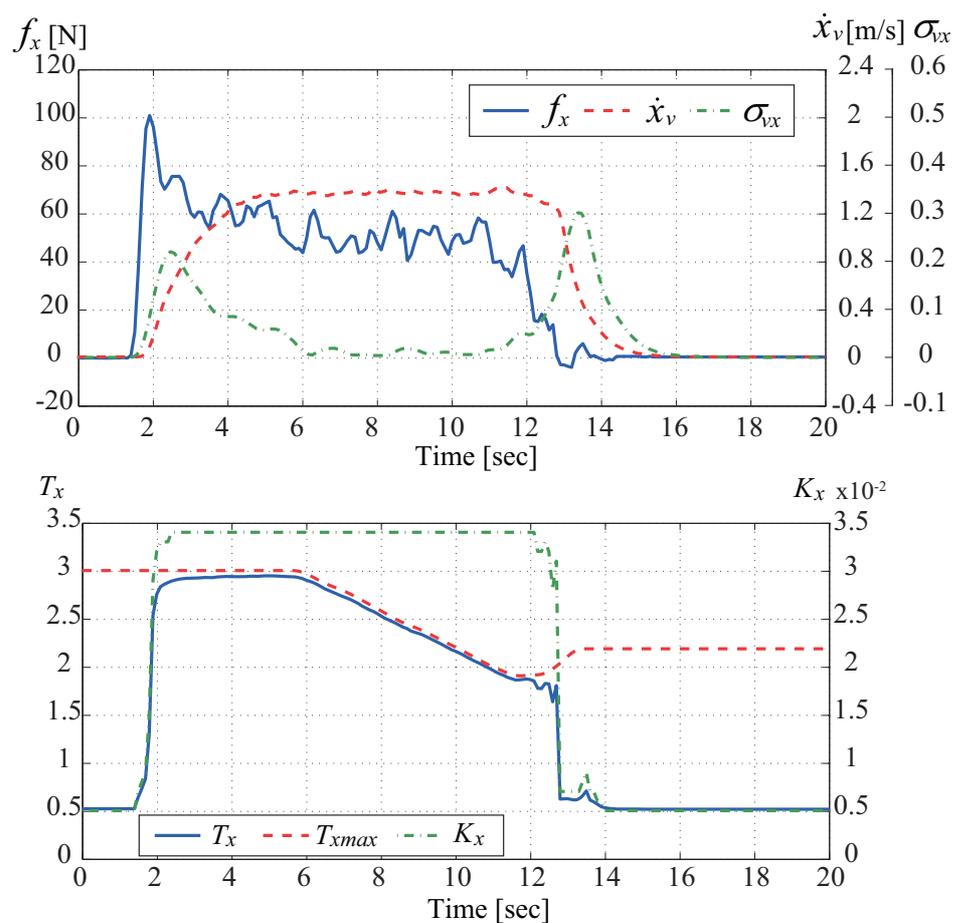


Fig. 5.17 Experimental result of the operation to X-axis of subject 1 without skill-assist system

Fig. 5.18 Experimental result of the operation to X_v -axis of subject 1 using skill-assist system

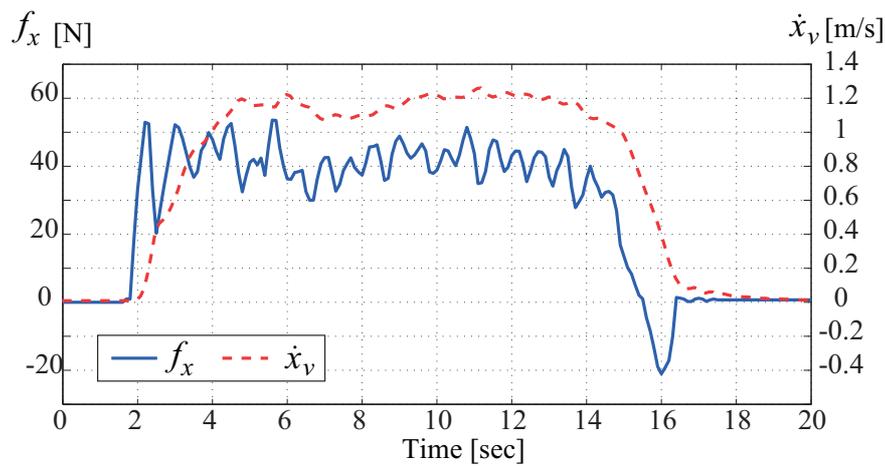


Fig. 5.19 Experimental result of the operation to X_v -axis of subject 2 without skill-assist system

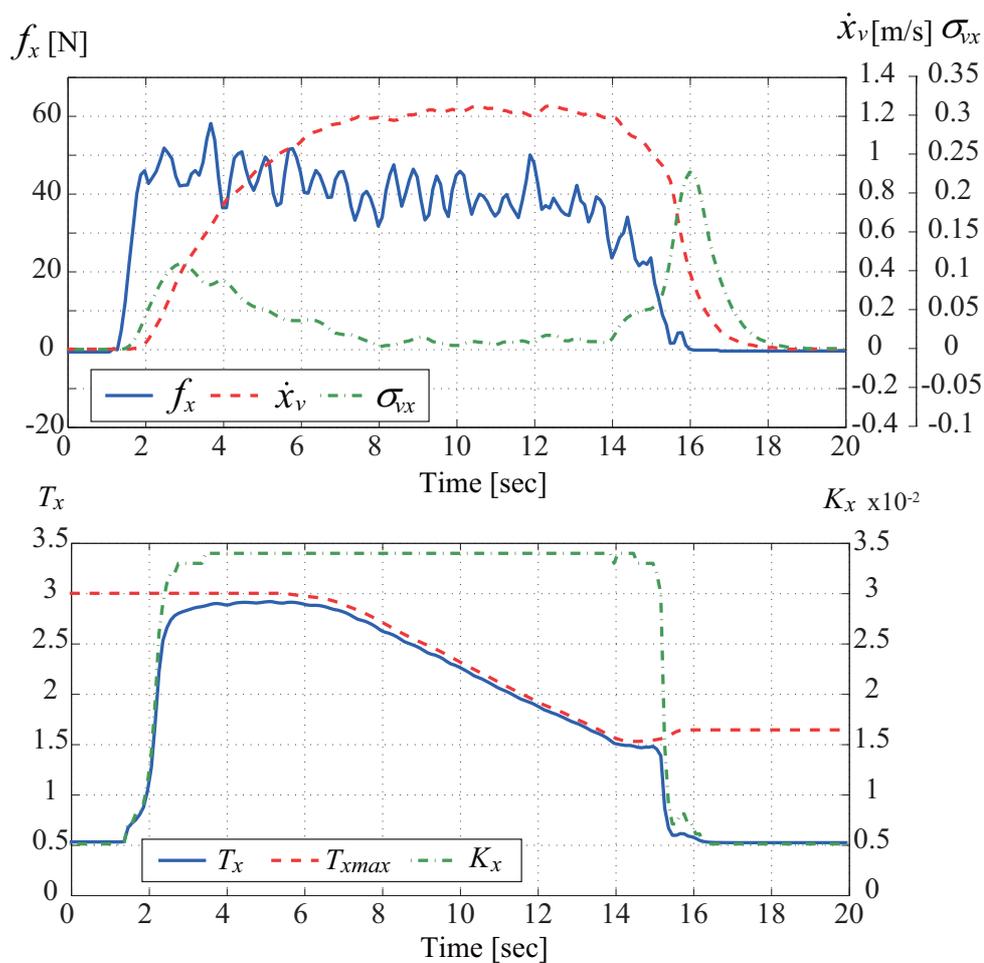


Fig. 5.20 Experimental result of the operation to X_v -axis of subject 2 using skill-assist system (first trial)

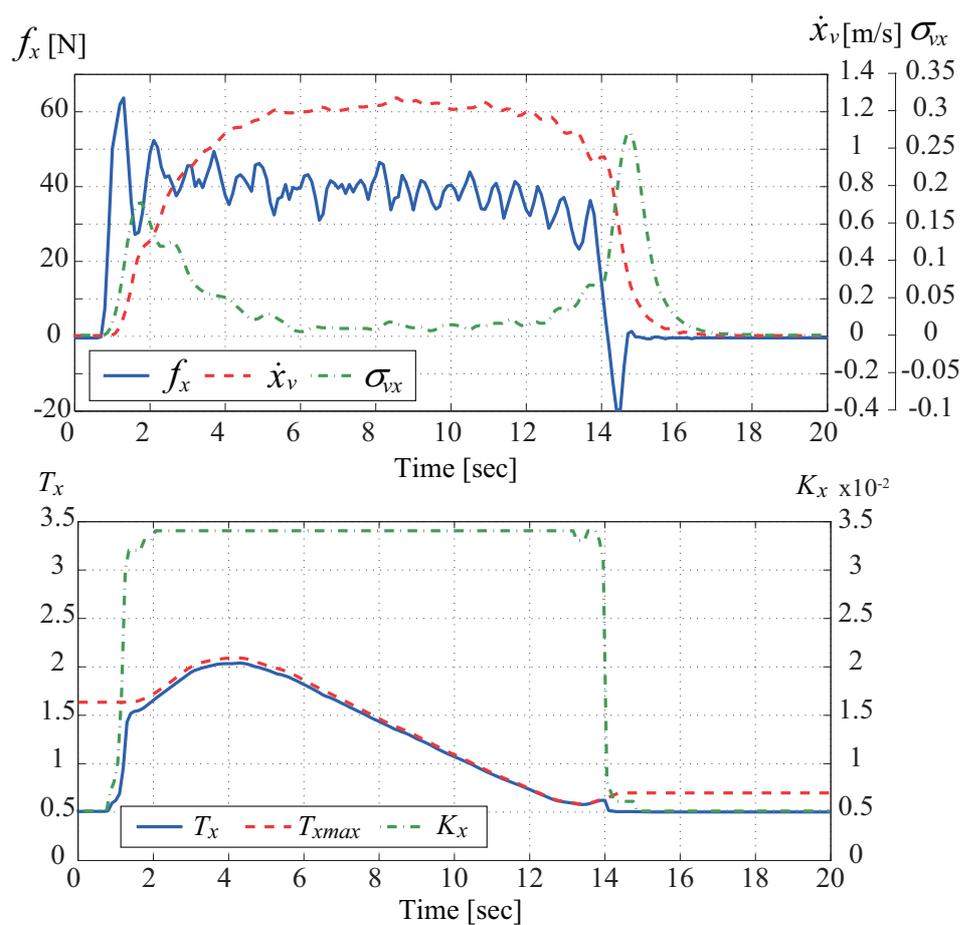


Fig. 5.21 Experimental result of the operation to X_v -axis of subject 2 using skill-assist system (second trial)

真横並進

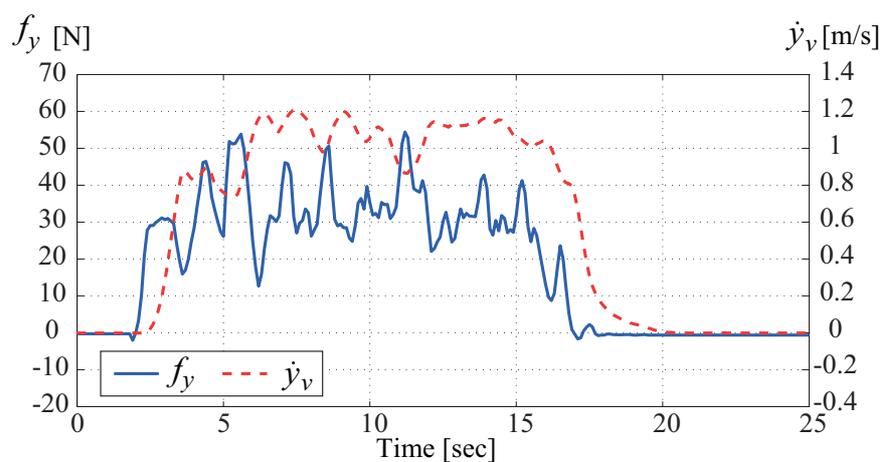
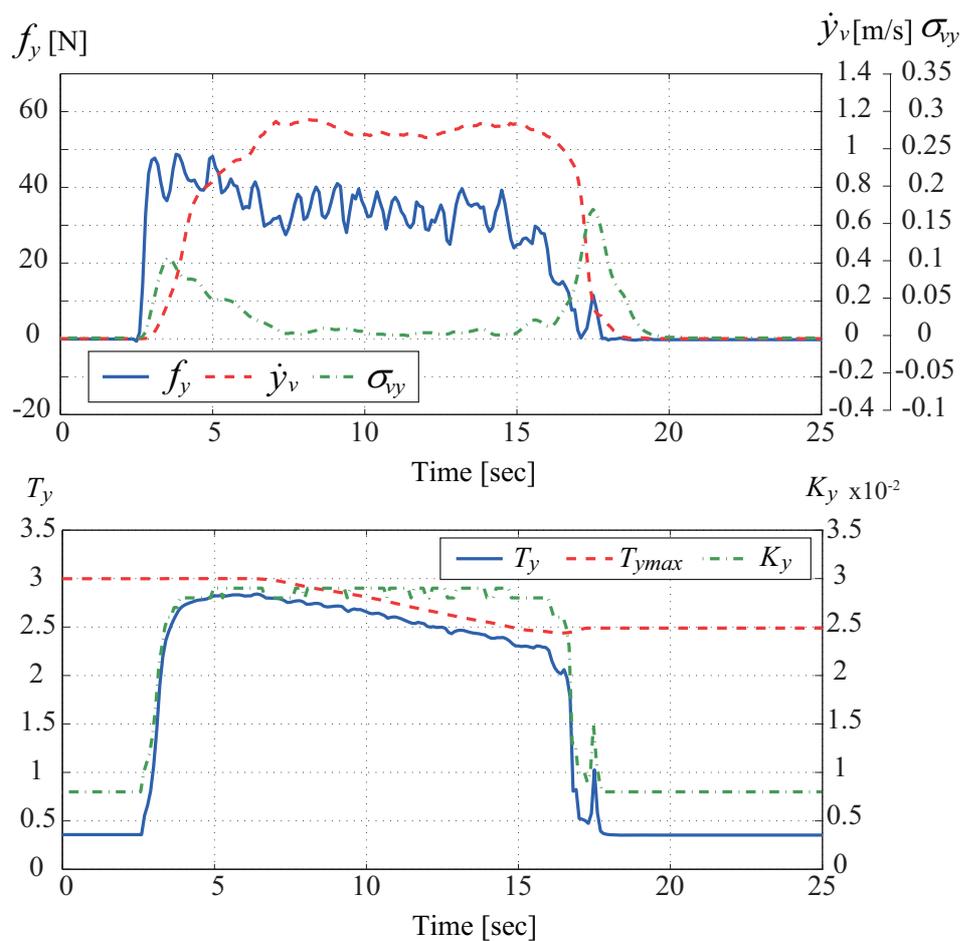
真横方向についても同様に、二名の被験者を用いて左方向へ15[m] 走行する実験を行った。被験者1のスキルアシストを用いない場合と用いた場合の結果を、Fig 5.22 および Fig. 5.23 に示す。また同様に被験者2の結果を、Fig 5.24 および Fig. 5.25 に示す。

いずれの被験者も、スキルアシストを行わない場合には車両速度に脈動が発生していたのに対し、スキルアシストを用いることで抑制できていることが確認できる。両者とも、時定数の最大値の変化はあまりなく、 Y_v 軸方向への操作熟練度が低いことが窺える。被験者2は、 X_v 軸方向への操作実験では高い熟練度を見せていたのにも関わらず Y_v 軸方向では低くなっているが、これは普段行わない横方向への移動は不慣れであるためと思われる。 Y_v 軸方向への操作についても、スキルアシストシステムにより、直進方向の実験で熟練度の高い被験者2の結果に見られたように、力入力の変動が減り、周期が短くなっていることがわかり、熟練者同様の操作が可能になっていることが確認できる。

旋回動作

旋回動作については、被験者1のみで、その場で2回転させる実験を行った。実験結果を Fig. 5.26 及び Fig. 5.27 に示す。

結果を比較すると、スキルアシストを用いない場合であっても車両速度の脈度は少なく、力入力もほぼ同じ傾向となっているため、一見旋回方向のスキルアシストの有用性は確認できない。しかし、次節にて示す複合動作の実験では、その有用性が確認できる結果が得られたため、そちらを参照願いたい。

Fig. 5.22 Experimental result of the operation to Y_v -axis of subject 1 without skill-assist systemFig. 5.23 Experimental result of the operation to Y_v -axis of subject 1 using skill-assist system

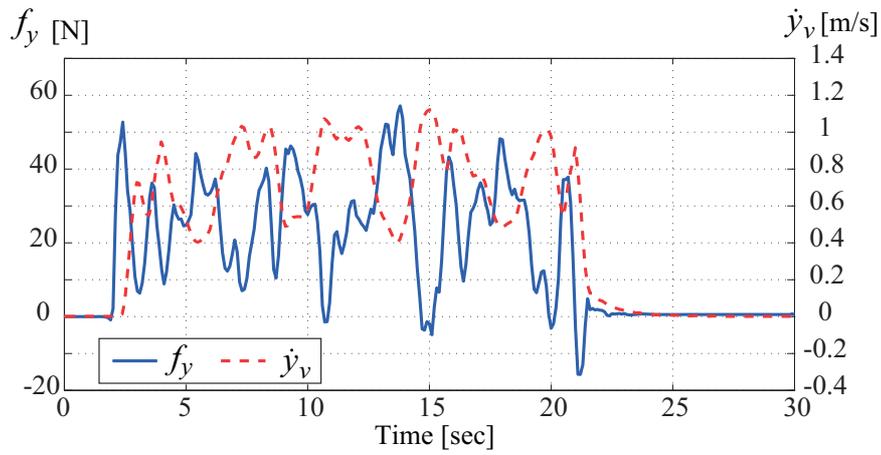


Fig. 5.24 Experimental result of the operation to Y_v -axis of subject 2 without skill-assist system

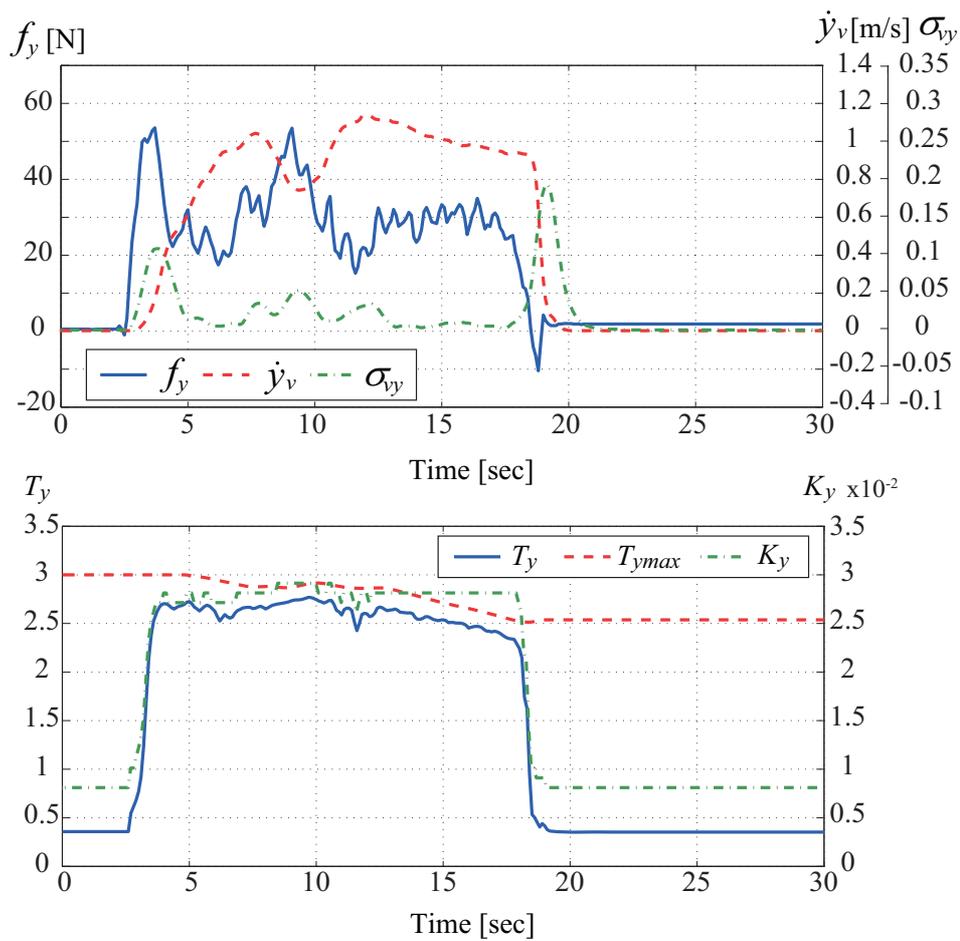
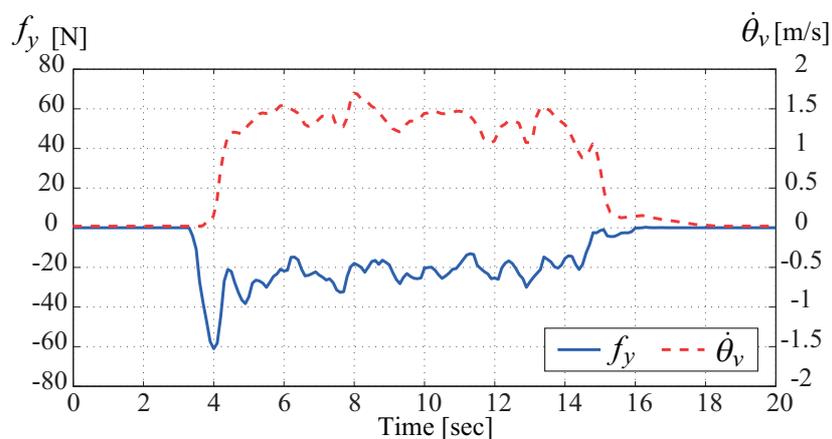
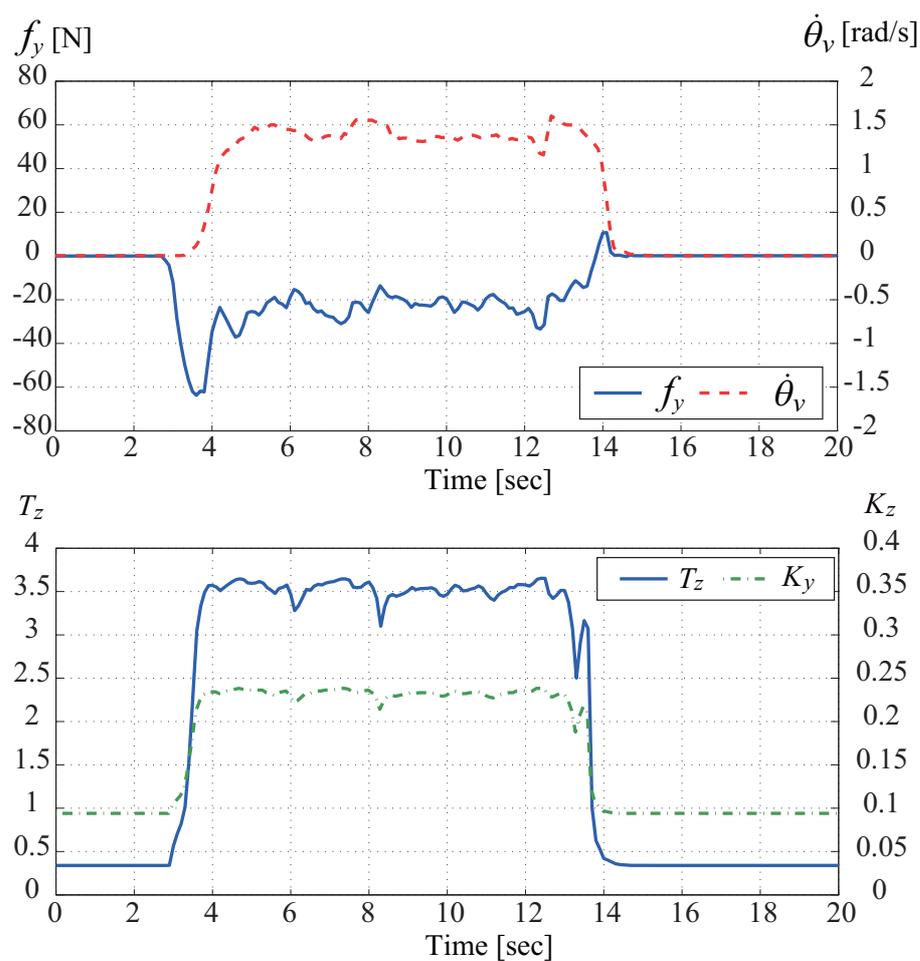


Fig. 5.25 Experimental result of the operation to Y_v -axis of subject 2 using skill-assist system

Fig. 5.26 Experimental result of the operation to θ_v -axis of subject 1 without skill-assist systemFig. 5.27 Experimental result of the operation to θ_v -axis of subject 1 using skill-assist system

複合動作におけるスキルアシストの効果について

これまで行ったスキルアシストの検証実験は、各軸で独立したものであった。そこで本節では、 X_v 軸と Y_v 軸動作を組み合わせたスラローム走行と、 Y_v 軸と θ_v 軸動作を組み合わせた旋回動作の実験を行った。

まず、スラローム走行実験について述べる。本実験は、混雑した場所で障害物を避けながら移動することを想定している。実験では、パイロンを2[m] 間隔で3本設置し、操作者はその間を縫うように車両姿勢を維持したまま移動する。実験結果を Fig. 5.28 に示す。図はそれぞれ、車両の軌道と $X_v \cdot Y_v \cdot \theta_v$ 軸の力(モーメント)および速度(角速度)、時定数およびゲインを示す。

結果より、車両動作に大きな乱れは見られず、安定した走行ができていることが確認できる。実験後に感想を聞いたところ、動作方向を切り替えるときに操作感が重たく感じたものの、一度切り替わると安定した走行ができたということであった。動作方向を切り替える時に操作感が重たくなるのは、例えば X_v 軸方向に移動している時に、 Y_v 軸方向へ移動方向を切り替えようとすると、走行状態推定の結果は「停止状態」であるため加速に大きな力が必要になるためである。

次に、 Y_v 軸と θ_v 軸動作を組み合わせた旋回動作の実験について述べる。実験内容は、車両前方にパイロンを配置し、常に車両先端をパイロンに向けたまま反時計方向に1周するというものである。二名の被験者を用いて行った実験結果を、被験者ごとにそれぞれ Fig. 5.29 および Fig. 5.30 に示す。図はそれぞれ、車両の軌道と $X_v \cdot Y_v \cdot \theta_v$ 軸の力(モーメント)および速度(角速度)を示す。

車両軌道の結果を見ると、どちらの被験者もスキルアシストを用いた場合の方が安定しており、操作時間も短くなっていることが確認できる。また、従来手法の結果に注目すると、本来使用しないはずの X_v 軸方向への操作が比較的大きく発生していることから、操作の意図を十分に反映できておらず操作性の悪化や、それに伴う操作時間の延長が発生していることがわかる。また、前節にて示した θ_v 軸方向の操作実験では、スキルアシストシステムによる操作性の大幅な改善は見られないという結果が得られたが、本実験では、スキルアシストを用いることで旋回速度の脈動を、用いない場合に比べて軽減することに成功しており、これが操作性の改善に繋がっていることが確認できる。

以上より、提案する全方向に対するスキルアシストシステムは、各軸の独立した動作のみならず、複合的な動作を行った場合でも有効であることが実証された。

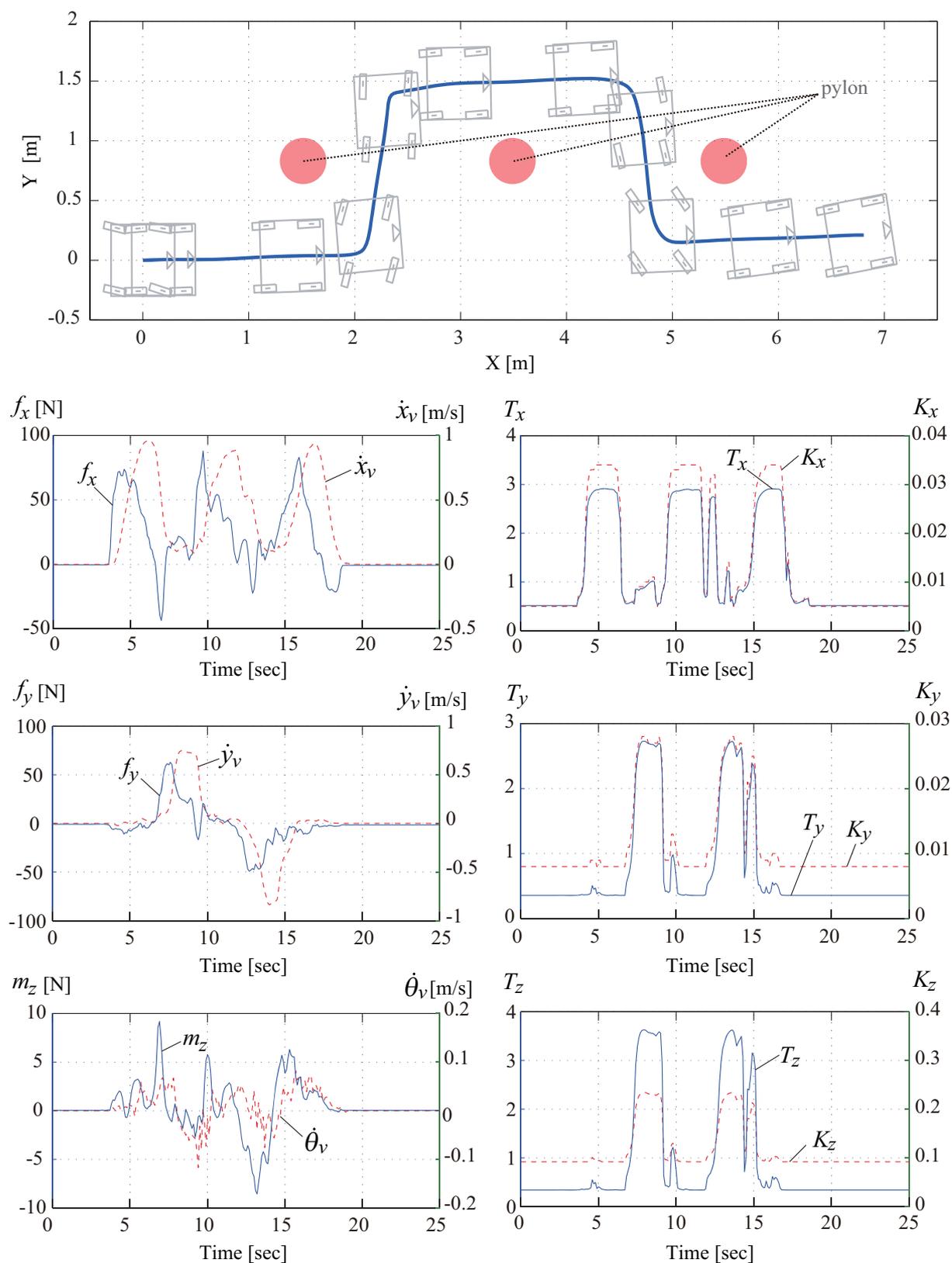


Fig. 5.28 Experimental result of slalom run

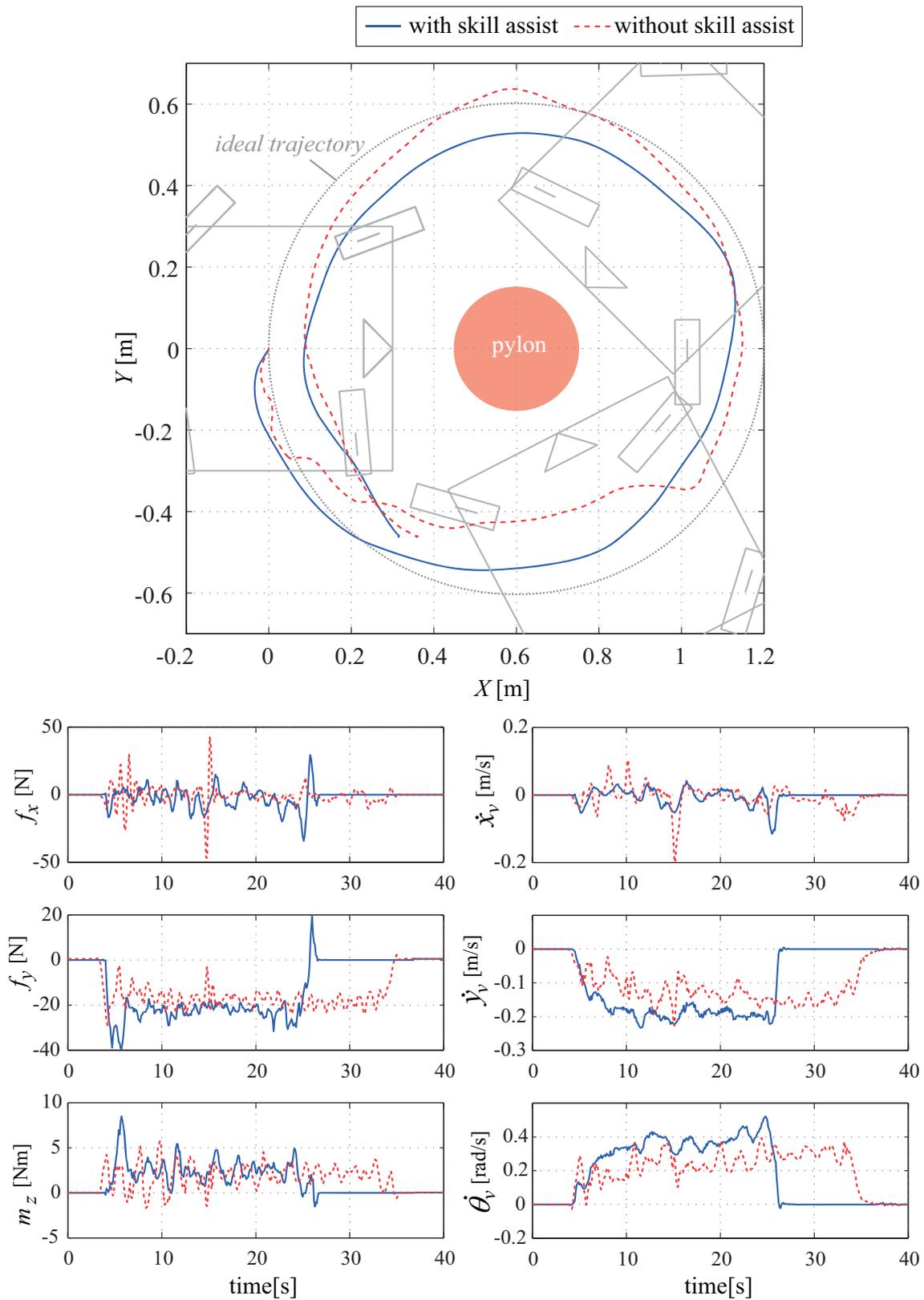


Fig. 5.29 Epicyclic motion of subject 1

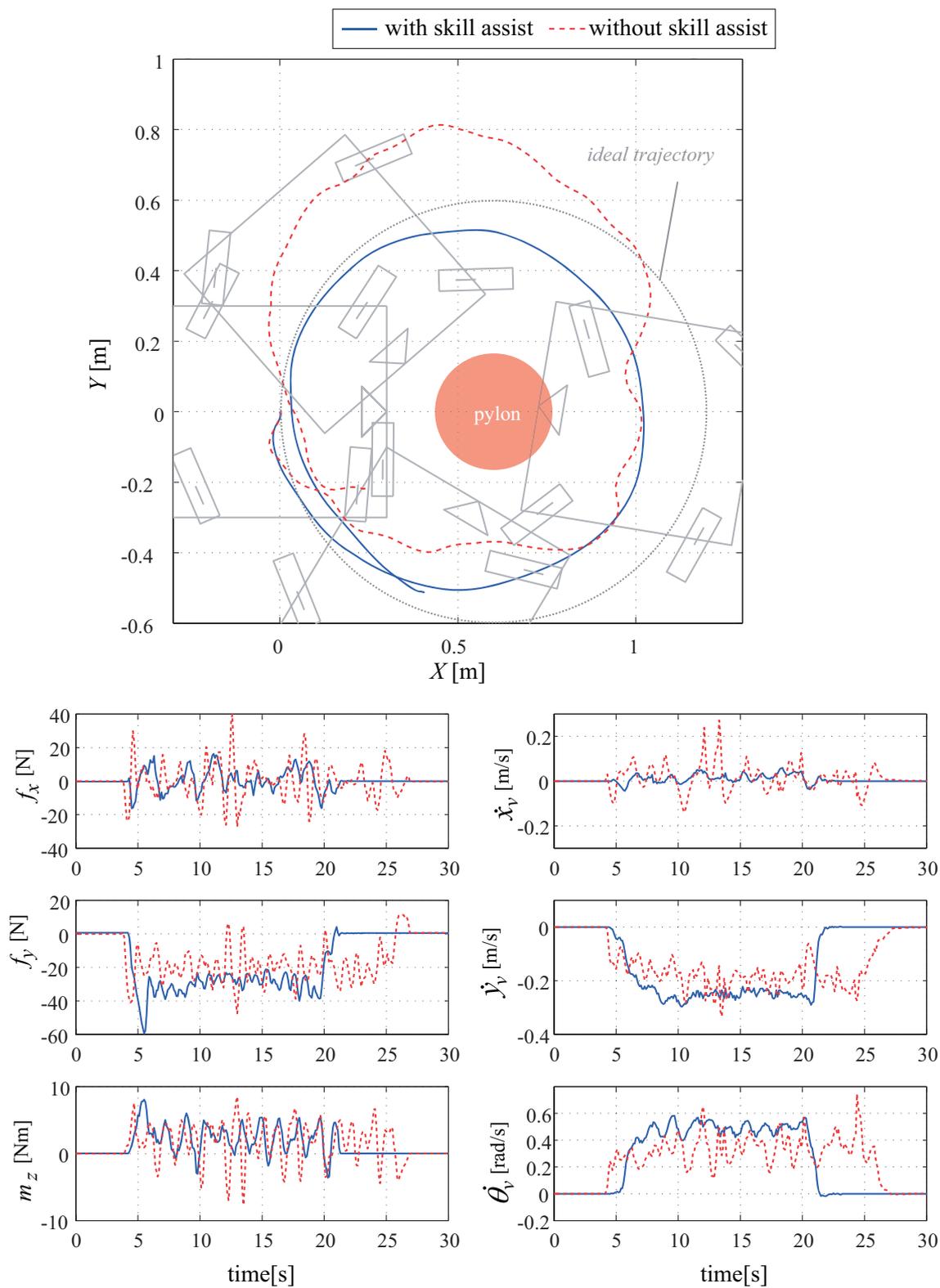


Fig. 5.30 Epicyclic motion of subject 2

第6章 結言

6.1 結論

本研究では、差動駆動操舵機構 (DDSS) とそれを応用した機器や操作支援システムの開発を行う中で、以下の結果が得られた。

1. 平歯車型差動歯車機構を応用したキャスト型機構である差動駆動操舵機構 (DDSS) を提案した。
2. DDSS の運動学モデルやトルクモデルの導出や、それらを用いた設計手法の導出と機構出力解析を行った。
3. 遊星歯車型 DDSS と比較することにより、本研究にて開発した平歯車型 DDSS の有効性を証明した。
4. DDSS の応用機器として、全方向移動車いす (OMW)、全方向移動ベッド (OMB)、3 輪全方向移動プラットフォーム (3D-OMP) を開発した。
5. 車輪数を n とした一般化車両運動学モデル、および疑似逆行列を用いた逆運動学モデルを導出した。
6. 旋回時に操舵トルクが上昇するという実験結果をもとに、力学解析による原因解明と、車輪に生じる横力の原理を応用した車両モデルの導出をし、実験結果から本手法の有効性を確認した。
7. 全方向移動パワーアシストシステムを OMW および OMB に実装し、操作性の検証実験および機器によるパラメータ傾向の基礎的な分析を行った。
8. 従来研究にて開発されたスキルアシストシステムを改良し、全方向への拡張した。また前後・左右・旋回のみでなく複合動作の実験にて、スキルアシストにより得られる効果を検証した。

1) で提案した平歯車型 DDSS は 2) で行った解析の結果、適切に設計することで従来のキャスト駆動輪に比べ前後・左右方向の出力を二台のモータで 50% ずつ負担すれば良いことがわかった。また 45 度方向の出力時に関しては片方のモータに負担が集中するものの、発生は過渡期のみであり定常期には前方向への出力のみになる。従来のキャスト駆動輪は前方向へ出力する場合は一台のモータのみ駆動するが、DDSS は二台のモータを使用するため、運用率が改善できることが確認できた。さらに 3) の遊星歯車型 DDSS と平歯車型 DDSS の比較では、遊星歯車型の場合は機構の特性上サンギヤとリングギヤの歯数を等しくできないため、二台のモータに負荷を等分配できないが、平歯型は二台のモータへ負荷を等分配可能であることが確認できた。

4) で開発した三種類の機器は 5) にて導出した運動学モデルおよび逆運動学モデルにより、制御可能であることが確認でき、OMW については、従来オムニホイールを使用した場合に実現できなかった段差乗り越えが、70[mm] 程度まで可能であることもわかった。また DDSS の場

合、オムニホイールのように振動や騒音が発生することなく滑らかな移動が可能であることが確認できた。

6)にて取り上げた旋回時の操舵トルクの上昇問題は、運動学モデルにて操舵角速度に対する車輪速度を操舵軸の旋回軌道の接線方向へ出力させるよう導出されていたため生じていたことが明らかとなり、DDSSのみでなく操舵軸と車輪接地点との間にオフセットの存在するすべてのキャスト型機構で生じる問題であることが分かった。また本現象は、タイヤ工学におけるスリップ角と横力の関係と一致することがわかり、スリップ角をゼロにすることで操舵トルクを抑制可能であることがわかった。スリップ角をゼロにする運動学モデルを導出し、実験を行った結果から、提案手法は従来の制御手法に比べ反時計方向の場合に35.2%、時計方向の場合に32.6%出力を低減可能であることが確認できた。このときの操舵トルクは直進時のようにゼロになることを期待していたが、実際にはそうならず、わずかに操舵トルクが発生することがわかった。追加で行った実験では、操舵角度を強制的にずらすと操舵トルクをゼロにできる点が存在することがわかった。さらに、いくつかの異なる旋回角速度で行った実験では、操舵トルクに有意差が見られず、遠心力は操舵トルクに影響しないことがわかった。そして最後に、異なる路面で実験を行った結果、それぞれ異なる結果が得られ、本現象は路面抵抗の影響によるものであることがわかった。

最後に操作支援システムに関しては、7)で従来研究にて開発された全方向移動パワーアシストシステムをOMWおよびOMBに実装し、操作性の検証やパラメータの比較実験を行った。操作性の検証では従来研究と同様に、ファジィ推論による操作意図推定により操作性の改善が可能であることが確認できた。またパラメータの比較結果から、OMBのパラメータはOMWのものに比べ、反応が鈍くなるように(OMWよりも大きな操作力を必要とする)調節されることが分かり、機器に対して抱く重量感が大きいほどそのようなパラメータの傾向になることが推測された。さらに8)のスキルアシストシステムでは、従来研究では前後方向のみに対応していたものを、改良・拡張することで全方向に対応させることに成功した。また検証実験から前後・左右については、スキルアシストを用いることで操作性の大幅な改善が見られるものの、旋回動作については大きな違いが現れないことがわかった。しかし横方向移動と旋回移動を複合的に行う場合には改善効果が大きく見られ、全方向への拡張の重要性が確認できた。

6.2 残された課題と今後の展望

本稿では新たな全方向移動機構と応用機器の開発、および操作支援システムとしてのパワーアシスト・スキルアシストシステムについて議論を行ってきた。それぞれの内容に関して次のような課題や今後の展望が挙げられる。

まず全方向移動機構については駆動システムの有する冗長性の課題が挙げられる。全方向移動を実現するために最低で二輪必要な構成上、モータ数は四台以上となるため冗長性は回避できず、車輪の増加と共に増加してしまう。冗長性の増加は使用するモータ数の増加を引き起こし、コストの上昇に繋がるため、冗長性を回避できる機構や構造の開発も今後重要になると考える。また実用的な課題として、機構の設計手法の確立が挙げられる。本研究にて開発した機

構は、車いすやベッドなどに対して試験的に開発されたものであり、サイズや要求仕様の異なる機器へ応用する際には、再度設計する必要がある。しかしながら機構の、特に差動歯車機構部の要素部品に掛かる負荷等の解析が不十分であるため、要求仕様に対する明確な設計指標が無いのが現状である。

また全方向移動機構の今後の展望として、平歯車型差動歯車機構の応用が挙げられる。現在までの研究で差動歯車機構を応用したもののほとんどは、傘歯車や遊星歯車機構を用いたものであった^{[30][31][108]~[111]}。本研究にて応用した平歯車型差動歯車機構はそれらの機構に対して、負荷を等分配できるという特徴を持つため、これを活用した高効率な構造の開発も期待できる。また全方向移動機構の原理は移動機構だけでなく、水上移動機構や全方向移動歯車などの開発の例もある^{[127][128]}。DDSSについても平歯車型機構だけに捕らわれず、差動歯車機構を活用した機器や要素の開発も今後重要になると考える。さらに今後のサービスロボットの発展のためには、様々な要素を組み合わせる幅広い用途に対応できることが重要となり、そのためにはオープン構造のロボット要素が必要になる^[129]。現在市販されている全方向移動機構はオムニホイールやメカナムホイールだけである。DDSSについても要素化し容易に様々な機器へ応用可能になれば、DDSSの特徴を活かした機器の実現が望めるものと考えられる。

次に操作支援システムについては更なる操作性改善による安全性の向上が挙げられる。サービスロボットにおいて安全性は第一に考えられるべき事項である。特に医療福祉系のロボットについては使用者だけでなく、患者や要介護者などにも危害が加わる可能性がある。介護施設でのヒアリングでは、介護士などの機器を使用してサービスを提供する側の人びとは自身に対する被害よりも介護等の対象者に対する被害に対しては非常に敏感であることがわかった。使用に対して少しでも恐怖を感じると、要介護者に対する安全性が保障できなくなり、使用されなくなるケースもある。当然ながら本質的な安全性は必要であるが、それに加え、制御的にも安定なシステムであることが重要である。本研究で提案したスキルアシストシステムは、不慣れた操作者であっても安定した操作を可能とした。しかしながら必ずしもすべての操作者に対して有効ではなく、車体が激しく振動し危険を感じる例もあった。この問題の解決には操作者(人)の特性を探求し、人の状態の観測や行動予測などにより得られる情報を用いて系を能動的に安定化することが有効であると考えられる。しかしながら人を含む系は複雑で、実験ごとに再現性が得られないなどの難しさがあることなどから、全ての現象を包含するモデルを構築することは困難である。だが条件を絞れば、Tsujiらが人の特性をバネ・マス・ダンパ系で表現しシステム同定手法により特性を求めたように^{[130][131]}、或いはUnoらが人は無意識のうちに手先の動作が躍度最小になっていることを明らかにしたように^[132]、人の特性や行動パターンを同定することは可能である。またこれらから得られた知見を制御則に生かすことで、人と調和が可能な制御系の構築に関する研究も積極的に行われている^{[133]~[136]}。本研究にて取り扱った移動ロボットの操作支援システムに話を戻すと、これらの研究との違いは、人が立ち止まっているかもしくは運動(歩行)をしているかにある。車いすやベッドを操作するときは操作者も同時に移動するため、歩行の影響は少なからず現れる。歩行と操作特性の変化の結びつきについて述べられた研究はこれまでに無く、これが明らかになれば歩行周期の同定などを行うことで操作性の改善が可能になると考える。

DDSS と操作支援システムを活用した機器は、様々な機器への応用が期待できる。これらの技術は既に病院内での回診作業支援ロボット「Terapio(セラピオ)」にも応用されている^[137]。今後様々な分野(機器)への応用を通して得られる知見を集約し、それぞれの要素技術の更なる発展を目指すことで、迫り来る高齢化社会の問題に対する解決策の一つになることが期待できる。

参考文献

- [1] 国立社会保障・人口問題研究所：日本の将来推計人口 (2012).
- [2] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, Population Estimates and Projection Section, : World Population Prospects: The 2012 Revision (2012).
- [3] 経済産業省：ロボット産業の市場動向 (2012).
- [4] 経済産業省：技術戦略マップ ロボット分野 (2010).
- [5] Shibata, T.: Therapeutic Seal Robot as Biofeedback Medical Device: Qualitative and Quantitative Evaluations of Robot Therapy in Dementia Care, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 100, No. 8, pp. 2527–2538 (2012).
- [6] Kato, S., Ohshiro, S., Itoh, H. and Kimura, K.: Development of a communication robot Ifbot, in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 1, pp. 697–702 (2004).
- [7] Murai, R., Sakai, T., Kawano, H., Matsukawa, Y., Kitano, Y., Honda, Y. and Campbell, K.: A novel visible light communication system for enhanced control of autonomous delivery robots in a hospital, in *IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*, pp. 510–516 (2012).
- [8] 総合警備保障株式会社 巡回警備ロボット Reborg-Q
: <http://www.alsok.co.jp/corporate/robot/reborg-q.html>.
- [9] Suzuki, K., Mito, G., Kawamoto, H., Hasegawa, Y. and Sankai, Y.: Intention-Based Walking Support for Paraplegia Patients with Robot Suit HAL, *Advanced Robotics*, Vol. 21, No. 12, pp. 1441–1469 (2007).
- [10] 佐藤裕, 何佳欧, 小林寛征, 村松慶紀, 橋本卓弥, 小林宏：腰補助用マッスルスーツの開発と定量的評価, 日本機械学会論文集C編, Vol. 78, No. 792, pp. 2987–2999 (2012).
- [11] Imamura, Y., Tanaka, T., Suzuki, Y., Takizawa, K. and Yamanaka, M.: Motion-Based-Design of Elastic Material for Passive Assistive Device using Musculoskeletal Model, *Journal of Robotics and Mechatronics(JRM)*, Vol. 23, No. 6, pp. 978–990 (2011).
- [12] Segway Inc., : <http://www.segway.com/>.

- [13] 山岡正明: パーソナルモビリティロボット, 日本ロボット学会誌, Vol. 26, No. 8, pp. 885–886 (2008).
- [14] Sakagami, Y., Watanabe, R., Aoyama, C., Matsunaga, S., Higaki, N. and Fujimura, K.: The intelligent ASIMO: system overview and integration, in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol. 3, pp. 2478–2483 (2002).
- [15] Iwata, H. and Sugano, S.: Design of human symbiotic robot TWENDY-ONE, in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 580–586 (2009).
- [16] 内閣府: 新たな成長戦略 ①「日本再興戦略-JAPAN is BACK-」 ① (2013).
- [17] 経済産業省: ロボット技術の介護利用における重点分野 (2012 (2014 改訂)).
- [18] 富岡公子, 樋口由美, 眞藤英恵: 福祉用具の有効性に関する介護作業負担の比較研究—福祉用具使用の有無作業姿勢の適正—, 産業衛生学会誌, Vol. 49, No. 4, pp. 113–121 (2007).
- [19] 富岡公子, 栄健一郎, 保田淳子: 移乗介助におけるリフトの腰部負担軽減の効果介護者の介助技術の習得度を考慮した有効性の検証, 産業衛生学会誌, Vol. 50, No. 4, pp. 103–110 (2008).
- [20] 岩切一幸, 高橋正也, 外山みどり, 平田衛, 久永直見: 高齢者介護施設における介護機器の使用状況とその問題点, 産業衛生学会誌, Vol. 49, No. 1, pp. 12–20 (2007).
- [21] 富岡公子, 熊谷信二, 小坂博, 吉田仁田淵武夫, 小坂淳子, 新井康友: 特別養護老人ホームにおける介護機器導入の現状に関する調査報告—大阪府内の新設施設の訪問調査から—, 産業衛生学会誌, Vol. 48, No. 2, pp. 49–55 (2006).
- [22] 厚生労働省: 介護・福祉ロボット開発・普及支援プロジェクト検討会 (2010).
- [23] 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構: 生活支援ロボット実用化プロジェクト (2009).
- [24] 山下淳, 浅間一, 新井民夫, 太田順, 金子透: ロボットの移動機構に関する研究動向, 日本ロボット学会誌, Vol. 21, No. 3, pp. 282–292 (2003).
- [25] 和田正義: 全方向移動ロボットの研究開発動向, システム/制御/情報: システム制御情報学会誌, Vol. 47, No. 9, pp. 439–444 (2003).
- [26] 藤沢正一郎, 大久保慶治, 師玉康成, 山浦弘夫: 四輪独立駆動型全方向移動ロボットの運動学と走行特性, 日本機械学会論文集. C編, Vol. 62, No. 604, pp. 4573–4579 (1996).
- [27] Paromtchik, I., Asama, H., Fujii, T. and Endo, I.: A control system for an omnidirectional mobile robot, in *IEEE International Conference on Control Applications*, Vol. 2, pp. 1123–1128 (1999).

- [28] Dickerson, S. and Lapin, B.: Control of an omni-directional robotic vehicle with Mecanum wheels, in *National Telesystems Conference*, pp. 323–328 (1991).
- [29] Salih, J. E. M., Rizon, M., Yaacob, S., Adom, A. H. and Mamat, M. R.: Designing Omni-Directional Mobile Robot with Mecanum Wheel, pp. 323–328 (2006).
- [30] Mukai, T., Hirano, S., Yoshida, M., Nakashima, H., Kato, Y., Sakaida, Y., Guo, S. and Hosoe, S.: Generation of Human Care Behaviors by Human-Interactive Robot RI-MAN, in *International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3128–3129 (2007).
- [31] Mukai, T., Hirano, S., Yoshida, M., Nakashima, H., Kato, Y., Sakaida, Y., Guo, S. and Hosoe, S.: Development of a Nursing-Care Assistant Robot RIBA That Can Lift a Human in Its Arms, in *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 5996–6001 (2010).
- [32] 久米洋平, 川上日出夫: 自立した生活を支援できるロボティックベッドの制御技術, *Panasonic technical journal*, Vol. 56, No. 3, pp. 176–178 (2010).
- [33] Kume, Y., Shimoda, T., Ohta, A., Tsukada, S., Kawakami, H., Nakamura, M., Suzurikawa, J. and Inoue, T.: Development of Transfer Assist Robot System Supporting Self-Reliant Life, No. 2, pp. 417–424 (2013).
- [34] Chugo, D., Kawabata, K., Kaetsu, H., Asama, H. and Mishima, T.: Development of omnidirectional vehicle with step-climbing ability, in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 3, pp. 3849–3854 (2003).
- [35] 多田隈建二郎, 多田隈理一郎, 広瀬茂男: 球状全方向車輪 “Omni-Ball” の開発, *ロボティクスシンポジウム予稿集*, 第13巻, pp. 105–112 (2008).
- [36] 小森雅晴, 松田吉平, 大橋啓生: 全方向駆動車輪の開発, 第12回公益社団法人計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2011) 論文集, pp. 362–363 (2011).
- [37] 広瀬茂男: 大荷重高効率全方向移動車両の開発, *日本機械学会ロボットメカトロニクス講演会*, pp. 350–355 (1993).
- [38] Tadakuma, K., Ming, A., Shimojo, M., Yoshida, K., Nagatani, K., Yoshida, K. and Iagnemma, K.: Basic running test of the cylindrical tracked vehicle with sideways mobility, in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2009. IROS 2009.*, pp. 1679–1684 (2009).
- [39] West, M. and Asada, H.: Design of Ball Wheel Mechanism for Omnidirectional Vehicles with Full Mobility and Invariant Kinematics, *Journal of Mechanical Design*, Vol. 119, pp. 153–161 (1997).

- [40] Ferriere, L., Raucent, B. and Samin, J. C.: ROLLMOBS, a new omnimobile robot, in *Intelligent Robots and Systems, 1997. IROS '97., Proceedings of the 1997 IEEE/RSJ International Conference on*, Vol. 2, pp. 913–918 (1997).
- [41] Ball, D., Lehnert, C. and Wyeth, G.: A practical implementation of a continuous isotropic spherical omnidirectional drive, in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 3775–3780 (2010).
- [42] Ishida, S. and Miyamoto, H.: Ball wheel drive mechanism for holonomic omnidirectional vehicle, in *World Automation Congress (WAC)*, pp. 1–6 (2010).
- [43] Wada, M. and Mori, S.: Modeling and control of a new type of omnidirectional holonomic vehicle, in *International Workshop on Advanced Motion Control*, Vol. 1, pp. 265–270 (1996).
- [44] 和田正義, 森俊二: ホロノミック全方向移動ロボットの開発, 日本ロボット学会誌, Vol. 15, No. 8, pp. 43–50 (1997).
- [45] Holmberg, R. and Khatib, O.: Development of a Holonomic Mobile Robot for Mobile Manipulation Tasks, Vol. 19, No. 11, pp. 1066–1074 (2000).
- [46] Inoue, Y., Hirama, T. and Wada, M.: Design of omnidirectional mobile robots with ACROBAT wheel mechanisms, in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 4852–4859 (2013).
- [47] Asama, H., Sato, M., Bogoni, L., Kaetsu, H., Mitsumoto, A. and Endo, I.: Development of an omni-directional mobile robot with 3 DOF decoupling drive mechanism, in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Vol. 2, pp. 1925–1930 (1995).
- [48] 和田正義: 同期キャスト駆動機構によるホロノミック全方向移動ロボットの設計と運動解析, 日本ロボット学会誌, Vol. 19, No. 6, pp. 784–792 (2001).
- [49] Wada, M.: Holonomic and omnidirectional wheelchairs with synchronized 4WD mechanism, in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS)*, pp. 1196–1202 (2007).
- [50] Borgolte, U., Hoyer, H., Buhler, C. and Heck, H.: Architectural Concepts of a Semi-autonomous Wheelchair, *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, Vol. 22, pp. 233–253 (1998).
- [51] Wada, M. and Asada, H.: Design and control of a variable footprint mechanism for holonomic omnidirectional vehicles and its application to wheelchairs, *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, Vol. 15, No. 6, pp. 978–989 (1999).

- [52] Hirata, Y., Baba, T. and Kosuge, K.: Motion control of omni-directional type walking support system "Walking Helper", in *The 12th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication*, pp. 85–90 (2003).
- [53] Jiang, Y. and Wang, S.: Directional intention identification for running control of an omni-directional walker, in *IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ)*, pp. 1–8 (2010).
- [54] C. Zhu M. Oda, T. N. S. S., M. Yoshioka and Luo, X.: Admittance control based walking support and power assistance of an omnidirectional wheelchair typed robot, in *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, pp. 381–386 (2010).
- [55] 藤原茂喜, 北野斉, 山下秀樹, 前田裕史, 福永秀雄: 全方向移動型パワーアシストカート, 日本ロボット学会誌, Vol. 20, No. 1, pp. 53–54 (2002).
- [56] 藤原茂喜, 山下秀樹, 前田裕史, 岡野正紀: 全方向移動型パワーアシストカートの衝突回避機能, 日本ロボット学会誌, Vol. 22, No. 3, pp. 385–391 (2004).
- [57] Munakata, Y., Tanaka, A. and Wada, M.: A five-wheel wheelchair with an active-caster drive system, in *IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)*, pp. 1–6 (2013).
- [58] 高橋義信: 車いすの安全・快適技術, 国際交通安全学会誌, Vol. 27, No. 2, pp. 15–22 (2002).
- [59] 藤井文武, 和田憲造: 乗り手にやさしい電動車椅子の実現に関する研究, 日本機械学会論文集, Vol. 66, No. 645, pp. 229–235 (2000).
- [60] Simpson, R.: Smart wheelchairs: A literature review, *Journal of Rehabilitation Research and Development*, Vol. 42, No. 4, pp. 423–435 (2005).
- [61] Bourhis, G., Horn, O., Habert, O. and Pruski, A.: An autonomous vehicle for people with motor disabilities, *IEEE Robotics Automation Magazine*, Vol. 8, No. 1, pp. 20–28 (2001).
- [62] Yasuda, T., Suehiro, N. and Tanaka, K.: Strategies for collision prevention of a compact powered wheelchair using SOKUIKI sensor and applying fuzzy theory, in *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, pp. 202–208 (2009).
- [63] Rebsamen, B., Guan, C., Zhang, H., Wang, C., Teo, C., Ang, V. and Burdet, E.: A Brain Controlled Wheelchair to Navigate in Familiar Environments, *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, Vol. 18, No. 6, pp. 590–598 (2010).
- [64] 田中一男: 脳波指令で動く車いすの開発 (特集 人を支えるロボティクス最前線), 精密工学会誌, Vol. 78, No. 8, pp. 662–665 (2012).

- [65] Miyoshi, T., Niinuma, A., Terashima, K. and Miyashita, Y.: Development of Industry Oriented Power-Assisted System and Comparison with Conventional Machine, *International Journal of Automation Technology*, Vol. 3, No. 6, pp. 692–699 (2009).
- [66] Yamada, Y., Konosu, H., Morizono, T. and Umetani, Y.: Proposal of Skill-Assist: a system of assisting human workers by reflecting their skills in positioning tasks, in *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 4, pp. 11–16 (1999).
- [67] Takesue, N., Murayama, H., Fujiwara, K., Matsumoto, K., Konosu, H. and Fujimoto, H.: Kinesthetic Assistance for Improving Task Performance - The Case of Window Installation Assist -, *International Journal of Automation Technology*, Vol. 3, No. 6, pp. 663–670 (2009).
- [68] ヤマハ発動機株式会社 : <http://www.yamaha-motor.co.jp/wheelchair/>.
- [69] 今仙技術研究所 : <http://www.imasengiken.co.jp/emc/>.
- [70] 馬場道子, 鳥毛明, 藤沼康仁 : 地形傾斜角度を考慮したパワーアシスト車いすの開発, 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会, pp. 1A1–J10 (2007).
- [71] Seki, H., Sugimoto, T. and Tadakuma, S.: Novel Straight Road Driving Control of Power Assisted Wheelchair Based on Disturbance Estimation and Minimum Jerk Control.
- [72] 垣本映, 松田英夫, 関口行雄 : 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).
- [73] 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. 49, No. 5, pp. 357–362 (2001).
- [74] Tashiro, S. and Murakami, T.: Step Passage Control of a Power-Assisted Wheelchair for a Caregiver, *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, Vol. 55, No. 4, pp. 1715–1721 (2008).
- [75] Mascaro, S. and Asada, H. H.: Docking Control of Holonomic Omnidirectional Vehicles With Applications to a Hybrid Wheelchair/Bed System, in *International Conference on Robotics and Automation*, pp. 399–405 (1998).
- [76] Burke Inc. Impulse Drive, : <http://www.burkebariatric.com/BB3ImpulseDrive.html>.
- [77] 北川秀夫, 別府達哉, 大野義則, 三好孝典, 寺嶋一彦 : 全方向移動車椅子の乗り心地向上のための走行制御, 日本ロボット学会誌, Vol. 22, No. 7, pp. 933–939 (2004).
- [78] 別府達哉 : 全方向移動車椅子における環境認識と操作入力補助システムの開発, Master's thesis, 豊橋技術科学大学大学院 (2000).

- [79] 小林恒允：全方向移動車椅子における環境認識と操作入力補助システムの開発, Master's thesis, 豊橋技術科学大学大学院 (2000).
- [80] 横山聡：リファレンスガバナによる拘束条件を考慮したハプティックフィードバックジョイスティックシステムの開発, Master's thesis, 豊橋技術科学大学大学院 (2005).
- [81] Kondo, Y., Miyoshi, T., Terashima, K. and Kitagawa, H.: Navigation Guidance Control Using Haptic Feedback for Obstacle Avoidance of Omni-directional Wheelchair, in *Haptic interfaces for virtual environment and teleoperator systems, 2008. haptics 2008. symposium on*, pp. 437–444 (2008).
- [82] 近藤恭：全方向移動車椅子におけるハプティックフィードバックジョイスティックを用いた誘導型操作支援, Master's thesis, 豊橋技術科学大学大学院 (2008).
- [83] 佐藤隆史：全方向移動ロボットにおける障害物回避操作支援のための3自由度ハプティックジョイスティックシステムの開発, Master's thesis, 豊橋技術科学大学大学院 (2010).
- [84] 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, 日本ロボット学会誌, Vol. 23, No. 3, pp. 321–329 (2005).
- [85] 西坂晋：全方向移動車椅子における介護用パワーアシストシステムの開発, Master's thesis, 豊橋技術科学大学大学院 (2003).
- [86] Jang, J.: ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 23, No. 3, pp. 665–685 (1993).
- [87] Terashima, K., Miyoshi, T., Urbano, J. and Kitagawa, H.: Frequency shape control of omni-directional wheelchair to increase user's comfort, in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Vol. 3, pp. 3119–3124 (2004).
- [88] Gutierrez, J. B. U.: *Motion Control of an Omni-directional Mobile Wheelchair Considering Safety and Operability*, PhD thesis, 豊橋技術科学大学大学院 (2007).
- [89] 北村創：全方向移動車椅子における介助者の操作特性を考慮したパワーアシストシステムの開発, Master's thesis, 豊橋技術科学大学大学院 (2007).
- [90] Terashima, K., Watanabe, K., Ueno, Y. and Masui, Y.: Auto-tuning control of power assist system based on the estimation of operator's skill level for forward and backward driving of omni-directional wheelchair, in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 6046–6051 (2010).
- [91] 渡邊馨：全方向移動ビークルにおける操作者の熟練度を考慮したパワーアシストシステムの知的制御, Master's thesis, 豊橋技術科学大学大学院 (2009).

- [92] 北川秀夫, 大野貴, 三好孝典, 寺嶋一彦: 全方向移動ロボットのための差動駆動操舵機構の開発, 日本ロボット学会誌, Vol. 27, No. 3, pp. 343–349 (2009).
- [93] 大野貴: 全方向移動型車椅子のための差動駆動操舵機構の開発, Master's thesis, 豊橋技術科学大学大学院 (2007).
- [94] 三好孝典, 小笠原慎一, 北川秀夫, 寺嶋一彦: 負荷変動に対するロバスト性を考慮した H_{∞} 制御パワーアシスト車いすの開発 (機械力学, 計測, 自動制御), 日本機械学会論文集. C 編, Vol. 74, No. 738, pp. 386–394 (2008).
- [95] 小笠原慎一: 負荷変動などの外乱を考慮した H_{∞} 制御によるパワーアシスト車椅子の開発, Master's thesis, 豊橋技術科学大学大学院修士論文 (2004).
- [96] 野田善之, 佐藤勇太, 寺嶋一彦: 電動車いす走行における搭乗者挙動と快適性, 設計工学 = JOURNAL OF JAPAN SOCIETY FOR DESIGN ENGINEERING, Vol. 43, No. 6, pp. 315–321 (2008).
- [97] 佐藤勇太: 搭乗者の個人差に対応可能な搭乗者上体挙動を考慮した電動車いす快適走行の実現, Master's thesis, 豊橋技術科学大学大学院 (2008).
- [98] Yamagami, D., Sato, Y., Noda, Y., Miyoshi, T. and Terashima, K.: Wheelchair Driving Control with Passenger's Posture Behavior Suppression and Evaluation of Comfort of Ride by Emotional Sweating, in *International Conference on Advanced Computer Control*, pp. 30–35 (2009).
- [99] 山上大介: 搭乗者の個人差に対応可能な搭乗者上体挙動を考慮した電動車いす快適走行の実現, Master's thesis, 豊橋技術科学大学大学院 (2008).
- [100] Yamashita, K., Noda, Y., Miyoshi, T. and Terashima, K.: Tailor-made modeling and sway control of human posture riding on electrical wheelchair for comfort driving, in *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2010 IEEE/RSJ International Conference on*, pp. 6034–6039 (2010).
- [101] 山下孔明: 搭乗者の個人差に対応可能な搭乗者上体挙動を考慮した電動車いす快適走行の実現, Master's thesis, 豊橋技術科学大学大学院 (2008).
- [102] Hanebeck, U., Saldic, N. and Schmidt, G.: A modular wheel system for mobile robot applications, in *International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Vol. 1, pp. 17–22 (1999).
- [103] Mori, Y., Nakano, E., Takahashi, T. and Takayama, K.: A study on the mechanism and control of omni-directional vehicle, in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol. 1, pp. 52–59 (1996).

- [104] Byun, K.-S., Kim, S.-J. and Song, J.-B.: Design of a four-wheeled omnidirectional mobile robot with variable wheel arrangement mechanism, in *Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA '02. IEEE International Conference on*, Vol. 1, pp. 720–725 (2002).
- [105] 和田正義, 高木昭, 森俊二: 双輪キャスト型駆動機構を用いたホロノミック全方向移動ロボット, 日本ロボット学会誌, Vol. 18, No. 8, pp. 1166–1172 (2000).
- [106] Ushimi, N., Yamamoto, M. and Mohri, A.: Two wheels caster type odometer for omnidirectional vehicles, in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Vol. 1, pp. 497–502 (2003).
- [107] 広瀬茂男, 佐藤幹夫: 多自由度ロボットハンドの干渉駆動, 日本ロボット学会誌, Vol. 7, No. 2, pp. 128–135 (1989).
- [108] Uchiyama, M., Konno, A., Uchiyama, T. and Kanda, S.: Development of a flexible dual-arm manipulator testbed for space robotics, in *IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Vol. 1, pp. 375–381 (1990).
- [109] Konno, A., Nagashima, K., Furukawa, R., Nishiwaki, K., Noda, T., Inaba, M. and Inoue, H.: Development of a humanoid robot Saika, in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Vol. 2, pp. 805–810 (1997).
- [110] 小田島正, 大西正輝, 田原健二, 向井利春, 平野慎也, 羅志偉, 細江繁幸: 抱え上げ動作による移乗作業を目的とした介護支援ロボット研究用プラットフォームRI-MANの開発と評価, 日本ロボット学会誌, Vol. 25, No. 4, pp. 554–565 (2007).
- [111] Sasaki, S.: Toyota's newly developed hybrid powertrain, in *International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs*, pp. 17–22 (1998).
- [112] 特許出願平 11-40943, 特許公開 2000-240756, 発明者: 三原秀夫, 発明の名称: 車両用差動歯車装置.
- [113] 両角宗春: 遊星歯車と差動歯車の理論と設計方法 (1989).
- [114] 酒井秀男: タイヤ工学: 入門から応用まで, グランプリ出版 (1987).
- [115] カヤバ工業株式会社: 自動車の操舵系と操安性, 山海堂 (1996).
- [116] 山川淳也, 渡辺啓二, 田中将浩: 多軸車両の操舵・駆動方式と旋回特性 (機械力学, 計測, 自動制御), 日本機械学会論文集. C編, Vol. 70, No. 694, pp. 1687–1694 (2004).
- [117] Chesney, D. and Axelson, P.: Preliminary test method for the determination of surface firmness [wheelchair propulsion], *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, Vol. 4, No. 3, pp. 182–187 (1996).

- [118] Chenier, F., Bigras, P. and Aissaoui, R.: An Orientation Estimator for the Wheelchair's Caster Wheels, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 19, No. 6, pp. 1317–1326 (2011).
- [119] Park, T. B., Lee, J. H., Yi, B.-J., Kim, W.-K., You, B.-J. and Oh, S.-R.: Optimal design and actuator sizing of redundantly actuated omni-directional mobile robots, in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Vol. 1, pp. 732–737 (2002).
- [120] Jung, E.-J., Chung, J. H., Lee, J. H., Yi, B.-J. and Kim, W.-K.: Implementation of an embedded omni-directional mobile robot with active caster wheels, in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 3911–3918 (2007).
- [121] Jin, C., Yuta, S. and Lee, J.: Position estimation and motion control of omni-directional mobile robot with active caster wheels, in *IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*, pp. 226–231 (2008).
- [122] Hogan, N.: Impedance Control Part 1–Part 2, *Transaction of ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 107, pp. 1–24 (1985).
- [123] Kosuge, K., Furuta, K. and Yokoyama, T.: Virtual internal model following control of robot arms, in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 4, pp. 1549–1554 (1987).
- [124] Ikeura, R., Moriguchi, T. and Mizutani, K.: Optimal variable impedance control for a robot and its application to lifting an object with a human, in *IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication*, pp. 500–505 (2002).
- [125] Flash, T. and Hogans, N.: The Coordination of Arm Movements: An Experimentally Confirmed Mathematical Model, *Journal of neuroscience*, Vol. 5, pp. 1688–1703 (1985).
- [126] Maeda, Y., Hara, T. and Arai, T.: Human-robot cooperative manipulation with motion estimation, in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol. 4, pp. 2240–2245 (2001).
- [127] Tadakuma, K., Tadakuma, R., Aigo, M., Shimojo, M., Higashimori, M. and Kaneko, M.: "Omni-Paddle": Amphibious spherical rotary paddle mechanism, in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 5056–5062 (2011).
- [128] Tadakuma, K., Tadakuma, R., Ioka, K., Kudo, T., Takagi, M., Tsumaki, Y., Higashimori, M. and Kaneko, M.: Omnidirectional driving gears and their input mechanism with passive rollers, in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 2881–2888 (2012).

- [129] 谷江和雄: ロボット市場を立ち上げるために, 東芝レビュー, Vol. 59, No. 9, pp. 9–14 (2004).
- [130] Tsuji, T., Goto, K., Moritani, M., Kaneko, M. and Morasso, P.: Spatial characteristics of human hand impedance in multi-joint arm movements, in *IEEE/RSJ/GI International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Vol. 1, pp. 423–430 (1994).
- [131] Tsuji, T. and Tanaka, Y.: Tracking control properties of human-robotic systems based on impedance control, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, Vol. 35, No. 4, pp. 523–535 (2005).
- [132] Uno, Y., Kawato, M. and Suzuki, R.: Formation and control of optimal trajectory in human multijoint arm movement, *Biological Cybernetics*, Vol. 61, No. 2, pp. 89–101 (1989).
- [133] Tsumugiwa, T., Yokogawa, R. and Hara, K.: Variable impedance control based on estimation of human arm stiffness for human-robot cooperative calligraphic task, in *Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA '02. IEEE International Conference on*, Vol. 1, pp. 644–650 (2002).
- [134] Takubo, T., Arai, H., Tanie, K. and Arai, T.: Human-Robot Cooperative Handling Using Variable Virtual Nonholonomic Constraint, *International Journal of Automation Technology*, Vol. 3, No. 6, pp. 653–662 (2009).
- [135] Arechavaleta, G., Laumond, J.-P., Hicheur, H. and Berthoz, A.: An Optimality Principle Governing Human Walking, *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 24, No. 1, pp. 5–14 (2008).
- [136] Kruse, T., Basili, P., Glasauer, S. and Kirsch, A.: Legible robot navigation in the proximity of moving humans, in *IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts (ARSO)*, pp. 83–88 (2012).
- [137] 寺嶋一彦, 竹之下誠一, 三浦純, 田崎良佑, 北崎充晃, 三枝亮, 三好孝典, 内山直樹, 佐野滋則, 佐竹純二, 大村廉, 福島俊彦, 柿原清章, 河村博年, 高橋幹朗: 回診ロボット ①Terapio(セラピオ)の試作機開発 ②, 第31回日本ロボット学会学術講演会, CD-ROM (RSJ2013AC3C1-03) (2013).

研究業績

掲載論文

1. 上野祐樹, 北川秀夫, 柿原清章, 寺嶋一彦: 全方向移動ロボットのための平歯車型差動駆動操舵機構の開発, 日本機械学会論文集C編, Vol. 78, No. 789, pp. 1872-1885, (2012)
2. Ueno Y., Kitagawa H., Kakihara K., Sakakibara T. and Terashima K.: Development of an Innovative Power-Assist Omni-Directional Mobile Bed Considering Operator's Characteristics, International Journal of Automation Technology, Vol. 8, No. 3 (掲載決定)

査読付き国際会議論文

1. Ueno Y., Ohno T., Terashima K. and Kitagawa H.: The Development of Driving System with Differential Drive Steering System for Omni-directional Mobile Robot, International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA2009), pp. 1089-1094 (2009).
2. Ueno Y., Ohno T., Terashima K., Kitagawa H., Kakihara K. and Funato K.: Novel Differential Drive Steering System with Energy Saving and Normal Tire Using Spur Gear for an Omni-directional Mobile Robot, International Conference on Robotics and Automation (ICRA2010), pp. 3763-3768 (2010)
3. Ueno Y., Terashima K., Kitagawa H., Kakihara K. and Funato K.: Development and Experimental Evaluation of a Novel Omni-directional Wheel Mechanism, International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Robot (CLAWAR2010), pp. 817-824 (2010)
4. Terashima K., Watanabe K., Ueno Y. and Masui Y.: Auto-tuning Control of Power Assist System Based on the Estimation of Operator's Skill Level for Forward and Backward Driving of Omni-directional Wheelchair, International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2010), pp. 6046-6051 (2010)
5. Ueno Y., Terashima K., Kitagawa H. and Kakihara K.: Development of Collision Avoidance Supporting System for Power Assist System in Omni-directional Mobile Robot, SICE Annual Conference 2011, pp. 1447-1452 (2011).
6. Ueno Y., Kitagawa H., Kakihara K. and Terashima K.: Design and Control for Collision Avoidance of Power-assisted Omni-directional Mobile Wheelchair System, IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII2011), pp. 902-907 (2011)
7. Ueno Y., Kitagawa H., Kakihara K. and Terashima K.: Control system of omni-directional

mobile robot with caster drive mechanism to develop reduction of motor output, International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Robot(CLAWAR2012), pp. 595-602 (2012)

特許

1. 操舵可能な駆動機構および全方向移動車, 特願 2009-146050, 2009年6月
2. 国際特許 PCT/JP2010/60078, 2010年6月

謝辞

本論文は、2008年4月から2014年2月までに遂行された研究をまとめたものであり、多くの先生方のご指導と多くの方々のご協力の賜物であります。ここに深く感謝申し上げます。

指導教員である豊橋技術科学大学工学部機械工学系教授 寺嶋一彦先生には、全方向移動機構の開発から応用を含めたやりがいのある研究テーマを頂き、機構の提案からモデル化、シミュレーション、設計・制作、制御に至るまでご指導いただく中で、目的を達成する手段として理論を用いること、理論と現実は必ずしも一致しないが、そこから得られる知見が新たな発見に繋がることなどをご教授いただいたことに感謝いたします。また十数回に渡る国内外での学会講演やMOTの企業研修、共同研究へ参加させていただく機会を与えて下さり、研究を多角的視点から検討し発展させていくための機会を常々与えて下さいました。また博士後期課程3年目の2013年5月から2014年2月までの10か月間、Technische Universität München (ミュンヘン工科大学)、Institute for Information-Oriented Control への留学の機会を与えて頂きました。世界でも有数の学術機関における滞在の中で、国際的視野に立った研究の進め方や、高水準な研究の効率的な推進方法を学べたことは今後の糧となり、また海外の同年代研究者との交流は刺激的であり学習意欲を養う場にもなりました。ここに厚く御礼申し上げます。

岐阜工業高等専門学校電子・機械工学部教授 北川秀夫先生、豊橋技術科学大学工学部機械工学系准教授 三好孝典先生、助教 田崎良佑先生、山梨大学工学部准教授 野田善之先生をはじめとする諸先生方からは、研究だけでなく多方面でご指導いただいたことをここに深く感謝いたします。

また本論文の審査委員を勤めていただき、有益なご助言を頂きました本学工学部情報工学系教授 三浦純先生、機械工学系准教授 内山直樹先生に厚く御礼申し上げます。

株式会社ケーイーアール代表取締役社長 柿原清章様には研究開始当初から公私に渡り多大なるご助言、ご協力を頂きましたことに深く御礼申し上げます。研究成果の実用化を目指した取り組みは、社会貢献を実感しながら次なる研究課題を創出する場ともなり、それらの課題を解決する中で多くのことを学ぶことができました。また、その過程で犯した数多くの失敗に対しても寛容な対応をして下さり、失敗を恐れずに突き進むことや、失敗から学ぶことの大切さを、身を持って学ばせて頂きました。また日頃議論を交わすなかで、物事の先見性の重要さやリーダーとしての心構え等についても学ばせて頂きました。同社 技術部リーダー 船戸一弘様には、プログラミングに関して幅広い知識の中から常に最適な解決方法をご提示頂いたことに深く感謝いたします。

Technische Universität München, Institute of Automatic Control Engineering, Martin Buss 教授ならびに Institute for Information-Oriented Control, Sandra Hirche 教授には、10か月間の留学を快く引き受けていただくとともに、勉学に励むための最適な環境を提供していただい

たことに深く感謝いたします。さらに、留学中にお世話になりました、(株)東芝 電力・社会システム技術開発センター 松崎謙司氏ならびに慶応義塾大学 理工学部博士後期課程 橋本潔氏、豊橋技術科学大学修士課程 電気・電子情報工学専攻 金澤直輝氏、ほか日本人メンバーの皆さまとは、専門的なことから他愛もないことまで日本語で話すことでストレスの解消にもなりました。充実した留学生活を送ることができたのは、皆さまの存在が精神的な支えとなったおかげでもありました。ここに深く感謝申し上げます。

そして公私の別なくご助言、ご協力くださいましたシステム制御研究室の皆さま、特に同級生の渋谷涼太氏、ビークル班修士課程修了生の Nguyen Manh Toi 氏、山下孔明氏、山田雅也氏、越智友亮氏、在校博士学生の佐郷幸法氏、在校修士学生の Mohd Hazwan Bin Abd Latif 氏、松尾一博氏、國廣和樹氏にお礼を申し上げます。

最後に、勉学・研究に専念する学生生活を温かく見守ってくれた家族や恋人に心より感謝申し上げます。

皆さまの多大なるご支援の下、今日まで研究を遂行できたことを深く感謝するとともに、今後は私が培った経験をもとに社会と多くの方々に貢献していく所存です。

付録 A 重ねあわせ方による差動歯車機構の運動学モデルの導出

遊星歯車機構における減速比の計算には、重ねあわせ方が用いられる。平歯車型差動歯車機構においても、同様にして減速比を求めることができる。本章では、重ね合わせ法を用いた、遊星歯車型差動歯車機構と平歯車型差動歯車機構の運動学モデル導出方法について述べる。

A.1 遊星歯車型差動歯車機構の運動学モデル

遊星歯車型差動歯車機構のモデルを Fig. A.1 に示す。機構を構成する A から D の部品の角速度を、それぞれ ω_A , ω_B , ω_C , ω_D とし、歯車 A, B, C の歯数を Z_A , Z_B , Z_C とする。機構の状態ベクトル ω_P , 入力ベクトル u_P をそれぞれ $\omega_P = [\omega_C, \omega_D]^T$, $u_P = [\omega_A, \omega_B]^T$ とし、運動学モデルを重ね合わせ法により求める^[113]。なお図に示すように、重ね合わせ法では、全ての要素において時計方向を正回転 (CW) とする。

まず、 ω_A に対する ω_C , ω_D の比を求める。このときの重ね合わせ法の表を Table A.1 に示す。表は、重ね合わせ法の計算過程を上を行から順に示している。まず 1 行目では、旋回台 D を固定した状態 (5 列目がゼロ) を想定し、歯車 B を 1 回転させたときの各部品への伝達比を考える。次に 2 行目では、歯車 B に与えられた回転を打ち消すよう “全体を” -1 回転させる。さらに 3 行目では、1 行目と 2 行目の結果を足し合わせることで、歯車 B が運動しない (固定された) 状態での各要素の運動の関係性を得ることができる。最終的に 4 行目では、歯車 A が 1 回転した場

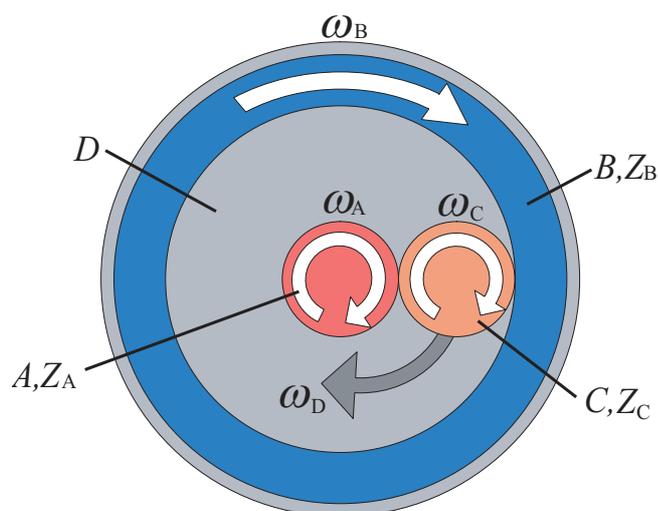


Fig. A.1 Model of planetary gear type differential gearing mechanism

Table A.1 Superposition method of planetary gear type DDSS(1)

	Sun gear(A)	Ring gear(B)	Planetary gear(C)	Turn unit(D)
1	$-\frac{Z_B}{Z_A}$	1	$\frac{Z_B}{Z_C}$	0
2	-1	-1	-1	-1
3	$-\frac{Z_A+Z_B}{Z_A}$	0	$\frac{Z_B-Z_C}{Z_C}$	-1
4	1	0	$\frac{Z_A(Z_C-Z_B)}{Z_C(Z_A+Z_B)}$	$\frac{Z_A}{Z_A+Z_B}$

合の各要素の減速比が求まる．以上より， ω_A に対する ω_C ， ω_D の比を求めると，

$$\omega_C = \frac{Z_A(Z_B - Z_C)}{Z_C(Z_A + Z_B)}\omega_A \quad (\text{A.1})$$

$$\omega_D = \frac{Z_A}{Z_A + Z_B}\omega_A \quad (\text{A.2})$$

となり，歯車 A への入力に対する二つの出力の関係性を導出できる．

次に， ω_B に対する ω_C ， ω_D の比を求める．このときの重ね合わせ法の表を Table A.2 に示す．先の導出過程と同様に，まず 1 行目では，回転台 D を固定した状態とし (5 列目がゼロ)，歯車 A

Table A.2 Superposition method of planetary gear type DDSS(2)

	Sun gear(A)	Ring gear(B)	Planetary gear(C)	Turn unit(D)
1	1	$-\frac{Z_A}{Z_B}$	$-\frac{Z_A}{Z_C}$	0
2	-1	-1	-1	-1
3	0	$-\frac{Z_A+Z_B}{Z_B}$	$-\frac{Z_A+Z_C}{Z_C}$	-1
4	0	1	$\frac{Z_B(Z_A+Z_C)}{Z_C(Z_A+Z_B)}$	$\frac{Z_B}{Z_A+Z_B}$

を 1 回転させたときの各部品への伝達比を考える．次に 2 行目では，歯車 A の回転を打ち消すよう全体を -1 回転させる．さらに 3 行目では，1 行目と 2 行目の結果を足し合わせ，歯車 A が運動しない (固定された) 状態での各要素の運動の関係性を得る．最終的に 4 行目では，歯車 B が 1 回転した場合の各要素の減速比が求まる．以上より， ω_B に対する ω_C ， ω_D の比を求めると，

$$\omega_C = \frac{Z_B(Z_A + Z_C)}{Z_C(Z_A + Z_B)}\omega_B \quad (\text{A.3})$$

$$\omega_D = -\frac{Z_B}{Z_A + Z_B}\omega_B \quad (\text{A.4})$$

となり，歯車 B への入力に対する二つの出力の関係性を導出できる．

式 (A.1) から (A.4) までの結果をまとめると、運動学モデルは、

$$\omega_P = B_P u_P \quad (\text{A.5})$$

$$B_P = \begin{bmatrix} \frac{Z_A(Z_B - Z_C)}{Z_C(Z_A + Z_B)} & \frac{Z_B(Z_A + Z_C)}{Z_C(Z_A + Z_B)} \\ \frac{Z_A}{Z_A + Z_B} & -\frac{Z_B}{Z_A + Z_B} \end{bmatrix} \quad (\text{A.6})$$

また、変換行列 B_P 逆行列 B_P^{-1} を求めると、逆運動学モデルは

$$u_P = B_P^{-1} \omega_P \quad (\text{A.7})$$

$$B_P^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{Z_C}{Z_A} & \frac{Z_A + Z_C}{Z_A} \\ \frac{Z_C}{Z_B} & \frac{Z_C - Z_B}{Z_B} \end{bmatrix} \quad (\text{A.8})$$

となる。

A.2 平歯車型差動歯車機構の運動学モデル

平歯車型差動歯車機構についても、遊星歯車型と同様に、重ね合わせ法により運動学モデルが導出できる。機構のモデルを Fig. A.1 に示す。A, B, C, D の機構要素の角速度をそれぞれ $\omega_A, \omega_B, \omega_C, \omega_D$ とし、歯車 A, B, C, C' の歯数を $Z_A, Z_B, Z_C, Z_{C'}$ とする。なお、歯車 C および C' は同軸に固定されるため、角速度はどちらも ω_C として扱う。機構の状態ベクトル ω_S , 入力ベクトル u_S をそれぞれ $\omega_S = [\omega_C, \omega_D]^T$, $u_S = [\omega_A, \omega_B]^T$ とし、運動学モデルを重ね合わせ法により求める。なお、遊星歯車型と同様に重ね合わせ法では、全ての要素において時計方向 (CW) を正方向とする。

平歯車型差動歯車機構は5枚の平歯車組み合わせた機構であるが、そのうち歯車 A と B は、それぞれ遊星歯車機構におけるサンギヤとリングギヤと同様の役割を持つ。また、歯車 C と C'

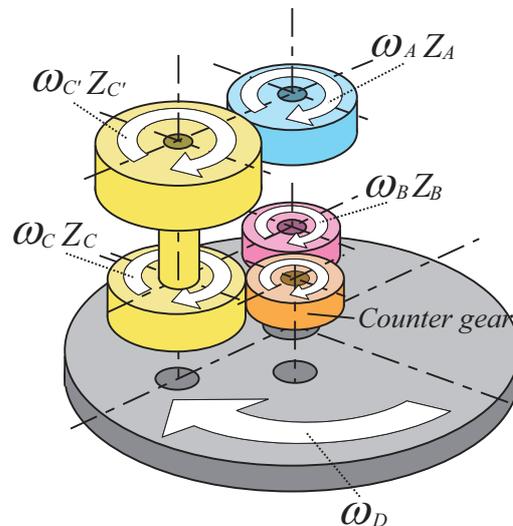


Fig. A.2 Model of spur gear type differential gearing mechanism

の固定された軸は、遊星歯車機構におけるのプラネタリギヤと同様の役割を持つ。そのため、遊星歯車型差動歯車機構と同様に、まず、 ω_A に対する ω_C , ω_D の比を求める。このときの重ね合わせ法の表を Table A.3 に示す。

Table A.3 Superposition method of spur gear type DDSS(1)

	A	B	C	D
1	$-\frac{Z_B Z'_C}{Z_C Z_A}$	1	$\frac{Z_B}{Z_C}$	0
2	-1	-1	-1	-1
3	$-\frac{Z_A Z_C + Z_B Z'_C}{Z_A Z_C}$	0	$\frac{Z_B - Z_C}{Z_C}$	-1
4	1	0	$-\frac{(Z_C - Z_B) Z_A}{Z_A Z_C + Z_B Z'_C}$	$\frac{Z_A Z_C}{Z_A Z_C + Z_B Z'_C}$

まず1行目では、旋回台 D を固定した状態 (5列目がゼロ) を想定し、歯車 B(B') を1回転させたときの各部品への伝達比を考える。次に2行目では、歯車 B に与えられた回転を打ち消すよう“全体を”-1回転させる。さらに3行目では、1行目と2行目の結果を足し合わせることで、歯車 B(B') が運動しない (固定された) 状態での各要素の運動の関係性を得ることができる。最終的に4行目では、歯車 A が1回転した場合の各要素の減速比が求まる。以上より、 ω_A に対する ω_C , ω_D の比を求めると、

$$\omega_C = -\frac{(Z_C - Z_B) Z_A}{Z_A Z_C + Z_B Z'_C} \omega_A \quad (\text{A.9})$$

$$\omega_D = \frac{Z_A Z_C}{Z_A Z_C + Z_B Z'_C} \omega_A \quad (\text{A.10})$$

となり、歯車 A への入力に対する二つの出力の関係が導出された。

次も同様に、 ω_B に対する ω_C , ω_D の比を求める。このときの重ね合わせ法の表を Table A.4 に示す。

Table A.4 Superposition method of spur gear type DDSS(2)

	A	B	C	D
1	1	$-\frac{Z_A Z_C}{Z'_C Z_B}$	$-\frac{Z_A}{Z'_C}$	0
2	-1	-1	-1	-1
3	0	$-\frac{Z_A Z_C + Z_B Z'_C}{Z_B Z'_C}$	$-\frac{Z_A + Z'_C}{Z'_C}$	-1
4	0	1	$\frac{(Z_A + Z'_C) Z_B}{Z_A Z_C + Z_B Z'_C}$	$\frac{Z_B Z'_C}{Z_A Z_C + Z_B Z'_C}$

先の導出過程と同様に、まず1行目では、旋回台Dを固定した状態とし(5列目がゼロ)、歯車Aを1回転させたときの各部品への伝達比を考える。次に2行目では、歯車Aの回転を打ち消すよう全体を-1回転させる。さらに3行目では、1行目と2行目の結果を足し合わせ、歯車Aが運動しない(固定された)状態での各要素の運動の関係性を得る。最終的に4行目では、歯車B(B')が1回転した場合の各要素の減速比が求まる。以上より、 ω_B に対する ω_C 、 ω_D の比を求めると、

$$\omega_C = \frac{(Z_A + Z'_C)Z_B}{Z_A Z_C + Z_B Z'_C} \omega_B \quad (\text{A.11})$$

$$\omega_D = \frac{Z_B Z'_C}{Z_A Z_C + Z_B Z'_C} \omega_B \quad (\text{A.12})$$

となり、歯車Bへの入力に対する二つの出力の関係が導出された。

以上より、平歯車型DDSSの運動学モデルは、

$$\omega_S = B_S u_S \quad (\text{A.13})$$

ただし、

$$B_S = \begin{bmatrix} -\frac{(Z_B - Z_C)Z_A}{Z_A Z_C + Z_B Z'_C} & \frac{(Z_A + Z'_C)Z_B}{Z_A Z_C + Z_B Z'_C} \\ \frac{Z_A Z_C}{Z_A Z_C + Z_B Z'_C} & \frac{Z_B Z'_C}{Z_A Z_C + Z_B Z'_C} \end{bmatrix} \quad (\text{A.14})$$

となる。また、変換行列 B_S から逆行列 B_S^{-1} を求めると、逆運動学モデルは、

$$u_S = B_S^{-1} \omega_S \quad (\text{A.15})$$

ただし、

$$B_S^{-1} = \begin{bmatrix} -\frac{Z'_C}{Z_A} & \frac{Z_A + Z'_C}{Z_A} \\ \frac{Z_C}{Z_B} & \frac{Z_B - Z_C}{Z_B} \end{bmatrix} \quad (\text{A.16})$$

となる。なお、本文中の運動学モデルとは各要素の回転の正方向が異なるため、注意する必要がある。

付録B 全方向移動車いすの構成

本章では、OMW の機器構成について述べる。

B.1 駆動ユニット

OMW のために設計・製作された DDSS の外観を Fig. B.1 および Fig. B.2 に示す。

DDSS の制御は、図中に上下に配置された二台のモータにより行われる。これらの動力は、ベベルギヤを介して差動歯車機構へ入力される。差動歯車機構の歯車 C からの出力は、ベベルギヤとタイミングベルトを介して車輪の回転へと伝えられる。また、旋回台 D の出力は直接操舵駆動となる。

本機構は、2.5 章にて述べたオフセット量選定手法の導入以前に試作機として設計されたため、スイングアーム式の車輪フレームに複数のねじ穴を用意し、調節バーの位置を変更することにより段階的にオフセット量を調節できるようにしていた。

OMW は、悪路走行や段差越え時の安定性や走破性を確保できるように、Fig. B.3 に示すように DDSS を四輪配置している。

OMW の駆動ユニットに使用されている DC サーボモータ、ギヤヘッド、エンコーダ、モータドライバ、ベベルギヤ、平歯車、タイミングベルトなどの基本仕様を Table B.1 に示す。

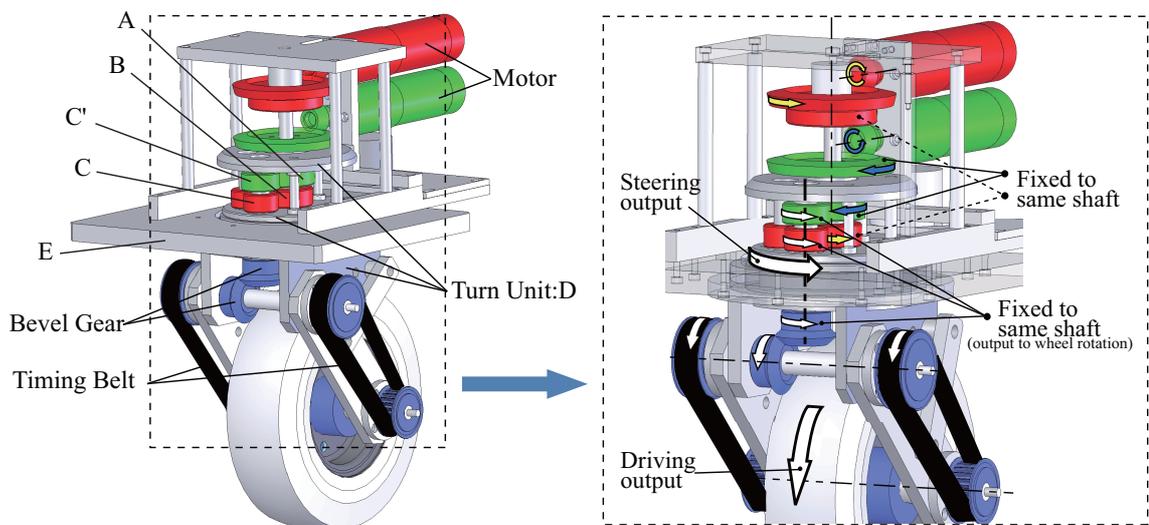
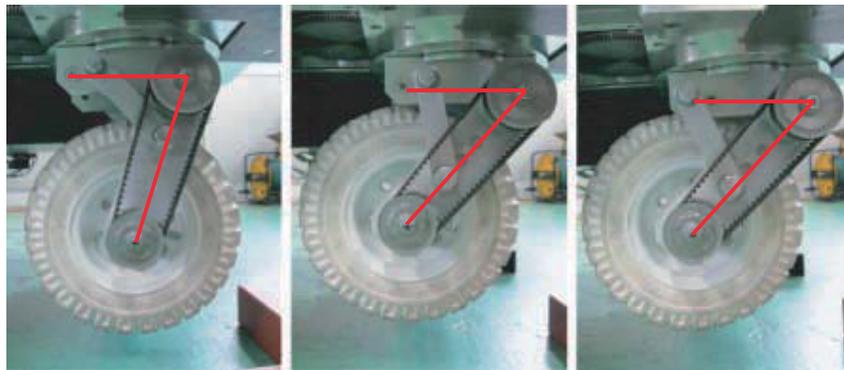
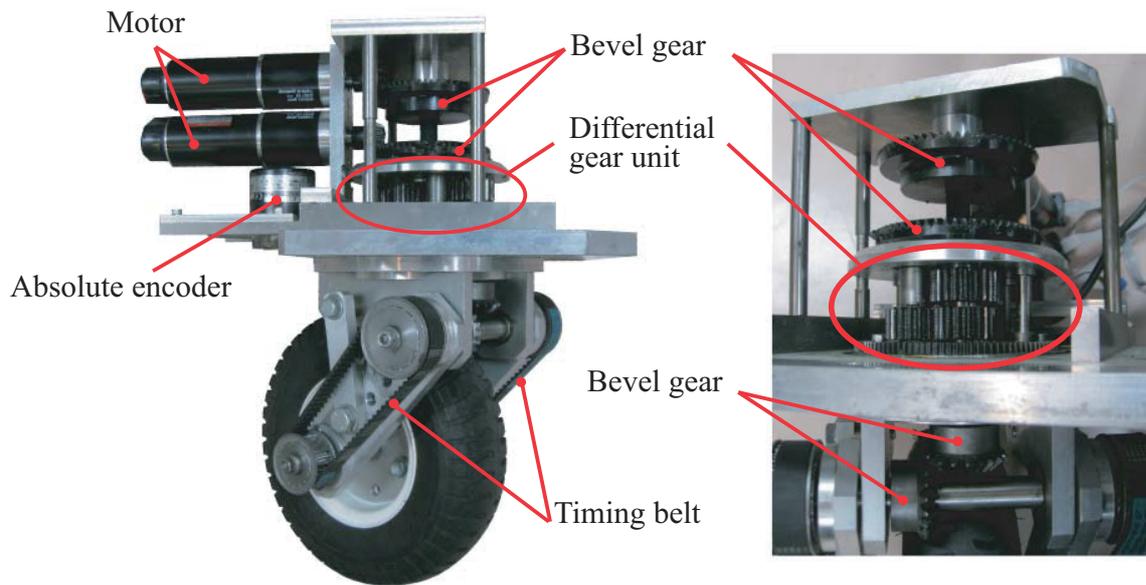


Fig. B.1 Drawing of the DDSS unit



Adjustable offset mechanism

Fig. B.2 Photograph of the DDSS unit

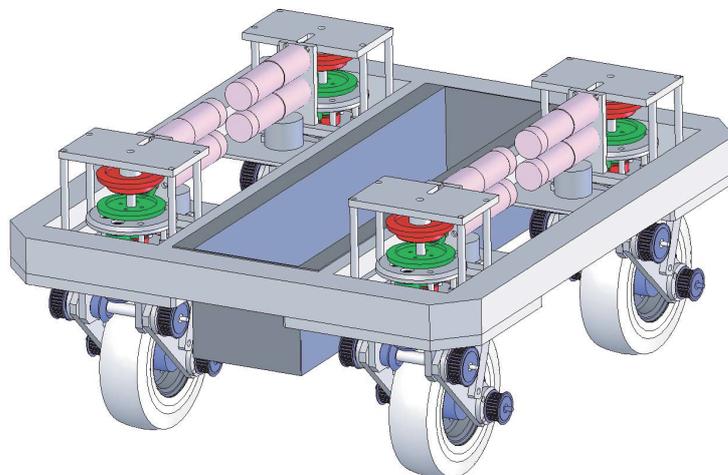


Fig. B.3 Driving unit of the OMW

Table B.1 Specification of elements of the drive unit

Wheel	Maker	CHUBU-SANGYO Co.,Ltd.
	Model	UT250-4
	Diameter	208[mm]
	Width	62[mm]
DC servo motor	Maker	maxon Japan CO.,Ltd.
	Model	RE40-148867
	Rated output	150[W]
	Rated notational velocity	7580[rpm]
	Nominal voltage	24[V]
	Maximum torque	191[mNm]
Gear head	Maker	maxon Japan CO.,Ltd.
	Model	GP42C-203119
	Gear ratio	26/1
Encoder	Maker	maxon Japan CO.,Ltd.
	Model	HEDL 5540-110514
	Resolution	500[pulse/rev]
	Power supply	$\pm 5[V]$
DC servo amplifier	Maker	maxon Japan CO.,Ltd.
	Model	EPOS2 50/5-347717
	Supply voltage	11-50[V]
	Input voltage	$\pm 10[V]$
	Maximum output voltage	$0.9 \times V_{CC}[V]$
	Maximum output current	10[A]
Absolute encoder	Maker	Omron CO.,Ltd.
	Model	E6C3-AG5C
	Resolution	1024[pulse/rev]
	Max. response frequency	20[kHz]
	Power supply voltage	12-24[V]
	Output code	Gray code
Spur gear	Maker	KOHARA GEAR INDUSTRY CO., Ltd.
	Model	$Z_A : SS1.5-30, Z_B : SS1.5-27$ $Z'_C : SS1.5-20, Z_C : SS1.5-18$
	Gear ratio($Z_A/Z'_C = Z_B/Z_C$)	3/2
Bevel gear	Maker	KOHARA GEAR INDUSTRY CO., Ltd.
	Model	SB1.5-6015 & SB1.5-1560
	Gear ratio	1/4
	Model	MM2-20
	Gear ratio	1/1
Timing pulley	Maker	Mitsuboshi Belting CO., Ltd.
	Model	P32MTS5M0150 & P24MTS5M0150
	Gear ratio	4/3

B.2 制御ユニット

OMW に搭載されている制御ユニットの仕様を Table D.1 に示す。OMW の制御は、PLC (Programmable Logic Controller) を用いて行われる。PLC を用いる利点として、PC による制御に比べ電源投入後の起動が早く、プログラムの書換えが容易に出来ること。専用のプログラム編集ソフト (GX Developer) にて PLC の状態をモニタリングできること。機能拡張がユニットを空きスロットに挿入するだけで行えることなどが挙げられる。

本システムにて用いる拡張機能ユニットは、電源ユニットや入力ユニット、出力ユニット、A/D 変換ユニット、D/A 変換ユニットがある。また、それぞれ入力ユニットは非常停止スイッチや速度変更スイッチ、ジョイスティックの並進移動・回転切り替えスイッチ、アブソリュートエンコーダに、出力ユニットは速度切替スイッチ内部の照明に、A/D 部は 6 軸力覚センサの入力やモータドライバからのモータ角速度データの取得に、D/A 部は駆動・ジョイスティックモータの指令電圧を与えるために用いられている。

OMW の背面には、各種パラメータの変更や参照、接点の切り替え等を行うためにタッチパネルが取り付けられている。タッチパネルの外観を Fig. C.4 に、仕様を Table に示す。



Fig. B.4 Touch-panel

Table B.2 Specification of the PLC unit

Maker		Mitsubishi Electronics Corp.
Power-supply unit	Model	Q63P
	Input voltage	DC 24 [V]
	Output voltage	DC 5 [V]
	Output current	6 [A]
CPU unit	Model	Q04UDHCPU
	Communication port	USB, RS-232
DC input unit	Model	QX40
	Input port	16 points
	Input voltage	DC 24 [V]
DC input unit	Model	QX42
	Input port	62 points
	Input voltage	DC 24 [V]
Relay output unit	Model	QY10
	Output port	8
	Rated voltage	DC 24 [V]
D/A conversion unit	Model	Q68DAVN
	Channel	8
	Output voltage	± 10 [V]
	Resolution	16[bit]
A/D conversion unit	Model	Q68ADV
	Channel	8
	Input voltage	± 10 [V]
	Resolution	16[bit]
Serial communication unit	Model	QJ71C24N-R2
	Interface	RS-232 (D-Sub 9P)
	Channel	2
	Transmission rate	230400[bps](max.)

Table B.3 Specification of touch-panel

Maker		Mitsubishi Electronics Corp.
Model		GT1562-VNBD
LCD panel	Display type	TFT LCD panel
	Maximum resolution	640×480(VGA)
	Screen size	8.4[inch]
	Maximum color	256
	Maximum brightness	150[cd/m ²]
Touch-panel	Touch-panel	Matrix resistance film
	Touch input	Finger, Pen
	Number of touch keys	1200(30×40)
	Touch durability	1,000,000
Communication port		USB, RS-232
Power consumption		Maximum 41[W]
Dimension		241(W)×190(H)×52(D)[mm]
Weight		1.9[kg]

B.3 操作インタフェース

車いすの操作インタフェースは、搭乗者と介助者へ対するものが必要である。搭乗者へ対してはハプティックジョイスティックによる操作システム、介助者に対してはパワーアシストシステムがそれぞれ実装されている。本節では、各インタフェースの機器構成について説明する。

B.3.1 ハプティックジョイスティック

ジョイスティックは、少ない力で操作可能なインタフェースであり、電動車いすの操作に広く利用されている。また取り付け場所は、障害に応じて、左右の肘掛の位置や足元、あごの位置などに変更できる。

従来研究では、ジョイスティックの各軸にモータを搭載したハプティックジョイスティックを開発し、環境認識システムを併用することで、障害物情報をジョイスティックへ反映可能なハプティックフィードバックシステムが開発された^{[79]~[81] [83]}。OMWにも、同様のシステムが構築されている。搭載されているハプティックジョイスティックの外観をFig. B.5(a)に、機構・制御ハードウェアの仕様をTable B.4に示す。

従来研究では、3自由度ハプティックジョイスティックが開発されたが^[83]、本機に搭載するジョイスティックは、縦横の2自由度の構成となっている。本ジョイスティックでは、車両3自由度の制御を行うために、グリップ頭頂部に取り付けられたモーメンタリ式の押しボタンスイッチにより動作の切替を行う構成とした。通常、横へスティックを傾けると真横並進を行うが、押しボタンを押している間のみ旋回へ動作を切り替わる仕様となっている。

ハプティックジョイスティックは機構内部にギヤドモータが搭載されているため、ギヤの抵抗により操作感が重くなる。操作に十分な力を持たない人にとっては操作が困難となるため、

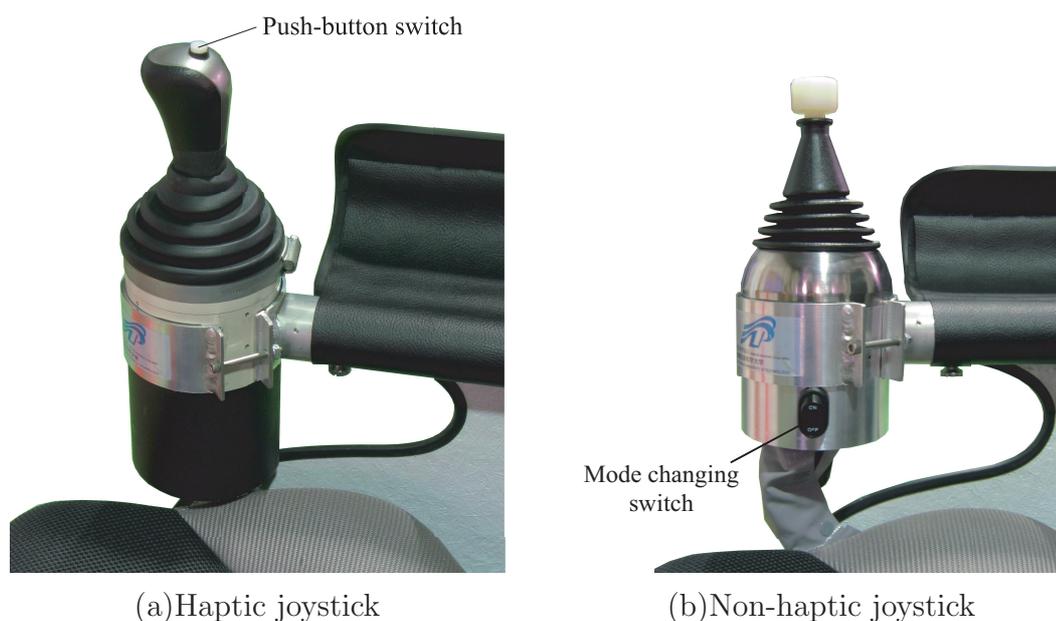


Fig. B.5 Joystick system

Table B.4 Specification of elements the haptic joystick

DC servo motor	Maker	maxon Japan CO.,Ltd.
	Model	EC-max30-272768
	Rated output	40[W]
	Rated notational velocity	9250[rpm]
	Nominal voltage	24[V]
	Maximum torque	33.2[mNm]
Gear head	Maker	maxon Japan CO.,Ltd.
	Model	GP32C-166940
	Gear ratio	66/1
Encoder	Maker	maxon Japan CO.,Ltd.
	Model	HEDL 5540-110514
	Resolution	500[pulse/rev]
	Power supply	$\pm 5[V]$
DC servo amplifier	Maker	maxon Japan CO.,Ltd.
	Model	EPOSP 24/5-323232
	Supply voltage	11-24[V]
	Input voltage	$\pm 10[V]$
	Maximum output voltage	$0.9 \times V_{CC}[V]$
	Maximum output current	10[A]
Bevel gear	Maker	KOHARA GEAR INDUSTRY CO., Ltd.
	Model	SS1.5-27, SS1.5-30, SS1.5-18, SS1.5-20
	Gear ratio	1.5/1

Fig. B.5(b) に示す通常のジョイスティック同様にバネで中立保持を行い、操作感を軽くしたジョイスティック (ノーマルジョイスティック) も交換可能にした。ノーマルジョイスティックは、ハプティックジョイスティックのモータに搭載されているものと同様のロータリエンコーダを軸に取り付けることで、制御構成を変える必要がなく、コネクタの差し替えのみで交換可能となっている。動作切替スイッチをスティック登頂部ではなく、側面に取り付けられており、ロッカースイッチであるため、どちらか一方の操作方法に固定できるようになっている。これは、障害により手先を器用に使えない操作者は、押しボタンスイッチ等の細かいスイッチの操作が出来ず、上手く動作を切り替えられないためであり、誤動作を防ぐ役割もある。

B.3.2 パワーアシストハンドル

OMW は介助者へ対する操作支援システムとして、パワーアシストシステムを搭載している。Fig. B.6 に示すように、操作用ハンドルが6軸力覚センサを介してフレームに固定されており、ハンドルに加えられる介助者の操作入力を6軸力覚センサにより検出する。6軸力覚センサは箔歪ゲージのブリッジ回路による電圧の変化を直交3軸方向の力と軸回りのモーメントとして測定し、 $\pm 5[V]$ のアナログ信号にて出力される。

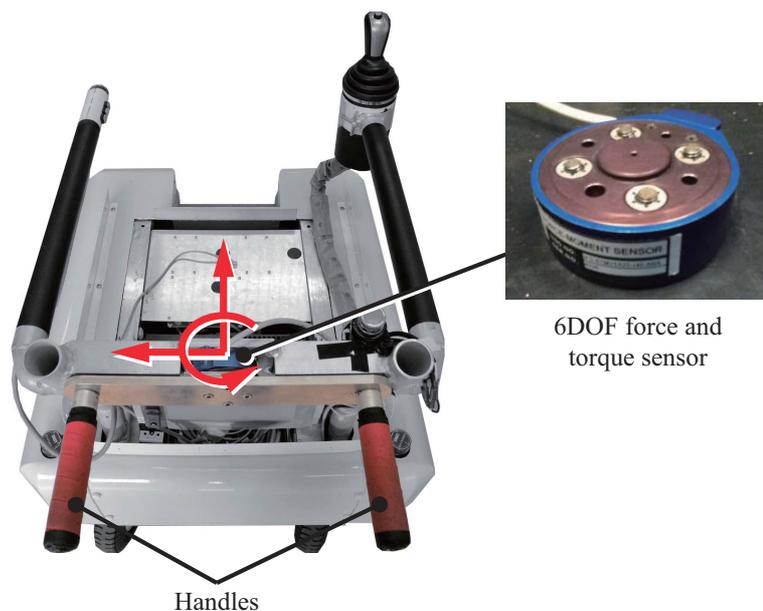


Fig. B.6 Construction of the power-assist handle

Table B.5 Specification of force sensor

Maker	NITTA CORP.
Model	IFS-67M25A25-140-ANA
Capacity of F_x, F_y	± 100 [N]
Capacity of F_z	± 200 [N]
Capacity of M_x-M_z	± 7 [Nm]
Diameter	67 [mm]
Height	25 [mm]
Mass	0.18 [kg]
Input voltage	$\pm 7-15$ [V]
Output voltage	± 5 [V]

B.4 制御システムの構成

OMW の制御システムの構成を Fig. C.6 に示す. 車体の制御は, PLC の CPU ユニットとモータドライバの EPOSP を用いて, それぞれ車体制御系とモータ制御系に分割して行っている. PLC は車体状態と操作指令をセンサより取得し, 各モータの角速度の計算やモータドライバへの指令等を行い, EPOSP は PLC からの信号に基づき, 使用されている各モータの制御指令を行う.

四輪で構成される OMW は, 合計八台のモータが用いられる. 車輪用のモータの制御には EPOS2 が用いられている. EPOS2 には速度制御や位置制御, 電流制御などの機能があるが, 単独で動作できないスレーブ機であるため, CAN 通信によって操作する必要がある. そこで, EPOS2 と同様の機能を持つほか, プログラミングにより単独動作でき, CAN 通信のマスタ機能を持つためスレーブ機の操作を行える EPOSP をマスタ機として利用する. CAN 通信のマスタ機として PLC を用い, モータドライバも含めて処理を統一することも考えられるが, 通信プロトコルの解析や構築等の手間が掛かることや, ハプティックジョイスティックの各軸の制御に EPOSP を使用していることから EPOSP を用いてモータ制御系を統一することにした. 二者間では, アナログ信号を利用してモータの速度指令や測定した角速度データの受け渡しを行う.

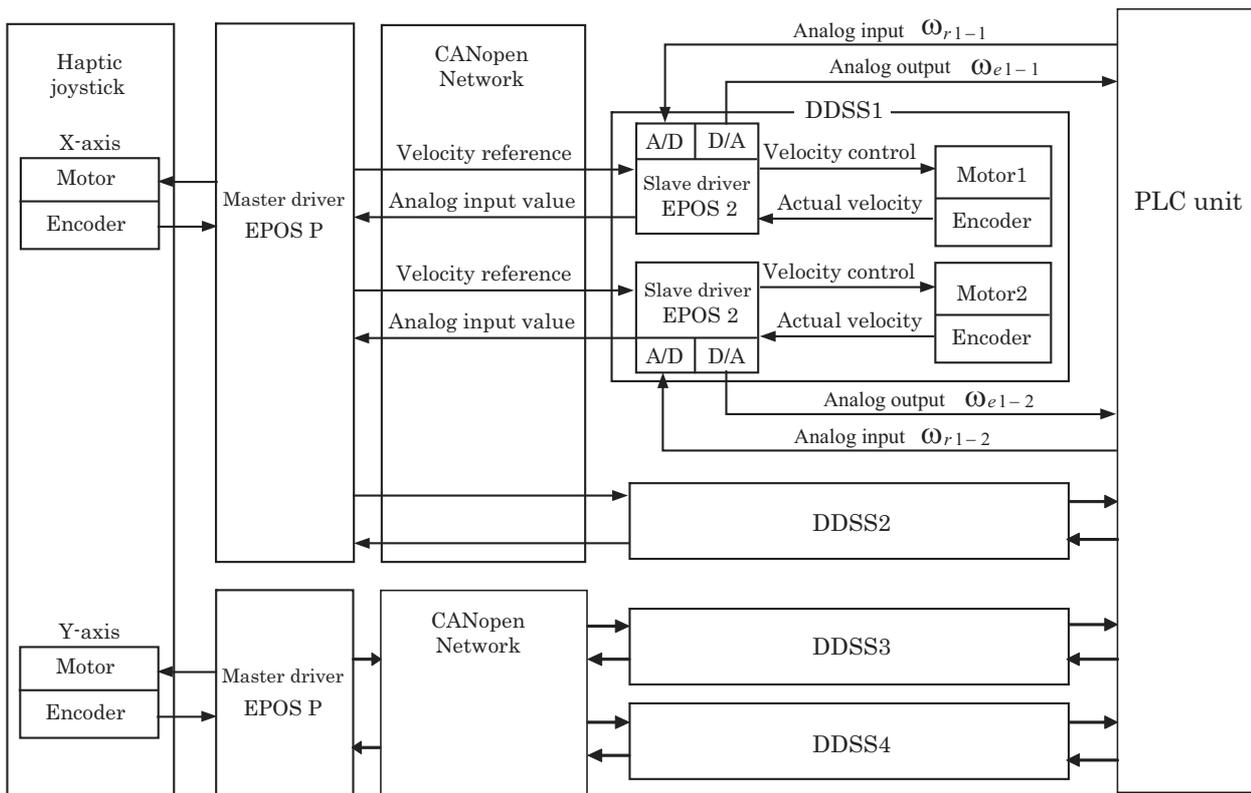


Fig. B.7 Block diagram of control unit

付録C 全方向移動ベッドの構成

本章では、OMBの機器構成について述べる。

C.1 駆動ユニット

OMBのために設計したDDSSは、2.5章のオフセット量設計手法を基に設計した。車輪直径を208[mm]とし、歯数比は $Z'_C : Z_A = 3 : 2$ 、オフセット量は55[mm]とした。

DDSSユニットをFig. C.1に示す。新型ユニットでは整備性を考慮し、Fig. C.2に示すように、モータ部と差動歯車部、車輪部に分割できるよう設計を行った。ユニット同士は、それぞれ数本のネジにより締結される。

Figure C.3にOMBの駆動ユニットの外観を示す。OMBは駆動輪を二輪とした。これは、病院などの施設内での移動を前提としているため車いすほどの走破性は必要無く、ホロミックな全方向移動を行うために最低限必要な車輪数としたためである。なお安定性のため、駆動輪は車体の対角に配置し、逆の対角には補助輪を二輪配置し四点接地としている。

OMBの駆動システムに使用されているDCサーボモータ、ギヤヘッド、エンコーダ、モータドライバ、ベベルギヤ、平歯車、タイミングベルトなどの基本仕様をTable C.1およびTable C.2

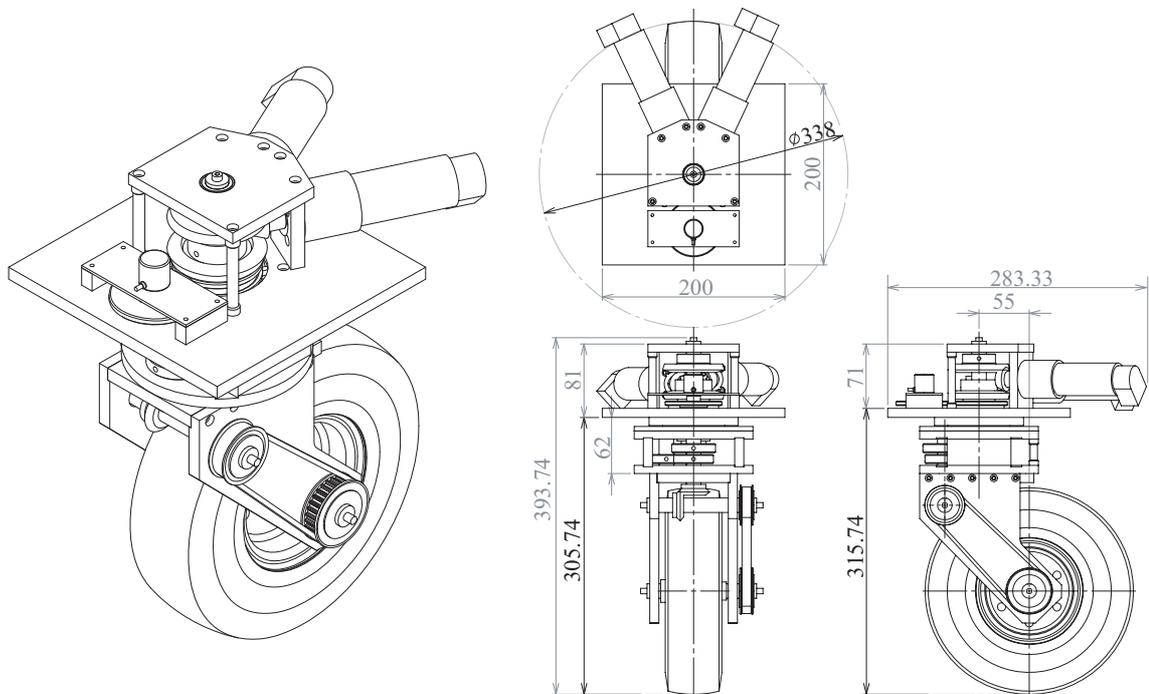


Fig. C.1 Illustration of DDSS unit

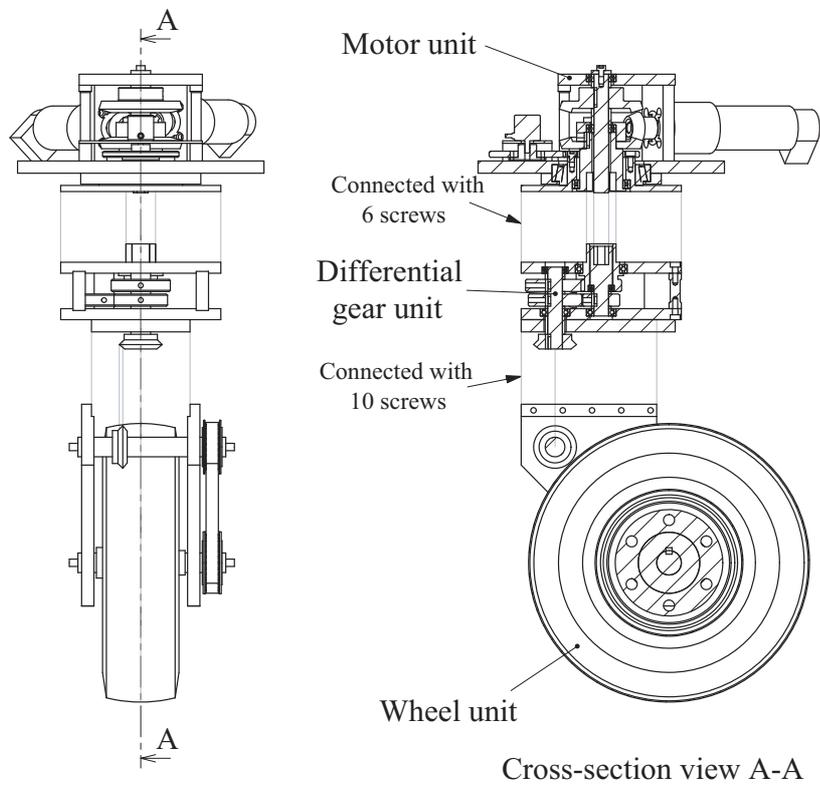


Fig. C.2 Illustration of divided DDSS unit

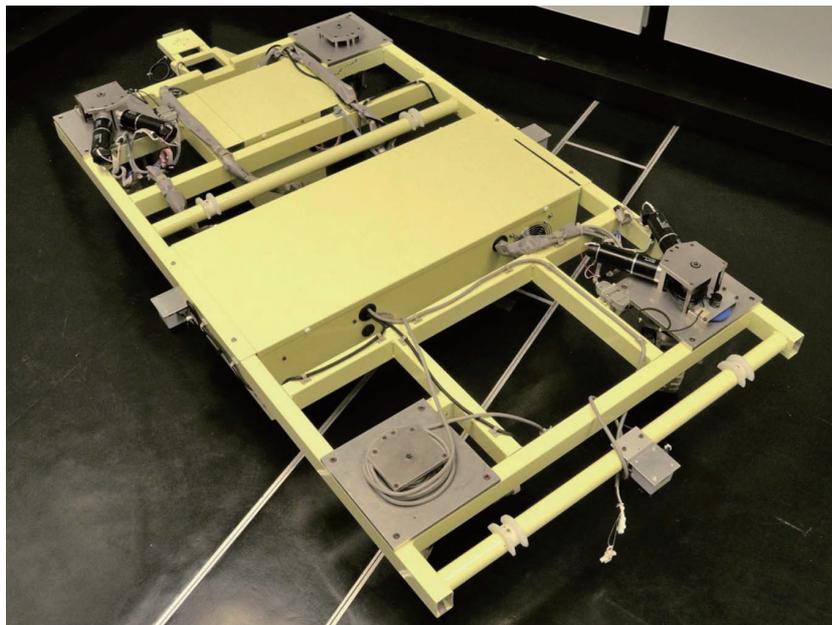


Fig. C.3 Driving unit of OMB

Table C.1 Specification of drive unit -part 1-

Wheel	Maker	CHUBU-SANGYO Co.,Ltd.
	Model	GC2.50-4 (/駆動用)
	Diameter	208[mm]
	Width	62[mm]
DC servo motor	Maker	maxon Japan CO.,Ltd.
	Model	RE40-148867
	Rated output	150[W]
	Rated notational velocity	7580[rpm]
	Nominal voltage	24[V]
	Maximum torque	191[mNm]
Gear head	Maker	maxon Japan CO.,Ltd.
	Model	GP42C-203119
	Gear ratio	15/1
Encoder	Maker	maxon Japan CO.,Ltd.
	Model	HEDL 5540-110514
	Resolution	500[pulse/rev]
	Power supply	± 5 [V]
DC servo amplifier	Maker	maxon Japan CO.,Ltd.
	Model	EPOSP 24/5 & EPOS2 50/5-347717
	Supply voltage	11-50[V]
	Input voltage	± 10 [V]
	Maximum output voltage	$0.9 \times V_{CC}$ [V]
	Maximum output current	10[A]
Absolute encoder	Maker	Omron CO.,Ltd.
	Model	E6J-AG1C
	Resolution	256[pulse/rev]
	Max. response frequency	20[kHz]
	Power supply voltage	5[V]
	Output code	Gray code

に示す。OMBに搭載されたDDSSの制御にはマスタードライバのEPOSPとスレーブドライバのEPOS2を混合して用いており、OMWとは構成が異なる。

C.2 制御ユニット

OMBに搭載した制御システムの構成をTable D.1に示す。ベッドの制御には、OMWと同様にPLCを用いる。OMWとほぼ同等の構成となっているが、OMBでは駆動輪が少ない分入力点数が少ないなど様々な点で異なる。

Table C.2 Specification of drive unit -part 2-

Spur gear	Maker	KOHARA GEAR INDUSTRY CO., Ltd.
	Model	Z_A : SS1.5-20, Z_B : SS1.5-18 Z_C : SS1.5-30, Z_C : SS1.5-27
	Gear ratio($Z_A/Z_C = Z_B/Z_C$)	2/3
Bevel gear	Maker	KOHARA GEAR INDUSTRY CO., Ltd.
	Model	SB1.5-4515 & SB1.5-1545
	Gear ratio	1/3
	Model	MM2-20
	Gear ratio	1/1
Timing pulley	Maker	Tsubakimoto Chain CO.
	Model	HTPA-K24S5M-100 & K30S5M-100
	Gear ratio	4/5

OMWと同様に、OMBにもタッチパネルが搭載されている。タッチパネルインターフェースの外観をFig. C.4に、仕様をTableに示す。OMBに用いるタッチパネルはハンディタイプのものであり、主に実験時の各種パラメータの書換えやデータレジスタの参照、接点の切替等を目的としている。

C.3 パワーアシストハンドル

OMBもOMWと同様にパワーアシストシステムによる操作インターフェースを有する。6軸力覚センサの仕様等についてはOMWと同じであるため本節では省略する。操作用のハンドルは、Fig. C.5に示すように、ヘッドボードの上に6軸力覚センサを介して取り付けられている。



Fig. C.4 Touch-panel

Table C.3 Specification of control system

Maker		Mitsubishi Electronics Corp.
Power-supply unit	Model	Q63P
	Input voltage	DC 24 [V]
	Output voltage	DC 5 [V]
	Output current	6 [A]
CPU unit	Model	Q04UDHCPU
	Communication port	USB, RS-232
DC input unit	Model	QX42
	Input port	62 points
	Input voltage	DC 24 [V]
Relay output unit	Model	QY40P
	Output port	16
	Rated voltage	DC 12-24 [V]
D/A conversion unit	Model	Q68DAVN
	Channel	8
	Output voltage	± 10 [V]
	Resolution	16[bit]
A/D conversion unit	Model	Q68ADV
	Channel	8
	Input voltage	± 10 [V]
	Resolution	16[bit]
Serial communication unit	Model	QJ71C24N-R2
	Interface	RS-232 (D-Sub 9P)
	Channel	2
	Transmission rate	230400[bps](max.)

OMW のハンドルと異なる点は、操作者が触れる (握る) 部分までの距離であるが、本章でも述べたとおり、従来研究にて開発されたファジィ推論による操作意図推定を応用することで操作性の改善が可能となった。

C.4 制御システムの構成

本節では、OMW の制御システムの構成について述べる。OMW の制御構成を Fig. C.6 に示す。

車両の制御には、PLC とモータドライバの EPOSP を用いる。DDSS のモータ制御には EPOS2 が用いられるが、EPOS2 はスレーブ機でありスタンドアロンで動作できず、上位機種によって操作しなければならない。スレーブ機への通信方法には CAN Open 規格が用いられているが、PLC では CAN 通信を行うことが出来ないため、プログラムに基づいてスタンドアロン動作を行う EPOSP を上位機種として使用した。また、PLC からモータドライバへの各種指令は

Table C.4 Specification of touch-panel

Maker		Mitsubishi Electronics Corp.
Model		GT1155HS-QSBD
LCD panel	Display type	STN LCD panel
	Maximum resolution	320×240(VGA)
	Screen size	5.7[inch]
	Maximum color	16
	Maximum brightness	350[cd/m ²]
Touch-panel	Touch-panel	Matrix resistance film
	Touch input	Finger, Pen
	Number of touch keys	300(50×20)
	Touch durability	1,000,000
Mechanical switch		6(Push switch), 1(Dead man's switch), 1(Emergency stop switch)
Communication port		USB, RS-232
Power consumption		Maximum 9.84[W]
Dimension		176(W)×220(H)×93(D)[mm]
Weight		1.0[kg]

アナログ信号を用いる。車体状態と操作指令に基づく各モータの角速度の計算や、各モータドライバへの指令等は PLC を用いて行い、EPOS2 に与えられたアナログデータを EPOSP にて解析し、EPOS2 へ指令を与えることで車体を制御する。また、各モータの角速度等の情報は、EPOSP にて EPOS2 の状態を読み取り、アナログ信号出力の指令を与えることで PLC へ送ら

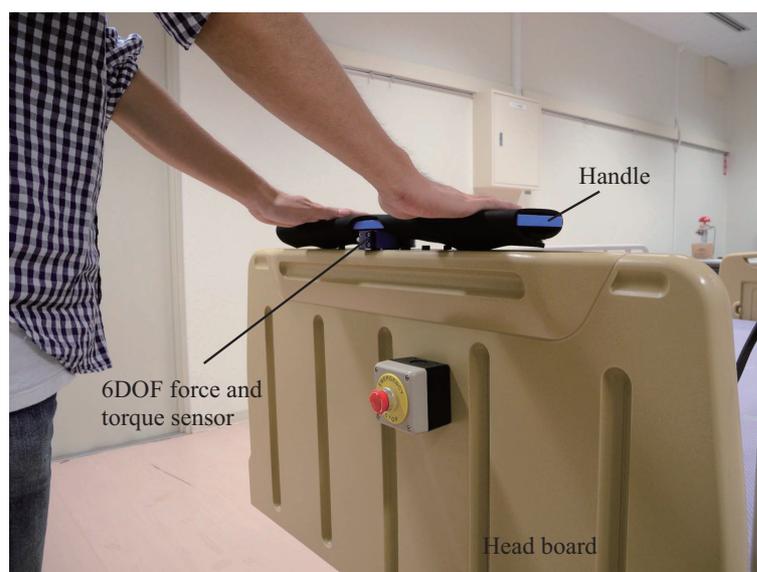


Fig. C.5 Detail of the power-assist handle

れる。PLC では A/D 変換ユニットを介して、角速度等の情報が得られる。

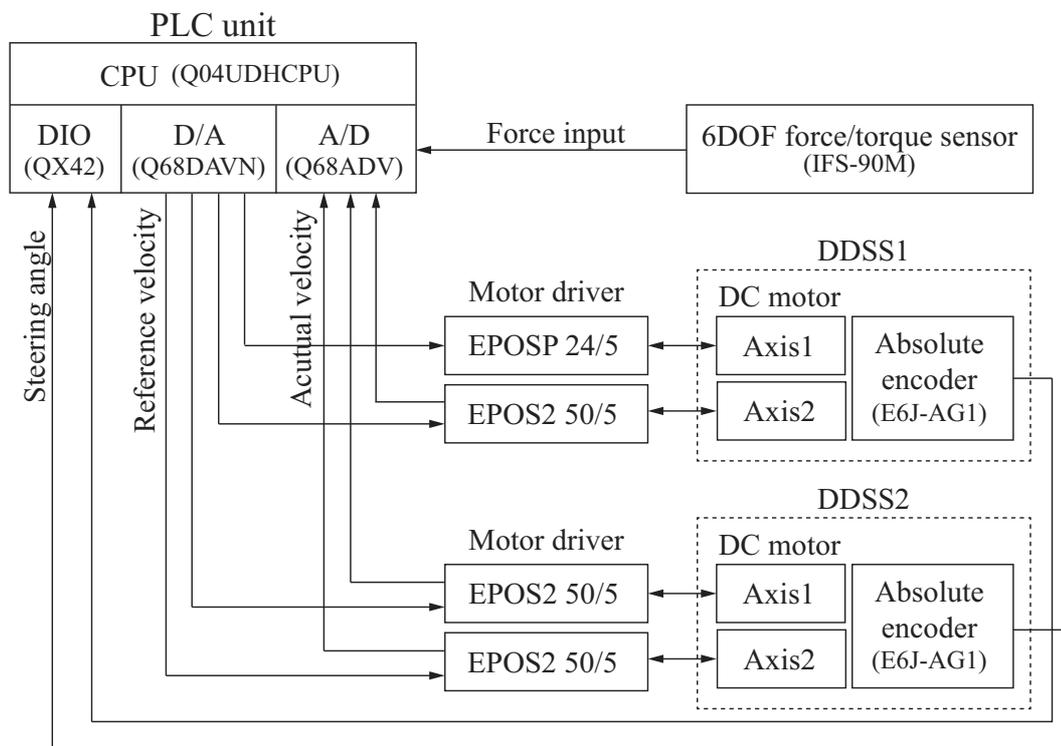


Fig. C.6 Block diagram of control unit

付録D 3輪全方向移動プラットフォームの構成

本章では、3D-OMPの機器構成について述べる。

D.1 駆動ユニット

3D-OMPの駆動ユニットの図をFig. D.1に示す。3D-OMPで用いられるDDSSはベッドのものと同様であり、120[deg]ごとに配置されている (Fig. C.1およびFig. C.2, Table C.1, Table C.2参照)。

D.2 制御ユニットおよびシステムの構成

全方向移動車いすは、車両の制御にPLC(Programable Logic Controller)を使用していた。PLCは、工場などの自動機械の制御に用いられ、プログラムの書き換えが容易であり、A/D変換やDIOなどのユニットを用途に応じて変更できるため、開発の際に有効である。しかし、プログラミング言語はラダー図であり、計算は通常1つずつしか行えないため、分解する必要がある。

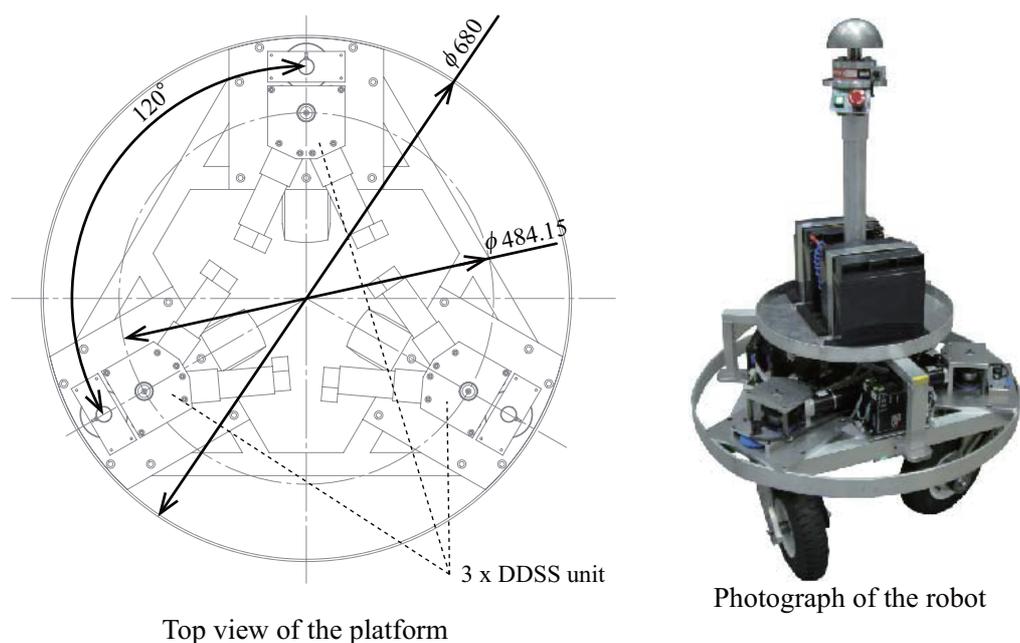


Fig. D.1 Overview of Omni-carrier

ある他、プログラム全体の見通しが悪いなどの問題があった。そこで本ロボットでは、Interface社製のPCコントローラを用いることにした。PCコントローラは、組み込み用コントローラであり、対振動性などが高く、Windowsベースで開発が可能であるため、C++などの言語を用いてプログラミングが可能である。また、A/D変換やDIOなどの制御ユニットを用途に応じて4つまで内蔵できるため、汎用性が高い。Interface社製PCコントローラによる制御機器の構成をFig. D.2に示す。

制御ユニットは、maxon社製モータドライバ(EPOS2)との通信のためのCANユニット、車輪操作角度計測用の絶対値エンコーダのデータ取得のためのDIOユニット、パワーアシスト制御用の6軸力覚センサのデータ取得のためのA/D変換ユニットを使用する。これまで、maxon社製モータドライバとCPU間のデータのやり取りはアナログ信号にて行っていた。モータドライバは、エンコーダ値やモータ速度、電流値などを計測し、CAN通信にて外部へ送信可能であるが、アナログ信号を用いてデータのやり取りを行う場合、アナログ信号ポートの関係から、同時に複数の情報をやり取りすることができなかった。新たに導入したシステムにより、モータに関する様々なデータの取得が可能となった。また本機器では、パワーアシストのためのセンサ入力をUSBにより取得する。センサの仕様をTable D.2に示す。

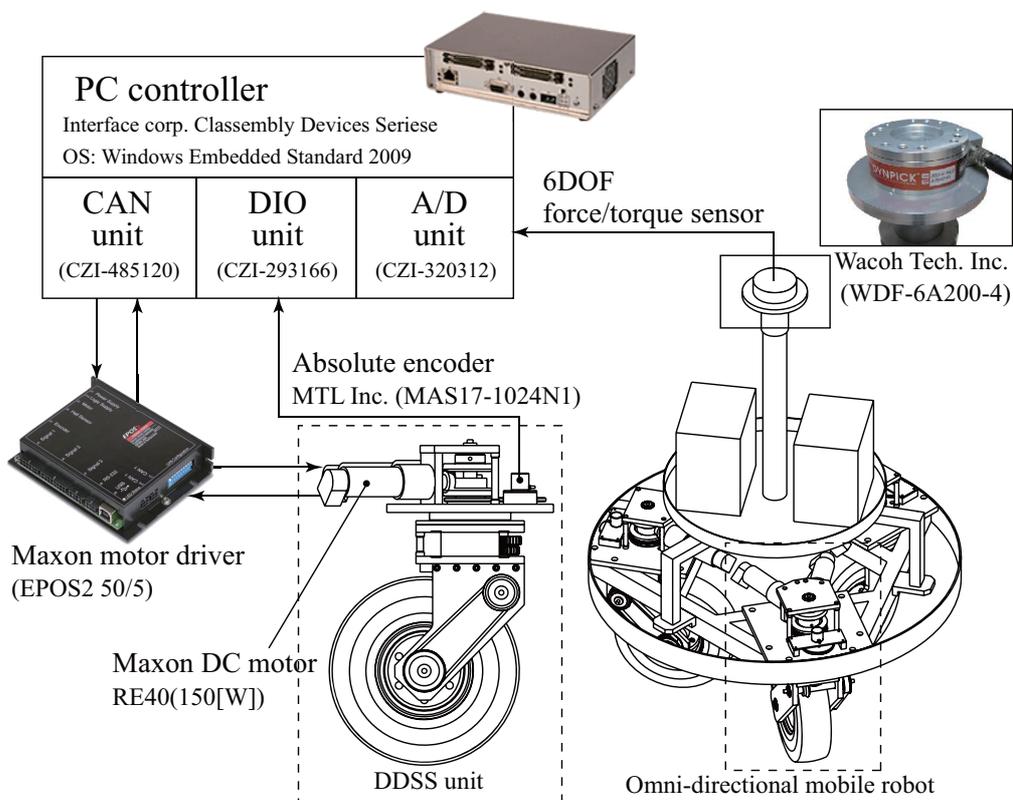


Fig. D.2 Configuration of control system

Table D.1 Specification of control system

Maker		Interface corp.
PC controller	Series	I/O Classembly Device
	OS	Windows Embedded Standard 2009
	CPU	Intel Atom Processor Z530 1.6GHz
	RAM	1 GB
	Storage	SSD 4 GB
	Ports	USBx4, RS-232Cx2, LANx1
	Input voltage	DC 6~ 36 [V]
	Size	180(W)x118(D)x44.2(H)
CAN unit	Model	CZI-485120
	Communication mode	CAN 2.0B x 2 Channel
	Baud rate	60kbps ~ 1Mbps
DIO unit	Model	CZI-293166
	I/O port	48 Ports (convertible)
	I/O voltage	DC 5 ~ 24 [V]
A/D unit	Model	CZI-320312
	Channel	16
	Resolution	12 bit
	Input range	$\pm 5, \pm 10$ [V]

Table D.2 Specification of force sensor

Maker	Wacoh Tech Inc.
Model	WDF-6A200-4
Capacity of F_x - F_z	± 200 [N]
Capacity of M_x - M_z	± 4 [Nm]
Diameter	80 [mm]
Height	32.5 [mm]
Mass	0.30 [kg]
Output form (resolution)	USB (14 bit)
Sampling interval	2.5 ksp/s

