

博士学位論文

# 球体駆動式全方向移動機構に関する研究

石田 秀一

2013年3月

九州工業大学大学院生命体工学研究科



## 論文要旨

先端産業であるロボット技術は、産業のみならずサービスロボットや特殊環境用ロボットなど様々なフィールドで活用されている。ロボットがタスクを実行するうえで、その作業効率を決定する重要な要素として移動性能が挙げられる。現在、最も広く普及している移動機構は車輪型である。この典型である自動車（駆動輪＋操舵輪）は、真横に移動することが出来ず目的位置へは切り返し動作を繰り返す必要があり、姿勢を自由に制御することが出来ない。この移動方向の制限克服を目的として全方向移動機構の開発が行われている。

全方向移動機構は、非ホロノミックな全方向移動機構、ホロノミックな全方向移動機構の2種類に分類できる。前者は、任意の方向に瞬時に速度を出すことができず、移動に時間を要する。後者は、任意の方向に瞬時に速度を出すことができ、3自由度（位置、姿勢）を独立に制御可能である。姿勢の変化を伴いながら移動を行えるなど、移動性が非常に高い。しかしながら、高度な移動性を実現するため必然的に機構構造が複雑になってしまい、制御が複雑化しているなどの問題がある。また、実環境を想定した走行実験や評価がこれまで十分に行われておらず、実用化への応用を阻んでいると指摘されている。本論文では、全方向移動機構における移動性能と構造の複雑さのトレードオフに対して、両者のバランスに優れた球体駆動式全方向移動機構を提案し、運動学と走行性能の検証に加え、移動ロボットへの応用展開について述べている。

球体を駆動輪に用いた全方向移動機構では、走行安定性を確保するために任意の方向に球体を駆動させることが望ましい。しかしながらアクチュエータの増加により生じる過拘束問題は、アクチュエータ間の精密な動作同期が必要となるなど制御が複雑化する。そこで本研究では、3つのアクチュエータによって3つの球体を任意方向に駆動させるホロノミックな全方向移動機構を提案する。過拘束問題を回避するため、アクチュエータの配置を工夫し、シンプルな機構構造を実現した。運動学妥当性の検証のため1つの球体を用いた駆動の検証や、基本的な走行性能として直進、左右、斜め、旋回の動作における移動精

度の計測を行った．さらに実環境での運用を想定し，段差，溝，斜面に対する走行性能の検証を行なった．

ここで，提案機構の有用性検証のため，プラットフォームとして2つの移動ロボットへ応用展開を行った．まず，福祉分野におけるリハビリテーションロボットとして，杖歩行の習得・習熟の効率的な支援を目的とした歩行訓練支援ロボットに適用を行った．訓練者が歩行訓練中にロボットへ体重や力をかけた状態において，コントロールを失うことなく全方向移動が行えるか検証し，本提案機構の利点を生かした歩行訓練システムを提案した．次に，同分野における電動車いすへの適用を試み，全方向に移動が可能な電動車いすを提案し，実環境での使用を想定した検証を行なった．また，全方向移動機構の実用化において克服すべき問題の1つである安全性について取り組んだ．全方向移動という極めてフレキシビリティが高い移動には，操作ミスなどによって人や壁への衝突が懸念されるなどリスクが伴う．この課題に対してセンサを単に組み合わせるだけでなく，安価な可変抵抗器を応用し，3つの可変抵抗器によって全方向の衝突を検知する装置を提案した．開発した全方向衝突検知装置の特性を検証するため，全方向移動機構へ実装し評価を行った．

本論文では，以下の手順で研究成果を報告する．第1章では，研究の背景と全方向移動機構に関する従来研究の紹介，および研究目的について述べている．第2章では，本研究で対象とする球体を用いた全方向移動機構における駆動原理について述べ，3つの球体と3つのアクチュエータにより構成されるホロノミックな球体駆動式全方向移動機構を提案している．運動学の妥当性を検証するために試作機を開発し，基本的な動作検証および，走行実験を行っている．また，屋内における運用で移動の障害となる段差，溝，斜面の外乱に対する走行性能の検証を行っている．第3章では，開発した球体駆動式全方向移動機構をプラットフォームとして，福祉分野におけるリハビリテーションロボットへ応用している．杖歩行の習得・習熟の効率的な支援を目的とした歩行訓練支援ロボットの開発を行い，プラットフォームの有用性について述べている．第4章では，前章と同様にプラットフォームとして全方向に移動が可能な電動車いすの開発を行っている．屋内での運用に向けた走行性能の検証を行っている．第5章では，全方向移動機構の実用化へ必要不可欠な安全対策について述べている．全方向に対応した衝突検知装置の開発を行い，その精度や

特性について述べている。第6章では、本研究で得られた新しい知見をまとめ、結論としている。



# 目次

第1章	研究の背景と目的	1
1.1	研究の背景	1
1.2	全方向移動機構の従来研究	4
1.2.1	フリーローラ付き車輪を用いた全方向移動機構	4
1.2.2	車輪を用いた全方向移動機構	6
1.2.3	球体を用いた全方向移動機構	8
1.3	本研究の目的	10
1.4	本論文の構成	11
第2章	球体駆動式全方向移動機構の開発	12
2.1	はじめに	12
2.2	駆動原理	12
2.3	球体駆動式全方向移動機構の設計	14
2.3.1	機構の構成	14
2.3.2	運動学	17
2.4	全方向移動機構の試作	23
2.5	1つの球体を用いた駆動検証	27
2.6	基本走行性能の検証	36
2.6.1	並進直進運動	38
2.6.2	並進左右運動	42

2.6.3	斜め運動 . . . . .	46
2.6.4	旋回運動 . . . . .	50
2.7	実環境における走行性能の検証 . . . . .	54
2.7.1	段差乗越え運動 . . . . .	55
2.7.2	溝踏破運動 . . . . .	56
2.7.3	斜面登坂運動 . . . . .	57
2.7.4	球体およびロータの耐久性 . . . . .	58
2.8	まとめ . . . . .	59
第3章	歩行訓練支援ロボットの開発 . . . . .	62
3.1	はじめに . . . . .	62
3.2	歩行介助と杖歩行 . . . . .	64
3.2.1	歩行介助 . . . . .	64
3.2.2	杖歩行 . . . . .	65
3.3	歩行訓練システムの概要 . . . . .	67
3.3.1	訓練システム . . . . .	67
3.3.2	訓練要素 . . . . .	67
3.3.3	介助要素 . . . . .	69
3.3.4	杖歩行訓練シーケンス . . . . .	69
3.4	歩行訓練ロボットの試作 . . . . .	70
3.4.1	要求要件 . . . . .	71
3.4.2	全方向移動機構 . . . . .	72
3.4.3	視覚フィードバック . . . . .	75
3.4.4	状態取得 . . . . .	75
3.4.5	聴覚フィードバック . . . . .	78
3.5	歩行訓練ロボットを用いた訓練 . . . . .	78
3.6	まとめ . . . . .	80



第4章	全方向電動車いすの開発	81
4.1	はじめに . . . . .	81
4.2	球体駆動式全方向移動機構の試作 . . . . .	83
4.3	全方向電動車いすの試作と走行性能の検証 . . . . .	89
4.4	まとめ . . . . .	93
第5章	全方向衝突検知装置の開発	94
5.1	はじめに . . . . .	94
5.2	全方向衝突検知装置の試作 . . . . .	96
5.3	運動学 . . . . .	99
5.4	実験 . . . . .	102
5.4.1	ポテンシオメータの校正 . . . . .	102
5.4.2	衝突検知 . . . . .	103
5.5	まとめ . . . . .	108
第6章	結言	109
6.1	本研究の結論 . . . . .	109
6.2	本研究の展望 . . . . .	110
	参考文献	111
	謝辞	121
	業績リスト	124



# 目次

1.1	Omni wheel . . . . .	5
1.2	Offset steered . . . . .	7
1.3	Ball wheel drive mechanism (top view) . . . . .	9
2.1	Drive principle . . . . .	13
2.2	Rotation velocity (top view) . . . . .	13
2.3	Vehicle construction . . . . .	15
2.4	3D CAD design of ball wheel drive mechanism . . . . .	16
2.5	Coordinate system . . . . .	18
2.6	Velocity . . . . .	19
2.7	Whole view of omnidirectional vehicle . . . . .	24
2.8	Control of omnidirectional vehicle . . . . .	26
2.9	Control system of omnidirectional vehicle . . . . .	26
2.10	Direction of rotation . . . . .	28
2.11	Measurement device . . . . .	28
2.12	Experiments of driving a ball wheel . . . . .	29
2.13	Velocity command of longitudinal driving a ball wheel . . . . .	30
2.14	Velocity command of lateral driving a ball wheel . . . . .	31
2.15	Velocity command of oblique driving a ball wheel . . . . .	32
2.16	Experimental result of longitudinal driving a ball wheel . . . . .	33

2.17	Experimental result of lateral driving a ball wheel . . . . .	34
2.18	Experimental result of oblique driving a ball wheel . . . . .	35
2.19	QuickMAG . . . . .	37
2.20	Experiment of longitudinal motion . . . . .	39
2.21	Velocity command of longitudinal motion . . . . .	40
2.22	Experimental result of longitudinal motion . . . . .	41
2.23	Experiment of lateral motion . . . . .	43
2.24	Velocity command of lateral motion . . . . .	44
2.25	Experimental result of lateral motion . . . . .	45
2.26	Experiment of oblique motion . . . . .	47
2.27	Velocity command of oblique motion . . . . .	48
2.28	Experimental result of oblique motion . . . . .	49
2.29	Experiment of turning motion . . . . .	51
2.30	Velocity command of turning motion . . . . .	52
2.31	Experimental result of turning motion . . . . .	53
2.32	Step overcoming motion . . . . .	55
2.33	Gap traversing motion . . . . .	56
2.34	Slope climbing motion . . . . .	57
2.35	Resistance against of ball wheel and rotor . . . . .	58
2.36	Low cost ball wheel drive mechanism with MC nylon . . . . .	61
3.1	Classification of cane walk . . . . .	66
3.2	Gait training system Reif Co.,Ltd. ( <a href="http://reif.p2.bindsite.jp/businesscontents.html">http://reif.p2.bindsite.jp/businesscontents.html</a> (accessed January 7, 2013)) . . . . .	67

3.3	Sequence of gait training system	
	three-point gait . . . . .	69
3.4	Prototype of a gait training robot . . . . .	70
3.5	Projection image of a target position . . . . .	71
3.6	Ball wheel drive mechanism . . . . .	73
3.7	Image projection . . . . .	75
3.8	Gait evaluation . . . . .	77
3.9	Training with gait training robot . . . . .	79
4.1	3D CAD design of ball wheel drive mechanism . . . . .	85
4.2	Prototype of a omnidirectional vehicle . . . . .	87
4.3	Control system of omnidirectional vehicle . . . . .	87
4.4	Prototype of a omnidirectional electric wheelchair . . . . .	89
4.5	Joystick . . . . .	90
4.6	Lift omnidirectional electric wheelchair up . . . . .	91
4.7	Disturbances . . . . .	92
5.1	3D CAD design of collision-detecting device . . . . .	97
5.2	Sensor unit of collision detecting device . . . . .	98
5.3	Layout of the sensor unit . . . . .	99
5.4	Bumper movement by collision . . . . .	100
5.5	Analog output with the potentiometer . . . . .	102
5.6	Prototype of collision-detecting device . . . . .	103
5.7	Input displacement . . . . .	104
5.8	x-axis collision . . . . .	105
5.9	y-axis collision . . . . .	106
5.10	$\theta$ -axis collision . . . . .	107



# 表目次

2.1	Specification of omnidirectional vehicle . . . . .	25
3.1	Specification of omnidirectional vehicle . . . . .	74
4.1	Maximum dimension . . . . .	83
4.2	Specification of omnidirectional vehicle . . . . .	88
4.3	Moving ability . . . . .	90





# 第 1 章

## 研究の背景と目的

### 1.1 研究の背景

先端産業であるロボット技術は、産業用ロボットだけでなくサービスロボットや特殊環境用ロボットなど様々なフィールドに活用されている。ロボットは、屋内外で人や障害物との共存環境や大規模災害地での特殊環境などで稼働しなければならない。ロボットが有する移動機構の能力は、ロボットがタスクを行う上でその作業効率を決定する重要な要素である。移動機構は多様な環境へロボットを進出させるため、様々な機構が提案されている [1]–[5]。移動機構を機能レベルで注目すると、1次元移動（レール上走行など）、2次元移動（自律型陸上走行車、壁面走行 [6], [7] など）、3次元移動（配管内走行 [8]–[10]、水中遊泳 [11]–[13]、空中遊泳 [14]、宇宙分野 [15] など）に分類できる。ただし本研究では、最も研究が盛んに行われている床面上の2次元移動を対象に取り扱う。2次元移動を移動機構の構造により分類すると、下記の4種類に分けられる [4]。

- (1) 車輪型移動機構
- (2) クローラ型移動機構
- (3) 脚型移動機構
- (4) その他：特殊機構や、(1)～(3)の組み合わせ

## 2 第1章 研究の背景と目的

また、これらが移動するフィールドには平面，斜面，段差，階段，不整地などが想定される．後者になる程，ロボットの進出範囲や移動領域を制限する要因となる．これを克服するため，様々な不整地移動ロボットが提案されている．不整地移動ロボットを分類すると，車輪やクローラの形状を変形させることにより不整地走行を可能とした移動機構変形型機構 [16]–[18]，段差・凹凸面への接触時にリンク機構によってロボット本体の形状を変化させる本体変形型機構 [19]–[22]，節型昆虫を模した体幹型機構 [23]–[25]，不整地移動への適応性が最も高い(4)脚型移動機構に車輪やクローラを装備したハイブリッド型機構 [26]–[28]，複数のロボットによる協調作業を行う協調型機構 [29], [30] の5種類に分けられる [4]．これらの不整地移動ロボットは，災害環境などで特定の用途においてその高い不整地走行性能が求められる．

しかしながら，我々の日常的な環境や，工場やオフィスなどの環境では完全に平坦な床面ではないが，整地環境であると言える．つまり平面走行や段差乗越え能力などが，移動機構に求められる実用的な価値として高いと考えられる．このような環境において現在，最も広く採用されている移動機構は(1)車輪型移動機構である．車輪型移動機構はエネルギー効率が高く，構造・制御が簡易であることや長年に渡るノウハウの蓄積に特徴がある．車輪型移動機構の駆動には対向2輪型や操舵型が知られており，駆動の自由度は最小2で十分である．この2自由度は，移動機構の速度ベクトルの大きさと向きを定めることができる．そのため，平面上の任意の位置へ速度ベクトルの時間積分として到達可能であるが，姿勢は速度ベクトルの向きと従属関係があるため任意に設定することができない．車輪型移動機構の典型である自動車(駆動輪+操舵輪)が，真横に移動できないため目的位置へは繰り返し動作を繰り返す必要があるのは，姿勢を自由に制御できないためである．この移動方向の制限の克服を目的とした全方向移動機構の開発が行われている．

全方向移動は非ホロノミック全方向移動機構，ホロノミック全方向移動機構に分類できる．平面上におけるロボットの運動自由度は位置と姿勢の3自由度である．非ホロノミック全方向移動機構は，任意の方向に瞬時に速度を出すことができないため，全方向への移動に時間かかる．これに対してホロノミックな全方向移動機構は，任意の方向に瞬時に速度を出すことが可能であるため，3自由度を独立制御した自在な移動が行える．次節にお

いて全方向移動機構の従来研究を詳細に説明する .

## 1.2 全方向移動機構の従来研究

全方向移動の実現のために様々な駆動力発生機構が提案されており、大きく分類すると 2 種類となる [4]。1 つは、1 自由度方向に駆動力を発生する機構である。フリーローラ付き車輪は、ある 1 方向にのみ駆動力を発生させることができるが、その方向と垂直な方向には力を発生させることはできない。この特殊車輪を駆動方向が異なるように最低 3 つ取り付けることで全方向移動を実現することができる。もう 1 つは、すべての方向 (2 または 3 自由度方向) に駆動力を発生できる機構である。この機構は駆動力を発生させる方向が多いためアクチュエータの増加を招き、機構が複雑となる同時に制御も困難となりやすい。

### 1.2.1 フリーローラ付き車輪を用いた全方向移動機構

フリーローラ付き車輪は、動輪に特定の方向へ受動回転する機能を持たせたものである。車輪の円周上に複数個のフリーローラを配置した特殊車輪は、現在全方向移動を実現する上で最も広く用いられている。フリーローラ付き車輪は、フリーローラの形状や配置によりさまざまな機構が存在する [31]。車輪の円周上にフリーローラを取り付け機構は、樽状のフリーローラを有するオムニホイール [32]、リング状のフリーローラを有するホイール [33]、異なるサイズのフリーローラを組み合わせ構成されるホイール [29] フリーローラを車軸に対して 45deg 傾けて配置したメカナムホイール [34], [35]、コーン状のフリーローラを有するホイール [36]、車輪の外周をリング状に包囲するよう配置したホイール [37]、フリーローラの形状が球体である機構 [38] などが提案されている。

その他の駆動方式として、フリーローラをクローラに取り付けた機構も提案されており、フリーローラの形状が円筒状の機構や [39]、車輪状の機構がある [40], [41]。球状のフリーローラ自体を回転させる機構が提案されており、異なる回転方向のフリーローラと組み合わせられて用いられる [42], [43]。この球体を分割し位相をずらした機構と分割方式や支持方式は異なるが、Omni-Ball と呼ばれる球状全方車輪が開発されている [44], [45]。この駆動メカニズムをクローラへ応用した円形断面クローラ機構である Omni-Crawler が開発され、クローラの中央に能動回転軸を持たせることで駆動力を任意の方向に発生させ

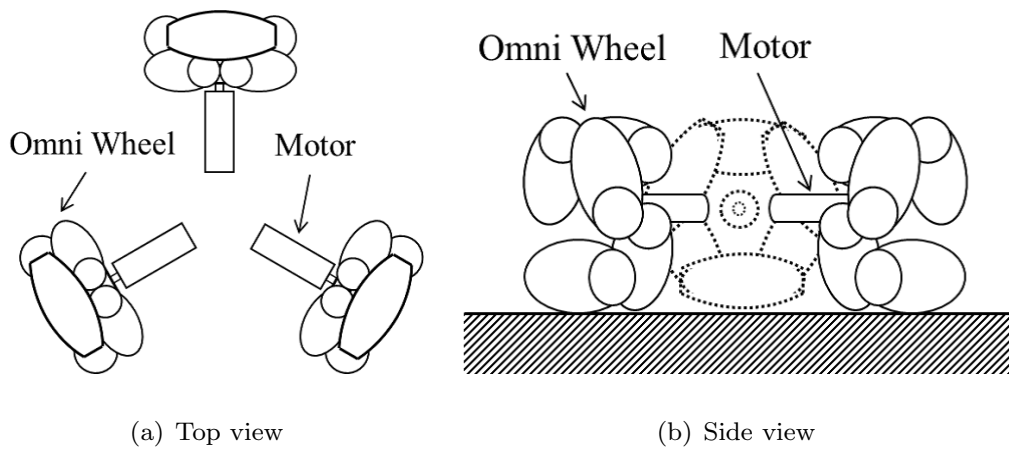


図 1.1. Omni wheel

ることを可能としている [46] . さらに , 円盤状の機構に複数のフリーローラが取り付けられた Omni-Disc と呼ばれる機構や [47] , 車輪の円周上に取り付けられた複数の小車輪を能動回転させる機構により , 接地点において 2 自由度の駆動力を発生させる駆動方式が提案されている [48] , [49] .

ここでオムニホイールを例に , ロボットへの取り付けについて述べる . 複数個のオムニホイールを本体へ配置するためには様々な方法が考えられるが , 3 つのオムニホイールを 120 度毎に配置する方法や 4 つのオムニホイールを 90 度毎に配置する方法がその多くを占める . オムニホイールは個々の駆動速度ベクトルの向きを固定し大きさのみを変化させるため , 平面 3 自由度運動のためには図 1.1 のように向き異なる 3 つのオムニホイールがあれば十分である . これに対し 4 つのオムニホイールを用いる利点としては , 接地の安定性の向上や車輪の方向を直交させることで制御を容易とできることなどが挙げられる . しかしながら , 通常オムニホイール 1 つに対して 1 つのアクチュエータで駆動力を発生させるため , 4 つのオムニホイールを用いた場合は 1 自由度冗長となり , アクチュエータ間に回転速度の従属関係が生じる . そこで 4 つのオムニホイールを 4 つのアクチュエータで駆動させることで , 接地の安定性を得られながら , 平面 3 自由度を独立に制御できる駆動伝達機構が提案されている [32] .

フリーローラ付き車輪を用いた全方向移動機構では , その形状の複雑さ , 床面に対して不連続な接地であるため振動を生じること , 乏しい段差乗越え能力が指摘されている . 段

## 6 第1章 研究の背景と目的

差乗越えについては、車輪の直径ではなくフリーローラの小さな直径によりその性能が決定されることや、フリーローラ自体に駆動力を持たないことが小さな凹凸であっても乗越えが不可能となる要因である。このような問題が指摘されつつも、既存の車輪をオムニホイールなどの特殊車輪に置き換えるだけで全方向移動を簡単な制御で実現できることが、この方式を広く普及させたと考えられる。

### 1.2.2 車輪を用いた全方向移動機構

車輪を用いた全方向移動機構は、その特徴として車輪にステアリングを有している。中野らによって開発された全輪操舵型の非ホロノミックな全方向移動機構は、全方向移動機構における位先駆的な研究として位置づけられている [50]。この機構は、一つの車輪ユニットに駆動と操舵を2つのアクチュエータにより独立に駆動させることが可能である。しかし、並進移動時には進行方向に車輪の向きをそろえる準備動作が必要である。

通常の操舵輪は2つのアクチュエータで構成されているが、運動の瞬間においては駆動用のアクチュエータのみが機能する1自由度の運動であるといえる。つまり、操舵用のアクチュエータは準備動作のみに用いられている。この要因として、図 1.2(a) のように車輪の接地点と操舵軸が交わるように配置されていることが挙げられる。この接地点と操舵軸にオフセットをつけることで、操舵車輪の運動を2自由度とする機能が期待され、これまでもホロノミックな全方向移動機構を目指した機構が提案されている。

ここで図 1.2 に操舵車輪の分類を示す。図 1.2(a) は前述したように、オフセットをつけておらず非ホロノミックな全方向移動のみが可能であり、従来より多く提案されている。[51], [52] また、図 1.2(b) は操舵軸の配置を車輪の転動方向に対して垂直に持たせたものであり、従来と同様に非ホロノミックな全方向移動のみ可能となる。このオフセットの取り方では、操舵軸を回転させた場合に車輪の接地点を中心に円運動が行われる。この回転運動による並進速度と車輪の回転による回転速度は常に平行となる。そのため、両軸を同時に駆動した場合であっても、各瞬間には1自由度の運動であるといえる。中野らによって開発された全輪操舵型の全方向移動機構もこの方式を用いている [50]。対して、図 1.2(c) のように、操舵軸を車輪の転動方向にオフセットを持たせた方式では、ホロノミックな全方向移動が可能となる [53]–[55]。この方式では、操舵軸を回転させた場合に生じ

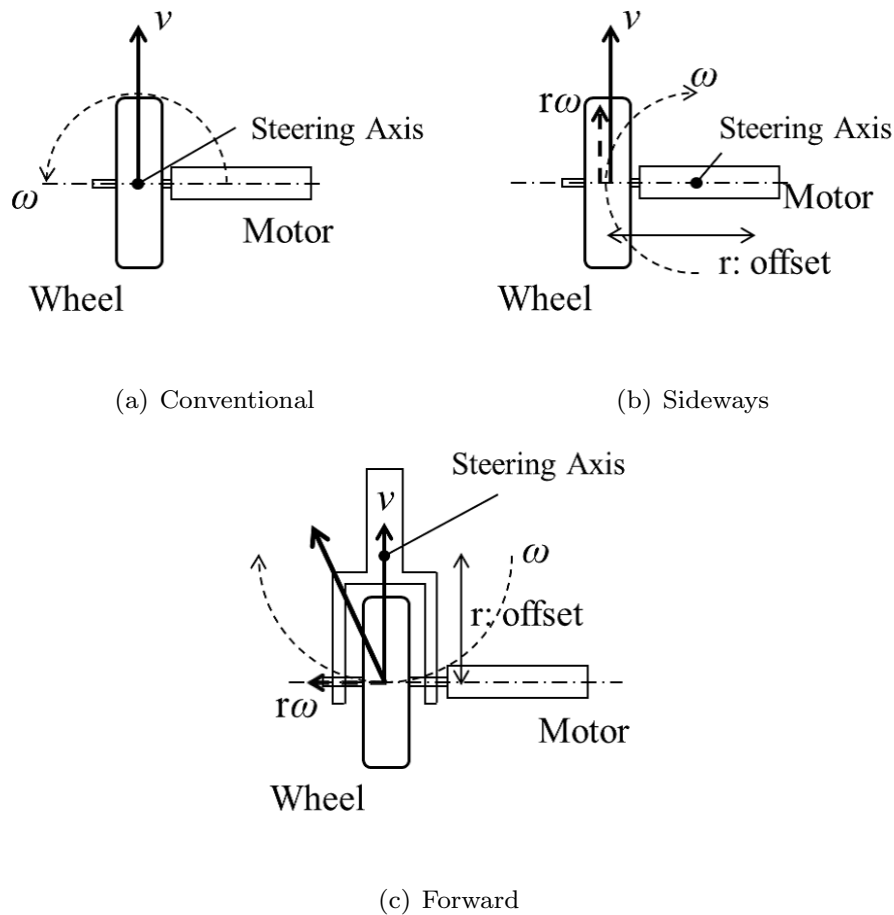


図 1.2. Offset steered

る並進速度と車輪の回転速度が直交するため、速度の向きを任意の方向にとることができる。しかしながら、操舵車輪において操舵方向と車輪の回転速度に従属関係があり、フリーローラ付き車輪を用いた従来の全方向移動機構に対して制御則が複雑となることや複数の車輪を用いることから冗長自由度の問題が指摘されている。冗長自由度を回避するための双輪キャスト型の駆動機構や [56]、すべての車輪方向を単一のアクチュエータで制御する同期キャスト駆動機構が提案されている [57]。車輪を用いた全方向移動機構ではフリーローラ付き車輪のような特殊車輪を用いることなく、通常のタイヤ車輪を用いることが可能であるため製作の容易さや耐荷重、高い段差乗越え能力などに特徴を有する。

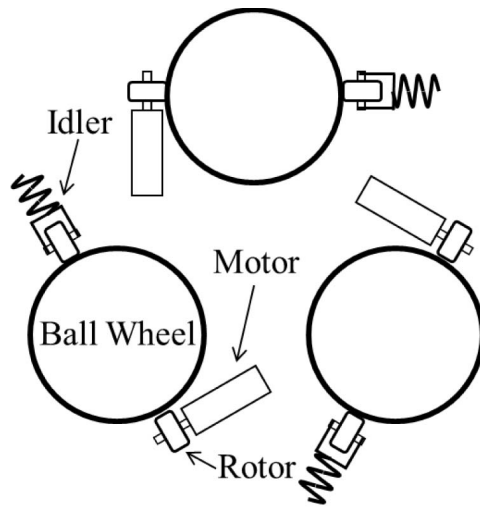
### 1.2.3 球体を用いた全方向移動機構

球体を用いた全方向移動機構では、移動機構全体が球型のものもあるが [58]–[62]，その多くは車輪の代わりに球体を用いた移動機構である．球体を移動機構本体に配置する方式において，球体は全方向移動のために平面並進の任意の方向へ回転する必要がある．駆動方式は，球体をロータによって圧接駆動させる方式が用いられている．

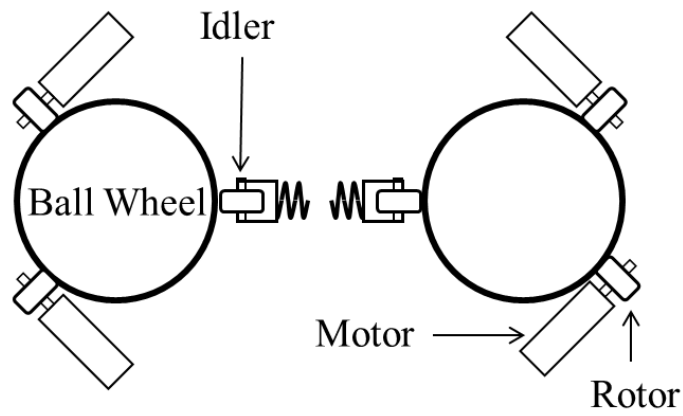
この方式では駆動方向によって 2 通りの方式に分類できる．1 つは球体を 1 方向の駆動させ，それと直交させる方向は受動的に回転させる方式である [63]–[65]．松本らは図 1.3(a) のように構成される全方向移動機構を提案しているが，受動回転を利用する原理はオムニホイールと基本的に同様であり，床面の凹凸等に弱いと言える．もう 1 つは，球体を任意の方向に駆動させる方式である [65]–[68]．この方式では，各球体の駆動速度ベクトルが機構の各球体接地点での速度ベクトルと一致する．従って，床面の凹凸や傾斜路，機構全体の重心移動等の要因があっても走行安定性は高い．この方式の例として野々下による図 1.3(b) や，山田らによる図 1.3(c) が挙げられる．しかしながら，回転させる方向が増加するとともにアクチュエータ数も増加することが制御や保守を困難としている．また他の機構として，クローラを用いてその駆動方向による球体の回転と，トラックを駆動することによる球体の回転方向を直交させた機構も提案されている [69], [70]．

球体を用いた移動機構では、床面との接地方式において車輪を用いた移動機構と比較し、スリップが大きくなる傾向にある．しかしながら，同時に球体という形状は全方向移動を実現するために最も適しているといえる．

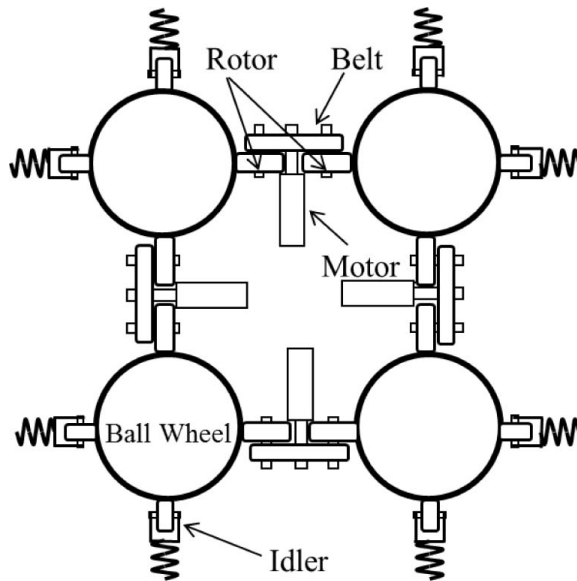




(a) 3 ball wheels - 3 actuators



(b) 2 ball wheels - 4 actuators



(c) 4 ball wheels - 4 actuators

図 1.3. Ball wheel drive mechanism (top view)

### 1.3 本研究の目的

従来提案されてきた全方向移動機構をまとめると、非ホロノミックな全方向移動機構は機構構造は簡単であるが、移動性や制御性に課題を残しており、ホロノミックな全方向移動機構は、移動性や制御性に利点を持つが、機構構造の複雑さ、実環境での使用（段差乗り越え能力）に問題があると言える。また、使用環境も基本的にフラットの床面を想定しており、段差などの外乱に対する実用的な検討は少ない。

全方向移動機構の運用が期待される場所では、多少の段差（数 mm ~ 数十 mm）などは考えられるが、不整地移動機構が必要となる環境はほとんどないと言える。つまり、整地された環境において全方向移動機構には少なくとも多少の段差を乗り越えられる走破能力が有効となる。この走破能力を実現するために専用のセンサやアクチュエータから構成されるユニットを追加することは、機構や制御を複雑化してしまうため、受動的に段差を乗り越えられる移動機構が望ましい。

全方向移動機構の実用的な使用では、簡単な機構と制御で受動的な段差乗り越え能力を有することが有効であると考えられる。現在最も広く用いられているオムニホイールによって構成される全方向移動機構では、上述の要件を満たすことは困難である。筆者は、全方向移動に適した球体を用いた全方向移動機構に注目し、実環境での使用に耐えうる機構の開発を目指している。また、全方向移動という高度な移動性により生じる衝突などのリスクに対して、全方向移動機構に特化した安全対策について同時に開発を行っている。ここで本研究での目的を以下に挙げる。

- (1) シンプルな機構と制御で構成される球体駆動式全方向移動機構の開発
- (2) 実環境を想定した走行性能検証
- (3) プラットフォームとして移動ロボットへの展開
- (4) 全方向移動機構における安全対策

## 1.4 本論文の構成

本論文では、以下の手順で研究成果を報告する。

第1章では、研究背景と全方向移動機構に関する従来の研究、および研究目的について述べている。

第2章では、球体を用いた全方向移動機構の駆動原理および、3つの球体と3つのアクチュエータにより構成されるホロノミックな球体駆動式全方向移動機構の提案について述べている。

運動モデルの妥当性を検証するために、実機を開発し、基本的な走行実験を行っている。また、屋内における運用で移動の障害となる段差、溝、斜面の外乱に対する走行性能の検証を行っている。

第3章では、開発した球体駆動式全方向移動機構をプラットフォームとして、福祉分野におけるリハビリテーションロボットへ応用している。杖歩行の習得・習熟の効率的な支援を目的とした歩行訓練支援ロボットの開発を行い、プラットフォームの有効性について述べている。

第4章では、開発した球体駆動式全方向移動機構をプラットフォームとして、福祉分野における電動車いすへ応用している。全方向に移動が可能な電動車いすの開発を行い、屋内での運用に向けた走行性能の検証を行っている。

第5章では、全方向移動機構の実用化へ必要不可欠な安全対策について述べている。全方向に対応した衝突検知装置の開発を行い、その精度や特性について述べている。

第6章では、本研究で得られた新しい知見をまとめ、結論としている。

## 第 2 章

# 球体駆動式全方向移動機構の開発

### 2.1 はじめに

第 1 章では，これまでに提案されている全方向移動機構の分類について述べた．本研究では，第 1 章で述べた全方向移動機構の内，球体を駆動輪として用いる全方向移動機構に注目した．本章では，球体を回転させる駆動原理について述べ，簡単な制御と機構で構成される全方向移動機構の開発について述べる．開発した全方向移動機構を用いて，基本動作や段差・溝・斜面の実環境での賜与を想定した走行性能の検証を行う．

### 2.2 駆動原理

圧接駆動方式の模式図を図 2.1 に示す．この方式では，球体をロータによる摩擦で駆動させる．球体の回転は球体とロータの接点に働く摩擦力  $f$  と球体と床面の接点に働く摩擦力  $F$  の合力により定まる．アイドラはロータの回転方向における球体との間の滑りがないように力を調整する．つまり， $f > F$  となるように調整が行われる．この合力により規定される球体の回転は，回転方向ベクトルが任意の水平面内を向く．

2 つの摩擦力により規定された回転が，図 2.2 に示すように回転しているとした場合について球体とロータの速度の関係を述べる．ロータの回転速度は，球体の半径と球体とロータの接点における回転半径を減速比  $r/R$  とし，球体の回転速度に乗じたものとなる．球体と床面の間に横滑りは生じず，接触では常に転がり接触となる．しかしながら，ロー

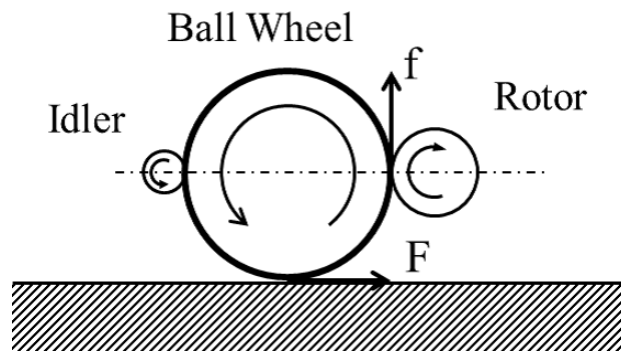


図 2.1. Drive principle

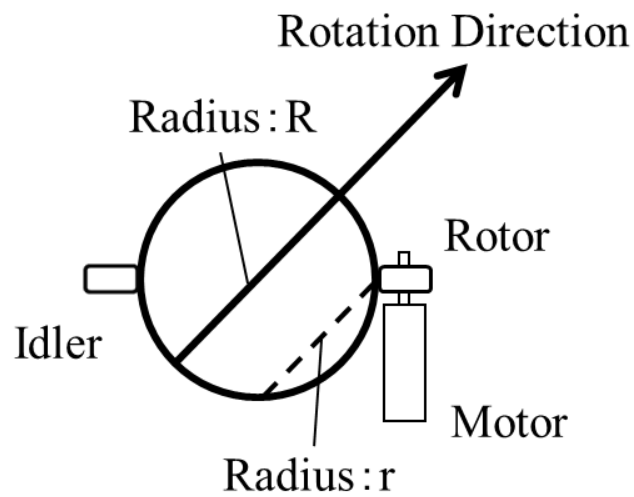


図 2.2. Rotation velocity (top view)

タと球体の接点と球体の中心を結ぶ直線が水平でない場合は、横滑りが生じる。つまり、球体の回転方向とロータの回転方向が不一致となってしまうためである。

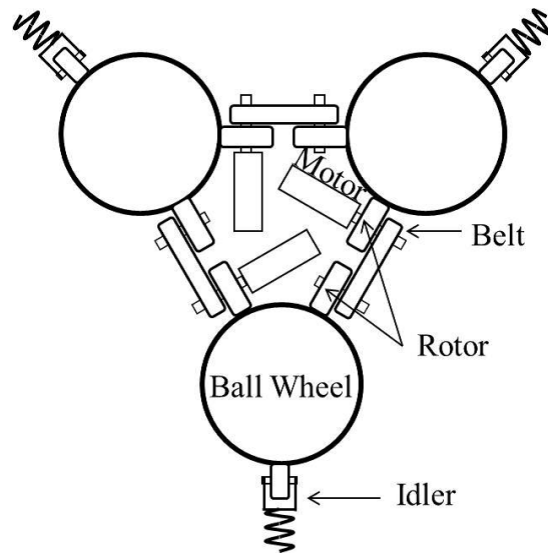
## 2.3 球体駆動式全方向移動機構の設計

### 2.3.1 機構の構成

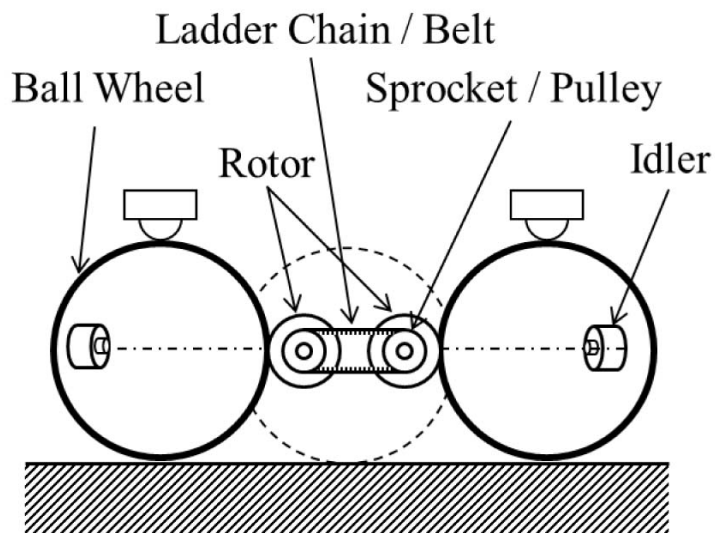
圧接駆動方式を用いた全方向移動機構はこれまで 1.2.3 で述べたようにいくつか提案されている。球体 1 つに対して、1 つのアクチュエータによって駆動させる方式では、受動回転を利用するため機構構造や制御を簡単にできる。しかしながら、走行安定性や段差などの外乱に対して弱くなってしまう。一方、球体を任意の方向に回転させる駆動方式ではアクチュエータ数が増加し、安定性を得る代償に構造・制御が複雑になる。そこで筆者は、このトレードオフの問題に対して、アクチュエータの配置を工夫し、3 つのアクチュエータによって 3 つの球体をそれぞれ任意の方向に回転させるホロノミックな全方向移動機構を提案する。3 つのアクチュエータを用い得ることで過拘束問題を回避し、簡単な機構でありながら、3 つの球体全てを常時駆動輪とできることに特徴を持つ。

ここで、本提案機構の構成図を図 2.3 に示す。このレイアウトは、図 2.3(a) のように 3 つの球体の接地点が正三角形の形状となるよう配置し、各辺にアクチュエータを配置している。アクチュエータからの駆動をチェーンやベルトにより球体間距離確保することで、1 つのアクチュエータは隣り合う球体を同時駆動させることが可能である。図 2.3(b) に示すようにアクチュエータからの駆動は、ベルトによってロータに伝達され、バネを持ったアイドラによってロータに球体を押しつける圧接駆動方式によって球体を回転させる。ロータ及びアイドラは、球体の中心を含む水平面内に球体との接点を持ち、各球体の頂部に配置したボールキャストを用いて球体の回転を保持している。これらの配置により球体の回転方向ベクトルは任意の水平面を向く。各球体は同時に駆動される 2 つのロータによって生じる回転運動のベクトル和によって回転方向が定まる。さらに、3 つの球体の回転運動による合力により、移動機構の平面 3 自由度運動が実現できる。

3D CAD による設計図面を図 2.4 に示す。図 2.4(a) は全方向移動機構の概観図であり、図 2.4(b) に移動機構の上下を逆さにした状態での斜視図、図 2.4(c) に側面図、図 2.4(d) に底面図、図 2.4(e), 2.4(f) に球体の回転保持機構の構造をそれぞれ示している。斜視図、底面図により、本提案機構の 3 つのアクチュエータおよび 3 つの球体の配置が正三角形を



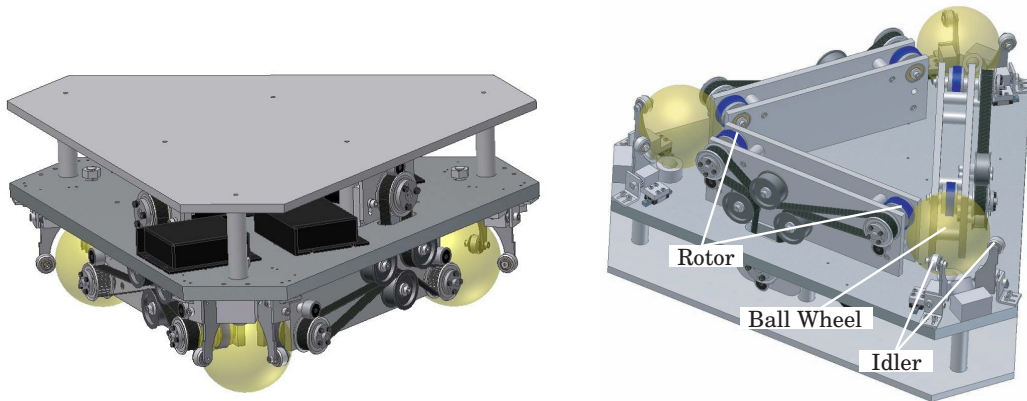
(a) Top view



(b) Side view

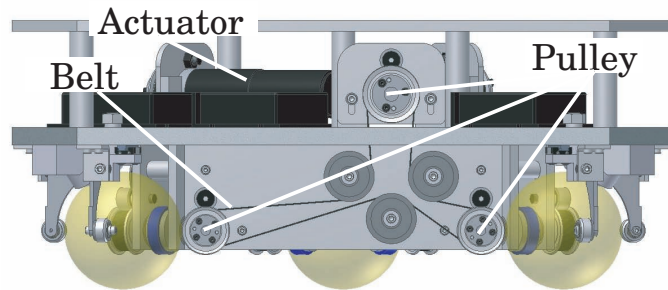
図 2.3. Vehicle construction

基準としたものであることが分かる。また、側面図から分かるようにアクチュエータの回転をタイミングベルトによって伝達させることで、2つのロータを同時に駆動させている。球体の保持には、バネを持った2つのアイドラおよび2つのボールキャストによって回転保持がなされている。

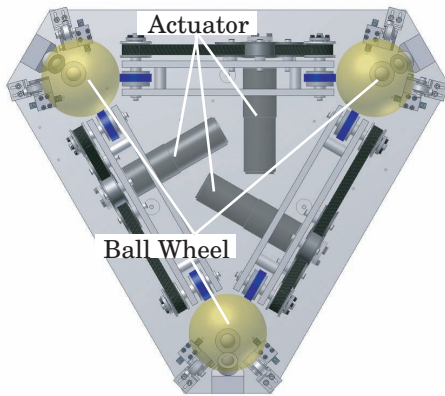


(a) Whole view

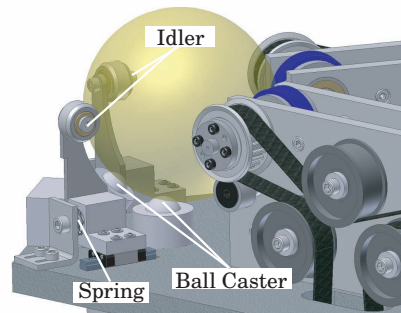
(b) Perspective view



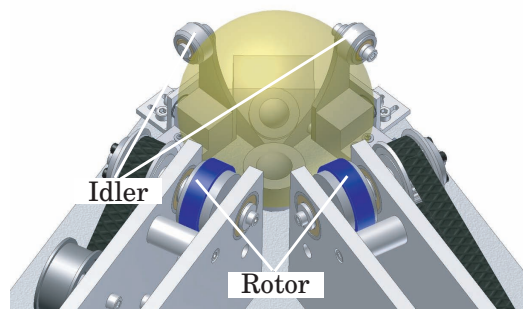
(c) Side view



(d) Bottom view



(e) Support unit (side view)



(f) Support unit (top view)

図 2.4. 3D CAD design of ball wheel drive mechanism



## 2.3.2 運動学

図 2.5(a) に示すように移動機構に固定した座標系を定義する．3 つの駆動用の球体を 1 ~ 3 として三角形の各頂点に配置し，この三角形の内部に原点  $o$  をとる． $y$  軸は球体 2 の接地点から原点方向に， $x$  軸は  $y$  軸と直交する方向にそれぞれとる．球体の番号を球体 1 より反時計周りに与える．更に，原点  $o$  から各球体  $i$  までの距離を  $l_i$  [m] とする．ここで添え字  $i$  は球体の番号を表す．( $i = 1, 2, 3$ )

次に各球体  $i$  に対する座標系を図 2.5(b) に示すように定義する．各球体  $i$  の接地点を原点  $o_i$  とし，移動機構の座標系での原点  $o$  から  $o_i$  に向かう方向に  $y_i$  軸，これと直交する方向に  $x_i$  軸をそれぞれとる．各球体の移動機構座標系からの回転角度を  $\theta_i$  [rad] とする．移動機構座標系での各球体  $i$  の接地点  $o_i$  の座標系は原点  $o$  からの距離  $l_i$  と  $y$  軸と  $o - o_i$  のなす角  $\theta_i$  で表すことができる．(反時計周りを正とする)

図 2.6(a) に移動機構の速度定義を示す．移動機構の原点  $o$  における並進速度の  $x$  軸方向成分を  $v_x$  [m/s]， $y$  軸方向成分を  $v_y$  [m/s]，原点  $o$  周りの反時計周りの回転角速度を  $\omega$  [rad/s] とする．

ここで各球体接地点  $o_i$  での移動機構の  $x_i$  軸方向成分を  $v_{xi}$  [m/s]， $y_i$  軸方向成分を  $v_{yi}$  [m/s] とすると次の関係が成り立つ．

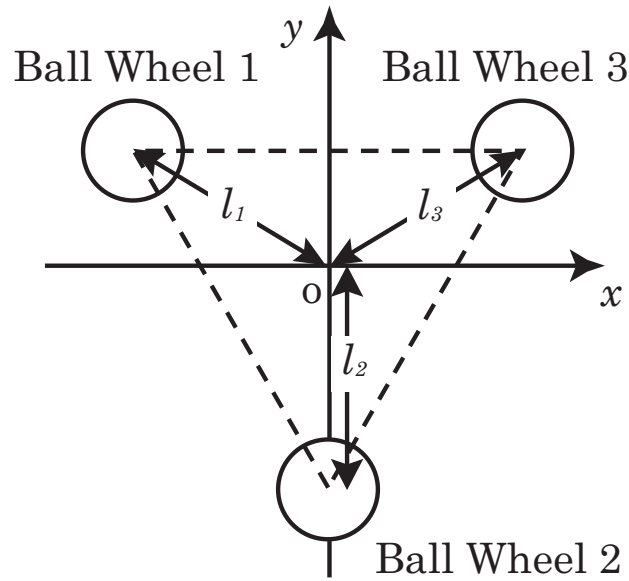
$$\begin{aligned} v_{xi} &= v_x \cos \theta_i + v_y \sin \theta_i - l_i \omega \\ v_{yi} &= -v_x \sin \theta_i + v_y \cos \theta_i \end{aligned} \quad (2.1)$$

ここで移動機構の原点  $o$  での速度ベクトル  $\mathbf{v}$  を，

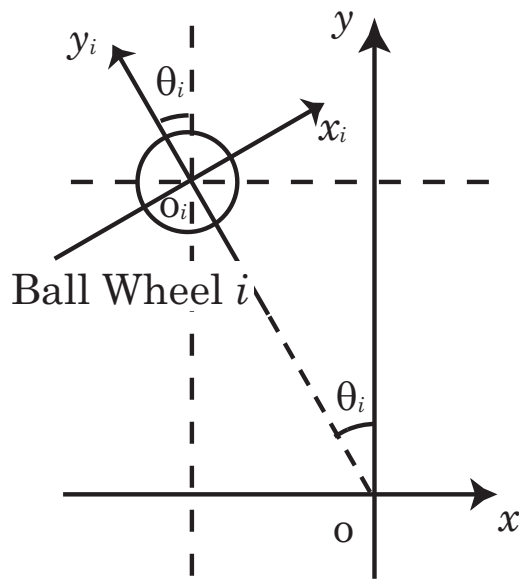
$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} v_x & v_y & \omega \end{bmatrix}^T \quad (2.2)$$

とおくと，各球接地点での  $x_i$  軸方向成分， $y_i$  軸方向成分をそれぞれまとめたベクトル  $\mathbf{v}_x$ ， $\mathbf{v}_y$  は

$$\mathbf{v}_x = \begin{bmatrix} v_{x1} & v_{x2} & v_{x3} \end{bmatrix}^T, \quad \mathbf{v}_y = \begin{bmatrix} v_{y1} & v_{y2} & v_{y3} \end{bmatrix}^T \quad (2.3)$$



(a) Vehicle coordinate system

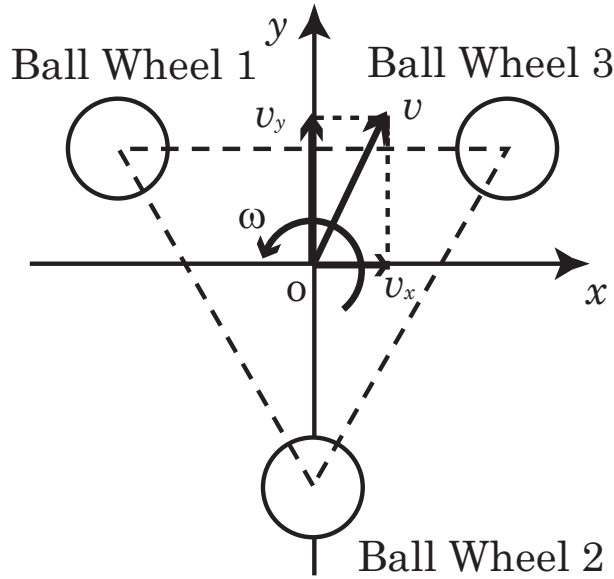


(b) Ball wheel coordinate system

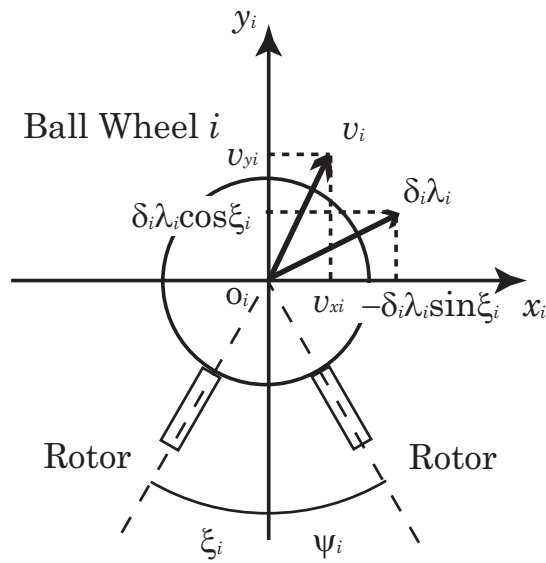
図 2.5. Coordinate system

として表される．式 (2.1) を式 (2.2) , (2.3) を用いて書き直すと , 次の関係が成り立つ .

$$\begin{aligned}
 \mathbf{v}_x &= \mathbf{P}_x \mathbf{v} , & (2.4) \\
 \mathbf{P}_x &= \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & \sin \theta_1 & -l_1 \\ \cos \theta_2 & \sin \theta_2 & -l_2 \\ \cos \theta_3 & \sin \theta_3 & -l_3 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$



(a) Velocity of vehicle



(b) Angular velocity of ball wheel

図 2.6. Velocity

$$\mathbf{v}_y = \mathbf{P}_y \mathbf{v} , \tag{2.5}$$

$$\mathbf{P}_y = \begin{bmatrix} -\sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 \\ -\sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 \\ -\sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 \end{bmatrix}$$

図 2.6(b) に球体接地点での速度成分を示す．球体 1 と球体 2 を駆動するロータの回転

角速度を  $\lambda_1$  [rad/s] , 球体 2 と球体 3 を駆動するロータの回転角速度を  $\lambda_2$  [rad/s] , 球体 3 と球体 1 を駆動するロータの回転角速度を  $\lambda_3$  [rad/s] とする . ここで  $\lambda_i$  は移動機構を外側からみて反時計周りを正とし , これらをまとめたベクトルを  $\lambda$  を次のように表す .

$$\lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 & \lambda_2 & \lambda_3 \end{bmatrix}^T \quad (2.6)$$

ロータの有効半径を  $\delta_i$  [m] とすると , 各球体の駆動に伝達されるロータの周速度  $\delta_i \lambda_i$  [m/s] は , 球体接地点において 2 つのロータの  $x_i$  軸方向成分 ,  $y_i$  軸方向成分に分解できるので , 次の関係が成り立つ . また , ロータの回転速度は球体の回転速度に減速比を乗じたものであり , 減速比を  $r$  とする .

$$\begin{bmatrix} v_{x1} \\ v_{x2} \\ v_{x3} \end{bmatrix} = -\frac{1}{r} \begin{bmatrix} \delta_1 \lambda_1 \cos \xi_1 + \delta_3 \lambda_3 \cos \psi_1 \\ \delta_2 \lambda_2 \cos \xi_2 + \delta_1 \lambda_1 \cos \psi_2 \\ \delta_3 \lambda_3 \cos \xi_3 + \delta_2 \lambda_2 \cos \psi_3 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$$\begin{bmatrix} v_{y1} \\ v_{y2} \\ v_{y3} \end{bmatrix} = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} -\delta_1 \lambda_1 \sin \xi_1 + \delta_3 \lambda_3 \sin \psi_1 \\ -\delta_2 \lambda_2 \sin \xi_2 + \delta_1 \lambda_1 \sin \psi_2 \\ -\delta_3 \lambda_3 \sin \xi_3 + \delta_2 \lambda_2 \sin \psi_3 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

式 (2.7) と式 (2.8) を式 (2.3) と式 (2.6) を用いて書き直すと ,

$$\mathbf{v}_x = \mathbf{U}_x \lambda , \quad (2.9)$$

$$\mathbf{U}_x = -\frac{1}{r} \begin{bmatrix} \delta_1 \cos \xi_1 & 0 & \delta_3 \cos \psi_1 \\ \delta_1 \cos \psi_2 & \delta_2 \cos \xi_2 & 0 \\ 0 & \delta_2 \cos \psi_3 & \delta_3 \cos \xi_3 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{v}_y = \mathbf{U}_y \lambda , \quad (2.10)$$

$$\mathbf{U}_y = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} -\delta_1 \sin \xi_1 & 0 & \delta_3 \sin \psi_1 \\ \delta_1 \sin \psi_2 & -\delta_2 \sin \xi_2 & 0 \\ 0 & \delta_2 \sin \psi_3 & -\delta_3 \sin \xi_3 \end{bmatrix}$$

を得る . また , 幾何学的関係より , 式 (2.4) と (2.9) は以下のようにまとめることができる .

$$\mathbf{P}_x \mathbf{v} = \mathbf{U}_x \lambda \quad (2.11)$$

式 (2.11) より移動機構の並進・回転角速度  $v$  をロータの回転角速度  $\lambda$  によって求めるためには,  $\mathbf{P}_x$  および  $\mathbf{U}_x$  が正則である必要がある. 正則であるための必要十分条件は行列式が非零であるが, 球体の配置によっては行列式が零となる変数が存在する. そこで, 提案機構では行列式が非零となる配置を選択することで, 以下のように逆行列を求めることを可能とする.

$$v = \mathbf{P}_x^{-1} \mathbf{U}_x \lambda \quad (2.12)$$

また, 逆にロータの回転角速度  $\lambda$  は移動機構の並進・回転角速度  $v$  より以下のように求まる.

$$\lambda = \mathbf{U}_x^{-1} \mathbf{P}_x v \quad (2.13)$$

提案機構のように, 各球体接地点が正三角形の頂点に配置される場合, 即ち  $\delta = \delta_1 = \delta_2 = \delta_3$ ,  $\theta_1 = \pi/3$ ,  $\theta_2 = \pi$ ,  $\theta_3 = 5\pi/3$ ,  $l = l_1 = l_2 = l_3$ ,  $\xi_i = \phi_i = \pi/6$ ,  $r = \sqrt{3}/2$  のとき, 式 (2.4), 式 (2.9) の  $\mathbf{P}_x$ ,  $\mathbf{U}_x$  は以下のように簡単になる.

$$\mathbf{P}_x = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \sqrt{3} & -2l \\ -2 & 0 & -2l \\ 1 & -\sqrt{3} & -2l \end{bmatrix}, \quad \mathbf{U}_x = -\delta \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

$$\mathbf{P}_x^{-1} \mathbf{U}_x = -\frac{1}{3} \delta \begin{bmatrix} -1 & -1 & 2 \\ \sqrt{3} & -\sqrt{3} & 0 \\ -\frac{2}{l} & -\frac{2}{l} & -\frac{2}{l} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{U}_x^{-1} \mathbf{P}_x = -\frac{1}{2\delta} \begin{bmatrix} -1 & \sqrt{3} & -l \\ -1 & -\sqrt{3} & -l \\ 2 & 0 & -l \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

なお, 移動機構の運動を考えると, 移動機構の運動は  $x$  軸方向,  $y$  軸方向および, 原点  $o$  周りの運動方程式によって規定され, その加速度は各球体の走行面と接地点における摩擦力により生じる. このとき, 次の関係が成り立つ.

$$M(\dot{v}_x - v_y \omega) = \sum_{i=1}^3 (F_{xi} \cos \theta_i - F_{yi} \sin \theta_i) \quad (2.16)$$

$$M(\dot{v}_y - v_x \omega) = \sum_{i=1}^3 (F_{xi} \sin \theta_i - F_{yi} \cos \theta_i) \quad (2.17)$$

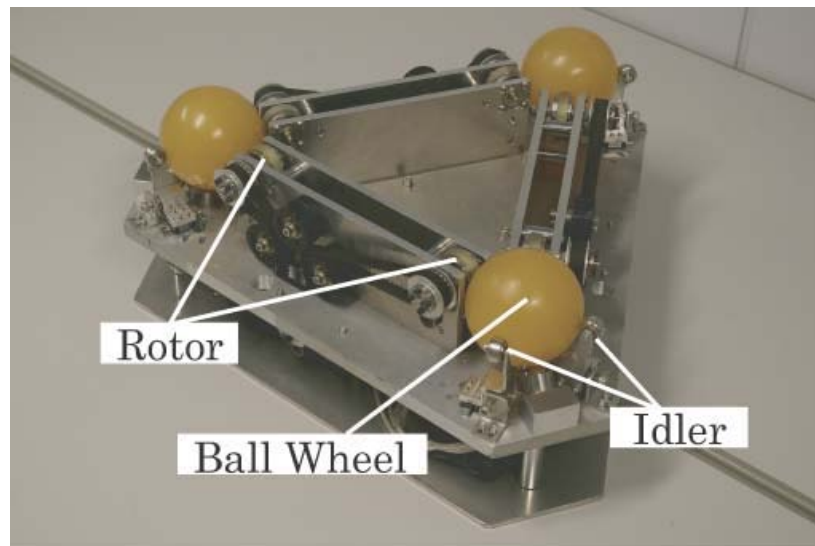
$$I_v \dot{\omega} = \sum_{i=1}^3 -l F_{xi} \quad (2.18)$$

## 22 第 2 章 球体駆動式全方向移動機構の開発

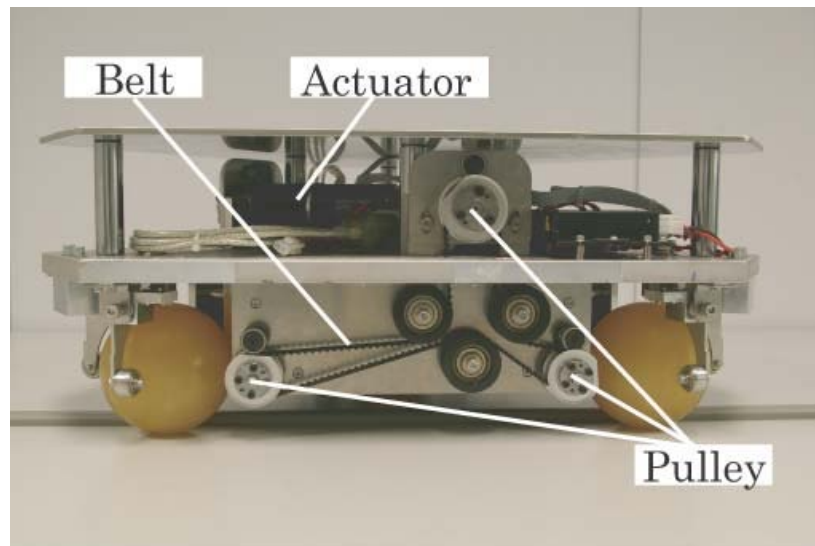
ここで、移動機構の質量を  $M$  [kg], 原点  $o$  周りの慣性モーメントを  $I_v$  [kgm<sup>2</sup>] とする。なお、 $F_{xi}$  および  $F_{yi}$  は球体接地点で走行面から受ける摩擦力であり、垂直抗力と摩擦係数の積で表される。

## 2.4 全方向移動機構の試作

開発した試作機の概観を図 2.7 に示す．図 4.2(a) に示されるように車両には 3 つの球体を取り付けられ，各球体は 2 つのアクチュエータにより駆動される．アクチュエータからロータへの回転伝達は図 4.2(b) に示されるとおり，機構台座に取り付けられたアクチュエータからの回転がベルトを介し 2 つのロータを駆動している．各球体における頂部のボールキャストは球体とロータの圧接力を安定化させるために，球体の北極点より 10 [mm] 外側へずらして配置している．図 2.8 は球体とアクチュエータの配置を示している．車両への動作入力では 3 自由度のジョイスティックにより並進速度  $v_x, v_y$ ，原点  $O$  周りの回転角速度  $\omega$  の速度指令を生成することができる．速度指令は式 (2.13) によりロータの回転角速度が求められ，モータドライバを介して各アクチュエータへ速度指令が図 2.9 に示されるように与えられる．制御システムでは本移動機構の基本的な特性を把握するためにオープンループ制御を行っている．また試作機の仕様は表 2.1 に示されるとおりである．



(a) Perspective view



(b) Side view

図 2.7. Whole view of omnidirectional vehicle



表 2.1. Specification of omnidirectional vehicle

Width	553.6 [mm]
Length	479.4 [mm]
Height	220 [mm]
Weight	28.4 [kg]
Ball Wheel's Diameter	98 [mm]
Ball Wheel's Weight	0.56 [kg]
Ball Wheel's Material	Urethane shore 90
Rotor's Diameter	40 [mm]
Rotor's Width	10 [mm]
Rotor's Material	Urethane shore 90
DC Motor's Output	Maxon DC 150 [W] × 3
Gear Ratio	74
Teeth Number of Pulley (Motor)	25
Teeth Number of Pulley (Rotor)	20
Internal Sensor	Incremental Encoder (Magnetic)
Encoder Resolution	500
Encoder Chanel	3

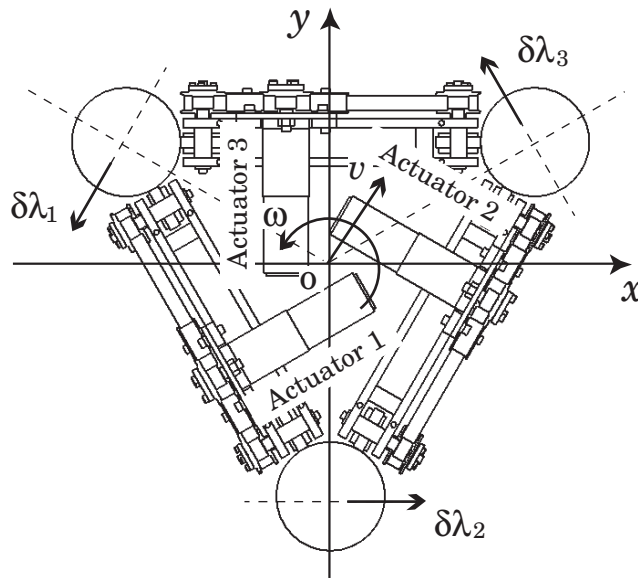


図 2.8. Control of omnidirectional vehicle

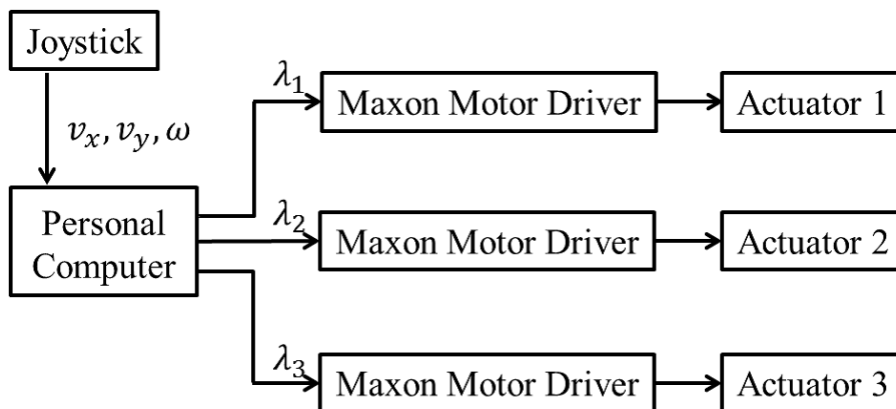


図 2.9. Control system of omnidirectional vehicle

## 2.5 1つの球体を用いた駆動検証

運動学の妥当性を検証するために、1つの球体を用いて駆動の検証を行う。本駆動方式は1つの球体が2つのアクチュエータに同時駆動されることにより任意の方向への駆動を可能としている。実際にこの駆動が行われているか、地面と接地という拘束条件を除いた状態、つまり移動機構を上下反転させた状態で並進直進運動、並進左右運動、斜め運動の3つの動作検証を行う。球体は図 2.5(a) での Ball Wheel 1 を用いた。この球体は図 2.8 で示されるように Actuator 1 と Actuator 3 により駆動される。図 2.10 に2つのアクチュエータが正の方向に回転した場合における球体の回転方向を示す。ただし、この図は移動機構を上下反転させた状態を示している。1つの球体の駆動では移動機構全体の回転成分を除いた並進成分によって定められる。並進速度  $v_{x1}, v_{y1}$  とアクチュエータの回転数  $\lambda_1, \lambda_3$  の関係は以下の式 (2.19) で求められる。

$$\begin{bmatrix} v_{x1} \\ v_{y1} \end{bmatrix} = -\frac{1}{2r} \begin{bmatrix} \sqrt{3}\delta_1 + \sqrt{3}\delta_3 \\ \delta_1 - \delta_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

検証として図 2.12 に示すように1つの球体を並進直進、左右、斜め方向に駆動させる。実験では、速度指令としてこの球体が床面に接地していた場合における、球体接地点での周速度をそれぞれ 0.003 [m/s] としている。また、仮の球体接地点での速度指令における各ロータの目標周速度およびアクチュエータの目標回転数をそれぞれの運動について図 2.13, 2.14, 2.15 に示し、実験の結果としてエンコーダからの取得回転数およびその値に基づくロータの周速度、仮の球体接地点での速度を図 2.16, 2.17, 2.18 示す。さらに、球体の周速度を外界センサによって計測を行う。移動量の検出にはレーザマウスを用いた。レーザマウスは並進2自由度の移動量の測定が可能であり、レーザマウスを図 2.11 のように球体の上部に取り付けることで周速度を得る。測定に用いたレーザマウスの仕様は分解能：1000 [dpi]、寸法：30 [mm] x 70 [mm] x 20 [mm]、重量：40 [g] である。また使用している球体の表面の状態では反射により正しく測定が行えない場合があった。そこで反射の少ない同寸法の球体を実験では使用した。

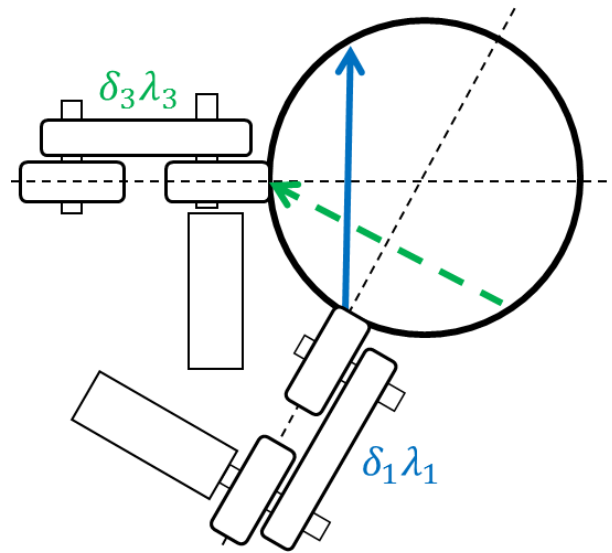


図 2.10. Direction of rotation

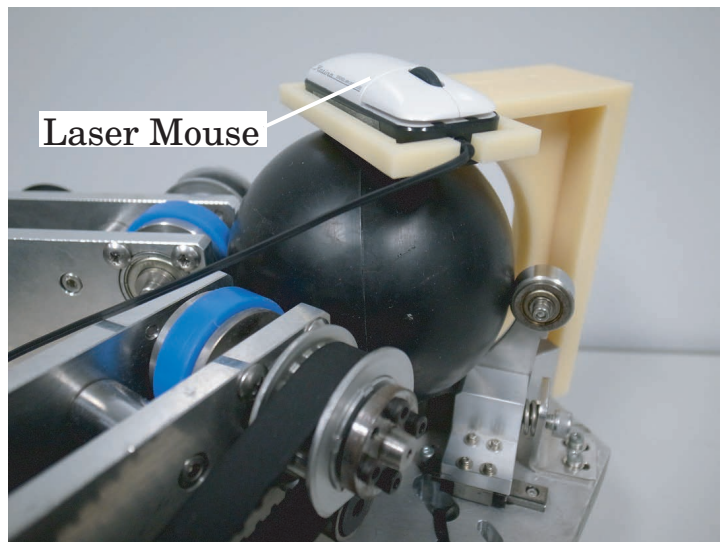
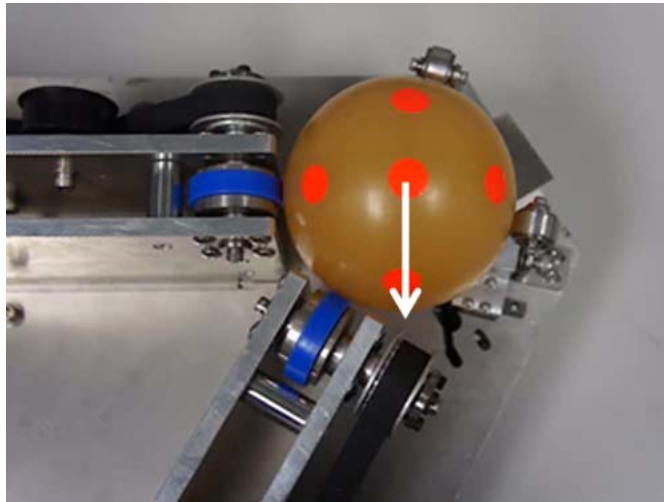
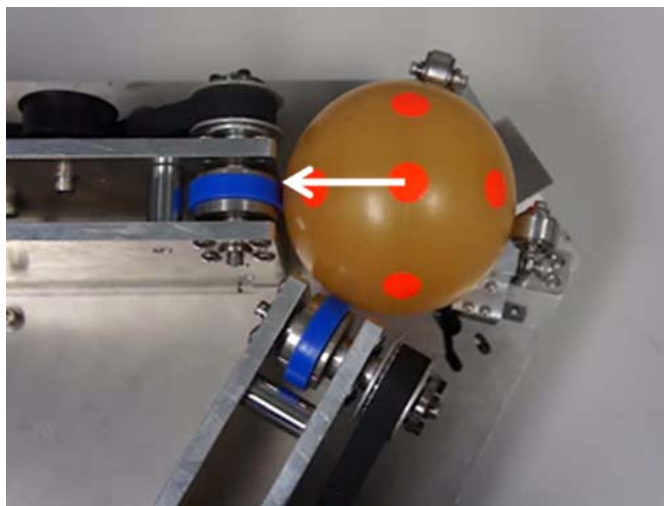


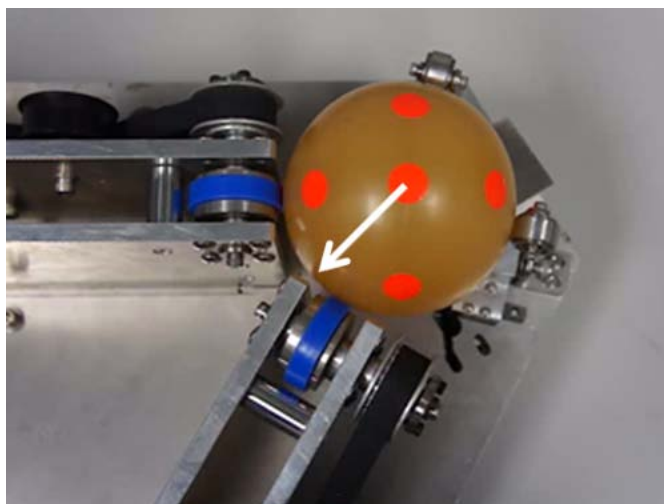
図 2.11. Measurement device



(a) Longitudinal driving

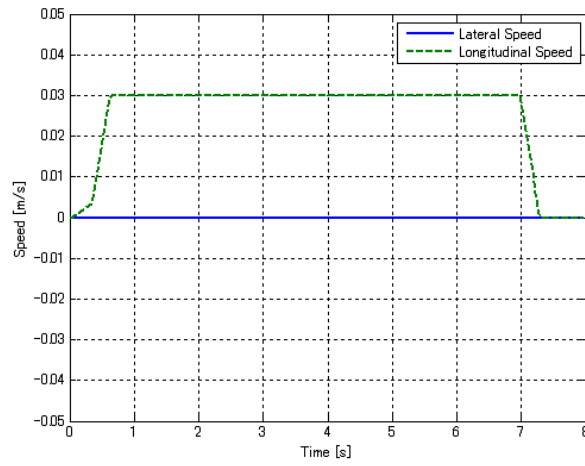


(b) Lateral driving

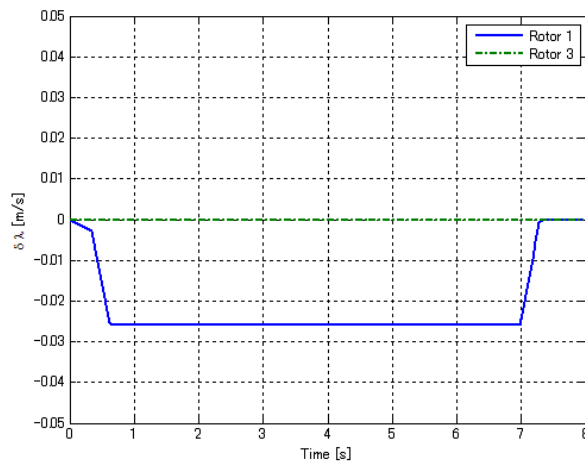


(c) Oblique driving

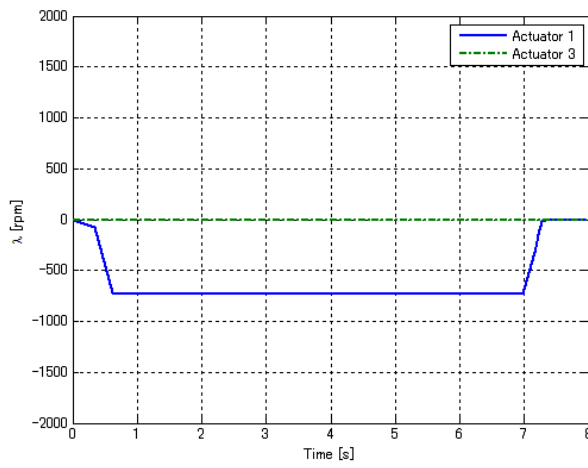
図 2.12. Experiments of driving a ball wheel



(a) Target speed

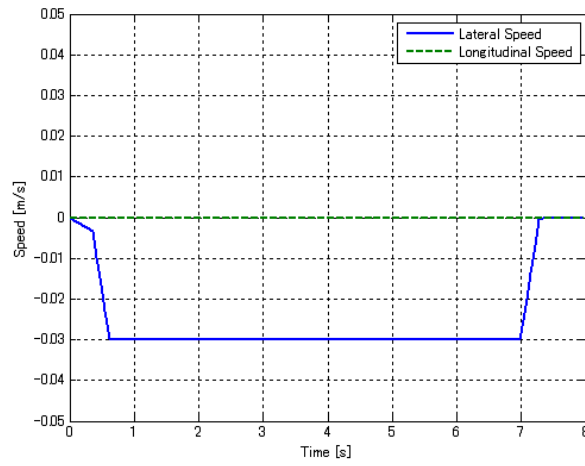


(b) Target rotor speed

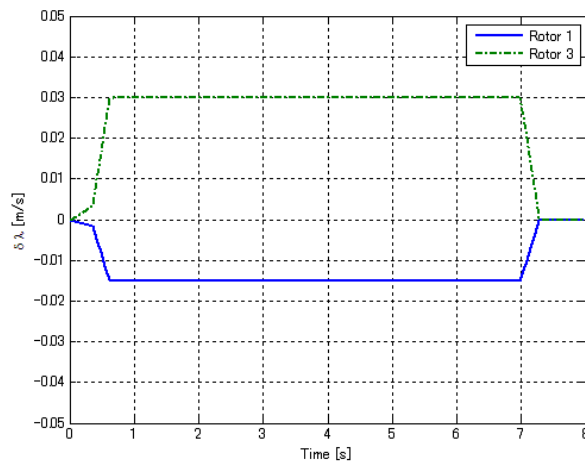


(c) Target actuator speed

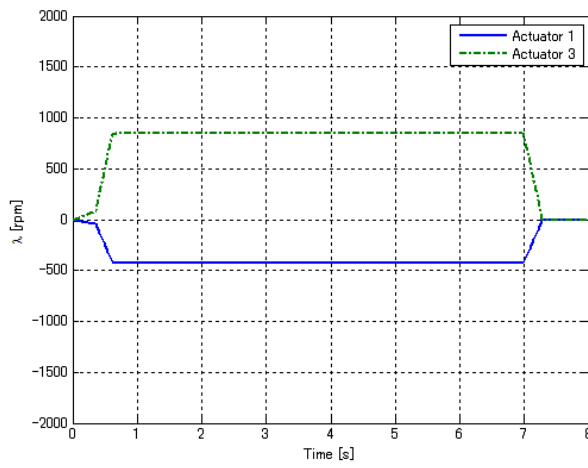
図 2.13. Velocity command of longitudinal driving a ball wheel



(a) Target speed

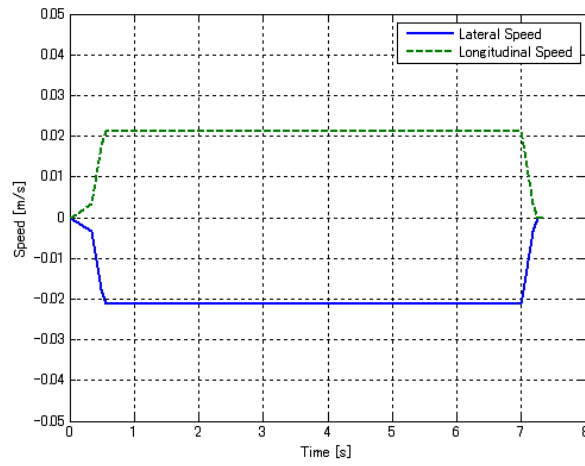


(b) Target rotor speed

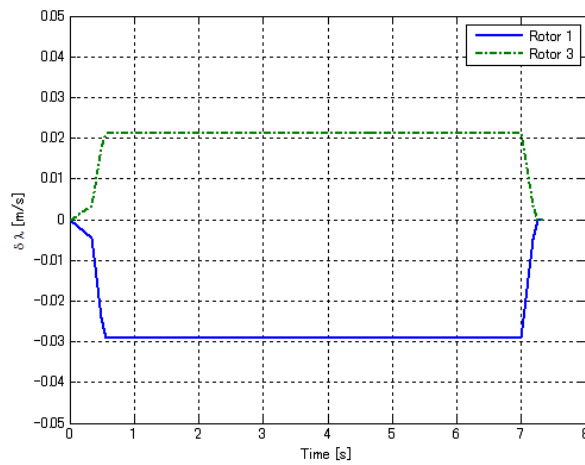


(c) Target actuator speed

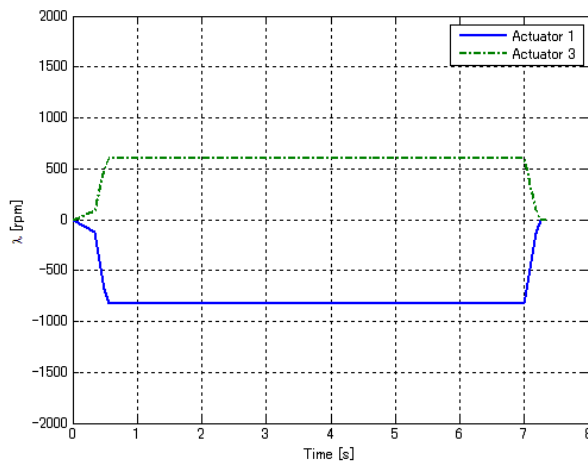
図 2.14. Velocity command of lateral driving a ball wheel



(a) Target speed



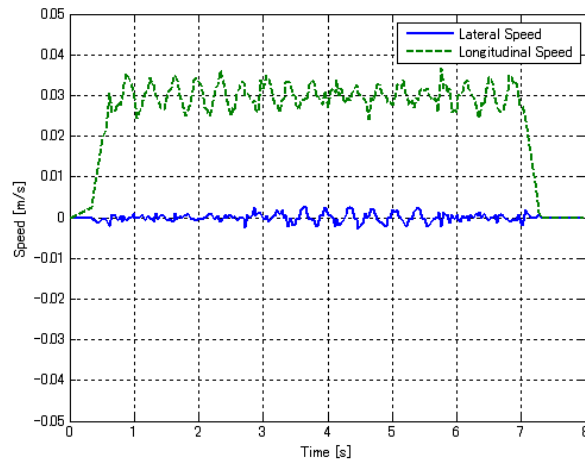
(b) Target rotor speed



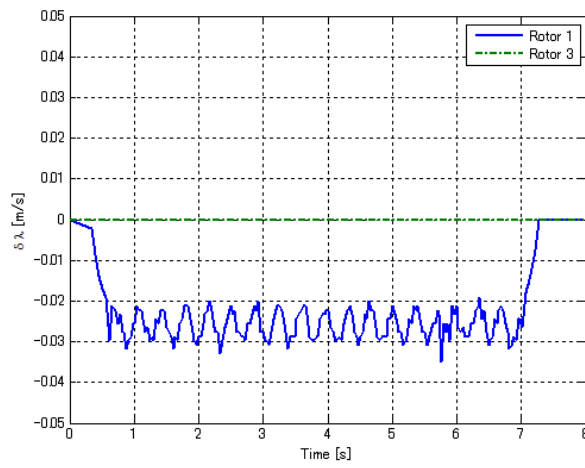
(c) Target actuator speed

図 2.15. Velocity command of oblique driving a ball wheel

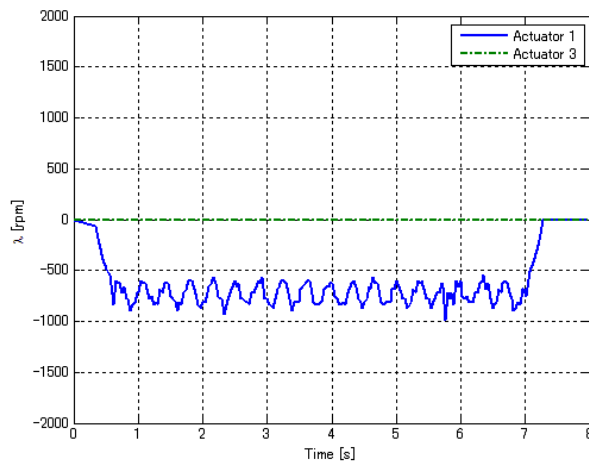




(a) Estimated speed

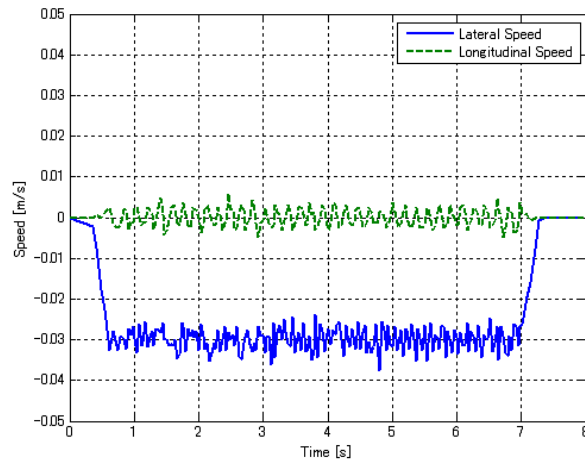


(b) Estimated rotor speed

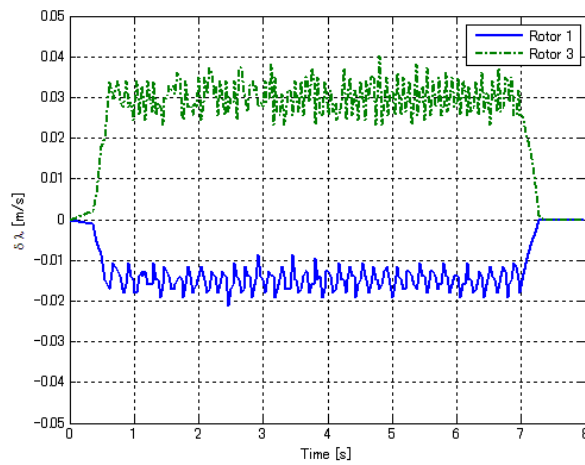


(c) Actuator speed

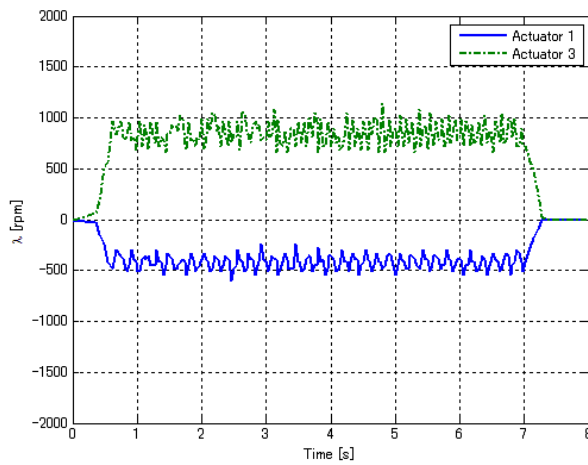
図 2.16. Experimental result of longitudinal driving a ball wheel



(a) Estimated speed

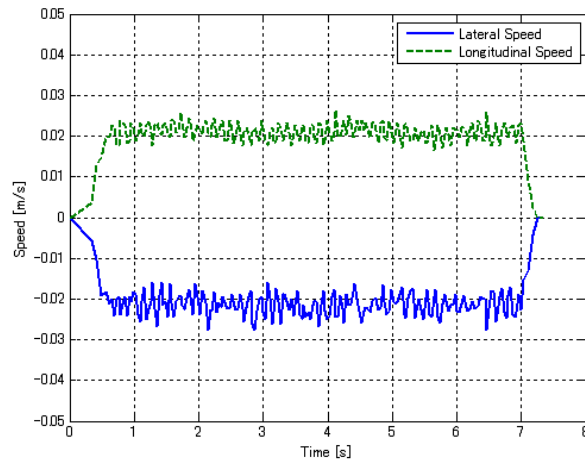


(b) Estimated rotor speed

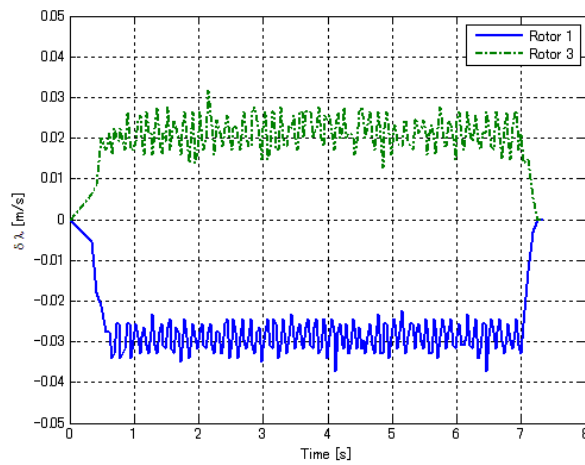


(c) Actuator speed

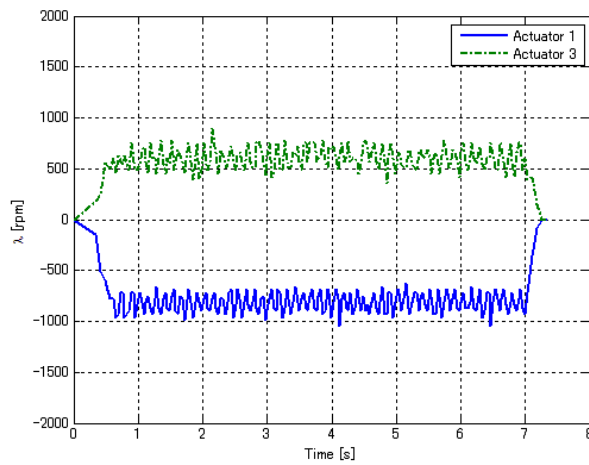
図 2.17. Experimental result of lateral driving a ball wheel



(a) Estimated speed



(b) Estimated rotor speed



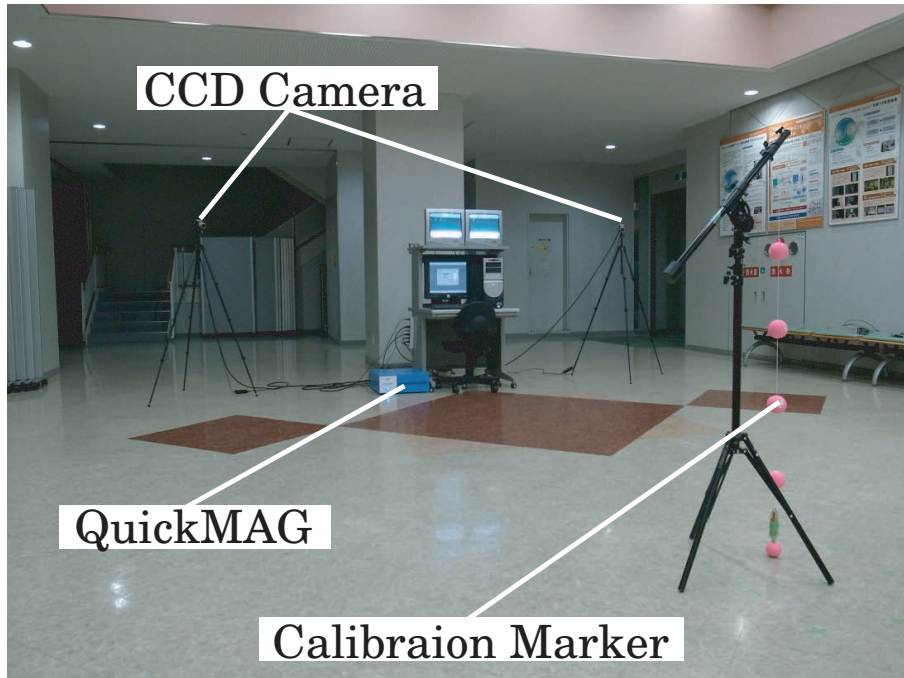
(c) Actuator speed

☒ 2.18. Experimental result of oblique driving a ball wheel

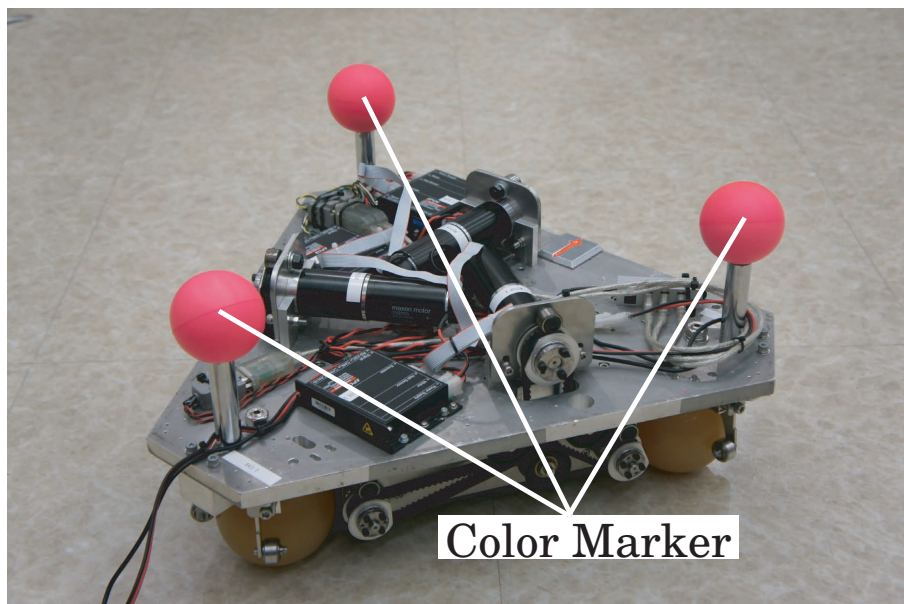
## 2.6 基本走行性能の検証

試作機の基本走行性能を検証するために、並進直進運動、並進左右運動、斜め運動、旋回運動の4つの動作検証を行う。基本走行時の走行軌跡を得るために、3次元位置座標計測装置である QuickMAG IV TYPE 2(株式会社 応用計測研究所製、以下 QuickMAG)を用いた。QuickMAG は2台の CCD カメラによって撮影された画像から、対象とするカラーマーカの3次元位置座標の計測を行う。3次元演算には、DLT法(Direct Linear Transformasion)を用いている。

図 2.19(a) に、QuickMAG の校正の様子を示す。既知の座標にあるカラーマーカを計測することで、校正が行われる。校正には最低6箇所が必要であるが、本実験では精度を高めるために75箇所の計測を行った。校正結果として標準残差( $X$ 軸:4.295,  $Y$ 軸:5.677,  $Z$ 軸:1.385,  $3$ 軸:7.251)を得た。また、移動機構の3次元位置計測を行うために機構本体に図 2.19(b) で示されるように3箇所のカラーマーカを設置した。カラーマーカの位置は図 4.2(b) における移動機構の台座と天板を支える球体付近の3本の支柱の位置に取り付けている。カラーマークは直径68 [mm] のマゼンタ色の球体であり、走行面からカラーマーカの中心までの高さは254 [mm] であった。このカラーマークの色を抽出し、追跡することで移動軌跡を得る。



(a) Whole view of QuickMAG



(b) Color marker

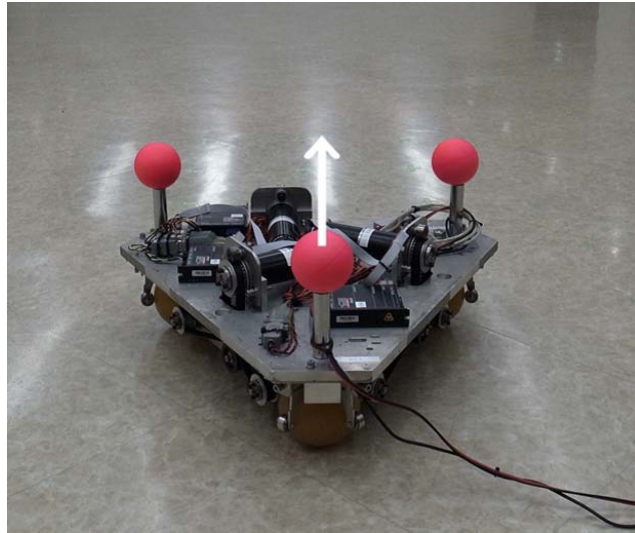
図 2.19. QuickMAG

## 2.6.1 並進直進運動

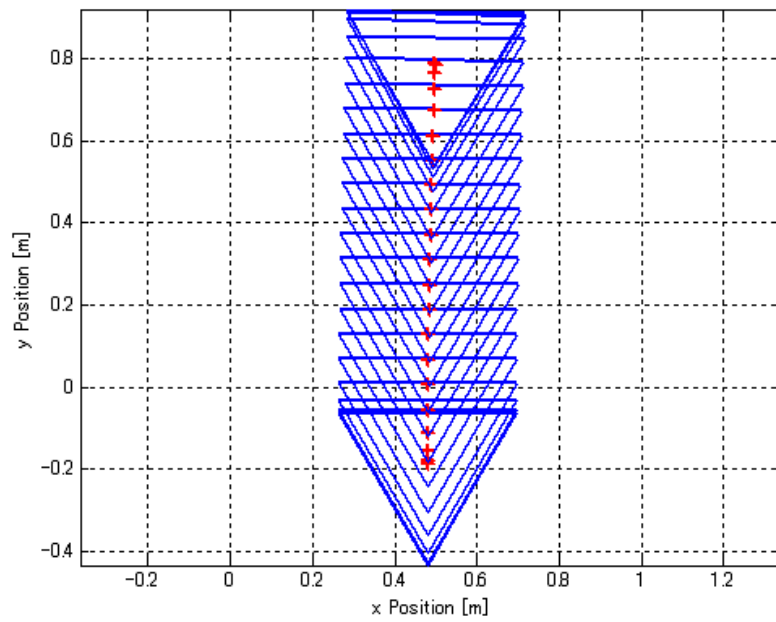
移動機構を図 2.20(a) のように並進直進方向に駆動させる．移動距離の目標値として 1002 [mm] を設定し，そのための目標機構速度を図 2.21(a)，目標ロータ周速度を図 2.21(b)，目標アクチュエータ回転数を図 2.21(c) にそれぞれ示している．

図 2.20(b) は機構を実際に移動させた状態を QuickMAG により 3 次元計測して得た移動軌跡である．また，移動中のアクチュエータの回転数をエンコーダにより計測し，図 2.22(c) に示している．計測されたアクチュエータの回転数をもとに推定したロータの周速度を図 2.22(b) に，機構速度を図 2.22(a) に実験結果として示す．なお，ここでの推定値にはロータと球体間のすべりは無いものとして算出している．

最終的な移動距離，姿勢変化（スタート地点 - ゴール地点）を，QuickMAG により計測した 3 つのカラーマーカの平均値を用いて算出した． $x$  方向：18.48 [mm]， $y$  方向：972.46 [mm]，姿勢角：-0.028 [rad] であった．よって，目標に対する誤差は  $x$  方向：18.48 [mm]， $y$  方向：-29.54 [mm]，姿勢角：-0.028 [rad] であった．

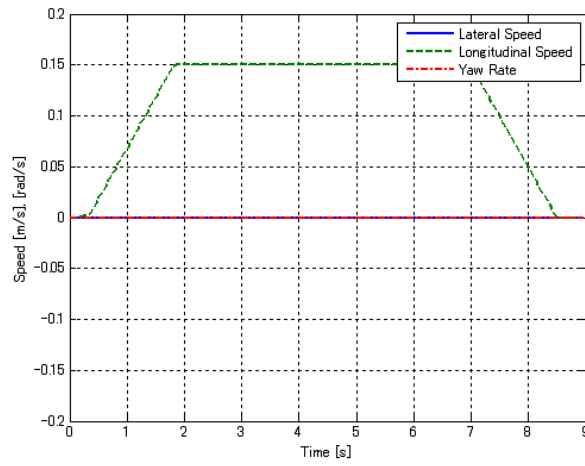


(a) Moving direction

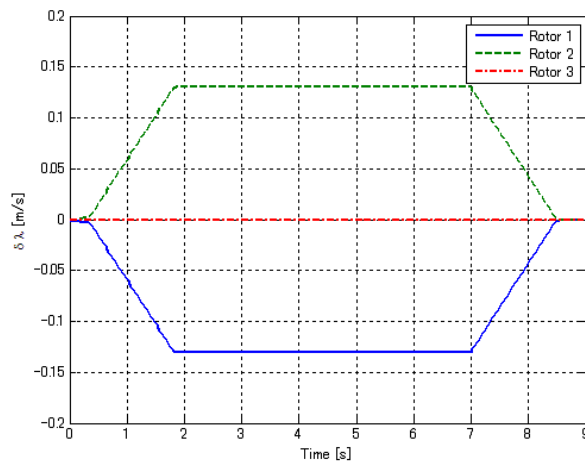


(b) Vehicle trajectory

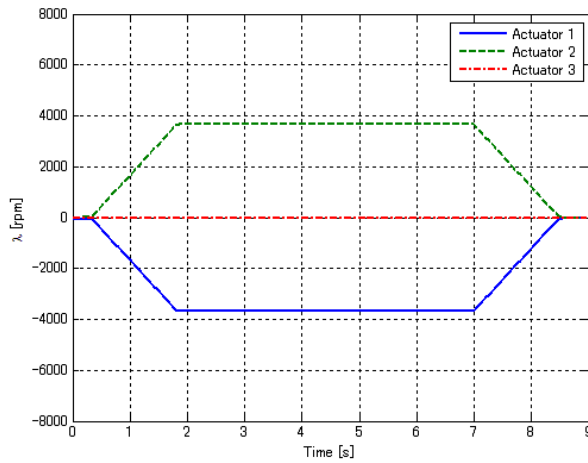
図 2.20. Experiment of longitudinal motion



(a) Target vehicle speed



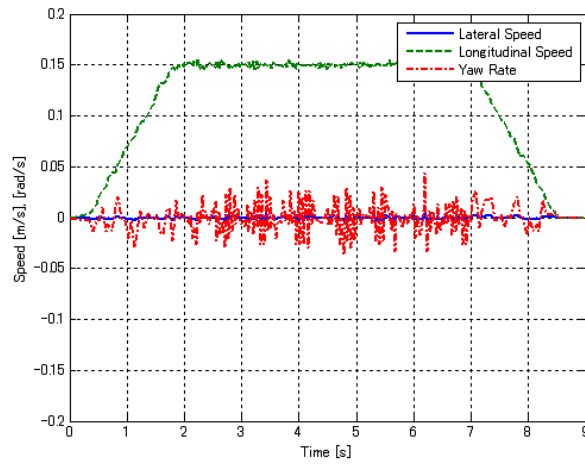
(b) Target rotor speed



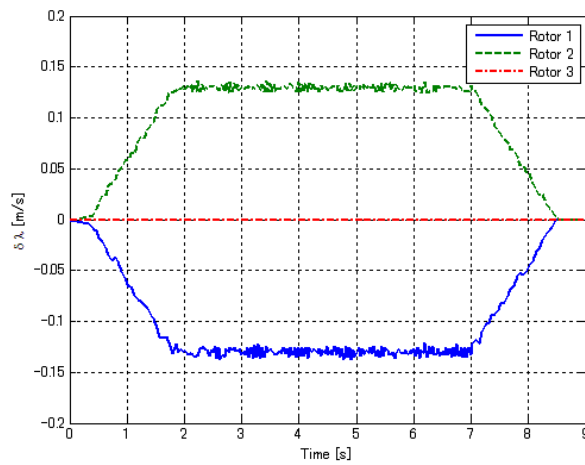
(c) Target actuator speed

図 2.21. Velocity command of longitudinal motion

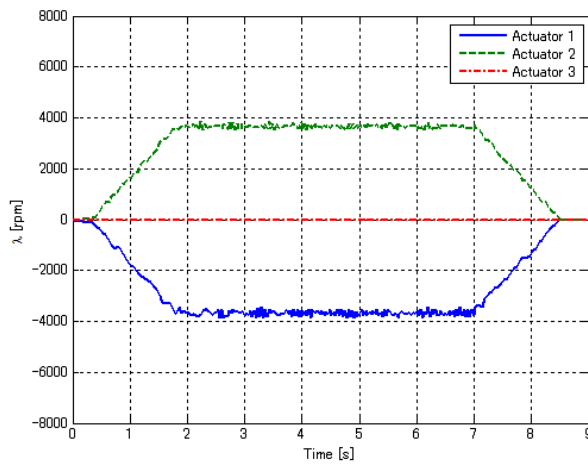




(a) Estimated vehicle speed



(b) Estimated rotor speed



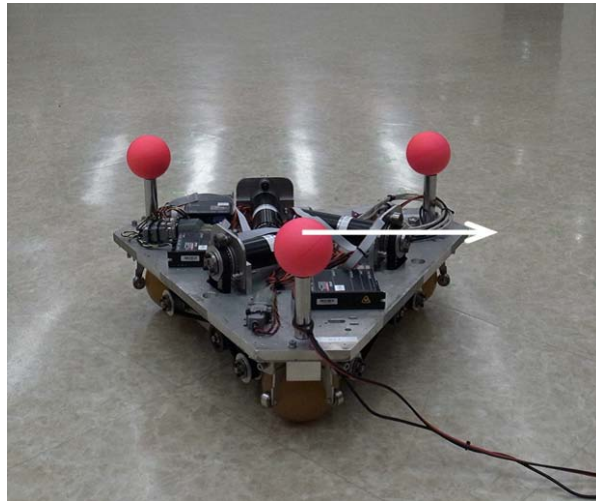
(c) Actuator speed

## 2.6.2 並進左右運動

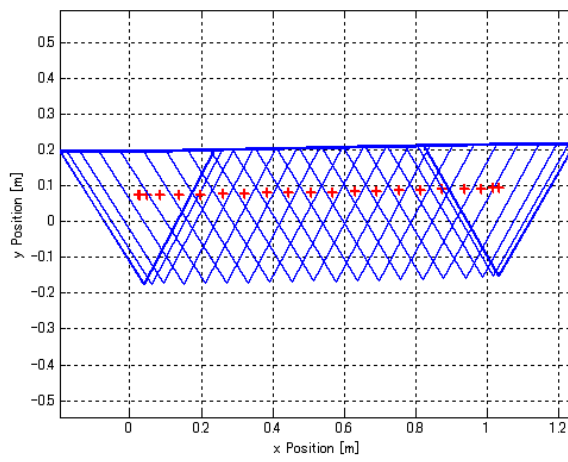
移動機構を図 2.23(a) のように並進左右方向に駆動させる．移動距離の目標値として 1025 [mm] を設定し，そのための目標機構速度を図 2.24(a)，目標ロータ周速度を図 2.24(b)，目標アクチュエータ回転数を図 2.24(c) にそれぞれ示している．

図 2.23(b) は機構を実際に移動させた状態を QuickMAG により 3 次元計測して得た移動軌跡である．また，移動中のアクチュエータの回転数をエンコーダにより計測し，図 2.25(c) に示している．計測されたアクチュエータの回転数をもとに推定したロータの周速度を図 2.25(b) に，機構速度を図 2.25(a) に実験結果として示す．なお，ここでの推定値にはロータと球体間のすべりはないものとして算出している．

最終的な移動距離，姿勢変化（スタート地点 - ゴール地点）を，QuickMAG により計測した 3 つのカラーマーカの平均値を用いて算出した． $x$  方向：1006.11 [mm]， $y$  方向：19.89 [mm]，姿勢角：0.023 [rad] であった．よって，目標に対する誤差は  $x$  方向：-18.89 [mm]， $y$  方向：19.89 [mm]，姿勢角：0.023 [rad] であった．

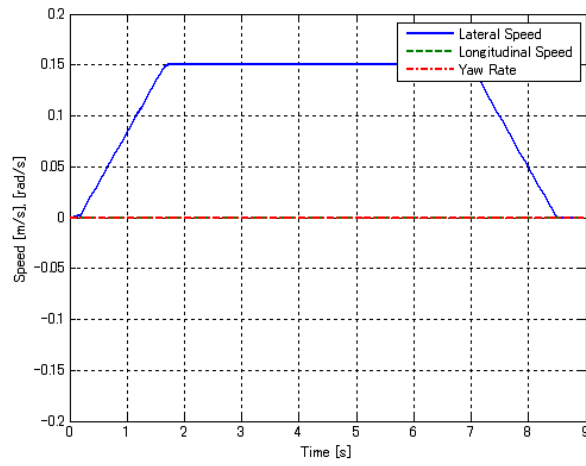


(a) Moving direction

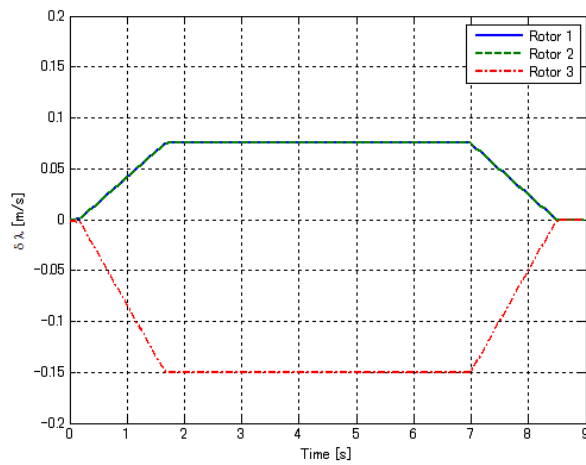


(b) Vehicle trajectory

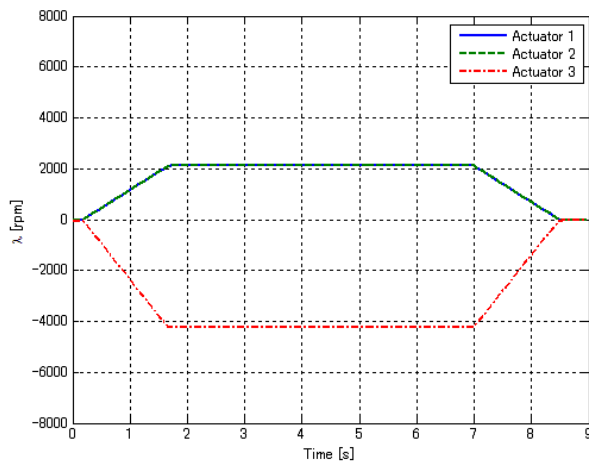
図 2.23. Experiment of lateral motion



(a) Target vehicle speed

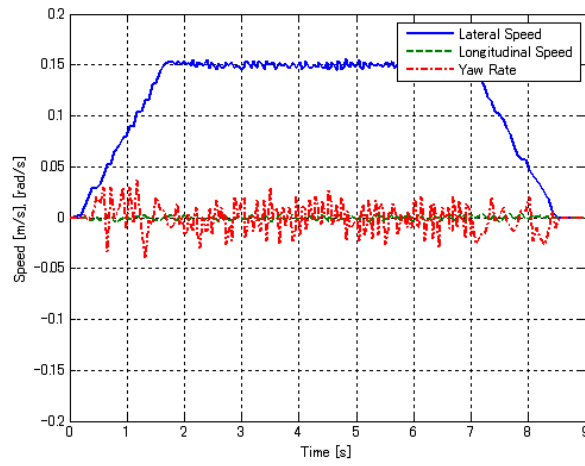


(b) Target rotor speed

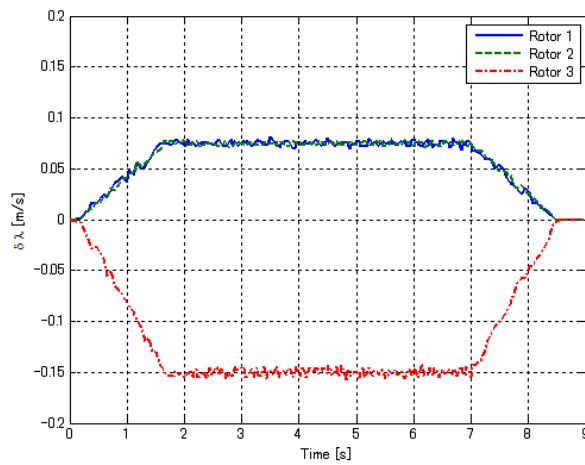


(c) Target actuator speed

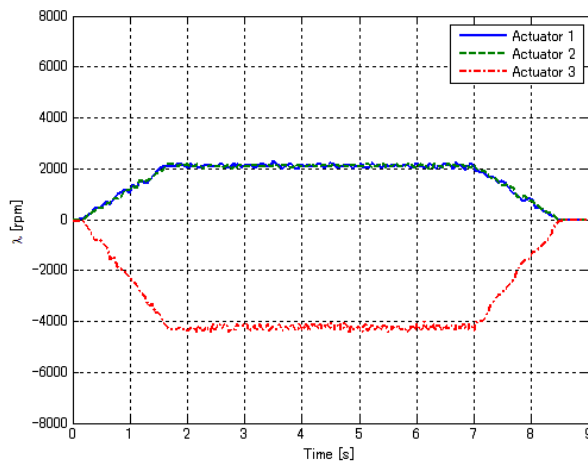
図 2.24. Velocity command of lateral motion



(a) Estimated vehicle speed



(b) Estimated rotor speed



(c) Actuator speed

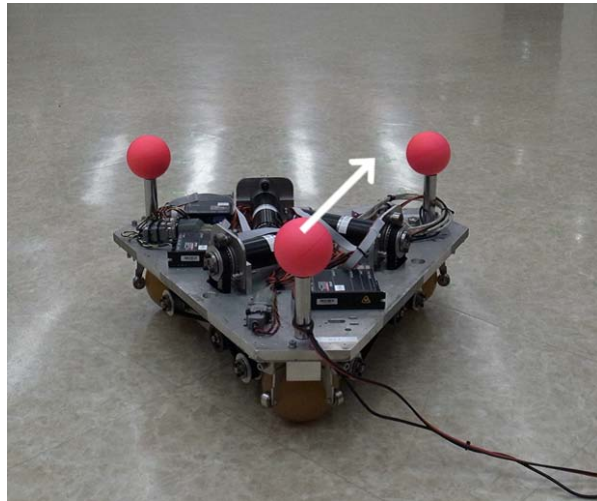
図 2.25. Experimental result of lateral motion

## 2.6.3 斜め運動

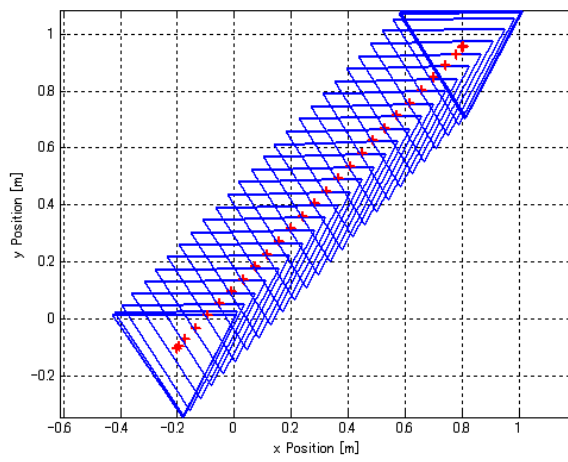
移動機構を図 2.26(a) のように斜め方向に駆動させる．移動距離の目標値として  $x$  方向：1068 [mm]， $y$  方向：1068 [mm] を設定し，そのための目標機構速度を図 2.27(a)，目標ロータ周速度を図 2.27(b)，目標アクチュエータ回転数を図 2.27(c) にそれぞれ示している．

図 2.26(b) は機構を実際に移動させた状態を QuickMAG により 3 次元計測して得た移動軌跡である．また，移動中のアクチュエータの回転数をエンコーダにより計測し，図 2.28(c) に示している．計測されたアクチュエータの回転数をもとに推定したロータの周速度を図 2.28(b) に，機構速度を図 2.28(a) に実験結果として示す．なお，ここでの推定値にはロータと球体間のすべりはないものとして算出している．

最終的な移動距離，姿勢（スタート地点 - ゴール地点）を，QuickMAG により計測した 3 つのカラーマーカの平均値を用いて算出した． $x$  方向：1005.20 [mm]， $y$  方向：1059.80 [mm]，姿勢角：0.011 [rad] であった．よって，目標に対する誤差は  $x$  方向：62.8 [mm]， $y$  方向：8.2 [mm]，姿勢角：0.011 [rad] であった．

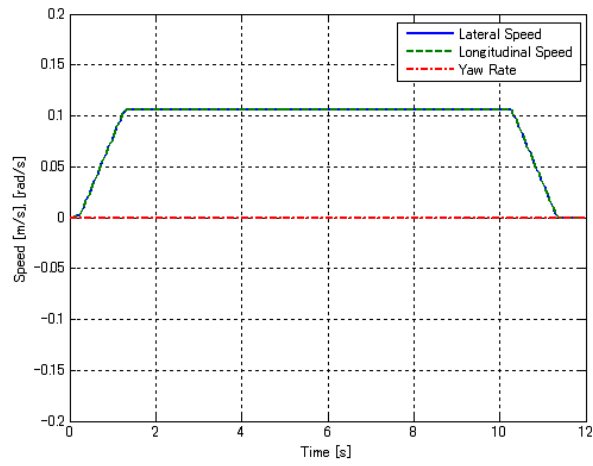


(a) Moving direction

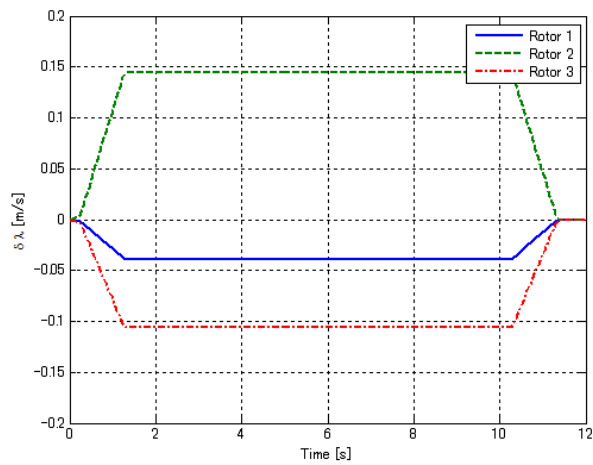


(b) Vehicle trajectory

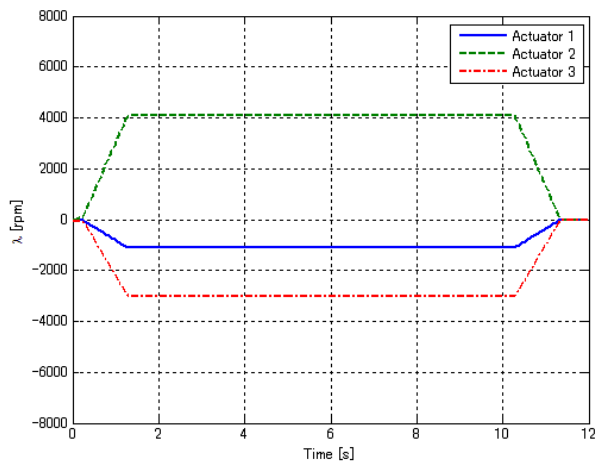
図 2.26. Experiment of oblique motion



(a) Target vehicle speed



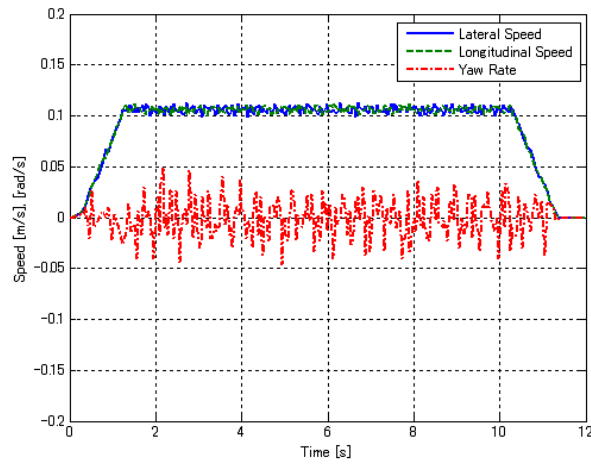
(b) Target rotor speed



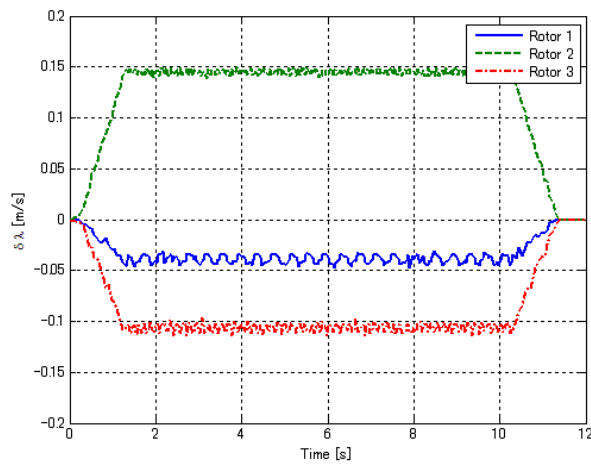
(c) Target actuator speed

図 2.27. Velocity command of oblique motion

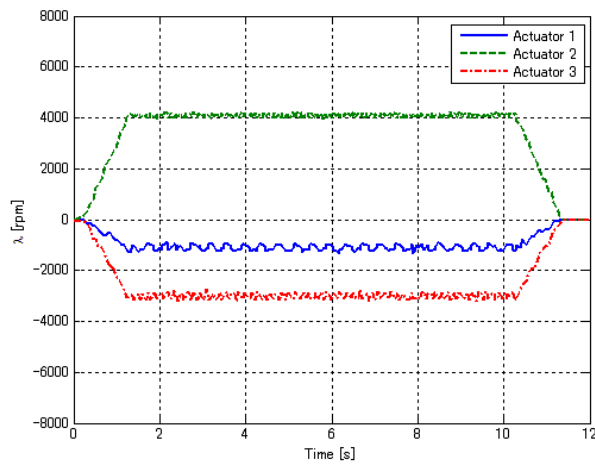




(a) Estimated vehicle speed



(b) Estimated rotor speed



(c) Actuator speed

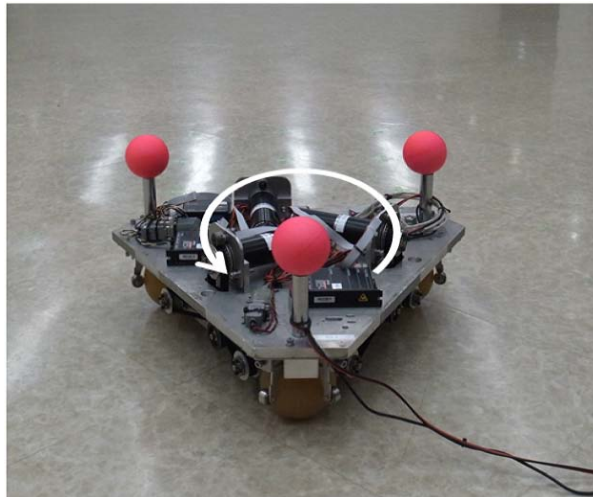
☒ 2.28. Experimental result of oblique motion

## 2.6.4 旋回運動

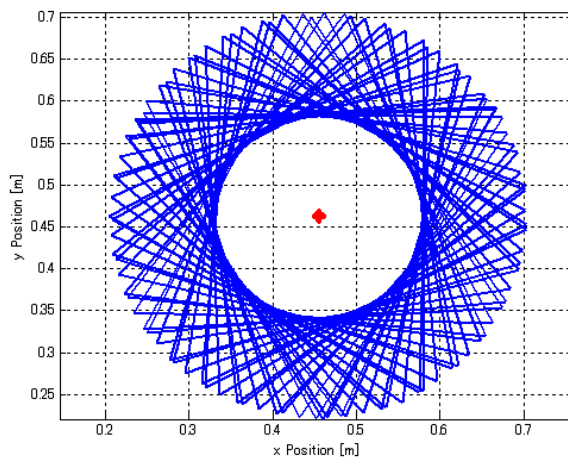
移動機構を図 2.29(a) のようにその場旋回させる．旋回の目標値として  $6.61[\text{rad}]$  を設定し，そのための目標機構速度を図 2.30(a)，目標ロータ周速度を図 2.30(b)，目標アクチュエータ回転数を図 2.30(c) にそれぞれ示している．

図 2.29(b) は機構を実際に移動させた状態を QuickMAG により 3 次元計測して得た移動軌跡である．また，移動中のアクチュエータの回転数をエンコーダにより計測し図 2.31(c) に示している．計測されたアクチュエータの回転数をもとに推定したロータの周速度を図 2.31(b) に，機構速度を図 2.31(a) に実験結果として示す．なお，ここでの推定値にはロータと球体間のすべりはないものとして算出している．

最終的な移動距離，姿勢（スタート地点 - ゴール地点）を，QuickMAG により計測した 3 つのカラーマーカの平均値を用いて算出した． $x$  方向： $1.41 [\text{mm}]$ ， $y$  方向： $0.31 [\text{mm}]$ ，姿勢角： $0.001 [\text{rad}]$  であった．よって，目標に対する誤差は  $x$  方向： $1.41 [\text{mm}]$ ， $y$  方向： $0.31 [\text{mm}]$ ，姿勢角： $-0.329 [\text{rad}]$  であった．

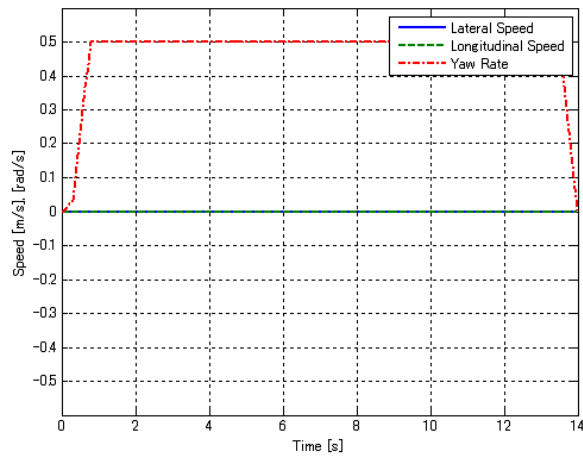


(a) Moving direction

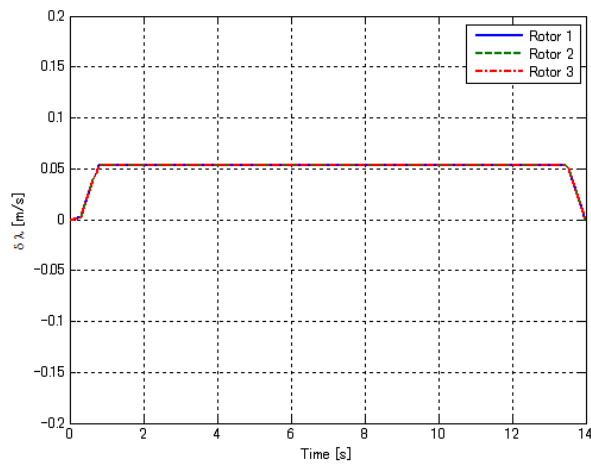


(b) Vehicle trajectory

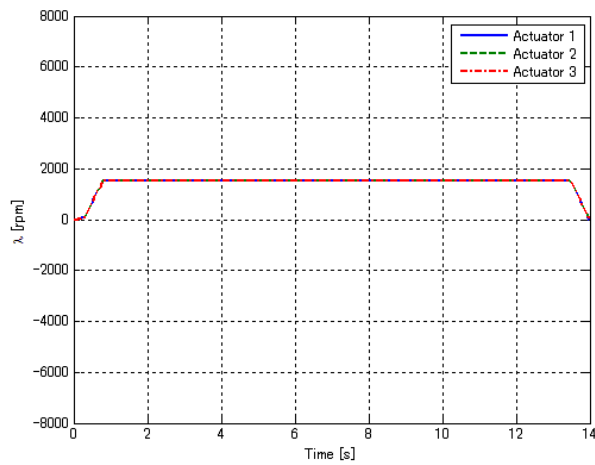
図 2.29. Experiment of turning motion



(a) Target vehicle speed

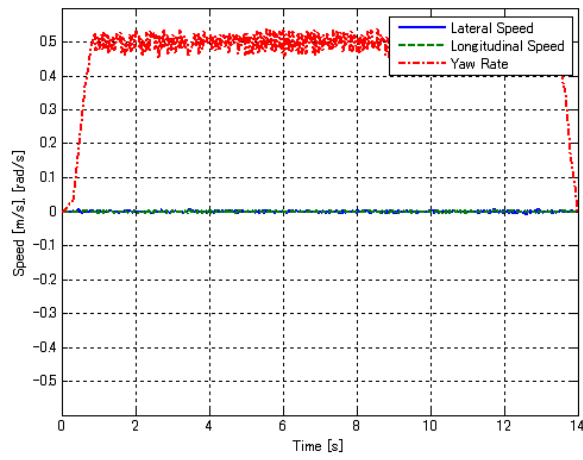


(b) Target rotor speed

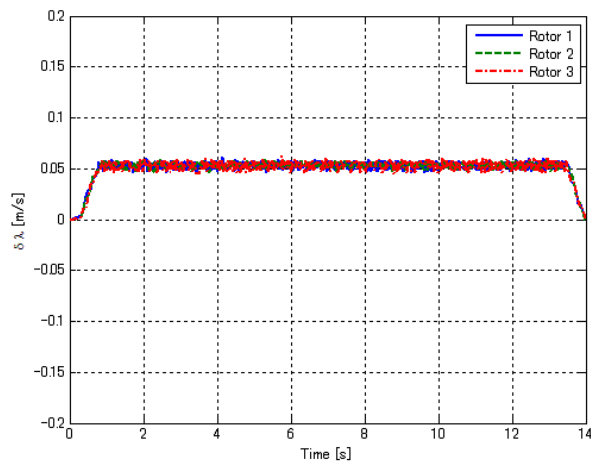


(c) Target actuator speed

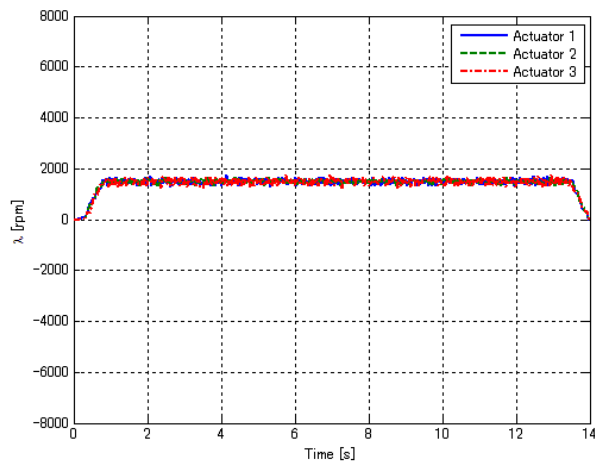
図 2.30. Velocity command of turning motion



(a) Estimated vehicle speed



(b) Estimated rotor speed



(c) Actuator speed

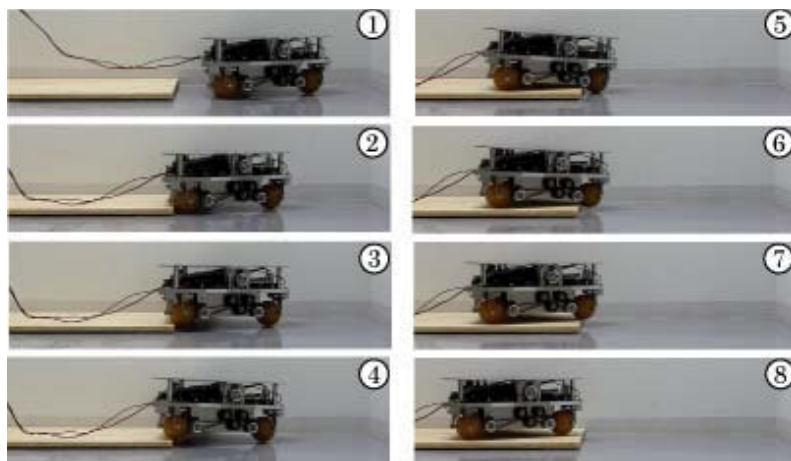
☒ 2.31. Experimental result of turning motion

## 2.7 実環境における走行性能の検証

試作機を用いて本機構の段差乗越え，溝踏破，斜面登坂能力の評価実験を行う．これらの評価項目は全方向移動機構の現実的な使用において不可欠の能力といえる．またそれぞれの評価項目において，成人（約 56 [kg]）が搭乗した状態でも同様の実験を行った．なお，実験における車両の制御はオープンループ制御を用いており，車両は 0.15 [m/s] の直進運動を行っている．段差乗越えや溝踏破において 2 つの球体が同時に進入する条件と比較すると，球体がひとつずつ順に進入する場合や回転動作を加えた条件では段差乗越えや溝踏破が容易になる傾向があった．本実験では進入方向を 2 つの球体が段差，溝，斜面に同時に接する方向に統一した．実験では，走行中の様子をビデオカメラで撮影し連続画像を得た．車両のみの実験では画像を時系列で示し，成人が搭乗した実験では連続画像のうち 5 枚を重ね合わせた合成画像を実験結果として示している．

## 2.7.1 段差乗越え運動

車両の段差乗越え動作実験は図 2.32(a) のように行った．車両が乗越えることができた段差は 24 [mm] であった．また成人が搭乗した状態では，図 2.32(b) で示されるように 14 [mm] の段差乗越え能力であった．車両の特定用途以外での使用では，屋内や工場内などが想定される．その走行面は完全に平坦ではないが整地された環境であるといえる．必要な段差乗越え能力は数 [mm] ~ 数十 [mm] 程度である．



(a) Step height 24 mm

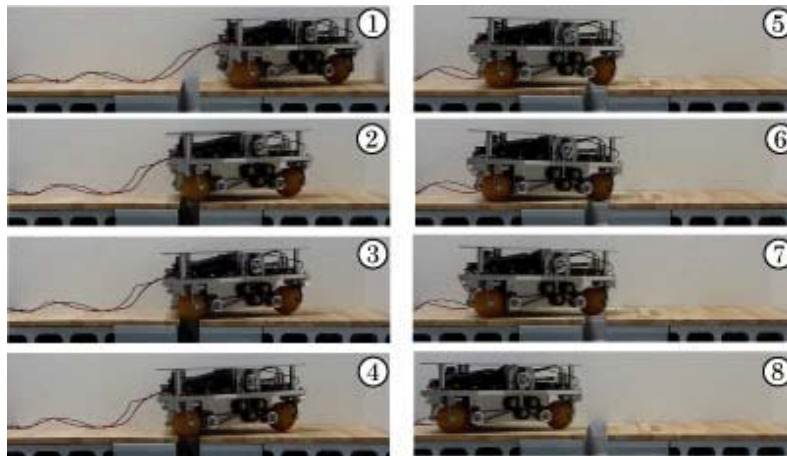


(b) Step height 14 mm

図 2.32. Step overcoming motion

## 2.7.2 溝踏破運動

溝踏破運動が求められる例としてエレベータとフロア間の溝を走行する場合が挙げられる。車輪型の移動機構は、進入方向によっては溝から抜け出せない状況も考えられる。本機構は球体を駆動輪としているため、任意の進入角においても溝踏破が可能である。筆者らの所属する大学におけるエレベータとフロアの溝の長さは約 30 [mm] であり、車両はこれを問題なく踏破できることを確認した。さらに、車両単体では図 2.33(a) で示されるとおり溝踏破能力を有し、最大 65 [mm] の溝踏破が可能であった。同様に、成人が搭乗した場合は 50 [mm] の溝踏破を図 2.33(b) のように確認できた。



(a) Gap length 65 mm



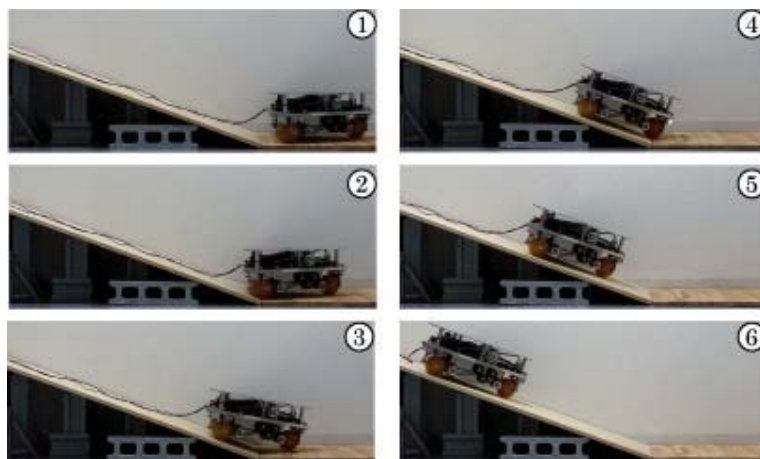
(b) Gap length 50 mm

図 2.33. Gap traversing motion



## 2.7.3 斜面登坂運動

図 2.34(a) で示されるとおり車両は斜面登坂能力を有することが確認できた．斜面の傾斜は 20 [deg] であった．さらに図 2.34(a) 中の 5 番目の画像では車両は一時停止をしており，再度その状態から発進を行っている．また，図 2.34(b) では成人男性が搭乗し 15 [deg] の登坂において同様の能力を確認した．



(a) Slope angle 20 deg



(b) Slope angle 15 deg

図 2.34. Slope climbing motion

## 2.7.4 球体およびロータの耐久性

本節では、試作機が有する段差乗越え、溝踏破、斜面登坂能力のそれぞれが屋内環境において有効であることを確認した。機構の実用化には移動能力だけでなく耐久性も重要な評価項目となる。走行耐久試験は多くの場合、車両自体の駆動システムによって基準ドラムを回転させるような（数十万回）試験が必要となる。本研究ではより実的な総経耐久試験は今後の課題とするが、ここでは試作機の実験・運用における球体およびロータの耐久性について述べる。現在の仕様は球体をウレタン ショア A90、ロータをウレタン ショア A90 としている。しかし初期の試作では圧接駆動の機能維持には、球体およびロータのそれぞれにある程度の弾性が有効であると考え、ショア A70 を用いていた。図 2.35 は球体およびロータの材質がウレタン ショア A70 の実験後の破損・摩耗を示している。このように人が乗るなど大きな負荷が生じる場合には、耐久性が著しく低下したことが分かる。しかしながら現仕様（ショア A90）では、同様の評価を行った場合でも破損等は確認されていない。また、実験ではロータの材質をウレタン ショア A90 と MC ナイロンの双方を使用し、耐久性の比較を行っているがこれまでの運用において明確な差は確認されていない。



(a) Ball wheel (Urethane shore 70)

(b) Rotor (Urethane shore 70)

図 2.35. Resistance against of ball wheel and rotor

## 2.8 まとめ

3つの球体と3つのアクチュエータから構成されるホロノミックな全方向移動機構を提案した。高度な移動性を有するホロノミックな全方向移動機構であるが、従来、構造・制御の複雑さや実際の使用で障害となる段差乗越え、溝踏破、斜面登坂など実用的な検討が少なく、実用化が遅れていた。本機構では、アクチュエータの配置を工夫することで過拘束問題を回避し、簡単な構造・制御で全方向移動を実現した。

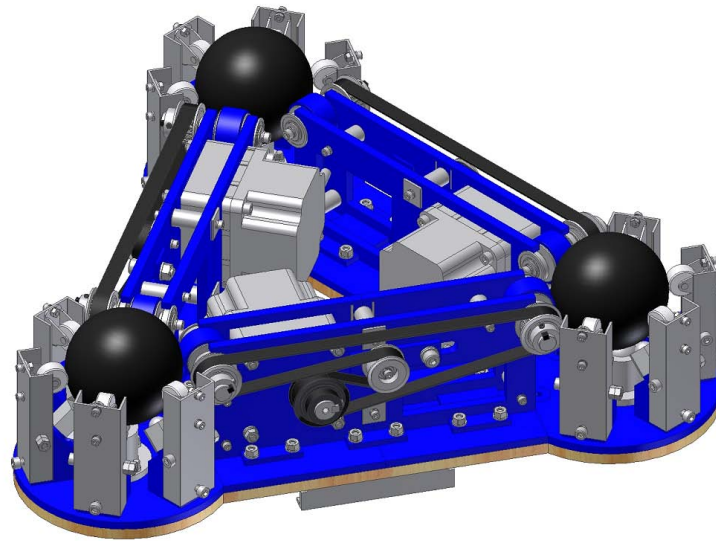
運動学の検証として、移動機構の上面と底面を反転させた状態（球体の回転を確認できる状態）において1つの球体の並進直進、並進左右、斜め方向に速度指令を生成し、駆動の検証を行った。2つのアクチュエータからの駆動によって、1つの球体は任意の方向に駆動することを確認し、この球体を3つ用いた本提案機構がホロノミックな全方向移動が行えることを確認した。

移動機構の基本的な走行性能を検証するために、並進直進運動、並進左右運動、斜め運動、旋回運動の実験を行った。3次元位置座標計測装置である QuickMAG を用いて、移動機構の走行時の位置座標の計測を行った。実験結果として、目標移動距離に対して実際の移動距離が最大 5.9 [%] 程度下回る結果が得られた。同様に姿勢角の変化では、最大 5.0 [%] 程度下回る結果が得られた。これらの原因としては、球体とロータの間にすべりが発生しており、ロータの回転が正しく伝達できていなかったことが考えられる。しかし、内界（アクチュエータのロータリエンコーダ）あるいは外界センサ（球体の回転数を計測するセンサや移動機構の移動量を計測する距離センサ）などを用いたフィードバック制御を行っていない状態であっても、検証により確認したように並進直進、並進左右、斜め、その場旋回の運動を安定して行うことができた。センサを用いたフィードバック制御を行うことでより精度の高い走行が実現できると考えられる。

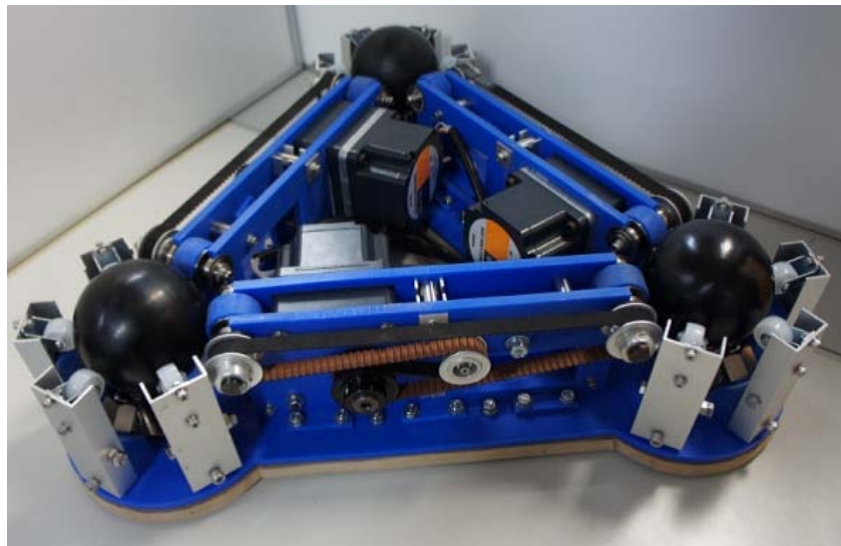
さらに実際の使用を想定し、車両単体および成人が搭乗した状態での実験を行い、段差乗越え、溝踏破、斜面登坂の実環境で想定される外乱に対しても走行が可能であることを確認した。これは本機構が屋内などの整地された環境における走行安定性や外乱への強固さが十分であると示すことができる。段差乗越えや溝踏破において球体の直径が乗越え高

さや溝幅に当然大きな影響を与える。本機構では、入手の容易さから直径 98 [mm] の球体を使用した。より乗越え高さや溝幅が必要となる場合は球体の直径を大きなものに変更することで対応できると考えられる。しかし、この点においては球体の直径変更に伴い、ロータの直径を変更することが望ましいなどより詳細な検証が必要であると思われる。

また、本プラットフォームの普及促進のため安価な球体駆動式全方向移動機構の開発を進めている。試作機は金属製であり、加工には大型の工作機械が必要となる。将来的に技術移転が行われ量産化が進む場合は問題にならないが、全方向移動機構の普及が進むまでは認知度を増すことが必要である。そのため、材質を MC ナイロンによって装置の開発を行っている。このような樹脂材料であれば大学の研究室規模であっても容易に加工が可能である。図 2.36 に MC ナイロンによる球体駆動式全方向移動機構の廉価版を示す。今後は先に述べたように装置の制御や機構本体の見直しだけでなく、同時に普及促進を考慮した開発を進めていきたい。



(a) 3D CAD design



(b) Prototype

図 2.36. Low cost ball wheel drive mechanism with MC nylon

## 第3章

# 歩行訓練支援ロボットの開発

### 3.1 はじめに

加齢疾患や何らかの原因により移動能力に障害が生じた場合，自立・移動支援や運動機能回復が必要となる．現在，補助具やリハビリテーション機器にロボティクス・メカトロニクス技術を用いた開発が盛んに行われている．この当該技術分野では，使用者の運動機能の回復・補助のために様々な器具が開発されている．分類として接触型の車いす，歩行器，トレッドミルや装着型の装具，義肢，パワーアシスト，侵襲型の人工関節などが代表的に挙げられる [71]．使用者は，これらから障害の程度，残存能力，予後予測，目的，使用場所を考慮した効果的な選択を行う必要がある [72]．

接触型の運動機能回復訓練ではトレッドミル構造を利用し体重を免荷した状態での訓練を可能とした Lokomat [73], [74]，訓練者への疑似的な歩行訓練の環境を与え負荷軽減と姿勢矯正を行う装置 [75]，屋内での歩行を電動アシストする歩行支援機 [76]，ベッドサイド型下肢運動療法装置 [77] などが開発されている．装着型の能動装具である HAL (Hybrid Assistive Limb) [78] は，運動機能の拡張・強化・補助を目的とし，表面筋電位を用いた制御を行う．また，WPAL (Wearable Power-Assist Locomotor) [79] は，車いすを併用し，歩行器を用いた自立的な起立と軽負担な平地歩行を可能としている．しかし，これらの訓練機や装具を使用することで運動機能の拡張や回復は認められるが，使用・訓練環境の限定や社会参加・復帰に至るまでには課題が残る．このように重度の移動能力障

害における運動機能回復には様々な提案が行われているが、軽度の移動能力障害や回復期に相当する患者に対してこれまでロボティクスの技術を用いた研究は少ない。

歩行の獲得において、訓練者が社会参加を実現するには、実用性歩行の獲得が必要であり、1秒間に1~1.2[m]、30分の連続歩行がその目安としてある。この速さを獲得するには最低でも一本杖レベルの歩行能力が望まれる。一本杖の先端に歩行カウンターを取り付けた片麻痺患者の活動量の調査研究では、1日7,000歩を超えるまでに回復した症例（患者）において社会参加が可能という目安作りが行われている [72]。このように杖を用いた歩行を習得および習熟することで、身体の外延としての機能が見込まれ、社会参加の実現が大いに促進される。しかしながら、杖の使用方法を誤り、望む効果が得られていないことが多くあり正しい杖歩行の習得が必要である。また、リハビリテーションなどで訓練場所を限定せず、多くの人例えば自室などで訓練を実施でき、効率的な習得および習熟が行える訓練機の開発が望まれている。

本章では、訓練者に杖歩行の習得および習熟の効率的な支援を目的とした歩行訓練ロボットの開発を行う。同時に、訓練者には単調な訓練への精神的な負担軽減と介助者への省力化を目指す。歩行訓練ロボットの開発において、2章で開発した球体駆動式全方向移動機構をプラットフォームとして採用し、その有効性の検証を行う。本章の構成は以下の通りである。3.2節では歩行介助における課題および杖を用いた歩行について紹介し、3.3節では提案する歩行訓練システムの概要を示す。さらに、3.4節では開発した歩行訓練ロボットが有する機能を解説し、3.5節では歩行訓練ロボットを用いた杖歩行訓練の様子を示す。3.6節で本章の結論を述べる。

## 3.2 歩行介助と杖歩行

### 3.2.1 歩行介助

自立した歩行は困難であっても、杖などの補助具と適切な介助を受けることで歩行が可能となる場合がある。適切な介助を受けて行う歩行訓練は、移動能力を高める有益なリハビリテーションである。杖を用いた歩行訓練では、理学療法士やリハビリテーションスタッフが介助者として訓練者の歩行がスムーズに行えるように介助する。介助者は訓練者の転倒に備え、訓練者の腕の付け根や腰を支持する。一本杖3動作歩行や2動作歩行のリズムに合わせ、訓練者の重心移動を助けるように介助が行われる。また、訓練中の緊張を和らげ、モチベーションを高めるために歩行リズムなどの声かけも行われている。

しかしながら、この歩行介助には訓練者、介助者の双方に問題がある。介助者は訓練者の安全を確保するために、身体的な負担が大きくなってしまふ。また、歩行訓練は訓練者にとってどうしても単調なものとなってしまう、正しい歩行が行えていないまま途中で訓練を放棄する場合がある。このような歩行介助の問題を解決し、介助者、訓練者の双方にとって有益な訓練システムの開発が期待されている。



### 3.2.2 杖歩行

本研究で対象とする一本杖を用いた歩行では，訓練者の身体機能および杖の条件として下記が挙げられる [72]．ただし，身体機能として体幹・健側下肢に問題がなく，健側下肢に十分な支持性があることが前提である．

#### 杖歩行が可能となるための身体的条件

- (1) 立ち上がり・立位保持が可能であること．
- (2) 患側下肢にある程度の支持機能があること．
- (3) 上肢で杖の操作ができること．
- (4) 片麻痺などでは重度の高次脳機能障害がないこと．

#### 杖の条件

- (1) 体重の一部を支えられるほど丈夫であること．
- (2) 持ち歩いて負担にならないほどに軽いこと．
- (3) 腕の力を効果的に発揮できるよう適切な形をしていること．
- (4) 杖先が確実に地面をとらえ滑らないこと．
- (5) 杖の長さが身体に合っていること．
- (6) 正しい方法で使うこと．

一本杖を用いた杖歩行は患脚の支持性により 2 種類に分類される．上記の身体的機能の条件を満たした訓練者は，患脚の支持性により図 3.1 に示す 2 種類の歩行パターンを行う．また，一本杖は基本的に健脚側につくという原則も重要である．これは転倒のリスクを減らすためであり，健側に杖をつくことで重心の移動時の安定性が増す．以下，2 種類の杖歩行について詳細を述べる．

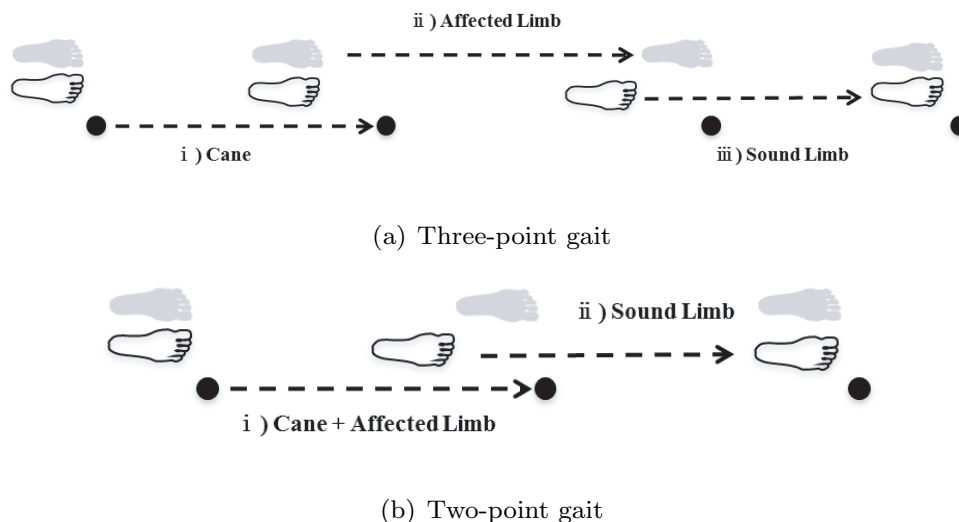


図 3.1. Classification of cane walk

### 一本杖 3 動作歩行

一本杖 3 動作歩行では図 3.1(a) に示されるように杖，患脚，健脚の順に前方へ移動する．この歩行パターンは常に体重が 2 点で支持され，バランスが保たれているため安定性が高い．健脚の接地時において，患脚の支持性により，杖に対する足の位置が後方，揃い，前方の 3 つに分けられる．これは熟練するに従い，後型 揃い型 前型へと移行していく傾向がある．

### 一本杖 2 動作歩行

一本杖 2 動作歩行は図 3.1(b) に示されるように，杖と患脚を同時に前方に出し，続いて健脚を前方に出す．歩行時には健脚 1 点と杖，患脚と杖の 2 点が交互に体重を支持するため，安定した歩行と速い速度での歩行が可能である．

このように，患脚の支持性，安定性により杖歩行の種類を選択し，適切な訓練を行うことが重要である．歩行訓練の初期段階では，平行棒内での歩行訓練による立位のバランスの向上や，その場での足踏みでの指導が行われる．また，パーキンソン病や小脳疾患等の患者は，最初の一步が容易に踏み出せない（すくみ足）ために歩行が困難となっている場合がある．このような場合，施設床面に横断歩道のように一定間隔で補助線やマーカなどを設けた場合，その視覚情報により歩容が改善されることが知られている．

### 3.3 歩行訓練システムの概要

#### 3.3.1 訓練システム

図 3.2 に歩行訓練ロボットを用いた杖歩行訓練の構想図を示す。ロボットは訓練者に対して訓練と介助の 2 つの要素を提供する。ここで、訓練要素とはロボットを用いた訓練法の詳細、介助要素とは訓練における安全性および実用的な課題としている。

#### 3.3.2 訓練要素

ロボットを用いた訓練では、訓練者が杖のようにロボットを持ち歩くのではなく、ロボットが歩行に合わせて自走を行う。訓練者と同じ方向へ自在に移動するために、ロボットの駆動部には全方向移動機構の採用が有効である。ここで、移動台車への速度指令の入力装置として力覚センサを用いている。訓練者の歩行の支えとなる支持部材の基端に力覚センサを取付け、支持部材は力覚センサを介して移動台車の上部に立設する。



図 3.2. Gait training system

Reif Co.,Ltd.

(<http://reif.p2.bindsite.jp/businesscontents.html> (accessed January 7, 2013))

ロボットには映像投影装置としてプロジェクタが取り付けられており、床面に踏み出し位置（足を出すための目標）の映像投影を行う。訓練者が投影された目標位置に従って足を踏み出すと、ロボットは踏み出された足の位置が適切であるか評価を行う。ここで、足の位置を評価するために距離センサを用いている。足の位置が評価されると、ロボットがスピーカより音声を発し、その評価結果を出力する。表示される目標位置などは、各訓練者に応じた歩幅などの設定を行うことで調整が可能である。

訓練中には、スムーズに歩行を行えるように各歩行の種類のリズムに応じた声かけをスピーカより発する。3動作歩行の例として、「杖・右足・左足」や「1・2・3」など様々なパターンの音声が出力可能である。また、投影された目標位置への訓練者の足の出し方の評価にも応用可能であり、「その調子ですよ」、「もう少し前に足を出しましょう」などの様々なパターンの出力が考えられる。

## 3.3.3 介助要素

歩行介助では訓練者の転倒を防ぎ、安全性を確保することが前提である。ロボットは、体重の一部を支えられる程度丈夫であることが必要である。さらに、訓練者のバランスが崩れた場合、ロボットには大きな力が印加されることになる。コントローラとして取り付けている力覚センサは、この転倒の恐れがあるような急な入力の変化が検出可能である。対処として、ロボットの緊急停止などが考えられるが、適する対処については今後議論を行う必要がある。

## 3.3.4 杖歩行訓練シーケンス

図 3.3 に歩行訓練ロボットを用いた杖歩行訓練の 1 つである一本杖 3 動作歩行の訓練シーケンスを示す。

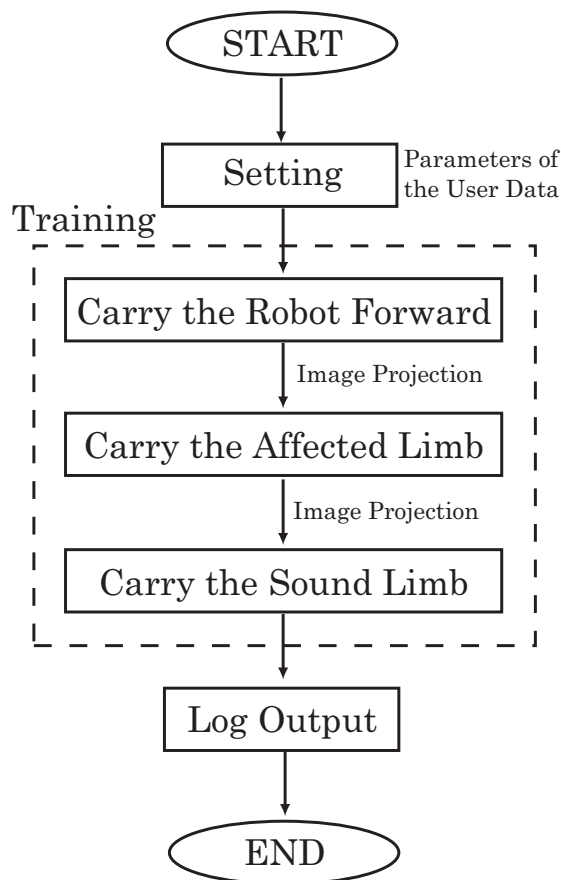


図 3.3. Sequence of gait training system three-point gait

### 3.4 歩行訓練ロボットの試作

開発した歩行訓練ロボットの試作機を図 3.4 に示す．各種センサは図のように配置され，上部にプロジェクタとスピーカを有する．プロジェクタからの映像投影の様子を図 3.5 に示している．以下，ロボット開発における要求要件について解説を行う．

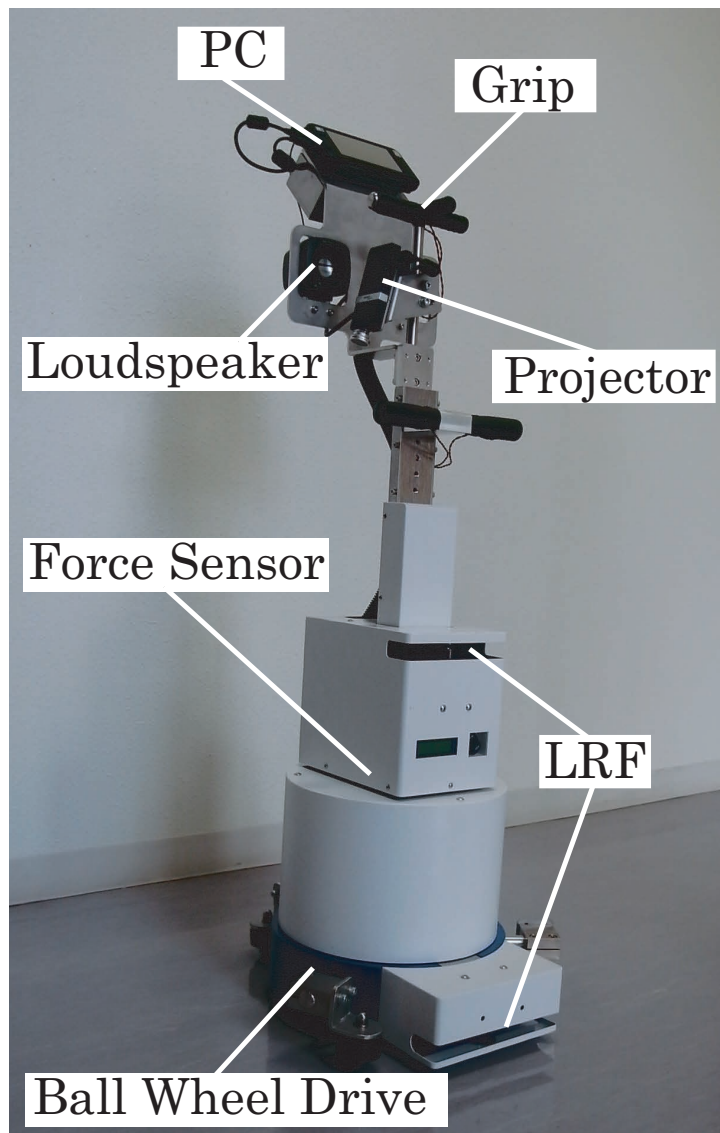


図 3.4. Prototype of a gait training robot

### 3.4.1 要求要件

3.3 節での杖歩行訓練構想を実現するため、歩行訓練ロボットの要求要件を以下にまとめる。ロボットはこれら 4 つの要求仕様に基づいて開発を行った。

- (1) 全方向移動：ロボットが動力を持ち、床面と常時接地した状態で、任意の方向へ自在に移動する。
- (2) 視覚フィードバック：床面に足の踏み出し位置を映像により投影し、目標に対する使用者の歩行に視覚的フィードバックを与える。
- (3) 状態取得：安定した支持基底面を確保するために、歩行中の足の出し方を取得し歩行状態の判断を行う。
- (4) 聴覚フィードバック：杖歩行のリズムや歩行の状態に基づいた声かけを行う。



図 3.5. Projection image of a target position

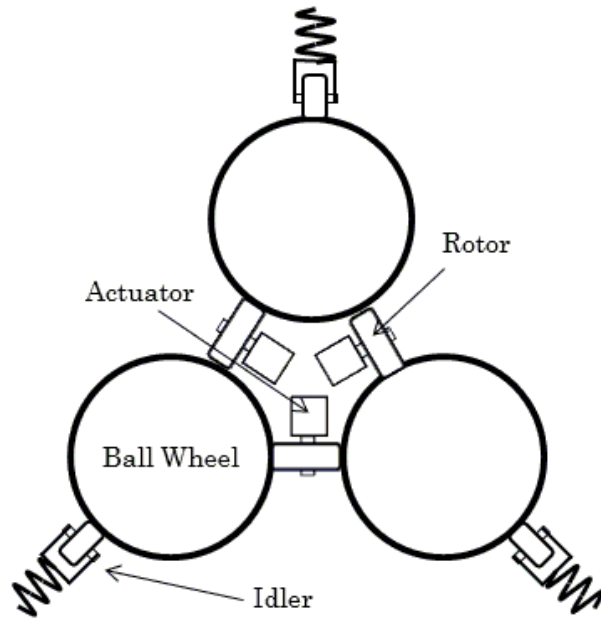
### 3.4.2 全方向移動機構

全方向移動機構を駆動部に採用することで、平面3自由度運動（並進2自由度、姿勢1自由度）を制御した高度な移動が可能となる。この歩行訓練ロボットのプラットフォームには高い走行安定性能が求められる。全方向移動機構が歩行中に何らかの力でコントロールを失ってしまうと、訓練者が転倒するなどのリスクが生じる。つまり、力が印加された状態であっても進行方向に対して安定した走行を行わなければならない。この点を考慮すると、従来のすべりを利用するオムニホイールの選択は適切ではないと考えられる。

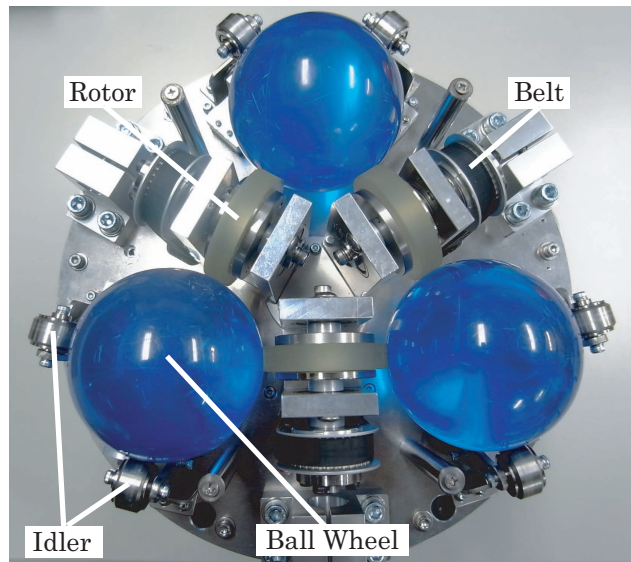
そこで筆者が開発している球体駆動式全方向移動機構をプラットフォームに採用することを試みた。すべりを利用せず、全ての球体が常時駆動輪となるこの機構は歩行訓練ロボットにおいて有用であると考えられる。すなわち、この特徴は訓練者からの荷重印加や走行面の摩擦の変化などの外乱に対して安定した走行に貢献する。

ロボットに搭載する上で、歩行の妨げとならないように移動機構はコンパクトであることが望ましい。そこで、図3.6(a)のように1つのロータが直接隣り合う2つの球体を駆動できるレイアウトを採用した。試作した球体駆動式全方向移動機構は図3.6(b)である。全方向移動機構の仕様を表3.1に示す。ホイールベースの縮小に伴うロボットの転倒リスクを回避するため、移動台車の周囲に複数の転倒防止用の旋回キャストを設けた。





(a) Top view of vehicle construction



(b) Prototype of ball wheel drive mechanism

図 3.6. Ball wheel drive mechanism

表 3.1. Specification of omnidirectional vehicle

Width	250 [mm]
Length	250 [mm]
Height	240 [mm]
Weight	15.6 [kg]
Ball Wheel's Diameter	100 [mm]
Rotor's Diameter	40 [mm]
Rotor's Width	10 [mm]
Rotor's Material	Urethane shore 90
DC Motor's Output	Maxon DC 60 [W] × 3
Gear Ratio	21
Internal Sensor	Incremental Encoder (Magnetic)
Encoder Resolution	512
Encoder Chanel	3

### 3.4.3 視覚フィードバック

ロボットに小型プロジェクタ (Optoma 社製, PK102, 10 [lm]) を取り付け, 床面に足の踏み出し位置を映像により投影する. 目標位置は図 3.7 のように足の形を投影する. ここでは赤色で示された左足が目標位置であり, 破線で描かれた右足はその時点での右足の位置を示している. この左足の目標位置は, 訓練者に分かりやすいように踵から, つま先にかけて色が塗りつぶされていくように繰り返し投影することで初期接地を促す.

### 3.4.4 状態取得

投影された目標位置に足が正しく出せているかを距離センサ (北陽電気株式会社製, URG-04LX-UG01) を用いて判定を行う. この距離センサは測距範囲 (5,600 mm x 240°) であり, ロボットの進行方向を除く周囲の距離測定が可能である. 歩行では, 立脚期における初期接地から足指離地, 遊脚期における足指離地から再度接地する歩行周期において, 荷重の受け継ぎ, 単下肢支持, 遊脚期の前進といった 3 つの課題遂行が必要である. 足を引きずる歩行を防ぐために, 初期接地から足指離地などが正しく行えているかを判定することは重要である. 距離センサを図 3.8(a) のようにロボットの底部に取り付け, 足が接地しているか, 振り出しが行えているか判定を行う. このために, 大腿部分と床面付近の 2 つの距離センサを取り付け歩行の状態取得を行う. 距離情報として大腿および踝付近の輪郭が得られ, それぞれの重心を求め 2 点を結んだスティックモデルとして足位置の評価を行う. 図 3.8(c) に示す大腿部分の輪郭からは, 前額面における訓練者の中心位置をデータの平均値として算出している. また, ロボットの支柱部分に図 3.8(b) のように

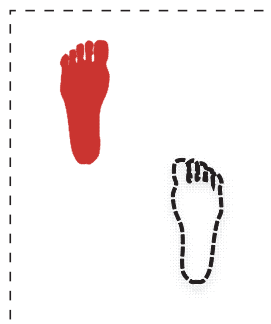
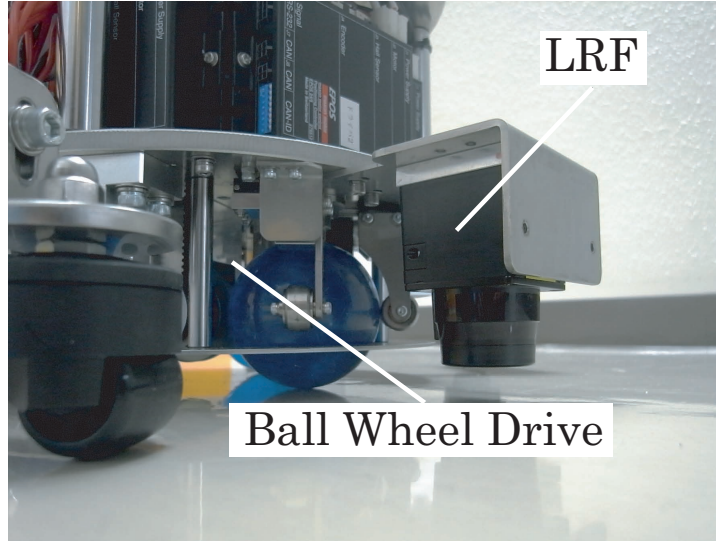
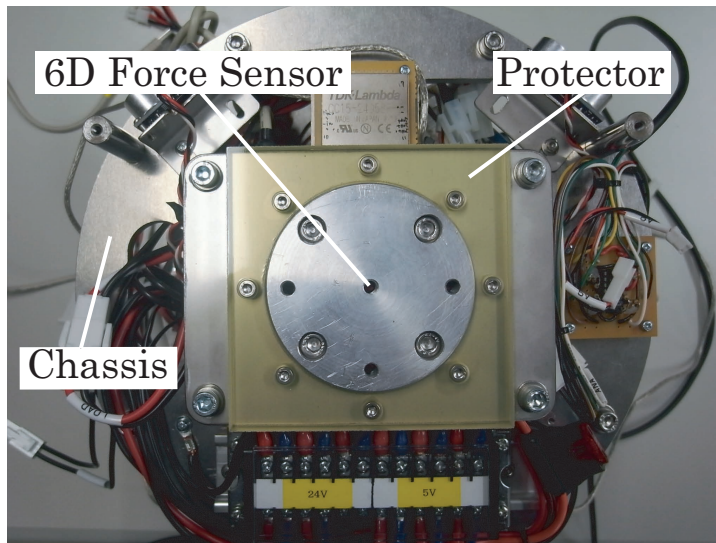


図 3.7. Image projection

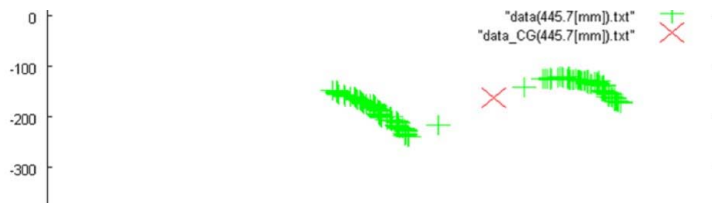
取り付けた6自由度力覚センサ(株式会社ワコーテック製, 静電容量型6軸力覚センサ)は, モーメント成分を除いた並進2自由度, 姿勢1自由度を用いてコントローラとして移動機構へ速度指令を行う. さらに, 歩行訓練中におけるロボットへの印加荷重を記録し, 異常検知として用いる.



(a) Laser range finder (bottom )



(b) Six-axis force sensor



(c) Measured position

☒ 3.8. Gait evaluation

#### 3.4.5 聴覚フィードバック

杖歩行のリズムの出力および訓練者への声掛けを目的にロボットのスピーカより音声が発せられる。このスピーカを用いた声かけは人工音声だけでなく、訓練者が親しくする家族や友人といった人の声を用いることも可能である。聴覚フィードバックを用いることで、訓練の単調さを軽減でき、楽しみを持って臨めることが期待できる。

### 3.5 歩行訓練ロボットを用いた訓練

ここで訓練の例として、訓練ロボットによる一本杖3動作歩行の訓練の様子を図3.9に示す。この訓練は、図3.3のシーケンスに基づいた訓練プログラムを実施した。初期の足が揃った状態から再度その状態に戻るまでの様子を示しており、各画像における状態は以下の通りである。

- (1) 初期位置：ロボットを持ち、足が揃っている状態とする。
- (2) ロボット移動：進行方向への力の印加により、進行方向へロボットが前進する。
- (3) 映像投影：患脚の目標位置を投影する。
- (4) 初期接地：目標位置に対して足を踏み出す。
- (5) 映像投影：健脚の目標位置を投影する。
- (6) 初期接地：目標位置に対して足を踏み出す（初期状態へ戻る）。

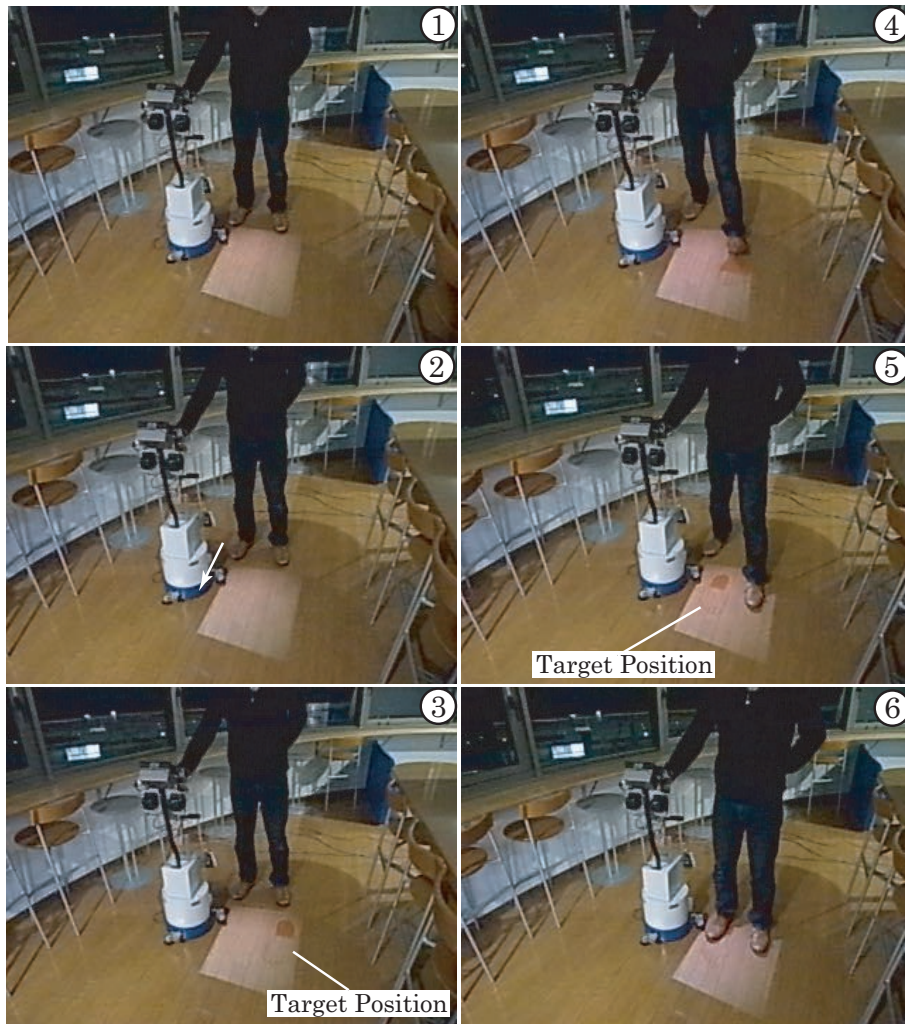


図 3.9. Training with gait training robot

### 3.6 まとめ

本章では正しい杖歩行の習得および習熟の効率的な支援を目的とした杖型の歩行訓練ロボットを提案した。ロボットの駆動部には、外乱に対して強固な走行安定性を有する球体駆動式全方向移動機構を採用した。杖歩行での患脚・健脚の踏み出し位置をロボットから映像投影し、目標に対する歩行状態の評価を行った。歩行状態に応じたフィードバック機能を有し、音声を用いて歩行リズムや声掛けなどを行う。本訓練ロボットを用いることで介助者の負担軽減と同時に、訓練者が楽しみを持って訓練に臨むことが期待される。現状では、歩行訓練ロボットの試作開発および各種機能の動作検証を行った段階である。今後の展開として、訓練者に対して歩行訓練ロボットを用いた訓練の有効性や、各種フィードバックの有無による歩容の変化について評価を行う。



## 第 4 章

# 全方向電動車いすの開発

### 4.1 はじめに

本章では，3 章と同様にロボティクス・メカトロニクス技術を用いた自立・移動支援の 1 つである電動車いすの開発を行う．3 章では，下肢の運動能力に障害があるがその程度が多少不自由な人を想定し，歩行補助具の使用によって社会参加・復帰を目指した歩行訓練支援ロボットを開発した．障害の程度が自身の力ではほとんど歩行が行えない場合には，移動手段として車いすの使用が有効である．日本では，工業標準化法に基づく国家標準の 1 つである日本工業規格（Japanese Industrial Standards）において，JIS T 9201「手動車いす（Manually propelled wheelchairs）」が 1971 年に制定され，最新は 1998 年に改訂されている [80]．この規格の中で標準形だけでなく，外観および用途によって室内形やスポーツ形など様々な分類がある．

しかしながら，下肢の障害だけでなく上肢にも何らかの障害があり手動車いすの操作が自分自身の力で困難な場合は，電動車いすの利用が有効である．また，先天的な障害を持つ人にとって電動車いすが唯一の能動的移動手段となる場合が多く，その役割は重要である．平成 24 年版高齢社会白書によると，総人口に占める 65 歳以上の高齢者人口の割合（高齢化率）は 2011 年 10 月 1 日現在，23.3 [%] に達し，2.5 人に 1 人が高齢者，4 人に 1 人が 75 歳以上人口という「本格的な高齢社会」となっている [81]．さらに，電動車いすの累計出荷台数はジョイスティック形，ハンドル形を合わせて 1985 年より，約 59 台

が普及しており，厚生労働省の「補装具費支給制度の概要」に基づく耐用年数の6年を基準とするとじいスティック形：約37,000台，ハンドル形：97,000台が現在使用されている [82]．このように電動車いすは使用者の市場は今後拡大すると考えられており，電動車いすの現状や課題について調査が行われている [83], [84]．

電動車いすは JIIS 規格において，JIS T 9203 「電動車いす (Electric wheelchairs)」が 1977 年に制定され，最新は 2006 年に改訂されている [85]．電動車いすの構成として，シート，バックサポート、アームサポート，フット・レッグサポートなどの身体支持部，駆動モータ，減速機及びバッテリーからなる駆動部，操作ボックス及びコントローラからなる制御部，駆動輪及びキャストまたは操舵輪から成る車輪，フレーム，ブレーキなどが主な要素として挙げられる．これまでに通常の電動車いすの機能に加え，座面昇降機能，立位機能，階段昇降機能 [86]，その場旋回が可能な電動車いす [87] などが開発されている．電動車いすへの操作は最も一般的かつ伝統的なジョイスティックだけでなく，近年では音声認識 [88] や視線-頭部追跡 [89]-[91] もしばしば用いられている．このような操作では単に台車を移動させるのみならず多くの知的な機能の付加が可能となる．

しかしながら，これらのような海外では多機能な電動車いすが開発されているにも関わらず，日本での普及はあまり進んでいないのが現状である．これには金額の問題だけでなく日本独自の文化の違いが指摘されている [84]．特に住宅の構造も欧米と比べ，階段，廊下幅の狭さなど移動の障害となるものが多く電動車いすの使用の障害となっている．これにはバリアフリーの促進だけでなく，日本の環境にあった独自のシステムの構築が必要になると考えられる．

これらを克服する 1 つの技術として，狭い屋内においても自由な移動が実現できる全方向移動機構を駆動部に持つ全方向電動車いすが開発されている [92]-[94]．本章では，筆者が開発している球体駆動式全方向移動機構を駆動部に採用した全方向電動車いすの開発を行い，その有効性を検証する．

## 4.2 球体駆動式全方向移動機構の試作

2章で開発した全方向移動機構は、移動台車として設計を行ったため本格的な電動車いすへの適用にはサイズや耐荷重などを考慮した設計が必要である。そこで基本的な駆動原理や構成は同様にして、再設計を行った。JIS T 9203 による電動車いすの型式分類では、全方向移動機構を駆動部に持つ形式はこの規格で適用されておらず、現状では明確な設計の指針が得られない。そのため、JIS T9203 を参考として駆動部の設計を行うこととする。

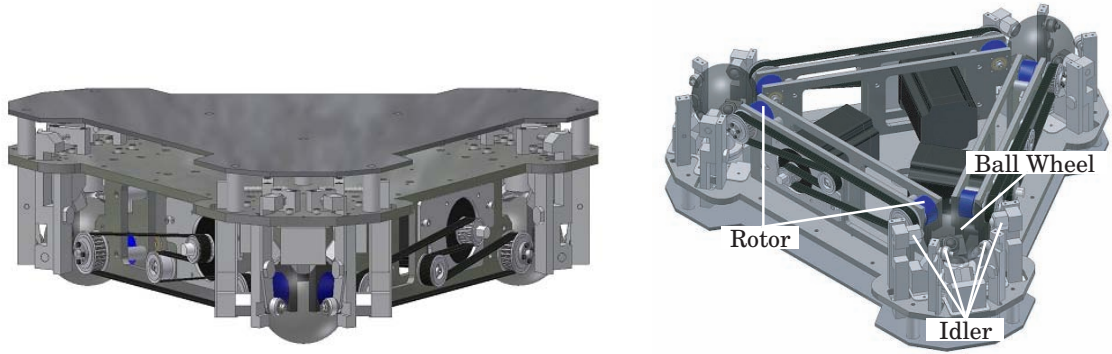
駆動部の設計ではまず最大寸法の決定を必要がある。JIS T 9203 では、最大寸法を表 4.1 のように定めている。対して建築物などにおける公共の福祉の増進に資することを目的としたを促進バリアフリー新法では、移動経路における幅は出入口：80 [cm] 以上，廊下等：120 [cm] 以上，敷地内の通路：120 [cm] 以上が定められているが，施行前の住宅や施設ではこの数値を大きく下回ることもあり，駆動部の寸法においてもこれを考慮せねばならない [95]。また車両の安定性を得るためにはホイールベースやトレッドが十分に確保する必要があり，この経路幅とはトレードオフの関係である。筆者が所属する研究室のドア幅（約 700 [mm]）を通過できるように，駆動部の幅を 650 [mm] に設定した。また，人や積載物が乗った状態で耐えるように球体の支持部の強化を図る。走破性能を高めるためには，駆動輪（主輪）の直径を大きくする必要があるが，筆者が使用している球体よりも径が大きなものは特別発注の必要があり，本研究では径の拡大は行わなかった。

表 4.1. Maximum dimension

Length	1200 [mm]
Width	700 [mm]
Height	1090 [mm]

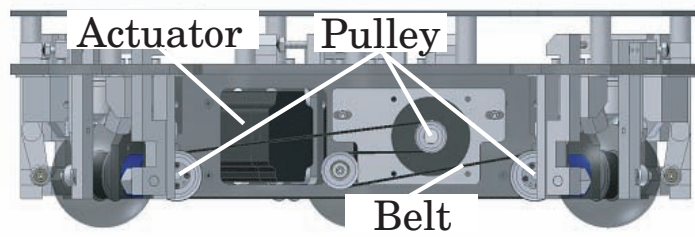
3D CAD による設計図面を図 4.1 に示す．図 4.1(a) は全方向移動機構の概観図であり，図 4.1(b) に移動機構の上下を逆さにした状態での斜視図，図 4.1(c) に側面図，図 4.1(d) に底面図，図 4.1(e), 4.1(f) に球体の回転保持機構の構造をそれぞれ示している．積載重量が増加することで球体とロータの圧接駆動がうまく働かない恐れがあるため，回転保持部には5つのボールキャストと4つのアイドラでよりスムーズに回転保持が行えるように改良した．また，ロータの幅を従来の倍の厚さ（20 [mm]）に変更し，駆動力の伝達部分についても改良を行った．アクチュエータには広範囲での速度制御が可能なことやフラットトルクに特徴があるブラシレス DC モータ（Oriental motor 社製，DC24 [V]）を採用した．

ここで，目標とする耐荷重について述べる．電動車いすはバッテリーによって動力を得ており，走行距離や使用時間を十分に確保するためには容量の大きなバッテリーが必要となる．大容量のバッテリーは重量が重く，さらに駆動に必要な強力なモータの重量も重い．ここに使用者自身の体重が加わると 150 [kg] 程度の耐荷重が必要であると考えられる．本機構では耐荷重の目標をこれに設定し，開発を進めていくこととする．

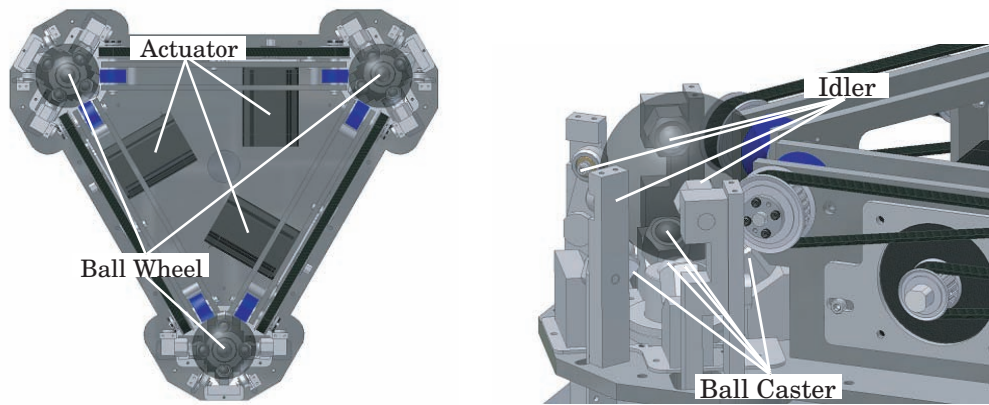


(a) Whole view

(b) Perspective view

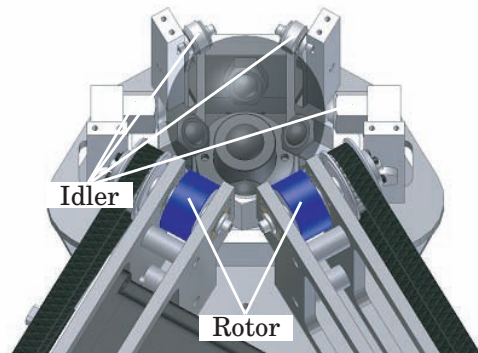


(c) Side view



(d) Bottom view

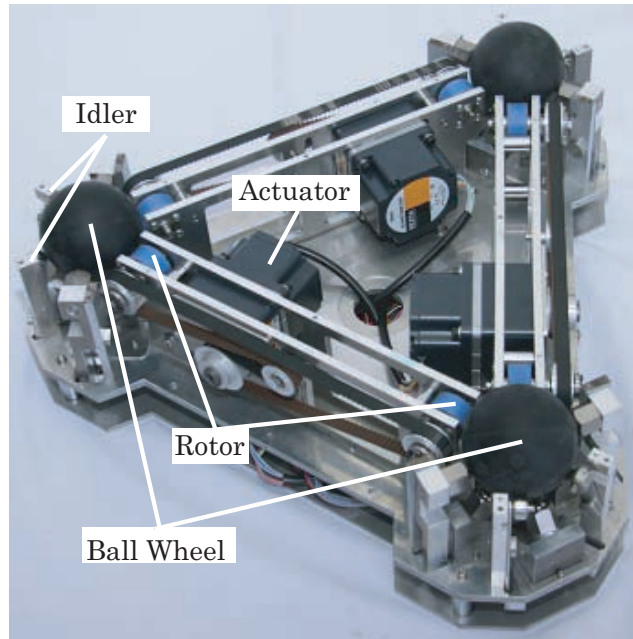
(e) Support unit (side view)



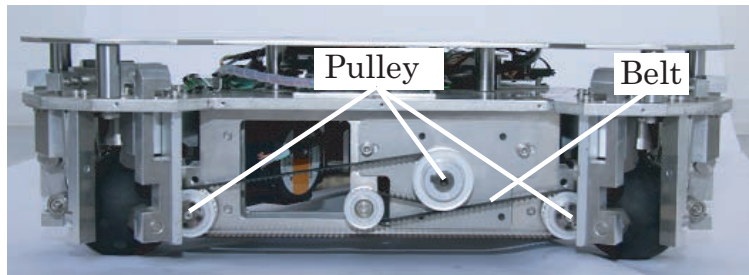
(f) Support unit (top view)

図 4.1. 3D CAD design of ball wheel drive mechanism

開発した試作機の概観を図 4.2，その仕様を表 4.2 に示す．ここで示した耐荷重は人が 3 名搭乗した状態において駆動を確認したことを意味しており，3 名の合計体重が約 180 [kg] であった．JIS T 9203 では電動車いすの機能分類として最高速度によって低速用：4.5 [km/h] 以下，中速用：6.0 [km/h] 以下の分類が行われている．本機構の最高速度は 2 [km/h] であり，低速用の分類となる．バッテリーは簡易形電動車いす用のニッケル水素バッテリー（ヤマハ発動機製，24 [V]，6.7 [Ah]）を用いた．球体とアクチュエータの配置は図 2.8 と同様であり，車両への動作入力では 3 自由度のジョイスティックにより並進速度  $v_x, v_y$ ，原点  $o$  周りの回転角速度  $\omega$  の速度指令を生成することができる．速度指令は式 (2.13) によりロータの回転角速度が求められ，モータドライバを介して各アクチュエータへ速度指令が図 4.3 に示されるように与えられる．なお，速度制御には PWM 方式を用いている．

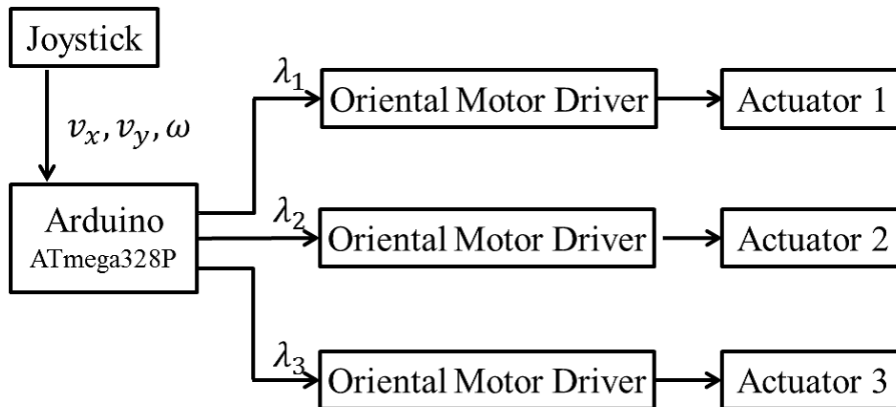


(a) Perspective view



(b) Side view

☒ 4.2. Prototype of a omnidirectional vehicle



☒ 4.3. Control system of omnidirectional vehicle

表 4.2. Specification of omnidirectional vehicle

Width	650 [mm]
Length	591 [mm]
Height	200 [mm]
Weight	40 [kg]
Ball Wheel's Diameter	98 [mm]
Ball Wheel's Weight	0.56 [kg]
Ball Wheel's Material	Urethane shore 90
Rotor's Diameter	40 [mm]
Rotor's Width	20 [mm]
Rotor's Material	MC Nylon
DC Motor's Output	Oriental DC 100 [W] × 3
Gear Ratio	30
Teeth Number of Pulley (Motor)	30
Teeth Number of Pulley (Rotor)	26
Max. Loading Weight	180 [kg]

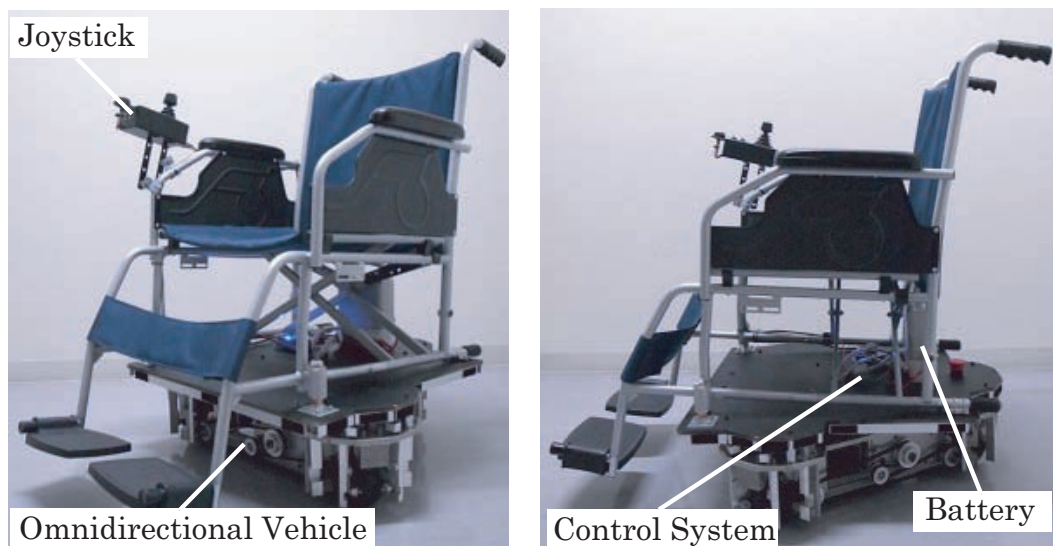


### 4.3 全方向電動車いすの試作と走行性能の検証

4.2 節で試作した球体駆動式全方向移動機構を駆動部に持つ全方向電動車いすの試作を行った。JIS T9201 手動車いすを規格取得した既製品から駆動部および車輪を取り除き、プラットフォームと接合した状態が図 4.4 である。この全方向電動車いすのサイズは、H 900 [mm] x W 650 [mm] x D 920 [mm] である。また、入力装置は図 4.5 で示すようにジョイスティックを用いている。このジョイスティックでは並進方向にはスティックを意図する方向へ倒し、回転方向にはスティックのつまみを左右にひねることで入力が行える。2 章では、並進直進、並進左右、斜め、その場旋回の基本的な走行実験および実環境で外乱となる段差、溝、斜面への走行実験を行った。本節では、この全方向電動車いすを用いてより実環境に即した走行実験を行う。

予備実験として、2 章の外乱に対して人が搭乗した同様の実験を行い表 4.3 の結果を得た。これらの数値は圧接駆動がすべりなく機能していれば駆動球体の直径に依存するため、サイズ変更を行っていないこの全方向電動車いすでは同様の結果となるといえる。

次に、床面の状態が変化した場合を取り扱う。一般的な全方向移動機構はすべりを用い



(a) Perspective view

(b) Side view

図 4.4. Prototype of a omnidirectional electric wheelchair

ることで各車輪の速度を合成し、機構全体の速度を得ている。この場合、床面の状態が変化し、駆動力の伝達が同条件でなくなるとコントロールを失ってしまう。極端な例では、車輪が浮き上がってしまった場合などではそれは顕著であり、従来の全方向移動機構を電動車いすの駆動部に用いることはリスクが高い。本機構では全ての球体が駆動輪となることから、摩擦係数などの状態変化が生じた場合でもコントロールを失いにくいと言える。これを検証するために、図 4.6 のように意図的に一つの球体が接地しない状態を再現し走行の検証を行った。図 4.6(a) は連続画像のうち 6 枚を重ね合わせた合成画像を示している。2 つの球体が進行方向に駆動力を発生させているため、結果としてコントロールを失うことなく進行方向へ向かうことができた。



図 4.5. Joystick

表 4.3. Moving ability

Step Climbing Ability	14 [mm]
Gap Traversing Ability	50 [mm]
Slope Climbing Ability	15 [deg]



(a) Longitudinal motion



(b) Side view

図 4.6. Lift omnidirectional electric wheelchair up



(a) Braille block



(b) Stone path



(c) Elevator

図 4.7. Disturbances

次に、筆者が所属する大学周辺での環境における外乱に対して走行実験を行った。図 4.7(a) は視覚障害者誘導用のブロックであり、2001 年に制定された JIS 規格では点状、線上の突起高さは 5 [mm] と定められている。実験では点字ブロックの上を走行し、突起が与える走行への影響について検証した。このプラットフォームには走行面の凹凸によるショックを吸収する機構がないため、多少の振動は生じるがコントロールを失うことなく走行が実現できた。同様に、図 4.7(b) は石畳の上での走行を検証した様子であるが、走行に問題はなかった。最後に、エレベータへの乗込みの様子を図 4.7(c) に示す。図で示されるように、溝の踏破を問題なく行うことを確認できた。

#### 4.4 まとめ

本章では、球体駆動式全方向移動機構を駆動部に持つ全方向電動車いすの開発を行った。電動車いすへの適用に際し、駆動部ではトルクや速度制御において扱いやすいブラシレス DC モータへの変更、支持部では積載荷重を向上させるためにアイドラやボールキャスタの設置数を増やし、圧接駆動が機能するように試みた。開発した全方向電動車いすを用いて一般的な全方向移動機構の欠点であるすべりを利用しない本機構の有効性を示し、屋内での実験だけでなく点字ブロックや石畳といった屋外での外乱を想定し走行検証を行った。全方向電動車いすでは、JIS 規格が未制定なため機能試験などは筆者の想定に留まった。ただし、現状の球体の直径サイズでは JIS T 9203 規格の機能試験は段差や溝などにおいても要件を満たすことができない。本研究では、十分な大きさの球体を用意できなかったため、今後サイズを拡大し機能試験に即した検証が必要になるとと思われる。

## 第5章

# 全方向衝突検知装置の開発

### 5.1 はじめに

全方向移動機構の高度な移動性は多くの分野への応用が期待されている。筆者は本研究において福祉分野への応用を試みたが、搬送台車や自律移動ロボットなど様々な可能性がある。しかしながら、高度な移動性は利便性をもたらす一方で操作ミスや制御の複雑さにより衝突等の危険性が増加することを忘れてはならない。これに関連して自律移動ロボットなどにおいてもセンシング技術を用いた環境認識や自己位置推定などによって人やロボットの安全の確保を目指している。本章では特に4章で取り扱った電動車いすの衝突安全について議論を行う。電動車いすでは、狭い屋内などの衝突・接触事故だけでなく残念ながら死亡事故も起きているのが現状である。

特に操作ミスによって電動車いすが使用者の意図しない方向へ進んでしまうことが多くある。使用者の安全を確保するために、周囲の環境での危険性を検出し障害物などを回避する研究が行われている。電動車いすに超音波センサ、赤外線センサ、レーザレンジファインダ、力覚ジョイスティックなどを用いた障害物回避関連の研究がある。[96]–[102]。また、近年では、画像処理技術の進展に伴い全方向カメラシステム [103], [104]、魚眼カメラシステム [105]、ステレオ全方向カメラシステム [106] などが開発されている。これらのシステムは衝突の回避だけでなく、自律もしくは半自律型の電動車いすのような知的機能の付加が可能となる。しかしながら超音波センサなどの距離センサを用いる場合は機構

の周囲に多数配置するか，レーザレンジファインダを用いることになるが前者はセンサ数増加による誤差の蓄積や信頼性に課題があり，後者はコストの問題が残る．さらに，測定した距離データを元にした回避行動では，誤検出が生じた場合使用者が事前に動作を予測できず，不安をもたらす要因となる．

これらを解決するため，シンプルなメカニズムを用いて全方向移動機構における安全技術に取り組む．移動機構の周囲にフレーム状のバンパーを取り付け，移動機構本体が壁面や障害物に衝突することを防ぐ．このバンパーに衝突の有無および方向を検知させるで，移動機構が障害物に対して回避行動を行えるシステムを提案する．また，バンパーの衝突検知精度を検証するために 2 章で開発したプラットフォームへの取付を前提として開発を行う．

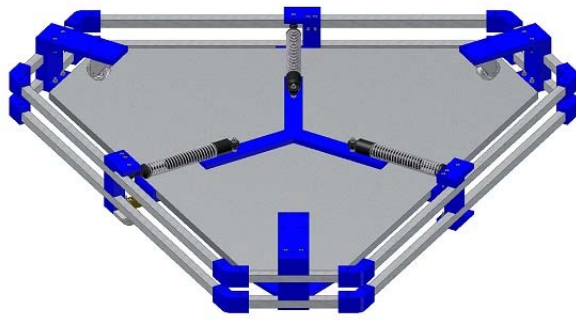
## 5.2 全方向衝突検知装置の試作

衝突検知装置は図 5.1 のように、移動機構の周囲を覆うように取り付ける。図 5.1(a),5.1(b),5.1(c) にバンパ単体を示しており、中央のプレートは移動機構の天板である。また全方向移動機構にバンパーを取りつけた状態を図 5.1(d),5.1(e),5.1(f) に示している。このバンパーは移動機構の本体とサスペンション部によって接合されている。サスペンション部をは引張バネとダンパによって構成されているため、バンパーは移動機構本体に対して相対的に自由に可動することができる。つまり、衝突の際はバンパーが衝突方向と逆方向に移動する。

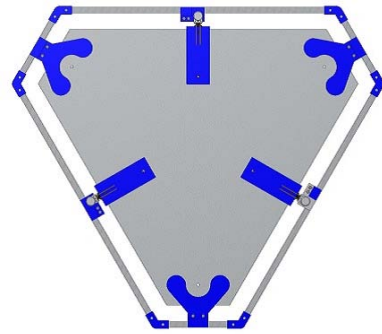
このときのバンパーの移動量を測定することで、本提案装置は衝突の有無だけでなく方向の検知が実現できると考えられる。バンパーの移動は水平面内の 3 自由度運動となるため、原理的には測定方向の異なる 3 つのセンサによってバンパー移動量の測定が可能となる。本研究では、ロータリーポテンショメータをセンサとして採用し、ポテンショメータのつまみ部分にスリットを設けたコの字の状のリンクを取りつけた。リンクを回転させる支点となるピンは移動機構本体の天板部分に固定する。つまり、バンパーの移動によってリンクはピンを支点として回転することが出来る。引張バネ、ダンパ、ポテンショメータをセンサユニットとして、バンパーの長辺の中心に計 3 箇所取り付けた。図 5.2(a) にリンクを取り付けたポテンショメータの回転方向、図 5.2(b),5.2(c) にセンサユニットの詳細を CAD 図としてそれぞれ示す。

衝突後、バンパーは初期位置へ戻る必要があり、これに必要な復元力は、図 5.2(c) で示されるように、バンパーと移動機構本体を連結させた引張バネを用いている。センサユニットの上段にダンパと引張バネを取り付けることで、スムーズな初期位置への回帰が可能となる。また、バンパーの水平面内における移動をスムーズに保つために、図 5.1(a),5.1(b) で示されるバンパーの短辺にフ天板を上下から挟み込むようにフリーキャスタを取りつけた。

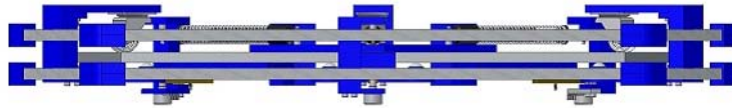




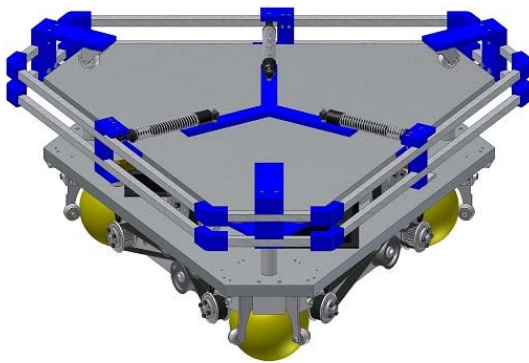
(a) Whole view



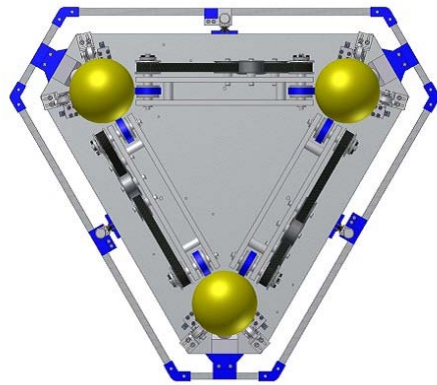
(b) Bottom view



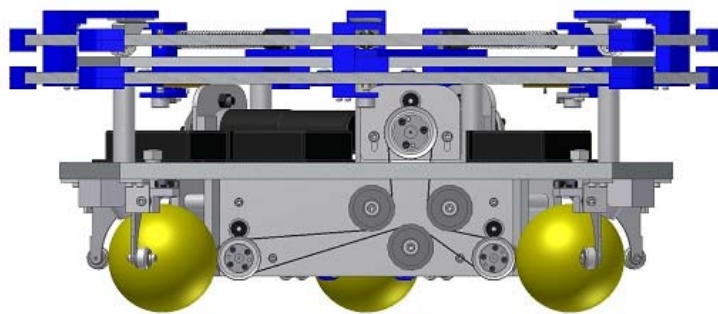
(c) Side view



(d) Bottom view

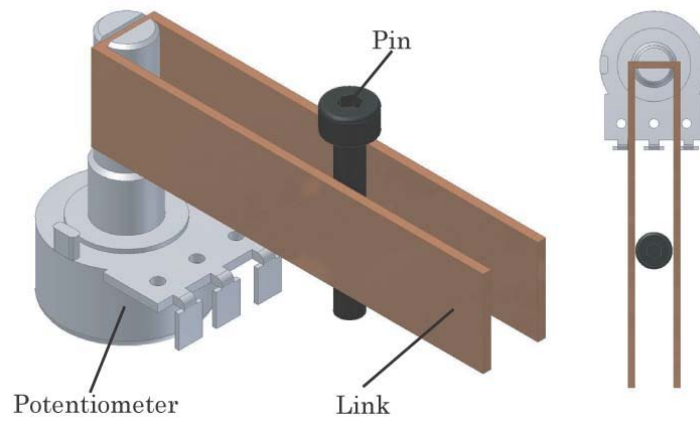


(e) Bottom view

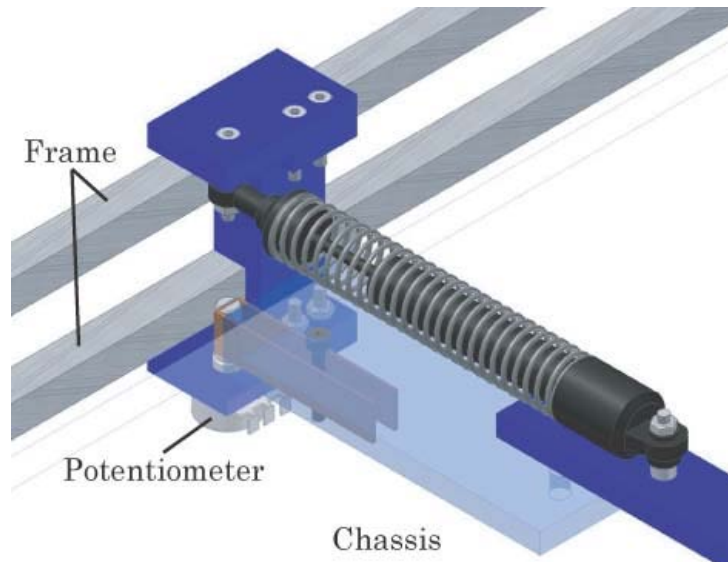


(f) Side view

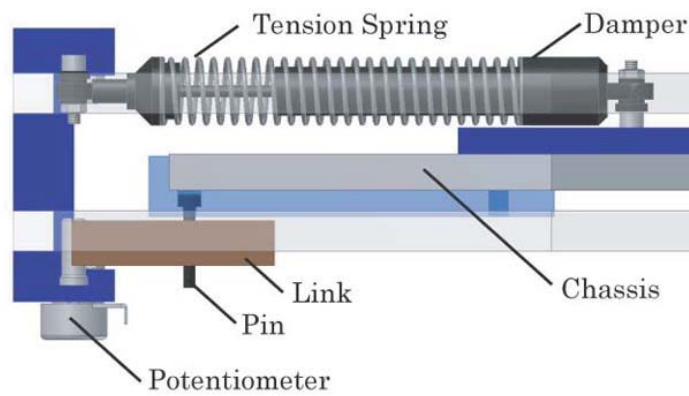
図 5.1. 3D CAD design of collision-detecting device



(a) Detecting of the displacement



(b) Perspective view



(c) Side view

図 5.2. Sensor unit of collision detecting device

## 5.3 運動学

基準となる移動機構の中心に固定した座標系を  $\Sigma_V$  とし，移動機構に一致して  $x_V, y_V$  をとる．図 5.3 に示されるように，原点  $o_V$  からピンまでの距離を  $L_1$ ，ポテンシオメータまでの距離を  $L_2$  とする．センサユニットの番号を図 5.3 の左下を 1 とし反時計周りに与える．このとき，ピンの中心位置を  $(a_i, b_i)$ ，ポテンシオメータの中心位置を  $(c_i, d_i)$  とする．ここで，添え字  $i$  はセンサユニットの番号を表す．( $i = 1, 2, 3$ )

バンパーの衝突による移動を考えるため，まず初期位置について考える．バンパーに固定した座標系を  $\Sigma_B$  とすると，初期状態において  $o_B$  は，座標系  $\Sigma_V$  における原点  $o_V$  と一致する．各ピン  $i$  の移動機構座標系からの回転角度を  $\gamma_i$  とする．(反時計周りを正とする) 各ピン  $i$  および各ポテンシオメータ  $i$  の座標は，それぞれ以下のように定義される．

$$\begin{aligned} (a_i, b_i) &= (L_1 \cos \gamma_i, L_1 \sin \gamma_i) \\ (c_i, d_i) &= (L_2 \cos \gamma_i, L_2 \sin \gamma_i) \end{aligned} \quad (5.1)$$

バンパーが衝突により初期位置から移動し，バンパーに固定した座標系  $\Sigma_B$  が移動機構座標系  $\Sigma_V$  より  $x_V$  軸方向， $y_V$  軸方向にそれぞれ  $x, y$ ，さらに  $o_V$  周りに  $\theta$  回転したとす

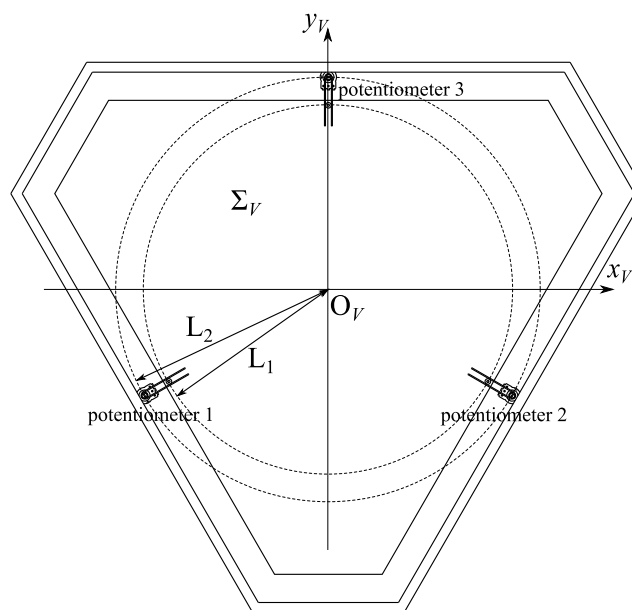
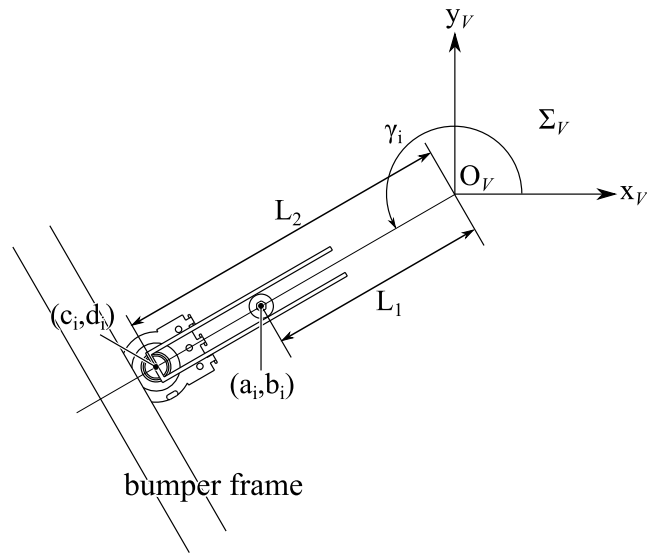
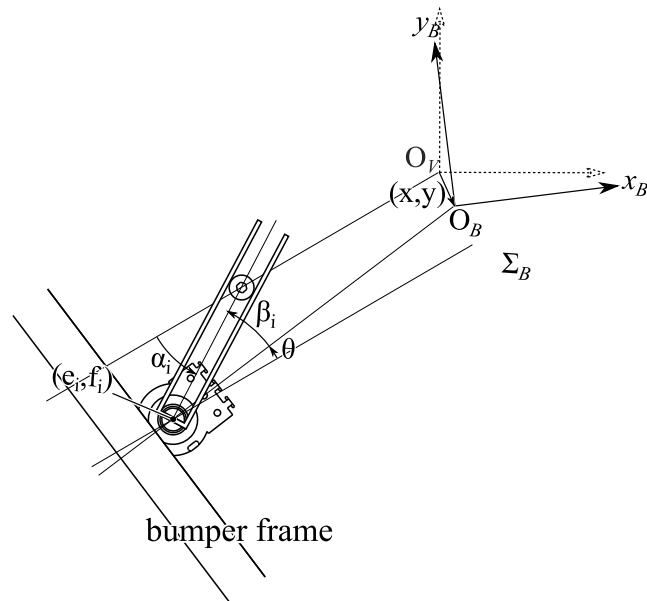


図 5.3. Layout of the sensor unit



(a) Initial position



(b) Change of position

図 5.4. Bumper movement by collision

る．このとき，ポテンシオメータの中心位置を  $(e_i, f_i)$  とすると，

$$(e_i, f_i) = (c_i \cos \theta - d_i \sin \theta + x, c_i \sin \theta + d_i \cos \theta + y) \quad (5.2)$$

である．ピンの中心とポテンシオメータの中心とを結ぶ線分の回転角度を  $\gamma_i + \alpha_i$  とすると，以下が成り立つ．ただし， $\alpha_i$  はバンパーの移動の回転成分  $\theta$  にポテンシオメータの

回転角  $\beta_i$  を加えたものである .

$$\tan(\gamma_i + \alpha_i) = \frac{f_i - b_i}{e_i - a_i} \quad (5.3)$$

ここで  $\gamma_1 = (1/2 + 2/3)\pi$ ,  $\gamma_2 = (1/2 + 4/3)\pi$ ,  $\gamma_3 = 1/2\pi$  とすると ,

$$\begin{aligned} \tan(\alpha_1) = z_1 &\doteq \frac{x - \sqrt{3}y + 2L_2\theta}{-\sqrt{3}x - y + 2(L_2 - L_1)} \\ \tan(\alpha_2) = z_2 &\doteq \frac{x + \sqrt{3}y + 2L_2\theta}{\sqrt{3}x - y - 2(L_2 - L_1)} \\ \tan(\alpha_3) = z_3 &\doteq \frac{-x + 2L_2\theta}{y + (L_2 - L_1)} \end{aligned} \quad (5.4)$$

である . このとき ,  $\theta$  が微小量であると仮定し ,  $\sin \theta \doteq \theta$ ,  $\cos \theta \doteq 1$  と置く . これらを整理すると次の関係が成り立つ .

$$\mathbf{A}\mathbf{b} = \mathbf{c} \quad (5.5)$$

ただし

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 + \sqrt{3} \tan \alpha_1 & \tan \alpha_2 - \sqrt{3} & 2L_2 \\ 1 - \sqrt{3} \tan \alpha_3 & \tan \alpha_3 + \sqrt{3} & 2L_2 \\ -2 & -2 \tan \alpha_1 & 2L_2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} x & y & \theta \end{bmatrix}^T$$

$$\mathbf{c} = \begin{bmatrix} 2(L_2 - L_1) \tan \alpha_1 \\ 2(L_2 - L_1) \tan \alpha_2 \\ 2(L_2 - L_1) \tan \alpha_3 \end{bmatrix}$$

これより , バンパーの動き  $\mathbf{b} = (x, y, \theta)^T$  すなわち障害物との衝突方向は ,

$$\mathbf{b} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{c} \quad (5.6)$$

として得られる .

## 5.4 実験

### 5.4.1 ポテンシオメータの校正

ポテンシオメータの校正のため、データの取得と解析の基礎実験を行った。本稿で対象とした全方向移動機構は高速プロトタイピングを目的とするマイコンモジュール mbed によって制御されている。バンパーの移動量検出においても同一のボードに搭載した mbed 内蔵 A-D コンバータの最大入力電圧は 3.3 V である。mbed では A-D コンバータ内部でデジタル化した値を 0~1.0 のアナログ値にさらに変換する。本研究で用いる B カープの 10 k $\Omega$  のポテンシオメータに mbed に装備されている 3.3 V の安定化電源出力を利用し、回転角度に対する変換されたアナログ値の解析を行った。読み込んだアナログ値は図 5.5 に示されるようにポテンシオメータの両端 20 deg 付近では値に変化がみられなかった。よって以降ポテンシオメータの回転角を  $\pm 150\text{deg}$  から  $\pm 130\text{deg}$  として扱うこととする。

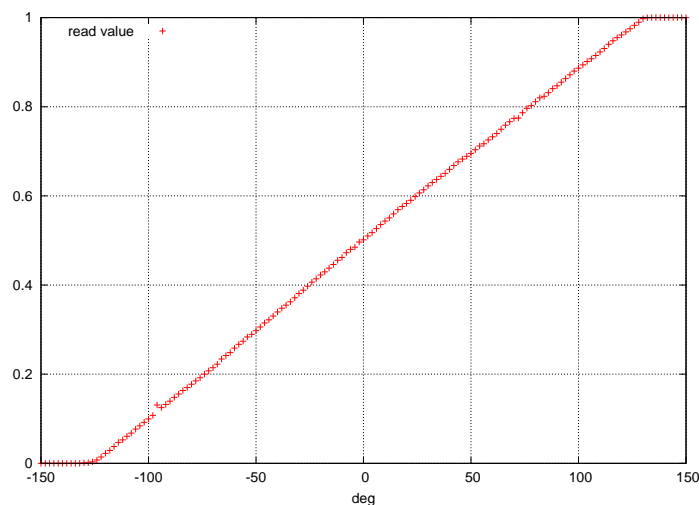


図 5.5. Analog output with the potentiometer

## 5.4.2 衝突検知

試作したバンパーを図 5.6 に示す．全方向移動機構の天板上にバンパーが取り付けられており，回転量を含むバンパーの姿勢検知を行う．バンパーの機能検証として，意図的にバンパーに外力を加えた際のバンパーの移動量と 5.3 節で述べた運動学より算出される移動量の比較を下記 3 項目に関し実験を行った．実験における外力の印加方向は図 5.7 に示される通りである．なお，バンパーの物理的な最大移動範囲は，並進前後方向  $[\pm 18.5\text{mm}]$ ，並進左右方向  $\pm 2.5[\text{mm}]$ ，回転方向  $\pm 2.5[\text{deg}]$  である．

- 並進前後方向への移動 (-15 [mm] ~ 15 [mm] を 3 [mm] 間隔)
- 並進左右方向への移動 (-15 [mm] ~ 15 [mm] を 3 [mm] 間隔)
- 回転中心を変化させない旋回動作 (-7 deg ~ 7 deg を 1 deg 間隔)

これらの実験より，各軸方向における移動量の目標値と運動学より導出した算出値の関係を図 5.8,5.9,5.10 のように得た．移動量が比較的大きくない範囲ではポテンショメータの変化より，精度よく移動量が算出できていることが分かる．しかしながら，移動量が大い範囲での最大誤差は並進前後方向  $\pm 2.5[\text{mm}]$ ，並進左右方向 6.0 [mm]，回転方向 2.5 [deg] であった．

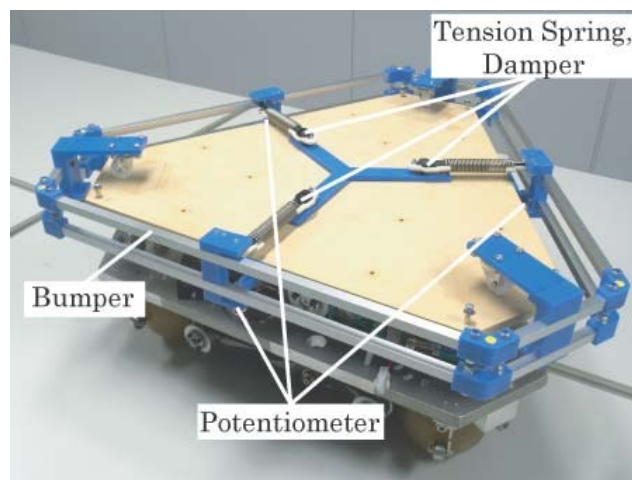
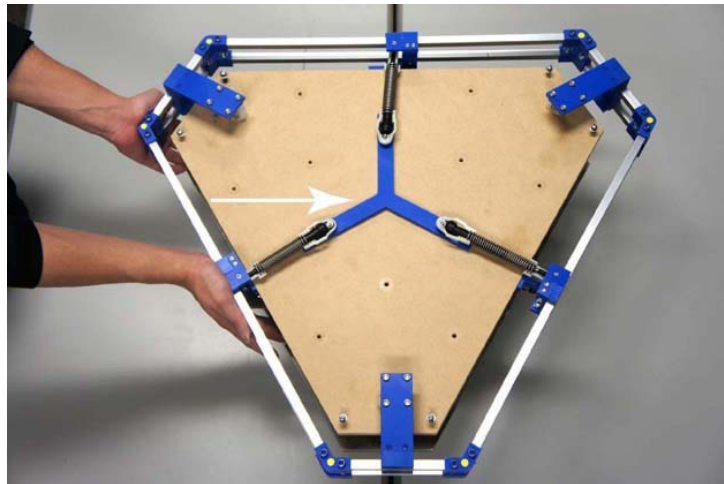
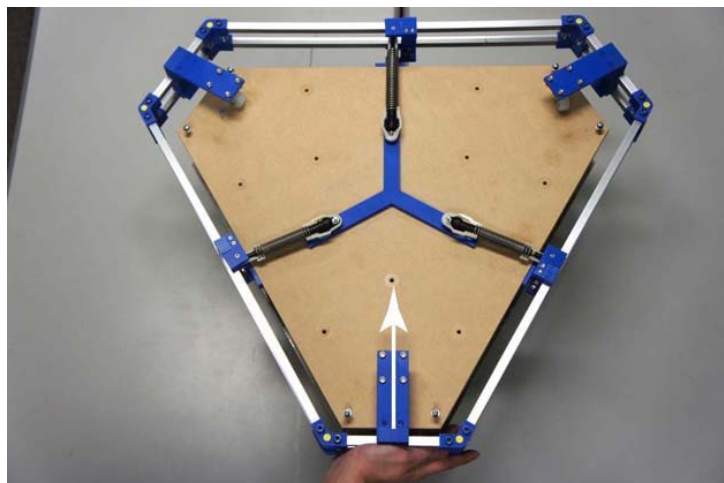


図 5.6. Prototype of collision-detecting device

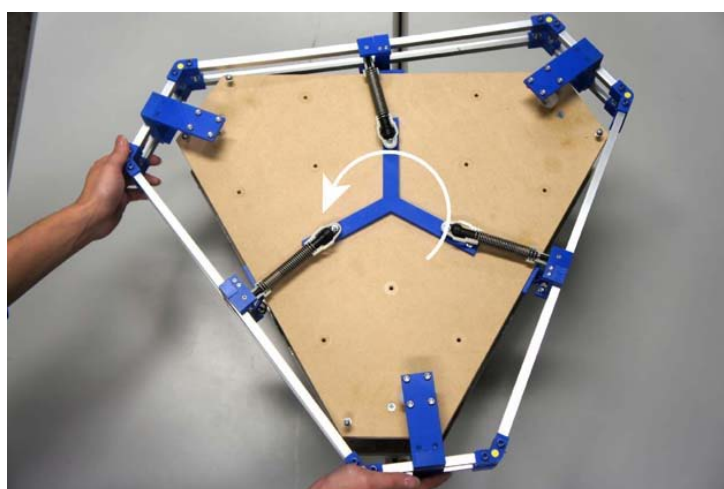




(a) x-axis collision



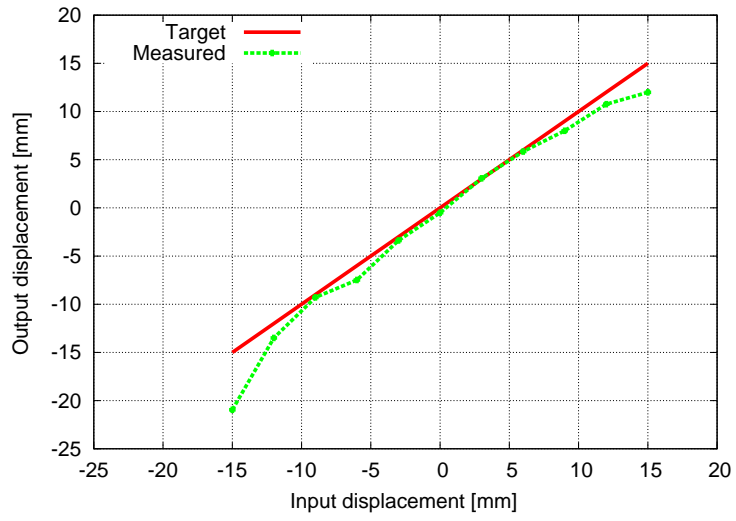
(b) y-axis collision



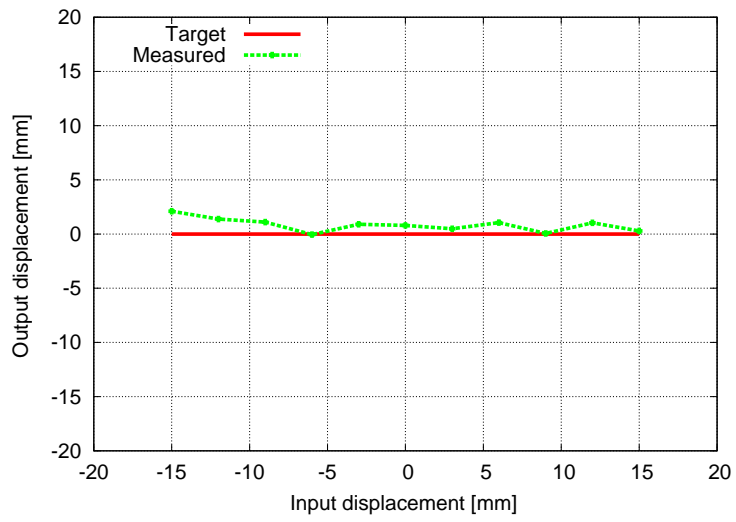
(c)  $\theta$ -axis collision

図 5.7. Input displacement

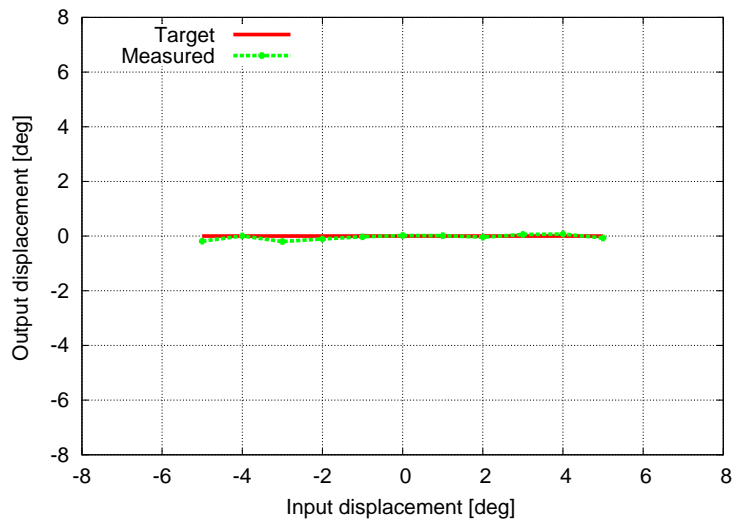




(a) x-axis displacement

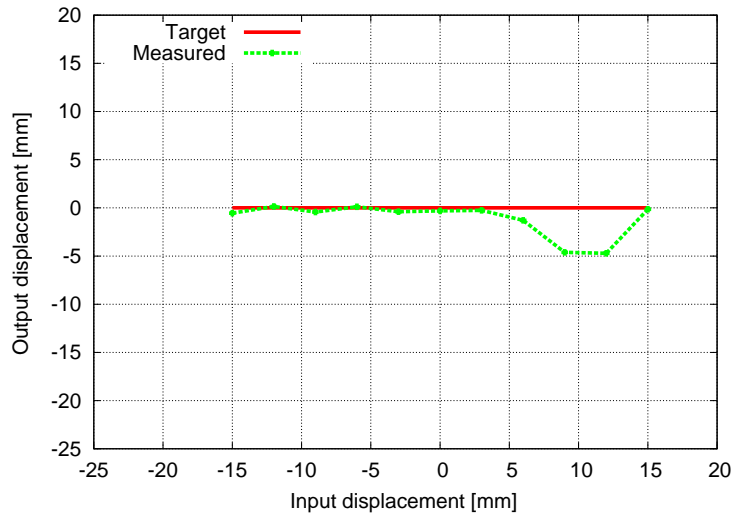


(b) y-axis displacement

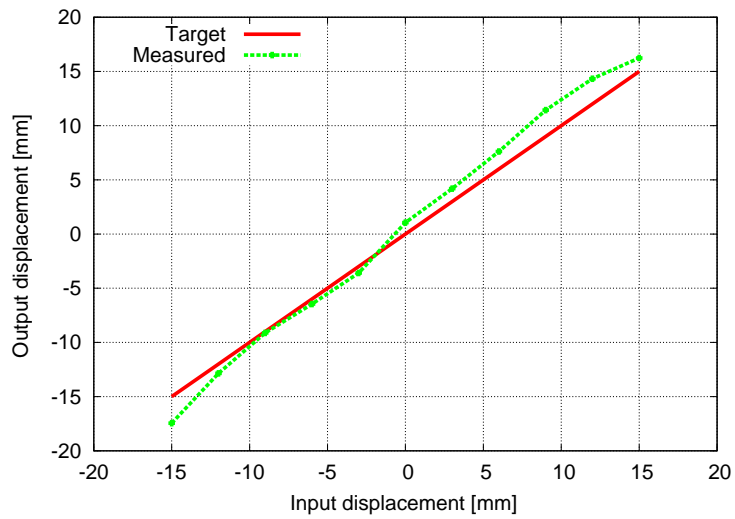


(c)  $\theta$ -axis displacement

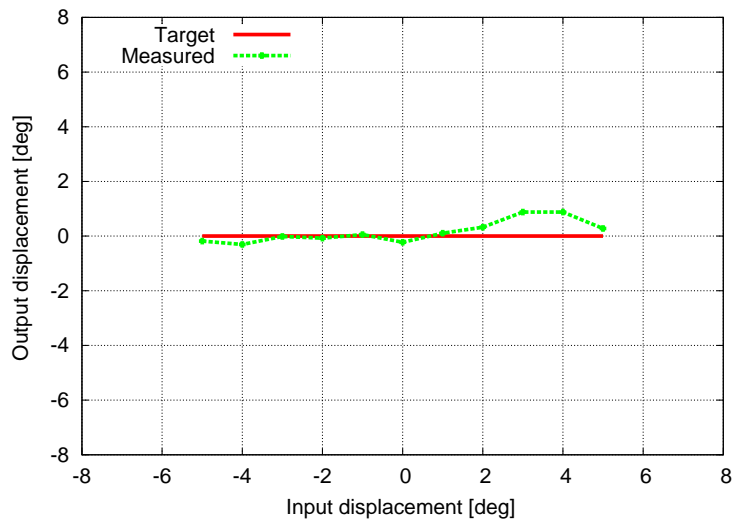
☒ 5.8. x-axis collision



(a) x-axis displacement

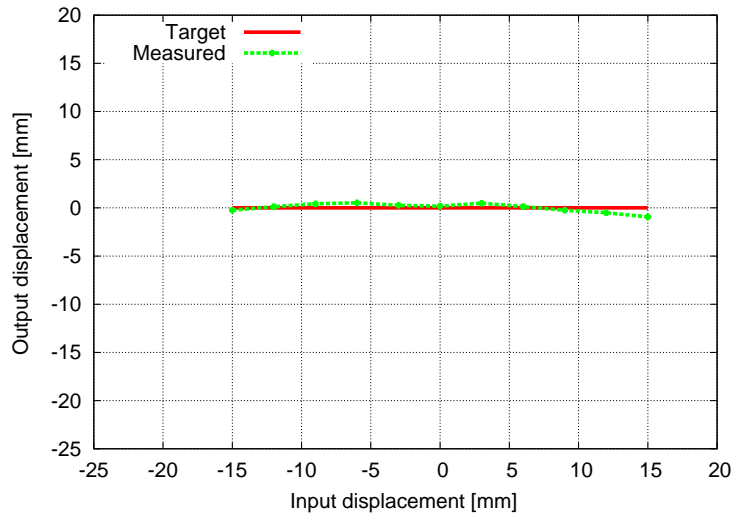


(b) y-axis displacement

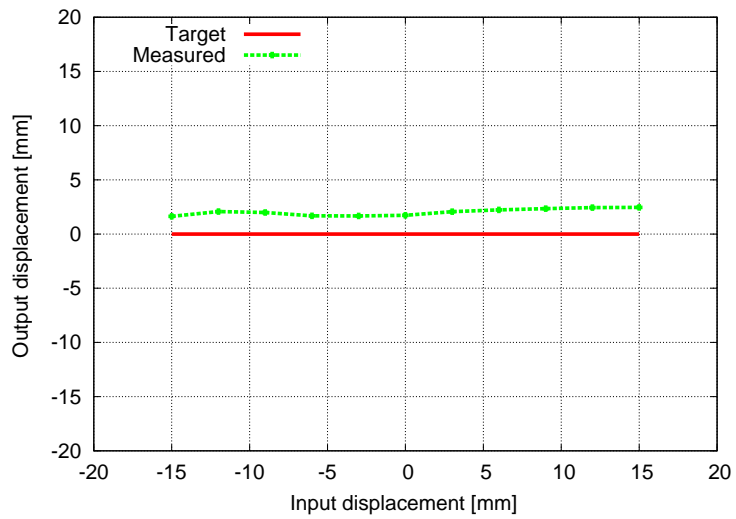


(c)  $\theta$ -axis displacement

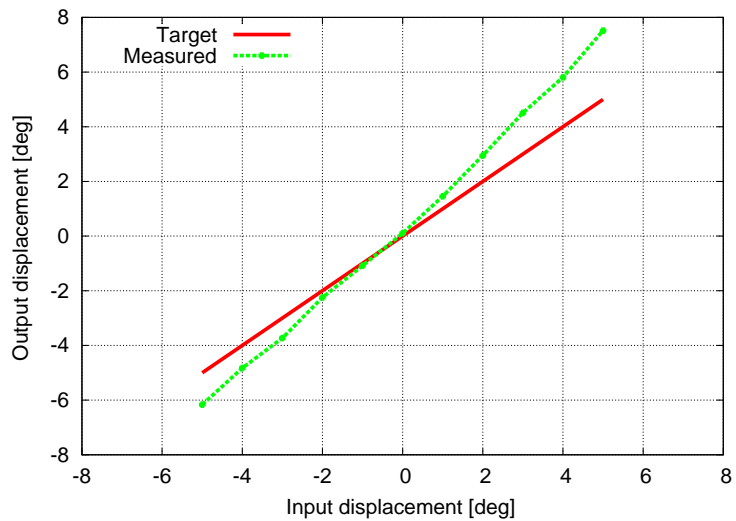
図 5.9. y-axis collision



(a) x-axis displacement



(b) y-axis displacement



(c)  $\theta$ -axis displacement

☒ 5.10.  $\theta$ -axis collision

## 5.5 まとめ

本章では、ホロノミックな全方向移動機構における全方向衝突検知装置として、衝突を物理的に検知するバンパーを提案した。衝突によるバンパーの移動機構に対する相対的な移動を、3つのポテンシオメータを用いて、回転量として検出することで、移動量の算出を行った。提案装置の有効性の検証として、並進前後・左右、回転方向からの衝突を想定し、バンパーを移動させた場合の真値と算出値の比較を行った。これによって、移動量が小さい範囲では精度よく移動量を算出できていることが分かった。しかし、移動量が可動限界値に近づく範囲においては、並進左右方向や回転方向で誤差が大きく生じた。これは運動学の導出において、ポテンシオメータの回転を微小量であると近似したためである。並進前後方向の可動限界値付近での回転角度は約 20 deg であるが、誤差の大きかった可動限界値付近では、ポテンシオメータの回転角度が約 40 deg となることが要因として挙げられる。また、ポテンシオメータに取り付けたリンクの材質に樹脂を用いているため、衝突時にリンクの剛性不足により本来以上につまみを回転させてしまったことが考えられる。さらに、このバンパーは入力装置としても応用が可能であり、狭い場所での位置の微調整等では直感的に駆動できるという点で有効であると考えられる。

今後は、リンクの材質変更やバンパーの移動量にあらかじめ制限を設けるなど改善を行う必要がある。衝突時のデータ処理やサスペンションの反力を元に衝突の力や速度の算出を行い、実用化に向け研究を進めていきたい。

## 第6章

# 結言

### 6.1 本研究の結論

本研究は、球体という全方向移動に適した形状に注目し、全方向移動機構の従来の課題であった機構と制御のトレードオフの克服と段差や溝といった実環境での運用において必須な走破性能を有するホロノミックな全方向移動機構の開発を目標に遂行された。得られた知見を以下に整理し、本論文の結論とする。

第2章では、球体を用いた全方向移動機構の駆動原理および、3つの球体と3つのアクチュエータにより構成されるホロノミックな球体駆動式全方向移動機構の提案について述べた。運動モデルを構築し、その妥当性を検証するために床面との接地拘束がない状態で1つの球体を駆動させ任意の方向に駆動が可能であることを確認した。さらに3次元位置座標計測装置を用いて、基本特性を表すオープンループ制御によって並進直進、並進左右、斜め、その場旋回運動を行い、移動機構の走行安定性を確認した。また、屋内における運用で移動の障害となる段差、溝、斜面の外乱に対する走行性能の検証を行い、人が搭乗した状態においても球体の形状を生かした実験結果が得られた。

第3章では、開発した球体駆動式全方向移動機構をプラットフォームとして、福祉分野におけるリハビリテーションロボットへ応用した。杖歩行の習得・習熟の効率的な支援を目的とした歩行訓練支援ロボットの開発を行った。その中で駆動部にプラットフォームを採用することで、歩行訓練というロボットへ力が印加された状態においてもすべりを持ち

ない本機構の走行安定性を確認することができた。

第4章では、開発した球体駆動式全方向移動機構をプラットフォームとして、福祉分野における電動車いすへ応用した。全方向電動車いすを開発し、本機構の特徴であるシンプルな構成ながらすべての球体を常に駆動輪とする特徴を生かした走行や屋外における外乱に対しての走行を確認した。

第5章では、全方向移動機構の実用化へ必要不可欠な安全対策について述べた。高度な移動性に伴う危険性の増加は、全方向移動機構においても重要なテーマである。バンパー型の衝突検知装置を開発し、シンプルな構成ながら衝突の有無とその方向を検出することが可能であり全方向移動機構の運用において有効であることを確認した。以上のように本研究では、全方向移動機構の実環境での運用に重点をおき研究を行った。

## 6.2 本研究の展望

最後に、全方向移動機構が今後実用的な移動プラットフォームとして運用するために何が必要であるかを考察する。これまでに多くの優れた全方向移動機構が提案・開発されているにも関わらず、その多くが実用化に至っていないのが現状である。今後の研究に必要なことは、JIS規格を始めとする明確な機能試験項目の制定についての議論であると考えられる。移動機構の走行性能を検証する際に筆者を含め多くの研究者がそれぞれ独自に何らかの規格を参考にして評価を行っている。しかし、実環境での運用には信頼が必要であり、それは標準化でもあると言える。この標準化が進むことで、これまでに開発されてきたすばらしい移動機構が我々の身の回りで運用されることが近づくであろう。このような枠組みの中でのロボット・移動機構の開発がより多くの成果を世に還元できると考える。

## 参考文献

- [1] 高野政晴. 自律移動ロボットの機構と移動制御技術. 日本ロボット学会誌, Vol. 5, No. 5, pp. 384–390, 1987.
- [2] 日本ロボット学会. ロボット紳士・淑女録. 日本ロボット学会誌, Vol. 14, No. 3, pp. 337–369, 1996.
- [3] 坪内孝司. 移動ロボット. 日本ロボット学会誌, Vol. 16, No. 7, pp. 902–905, 1998.
- [4] 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.
- [5] 多田隈健二郎. 全方向移動・駆動機構. 日本ロボット学会誌, Vol. 29, No. 6, pp. 516–519, 2011.
- [6] 西亮. 車輪またはクローラを用いた壁面移動ロボット. 日本ロボット学会誌, Vol. 10, No. 5, pp. 570–574, 1992.
- [7] 広瀬茂男, 長久保晶彦. 歩行型壁面移動ロボット. 日本ロボット学会誌, Vol. 10, No. 5, pp. 575–580, 1992.
- [8] 福田敏男. プラント検査メンテナンスロボット. 日本ロボット学会誌, Vol. 4, No. 5, pp. 536–539, 1986.
- [9] 藤原茂, 金原了二, 岡田徳次, 実森毅. 分節型主要配管内検査点検ロボットの開発. 日本ロボット学会誌, Vol. 12, No. 2, pp. 318–327, 1994.
- [10] 宮川豊美, 鈴森康一, 木村正信, 長谷川幸久. 1 インチ用配管作業ロボットの開発. 日本ロボット学会誌, Vol. 17, No. 3, pp. 389–395, 1999.
- [11] 浦環. 自律型海中ロボット. 日本ロボット学会誌, Vol. 18, No. 7, pp. 933–936,

- 2000.
- [12] J. Yuh and M. West. Underwater robotics. *Advanced Robotics*, Vol. 15, No. 5, pp. 609–639, 2001.
- [13] 山本郁夫. 魚型ロボットの研究開発. 日本マリンエンジニアリング学会誌, Vol. 43, No. 4, pp. 99–102, 2008.
- [14] 日本ロボット学会. 空中ロボットシステム紹介. 日本ロボット学会誌, Vol. 24, No. 8, pp. 908–931, 2006.
- [15] 久保田孝. 宇宙ロボット. 日本ロボット学会誌, Vol. 18, No. 7, pp. 941–945, 2000.
- [16] 森田哲, 高野政晴, 井上健司, 佐々木健. 階段昇降移動ロボット TO-ROVER III の開発研究. 精密工学会誌, Vol. 60, No. 10, pp. 1495–1499, 1994.
- [17] 田口幹, 佐藤央隆. 足付き車輪による段差昇降機械の研究. 日本ロボット学会誌, Vol. 1, No. 10, pp. 118–123, 1997.
- [18] 広瀬茂男, 青木実仁, 三宅潤. 対地適応型 4 クローラ走行車 HELIOS-II の開発. 日本ロボット学会誌, Vol. 10, No. 2, pp. 283–291, 1992.
- [19] H. W. Stone. Mars pathfinder microrover: A small, low-cost, low-power spacecraft. In *Proceedings of the AIAA Forum on Advanced Developments in Space Robotics*, 1996.
- [20] Y. Uchida, K. Furuichi, and S. Hirose. Fundamental performance of a 6 wheeled off-road vehicle “HELIOS-V”. In *Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 第 3 巻, pp. 2336–2341, 1999.
- [21] 小柳栄次, 油田信一. 段差を踏破する 6 輪車輪型移動ロボット「六車士」. 日本機械学会第 6 回ロボティクスシンポジウム講演予稿集, pp. 261–266, 2001.
- [22] 多田隈建二郎, 多田隈理一郎, 永谷圭司, 吉田和哉, Iagnemma K. 形態可変機能を有する正四面体型移動ロボット (特殊移動ロボット). ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, pp. 2P1–C15(1)–2P1–C15(4). 日本機械学会, 2008.
- [23] 広瀬茂男, 森島昭男, 塚越真一, 妻木俊道, 物部宏之. 節体幹型移動ロボット KR II の開発. 日本ロボット学会誌, Vol. 9, No. 5, pp. 551–559, 1991.



- [24] 辻井辰雄. 林業分野におけるロボット研究. 日本ロボット学会誌, Vol. 12, No. 7, pp. 971–974, 1994.
- [25] 狼嘉彰, 若林靖史, 足立忠司. 月・火星探査ローバ. 日本ロボット学会誌, Vol. 12, No. 7, pp. 979–985, 1994.
- [26] 広瀬茂男, 竹内裕喜. ローラウォーカー: 新しい脚-車輪ハイブリッド移動体の提案. 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 62, No. 599, pp. 2758–2764, 1996.
- [27] 宮城政雄, 内田干城, 米田隆志, 小山浩幸, 船久保熙康. 脚・車輪式による階段昇降可能な車椅子の開発 (第 2 報): 画像による階段計測システムを用いた自動階段昇降実験. 精密工学会誌, Vol. 64, No. 6, pp. 840–844, 1998.
- [28] 松本治, 梶田秀司, 西郷宗玄, 谷和男. 静的歩容を規範とした 2 足歩行型脚車輪ロボットの階段昇降制御. 日本ロボット学会誌, Vol. 16, No. 6, pp. 868–875, 1998.
- [29] 浅間一, 佐藤雅俊, 後藤伸之, 嘉悦早人, 松元明弘, 遠藤勲. 2 台の自律移動ロボットの相互ハンドリングによる協調搬送. 日本ロボット学会誌, Vol. 15, No. 7, pp. 1043–1049, 1997.
- [30] S. Hirose, S. Takaya, and F. E. Fukushima. Proposal for cooperative robot “gunryu” composed of autonomous segments. In *Proceedings of the 1994 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1532–1538, 1994.
- [31] L. Ferrière, B. Raucent, and G. Campion. Design of omnimobile robot wheels. In *Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 4, pp. 3664–3670, 1996.
- [32] 浅間一, 佐藤雅俊, 嘉悦早人, 尾崎功一, 松元明弘, 遠藤勲. 3 自由度独立駆動型全方向移動ロボットの開発. 日本ロボット学会誌, Vol. 14, No. 2, pp. 249–254, 1996.
- [33] 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.
- [34] Ilon Bengt, Erland. Wheels for a course stable selfpropelling vehicle movable in

- any desired direction on the ground or some other base. United States Patent 3,876,255, 4 1975.
- [35] Donald Barnett Harris. Low vibration omni-directional wheel. United States Patent 6547340, 4 2003.
- [36] 出願人：関東自動車工業株式会社，発明者：取田秀樹. 全方向移動車. 日本国特許，特開 2005-47312，特願 2003-203645, 2003.
- [37] 藤伸一郎. 全方向移動車輪および移動装置. 日本国特許第 3738266 号, 2005.
- [38] 坂田昌信, 羽田芳朗, 雨海明博, 高瀬国克. ホロノミックな小型全方向移動ロボットの開発 (第 1 報) メカニズムと基本制御システム. 日本ロボット学会学術講演会予稿集, 第 14 巻, pp. 587–588, 11 1996.
- [39] 広瀬茂男, 天野信一. 大荷重高効率全方向車両の開発. ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, pp. 350–355, 1997.
- [40] 磯田隆司, 陳鵬, 光武伸一郎, 豊田利夫. オフロード走行用のローラ・クローラ型全方向移動ロボット. 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 65, No. 636, pp. 3282–3289, 2 1999.
- [41] P. Chen, T. Mitsutake, S. and Isoda, and T. Shi. Omni-directional robot and adaptive control method for off-road running. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 18, No. 2, pp. 251–256, 2002.
- [42] F. G. Pin and S. M. Killough. A new family of omnidirectional and holonomic wheeled platforms for mobile robots. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 10, No. 4, pp. 480–489, 1994.
- [43] 湯軍, 渡辺桂吾, 栗林勝利, 白石大和. 直交車輪機構を用いた全方向移動ロボット車の自律制御. 日本ロボット学会誌, Vol. 17, No. 1, pp. 51–60, 1999.
- [44] K. Tadakuma. Tetrahedral mobile robot with novel ball shape wheel. In *The First IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, BioRob 2006*, pp. 946 – 952, 2006.
- [45] K. Tadakuma, R. Tadakuma, and J. Berengeres. Development of holonomic

- omnidirectional vehicle with “ omni-ball ”: spherical wheels. In *Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 33 – 39, 2007.
- [46] K. Tadakuma, R. Tadakuma, K. Nagatani, K. Yoshida, S. Peters, M. Uden-  
gaard, and K. Iagnemma. Crawler vehicle with circular cross-section unit to  
realize sideways motion. In *2008 IEEE/RSJ International Conference on Intel-  
ligent Robots and Systems, IROS 2008*, pp. 2422 – 2428, 2008.
- [47] R. Damato, W. Cheng, and S. Hirose. Holonomic omnidirectional vehicle with  
new omni-wheel mechanism. In *IEEE International Conference on Robotics and  
Automation*, pp. 773–778, 2001.
- [48] 出願人：本田技研工業，発明者：竹中透. 全方向移動車両. 日本国特許，特開  
2011-63204，特願 2009-217791.
- [49] 小森雅晴，松田吉平，大橋啓生. 全方向駆動車輪に関する基礎的研究. ロボティク  
ス・メカトロニクス講演会講演概要集, pp. 2A2–E10(1)–2A2–E10(2). 日本機械学  
会, 2010.
- [50] E. Nakano and N. Kyoyachi. An advanced mechanism of the omni directional  
vehicle (ODV) and its application to the working wheel chair for the disabled.  
In *Proceedings of the 1983 International Conference on Advanced Robotics*, pp.  
277–284, 1983.
- [51] 森善一，中野栄二，高橋隆行，高山訓治. 新しい全方向移動台車 ODV9 の機構とその  
走行モードについて. 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 64, No. 619, pp. 951–958,  
1998.
- [52] 森善一，中野栄二，高橋隆行. 全方向移動ロボット odv9 の基本原理と小段差乗り越  
えについて. 日本ロボット学会誌, Vol. 18, No. 1, pp. 150–157, 2000.
- [53] M. Wada and S. Mori. Holonomic and omnidirectional vehicle with conventional  
tires. In *Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics  
and Automation*, pp. 3671–3676, 1996.

- [54] 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. 1139–1146, 1997.
- [55] 和田正義. アクティブキャストを用いた全方向移動ロボットのモデル化と制御. 日本ロボット学会誌, Vol. 25, No. 7, pp. 1100–1107, 2007.
- [56] 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.
- [57] 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, pp. 784–792, 2001.
- [58] 越山篤, 山藤和男. 全方向形移動ロボットの制御に関する研究: 第1報, 球状ロボットのコンセプトとロールおよび走行制御. 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 58, No. 548, pp. 1128–1136, 1992.
- [59] 出願人: 株式会社安川電機, 発明者: 岸泰正. 球状移動装置. 日本国特許, 特開 2007-112168, 特願 2005-302480.
- [60] T. Endo and Y. Nakamura. An omnidirectional vehicle on a basketball. In *12th International Conference on Advanced Robotics, ICAR2005*, pp. 573 – 578, 2005.
- [61] U. Nagarajan, A. Mampetta, Kantor G. A., and R. L. Hollis. State transition, balancing, station keeping, and yaw control for a dynamically stable single spherical wheel mobile robot. In *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA 2009*, pp. 998 – 1003, 2009.
- [62] M. Kumagai and T. Ochiai. Development of robot balanced on a ball -first report, implementation of the robot and basic control-. *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 22, No. 3, pp. 348–355, 2010.
- [63] M. West and H. Asada. Design and control of ball wheel omnidirectional vehicles. In *Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1931 – 1938, 1995.
- [64] 松本直樹, 竹田滋, 飯田慎二, 伊東正篤. 3つの球を使った全方位移動機構の運動と制御. 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 60, No. 576, pp. 2756–2763, 1994.

- [65] L. Ferrière, G. Champion, and B. Raucent. *ROLLMOBS, a new drive system for omnimobile robots*, Vol. 19. Cambridge University Press, 2001.
- [66] 野々下亮二. 平成 14 年度電気通信大学卒業論文, 2003.
- [67] 山田健介, 宮本共生, 臼井清一. 4 個の球を用いた全方向移動機構に関する研究. 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 71, No. 708, pp. 2557–2562, 2005.
- [68] Y. C. Lee, D. V. Lee, J. H. Chung, and S. A. Velinsky. *Control of a redundant, reconfigurable ball wheel drive mechanism for an omnidirectional mobile platform*. Cambridge University Press, 2007.
- [69] M. West and H. Asada. Design of a holonomic omnidirectional vehicle. In *Proceedings of the 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 1, pp. 97–103, 1992.
- [70] 西川晃平, マーク ウェスト 浅田春比古. ホロノミック特性を有する全方向移動ロボットと移動ロボットの高精度誘導方式の開発. 日本ロボット学会誌, Vol. 13, No. 2, pp. 249–256, 1995.
- [71] 独立行政法人産業技術総合研究所. 平成 23 年度戦略的技術開発委託費 医療機器等の開発・実用化促進のためのガイドライン策定事業 (医療機器に関する開発ガイドライン作成のための支援事業) 運動機能回復訓練機器分野 (運動機能起伏訓練用医療機器) 開発 wg 報告書, 3 2012.
- [72] 橋元隆. 杖・歩行補助具の種類と動作障害に応じた使い方の要点. 理学療法, Vol. 27, No. 1, pp. 192–207, 2010.
- [73] Lokomat. <http://www.hocomat.com/products/lokomat/> (accessed January 7, 2013).
- [74] S. Jezernik, G. Colombo, and M. Morari. Automatic gait-pattern adaptation algorithms for rehabilitation with a 4-dof robotic orthosis. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 20, No. 3, pp. 574 – 582, 2004.
- [75] 谷知之, 小関篤志, 酒井昭彦, 服部静子. 歩行訓練システム制御方式の開発. 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 62, No. 597, pp. 1928–1934, 1996.

- [76] 根本泰弘, 柄川索, 藤江正克. 高齢者の歩行支援機器技術. *BME : bio medical engineering*, Vol. 13, No. 2, pp. 42–46, 1999.
- [77] H. Tomisaki. Development of portable therapeutic exercise machine tem lx2 influences of passive motion for lower extremities on regional cerebral blood volume. In *Proceedings of the Symposium on Biological and Physiological Engineering*, pp. 29–31, 2006.
- [78] Sankai Y. Hal: Hybrid assistive limb based on cybernics. In *The 13th International Symposium, ISRR 2007*, 2007.
- [79] 村岡慶裕, 才藤栄一. 歩行補助ロボットの開発. *日本ロボット学会誌*, Vol. 26, No. 8, pp. 878–880, 2008.
- [80] 日本規格協会. JIS T 9201 手動車いす, 2012.
- [81] 内閣府. 平成 24 年版高齢社会白書, 2012.
- [82] 電動車いす安全普及協会. <http://www.den-anryo.org/society/transition.html>(accessed January 7, 2013), 2003.
- [83] 米田隆志, 舟久保熙康. 車椅子・歩行介助装置の現状と課題. *日本ロボット学会誌*, Vol. 11, No. 5, pp. 644–648, 1993.
- [84] Takashi Masuzawa and Shigeyuki Minami. Current status and the future of electric wheel chairs in japan. *Journal of Human Environmental Studies*, Vol. 8, No. 1, pp. 45–53, 2010.
- [85] 日本規格協会. JIS T 9203 電動車いす, 2012.
- [86] INDEPENDENCE iBOT 4000. <http://www.ibotnow.com/index.htm> (accessed January 7, 2013).
- [87] PRIDE Jazzy. <http://www.pridemobility.com/jazzy/index.asp> (accessed January 7, 2013).
- [88] N. I. Katevas, N.M. Sgouros, S.G. Tzafestas, G. Papakonstantinou, P. Beattie, J.M. Bishop, P. Tsanakas, and D. Koutsouris. The autonomous mobile robot SENARIO: a sensor aided intelligent navigation system for powered wheelchairs.

- IEEE Robotics & Automation Magazine*, Vol. 4, No. 4, pp. 60 – 70, 1997.
- [89] H. A. Yanco. Wheelchair: A robotic wheelchair system: Indoor navigation and user interface. In *Proceeding of Assistive Technology and Artificial Intelligence*, pp. 256–268, 1998.
- [90] Y. Matsumoto, T. Ino, and T. Ogasawara. Development of intelligent wheelchair system with face and gaze based interface. In *Proceedings of the 10th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication*, pp. 262 – 267, 2001.
- [91] Y. Kuno, N. Shimada, and Y. Shirai. Look where you're going. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, Vol. 10, No. 1, pp. 26 – 34, 2003.
- [92] 和田正義, 浅田春比古. 車両幅可変機構を有する全方向移動車の設計とその車椅子への応用. *日本ロボット学会誌*, Vol. 16, No. 6, pp. 816–823, 1998.
- [93] 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. 993–939, 2004.
- [94] 和田正義. 4輪駆動式全方向電動車椅子の設計と全方向移動制御. *日本ロボット学会誌*, Vol. 27, No. 3, pp. 314–324, 2009.
- [95] 国土交通省. 高齢者, 障害者等の移動等の円滑化の促進に関する法律(バリアフリー新法), 2006.
- [96] D. P. Miller and M. G. Slack. Design and testing of a low-cost robotic wheelchair prototype. *Autonomous Robots*, Vol. 2, pp. 77–88, 1995.
- [97] U. Borgolte, H. Hoyer, C. Bühler, H. Heck, and R. Hoelper. Architectural concepts of a semi-autonomous wheelchair. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, Vol. 22, No. 3-4, pp. 233–253, 1998.
- [98] J.-D. Yoder, T. Baumgartner, E., and B. Skaar, S. Initial results in the development of a guidance system for a powered wheelchair. *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, Vol. 4, No. 3, pp. 143 – 151, 1996.
- [99] R. Simpson, E. LoPresti, S. Hayashi, and I. Nourbakhsh. The smart wheelchair

- component system. *Journal of Rehabilitation Research & Development*, Vol. 41, No. 3B, pp. 429–442, 2004.
- [100] C. Simpson R. Smart wheelchairs: A literature review. *Journal of Rehabilitation Research & Development*, Vol. 42, No. 4, pp. 423–436, 2005.
- [101] A. Lankenau and T. Röfer. A versatile and safe mobility assistant. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, Vol. 8, No. 1, pp. 29–37, 2001.
- [102] L. Protho, J. F. LoPresti, E. and M. Brienza, D. An evaluation of an obstacle avoidance force feedback joystick. In *Proceedings of the 23th Annual RESNA Conferecnce 2000*, 2000.
- [103] Y. Yagi, S. Kawato, and S. Tsuji. Real-time omnidirectional image sensor (COPIS) for vision-guided navigation. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 10, No. 1, pp. 11–22, 1994.
- [104] C. Mandel, K. Huebner, and T. Vierhuff. Towards an autonomous wheelchair: Cognitive aspects in service robotics. In *Proceedings of the Towards Autonomous Robotics Systems (TAROS'2005)*, pp. 165–172, 2005.
- [105] J. Kurata, T V. Grattan, K, and H. Uchiyama. Navigation system for a mobile robot with a visual sensor using a fish-eye lens. *Review of Scientific Instruments*, Vol. 69, No. 2, pp. 585–690, 1998.
- [106] Y. Satoh and K. Sakaue. An omnidirectional stereo vision-based smart wheelchair. *EURASIP Journal on Image and Video Processing 2007*, Vol. 2007, p. 11 pages, 2007.



# 謝辞

本研究は、筆者が九州工業大学大学院生命体工学研究科情報専攻宮本研究室での研究成果をまとめたものであります。この間、多くの方々の御指導、御助言を頂きました。ここで簡単ではございますが、御礼を申し上げます。

本研究を行うにあたり、筆者の指導教官として卒業研究配属より6年間の長きにわたり、御指導して頂きました九州工業大学大学院生命体工学研究科脳情報専攻准教授 宮本弘之先生に心より厚く感謝いたします。宮本先生には数多くの魅力的な研究テーマを提示して頂いただけでなく、自由な研究活動の環境を与えて頂きました。宮本研究室で過ごした6年間は人生において本当に貴重な時間でした。胸を張って勉強に、遊びに全力で打ち込んだといえる6年間でした。宮本先生には本当に感謝の気持ちで一杯です。

さらに、本論文の審査を通じて貴重なご指導ご助言を賜りました九州工業大学大学院生命体工学研究科脳情報専攻教授 永松正博先生、石井和男先生、北九州市立大学国際環境工学部情報メディア工学科教授 Ivan Godler 先生に感謝致します。

また、共著者・共同研究者として九州栄養福祉大学リハビリテーション学部理学療法学科教授 橋元隆先生、北九州市立大学国際環境工学部機械システム工学科教授 山本郁夫先生、Delft University of Technology, Faculty of Mechanical, Maritime and Materials Engineering, Dr.ir. H. T. Grimmelijs 先生には親身なご指導を頂きました。心より御礼申し上げます。

機構の設計・開発にあたり有限会社 オートシステム 谷本吉太郎氏には大変お世話になりました。谷本氏には技術だけでなく、技術者としてどうあるべきかご自身の経験を踏まえたお話をしてくださり大変参考になりました。

修士1年次より所属した北九州学術研究都市合同研究チーム” Hibikino-Musashi ”ではRoboCup Soccer Middle Size League に参戦し、多くの皆さんと共に有意義な時間を過ごすことができました。チームのアドバイザーである宮本先生、石井先生、ゴドレール先生には様々な活動の機会を与えて頂き、私たちの相談にも親身にご指導頂きました。九州工業大学大学院生命体工学研究科脳情報専攻石井研究室研究員 Amir A. F. Nassirei 氏には、技術的な指導だけでなく活動計画やミーティングに至るまで様々なご助言を頂きました。また、チーム運営では公益財団法人 北九州産業学術推進機構ロボット開発支援部の御厨美和氏、稲川直裕氏、竹迫実希氏の親身なご支援のおかげで、学生が研究に打ち込める環境を作って頂き、感謝しております。Hibikino-Musashi では研究室にいるだけでは学ぶことのできない多くの経験をさせて頂きました。特にチームリーダーを務めさせて頂いた博士後期課程では、チーム運営などでうまくいかないこともありましたが、先生方やメンバーに支えて頂き世界大会テクニカルチャレンジ第1位となることができました。チームリーダーの前任者である北住祐一氏にはいつも頼ってばかりでしたが、本当に親身なご指導を頂き、心より感謝を申し上げます。また、チームの同期である森川裕治氏、山田浩太氏、大木万里子氏、福岡徳一氏とは共に難題に取り組み、互いに切磋琢磨しながら研究活動を行ってきました。皆と過ごした Hibikino-Musashi での活動は筆者にとって忘れることのできない大切な思い出となりました。

宮本研究室では多くの先輩や同期、後輩に支えて頂きました。心から宮本研究室で研究活動を行えて幸せであったと思います。吉塚武治氏、清水昌樹氏には勉強だけでなく多くのことを学ばせて頂き感謝しております。同期の森川裕治氏、松尾貞季氏、中野智博氏、立石弥生氏、蓑毛博一氏とは大学だけでなくプライベートでも共に時間を共有し、筆者にとって本当に大切な仲間です。同期の存在にはいつも助けられ、感謝の気持ちで一杯です。また、宅見優輝氏、小野観和氏、新福宜侑氏、戸部田雅一氏には実験の手伝いをはじめ、筆者の依頼にも嫌な顔せず協力して頂きました。心より感謝致します。

岩橋真莉子氏には筆者の身勝手な行動を許して頂き、いつも筆者を支えてくれました。また、論文執筆においても推敲・見直しに多くの有益なご意見を頂き、論文を完成させることができました。心より御礼申し上げます。

また，研究を進めるにあたり，文部科学省「科研費（21560265）」，科学技術振興機構「研究成果展開事業（研究成果最適展開支援プログラム（A-STEP），AS232Z02749F）」，福岡県ロボット産業振興会議「平成 21 年・22 年度ロボット開発技術力強化助成金（プロジェクトリーダー：リーフ株式会社）」の支援を受けました．ここに深く感謝致します．

ここでは申し上げられませんが，多くの先輩・同期・友人の協力があり，本論文を作成することができました．心より感謝致します．

最後に筆者がこのように素晴らしい大学生活を送れたことは，家族の支えがあったからこそです．父，母，兄弟，祖母そして叔父，叔母，従兄弟に心から感謝致します．

2013 年 1 月 24 日 石田 秀一

# 業績リスト

## I 原著論文

- (1) 石田 秀一, 宮本 弘之. 球体駆動式全方向移動機構の開発. 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 78, No. 790, pp.2162-2170, 2012.
- (2) Shuichi Ishida, Hiroyuki Miyamoto. Collision-Detecting Device for Omnidirectional Electric Wheelchair. ISRN Robotics, Vol. 2013, Article ID 672826, 8 pages, Hindawi Publishing Corporation.
- (3) 石田 秀一, 宮本 弘之, 橋元 隆. 球体駆動式全方向移動機構を用いた歩行訓練ロボットの開発. 日本人間工学会誌, accepted, 2013. 3.

## II 査読付き国際会議

- (1) Shuichi Ishida, Hiroyuki Miyamoto. Holonomic Omnidirectional Vehicle with Ball Wheel Drive Mechanism. 26th World Automation Congress 2010, Kobe, Japan.

## III 査読付き国内会議

- (1) 石田 秀一, 戸部田 雅一, 宮本 弘之. 全方向移動機構のための全方向衝突検知装置. 第 17 会ロボティクス・シンポジア, pp.618-624, 2012.

## IV 査読なし国内会議

- (1) 石田 秀一, 宮本 弘之. 球体駆動式全方向移動機構を用いた歩行介助ツールの開発. 信学技報, Vol. 111, No. 241, 2011.

## V 工業所有権

- (1) 宮本 弘之, 石田 秀一. 球体駆動式全方向移動装置. 特開 2010-030360, 特願 2008-192590
- (2) 宮本 弘之, 石田 秀一. 森 政男, 自立式の歩行支援装置. 特開 2011-229838, 特願 2010-105428

## VI その他

- (1) Ikuo Yamamoto, Shuichi Ishida, Takayuki Asanuma, Katsuya Maeda, René Nuijten, Hugo T. Grimmelius. Research on Low-cost Design Method of Off-shore Platform DPS before Construction. Journal of Applied Mechanics and Materials, Vol. 271-272, pp. 1402-1409, 2012.