

拘束切り替えを利用したヘビ型ロボットの 2平面移動と2点同時制御に関する研究

中島 瑞

電気通信大学大学院 情報理工学研究科
博士(工学)の学位申請論文

2020年3月

拘束切り替えを利用したヘビ型ロボットの 2平面移動と2点同時制御に関する研究

博士論文審査委員会

主査 田中 基康 准教授

委員 明 愛国 教授

委員 田中 一男 教授

委員 横井 浩史 教授

委員 金子 修 教授

著 作 權 所 有 者

中 島 瑞

2020

Simultaneous control of two points and locomotion control moving between two planes for a snake robot by using switching constraints

Mizuki Nakajima

Abstract

The aim of this paper is realization of complex work and propulsion in complex environment by exploiting the high degrees of freedom and redundancy of snake robots. In order for a robot to propel in a complex environment, it is essential to consider the relative relationship between the robot and the environment. The motion of the robot has to be switched appropriately according to the situation. The robot can perform work more effectively by changing the behavior of the robot according to the situation. In this study, simultaneous control of two point and propulsion between non-parallel two planes are realized, by switching the constraint and the redundant space of the robot according to the situation. The constraint is determined by the allocation of grounded and ungrounded of the wheels. By modeling and exploiting the change of the allocation, the robot can move and work more effectively according the situation. The suitable constraints in propulsion between non-parallel two planes are designed in advance based on motion, and constraints in simultaneous control of two point are determined by solving the optimization problem. An increase in the calculation cost due to increase of the number of allocation is a problem. We reduce the calculation cost by determining the combinations to be searched based on convergence of the controlled variables and the constraint of actual robot. The caging transportation and the steering a hand cart, and the opening the spring-loaded door motion are presented as applications of simultaneous control of two points. The effectiveness of the proposed control method is verified by experiments and simulations. From the verification results, we clarify issues on complex works and

propulsion in complex environment with a snake robot, and provide guidelines for these issues.

拘束切り替えを利用したヘビ型ロボットの 2平面移動と2点同時制御に関する研究

中島 瑞

概要

生物のヘビは、その単純な構造にも関わらず不整地や木登り、水中など多様な環境での推進を実現している。ヘビを工学的にモデル化したロボットの一例として、車輪拘束ヘビ型ロボットがある。車輪拘束ヘビ型ロボットは、受動車輪を備えたリンクを能動関節で直列に連結した構造をしており、受動車輪による摩擦の異方性を利用することで生物のヘビと同様の推進が可能である。ヘビ型ロボットは生物のヘビ同様の多様な環境での推進の実現が期待できる。さらに、豊富な関節自由度と環境への接触を巧みに利用し、生物を超えるような動作の実現や物体運搬のような作業への応用を目指した研究が行われている。従来研究では、制御点はロボットの重心や先頭の一点であり、想定環境も一様な単一平面としたものがほとんどである。しかし、制御点数や環境が一様であるという制限を取り除くことにより、より多様な環境での移動やより多様な動作の実現が期待できる。例えば、ロボット先頭と最後尾を同時に制御することで、ロボットを自走する双腕マニピュレータのように動作させることができ、実現可能なタスクの大幅な拡大が期待できる。また、家屋や工業施設などの建造物では、段差や階段、スロープなど複数の平面を組み合わせた環境が多く、複数の平面から構成される環境での推進実現によって、これらの環境への活動範囲拡大が期待できる。

本論文では、ヘビ型ロボットが達成可能なタスク、および活動可能な範囲の拡大を目的とし、2制御点の同時制御、2平面間の移動制御、の2つの課題に取り組む。これらの課題を解決するため、車輪の接地/非接地の変化、すなわち拘束条件の変化を利用する。ヘビ型ロボットは車輪が横滑りしないという速度拘束を利用し横うねり動作を推進力に変換するが、その拘束はヘビ型ロボット全体の動作を大きく制限してしまう。そこで一部の車輪を浮かせて非接地状態とすることでこの制限を緩和する。速度拘束を変化させることで

ロボットのモデルと冗長空間が変化するため、状況に応じて適した拘束条件（接地/非接地車輪の配置）を選択することで、ロボットはより自由に動作を行うことができる。2制御点の同時制御では、拘束条件を一定とした場合にはロボットは頻繁に制御目標を達成できない状態に陥る。また、2平面間の移動では、推進に伴い車輪を一時的に持ち上げて車輪の接地対象面を変化させなければならないため、環境に依存した拘束条件の変化を考慮し動作を設計する必要がある。そこで、拘束変化を考慮した対象の数式モデル化を行い、2点同時制御と2平面間移動のための制御方法を提案する。適切な拘束条件の選択の際には計算量の大きさが問題になるが、2制御点同時制御ではモデルから導かれる被制御量の拘束条件や必要な冗長自由度を考慮し、選択可能な車輪の接地/非接地の組み合わせを削減することで、適した拘束条件の計算コストの増大化を抑える。また、2平面間の移動では動作にあわせて次に変化する拘束条件を事前設計することで、拘束条件の計算コストを削減する。提案制御手法に対し、数値シミュレーションおよび実機実験を行うことでその有効性を検証する。この際、2点同時制御の応用例としてロボット単体によるケーシング物体搬送、台車押し、扉開けについて扱う。そして、動作の結果を通じてロボットが複雑環境、複雑なタスクを実現する際の問題点を明らかにする。そして、これらの問題点を解決するための指針を提示し、ロボットの推進環境や実施タスク拡大の可能性を示す。

目次

第1章	序論	1
1.1	ヘビ型ロボット	1
1.2	ヘビ型ロボットの運動制御	3
1.2.1	生物模倣による運動制御	3
1.2.2	ヒューリスティック手法による運動制御	4
1.2.3	モデルベースト手法による運動制御	5
1.2.4	環境に関する分類	5
1.2.5	運動制御まとめ	6
1.3	本論文の目的と構成	7
1.3.1	目的	7
1.3.2	構成	7
第2章	制御対象のモデリング	9
2.1	制御対象	9
2.2	速度拘束に基づく運動学モデル	11
2.2.1	速度拘束	12
2.3	拘束条件の切り替え	12
2.3.1	接地/非接地車輪の組み合わせ	13
2.3.2	拘束条件の切り替えを考慮した運動学モデル	13
2.3.3	運動学的冗長性	14
2.3.4	特異姿勢	14
2.4	制御点の追加	15
2.4.1	第2制御点の運動学関係	16
2.4.2	制御点を追加した2次元運動学モデル	16
2.4.3	特有の特異姿勢	16
2.5	3次元動作のモデリング	17
2.5.1	先頭を持ち上げた運動学モデル	17
2.5.2	双腕動作	19
2.6	環境との相対関係	20
2.6.1	車輪と平面の接触条件	21

第 3 章	2 制御点同時制御	23
3.1	問題設定	23
3.2	制御設計	24
3.2.1	関節入力	25
3.2.2	特異姿勢	25
3.2.3	冗長入力	26
3.2.4	モード選択	27
3.2.5	入力制約	29
3.3	実機実験	30
3.4	応用動作	32
3.4.1	ケーシング運搬	32
3.4.2	台車操舵	34
3.4.3	扉開け	37
3.5	まとめ	42
第 4 章	2 平面間の移動制御	43
4.1	問題設定	43
4.2	動作設計	44
4.2.1	先頭遷移動作	46
4.2.2	2 平面間推進動作	46
4.2.3	接続部遷移動作	47
4.2.4	動作間の遷移条件	48
4.3	モデリング	49
4.3.1	先頭部	49
4.3.2	平面部	50
4.3.3	接続部	51
4.4	制御設計	52
4.4.1	関節入力	53
4.4.2	冗長入力	55
4.5	実機実験	55
4.6	まとめ	59
第 5 章	結論	61
5.1	まとめ	61
5.2	課題と今後の展望	62
謝辞		71

目 次

1.1	Snake robots with passive wheels	1
1.2	Snake robots without wheels	2
1.3	Articulated mobile robot	3
2.1	A model of a snake robot	9
2.2	Detail of a snake robot	10
2.3	Coordinate system of the head	11
2.4	Coordinate system of the i th wheel	11
2.5	Lifting wheel by pitch joints	13
2.6	Example of the singular configurations	15
2.7	Motion of the simultaneous control	15
2.8	A model of head raising motion	18
2.9	A model double arm motion	20
2.10	Condition of the contact between a wheel and plane	21
2.11	A model of the relation between the i th wheel and the j th plane	22
3.1	Example of the application	23
3.2	Diagram of the controller for simultaneous control	24
3.3	Example of singular configuration II	26
3.4	Lifting adjacent wheels	28
3.5	Experimental system	30
3.6	Experimental results of trajectory tracking	31
3.7	Time response of the yaw joint angles	32
3.8	Experimental result of caging transport	33
3.9	Motion on the caging transport experiment	34
3.10	Experimental results of handcart steering	35
3.11	Motion on the steering handcart experiment	36
3.12	Pattern diagram of the door	37
3.13	Overview of the proposed motion	38
3.14	Motion flow	39
3.15	Simulation environment	40
3.16	Simulation results	41

3.17 Failure to pass through	41
4.1 Non-parallel two plane	43
4.2 Schematic of a robot straddling two planes	44
4.3 Detail of the each part	45
4.4 Motion flow	45
4.5 Collision between the robot and edge of the plane	46
4.6 Motion of approaching to the front plane	47
4.7 Transition of the connection part	48
4.8 Distance between the wheel and edge of the front plane	49
4.9 Model of the head part	50
4.10 Rear end of the connection part	51
4.11 Overview of the controller	52
4.12 Experimental system	56
4.13 Experimental results for condition 1	57
4.14 Experimental results for condition 2	58

表 目 次

4.1 Parameters for control	56
--------------------------------------	----

第1章

序論

1.1 ヘビ型ロボット

生物のヘビは手足のない単純な形状に関わらず，不整地や砂地，水中といった，様々な環境での推進が可能である．また，その細長い体を枝に巻き付けることで樹木を登ったり，空中で体を屈曲させることで滑空するものもある．このように，多彩な環境での活動が可能な生物ヘビの構造や動作を模倣したロボットがヘビ型ロボットである．ヘビ型ロボットはその細長い体形から，狭所での探索や検査活動に加えて，生物のヘビと同様に不整地や砂地など，多彩な環境での活動が期待されている．

生物ヘビの胴体は，体幹軸方向に滑りやすくそれに直交する方向には滑りにくい，という摩擦の異方性を有している [1]．この摩擦の異方性を受動車輪により再現した車輪拘束ヘビ型ロボットが数多く研究開発されている [1–27]．車輪拘束ヘビ型ロボットの例を Fig. 1.1 に示す．車輪拘束ヘビ型ロボットは受動車輪を備えたリンクを能動関節で直列に連結した構造であり，体を屈曲させることで車輪による摩擦の異方性を利用して推進する．Fig. 1.1 のロボットは隣り合う関節軸を体幹軸周りに 90 度ずらして配置することで，3 次元的な運動が可能である．



(a) ACM-R3 [2]



(b) T2 snake-2 [20]

Fig. 1.1 :Snake robots with passive wheels



(a) Unified snake robot [28]



(b) Snake robot on a debris field [29]

Fig. 1.2 :Snake robots without wheels

一方で、生物ヘビのような摩擦の異方性を有さない非車輪型のロボットも研究開発されている [28–56]。非車輪型ロボットはリンクを能動関節によって直列に連結した構造であり、ロボット胴体で直接環境に接触する。このタイプのロボットは摩擦の異方性を再現する機構を有しておらず、車輪拘束型ロボットと同様の屈曲運動では推進できない。そのため、体を体幹軸周りで回転させる捻転動作や、体全体で歩容動作を生成することによって推進する。非車輪型のロボットの例を Fig. 1.2 に示す。Fig. 1.2(a) のロボットは、ロボットの体全体を使って円柱に巻きつき、捻転動作によって円柱上を推進可能である。Fig. 1.2(b) のロボットは、体全体でクローラのような動作を再現することで環境の摩擦に大きく依存することなく不整地での推進を実現している。

また、類似した構造のロボットとしては受動車輪の代わりに能動車輪を搭載した構造の多連結移動ロボットがある [57–63]。多連結移動ロボットは、摩擦の異方性を利用した屈曲運動に加えて能動車輪の回転により推進力を発生させることができる。そのため、受動車輪を用いた車輪拘束ヘビ型ロボットよりも高い踏破性を有するものが多い。その一方で、能動車輪の増加によって構造が複雑化し、ロボットが大型化、高重量化する傾向がある。また、構造の類似性から車輪拘束ヘビ型ロボットの動作は多連結移動ロボットへと転用できる場合が多い。多連結移動ロボットの一例を Fig. 1.3 に示す。Fig. 1.3 のロボットは、搭載した能動車輪により不整地のような環境でも障害物を乗り越えながら推進できる。

特殊な環境での活動を考慮したロボットとして、水中での動作を考慮した防水構造のヘビ型ロボットも研究開発されている [5, 39, 41]。水をとらえるためのフィンを胴体に搭載し屈曲運動によって推進するロボット [5, 39] や、スラスタを搭載することで推進力を発生させ推進するロボット [41] が研究開発されている。

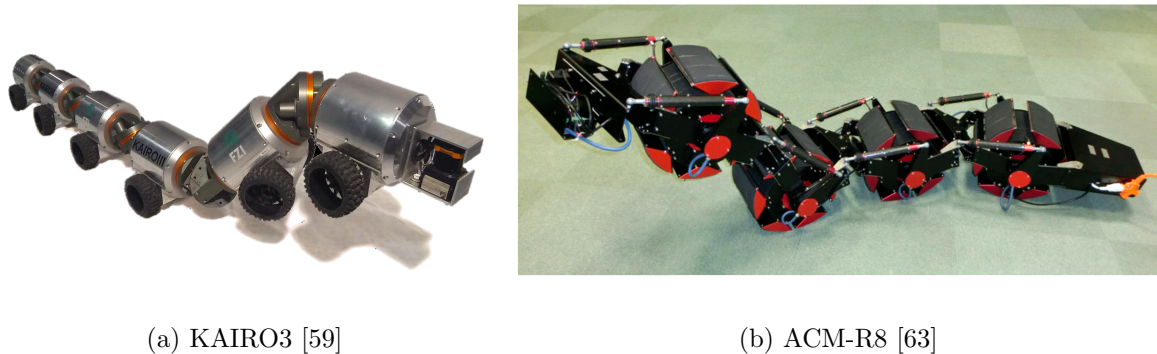


Fig. 1.3 :Articulated mobile robot

1.2 ヘビ型ロボットの運動制御

ヘビ型ロボットはその構造から非常に多くの関節自由度を有しており、操作者がすべての関節を直接制御することは難しい。そのため、ロボットに所望の運動をさせるための運動制御に関する研究が数多く行われている。ロボット先頭や重心の経路追従および軌道追従、段差や円柱内外での推進、不整地の踏破など、様々な動作を実現するための制御手法が研究されてきた。これらの研究は、それぞれの制御アプローチから以下の3種類に大別できる。

- ・ 生物ヘビの運動を規範としてロボットの運動を制御する生物模倣的手法
- ・ 事前設計的に体形を決定しロボットの運動を制御するヒューリスティック手法
- ・ ロボットの運動を数式モデル化し、制御理論に基づいてロボットの運動を制御するモデルベースト手法

本節では、それぞれの制御手法に関する研究内容とその特徴を示す。また、これらの手法について適応する環境に着目した分類を示す。

1.2.1 生物模倣による運動制御

生物模倣的手法は、生物ヘビの運動を模倣することで推進を実現する手法である。生物ヘビの運動を工学的に再現することでヘビの運動知能に関して考察を行う研究 [1, 3, 4, 16, 44, 51] や、生物ヘビの運動を模倣することで複雑な環境下での推進を実現する研究 [33, 37, 45] が行われている。広瀬は生物ヘビの動作を観察、解析することで、平面上におけるヘビの運動を表現する曲線としてサーペノイド曲線を提案し、車輪拘束ヘビ型ロボットによる平面上でのうねり推進を実現した [1]。サーペノイド曲線のパラメータを変化させることでロボットの推進速度や推進方向がある程度調整可能である。sinus-lifting 滑走は、体

形の曲率が最大となる点近傍で体を地面から持ち上げた推進であり、生物ヘビが高速に推進する際に見せる運動である [1]. sinus-lifting 滑走については、動的可操作性との関連に関する考察 [3, 4] や、動力学的な観点からの解析 [51], コスト関数に基づいた接地点の選択に関する考察 [16] などが行われている. sidewinding 滑走は、生物ヘビが砂地などで推進する際に見られる運動であり、体幹に垂直な方向に推進する [44]. sidewinding 滑走を規範とした動作によって、様々な傾斜のスロープが連結された環境の踏破 [37] や、階段昇降 [33] が実現されている. concertina 滑走は壁面に囲まれたような狭い空間を推進するときに見られる運動であり、アコーディオンのように胴体の屈曲と伸縮を繰り返すことで推進する. concertina 滑走を模倣した運動により、壁面に囲まれた環境での推進がシミュレーションにより確認されている [45].

生物の周期的な運動を司る神経回路である中枢パターン生成器 (CPG) を用い、ヘビ型ロボットの周期的な屈曲運動を生成することでロボットの推進を実現した研究もある [15, 27, 46]. ロボットが推進するための CPG ネットワーク構造に関する研究 [27] のほか、CPG に基づいたうねり動作のオンライン最適化による斜面移動 [15] や、センサ情報に基づいて推進方向を制御することによる障害物との衝突回避 [46] が提案された.

このように、生物模倣的な手法では生物ヘビの運動知能の解明に向けた研究のほか、生物の運動を規範とした運動によって斜面や階段、狭所環境での推進を実現している. しかしながら、これらの運動は実験的に確認、検証されたものであり、ロボットの推進量や推進方向、位置姿勢を正確に制御することはできない.

1.2.2 ヒューリスティック手法による運動制御

ヒューリスティックな手法は、事前設計した体形に基づきロボットの関節角度を決定することでロボットの推進を実現する手法である. ヒューリスティックな手法では、連続曲線近似法を用いた研究 [8] とそれを応用した動作が数多く研究されている [6, 13, 29, 48]. 山田らはフレネの標構でロボットの目標体形曲線を記述し、目標曲線にロボットの体形が沿うように関節を制御する手法を提案した [8]. また、波を送るように目標曲線を変化させることで多連結移動ロボットによる段差の踏破を実現した. 亀川らは、螺旋形状にロボット体形を制御することで円柱に巻き付き、体幹軸周りに回転することで配管外に巻き付いた状態での推進を実現した [6]. また、この手法を応用して曲がり管での推進 [13] や分岐のある配管での推進 [48] を実現した. 竹森らは、簡単な連続曲線を連結し複雑な目標連続曲線を生成することで、不整地での推進 [29] やはしご登り [64] を実現した. また、ロボットの動作をシーケンシャルに設計し、歩容動作を生成することで推進を実現した研究もある [55, 56].

このように、ヒューリスティックな手法を用いた研究では段差や不整地、配管内外など、様々な環境での推進を実現している. ヒューリスティックな手法も生物模倣的な手法と同様、その推進は実験的に検証されたものである. そのため、ロボットの任意軌道への追従といった正確な位置制御は実現できない.

1.2.3 モデルベースト手法による運動制御

モデルベースト手法では，ロボットの運動を数式モデル化し，制御理論に基づいてロボットを制御する．車輪による摩擦の異方性を車輪は横滑りしないという速度拘束として表現した研究や [9–12, 14, 17–26]，車輪の摩擦をモデル化し，動力学に基づいてロボットを動作させる研究が存在する [7, 52–54]．

速度拘束に基づいた研究では，2次元平面上のロボット先頭の位置姿勢の制御 [11, 17–20, 23, 25, 26] や，先頭を持ち上げることによる先頭の3次元軌道追従制御 [12, 21, 22, 24] が実現されている．これらの研究では，モデルに基づいてロボットを制御しており，ロボット先頭や重心の任意軌道への追従を理論的に保証することができる．また，モデル化によってヘビ型ロボットの有する冗長性が陽に表現され，これを制御に用いることで様々な副次的な動作が実現されてきた [11, 12, 18, 20, 25, 26]．茂木らは，ロボットの冗長性を用いてモデルを表現する行列とロボットの特異姿勢との関係に基づいた特異姿勢回避を実現した [18]．田中らは，ロボットと環境との相対位置に基づく評価関数を定義し，この評価関数に基づいた障害物回避を実現した [11]．また，文献 [20, 25, 26] では車輪を微小に持ち上げることで速度拘束を能動的に切り替え，冗長空間を変化させながら動作する手法が提案されている．この手法を用いることで状況に応じて冗長性を巧みに利用することが可能となり，移動障害物回避 [20] や先頭の位置姿勢を維持した状態での体形変化 [26] といった動作が実現された．これらの研究は一樣な単一平面上での動作を扱っているが，段差や階段などの複数の平面から構成された環境での推進を扱った研究もある [9, 10, 62]．田中らはロボット胴体の段をまたぐ部分の動作を工夫することで，車輪拘束ヘビ型ロボットによる段差昇降 [9, 10] や，多連結型移動ロボットによる階段昇降 [62] を実現した．

また，モデルベースト手法ではロボットの高い冗長性を活かした作業についても研究されている [41, 61]．文献 [61] では，ロボット先頭にグリッパを搭載し，先頭の3次元の位置姿勢を制御することで，小物体の把持やバルブ開閉動作を実現している．また，文献 [41] では水中での先頭マニピュレータによる作業について検討されている．しかしながら，これらの作業に言及した論文は少なく，単純な作業が検討されているのみである．

以上より，モデルベースト制御ではロボット先頭や重心の任意軌道追従を扱ったものが多く，ロボットの位置姿勢を正確に制御可能な点が特徴である．また，ロボットの冗長性を陽に活かすことで，ロボットの横転回避や障害物回避など，副次的な目標の実現が可能である．その一方で，ロボットと環境との相互作用や，環境自体の数式モデル化が困難な不整地などの複雑環境での推進は実現されていない．ほとんどの研究では平面や斜面といった単一平面を想定しており，一部が段差や階段といった平面で構成された環境を想定しているのみである．

1.2.4 環境に関する分類

各制御手法に基づいた従来研究について，その適用環境に着目して分類する．まず，適用環境を構造の複雑さから，1. 単一平面環境，2. 複数平面環境，3. 複雑環境，の3つ

に分類する．1. 単一平面環境は，単一の平面から構成された最も単純な環境を示し，水平な平面や斜面，壁面などが該当する．2. 複数平面環境は，複数の平面から構成された環境を示し，段差や階段，壁間，複数の斜面で構成された環境などが該当する．3. 複雑環境は，上記以外の環境を示し，円柱や曲面，詳細な定義が難しい不整地などの環境が該当する．

1. 単一平面環境は，最も基本的な環境であることからどの制御手法を用いた従来研究でも扱われている．生物模倣手法では，水平な平面環境下で CPG に基づく障害物回避 [46] や斜面踏破 [15] が実現されている．ヒューリスティック手法では，他の手法と比較して複雑な環境での推進を扱う傾向が強く，単一平面のみを適応環境とした研究は少ない．連続曲線近似法によるロボットの運動制御 [8] や，ロボット全体をクローラのように動作させる研究 [29] などが水平な平面環境での推進に該当する．モデルベースト制御では，単一平面環境での運動が最も多く取り上げられている．ロボット先頭の2次元軌道追従 [11, 17–20, 23, 25, 26] や3次元軌道追従 [12, 21, 22, 24] といった基礎的な運動制御に関する従来研究のほか，冗長性を利用した障害物回避 [11] など単一平面環境での運動を扱った研究である．しかしながら，斜面を陽に扱ったモデルベースト手法の従来研究はない．

2. 複数平面環境も単一平面環境同様にどの手法でも扱われているが，適応可能な環境は各手法によって異なる．生物模倣手法では，sidewinding 滑走による階段昇降 [33] や滑らかに連結した複数斜面の踏破 [37] が実現されている．ヒューリスティック手法では，連続曲線近似手法による段差踏破 [8] やシーケンシャルに関節動作を決定することによる垂直な壁間推進 [55, 56] が実現されている．モデルベースト手法では，2つの水平な平面から構成された段差環境での軌道追従制御 [9] や，多連結移動ロボットによる階段昇降 [62] が実現されている．

3. 複雑環境での推進は，主にヒューリスティック手法によって実現されており，生物模倣手法やモデルベースト手法では実現されていない．ヒューリスティック手法では，捻転動作による配管内外の推進 [6, 13, 48] や，連続曲線近似法の応用によるはしご登り [64] や不整地での推進 [29] を実現している．

以上のように，適用環境で従来研究を分類した場合，ヒューリスティック手法が最も多くの環境で推進を実現している．その一方で，モデルベースト制御ではロボットと環境間の相対関係が複雑化することや，環境のモデル化が困難であることから，複雑な環境での推進はほとんど実現されていない．

1.2.5 運動制御まとめ

生物模倣的手法では，生物の運動や神経回路構造を模倣することで生物の運動知能に関して研究されているほか，斜面や階段，狭所での推進を実現している．ヒューリスティック手法では，環境に応じたロボットの運動を事前設計的に決定することで，配管内外や不整地といった複雑な環境下での推進が実現されている．これらの手法は，オンラインでの計算処理が少なくリアルタイム性が高いことから，実環境での運用に適している．しかし

ながら、生物模倣手法、ヒューリスティック手法では、実験的にその運動が検証されているのみであり、ロボットの推進速度や方向といったロボットの目標軌道への収束に関する保証はない。また、ロボットの有する冗長性を明確に定義することができないためにその活用も限定的である。

モデルベースト手法はロボットの位置姿勢を正確に制御することができるため、任意軌道追従やロボットによるマニピュレーションといった作業が可能である。そのため、ロボットの運動を正確に制御したい場面に適している。また、運動を数式モデル化することでロボットの冗長性を陽に扱うことが可能となり、冗長性を用いた副次的な目標を実現可能である。その一方で、ロボットと環境との相互作用や環境情報のモデル化が困難であることから、複雑な環境での推進が実現されていない。モデルベースト手法においても、その他の手法のように複雑な環境での推進が可能となれば、災害現場におけるより正確なマッピングや簡単な瓦礫の撤去、人の立ち入れない環境における自律巡回点検など、ヘビ型ロボットによる活躍の場が広がることが期待できる。また、冗長性を陽に扱うことによる転倒防止や障害物回避といった副次的な目標の考慮によって、複雑環境におけるより確実な動作が可能となる。

本研究では、モデルベースト手法を用いた車輪拘束ヘビ型ロボットによる複雑な環境での推進、複雑なタスクの実現を大目的として、非平行2平面環境での推進と2制御点同時制御に取り組む。車輪の速度拘束を切り替えることでロボットの冗長性を巧みに利用し、従来研究では実現されていない環境での推進、タスクの実現を目指す。

1.3 本論文の目的と構成

1.3.1 目的

本研究では、ヘビ型ロボットが達成可能なタスク、および活動可能な範囲の拡大を目的とし、2制御点の同時制御、2平面間の移動制御、の2つの課題に取り組む。2制御点の同時制御では、拘束条件を切り替えない場合にはロボットは頻繁に制御目標を達成できない状態に陥る。また、2平面間の移動では推進に伴い車輪を一時的に持ち上げ、車輪の接触する平面を切り替える必要があり、環境に依存した拘束条件の変化を考慮しなければならない。そこで、本研究では拘束条件の変化を考慮したヘビ型ロボットの2点同時制御、2平面間移動制御を提案する。まず、2点同時制御と2平面間移動のための制御モデルを車輪の速度拘束、ロボットと環境の相対関係式に基づいて導出する。そして、これらのモデルにおいて適切に拘束条件を切り替えることで、それぞれの課題の解決を目指す。

1.3.2 構成

本論文は全5章で構成されており、その概要は以下のとおりである。

第2章では、車輪拘束ヘビ型ロボットのモデリングを行う。車輪による摩擦の異方性を速度拘束としてモデル化し、このモデルに対して車輪の微小持ち上げによる拘束変化を導入する。次に、複数点同時制御のためのモデルを導出する。第2制御点の運動学関係をモデルに導入することで、先頭と第2制御点の両方を被制御量として扱う。続けて、2平面間の移動のためのモデルを導出する。ロボットと環境との相対関係をモデルに取り入れることで、環境との相対関係を陽に扱う。これにより、ロボットと環境が適切に接触を維持するための条件を明らかにする。

第3章では、2つの制御点を同時に制御する制御則を提案する。導出したモデルをもとに、2制御点を同時に制御するための条件、問題点を明らかにする。そして、車輪の微小持ち上げによるロボットの拘束変化を用いてこれらの条件を達成し、問題点を回避する制御則を提案する。提案制御則は実機実験によりその有効性を検証する。また、提案制御則の適用事例として物体運搬や扉開け動作を実施する。

第4章では、2平面間の移動を実現する制御則を提案する。モデルをもとに、ロボットの車輪が環境に対して適切な接触を維持するための制御則を提案する。そして、2つの平面をつなぐ部分の動作を工夫することで、2平面間の移動を実現する制御則を提案する。提案制御則は実機実験によりその有効性を検証する。

第5章では、これまでの結果をまとめヘビ型ロボットが複雑な環境での推進や複雑なタスクを実現するための課題と今後の展望を述べる。

第2章

制御対象のモデリング

2.1 制御対象

本研究の制御対象は、車輪拘束ヘビ型ロボットである。Fig. 2.1 にロボットの模式図を示す。また、Fig. 2.2 に各部の詳細を示す。ロボットは、受動車輪を有するリンクを能動関節によって直列に連結した構造である。Fig. 2.1 のように、隣り合う関節の回転軸がリンク周りに $\pi/2$ 回転するように取り付ける。先頭から奇数番目の関節をヨー関節、偶数番目の関節をピッチ関節とする。リンクの長さはすべて等しいものとし、この長さを l とする。ここで、ロボットを構成するリンク数を $2n$ とする。また、Fig. 2.2(b)–2.2(c) のように第 i リンクと第 $i+1$ リンクのなす角度を ψ_i とする。 ψ_i は、第 i 関節によって制御される。すべての関節角をまとめたベクトルを $\boldsymbol{\psi} \in \mathbb{R}^{2n-1,1}$ とする。ピッチ関節と同軸上には受動車輪が一對ずつ取り付けられている。各車輪は車軸を中心として回転することでロボット体幹軸方向にはほとんど摩擦を発生しない。一方で、車輪の摩擦係数は十分に高いものとし、車軸方向には横滑りしないものと仮定する。このように、車輪拘束ヘビ型ロボットは受動車輪によって生物のヘビにみられる摩擦の異方性を再現している。ヨー関節によって体形を屈曲させることで、この摩擦の異方性を利用してロボットは推進する。また、ピッチ関節を用いることで先頭の3次元軌道追従 [12]、段差昇降 [9] といった3次元動作が可能である。

ロボット先頭の3次元位置を $\mathbf{p}_h = [x_h, y_h, z_h]^\top$ とする。また、ロボット先頭の位置姿勢をあらわすため、ロボット先頭を原点とする座標系 Σ_h を設定する。Fig. 2.3 に Σ_h を示

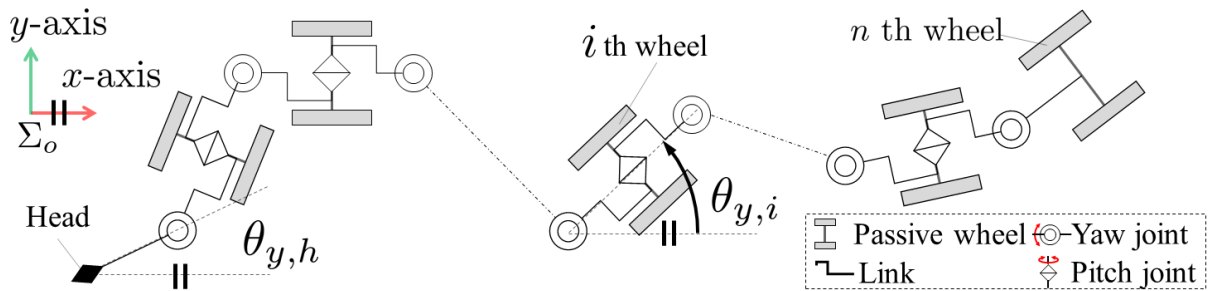


Fig. 2.1 :A model of a snake robot

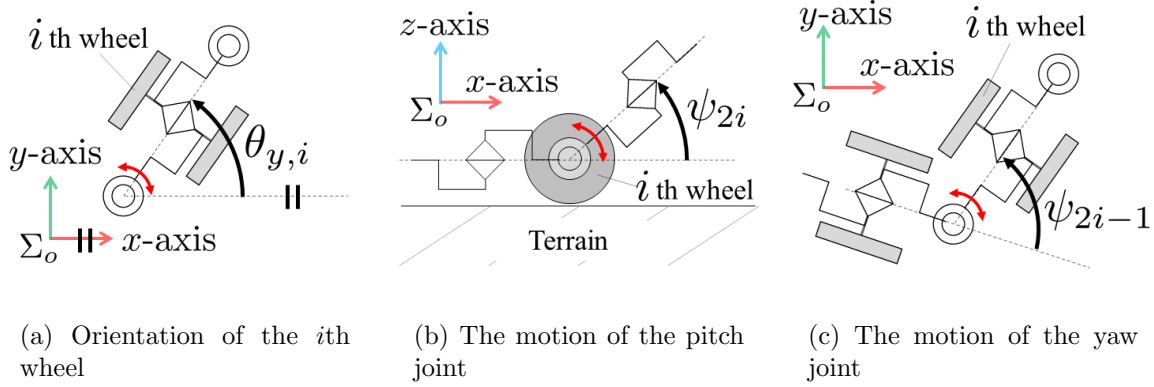


Fig. 2.2 :Detail of a snake robot

す. Σ_h の各軸の単位ベクトルを ${}^h e_x \in \mathbb{R}^{3,1}$, ${}^h e_y \in \mathbb{R}^{3,1}$, ${}^h e_z \in \mathbb{R}^{3,1}$ とする. ${}^h e_x$ は第1リンクと同軸で第1関節の方向を正, ${}^h e_z$ は第1関節の回転軸と平行でロボット上方为正, ${}^h e_y = {}^h e_z \times {}^h e_x$ とする. このときの基準座標系からロボット先頭の座標系への変換をあらわす回転行列 $\mathbf{R}_h \in \mathbb{R}^{3,3}$ を,

$$\mathbf{R}_h = \mathbf{R}_z(\theta_{y,h})\mathbf{R}_y(\theta_{p,h})\mathbf{R}_x(\theta_{r,h}) \quad (2.1)$$

とする. ここで, $\mathbf{R}_x(x)$, $\mathbf{R}_y(y)$, $\mathbf{R}_z(z)$ は, それぞれ基準座標系の x , y , z 軸周りに, x 回転する回転行列, $\theta_{r,h}$ はロボット先頭のロール角, $\theta_{p,h}$ はピッチ角, $\theta_{y,h}$ はヨー角である. そして, ロボットの3次元姿勢を $\boldsymbol{\theta}_h = [\theta_{r,h}, \theta_{p,h}, \theta_{y,h}]^\top$ であらわす. ここで, ロボットが2次元平面上で動作するときは, $\theta_{r,h} = \theta_{p,h} = 0$ であり, $\theta_{y,h}$ でロボット先頭の向きをあらわす. また, ロボット先頭の位置姿勢をまとめたベクトルを, $\mathbf{w}_h = [\mathbf{p}_h^\top, \boldsymbol{\theta}_h^\top]^\top \in \mathbb{R}^{6,1}$ とする.

第 i 車輪の車軸中心の3次元位置を $\mathbf{p}_i = [x_i, y_i, z_i]^\top$ とする. ロボット先頭と同様に, 第 i 車輪の位置姿勢をあらわすため, 車軸中心を原点とした座標系 $\Sigma_{w,i}$ を設定する. Fig. 2.4 に $\Sigma_{w,i}$ を示す. $\Sigma_{w,i}$ の各軸の単位ベクトルを ${}^w e_{x,i} \in \mathbb{R}^{3,1}$, ${}^w e_{y,i} \in \mathbb{R}^{3,1}$, ${}^w e_{z,i} \in \mathbb{R}^{3,1}$ とする. ${}^w e_{x,i}$ は第 i 車輪後方のリンクと同軸でロボット後方を正, ${}^w e_{z,i}$ は第 i 車輪後方のヨー関節の回転軸と平行でロボット上方为正, ${}^w e_{y,i} = {}^w e_{z,i} \times {}^w e_{x,i}$ とする. このときの基準座標系から $\Sigma_{w,i}$ 座標系への変換をあらわす回転行列を

$$\mathbf{R}_{w,i} = \mathbf{R}_z(\theta_{y,i})\mathbf{R}_y(\theta_{p,i})\mathbf{R}_x(\theta_{r,i}) \quad (2.2)$$

とする. ここで, $\theta_{r,i}$ は第 i 車輪のロール角, $\theta_{p,i}$ はピッチ角, $\theta_{y,i}$ はヨー角である. そして, 第 i 車輪の3次元姿勢を $\boldsymbol{\theta}_i = [\theta_{r,i}, \theta_{p,i}, \theta_{y,i}]^\top$ であらわす. また, 第 i 車輪の位置姿勢をまとめたベクトルを, $\mathbf{w}_i = [\mathbf{p}_i^\top, \boldsymbol{\theta}_i^\top]^\top \in \mathbb{R}^{6,1}$ とする.

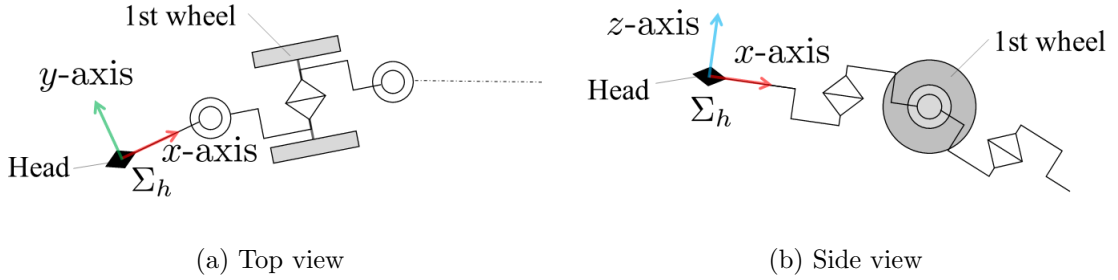
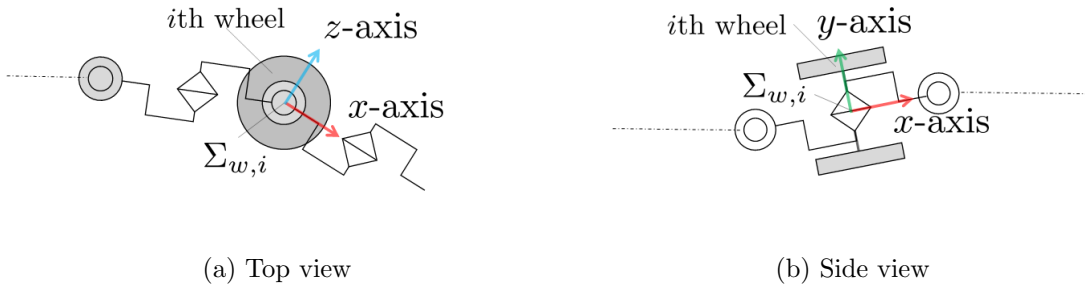


Fig. 2.3 :Coordinate system of the head

Fig. 2.4 :Coordinate system of the i th wheel

2.2 速度拘束に基づく運動学モデル

まず、2次元平面上で動作するヘビ型ロボットのモデリングを行う。すなわち、すべてのピッチ関節角がゼロ、ロボット先頭のロール角 $\theta_{r,h} = 0$ 、ピッチ角 $\theta_{p,h} = 0$ 、すべての車輪は基準座標系 x - y 平面に接触している状態を仮定する。受動車輪による速度拘束をモデル化し、これを連立することで運動学モデルを導出する。このとき、ロボット先頭の x - y 平面上の位置姿勢をまとめたベクトルを、 $\tilde{\mathbf{w}}_h = [x_h, y_h, \theta_{y,h}]^\top$ とする。また、関節角度をまとめたベクトル $\boldsymbol{\psi}$ からピッチ関節を取り除いたベクトルを $\boldsymbol{\phi} \in \mathbb{R}^{n,1}$ 、 $\boldsymbol{\phi}$ の第 i 成分を ϕ_i とする。

2.2.1 速度拘束

まず，受動車輪による速度拘束をモデル化する．ロボットの幾何関係より，第 i 車輪の車軸中心の2次元位置は，

$$x_i = \begin{cases} x_h + l \{ \cos(\theta_{y,h}) + \cos(\theta_{y,i}) \} & (i = 1) \\ x_{i-1} + l \{ \cos(\theta_{y,i-1}) + \cos(\theta_{y,i}) \} & (i = 2, 3, \dots, n) \end{cases} \quad (2.3)$$

$$y_i = \begin{cases} y_h + l \{ \sin(\theta_{y,h}) + \sin(\theta_{y,i}) \} & (i = 1) \\ y_{i-1} + l \{ \sin(\theta_{y,i-1}) + \sin(\theta_{y,i}) \} & (i = 2, 3, \dots, n) \end{cases} \quad (2.4)$$

となる．また，第 i 車輪のヨー角 $\theta_{y,i}$ は，

$$\theta_{y,i} = \theta_{y,h} + \sum_{k=1}^i \phi_k \quad (2.5)$$

となる．このとき，第 i 車軸中心の車軸方向速度 v_i は，

$$v_i = \dot{x}_i \sin(\theta_{y,i}) - \dot{y}_i \cos(\theta_{y,i}) \quad (2.6)$$

となる．ここで，第 i 車輪による速度拘束を $v_i = 0$ とすると，速度拘束式は，

$$\dot{x}_i \sin(\theta_{y,i}) - \dot{y}_i \cos(\theta_{y,i}) = 0 \quad (2.7)$$

とあらわされる．この速度拘束式をすべての車輪について連立すると，

$$\mathbf{A} \dot{\mathbf{w}}_h = \mathbf{B} \dot{\boldsymbol{\phi}} \quad (2.8)$$

となる．ここで， $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n,3}$ ， $\mathbf{B} \in \mathbb{R}^{n,n}$ である．また， \mathbf{B} はその幾何関係から

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} l & 0 & \cdots & 0 \\ b_{2,1} & l & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & 0 \\ b_{n,1} & \cdots & b_{n,n-1} & l \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

であり，すべての対角成分が定数の三角行列となる．ここで， $b_{i,j}$ は \mathbf{B} の第 i 行， j 列成分である．式(2.8)が $\dot{\mathbf{w}}_h$ を被制御量， $\dot{\boldsymbol{\phi}}$ を入力とした，2次元平面上のヘビ型ロボットの運動学モデルである．

2.3 拘束条件の切り替え

ロボットは車輪による横滑りしないという速度拘束を用いて推進する．その一方で，速度拘束によって運動を制限されている．そこで，車輪を微小に持ち上げることで任意の車

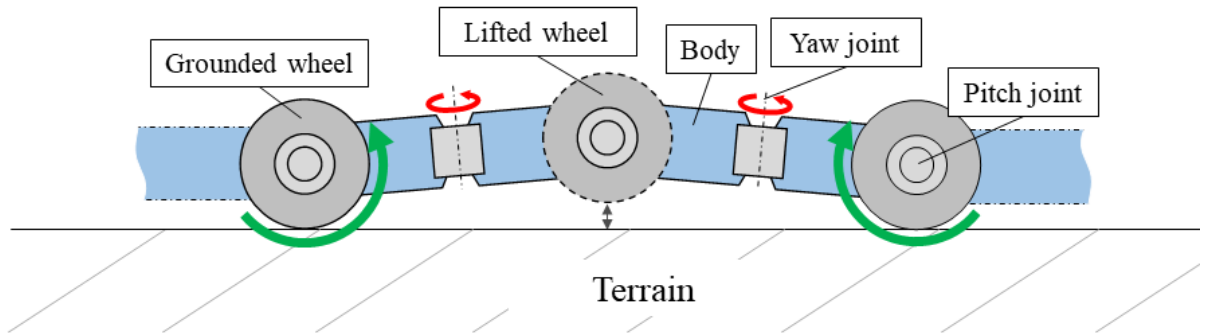


Fig. 2.5 :Lifting wheel by pitch joints

輪の速度拘束を取り除く．持ち上げる車輪を工夫することで，移動障害物回避 [20] や，その場での体形変化 [26] が可能となる．車輪の持ち上げは，Fig. 2.5 のように該当の車輪前後のピッチ関節を微小に動作させることで実現する．ここで，環境は変形しない滑らかな平面であるものとし，微小に車輪を持ち上げることで車輪は平面から離れるものとする．このとき，車輪の持ち上げるためのピッチ関節角度は非常に小さく，2次元平面上での運動への影響は小さい．よって，2次元の運動学モデル上はピッチ関節角度をゼロに近似して扱う．

2.3.1 接地/非接地車輪の組み合わせ

車輪を持ち上げるとき，接地している車輪と非接地の車輪を区別する必要がある．この車輪の接地/非接地状態の組み合わせをあらわす固有の整数をモードと呼ぶこととし， σ であらわす．車輪数 n のとき，すべての車輪に対する接地/非接地の組み合わせは， 2^n 通りである．ただし，これらの組み合わせの中にはすべての車輪が非接地，ひとつの車輪しか接地していないなど，実機では実現が不可能なモードが存在していることに注意が必要である．これらのモードの中から状況に適したモードを選択することで，ロボットがより効果的，効率的に動作可能であると期待できる．しかしながら，前述の通りモードの総数は車輪の数に対して指数的に増加する．そのため，すべてのモードから適したモードを選択した場合，非常に大きな計算コストが掛かる．よって，何らかの指針で探索範囲とするモードの総数を削減する必要がある．

2.3.2 拘束条件の切り替えを考慮した運動学モデル

式 (2.8) のすべての車輪が接地した運動学モデルでは，それぞれ第 i 行が第 i 車輪による速度拘束をあらわしている．よって，第 i 車輪を持ち上げた場合の運動学モデルは，式 (2.8) から第 i 行を取り除いたものとなる．ここで，モードに応じて接地している車輪が

異なるから、運動学モデルも異なる．すなわち、モードの数に対応した運動学モデルが存在する．ここで、モード σ での運動学モデルを

$$\mathbf{A}_\sigma \dot{\mathbf{w}}_h = \mathbf{B}_\sigma \dot{\phi} \quad (2.10)$$

とする．ここで、モード σ における接地車輪数を n_σ とすると、 $\mathbf{A}_\sigma \in \mathbb{R}^{n_\sigma, 3}$ 、 $\mathbf{B}_\sigma \in \mathbb{R}^{n_\sigma, n}$ である．モデル行列 \mathbf{A}_σ 、 \mathbf{B}_σ は、各モードに応じた選択行列 $\mathbf{T}_\sigma \in \mathbb{R}^{n_\sigma, n}$ を用いて、

$$\mathbf{A}_\sigma = \mathbf{T}_\sigma \mathbf{A}, \quad \mathbf{B}_\sigma = \mathbf{T}_\sigma \mathbf{B} \quad (2.11)$$

とあらわされる．ここで、 $n_\sigma < n$ であれば拘束条件の数に対して入力の数が大きく、モデルは運動学的冗長性をもつ．また、モードの切り替えに伴ってモデルが変化し、冗長空間も変化する．これにより、状況に応じて冗長空間を変化させることで、ロボットはより柔軟な動作が可能となる．

2.3.3 運動学的冗長性

式 (2.10) の運動学モデルに基づいてロボットの2次元運動を制御するとき、 $n_\sigma < n$ でモデルは運動学的冗長性を有する．式 (2.10) を $\dot{\phi}$ について解くと、その一般解は、

$$\dot{\phi} = \mathbf{B}_\sigma^\dagger \mathbf{A}_\sigma \dot{\mathbf{w}}_h + (\mathbf{I}_n - \mathbf{B}_\sigma^\dagger \mathbf{B}_\sigma) \mathbf{l} \quad (2.12)$$

となる．ここで、 $\mathbf{I}_n \in \mathbb{R}^{n, n}$ は単位行列、 $\mathbf{B}_\sigma^\dagger \in \mathbb{R}^{n, n_\sigma}$ は \mathbf{B}_σ の擬似逆行列、 $\mathbf{l} \in \mathbb{R}^{n, 1}$ は任意のベクトルである．式 (2.12) の右辺第2項が冗長性に起因する成分であり、 \mathbf{l} を適切に設計することで冗長性を利用した動作が可能である [66]．従来研究では、この冗長成分を利用することでさまざまなサブタスクを実現している [11, 12, 18, 20, 25, 26, 26]．冗長空間を用いた評価関数の増大化 [18] や、特定の関節角の直接制御 [26] などが可能である．

2.3.4 特異姿勢

式 (2.8) の運動学モデルにもとづいてロボットを制御するとき、 \mathbf{A}_σ のフルランク性に起因する特異姿勢が存在する [65]．一方で、 \mathbf{B}_σ はその成分から常に行フルランクであり、 \mathbf{B}_σ のフルランク性に起因した特異姿勢は存在しない．式 (2.8) の特異姿勢は、Fig. 2.6 に示す2種類の体形に分類される．Fig. 2.6(a) のように接地しているすべての車輪が平行な体形と、Fig. 2.6(b) のように接地している車輪の車軸を通る直線が単一の点で交わる体形である．これらの体形では、一定の方向に速度拘束が発生せず、ロボットの運動が一意に決定されない．これらの特異姿勢の時、 $\text{rank}(\mathbf{A}_\sigma) < 3$ となり、列フルランク性を損なうことがわかっている [65]．

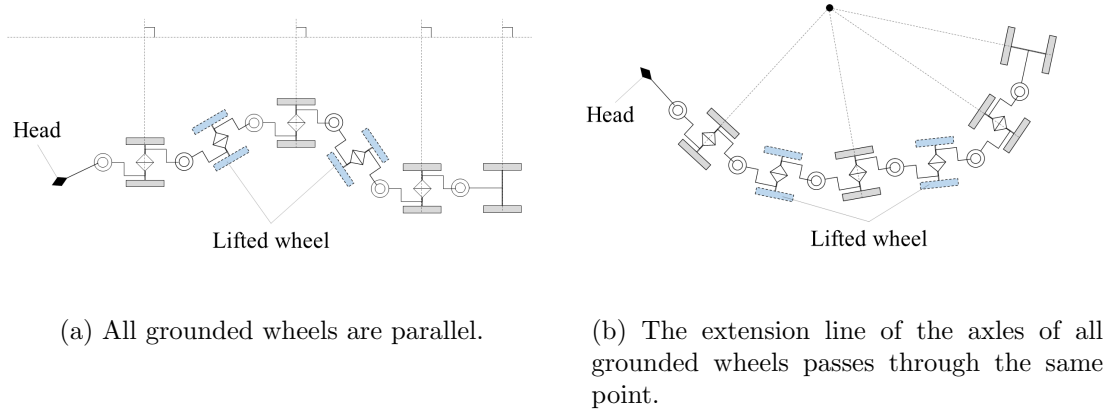


Fig. 2.6 :Example of the singular configurations

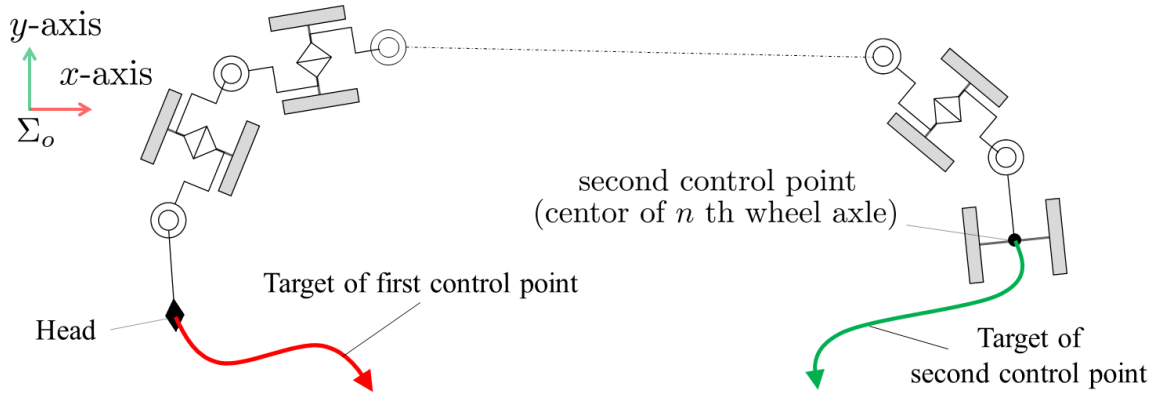


Fig. 2.7 :Motion of the simultaneous control

2.4 制御点の追加

Fig. 2.7 のように、2次元平面上においてロボット先頭ともう一つの制御点を同時に制御することを考える．式 (2.10) の運動学モデルに、新たに制御点を追加する．この追加する制御点を第2制御点とする．第2制御点はいずれかの車輪の車軸中心とする．第2制御点とロボット先頭の2次元位置姿勢、関節角度との運動学関係式を、式 (2.10) のモデルに連立することで2つの制御点を同時に制御するための運動学モデルを導出する．

2.4.1 第2制御点の運動学関係

第2制御点を第 k 車輪の車軸中心とする．第 k 車輪の2次元位置姿勢 $\tilde{\mathbf{w}}_k = [x_k, y_k, \theta_{y,k}]^\top$ は，式(2.3)–(2.5)より， $\tilde{\mathbf{w}}_h$ ， ϕ の関数としてあらわされる．よって， $\tilde{\mathbf{w}}_k$ の微分は，

$$\dot{\tilde{\mathbf{w}}}_k = \mathbf{J}_{k,1}\dot{\tilde{\mathbf{w}}}_h + \mathbf{J}_{k,2}\dot{\phi} \quad (2.13)$$

となる．ここで， $\mathbf{J}_{k,1} \in \mathbb{R}^{3,3}$ ， $\mathbf{J}_{k,2} \in \mathbb{R}^{3,n}$ である．式(2.13)が， $\tilde{\mathbf{w}}_k$ と $\tilde{\mathbf{w}}_h$ ， ϕ の運動学関係式である．ここで，幾何関係より $\mathbf{J}_{k,2}$ の第 $k+1$ から第 n 列成分はすべてゼロである．

2.4.2 制御点を追加した2次元運動学モデル

車輪の速度拘束に基づく運動学モデルに，第2制御点の運動学関係式を連立することで，2制御点を同時に制御するための運動学モデルを導出する．式(2.10)と式(2.13)を連立すると，

$$\mathbf{A}_{c,\sigma}\dot{\mathbf{c}}_c = \mathbf{B}_{c,\sigma}\dot{\phi} \quad (2.14)$$

$$\mathbf{A}_{c,\sigma} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_\sigma & \mathbf{O}_{n_\sigma,3} \\ \mathbf{J}_{k,1} & -\mathbf{I}_3 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_{c,\sigma} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_\sigma \\ -\mathbf{J}_{k,2} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{c}_c = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{w}}_h \\ \tilde{\mathbf{w}}_k \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

となる．ここで， $\mathbf{A}_{c,\sigma} \in \mathbb{R}^{n_\sigma+3,6}$ ， $\mathbf{B}_{c,\sigma} \in \mathbb{R}^{n_\sigma+3,n}$ である．式(2.14)が，被制御量を \mathbf{c}_c ，入力を $\dot{\phi}$ とした，2制御点を同時に制御するための運動学モデルである．ここで，式(2.14)が $\dot{\phi}$ についての解を持つためには，連立した式の数よりも入力の数が多い必要がある．よって， $n_\sigma + 3 \leq n$ が必要である． n_σ についてまとめると， $n_\sigma \leq n - 3$ が必要条件となる．すなわち，式(2.14)が $\dot{\phi}$ についての解を持つためには，3つ以上の車輪を持ち上げるモードである必要がある． $n_\sigma = n - 3$ のとき， $\dot{\phi}$ は一意解をもつ． $n_\sigma \leq n - 3$ のとき，式(2.14)は運動学的冗長性を有する．

2.4.3 特有の特異姿勢

2制御点同時制御では，先頭のみを制御する場合の特異姿勢に加えて，特有の特異姿勢が存在する．これは，モデル行列の $\mathbf{B}_{c,\sigma}$ のフルランク性に起因する．先頭のみを制御する場合，2制御点同時制御の $\mathbf{B}_{c,\sigma}$ に該当する行列 \mathbf{B} はその成分から常にフルランクである．また，拘束切り替えを導入したモデルにおける \mathbf{B}_σ も同様に常に行フルランクである．そのため， \mathbf{B} ， \mathbf{B}_σ のフルランク性に依存した特異姿勢は存在しなかった．しかしながら，2制御点同時制御では $\mathbf{B}_{c,\sigma}$ の行フルランク性は保証されておらず，これに起因した特異姿勢が存在する．この特異姿勢については，3.2.2節にて入力計算と合わせてその詳細を示す．

2.5 3次元動作のモデリング

2.4節まではロボットの2次元平面上での動作を扱ってきた。ヘビ型ロボットはピッチ関節を用いることで平面上の動作だけではなく、3次元運動が可能である [12]。ここでは、ロボット先頭の3次元位置姿勢を制御するための運動学モデルと、ロボット先頭と最後尾の3次元軌道を同時に制御するための運動学モデルを導出する。

2.5.1 先頭を持ち上げた運動学モデル

Fig. 2.8 のようにピッチ関節を用いてロボット先頭を持ち上げた状態で、ロボット先頭の3次元位置姿勢を制御することを考える。ここで、第 n_h 車輪から第 n 車輪が平面に接触していると仮定する。このとき、平面に接地している部分をベース部、持ち上げられている部分を先頭部とする。Fig. 2.8(b) にベース部の模式図を示す。第1から第 $2n_h$ 関節を先頭部関節、第 $2n_h + 1$ から第 $2n - 1$ 関節をベース部関節とする。これらの関節角度をまとめたベクトルをそれぞれ $\psi_h \in \mathbb{R}^{2n_h,1}$, $\psi_b \in \mathbb{R}^{2n-2n_h-1,1}$ とする。特に、ベース部のヨー関節だけをまとめたベクトルを $\phi_b \in \mathbb{R}^{n-n_h,1}$, ϕ_b の第 i 成分を $\phi_{b,i}$ とする。また、このとき平面に接触している車輪数を n_b とすると、 $n_b = n - n_h + 1$ である。ここで、ベース部先頭車輪は初期状態で平面に接触しており、離れることはないと仮定する。すなわち、 $\dot{z}_{n_h} = \dot{\theta}_{r,n_h} = \dot{\theta}_{p,n_h} = 0$ を仮定する。この拘束式は、幾何関係より次式であらわされる。

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_{n_h} \\ \dot{\theta}_{r,n_h} \\ \dot{\theta}_{p,n_h} \end{bmatrix} = \mathbf{J}_{b,1} \dot{\psi}_h + \mathbf{J}_{b,2} \dot{\psi}_b = \mathbf{0} \quad (2.16)$$

ここで、 $\mathbf{J}_{b,1} \in \mathbb{R}^{3,6}$, $\mathbf{J}_{b,2} \in \mathbb{R}^{3,2n_h}$ である。

第 i ベース部車輪のインデックスを示す変数を $b_i = n_h + i - 1$ とする。先頭を持ち上げた状態でのベース部車輪の車軸中心の2次元位置姿勢は、

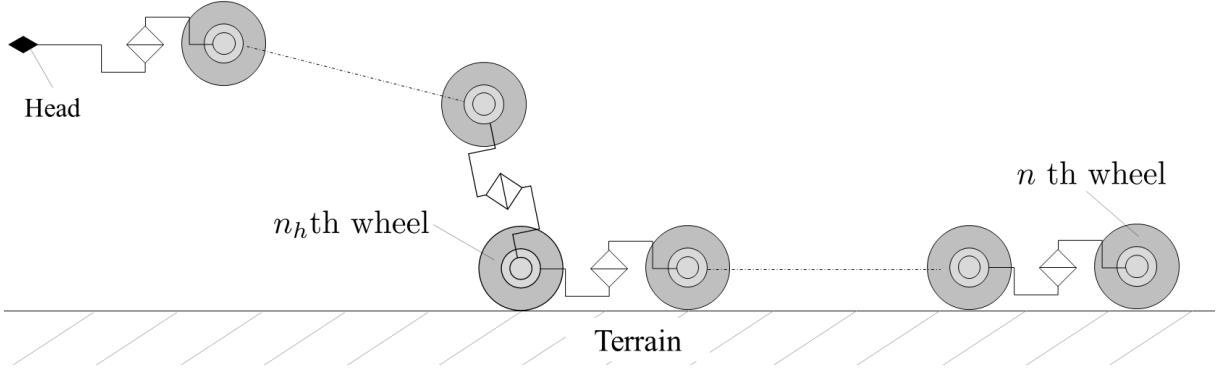
$$x_{b_i} = \begin{cases} x_{n_h} & (i = 1) \\ x_{b_{i-1}} + l \{ \cos(\theta_{y,b_{i-1}}) + \cos(\theta_{y,b_i}) \} & (i = 2, 3, \dots, n_b) \end{cases} \quad (2.17)$$

$$y_{b_i} = \begin{cases} y_{n_h} & (i = 1) \\ y_{b_{i-1}} + l \{ \sin(\theta_{y,b_{i-1}}) + \sin(\theta_{y,b_i}) \} & (i = 2, 3, \dots, n_b) \end{cases} \quad (2.18)$$

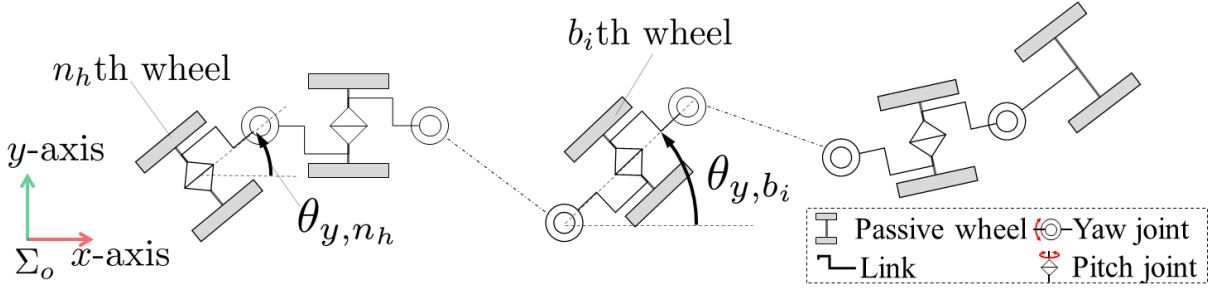
$$\theta_{y,b_i} = \begin{cases} \theta_{n_h} & (i = 1) \\ \theta_{y,b_{i-1}} + \phi_{b,i-1} & (i = 2, 3, \dots, n_b) \end{cases} \quad (2.19)$$

となる。第 i ベース部の車輪による速度拘束式は、

$$\dot{x}_{b_i} \sin(\theta_{y,b_i}) - \dot{y}_{b_i} \cos(\theta_{y,b_i}) = 0 \quad (2.20)$$



(a) Model of whole part



(b) Model of the base part

Fig. 2.8 :A model of head raising motion

であるから、ベース部の車輪による速度拘束式を連立すると、

$$\mathbf{A}_b \dot{\tilde{\mathbf{w}}}_{n_h} = \mathbf{B}_b \dot{\boldsymbol{\phi}}_b \quad (2.21)$$

$$\tilde{\mathbf{w}}_{n_h} = \begin{bmatrix} x_{n_h} \\ y_{n_h} \\ \theta_{y,n_h} \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

とあらわされる。ここで、 $\mathbf{A}_b \in \mathbb{R}^{n_b,3}$ 、 $\mathbf{B}_b \in \mathbb{R}^{n_b,n_b-1}$ である。また、幾何関係から $\tilde{\mathbf{w}}_{n_h}$ は \mathbf{w}_h 、 $\boldsymbol{\psi}_h$ の関数としてあらわされる。よってその微分は、

$$\dot{\tilde{\mathbf{w}}}_{n_h} = \mathbf{J}_{b,3} \dot{\mathbf{w}}_h + \mathbf{J}_{b,4} \dot{\boldsymbol{\psi}}_h \quad (2.23)$$

とあらわされる。ここで、 $\mathbf{J}_{b,3} \in \mathbb{R}^{3,3}$ 、 $\mathbf{J}_{b,4} \in \mathbb{R}^{3,2n_h}$ である。よって、式(2.21)は

$$\mathbf{A}_b \mathbf{J}_{b,3} \dot{\mathbf{w}}_h = \begin{bmatrix} -\mathbf{A}_b \mathbf{J}_{b,4} & \mathbf{B}_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{\psi}}_h \\ \dot{\boldsymbol{\phi}}_b \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

となる．ベース部車輪の速度拘束式と，ベース部先頭の平面への拘束式を連立することで先頭を持ち上げた状態の運動学モデルを導出する．式 (2.16) と式 (2.24) を連立すると，

$$\mathbf{A}_h \dot{\mathbf{w}}_h = \mathbf{B}_h \dot{\bar{\boldsymbol{\psi}}} \quad (2.25)$$

$$\mathbf{A}_h = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_b \mathbf{J}_{b,3} \\ \mathbf{J}_{b,1} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_h = \begin{bmatrix} -\mathbf{A}_b \mathbf{J}_{b,4} & \mathbf{B}_b \\ -\mathbf{J}_{b,2} & \mathbf{O}_{3,n_b-1} \end{bmatrix}, \quad \bar{\boldsymbol{\psi}} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\psi}_h \\ \boldsymbol{\phi}_b \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

となる．ここで， $\mathbf{A}_h \in \mathbb{R}^{n_b+3,6}$ ， $\mathbf{B}_h \in \mathbb{R}^{n_b+3,n+n_h}$ である．また， $\mathbf{O}_{i,j}$ は $\mathbf{O}_{i,j} \in \mathbb{R}^{i,j}$ のゼロ行列である．式 (2.25) の第 1 行から第 n_b 行がベース部車輪の速度拘束，第 $n_b + 1$ 行から第 $n_b + 3$ 行がベース部先頭の平面への拘束式をあらわしている．式 (2.25) がロボット先頭の 3 次元位置姿勢を被制御量，ヘッド部関節角速度とベース部ヨー関節角速度を入力とした運動学モデルである．ここで，式 (2.25) が $\dot{\bar{\boldsymbol{\psi}}}$ について解を持つためには，拘束式の数より入力の方が大きい必要がある．よって， $n_b + 3 \leq n + n_h$ が式 (2.25) が $\dot{\bar{\boldsymbol{\psi}}}$ について解を持つための必要条件である． n_h についてまとめると， $n_h \geq 2$ となる． $n_h = 2$ のとき解は一意に定まり， $n_h > 2$ のとき式 (2.25) は冗長性を持つ．

2.5.2 双腕動作

Fig. 2.9 のように，ロボット先頭と最後尾の 3 次元位置姿勢を同時に制御することで，双腕ロボットのように動作することを考える．ここで，第 n_h 車輪から第 n_t 車輪が平面に接触しているとする．平面に接触している部分をベース部，先頭を持ち上げている部分を先頭部，最後部を持ち上げている部分を後端部とする．第 1 から第 $2n_h$ 関節を先頭部関節，第 $2n_h + 1$ から第 $2n_t - 1$ 関節をベース部関節，第 $2n_t$ から第 $2n - 1$ 関節を後端部関節とする．これらの関節をまとめたベクトルをそれぞれ $\boldsymbol{\psi}_h \in \mathbb{R}^{2n_h,1}$ ， $\boldsymbol{\psi}'_b \in \mathbb{R}^{2n_t-2n_h-1,1}$ ， $\boldsymbol{\psi}_t \in \mathbb{R}^{2n-2n_t,1}$ とする．特にベース部関節のヨー関節のみを抜き出したベクトルを $\boldsymbol{\phi}'_b \in \mathbb{R}^{n_t-n_h,1}$ とする．また，このときの平面に接触している車輪数を n'_b とすると， $n'_b = n_t - n_h + 1$ である．また，ベース部最後尾車輪の 2 次元位置姿勢を $\tilde{\mathbf{w}}_{n_t} = [x_{n_t}, y_{n_t}, \theta_{y,n_t}]^\top$ とする．このときのロボット先頭を持ち上げた運動学モデルを，

$$\mathbf{A}'_h \dot{\mathbf{w}}_h = \mathbf{B}'_h \dot{\bar{\boldsymbol{\psi}}}' \quad (2.27)$$

$$\bar{\boldsymbol{\psi}}' = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\psi}_h \\ \boldsymbol{\phi}'_b \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

とする．ここで， $\mathbf{A}'_h \in \mathbb{R}^{n'_b+3,6}$ ， $\mathbf{B}'_h \in \mathbb{R}^{n'_b+3,n_t+n_h}$ である．

Fig. 2.9 より，ロボット最後尾の位置姿勢 \mathbf{w}_t は， $\tilde{\mathbf{w}}_{n_t}$ ， $\boldsymbol{\psi}_t$ の関数としてあらわされる．よって，その微分は

$$\dot{\mathbf{w}}_t = \mathbf{J}_{t,1} \dot{\tilde{\mathbf{w}}}_{n_t} + \mathbf{J}_{t,2} \dot{\boldsymbol{\psi}}_t \quad (2.29)$$

とあらわされる．ここで， $\mathbf{J}_{t,1} \in \mathbb{R}^{3,3}$ ， $\mathbf{J}_{t,2} \in \mathbb{R}^{3,2n-2n_t}$ である．ベース部最後尾車輪の 2 次元位置姿勢 $\tilde{\mathbf{w}}_{n_t}$ は，幾何関係より \mathbf{w}_h ， $\bar{\boldsymbol{\psi}}'$ の関数としてあらわされる．よってその微

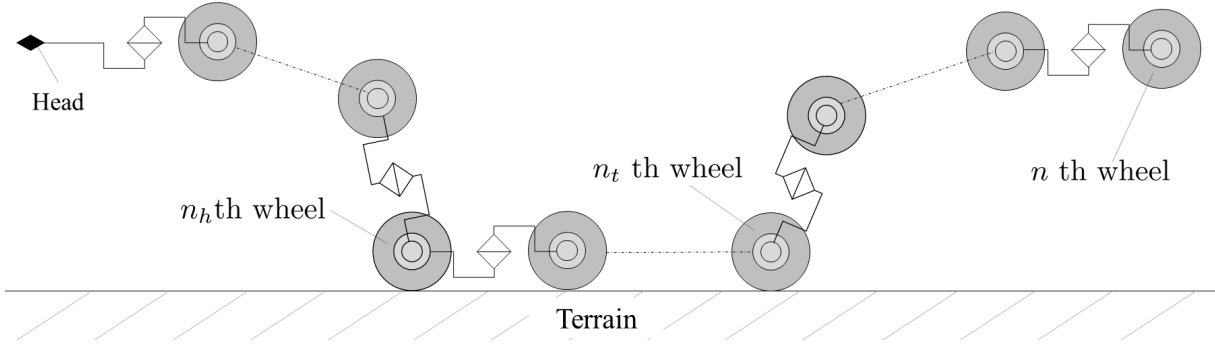


Fig. 2.9 :A model double arm motion

分は,

$$\dot{\mathbf{w}}_{n_t} = \mathbf{J}_{n_t,1} \dot{\mathbf{w}}_h + \mathbf{J}_{n_t,2} \dot{\boldsymbol{\psi}}' \quad (2.30)$$

とあらわされる．よって式 (2.29) は,

$$\dot{\mathbf{w}}_t = \mathbf{J}_{t,1} \mathbf{J}_{n_t,1} \dot{\mathbf{w}}_h + \mathbf{J}_{t,1} \mathbf{J}_{n_t,2} \dot{\boldsymbol{\psi}}' + \mathbf{J}_{t,2} \dot{\boldsymbol{\psi}}_t \quad (2.31)$$

となる．式 (2.27) と式 (2.31) を連立すると,

$$\mathbf{A}_d \dot{\mathbf{c}}_d = \mathbf{B}_d \dot{\boldsymbol{\psi}}_d \quad (2.32)$$

$$\mathbf{A}_d = \begin{bmatrix} \mathbf{A}'_h & \mathbf{O}_{n'_b+3,6} \\ \mathbf{J}_{t,1} \mathbf{J}_{n_t,1} & -\mathbf{I}_6 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_d = \begin{bmatrix} \mathbf{B}'_h & \mathbf{O}_{n'_b+3,2n-2n_t} \\ -\mathbf{J}_{t,1} \mathbf{J}_{n_t,2} & -\mathbf{J}_{t,2} \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

$$\mathbf{c}_d = \begin{bmatrix} \mathbf{w}_h \\ \mathbf{w}_t \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\psi}_d = \begin{bmatrix} \psi_h \\ \phi'_b \\ \psi_t \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

となる．ここで, $\mathbf{A}_d \in \mathbb{R}^{n'_b+9,12}$, $\mathbf{B}_d \in \mathbb{R}^{n'_b+9,2n-n'_b+1}$ である．双腕制御では, 2 制御点同時制御と同様に拘束条件の切り替えを導入する．式 (2.32) のベース部について, モード切り替えを導入した運動学モデルを

$$\mathbf{A}_{d,\sigma} \dot{\mathbf{c}}_d = \mathbf{B}_{d,\sigma} \dot{\boldsymbol{\psi}}_d \quad (2.35)$$

とする．ここで, モード σ におけるベース部の接地車輪数を $n'_{b,\sigma}$ とすると, $\mathbf{A}_{d,\sigma} \in \mathbb{R}^{n'_{b,\sigma}+9,12}$, $\mathbf{B}_{d,\sigma} \in \mathbb{R}^{n'_{b,\sigma}+9,2n-n'_{b,\sigma}+1}$ である．式 (2.35) が被制御量を \mathbf{c}_d , 入力を $\dot{\boldsymbol{\psi}}_d$ とした運動学モデルである．

2.6 環境との相対関係

ヘビ型ロボットは車輪による摩擦の異方性を利用して, 体を屈曲させることで推進する．このとき, 車輪による摩擦の異方性を利用するには, 車輪が環境と適切に接触してい

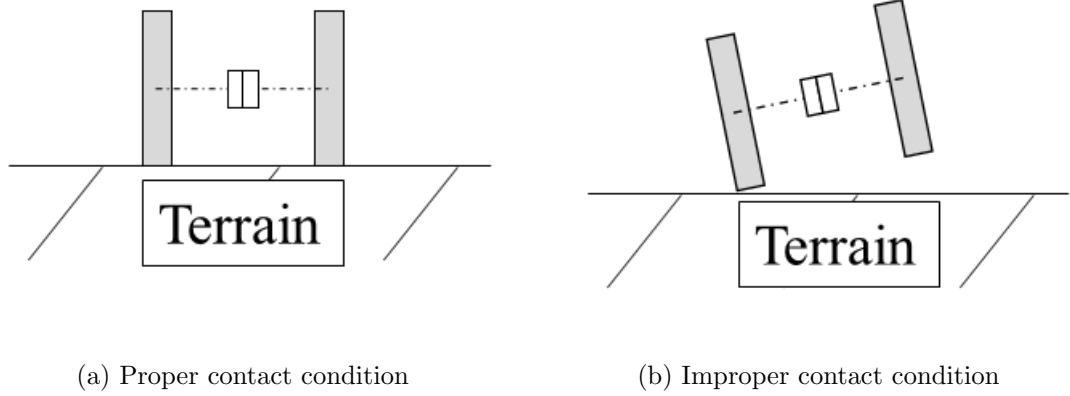


Fig. 2.10 :Condition of the contact between a wheel and plane

る必要がある．よって，車輪と対象環境との相対関係式と，適切な接触条件を明らかにする．そして，この条件式を満たすようにロボットを動作させることで，車輪による速度拘束を適切に発生させる．ここで，ロボットが接触する想定環境は平面とし，曲面や不整地は考慮しない．

2.6.1 車輪と平面の接触条件

車輪が平面に対して接触するための条件式を明らかにする．車輪は半径 r_w の円盤形状と仮定し，厚さは無視できるものとする．左右の車輪の距離を d_{tr} とし，以降トレッド幅と呼ぶ．また，車輪が接触する平面を第 j 平面とし，平面上の点 $\mathbf{p}_{e,j} \in \mathbb{R}^{3,1}$ と平面の法線ベクトル $\mathbf{n}_j \in \mathbb{R}^{3,1}$ であらわす．

ここで，適切な姿勢での車輪と平面の接触とは，Fig. 2.10(a) のように 2 つの車輪が両方とも平面に接触している状態とする．一方で，Fig. 2.10(b) のように片方の車輪のみ平面に接触している状態を不適切な接触状態とする．このとき，車軸中心と平面との距離は車輪半径 r_w と等しく，車軸が平面と平行である．よって，車輪と平面との相対関係を車軸中心と平面との相対距離，車軸と平面との相対角度であらわす．Fig. 2.11 に車輪と平面との相対関係の模式図を示す．第 i 車輪の車軸中心と第 j 平面との距離を $d_{i,j}$ ，第 i 車輪の車軸と第 j 平面との相対角度を $\kappa_{i,j}$ とし，次のように定義する．

$$d_{i,j} = \mathbf{n}_j^\top (\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_{e,j}) \quad (2.36)$$

$$\kappa_{i,j} = \sin^{-1} (\mathbf{n}_j \cdot {}^w \mathbf{e}_{y,i}) \quad (2.37)$$

$d_{i,j} = r_w$ ， $\kappa_{i,j} = 0$ のとき，第 i 車輪は第 j 平面に対して適切に接触する．

ここで，複数の連続した車輪が平面に接触する場合を考える．第 i 車輪から第 $i + n_s$ 車輪を第 j 平面に適切に接触する場合を仮定する．ただし，第 i 車輪から第 $i + n_s$ 車輪の間

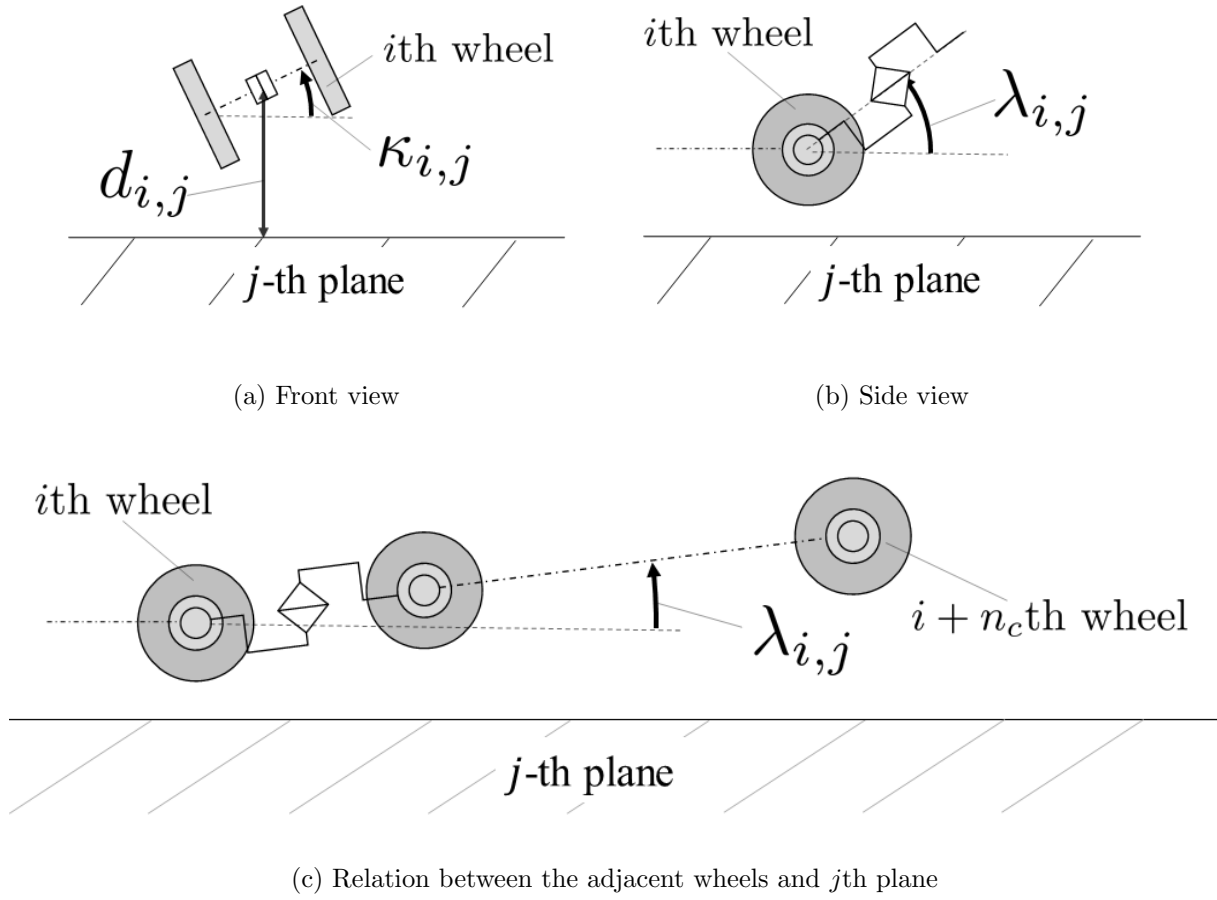


Fig. 2.11 :A model of the relation between the i th wheel and the j th plane

のピッチ関節はすべてゼロとする. Fig. 2.11(c) にそのときの模式図を示す. このとき, 第 i 車輪が適切に接触していると仮定すると, ${}^w\mathbf{e}_{x,i}$ が第 j 平面と平行であれば第 $i+1$ から第 $i+n_s$ 車輪は平面に適切に接触する. ${}^w\mathbf{e}_{x,i}$ と第 j 平面の相対角度を $\lambda_{i,j}$ とし,

$$\lambda_{i,j} = \sin^{-1}(\mathbf{n}_j \cdot {}^w\mathbf{e}_{x,i}) \quad (2.38)$$

とすると, 第 i 車輪から第 $i+n_c$ 車輪が第 j 平面に適切に接触するための条件式は, $d_{i,j} = r_w$, $\kappa_{i,j} = 0$, $\lambda_{i,j} = 0$ である. 以上の条件式を満たすようにロボットを制御することで, 車輪は平面に対して適切に接触し速度拘束を発生させる.

第3章

2 制御点同時制御

3.1 問題設定

本研究の制御対象である車輪拘束ヘビ型ロボットを用いて、ロボット先頭と最後尾の2点を同時に制御する。そして、この2つの制御点を用いてケーシング運搬や台車操舵、扉開けを実現することを目指す。想定環境は単一平面とし、制御対象は第2章で示した車輪拘束ヘビ型ロボットとする。そして、体を屈曲することで車輪の速度拘束を利用して推進する。先頭と最後尾を同時に制御することでFig. 3.1のようにケーシング運搬や台車操舵といった動作を実現する。2つの制御点を同時に制御するとき、ロボットは特有の特異姿勢を有する。この特異姿勢により、ロボットの拘束条件が変化しないモデルを用いた制御ではロボットが動作を継続することが困難な場合がある。例えば、Fig. 3.1(a)のケーシング運搬では、進行方向に対して直交する向きの車輪がロボットの動作を妨げている。そこで、一定時間ごとに車輪の接地/非接地の組み合わせを切り替えながら動作することで、特異姿勢を回避しながら継続的に動作することを目指す。このとき、車輪の接地/非接地の組み合わせは無数に存在し、適切な組み合わせを選択しなくてはロボットの継続的な動作は実現できない。本研究では、2制御点同時制御に特有の特異姿勢に基づいた評価関数を導入し、この評価関数に基づいて最適化問題を解くことでロボットの姿勢に応じて適した車輪の接地/非接地の組み合わせを計算、切り替えながら動作する。



(a) Caging transportation

(b) Steering a handcart

Fig. 3.1 :Example of the application

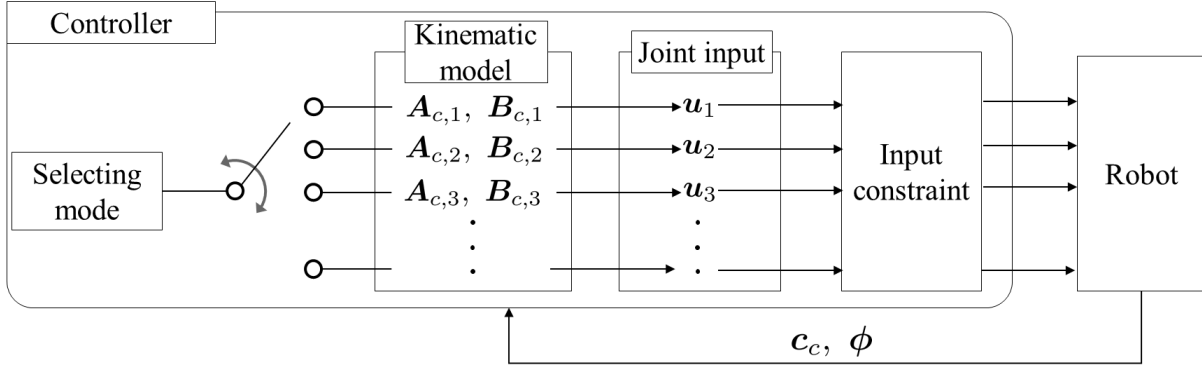


Fig. 3.2 :Diagram of the controller for simultaneous control

3.2 制御設計

制御点を先頭，最後尾車輪の車軸中心とする．ロボット最後尾の2次元位置姿勢を $\tilde{\mathbf{w}}_t = [x_t, y_t, \theta_{y,t}]^\top$ とする．また，モードを σ ，モード σ における接地車輪数を n_σ とすると，2.4節よりロボットの運動学モデルは，

$$\mathbf{A}_{c,\sigma} \dot{\mathbf{c}}_c = \mathbf{B}_{c,\sigma} \dot{\boldsymbol{\phi}} \quad (3.1)$$

$$\mathbf{c}_c = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{w}}_h \\ \tilde{\mathbf{w}}_t \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

となる．ここで， $\mathbf{A}_{c,\sigma} \in \mathbb{R}^{n_\sigma+3,6}$ ， $\mathbf{B}_{c,\sigma} \in \mathbb{R}^{n_\sigma+3,n}$ である．また， \mathbf{c}_c は2制御点同時制御における被制御量である．式(3.1)の運動学モデルを用いて2つの制御点を同時に目標軌道へと追従させる．

制御器全体の概略図を Fig. 3.2 に示す．まず，モード選択によってロボットの姿勢に応じて適した車輪の接地/非接地の組み合わせを選択する．モード選択は一定時間ごとに実施され，最適化問題を解くことで遷移するモードを決定する．次に，モードに応じて切り替わったモデルを用いて，被制御量 \mathbf{c}_c を目標値へと収束させる関節角速度入力を算出する．このとき，モデルの運動学的冗長性を利用してサブタスクの実現を目指す．被制御量に寄与しない入力成分を用いて，評価関数 V_u を増大化させる．サブタスクを考慮して V_u を設計することで，サブタスクの実現を目指す．最後に，計算された入力に対して入力制約を加える．2制御点同時制御特有の特異姿勢近傍では，入力が過大化してしまう．計算された入力が一定の閾値を超えた場合，入力をゼロとすることでロボットの動作を停止させる．これにより，特異姿勢近傍でのロボットの予期せぬ動作を防止する．

3.2.1 関節入力

式 (3.1) のモデルから，被制御量を目標値へと収束させるための関節角速度入力を算出する．式 (3.1) より，次式で入力 $\mathbf{u}_\sigma = \dot{\phi}$ を決定する．

$$\mathbf{u}_\sigma = \mathbf{u}_c + \mathbf{u}_v \quad (3.3)$$

$$\mathbf{u}_c = \mathbf{B}_{c,\sigma}^\dagger \mathbf{A}_{c,\sigma} \{ \dot{\mathbf{c}}_{c,d} + \mathbf{K}_p (\mathbf{c}_{c,d} - \mathbf{c}_c) \} \quad (3.4)$$

$$\mathbf{u}_v = k_v (\mathbf{I}_n - \mathbf{B}_{c,\sigma}^\dagger \mathbf{B}_{c,\sigma}) \boldsymbol{\eta} \quad (3.5)$$

$$\boldsymbol{\eta} = \left[\frac{\partial V_u}{\partial \phi_1} \quad \dots \quad \frac{\partial V_u}{\partial \phi_n} \right]^\top \quad (3.6)$$

ここで， $\mathbf{B}_{c,\sigma}^\dagger$ は $\mathbf{B}_{c,\sigma}$ の擬似逆行列， $\mathbf{I}_n \in \mathbb{R}^{n,n}$ は単位行列， $\mathbf{c}_{c,d}$ は被制御量の目標値， $\mathbf{K}_p \in \mathbb{R}^{6,6}$ は対角成分に正の成分を持つ制御ゲイン， k_v は冗長性に関するゲイン， V_u は入力の冗長成分を利用して増大化させる評価関数である．式 (3.3) の右辺第 1 項が被制御量の収束に関する成分，第 2 項が冗長性に起因する成分である． $\mathbf{B}_{c,\sigma}$ が行フルランクのとき，式 (3.3) をモデルに代入すると，

$$\mathbf{A}_{c,\sigma} \{ \dot{\mathbf{c}}_{c,d} - \dot{\mathbf{c}}_c + \mathbf{K}_p (\mathbf{c}_{c,d} - \mathbf{c}_c) \} = 0 \quad (3.7)$$

となる．また， $\mathbf{A}_{c,\sigma}$ が列フルランクのとき閉ループ系は，

$$\dot{\mathbf{c}}_{c,d} - \dot{\mathbf{c}}_c + \mathbf{K}_p (\mathbf{c}_{c,d} - \mathbf{c}_c) = 0 \quad (3.8)$$

となり， $t \rightarrow \infty$ で被制御量は目標値に収束する．

また，式 (3.3) で入力を決定したとき，評価関数 V_u の微分は，

$$\dot{V}_u = \frac{\partial V_u}{\partial \mathbf{c}_c} \dot{\mathbf{c}}_c + \frac{\partial V_u}{\partial \phi} \dot{\phi} \quad (3.9)$$

$$= \frac{\partial V_u}{\partial \mathbf{c}_c} \dot{\mathbf{c}}_c + \boldsymbol{\eta}^\top \mathbf{u}_c + k_v \boldsymbol{\eta}^\top (\mathbf{I}_n - \mathbf{B}_{c,\sigma}^\dagger \mathbf{B}_{c,\sigma}) \boldsymbol{\eta} \quad (3.10)$$

となる．式 (3.10) の右辺第 1, 2 項は被制御量の動作に起因する成分，第 3 項が冗長性に起因する成分である．第 3 項において， $\boldsymbol{\eta}^\top (\mathbf{I} - \mathbf{B}_{c,\sigma}^\dagger \mathbf{B}_{c,\sigma}) \boldsymbol{\eta} \geq 0$ であるから， $k_v > 0$ とすることで第 3 項は非負となる [66]．よって，式 (3.3) で入力を決定することで V_u の増大化に寄与できる． V_u をサブタスクに応じて適切に設計することで，サブタスクの実現が期待できる． V_u の詳細は後述する．

3.2.2 特異姿勢

式 (3.3) で制御入力を計算するとき， $\mathbf{A}_{c,\sigma}$ および $\mathbf{B}_{c,\sigma}$ がフルランクであることを仮定している．これらがフルランクでないとき，ロボットの被制御量への追従は保証されない．

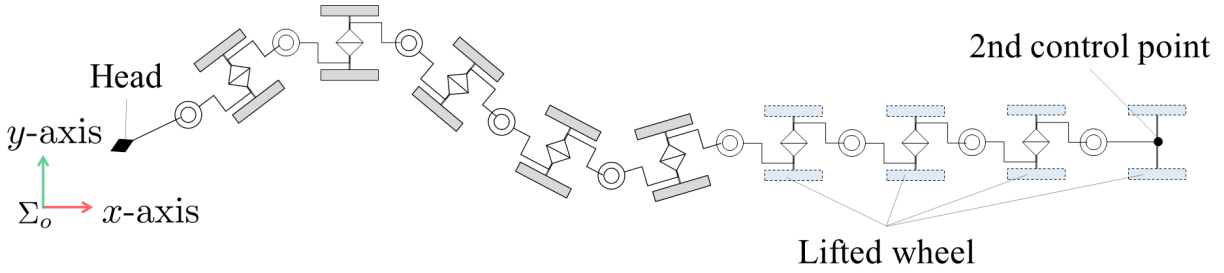


Fig. 3.3 :Example of singular configuration II

これらの姿勢について， $\mathbf{A}_{c,\sigma}$ が列フルランクではない姿勢を特異姿勢 I， $\mathbf{B}_{c,\sigma}$ が行フルランクではない姿勢を特異姿勢 II とする．ここで， $\mathbf{A}_{c,\sigma}$ の成分は，

$$\mathbf{A}_{c,\sigma} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_\sigma & \mathbf{O}_{n_\sigma,3} \\ \mathbf{J}_1 & -\mathbf{I}_3 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

である． $\mathbf{A}_{c,\sigma}$ の成分より， \mathbf{A}_σ が列フルランクであれば， $\mathbf{A}_{c,\sigma}$ も列フルランクである．よって，特異姿勢 I の発生条件は， \mathbf{A}_σ が列フルランク性を損なうことである．これは，先頭のみを制御するときの特異姿勢と同等の条件である．特異姿勢 I は従来研究で解析されており，2.3.4 節で示した通りロボットの接地車輪がすべて平行な体形や接地車輪の車軸と通る直線が同一の点を通る体形である．このような姿勢では，一定の方向に速度拘束が生じずにロボットの運動が一意に決定できない．

一方で，特異姿勢 II は 2 制御点同時制御に特有の特異姿勢である．先頭のみを制御する場合， \mathbf{B} は対角成分に定数を持つ三角行列であり， \mathbf{B} の行を抜き出した \mathbf{B}_σ は常に行フルランクである．しかしながら，2 制御点同時制御では $\mathbf{B}_{c,\sigma}$ はそのフルランク性は保証されていない． $\mathbf{B}_{c,\sigma}$ のフルランク性が損なわれる特異姿勢 II 近傍では，式 (3.3) の入力が増大化する．この増大化した入力はロボットの意図しない動作を発生させる．特異姿勢 II の具体的な姿勢については，詳細な解析ができていない．Fig.3.3 に特異姿勢 II の一例を示す．Fig.3.3 のような姿勢では，ロボット先頭を停止した状態で第 2 制御点を x 軸性方向に動作させることができない．これは，接地車輪の速度拘束が第 2 制御点の動作を阻害するためである．しかしながら，接地している車輪を切り替えることで動作が可能となる．このように，特異姿勢 II は接地車輪の組み合わせに大きく依存しているがわかっている．特異姿勢に関する詳細な解析は今後の課題である．

3.2.3 冗長入力

式 (3.3) の右辺第 2 項がモデルの運動学冗長性に起因する入力である．式 (3.3) により，評価関数 V_u の増大化に貢献できる．2 制御点同時制御のサブタスクを考慮して V_u を設計することで，サブタスクの実現を目指す．2 制御点同時制御におけるサブタスクは，(a) 関

節可動限界回避, (b) 特異姿勢 I の回避, (c) 特異姿勢 II の回避, の3点とする. サブタスク (a) は関節角度が大きくなり過ぎないように関節の動作を抑制することで達成が期待できる. サブタスク (b) の特異姿勢 I は, $\mathbf{A}_{c,\sigma}$ の列フルランク性に依存し, フルランクでない場合に特異姿勢 I となる. $\mathbf{A}_{c,\sigma}$ の特異値にゼロが存在するとき, $\mathbf{A}_{c,\sigma}$ はランク落ちし, 特異姿勢 I となる. よって, $\mathbf{A}_{c,\sigma}$ の特異値を増大化させることで, サブタスク (b) の達成が期待できる. サブタスク (c) の特異姿勢 II は, $\mathbf{B}_{c,\sigma}$ の行フルランク性に依存し, フルランクでない場合に特異姿勢 II となる. 特異姿勢 I と同様, $\mathbf{B}_{c,\sigma}$ の特異値にゼロが存在するとき, 特異姿勢 II となる. よって, $\mathbf{B}_{c,\sigma}$ の特異値を増大化させることでサブタスク (c) の達成が期待できる.

それぞれのサブタスクに関する評価関数 $V_{u,1}$ – $V_{u,3}$ の重み付け和として, 冗長入力に関する評価関数 V_u を次のように設計する.

$$V_u = k_{u,1}V_{u,1} + k_{u,2}V_{u,2} + k_{u,3}V_{u,3} \quad (3.12)$$

$$V_{u,1} = -\sum_{k=1}^n f(\phi_{th}, |\phi_k|) \quad (3.13)$$

$$V_{u,2} = \det(\mathbf{A}_{c,\sigma}^\top \mathbf{A}_{c,\sigma}) \quad (3.14)$$

$$V_{u,3} = \det(\mathbf{B}_{c,\sigma} \mathbf{B}_{c,\sigma}^\top) \quad (3.15)$$

$$f(x, y) = \begin{cases} (y - x)^2, & (\text{if } x < y) \\ 0, & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (3.16)$$

ここで, $k_{u,1}$, $k_{u,2}$, $k_{u,3}$ はそれぞれの評価関数の重み, ϕ_{th} は関節角度に関する正の定数の閾値, $\det(\mathbf{X})$ は正方行列 \mathbf{X} の行列式である. $V_{u,1}$ の増大化により, 関節角度は ϕ_{th} より小さくなるように動作する. $\phi_i \leq \phi_{th}$ では, $V_{u,1}$ は作用しない. ϕ_{th} を関節可動限界角度よりも小さくすることで, サブタスク (a) の達成が期待できる. $V_{u,2}$ の増大化により, $\mathbf{A}_{c,\sigma}$ の特異値が増大化し, サブタスク (b) の達成が期待できる. $V_{u,3}$ の増大化により, $\mathbf{B}_{c,\sigma}$ の特異値が増大化し, サブタスク (c) の達成が期待できる. 以上より, V_u の増大化によってサブタスク (a)–(c) の実現が期待できる.

3.2.4 モード選択

一定時間ごとに車輪の接地/非接地の組み合わせを切り替えることで, 状況に応じて拘束条件を切り替える. ここで, 状況に適したモードを選択するため文献 [26] と同様に次式の最適化問題を導入する.

$$\max_{\sigma_k} J, \quad (3.17)$$

$$J = \varphi(\hat{\mathbf{q}}(t_p, \sigma_k)) + \int_{t_k}^{t_p} \Gamma(\hat{\mathbf{q}}(\tau, \sigma_k), \mathbf{u}(\tau, \sigma_k)) d\tau, \quad (3.18)$$

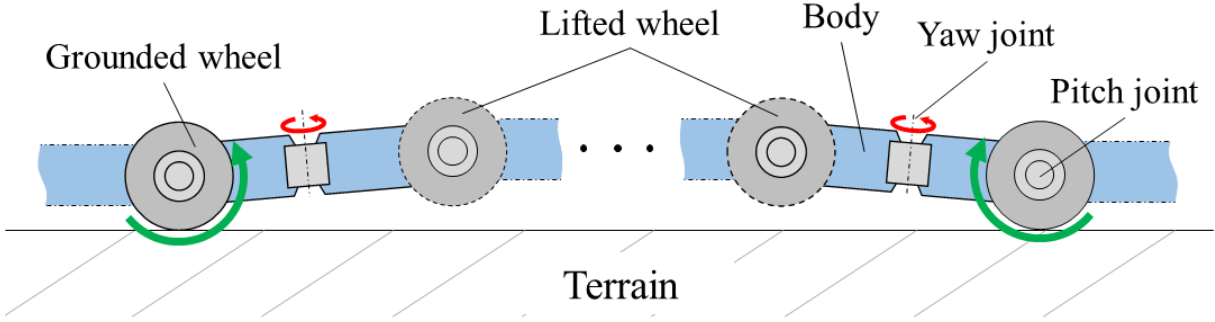


Fig. 3.4 :Lifting adjacent wheels

φ は終端条件に関する評価関数, Γ は予測区間における評価関数, $\hat{\mathbf{q}} \in \mathbb{R}^{n+3,1}$ は一般化座標 $\mathbf{q} = [\tilde{\mathbf{w}}_h^\top, \boldsymbol{\phi}^\top]^\top$ の推定値, $t_p \geq t_k$ は予測ホライズンである. $t_k \leq t \leq t_p$ のロボットの動作を推定することで状況に適したモードを選択する. モード選択の周期は t_σ とし, 従来研究 [20, 25, 26] を参考に決定する.

ここで, 式 (3.17) の最適化問題をすべてのモード候補について計算すると, モード候補の多さから計算コストが増大化してしまう. そこで, 2制御点同時制御では2段階で選択候補のモードを削減する. まず, 第1段階として実機では実現不可能なモード, モデル的に不適なモードを選択候補から除外する. 第2制御点の車輪が接地していると, 第2制御点の動作を阻害する. 第2制御点の車輪が接地しているとき, 車輪の速度拘束により第2制御点は車軸方向に動作できない. よって, 第2制御点の車輪は非接地でなくてはならない. 次に, モデル行列のサイズからモード候補を限定する. 前述のとおり, ロボットの動作には各モデル行列のフルランク性が必要である. $\mathbf{A}_{c,\sigma}$ が列フルランクであるためには, $\mathbf{A}_{c,\sigma}$ が正方か縦長の行列でなければならない. よって, そのサイズから $6 \leq n_\sigma + 3$ が必要条件である. また, $\mathbf{B}_{c,\sigma}$ が行フルランクであるためには, $\mathbf{B}_{c,\sigma}$ が正方か横長の行列でなければならない. よって, そのサイズから $n_\sigma + 3 \leq n$ が必要条件である. 最後に, 実機での制限からモード候補を限定する. 実機には関節トルクの制限があるため, Fig. 3.4 のように隣り合う車輪を多数持ち上げることは困難である. 以上より, 次の制約条件を導入する.

- (i) 第2制御点の車輪は非接地
- (ii) $3 \leq n_\sigma \leq n - 3$
- (iii) 隣り合う車輪は連続して n_c までしか持ち上げない

これらは最低限満たす必要のある条件であり, 満たさないモードではロボットが動作不能となるか, 関節トルクが不足し車輪が持ち上がらない. また, これらの条件を満たすモードは非常に多く, 計算コストの面で実環境での適用は難しい. そこで, 第2段階として制約条件 (ii) を次のように拡張する.

$$(ii') \quad n_g \leq n_\sigma \leq n - n_l$$

ここで、 $n_l \geq 3$, $n_g \geq 3$ は正の整数であり、接地車輪数の範囲を制限する設計変数である。制約条件 (ii') によりモード候補数を削減する。 $n = 9$, $n_l = 4$, $n_g = 4$, $n_c = 2$ のとき、モード選択候補の総数は 66 となる。また、予測ホライズンを $t_p = t_k$ とすることで、予測区間をモード選択の瞬間のみに限定することで計算コストを実環境で適用可能な範囲まで削減する。

2 制御点同時制御では、特異姿勢 I, II を考慮して遷移先のモードを決定する。そこで、 $\varphi = \Gamma = V_m$ とし、モード選択に関する評価関数 V_m を次式で与える。

$$V_m = k_{m,1} \min(\mathbf{s}_{\sigma,A}) + k_{m,2} \min(\mathbf{s}_{\sigma,B}) \quad (3.19)$$

ここで、 $k_{m,1}$, $k_{m,2}$ は評価関数に関する重み、 $\min(\mathbf{x})$ はベクトル \mathbf{x} の最小値を返す関数、 $\mathbf{s}_{\sigma,A} \in \mathbb{R}^{6,1}$, $\mathbf{s}_{\sigma,B} \in \mathbb{R}^{n_\sigma+3,1}$ はそれぞれ $\mathbf{A}_{c,\sigma}$, $\mathbf{B}_{c,\sigma}$ の特異値を並べたベクトルである。 V_m の大きなモードは、モデル行列の特異値の最小値が大きいモードであり、特異姿勢から遠いモードである。よって、 V_m の大きなモードを選択することで、ロボットは特異姿勢から遠いモードが選択できる。

3.2.5 入力制約

ロボットの体形が特異姿勢 II 近傍のときは、 $\mathbf{B}_{c,\sigma}$ の特異値が非常に小さくなり、式 (3.3) で決定される入力が増大化してしまう。このとき、ロボットの動作は意図しないものとなり、制御に支障をきたす。よって、これを抑制するため次式の入力制約を導入する。

$$\mathbf{u}_\sigma = \begin{cases} \mathbf{0}, & (\text{if } \|\mathbf{u}_\sigma\| > u_{\text{lim}}) \\ \mathbf{u}_\sigma. & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (3.20)$$

ここで、 u_{lim} は入力ノルムの閾値であり定数である。入力のノルムが u_{lim} を超えると、関節角速度入力がゼロとなりロボットは動作を停止する。式 (3.3) で計算される入力は、ロボットの体形と接地車輪に依存しているため、モードを切り替えるまでは常に入力制約によってロボットは動作を停止し続ける。そして、一定時間ごとに実行されるモード切替で特異姿勢から遠いモードが選択されることで、ロボットは動作を再開する。これにより、ロボットの特異姿勢近傍における意図せぬ動作を抑制しながら、継続的な動作が可能となる。

ロボットの入力 \mathbf{u}_σ は被制御量の目標速度や現在値と目標値との誤差、制御ゲインなど、多数の要因によって変化する。そのため、入力ノルムの閾値 u_{lim} を一意に決定することはできない。 u_{lim} が小さすぎると、ロボットが特異姿勢 II 近傍でない場合にも、 \mathbf{u}_σ が u_{lim} を超えてしまいロボットが動作を停止してしまう。 u_{lim} が大きすぎると、ロボットが特異姿勢 II 近傍の場合でも入力制約が適用されず、ロボットが意図しない動作をしてしまう。よって、どちらの問題も発生しない中間の値を試行錯誤的に決定する。

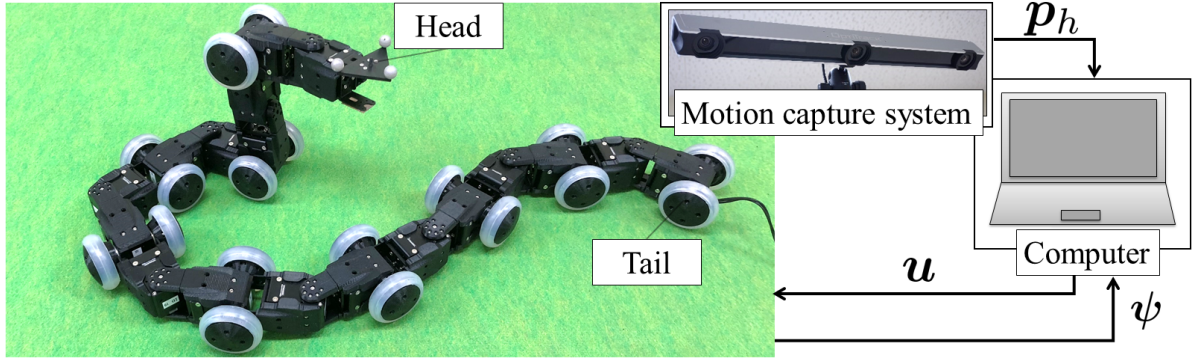


Fig. 3.5 :Experimental system

3.3 実機実験

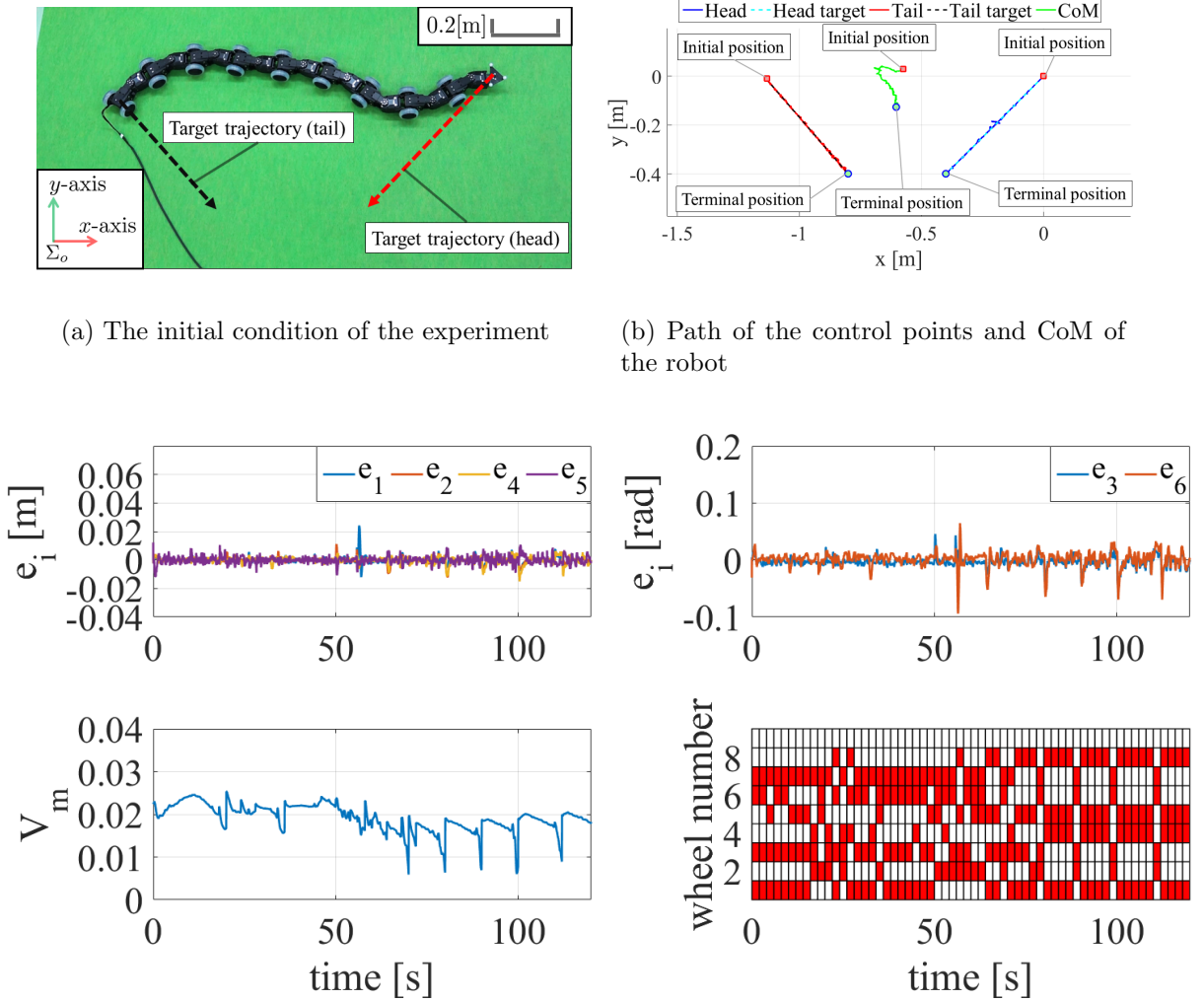
提案制御則の有効性を検証するため、実機を用いた軌道追従実験を実施した。Fig. 3.5に実験環境を示す。実機の関節にはROBOTIS社のXH430-V350-Rサーボモータを使用した。このモータはシリアル通信によって制御PCから関節角度の現在値の取得、関節角度、角速度の制御が可能である。ロボット先頭には計測用マークが取り付けられており、モーションキャプチャによって先頭の位置姿勢を取得できる。モーションキャプチャシステムは、OptiTrack社のV120:Trioを使用している。公証の計測誤差は1mmであり、120Hz周期でデータの取得が可能である。ロボットの構造に関する定数は、車輪数 $n = 9$ 、リンク長 $l = 0.0685[\text{m}]$ である。制御周期を $\delta t = 0.05[\text{s}]$ 、動作終了時間を $t_{\text{end}} = 120[\text{s}]$ とした。任意定数は、 $\phi_{\text{th}} = \frac{\pi}{4}$ 、 $t_{\sigma} = 2$ 、 $n_l = 4$ 、 $n_g = 4$ 、 $n_c = 2$ 、 $u_{\text{lim}} = 4$ とした。このときの選択対象のモード数は66である。制御ゲインは、 $\mathbf{K}_p = 4\mathbf{I}_4$ 、 $k_v = 2$ 、 $k_{u,1} = 0.6$ 、 $k_{u,2} = 0.8$ 、 $k_{u,3} = 0$ 、 $k_{m,1} = 0$ 、 $k_{m,2} = 1$ 、また、初期関節角度 $\phi(0) = \left[\frac{\pi}{6}, -\frac{\pi}{6}, -\frac{\pi}{6}, 0, \frac{\pi}{6}, 0, 0, \frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{6}\right]^T$ 、先頭の初期位置、姿勢は $\tilde{\mathbf{p}}_h(0) = [0, 0, \pi]^T$ とした。これらの初期条件は、特殊な条件を除いて任意に選択可能である。例えば、すべてのモードでロボットが特異姿勢、ロボットの胴体が干渉している、等の初期条件は考えないものとする。

被制御量の目標 $\mathbf{c}_{c,d}(t)$ は、被制御量の初期値を $\mathbf{c}_c(0)$ として次式で与えた。

$$\mathbf{c}_{c,d}(t) = \mathbf{c}_c(0) + \frac{\mathbf{c}_{c,e} - \mathbf{c}_c(0)}{t_{\text{end}}}t \quad (3.21)$$

ここで、 $\mathbf{c}_{c,e} \in \mathbb{R}^{6,1}$ は被制御量の終端目標値をあらわす任意定数ベクトルである。また、第2制御点の初期位置、姿勢は先頭の位置姿勢ならびに関節角度から計算される。本実験では、 $\mathbf{c}_{c,e} = \left[-0.4, -0.4, \frac{\pi}{2}, -0.8, -0.4, -\frac{\pi}{2}\right]^T$ とした。

実験結果をFig. 3.6–3.7に示す。Fig. 3.6(a)がロボットの初期位置姿勢、Fig. 3.6(b)が各制御点の軌道、Fig. 3.6(c)が被制御量およびモード σ 、モード選択に関する評価関数 V_m の時間応答、Fig. 3.7が各ヨー関節角度の時間応答である。ここで、Fig. 3.6(b)の点線が



(c) Time response of the controlled variables, the cost function, the grounded/lifted state of each wheel. The red squares represent grounded wheel.

Fig. 3.6 :Experimental results of trajectory tracking

各被制御量の目標，実線が計測値である．Fig. 3.6(c) の e_i ($i = 1, 2, \dots, 6$) は，第 i 被制御量の目標値と現在値の差である．Fig. 3.7 おいて，グラフの点線は関節の可動限界角度を示している．

Fig. 3.6(c) より，すべての被制御量において目標値との誤差は小さい．よって，各制御点はそれぞれの目標軌道へと追従している．また，動作に伴いモードが変化しており， V_m の値が低いモードに留まるのを回避している．よって，サブタスク (b) 特異姿勢 I の回避，サブタスク (c) 特異姿勢 II の回避が満足されている．Fig. 3.7 より各関節角度は可動限界角度を超えておらず，サブタスク (a) 関節の可動限界回避は満足されている．よって，提

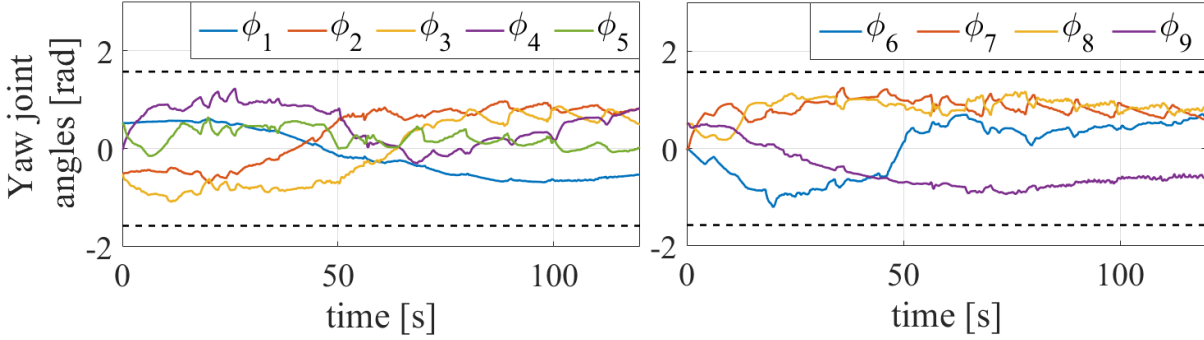


Fig. 3.7 :Time response of the yaw joint angles

案制御則を用いることで2つの制御点が同時に目標軌道へと追従している．さらに，冗長入力およびモード切り替えの工夫によってサブタスク (a)–(c) が実現されている．

ここで，制約条件 (ii) より，実験条件において接地車輪数は $4 \leq n_\sigma \leq 5$ であるが，実際に選択されているモードはすべて $n_\sigma = 4$ のモードである．このことから，モード選択ではより接地車輪数の少ないモード，すなわち冗長自由度の高いモードが選択されやすい傾向にあると考えられる．また，選択可能なモード数 66 のうち実際に選択されたモードは 14 と少ない．このことから，選択対象となるモードの選定には改善の余地があると考えられる．

3.4 応用動作

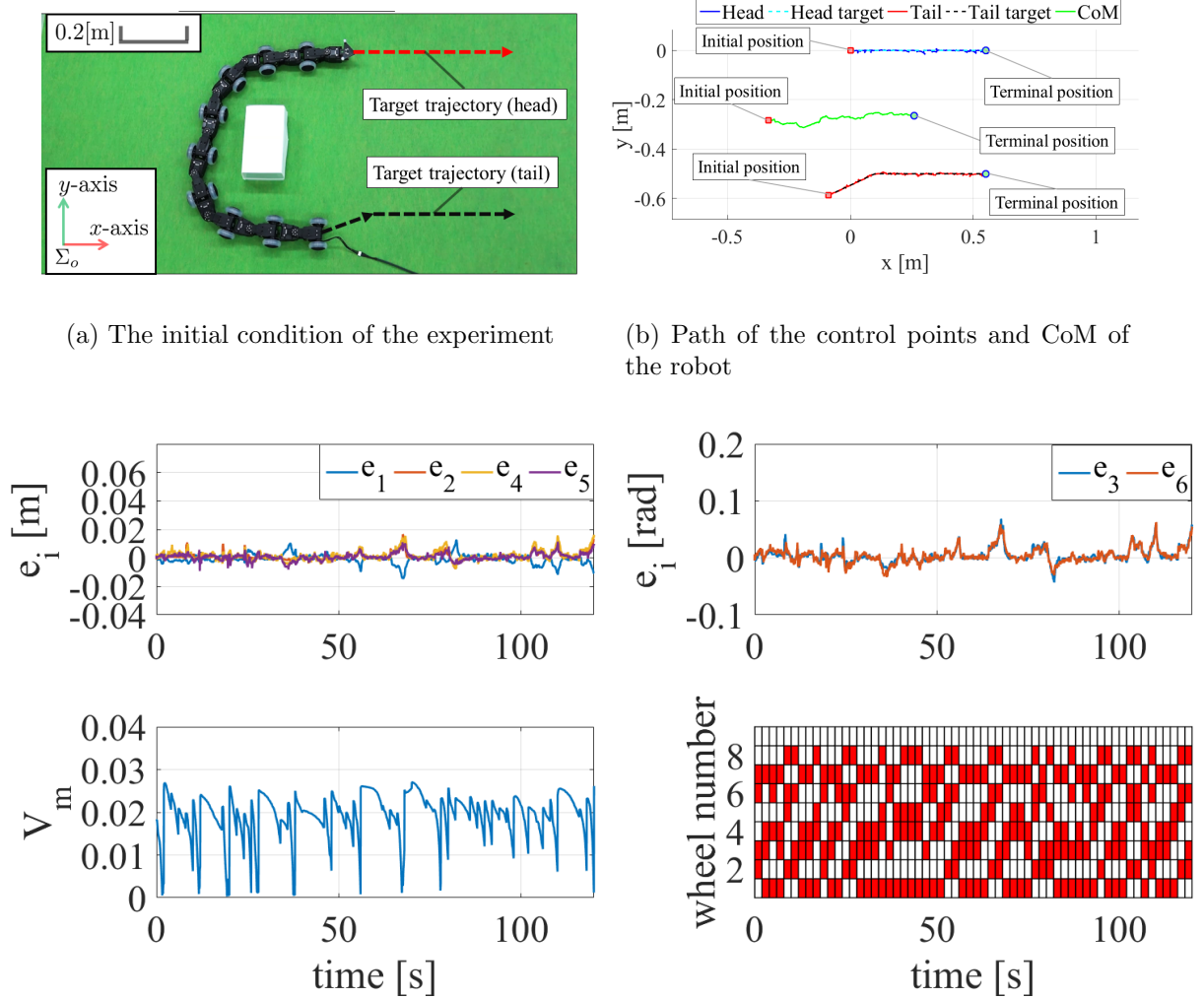
提案制御則を用いた応用動作として，ケーシング運搬，台車操舵，そして扉開け動作の検証を行った．ケーシング運搬，台車操舵は軌道追従実験と同様の実機を用いた実験，扉開け動作は物理シミュレータを用いた検証を行った．

3.4.1 ケーシング運搬

提案制御則の応用事例として，物体のケーシングと運搬動作の実験を行った．ケーシング [67] のように対象物をロボット全体で包み込み，この状態を維持しながら推進することで対象物を運搬する．各種任意定数，制御ゲイン，先頭の初期位置姿勢は軌道追従実験と同様とする．初期関節角度 $\phi(0) = \left[0, \frac{\pi}{9}, \frac{\pi}{9}, \frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{9}, \frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{6}, 0\right]^\top$ とした．また，被制御量の目標値はケーシング動作および運搬動作の2段階に分けて与えるものとし，次式で与える．

$$\mathbf{c}_{c,d}(t) = \mathbf{c}_{c,s} + \frac{\mathbf{c}_{c,e} - \mathbf{c}_{c,s}}{t_s} t \quad (3.22)$$

$$\begin{cases} t_s = t_{s1}, \mathbf{c}_{c,e} = \mathbf{c}_{c,e1}, \mathbf{c}_{c,s} = \mathbf{c}_c(0), & (0 \leq t < t_{s1}) \\ t_s = t_{\text{end}}, \mathbf{c}_{c,e} = \mathbf{c}_{c,e2}, \mathbf{c}_{c,s} = \mathbf{c}_{c,e1}, & (t_{s1} \leq t \leq t_{\text{end}}) \end{cases} \quad (3.23)$$



(c) Time response of the controlled variables, the cost function, the grounded/lifted state of each wheel. The red squares represent grounded wheel.

Fig. 3.8 :Experimental result of caging transport

本実験では, $t_{s1} = 30[s]$, $\mathbf{c}_{c,e1} = [0.1, 0, \pi, 0.1, -0.5, 0]^T$, $\mathbf{c}_{c,e2} = [0.55, 0, \pi, 0.55, -0.5, 0]^T$ とした.

実験の結果を Fig. 3.8 に示す. Fig. 3.8 の各グラフがあらわすのは, Fig. 3.6 と同様である. また, Fig. 3.9 に実験の様子を示す. Fig. 3.9 中央の白い箱が運搬対象である. Fig. 3.8(c) より, 軌道追従実験と同様, 被制御量が目標値によく追従していることがわかる. また, モード選択によって状況に応じてモードが変化している. Fig. 3.9 より, 運搬対象がロボットの推進に伴って運搬されていることが確認できる. よって, 提案制御則のケージング運搬への応用の有用性が示された.

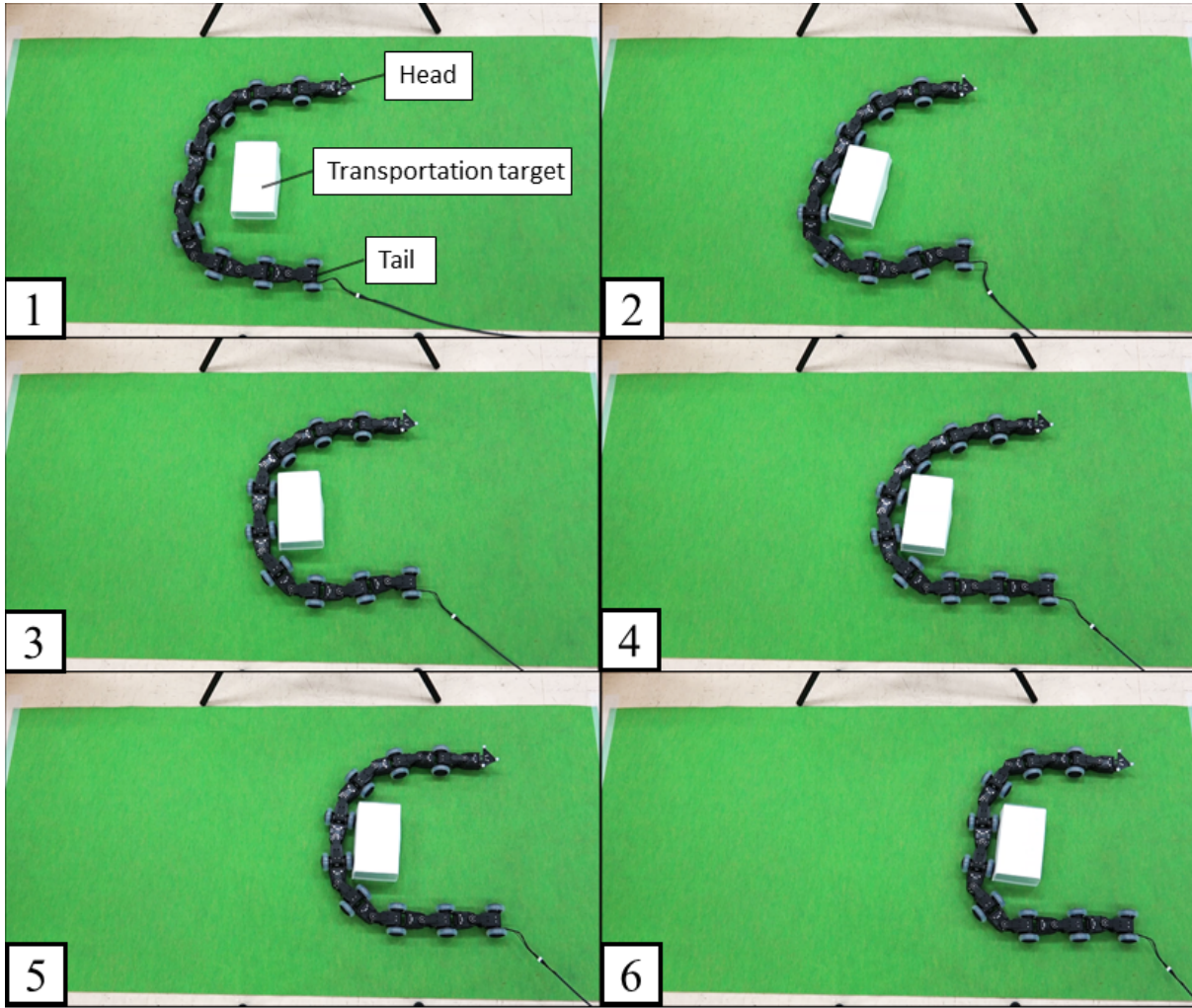


Fig. 3.9 :Motion on the caging transport experiment

3.4.2 台車操舵

提案制御則の応用事例として、台車操舵実験を行った。台車操舵実験では、2.5.2節で示した双腕制御のための運動学モデルを用いて制御を行う。双腕制御の運動学モデルを以下に再掲する。

$$\mathbf{A}_{d,\sigma} \dot{\mathbf{c}}_d = \mathbf{B}_{d,\sigma} \dot{\boldsymbol{\psi}}_d \quad (3.24)$$

$$\mathbf{c}_d = \begin{bmatrix} \mathbf{w}_h \\ \mathbf{w}_t \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\psi}_d = \begin{bmatrix} \psi_h \\ \phi'_b \\ \psi_t \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

先頭と最後尾を制御点とし、それぞれの3次元位置姿勢を制御する。そして、それぞれの制御点で台車の持ち手を押すことで台車を操舵する。2つの制御点間の相対位置姿勢が崩

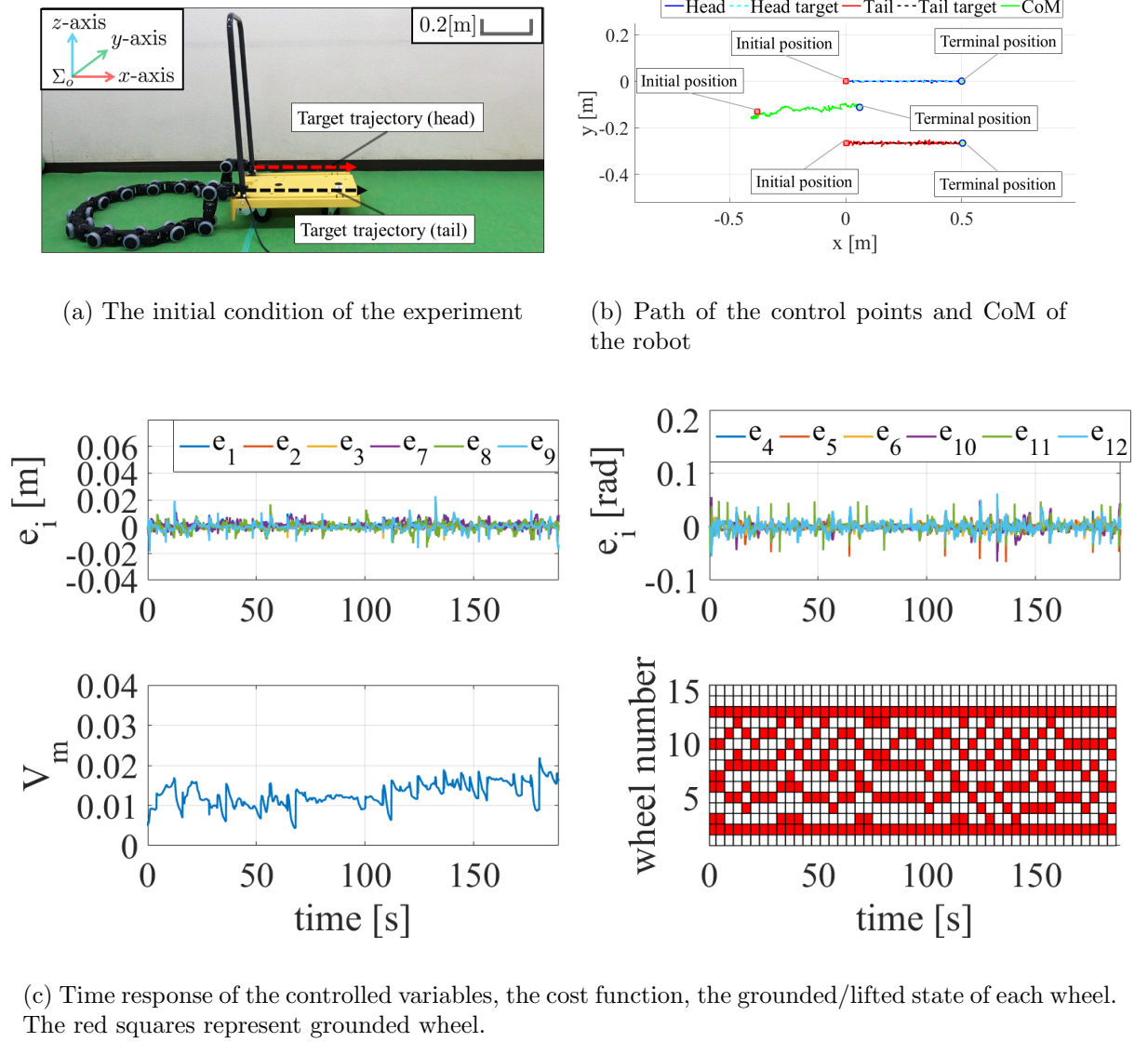


Fig. 3.10 :Experimental results of handcart steering

れると、制御点が持ち手から離れ操舵不能となる．2 制御点同時制御では制御点間の相対関係が維持できるため、台車操舵への応用は有用である．

3次元の動作を行うには、2次元の動作に比べて多くの自由度が必要となる．そのことから、2次元動作に用いたロボットの長さを伸ばし車輪数 $n = 15$ として実験を行った．被制御量の目標 $\mathbf{c}_{d,d}(t)$ は、被制御量の初期値を $\mathbf{c}_d(0)$ として次式で与えた．

$$\mathbf{c}_{d,d}(t) = \mathbf{c}_d(0) + \frac{\mathbf{c}_{d,e} - \mathbf{c}_d(0)}{t_{\text{end}}} t \quad (3.26)$$

ここで、 $\mathbf{c}_{d,e} \in \mathbb{R}^{12,1}$ は被制御量の終端目標値をあらわす任意定数ベクトルである．本実

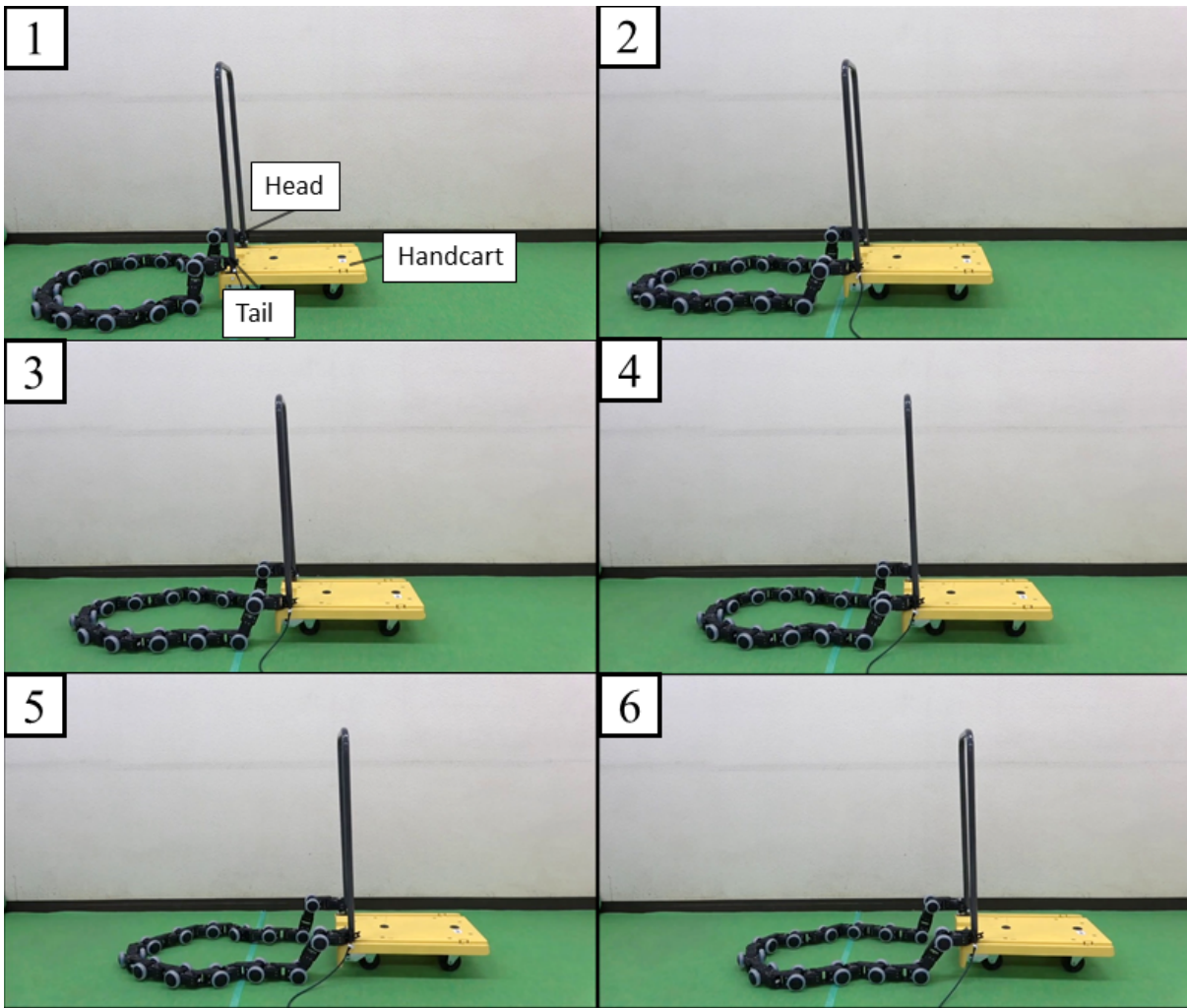


Fig. 3.11 :Motion on the steering handcart experiment

験では、 $\mathbf{c}_{d,e} = [0.5, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0.5, 0, 0, 0, 0, 0]^T$ とし、 x 軸正方向に直進する目標軌道を与えた。

実験の結果を Fig. 3.10 に示す。Fig. 3.10 の各グラフがあらわすのは、Fig. 3.6 と同様である。また、Fig. 3.11 に実験の様子を示す。Fig. 3.10(c) より、軌道追従実験と同様、被制御量が目標値によく追従していることがわかる。よって、被制御量が制御点の3次元位置姿勢となった場合においても制御則は有効に作用することが確認できた。また、Fig. 3.11 より、ロボット先頭と最後尾によって台車が操舵されていることが確認できる。よって、提案制御則の台車操舵への応用の有用性が示された。

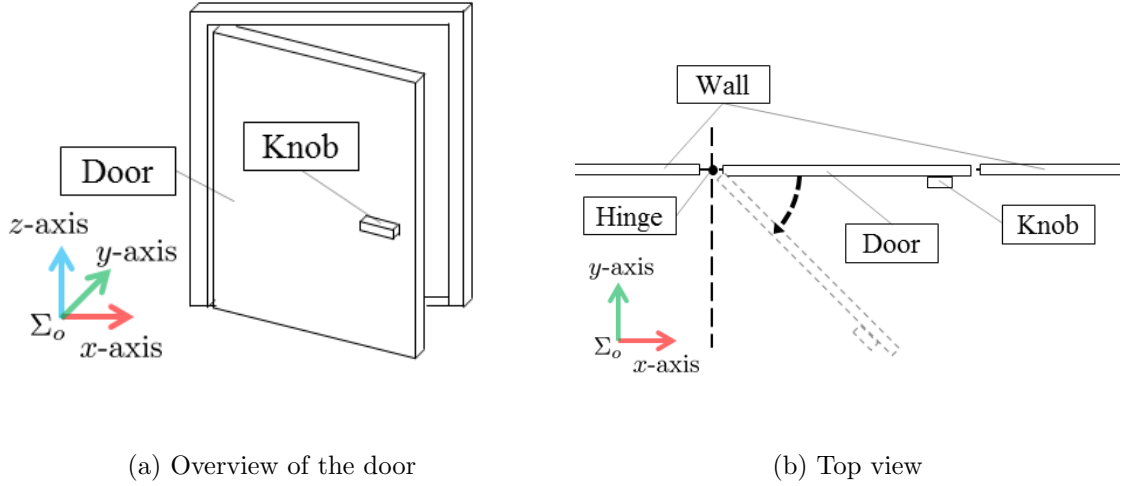


Fig. 3.12 :Pattern diagram of the door

3.4.3 扉開け

提案制御則の応用事例として、扉開け動作を行った。Fig. 3.12 に想定する環境を示す。扉は一般的な開き戸を小さくしたものを想定する。扉の両面のうちロボット側を外側、進行方向側を内側とよぶ。ドアノブは扉の外側に取り付けられているものとする。簡単化のためドアノブを回す必要はないものとし、ドアノブを引くことで扉が開く。また、蝶番部分にはバネが搭載されており、ドアノブを離すと扉は自動で閉まる。制御対象は速度拘束ヘビ型ロボットとし、ロボット先頭には簡易的なフックを取り付ける。先頭のフックを用いて扉の取っ手を引くことで扉をあけることができる。

ヘビ型ロボットでこの扉を開けて通過することを目標動作とする。ヘビ型ロボットは先頭を持ち上げることで先頭の3次元動作が可能である [12]。また、ロボット先頭にグリッパを取り付けることで、グリッパによる軽作業が実現できる [61]。これらの手法を応用することで扉を開くことができる。しかし、先頭のみが制御点であるこれらの手法では Fig. 3.13 のようにドアノブを離すと扉が自動で閉じてしまい扉を通過することができない。このような扉を通過するためには、扉が開いた状態を維持しながら、ロボットが扉を通過するための工夫が必要である。そこで、本研究では2つの制御点を同時に制御する制御則を応用して、バネ付き扉の通過を目指す。Fig. 3.13 のようにロボット先頭で扉が開いた状態で維持し、同時にロボット最後尾から扉を通過する。

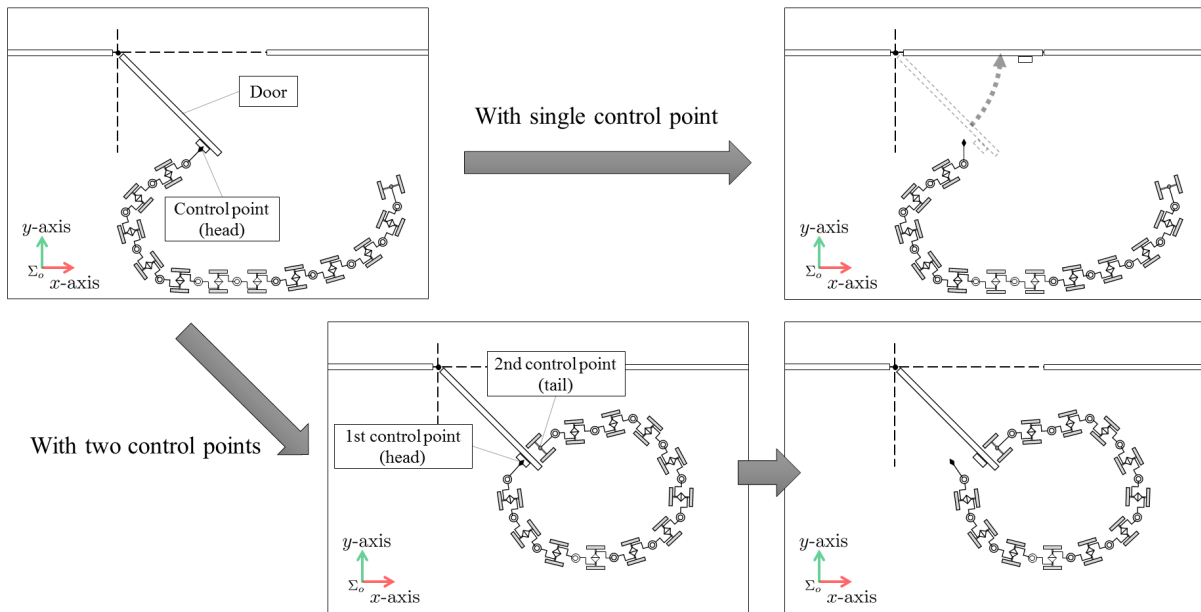


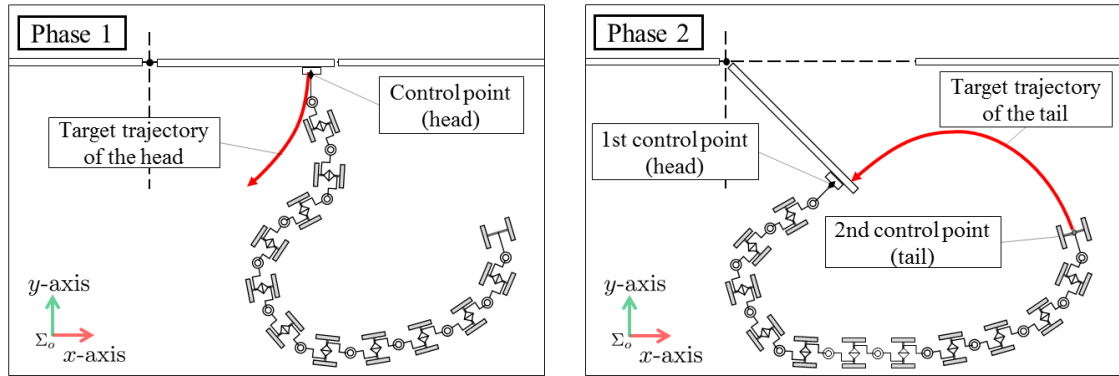
Fig. 3.13 :Overview of the proposed motion

動作設計

Fig. 3.14 に動作全体の概要を示す．全体の動作を 3 つの Phase に分解する．まず，ロボット先頭のフックの位置姿勢を制御することでドアノブを引き扉を開く (Fig. 3.14(a))．その後，ロボット先頭，最後尾の位置姿勢を同時に制御することで扉の内側へと進入する (Fig. 3.14(b))．最後に，ロボット全体で内側から扉を押しのけるように進むことで扉を通過する (Fig. 3.14(c))．以上の動作により，ロボット全体のバネ付き扉の通過実現を目指す．

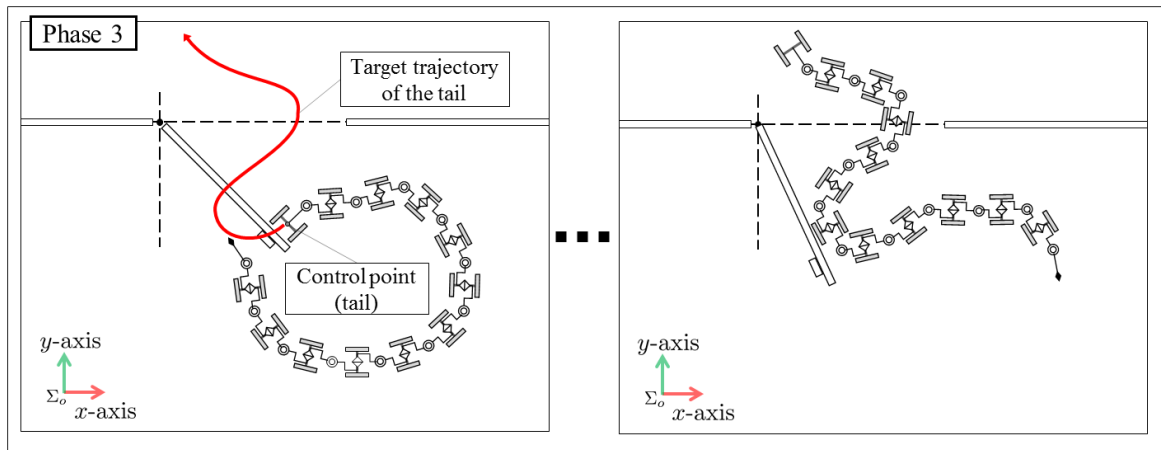
Phase 1 では，ロボット先端のフックでドアノブを引くことで扉を開く．ここでは，ヘビ型ロボットの先頭持ち上げ制御 [12] を用いてロボット先頭の運動を制御する．この制御手法を用いることで，ロボット先頭を任意の 3 次元軌道に追従させることが可能である．まず，フックがドアノブに掛かるようにロボット先頭の位置姿勢を制御する．その後，Fig. 3.14(a) のように扉の回転中心を考慮してフックを引くことで扉を開く．

Phase 2 では，ロボット先頭で扉を開いた状態を維持しながら，ロボット最後尾を扉内側へと進入させる．ここでは，2 制御点同時制御を用いてロボット先頭，最後尾の運動を同時に制御する．ロボット先頭の位置姿勢を動かさないように制御することで扉が開いた状態で維持する．同時に，ロボット最後尾の位置姿勢を Fig. 3.14(b) のように扉を回り込む軌道で制御する．以上の動作によって，ロボット最後尾を扉内側へと進入させる．ロボット最後尾が扉内側へ進入したら，最後尾が動かさないように制御した状態で先頭のフックをドアノブから離す．フックをドアノブから離すと扉は自動で閉まろうとし，扉内側へ進入しているロボットに接触して止まる．このとき，ロボット最後尾と扉との距離が大きいと



(a) Opening the door

(b) Entering behind the door



(c) Passing through the door

Fig. 3.14 :Motion flow

扉が勢いよくロボットに衝突する．そのため、ロボット最後尾はなるべく扉の近くまで接近させる．

Phase 3では、扉を押し開けるようにしてロボット全体で扉を通過する．ここでは、シフト制御 [8] を用いてロボットを推進させる．この手法は、連続曲線にロボットの体形をフィッティングするようにロボットを動作させる手法である．この連続曲線をロボット最後尾側から先頭側に向けて波を伝播するように変化させることで、ロボットは最後尾方向へと推進する．Fig. 3.14(c)のように、ロボット最後尾で扉を押し込みながら蛇行し扉を通過する．ここで、シフト制御開始時の連続曲線は、現在の関節角度から生成する [62]．

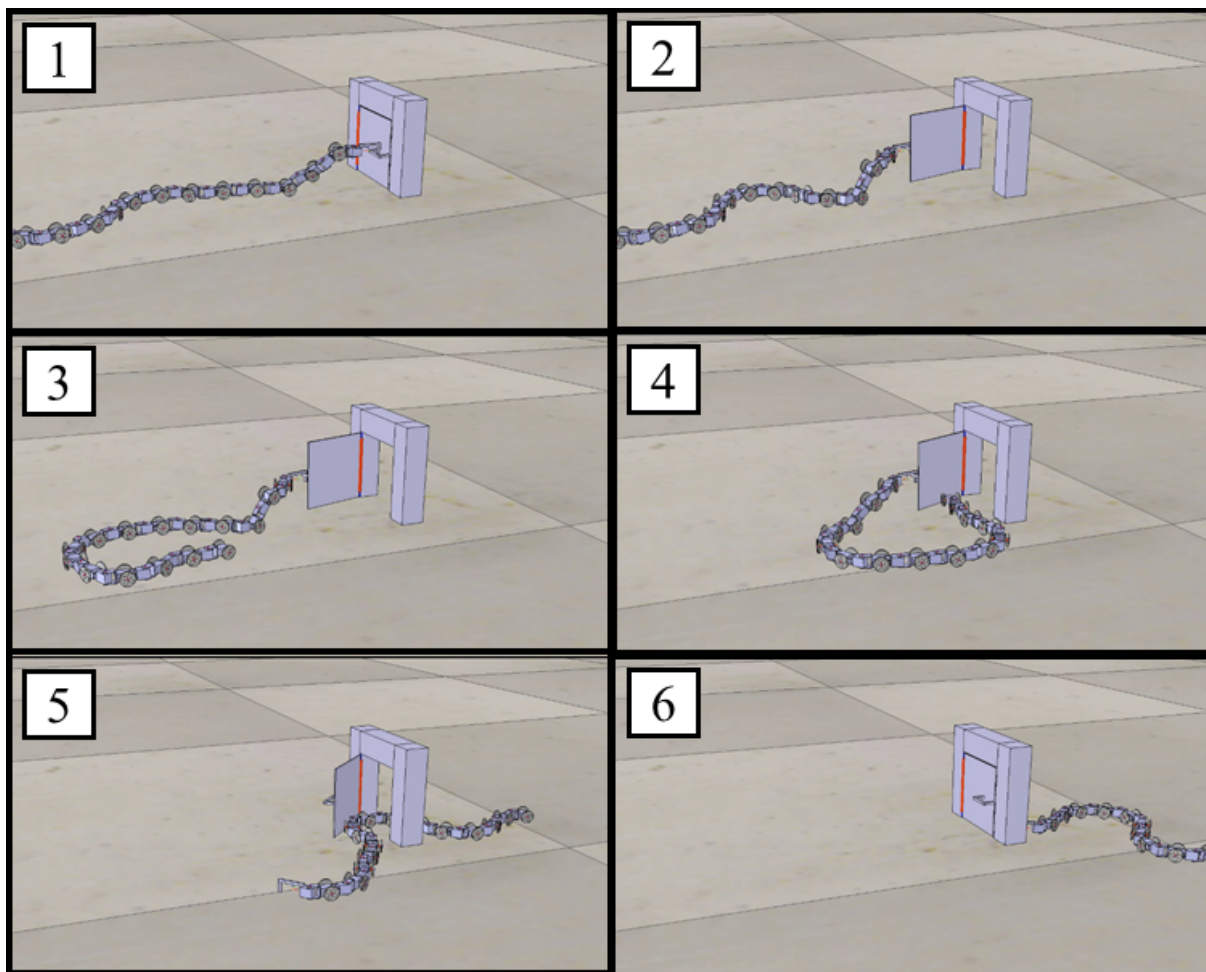


Fig. 3.16 :Simulation results

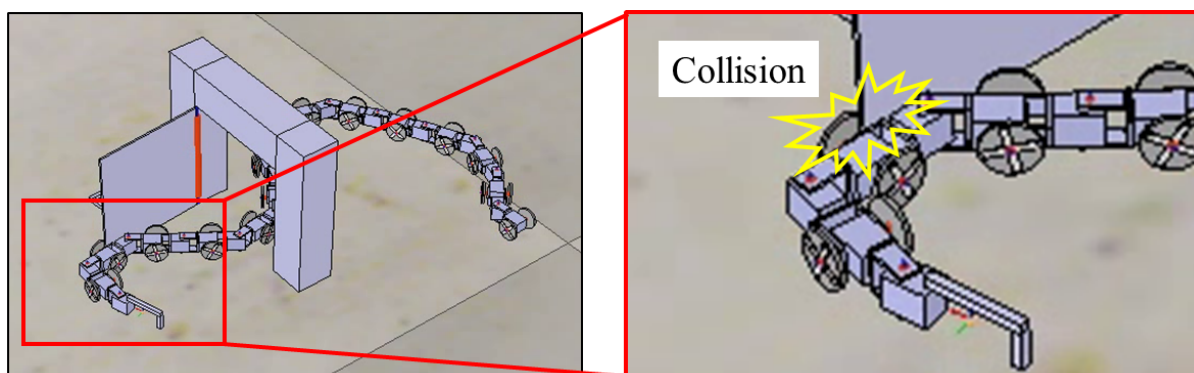


Fig. 3.17 :Failure to pass through

3.5 まとめ

第3章では，ヘビ型ロボットにおいて2つの制御点を同時に制御するための制御則を提案した．2つの制御点を同時に制御するとき，従来の特異姿勢とは異なる特有の特異姿勢が存在し，拘束条件が変化しないモデルではロボットの継続的な推進は困難である．本研究では，車輪の微小持ち上げによる速度拘束の切り替えを用いることでロボットの運動学的冗長性を巧みに利用し，2制御点同時制御に特有の特異姿勢を回避しながら推進を実現する制御則を提案した．提案制御則の有効性は実機実験によって確認した．実機実験では，2つの制御点が同時に目標軌道へと追従していることが確認できた．また，提案制御則を応用することで，ケーシング運搬動作や台車操舵，扉開けが実現可能であることを示した．このことから，提案制御則によって従来研究では達成できなかった複雑なタスクが実現可能であることが確認できた．一方で，モード選択の手法には改善の余地が残っていることも分かった．2制御点同時制御に特有な特異姿勢の解析を進めることで，より効果的かつ効率的にモードが選択できる可能性がある．また，各種の応用動作は簡単な例を示したのみであり，運搬対象や台車，扉との接触による相互作用や，3次元動作に伴う横転の危険性に関する考慮など，応用動作に特有の問題点の議論にまで至っていない．これらは今後の課題であり，検討を進めていきたい．

第4章

2平面間の移動制御

4.1 問題設定

車輪拘束ヘビ型ロボットを用いて、非平行な2つの平面にまたがった移動の実現を目指す。想定環境を Fig. 4.1 のような2つの平面から構成された環境とする。各平面は端面が直線で構成された多角形とし、2つの平面は非平行であるものとする。また、一方の平面は基準座標系の x - y 平面と一致するものとし、この平面を後方平面、もう一方の平面を前方平面とする。また、前方平面は後方平面と直接接しておらず、Fig. 4.1 のように平面の間にはギャップがあるものとする。前方平面上に原点を持ち、 x - y 平面が前方平面と一致する座標系を Σ_f とする。 Σ_f の z 軸は平面上方を正とする。また、 Σ_f の位置姿勢は原点の3次元位置 $\mathbf{p}_f \in \mathbb{R}^{3,1}$ と姿勢 $\boldsymbol{\theta}_f = [\theta_{r,f}, \theta_{p,f}, \theta_{y,f}]^T$ であらわすものとする。このとき、基準座標系から Σ_f への変換をあらわす回転行列を $\mathbf{R}_f = \mathbf{R}_z(\theta_{y,f})\mathbf{R}_y(\theta_{p,f})\mathbf{R}_x(\theta_{r,f})$ とする。

この想定環境において、ロボットが後方平面上で動作している状態から、前方平面上へと移動する動作を想定する。ロボットは後方平面を推進している状態から2平面に跨った状態を経て、前方平面上で推進する状態へと遷移する。このとき、ロボットの推進に伴って車輪が接触している平面を切り替える必要がある。また、ロボットは車輪による摩擦の異方性を利用した運動学モデルに基づいて動作する。よって、車輪による速度拘束を発生させるために各平面に対して適切に車輪が接触している必要がある。Fig. 4.2 に2平面に

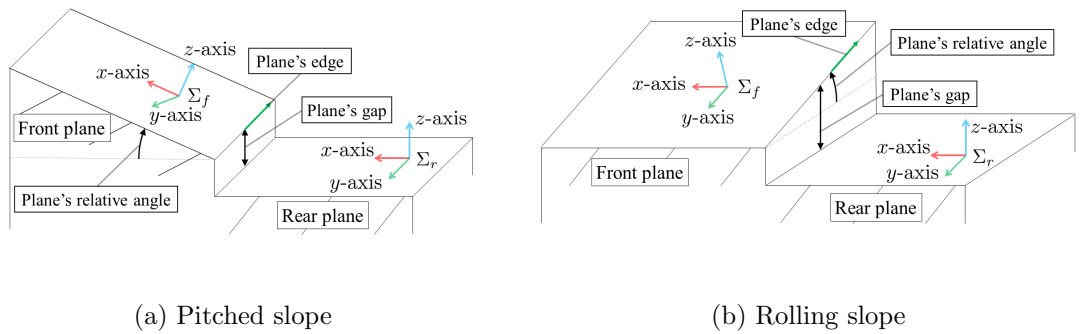


Fig. 4.1 :Non-parallel two plane

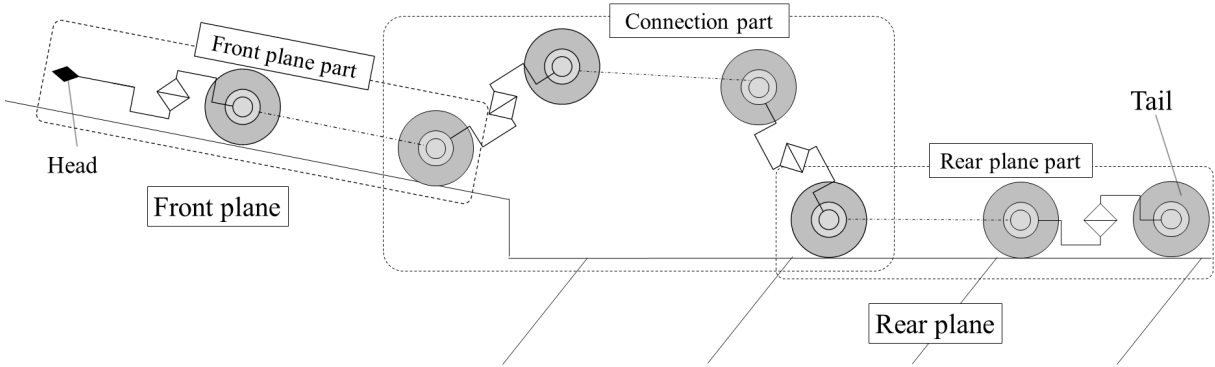


Fig. 4.2 :Schematic of a robot straddling two planes

跨った状態の模式図を示す．本研究では，ロボット胴体の2つの平面をつなぐ部分の動作を工夫することで，これらの要件を満たしながら推進する．このロボットの胴体のうち2平面をつなぐ部分を接続部とする．また，ロボット胴体のうち各平面に接触している部分をそれぞれ前方，後方平面部とする．各部の詳細について，Fig. 4.3に示す．前方平面に接触している車輪を前方平面部車輪，後方平面に接触している車輪を後方平面部車輪，それ以外の車輪を接続部車輪とする．前方平面部後端車輪と同軸のピッチ関節から後方平面部前端車輪と同軸のピッチ関節までを接続部関節とする．ここで，前方平面に接触している車輪数を n_f ，後方平面に接触している車輪数を n_r ，接続部車輪数を n_c とする．また，各平面部のヨー関節角度をまとめたベクトルを $\phi_f \in \mathbb{R}^{n_f,1}$ ， $\phi_r \in \mathbb{R}^{n_r,1}$ ，接続部の関節角度をまとめたベクトルを $\psi_c \in \mathbb{R}^{2(n_c+1)+1,1}$ とする．また，前方平面部後端車輪の次の車輪を接続部第1車輪とする．ここで，前方平面部後端車輪と後方平面部前端車輪はそれぞれ接続部前端，後端車輪にあたる．ただし，接続部第1車輪と接続部前端車輪は異なることに注意が必要である．各平面部の車輪はそれぞれの平面に対して適切に接触しているものとする．このとき，各平面部のピッチ関節角度はゼロとなる．接続部を後方へと遷移させていくことで，ロボットを前方平面上へと移動させる．ここで，平面間を移動する際に車輪の接地/非接地状態が切り替わり，これに伴ってモデルも切り替わる．また，接続部を後方へと遷移させていく際，被制御量も変化する．以上より，2平面間の移動制御では，車輪の接地/非接地状態と被制御量の両方が変化する複雑なモデルとなる．本研究では，これらの被制御量，車輪の接地状態の変化をモデル化し，ロボット先頭の目標軌道への追従を保証する制御則を提案する．

4.2 動作設計

2平面間の移動動作全体の流れを Fig. 4.4に示す．2平面間の移動動作を大きく3つに分けて考える．それぞれ，ロボット先頭を前方平面へと接触させる動作，2つの平面に跨って推進する動作，接続部を後方へとシフトする動作，の3動作である．それぞれの動作

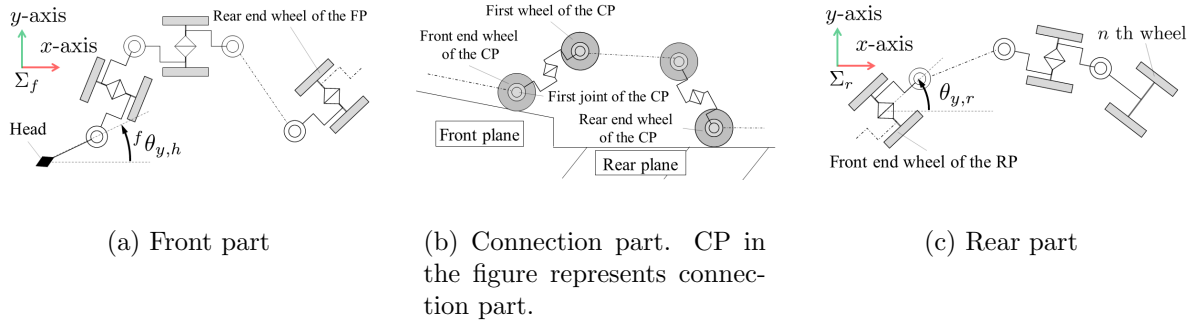


Fig. 4.3 :Detail of the each part

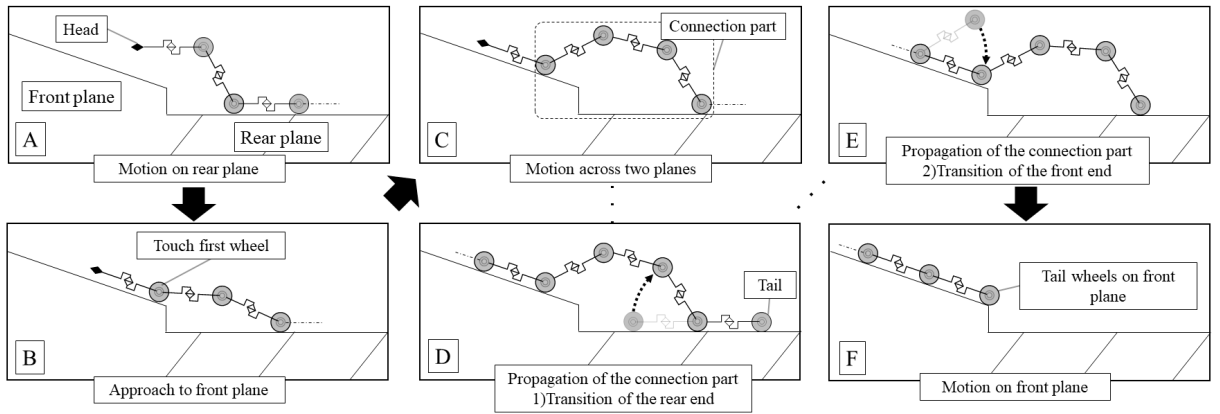


Fig. 4.4 :Motion flow

を先頭遷移動作，2平面間推進動作，接続部遷移動作とする．まず，先頭遷移動作によってロボットが2平面に跨った状態へと遷移する (Fig. 4.4 A-B)．その後，2平面間推進動作によって2平面に跨った状態で推進する (Fig. 4.4 C)．このとき，接続部後端と後方平面との相対位置姿勢を被制御量として制御することで，2つの平面に対して適切な接触を維持する．また，適切なタイミングで接続部遷移動作を実行することで接続部を後方へとシフトする (Fig. 4.4 D-E)．2平面間推進動作と接続部遷移動作を交互に繰り返すことで，ロボットを前方平面上へと移動させていく．ここで，接続部が3次的に動作する際，Fig. 4.5 のように接続部の胴体と平面端部が接触する可能性がある．そこで，本研究では接続部の運動学的冗長性を利用してロボットと平面の衝突を回避する．以下に各動作の詳細を示す．

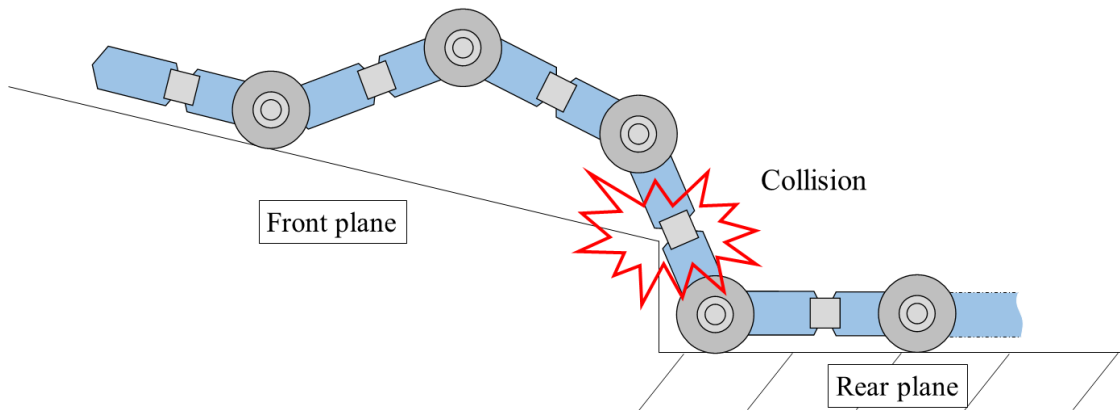


Fig. 4.5 :Collision between the robot and edge of the plane

4.2.1 先頭遷移動作

先頭遷移動作の流れの概略を Fig. 4.6 に示す．先頭遷移動作では，前方平面に第1車輪を接触させる．まず，ロボット先頭側の車輪を複数持ち上げることで先頭を3次的に動作させる [12]．2.5.1 節での定義と同様に，ロボット先頭側の車輪を持ち上げている部分を先頭部，後方平面に接触している部分をベース部とする．ベース部の車輪はすべて後方平面に接触しているものとし，ベース部のピッチ関節角度はすべてゼロとする．先頭を持ち上げた状態でロボット先頭の位置姿勢を制御することで前方平面近くまで接近する．前方平面に十分接近したら，第1車輪と前方平面の相対関係を制御することで，第1車輪を前方平面に接触させる．ここで，ベース部は動作しないものとし，先頭部の動作によって第1車輪を前方平面に接触させる．このとき，2.6.1 節で示した適切な姿勢で第1車輪を接触させる必要がある．また，2平面間推進動作時には前方平面部は平面上の2次元モデルとしてあらわされる．このことから，Fig. 4.6 のように第1ヨー関節の回転軸は前方平面に直交する姿勢であることが望ましい．第1リンクと前方平面との相対角度がゼロの時，第1ヨー関節の回転軸は前方平面と直交する．よって，第1車輪と前方平面との相対位置姿勢に加えて，第1リンクと前方平面との相対角度を制御する．ロボットが先頭を持ち上げた状態で前方平面に接近する動作は，従来研究 [12] と同様の動作であるため，本研究ではロボット先頭が前方平面に十分接近した後の動作のみ取り扱う．以上より，先頭遷移動作における被制御量は第1車輪と前方平面との相対位置姿勢，第1リンクと前方平面との相対角度，入力先頭部の関節角速度とする．

4.2.2 2平面間推進動作

2つの平面に跨った状態で，各平面に接触している車輪の速度拘束を利用して推進する．各平面部はそれぞれの平面上で動作し，平面部の車輪が浮き上がることはないと仮定する．しかしながら，推進に伴って前方平面部後端と後方平面部前端の相対位置姿勢は変化

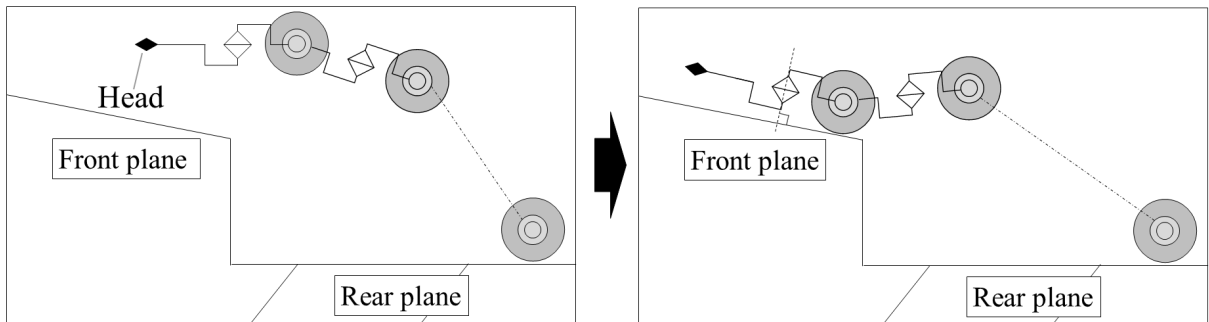


Fig. 4.6 :Motion of approaching to the front plane

する．よって，推進動作に合わせて接続部両端が各平面に対して適切な接触を維持するように接続部を動作させる必要がある．接続部前端が前方平面に適切に接触していると仮定し，接続部後端と後方平面の相対関係を制御することで，接続部後端を後方平面に対して適切に接触させる．以上より，2平面間推進動作における被制御量はロボット先頭の前方平面上での2次元位置姿勢，接続部後端と後方平面の相対位置姿勢，入力はいずれの平面部のヨー関節角速度と接続部の関節角速度とする．

4.2.3 接続部遷移動作

接続部遷移動作の概要を Fig. 4.7 に示す．接続部を構成する関節を後方へとシフトしていくことで，ロボットを前方平面上へと移動させていく．接続部遷移動作における初期状態は，2平面間推進動作におけるロボットの状態である．また，接続部遷移動作中もロボットは推進を続けるものとする．接続部遷移動作は2段階に分けて実現する．まず，接続部後端の車輪を一つ後ろにシフトし，次に接続部前端の車輪を一つ後ろにシフトする．2平面間推進動作では，接続部後端の車輪と後方平面との相対関係を被制御量とし，車輪の適切な接触を維持するように動作している．よって，被制御量として制御する車輪を一つ後方の車輪にシフトすることで後端のシフトを実現できる．また，接続部第1車輪を新たに前方平面へと接触させることで，接続部前端を一つ後ろにシフトすることができる．このとき，前方平面に複数の連続した車輪が接触することになる．2.6.1 節の車輪の接触条件より，接続部の第1ピッチ関節をゼロに制御することで，接続部第1車輪は前方平面に接触する．以上より，接続部遷移動作における被制御量はロボット先頭の前方平面上の2次元位置姿勢，接続部後端と後方平面との相対関係，接続部第1ピッチ関節，入力はいずれの平面部のヨー関節角速度と接続部の関節角速度とする．

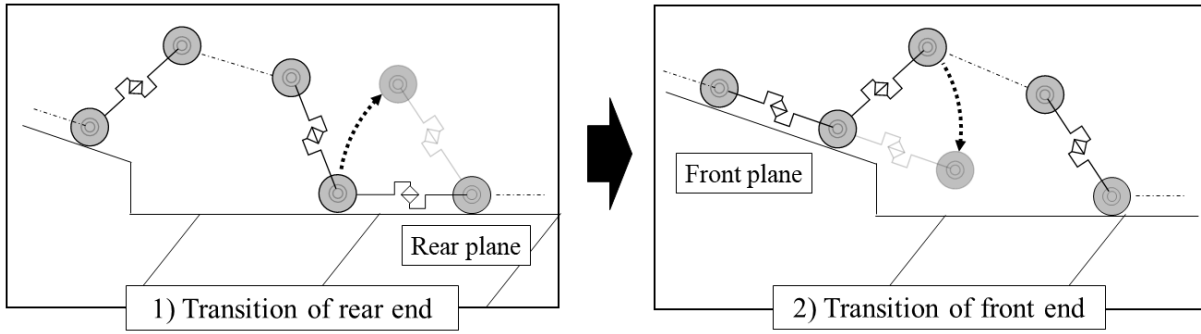


Fig. 4.7 :Transition of the connection part

4.2.4 動作間の遷移条件

ロボットはFig. 4.4のように平面を遷移しながら動作する．このとき，各動作間を遷移するタイミングは重要である．例えば，接続部の遷移タイミングが遅すぎると，Fig. 4.5のように接続部が前方平面端部と干渉してしまう．このような問題が生じないように遷移条件を設計する必要がある．ここでは，接続部遷移動作における遷移条件について考える．接続部の遷移動作は，後端車輪のシフトと，前端車輪のシフトの2段階で実行される．

まず，後端車輪の遷移条件について考える．接続部後端のシフトするタイミングが遅いと，前方平面端部とロボットが接触してしまう．一方で，タイミングが早くても大きな問題は生じない．ただし，接続部後端のシフトでは持ち上げる車輪が増える．実機での動作を考慮すると，多数の車輪を持ち上げることは関節トルクの観点から難しい．よって，同時に持ち上げる車輪数に制限を設ける．最大の接続部車輪数 $n_{c_{\max}}$ を超えないように，遷移条件を次のように設計する．

- ・ (後端遷移条件) $n_c < n_{c_{\max}}$

この条件から，接続部車輪が一定以下の場合は即座に接続部後端はシフトし，接続部車輪を増やす．

次に，前端車輪の遷移条件について考える．接続部前端のシフトのタイミングが早いと，接続部前端の車輪が平面に接触せず速度拘束が有効に作用しない．また，タイミングが遅いと接続部が前方平面端部に接触してしまう．そこで，接続部前端のシフトのタイミングは，接続部第1車輪と前方平面端部との相対位置を条件として決定する．Fig. 4.8のように，接続部第1車輪と前方平面端部との距離の後方平面への射影を d_e とする．そして， d_e が一定の閾値 ε_d を下回ったときに接続部前端のシフトを開始する．よって，接続部前端の遷移条件は次のように与える．

- ・ (前端遷移条件) $d_e < \varepsilon_d$

ここで， ε_d の値はロボットの目標推進速度や前方平面部の体形などの要因で最適な値が変化する．そのため，一意的に最適値を与えることはできない．本研究では，試行錯誤的に

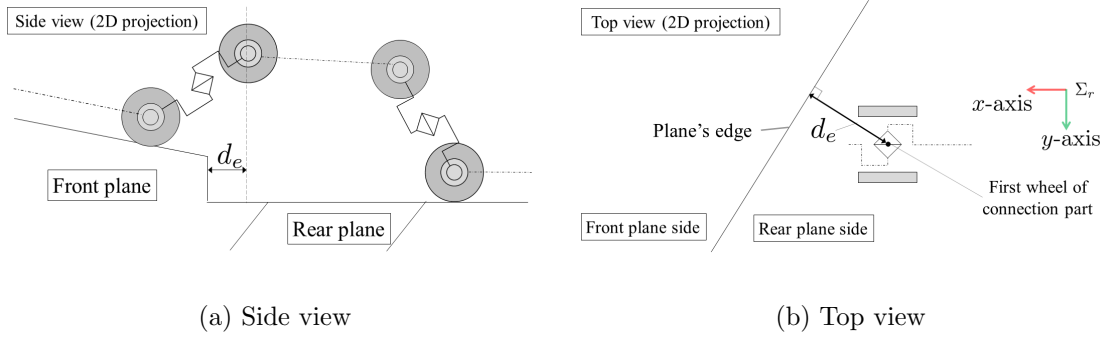


Fig. 4.8 :Distance between the wheel and edge of the front plane

値を決定している．また，接続部前端のシフトが完了すると，接続部車輪数が減少する．このことから，接続部前端のシフトが完了すると後端遷移条件を満たし接続部後端のシフトが開始される．以上より，接続部遷移動作は $d_e < \varepsilon_d$ の条件を満たすと，接続部前端と接続部後端のシフトが連続的に実行される．

4.3 モデリング

先頭部，各平面部，および接続部の運動学モデルを導出する．各動作時にはそれぞれのモデルに基づいてロボットを制御する．各平面部の車輪はそれぞれの平面に適切に接触しているものと仮定し，各平面部のモデルはそれぞれの平面上における2次元のモデルとして定義する．また，各平面部を繋ぐ接続部は，その端部の片方が平面部と適切に接触していると仮定した3次元のモデルとして定義する．

4.3.1 先頭部

先頭遷移動作では，ベース部は動作せず先頭部の動作によって第1車輪を前方平面へと接触させる．よって，ベース部前端を固定端としたマニピュレータとしてモデル化する．Fig. 4.9に先頭部の模式図を示す．ここで， $\lambda'_{1,f}$ を第1リンクと前方平面の相対角度とする． n_h 車輪が後方平面に接触していると仮定すると，第1関節から第 $2n_h$ 関節までが先頭部関節である．これらの関節角度をまとめたベクトルを $\psi_h \in \mathbb{R}^{2n_h,1}$ とする．このとき，先頭遷移動作における被制御量を， $\mathbf{r}_1 = [d_{1,f}, \kappa_{1,f}, \lambda'_{1,f}]^T$ とする．幾何関係より， \mathbf{r}_1 は先頭部の関節角度を変数とした関数としてあらわされる．よって，第1車輪と前方平面との相対関係に関する運動学関係は

$$\dot{\mathbf{r}}_1 = \mathbf{J}_h \dot{\psi}_h \quad (4.1)$$

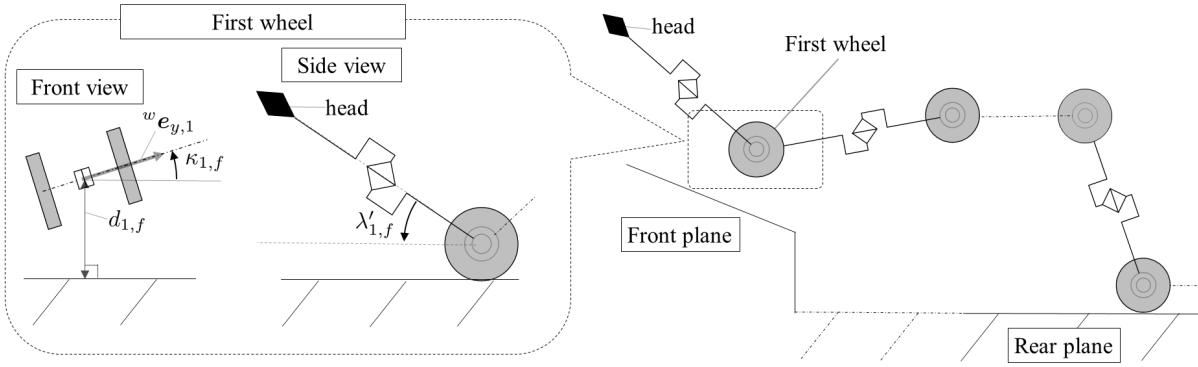


Fig. 4.9 :Model of the head part

となる．ここで， $\mathbf{J}_h \in \mathbb{R}^{3,2n_h}$ である．式 (4.1) の運動学関係に基づいて，ロボットを制御することで第1車輪を前方平面に適切に接触させる．

4.3.2 平面部

平面部のモデルは各平面部で接触している車輪の速度拘束式を連立することで導出する．まず，前方平面部の車輪の速度拘束式を，2.2.1 節と同様にして導出する．前方平面部の車輪の速度拘束式を連立すると，

$$\mathbf{A}_f^f \dot{\tilde{\mathbf{w}}}_h = \mathbf{B}_f \dot{\phi}_f \quad (4.2)$$

ここで， $\mathbf{A}_f \in \mathbb{R}^{n_f,3}$ ， $\mathbf{B}_f \in \mathbb{R}^{n_f,n_f}$ であり， ${}^f\tilde{\mathbf{w}}_h \in \mathbb{R}^{3,1}$ は Σ_f から見たロボット先頭の2次元位置姿勢である．また，後方平面部前端車輪の2次元位置姿勢を $\tilde{\mathbf{w}}_r = [x_r, y_r, \theta_{y,r}]^\top$ とする．このとき，後方平面部前端車輪の速度拘束式は

$$\dot{x}_r \sin \theta_{y,r} - \dot{y}_r \cos \theta_{y,r} = 0 \quad (4.3)$$

となる．後方平面部の第2車輪から第 n_r 車輪に関する速度拘束式をまとめると，

$$\mathbf{A}_r \dot{\tilde{\mathbf{w}}}_r = \mathbf{B}_r \dot{\phi}_r \quad (4.4)$$

ここで， $\mathbf{A}_r \in \mathbb{R}^{n_r-1,3}$ ， $\mathbf{B}_r \in \mathbb{R}^{n_r-1,n_r-1}$ である．また， $\tilde{\mathbf{w}}_r$ は幾何関係から ${}^f\tilde{\mathbf{w}}_h$ ， ϕ_f ， ψ_c の関数としてあらわされる．よって，その運動学関係は，

$$\dot{\tilde{\mathbf{w}}}_r = \mathbf{J}_{r,1}^f \dot{\tilde{\mathbf{w}}}_h + \mathbf{J}_{r,2} \dot{\phi}_f + \mathbf{J}_{r,3} \dot{\psi}_c \quad (4.5)$$

となる．ここで， $\mathbf{J}_{r,1} \in \mathbb{R}^{3,3}$ ， $\mathbf{J}_{r,2} \in \mathbb{R}^{3,n_f}$ ， $\mathbf{J}_{r,3} \in \mathbb{R}^{3,2(n_c+1)+1}$ である．よって，式 (4.3) は，

$$\mathbf{D}_1 \dot{\tilde{\mathbf{w}}}_h + \mathbf{D}_2 \dot{\phi}_f + \mathbf{D}_3 \dot{\psi}_c = 0 \quad (4.6)$$

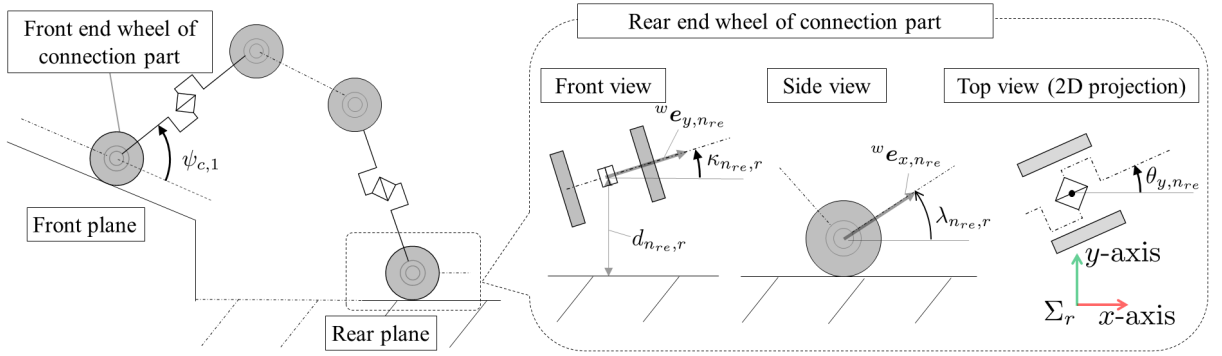


Fig. 4.10 :Rear end of the connection part

とあらわされる．ここで， $D_1 \in \mathbb{R}^{1,3}$ ， $D_2 \in \mathbb{R}^{1,n_f}$ ， $D_3 \in \mathbb{R}^{1,2(n_c+1)+1}$ である．同様に式 (4.4) は，

$$A_r \left(J_{r,1}^f \dot{w}_h + J_{r,2} \dot{\phi}_f + J_{r,3} \dot{\psi}_c \right) = B_r \dot{\phi}_r \quad (4.7)$$

と変換される．式 (4.7) を整理すると，

$$A_r J_{r,1}^f \dot{w}_h = \begin{bmatrix} -A_r J_{r,2} & -A_r J_{r,3} & B_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi}_f \\ \dot{\psi}_c \\ \dot{\phi}_r \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

となる．式 (4.2) と式 (4.6)，式 (4.8) を連立し，次式の平面部の速度拘束にもとづく運動学モデルを得る．

$$A_p^f \dot{w}_h = B_p \dot{\psi} \quad (4.9)$$

$$A_p = \begin{bmatrix} A_f \\ D_1 \\ A_r J_{r,1} \end{bmatrix}, \quad B_p = \begin{bmatrix} B_f & O \\ -D_2 & -D_3 & O \\ -A_r J_{r,2} & -A_r J_{r,3} & B_r \end{bmatrix}, \quad \tilde{\psi} = \begin{bmatrix} \phi_f \\ \psi_c \\ \phi_r \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

ここで， $A_p \in \mathbb{R}^{n_f+n_r,3}$ ， $B_p \in \mathbb{R}^{n_f+n_r,n_f+n_r+2(n_c+1)}$ である．

4.3.3 接続部

接続部前端が前方平面に適切に接触していることを仮定し，接続部後端と後方平面との相対関係をモデル化する．Fig. 4.10 に接続部後端と後方平面との相対関係を示す．2.6.1 節で示したとおり，車輪が平面に対して適切に接触するためには車輪と平面との相対距離，相対姿勢を制御すればよい．また，後方平面に複数の車輪が接触している場合，接続部後端から連続した複数の車輪が平面に接触する．よって， $r = [d_{n_{re},r}, \kappa_{n_{re},r}, \lambda_{n_{re},r}]^T$ を

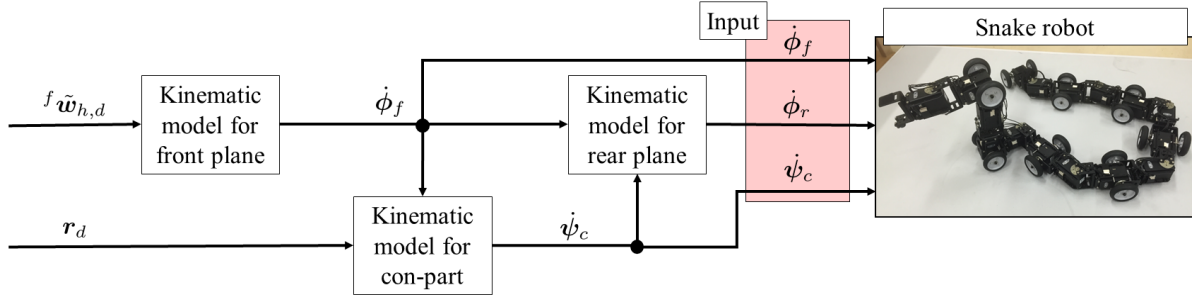


Fig. 4.11 : Overview of the controller

被制御量として接続部をモデル化する．ここで， n_{re} は接続部後端車輪のインデックスをあらわし， $n_{re} = n_f + n_c + 1$ である．このとき， \mathbf{r} は $^f\tilde{\mathbf{w}}_h$ ， ϕ_f ， ψ_c の関数としてあらわされる．よって，その運動学関係は，

$$\dot{\mathbf{r}} = \mathbf{J}_{c,1} \dot{^f\tilde{\mathbf{w}}_h} + \mathbf{J}_{c,2} \dot{\phi}_f + \mathbf{J}_{c,3} \dot{\psi}_c \quad (4.11)$$

となる．ここで， $\mathbf{J}_{c,1} \in \mathbb{R}^{3,3}$ ， $\mathbf{J}_{c,2} \in \mathbb{R}^{3,n_f}$ ， $\mathbf{J}_{c,3} \in \mathbb{R}^{3,2(n_c+1)+1}$ である．式 (4.11) が 2 平面間推進動作時の接続部に関する運動学モデルである．

また，接続部遷移動作では接続部第 1 ピッチ関節 $\psi_{c,1}$ を加えた $\mathbf{r}' = [d_{n_{re},r}, \kappa_{n_{re},r}, \lambda_{n_{re},r}, \psi_{c,1}]^T$ が被制御量となる．よって，式 (4.11) に接続部第 1 ピッチ関節に関する行を加えた次式が接続部遷移動作における運動学モデルである．

$$\dot{\mathbf{r}}' = \mathbf{J}'_{c,1} \dot{^f\tilde{\mathbf{w}}_h} + \mathbf{J}'_{c,2} \dot{\phi}_f + \mathbf{J}'_{c,3} \dot{\psi}_c \quad (4.12)$$

$$\mathbf{J}'_{c,1} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{c,1} \\ \mathbf{O}_{1,3} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{J}'_{c,2} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{c,2} \\ \mathbf{O}_{1,n_f} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{J}'_{c,3} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{c,3} \\ 1 & 0 & \dots \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

動作に応じて式 (4.11) と式 (4.12) のモデルを切り替えながらロボットを制御する．

4.4 制御設計

本研究の動作では，モデルや被制御量，入力が各動作に応じて切り替わる．そのため，制御設計も各動作に応じて切り替わる．よって，各動作における制御設計についてそれぞれ示す．

4.4.1 関節入力

先頭遷移動作

先頭遷移動作では，式 (4.1) のモデルに基づいてロボットを制御する．先頭遷移動作における被制御量の目標値 $\mathbf{r}_{1,d}$ ，制御入力 $\mathbf{u}_h = \dot{\boldsymbol{\psi}}_h$ として，次式でロボットを制御する．

$$\mathbf{u}_h = \mathbf{J}_h^\dagger \{\dot{\mathbf{r}}_{1,d} + \mathbf{K}_h (\mathbf{r}_{1,d} - \mathbf{r}_1)\} \quad (4.14)$$

ここで， \mathbf{J}_h^\dagger は \mathbf{J}_h の疑似逆行列， $\mathbf{K}_h \in \mathbb{R}^{3,3}$ は対角成分に正の定数を持つゲイン行列である．このときの閉ループ系は，

$$\dot{\mathbf{r}}_{1,d} - \dot{\mathbf{r}}_1 + \mathbf{K}_h (\mathbf{r}_{1,d} - \mathbf{r}_1) = 0 \quad (4.15)$$

となり， $t \rightarrow \infty$ のとき被制御量 \mathbf{r}_1 は目標値 $\mathbf{r}_{1,d}$ に収束する． $\mathbf{r}_{1,d} - \mathbf{r}_1 < \varepsilon_1$ を満たしたら，接続部遷移動作は完了したと判断し，2 平面間推進動作に遷移する．ここで， ε_1 は先頭遷移動作の完了を判断するための閾値である．

2 平面間推進動作

2 平面間推進動作では，式 (4.9) と式 (4.11) のモデルに基づいてロボットを制御する．接続部遷移動作における先頭の目標軌道を ${}^f\tilde{\mathbf{w}}_{h,d}$ ，接続部後端の相対関係に関する目標値を \mathbf{r}_d とする．まず，前方平面部の関節角速度を式 (4.2) のモデルに基づいて次式で決定する．

$$\dot{\boldsymbol{\phi}}_f = \mathbf{B}_f^{-1} \mathbf{A}_f \{{}^f\dot{\tilde{\mathbf{w}}}_{h,d} + \mathbf{K}_p (\tilde{\mathbf{w}}_{h,d} - \tilde{\mathbf{w}}_h)\} \quad (4.16)$$

ここで， \mathbf{K}_p は先頭軌道追従に関するゲイン行列である．次に，接続部の関節角速度を式 (4.6) の速度拘束と式 (4.11) のモデルに基づいて次式で決定する．

$$\dot{\boldsymbol{\psi}}_c = \mathbf{u}_{c1} + \mathbf{u}_{c2} \quad (4.17)$$

$$\mathbf{u}_{c1} = \mathbf{H}_3^\dagger \left\{ \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{r}}_d + \mathbf{K}_c (\mathbf{r}_d - \mathbf{r}) \\ 0 \end{bmatrix} - \mathbf{H}_1 \{{}^f\dot{\tilde{\mathbf{w}}}_{h,d} + \mathbf{K}_p ({}^f\tilde{\mathbf{w}}_{h,d} - {}^f\tilde{\mathbf{w}}_h)\} - \mathbf{H}_2 \dot{\boldsymbol{\phi}}_f \right\} \quad (4.18)$$

$$\mathbf{u}_{c2} = k_v \left(\mathbf{I} - \mathbf{H}_3^\dagger \mathbf{H}_3 \right) \boldsymbol{\eta} \quad (4.19)$$

$$\boldsymbol{\eta} = \left[\frac{\partial V}{\partial \psi_{c,1}} \quad \cdots \quad \frac{\partial V}{\partial \psi_{c,n_c}} \right]^\top \quad (4.20)$$

ここで，

$$\mathbf{H}_1 = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{c,1} \\ \mathbf{D}_1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H}_2 = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{c,2} \\ \mathbf{D}_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H}_3 = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{c,3} \\ \mathbf{D}_3 \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

また， \mathbf{H}_3^\dagger は \mathbf{H}_3 の疑似逆行列， \mathbf{K}_c は接続部後端に関する制御ゲイン， k_v は冗長性に関するゲイン， V は評価関数である． \mathbf{u}_{c2} は冗長性に関する成分であり， $k_v > 0$ とすること

で評価関数 V の増大化に寄与できる．詳細は後述する．最後に，後方平面部の関節角速度を式 (4.8) のモデルに基づいて次式で決定する．

$$\dot{\phi}_r = B_r^{-1} A_r J_{r,1} \{ {}^f \dot{\tilde{w}}_{h,d} + K_p ({}^f \tilde{w}_{h,d} - {}^f \tilde{w}_h) \} + B_r^{-1} A_r \begin{bmatrix} J_{r,2} & J_{r,3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi}_f \\ \dot{\psi}_c \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

$H_3 H_3^\dagger = I_4$ を仮定すると，式 (4.16)，(4.17)，(4.22) の関節角速度を入力として与えたとき，式 (4.9) の平面部モデルにおける閉ループ系は，

$$A_p \{ {}^f \dot{\tilde{w}}_{h,d} - {}^f \dot{\tilde{w}}_h + K_p ({}^f \tilde{w}_{h,d} - {}^f \tilde{w}_h) \} = 0 \quad (4.23)$$

となる． A_p が列フルランクのとき式 (4.23) は

$${}^f \dot{\tilde{w}}_{h,d} - {}^f \dot{\tilde{w}}_h + K_p ({}^f \tilde{w}_{h,d} - {}^f \tilde{w}_h) = 0 \quad (4.24)$$

となり， $t \rightarrow \infty$ で先頭の位置姿勢は目標値に収束する．また，式 (4.11) であらわされる接続部の閉ループ系は，

$$\dot{r}_d - \dot{r} + K_c (r_d - r) - J_{c,1} \{ {}^f \dot{\tilde{w}}_{h,d} - {}^f \dot{\tilde{w}}_h + K_p ({}^f \tilde{w}_{h,d} - {}^f \tilde{w}_h) \} = 0 \quad (4.25)$$

となる．式 (4.24) より，式 (4.25) は $t \rightarrow \infty$ で，

$$\dot{r}_d - \dot{r} + K_c (r_d - r) = 0 \quad (4.26)$$

となり，接続部に関する被制御量は目標値に収束する．

接続部遷移動作

接続部遷移動作では，後端の遷移は2平面間推進と同様の制御入力，前端の遷移は式 (4.12) のモデルに基づいて接続部を制御する．各平面部の動作は2平面間推進動作と同様である．接続部の前端遷移での被制御量の目標値を r'_d とし，次式で接続部の関節角速度入力を決定する．

$$\dot{\psi}_c = u'_{c_1} + u'_{c_2} \quad (4.27)$$

$$u'_{c_1} = H_3'^\dagger \left\{ \begin{bmatrix} \dot{r}'_d + K'_c (r'_d - r') \\ 0 \end{bmatrix} - H_1' \{ {}^f \dot{\tilde{w}}_{h,d} + K_p ({}^f \tilde{w}_{h,d} - {}^f \tilde{w}_h) \} - H_2' \dot{\phi}_f \right\} \quad (4.28)$$

$$u'_{c_2} = k_v \left(I - H_3'^\dagger H_3' \right) \eta \quad (4.29)$$

ここで，

$$H_1' = \begin{bmatrix} J'_{c,1} \\ D_1 \end{bmatrix}, \quad H_2' = \begin{bmatrix} J'_{c,2} \\ D_2 \end{bmatrix}, \quad H_3' = \begin{bmatrix} J'_{c,3} \\ D_3 \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

である．また， $H_3'^\dagger$ は H_3' の疑似逆行列， K'_c は接続部後端に関する制御ゲインである．このときも2平面間推進動作と同様に被制御量は目標値に収束する．詳細は割愛する．

4.4.2 冗長入力

式(4.17)の冗長成分を用いてサブタスクの実現を目指す．ここで，評価関数 V の微分は，

$$\dot{V} = \frac{\partial V}{\partial f} \dot{f} + \frac{\partial V}{\partial \phi_f} \dot{\phi}_f + \frac{\partial V}{\partial \psi_c} \dot{\psi}_c \quad (4.31)$$

であらわされるものとする．式(4.16)，(4.17)で入力を決定したとき，評価関数の微分は，

$$\dot{V} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + k_v \boldsymbol{\eta} \left(\mathbf{I} - \mathbf{H}_3^\dagger \mathbf{H}_3 \right) \boldsymbol{\eta}^\top \quad (4.32)$$

とあらわされる．ここで， \mathbf{E}_1 ， \mathbf{E}_2 はそれぞれ先頭と接続部後端に関する被制御量に起因する成分である．そして，式(4.32)の右辺第3項は冗長成分に起因する成分である．ここで， $\boldsymbol{\eta} \left(\mathbf{I} - \mathbf{H}_3^\dagger \mathbf{H}_3 \right) \boldsymbol{\eta}^\top \geq 0$ であるから， $k_v > 0$ とすることで式(4.32)の右辺第3項は非負となる[66]．よって， $k_v > 0$ とすることで評価関数の増大化に寄与できる．

評価関数 V をサブタスクに応じて設計することで，サブタスクの実現を目指す．本研究のサブタスクを次の2点とする．

- (i) 関節可動限界回避
- (ii) 平面端部と接続部の接触回避

サブタスクに基づき，評価関数を次のように設計する．

$$V = k_{u,1} V_1 + k_{u,2} V_2 \quad (4.33)$$

$$V_1 = \frac{1}{m_c} \sum_{i=1}^{m_c} \frac{\psi_{\text{lim}^2} - \psi_{c,i}^2}{\psi_{\text{lim}^2}} \quad (4.34)$$

$$V_2 = \frac{1}{n_c} \sum_{i=1}^{n_c} \frac{d_r^2 - (d_{c,i} - d_d)^2}{d_r^2} \quad (4.35)$$

ここで， $d_{c,i}$ ($i = 1, 2, \dots, n_c$) は接続部第 i 車輪と後方平面との距離， m_c は接続部の関節数であり $m_c = 2(n_c + 1) + 1$ ， $k_{u,1}$ ， $k_{u,2}$ は評価関数の重みである． V_1 の増大化により，接続部の関節角度の絶対値が減少する．よって， V_1 の増大化によりサブタスク (i) の達成が期待できる．また， V_2 の増大化により， $d_{c,i}$ は d_d に近づく． $d_d > 0$ とすることで，車輪が平面から浮き上がる方向に関節は動作する．よって， V_2 の増大化によりサブタスク (ii) の達成が期待できる．

4.5 実機実験

提案した制御則の有効性を検証するため，実機を用いた実験を行った．実験環境の模式図を Fig. 4.12 に示す．実機の構造に関するパラメータは，車輪数 $n = 9$ ，リンク長

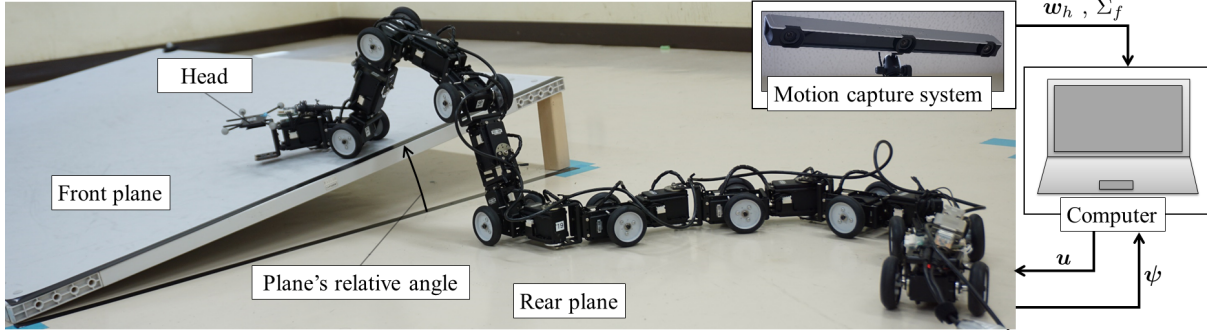


Fig. 4.12 :Experimental system

Table 4.1 :Parameters for control

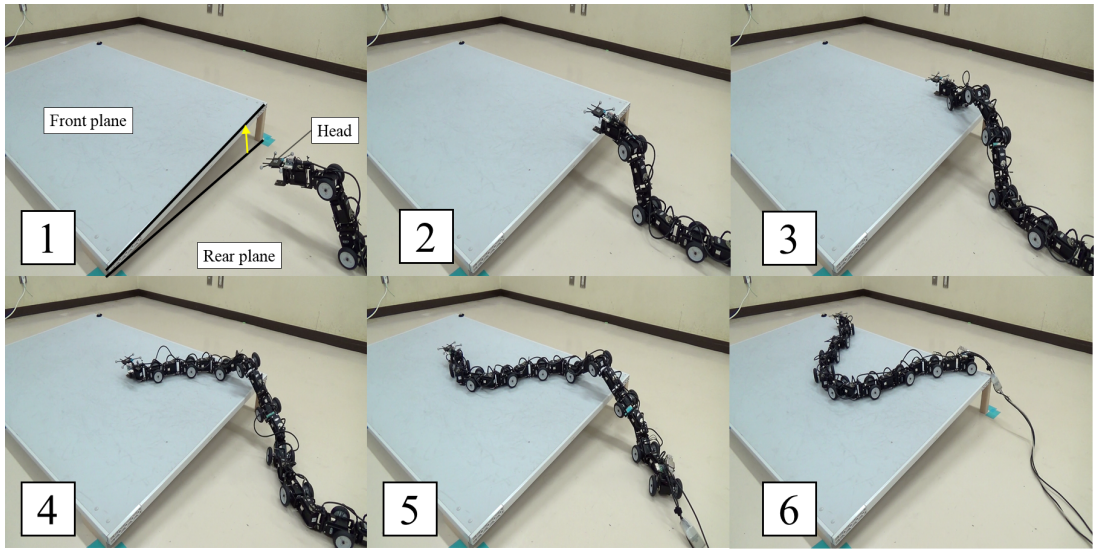
	$d_d[\text{m}]$	$d_r[\text{m}]$	k_c	k_p	k_v	$k_{u,1}$	$k_{u,2}$	$v_p[\text{m/s}]$	$A[\text{m}]$	$T[\text{sec.}]$
condition 1	0.272	0.272	1	1	3	0.7	0.3	0.01	0.25	90
condition 2	0.181	0.181	1	1	2	0.7	0.3	0.01	0.3	90

$l = 0.0905 \text{ m}$, 車輪半径 $r_w = 0.029 \text{ m}$ 関節可動限界角度 $\psi_{\text{lim}} = \pi/2 \text{ rad}$. とし, ロボットの制御周期は 0.2 s とした. ヘビ型ロボット先頭および前方平面に位置検出用マークを取り付け, モーションキャプチャシステムによって位置姿勢を取得する. ロボット全体の関節角度の初期値 ψ_0 は陽に与えることはせず, 初期化時のロボットの関節角度を取得して初期値としている. 時刻 t における先頭に関する被制御量の目標値 ${}^f\tilde{\mathbf{w}}_{h,d}(t)$ は, 先頭適応終了時の先頭の前方平面上における位置を ${}^fx_h(0)$, ${}^fy_h(0)$, 終了時の時間を t_0 として次式で与えた.

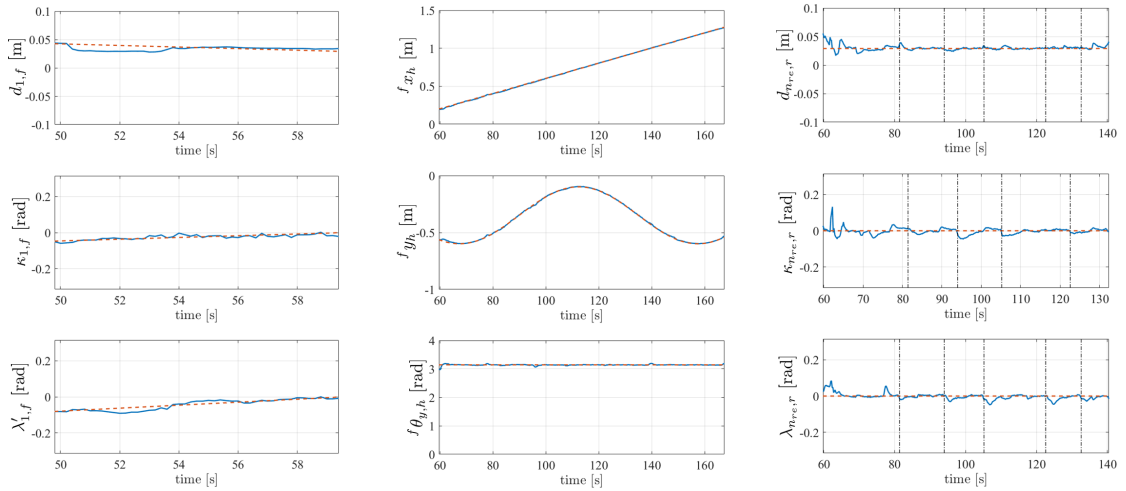
$${}^f\tilde{\mathbf{w}}_{h,d}(t) = \begin{bmatrix} {}^fx_h(0) + v_p(t - t_0) \\ {}^fy_h(0) + A \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \\ \pi \end{bmatrix} \quad (4.36)$$

ここで, $v_p > 0$ は先頭の推進速度, A は推進軌道の振幅, T は推進軌道の周期である. 先頭適応動作におけるパラメータを, $n_h = 3$, 接続部伝播動作における遷移条件のパラメータを, $n_{c_{\text{max}}} = 2$, $\varepsilon_d = 0.029 \text{ m}$ とした. 実機実験は前方平面の姿勢が異なる2種類の環境で実施した. それぞれの実験条件を実験条件1, 実験条件2とする. 実験条件1の前方平面の位置姿勢は $\mathbf{p}_f = [0.595, 0.146, 0.0970]^\top$, $\boldsymbol{\theta}_f = [-0.107, 0.00, 0.00]^\top$, 実験条件2では, $\mathbf{p}_f = [0.593, 0.140, 0.0673]^\top$, $\boldsymbol{\theta}_f = [0.00, -0.0609, 0.00]^\top$ とした. 各実験条件での制御パラメータを Table 4.5 に示す. condition 1 が実験条件1, condition 2 が実験条件2でのパラメータである.

Fig. 4.13 に条件1での実験の様子, ならびに各被制御量の応答, Fig. 4.14 に条件2での実験の様子, ならびに各被制御量の応答を示す. グラフの点線で示したものが目標値, 実線が



(a) Motion of the robot



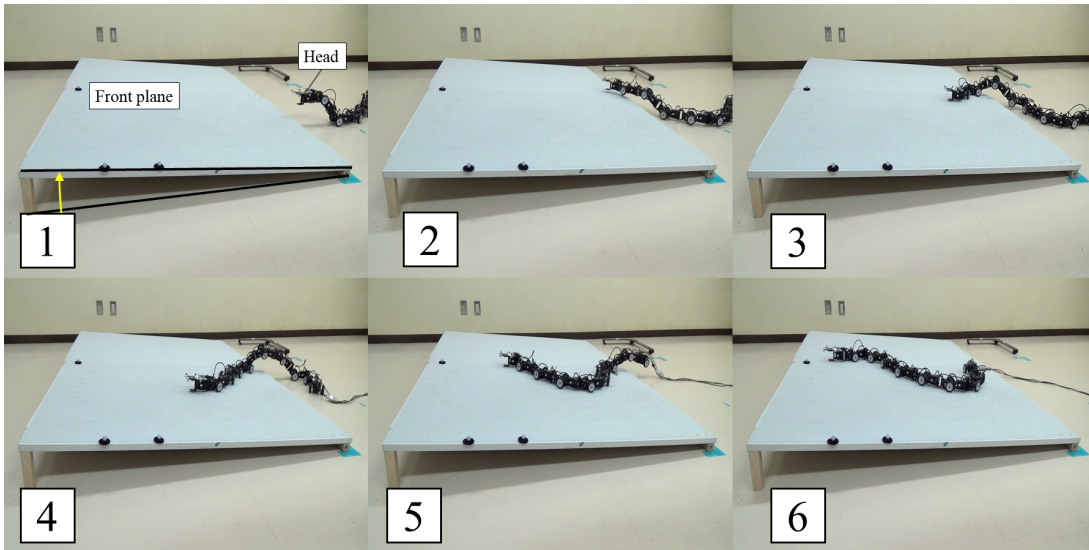
(b) Time response of controlled variable of the head adaptive motion

(c) Time response of controlled variable of the motion for straddling two planes

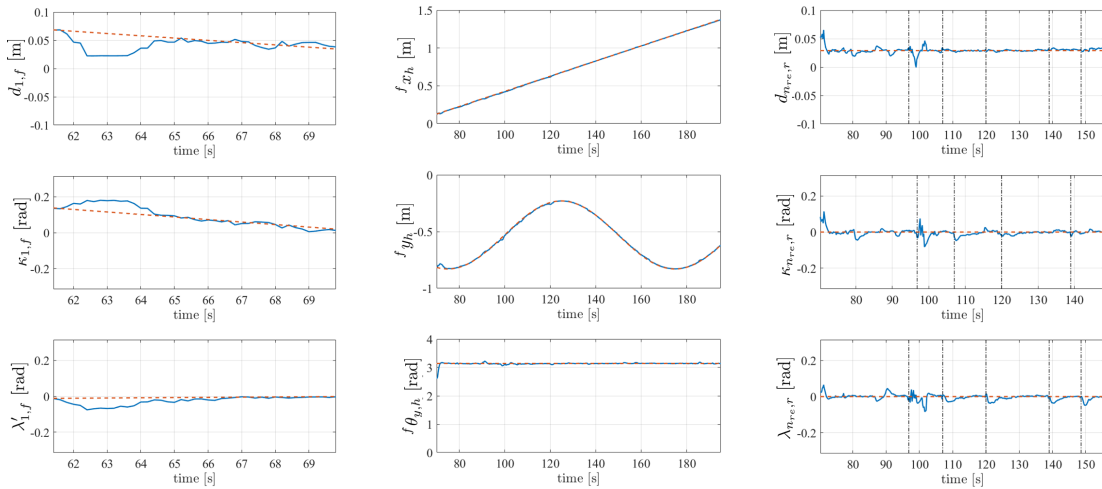
(d) Time response of controlled variable of the connection part

Fig. 4.13 :Experimental results for condition 1

計測値である。また, Fig. 4.13(d) および, Fig. 4.14(d) における一点鎖線による区切りは, 接続部後端の遷移によって被制御量を切り替えたタイミングを示している。Fig. 4.13(a),



(a) Motion of the robot



(b) Time response of controlled variable of the head adaptive motion

(c) Time response of controlled variable of the motion for straddling two planes

(d) Time response of controlled variable of the connection part

Fig. 4.14 :Experimental results for condition 2

Fig. 4.14(a) から，先頭適応動作によって前方平面へと先頭を接触させ，さらに推進に伴い接続部を後方へと伝播することで前方平面へと遷移しながら推進できていることが分

かる．Fig. 4.13(c) および，Fig. 4.14(c) から，2 平面間推進動作における先頭に関する被制御量が目標値に追従していることが分かる．よって，ロボット先頭は前方平面上の目標軌道へと追従している．また，Fig. 4.13(b) および，Fig. 4.14(b) から，先頭適応動作における被制御量についても，先頭適応開始直後に目標値と実際の値で差があるが最終的には目標値へと収束していることが確認できる．よって，先頭適応動作によってロボット先頭が前方平面へと適切な姿勢で接触できている．先頭適応開始直後の目標値との乖離は，持ち上げる車輪数が増加したことにより必要トルクの増大によるものと考えられる．Fig. 4.13(d) および，Fig. 4.14(d) から，接続部の相対姿勢制御に関する被制御量についても，良好に目標値に追従している．よって，接続部の相対姿勢制御により各平面に対して車輪が適切に接触している．

以上より，提案した制御則を用いることで，非平行な2平面から構成される環境において各平面をまたいだ状態での推進ならびに先頭の任意軌道への追従が可能であることが確認された．しかしながら，本研究では運動学によるロボットの運動制御を行っており，動力学モデルは考慮していない．そのため，摩擦係数が極めて低い環境や水平面から大きく傾いた平面が対象の場合，運動学的な拘束である速度拘束が満たされず推進を実現できない．同様に，ロボットの加速度について考慮されていないため，加速度に起因するモーメントによって転倒する可能性がある．また，本研究では既知環境を対象としており，接続部の伝播動作や相対姿勢制御などの動作の決定にこれらの環境情報を利用している．そのため，未知環境では本制御則を適用できない．今後は，これらの課題に取り組むことで未知環境やより複雑な環境での推進実現に取り組んでいきたい．

4.6 まとめ

第4章では，ロボットが2つの非平行な平面に跨った状態で推進することを目標としてロボットの制御則を提案した．ロボット胴体のうち，2つの平面を接続する部分(接続部)の運動を適切に制御することで，ロボットが環境に適切に接触を維持しながら推進する制御則を提案した．また，ロボット胴体と平面端部との意図しない接触や関節の可動限界を回避するための評価関数を導入し，接続部の運動学的冗長性を活用することでこれらの問題の解決を目指した．提案した制御則の有効性は実機実験によって確認した．実機実験では，ロボットの推進に伴って接触する平面を変化させながら，先頭が前方平面上の目標軌道に追従していることが確認できた．また，ロボットと環境との相対関係を制御することで，速度拘束を適切に発生されていることが確認できた．そして，冗長性を利用することで環境との意図しない干渉やロボットの関節可動限界回避が実現されていることが確認できた．以上のことから，提案制御則によって従来研究では実現されていなかった複雑な環境での軌道追従制御が可能となった．また，環境とロボットとの相対関係を制御することで複雑な環境下でも運動学に基づいて推進可能であることを示した．一方で，本制御則では既知環境を想定しており，未知環境や不整地のようなモデル化の難しい環境への制御則の適用には課題が残る．接続部の遷移条件や冗長性の利用では，ロボットと環境との相対

関係を利用している．また，車輪が接触する平面は環境情報をもとに事前設計的に決定されており，車輪が接触する平面を自由に選択することはできていない．そのため，未知環境や不整地のようなモデル化の難しい環境での制御則適用は難しい．また，制御則は運動学に基づいて設計されており，力学的な作用の考慮がされていない．そのため，推進に十分な摩擦が確保できず滑落する可能性や，接続部の動作によってロボットが横転してしまう可能性がある．これらは今後の課題であり，より複雑な環境や未知環境にロボットの活動範囲を拡大するため，検討を進めていきたい．

第5章

結論

5.1 まとめ

本論文では、拘束条件の切り替えを考慮したヘビ型ロボットによる複雑な環境での推進や複雑なタスクの実現を大きな目標として、2制御点同時制御と2平面間に跨った状態での推進制御を提案した。運動学に基づくモデルベースト手法を用いてロボットを制御することで、生物模倣的な手法やヒューリスティックな手法では実現できないロボット先頭の任意軌道への追従を保証する制御則を提案し、実機実験により実際に軌道追従が実現されていることを確認した。また、モデルベースト手法の特徴であるロボットの冗長性の積極的な活用によって、さまざまな副次的な制御目標を実現する手法を提案し、その有効性を確認した。

第2章では、車輪拘束型ヘビ型ロボットを速度拘束に基づいて制御するための運動学モデルについて述べた。ロボットの受動車輪は横滑りしないものと仮定し、この仮定を速度拘束として数式化することで運動学モデルを導出した。この運動学モデルではロボットの運動学的冗長性を陽に表現可能であり、冗長性を積極的に活用することで生物模倣的な手法やヒューリスティックな手法では実現できない副次的な制御目標の達成が可能であることを示した。さらに、車輪を微小に持ち上げることで速度拘束を任意に変化させる手法と、この時の運動学モデルについて示した。この手法により、状況に応じて巧みに冗長性を利用した運動が可能となる。また、従来の運動学モデルに第2制御点の運動学関係式を追加することで、先頭と第2制御点を同時に制御するための運動学モデルを導出した。このとき、2つの制御点を同時に制御するための運動学モデルでは、従来の運動学モデルにおける特異姿勢に加えて固有の特異姿勢が存在することを示した。また、車輪による速度拘束を適切に発生するための条件として、車輪と平面との相対関係式を導いた。この相対関係式を満たすようにロボット制御することで、複雑な環境下でも車輪による速度拘束に基づいた推進が実現可能となる。

第3章では、2つの制御点を同時に制御するための制御手法について述べた。また、その応用事例としてケーシング運搬動作、台車操舵、扉開けについて示した。第2制御点の運動学関係式に基づいてロボットを制御することで、2つの制御点を同時に制御するための制御則を提案した。また、2制御点同時制御特有の特異姿勢は拘束条件の切り替えを用いることで回避する手法を提案した。特異姿勢に関する評価関数に基づいて拘束条件を切

り替えることで、特異姿勢を回避しながら動作する。この特有の特異姿勢近傍では制御入力の過大化が発生するが、入力制約によって過大な入力が発生したときにロボットの動作を停止することで、ロボットの意図せぬ挙動を防いでいる。入力制約で動作停止した場合でも、拘束条件の切り替えにより特異姿勢が変化することで、ロボットは動作を再開することができる。実機実験により、提案制御則によって2つの制御点を同時に制御可能であることを確認した。拘束条件の切り替えと運動学冗長性の利用により、特異姿勢を回避しながら2制御点が同時に目標軌道へと追従可能であることを確認した。また、入力制約と拘束条件の切り替えを併用することで、特異姿勢近傍における意図せぬ挙動を防ぎながらロボットが継続的に動作を続けることができた。提案制御則を利用した応用動作は、実機実験と物理シミュレータを用いて確認した。提案制御則の応用により、ケーシング運搬動作、台車操舵、扉開けが実現可能であることが確認できた。

第4章では、2つの平面で構成された環境での推進制御について述べた。ロボットと平面との相対関係を制御することで、車輪と環境平面との適切な接触を実現する。これによって、車輪の速度拘束を適切に発生させながら2平面環境で推進するための制御則を提案した。そして、推進に伴って適切なタイミングで車輪の接触状態、接触平面を切り替えることで2平面間を遷移する。また、ロボット胴体の2平面をつなぐ部分である接続部の運動学冗長性を利用することで、環境との意図しない接触を防ぐための評価関数を提案した。実機実験により、提案制御則によって2平面間環境での推進が可能であることを確認した。提案制御則によって、適切なタイミングで推進する平面を遷移しながら、ロボット先頭が任意軌道に追従できることが確認できた。

まとめると、本論文から次の知見を得た。

- ・ ロボットと環境との相対関係の制御
- ・ 拘束切り替えと入力制約を併用した動作不能状態の回避

これらの知見によって、ヘビ型ロボットによる2平面間環境での推進、ケーシング運搬や台車操舵、扉開けといった複雑なタスクが実現された。また、得られた知見を応用することで、複数平面で構成された環境のような、より複雑な環境での推進実現が期待できる。

5.2 課題と今後の展望

ヘビ型ロボットによる複雑環境での推進や複雑なタスクの実現において、力学的作用の考慮が共通の課題である。2制御点同時制御を用いた応用動作では、運搬対象や台車、扉など、ロボットと環境との間に力学的な相互作用が発生する。質量の大きい物体の搬送や扉開けでは、ロボットが力が発生しやすい体形をとるなどの対応が必要となる。また、複数平面で構成された環境では、ロボットの動作は3次元的なものとなるため、ロボットの転倒が発生する可能性がある。以上のことから、力学的作用の考慮は共通の課題であると考えられる。

2 制御点同時制御における課題は、特有の特異姿勢の解析があげられる。2 制御点同時制御に特有の特異姿勢については、詳細な解析が行われていない。具体的な体形や接触車輪の関係が明らかになれば、より効果的な拘束条件の切り替えが可能となると考えられる。また、これによりモード候補の合理的に選択が可能となり、実際の運用における計算コストの削減が期待できる。

2 制御点同時制御における課題は、平面間の遷移条件の一般化である。本論文では、車輪が遷移する平面が事前設計されており、平面間の遷移条件が非常に簡単化されている。複数の平面から構成された環境への拡張や、未知環境での遠隔操縦への適用を考えると、遷移条件をより一般化する必要がある。

研究全体の今後の展望としては、以下の2点が挙げられる。

- ・ 環境との接触条件の一般化：

本論文では、単一または複数の平面で構成された環境を想定している。車輪による速度拘束を適切に発生するための条件式は、環境に応じて変化する。そのため、現在の条件式を用いた制御では平面で構成された環境でしかロボットの推進を保証できない。そこで、曲面環境や不整地など、環境に対してより一般化した条件式の導出を進めたい。また、接触に関する条件式は車輪の形状や配置にも大きく依存している。よって、ソウト面だけではなく、ハード面からのアプローチについても今後は検討していきたい。これにより、環境にあまり依存しない形でロボットの制御が可能となると考えている。

- ・ 局所的情報を用いた制御：

本論文では、単純な平面から構成された環境を仮定してモデリングと制御設計を行っている。また、これらの環境は既知であるものとして扱われている。不整地などのより複雑な環境では、環境情報の完全なモデリングが難しいことが考えられる。また、常に環境情報が既知であるとは限らない。そこで、局所的な環境情報を使ったロボットの制御ができないかを模索する。環境全体をモデリングするのではなく、ロボットの推進に必要な局所的情報のみセンサ情報から取得することで、環境のモデルを簡略化する。これにより、未知の環境や複雑な環境でのロボットの推進が可能となると考える。

これらの課題を解決することで、より複雑な環境での推進やタスクの実現、より環境やタスクに適した効率的な動作の実現が期待できる。また、プラント内や災害現場など、実環境へのヘビ型ロボット投入が可能となり、ヘビ型ロボットの活躍の場が大きく広がると考えている。

参考文献

- [1] S. Hirose, *Biologically Inspired Robots (Snake-like Locomotor and Manipulator)*. Oxford University Press, 1993.
- [2] M. Mori and S. Hirose, “Three-dimensional serpentine motion and lateral rolling by active cord mechanism ACM-R3,” in *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems*, pp. 829–834, 2002.
- [3] K. Shigeta, H. Date, S. Nakaura, and M. Sampei, “Improvement of manipulability for locomotion of a snake robot by mass distribution,” in *Proc. SICE Annual Conf.*, pp. 2214 – 2217, 2002.
- [4] M. Tsuda, S. Nakaura, and M. Sampei, “Dynamic manipulability of a snake-like robot and its effect for sinus-lifting motion,” in *Proc. SICE Annual Conf.*, pp. 2202–2207, 2004.
- [5] 千木崎俊太郎, 森淳, 山田浩也, 広瀬茂男, “水陸両用ヘビ型ロボット “ACM-R5” の機構と制御の研究,” ロボティクスメカトロニクス講演会 2005, 2005.
- [6] T. Kamegawa, T. Harada, and A. Gofuku, “Realization of cylinder climbing locomotion with helical form by a snake robot with passive wheels,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 3067–3072, 2009.
- [7] P. Liljebäck, I. U. Haugstuen, and K. Pettersen, “Path Following Control of Planar Snake Robots Using a Cascaded Approach,” *IEEE Trans. Control System Technology*, vol. 20, no. 1, pp. 111–126, 2012.
- [8] 山田浩也, 広瀬茂男, “索状能動体の研究:多関節体幹による連続曲線近似法,” 日本ロボット学会誌, vol. 26, no. 1, pp. 110–120, 2008.
- [9] M. Tanaka and K. Tanaka, “Control of a snake robot for ascending and descending steps,” *IEEE Trans. Robotics*, vol. 31, no. 2, pp. 511–520, 2015.
- [10] K. Kon, M. Tanaka, and K. Tanaka, “Mixed Integer Programming-Based Semiautonomous Step Climbing of a Snake Robot Considering Sensing Strategy,” *IEEE Trans. Control Systems Technology*, vol. 24, no. 1, pp. 252–264, 2016.

- [11] M. Tanaka, K. Kon, and K. Tanaka, “Range-sensor-based Semiautonomous Whole-body Collision Avoidance of a Snake Robot,” *IEEE Trans. Control Systems Technology*, vol. 23, no. 5, pp. 1927–1934, 2015.
- [12] M. Tanaka and F. Matsuno, “Modeling and control of head raising snake robots by using kinematic redundancy,” *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, vol. 75, no. 1, pp. 53–69, 2014.
- [13] T. Kamegawa, T. Baba, and A. Gofuku, “V-shift control for snake robot moving the inside of a pipe with helical rolling motion,” in *Proc. IEEE Int. Symp. Safety, Security and Rescue Robotics*, pp. 1–6, 2011.
- [14] 田中基康, 塚野洋章, 松野文俊, “円柱曲面上におけるヘビ型ロボットの滑落回避を考慮した軌道追従制御,” 計測自動制御学会論文集, vol. 48, no. 10, pp. 664–673, 2012.
- [15] A. Crespi and A. J. Ijspeert, “Online optimization of swimming and crawling in an amphibious snake robot,” *IEEE Trans. Robotics*, vol. 24, no. 1, pp. 75–87, 2008.
- [16] S. Toyoshima, M. Tanaka, and F. Matsuno, “A Study on Sinus-Lifting Motion of a Snake Robot With Sequential Optimization of a Hybrid System,” *IEEE Trans. Automation Science and Engineering*, vol. 11, no. 1, pp. 139 – 144, 2014.
- [17] P. Prautsch, T. Mita, and T. Iwasaki, “Analysis and control of a gait of snake robot,” *IEEJ Trans. Industry Applications*, vol. 120, no. 3, pp. 372–381, 2000.
- [18] F. Matsuno and K. Mogi, “Redundancy Controllable System and Control of Snake Robot with Redundancy based on Kinematic Model,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Decision and Control*, pp. 4791–4796, 2000.
- [19] F. Matsuno and H. Sato, “Trajectory Tracking Control of Snake Robots based on Dynamic Model,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 3029–3034, 2005.
- [20] M. Tanaka and F. Matsuno, “Control of Snake Robots with Switching Constraints: trajectory tracking with moving obstacle,” *Advanced Robotics*, vol. 28, no. 6, pp. 415–429, 2014.
- [21] F. Matsuno and K. Suenaga, “Control of Redundant 3D Snake Robot Based on Kinematic Model,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 2061–2066, 2003.
- [22] M. Yamakita, M. Hashimoto, and T. Yamada, “Control of Locomotion and Head Configuration of 3D Snake Robot (SMA),” in *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 2055–2060, 2003.

- [23] S. Ma, Y. Ohmameuda, K. Inoue, and B. Li, “Control of a 3-Dimensional Snake-like Robot,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 2067–2072, 2003.
- [24] M. Tanaka and F. Matsuno, “Cooperative control of two snake robots,” in *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 404–405, 2006.
- [25] M. Tanaka, K. Tanaka, and F. Matsuno, “Approximate Path-Tracking Control of Snake Robot Joints with Switching Constraints,” *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 20, no. 4, pp. 1633–1641, 2015.
- [26] M. Tanaka and K. Tanaka, “Shape Control of a Snake Robot with Joint Limit and Self-collision Avoidance,” *IEEE Trans. Control Systems Technology*, vol. 25, no. 4, pp. 1441–1448, 2017.
- [27] X. Wu and S. Ma, “CPG-based Control of Serpentine Locomotion of a Snake-like Robot,” *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 42, no. 16, pp. 705–710, 2010.
- [28] C. Wright, A. Buchan, B. Brown, J. Geist, M. Schwerin, D. Rollinson, M. Tesch, and H. Choset, “Design and Architecture of the Unified Modular Snake Robot,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 4347–4354, 2012.
- [29] T. Takemori, M. Tanaka, and F. Matsuno, “Gait Design of a Snake Robot by Connecting Curve Segments and Experimental Demonstration,” *IEEE Trans. Robotics*, vol. 34, no. 5, pp. 1384–1391, 2018.
- [30] A. Shapiro, A. Greenfield, and H. Choset, “Frictional Compliance Model Development and Experiments for Snake Robot Climbing,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 574–579, 2007.
- [31] F. Barazandeh, B. Bahr, and A. Moradi, “How Self-locking Reduces Actuators Torque In Climbing Snake Robots,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Advanced Intelligent Mechatronics*, pp. 1–6, 2007.
- [32] H. Date and Y. Takita, “Control of 3D snake-like locomotive mechanism based on continuum modeling,” in *Proc. ASME2005 Int. Design Engineering Technical Conference*, pp. 1351–1359, 2005.
- [33] K. Lipkin, I. Brown, A. Peck, H. Choset, J. Rembisz, P. Gianfortoni, and A. Naaktgeboren, “Differentiable and piecewise differentiable gaits for snake robots,” in *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems*, pp. 1864–1869, 2007.
- [34] R. L. Hatton and H. Choset, “Generating gaits for snake robots: annealed chain fitting and keyframe wave extraction,” *Autonomous Robots*, vol. 28, no. 3, pp. 271–281, 2010.

- [35] D. Rollinson and H. Choset, “Gait-Based Compliant Control for Snake Robots,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 5123–5128, 2013.
- [36] R. L. Hatton and H. Choset, “Sidewinding on Slopes,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 691–696, 2010.
- [37] C. Gong, M. Tesch, D. Rollinson, and H. Choset, “Snakes on an Inclined Plane: Learning an adaptive sidewinding motion for changing slopes,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Intelligent Robots and Systems*, pp. 1114–1119, 2013.
- [38] H. Ponte, M. Queenan, C. Gong, C. Mertz, M. Travers, F. Enner, M. Hebert, and H. Choset, “Visual Sensing for Developing Autonomous Behavior in Snake Robots,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 2779–2784, 2014.
- [39] P. Liljebäck, O. Stavdahl, K. Y. Pettersen, and J. T. Gravdahl, “Mamba - A Waterproof Snake Robot with Tactile Sensing,” in *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems*, pp. 294–301, 2014.
- [40] M. Travers, J. Whitman, P. Schiebel, D. Goldman, and H. Choset, “Shape-Based Compliance in Locomotion,” in *Proc. Robotics: Science and Systems*, 2016.
- [41] J. Sverdrup-Thygeson, E. Kelasidi, K. Y. Pettersen, and J. T. Gravdahl, “The Underwater Swimming Manipulator—A Bioinspired Solution for Subsea Operations,” *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 43, no. 2, pp. 402–417, 2018.
- [42] D. Rollinson and H. Choset, “Pipe Network Locomotion with a Snake Robot,” *Journal of Field Robotics*, vol. 33, no. 3, pp. 322–336, 2016.
- [43] M. Vespignani, K. Melo, M. Mutlu, and A. J. Ijspeert, “Compliant snake robot locomotion on horizontal pipes,” in *Proc. IEEE Int. Symp. Safety, Security Rescue Robotics*, pp. 1–8, 2015.
- [44] J. W. Burdick, J. Radford, and G. S. Chirikjian, “A ‘sidewinding’ locomotion gait for hyper-redundant robots,” *Advanced Robotics*, vol. 9, no. 3, pp. 195–216, 1995.
- [45] R. Yoshizawa, T. Kano, and A. Ishiguro, “Realization of Snakes’ Concertina Locomotion by Using ‘TEGOTAE-Based Control’,” in *Proc. 5th Int. Conf. Living machines 2016*, pp. 548–551, 2016.
- [46] X. Wu and S. Ma, “Neurally Controlled Steering for Collision-Free Behavior of a Snake Robot,” *IEEE Trans. Control Systems Technology*, vol. 21, no. 6, pp. 2443–2449, 2013.

- [47] A. Mohammadi, E. Rezapour, M. Maggiore, and K. Y. Pettersen, "Maneuvering Control of Planar Snake Robots Using Virtual Holonomic Constraints," *IEEE Trans. Control Systems Technology*, vol. 24, no. 3, pp. 884–899, 2016.
- [48] W. Qi, T. Kamegawa, and A. Gofuku, "Helical wave propagation motion for a snake robot on a vertical pipe containing a branch," *Journal of Artificial Life and Robotics*, vol. 23, no. 4, pp. 515–522, 2018.
- [49] C. Ye, S. Ma, B. Li, and Y. Wang, "Modular Universal Unit for a Snake-Like Robot and Reconfigurable Robots," *Advanced Robotics*, vol. 23, no. 7-8, pp. 865–887, 2009.
- [50] Z. Wang, Q. Gao, and H. Zhao, "CPG-Inspired Locomotion Control for a Snake Robot Basing on Nonlinear Oscillators," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 85, no. 2, pp. 209–227, 2017.
- [51] S. Ma, Y. Ohmameuda, and K. Inoue, "Dynamic analysis of 3-dimensional snake robots," in *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems*, pp. 767–772, 2004.
- [52] S. Ma, N. Tadokoro, and K. Inoue, "Influence of the gradient of a slope on optimal locomotion curves of a snake-like robot," *Advanced Robotics*, vol. 20, no. 4, pp. 413–428, 2006.
- [53] M. Sato, M. Fukaya, and T. Iwasaki, "Serpentine locomotion with robotic snakes," *IEEE Control Systems*, vol. 22, no. 1, pp. 64–81, 2002.
- [54] L. Zhu, Z. Chen, and T. Iwasaki, "Oscillation, orientation, and locomotion of under-actuated multilink mechanical systems," *IEEE Trans. Control Systems Technology*, vol. 21, no. 5, pp. 1537–1548, 2012.
- [55] T. Maneewarn and B. Maneechai, "Design of pipe crawling gaits for a snake robot," in *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Biomimetics*, pp. 1–6, 2008.
- [56] F. Barazandeh, B. Bahr, and A. Moradi, "How Self-locking Reduces Actuators Torque In Climbing Snake Robots," in *Proc. IEEE/ASME Int. Conf. Advanced Intelligent Mechatronics*, pp. 1–6, 2007.
- [57] H. Yamada, S. Takaoka, and S. Hirose, "A snake-like robot for real-world inspection applications (the design and control of a practical active cord mechanism)," *Advanced Robotics*, vol. 27, no. 1, pp. 47–60, 2013.
- [58] K. Kouno, H. Yamada, and S. Hirose, "Development of Active-Joint Active-Wheel High Traversability Snake-Like Robot ACM-R4.2," *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol. 25, no. 3, pp. 559–566, 2013.

- [59] L. Pfotzer, M. Staehler, A. Hermann, A. Roennau, and R. Dillmann, “KAIRO 3: Moving Over Stairs & Unknown Obstacles with Reconfigurable Snake-Like Robots,” in *Proc. European Conf. Mobile Robots*, pp. 1–6, 2015.
- [60] M. Tanaka, M. Nakajima, and K. Tanaka, “Smooth control of an articulated mobile robot with switching constraints,” *Advanced Robotics*, vol. 30, no. 1, pp. 29–40, 2016.
- [61] M. Tanaka, K. Tadakuma, M. Nakajima, and M. Fujita, “Task-Space Control of Articulated Mobile Robots With a Soft Gripper for Operations,” *IEEE Trans. Robotics*, vol. 35, no. 1, pp. 135–146, 2018.
- [62] M. Tanaka, M. Nakajima, Y. Suzuki, and K. Tanaka, “Development and Control of Articulated Mobile Robot for Climbing Steep Stairs,” *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 23, no. 3, pp. 531–541, 2018.
- [63] H. Komura, H. Yamada, and S. Hirose, “Development of snake-like robot ACM-R8 with large and mono-tread wheel,” *Advanced Robotics*, vol. 29, no. 17, pp. 1081–1094, 2015.
- [64] T. Takemori, M. Tanaka, and F. Matsuno, “Ladder Climbing with a Snake Robot,” in *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems*, pp. 1–9, 2018.
- [65] M. Tanaka and K. Tanaka, “Singularity Analysis of a Snake Robot and an Articulated Mobile Robot With Unconstrained Links,” *IEEE Trans. Control Systems Technology*, vol. 24, no. 6, pp. 2070–2081, 2016.
- [66] 吉川恒夫, ロボット制御基礎論. コロナ社, 1988.
- [67] S. Makita and W. Wan, “A survey of robotic caging and its applications,” *Advanced Robotics*, vol. 31, no. 19-20, pp. 1071–1085, 2017.

謝 辞

本研究を遂行するにあたり，長きに渡り適切な御指導と御助言を頂きました電気通信大学 情報理工学研究科 田中基康准教授に心より感謝申し上げます．本論文の執筆に当たって様々な御意見，御助言を頂きました電気通信大学 情報理工学研究科，明愛国教授，田中一男教授，横井浩史教授，金子修教授に深く感謝致します．

また，実験や議論をはじめ様々な協力をしていただいた京都大学 工学研究科 松野文俊教授，ともに研究活動に励んだ田中研究室の皆様感謝致します．

最後に，生活面で常に支えて頂きました両親に感謝の意を表し，本論文の締めくくりとさせていただきます．

関連論文の印刷公表の方法及び時期

- (1) 全著者名: Mizuki Nakajima, Motoyasu Tanaka, Kazuo Tanaka, and Fumitoshi Matsuno
論文題目: Motion control of a snake robot moving between two non-parallel planes
印刷公表の方法及び時期: Advanced Robotics, vol.32, no.10, pp.559-573, 2018.
(第 2, 4 章に関連)
- (2) 全著者名: Mizuki Nakajima, Motoyasu Tanaka, and Kazuo Tanaka
論文題目: Simultaneous Control of Two Points for Snake Robot and Its Application to Transportation
印刷公表の方法及び時期: IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 5, no. 1, pp. 111-118, 2020.
(第 2, 3 章に関連)
- (3) 全著者名: Mizuki Nakajima, Motoyasu Tanaka, and Kazuo Tanaka
論文題目: Motion design of a snake robot to pass through a door
印刷公表の方法及び時期: Proc. The Third International Symposium on Swarm Behavior and Bio-Inspired Robotics, pp. 205-208, 2019.
(第 3 章に関連)

参考論文の印刷公表の方法及び時期

- (1) 全著者名: Nobutaka Matsumoto, Motoyasu Tanaka, Mizuki Nakajima, Masahiro Fujita, and Kenjiro Tadakuma
論文題目: Development of a folding arm on an articulated mobile robot for plant disaster prevention
印刷公表の方法及び時期: Advanced Robotics, vol.34, no.2, pp. 89-103, 2020.
- (2) 全著者名: Motoyasu Tanaka, Kazuyuki Kon, Mizuki Nakajima, Nobutaka Matsumoto, Shinnosuke Fukumura, Kosuke Fukui, Hidemasa Sawabe, Masahiro Fujita, and Kenjiro Tadakuma
論文題目: Development and Field Test of the Articulated Mobile Robot T2 Snake-4 for Plant Disaster Prevention
印刷公表の方法及び時期: Advanced Robotics, vol.34, no.2, pp. 70-88, 2020.
- (3) 全著者名: Hidemasa Sawabe, Mizuki Nakajima, Motoyasu Tanaka, Kazuo Tanaka, and Fumitoshi Matsuno
論文題目: Control of an articulated wheeled mobile robot in pipes
印刷公表の方法及び時期: Advanced Robotics, vol.33, no.20, pp. 1072-1086, 2019.
- (4) 全著者名: Motoyasu Tanaka, Mizuki Nakajima, Masahiro Fujita, and Kenjiro Tadakuma
論文題目: Task-space Control of Articulated Mobile Robots with a Soft Gripper for Operations
印刷公表の方法及び時期: IEEE Transactions on Robotics, vol.35, no.1, pp.135-146, 2019.
- (5) 全著者名: Motoyasu Tanaka, Mizuki Nakajima, Yosuke Suzuki, and Kazuo Tanaka
論文題目: Development and Control of Articulated Mobile Robot for Climbing Steep Stairs
印刷公表の方法及び時期: IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol.23, no.2, pp.531-541, 2018.

- (6) 全著者名: Motoyasu Tanaka, Mizuki Nakajima, and Kazuo Tanaka
論文題目: Smooth Control of an Articulated Mobile Robot with Switching Constraints
印刷公表の方法及び時期: Advanced Robotics, vol.30, no.1, pp.29-40, 2016.
- (7) 全著者名: Fumitoshi Matsuno, Tetsushi Kamegawa, Wei Qi, Tatsuya Takemori, Motoyasu Tanaka, Mizuki Nakajima, Kenjiro Tadakuma, Masahiro Fujita, Yosuke Suzuki, Katsutoshi Itoyama, Hiroshi G. Okuno, Yoshiaki Bando, Tomofumi Fujiwara, and Satoshi Tadokoro
論文題目: Development of Tough Snake Robot Systems. In: Tadokoro S. (eds) Disaster Robotics.
印刷公表の方法及び時期: Springer Tracts in Advanced Robotics, vol. 128. Springer, Cham, 2019/1.

著者略歴

中島 瑞 （なかじま みずき）

2014 年 3 月 電気通信大学 情報理工学部 知能機械工学科 卒業

2014 年 4 月 電気通信大学大学院 情報理工学研究科 知能機械工学専攻
博士前期課程入学

2016 年 3 月 電気通信大学大学院 情報理工学研究科 知能機械工学専攻
博士前期課程修了

2016 年 4 月 Sony 株式会社 入社

2016 年 11 月 Sony 株式会社 退職

2017 年 4 月 電気通信大学大学院 情報理工学研究科 機械知能システム
学専攻 博士後期課程入学

2020 年 3 月 電気通信大学大学院 情報理工学研究科 機械知能システム
学専攻 博士後期課程修了

日本ロボット学会，日本機械学会会員．