

博士論文

車軸と体軸の差動を利用した

V字車輪型配管検査ロボットの開発

(Development of a Wheeled V-shaped In-pipe Robot Using
Differential Motion between Wheels and Body Axis)

2022年3月

立命館大学大学院理工学研究科

機械システム専攻博士課程後期課程

岡 義倫

立命館大学審査博士論文

車軸と体軸の差動を利用した

V字車輪型配管検査ロボットの開発

(Development of a Wheeled V-shaped In-pipe Robot Using
Differential Motion between Wheels and Body Axis)

2022年3月

March 2022

立命館大学大学院理工学研究科

機械システム専攻博士課程後期課程

Doctoral Program in Advanced Mechanical Engineering and Robotics

Graduate School of Science and Engineering

Ritsumeikan University

岡 義倫

OKA Yoshimichi

研究指導教員：馬 書根 教授

Supervisor : Professor MA Shugen

摘要

近年、配管設備の老朽化に伴い、管内の異常箇所を特定するための方法として狭い配管内を移動することができる配管内検査ロボットが注目されている。その中でも、連結車輪型と呼ばれる、細長くジグザグな形状を持ち、配管内のような狭隘環境を移動するのに適したロボットが存在する。このロボットは必要なアクチュエータを配管軸方向に直列に配置する構造により配管半径方向への小型化が容易となっている。また、V字に連結されたリンクと関節の開閉により配管内で突っ張り、垂直方向に移動することができる。

連結車輪型はその構造の特徴上、屈曲した配管を走行するには配管の屈曲方向とロボットの関節の屈曲方向が一致している必要がある。この問題を解決するため、既存のロボットは推進機能と旋回機能を有し、それぞれのために独立して動くアクチュエータが設けられている。しかし、必要アクチュエータ数が多いほど接続するリンク数が増加するため、ロボットの全長は長くなりがちである。また、屈曲部が連続した複雑な構造の配管を走行する場合、ロボットの全長は一つの問題となる。

そこで本論文では、1つの入力から複数の出力を取り出す劣駆動機構に着目し、推進機能と旋回機能のアクチュエータを共通化した配管内検査ロボットについて述べる。ロボットに必要なアクチュエータ数を削減し、少ないリンク数でロボットを構成することで、配管軸方向への小型化が可能となり、屈曲部が連続した配管への走破性の向上が期待できる。

本研究では、マイタギア機構の出力ギアの自転と公転動作を使ったシンプルな差動原理を応用することで、半球状の車輪を車軸とリンク軸の2つの軸周りに回転させられる劣駆動関節を提案した。また、この劣駆動関節を前後に2つ配置した2リンクV字構造で構成されたロボットを開発した。提案した機構はモータの回転を半球状車輪のロールとピッチの回転へと分配することができる。しかし、劣駆動機構では、出力分配比の調整に外力が必要になる。そこで本論文では、二つのモータの速度差を利用しロボットの姿勢を変える制御的アプローチ、およびワンウェイクラッチを用いて機械的な拘束を導入することで出力の切り替えを補助する機構的アプローチという二つの解決方法を提案しこの問題を解決する。

まず、一つ目のアプローチとして、2つのモータ間の速度差と回転方向の組み合わせから複数の異なる動作が生成される点に着目し、速度差によってロボットの姿勢が変形する原理を分析したのち、ロール関節を目標角度まで回転させるための変形手法を提案する。また、管内を螺旋回転によって移動する2リンク型の連結車輪型ロボットにおいて、螺旋ピッチ角とリンクのロール回転角度との関係を明らかにし、螺旋回転時の適切なロール関節回転角度を求める。

次に、二つ目のアプローチとして、ワンウェイクラッチを利用し車軸の回転方向を拘束することで、モータの回転方向の切り替えによって車輪のピッチとロール回転の選択が可能で新しい拘束付き差動機構を提案する。提案機構ではワンウェイクラッチが車軸の回転をロックする際の拘束力を外力として利用し、差動駆動の切り替えを行う。この機構を用いて、劣駆動機構における動力分配の調整に必要な動作を機構的に解決した新たなV字車輪型配管検査ロボットを開発する。

最後に、開発した劣駆動関節を有するロボットの配管内走行実験を行い、提案した制御的アプローチと機構的アプローチの有効性について検証した。制御的アプローチによる実験では、提案した手法の1つによりロール関節を目標値まで回転させ、ロボットの螺旋回転運動を可能にした。機構的アプローチによる実験では、新たに提案した拘束付き差動機構を有するロボットの旋回動作を含む基本的動作を水平及び垂直直管内で行ったのち、曲管内での走行性能を確認した。その後、実験で得られた結果から、従来の連結車輪型ロボットとの旋回動作を比較し、面外曲げ配管、T字管内における総合的な走行性能について実験的に評価した。その結果、従来の連結車輪型ロボットと比べ、開発したV字型のロボットのT字管内での走行性能は下がったものの、曲管に対する旋回性能及び面外曲げ配管での走行性能が上がる事が明らかとなった。

Abstract

In recent years, with an increase in aging infrastructure pipelines, in-pipe inspection robots that are able to travel in narrow pipes have been attracting attention of the scientific and industrial community as a way to identify abnormalities in pipelines. To contribute to the demand for such robots, an articulated wheeled in-pipe robot, which has a long and zig-zag shaped structure, has been developed. This robot can be easily miniaturized in radial direction by arranging the necessary actuators in series along the pipe's axial direction. In addition, the robot can travel through vertical pipes by closing its links and forming a V-shape while pressing the wheels against the pipe wall.

Due to the structural characteristics of an articulated wheeled in-pipe robot, usually the bending direction of bent pipes and the bending direction of the robot's joints need to be aligned. To achieve this function, existing robots have been equipped with actuators independently for a propulsion function and a rolling function. However, the greater the number of actuators required, the greater the number of links to be connected, which tends to increase the total length and diameter of the robot. The total length of the robot is one of the problems when it passes through pipes with complicated structures that have a series of bends in an out-of-plane direction. Therefore, this thesis focuses on an underactuated mechanism that produces multiple output by a single input. This mechanism aims to achieve propulsion and steering with only one single input. By reducing the number of required actuators and links, it is possible to reduce the robot length, which will improve the traveling performance in out-of-plane pipes.

In this study, based on a simple differential principle using the rotating and revolving motions of a pair of miter gears, an underactuated joint is proposed in which a hemispherical wheel that can rotate around its pitch axis and its roll axis. With this mechanism, a V-shaped robot, which can roll around the pipe axis using helical movement, is developed. The proposed mechanism can distribute the motor power to roll and pitch rotation of the hemispherical wheels. However, to change the output distribution ratio, an external force is required. Therefore, this study proposes two methods: a control-based approach to change the robot's posture by using the speed difference between the two motors installed in the robot, and a mechanical approach to assist the output switching by adopting a mechanical constraint using a one-way clutch. The validity of the proposed mechanism is examined by experiments.

The first approach focused on the physical phenomenon that several different motions are generated from the combination of the speed difference between two motors and the direction of rotation. Based on this, three types of transformation methods that are considered effective for rotating the roll joint are presented. In addition, to obtain the appropriate roll joint angle during the helical rolling movement, the relationship between the elevation angle of the helical motion and the roll angle is

clarified.

In the second approach, a novel constrained differential mechanism is proposed, that can select between pitch and roll rotation of the wheels by switching the rotational direction the motor. The proposed mechanism utilizes the constraint force of the one-way clutch to switch two outputs of the differential mechanism. A new V-shaped in-pipe robot with this constrained differential mechanism is developed, which mechanically solves the drawback of underactuated joints.

Finally, experimental verification is conducted for each of two proposed methods described above. In this part, the traveling and steering performances of the proposed robot in straight, bent, T-branch pipes as well as vertical sections are evaluated by prototypes. From the results, although it was found that the traveling performance for T-branch pipes of the developed V-shaped robot was lower than that of the conventional robots, the robot has improved the traveling and steering performance for bend and out-of-plane pipes.

目次

| | |
|-------------------------------------|-----------|
| 第 1 章 序論 | 1 |
| 1.1 研究背景 | 1 |
| 1.2 既存研究 | 1 |
| 1.2.1 配管検査ロボットの移動形態 | 1 |
| 1.2.2 車軸と関節軸が同軸上にない場合 | 2 |
| 1.2.3 車軸と関節軸が同軸上にある場合 | 3 |
| 1.3 研究目的 | 8 |
| 1.4 本論文の構成 | 10 |
| 第 2 章 V 字車輪型配管検査ロボットの機構 | 11 |
| 2.1 ロボットの機構 | 11 |
| 2.2 マイタギアを利用した差動原理 | 12 |
| 2.3 ロボットの運動学 | 14 |
| 第 3 章 劣駆動関節の制御手法 | 17 |
| 3.1 モータ間の速度差を利用した姿勢変形手法 | 17 |
| 3.1.1 差動機構の運動学 | 17 |
| 3.1.2 速度差によるロボットの変形原理 | 18 |
| 3.1.3 姿勢変形のための動作生成手法 | 20 |
| 3.2 最小螺旋ピッチ角の導出 | 21 |
| 3.2.1 螺旋ピッチ角の定式化 | 22 |
| 3.2.2 制約条件の定式化 | 22 |
| 3.2.3 螺旋ピッチ角とリンク回転角度の導出 | 24 |
| 第 4 章 ワンウェイクラッチを利用した拘束付き差動機構 | 29 |
| 4.1 ロボットの機構 | 29 |
| 4.2 半球車輪の設計 | 32 |
| 第 5 章 実機実験 | 37 |
| 5.1 速度差を利用したロボットの姿勢変形実験 | 37 |
| 5.1.1 実験環境 | 37 |
| 5.1.2 実験結果 | 38 |
| 5.2 拘束付き差動機構を有するロボットの走行実験 | 43 |
| 5.2.1 水平・垂直直管内走行実験 | 44 |
| 5.2.2 水平曲管内走行実験 | 46 |
| 5.2.3 垂直曲管内走行実験 | 47 |

| | | |
|------------|------------------|-----------|
| 5.3 | 考察 | 49 |
| 5.3.1 | 旋回性能の比較 | 49 |
| 5.3.2 | 曲管での走行性能 | 49 |
| 5.3.3 | 面外曲げ配管での走行性能 | 50 |
| 5.3.4 | T字配管での走行性能 | 54 |
| 第6章 | 結論と今後の課題 | 57 |
| 6.1 | 結論 | 57 |
| 6.2 | 今後の課題 | 58 |
| 6.2.1 | 車輪とピッチ関節の能動化 | 58 |
| 6.2.2 | 面外曲げ配管の走行理論の構築 | 60 |
| 6.2.3 | モジュール化の検討 | 60 |
| | 参考文献 | 65 |
| | 研究業績 | 69 |
| 付録A | ベクトルを用いた差動機構の運動学 | 71 |
| 付録B | モータのPID速度制御 | 73 |
| B.1 | ブロック線図 | 73 |
| B.2 | 電子回路 | 73 |
| B.3 | 計測結果 | 73 |

目次

| | | |
|------|---|----|
| 1.1 | Image example of multi-module in-pipe robots with expandable arm and linkage. | 2 |
| 1.2 | Robot's orientation for traveling a bend pipe | 4 |
| 1.3 | Various configurations of multilink articulated in-pipe robots with a zig-zag structure | 4 |
| 1.4 | Overview of an out-of-plane double elbow. | 8 |
| 2.1 | Overview of the proposed V-shaped robot | 11 |
| 2.2 | Cross-sectional view of the robot. | 12 |
| 2.3 | Rotational axes of the robot | 12 |
| 2.4 | Principle and practical motions of the proposed underactuated mechanism. | 13 |
| 2.5 | Schematic diagram of the proposed underactuated mechanism visualized as a hydraulic system. The differential mechanism generates two outputs (roll joint and wheel) from the rotation of a single motor. The sum of the rotation of the roll joint and the wheel is equal to the rotation of the motor. | 13 |
| 2.6 | Kinematic model of the robot | 14 |
| 2.7 | Basic posture of the vector diagram | 15 |
| 3.1 | Diagram of a differential gear mechanism with a single pair of miter gears. | 18 |
| 3.2 | Expected motions when the two motors operate at different speeds (R_w denotes the wheel radius) | 19 |
| 3.3 | Possible combinations of motor velocity for transformation of the robot including the driving direction \textcircled{a} – \textcircled{c} and absolute velocity $\textcircled{1}$ – $\textcircled{3}$ | 20 |
| 3.4 | Three selected methods of rotating the roll joints | 20 |
| 3.5 | Wheel trajectory during the helical movement in a pipe | 22 |
| 3.6 | Variation of the axle in a pipe | 23 |
| 3.7 | Different posture of the robot with γ_0 | 25 |
| 3.8 | Visual model of the robot with optimized parameters | 26 |
| 3.9 | Visual model of the robot on YZ plane (without wheels) | 26 |
| 3.10 | Visual model of the robot on YZ plane (with wheels) | 27 |
| 3.11 | Visual model of the robot on the cross-sectional plane (XY plane) | 27 |

| | | |
|------|---|----|
| 4.1 | Overview of proposed robot AIRo-3.1. | 29 |
| 4.2 | CAD model of the proposed robot | 30 |
| 4.3 | Schematic conceptual drawing of the proposed underactuated mechanism (example of front motor) visualized as a hydraulic system: (a) Unconstrained flow, (b) Constrained flow. | 31 |
| 4.4 | Two types of movement generated by changing the rotational direction of the motor | 32 |
| 4.5 | Movement sequence of robot: (a) Forward movement, (b) Rolling movement around the pipe axis, and (c) Backward movement (see attached video). | 33 |
| 4.6 | Restricted space and configuration of hemispherical wheel in a pipe: (a) Normal posture at initial position, (b) Normal posture after half rotation of roll joint. | 34 |
| 4.7 | Transition of hemispherical wheel by roll joint: (a) Lifting phase (b) Rolling phase (c) Recovery phase | 34 |
| 5.1 | Overview of the control system. | 38 |
| 5.2 | Schematic diagram of the control system. | 38 |
| 5.3 | Overview of 4-inch straight and bend pipes. | 39 |
| 5.4 | Posture transformation with method (A). | 40 |
| 5.5 | Posture transformation with method (B) (motion changed at 8.5 sec) | 40 |
| 5.6 | Posture transformation with method (C) | 42 |
| 5.7 | Comparison of measured velocity differences with method (C) | 42 |
| 5.8 | Experimental result for method (C) | 43 |
| 5.9 | Experimental result of the helical movement with method (C) | 43 |
| 5.10 | Forward and backward movements of the robot in a horizontal pipe. | 44 |
| 5.11 | Forward and backward movements of the robot in a vertical pipe | 44 |
| 5.12 | The orientation angle generated by a half rotation of the roll joints. | 45 |
| 5.13 | Rolling movement of the robot in a horizontal pipe. | 45 |
| 5.14 | Negotiating a horizontal bend pipe from the against orientation with the rolling movement. | 46 |
| 5.15 | Negotiating a horizontal bend pipe from the against orientation with the rolling movement | 47 |
| 5.16 | Experimental result in a vertical bend pipe. | 48 |
| 5.17 | Experimental result in a vertical bend pipe with a climbing motion. | 48 |
| 5.18 | Three orientation patterns of the robot for passing through an out-of-plane double elbow. | 51 |
| 5.19 | Experimental result of the proposed robot in an out-of-plane double elbow (Success example of pattern 2). | 51 |
| 5.20 | Experimental result in an out-of-plane double elbow. | 53 |
| 5.21 | Experimental result in an out-of-plane double elbow with a climbing motion. | 53 |
| 5.22 | Two different type of T-branch pipes. | 54 |

| | | |
|------|---|----|
| 5.23 | Experimental result in a T-branch pipe with edge corner. | 55 |
| 5.24 | Experimental result in a T-branch pipe. | 55 |
| 5.25 | Experimental result in a T-branch pipe with a different direction. . . | 56 |
| 6.1 | Two kinds of torsion springs with different diameters. | 59 |
| 6.2 | In-pipe robot with a active pitch joint using Series Elastic Actuator (Example of the one-linked model). | 60 |
| A.1 | Vector analysis of a differential gear mechanism with a single pair of miter gears. | 71 |
| B.1 | Block diagram of for the velocity control of the motor. | 73 |
| B.2 | Circuit of the control system. | 74 |
| B.3 | Wiring diagram of the control system. | 75 |
| B.4 | Velocity control test of the motor. | 76 |

表 目 次

| | | |
|-----|---|----|
| 1.1 | Existing multilink articulated in-pipe robots with a zig-zag structure. | 7 |
| 3.1 | Parameters for the optimization | 24 |
| 4.1 | Dimensions of robot | 35 |
| 5.1 | Experimental results for the out-of-plane double elbow (10 trials in each pattern). | 52 |

第 1 章 序論

1.1 研究背景

日本の高度経済期以降、急速にインフラ設備等の拡大が行われたことにより配管設備の需要が高まっている。現在においても、配管設備は様々な場所で我々の生活を支えており、プラント設備等の産業設備だけではなく、都市ガスや水道など多くの場に存在している。しかしその一方で、耐用年数を超過した配管は多数存在し、時間経過による錆、腐食、キズ等の劣化が進行している [1]。また、これらが原因で引き起こされる配管内部を通る物質の汚染や配管の破裂などの問題は人間の生活に大きな影響を及ぼす。そのため、超音波や磁気を利用した肉厚測定機器や CCD(charge-coupled device) カメラなどを用いた配管の定期的な保守点検が非常に重要な役割を担っている。しかし、手作業による配管の検査には時間と労力がかかる上、地中や高所に設置された配管は検査を行うことが困難である。このような背景から、近年ではロボットにカメラを搭載し配管の内部から検査を行う非破壊検査技術 (NDT: Non Destructive Testing) への関心が高まり、特に、自立的に配管内を検査可能なロボットの開発が様々な企業や研究教育機関によって進められている。

1.2 既存研究

ここでは、従来の配管検査ロボットに関して、その移動形態について分類したのち、その研究および技術状況について述べる。

1.2.1 配管検査ロボットの移動形態

現在では、多様なロボットの移動形態が提案され、それらを大まかにまとめると、歩行型 [2]、蛇行運動型 [3]、蠕動運動型 [4][5][6]、車輪・クローラ型 [7]-[25] に大別することができる。歩行型としては、複数の脚により配管内で突っ張りながら移動を行うロボットが報告されている [2]。しかし、脚機構による移動は制御が複雑化しやすく、機構も大型化しやすいため報告例が少ない。蛇行運動型は生物の蛇の特徴を模倣して開発され、複数の体節からなる細長い体幹を活かし、直列に配置されたアクチュエータを波を作るように左右にくねらせ配管内を移動する [3]。蠕動運動型はミミズのようにくびれるような動きを模倣し、直列に配置されたアクチュエータを伝播性の収縮波をつくるよう交互に動かすことで移動する [4][5][6]。そして、後述する車輪・クローラ型は、車輪やクローラの無限回転を利用して配管内を移動する形態であり、これらの駆動部を配管内壁面に押し付けて移動をする。蛇行運動や蠕動運動型は、波を生成する周期を変えることで移動速度を上げることが可能だが、一

一般的には無限回転方式によって配管内を移動する車輪・クローラ型のロボットの方が移動速度を速くしやすい。また、車輪・クローラ型は直進するための制御であれば容易に実装できるため、開発例も多い。

そこで、前述したような多様な移動形態が提案される中、移動速度が速い車輪・クローラ型の移動形態を採用し、配管内という狭く細長い狭隘環境を移動するため、配管軸方向に直列に駆動部を配置し関節により連結した多関節の配管検査ロボットの開発例が多数報告され始めている。配管軸方向に連結するこの構造は、必要に応じて追加の推進機構や検査に必要となるセンサ、また、通信・バッテリー等を搭載したものをモジュールとして追加しやすく、検査対象や走行環境、走行距離に適応しやすいため、実用化に向けての期待が高まっている。また、複数のアクチュエータが同じ機能を発揮することでその駆動力を積極的に干渉させることができ、全駆動力系を出来るだけすべて駆動することによって出力パワーを増大化させることができる。この設計法は干渉駆動 (Coupled Drive)[28] とも呼ばれ、これにより搭載すべきモータの最大出力パワーを低く抑えることができ、ロボット全体の軽量化を図ることができる。

多関節配管検査ロボットは車軸と関節軸が同軸上にある場合とない場合に分けることができる。そこで、次項ではそれぞれのタイプのロボットについて詳しく紹介していく。

1.2.2 車軸と関節軸が同軸上でない場合

一般的に、配管内を検査するロボットには推進機能・経路選択機能・突っ張り機能の3つ機能が必要となる。経路選択機能は分岐管内を移動する場合に必要となり、突っ張り機能は垂直に設置された配管を移動する場合に必要となる。特に、車輪やクローラなどの回転によって推進する移動形態においては、回転する駆動部を配管内壁面に押し付ける機構は推進力にも影響するため、いかに推進機構と突っ張り機

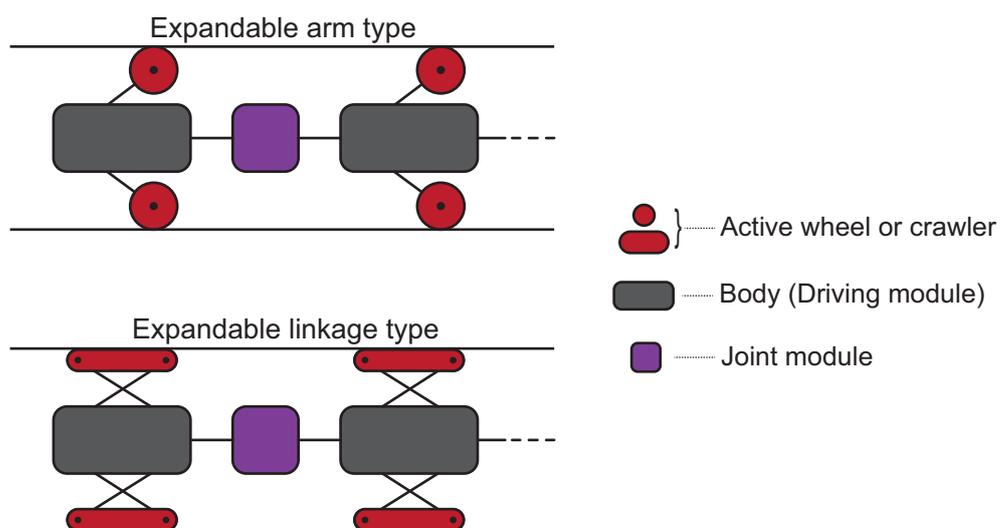


図 1.1: Image example of multi-module in-pipe robots with expandable arm and linkage.

構の設計をするかはロボットの小型化にもかかわる重要なファクターである。従来の多関節配管検査ロボットがもつ突っ張り機構の分類については、文献 [19] にて行われ、これらは主に、配管軸周りに並行に配置された車輪等の駆動部を配管軸から壁面方向に押し付けるタイプと、複数のリンクが直列に連結されたジグザグ構造を持つタイプに大別される。これらの構造の違いとして、車軸と関節軸が同軸上にならない場合かある場合かで判別することができる。そこでまず、ここでは前者の車軸と関節軸が同軸上にならない場合のロボットについて述べる。

このタイプのロボットは、スライダクランク機構やパンタグラフ機構によって能動車輪やクローラを壁面に押し付け回転させることで推進力を得る。この押し付け機構のイメージとして図 1.1 にその一例を示す。

まず、その一つ目の例として、Schempf らが進める Explore プロジェクトでは、直径 6 インチから 8 インチ (配管内径約 150[mm] から 200[mm]) のガス管での走行を対象とし、バッテリー・センサ・無線モジュールを搭載したロボットが開発されている [7]。また現在では、カナダの Pipetel Technologies 社がこのロボット開発を行っている [8]。

韓国の成均館 (せいきんかん, ソンギュンガン) 大学の Choi らがやっているプロジェクトでは、MRINSPECT と呼ばれる配管検査ロボットが開発されている。直近では、MRINSPECT VII+ と呼ばれるバッテリー・コントローラを内蔵した自立移動型の配管検査ロボットが報告され、このロボットは 4 つの推進モジュール、7 つの関節モジュール、そしてセンサモジュールとバッテリーモジュールを 2 つずつ有し、内径 200[mm] のガス管での走行を対象としている [9]。推進モジュールは Choi らが提案する 2-2D differential gear mechanism [10][11] と呼ばれる特殊な遊星歯車機構を用いた差動原理により、単一のブラシレス DC (BLDC) モータの入力トルクを 4 つの駆動輪へ出力することができる。また、このロボットはスライダクランク機構によりアームの開閉を行い、アーム先端に取り付けられた駆動輪を壁面に押し付ける。

クローラを用いた移動形態では、配管軸周りに 120 度間隔で配置された能動クローラをスライダクランク機構によって壁面に押し付けて移動するロボットが漢陽 (ハニャン) 大学で開発されている [12]。このロボットは 2 つの推進モジュールをバネのみで接続したシンプルな構造を有し、内径 80–100[mm] の配管を対象としている。

しかし、車軸と関節軸が同軸上にならないタイプは配管軸周りに並行に駆動部を配置するため、曲管を走行する際には内輪差が生じ、各車輪もしくはクローラの回転速度を制御する必要がある。また、配管軸に対して垂直に駆動部を押し付ける必要があるため、機構が複雑になりやすく、大型化しやすい。そこで、次項で解説する、複数のリンクを配管軸方向へ直列にジグザグ上に連結したタイプの配管検査ロボットが注目されている [13]–[23]。

1.2.3 車軸と関節軸が同軸上にある場合

ジグザグ構造を有するタイプのロボット (以下、連結車輪・クローラ型配管検査ロボットと呼ぶ) は、配管軸と垂直な回転軸を持つ関節によって 2 つのリンクをつなげた V 字構造により配管内で突っ張るため、リンク端点部分に車輪などの駆動部を配置し、その車軸と関節軸を同軸上に設計することができる。これにより、配管半径

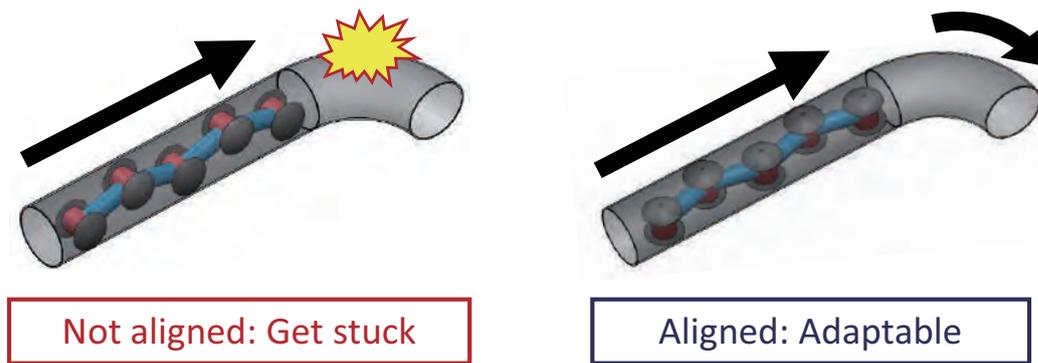
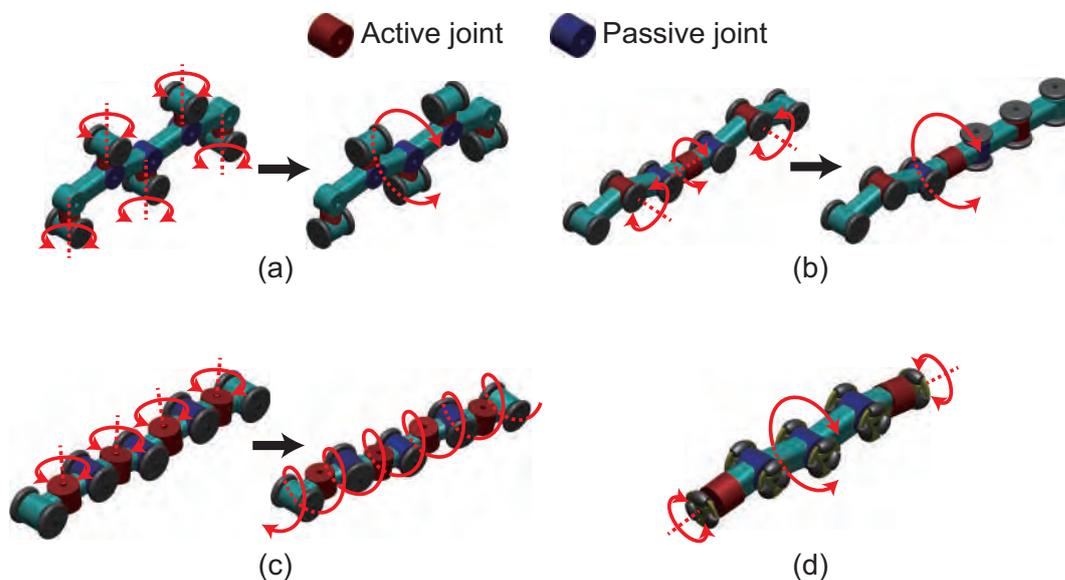


図 1.2: Robot's orientation for traveling a bend pipe



© 2018 IEEE

図 1.3: Various configurations of multilink articulated in-pipe robots with a zig-zag structure

方向に対して省スペースな設計が可能になるため、小型化が比較的容易であるという利点を持つ。また、複数の V 字部を組み合わせることで、突っ張り状態を維持しながら T 字管を走行することもできる [20]。

図 1.2 で示すのは曲管に進入する際の連結車輪型ロボットの配管軸周りの姿勢と配管の屈曲方向の関係である。このタイプのロボットはリンクを曲げることで配管内で二次元平面的に突っ張るため、リンクを曲げている関節の回転方向が配管の屈曲方向に合わなければ幾何学的に拘束されてしまい走行できない特徴を有している。しかし、これは欠点ではなく、配管の途中で穴が空いている場合や、T 字管へ進入する際に曲がらず直進する場合などにおいて有効な移動形態である。この理由から、ジグザグ構造の連結車輪・クローラ型のロボットはいずれも旋回機能を有する。現在では、連結車輪型ロボットにおいて図 1.3 に示すように多様な旋回方法が提案されている [24]。

図 1.3 中 (a) のタイプに分類されるものとして、アメリカの Foster-Miller 社で開発されたロボット (RoboScan) が挙げられる [13]. このロボットは、車軸をヨー軸まわりに回転させ、その後車輪を駆動させることでロボットの配管軸周りに回転させる。ただし、このロボットは 16 インチから 20 インチ (公称 18 インチ) の配管を対象としているため大型である。

(b) のタイプとしては、オランダの Twente (トゥエンテ) 大学で Dertien らによって開発されたロボット (PIRATE series) が挙げられる [14]. このロボットは、配管軸と垂直な軸 (以下、ピッチ軸) 周りと配管軸周りに回転可能な能動関節を有し、ロボットが旋回動作を行う際、まずピッチ関節により後部のジグザグ形状を引き伸ばし、ロール関節により後部を配管軸周りに回転させる (図 1.3(b) 右). このとき、前部はジグザグ形状を維持し管内での突っ張りを維持している。その後、後部を突っ張らせ、前部に対しても同様の動作を行うことでロボットの姿勢を配管軸周りに回転させる。

(c) に分類されるものでは、広瀬らによって東京工業大学と日本の Hibot 社から開発されたロボット (PIPETRON-I, PIPETRON-II) が存在する [16]-[18]. このロボットは、ヨー軸周りに回転可能な能動関節を有し、配管軸方向に対して車輪が斜めに進むよう各車輪の車軸をヨー軸周りにわずかに回転させることで、前進時にロボットが螺旋回転運動を行いながら旋回することができる。また、このロボットは 2 本一対のワイヤを体幹に沿って内部に取り付けており、ロボットの後ろに取り付けられた牽引ユニット内部の DC モータによってワイヤの張力を調整することで車輪の壁面への押し付けとヨー軸周りの回転を行う。

最後に (d) のタイプとしては、前述したトゥエンテ大学のオムニホイールを用いたロボット [15] と、筆者の所属する立命館大学の生物知能機械学研究室で開発されたロボット (AIRo series) が挙げられる [19][20]. これらのロボットの共通点は、リンク軸もしくは配管軸周りに回転する能動車輪と、ピッチ軸周りに回転する能動車輪 (オムニホイール) を持つ点である。トゥエンテ大学のロボットはピッチ軸と配管軸周りに能動回転するオムニホイールを使用し、ロボットの配管軸周りの回転を実現している。一方、立命館大学のロボットはピッチ軸周りに能動回転するオムニホイールと、ピッチ軸周りには受動回転をしリンク軸周りに能動回転する半球状の車輪 [26] を使用しホロノミックにロール回転が可能なロボットを開発している。また、現在では SEA (Series Elastic Actuator) [21] と呼ばれる直列弾性アクチュエータを採用した能動ピッチ関節をもつロボット (AIRo-5.1) が開発され、垂直部を含めた T 字管での走行を可能にしている [20].

また、近年では移動形態にクローラを用いた例も報告されており、インドの IIT Hyderabad (International Institute of Information Technology, Hyderabad) 大学で開発された 3 つの推進モジュールを連結したロボット (CoCrIP) がその例として挙げられる [22][23]. このロボットは omni-crawler [27] と呼ばれる、履帯の無限回転による前後推進および中央回転軸の駆動による左右方向への移動によって全方位に移動が可能なクローラ機構から着想を得たクローラ推進モジュールを連結している。この機構により、クローラをロール軸方向に回転させることでロボットを配管軸周りに回転させることが可能である。また、このロボットは SEA を採用した能動ピッチ関節によりクローラ部を壁面に押し付け垂直管や曲管を走行する。

前述した連結車輪・クローラ型のロボットについて、内径 125[mm] までの小口径

な配管での走行を対象にしたものに関し、リンク数、全長、対応配管径をまとめたものを表 1.1 に示す。この表で示すように、必要な機能に応じて配管軸方向にリンクを連結するため、既存のロボットは全長が長くなりがちである。

表 1.1: Existing multilink articulated in-pipe robots with a zig-zag structure.

| Robot | Joint type | Number of links (actuators) | Total length [mm] | Adaptive pipe diameter [mm] |
|--------------------|-----------------------|-----------------------------|-------------------|-----------------------------|
| PIRATE series [14] | A-P & A-R | 7 (5) | 670 | 75 |
| PIRATE series [15] | P-P & A-R | 5 (6) | 470 | 125 |
| PIPETRON-I [18] | A-P & A-Y (Tendon) | 6 (7) | 2450 | 75 |
| PIPETRON-II [18] | P-P & A-Y | 4 (8) | 550 | 75 |
| CoCrIP [23] | A-P & P-P & A-R | 2 (11) | 540 | 75 |
| AIRo-2 series [19] | P-P & A-R | 4 (4) | 550 | 100 |
| AIRo-5.1 [20] | A-P & P-P & A-R | 4 (6) | 510 | 100-125 |

Note: A-R: Active roll, P-P: Passive pitch, A-P: Active pitch, A-Y: Active yaw.

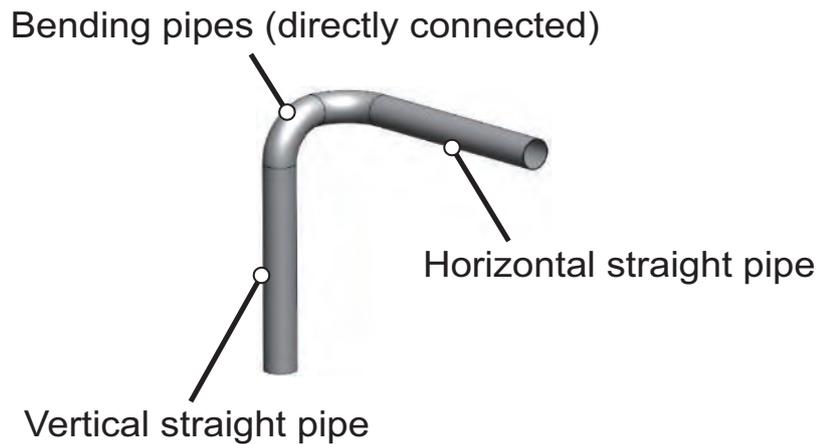


図 1.4: Overview of an out-of-plane double elbow.

連結車輪・クローラ型ロボットは関節の屈曲方向と配管の屈曲方向を合わせなければ走行できないため、全長が長い場合、図 1.4 で示すように 2 つの曲管が面外曲げ方向に連結された配管 (以下、面外曲げ配管 (out-of-plane double elbow) と呼ぶ) での走行が困難となる。この種の配管を走行するロボットの例としては、中央大学の中村らが開発した 1 インチ管の走行を対象にした蠕動運動型配管検査ロボット [5][6] と、Hibot 社が開発した 6 インチ管を対象にしたロボット (THESBOT-Dual)[25] が存在する。中央大学のロボットは、複数の空気圧で伸縮する人工筋アクチュエータをコイルバネとゴムを使用した受動弾性関節により接続し、極めて径の小さい配管での移動に適している。また、Hibot 社のロボットは、ユニバーサルジョイントにより推進モジュールを連結することで、複雑な形状をした連続曲管内での走行を可能にしている。この推進モジュールは空気圧により駆動輪を配管内壁面に押し付けて推進力を得る。

上述したロボットはいずれも柔軟に変形する受動関節を用いて推進用のアクチュエータもしくはモジュールを連結している。連結車輪・クローラ型のロボットは、配管半径方向への小型化や T 字管走行を可能にする一方、ピッチ関節がジグザグに連結された構造であるため、複数の曲管が面外に曲がるように接続された場合では幾何学的に走行できない。ロボットの突っ張り機能は V 字状に接続された 2 リンクが複数連結し、ジグザグ構造を成すことで実現されている。そのため、連結車輪・クローラ型のロボットが面外曲げ配管を走行する場合、突っ張り機能を担うジグザグ部分の最小構成単位である 2 リンク V 字構造が面外曲げ方向に移動するための推進機能と旋回機能を担い走行する必要がある。

1.3 研究目的

前節では、連結車輪・クローラ型の配管検査ロボットに関して、ロボットに機能を追加することによりリンク数が増加しロボットの全長が伸びることで起こる問題について述べた。配管軸方向にリンクを直列に配置するジグザグ構造は配管半径方向への小型化を容易にする一方、配管軸方向への小型化は困難になるためトレードオフの関係にある。また、単純な多自由度化はロボット重量の過大な増加を招く。その

ため、いかに機能を損なわずに機構の簡略化や必要アクチュエータ数を減らせるかどうかはロボットの小型軽量化に大きく影響し、配管内という空間制約のある環境を移動するロボットにとって避けられない課題である。この問題を解決する一つの設計法として、ロボットの関節の能動自由度に対し少ないアクチュエータ数で動作を実現する劣駆動機構 (Underactuated mechanism) が挙げられる。この機構はアクチュエータの数が全能動自由度に比べて少なく済むため、製作コストや重量、制御量の点で優れていると言える。しかし、入力数が能動自由度よりも少なくなる劣駆動機構は動力分配の比率を変えるために外力を必要とする場合が多く、動作が外部環境に依存しやすい。また、遊星歯車などの特殊な機構を使用した場合には機構が複雑になり、ロボットの大型化を招く。

そこで、本研究では、一对のマイタギアにおいて、出力ギアの自転と公転動作を使ったシンプルな差動原理を応用し、半球状の車輪を車軸とリンク軸の2つの軸周りに回転が可能な劣駆動機構を提案する。半球車輪を車軸とリンク軸回転方向の両方に駆動できれば推進と旋回の動作に必要なパワーを同じモータで賄うことができる。単に推進や旋回用のアクチュエータの数を減らすだけではロボットの性能の低下を招くが、提案機構では限られたすべてのアクチュエータを推進機能と旋回機能の両方に利用することができ、駆動力を最大限に活用できる。本研究では、この半球車輪を前後に配置した2リンクV字構造で構成されたロボットを開発し、その走行性能を総合的に評価することを目的とする。連結車輪型の最小構成単位であるV字構造での走行性能を示すことにより、劣駆動機構によるアクチュエータの共通化が連結車輪型配管検査ロボットの配管軸方向への小型化に向けた可能性を有することを示す。

しかし、前述したように、劣駆動機構は動作の切り替えに外力を必要とし、配管内のような単調な構造の空間内でこれを行うのは困難である。そこで、本論文では、制御面と機構面から二つのアプローチを行う。一つ目は、ロボットに搭載した二つのモータに速度差を発生させ、その内力と配管内の拘束空間を利用してロボットの劣駆動関節を回転させる制御的なアプローチである。このアプローチでは、2つのモータ間の速度差と回転方向の組み合わせから複数の異なる動作が生成される点に着目し、速度差によってロボットの姿勢が変形する原理を分析したのち、ロール関節を目標角度まで回転させるための変形手法を提案する。また、配管内でロボットが最小螺旋ピッチを描きながら螺旋回転運動をする際に目標値となるロール関節回転角度を、配管内空間とロボットの幾何学関係から最適化問題を解くことで求める。

二つ目は、ワンウェイクラッチを用いて機械的な拘束を導入し、劣駆動関節の回転方向に制限をかけることで出力の切り替えを補助する機構を提案する機構的なアプローチである。このアプローチでは、半球車輪の車軸にワンウェイクラッチを取り付けその拘束力を利用することで、モータの回転方向の切り替えで劣駆動関節を回転させる機構的なアプローチを提案する。また、その機構をもつ新たなV字型のロボットの開発を行う。

これら二つのアプローチにより、劣駆動関節を回転させることが可能か実験的に検証する。さらに、開発した劣駆動関節を有するロボットの基本動作の確認と従来の連結車輪型ロボットとの走行性能の比較をするため、水平及び垂直直管、曲管、面外曲げ配管、T字管内でそれぞれ走行実験を行い、ロボットの総合的な走行性能について評価する。

1.4 本論文の構成

本論文は「車軸と体軸の差動を利用したV字車輪型配管検査ロボットの開発」と題し全7章で構成する。

第1章「序論」では、本研究の背景と目的を述べた。ここでは、近年の社会インフラの経年劣化が深刻な社会問題として取り上げられていることを述べ、点検作業の省力化の観点から配管検査ロボットへの関心が高まっていることを示した。またその中でも、連結車輪型の配管検査ロボットとそのロボットが持つ特徴について述べ、配管軸方向にリンクを連結する構造は複数の屈曲部を持つ配管設備ではロボットの全長が障壁になるため、必要アクチュエータ数の削減が必要であることを示した。

第2章「V字車輪型配管検査ロボットの機構とその設計」では、本研究で開発した劣駆動機構について、一对のマイタギアを使用した差動原理とその機構を有するロボットの構造をそれぞれ解説する。

第3章「劣駆動関節の制御手法」では、まず、差動駆動によって回転するロール関節をどのようにして回転させるのか、劣駆動関節を有効に使うために制御面からアプローチを行う。提案する差動機構は外力が加えられない限りピッチとロールの2つの回転の出力比を変えることができない。そこで本章では、ロボットに搭載された2つのブラシ付きDCモータの速度差を利用することで劣駆動関節を回転させる。また、配管内でロボットが最小螺旋ピッチを描きながら螺旋回転運動をするためのロール関節回転角度を配管内空間とロボットの幾何学関係から最適化問題を解くことで求める。

第4章「ワンウェイクラッチを利用した拘束付き差動機構」では、ワンウェイクラッチによる機械的な拘束を利用し、モータの回転方向の切り替えだけで劣駆動関節を回転させる方法によって機構面からのアプローチを行う。ワンウェイクラッチにより差動機構に意図的に制約を設け、ワンウェイクラッチが車軸の回転を止める際の摩擦力を外力として利用し、モータの回転方向の切り替えで車輪とロール関節の出力比の切り替えを行うことができる機構を提案する。

第5章「実機実験」では、本論文で提案する劣駆動関節を有するロボットについて配管内での走行実験を行い、制御的アプローチと機構的アプローチの有効性について検証する。その後、上述した二つのアプローチについて得られた実験結果について考察したのち、面外曲げ配管およびT字配管で走行実験を行い、提案するロボットの走行性能を総合的に評価する。

第6章「結論と今後の課題」では、本研究で得られた結論を述べるとともに、残された課題と今後の展望について述べる。

第2章 V字車輪型配管検査ロボットの機構

本章では、本研究で提案する一对のマイタギアの差動原理を応用した劣駆動機構について、ロボットの機構とその差動駆動の原理について解説する。

2.1 ロボットの機構

V字車輪型配管検査ロボットは図2.1のように、1つの受動弾性ピッチ関節を介して2つのリンクで構成されている。中央の半球車輪は受動車輪であり、その車軸と同軸上に存在するピッチ関節の内部には図2.2で示すようにトーションバネ [29] が取り付けられ、配管内で推進力を得るために各車輪を配管内壁面に押し付ける役割を果たす。上述した機構は、文献 [19] と基本的な構造は同じであるものの、本ロボットでは車軸以外にもモータ軸周りにベアリングが取り付けられ、図2.3で示すように前後の半球状の車輪 [26] がピッチ軸とロール軸の両軸周りに回転できる構造となっている。ピッチ軸とロール軸周りの回転は後述する差動原理を利用して行われる。半球車輪をロール軸周りに回転させることでロボットは配管内でねじれるように姿勢変形を行い、その状態で前進することにより螺旋回転運動による旋回動作を行う。また、各リンク上にはポテンシオメータが取り付けられ、ロール関節の回

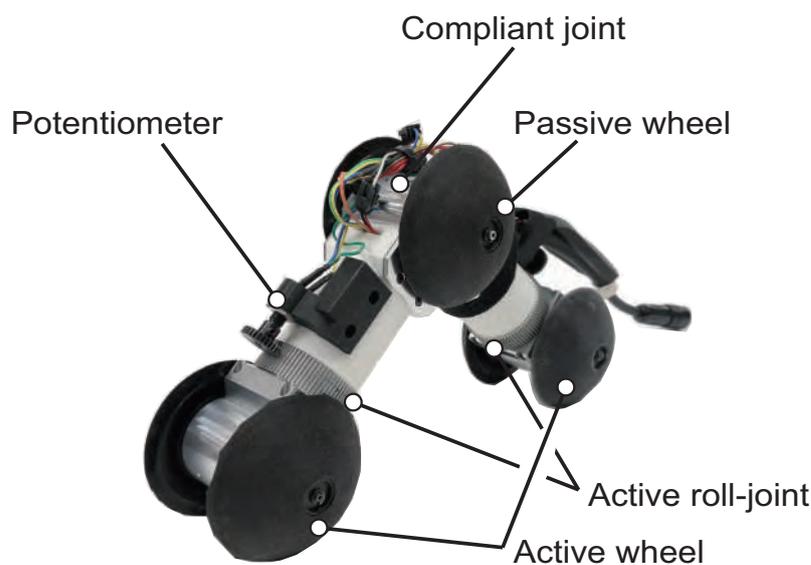


図 2.1: Overview of the proposed V-shaped robot

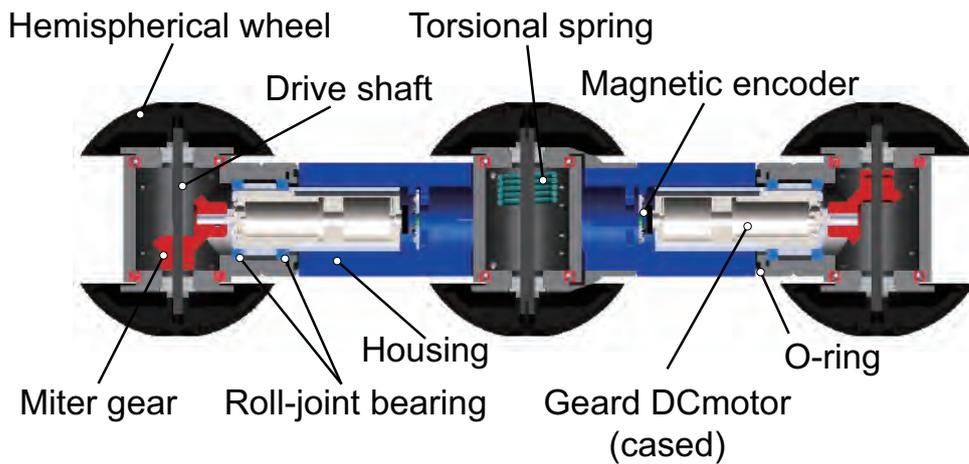


図 2.2: Cross-sectional view of the robot.

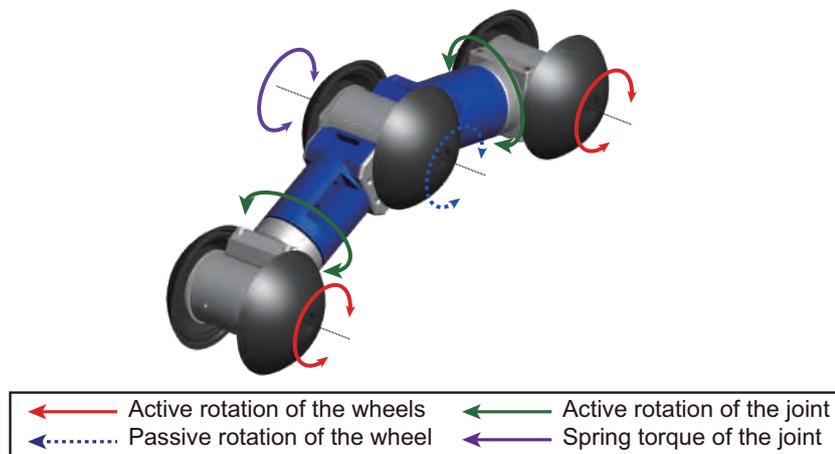


図 2.3: Rotational axes of the robot

転角度を計測することができる。リンク内部にはブラシ付き DC モータが内蔵され、その後部に取り付けられた磁気エンコーダによってモータの回転速度を計測できる。

2.2 マイタギアを利用した差動原理

ここでは、一對のマイタギアでの差動原理を利用した劣駆動機構について、その原理を解説する。提案する劣駆動機構はモータからの回転を入力とし、差動駆動によりその回転を半球車輪の車軸周りの回転とリンク軸周りの回転に分配する 1 入力 2 出力のシステムである。その原理と機構のイメージ図を図 2.4 に示す。

モータの回転が入力ギアに伝達されたのち、出力ギアがその体軸周りの自転と入力軸周りの公転動作を行うことで 1 つの入力から 2 つの出力へ動力分配を行う。このときの入力軸周りの公転動作はキャリアによって保持される。この原理を利用し、体軸周りの自転を車軸の回転、入力軸周りの公転をリンク軸周りの回転として機構を構成することで、半球車輪が車軸とリンク軸周りに回転可能となる (以降は、車軸周りの回転を車輪の回転とし、リンク軸周りの回転をロール関節の回転として述べ

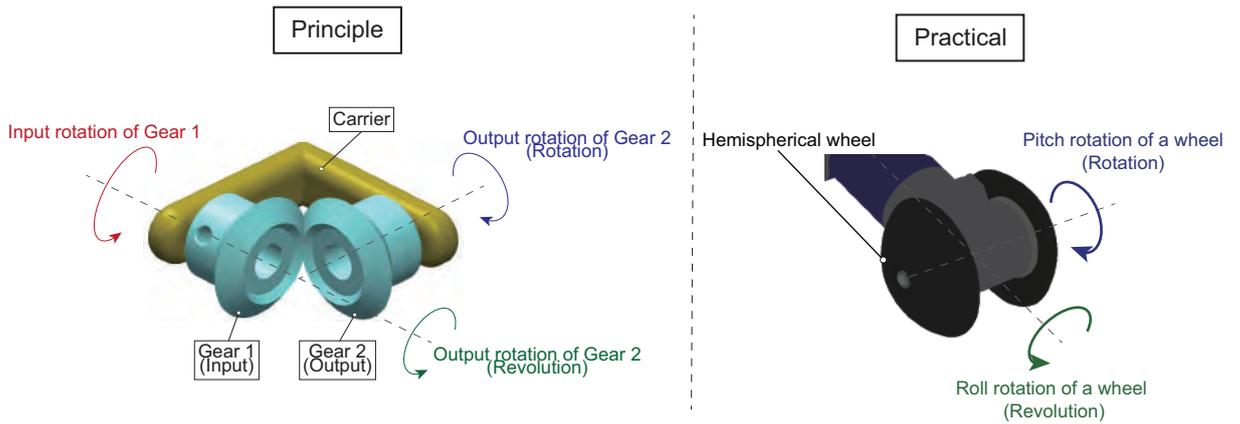


図 2.4: Principle and practical motions of the proposed underactuated mechanism.

ていく)。また、出力ギアの公転を利用する動作生成法は、筆者が所属する研究室で行われた文献 [30][31] の研究でも用いられている。

図 2.5 (a) は提案機構を液圧システムに代替して表現した概念図である。図中の入力 (input) はモータの回転を示し、出力 1 (output1) と出力 2 (output2) はそれぞれロール関節の回転と車輪の回転を示す。通常、出力 1 への流れはリリーフ弁 (a relief pressure valve) として表される O リングによって抑えられている。そのため、モータの入力は優先的に出力 2 の車輪の回転へと分配される。これにより、ロボットはロール関節を回転させることなく車輪の回転により前進することが可能である。しかし、モータのトルクが O リングの静止摩擦力によるモーメントを上回った場合、入力トルクはリリーフ弁を押し上げ出力 1 であるロール関節の回転へと分配される (図 2.5 (b))。よって、ロール関節を回転させるには車輪に負荷を加える必要がある。一方、図 2.5 (a) の状態で車輪がもう一方の車輪に牽引されるなどして過度に回転す

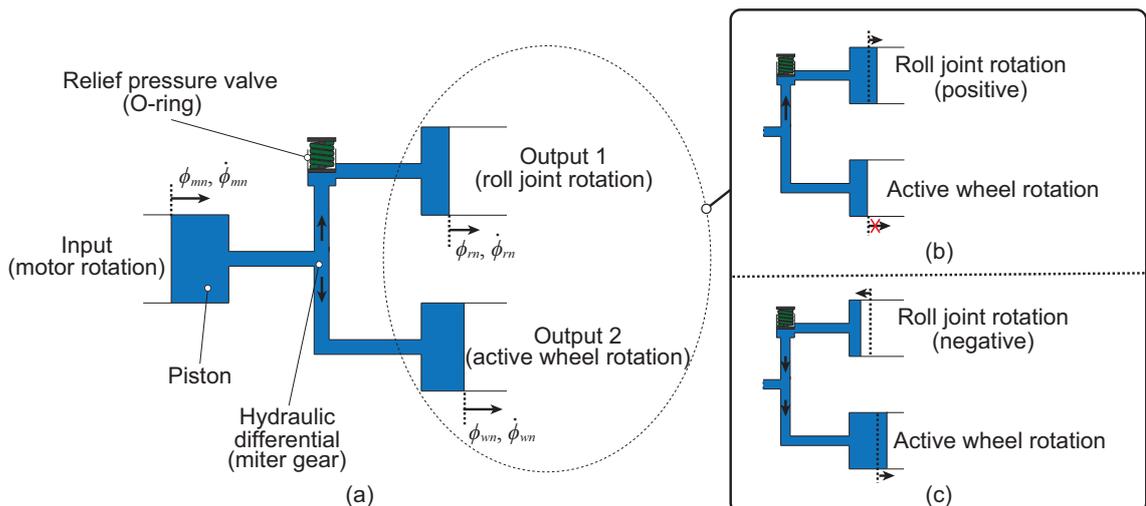


図 2.5: Schematic diagram of the proposed underactuated mechanism visualized as a hydraulic system. The differential mechanism generates two outputs (roll joint and wheel) from the rotation of a single motor. The sum of the rotation of the roll joint and the wheel is equal to the rotation of the motor.

る場合、ロール関節は車輪が過回転する回転数だけ逆方向に回転する(図2.5(c)). 第3章での制御的アプローチでは、この原理を利用してロボットの持つ2つのロール関節を回転させる方法を提案する.

2.3 ロボットの運動学

次に、ここでは提案する2リンクV字型のロボットの順運動学について述べる. これは次章の螺旋ピッチ角の定式化の際にも用いる.

順運動学問題を解くにあたって、本研究ではベクトルを用いた解法を利用する[32]. 対象とするロボットの自由度を図2.6に示す. XYZ 系は絶対座標系(ワールド座標系)である. ロボットは各リンクにロール関節を有し、中央にピッチ軸回りの関節をもつ. $\mathbf{P}_i = [x_i \ y_i \ z_i]^T$ はそれぞれ i 番目の関節の絶対座標系での位置を示し、 $\mathbf{q} = [q_0 \ q_1 \ q_2 \ q_3]^T$ はロボット的一般化座標を示す. このとき、 q_1 および q_3 はロール関節の回転角度を表し、 q_2 はピッチ関節の回転角度を表している. q_0 は第一リンクの Y 軸周りの回転角度を示し、後述するオイラー角としても扱う. また、本解析ではロボットをマニピュレータとして考え、支持点である $\mathbf{P}_0 = [x_0 \ y_0 \ z_0]^T$ は固定されていない状態を考える. 図中 l_i はリンク長を示し、そのベクトルを \mathbf{l}_i とする. 各関節の回転軸周りの回転は $\hat{\mathbf{s}}_i$ の回転軸ベクトルとして表す. このとき、図2.7で示すように、 $\hat{\mathbf{l}}_i$ 、 $\hat{\mathbf{s}}_i$ をそれぞれ基準姿勢時のリンクベクトルと回転軸ベクトルとして表し、 $\hat{\mathbf{l}}_i = [1 \ 0 \ 0]^T \mathbf{l}_i$ とする. なお、順運動学解析におけるロボットの基準姿勢について、本研究ではロボットが配管軸方向(X 軸方向)に向かって進むことを前提として考え、実際に使用するセンサのゼロ点などを考慮して X 軸に沿った状態を基準姿勢に設定する. ロボットのリンクはそのすべてが X 軸に沿った状態を基準姿勢として考え、第一リンクの初期姿勢は ZYZ 系のオイラー角 α_0 、 β_0 、および γ_0 を用いて表されるものとする. ただし、 $\beta_0 = q_0$ である.

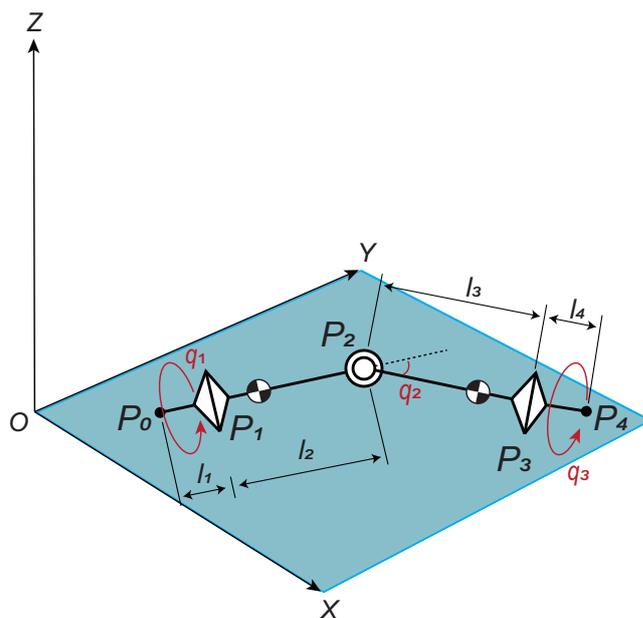


図 2.6: Kinematic model of the robot

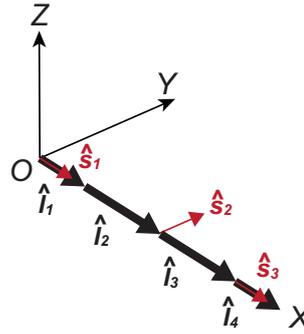


図 2.7: Basic posture of the vector diagram

それぞれの回転軸ベクトル \hat{s}_i まわりの角度 q_i の回転を示す回転変換行列を $\mathbf{R}_i \equiv \hat{\mathbf{E}}^{s_i q_i}$ とし以下の式で表す.

$$\mathbf{R}_i = \begin{cases} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos q_i & -\sin q_i \\ 0 & \sin q_i & \cos q_i \end{bmatrix} & (i = 1, 3) \\ \begin{bmatrix} \cos q_i & 0 & \sin q_i \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin q_i & 0 & \cos q_i \end{bmatrix} & (i = 2) \end{cases} \quad (2.1)$$

これらのパラメータを用いてピッチ関節の座標 $\mathbf{P}_2 = [x_2 \ y_2 \ z_2]^T$ および手先座標 $\mathbf{P}_4 = [x_4 \ y_4 \ z_4]^T$ を表すベクトル方程式を以下の式のように導出することができる.

$$\mathbf{P}_2 = \mathbf{P}_0 + \mathbf{R}_0(\mathbf{l}_1 + \mathbf{R}_1(\mathbf{l}_2)) \quad (2.2)$$

$$\mathbf{P}_4 = \mathbf{P}_0 + \mathbf{R}_0(\mathbf{l}_1 + \mathbf{R}_1(\mathbf{l}_2 + \mathbf{R}_2(\mathbf{l}_3 + \mathbf{R}_3(\mathbf{l}_4)))) \quad (2.3)$$

ここで、式中の \mathbf{R}_0 は第一リンクの姿勢を表し、オイラー角を用いて以下のように表すことができる.

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_0 &= \begin{bmatrix} \cos \alpha_0 & -\sin \alpha_0 & 0 \\ \sin \alpha_0 & \cos \alpha_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta_0 & 0 & \sin \beta_0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta_0 & 0 & \cos \beta_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \gamma_0 & -\sin \gamma_0 & 0 \\ \sin \gamma_0 & \cos \gamma_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos \alpha_0 \cos \beta_0 \cos \gamma_0 - \sin^2 \alpha_0 & -\cos \alpha_0 \cos \beta_0 \sin \gamma_0 + \sin \alpha_0 \cos \gamma_0 & \cos \alpha_0 \sin \beta_0 \\ \sin \alpha_0 \cos \beta_0 \cos \gamma_0 + \sin \alpha_0 \cos \alpha_0 & -\sin \alpha_0 \cos \beta_0 \sin \gamma_0 + \cos \alpha_0 \cos \gamma_0 & \sin \alpha_0 \sin \beta_0 \\ -\sin \beta_0 \cos \gamma_0 & \sin \beta_0 \sin \gamma_0 & \cos \beta_0 \end{bmatrix} \quad (2.4) \end{aligned}$$

第3章 劣駆動関節の制御手法

第2章では、差動駆動によってロールとピッチ軸周りに回転可能な劣駆動機構を持つ半球車輪について解説した。しかし、一般的に劣駆動機構は外力が加えられない限り出力の分配比を変えることができない。そのため、半球車輪をロール回転させロボットの螺旋回転運動を可能にするには、何らかの方法で配管内で車輪に負荷をかけロール関節を回転させる必要がある。そこで、本章ではまず制御面に着目し、ロボットに搭載された2つのモータの間に速度差を発生させ、そこで生じる内力を利用してロール関節を回転させることによってロボットを変形させる手法を提案する。この方法は筆者が所属する立命館大学の生物知能機械学研究室で過去に行われた文献 [33] の研究から着想を得たものである。また、ロボットが螺旋回転運動を行う際、各ロール関節の回転角度が制御されていなかった場合には各車輪の描く螺旋軌道に差異が生じる。そこで、車輪が描く螺旋軌道を螺旋ピッチ角の定式化により求め、その角度を最小化することにより、短い距離で螺旋回転運動が可能な螺旋ピッチ角を求める。これにより、同時に求めたロール関節角度の値を螺旋回転運動におけるロール関節の目標角度として設定し実験に用いる。

3.1 モータ間の速度差を利用した姿勢変形手法

ここではまず、ロボットの劣駆動機構の半球車輪とロール関節への出力分配比を変えるための方法として、前後のモータ間に速度差を与え、その時に生じる力を利用してロール関節を回転させる手法を提案する。劣駆動機構における回転速度の入出力関係を求めたのち、前後のモータの速度差によってロール関節が回転する原理を分析し、ロボットが有する2つのロール関節を回転させるのに有効であると考えられる手法を3つ提案する。

3.1.1 差動機構の運動学

まず初めに、差動駆動を利用した劣駆動機構における入出力について、その回転速度の関係式を求める。

図3.1で示すのは、提案する差動機構の概念図である。 ϕ_m , ϕ_w , および ϕ_r はそれぞれ入力マイタギアの回転角度、出力マイタギアの自転時の回転角度、出力マイタギアの公転時の回転角度を示す。二つのマイタギアは互いの歯によってかみ合っているため、滑りは生じない。この場合、入力マイタギアの回転量は出力マイタギアの自転と公転方向への回転量の総和と等しくなる。よって、

$$r_{in}\phi_m = r_{out}\phi_w + r_{in}\phi_r \quad (3.1)$$

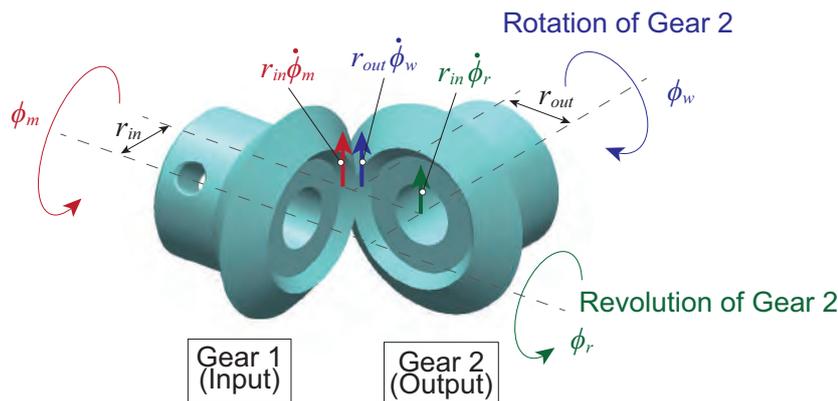


図 3.1: Diagram of a differential gear mechanism with a single pair of miter gears.

ここで、 r_{in} および r_{out} は入力マイタギアと出力マイタギアの半径を示す。また、二つの歯車の間に滑りが生じないことから、微小時間当たりの回転量も等しくなる。よって、

$$r_{in}\dot{\phi}_m = r_{out}\dot{\phi}_w + r_{in}\dot{\phi}_r \quad (3.2)$$

この式は、図 3.1 で示す、二つの歯車の接触点における接線方向の速度の関係式を表す。本研究で扱う提案機構では、互いの歯車の減速比は $1:1$ ($r_{in} = r_{out}$) であるため、入出力の回転角速度の関係を表す式として以下の式が得られる。

$$\dot{\phi}_m = \dot{\phi}_w + \dot{\phi}_r \quad (3.3)$$

また、この関係式はベクトルを用いて求めることもできる (付録 A)。

3.1.2 速度差によるロボットの变形原理

次に、モータ間の速度差によってロール関節が回転する原理を分析する。

図 3.2 はロボットの前後の駆動輪において、瞬間的な速度差を生じさせた際に予測されるロボットの動きを示す。 $\dot{\phi}_{mD}$ 、 $\dot{\phi}_{wD}$ 、および $\dot{\phi}_{rD}$ はそれぞれ DC モータ、駆動輪、ロール関節の回転角速度を表す。ここで、添字 D は前後のパーツを区別するものとして表され、 $D = f$ が前部、 $D = r$ が後部を表す。例として、 $\dot{\phi}_{mf}$ 、 $\dot{\phi}_{wr}$ はそれぞれ前部 DC モータと後部駆動輪の回転角速度を示す。図 3.2(a) および (b) は、前輪と後輪の間に瞬間的な速度差が発生した際、配管による幾何学的な拘束やバネによる機械的な拘束もない場合のロボットの動きを予測したものである。(a) では後部のモータが前部のモータよりも速く回転する場合であり、(b) では逆に前部のモータが速く回転する場合を示している。後部の駆動輪が前部の駆動輪よりも速く回転する際、両輪間の距離は短くなり、中央のピッチ関節が“閉じる”ような動作を取る (図 3.2(a))。一方、後部の駆動輪が遅く回転する場合、両輪間の距離は長くなり中央のピッチ関節が“開く”ような動作を取る (図 3.2(b))。しかし、実際の場合には、配管と関節内部のバネによる拘束が存在する。このため、各車輪が配管内壁面に十分な押し付け力により押し付けられスリップしないと考えられる場合、実際には図 3.2(c) のように両輪間の距離は変わらず、ロボットは前進する。すなわち、両

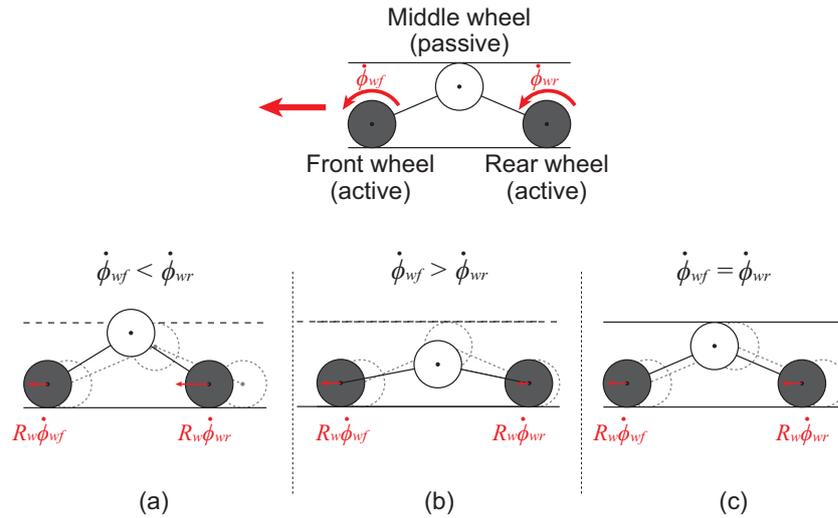


図 3.2: Expected motions when the two motors operate at different speeds (R_w denotes the wheel radius)

駆動輪の回転速度は等しい状態に保たれる。この理由から、配管軸方向の両輪の回転速度の関係式は以下のように得られる。

$$\dot{\phi}_{wf} = \dot{\phi}_{wr} \quad (3.4)$$

ここで、二つのモータ間の回転の速度差を s_{dif} ($s_{dif} > 0$) として定義すると、二つのモータの回転速度を用いて以下の式で表すことができる。

$$\dot{\phi}_{mr} = \dot{\phi}_{mf} \pm s_{dif} \quad (3.5)$$

この式に式 (3.3) で求めたモータと車輪、ロール関節の回転速度の関係式を代入すると、

$$\dot{\phi}_{wr} + \dot{\phi}_{rr} = \dot{\phi}_{wf} + \dot{\phi}_{rf} \pm s_{dif} \quad (3.6)$$

このとき、式 (3.4) より、前後の車輪の回転速度は等しくなる ($\dot{\phi}_{wf} = \dot{\phi}_{wr}$) ため、

$$\dot{\phi}_{rr} - \dot{\phi}_{rf} = \pm s_{dif} \quad (3.7)$$

ここで、各車輪が速度制御により目標速度を保ち、かつ、スリップしないと仮定する場合、片方の車輪がもう片方の車輪よりも速く回転する場合であっても、ロボットの移動速度は遅く回転する車輪の回転速度と等しくなる。そのため、モータ間に瞬間的な速度差が生じた場合、遅く回転するモータ側のロール関節は回転せず、その差分の回転は速く回転するモータ側のロール関節の回転に分配されると考えられ、以下の式を得る。

$$\begin{cases} \dot{\phi}_{rr} = s_{dif} & (\because \dot{\phi}_{rf} = 0, \dot{\phi}_{mr} > \dot{\phi}_{mf}) \\ \dot{\phi}_{rf} = s_{dif} & (\because \dot{\phi}_{rr} = 0, \dot{\phi}_{mr} < \dot{\phi}_{mf}) \end{cases} \quad (3.8)$$

3.1.3 姿勢変形のための動作生成手法

前項では2つのモータ間に速度差が生じた際にロール関節が回転する原理を分析した。そこでここでは、前述した原理を利用して配管内で2つのロール関節を回転させるためのロボットの動作手法を提案する。

配管内でロボットが持つ前後のモータ間に速度差が生じる場合、その速度バランスは各モータの回転速度と大きさにより変化し、図 3.3 で示す9つの組み合わせで考えることができる。図中の矢印は各駆動輪の目標回転速度の大きさと方向を示す。ただし、実際の各車輪の回転速度は式 (3.4) で示したように等しくなる。ロボットのロール関節は、式 (3.8) で示したように前後のモータの速度差によって回転させることができると考えられる。そこで本研究では、各ロール関節を回転させるのに有効と考えられる動作として図 3.4 で示す以下の3つの動作を提案する。

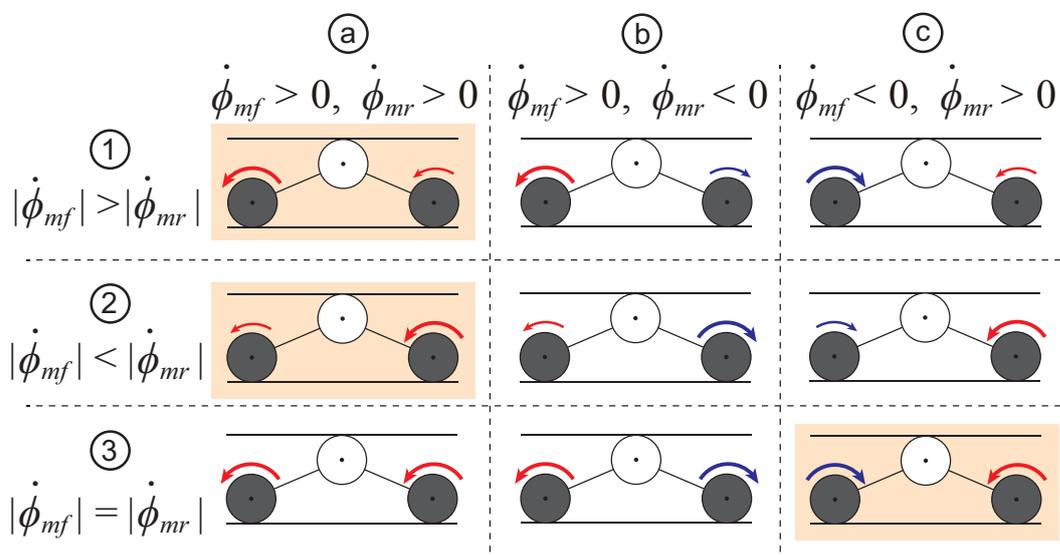


図 3.3: Possible combinations of motor velocity for transformation of the robot including the driving direction (a)–(c) and absolute velocity (1)–(3)

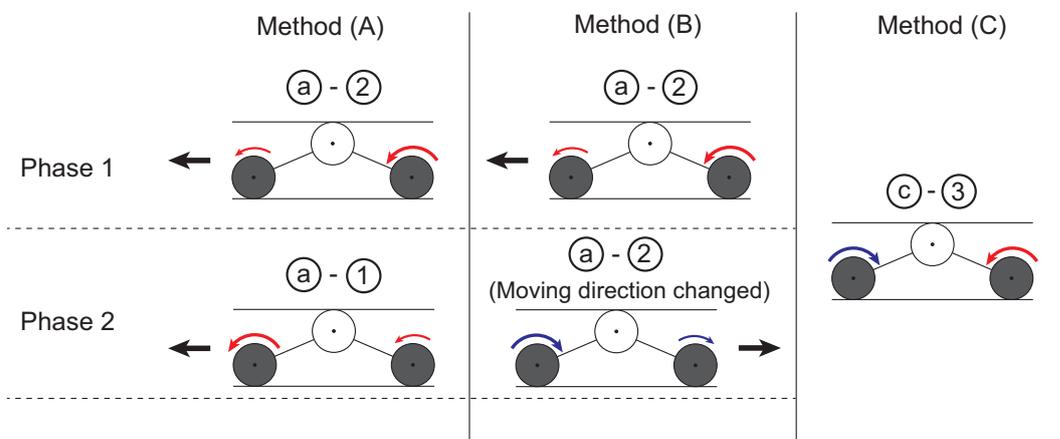


図 3.4: Three selected methods of rotating the roll joints

手法 (A) ロボットの前進動作とともにⒶ-①及びⒶ-②を交互に行う組み合わせ動作.

手法 (B) ロボットの前後移動とともにⒶ-②を交互に行う動作.

手法 (C) 前後方向には移動をせずⒸ-③を行う動作.

これらの動作について、以下に詳しく説明する.

手法 (A)

この手法ではまず初めに、後部の駆動輪を速く回転させる (Phase 1). この動作により後部ロール関節が回転し、その角度が次節で求める目標角度に達したとき、前後のモータの速度比率を入れ替える (Phase 2). 速度比率を入れ替え前部の車輪が速く回転することにより、前部のロール関節が回転する. このプロセスを経ることでロボットは前進しながら前後のロール関節を交互に回転させる.

手法 (B)

この手法では、ロボットは前後移動を交互に行うことでロール関節を回転させる (Phase 1, Phase 2). 図 3.2(b) で示したように、手法 (A) の動作Ⓐ-①は V 字型ロボットの中央のピッチ関節が開くような動きになることでバネによる押し付け力が減少し、車輪がスリップする可能性が考えられる. そこで手法 (B) では、図 3.2(a) のように後部の車輪を速く回転させ車輪を壁面へ押し付ける動作を前後のロール関節を回転させるために用いる. ロボットが前進及び後退する際に、進行方向に対して後ろにある車輪を速く回転させることでロール関節を回転させる.

手法 (C)

この手法では、前部の駆動輪をロボットの進行方向とは逆方向に進むように回転させ、後部車輪と向かい合うように駆動させる. 車輪がスリップしないと仮定する場合、ロボットは前後方向には動かず、モータの回転はすべてロール関節の回転に分配される. この手法により、ロボットは配管内で前後に動くことなく両方のロール関節を同時に回転させることができると考えられる.

以上の 3 つの手法について、後述する第 5 章の実機実験によりその有効性を検証する.

3.2 最小螺旋ピッチ角の導出

前節の手法によってロボットのロール関節を回転させ螺旋回転運動を行う場合、目標となる螺旋軌道のピッチ角とそのときのロール関節回転角度が必要になる. そこで本節では、ロボットが螺旋回転する際に各車輪が描く螺旋軌道の螺旋ピッチ角を定式化し、ロボットと配管内空間の幾何学関係を制約条件とした上で最小化を行った. 螺旋ピッチ角を最小化することによりロボットが螺旋回転運動をする際に必要な旋回距離を短くすることができる. また、このとき同時に求めたロール関節回転角度を螺旋回転運動時の目標値として設定し、第 5 章の実機実験で用いた.

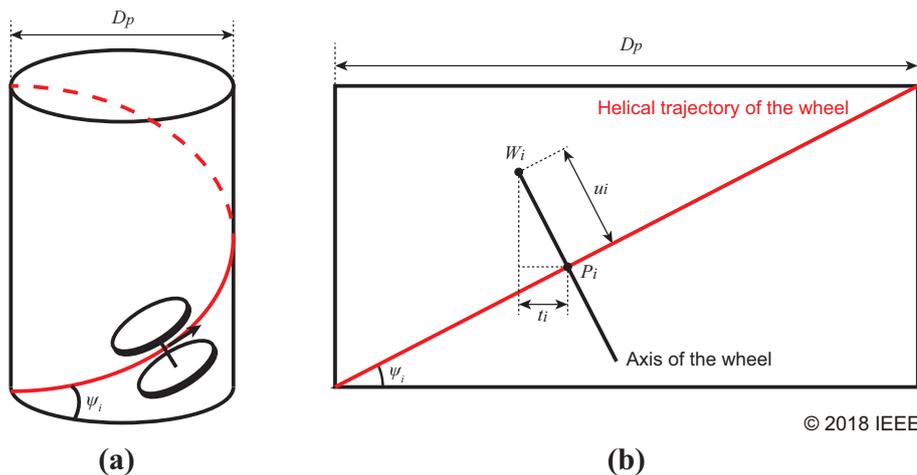


図 3.5: Wheel trajectory during the helical movement in a pipe

3.2.1 螺旋ピッチ角の定式化

まず最初に、ここでは、前章の順運動学問題で導出した関節座標を利用して螺旋ピッチ角を定式化する。

配管内でロボットが螺旋回転運動を行うとき、その車輪が描く螺旋軌道を図 3.5 に示す。図 3.5(a) は配管内でロボットが螺旋回転運動を行う際の螺旋軌道を示し、図中 ψ_i は車輪が描く螺旋軌道の螺旋ピッチ角を表す。ただし、本章では車輪の位置座標のみを扱うため、関節番号を表す i は車輪が取り付けられている関節 ($i = 0, 2, 4$) に限定する。図 3.5(b) はその配管を展開し平面として表したものであり、 P_i が車輪の中心 (関節) を、また、 $W_i = [x_{wi} \ y_{wi} \ z_{wi}]^T$ は車軸の端点を表す。図 3.5(b) から、ロボットの螺旋ピッチ角 ψ_i は以下の式で求めることができる。

$$u_i = \sqrt{(x_{wi} - x_i)^2 + (y_{wi} - y_i)^2 + (z_{wi} - z_i)^2} \quad (3.9)$$

$$t_i = \sqrt{(y_{wi} - y_i)^2 + (z_{wi} - z_i)^2} \quad (3.10)$$

$$\psi_i = 90^\circ - \cos^{-1} \frac{t_i}{u_i} \quad (3.11)$$

この式において、リンク端点 P_i 及び車軸端点である W_i の座標成分を直管内におけるロボットの順運動学で求めることで螺旋ピッチ角 ψ_i を導出することができる。

3.2.2 制約条件の定式化

次に、ロボットが配管内空間によって受ける幾何学的な拘束と螺旋回転運動時に各車輪が描く軌道を制約条件として定式化する。

ロボットが各ロール関節を回転させ配管内で姿勢を変形させるとき、各車輪の両輪が関節内部のバネによる十分な押し付け力によって配管内壁面に接地していると仮定すると、配管軸 (X 軸) から見た時の車輪の状態は図 3.6 のように表すことができる。左の図は変形前を、右図は変形後の時の車輪の状態を表す。ロボットが配管軸方向に真っ直ぐに直進する動作では、左図のように車軸は Y 軸と平行となる。このとき、リンク端点 P_i は配管の中心点から半径 R_c の円上に存在している。一方、

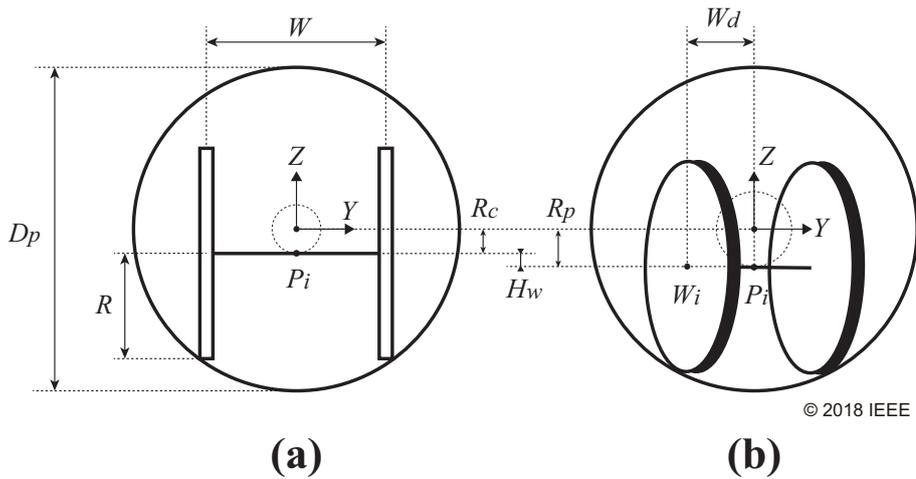


図 3.6: Variation of the axle in a pipe

ロボットが変形し車輪が Z 軸周りに回転した場合、リンク端点の位置は右図のように半径 R_p の円上に移動する ($R_c < R_p$)。ここで、ロボットが一定の螺旋ピッチ角で螺旋回転運動を行う場合、各車輪が描く螺旋軌道、すなわち螺旋ピッチ角はすべて等しい状態が理想的であると考えられる。これは、各々の車輪が異なる螺旋ピッチ角で螺旋回転運動により前進した場合にはそれらの相対距離が変わってしまうことを考えると当然と言える。各車輪の描くピッチ角がすべて等しいとき、各リンク端点に乗る円の半径はすべて等しくなる。よって、このときのリンク端点を持つ拘束条件を以下のように表すことができる。

$$y_i^2 + z_i^2 = R_p^2 \quad (3.12)$$

式 (3.12) の条件を \mathbf{P}_i が満たすとき、各車輪は壁面に接地していることを意味する。また、 R_p は以下のように求めることができる。

$$R_p = R_c + H_w \quad (3.13)$$

H_w はロール関節が回転しロボットの姿勢が変形した際の車軸の配管中心から壁面方向 (Z 軸負の方向) への沈み量を表している。このとき、式 (3.13) の右辺のパラメータを求めると、まず、図 3.6 より式 (3.14) となり、 $R_c > 0$ より R_c は式 (3.15) として求まる。

$$(R + R_c)^2 + \left(\frac{W}{2}\right)^2 = \left(\frac{D_p}{2}\right)^2 \quad (3.14)$$

$$R_c = \sqrt{\left(\frac{D_p}{2}\right)^2 - \left(\frac{W}{2}\right)^2} - R \quad (3.15)$$

ここで示す W は両輪間の距離 (車軸長) を表している。

同様にして、 H_w を求めるとき式 (3.16) のように表すことができる。

$$(R + R_c + H_w)^2 + (W_d)^2 = \left(\frac{D_p}{2}\right)^2 \quad (3.16)$$

このとき、 W_d は \mathbf{W}_i と \mathbf{P}_i の YZ 平面上における距離を表し、以下の式 (3.17) のように求まる。

$$W_d = \sqrt{(z_{wi} - z_i)^2 + (y_{wi} - y_i)^2} \quad (3.17)$$

ただし、ロール関節の回転による車軸の Z 軸回りの回転は微小であるため、車輪と壁面との接点は車軸端点から Z 軸と平行に伸ばした線上にある点とみなす。

次に、各車輪の螺旋ピッチ角の条件について考える。前述したように、ロボットが螺旋回転運動を行う場合には、各車輪の螺旋ピッチ角はすべて等しい状態が理想的であると考えられる。各車輪の螺旋ピッチ角は前述した式 (3.11) を用いて表すことができ、それぞれがすべて等しいことから、この条件式は以下のように表すことができる。

$$\psi_0 = \psi_2 = \psi_4 \quad (3.18)$$

ここで、 ψ_0 は第一リンクの始点である \mathbf{P}_0 を通る車軸の車輪がもつ螺旋ピッチ角であり、これは第一リンクの姿勢を表すオイラー角から $\psi_0 = 90^\circ - \alpha_0$ と表すことができる。

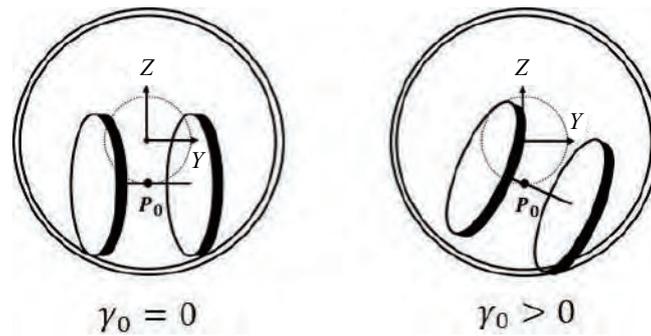
以上の計算から、式 (3.12) 及び式 (3.18) を螺旋ピッチ角を最小化する計算での制約条件とし、次項で最適化計算を行う。また、この2つの制約に加え、計算時にロボットが特異姿勢に収束するのを避けるため、ロボットが配管内に存在する場合に各未知パラメータが幾何学的に取りうる値の範囲を制約条件として加えた。

3.2.3 螺旋ピッチ角とリンク回転角度の導出

本節では、定式化した螺旋ピッチ角を目的関数とし、前節で求めた制約条件を制約関数として設け、この制約条件の下で目的関数を最小化する。このとき同時に求まるロール関節の回転角度は、ロボットが姿勢変形する際のロール関節の静的な目標値として次章の実験に利用する。まず、解析用のパラメータを表3.1に示す。今回扱う目的関数は三角関数を含む非線形方程式であり、厳密解を求めることは困難である。そこで本項では目的関数と制約関数を用いて制約付き非線形計画問題 (制約付き最適化問題) としてこの問題を扱い近似解を求める方法を試みた。制約付き非線形計画問題を解くアルゴリズムにはいくつかの種類が存在するが、本項では、実用的に有用とされ近年多くの非線形最適化ソフトに組み込まれている逐次2次計画法 (sequential quadratic programming method: SQP 法)[34] と呼ばれる求根アルゴリ

表 3.1: Parameters for the optimization

| Known parameter | Value | Unknown parameter | Symbol |
|---------------------------------------|--------|---------------------------------|---------------------|
| Diameter of a pipe (D_p) [m] | 0.100 | The component of \mathbf{P}_0 | z_0 |
| Radius of wheels (R) [m] | 0.0325 | Euler angles | α_0, β_0 |
| Length of the wheel shaft (W) [m] | 0.050 | Pitch joint angle | q_2 |
| Link length (l_1, l_4) [m] | 0.010 | Rear roll joint angle | q_1 |
| Link length (l_2, l_3) [m] | 0.107 | Front roll joint angle | q_3 |

図 3.7: Different posture of the robot with γ_0

ズムを用いて計算を行った。このとき、表 3.1 で示した未知パラメータは目的関数である式 (3.11) を制約関数である式 (3.12)(3.18) のもとで最小化することによって近似解として得ることができる。計算には数値計算ソフトウェアである MATLAB を用い、各パラメータが配管内で幾何学的に取りうる値の中からランダムに初期点を生成することで計算処理を開始した。また、数値計算をするにあたり、第一リンクの姿勢を表すオイラー角 γ_0 を $\gamma_0 = 0$ として考えた。これは、 $\gamma_0 \neq 0$ の場合には図 3.7 で示すように車輪が壁面から離れてしまい車輪と壁面との接触が失われるためである。加えて、前節で述べたように、初期点であるリンク端点を表す $\mathbf{P}_0 = [x_0 \ y_0 \ z_0]^T$ の座標成分 x_0 および y_0 は、 $x_0 = 0$, $y_0 = 0$ として考える。

数値計算のプロセスとしては、まず未知パラメータを含めた状態で式 (2.2) 及び式 (2.3) を用いてロボットの順運動学問題を解き、そのときの値を利用して目的関数と制約関数の式を導出する。その後、それらの式を逐次 2 次計画法による求根アルゴリズムを用いて最適化計算を行い、各未知パラメータの値が条件を満たす近似解を得た際に処理を終了した。このとき、導出された各パラメータの値は、 $\alpha_0 = 3.8017[\text{deg}]$, $\beta_0 = 80.9057[\text{deg}]$, $q_1 = -45.6049[\text{deg}]$, $q_2 = 18.1887[\text{deg}]$, $q_3 = -45.6049[\text{deg}]$ となった。また、これらの値に加え、同時に導出されるパラメータとして、 $\psi_i = 86.1983[\text{deg}]$ 及び $R_p = 10.8330[\text{mm}]$ がそれぞれ求まった。以上より、導出された値を用いてロボットの順運動学問題を再度計算し、MATLAB の計算処理によって可視化したロボットの姿勢を図 3.8 に示す。また、図 3.9 および図 3.10 に配管断面から見た図を、図 3.11 に Z 軸正方向から見たロボットの姿勢を示す。

図 3.9 及び図 3.10 で示すように、各車輪が壁面に接した状態で各リンク端点が半径 R_p の円上に存在していることがわかる。この計算結果から、ロボットは配管内で幾何学的にすべての車輪の螺旋ピッチ角が等しくなる姿勢をとることが可能であることがわかった。また、導出された螺旋ピッチ角の値は $\psi_i = 86.1983[\text{deg}]$ と求まったことから、ロボットが図 3.8 の姿勢で螺旋回転運動を行う場合、非常に緩やかな螺旋軌道を描きながら回転することが明らかとなった。これは、ロボットの設計パラメータ (リンク長, 車軸長, 車輪径等) が大きく影響することから、これらの設計パラメータを再設計し、螺旋ピッチ角をより小さくなるよう設計することで解決すると考えられる。

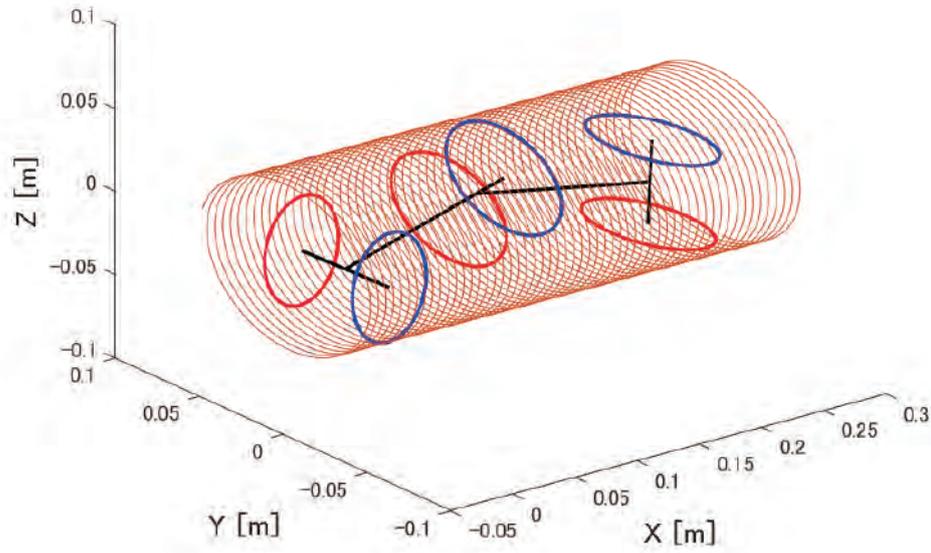


図 3.8: Visual model of the robot with optimized parameters

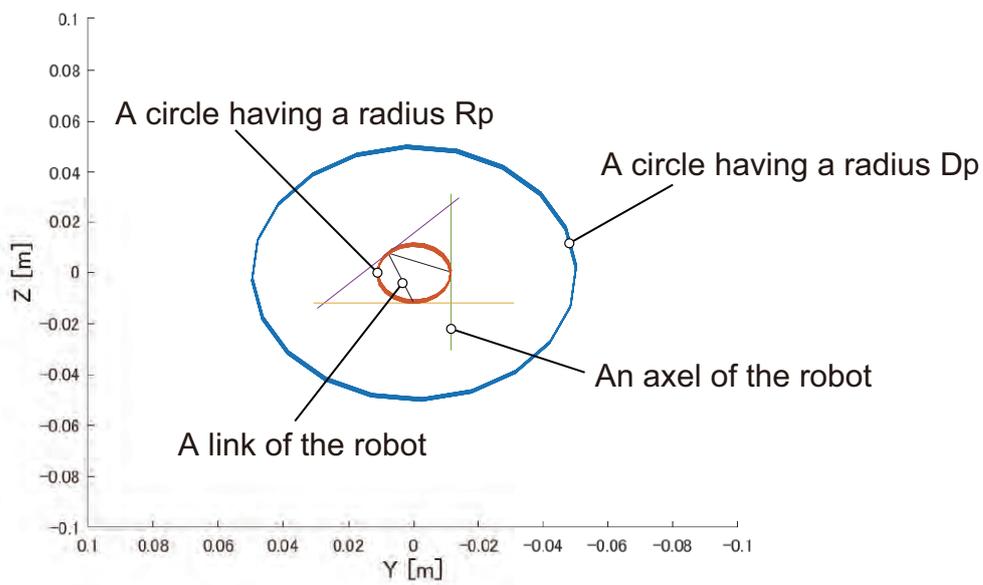


図 3.9: Visual model of the robot on YZ plane (without wheels)

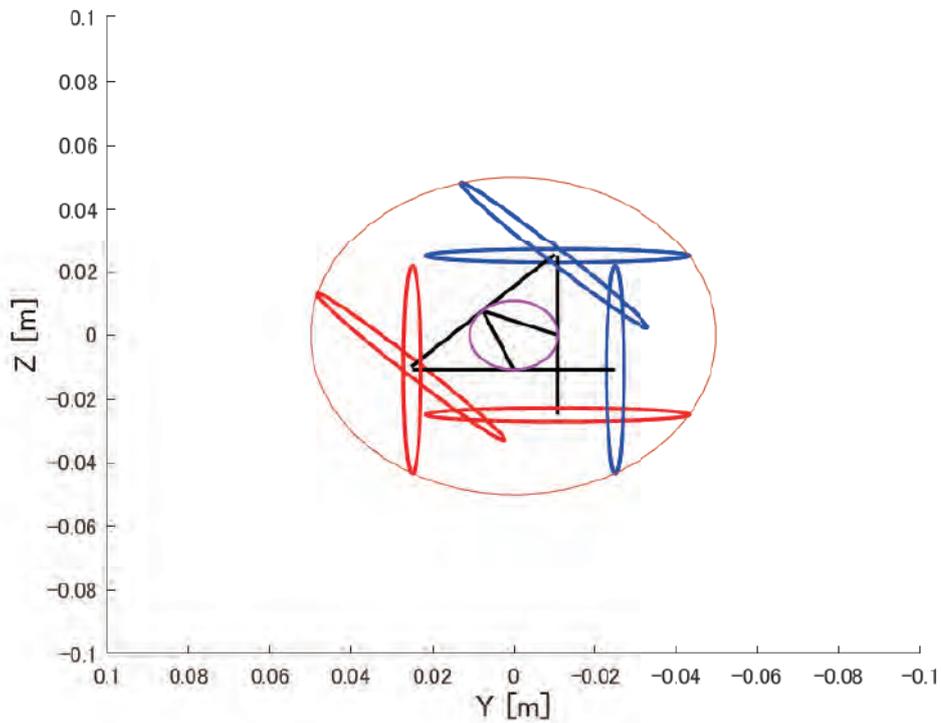


図 3.10: Visual model of the robot on YZ plane (with wheels)

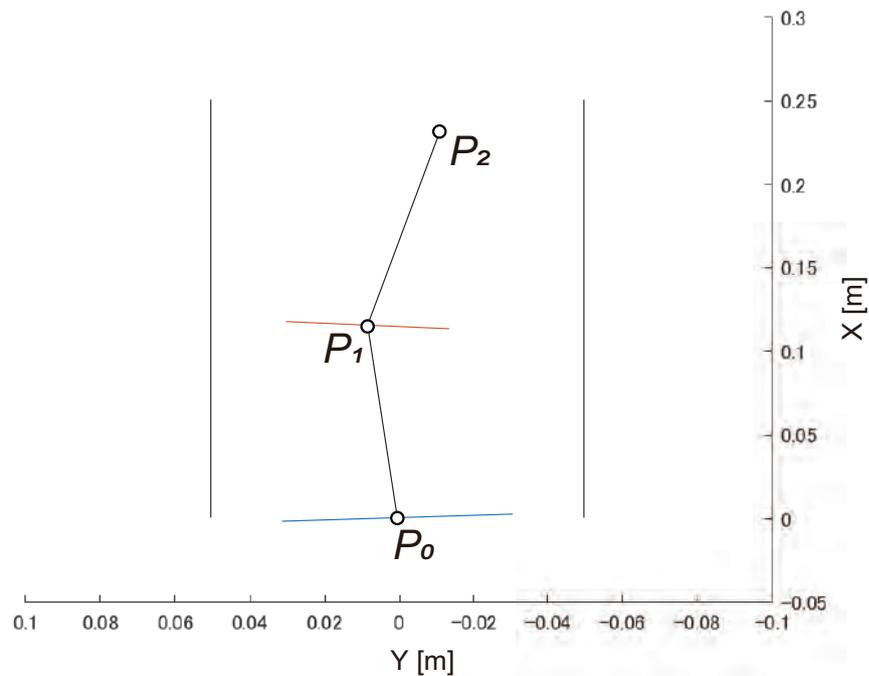


図 3.11: Visual model of the robot on the cross-sectional plane (XY plane)

第4章 ワンウェイクラッチを利用した拘束付き差動機構

第2章で述べたように、本研究で提案した劣駆動機構は出力の分配比の切り替えに外力が必要となる。この問題を、第3章では制御的アプローチによりその解決方法を提案した。本章では、機構的な面から解決へのアプローチを試み、ワンウェイクラッチによる機械的な拘束を導入することによって出力の切り替えを補助する機構を提案し、新たなV字車輪型ロボットの開発を行う。

4.1 ロボットの機構

図4.1と図4.2で示すのは、本章で新たに提案する拘束付き差動機構を有するV字車輪型配管検査ロボットの外観とCAD図である。設計は前述の第2章で述べた2リンクで構成されたロボットがベースとなり、中央のピッチ関節内部にトーションバネが取り付けられ、各車輪を壁面に押し付ける役割を果たしている。各リンクにブラシ付きDCモータが内蔵され、前後の半球車輪を一对のマイタギアを介して回転させる。また、中央関節には受動車輪として新たにオムニホイールが取り付けられている。

第2章で述べた従来の劣駆動機構と異なる点として、半球車輪の車軸にワンウェイクラッチ取り付けられている [35]。ワンウェイクラッチはベアリングに似た円筒

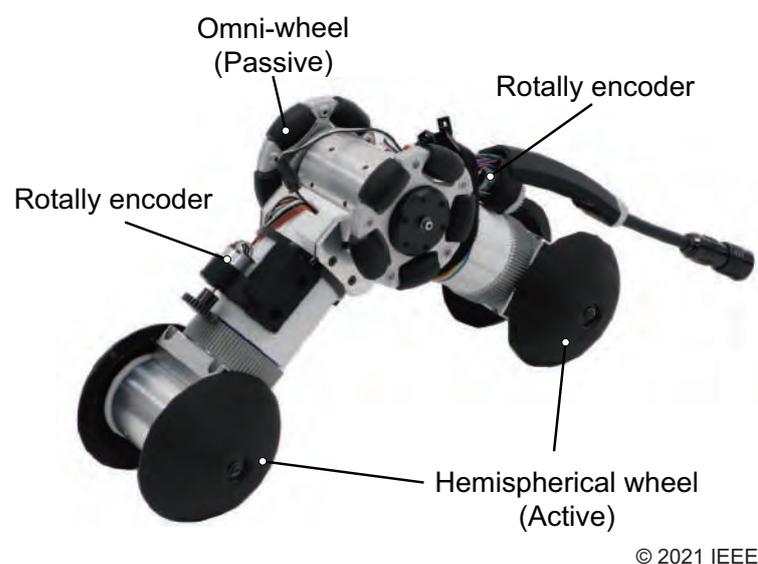


図 4.1: Overview of proposed robot AIRo-3.1.

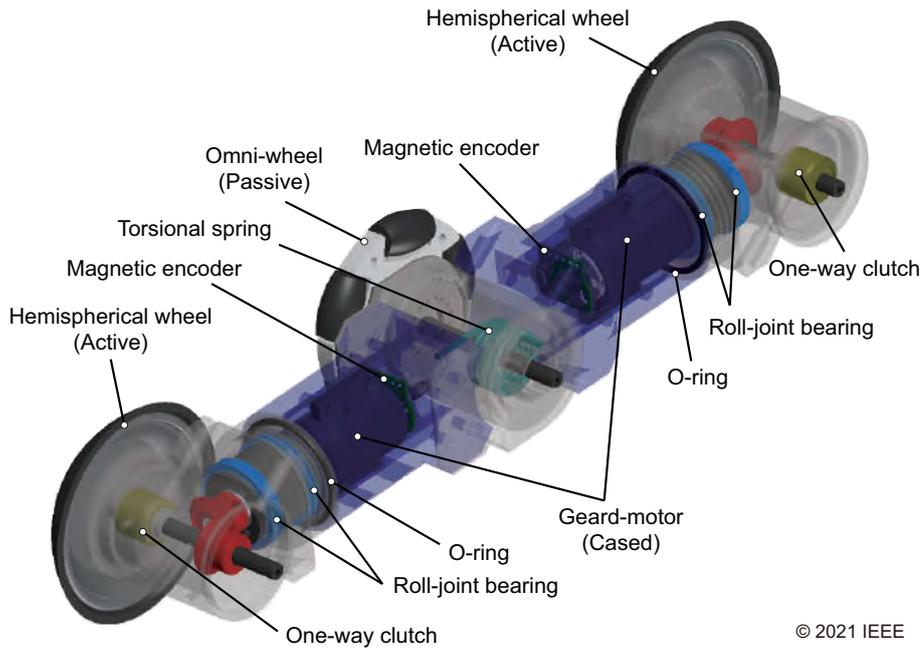


図 4.2: CAD model of the proposed robot

状の部品であり、取り付けられた軸の回転に対して、一方の回転にはベアリングと同じ機能 (Free rotational direction) を発揮し、もう一方の回転に対してはロック (Locking direction) をかけることができる。本章で提案する機構は、図 4.2 において、図の右側から見た場合に車輪が反時計回りに回転する方向 (ロボットの推進方向) を自由回転方向とし、時計回りに回転する方向を拘束方向としてワンウェイクラッチを車軸に取り付けている。

このワンウェイクラッチによって構成された拘束付き差動機構の概念図を液圧システムとして図 4.3 で示す。この機構では、ワンウェイクラッチが車軸の回転を止める際の拘束力を利用して、単一モータの駆動方向を切り替えることで2種類の動作 (unconstrained flow, constrained flow) を生成することが可能となる。ここで、図の CW 及び CCW はモータ軸を出力側から見た際の回転方向を示し、それぞれ時計まわり (clockwise) と反時計回り (counterclockwise) を示す。ただし、車輪の CW 及び CCW 回転は図 4.2 で車輪を右側から見た場合の回転方向を示す。まず例として、図 4.2 で示したロボットの前部モータに着目して動作原理を説明する。前部モータが CCW 方向に回転する場合 (図 4.3(a))、ロール関節の回転は O リングの摩擦抵抗によって止められている。ここで、O リングは図 4.3 中の “a relief pressure valve” として示されている。このとき、モータの回転はマイタギアを介して車輪へ伝達され、その回転方向がワンウェイクラッチによってロックされていない状態であるため車輪が回転する。この非拘束動作は2章で述べたロボットと同じ機能を果たす。

一方、前部モータが CW 方向に回転する場合 (図 4.3(b))、モータの回転は車輪のワンウェイクラッチによってロックされた回転方向に分配されるため、車輪は回転しない。この拘束動作により、モータの回転はロール関節にのみ分配される。この結果、図 4.4 のように、単一のモータの駆動方向を切り替えるだけで車輪の回転とロール関節の回転という2種類の動作を生成することが可能となる。

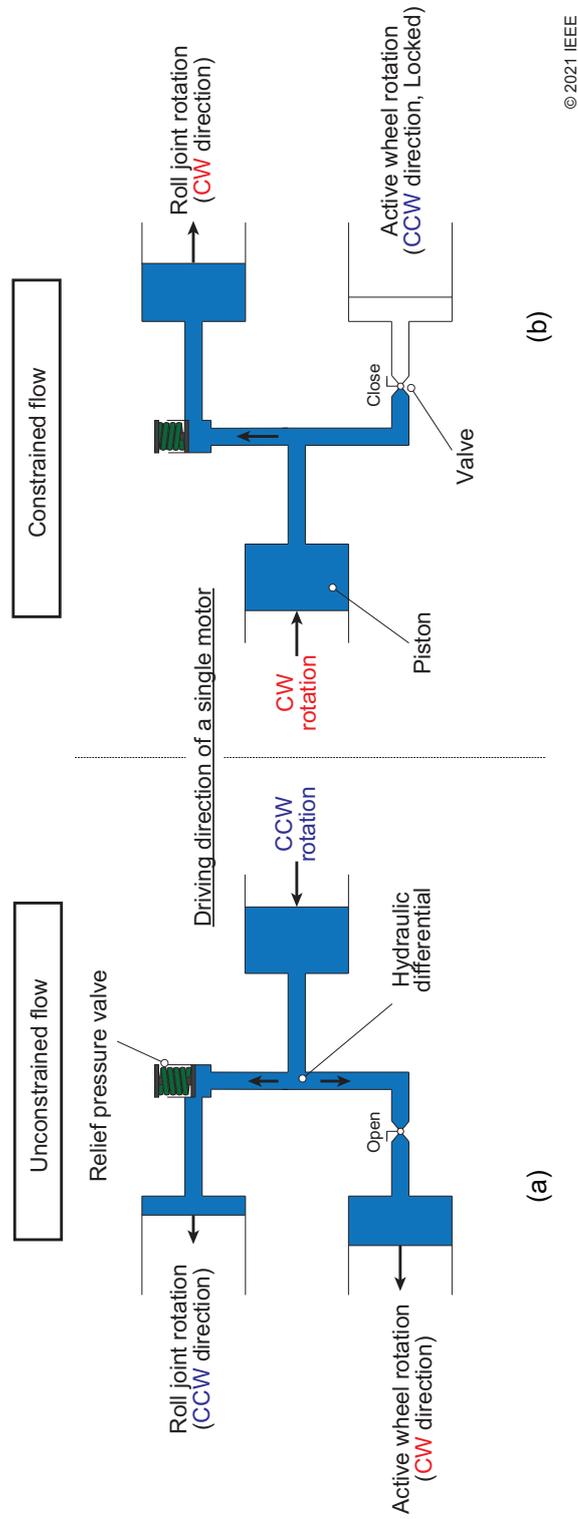


図 4.3: Schematic conceptual drawing of the proposed underactuated mechanism (example of front motor) visualized as a hydraulic system: (a) Unconstrained flow, (b) Constrained flow.

© 2021 IEEE

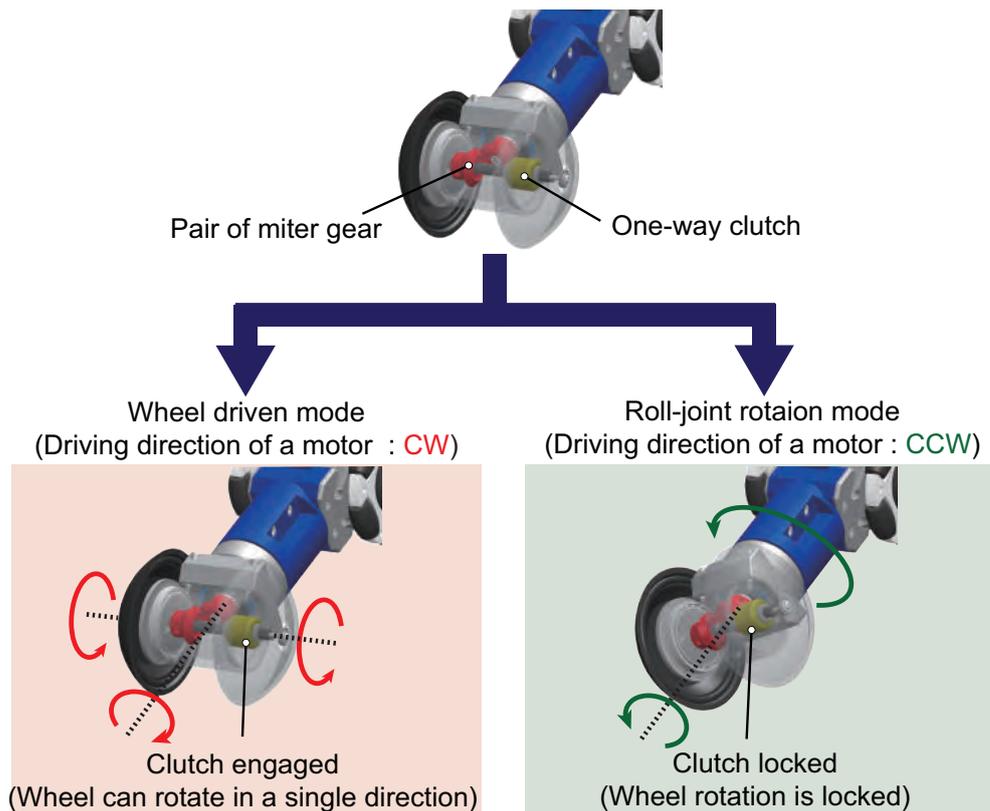


図 4.4: Two types of movement generated by changing the rotational direction of the motor

しかし、ワンウェイクラッチによる拘束により、車輪とロール関節はそれぞれ単一方向にしか回転できない。そのため、通常であれば、車輪が単一方向にしか回転できないためロボットも前進動作しかできなくなる。そこで、本章で提案するロボットは配管内の曲面を利用し、図 4.5 で示すように車輪を 180 度ロール回転させることで車輪の駆動によるロボットの推進方向を切り替え、配管内での前後移動を可能とした。この特徴に加え、ロボットが移動する際、駆動車輪はロボットの推進方向に回転可能である必要がある一方、反対方向にはワンウェイクラッチによるロックがかかる。そのため、垂直管内で上り方向へ走行する際には、ワンウェイクラッチはブレーキとしての役割を果たすことができる。ただし、ワンウェイクラッチについては、モータトルク τ_m がワンウェイクラッチのロック可能な許容トルク τ_l を超過しないための条件として、

$$\tau_m \leq \tau_l \quad (4.1)$$

を満たす必要がある。

4.2 半球車輪の設計

ここでは、ロボットがロール関節を回転させ配管軸周りに旋回する際のロボットの旋回角度の導出を行う。本章で提案する拘束付き差動機構を有する V 字型ロボットは単一方向にしかロール回転できず、また、前後の移動方向の切り替え時にもロー

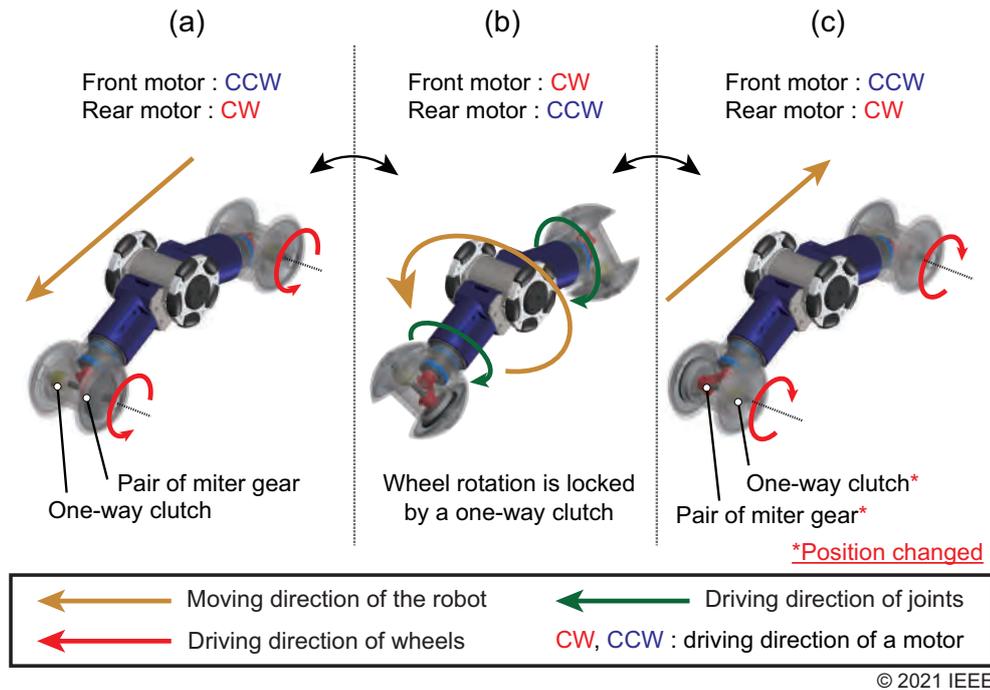


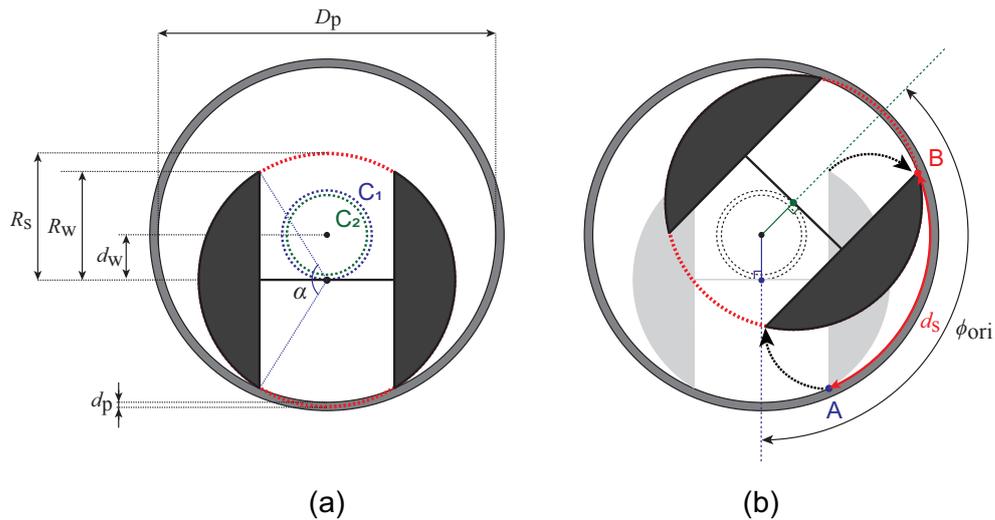
図 4.5: Movement sequence of robot: (a) Forward movement, (b) Rolling movement around the pipe axis, and (c) Backward movement (see attached video).

ル回転動作を必要とする。加えて、車輪も単一方向にしか駆動できないため、配管内を進む際に曲管の屈曲方向に合わせてロボットのロール姿勢を調整する場合には、ロール関節を必ず一回転以上させ車輪の駆動方向をロボットの推進方向に合わせなければ再度前進することができない。このとき、ロール関節の1回転あたりの旋回量が適切でなければ曲管走行時に必要な旋回回数が増加してしまう。そこで、ロボットがロール関節を回転させ配管軸周りに回転する際の旋回量を導出し、半球車輪の径とその関係を求める。

図 4.6 は配管内空間と半球車輪の幾何学関係を示す。 D_p , W , R_s , R_w , および α はそれぞれ、配管内径、半球車輪間の距離、球半径、車輪半径、そして断面上での車軸中心が車輪の上端と下端となす角度を示す。ロール関節がリンク軸周りに180度回転する際、半球車輪は図 4.6(b) のように回転する。ここで $R\phi_{ori}$ は配管軸周りのロボットの旋回角度を示す。また、 d_s は半球車輪がロール関節の回転によって配管壁面上を転がった際の移動距離を示す。‘A’ 点及び‘B’ 点は半球車輪の端点が配管内壁面と接している点を表し、それぞれ初期状態での接地点とロール回転後の接地点を表す。

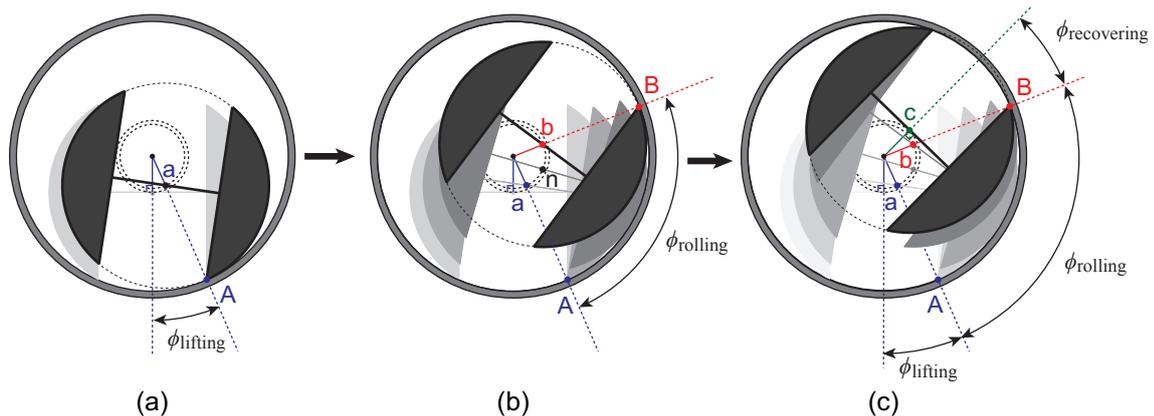
ロボットに取り付けている半球車輪は一つの球から設計されているが、中央の部分を取り除いた状態であるため、半球車輪が管内壁面に接している際、図 4.6(a) で示すように配管中心から d_p 分だけ沈むように接地している。このため、半球車輪がロール回転する際には三つの状態 (lifting phase, rolling phase, recovery phase) を移行しながら回転する。

図 4.7 は半球車輪がロール回転動作する際の状態推移を示す。ロール関節が回転し始めた際、半球車輪によって車軸中心 (球の中心) は配管中心に近づくように持ち上げられ、半球車輪がなす球が配管内壁面に接する状態になった時点で d_p がゼロ



© 2021 IEEE

図 4.6: Restricted space and configuration of hemispherical wheel in a pipe: (a) Normal posture at initial position, (b) Normal posture after half rotation of roll joint.



© 2021 IEEE

図 4.7: Transition of hemispherical wheel by roll joint: (a) Lifting phase (b) Rolling phase (c) Recovery phase

になる (lifting phase). 続いて, 半球車輪の端点が 'B' 点に到達するまで車輪がロール回転し (rolling phase), 最終的に両輪が再び壁面に接するまで回転する (recovery phase). このとき, 'a', 'b', および 'c' 点はそれぞれの状態での球の中心の位置を示す. これらの点はそれぞれ図 4.6(a) 中で示す C_2 および C_1 の円上に存在する. そのため, 球の中心は異なる二つの円軌道上を通過する.

上述した全体の状態推移から, ロボットの旋回角度 ${}^R\phi_{ori}$ は以下のように求まる.

$${}^R\phi_{ori} = {}^R\phi_{lifting} + {}^R\phi_{rolling} + {}^R\phi_{recovery} \quad (4.2)$$

ここで, ${}^R\phi_{lifting}$, ${}^R\phi_{rolling}$, および ${}^R\phi_{recovery}$ は図 4.7 で示すように各状態での旋回角

表 4.1: Dimensions of robot

| | |
|--|--------|
| Adaptive diameter of pipe (D_p) [m] | 0.1 |
| Width between pair of wheels (W) [m] | 0.042 |
| Radius of sphere of hemispherical wheels (R_s) [m] | 0.038 |
| Radius of hemispherical wheels (R_w) [m] | 0.0325 |

度を示し、それぞれ以下のように求まる.

$${}^R\phi_{\text{lifting}} = \cos^{-1} \frac{2(d_w + R_w)}{D_p} \quad (4.3)$$

$${}^R\phi_{\text{rolling}} = 2\pi \frac{d_s}{D_p} \quad (4.4)$$

ここで、recovery phase での旋回角度をは lifting phase でのものと等しくなるため、 ${}^R\phi_{\text{recovery}}$ は以下のように求まる.

$${}^R\phi_{\text{recovery}} = {}^R\phi_{\text{lifting}} \quad (4.5)$$

ここで上述した式中の各パラメータは、

$$d_w = \sqrt{\left(\frac{D_p}{2}\right)^2 - \left(\frac{W}{2}\right)^2} - R_w \quad (4.6)$$

$$d_s = R_s \frac{\alpha}{\pi} \quad (4.7)$$

$$\alpha = 2 \cos^{-1} \frac{W}{2R_s} \quad (4.8)$$

のように求めることができる.

以上より、表 4.1 で示す提案ロボットの設計パラメータを用いて、ロール関節が 180 度回転する際のロボットの旋回角度 ${}^R\phi_{\text{ori}}$ は 134.96 度として求まる.

最後に、ロボットが曲管の屈曲方向に合わせて旋回する場合のロール関節の必要回転数 n を式 (4.9) から求める:

$$u = \frac{2 {}^R\phi_{\text{ori}} n}{A\phi_t} \quad (4.9)$$

ここで $A\phi_t$ は絶対座標系でのロボットの目標旋回角度を示す. n を整数の旋回回転数とする場合、 u は整数でなければならず、 n を 0 から 1 ずつ増やし u が整数になった場合がロール関節の必要回転数となる. 例として、ロボットが曲管の屈曲方向に姿勢を合わせるために 90 度の旋回が必要な場合、現在の設計 (${}^R\phi_{\text{ori}} = 135[\text{deg}]$) ではロール関節を 4 回転させる必要がある. これが仮に ${}^R\phi_{\text{ori}} = 130[\text{deg}]$ や ${}^R\phi_{\text{ori}} = 150[\text{deg}]$ となるように設計された半球車輪の場合、それぞれ 90 度旋回するのにロール関節は 9 回転する必要がある、ロボットが曲管を走行する際に必要な操作量に影響する.

第5章 実機実験

本章では、提案した劣駆動機構を有するV字車輪型のロボットに関して、第3章と第4章で述べた制御面と機構面の2つのアプローチについて実機実験を行い、その有効性を確認する。また、面外曲げ配管とT字管内での走行実験を行いその結果について述べるとともに、これらの実験を通して明らかとなったロボットの総合的な走行性能の評価を行う。

5.1 速度差を利用したロボットの姿勢変形実験

ここではまず、第3章で提案した姿勢変形のための手法に関する実機実験を行う。第3章の1.3節で示した(A)-(C)の3つの動作生成手法を用いたロボットの変形動作によってロール関節が回転するかどうかを実験により確認し、その有効性を検証する。評価方法として、ロボットに搭載した2つの磁気エンコーダとリンクに取り付けたポテンショメータからDCモータの回転速度とロール関節の回転角度を取得し、変形後のロール関節の回転角度が第3章の2.3節で得た目標値を満たすことを条件に評価を行う。

5.1.1 実験環境

実験装置の外観を図5.1に、その構成を図5.2に示す。ロボットに内蔵された2つのDCモータ(maxon B7736698DDC0)をそれぞれ速度制御するために、マスターとなるマイクロコントローラ(Arduino Mega)と、スレーブとなる2つのマイクロコントローラ(Arduino Nano)を用いてマスター・スレーブ方式により制御を行った。それぞれのマイコン間の相互通信にはRS-485の通信方式を採用した。各モータの目標回転角速度はコンピュータから送られ、マスターマイコンがASCIIコードで受信する。その際の目標値はPWM(Pulse Width Modulation)信号として送信される。その後、マスターマイコンがスレーブマイコンに各モータの指令値を送ったとき、各スレーブマイコンは磁気エンコーダ(20 CPR, 2.7-18V, Pololu Corp., Las Vegas, USA)が検出したパルスカウントからモータの回転速度を算出し、その値をもとにモータの回転速度をPID制御(付録B)によって目標値になるように速度の調整を行う。ロール関節の目標値は3章で求めた最小螺旋ピッチ角でのロール関節回転角度である $-45[\text{deg}]$ に設定する。ロール関節の回転角度については、リンクに取り付けられたポテンショメータ(JC10-000-103N, Nidec Copal Electronics Corp., Tokyo, Japan)の内部抵抗による電圧値の変化をスレーブマイコンが取得し、その値をロール回転角度に変換する。このとき、ポテンショメータによって取得した値はローパスフィルタをかけて処理したデータを示し、モータの回転速度のデータについては

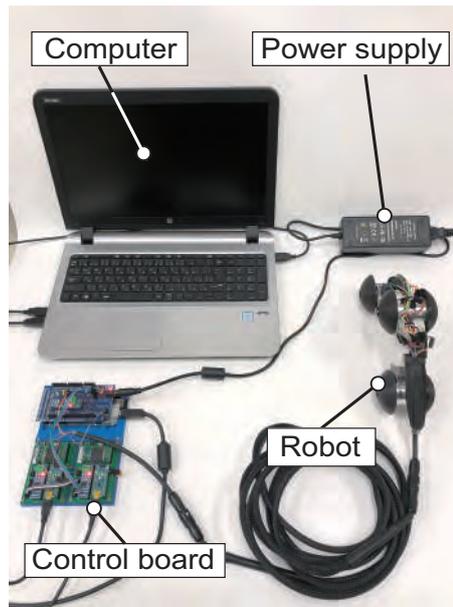


図 5.1: Overview of the control system.

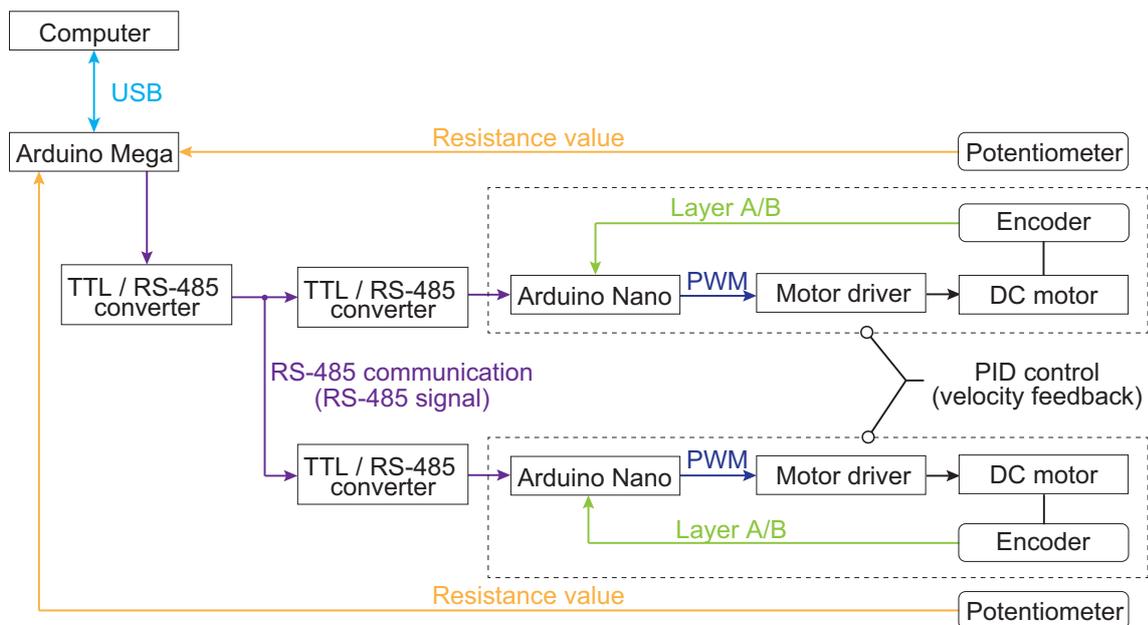


図 5.2: Schematic diagram of the control system.

取得時のデータとローパスフィルタをかけたデータの2つを示す。マスターマイコンとコンピュータ間の通信速度 (baud-rate) は 38400[bps] で設定し，マスターマイコンとスレーブマイコン間の通信速度は 9600[bps] で設定した。また，実験では図 5.3 で示す内径 100[mm] の塩化ビニル製の配管を用いて行った。

5.1.2 実験結果

ここでは，第 3 章で提案した 3 つの手法を用いてロボットの前後にある 2 つのロール関節を回転させ，その時の回転角度が目標値まで達するかを確認する。それぞれの



図 5.3: Overview of 4-inch straight and bend pipes.

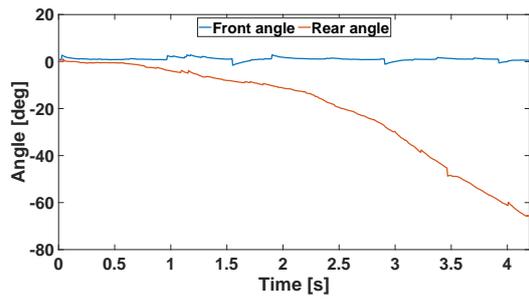
手法で実験を行い，計測したロール関節の回転角度とモータ回転速度の変化のデータをグラフにより示し，その結果について考察する．ロール関節が目標値に達せ薄かどうかについて各手法の評価を行い，それらの中から有効な手法を選定したのち，旋回動作を確認するために螺旋回転動作実験を行う．これらの実験はそれぞれ5回ずつ行った．

手法 (A)

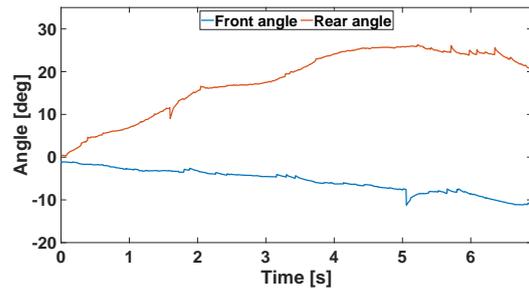
まず，手法 (A) による実験では，動作①-a-①及び①-a-②の実験を別々に行った．初めに，動作①-a-②では図 5.4(a)(c) で示すように後部のロール関節がモータ間の速度差によって回転することを確認した．この結果は第3章で仮定した図 3.2(a) の動作と同じものである．しかしその一方，動作①-a-①での実験では，前部のロール関節が十分に回転しない結果となった(図 5.4(b))．またこのとき，後部のロール関節が目標回転方向とは逆の方向に回転することを確認した．この結果は前部の車輪が後部よりも速く回転し，後部の車輪を牽引するように動作したためであると考えられる．これは，図 5.4(d) で示される後部車輪が牽引され後部のモータが過回転することで目標値に収束できなくなっている点から考えることができる．第3章の図 3.2(b) で予測したように，前部の車輪が後部よりも速く回転する動作の場合ではピッチ関節が開く方向に動作するため壁面から車輪に生じる垂直抗力が減少していることが考えられる．このため，前部の車輪が目標回転数で回転した場合，後部の車輪は前部の車輪と同じ回転速度と等しくなるために過回転する．その結果，後部のロール関節が過回転の回転角度分だけ回転したと考えられる．

手法 (B)

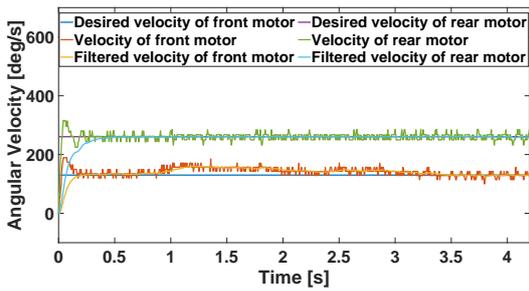
次に，手法 (B) では，ロボットが前後に移動する際，それぞれの進行方向に対して後部の車輪が速く回転し，ロボットのピッチ関節を閉じるような動作を検証した．この時の実験で得たデータを図 5.5 に示す．手法 (A) の実験において，モータ間の速度差によって後部のロール関節が回転することが確認できたため，この実験ではロボットが動作①-a-②により前後移動する際，片方のロール関節が目標値である $-45[\text{deg}]$ に



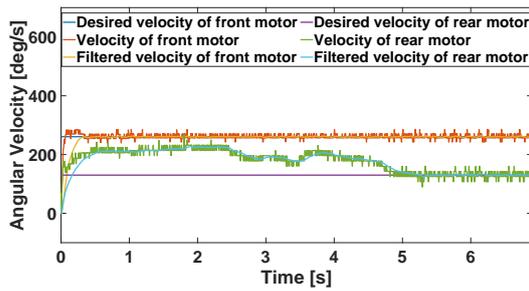
(a) Measured roll joint angle of motion (a)-②



(b) Measured roll joint angle of motion (a)-①

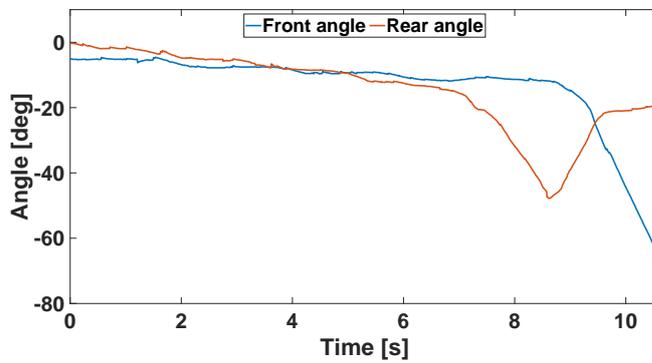


(c) Measured motor velocity of motion (a)-②

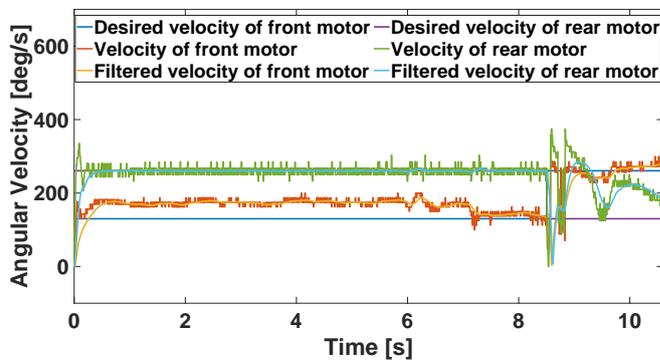


(d) Measured motor velocity of motion (a)-①

図 5.4: Posture transformation with method (A).



(a) Measured roll joint angle



(b) Measured motor velocity

図 5.5: Posture transformation with method (B) (motion changed at 8.5 sec)

達した時点 (8.5[sec]) でロボットの進行方向を切り替えた。図 5.5 の 7-8[sec] の結果から、後部の車輪が前部の車輪より速く回転するためわずかに押され目標速度を上回ったにも関わらず、後部のロール関節が回転することを確認した。しかし、後部のロール関節角度が目標値に達し、進行方向を切り替えた 8.5[sec] の時点で、今度は目標とは逆方向に回転して戻る結果となった。これは、ロボットの進行方向を変えるためにモータを逆回転させたために、目標値とは逆方向に回転が生じたためであると考えられる。そのため、手法 (B) によってロボットの姿勢を操作する際には、モータを逆方向に回転させた際にもう片方のロール関節が回転しないよう、ロール関節の回転を止めている O リングの静止摩擦抵抗について慎重に検討する必要がある。加えて、手法 (B) でロール関節が回転する速度は手法 (A) の場合とは大きく異なった。これは実験中に確認された車輪のスリップの影響であると考えられる。車輪がスリップし空転する場合、モータの回転はロール関節に分配されない。よって、手法 (A) と (B) によってロール関節を正確に制御する場合、モータに速度差が生じた場合の推進力とバネトルクの関係について明らかにし、バネの再設計を検討する必要がある。

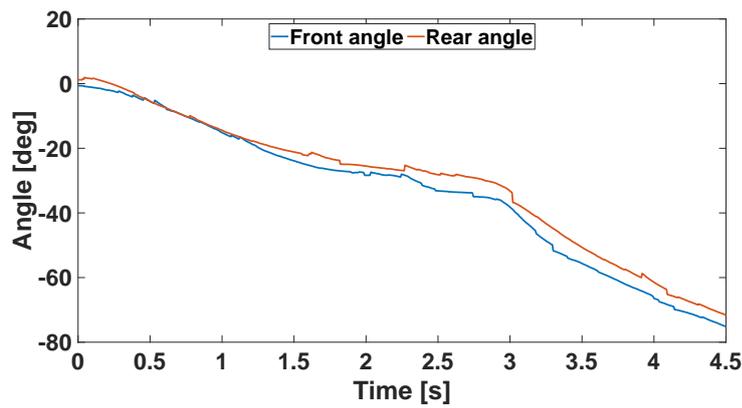
手法 (C)

最後に、手法 (C) では、車輪の推進方向が向き合うように二つのモータを同時に同じ速度で回転させた。図 5.6 にその実験結果を示す。この実験では、両方のロール関節が同時に回転可能であることを確認した。また、図 5.7 に各モータとロール関節のそれぞれの速度差を示す。式 (3.8) では、モータ間の速度差がロール関節の回転速度と一致し一定であると仮定したが、実際の測定結果では異なることがわかる。これは、図 5.8 に示す実験の様子から、車輪のスリップが原因であることがわかった。このため、手法 (C) によって車輪が向かい合うように駆動する場合には、スリップしないようにバネを設計することで姿勢変形動作を向上させることができると考えられる。しかし、この手法によりロボットは両方のロール関節を同時に回転させることができるため、前後への移動距離を必要とせずその場で素早い変形が可能である。よって、これらの実験結果から、他の手法に比べ、手法 (C) がロボットの姿勢を変える際の最も有効な手段であることがわかった。また、車輪を逆方向に駆動することで回転したロール関節を初期状態に戻すことが可能であった。

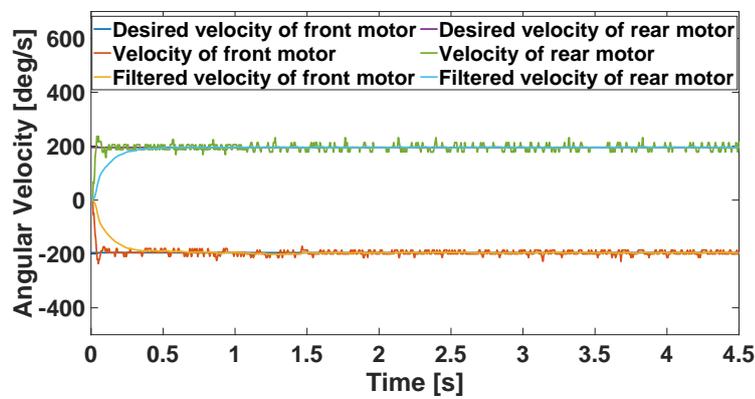
螺旋回転動作実験

螺旋回転運動のためにロボットの姿勢を変形させる手法として、手法 (C) が最も有効であることが前述した実験により示された。そこでここでは、手法 (C) によってロボットの姿勢を変形させたのち、ロボットの螺旋回転運動を確認するための実験を行った (図 5.9)。

実験結果から、手法 (C) により各ロール関節を目標値である $-45[\text{deg}]$ まで回転させたのち、ロボットを前進させることで螺旋回転によって旋回することを確認した。また、この実験から、ロボットは配管軸周りにおよそ $90[\text{deg}]$ 旋回するのに $1.2[\text{m}]$ の距離を必要とすることがわかった。加えて、図 5.9 の $3.5[\text{sec}]$ 及び $4.5[\text{sec}]$ の時点で示すように、手法 (C) ではロボットのロール関節を $-90[\text{deg}]$ 近くまで回転させるこ



(a) Measured roll joint angle with motion (c)-③



(b) Measured motor velocity with motion (c)-③

図 5.6: Posture transformation with method (C)

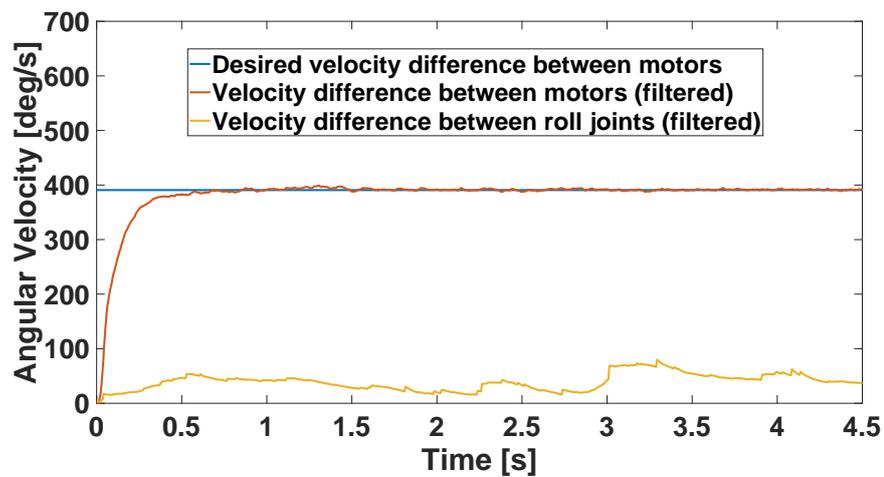


図 5.7: Comparison of measured velocity differences with method (C)

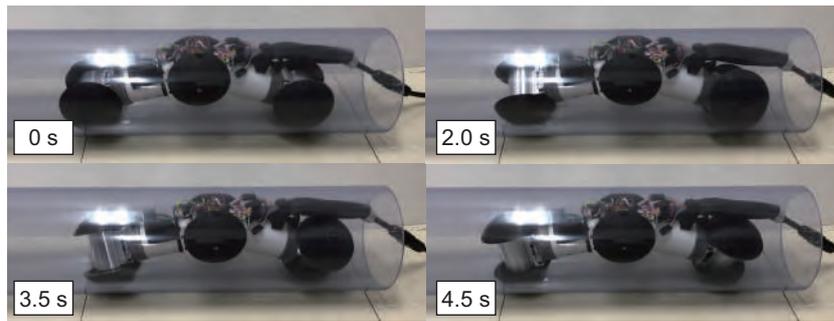


図 5.8: Experimental result for method (C)



図 5.9: Experimental result of the helical movement with method (C)

とが可能であった。ただし、車輪の中心部(車軸端点部分)が配管内壁面と接するようなこの姿勢では、車輪の回転によって壁面との間に生じる摩擦力が配管軸と垂直になる方向に生じるため、ロール関節をもとの状態に戻すことが困難となる。そのため、手法(C)による姿勢変形動作ではロール関節の回転が目標値付近で止まるような角度制御が有効であると考えられる。

5.2 拘束付き差動機構を有するロボットの走行実験

ここでは、第4章で提案した拘束付き差動機構を有するV字車輪型配管内検査ロボットを用いて、その基本的な走行性能を確認するため、水平及び垂直直管、水平曲管、垂直曲管での実験を行った。ロボットの走行実験では図5.3で示した内径100[mm]の塩化ビニル製の直管と曲管を用いてそれぞれ5回ずつ行った。また、この実験では、ゲームパッドをコントローラとして利用し、オープンループによるロボットのマニュアル操縦を行う。

5.2.1 水平・垂直直管内走行実験

ここではまず、第4章で提案した拘束付き差動機構を有するV字車輪型配管内検査ロボットの直管内での基本的な動作の確認を行った。第4章で提案したロボット

はワンウェイクラッチにより車軸の回転が拘束され、車軸は単一方向にしか回転しない。そのため、ロボットが前後の移動方向を切り替える際にはロール回転動作を行う必要がある。そこでまず最初に、水平直管内においてロボットが推進方向を切り替える前後移動の実験を行い動作の確認をした。その様子を図5.10で示す。

この実験により、ロボットは半球車輪を180度ロール回転させることで駆動輪の推進方向を変え、ロボットが前後に移動可能であることを確認した。また、この動作については垂直な直管内においても問題なく動作することを図5.11に示す実験から確認した。ただし、コントローラ上の二つのジョイスティックを用いて前後のモータへ別々に指令値を送っているため、ロール関節の回転角度がずれた際には個別に操作しロール関節角度を調整する必要があった。

次に、旋回動作についての実験についての実験を水平直管内で行った。まず、半球車輪が180度ロール回転する際のロボットの配管軸周りの旋回動作を示したものを図5.12に示す。第4章2節から、ロール関節がその軸周りに半回転した際のロボットの

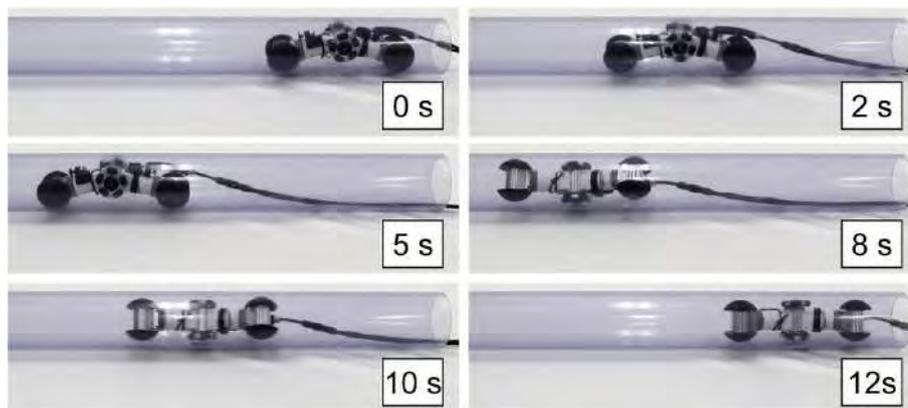


図 5.10: Forward and backward movements of the robot in a horizontal pipe.

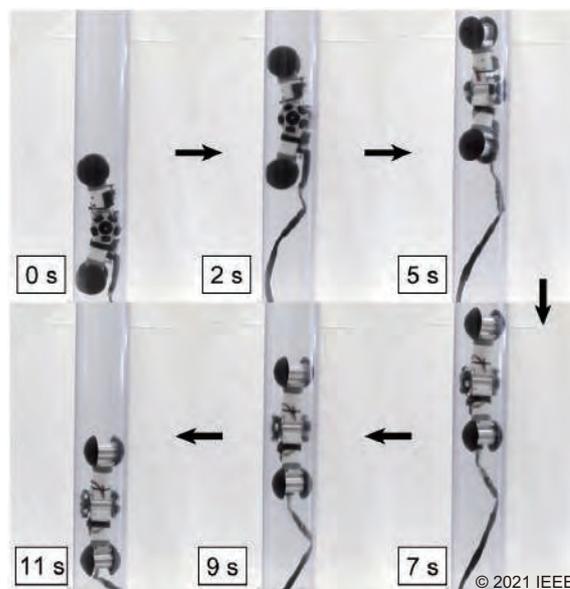


図 5.11: Forward and backward movements of the robot in a vertical pipe

配管軸周りの回転角度は $R\phi_{ori} = 135[\text{deg}]$ と導出されたが、実験の測定値は $124[\text{deg}]$ であった。これは 0.2 から $0.6[\text{sec}]$ で片輪を持ち上げ旋回動作に移行した瞬間にわずかに車輪がスリップしたことが原因であると考えられる。 $10[\text{deg}]$ 近い差異はロボットの必要旋回回数 (式 (4.9)) にも影響する。しかし、曲管に関する走行実験結果から、ロボットの旋回動作について新たな知見が得られたため、この問題については次節の考察で議論する。

次に図 5.13 で示すのは、ロボットの旋回動作確認のための実験の様子である。図中 n はロール関節が $360[\text{deg}]$ 回転し、ロボットが配管軸周りに旋回した回数を示す。ワンウェイクラッチの拘束により、ロボットはロール関節が $360n[\text{deg}]$ 以上回転した場合にしか再び同じ方向に進むことができない。そのため、旋回動作を始めた場合、再び前進するためには、最短でも図中で示す $n = 1$ の姿勢にならなければ前進できない。

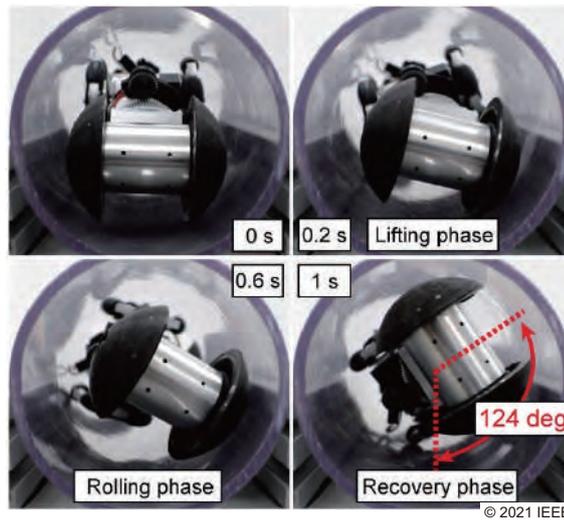


図 5.12: The orientation angle generated by a half rotation of the roll joints.

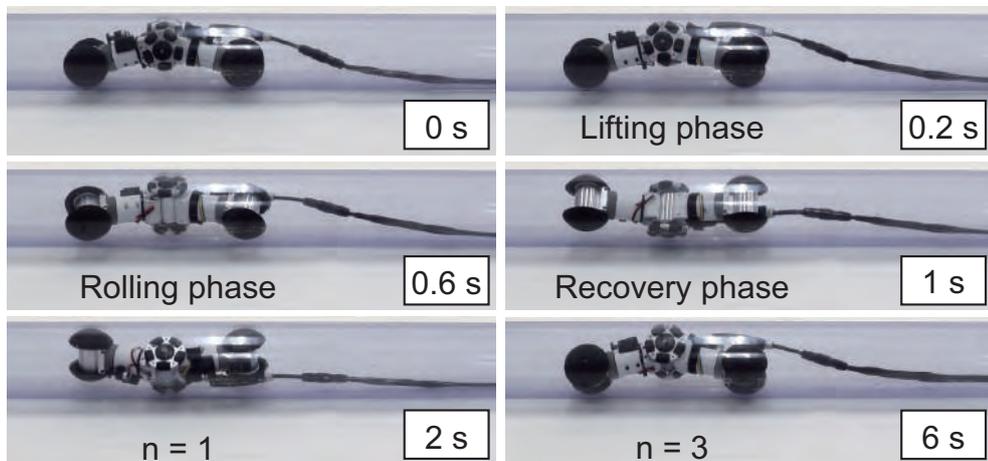


図 5.13: Rolling movement of the robot in a horizontal pipe.

5.2.2 水平曲管内走行実験

次に、水平な曲管での走行性能を検証した。ここでは、以下に示す4つの異なる姿勢から曲管内へ進入することを考える。

- (1) ロボットの関節の屈曲方向と曲管の屈曲方向が一致している場合
- (2) ロボットの進行方向に対し曲管が真横に伸びている場合
- (3) ロボットの関節の屈曲方向と曲管の屈曲方向が180度逆方向の場合
- (4) ロボットの進行方向に対し、ロボットの後ろ側に曲管が存在する場合

走行実験の結果として、ロボットはすべての場合において曲管を走行することができた。例として、図5.14と図5.15に(2)と(3)の場合での実験の様子をそれぞれ示す。従来の連結車輪型ロボットでは、(2)の姿勢の状態ではロボットが曲管を走行することは幾何学的に困難である。しかし、提案するロボットは各リンクがロール関節を有し、中央の受動車輪をオムニホイールにしているため、図5.14の6から15[sec]のように従来では走行が困難であった姿勢の状態のまま進入した場合でも、各ロール関節が受動的に回転することでロボットは曲管の屈曲方向になじむように姿勢を変えることが可能であった。この動作にはワンウェイクラッチが必要でないため、中央の車輪がオムニホイールであれば第2章のロボットでも可能である。しかし、その後の21から24[sec]の動作のように、曲管内でロール関節を独立して回転させ、まっすぐな姿勢に戻す動作にはワンウェイクラッチが必要となる。この一連の動作により、提案ロボットは曲管を走行する際に事前に姿勢を合わせる必要なく曲管を走行することができた。また、図5.15で示す(3)の場合において、曲管に進入する前に

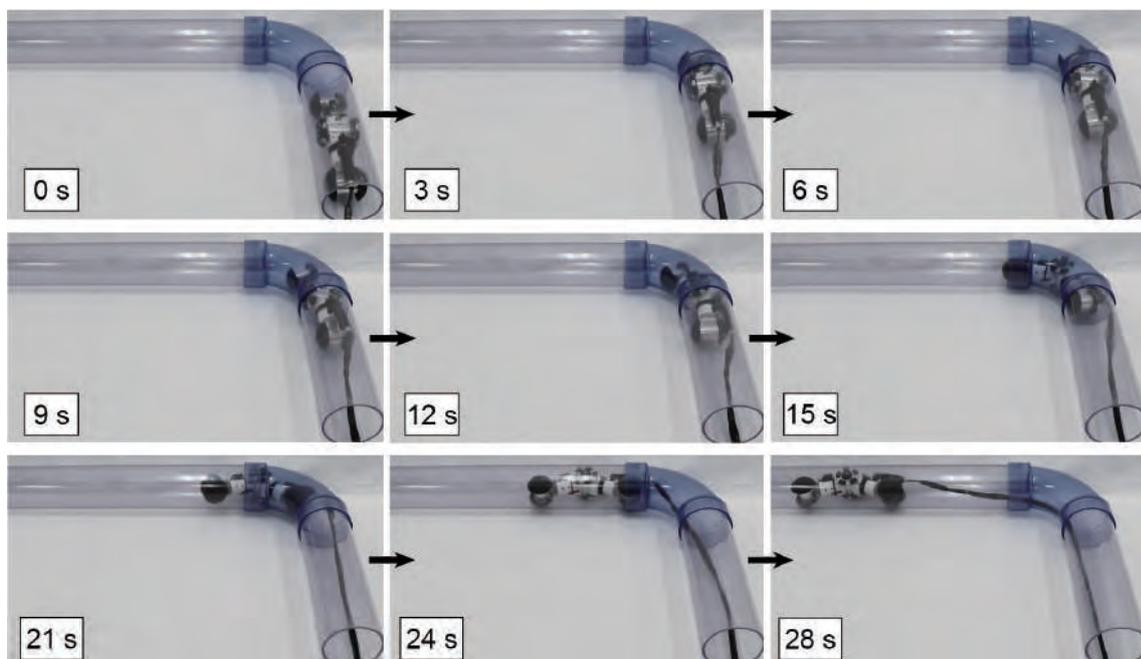


図 5.14: Negotiating a horizontal bend pipe from the against orientation with the rolling movement.

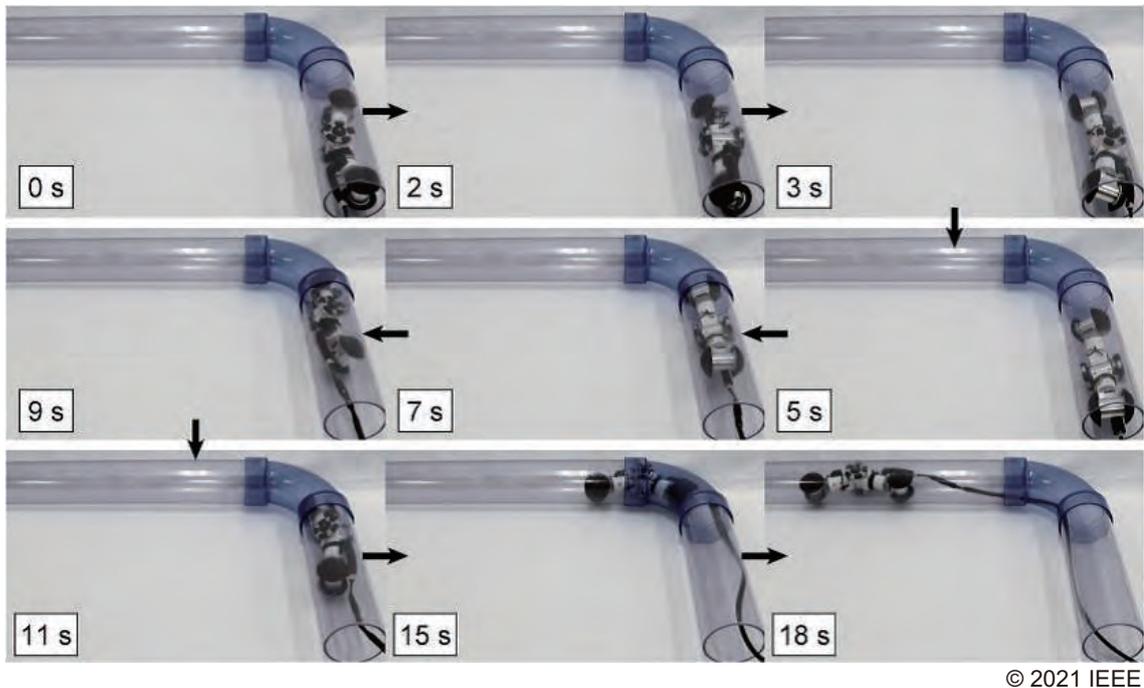


図 5.15: Negotiating a horizontal bend pipe from the against orientation with the rolling movement

事前に旋回動作 (0–3[sec] 及び 7–11[sec]) によって配管の屈曲方向と関節の屈曲を合わせることで曲管を走行できることを確認した. (1)-(4) の実験結果から, 提案するロボットは関節の屈曲方向と曲管の屈曲方向が一致していない場合であっても, そのまま進入してなじむようにロール回転しながら走行する, もしくは旋回動作によりロボットの配管軸周りの姿勢を調整したのち走行することが可能であることを確認した.

5.2.3 垂直曲管内走行実験

ここでは, ロボットの垂直曲管での走行実験を行う. まず, 図 5.16 に垂直管から水平管へと上る走行実験を行った際の様子を示す.

ここでは, ロボットが垂直な直管から曲管へ進入する際にわずかに車輪がスリップしたものの, ロボットは曲管部を通過し走行することができた. しかし, 実験回数を重ねるごとに車輪がスリップする場面が増え, 最終的に曲管を走破できた回数は最初の 3 回ほどであった. このとき, ピッチ関節内部のトーションバネの塑性変形が確認され, 同じバネに入れ替えた場合に再度走行することを確認した. また, 図 5.17 で示すような垂直曲管で, 水平管から垂直管へと上る走行では, ロボットが曲管内部に進入し後部車輪までが入りきったところで車輪がスリップし, それ以上進むことはできなかった. これら図 5.16 及び図 5.17 の実験の結果については, 次節の考察で詳細な議論を述べる.

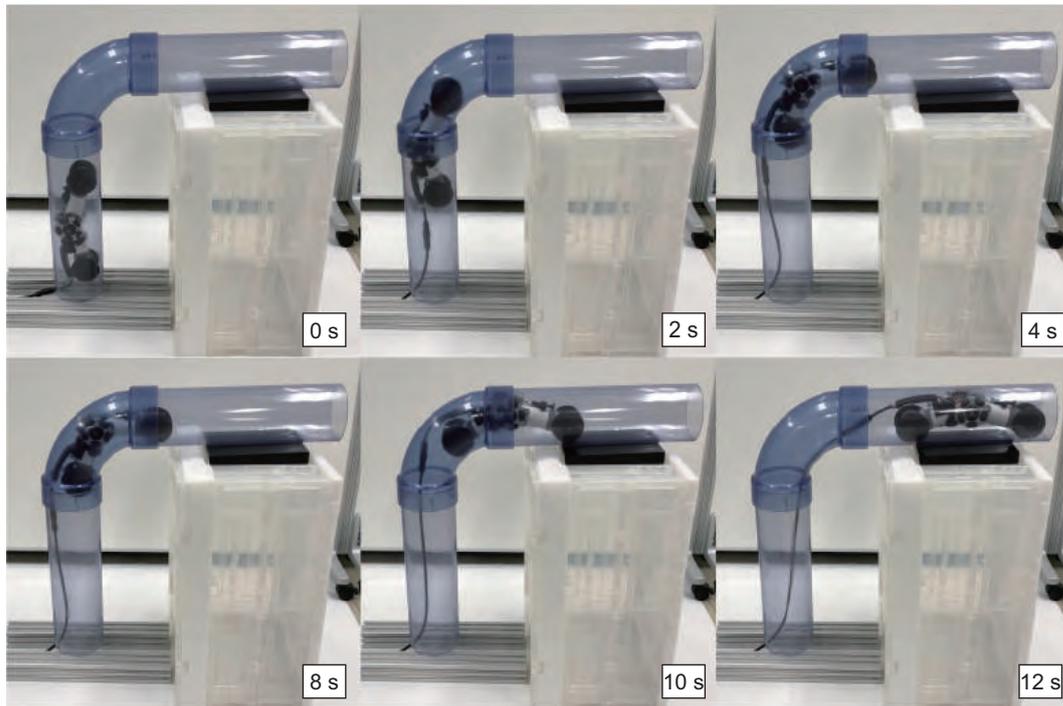


図 5.16: Experimental result in a vertical bend pipe.

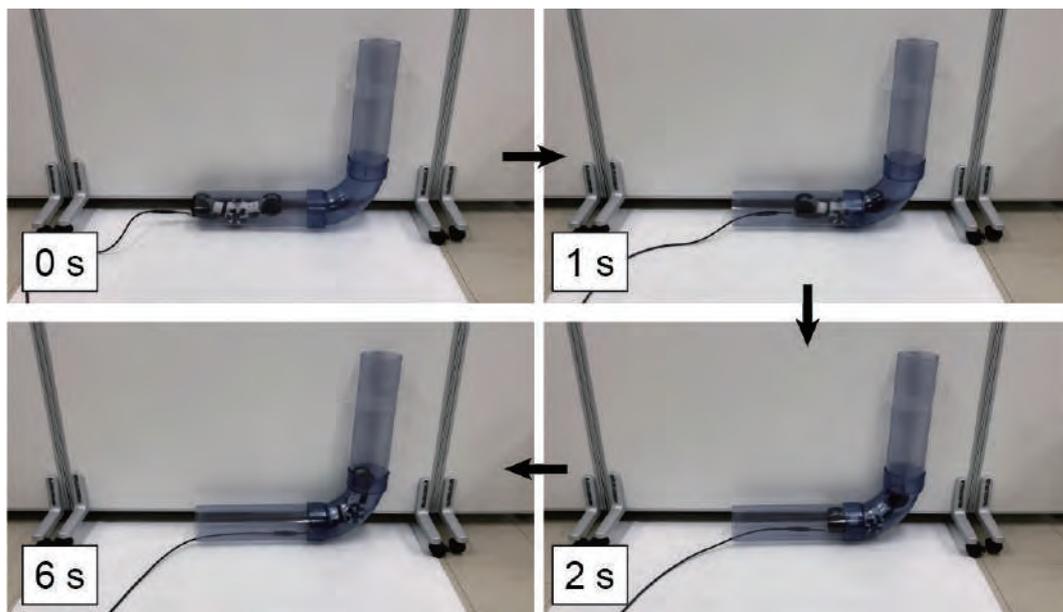


図 5.17: Experimental result in a vertical bend pipe with a climbing motion.

5.3 考察

ここではまず、本研究で提案した制御面と機構面からの2つのアプローチ、すなわち第3章で提案した劣駆動関節の制御手法と第4章で提案した拘束付き差動機構について、実験から得られた結果を基にロボットの旋回性能について評価する。次に、開発したロボットの曲管内での走行実験の結果について考察したのち、面外曲げ配管、T字管内での走行実験を行い、ロボットの総合的な走行性能を評価する。

5.3.1 旋回性能の比較

前節では、本研究で提案した制御面と機構面からの2つのアプローチについての実機実験を行い、それぞれのアプローチの有効性を検証した。その結果から、前者はモータ間の速度差によりロール関節を回転させ螺旋回転運動が可能なことを、後者は前後移動することなくその場で旋回動作が可能なことをそれぞれ確認した。しかし、それぞれのアプローチでは使用するロボットが異なる。前者のロボットでは、ロボットは螺旋回転運動により前進しながら配管軸周りに旋回する。これは、推進動作と旋回動作を同時に行うことができるため効率的な旋回方法と言えるが、旋回には一定の距離が必要になり、曲管と曲管をつなぐ直管が短い場合では配管の屈曲方向に合わせた旋回が困難となる。また、第3章2節で求めたように、現在の設計では最小化した螺旋ピッチ角の値がおよそ $\psi_i = 86[\text{deg}]$ と大きく、ゆるやかな螺旋回転軌道でしか旋回できない。一方、拘束付き差動機構を有するロボットでは、旋回時に前後方向への移動を必要とせず、直管部が短い場合でもロボットの全長が収まれば旋回は可能である。加えて、この機構では図5.14の実験で示したように、曲管内へなじむように進入することができ、その際受動的に回転したロール関節はモータの回転によって戻すことができる。これはモータの回転方向の切り替えのみで車輪とロール関節をそれぞれ駆動できる拘束付き差動機構の強みであると言える。しかし、この機構ではワンウェイクラッチの回転拘束によりロール関節は単一方向にしか駆動できない。この場合、ロボットが連続して旋回動作を行う場合にはロボットの後部に接続されている電源ケーブルがねじれてしまう。そのため、スリップリング[36]のような回転コネクタの使用を検討する必要がある。ただしこのコネクタはロボットの後部に牽引する形で接続すればよいため、これらの点を考慮すると旋回機能においては後者のロボットがより有用であると考えることができる。

5.3.2 曲管での走行性能

ここでは拘束付き差動機構を有するロボットの曲管での走行性能について、実験で得られた結果をもとに考察する。

初めに、提案ロボットの曲管での走行性能について、旋回動作の観点から従来の連結車輪型ロボットと比較する。この点について言及すると、まずロボットに必要な制御量を減らすことができると言える。従来の連結車輪型ロボットであれば、曲管を走行する際、姿勢が合致していなければ必ず旋回動作が必要になった。一方、提案ロボットでは、図5.14及び図5.15で示した実験結果から、ロボットのロール姿

勢を曲管の屈曲方向に合わせる際、必ずしも厳密に合わせる必要はなく、姿勢が合致していない場合でも曲管になじむようにロール回転しながら前進することが確認できている。これは、ロボットに必要な旋回動作の回数を減らせることを意味する。加えて、ロボットが曲管になじむように進入する動作は、将来的な配管検査を考慮した際、ロボットをマニュアルで操縦する場合と自律的に動かす場合の両方に影響し、マニュアル操縦の場合にはロボットに必要な操作が減るため操縦者の負担を減らすことができる。ロボットの自律制御を考える場合には、文献 [37] のように事前に曲管の屈曲方向を識別する必要性がなくなるため、ロボットの制御量が減る。これら点は提案ロボットの新たな有用性として挙げることができる。しかし、旋回動作が必要な場面、例えばロボットの配管軸周りの姿勢を細かく調整したい状況等が生じた場合には、提案ロボットは単一方向にしか旋回できない点がデメリットとなる。これは T 字管などの分岐管を走行する場合において、分岐せずに直進する動作に影響する。この点を解決するには、ワンウェイクラッチを電磁クラッチに置き換え、ロール関節が両方向に駆動できるようにする方法などが考えられるが、ロボットが大型化しないようにするための設計が求められる。

次に、提案ロボットの垂直な曲管内での走行性能について述べる。図 5.16 及び図 5.17 の実験では、垂直曲管を移動することを確認したものの、繰り返し安定して走行をすることはできなかった。この原因については、バネのもつ剛性と変位量が関係していると考えられる。まず、垂直管から水平管へ上る場合の実験では、ロボットは数回であったものの走行することを確認している。これは、トーションバネがもつ剛性とその時の変位量が十分であったためだと推測できるが、バネの変位量に対し使用可能角度が小さかったため、塑性変形が起きた。また、水平管から垂直管へ上る場合の実験では車輪が完全にスリップし、走行できなかった。これらの結果から、垂直曲管内での安定した走行を実現するには、現在使用しているバネについて、同程度かそれ以上の剛性を持つバネを使用し、それと同時にバネの変位量が大きくなるよう取り付け位置を変える必要がある。しかし、トーションバネがもつ剛性と使用可能角度との間には、トレードオフの関係が存在し、基本的に、バネの線径とコイル直径を固定して考えた場合、高い剛性係数を持つバネであればあるほど巻き数が減り、使用可能角度が小さくなる。そのため、バネ剛性係数を維持しつつバネの使用可能角度を増やす場合には、バネの線径とコイル直径を変更し、バネの直径を大きくしたものを使用しなければならない。この問題については次章の今後の課題で詳しく述べる。

5.3.3 面外曲げ配管での走行性能

ここでは、本論文で開発した2つのロボット(第2, 4章)について、提案ロボットの面外曲げ配管での走行を実験的に検証し、その結果について述べる。

まず初めに、第2章で提案した V 字型のロボットを用いて、内径 100[mm] の面外曲げ配管での動作実験を行った。実験では、操縦者がゲームコントローラを使用して前後のモータの回転方向を指定してマニュアルで操作を行った(マスターマイコンとスレーブマイコン間の通信システムの詳細は前節と同じものである)。実験は図 5.18 で示すように3つの異なる姿勢から配管への進入を行い、それぞれ10回ずつ

行った. この実験の様子とその結果を図 5.19 及び表 5.1 で示す. 走行中に 2 分以上経過した場合は走行失敗として記録している. この実験では, 毎回安定した走破はできなかったものの, ロボットが幾何学的に面外曲げ配管を走行可能であることが分かった. 図 5.19 (パターン 2) で示すように, ロボットが 2 つ目の曲管に進入を始める際 (4-5 [sec]), 前部の半球車輪が曲管内の外側壁面の形状に沿うように受動的にロール関節が回転している. その後, 半球車輪が曲管内の内側壁面に接触するようにロボットを一度後退させ (5-6 [sec]), 再度前部車輪の回転を逆転させ前進することで面外曲げ配管を走破した (8-12 [sec]). 加えて, パターン 1 とパターン 3 の場合でも同様に, 半球車輪が壁面に沿うようにロール関節を回転させ進入することでロボットの向きを変え, 走行することを確認した.

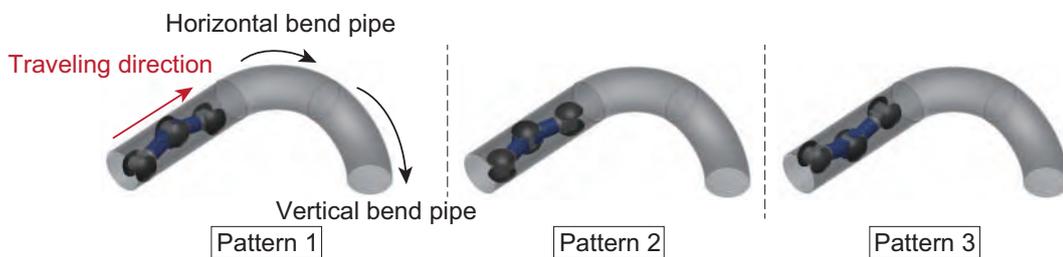


図 5.18: Three orientation patterns of the robot for passing through an out-of-plane double elbow.

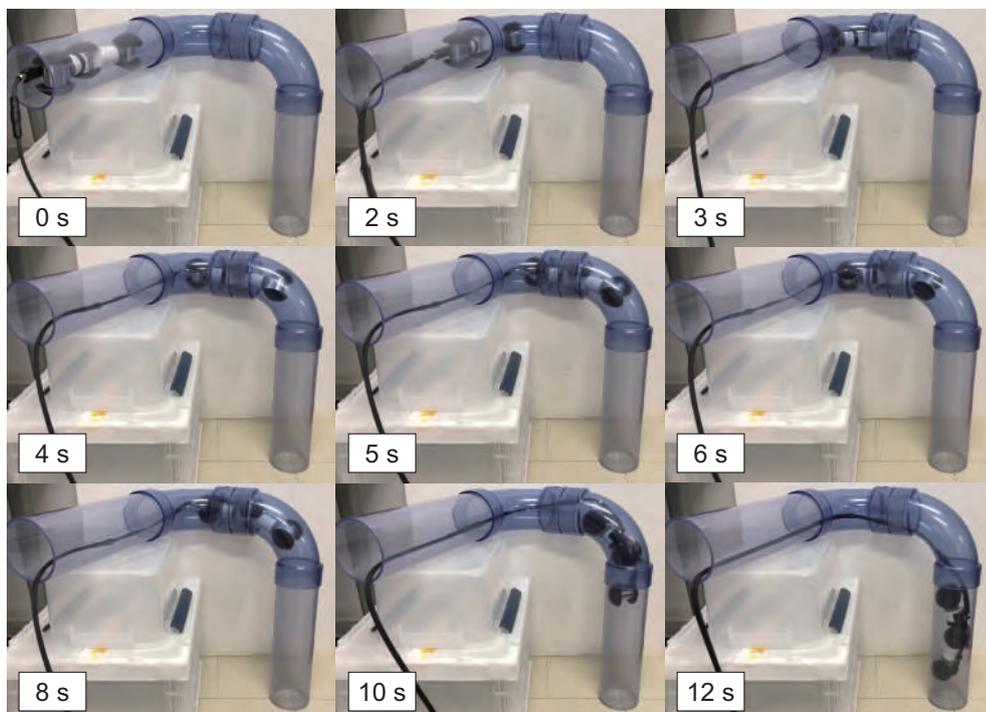


図 5.19: Experimental result of the proposed robot in an out-of-plane double elbow (Success example of pattern 2).

表 5.1: Experimental results for the out-of-plane double elbow (10 trials in each pattern).

| Robot orientation | Fastest passing time [s] | Slowest passing time [s] | Average time [s] | Number of failures [times] |
|-------------------|--------------------------|--------------------------|------------------|----------------------------|
| Pattern 1 | 22.5 | 96.0 | 43.9 | 1 |
| Pattern 2 | 12.3 | 86.2 | 30.3 | – |
| Pattern 3 | 26.2 | 78.6 | 54.8 | 2 |

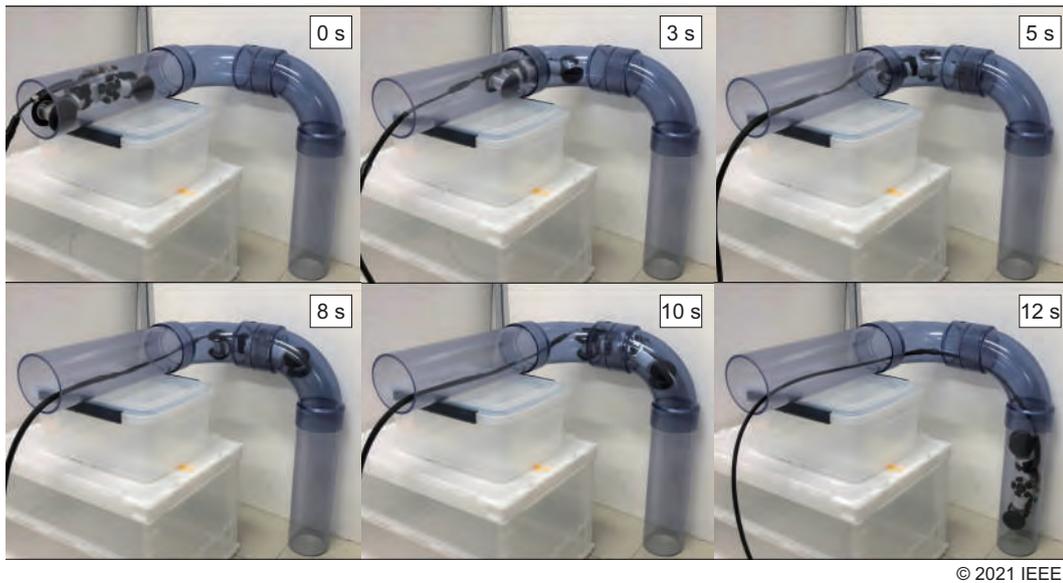


図 5.20: Experimental result in an out-of-plane double elbow.

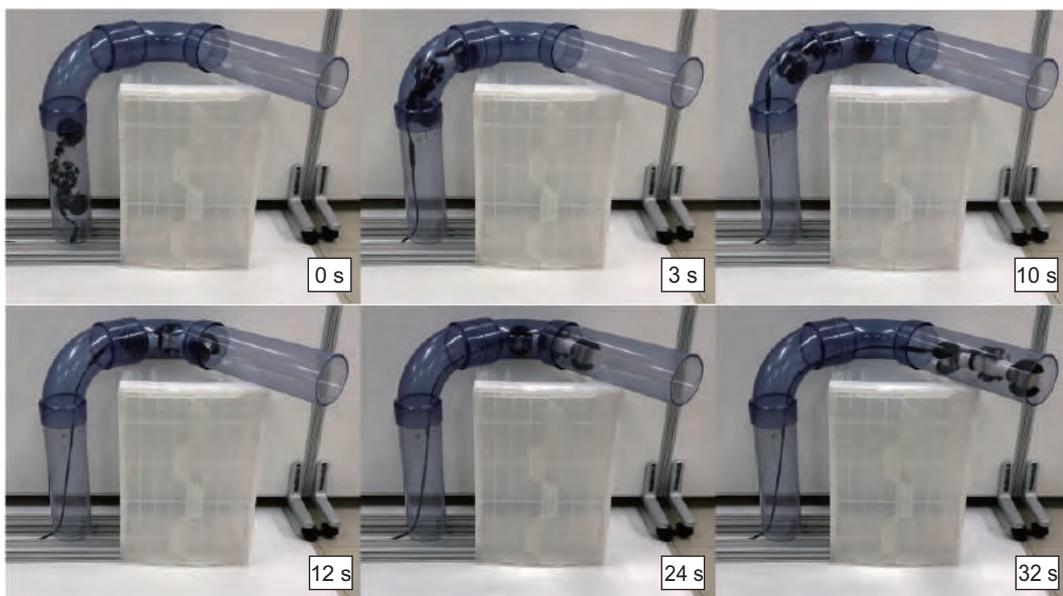


図 5.21: Experimental result in an out-of-plane double elbow with a climbing motion.

次に、第 4 章で提案した拘束付き差動機構を有するロボットを用いて、面外曲げ配管での走行実験を行った。その様子を図 5.20 と図 5.21 に示す。

実験から、前述と同様に提案ロボットが面外曲げ配管を幾何学的に走行可能であることを確認した。また、この実験ではいずれの姿勢で曲管に進入した場合でも、ロボットは常に能動車輪を配管内壁面に接触させながらロボットの体幹をねじるように面外曲げ配管を走行し、途中でスタックすることなく走破することができた。しかし、上り方向での実験(図 5.21)では垂直曲管での実験と同様に、走破することはできたものの走行回数を増やしくいくとバネの塑性変形により次第に走行できなくなった。

これらの結果から、本研究で提案するV字型のロボットが面外曲げ配管での走行が可能であることを実験的に確かめることができた。しかし、現状では走行時のロボットの操作が複雑であり、面外曲げ配管を走行する際は操縦者への技量が求められる。また、面外曲げ配管の内部空間とロボットとの幾何学関係が明らかとなっていないため、この種の配管の走行理論を確立するにはロボットのリンク長や車輪径などのパラメータに関する設計理論の構築が必要となる。これらの問題点について、次章の今後の課題でまとめる。

5.3.4 T字配管での走行性能

最後に、提案した拘束付き差動機構を有するロボットのT字管での走行を実験的に検証し、その結果について述べる。T字管には図5.22のように内側形状が角張ったものと曲管のようにフィレットがついたものが存在する。そのため、ここでは両方のT字管について、水平と垂直の場合で実験を行った。また、実験は進行方向に壁面がある場合、進行方向に壁面がない場合、分岐部を走行せずに直進する場合の3つのパターンで実験を行った。

実験の結果として、まず、内側形状が角張ったT字管ではリンクが分岐部でスタックし、いずれのパターンでも走行が困難であった。図5.23にその実験の様子を示す。28[sec]の時点で後部リンクがT字管の内側の角に乗り上げる状態となり後部車輪が浮くことで前進することができなくなった。ただし、これはリンクの形状や車輪半径の変更により改善する可能性があるため、ロボットとT字管内形状との幾何学関係を調べる必要がある。

次に、内側にフィレットがかかった水平なT字管内での走行実験を行った。図5.24と図5.25に1つ目と2つ目のパターンでの実験の様子を示す。分岐部の内側にフィレットがかかったこのT字管では、ロボットはいずれのパターンも走行可能であることが分かった。これは、前述のような配管内部の段差が存在せず、リンクが乗り上げることがなかったことが要因として考えられる。しかし、T字管の分岐部での走行は、2リンク型のロボットでは中央の車輪が分岐した配管へ突き出てしまい壁

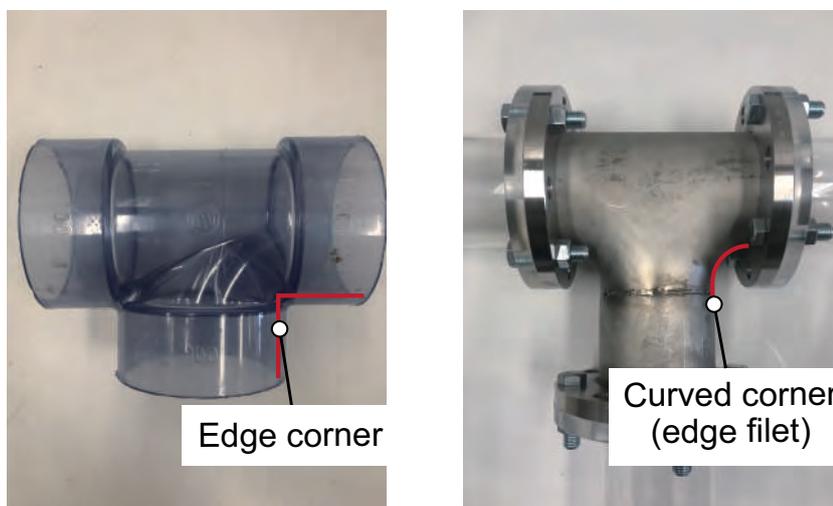


図 5.22: Two different type of T-branch pipes.

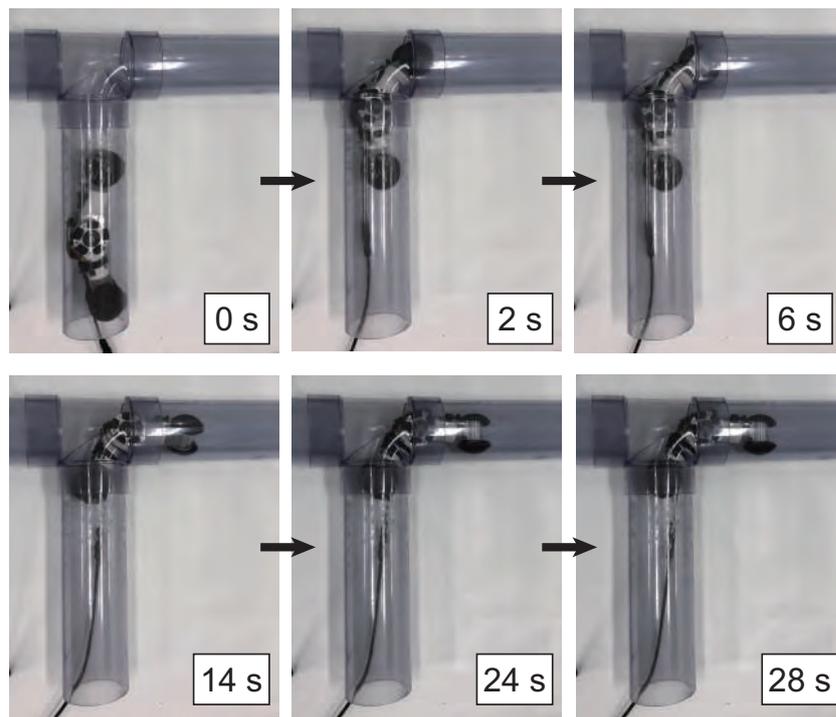


図 5.23: Experimental result in a T-branch pipe with edge corner.

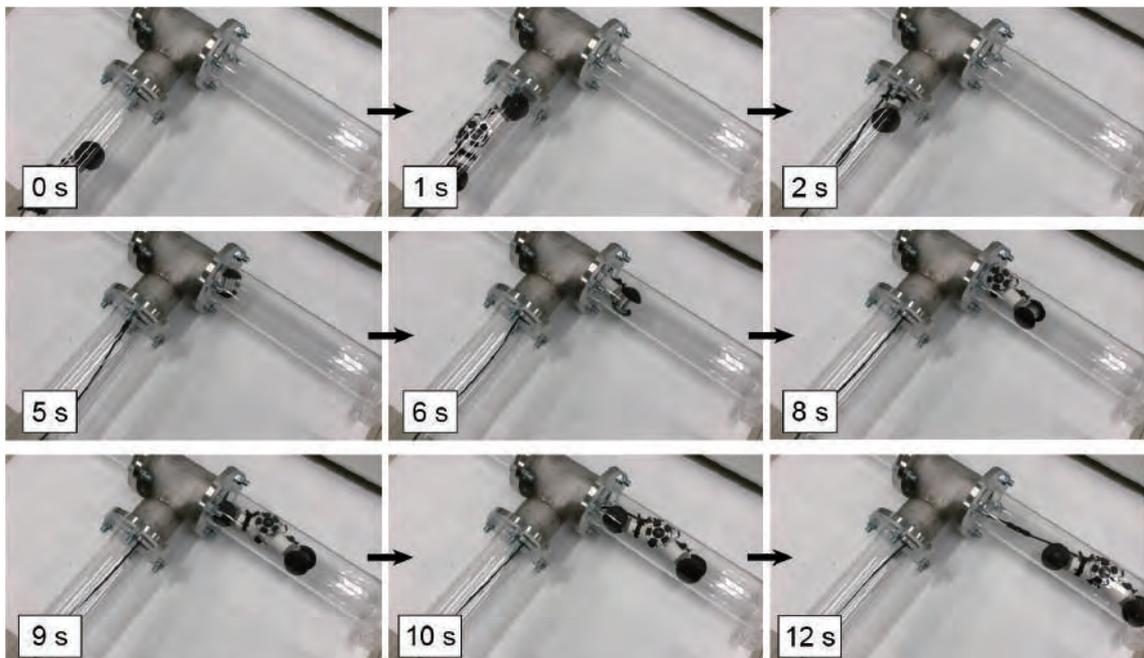


図 5.24: Experimental result in a T-branch pipe.

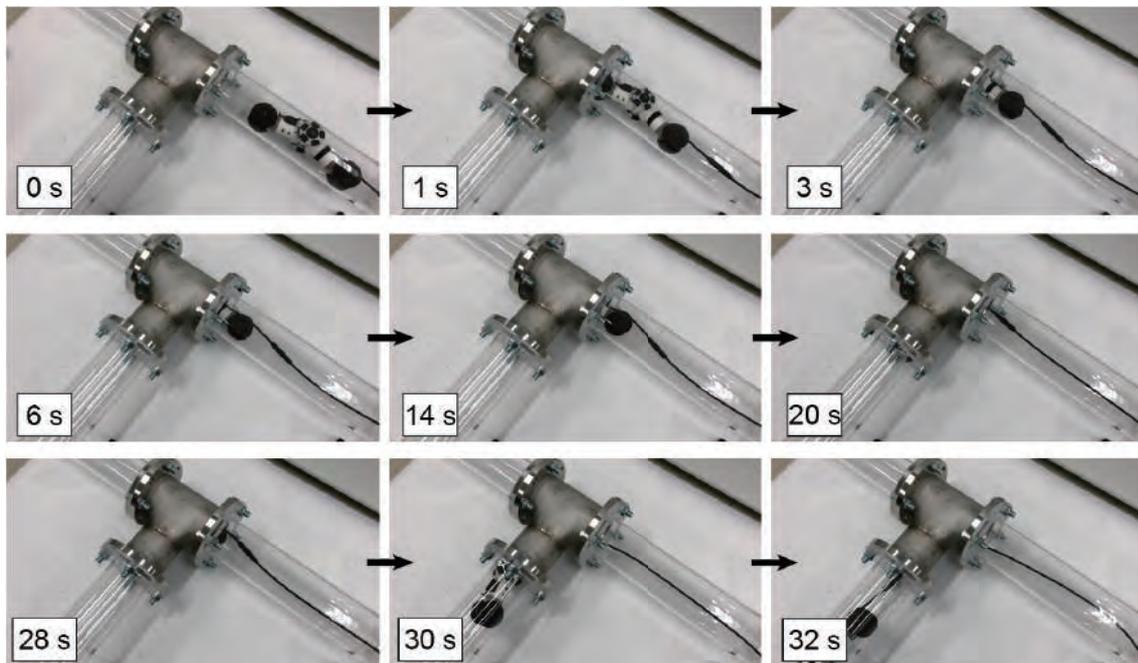


図 5.25: Experimental result in a T-branch pipe with a different direction.

面との接触を維持できなくなるため、突っ張り状態を維持できなくなった。ただし、この状態でロボットのロール関節を回転させ半球車輪の両輪を地面側の壁面に接触させることで、推進力を得て走行することは可能であった。この動作の有効性は1つ目と2つ目の両方のパターンで実験により確認した。しかし、進行方向に壁面がないパターンではロボットが分岐後の2つ目の直管に進入する際に中央の車輪が図中上方向にある直管側に突き抜けてしまう。これにより、前部の車輪が2つ目の直管の軸方向に前進しようとするのに対し、後部車輪は図中上方向にある直管側に進もうと動くため、慎重な操作が必要とされた(図5.25中14–28[sec])。また、垂直な配管で実験した場合には、下る方向には走行できたものの、上り動作が必要なパターンではいずれも走行することができなかった。

以上の結果から、提案ロボットは水平なT字管であれば走行できることを実験的に確認することができた。しかし、V字型のロボットではT字管内で突っ張り状態を維持できないため、車輪と壁面との摩擦が十分ではなくスリップが生じやすくなる。また、ロボットにカメラを搭載しその情報のみでロボットを操縦する場合には操作手順が複雑になることが予想される。そのため、実用的な場面を考えると、現在の状態においてV字型ロボット単体でT字管を走行することは現実的ではない。

第6章 結論と今後の課題

6.1 結論

本論文では、一對のマイタギアの差動原理によって半球状の車輪の車軸とリンク軸周りの回転を実現した劣駆動機構の提案により、連結車輪型配管検査ロボットがもつ推進動作と旋回動作のためのアクチュエータを共通化した2リンクV字型の連結車輪型配管検査ロボットの開発を行った。共通化によりアクチュエータのパワーのすべてを推進動作と旋回動作に使用することで、限られたアクチュエータの駆動力を最大限に活用できる。これは、例えば、従来では推進動作と旋回動作のそれぞれに2つずつモータが使用されていた場合、提案したロボットでは2つモータの駆動力を推進動作と旋回動作の両方に活用することが可能になるため、各動作で発揮されるパワーを落とすことなくロボットに必要なアクチュエータ数を減らすことができる。ロボットに必要なアクチュエータ数が削減されることで、将来的なロボットの小型軽量化が期待できるほか、連結車輪型ロボットでは構成するリンク数の削減が容易となり、従来では走行が困難であった面外曲げ配管の走破性の向上が期待できる。しかし、一般的に劣駆動機構では、アクチュエータの数がロボットのもつ関節の能動自由度の数より少なくなるため、複数の出力動作の動力分配を行うために外力を必要とする。そのため、提案した機構では、ロボットが配管内を走行し推進動作と旋回動作を切り替える際、車輪の回転とロール関節の回転の動力分配比を変えるために外力を得る必要があった。この欠点を補うため、本研究では制御面と機構面から二つのアプローチをとり、その動作方法の確立を行った。

まず初めに、制御的アプローチでは、ロボットに搭載された2つのモータ間に速度差を生じさせ、配管内における空間制約と関節内部のバネによる拘束を利用して前後のロール関節を回転させる方法を提案した。ここでは、モータ間に速度差が生じた際にロール関節が回転する原理を分析し、2つのモータの速度バランスの組み合わせによって定義される9つの動作から、前後のロール関節を回転させるために有効な3つ動作を選定した。また、提案した手法の1つがロボットにある2つのロール関節同時に回転させるのに有効であり、ロボットを配管内でねじるように姿勢変形させ、螺旋回転運動を可能にすることを実機実験により確認した。

次に、機構的アプローチでは、半球車輪の車軸にワンウェイクラッチによる機械的な拘束を入れることにより、劣駆動機構における動力分配比の切り替えを補助する機構を提案し、その機構をもつ新たなV字型のロボットの開発を行った。この機構では、ワンウェイクラッチが車軸の回転を止める際の拘束力を利用し、単一モータの駆動方向を切り替えることで半球車輪の2軸周りの回転動作の切り替えを実現した。また、水平及び垂直の直管と曲管内で走行実験を行い、開発したロボットの有効性を示した。

最後に、制御アプローチと機構アプローチにおけるロボットの旋回性能の評価を行うとともに、従来の連結車輪型ロボットと比較しロボットの総合的な走行性能を評価するため、面外曲げ配管、T字管内での実験を行った。まず、本研究で提案した2つのアプローチについては、制御アプローチと機構アプローチでロボットが行う旋回方法が異なり、前者ではロボットがその体幹をねじるようにロール関節を回転させたのち、螺旋回転運動を行うことで配管軸周りに旋回する。一方、後者では、ロール関節の無限回転により、ロボットは前後移動することなくその場で配管軸周りに旋回する。そのため、この2つのアプローチについてはその旋回性能の観点から比較をし、それぞれの長所と短所について議論した。次に、面外曲げ配管及びT字管での走行性能について、提案したV字型のロボットが従来では走行が困難であった面外曲げ配管を走行できることを確認し、曲管を走行する際にはその屈曲方向に事前に姿勢を合わせる必要がなく、曲管形状になじむような走行が可能であることがわかった。しかしその一方、T字管での走行は分岐前と分岐後の配管内の二か所で突っ張りながら走行を行う必要があるため、V字型の構造では垂直上り方向への走行が困難であった。加えて、水平T字管内の走行においても、突っ張り状態を維持できないために駆動輪のスリップが生じやすく、走破に必要な操作が複雑になり、操縦者の技量が影響することを確認した。このことから、本研究で開発したV字型のロボットは、従来の連結車輪型ロボットと比べ、曲管に対する旋回性能及び面外曲げ配管での走行性能が上がった一方で、T字管での走行性能は下がることが明らかとなった。この点に関して考えられる解決方法について、次節の今後の課題で詳しく述べていく。

6.2 今後の課題

本論文で提案したV字車輪型の配管検査ロボットについて、今後さらに検討が必要な課題を以下に述べる。

6.2.1 車輪とピッチ関節の能動化

2章と4章で提案した2つのロボットについては、旋回動作における優位性から拘束付き差動機構を有するロボットが有用であることを5章の考察で述べた。しかし、バネのもつ剛性と変位量における問題から、中央車輪の能動化もしくはピッチ関節の改良が必要であると考えられる。まず、中央車輪の能動化について、文献[19]の解析結果によると、連結車輪型の配管検査ロボットにおいて中央にある車輪がロボットの推進力に大きく影響することがわかっている。これは垂直曲管にて、より小さいバネ剛性でもスリップすることなく走行できることを意味する。

次に、バネの改良についてだが、現在のバネの剛性と同程度かそれ以上の剛性を持ち、使用可能角度が大きくなるようなバネを選ぶ場合、バネのコイル直径、線径、巻き数を増やしサイズの大きいバネを検討する必要がある。例として、図6.1に実験で使用したバネ(左)と、同等のバネ剛性を持たせつつ使用可能角度が約60度大きくなるよう製作された特注バネ(右)を示す。この二つを比較すると、バネ剛性係数を維持しつつバネの使用可能角度を増やす場合にはバネの直径がかなり大きな

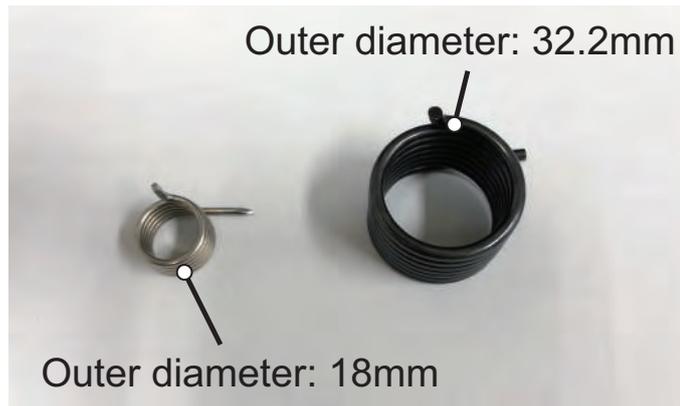


図 6.1: Two kinds of torsion springs with different diameters.

ることがわかる。また、このバネを取り付けるにはピッチ関節内部の空間を拡張しなければならず、同時に車輪直径やベアリングの直径の考慮が必要なため設計は困難になる。

将来的な実用化を視野に入れた場合、配管壁面の表面状態や検査ツールの搭載による重量の増加を考慮すると、文献 [38] のようなピッチ関節の能動化も検討すべき一つの要素である。ただし、車輪もしくはピッチ関節の能動化によりアクチュエータ数が増え、それに伴いロボットのリンク数が増加する場合には本来の本研究の目的に沿わない。そのため、この場合は文献 [20] のように1つのリンクに2つのモータを内蔵するなど限られたスペースを有効的に活用するための設計の工夫が必要となる。そこで、設計の例として、本研究で提案した劣駆動機構とピッチ関節を駆動させるための2つのモータを1つのリンク内に設計したものを図 6.2 に示す。この設計例では2つの DC モータによってそれぞれ半球車輪とピッチ関節を駆動させることを想定している。また、ピッチ関節の駆動は SEA 機構 [20][21] を利用して行われる。センサ系としては、まずロール関節の回転角度を内部に取り付けた磁気アブソリュートエンコーダによって計測する。これに加え、ピッチ関節内部の2つのポテンショメータによりピッチ関節の回転角度と弾性体の変形量を計測する。中央の車輪を能動車輪にする場合でも、同様に1つのリンクに2つのモータを内蔵させる設計が必要になると考えられる。しかし、アクチュエータが増えロボットの重量が増す場合には、その消費電力も大きくなる。そのため、同様に能動ピッチ関節を用いた既存の研究 [20] に対し、CoP (Cost of Transport) を指標としてその性能の比較を行い、評価する必要がある。

今後、このような設計の工夫により V 字型ロボットの中央車輪とピッチ関節を能動的に動かすことができれば、T 字管での走行性能の向上を期待できる。5 章での T 字管の走行実験では、ロボットの中央の車輪が分岐した配管へ突き出てしまい壁面との接触を維持できなくなるため、配管内で突っ張り状態を維持できず車輪がスリップし、走行が困難であった。しかしこの問題は、ロボットのピッチ関節を能動的に動かし、半球車輪を壁面に押し付ける力を大きくすることができれば、解決する可能性が高い。また、この動作により中央の車輪を壁面に接触させたのち、その車輪を動かすことができれば、ロボットの走行性能を上げることができる。これを確認するためには、T 字配管内でロボットと管内空間の幾何学関係を明らかにして

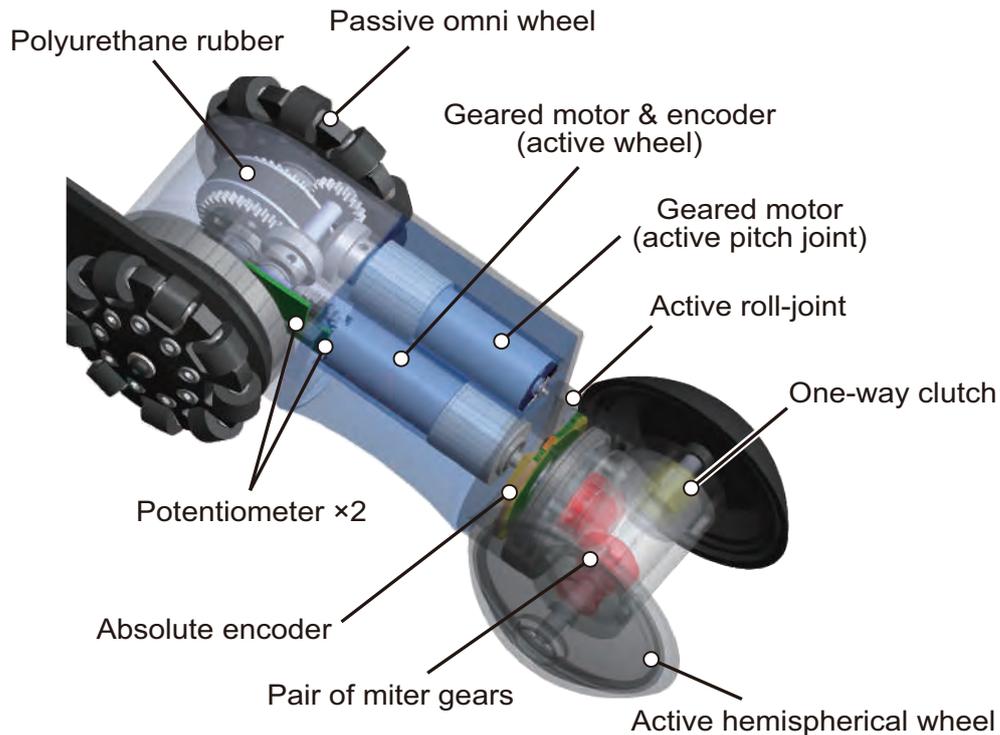


図 6.2: In-pipe robot with a active pitch joint using Series Elastic Actuator (Example of the one-linked model).

ロボットを設計するとともに、T字管走行のための分岐部走破アルゴリズムを組み立てる必要があると考えられる。

6.2.2 面外曲げ配管の走行理論の構築

本論文では、提案するV字型のロボットが面外曲げ配管での走行が可能であることを実験的に確かめた。しかし、走行時のロボットの操作が複雑であり、面外曲げ配管を走行する際は操縦者への技量が求められる。加えて、実験では配管外からロボットの様子を確認しながら操作を行ったが、実用化を考慮する場合にはロボットにカメラを搭載しその情報のみでロボットを動かさなければならない。そのため、ロボットと面外曲げ配管の内部空間との幾何学関係を明らかにしてロボットのリンク長や車輪径などのパラメータに関する設計理論を構築するとともに、面外曲げ配管を走行する際にロボットがとるべき移動軌跡を考え、動作手順を組み立てることで、この種の配管の走行理論を確立する必要がある。

6.2.3 モジュール化の検討

将来的に長距離移動のための推進モジュールや検査に必要なセンサモジュールを追加する可能性を考えた場合、ロボットにより多くのリンクを連結することを検討する必要がある。前章の考察では旋回性能の面から拘束付き差動機構を有するロボットが有用であることを述べたが、このロボットはロール関節が単一方向にしか回転

できないため、2章のように単純に複数のリンクを連結する場合にはロボットの旋回機能を維持することは困難である。また、現状では複数のリンクを直接連結する場合での面外曲げ配管での走行は確認できていない。そこで、上述した課題を達成するための一つの方法として、V字型2リンク構造を1つのモジュールとして考え、複数のモジュールの連結を検討する方法が考えられる。モジュール間の連結方法については、面外曲げ配管での走行を考えた場合、文献[25]のようにモジュール間をユニバーサルジョイントのような受動関節で接続する方法も1つの手段として検討することができる。また、垂直なT字管での走行を可能とするには、複数のV字モジュールでロボットを構成し、先端のV字モジュールがT字部を上る際に後ろから押せるような連結方法を一つの手段として検討する必要がある。

謝辞

本論文は、著者が立命館大学大学院理工学研究科 機械システム専攻 生物知能機械学研究室(馬研究室)において博士課程後期課程の期間に行った研究をまとめたものです。その間、常に熱心にご指導頂きました指導教官の馬書根教授に心より感謝申し上げます。先生は常に筆者を一人の研究者として扱ってくださり、研究内容から研究指針、研究生活に至るまで、多くの貴重な助言を下されました。

立命館大学工学部ロボティクス学科 講師 加古川篤先生には、馬研究室に在籍してから6年間、研究やゼミ発表、論文の執筆など、多くのご指導をいただきました。また、先生は筆者が博士後期課程へ進学するきっかけを与えてくださった恩師であり、研究者、技術者として自らが目指すべき姿を多く見せていただきました。心より感謝申し上げます。

立命館大学工学部ロボティクス学科 助教 田陽先生には、ゼミ発表や研究相談の場を通し、様々な助言を頂きました。また、研究内容以外にも、研究姿勢について大変多くのアドバイスを頂きました。心より感謝申し上げます。

立命館大学工学部ロボティクス学科 教授 野方誠先生には、合同ゼミにて大変お世話になりました。先生には本研究の不明な部分について丁寧なアドバイスを頂き、研究をより発展させることができました。心より感謝申し上げます。

本論文をまとめるにあたり、副査をお引き受けくださいました、立命館大学工学部ロボティクス学科 教授 下ノ村和弘先生、ならびに立命館大学工学部機械工学科 教授 徳田功先生に、心より感謝申し上げます。

立命館大学からは博士課程後期課程研究奨励奨学金を2014年度、2015年度、2016年度にB給付を採択して頂きました。また、短い期間ながらも立命館先進研究アカデミー次世代研究者育成プログラム(Ritsumeikan Advanced Research Academy: RARA 学生フェロー)に採択していただき、2021年度の後期期間に研究奨励費と研究費を給付していただきました。立命館大学の皆様ならびに当プログラムの関係者の皆様に心より感謝申し上げます。

立命館大学工作センター職員 杉本弘之氏、浅田敬司氏には部品加工において大変お世話になりました。設計時のアドバイスや加工技術を丁寧に教えてくださり、加工の難しい部品を持ち寄った際にも親身になって相談にのって頂きました。心より感謝申し上げます。

共に過ごした生物知能機械学研究室のすべての方々に心より感謝申し上げます。また、在学中に研究内容の指導をしていただきました張国騰氏(山東大学)、杜亮氏(上海大学)、多くの協力をしていただきました秘書の浜本律子氏、Yiming Cao氏、Haonan Sun氏に心より感謝申し上げます。

最後に、6年間もの間、筆者を理解し支えてくださった家族と親戚の皆様に、心より感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT) (Japan), White Paper on Land, Infrastructure, Transport and Tourism in Japan, 2015.
- [2] A. Zagler and F. Pfeiffer, ““MORITZ” a Pipe Crawler for Tube Junctions,” *Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2954–2959, 2003.
- [3] A. Kuwada, K. Tsujino, K. Suzumori, and T. Kandai, “Intelligent actuators realizing snake-like small robot for pipe inspection”, *Proceeding of the IEEE International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science*, pp.120-125, 2006.
- [4] T. Tanaka, K. Harigaya, and T. Nakamura, “Development of a peristaltic crawling robot for long-distance inspection of sewer pipes”, *Proceeding of the IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pp. 1552 E557, 2014.
- [5] T. Kishi, M. Ikeuchi, and T. Nakamura, “Development of a peristaltic crawling inspection robot for 1-inch gas pipes with continuous elbows,” *Proceeding of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 3297–3302, 2013.
- [6] M. Kamata, S. Yamazaki, Y. Tanise, Y. Yamada, and T. Nakamura, “Morphological change in peristaltic crawling motion of a narrow pipe inspection robot inspired by earthworm’s locomotion,” *Advanced Robotics*, Vol. 32, No. 7, pp. 386–397, 2018.
- [7] H. Schempf, E. Mutschler, A. Gavaert, G. Skoptsov, and W. Crowley, “Visual and nondestructive evaluation inspection of live gas mains using the Explore family of pipe robots,” *Journal of Field Robotics*, Vol. 27, No. 3, pp. 217–249, 2010.
- [8] Pipetel Technologies Inc., Advanced Robotics Technology, <https://www.pipetelone.com/advanced-explorer-technology/> [Accessed: 30-Nov-2021].
- [9] H. Jang, H. M. Kim, M. S. Lee, Y. H. Song, Y. Lee, W. R. Ryew, and H. R. Choi, “Development of modularized in-pipe inspection robotic system: MRINSPECT VII+,” *Robotica*, 1–24, 2021.

-
- [10] H. M. Kim, Y. S. Choi, H. M. Mun, S. U. Yang, C. M. Park, and H. R. Choi, “2-D differential gear mechanism for robot moving inside pipelines,” *Proceeding of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1152–1157, 2015.
- [11] H. M. Kim, Y. S. Choi, Y. G. Lee, and H. R. Choi, “Novel mechanism for in-pipe robot based on a multiaxial differential gear mechanism,” *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 22, No. 1, pp. 227–235, 2017.
- [12] Y. Kwon and B. Yi, “Design and Motion Planning of a Two-Module Collaborative Indoor Pipeline Inspection Robot,” *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 28, no. 3, pp. 681–696, 2012.
- [13] G. C. Vradis and W. Leary, “Development of an inspection platform and a suite of sensors for assessing corrosion and mechanical damage on unpiggable transmission mains,” *Technical Report of NGA and Foster-Miller*, 2004.
- [14] E. Dertien, S. Stramigioli, and K. Pulles, “Development of an inspection robot for small diameter gas distribution mains,” *Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 5044–5049, 2011.
- [15] E. Dertien, M. Foumashi, K. Pulles, and S. Stramigioli, “Design of a robot for in-pipe inspection using omnidirectional wheels and active stabilization,” *Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 5121–5126, 2014.
- [16] 磯村一樹, 広瀬 茂男, “連結球形車輪型管内移動ロボット「ThesV」の開発,” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2011 講演論文集, pp. 2A2–L08, 2011.
- [17] 磯村一樹, M. Guarnieri, P. Debenest, 鷹巢征行, 広瀬 茂男, “連結球形車輪型管内移動ロボット「ThesV」の開発 —第2報: 機構改良と配管腐食検査の総合実験—,” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012 講演論文集, pp. 2A2–M02, 2012.
- [18] P. Debenest, M. Guarnieri, and S. Hirose. “PipeTron series - Robots for pipe inspection,” *Proceeding of the IEEE International Conference on Applied Robotics for the Power Industry*, pp. 1–6, 2014.
- [19] A. Kakogawa and S. Ma, “Design of a multilink-articulated wheeled pipeline inspection robot using only passive elastic joints,” *Advanced Robotics*, Vol. 32, No. 1, pp. 37–50, 2018.
- [20] A. Kakogawa and S. Ma, “A Multi-link In-pipe Inspection Robot Composed of Active and Passive Compliant Joints,” *Proceeding of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 6472–6478, 2020.

- [21] G. A. Pratt and M. M. Williamson, "Series Elastic Actuators," *Proceeding of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 399–406, 1995.
- [22] A. Singh, E. Sachdeva, A. Sarkar, and K. M. Krishna, "COCrIP: Compliant OmniCrawler in-pipeline robot," *Proceeding of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 5587–5593, 2017.
- [23] A. Singh, E. Sachdeva, A. Sarkar, and K. M. Krishna, "Design and optimal spring stiffness estimation of a Modular OmniCrawler in-pipe climbing Robot," *Proceeding of the IEEE/RSJ International Conference on Robotics and Biomimetics*, pp. 1912–1917, 2017.
- [24] A. Kakogawa, Y. Oka, and S. Ma, "Multi-link articulated wheeled in-pipe robot with underactuated twisting joints," *Proceeding of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, pp. 942–947, 2018.
- [25] Hibot Corp., THESBOT-Dual, Available: <https://www.hibot.co.jp/products/thes-dual/>, [Accessed: 30-Nov-2021].
- [26] K. Tadakuma, "Tetrahedral Mobile Robot with Novel Ball Shape Wheel," *Proceeding of the First IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics*, pp. 946-952, 2006.
- [27] K. Tadakuma, R. Tadakuma, K. Nagatani, K. Yoshida, and K. Iagnemma, "Crawler mechanism with circular section to realize a sideling motion," *Proceeding of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2422-2428, 2008.
- [28] 広瀬 茂男, 佐藤 幹夫, "多自由度ロボットの干渉駆動," *日本ロボット学会誌*, Vol. 7, No. 2, pp. 20–27, 1989.
- [29] サミニ株式会社, ねじりスプリング, Available: <https://www.samini.co.jp/>, [Accessed: 17-Dec-2021].
- [30] T. Nishimura, A. Kakogawa, and S. Ma, "Improvement of a screw drive in-pipe robot with pathway selection mechanism to pass through T-branches," *J. Robot. Mechatron.*, Vol. 25, No. 2, pp. 340–346, 2013.
- [31] A. Kakogawa, S. Ma and S. Hirose, "An in-pipe robot with underactuated parallelogram crawler modules," *Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1687–1692, 2014.
- [32] S. Hirose, "Robotics -Vector analysis of mechanical system- (2nd ed.)," *Shokabo Tokyo Press*, 2013 (in Japanese).

- [33] S. Ma, Q. Quan, and R. Liu, "Posture analysis of a dual-crawler-driven robot," *Proceeding of the IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pp. 365–370, 2008.
- [34] 穴井宏和, 数理最適化の実践ガイド. 講談社, 2013.
- [35] Y. Oka, A. Kakogawa, and S. Ma, "A Wheeled V-shaped In-pipe Robot with Clutched Underactuated Joints," *Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Automations*, 2021.
- [36] ハヤシレピック株式会社, スリップリングとは, Available: <https://www.h-repic.co.jp/descriptions/slipring>, [Accessed: 1-Dec-2021].
- [37] A. Kakogawa, Y. Komurasaki, and S. Ma, "Shadow-based Operation Assistant for a Pipeline-inspection Robot using Variance of Pixel-number to the Luminance," *Journal of Robotics and Mechatronics*, 31-6, pp. 772–780, 2019.
- [38] A. Kakogawa and S. Ma, "Differential elastic joint for multi-linked pipeline inspection robots," *Proceeding of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 949–954, 2018.

研究業績

学術誌

- [1] Yoshimichi Oka, Atsushi Kakogawa, Yang Tian, and Shugen Ma, “Control Technique of a V-Shaped In-Pipe Robot Composed of Two Underactuated Roll-Pitch Joints,” *Advanced Robotics*, 2021, DOI: 10.1080/01691864.2021.2012513.

査読付き国際会議

- [1] Atsushi Kakogawa, Yoshimichi Oka, and Shugen Ma, “Multi-link articulated wheeled in-pipe robot with underactuated twisting joints,” *Proceeding of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, pp. 942–947, 2018.
- [2] Yoshimichi Oka, Atsushi Kakogawa, and Shugen Ma, “Stopper Angle Design for a Multi-link Articulated Wheeled In-pipe Robot with Underactuated Twisting joints,” *Proceeding of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 973–978, 2018.
- [3] Yoshimichi Oka, Atsushi Kakogawa, and Shugen Ma, “A Wheeled V-shaped In-pipe Robot with Clutched Underactuated Joints,” *Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Automations*, pp. 11457–11462, 2021.

その他口頭発表

- [1] 岡 義倫, 加古川 篤, 馬 書根, “車軸と体軸に差動機構を有した連結車輪型管内移動ロボットの開発,” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017 講演論文集, ビッグパレットふくしま, 福島, 2A2-A10, 2017.
- [2] 岡 義倫, 加古川 篤, 馬 書根, “車軸と体軸に差動機構を有した連結車輪型管内移動ロボットの開発,” アスターフォーラム 2018, 琵琶湖大津プリンスホテル, 滋賀, 2018.
- [3] 岡 義倫, 加古川 篤, 馬 書根, “車軸と体軸に差動機構を有した連結車輪型管内移動ロボットの開発,” アスターフォーラム 2019, 琵琶湖大津プリンスホテル, 滋賀, 2019.

- [4] 岡 義倫, 加古川 篤, 馬 書根, “クラッチ付き劣駆動関節を有する V 字車輪型管内移動ロボットの開発,” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2021 講演論文集, オンライン開催, 大阪, 2P3-I13, 2021.
- [5] 岡 義倫, 加古川 篤, 馬 書根, “クラッチ付き劣駆動関節を有する V 字車輪型管内移動ロボットの開発,” アスターフォーラム 2021, オンライン開催, 2021.

賞罰

- [1] Toshio Fukuda Best Paper Award in Mechatronics (上記査読付き国際会議 [1] に対して), 2018.
- [2] 企業賞：ナベル賞 (上記口頭発表 [5] に対して), 2021.

特許

- [1] 馬 書根, 加古川 篤, 岡 義倫, “管内走行装置,” 特許第 6884382, 2021.
- [2] 馬 書根, 加古川 篤, 岡 義倫, “管内走行装置,” 特願 2020-130377(申請中), 2020.

付録 A ベクトルを用いた差動機構の運動学

本研究で提案した差動機構における入出力マイタギアの回転角速度の関係式(3.3)はベクトルを用いても導出することができる。図 A.1 に概念図を示す。使用されるパラメータは図 3.1 のものと同じである。すなわち、 ϕ_m 、 ϕ_w 、および ϕ_r はそれぞれ入力マイタギアの回転角度、出力マイタギアの自転時の回転角度、出力マイタギアの公転時の回転角度を示す。ここで、O、C 点は二つのマイタギアの回転軸（自転）の交点、および接触点をそれぞれ示す。A、B 点は接触点 C からそれぞれ二つのマイタギアの回転軸（自転）におろした垂線との交点を表す。 ω_1 、 ω_2 、および ω_3 はそれぞれ ϕ_m 、 ϕ_w 、および ϕ_r の回転によって生じる角速度ベクトルを示す。ここで、入力マイタギアが X 軸まわりに回転する際の接触点 C における Z 軸方向の速度は、Z 軸正方向の並進速度を表すベクトル v_c を用いて以下のように表すことができる。

$$v_c = \omega_1 \times r_1. \tag{A.1}$$

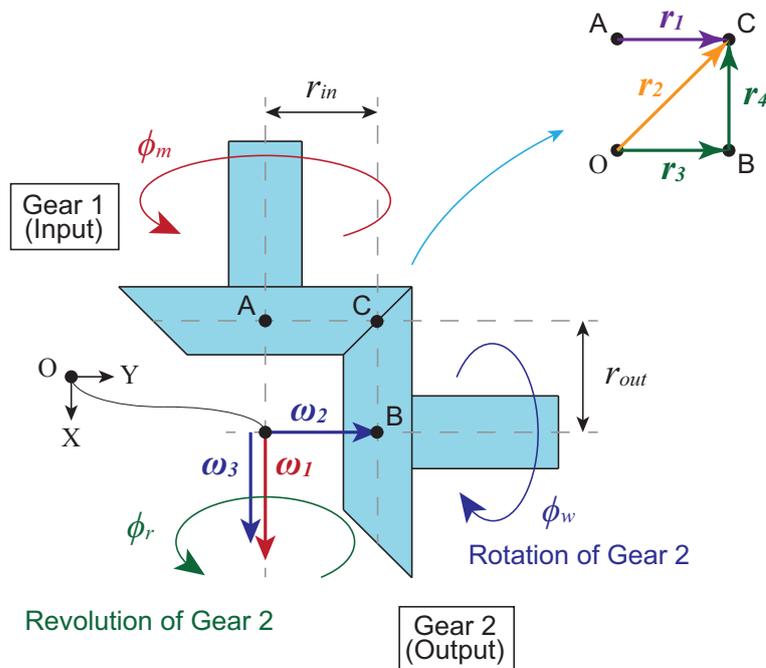


図 A.1: Vector analysis of a differential gear mechanism with a single pair of miter gears.

一方、ベクトル \boldsymbol{v}_c を点 O での出力マイタギアの運動座標系で考えた場合、出力マイタギアのもつ総角速度が ($\boldsymbol{\omega}_{out} = (\boldsymbol{\omega}_2 + \boldsymbol{\omega}_3)$) であることから、以下の式を得ることができる。

$$\boldsymbol{v}_c = (\boldsymbol{\omega}_2 + \boldsymbol{\omega}_3) \times \boldsymbol{r}_2. \quad (\text{A.2})$$

ここで、 $\boldsymbol{r}_2 = \boldsymbol{r}_3 + \boldsymbol{r}_4$ 、 $\boldsymbol{\omega}_2 \times \boldsymbol{r}_3 = 0$ 、また、 $\boldsymbol{\omega}_3 \times \boldsymbol{r}_4 = 0$ であることから、式 (A.2) より

$$\boldsymbol{v}_c = \boldsymbol{\omega}_2 \times \boldsymbol{r}_4 + \boldsymbol{\omega}_3 \times \boldsymbol{r}_3. \quad (\text{A.3})$$

さらに、式 (A.1) を式 (A.3) へ代入し、下記の式を得る。

$$\boldsymbol{\omega}_1 \times \boldsymbol{r}_1 = \boldsymbol{\omega}_2 \times \boldsymbol{r}_4 + \boldsymbol{\omega}_3 \times \boldsymbol{r}_3. \quad (\text{A.4})$$

三つの角速度ベクトル $\boldsymbol{\omega}_1$ 、 $\boldsymbol{\omega}_2$ 、および $\boldsymbol{\omega}_3$ と三つの位置ベクトル \boldsymbol{r}_1 、 \boldsymbol{r}_4 、および \boldsymbol{r}_3 は同じ平面上に存在する。よって、それぞれの角速度ベクトルと位置ベクトルの外積は Z 軸正方向を向いたベクトルとして存在する。これより、式 (A.4) から Z 成分のみを取り出すことで、三つの回転角速度の関係式が得られる。

$$\omega_1 r_1 = \omega_2 r_4 + \omega_3 r_3. \quad (\text{A.5})$$

提案機構では、 $r_1 = r_3 = r_4$ であることから、上記の式 (A.5) は最終的に以下の式として表すことができる。

$$\dot{\phi}_m = \dot{\phi}_w + \dot{\phi}_r. \quad (\text{A.6})$$

付録B モータのPID速度制御

ここでは、第5章の実験で用いたモータのPID速度制御について解説する。

B.1 ブロック線図

図B.1に実験で用いたPID速度制御系のブロック線図を示す。モータへ入力する目標速度と磁気エンコーダから取得される実際の回転速度をそれぞれ $v_d(t)$ 及び $v_c(t)$ とする。このとき、目標値と現在値との偏差を $e(t)$ とし、以下の式で求める。

$$e(t) = v_d(t) - v_c(t) \quad (\text{B.1})$$

これより、 K_p 、 K_i 、 K_d をそれぞれ比例ゲイン、積分ゲイン、微分ゲインとすると、モータへ与える制御量 $m(t)$ は以下の式から求まる。

$$m(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(s) ds + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (\text{B.2})$$

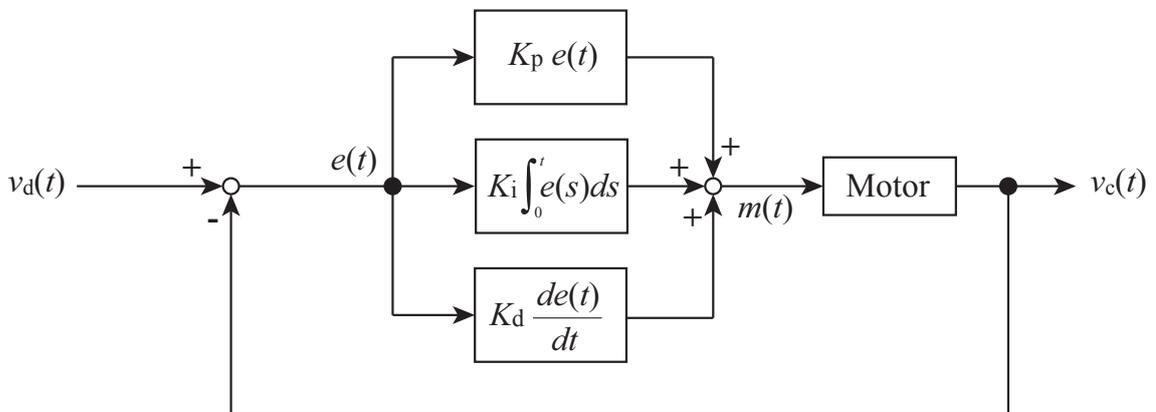


図 B.1: Block diagram of for the velocity control of the motor.

B.2 電子回路

図B.2に実験で使用したロボットの電子回路を、図B.3にその配線図をそれぞれ示す。

B.3 計測結果

前述した制御式と電子回路を用いて各ゲインをチューニングし、無負荷状態でモータを動かし速度制御の確認を行った。その結果を図B.4に示す。

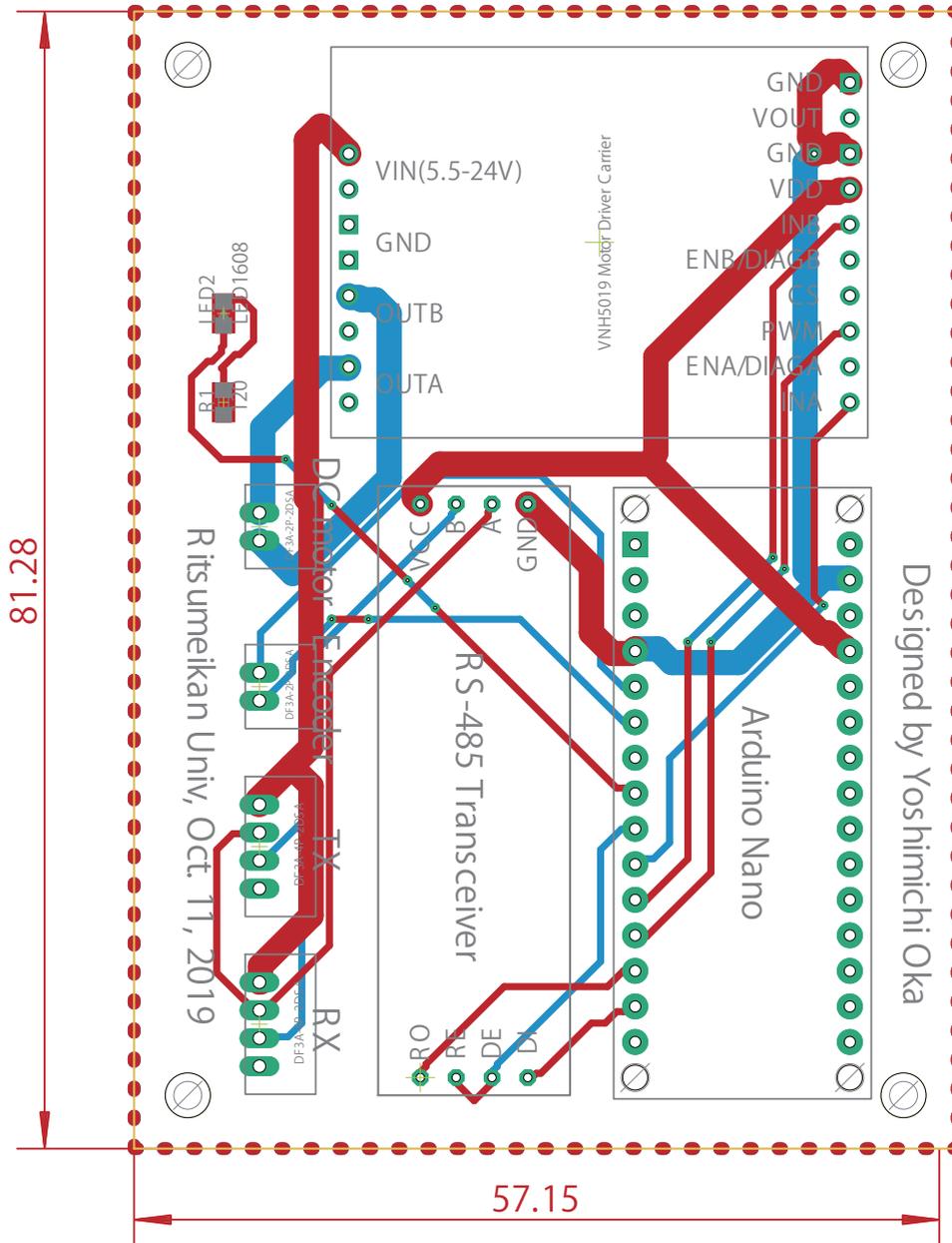


図 B.2: Circuit of the control system.

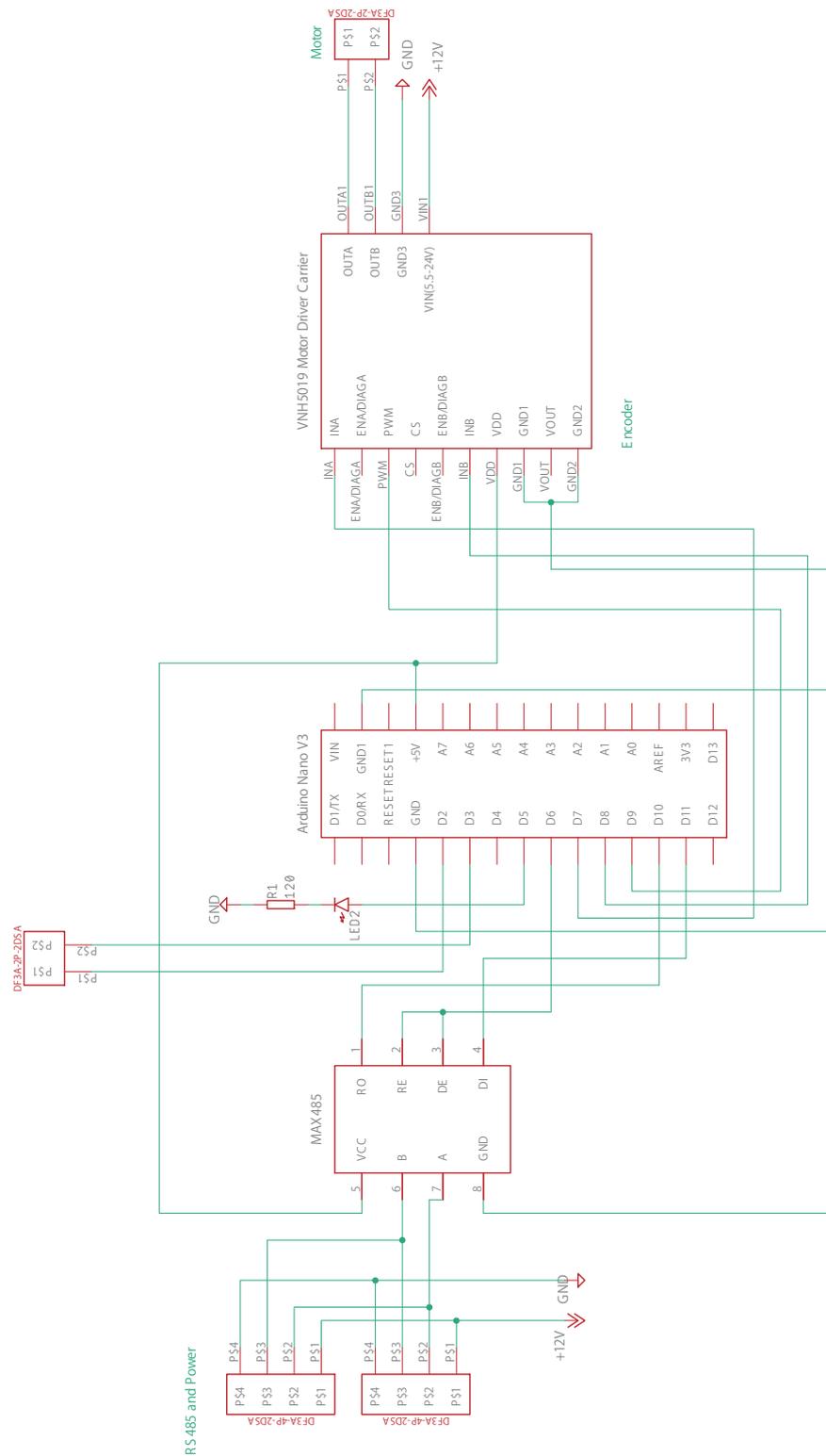


図 B.3: Wiring diagram of the control system.

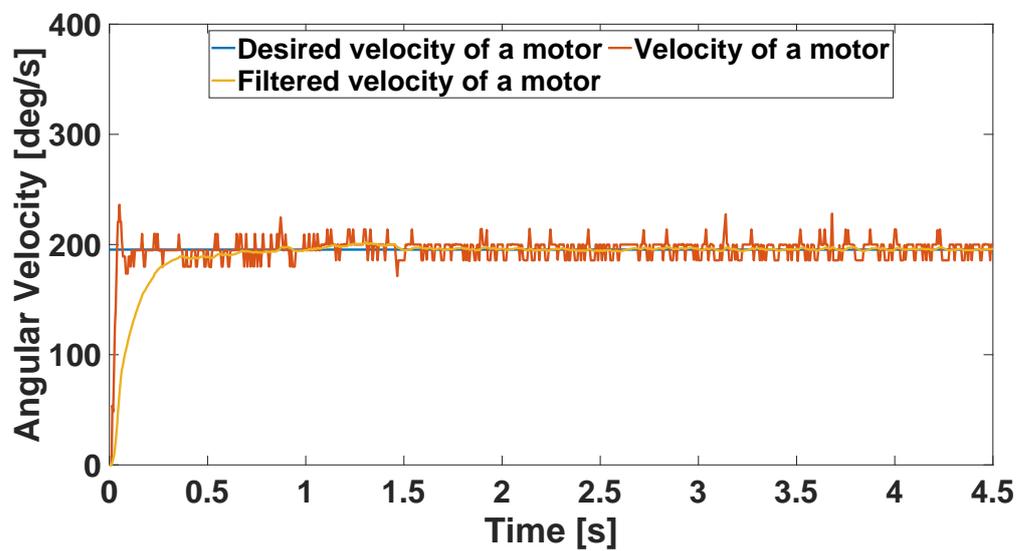


図 B.4: Velocity control test of the motor.