

博士論文要旨

論文題名：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

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

オカ ヨシミチ

岡 義倫

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。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の二つのアプローチにより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な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 of Doctoral Thesis

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

Doctoral Program in Advanced Mechanical Engineering and Robotics
Graduate School of Science and Engineering
Ritsumeikan University

オカ ヨシミチ
OKA Yoshimichi

In recent years, with an increase in aging infrastructure pipelines, in-pipe inspection robots that can travel in narrow pipes have been attracting the attention of the scientific and industrial community 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 the 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, the bending direction of bent pipes and the bending direction of the robot's joints need to be aligned. Existing robots have been equipped with actuators independently for a propulsion function and a rolling function to achieve this 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 robot's size is one of the problems when it passes through pipes with complicated structures with a series of bends in an out-of-plane direction. Therefore, this thesis focuses on an underactuated mechanism that produces multiple outputs 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 where a hemispherical wheel can rotate around its pitch axis and roll axis. A V-shaped robot, which can roll around the pipe axis using helical movement, is developed with this mechanism. The proposed mechanism can distribute the motor power to the hemispherical wheels' rolling motion and pitch rotation. However, an external force is required to change the output distribution ratio. Therefore, this study proposes 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. Experiments demonstrate the validity of the proposed mechanism.

The first approach focused on the physical phenomenon that several different motions are generated through combining the speed difference between two motors and the direction of rotation. Based on this, three types of transformation methods considered adequate 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 motor's rotational direction. 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 proposed method described above. In this part, the traveling and steering performances of the proposed robot in straight, bent, T-branch pipes and 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.