

機関番号：15301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21760199

研究課題名(和文) 螺旋捻転運動により円柱を昇降するヘビ型ロボットの開発

研究課題名(英文) Development of snake robot that climbs a cylinder by helical rolling motion

研究代表者

亀川 哲志 (KAMEGAWA TETSUSHI)

岡山大学・大学院自然科学研究科・講師

研究者番号：80432623

研究成果の概要(和文)：

これまでのヘビ型ロボットの移動は2次元平面上に限られるものがほとんどであった。本研究ではピッチ軸とヨー軸を交互に組み合わせて構築したヘビ型ロボットが円柱に巻きついた状態で螺旋捻転運動を行うことにより、円柱の内部や外部といった3次元の環境を移動することを実現した。また、円柱の径が途中で変わった際に螺旋の径を自動調整する制御の導入や、曲がった配管内部で形を少しずつシフトさせながら移動する手法の提案と実証、さらに数学モデルを使った解析によりヘビ型ロボットが円柱内部でつばっている際の接触力を導出することなどを行った。

研究成果の概要(英文)：

Most of previous snake robot's movements are restricted on a two dimensional plane. In this study, we realized a snake robot which moves the inside and the outside of a cylinder by helical rolling motion. The snake robot is constructed by assembling pitch joints and yaw joints alternately so that it can move in the three dimensional environment. The automatic coiling control to adjust to the diameter of a cylinder is implemented. In addition, some experiments was conducted that the snake robot moves the inside of a curvilinear pipe by shifting its shape gradually. Moreover, the contact force affected to a cylinder was analyzed based on mathematical model.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			0
年度			
年度			
総計	2,000,000	600,000	2,600,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：ロボティクス, ヘビ型ロボット, 螺旋捻転運動

## 1. 研究開始当初の背景

生物の蛇は単純な形態でありながら、移動する時には「足」となり、作業する時には「手」となり、さらに環境まきつく時には「腕」になるなどして様々な機能を果たす。この生物の蛇のメカニズムを工学的に応用すれば汎用的な機械システムを構築できる可能性がある。

例えば、ヘビ型ロボットの細長い形状を生かし、ロボットを狭い空間内に進入させて内部を探索したり簡単な作業を行う装置として応用したりすることなどが考えられる。

これまで東京工業大学の広瀬らの研究により、蛇は足がないのになぜ移動できるのかが工学的に解明されてきた。生物の蛇は移動する際に体幹に沿ってエッジを立てることにより進行方向とそれに垂直な方向との摩擦の差を生じさせ、これを利用して推進している。広瀬はこのとき生物の蛇はサーペノイドカーブと呼ばれる曲線に沿って移動していることを明らかにし、摩擦の差を生じるメカニズムを受動車輪により工学的にモデル化することで2次元平面上を滑らかに移動するヘビ型ロボットを実現した。また近年では、砂漠の蛇に見られるサイドワインディング推進や、尺取虫のように縦波を伝播する推進が実現され、さらにはラテラルローリング推進と呼ばれる生物の蛇では観察されないような特殊な推進方策による移動も実現されてきた。しかしながら、これら従来のヘビ型ロボットは3次元動的な動きは可能であるものの、その移動環境は2次元平面上に限られるものがほとんどであった。一方で生物の蛇は、木に登ったり排水溝を移動したりするなど複雑な3次元環境内を動き回ることができる。ヘビ型ロボットを今後実用化するためには、3次元環境を移動させるための研究が不可欠である。それは

単に、ヘビ型ロボットの3次元動的な動きを計画して実現するものではなく、環境に適応して移動する形態であることが望ましい。そこで本研究では、ヘビ型ロボットが従来の移動形態に加え、螺旋状に円柱の外部に巻きついて（あるいは円柱の内部につばって）適応的に移動する形態を実現することを研究対象とした。

## 2. 研究の目的

上述のとおり、本研究ではヘビ型ロボットが螺旋状に円柱の外部に巻きついて（あるいは円柱の内部につばって）適応的に移動する形態を実現することが研究の目的である。これを達成するために、以下のサブテーマを設定した。

(1) 円柱の径に適応して螺旋の半径を調整するアルゴリズムの提案と実装：

これまでに、3次元空間内に表現した連続曲線を離散化して、ピッチ軸回転とヨー軸回転を交互に組み合わせたヘビ型ロボットの座標系のモデルに当てはめることにより、螺旋形状を再現できることはシミュレーション上で確認されていた。また、この3次元空間内の曲線を時間の関数として捻るようにすれば、ロボットが螺旋捻転運動を実現できることも確認していた。このサブテーマでは、まずヘビ型ロボットの実機モデルに同じアルゴリズムを適用し、実際に円柱に巻きついて移動することができるかどうかを確かめる。さらに、実機で測定されたモータ負荷の値を制御プログラムにフィードバックすることにより、円柱の径に応じてヘビ型ロボットの成す螺旋形状の径を自動的に調整するアルゴリズムを構築し、実機実験によりその有効性を確かめることを目的とする。

(2) 曲がった配管内を移動するためのアルゴリズムの提案と実装：

ヘビ型ロボットが円柱の外部に巻きついて螺旋捻転運動で移動するのと同様に、円柱内部にヘビ型ロボットがつっぱって螺旋捻転運動で移動することも考えられる。螺旋捻転運動でヘビ型ロボットが円柱内部を移動することは、波打った形状をヘビ型ロボットが生成して円柱内部を移動する方式に比べて、円柱とロボットとの間の接触点を増やして摩擦力を稼ぐ点でメリットがあると考えられる。このサブテーマでは、配管内部の検査にヘビ型ロボットを利用することを想定して、直管とエルボ管の組み合わせられた配管内を螺旋捻転運動で移動するヘビ型ロボットを実現することが目的である。

(3) ヘビ型ロボットが円柱に巻きついている時に与える力の数学モデルを使った解析：ヘビ型ロボットが円柱に巻きつく（あるいはつっぱる）際に、ロボットが円柱にどれくらいの力を及ぼすのかを事前に見積もることができれば、制御方策にこれを反映することで、より適応的な移動を実現できる可能性がある。その第一歩として、円柱内部でつっぱっているヘビ型ロボットの数学モデルを構築し、各関節に適当なトルクを与えた際に接触点に働く力を計算するアルゴリズムを構築して解析することがこのサブテーマの目的である。

### 3. 研究の方法

サブテーマ(1)(2)に関しては実機実験により、螺旋捻転運動により円柱の外部あるいは内部を移動するヘビ型ロボットを実証する。本研究で構築したヘビ型ロボットの実機モデルは、ピッチ軸とヨー軸の2つの関節軸を持つユニットを直列に繋いで構成されている。各ユニットには必要に応じて受動車輪を取り付けることが可能となるようにした。1 ユニ

ットのサイズは、長さ145[mm]、幅50[mm]、重量210[g]であり、車輪の直径は74[mm]、車輪間のトレッドは88[mm]である。各軸を駆動するアクチュエータとして市販のサーボモータを採用している。採用したサーボモータにはモータ制御用の基盤が内蔵されており、ロボット全体の形を制御するPCから特定のコマンドを送信することで、各関節が目的の角度になるように動かしたり現在角度やモータ負荷などの値を取得したりすることが出来る。ヘビ型ロボットの先端には環境を認識するための魚眼レンズ付きのカメラを取り付けた。またヘビ型ロボットの最後尾にはスリッピングを取り付けることにより、ヘビ型ロボットが捻転運動を行なっても外部電源や制御用PCにつながっているコードが振れないようにした。サブテーマ(1)の実験環境については、市販の塩化ビニルパイプを組み合わせで構築し、区間0~500[mm]において外径140[mm]、区間500~1000[mm]において外径114[mm]、区間1000~1500[mm]において外径140[mm]と途中で円柱の外径が変化する環境を用意した。ヘビ型ロボットがこのパイプの外部に巻きついて移動する際に、提案するアルゴリズムを使って適応的に螺旋半径を調整できているかどうかを確認する。また、内径145[mm]と195[mm]の亚克力製のパイプの内部も同様に螺旋半径を調整しながら螺旋捻転運動により移動できるかどうかを確認する。サブテーマ(2)については、内径300[mm]の直管とエルボ管を組み合わせた実験環境を構築した。直管の長さは930[mm]でエルボ管のRは105[mm]である。直管の部分では常螺旋捻転運動で移動し、エルボ管にさしかかったところにおいては曲螺旋捻転運動で移動するようにプログラムしたものが実際に動くことを確認する。なお、エルボ管に到達したかどうかの判定は現時点では人間が目視で判断を行うものとする。

サブテーマ(3)に関してはヘビ型ロボットの数学モデルを構築し、数値計算ソフトウェアを利用してその挙動の解析を行う。一般にロボットハンドに代表される多関節機構の接触力はトルクを発生する関節数に対して対象物との接触点が増加すると不静定となることが知られており、この不静定な接触力を計算する手法がいくつか提案されているが、ヘビ型ロボットに適用された例はこれまでなかった。本研究の解析手法では、まずヘビ型ロボットが螺旋形状をなす際に生じる誤差を考慮して、ロボットと円柱との接触点を導出する。次いで従来の計算手法を応用して接触力の発生し得る範囲を求め、最後に円柱壁面からヘビ型ロボットが受ける垂直抗力に注目して接触力として妥当な解を求める。

#### 4. 研究成果

本研究で構築したヘビ型ロボットの実機モデルを用いて、螺旋捻転運動により円柱の外部あるいは内部を移動するヘビ型ロボットを実証した。以下にサブテーマごとの研究成果について述べる。

(1)円柱の径に適応して螺旋の半径を調整するアルゴリズムの提案と実装：

3次元空間内にフレネ＝セレの公式を用いて表現した螺旋形状の連続曲線を離散化し、ピッチ軸回転関節とヨー軸回転関節とが交互に接続されたヘビ型ロボットの実機モデルに当てはめることにより、ヘビ型ロボットが螺旋形状を構成できることを確認した。また、フレネ＝セレ座標系とロボット座標系のロール軸周りのずれを任意に設定することにより、ロボットが捻転運動を生成することも確認した。さらに、デカルト座標系において螺旋の半径や螺旋の送り幅といった螺旋形状を決定するパラメータと、フレネ＝セレの公式において使われる曲率と捩率の関係を導出し、指

定した螺旋半径でヘビ型ロボットが螺旋形状を成すことを確認した。ここで、ヘビ型ロボットの一部のサーボモータで測定されたモータ負荷の値を制御プログラムにフィードバックし、その一定時間の平均値が設定した閾値を超えているかどうかを判別してヘビ型ロボットの成す螺旋半径を増減することによって、形状を自動的に調整するアルゴリズムを実装して実験を行った。結果として、円柱の外部に巻きついて移動している最中に円柱の径が変化した場合でも適切に螺旋形状を調整して移動しつづけることができることを確認した。また、異なる内径の配管の内側においても同様に、螺旋半径を徐々に調整することによって配管内を移動することができることを確認した。現時点では実機モデルのデータ通信の制約上、複数個所のモータ負荷を一度に測定できていないが、今後実機モデルを改良することにより、局所的な移動環境の変化にも対応することができると考えている。

(2)曲がった配管内を移動するためのアルゴリズムの提案と実装：

常螺旋の形状をなす移動形態により直管内部を移動できることはサブテーマ(1)において示された。さらにこのサブテーマにおいて、ヘビ型ロボットがエルボ管内部を移動する際には、ヘビ型ロボットの形状が曲螺旋（螺旋の中心軸が一定の曲率で曲がっている）を成すようにすることで移動できることを提案し、実際にエルボ管内部での移動が実現されることを確認した。また、直管とエルボ管が組み合わせられた一般的な配管内においてスムーズな移動を実現するために、配管形状の変化に合わせてヘビ型ロボットの移動形状を変化させるVシフト制御（先頭形状を後方にシフトすることで先頭から徐々に形状を変更する制御方法）を実装することにより配管内部にて移動形態間のスムーズな変化による移動を実

現した。ここでVシフト制御と呼んでいるものは本研究で新しく提案した制御手法である。従来のヘビ型ロボットの制御手法として、ヘビ型ロボット体幹の接線方向の移動に伴う形状変化を先頭から後方へシフトしていく方法（ここでは便宜上、Sシフト制御と呼ぶ）考案されていた。しかしながら、本研究でヘビ型ロボットは螺旋捻転運動により移動しており、これはヘビ型ロボット体幹の接線方向ではなく法線方向に移動する方式であるため、Sシフト制御を適用することができない。本研究で提案したVシフト制御では、螺旋捻転運動するヘビ型ロボットが法線方向に移動した際にあらかじめ計画していた移動経路から捻転運動によって逸脱し、新たな移動経路にヘビ型ロボットがシフトすると同時に体軸方向に一定量だけ移動したと考えることで先頭から形状を形成するという制御方法である。新しく提案したVシフト制御により、直管とエルボ管の間の連続的な移動が実現されたが、現時点では環境の認識は人間の目視により行われており、Vシフト制御のきっかけは人間が与えているので、この部分を自動化することで、さらなる性能の向上が期待できる。

(3)ヘビ型ロボットが円柱に巻きついている時に与える力の数学モデルを使った解析：ピッチ軸関節とヨー軸関節が交互に $n$ 個連結されたヘビ型ロボットが円柱内部でつばっている際の数学モデルを作成し、各関節に適切なトルクを与えたときの接触力を数値計算ソフトMATLABにより計算して求めた。まず、静的なつりあいを考え、仮想仕事の原理より力の関係を示す方程式を導出する。このとき、接触点の座標の変数の総和が一般化座標の数を超えると解は一意に決まらず不定となる。本研究で対象とする問題では、ヘビ型ロボットは螺旋形状を成して円柱内部につばった状態になっている。また、ヘビ型ロボットが

捻転することによってその接触点は複雑に変化する。本サブテーマでは、まず螺旋捻転運動時のヘビ型ロボットと円柱との接触点を求めた。ここで、サブテーマ(1)の方法で採用したフレネ＝セレの公式を用いて表現された螺旋形状の連続曲線を単純に離散化する手法を用いると、離散化の影響で関節の位置が円柱の壁面のある位置と一致しないという問題が発生することが分かった。そこで本研究では、関節位置が円柱表面にあるようにするため、関節角度を順に先頭から微調整するアルゴリズムを導入することによりこの問題を解決し、ある状態のヘビ型ロボットの接触点を導出できるようにした。導出された多数の接触点においてヘビ型ロボットは円柱と接触するため、やはり接触力を求める方程式は不定の解をもつことになる。そこで、妥当な解の存在範囲を絞ることにより、解を導くこととする。具体的には、円柱壁面からヘビ型ロボットが受ける垂直抗力に注目し、評価関数として垂直抗力のばらつきが最小になる場合と滑り方向の力の絶対値の平均が最小となる場合とでそれぞれ解を求めた。ヘビ型ロボットが6リンクの場合と20リンクの場合の構成で求めた計算結果により、それぞれの場合で解が求まることを確認した。ただし計算結果の妥当性については、実機実験による結果と照らし合わせる必要があり、今後研究を進展していく中で検証していく予定である。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計4件)

① 亀山祥英、亀川哲志、五福明夫、ヘビ型ロボットの円柱内螺旋捻転運動における移動速

度の導出、第28回日本ロボット学会学術講演会、査読無、2010年9月24日、名古屋工業大学（名古屋）

② Toshimichi Baba、Yoshihide Kameyama、Tetsushi Kamegawa、Akio Gofuku、  
A snake robot propelling inside of a pipe with helical rolling motion、計測自動制御学会 SICE Annual Conference 2010、査読有、2010年8月20日、台北（台湾）

③ 野波博敬、亀川哲志、五福明夫、へび型ロボットの車輪接触方向を考慮した円柱表面をうねり推進するための連続曲線の導出、第27回日本ロボット学会学術講演会、査読無、2009年9月15日、横浜国立大学（神奈川）

④ Tetsushi Kamegawa、Takaaki Harada、Akio Gofuku、Realization of cylinder climbing locomotion with helical form by a snake robot with passive wheels、IEEE International Conference on Robotics and Automation 2010、査読有、2009年5月15日、神戸国際会議場（兵庫）

〔図書〕（計0件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計0件）

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

出願年月日：

国内外の別：

○取得状況（計0件）

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年月日：

国内外の別：

〔その他〕

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

亀川 哲志 (KAMEGAWA TETSUSHI)  
岡山大学・大学院自然科学研究科・講師  
研究者番号：80432623

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし