

平成 30 年 5 月 30 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05898

研究課題名(和文) 3次元運動により障害物利用推進を行うヘビ型ロボットの開発

研究課題名(英文) Development of a snake-like robot realizing three dimensional motion with obstacle aided behavior

研究代表者

亀川 哲志 (Kamegawa, Tetsushi)

岡山大学・自然科学研究科・講師

研究者番号：80432623

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ヘビ型ロボットが複雑な狭隘空間において周囲の環境との力学的な作用を利用して移動することを目指し、ロボット全周において圧力を測定することができ、かつ3次元運動可能なヘビ型ロボットを新たに構築した。直管と曲管とで構成される内径200mmの配管の内部をこのヘビ型ロボットが螺旋捻転運動により移動する際の圧力をリアルタイムに測定することができることを確認した。また、ヘビ型ロボットが測定した圧力によって配管内で反射的に形状を変化させるアルゴリズムについて検討を行った。

研究成果の概要(英文)：In this research, a snake-like robot aims to move in a complicated narrow space utilizing dynamical interaction with the surrounding environment. We have developed a new snake-like robot which can measure pressure around its whole body as well as can achieve make three dimensional movement. We have verified the robot can measure pressure in real time when it moves the inside of 200mm straight and bending pipes. We also studied an algorithm to change the shape reflectively in a pipe by pressure measured by a snake-like robot.

研究分野：ロボット工学，ヘビ型ロボット，遠隔操作移動ロボット，医療ロボット

キーワード：ヘビ型ロボット 圧力センサ 螺旋捻転運動 反射行動

1. 研究開始当初の背景

ヘビ型ロボットは細長い構造をしているので狭隘地を探索するロボットとしての応用が期待され、これまでに様々なヘビ型ロボットが研究開発されてきた。例えば、災害や事故により倒壊した建物の内部の調査を行ったり、既存のプラント設備において複雑な配管の内部を調査したりすることなどが期待されており、我々もこれまでに図1に示すようなヘビ型ロボットの研究開発を行ってきた。



図1 配管内を移動するヘビ型ロボット

このように、ヘビ型ロボットの利用が期待されている環境は複雑で未知な環境であるにも拘らず、これまでに研究開発されてきたヘビ型ロボットのシステムでは、ヘビ型ロボットのなすべき所望の体幹形状を事前に計画するものがほとんどであり、この事前計画に基づいてロボットの各関節に目標角度を与え、その目標角度になるように関節を制御することで特定の移動形態が実現されていた。そのため、複雑で未知な実環境に適応して移動をするヘビ型ロボットはこれまでに実現されていない。

一方で、モバイルロボットの分野では、behavior-based robotics または身体性認知科学と呼ばれるアプローチにより、実環境にリアルタイムに適応して行動をするロボットの枠組みが提案され、これは iRobot 社のお掃除ロボットルンバなどに実装されて実用化されている。

ヘビ型ロボットは単純なモバイルロボットに比べて関節数が多く、その意味で複雑で未知な環境下において体幹形状を環境にあわせて適応的に変形させるような制御はむずかしいと一般に思われる。しかしながら、ヘビ型ロボットが実用化にいたらないのは、単にロボットの体幹形状を事前に計画した形に制御するという従来のやりかたから脱却できないということが問題であると考えられる。この点に関してブレイクスルーを起こすためには、ヘビ型ロボットの細長い形状を維持したまま、ロボットの全周に圧力センサを搭載した新たなヘビ型ロボットを開発する必要がある。それから、身体性認知科学の枠組みを導入し、リアルタイムに環境に適応する振る舞いを生じさせることができれば、従来期待されているような複雑狭隘な環境で高いモビリティを発揮することができ、実用化に至ることが期待される。

2. 研究の目的

そこで本研究においては、まず、3次元運動するヘビ型ロボットの全周の圧力を測定することのできる新たなヘビ型ロボットを開発する。3次元運動可能なヘビ型ロボットは、屈曲関節をピッチ・ヨーと交互に連結して構成されており、螺旋捻転運動と呼ばれる移動形態を実現することができる。螺旋捻転運動により、ロボットは配管内部で突っ張った状態で捻転しながら移動する。この際、ロボットは体軸回りに回転しながら推進するので、ロボットの全周において圧力を測定できるようにする設計が必要となる。

次に試作したヘビ型ロボットを使って、リアルタイムに圧力が測定できることを実証実験により示す。その際、ヘビ型ロボットのどの位置のどれくらいの大きさの圧力がかかっているかを直観的に把握するため、圧力センサの値をベクトルとして可視化す

る表示部を作成する。

さらに、ヘビ型ロボットが測定した圧力によって配管内で反射的に螺旋形状を変化させるアルゴリズムについて検討を行う。例えば、配管内においてゲートバルブにより配管の一部が閉じているような場合において、側抑制による反射的な振る舞いを加えた場合の挙動について調査する。

3. 研究の方法

(1) 全身感じるヘビ型ロボットの設計開発

本研究では、ロボット全周の接触圧力を測定することのできるセンサとして CoP (Center of Pressure) センサをヘビ型ロボットに実装した。CoP センサは圧力によりセンサ内部の抵抗値が変化して、測定する電圧値が変化し、その電圧値から総電流量（圧力の大きさに関係する）と圧力の重心位置を計算することができる。CoP センサはシート状であるので、様々な曲面に装着することができる。本稿のヘビ型ロボットのサーボモータには円柱状のパーツを装着しており、その円柱状のパーツの曲面に CoP センサを貼り付けることでヘビ型ロボットにセンサを実装している。CoP センサの外観とロボットの全体の様子を図 2 に示す。CoP センサは 2 層構造になっており、これが円柱状のパーツに半周ずつ取り付けられている。現時点では CoP センサはヘビ型ロボットの 2 リンク毎に 1 つ取り付けられている。

CoP センサには AD コンバータ IC が実装されており、この IC とマイコンが I2C により通信を行う。CoP センサの 1 つの層で 4 点の電圧を測定するため、AD 変換される値はヘビ型ロボットの 1 つの円柱状パーツについて 16 点（4 点×2 層×2 半周）となる。マイコンで読み取った AD 値は CAN によって制御用 PC へ送られ、制御用 PC にて圧力位置や大きさについての計算が行われる。

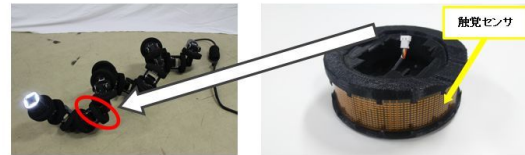


図 2 接触圧力センサのヘビ型ロボットへの実装

(2) 実証実験と圧力の測定

開発したヘビ型ロボットは、図 3 の左図に示す模擬配管プラントを使って実証実験を行う。配管の内径は 200mm である。配管の構成としては、まず水平に約 2m の直管があり、そこでエルボ管によって垂直な約 4m の直管に接続され、その先にまたエルボ管によって約 0.5m の直管と接続されたものとなっており、全直約 7m である。経路の途中にはゲートバルブが存在しているが、これは実機実証実験においては全開になっている。ただし、後述の反射的な振る舞いのアルゴリズムの検証においては、このゲートバルブが半開になっている状況を想定している。

図 3 の右図に、実験中のロボットの様子を示す。実証実験において、ヘビ型ロボットは下部の配管の入り口から挿入されて、上述の配管の内部を螺旋捻転運動により配管に突っ張りながら走破して、上部の配管出口まで到達する。この際の圧力センサのログを記録する。なお、ロボットシステムは ROS を使って構築されており、ロボットのセンサデータなどのログは rosbag を使って記録するようにしている。



図 3 実験模擬プラント（内径 200mm 配管）と内部を移動するヘビ型ロボットの様子

(3) 反射的振る舞いの検討

2次元平面内を動くヘビ型ロボットの反射的振る舞いとして実装していた側抑制を3次元的な運動に拡張する手法を提案する。ヘビ型ロボットはピッチ軸とヨー軸とが交互に連結されたモデルとなっている。2次元の場合と同様に、各リンクに接触圧力が付加された場合における振る舞いを考えるにあたり、ピッチ軸とヨー軸とを分けて考える。ここで、各リンクに加わる圧力から各関節の接触圧力への対応について、隣り合う関節のピッチ軸方向とヨー軸方向とで、その平均値が各リンクに加わる圧力とする。このとき、 i 番目の関節の回転角速度を以下で与える。

$$\frac{d\theta(i)}{dt} = K \left(P_j(i) - \frac{1}{2}P_j(i+2) - \frac{1}{2}P_j(i-2) \right)$$

ここで、 P_j は j 番目の関節に加わる圧力であり、 K は比例定数である。このようにして、各リンクに加わる接触圧力から各関節に対応した圧力へと変換し、ピッチ軸とヨー軸をそれぞれ分けて側抑制を適応することで、3次元運動に側抑制を拡張することとする。

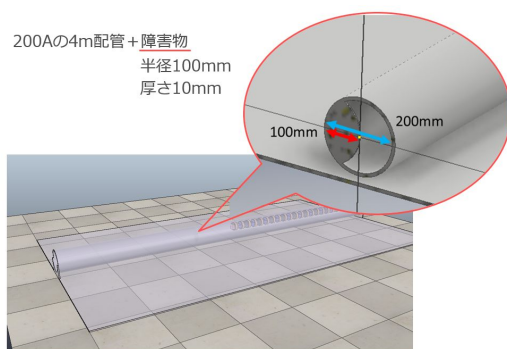


図4 障害物のある配管内で反射的に振る舞うヘビ型ロボットのシミュレーション

提案する反射的な振る舞いの挙動は、シミュレーション実験により検証する。図4にシミュレーション環境を示す。配管の途中の部分において、ゲートバルブを模した

障害物を配置し、螺旋捻転運動のみで移動させる場合と、螺旋捻転運動に反射的振る舞いを付加した場合とで比較し、各関節で生じるトルクを記録する。

4. 研究成果

全身感じるヘビ型ロボットの圧力センサの測定と可視化

実証実験により、本研究で開発したヘビ型ロボットが螺旋捻転運動で配管内を移動する際に、ヘビ型ロボット全体にわたって圧力を測定できていることを確認した。特に先頭付近で測定した圧力センサの値に適切な閾値を設けることで、ヘビ型ロボットが曲管部分に差し掛かったことを自動判別するアルゴリズムについての検証を行い、ある程度判別できる結果を得た。

図5に実証実験でのヘビ型ロボットの形状ならびに圧力センサの値を表示するユーザインタフェースの実行画面を示す。ヘビ型ロボットにかかる圧力はリアルタイムにユーザインタフェースの画面に表示される。これにより、ヘビ型ロボットが曲管部分を走破しようとしている際には、大きな圧力がロボットにかかっていることが観察された。このような情報をオペレータに呈示することは、ロボットを遠隔操作する際に役立つ情報となった。

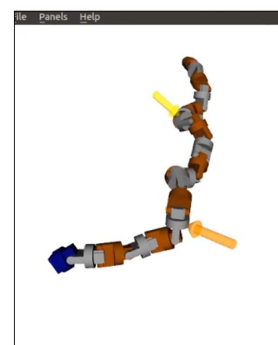


図5 圧力センサ情報の可視化を行うユーザインタフェースの画面

反射的振る舞いの影響

配管内を移動するヘビ型ロボットに反射

的振る舞いを実装したシミュレーション実験の結果を図6に示す。K = 0は側抑制の影響がなく常螺旋捻転運動だけを行っている状態であり、Kの値が大きくなるにつれて側抑制の影響が大きくなる。グラフの横軸は各関節の番号、縦軸は各軸におけるトルクの平均値であるが、側抑制があることで、ロボットの発生するトルクが小さくなり、ロボットへの負荷の低減や環境適応性の向上の効果が示唆された。

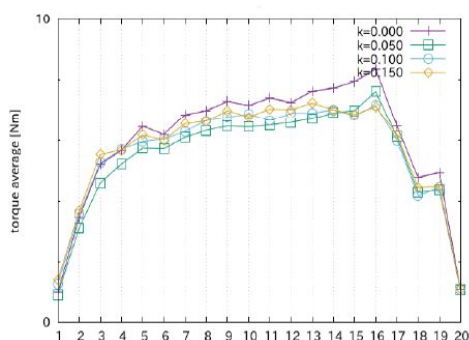


図6 反射的振る舞いの影響

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計6件)

亀川哲志, 他: "螺旋捻転運動で配管内を移動するヘビ型ロボットの構築", 第8回横幹連合コンファレンス 2017年12月3日, 京都

藤原始史, 竹森達也, 斉偉, 亀川哲志, 他: "配管内検査のためのヘビ型ロボットの遠隔操作インタフェース", 第8回横幹連合コンファレンス, 2017年12月3日, 京都

Taichi Akiyama, Tetsushi Kamegawa, Yosuke Suzuki, etc: "Recognition of a Bending Pipe by a Snake Robot with Pressure Sensors Mounted on the Entire Circumference of the Robot's Body", Proceedings of The 2nd International Symposium on Swarm Behavior and Bio-Inspired Robotics (SWARM2017), pp.190-195, Oct.30-Nov.1, 2017, Kyoto, Japan

秋山太一, 亀川哲志, 鈴木陽介, 他: "全周に圧力センサを搭載したヘビ型ロボットによる曲管の認識", ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017, 2017年5月11日, 福島

亀川哲志, 他: "螺旋捻転運動で配管を走破するヘビ型ロボットの開発-接触圧力センサならびに音響位置推定センサとの統合と実証実験-", ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017, 2017年5月11日, 福島

須原大貴, 亀川哲志, 五福明夫: "螺旋捻転運動により直管をつなぐ曲管を走破するヘビ型ロボットの実現", ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016 2016年6月9日, 横浜

〔図書〕(計1件)

松野文俊(主査), 大須賀公一(幹事), 松原仁, 野田五十樹, 稲見昌彦: "ロボット制御学ハンドブック", 16.6.3節 螺旋捻転運動によりパイプ内を移動するヘビ型ロボット, pp.562-563, 近代科学社 (2017)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

報道関連情報

碧い風, 特集 社会を豊かにするロボット技術, 複雑な配管内の情報を提供できるヘビ型ロボットの開発に成功, pp.12-13, 2018年3月

山陽新聞, くねくね前進 配管スイスイ, 2017年9月6日

日刊工業新聞, 曲管内走破ロボ開発, 2017年8月30日

6. 研究組織

(1)研究代表者

亀川 哲志 (KAMEGAWA, Tetsushi)

岡山大学・自然科学研究科・講師

研究者番号: 80432623