

ヒューマン・マシン・システム研究部会セッション

プラント運転・保守へのロボット技術の適用

Applications of Robotic Technology to the Operation and Maintenance of Plants

ヘビ型ロボットの開発と応用性

Development and Applicability of Snake-like Robots

*亀川 哲志

岡山大学

1. 緒言

生物の蛇を模倣して高い機能性を発揮するヘビ型ロボットの研究開発が進められている。我々もこれまでにいくつかのヘビ型ロボットを開発し、多様な移動形態を実現してきた[1][2][3]。特に我々はヘビ型ロボットの移動形態として螺旋捻転運動に着目している。螺旋捻転運動による移動方式では、ヘビ型ロボットが全体で螺旋の形状になり、その状態において体軸まわりに捻転する運動を生成して移動する。この移動方式ではヘビ型ロボットが螺旋形状になっているため、円柱状の環境に対して有効となることが期待できる。例えば、一般に配管内検査ロボットとして考案されているような配管内部で能動車輪を突っ張って移動するものに比べ、ヘビ型ロボットの豊富な自由度を生かして、より複雑な環境に対して柔軟な対応をすることが期待できる。そこで、我々は大規模プラントなどの配管検査においてヘビ型ロボットを活用することを目指し、これまでに螺旋捻転運動を用いて配管の内外に沿って移動させるヘビ型ロボットを実証したり、曲管に対応した移動方式として曲螺旋捻転運動などへの展開を行ったりしてきた[4][5]。しかしながら、ヘビ型ロボットを実環境で具体的なタスクを遂行するロボットシステムにしようとする、単にヘビ型ロボットの移動方式を研究するのみならず、ロボットのハードウェアのさらなる改良や高機能なセンサとの統合が必要不可欠である。そのため、我々は革新的研究開発推進プログラム (ImPACT) のタフ・ロボティクス・チャレンジ (TRC) にて、配管検査を行うヘビ型ロボットの実現にむけて、センサとの統合や遠隔操作に必要なユーザインタフェースとの統合を行ってきた[6]。本稿では、ImPACT TRC にて開発中のヘビ型ロボット (太索状プラットフォーム) について成果の一部を紹介する。本プロジェクトでは、いくつかのヘビ型ロボットプラットフォームが開発されているが、本稿で紹介するのは、車輪非搭載のハイパワータイプと呼ぶものである。

2. ヘビ型ロボットプラットフォーム**2-1. ハイパワータイプ**

図1に、ImPACT TRC で開発中の車輪非搭載ハイパワータイプのヘビ型ロボットと、そのシステム図を示す。ロボットは全長約 2.0m、質量約 9.0kg である。ロボットの外周には、ロボットと配管との間の摩擦力を高めるために (株) 水内ゴムに製作を依頼した独立気泡のスポンジゴムリング (硬度 15°) を装着している。スポンジゴムリングの幅は 25mm、外周直径は 115mm、厚さは 15mm である。

ロボット全体を制御する PC や電源は外部の設置されており、これらの機器への接続のためロボット後部から外径 10.4mm、長さ約 10m のハイフロン被覆の 6 芯×15AWG のケーブルが接続されている。また、螺旋捻転運動時にケーブルの撚れを解消するために、ロボットの後部にソルトン社製のロータリコネクタ rotary630 を搭載している。ロボットの先頭には、配管内をモニタするためのカメラとして GoPro 社製 HERO4 Session を搭載している。また LED の照明として、SheInKa 社製 LED Light を搭載している。カメラ映像は無線通信により転送されオペレータの手元にあるモニタ (Apple 社製 iPad Air2) あるいは操作用 PC のユーザインタフェースに映し出される。

このヘビ型ロボットは、ピッチ軸とヨー軸とが交互になるように屈曲する関節を直列に配置して構成されており、合計 20 個の関節を持つ。ここで関節を駆動するサーボモータには ROBOTIS 社製 Dynamixel

MX-106 を採用している。サーボモータ間の接続には通常 Dynamixel の純正品のアルミフレームが組み合わされて使われるが、予備実験においてこの部材が塑性変形したため、新たに SUS304-CP の材質の 1 枚もののフレームを特注で設計製作した。Dynamixel はある程度の数であれば電源線と信号線を直列に接続して使用することができるが、20 個を直列につなぐと電源から離れるにしたがって電圧降下が起こったり、通信速度に制約が生じたりする。そこで、サーボモータ 2 個につき 1 個のマイコン(MCU)を搭載したり電源を並列に供給したりしている。マイコンには THK 社製 SEED MS1A を使用している。また、ロボットは超小型 USB シリアル変換モジュール AE-FT234X を接続したマイコンで独自に構成した USB-CAN converter を介して PC と通信を行っている。また、IMU センサを搭載したマイコンがロボットの先頭付近に搭載されている。すべてのマイコンは共通の CAN バスに接続されて通信が行われている。

ロボットへの電源として、定格出力電圧 48V、定格電力 1000W の安定化電源である TDK-Lambda 社製 HWS1000-48 を使用している。この 48V の電源を DCDC コンバータで適切に電圧変換して、ロボットの各機器へと電力を供給する。サーボモータに対しては COSEL 社製 CDS4004815 を介して 15V の電源が供給され、マイコンには COSEL 社製 CBS2004812 を介して 12V の電源が供給されている。ロボットの運動計画を行ったりデータを記録したりするための PC がロボットに接続されている。また、PC には家庭用ゲーム機のコントローラが接続され、オペレータはこれを用いてロボットを操作する。現時点では、オペレータはロボット先頭のカメラ映像や PC 上に表示されるロボット関節角度などの内部状態を見ながらロボットを遠隔操作するようになっている。

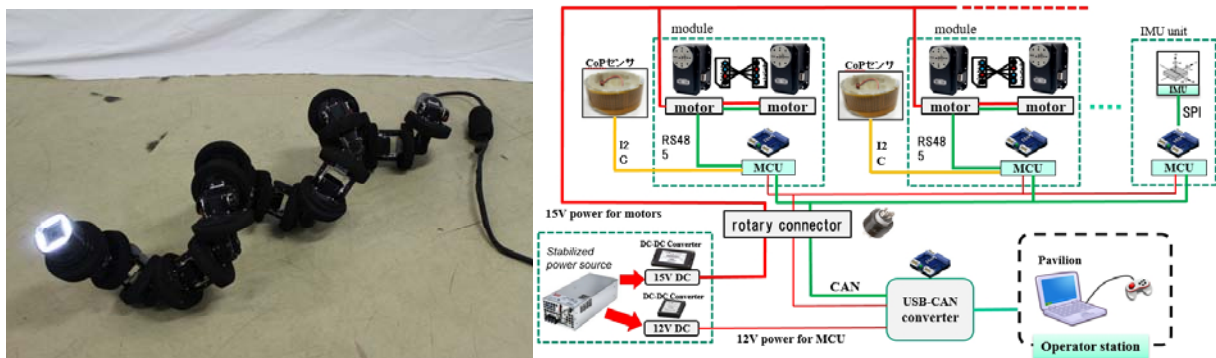


図1 ヘビ型ロボット (ハイパワータイプ) とシステム図

2-2. 接触圧力センサ

ヘビ型ロボットの体幹に接触センサや圧力センサを取り付けて、環境認識を行ったり、ロボットの運動へのフィードバックに利用したりする研究例がいくつか報告されている。しかしながら、3次元運動をするヘビ型ロボットのためにロボットの全周の接触圧力を測定することのできるセンサを実装したヘビ型ロボットの研究例はこれまでにない。

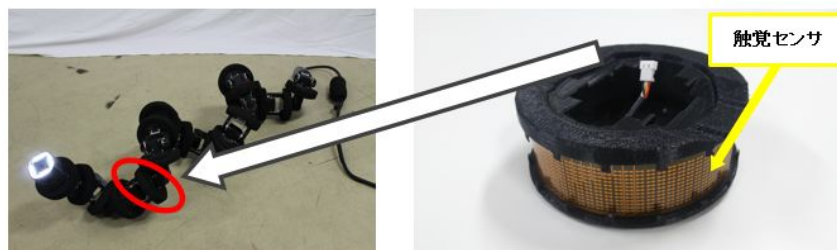


図2 ロボット全周の圧力を測るセンサ (CoP センサ)

本プロジェクトでは、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。

2-3. 音響位置推定センサ

ヘビ型ロボットを配管内検査に適用する場合、ヘビ型ロボットが配管内のどこにいるのかを知ることができれば、検査の際の画像情報などを配管の位置情報と紐づけて記録することができ、大変有用である。我々は本プロジェクトにおいて、音響センサを用いた配管内自己位置推定システムをヘビ型ロボットに搭載することで、この機能を実現する。音響位置推定センサにおいては、配管入口にスピーカを設置し、位置を推定する場所にマイクを取り付ける。これにより、スピーカが音を発してからマイクに到達するまでの時間を参照信号との到達時間の差を用いて計測し、配管入口からのマイクまでの距離を推定することができる。またマイクを取り付けた部分の姿勢を検出するためにジャイロと加速度センサによる慣性計測ユニット (IMU) もマイクの付近に取り付ける。これにより、マイクの取り付けの向きを測定して、配管がどちらの向きに延びているかを推定する。これらの情報を組み合わせて、配管入口からの距離を求めただけでなく、配管の地図を作ることができる。

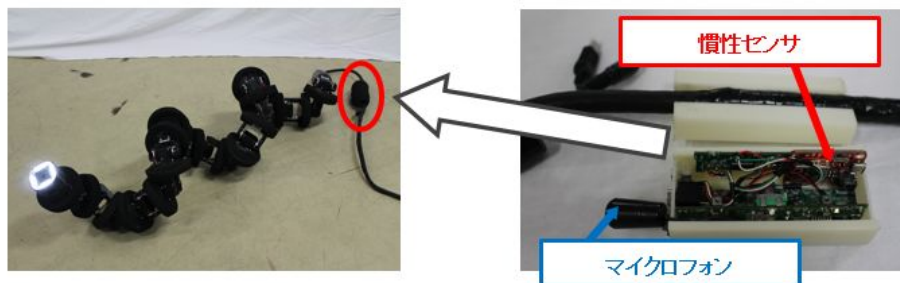


図3 音響位置推定センサ

図3にマイクやIMUを含む音響センサデバイスをヘビ型ロボットの後部に取り付ける様子を示す。音響センサデバイスはUSBで信号処理用のPCと接続される。そのため、USBケーブルをヘビ型ロボットのケーブルと並走して取り付けている。音響センサを用いた自己位置推定のソフトウェアもUbuntu14.04上のROS indigoにて開発されているが、システムとしてはロボットのシステムと独立しているため、ロボットの制御用PCとは別のPCで処理を行うこともできる。

2-4. 統合化ユーザインタフェース

前述のとおり、ヘビ型ロボットの各リンクには全周圧力センサが、最後尾には音響センサと慣性センサを組み合わせた位置推定センサが、先頭にはライトとカメラによる画像センサが搭載されている。また、ヘビ型ロボットの各関節の角度は、サーボモータの機能により取得することができる。音響位置推定センサにより作成される配管地図データにロボットの現在形状をCGで描画したものに加え、さらに、ヘビ型ロボットの先頭に搭載されたカメラにより撮影された写真を配管地図上にマッピングする技術を開発した。

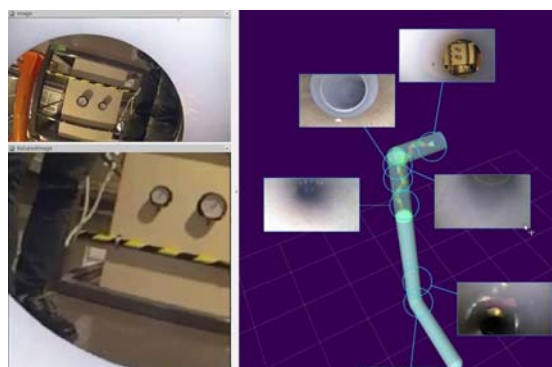


図4 ヘビ型ロボット遠隔操作統合ユーザインタフェース

図4の右にこの画面を示す。また、ヘビ型ロボットの捻転運動により激しく回転してしまうカメラ映像をIMUで測定した重力方向に対して安定化させるユーザインタフェースを開発した。この画面を図4の左に示す。さらに、配管内でのヘビ型ロボットの現在形状について、目標形状との差分が分かるように2つの形状を重ね合わせて表示するユーザインタフェースと、接触圧力センサで測定した圧力を、位置と大きさが分かるようにベクトル表示してロボットのCGに書き加えたユーザインタフェースも開発している。

3. 実証実験

3-1. 配管内走破実験

本稿で紹介したヘビ型ロボットプラットフォームを用い、ImPACT TRCの評価フィールドにて実証実験が行われた。評価フィールドの外観と配管内を移動しているヘビ型ロボットの様子を図5に示す。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、これは本実験においては全開になっている。そのため、途中でヘビ型ロボットの螺旋の半径を小さくするなどの対応をする必要は特にないが、ゲートバルブのゲートの幅の分の溝があり、その溝を構成するエッジ構造が螺旋捻転運動をするヘビ型ロボットにダメージを与える場合があるため、配線の処理などが適切でないと断線などの接触不良が生じ、ロボットの故障の原因となる。

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できることを確認した。また、その際にヘビ型ロボットに搭載したセンサ情報を取得できていることを確認した。配管出口の正面には模擬的な計器が置かれており、オペレータはロボット先頭のカメラ画像によって計器を目視することができた。



図5 ヘビ型ロボットの螺旋捻転運動による配管内走破

3-2. ダクト内螺旋捻転走破実験

さらに、ImPACT TRCでは、ヘビ型ロボットの走破すべき新たな課題として角ダクトが設置された。この外観と図面を図6に示す。ダクトは断面の寸法が250mm×250mmであり、下部の入り口からロボットを投入する。まず水平な区間があり、それから垂直、水平垂直、最後に水平となって上部の出口に到達する。入り口から出口までの全長は約4mである。

実証実験において、ヘビ型ロボットは下部のダクト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ダクトに突っ張りながら走破して、上部の出口まで到達した。また、その際にヘビ型ロボットに搭載したセンサ情報を取得できていることを確認した。なお、ヘビ型ロボットの形状の制御については、基本的に常螺旋形状を目標形状とし、ダクトが曲がっている部分では、ダクトから受ける外力によってロボットの形状が変化できるように、サーボモータの関節制御の剛性を比較的低く設定している。

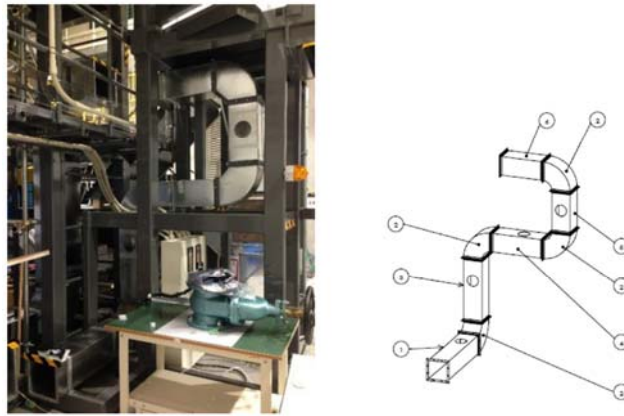


図6 ダクト内走行実験のための模擬環境

4. 結言

本稿では、革新的研究開発推進プログラム (ImPACT) のタフ・ロボティクス・チャレンジ (TRC) にて開発中の非車輪タイプのヘビ型ロボットを紹介し、本ロボットによって走破可能であった配管やダクトの一例を示した。開発したヘビ型ロボットは先頭カメラのみならず接触圧力センサや音響位置推定センサが統合化されており、統合化ユーザインタフェースにこれらの情報が表示される。本研究ではヘビ型ロボットの冗長自由度を生かした制御方策により、複雑な構造物に沿って移動するロボットが実現される可能性を示した。本稿では紙面の都合により詳細を省いたが、配管の内部だけでなく外部に沿って移動するヘビ型ロボットの実証実験や、防塵防水仕様のヘビ型ロボットの構築もすでに進めている。今後、本研究をさらに進めることにより、実プラントでの点検や検査にヘビ型ロボットを適用することを目指している。

謝辞

本研究は、総合科学技術・イノベーション会議により制度設計された革新的研究開発推進プログラム (ImPACT) により、科学技術振興機構を通して委託されたものです。本ロボットの開発には、ImPACT TRC 太索状グループの研究成果が含まれています。

参考文献

- [1] 亀川哲志, 松野文俊: “三次元蛇型ロボットにおける体幹ねじり型移動の解析と GA による移動形態推移時の運動計画”, 日本ロボット学会誌, Vol. 21, No.5, pp.509-516, 2003.
- [2] Tetsushi Kamegawa, Takaaki Harada and Akio Gofuku: “Realization of cylinder climbing locomotion with helical form by a snake robot with passive wheels”, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.3067-3072, 2009.
- [3] 亀川 哲志, 斉 偉, 五福 明夫: “螺旋尺取り方式を用いて円柱を移動するヘビ型ロボットの提案”, 計測自動制御学会論文集, Vol.51, No.1, pp.8-15, 2015.
- [4] Toshimichi Baba, Yoshihide Kameyama, Tetsushi Kamegawa and Akio Gofuku: “A snake robot propelling inside of a pipe with helical rolling motion”, Proc. of SICE Annual Conference 2010, pp.2319-2325, 2010.
- [5] 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 講演論文集, 1A1-09b5, 2016.
- [6] 亀川哲志, 斉偉, 須原大貴, 松田絵梨子, 秋山太一, 酒井聡志, 竹森達也, 藤原始史, 松野文俊, 鈴木陽介, 坂東宜昭, 奥乃博: “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 講演論文集, 1P2-Q02, 2017.

*Tetsushi Kamegawa

Okayama Univ.