

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 5 月 28 日現在

機関番号：15301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25820088

研究課題名(和文) 反射行動に基づくヘビ型ロボットの障害物利用推進

研究課題名(英文) Obstacle aided locomotion for a snake-like robot based on reactive motion

## 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) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ヘビ型ロボットが接触センサ情報を利用した反射行動により環境内にある障害物を利用して移動する推進アルゴリズムの提案を行い、これを、動力学シミュレータによるシミュレーション実験ならびに実機モデルを用いた実験により検証した。実験の結果より、障害物利用推進により効率のよい推進が実現できることを確認した一方で、環境との接触点での摩擦力を考慮した新たなアルゴリズムの必要性を確認した。

研究成果の概要(英文)：In this research, I have proposed an algorithm that a snake-like robot moves reactively based on information of contact sensor, such that the snake-like robot utilizes obstacles existing in an environment. The effectiveness of proposed algorithm is verified by experiments of a dynamical simulation model and a real mechanical model. From the experimental results, it is verified that the snake-like robot realize an efficient locomotion by the reactive motion. On the other hand, I also confirmed that we need another algorithm that considers friction force between a robot and an obstacle to improve the locomotion.

研究分野：工学

キーワード：ヘビ型ロボット 反射行動 障害物利用推進 接触センサ 側抑制

### 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

しかしながら、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していた。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。その原因として、これまでに開発されてきたヘビ型ロボットは環境とインタラクションするためのセンサを備えておらず、環境を積極的に認知するための手段をほとんど持ち合わせていないという大きな問題があった。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、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が問題であって、ヘビ型ロボットにも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で実用化に至ることが期待される。

### 2. 研究の目的

身体性認知科学において特徴的な枠組みの1つに、センサからの入力を複雑な思考や計画なしにダイレクトにモータ出力へとつなぐ反射的な行動がある。一方で、これまで研究開発されてきたヘビ型ロボットは環境とインタラクションするためのセンサを実装することはほとんどなく、反射的な行動によりヘビ型ロボットを推進させる研究報告はあまりない。そこで本研究では、環境とインタラクションするための接触センサを備えたヘビ型ロボットを想定し、あるリンクに接触刺激があった場合の反射的な振る舞いを設計する。具体的には、環境中の障害物を避けるのではなく、障害物を積極的に利用して推進するヘビ型ロボットを実現するための枠組みを構築する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 反側抑制

本研究において我々は、ヘビ型ロボットが障害物に接触した場合の振る舞いとして反側抑制と呼ぶアルゴリズムを提案している。反側抑制の振る舞いを図2に示す。反側抑

制とは、障害物と接触したリンクの両端の関節を図2に示す方向に回転させ、さらに、その両隣の関節を逆方向に回転させるものである。この方法により、ヘビ型ロボットが環境と接触した際、その接触箇所において局所的に環境に押し戻す振る舞いが生成されるようになる。さらに、接触時に影響を受ける関節を増やした拡張反側抑制と呼ばれるアルゴリズムにより、より長く環境を押し戻す動作を生成することができる。

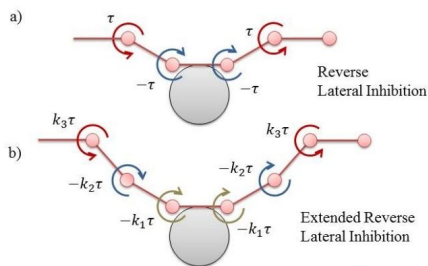


図2 反側抑制の振る舞い

## (2) シミュレーションの設定

検証実験においては、まず物理シミュレータ上にヘビ型ロボットのモデルを構築して反射行動の基本的な特性を検証する。図3に物理シミュレータ ODE (Open Dynamics Engine) 上に構築したヘビ型ロボットを示す。シミュレータ内に構築したヘビ型ロボットは、サイズや重量、関節の最大トルクなどのパラメータを実在のヘビ型ロボット(図1)と同じにしてある。さらにこのヘビ型ロボットには、側面に接触力を測定できるセンサを実装しており、また関節にかかるトルクを測定できるようになっている。図3中の青や緑の線分は接触力の大きさを、赤の線分は関節部のトルクを表している。

また、ヘビ型ロボットの移動する環境のモデルとして、本研究では2次元平面に複数の円柱状の障害物が存在する環境を設定した。環境に設置する障害物の半径は0.1[m]とし、地面に固定されている。地面とロボットの間の摩擦係数は、生物の蛇の皮膚の

特性を参考に設定し、体軸に対して接線方向と法線方向とで摩擦の差があるように設定されている。

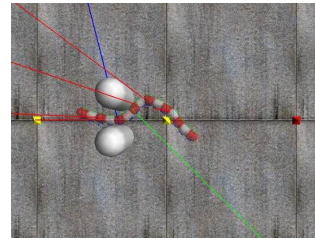


図3 ヘビ型ロボットのシミュレーションモデル

## (3) 実機実験のための試作機

さらなる検証実験として、接触センサを備えたヘビ型ロボットを試作し、これに環境との接触により反射的な振る舞いを示すアルゴリズムを実装して、実環境においてアルゴリズムの効果を検証する。図4に、試作したヘビ型ロボットを示す。ヘビ型ロボットは3つのリンクと2つの関節で構成されており、長さ594[mm]、幅150[mm]、高さ335[mm]で、重量は5[kg]である。関節部にはDCモータが取り付けられており、モータを駆動することでヘビ型ロボットは屈曲動作を行う。また接触センサがリンクの両側に取り付けられている。さらに、ロボットには受動車輪が取り付けられており、これにより、接線方向と法線方向との摩擦の差を実現している。

本研究では環境との接触力を測定する必要があるため、図4に示す接触センサを新たに製作した。接触センサは大きく2つのパーツにより構成されており、この2つのパーツに圧力センサが挟まれる格好になっている。

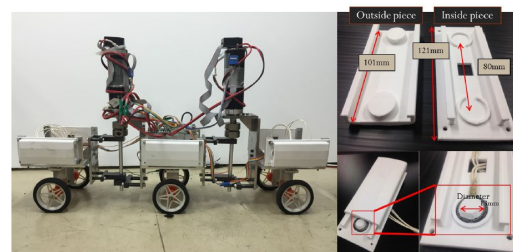


図4 接触センサを搭載したヘビ型ロボット

#### 4. 研究成果

##### (1) シミュレーションによる検証実験

###### 反側抑制の効果の検証

まず、シミュレーション実験により得られた結果を示す。シミュレーション実験の様子を図5に示す。ODEを用いたシミュレーション実験の初期状態として、ヘビ型ロボットの先頭位置を原点に置き、後続リンクはワールド座標系の  $x$  軸上に一直線になるように配置する。このときの重心位置は  $(-0.49, 0.0)[m]$  である。また、ロボットの目標移動地点は  $(10.0, 0.0)[m]$  と設定する。実験環境として、障害物が格子状に配置されているもの(図5左)と、三角格子状に配置されているもの(図5右)の2種類を用意した。また、それぞれの環境において、障害物の間隔を  $0.33, 0.36, 0.39, 0.42[m]$  とした4つのパターンについて実験を行った。また、実験において、ヘビ型ロボットが目標地点に到達するまでにロボットの発生したエネルギーを比較する。エネルギー  $E[J]$  は、稼働時間  $[0, T]$  において各関節が発生したものを足し合わせることで、次式により計算する。ただし、 $T$  は、ヘビ型ロボットの重心位置の  $x$  座標が  $9.5[m]$  を超えるまでの時間とする。

$$E = \sum_{i=1}^{14} \int_0^T \tau_i^m(t) \omega_i(t) dt$$

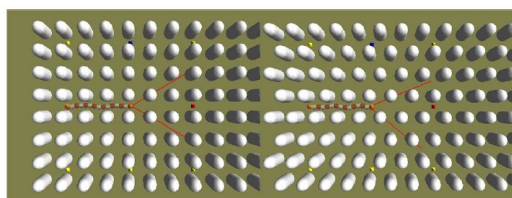


図5 シミュレーション実験

なお、シミュレーション実験においては、反側抑制による振る舞いに加えて、目標地点に向かう横うねり推進の振る舞いも実装されている。これは、ヘビ型ロボットを頭部(先頭リンク及び先頭関節)、首(第2リンクおよび第2関節)、胴(第3リンク

および第3関節以降)の3つの部分に分けて考え、それぞれに対して反射的なルールを適用することで、ヘビ型ロボットに目的地に到達させる振る舞いを生成させるものである。この横うねり推進のみで障害物内を移動させる場合と、横うねり推進に拡張反側抑制(ERLI)による反射的な振る舞いを加えた場合とで、推進の効率がどう変化するかを確認した。実験の結果を、表1に示す。

表1 シミュレーション実験の結果

Interval of obstacles [m]	Without ERLI [J]	With ERLI [J]
0.33	25900	10517
0.36	21029	9188
0.39	26301	13475
0.42	28260	11294

この実験により、本実験で提案する反側抑制の振る舞いをヘビ型ロボットに実装することによって障害物内を効率よく推進できる可能性があることが確認できた。つまりこの場合、ヘビ型ロボットは障害物を利用して効率よく推進していると考えられる。

ランダムな反側抑制によるスタック回避反側抑制により効率的な推進ができる可能性が示されたが、シミュレーション実験を重ねるうちに、ある条件になると、障害物からの反力とロボットの発生する力がつり合い、環境内でロボットが障害物に突っ張った状態で動きを止めてしまう、いわゆるスタック状態になることが確認された。そこでこの問題を解決するために、反側抑制のパターンを複数用意しておき、それらをランダムに選択することでスタック状態を回避するアルゴリズムを導入した。具体的には、3つの反側抑制パターンを設定し、このうちのどれを使って反射的に振る舞うかを  $0.5[s]$  ごとにランダムに選択する。実験の結果を表2と表3に示す。各表において、目標地点に到達した場合には「 $\square$ 」、目標地点に到達できずに環境中で停止した場

合には「Stuck」、ロボットが目標地点に到達できず障害物があるエリアから出た場合には「Escape」と記載されている。この結果により、提案アルゴリズムによって問題が解決されることが確認できた。

表2 Symmetry パターンのみの場合

障害物の間隔 [m]	障害物が格子配置	障害物が三角格子配置
0.33	○	stuck
0.36	stuck	escape
0.39	○	stuck
0.42	○	○

表3 3つをランダムに切り替える場合

障害物の間隔 [m]	障害物が格子配置	障害物が三角格子配置
0.33	○	○
0.36	○	○
0.39	○	○
0.42	○	○

## (2) 実機実験による検証実験

### 実験環境

さらに、試作したヘビ型ロボットの実機モデルにより、反射的振る舞いの効果を実験的に検証した。実験環境として、図6に示すような環境を構築した。この環境においては直径 50[mm]の円柱の障害物は格子状に配置されている。ゴールの位置はスタート位置から 1380[mm]離れた場所に設定されている。

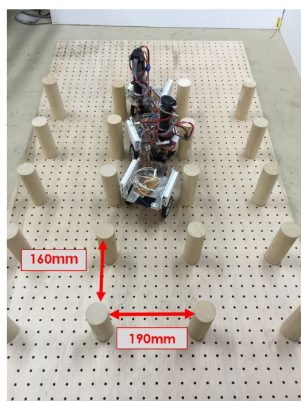


図6 実機実験の様子

### 横うねり推進

実機にもシミュレーション同様に横うねり推進 (LU) のアルゴリズムを実装した。た

だし、実機においては、各関節を駆動する PWM のデューティ比を下記の式により与えることにより横うねり推進を実現する。ここで、ある関節は隣り合う関節と位相差を持って正弦波状に駆動されることになる。

$$S_i^s = A \sin(\omega t + (i-1)\theta) \quad (i=1,2)$$

### 反射的振る舞い

さらに、実機のヘビ型ロボットには反射的振る舞いとして、側抑制 (LI) と反側抑制 (RLI) の2つの振る舞いを実装した。反射的振る舞いにより各関節を駆動する PWM のデューティ比として、中央リンクの接触センサに AD 値で 200 を超える刺激が入力されたときに、ある一定の値を与えることとする。

### 実験結果

ロボットの振る舞いとして、横うねり推進のみ (LU)、横うねり推進と側抑制 (LU+LI)、横うねり推進と反側抑制 (LU+RLI) の3つのパターンについて、それぞれ消費エネルギーとゴール地点まで移動するのにかった時間を測定した。それぞれ5回測定を行った平均値の結果を表4に示す。

表4 実機実験の結果

Average	LU	LU+LI	LU+RLI
Power consumption [J]	749.0	1235.4	952.1
Travel time [s]	55.8	77.3	65.8

実験結果により、どのパターンにおいてもゴール地点まで到達できたものの、一番消費エネルギーが少なく、かかった時間も少ないのは横うねり推進のみで移動した場合であった。これは、反射的振る舞いにより移動効率が向上することへの期待とは反対の結果であった。この原因として、ロボットと障害物との間の摩擦の方向が問題であると考えている。反側抑制は接触時においてロボットを障害物に押し付ける方向に作用するので、摩擦力も大きくなる。もし摩擦力が推進を妨げる方向に寄与する場合

には、ロボットの動きを止めるように影響するので、これは望ましくない。また、側抑制を加えた場合には、ロボット細かく振動して障害物との接触と非接触の状態を切り替えている様子が確認できた。これは側抑制の本質的な効果により、障害物と接触するとすぐに障害物と離れるように振る舞うが、横うねり推進の動きでまたすぐに障害物と接触するからである。さらに、シミュレーション実験でのヘビ型ロボットにくらべて実機実験のヘビ型ロボットは障害物にたいして相対的にサイズが大きいため、障害物を利用して進行方向に推進力を得にくい状況にあったといえる。今後の研究において、これらの問題を改善する予定である。例えば、摩擦力の方向によって振る舞いを変えるようなアルゴリズムを検討している。

#### 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1件)

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、査読有、51巻、1号、2015、8-15、  
<http://www.sice.jp/pub/vol51no1.html>

[学会発表](計5件)

Tsubasa WATANABE, Sosyo EN, Tetsushi KAMEGAWA, Akio GOFUKU,  
Development of Snake Robot with Obstacle Aided Locomotion by Reverse Lateral Inhibition, Second International Workshop on Functional Modelling for Design and Operation of Engineering Systems, 2015年3月31日発表、岡山

袁蘇湘, 亀川哲志, 五福明夫、狭隘空間で側面が接触した際に反射的な動作を行うヘビ型ロボットの試作、第15回計測自動制御学会システムインテグレーション部門

講演会、2014年12月16日発表、東京

渡辺翼, 亀川哲志, 五福明夫、MR流体を用いたヘビ型ロボットのための小型ダンパの開発、計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会、2014年11月21日発表、岡山

Tetsushi Kamegawa, Ryoma Kuroki, Akio Gofuku, Evaluation of Snake Robot's Behavior Using Randomized EARLI in Crowded Obstacles, IEEE International Symposium on Safety, Security and Rescue Robotics, 2014年10月28日発表、北海道

亀川哲志, 黒木亮磨, 五福明夫、拡張反側抑制を用いたヘビ型ロボットの障害物利用推進、日本ロボット学会学術講演会、2014年9月4日発表、福岡

[図書](計0件)

[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  
日刊工業新聞、ヘビ型ロボ 探索用途に岡山大が技術、2014年10月21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