

狭小垂直曲面間走行用蠕動運動型ロボットの開発

Development of the peristaltic crawling robot for driving on curved narrow space

精密工学専攻 56号 森下陽介

Yosuke Morishita

1. 緒言

近年、日本では様々な工業技術の研究・開発が行われており、現在の日本の躍進の元となっている。それにつれ工場等も効率化と共に複雑化しており、人の入り込めないスペースが増加している。その様な箇所では、道具やロボット等を用いて検査、清掃、および修理等のメンテナンスを行っている。

その中の一つとして、左右を垂直の壁で囲まれた狭小空間がある。これは並んだ機器の隙間や、建物の壁と大型機器との間等に生じる空間である。その様な場所も当然メンテナンスが必要不可欠であるが、人の手では入り込むことも出来ず、また道具を用いても作業が困難である場合が多々ある。そこでロボットを用い、狭小垂直壁面間をメンテナンスすることが求められている。

壁面間の走行ロボットの先行研究として、パンタグラフ型のホイール式ロボット⁽¹⁾があるが、ホイール式のものロボット自体が大きく、小型化し狭小空間に対応することが困難である。そこで、本研究室にて開発したミミズの蠕動運動を規範とした移動ロボット⁽²⁾を応用することを考えた。これは体節の伸縮の際に発生する摩擦を利用した運動である。この移動方式ならば、狭小空間での走行が容易であり、もし壁面間隔が変化しても受動的に対応が可能である。また、狭小空間への進入自体が困難な場合でも、進入時には細く小さく変形し、進入後は太く広くなり安定した走行をすることが可能である。

本研究では、蠕動運動を用いた検査およびメンテナンス用ロボットを開発する。本ロボットは、工業用内視鏡を搭載することで狭小空間内の検査を行い、さらには工具を用いての清掃等を行うことを目的とする。

とりわけ本報では、「狭小垂直曲面空間下での安定した走行」ならびに「加速度センサを用いた姿勢制御」を行える新型ロボットの設計・試作を行う。試作機にていくつかの実験を行い、新型ロボットの有用性を示す。

2. ミミズの蠕動運動

ミミズが前進する様子を Fig.1 に示す。ミミズは体節を以下のパターンに従って伸縮運動させることにより移動することができる。

ミミズははじめに頭部の体節を収縮させる。この収縮を順に後方の体節へと伝播させながら頭部の体節を伸長させてゆく。このとき収縮した体節は地面と摩擦が発生し、伸長した体節が前方に伸びるための反力を得ることができる。この収縮と伸長の繰り返しにより縦波後進波が発生しミミズは前進することができる。

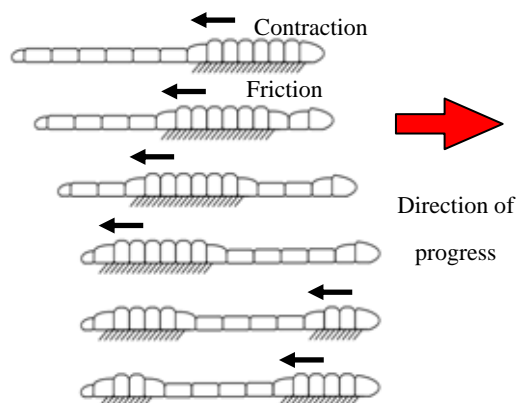


Fig.1 A peristaltic crawling of an actual earthworm

3. ロボットの概要

3.1 ロボットの外観

製作したロボットの外観を Fig.2 に示す。本ロボットは移動のための蠕動運動を行う人工筋肉部と、方向転換を行うためのサーボモータを中心に備えた X ジョイント部、さらに曲面に対応する為の人工筋肉部と X ジョイント部を繋ぐカーブジョイント部の、3つの部分から成り立っている。本ロボットの寸法は全長 655 [mm]、幅 115 [mm]であり、重さは約 600[g]である。

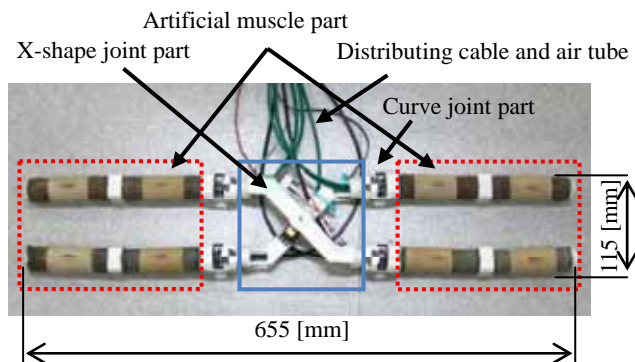


Fig.2 Peristaltic crawling robot using air pressure

3.2 人工筋肉部

既存の蠕動運動型ロボットではアクチュエータにモータ⁽³⁾や水圧⁽⁴⁾、形状記憶合金⁽⁵⁾、圧電素子⁽⁶⁾などを使用したものがあるが、本研究では出力やエネルギー供給の汎用性、小型軽量、耐水性、柔軟性があることなどから、空気圧式の人工筋肉を使用したユニットの外観と内部の構造をそれぞれ Fig.3, Fig.4, ユニットの仕様を Table 1 に示す。ここで、蛇腹が軸方向に伸びきっている状態を伸長時、蛇腹が軸方向に縮んでいる状態を収縮時と呼ぶ。

ユニットの構造は、まず蛇腹の内部にバネを入れ、端にフランジを取り付け、その上から人工筋肉を取り付けるような構造となっている。蛇腹と人工筋肉の間(チャンバ)に空気を送り、空気圧によってユニットを収縮させる。そして、チャンパ内の空気を抜くことで、ユニットを伸長させる。本ロボットでは、ユニットを2個ずつ連結したものを4か所に配置し、合計8個のユニットを使用する。これらのユニットの伸縮をミミズの体節の動きにみたと、ロボット全体で蠕動運動を再現する。

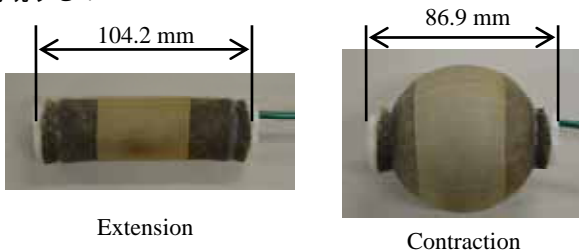


Fig.3 Appearance of the unit

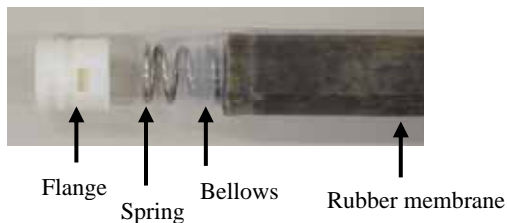


Fig.4 Mechanism of the unit

Table 1 Specification of a unit

Length [mm]	Extension	104.2
	Contraction	86.9
Diameter [mm]	Extension	29.5
	Contraction	71.8
供給圧力 [MPa]		0.08

3.3 Xジョイント部

Fig.5にXジョイント部の外観を示す。Xジョイント部は2つのパーツと1つのサーボモータから成っており、この2つのパーツがモータによって立体的に交差する構造となっている。サーボモータはH8マイコンにより制御されている。

中央のサーボモータを制御し、各ユニットの収縮と組み合わせることで、ロボットの姿勢・角度を自由に変えることができる。これにより、目標の方向へと進行方向を向けることが出来る。詳しい動作方法については後述する。

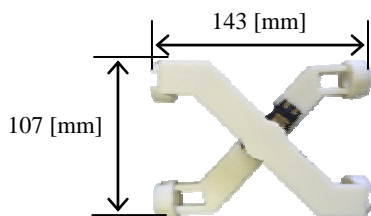


Fig.5 X joint part

3.4 カーブジョイント部

曲壁面間走行可能な柔軟性を持たせる為、人工筋肉部とXジョイント部との間に Fig.6 のようなカーブジョイント部を

設けた。このパーツはフランジとアルミプレート、およびバネからなり、一方向のみ曲がる構造になっている。また、バネによって真っ直ぐな状態を保とうとする。



Fig.6 Curve joint part

3.5 移動手法

本ロボットは X 部を挟み直線上に並んだ計4つのユニット2組、計8ユニットにて蠕動運動を行う。4つのそれぞれのユニットを順に膨張・収縮させ、縦波のように繰り返し波を送り前進する。これを2つ並べて並走させることで壁面を把持している点が面を形成し、姿勢を安定させることができる。4ユニットによる蠕動運動の動作パターンは数種類考えられるが、二平面間を安定して走行することができるのは1パターンだけである。その動作パターンを模式的に表した図を Fig.7 に示す。

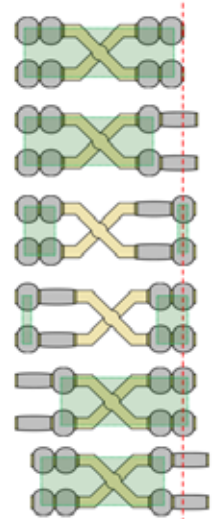


Fig.7 Peristaltic crawling with artificial muscles

3.6 方向転換手法

本ロボットは X ジョイント部中央に取り付けたサーボモータと人工筋肉の動作との組み合わせによって方向転換を行う。進行方向に対し 90 度右方向に方向転換をする際の動作方法を Fig.8 に示す。方向転換では、まず準備体勢として全ユニットが膨張した状態にする。次に、パーツ B だけを伸張させた後、サーボモータを 90 度回転させると、パーツ A は膨張して壁面を把持しているため、パーツ B だけが回転する。そして、把持脚を切り替えるため再び全ユニットを膨張させ、今度はパーツ A だけを伸張させて、90 度回転させる。最後に蠕動運動へ移行する為の準備体勢として、再度全ユニットを膨張させ、方向転換が完了する。

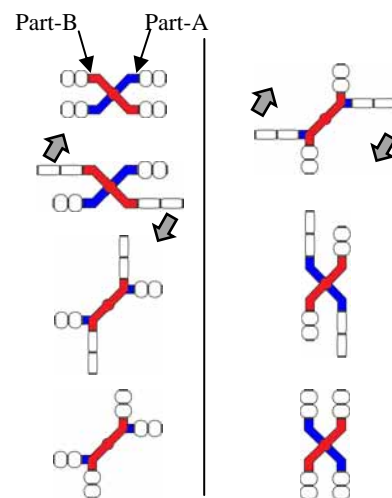


Fig.8 Turning motion of robot

4. 走行実験

製作したロボットを用いて、狭小垂直曲面間にて走行実験を行った。実験には、実際にメンテナンスが求められる物の一つである攪拌槽の、実験用モックアップ(Fig.9)を用いる。これは、外側は実際の攪拌槽で用いられる鉄板で、内側は動画解析用に透明なアクリル板となっている。壁面間隔は約 60 [mm]で、外側の壁面の曲率半径は約 890 [mm]ある。Fig.10 に実験時のロボットの様子を、Fig.11, Fig.12 に走行中のロボットの变位と傾きの実験結果をそれぞれ示す。



Fig.9 Mockup of mixing tank

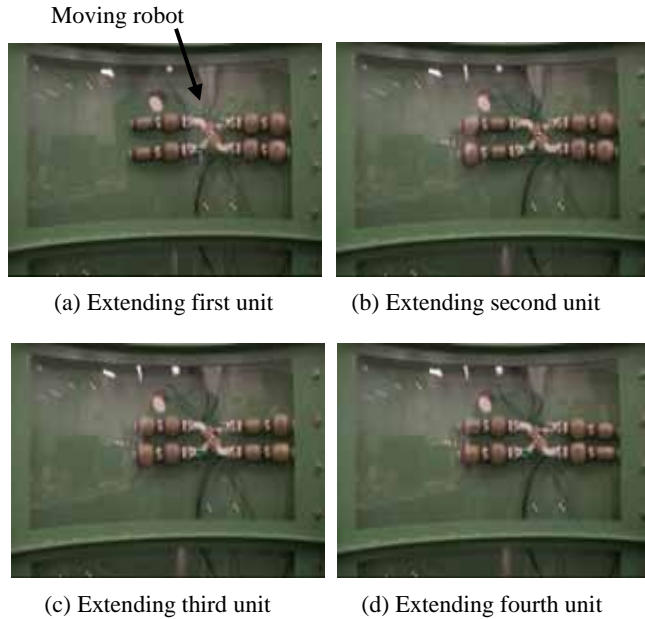


Fig.10 Moving robot in mockup

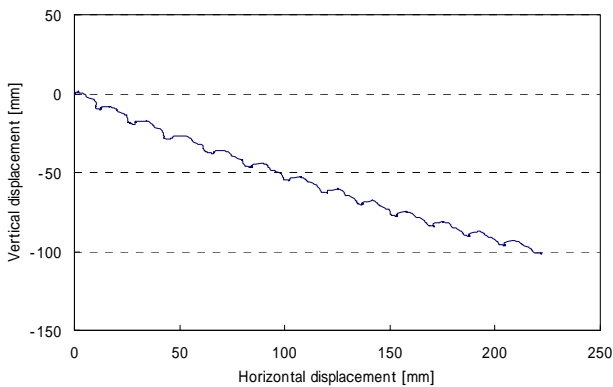


Fig.11 Results of analysis in vertical curved narrow space

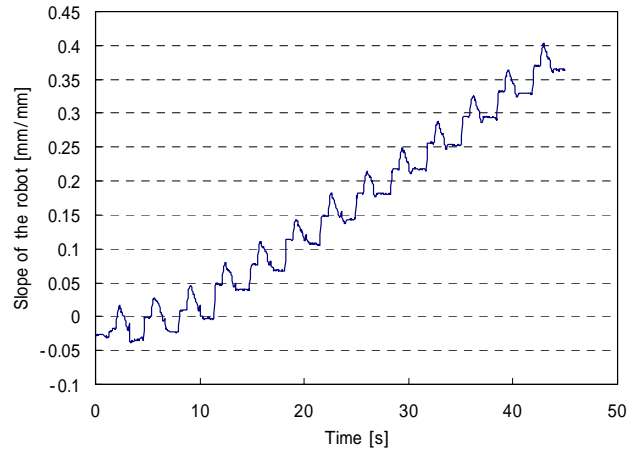


Fig.12 Results of analysis slope of the driving robot

Fig.11 より、走行はできたが、走行時にロボットの降下が見られた。降下量は進行量の約 0.5 倍となっている。この原因はロボットの撓みによるものだと考える。まず今回、カーブジョイント部を新たに取り付けたことによってロボットが以前の物よりも長く重くなり、より大きなモーメントがかかったことで、撓みが大きくなり、両端の降下量が増え、結果的にロボット全体の大きな降下へとつながった。さらに先端の降下が大きくなったことで、ロボットの先端が徐々に下方向へと向き、ロボットの姿勢も斜めになり、ロボットの進行方向も徐々に下向きになってしまった(Fig.12)。この場合、3.6 節で述べた方向転換手法を用いてロボットの姿勢を元の水平状態に戻すことは可能だが、多くの狭小空間、特に今回目標として用いた攪拌槽においては、検査中にロボットの様子を見るのが困難である。

そこで、3 軸加速度センサを取り付けることで、走行中のロボットの傾きを自動で計測し、下方向に傾いた際に自動で方向転換によってロボットの姿勢の修正を行い、進行方向を一定以上に上方向に保つことが出来ると考えた。

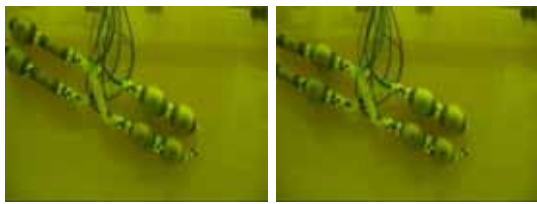
5. 傾き補正実験

前述した 3 軸加速度センサをロボットに取り付けた。このセンサは常に重力加速度方向を知ることが出来るので、ロボット自身の傾きを把握できる。これを用いて、ロボットの傾きが一定以上下方向を向いた場合に、方向転換し補正を行う。

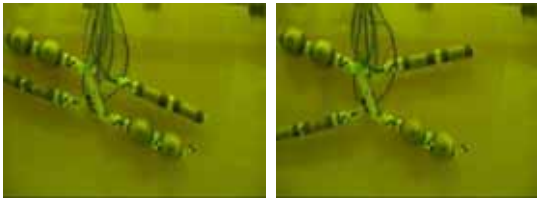
こちらの挙動を確認するために走行実験を行った。実験は、2 枚のアクリル板を用いた狭小垂直壁面空間内で行った。なお、壁面間隔は 60 [mm]となっている。実験時の様子を Fig.13 に示す。



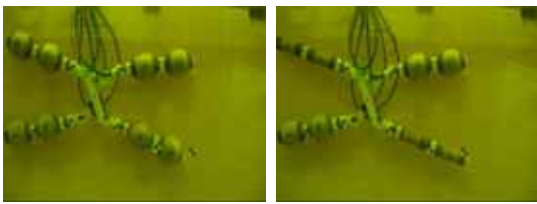
(a) Extending first units (b) Extending second units



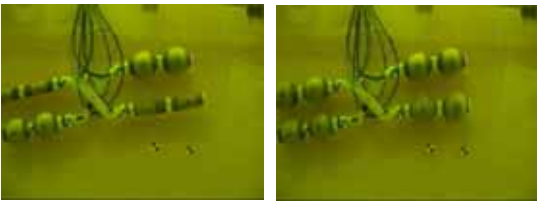
(c) Extending third units (d) Extending fourth units



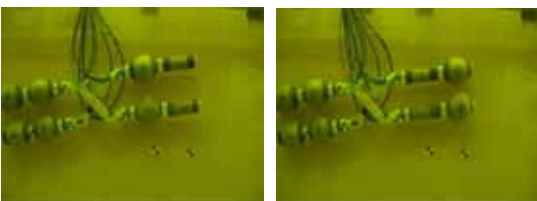
(e) Extending part-A units (f) Turning part-A



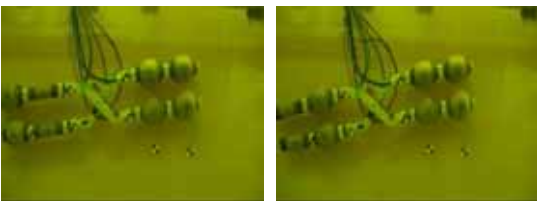
(g) Contracting all units (h) Extending part-B units



(i) Turning part-A (j) Contracting all units



(k) Extending first units (l) Extending second units



(m) Extending third units (n) Extending fourth units

Fig.13 Appearance of the correction of slope

Fig.13 (a)-(d)において、ロボットは斜め下方向に走行している。(d)にてちょうど蠕動運動の1サイクルが終了し、その後3軸加速度センサによってロボット自身の傾きを計測する。その傾きが一定以上下方向に傾いていた場合、3.6節で述べた通りの方向転換手法によってロボットの走行する方向を上方向へと修正する。その様子が Fig.13 (e)-(j)である。方向転換を終えると、Fig.13 (k)-(n)のように前進を再開し、再び

ロボットの角度が一定以上に下方向になるまで前進を続ける。

実験の結果、傾きが一定以上の場合には通常通りの走行を行い、傾きが一定よりも下がった場合に、ロボットが変形するのを確認できた。今回は傾きによる補正だけだが、今後は走行中の垂直方向の変位によっても補正を行えるようにすることで、目標への到達を可能にすると考えられる。

6. 結言

既存の狭小垂直壁面間走行用ロボットを改良し、狭小垂直曲面間を走行可能なロボットを製作した。さらに製作したロボットを用いて攪拌槽のモックアップにおける走行実験を行い、実現可能性を示した。

また、3軸加速度センサを取り付けることでロボットの傾きを計測し、走行中に補正を行えるようにした。

7. 今後の展望

3軸加速度センサを用いてロボット本体の変位を計測し、垂直方向への落ち量が一定以上になったら自動で真上方向へと移動する手法を行い、目的地への到達を目指す。

参考文献

- (1) Anna Ariga, Tsukasa Kobayashi, Tomoyuki Yamaguchi, and Shuji Hashimoto, Waseda Univ., "Wall Climbing Robot in Narrow Space with Pantograph-type Structure", Conference Publications of Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2010 IEEE International Conference on, pp.1507-1512 (December 14-18, 2010)
- (2) Taro Nakamura, Takashi Kato, Tomohide Iwanaga and Yoichi Muranaka, "Development of a Peristaltic Crawling Robot Based on Earthworm Locomotion", Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.18, No. 3, pp.299-304 (May. 2006)
- (4) Shota Horii, Taro Nakamura and Kohei Aoki, "Development of an In-Pipe Peristaltic Crawling Mobile Robot and Derivation of Theoretical Model", ROBOMECH 2010
- (5) 中里裕一, 宮内琢磨, 有賀幸則, "蠕動運動を利用した管内走行マイクロロボットの機構開発", 日本機械学科 2003年度年次大会講演論文集 (), No.03-1, pp.171-172(2003)
- (6) 大野学, 加藤重雄, "小径管内長距離走行用ミミズ型検査ロボットに関する研究 - 三体節式移動ロボットの開発とその基本性能 - ", 精密工学会誌, Vol.71, No.5, pp.606-612 (2005)
- (7) Peter E .Tenzer and Ridha Ben Mrad, "A Systematic Procedure for the Design of Piezoelectric Inchworm Precision Positioners", IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS, VOL.9, No.2