攪拌槽ジャケット内検査用空気圧式蠕動運動型ロボットの開発

Development of Peristaltic Crawling Robot using Air Pressure for Maintenance between Jacket and Shell of Mixing Tank

○学 森下 陽介 (中央大) 学 三戸 大輔 (中央大)
正 中村 太郎 (中央大)

Yosuke MORISHITA, Chuo University, y_morishita@bio.mech.chuo-u.ac.jp
Daisuke SANNOHE, Chuo University
Taro NAKAMURA, Chuo University

With the development of the industry in recent years, mixing tanks used in chemical reactions, equip "jacket" for adjusting temperature of a container on outer circumference. The heat medium or refrigerant inject to jacket, to adjust the temperature. Although a large amount of deposits are formed in the inner wall of jacket, there is no way to clean up or to inspect inside of the jacket because it's too narrow space and entrance. Therefore, we developed peristaltic crawling robot for vertical narrow space, and realized the locomotion in 50[mm] wide space. In addition to that, to achieve in locomotion between curved surfaces.

Key Words: Robot, Earthworm, Pneumatic, Artificial rubber muscle, Vertical narrow space

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。その中に、ガラスライニング攪拌槽がある。これは図 1 のように、薬品等を攪拌し混合する内容器(シェル)と、それを覆う外容器(ジャケット)の二層構造となっている。この装置で攪拌する際には、槽内の温度管理が重要であり、熱媒・冷媒を外部からシェル・ジャケット間の隙間(以後、ジャケット内部と呼ぶ)へと流入する方法で行っている。流す熱媒・冷媒は工業用水やブライン、スチームなど様々なものが使われている。

攪拌槽を使用するにつれジャケット内部は、付着物が堆積し壁面間隔が狭くなる。または逆に表面が溶出し壁面間隔が広くなることもあり、これが正常な動作の妨げとなっている。その為、ジャケット内部のメンテナンスは、機器の延命や安定した熱伝達の維持に必要不可欠である。しかしジャケット内部は、壁面間の距離が変化する狭小垂直壁面空間であり、入り口も内径 50 [mm]と狭い為、点検が困難である。

壁面間を走行するロボットの先行研究として、文献[1]のようなパンタグラフ型のホイール式ロボットがあるが、ホイール式のものには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。そこでミミズの蠕動運動をロボットに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、ジャケット内部の環境でも安定した走行ができ、なおかつ狭い入り口を通過できると考える。

そこで本研究では、ジャケット内の検査・付着物除去を目的とした、文献[2]のような人工筋肉による蠕動運動型ロボットの開発をしている。本報では、まず検査に重点を置いたロボットを開発し、ジャケット内に見立てた 50[mm]幅の垂直二平面間での走行実験、さらには垂直二曲面間での走行実験を行ったので、以下に開発したロボットとその結果について報告をする。

Fig.1 Cross-sectional view of stirred tank

2. ミミズの概要

ミミズの体は約 150 の同じ構造の体節から成り、その一つの体節を順に伸縮させることで蠕動運動を行っている。図 2 に蠕動運動によりミミズが前進する様子を示す。前進する際、ミミズはまず頭部の体節を収縮させ、順に後方の体節へとこの収縮を伝播する。この体節の収縮により地面との摩擦を発生させ、摩擦を足がかりにして前方の体節が伸び前進する。

Fig. 2 Locomotion pattern of an earthworm with peristaltic crawling

3. ロボットの概要

3.1 ロボットの構造

図 3 に今回作成したロボットの外観を示す。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ジョイント部の、2つの部分から成り立っている。本ロボットの寸法は全長 430[mm]、幅 107[mm]、高さは最大部で 35[mm]であり、重さは約 200[g]である。

Fig. 3 Developed peristaltic crawling robot

3.2 人工筋肉部の概要

3.2.1 人工筋肉の概要

ミミズの体節に相当する収縮機構には、文献[3]に記載してある、本研究室で開発した軸方向繊維強化型人工筋肉を使用している。図 4 に人工筋肉の伸長時と収縮時の外観を示す。人工筋肉の素材には天然ゴムラテックスとカーボンロービング繊維をシート状にしたものを用いており、チューブ状に形成したゴム膜内にマイクロカーボン層を内包した構造となっている。カーボン繊維に伸縮性はないが、繊維幅はゴム膜の変形に合わせて広がることのできる。その為、カーボン繊維を軸方向に沿わせることで、空気を供給した際半径方向には膨張するが、軸方向には拘束され収縮する。この収縮力と収縮量をアクチュエータとして用いている。

Fig.4 Artificial muscle

Table.1 Specification of one unit

Weight [g]		15
Length [mm]	Extension	55.0
	Contraction	41.4
Diameter [mm]	Extension	21.0
	Contraction	56.4
Response speed [sec]	Extension time	1.17
	Contraction time	1.33

(0.06[MPa])

3.2.2 人工筋部の構造

本ロボットは人工筋肉 1 ユニットをミミズの体節 1 つに見立てており、人工筋部の各脚は 2 ユニット連結してXジョイント部に接続されている。その人工筋部の内部構造を図 5 に示す。本ロボットは人工筋肉の内部に工具やカメラを通すことを想定しており、その中空部を設ける為に中心に蛇腹(ペローズ)状のチューブを使用している。このペローズチューブとゴム膜との隙間(チャンバー)に空気が供給されることでゴム膜が膨張する。

Fig.5 Mechanism of artificial muscle

3.3 ジョイント部の概要

図 6 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。

Fig.6 X joint part

3.4 移動方法

本ロボットはXジョイント部を挟み直線上に並んだ計4つのユニットによって蠕動運動を行う。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図7に示す。

Fig.7 Peristaltic crawling with artificial muscles

3.5 理論速度

ロボットの速度は、1ユニットの収縮量 r [mm]、波数 n 、波長 l 、総ユニット数 N 、送り s 、動作間周期 t [s] に依存している。ここで、波長 l は伸長しているユニット数、送り s は収縮しているユニットを何ユニットずつ後方に送るか、動作間周期 t は送りを行う時間間隔を表している。これらを用いて、ロボットが蠕動運動 1 周期で進む距離を d_B とすると、

$$d_B = rnl \quad \dots (1)$$

と表せる。また、1 周期の時間 T_B は

$$T_B = \frac{Nt}{s} \quad \dots (2)$$

となる。よって式(1)(2)より、ロボットの理論速度 v_B は、

$$v_B = \frac{d_B}{T_B} = \frac{rns l}{Nt} \quad \dots (3)$$

となる。

式(3)と表 1 より、動作パターン 1-1-1(波長 - 送り - 波の数)における理論速度は

$$v_B = \frac{rns l}{Nt} = \frac{13.6 \times 1 \times 1 \times 1}{4 \times 1.40} \approx 2.43 [\text{mm/s}]$$

と求まる。

3.6 方向転換

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図 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. 垂直二平面における走行実験

4.1 水平走行

実験に際して、壁面とアクリル板を用いて 50[mm]幅の垂直狭空間を作成しロボットに走行させた。その走行実験の様子を図 9 に示す。写真中の数字は、各フランジに付けた動画解析用の標点のうち、本実験で移動の様子を解析する為に用いた点である。解析結果を図 10 に示す。

Fig.9 Horizontal movement

(a) Horizontal movement

(b) Vertical movement

Fig.10 Results of analysis in vertical narrow space

走行実験の結果、垂直二平面間において水平方向に安定した走行ができることを確認した。各標点の挙動の解析を行ったところ、前進速度は2.53[mm/s]、降下速度は0.64[mm/s]であった。前進速度については理論速度が2.43[mm/s]であるので、ほぼ理論通りといえる。垂直方向に降下した原因については、図10(b)の拡大図を見ると周期的な波形が見られることから、人工筋が平行に取り付けられていない等の、ロボットの構造的問題が影響しているのではないかと考える。また、波形が周期的になっていない部分では、人工筋肉の膨張に伴ってアクリル板が撓み、十分な壁面の把持が出来ず滑りが生じたと考ええる。

4.2 方向転換

方向転換動作のコマ送り写真を図11に示す。図8と同様の動作を実現することが出来た。しかし、空気チューブやサーボモータの配線が回転動作の障害となり、方向転換するのに時間がかかってしまった。

Fig.11 Turning motion

5. 垂直二曲面における走行実験

実験に際して、アクリル板2枚を用いて50[mm]幅の垂直狭二曲面間を作成しロボットに走行させた。解析用の評点の番号は、垂直二平面での実験と同じである。解析結果を図12に示す。

走行実験の結果、垂直二曲面間において水平方向に安定した走行ができることを確認した。各標点の挙動の解析を行ったところ、前進速度は1.46[mm/s]、降下速度は0.40[mm/s]であった。前進速度については、二平面間に比べて大きく下がってしまった。これは、Xジョイント部が直線的な剛体であるために、曲面間を進む際の障害になったことが原因として考える。しかし、垂直方向への降下も二平面間に比べて小さくなった。これも同様に、Xジョイント部がロボットの降下を防いだものと考ええる。

(a) Horizontal movement

(b) Vertical movement

Fig.12 Results of analysis between curved surfaces

6. 結言

本研究では、攪拌槽ジャケット内の検査・洗浄を目的とした、人工筋肉による蠕動運動型ロボットを開発した。50[mm]幅の垂直二平面間・二曲面間における走行実験の結果、水平方向での安定した走行を確認した。また、X型構造とサーボモータによる方向転換方式の有効性を確認した。

今後は、エアチューブの取り回し方法の検討と速度向上を行い、実用性の向上を目指す。

文 献

- [1] Anna Ariga, Tsukasa Kobayashi, Tomoyuki Yamaguchi, and Shuji Hashimoto, "Wall Climbing Robot in Narrow Space with Pantograph-type Structure", Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2008) pp3028-3033,(2008)
- [2] Taro Nakamura, Takashi Kato, Tomohide Iwanaga and Yoichi Muranaka, "Development of a Peristaltic Crawling Robot Using Servo Motors Based on the Locomotion Mechanism of Earthworms", Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2006) pp.4342-4344,(2006)
- [3] Taro Nakamura and Hitomi Shinohara, "Position and Force Control Based on Mathematical Models of Pneumatic Artificial Muscles Reinforced by Straight Glass Fibers", Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2007) pp. 4361-4366(2007)