蠕動運動型工業用内視鏡ロボット

An In-pipe Mobile Robot for Use as an Industrial Endoscope Based on an Earthworm's Peristaltic Crawling

○学 堀井 翔太 (中央大) 学 青木 孝平 (中央大)
正 中村 太郎 (中央大)

Shota HORII, Chuo University, s_horii@bio.mech.chuo-u.ac.jp
Kohei AOKI, Chuo University
Taro NAKAMURA, Chuo University

Recently, the number of pipe accidents has been increasing. Because most of these were caused by corruptions or deteriorations, in-pipe inspections have been performed with fiber scopes to prevent such problems; however, such pipes cannot inspect in pipes over 14[m] long or in complex pipes. Therefore, in-pipe inspection robots are required for such uses. In this paper, we propose the development of the robot that mimics the peristaltic crawling of earthworms as a locomotion mechanism. In addition, we performed two experiments in a 27[mm] diameter acrylic pipe and a 28[mm] diameter aluminum pipe to examine 1) the locomotion speed of the robot and 2) the relationship between propulsive force and motion patterns.

Key Words: Robot, Earthworm, Peristaltic Crawling, In-pipe

1. 緒言

急速な技術革新による機械や工場設備のハイテク化および複雑化が進む現代社会において、不具合、ひいては異常運行へと繋がる連鎖を断ち、重大な事故を未然に防ぐ信頼性の高いメンテナンスは、社会にとって最も重要な課題のひとつとなっている。なかでもライフライン等の役割を担っている配管のメンテナンスは、配管の破裂や腐食による事故を防ぐ上で必要不可欠である。

特に、現在ガス管などの管の内部の検査に、メンテナンス機器のひとつである工業用内視鏡が多く使われており、人の目の届かない箇所を工業用内視鏡で観察し亀裂や腐食を確認している。その作業方法としては工業用内視鏡を手元から配管内に押し込んで行く。また、曲管を通過する際は内視鏡内部に通したワイヤーを引っ張ることで内視鏡先端の屈曲を操作して通過している。既存の工業用内視鏡には入り組んだ配管内の検査や、長さが14[m]程度を超える配管では使用できない欠点がある。これは、前述した状態になると工業用内視鏡が管内でたわみ、後ろからの押し込む力が前に伝わらなくなることが原因である。この様な状態になると押し込む力は工業用内視鏡のたわみをより大きくさせる方向に作用してしまう。また、ワイヤーによる屈曲の操作もワイヤーと内視鏡内部との摩擦力が大きくなるので困難になってしまう。

これらの問題は内視鏡に自走機能を搭載することで解決できると考えた。なお、先行研究として繊毛振動型¹⁾や蛇型²⁾ロボットの工業用内視鏡が研究されているが、後進出来ない、ロボットの幅に比べ間の幅が必要、などの問題がある。加えて、上記のような工業用内視鏡の問題を解決するには至っていない。

そこで本研究ではミミズの蠕動運動に着目した蠕動運動型ロボットを工業用内視鏡に応用することを考えた。

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1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。この体節の収縮で地面との摩擦を発生させ、摩擦を頼りにして前進する。

Fig. 1 Locomotion pattern of an earthworm

3. 蠕動運動型ロボット

3.1 ロボットの概要

図2に開発した蠕動運動型ロボットを示す。ロボットはミミズの複雑な構造を単純化し、ミミズの体節一つをロボットの1ユニットと見立てて設計してある。ユニット一つ一つがミミズの体節同様に伸縮運動を行うことができる。図2には大きさの比較のためにタバコを横に置いてある。ミミズ同様に管内走行ロボットもユニットを順序よく伸縮させることにより縦波後進波を発生させ、蠕動運動を行う。径の小さい管で走行できるようにマイクロモータ(Naniki SBL07-12)を使用した。

Fig. 2 The developed peristaltic crawling robot

3.2 ユニットの概要

設計したユニットの概要図を図3に、その仕様を表1にそれぞれ示す。ユニットは今回目標とした25Aのアルミ配管(内径 28.0~28.4[mm])に入る大きさにするためにマイクロモータを使用し、ネジを使って動力を伝達する構造とした。ユニットの最大外径は25Aのアルミ配管(内径 28.0~28.4[mm])内を走行することを目的としているためにベルトの変形分も考慮し、余裕を持たせて37.4[mm]確保してある。

(a) Extension

Fig. 3 Schematic view of a unit

Table. 1 Specification of a unit

Weight [g]		13.8
Length [mm]	Extension	57.3
	Contraction	44.3
Width [mm]	Extension	13.5
	Contraction	37.4

3.3 ユニットの伸張力

ギヤヘッドを取り付けモータのトルクを計測した。その結果モータのトルクは最大で0.48 [N]であった。このトルクに基づきにネジの推力を求める。推力 Q と回転方向の力 P がつり合っていると仮定し、ネジの斜面を1ピッチ分展開した図を図4に示す。

D : Effective diameter, p : Pitch, α : Lead angle
Q : Thrust force, P : Direction force

Fig. 4 Configuration of the screw in a unit

この力の関係に摩擦角 θ を考慮すると、 P と Q の関係は、

$$Q = P / \tan(\alpha + \theta) \quad (1)$$

となる⁽³⁾。ここで P をトルク T で表すと、

$$P = 2T/D \quad (2)$$

さらに使用した台形ネジの角度を β とすると摩擦角を考慮したネジの推力 Q_1' は

$$Q_1' = \frac{2T}{D \tan\{\alpha + \arctan(\frac{\mu}{\cos \beta})\}} \quad (3)$$

と求まる。ここで、それぞれのパラメータに値を代入し計算を行ったところ $Q_1' = 5.03$ [N] となった。実際に完成したユニットの力を測定したところ伸張力は 44.2 [N] と理論値に近い値となった。このことからユニットの伸張力はモータトルクから予測できる。

4. ロボットの走行実験

4.1 運動パターン

ロボットの運動パターンとしては、図5に示すように4-1-1型など様々なパターンがある。ここで波長とは伸張ユニット数、送りは波の伝播ユニット数である。

ロボットが蠕動運動をするためには波長を l 、送りを n 、波数を s 、総ユニット数を N とした時に、以下の式を満たさなければならない。

$$(l + n) \times s < N \quad (4)$$

$$N - l > s \quad (5)$$

Fig. 4 Motion pattern 4-1-1

また、これら動作を、動作中のユニットを考え、運動パターンをより滑らかに繋ぐことで速度の向上を図った中間動作を提案した。図5に中間動作を考慮した運動パターンを示す。ロボットの動作を m 個に分割するためには、以下の式(6)も満たさなければならない。また、送り n は1となる。

$$l > 2m \quad (6)$$

Fig. 5 Locomotion patterns of middle motion

4.2 理論速度

工業用内視鏡ロボットとしての目標速度は 5[mm/s]である。理論から速度を求め、目標速度を満たすユニット数と動作を検証した。

中間の動作を考えない場合の理論速度は、ユニットの膨張収縮にかかる時間を $\tau_0(t)$ 、1ユニットの収縮量を r とし、波の伝播が1周するときに前進する距離を d と置くと、

$$d = r s l \quad (7)$$

となり、1周期にかかる時間 T は

$$T = \frac{N\tau_0(t)}{n} \quad (8)$$

となる。式(4)式(5)よりロボットの理論速度 v は

$$v = \frac{d}{T} = \frac{rns l}{N\tau_0(t)} \quad (9)$$

は波の伝播が一周するときに前進する距離を d' と置くと、

$$d' = rs(l - 2 \sum_{i=1}^{m-1} i/m) \quad (10)$$

となり、1周期にかかる時間 T' は

$$T' = \frac{N\tau_0(t)}{m} \quad (11)$$

となる。式(7)式(8)よりロボットの理論速度 v' は

$$v' = \frac{d'}{T'} = \frac{ms(l - 2 \sum_{i=1}^{m-1} i/m)}{N\tau_0(t)} \quad (12)$$

となる。ここで、モータの回転速度を ω 、ネジのピッチを p とするとユニットの膨張収縮にかかる時間 $\tau_0(t)$ は

$$\tau_0(t) = \frac{r}{p\omega} \quad (13)$$

と表せ、式(6)式(9)に式(10)を代入すると

$$v = \frac{d}{T} = \frac{ns l p \omega}{N} \quad (14)$$

$$v' = \frac{d'}{T'} = \frac{ms(l - 2 \sum_{i=1}^{m-1} i/m) p \omega}{N} \quad (15)$$

となる。速度の式から1ユニットの収縮量 r を除くことができるので、収縮量の値で速度は変化しないことがわかる。このことより、モータの速度が変化しなければ、内径の多少異なる管でもほぼ同等の速度が出せることがわかる。

式(9)、式(12)を元に目標速度 5 [mm/s] を満たすユニット数を計算したところ、7 ユニットの時に目標速度を満たせることがわかった。7 ユニットの理論速度をまとめたグラフを図 6 に示す。この際に $\tau_0(t)$ は $P=2$ 、 $\omega=2.7$ [rps] から求められるが、製作したユニットの伸縮速度を計測した結果、若干伸縮速度が遅くなることがわかったので、計測値を使って $\tau_0(t)$ を算出した。この図より 7 ユニットの用いた際に、目標速度を達成可能なパターンが存在するとわかる。

Fig. 6 Theoretical velocity

4.3 走行実験

式(9)、式(12)を確認するために7ユニットから成るロボットを使用し、モーション 4-2-1 と 5-1-1(m) で、内径 27 [mm] のアクリル管内と 25A アルミ管内を走行させる実験を行った。アクリル管内の走行実験ではロボットの先頭から各ユニットの中心部に計七つの標点を付け、動画解析ソフト(NAC, movias)を用いてそれぞれのユニットの動作解析を行った。

さらに、理論と実際の動きにどのような違いが動作のどの段階で出るのかを検証するために、理論のとおり動いたときの各ユニットの位置を求めた。速度の比較を Table 2 に、実速度の比較を図 7、図 8 示す。

Table 2 experimental results

	Theoretical velocity	Acrylic pipe	Aluminum pipe
4-2-1 [mm/s]	5.4	4.1	3.8
5-1-1(m) [mm/s]	6.2	5.2	4.9

Fig. 7 Experimental result of the locomotion 4-2-1

Fig. 8 Experimental result of the locomotion 5-1-1(m3)

図7, 図8からわかるように波が頭部から順に尾部へと伝播している事が確認でき, 本ロボットが理論と同じ様に蠕動運動を行いながら管内を前進していることが確認できた。また, 理論速度を実現することはできなかったが, 5-1-1(m)の動作で目標速度の5[mm/s]をほぼ実現することが出来た。

図7, 図8からいくつかのユニットの動作時にグラフの傾きが理論と若干異なっていることがわかる。これは, 理論ではユニット単体で動かした時のデータを使っているが, 実際の動作では前後のユニットから力を受けており, その力がモータへの負荷となって回転速度が低下してしまったことが原因である。さらに, これらの理論値との誤差は, 波の伝播と共に他のユニットに伝わり, 蓄積されていくことがわかる。

5. ロボットの推進力実験

曲管を通過する際には直管の走行時と比べて多くの推進力が必要となる。既存の工業用内視鏡を手動でエルボ管(曲管)に挿入する際に必要とする推進力は約9[N]である。この9[N]を目標とし, 本ロボットの推進力を測定した。実験装置をFig. 12に示す。押し込みはモーション5-1-1(m3)で3.52[N]であった。ユニット単体の伸張力は44.2[N]であることを考えるとユニットの力を推進力として十分発揮することが出来ていない。ユニットの伸張力が推進力として伝わらないのは伸縮しているユニットが推進力を十分に支えるだけの摩擦力を出せていないためである。収縮して壁面に接地しているユニットが, 他のユニットから受ける力に負けて滑り出してしまう。そこで, エルボ管通過時には推進力を強化するモーションに切り替えることで9[N]の推進力を出せないかと考えた。動作時に収縮しているユニットの数を増やせばロボットの摩擦力が増し, 推進力を増加させることができる。モーション5-1-1(m3)で動作時に常に伸縮しているユニット数は1である。これをモーション1-1-1に変更すると常に伸縮しているユニット数は5となる。このことにより, 摩擦力を確保して推進力を出せる。動作を変えて押し込み力を測定した結果をFig. 12に示す。計測結果よりモーション1-1-1では目標の9[N]の押し込み力を達成できた。今後, ロボット先端に屈曲機構を付けて実際にエルボ管通過を目指す。

Fig. 6 experimental equipment

Fig. 13 The relationship between propulsive force and motion patterns

6. 結言

本研究ではミミズの蠕動運動に着目し, 細アルミ管内で走行可能なロボットの開発を行った。また, 動作を検討することで目標速度5[mm/s]を満たし, 推進力9[N]を実現した。今後の検討課題としてはエルボ管を通過できる屈曲機構の搭載・汚れのある管内での走行・15A(内径17[mm])で走行可能な実機の作製・防水性の検討などがある。

文 献

- [1] (2) 昆陽雅司, 畑崎計成, 伊崎和也, 田所諭, “Development of an Active Scopecamera Driven by Ciliary Vibration Mechanism”ROBOTICS Symposia 2007.3.15.16
- [2] Akira KUWADA, Kodai TSUJINO, Koichi SUZUMORI, Takefumi KAWADA (Okayama University)“Intelligent Actuators Realizing Snake-like Robot for Pipe Inspection”, Proc. IEEE 2006 International Symposium on Micro-Nano Mechatronics and Human Science, 2006-11
- [3] 三田純義, 朝比奈奎一, 黒田孝春, 山口健二, “機械設計法”コロナ社, pp.75-79.