

圧送管内における長距離検査用蠕動運動型ロボットの開発

Development of a peristaltic crawling robot for a long distance inspection inside pressure pipe

精密工学専攻 23号 田中友也
Tomoya Tanaka

1. 緒言

下水管は、都市のインフラとして、環境保全・衛生維持といった重要な役割を果たしている。しかし、近年、大都市を中心に使用年数が50年を越える老朽管が約9000kmにも達しており、年々増加の一途を辿っている。平成18年度には、全国約4000箇所道路陥没事故が報告されている⁽¹⁾。こうした下水管の老朽化による事故を未然に防ぐためには、管の状態を検査し、事前に補修の是非を検討する必要がある。

本研究では、下水管の中でも圧送管に焦点をあてて研究を行う。通常下水管は、自然流下を利用して汚水の運搬を行うが、管路を設置する環境の都合上、管内の汚水に圧力をかけて運搬する必要がある際には圧送管を用いる。圧送管を用いることで、地形による制限を受けにくく、比較的自由に管路を設定する事が可能となる。しかし、管路が複雑化する傾向があるため、現状の管内検査ロボット^{(2)~(4)}では管内深くまで入ることができず、管内の保守点検が困難となる。

そこで、細く複雑な管路内での長距離検査を可能とする手法として、狭い空間でも安定した走行が可能なミミズの蠕動運動に着目した。そして、本運動を軸方向繊維強化型人工筋肉⁽⁵⁾により再現することで、管径100A(内径108mm)の圧送管内を100m以上走行可能な蠕動運動型ロボットの開発を行う。

ここで、本ロボットで圧送管内部を検査する際には、管内を流れる汚水を一時的に止め、管内部に汚水が流れていない状態で行うことが想定される。しかし、汚水を止めることが可能な時間には制限があるため、この時間内で検査を完了させる必要がある。そこで本研究では、水平直管内においてはロボットの目標走行速度を50mm/sと設定し、この目標走行速度の達成を検討する。

2. ミミズの構造と蠕動運動

ミミズの体は、約150の同じ構造の体節からなり、その一つ一つの体節を前方から順に伸縮させることで蠕動運動を行っている。ミミズが前進する際には、まず頭部の体節を収縮させ、順に後方の体節へと伝播していく。この際に生じる、体節と地面との間での摩擦を利用することでミミズは前進することが可能となる。

3. 蠕動運動型ロボット

3.1 ロボットの概要

本研究で開発した蠕動運動型ロボットの外観をFig.1に示す。本ロボットは、7つのユニット部と6つの先頭部、検査用カメラの取り付けられた先頭部からなる。

ロボットが走行する際には、ミミズと同様に、先頭のユニットから順に伸縮させることで蠕動運動を行う。ここで、ロボットが走行する際の走行速度の算出式を式(1)に、各パラメータの値をTable1に示す。式(1)中の v は走行速度mm/s、 N はユニット数、 l は波長、 n は波数、 s は送り数、 r は収縮量mm、 t は動作間周期s、 t_1 は収縮時間s、 t_2 は伸長時間sである。

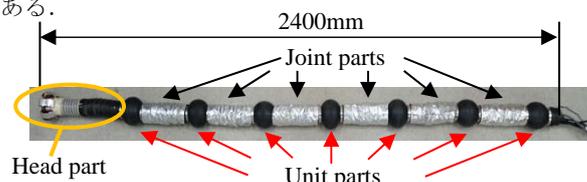


Fig. 1 Peristaltic crawling robot

$$v = \frac{r}{Nt} (lns - \frac{\sum_{k=1}^{l-1} (t_2 - kt_1)}{t_2}) \quad (1)$$

Table 1 Parameter values used in equation

N : Number of units	7
L : Wave length (Number of extending units)	5
n : Wave number	1
s : Number of propagation	1
r : Amount of contraction	24 mm
t_1 : Time of contraction	0.2 s
t_2 : Time of extension	0.83 s
t : Moving cycle	0.2 s

3.2 ユニット部の概要

ロボットに用いているユニットの仕様をTable2に、構造をFig.2に示す。本ユニットには、軸方向繊維強化型人工筋肉⁽⁵⁾を用いている。そのため、ユニットは空気の印加・排出により収縮・伸長を行う。この特性を持つユニットを用いることで、ロボットは蠕動運動を行うことが可能となる。

また、本ユニットではユニットへ空気圧の印加・排出を行う電磁弁を直接搭載している。これにより、電磁弁までは常に空気が供給されている状態となるため、ロボットが100m以上の長距離を走行する際、空気供給源であるコンプレッサーからユニットまでの空気伝達の遅れを防ぐことができ、走行速度の遅れを防ぐことも可能となる。なお、ユニット内の空気を排出する際も、搭載した電磁弁より行う(Fig.3)。

本ユニットは、人工筋肉に加え、ベローズと2つのフランジより構成されている。

Table 2 Specification of the unit

Length of unit [mm] (Band to band)	100 mm
Outside diameter (When the unit elongated)	58 mm
Outside diameter (When the unit contracted)	112 mm
Pulling force	200 N

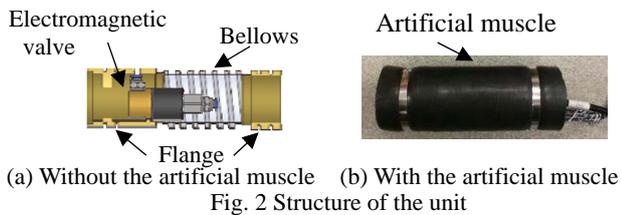


Fig. 2 Structure of the unit

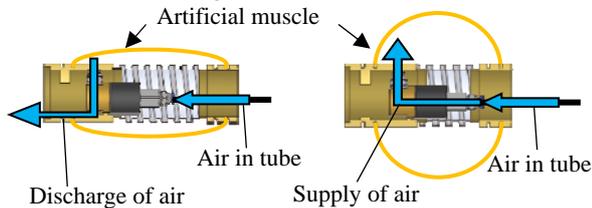


Fig. 3 Appearance of supply and discharge of air

3.3 ジョイント部の概要

これまでの研究では、6ユニットからなるロボットのジョイント部に曲がらないが縮みもしない高剛性ジョイント⁽⁶⁾を用いることで、水平直管内において算出速度および目標走行速度と近い値での走行に成功していた (Fig. 4)。しかし、高剛性ジョイントでは圧送管の管路に存在する曲管を通過することができない。そこで、曲がることが可能で、かつ縮まない多自由度関節 (Fig. 5) をジョイント部に採用したが⁽⁶⁾、多自由度関節は複数の節が連結した構造をしているため、ロボット走行時にユニットと配管との間で摩擦が生じた際には、節同士が滑ることで座屈することを確認した。これにより、ユニットの伸長量が吸収され、ロボットの走行速度低下が生じた (Fig. 6)。

そこで本研究では、座屈の軽減を目的とした新たなジョイント部 (Fig. 7) の開発を行った。本ジョイント部は、多自由度関節の周りにゴムチューブを巻きつけ、ゴムチューブおよび多自由度関節の各節の上から結束バンドによる結束を行っている。多自由度関節にゴムチューブを巻きつけることで以下の効果が得られる。

- ・多自由度関節での座屈を軽減すること
- ・多自由度関節が曲げ状態から伸長状態へと復元する際の復元力を得ること

また、結束バンドを結束することで以下の2点の向上が望める。

- ・多自由度関節の節同士での滑り摩擦を高めることでの剛性の向上
- ・ゴムチューブの長さを結束バンドから結束バンドまでと短くすることでゴムチューブの弾性力 (復元力) 向上

以上の改良を行った新ジョイント部を用いることで、ジョイント部での座屈軽減による走行速度向上が可能となり、曲管通過も可能となると考える。なお、ゴムチューブと配管との間で生じる摩擦を防ぐため、ゴムチューブの上には摩擦低減シートを巻きつけている。

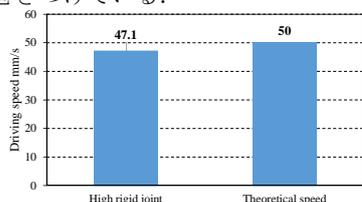


Fig. 4 Result of driving test with high rigid joint

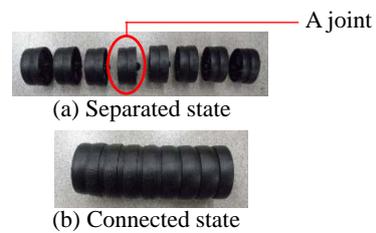


Fig. 5 Structure of the multi-degree-of-freedom joint

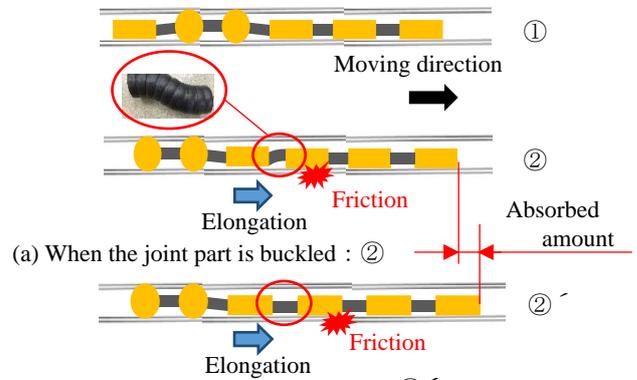
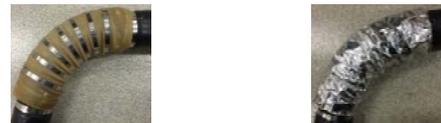


Fig. 6 Situation that the amount of elongation is absorbed by buckling



Without friction reducing sheet With friction reducing sheet (a) Stretch state



Without friction reducing sheet With friction reducing sheet (b) Bent state

Fig. 7 Structure of the new joint part

3.4 ユニット数の決定

本節では、3.3節で開発した新ジョイント部を用いた際に、水平直管内において目標走行速度である 50mm/s を達成可能とするユニット数について考えていく。

ユニット数を決定する上で、ジョイント部での座屈による走行速度への影響を測定するため、6ユニット、5ユニット、4ユニット、3ユニットから構成される各ロボットで走行実験を行い、各実験から得られた走行速度と算出速度との比較を行った。走行速度と算出速度との比較を Fig. 8 に、算出速度における走行速度の割合を Fig. 9 に示す。なお、各ロボットで走行実験を行う際には、伸長時間、収縮するユニット数および1ユニットあたりの収縮量を揃えている。

Fig. 8, Fig. 9 より、全てのロボットにおいて算出速度の 81.7% から 84.4% の間の速度で走行していることが分かる。このことから、ジョイント部での座屈量が走行速度へと与える影響は 20% 程度であり、これはユニット数およびジョイント部の数に依存しないことが分かった。そこで、Fig. 9 の結果において最も算出速度における走行速度の割合が低い3ユニット時での 81.7% (=0.817) を用いることで、目標走行速度を達成可能なユニット数の決定を行った (Fig. 10)。その結果、

ユニット数を7ユニットとすることで目標走行速度を達成可能であるということが分かった。以上より、ロボットのユニット数は7ユニットで構成することとした。

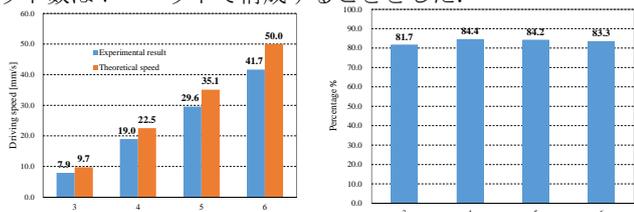


Fig. 8 Comparison with experimental result and theoretical speed

Fig. 9 Percentage of experimental result in theoretical speed

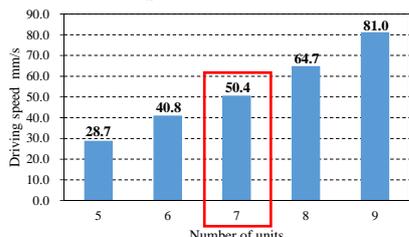
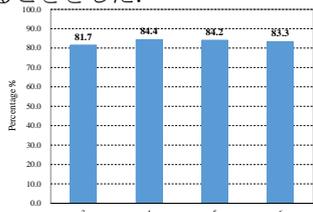


Fig. 10 Number of units which can achieve desired speed (Theoretical speed \times 0.817)

3.5 先頭部の概要

先頭部の外観を Fig. 11 に示す。先頭部には、配管内を検査するためのカメラを取り付けている。また、先頭部の円周上には6つの板ばねを設けている。これにより、カメラ位置が中心に固定され、さらに曲管の形状に沿って進むことが可能となる。

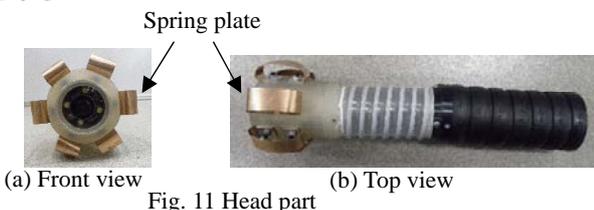


Fig. 11 Head part

4. 走行実験

開発したロボットを用いて水平直管・曲管・垂直管内での走行実験を行った。各実験では、管径 100A のアクリル管を使用している。

4.1 水平直管内での走行実験

水平直管内で走行実験を行った。Fig. 12 に実験結果を示す。

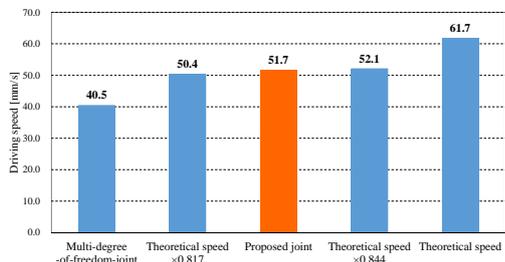


Fig. 12 Driving result in horizontal pipe with 7 units

Fig. 12 より、新しく開発したロボットを用いることで目標走行速度である 50mm/s を達成することに成功した。さらに、実験より得られた走行速度 (51.7mm/s) は、算出速度 (61.7mm/s) の 83.8% であり、これは 3.4 節で求めた、算出速度における走行速度の割合が最も低い 81.7% での走行速度

である 50.4mm/s と、割合が最も高い 84.4% での走行速度である 52.1mm/s との間に位置していることが分かる。以上より、ユニット数を7ユニットとし、新たなジョイント部を開発したことの有効性を確認できた。

また、多自由度関節のみを用いた際の走行速度 (41.5 mm/s) と比較して、新ジョイント部を用いた際の走行速度 (51.7mm/s) は大きく向上しており、ジョイント部での座屈を軽減可能であるということが分かった。このことから、新ジョイント部の有効性を確認できた。

4.2 曲管内での走行実験

圧送管の管路として想定される曲管の形状には、曲率半径の異なる「大曲管 (Fig. 13)」と「90° エルボ管 (Fig. 14)」が存在する (Table 3)。そこで本研究では、両曲管を用いて走行実験を行った。大曲管での実験結果を Fig. 15, Table 4 に、90° エルボ管での走行実験の実験結果を Fig. 16, Table 5 にそれぞれ示す。



Fig. 13 Large bend pipe Fig. 14 90° elbow pipe

	Curvature radius
Large bent pipe	180 mm
90° elbow pipe	120 mm

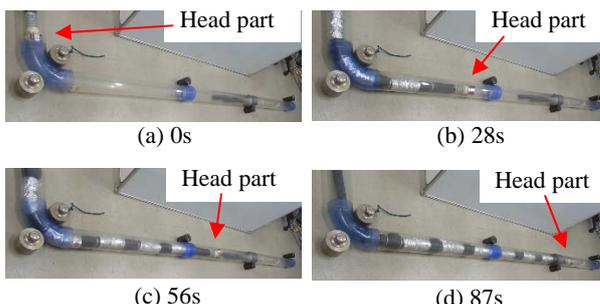


Fig. 15 Appearance of driving test in large bent pipe

Table 4 Result of driving test in large bent pipe

Robot type	Passed time
Previous robot (With multi-degree-of-freedom-joint)	94 s
New type robot (With proposed joint)	87 s

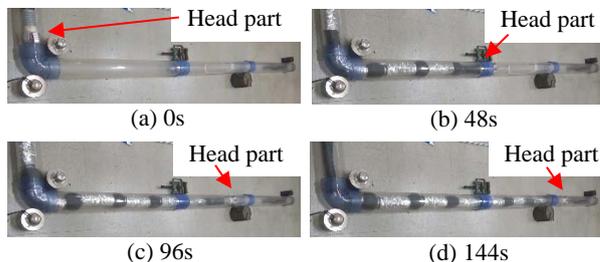


Fig. 16 Appearance of driving test in 90° elbow pipe

Table 5 Result of driving test in 90° elbow pipe

Robot type	Passed time
Previous robot (With multi-degree-of-freedom-joint)	186 s
New type robot (With proposed joint)	144 s

Fig. 15, Fig. 16 より, 新ジョイント部を用いることでも, 両曲管において走行可能であることを確認した. また, 大曲管では 87s, 90° エルボ管では 144s で通過を行っている. これらの通過時間は, 多自由度関節を用いた際の通過時間(大曲管の通過に 94s, 90° エルボ管の通過に 186s)と比較して向上していることが分かる(Table 4, Table 5). これは, ジョイント部を改良したことで座屈をし難くなり, ユニットの伸長量・伸長力がロボットの推進量・推進力へと効率的に加わったため, 通過時間を短縮できたと考える.

以上より, 曲管の走行においても, 新ジョイント部の有効性を確認できた.

4.3 垂直管内での走行実験

4.3.1 7ユニットでの走行実験

次に, 垂直管内での走行実験を行った. 実験結果を Fig. 17 に示す.

Fig. 17 より, 新ジョイント部を用いた際の走行速度 (32.5mm/s) は, 多自由度関節を用いた際の走行速度 (15.1 mm/s) の2倍以上での走行を可能としている. この結果より, 垂直管内での走行実験においても, 新ジョイント部の有効性を確認できた.

しかし, 新ジョイント部での走行速度 (32.5mm/s) と算出速度 (61.7mm/s) とを比較すると, 走行速度が低下していることが分かる. これは, 前方で伸長しているユニットの重さにより, 1. ジョイント部で座屈が生じる, 2. 後方ユニット自体がばねのように縮む, という2つの要因が生じることで, ユニットの伸長量を確実にロボットの推進量へと活かすことができていないことが原因と考える.

そこで次項では, ロボットの動作パターンを変え, 駆動するユニット数を減らすことでの走行速度の変化を, 垂直管内での走行実験を通じて確認していく.

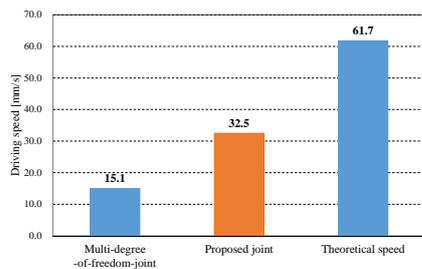


Fig. 17 Driving result in vertical pipe

4.3.2 動作パターンを変更することでの走行速度の比較

駆動するユニット数を減らすことによる走行速度の変化を, 走行実験を通じて確認した. Fig. 18 に実験結果を, Fig. 19 に算出速度における走行速度の割合を示す. なお, 各動作パターンで走行実験を行う際には, 伸長時間, 収縮するユニット数および1ユニットあたりの収縮量を揃えている.

Fig. 19 より, 駆動するユニット数が減少することで, 算出速度における走行速度の割合は向上する傾向にあることが分かる. しかし, Fig. 18 をみると, 走行速度はユニット数の減少と共に低下している. このことから, ユニットの数を減らすことで走行速度低下の要因を軽減することは可能であっ

たが, 走行速度の向上を図ることはできなかった. 以上より, 垂直管内においても7ユニットで走行を行い, 今後の長距離走行実験や実地実験を通じて, 更なる改良を図っていく.

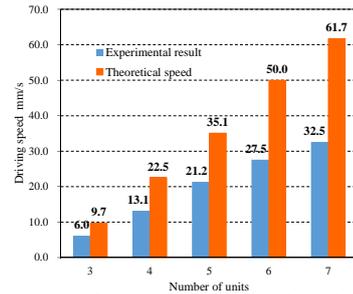


Fig. 18 Comparison with experimental result and theoretical speed

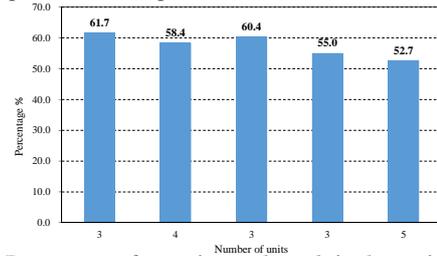


Fig. 19 Percentage of experimental result in theoretical speed

5. 結言

5.1 まとめ

ロボット走行時にジョイント部で生じる座屈を軽減可能とする新たなジョイント部の開発を行い, 水平直管・垂直管・曲管での走行実験を通じてその有用性を確認した.

新たに開発したジョイント部で, 水平直管内での目標走行速度である 50mm/s を達成可能とするユニット数の決定を行い, 目標走行速度を達成することに成功した.

5.2 今後の展望

- ・ロボットが牽引するエアチューブ等の摩擦低減方法の考案
- ・長距離走行実験の実施と実験結果からの改良点の検討
- ・実地試験を想定した環境での走行実験の実施
- ・実地実験の実施と実地実験によるロボットの改良点の検討

6. 参考文献

- (1) 内田裕和, 石井和男: 下水管調査ロボットのビジョンシステムを用いたひび割れ検出方法に関する基礎研究, Proceedings of the 2009 JSME Conference on Robotics and Mechanics, No. 09-4, (2009).
- (2) P. Li, S. Ma, B. Li, and Y. Wang : Development of an Adaptive Mobile Robot for In-pipe Inspection Task, Proc. IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, pp. 3622–3627, (2007).
- (3) T. Okada and T. Sanemori, : MOGER: A Vehicle Study and Realization for In-pipe Inspection Tasks, IEEE Journal Of Robotics And Automation, Vol. RA-3, NO. 6. December (1987).
- (4) A. H. Heidari, M. Mehrandezh, R. Paranjape, and H. Najjaran,: Dynamic Analysis and Human Analogous Control of a Pipe Crawling Robot, Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 733–740, (2009).
- (5) T. Nakamura and H. 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 , pp.4361-4366 , (2007).
- (6) T. Tanaka, K. Harigaya and T. nakamura : Development of a peristaltic crawling robot for long-distance inspection of sewer pipes, 2014 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM) , pp. 1552-1557 , (2014).