

振動推進に基づいた配管用移動ロボットの研究

Development of Mobile Robot for Pipe Based on Vibration Propulsion

○渡邊雄大*, 笹川一輝*, 村上久斗*, 堀切拓実*,
塩谷文武*, 阪本惇暉*, 阿部一樹*, 多田隈理一郎*

○Yudai Watanabe*, Kazuki Sasagawa*, Hisato Murakami*, Takumi Horikiri*,
Humitake Shioya*, Atsuki Sakamoto*, Kazuki Abe*, Riichiro Tadakuma*

*山形大学

*Yamagata University

キーワード： 配管調査 (pipe inspection), 移動ロボット (mobile robot), 繊毛 (cilia), 振動 (vibration),
ソフトロボット (soft robot)

連絡先： 〒 992-8510 山形県米沢市城南 4 丁目 3-16
山形大学 工学部 機械システム工学専攻 6-226 多田隈研究室
渡邊雄大, Tel.: (090)8056-8712, E-mail: yudai.watanabe.robotics@gmail.com

1. 緒言

現在, 水道管やガス管, 排気口など, 私たちの身の回りの至る所に配管設備が存在する。これらの配管設備は, 定期的に配管内の調査, 点検を行うことで事故を未然に防いだり, 迅速に欠陥箇所を特定, 修繕したりする必要がある。現在では, 工業用スコープカメラや超音波などを用いた管内検査方法が主流であるが, 検査可能距離が短い, 詳細な状況把握が困難であるといった問題がある。また, 配管が壁や地中に埋設されている場合は検査箇所周辺部を破壊, 配管が高所に設置されている場合は足場を設置する必要がある。また, 設置から長い年数の経過している配管のなかには配管図などのデータが存在しないものもあり, 配管設備の全体図を把握することも困難となる場合がある。以上のよ

うに, 現在の配管検査の方法は, 莫大な時間やコスト, 労働力を必要とする。

こうした問題を解決するために, これまで多くの管内探査用ロボットが開発されてきた。移動機構に関して挙げれば, もっとも典型的な移動機構である「車輪型^{1, 2)}」, や「クローラ型^{3, 4)}」, ミミズのように移動を行う「蠕動型^{5, 6)}」, 空気圧による押し出しや吸着を用いる「空気圧型^{7, 8)}」など多種多様なものが存在する。しかし, これらの移動機構の多くは機構が複雑であり, 大型であったり, コストが高かったりという問題から, ほとんど実用化には至っていない。そこで, 多田隈研究室では現在, 小型で低コストな管内探査用ロボットの開発を目指し, 振動モータと繊毛を推進機構とする, 振動推進型ロボットの研究を行っている。本研究は特に, 振動推進型ロボットの移動機構としての性能向上を

目指して研究を行っている。本稿では、更に小径の配管への対応を目指して製作した試作機と、それを用いて行った評価実験について述べる。

2. 振動推進型ロボットの概要

振動推進の概要図を Fig. 1 に示す。振動推進の原理は、ロボットに搭載した振動モータの駆動によって発生した振動を繊維毛に伝播させることで、繊維毛に微小なたわみを発生させ、繊維毛が元に戻る力を利用して推進力を得るというものである。ここで、振動モータとは、一般的に DC モータの軸に偏心重りを取り付けたものを指し、偏心重りを回転させることでモータ自身の重心を高周波で動かし、振動を発生させる機器である。

Fig. 2 に示すように節の背面側から見たとき、(a) のようにモータを反時計回りに回転させることでその反力として繊維毛先端と床面の接触部には時計回りの力が発生し、(b) のようにモータを時計回りに回転させると同様に反時計回りの力が繊維毛先端と床面の接触部に発生する。この現象により、ロボットは平面上であれば右左折を、配管内であれば旋回を行うことができる。

振動推進型ロボットの特徴として、以下の2点を挙げることができ、管内探索ロボットの移動機構として有利であると言える。

- 1) 機構がシンプルであり、小型化及び低コスト化が容易である。
- 2) 推進源である振動モータを密閉することで、気密性を高め、高い防水性及び防塵性を確保することができる。

3. 現行試作機の製作

今回新たに製作した振動推進型ロボットの現行試作機について、その紹介と過去の試作機からの改良点について述べる

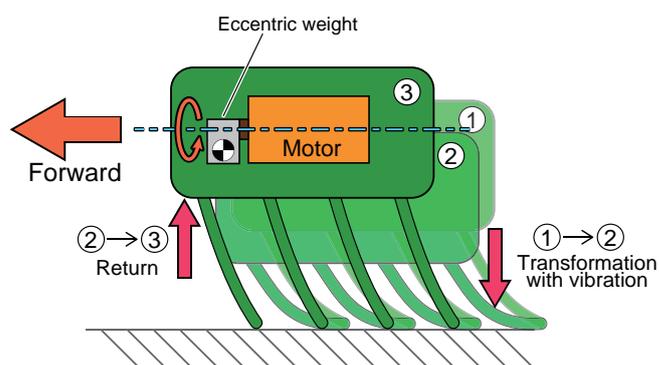


Fig. 1 Schematic diagram of the vibration propulsion.

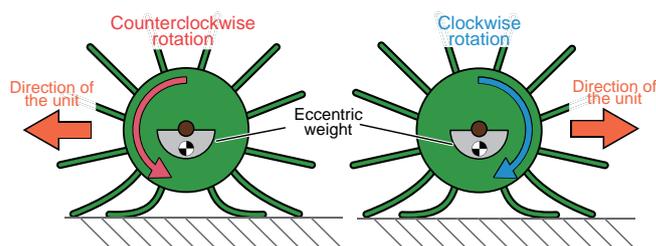


Fig. 2 Relation between direction of the motor's rotation and direction of the unit.

3.1 中期試作機からの改良点

3.1.1 小型化における改良点

過去に製作した試作機に関して、Fig. 3 に初期試作機を、Fig. 4 に中期試作機を示す。初期試作機と中期試作機の対応配管径はそれぞれ、硬質ポリ塩化ビニル管 VU100(外径 114 mm, 厚さ 3.1 mm), 同管 VP30(外径 38 mm, 厚さ 3.1 mm) であり、初期試作機から中期試作機において小型化を実現している。本研究室の振動推進型ロボットの基本形状は Fig. 3, Fig. 4 に示すように、内蔵した振動モータと外皮部の繊維毛により推進力を生み出すボディと、ボディ同士を繋ぐジョイントから構成される。将来的には管内探索を目的にセンサやカメラなどをロボットに搭載することを想定しており、各節への積載物の分散配置を考慮して複数節での設計を行っている。

振動推進型ロボットの小型化において最も困難なことのひとつとして、配管の直角曲がり部、

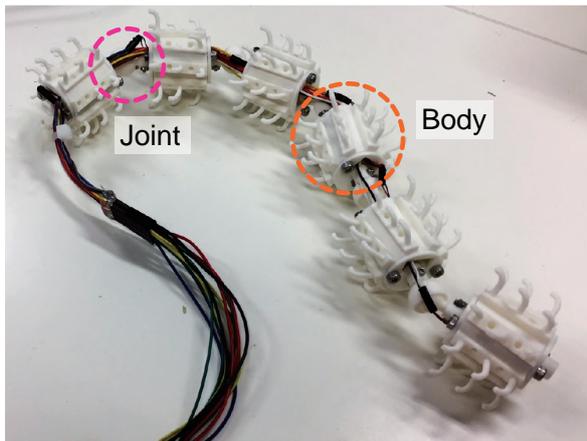


Fig. 3 Overall view of initial prototype.

エルボ部の通過を可能にすることが挙げられる。Fig. 5にエルボ部の概略図を、規格をTable 1に示す。ロボットのボディは振動モーターが内蔵されている構造上、ジョイントの様に柔軟に曲げることが困難である。このため、Fig. 5に示すような形状のエルボ部を通過するためには、ロボットの外径だけでなく、長さ方向の小型化も必要となる。

この問題を解決するために、現行試作機では、使用する振動モーターのタイプの変更を行った。Fig. 6に中期試作機、現行試作機に使用したモーターの概観を示す。また、Table 2に中期試作機用の、Table 3に現行試作機用のモーターの仕様を示す。従来の試作機では、すべて中期試作機同様にシリンダ型の振動モーターを使用していたが、現行試作機ではコイン型の振動モーターを採用した。コイン型は、シリンダー型に比べて外径が大きくなってしまいうというデメリットがあるが、長さ方向の寸法が小さいというメリットがある。加えて、シリンダ型モーターでは回転する偏心重りとロボットのパーツとの干渉に注意しながら設計を行う必要があるのに対し、コイン型は、偏心重りが内部に格納されているため、ロボットへの固定が容易であるというメリットもある。以上のことより、現行試作機では、ロボットのボディ長さの小型化を目的に、コイン型の振動モーターを用いることとした。

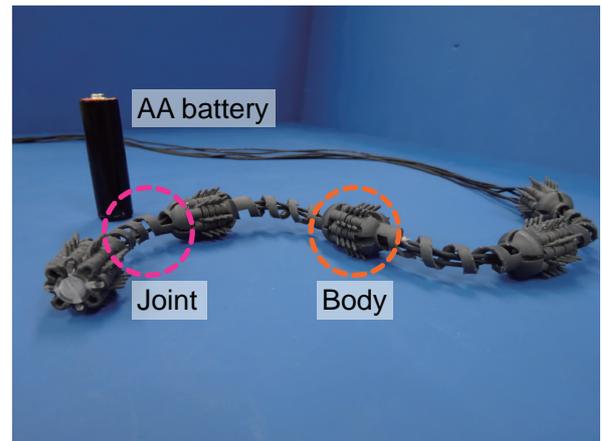


Fig. 4 Overall view of intermediate prototype.

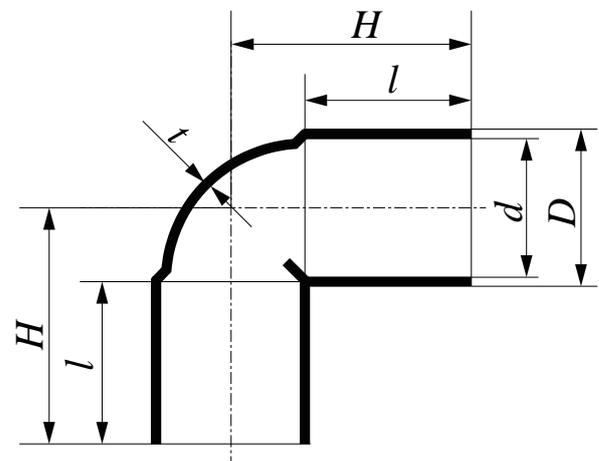


Fig. 5 Schematic view of pipe elbow.

Nominal diameter	13	20	30
D [mm]	24.0	33.0	46.0
H [mm]	36	50	65
d [mm]	18.40	26.45	38.60
l [mm]	26.0	35.0	44.0
t [mm]	3.0	3.5	4.0

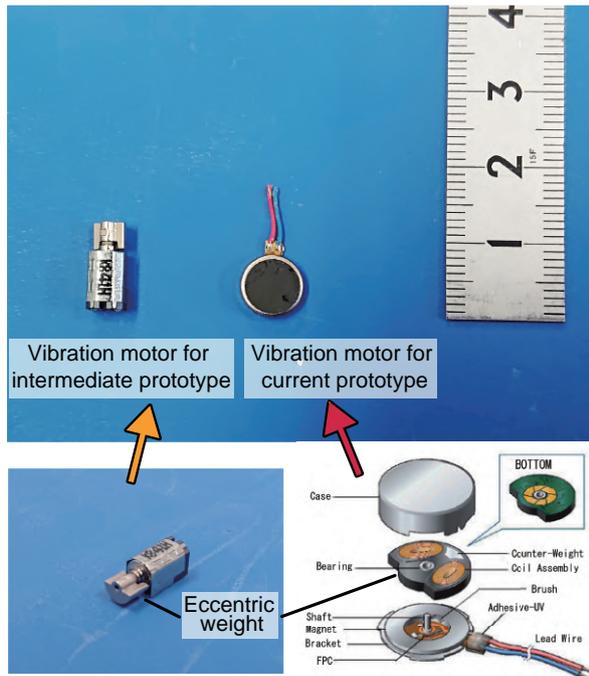


Fig. 6 Overall view of vibration motors for prototypes.

Table 2 Specifications of the vibration motor for intermediate prototype.

Model number	Z4FC1B1301781
Weight [g]	1.1
Outer diameter [mm]	Φ 4.5
Length [mm]	10.9
Operating voltage range [V]	2.6 - 3.6
Rated voltage [V]	3.0
Rated current [mA]	110
Number of rotations [rpm]	10000 \pm 2500

Table 3 Specifications of the vibration motor for current prototype.

Model number	C0820B006F
Weight [g]	0.6
Outer diameter [mm]	Φ 8.0
Length [mm]	2.3
Operating voltage range [V]	2.7 - 3.3
Rated voltage [V]	3.0
Rated current [mA]	120
Number of rotations [rpm]	10000

3.1.2 推進力向上における改良点

先述した通り、振動推進型ロボットは振動モータと繊毛を推進原理としており、ロボットの推進力を決定づける大きな要因となる。特に繊毛の形状に関しては、本研究室では Fig. 7 に示すように繊毛の各部の寸法や繊毛の本数を定義し、これらをまとめて繊毛パラメータと呼称している。繊毛の各部の寸法に関して、それぞれ繊毛の傾き角度を繊毛角度、長さを繊毛長、直径を繊毛径と呼称する。また繊毛の本数に関して、ロボットを正面から見た際の外周1周分の繊毛本数を列数、1列当たりの繊毛本数を行数と呼称する。すなわち、Fig. 7 の場合には3行8列の繊毛を持つロボットと定義することができる。

過去の実験において、繊毛パラメータを変化させた複数の試作機に対して推進力を測定し、繊毛パラメータと推進力の相関関係について調査を行い、繊毛長と繊毛本数の増加に伴い、推進力が増加するという結果が得られている。この結果を用いて、現行試作機では、ロボットの推進力向上を目的に、大きな繊毛長の確保と、繊毛の増設を目指すこととした。

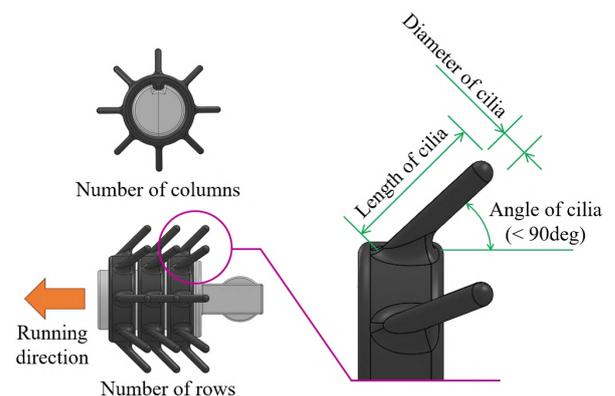


Fig. 7 Definition of cilia parameters.

3.2 現行試作機仕様

中期試作機と現行試作機の概観を Fig. 8 に示す。また、Table 4 に中期試作機の仕様を、Table 5 に現行試作機の仕様を示す。現行試作機では、中期試作機からボディ長さの大幅な小型化を実現し、硬質ポリ塩化ビニル管 VP20(外径 26 mm, 厚さ 3.1 mm) においてエルボ部の通過及び垂直上昇が可能であることを確認した。同配管における平均走行速度は、水平管内であれば 59.5 mm/s , 垂直管内であれば 28.5 mm/s である。コイン型モータは、シリンダー型モータと比較して外径が大きいという問題があったが、現行試作機のボディ部の形状により、ボディ外径に関しても中期試作機から小型化することができた。

現行試作機の分解図を Fig. 9 に示す。現行試作機の大きな特徴として、ボディに設置したボディ部繊維毛に加え、ジョイントにジョイント部繊維毛を追加したことが挙げられる。エルボ部通過のためのボディ長さの小型化に伴い、ボディに配す事のできる繊維毛がこれまでの試作機と比較して、現行試作機では大きく減少させる必要があった。繊維毛本数の減少はロボットの推進力の低下を引き起こすため、この対策として、ジョイント部にも繊維毛を配すことで、推進力の向上を図った。ジョイントの両端は前後のボディと接続するため、ジョイントにも振動が伝播し、その振動を利用することでジョイント部繊維毛も変形し推進力を生み出すと想定して設計を行った。ジョイントとして変形可能な柔軟性と、振動を伝播する為のある程度の剛性を併せ持つように形状や素材について検討を行った。また、ボディ部繊維毛、ジョイント部繊維毛共に十分に大きい繊維毛長を確保できるように各部の設計を行っている。

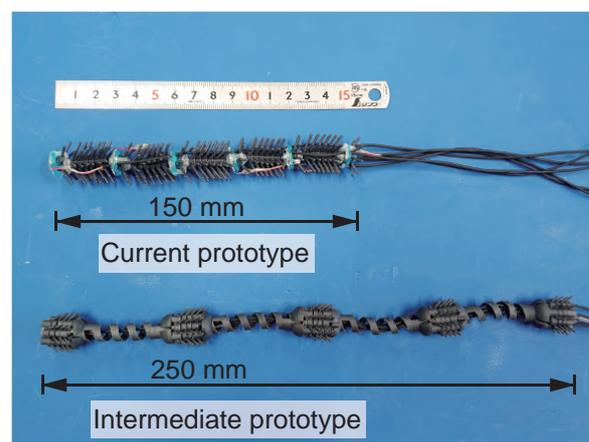


Fig. 8 Overview of the intermediate and current prototypes.

Table 4 Specifications of intermediate prototype(5 units).

Passable pipe diameter [mm]	$\phi 30$
Length [mm]	250
Weight [g]	$\Phi 21.8$
Length of body [mm]	27.4
Outer diameter(excluding cilia) [mm]	$\phi 14.7$
Outer diameter(including cilia) [mm]	$\phi 18.0$

Table 5 Specifications of current prototype(6 units).

Passable pipe diameter [mm]	$\phi 20$
Length [mm]	150
Weight [g]	$\Phi 12.1$
Length of body [mm]	9.3
Outer diameter(excluding cilia) [mm]	$\phi 13.8$
Outer diameter(including cilia) [mm]	$\phi 21.0$

4. 推進力測定実験

現行試作機において、推進力の向上を目的に行なった、繊維毛本数の増設の有効性について調査を行うために、推進力測定実験を行った。併せて、ボディの数、すなわち節数を変化させた推進力測定実験も併せて行い、振動推進型ロボットにおける多節構造の有効性についても調査を行う。

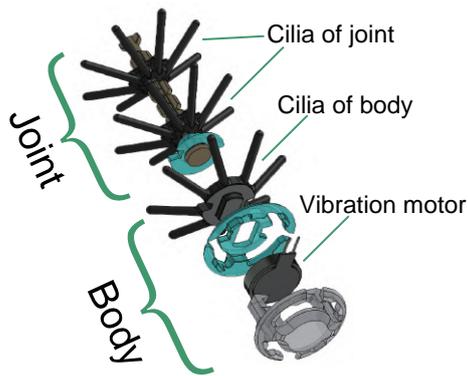


Fig. 9 Exploded view of the current prototype.

4.1 実験方法

Fig. 10に本実験で変化させるパラメータを示す。節数とは接続するボディの個数であり、すなわちロボットに内蔵された振動モータの個数と同義となる。列数とは正面から見た繊毛の本数であり、すなわちボディ部繊毛とジョイント部繊毛1パーツ当たりの繊毛本数を示す。行数とはジョイントにおける1列当たりの繊毛の本数であり、すなわちジョイントに搭載するジョイント部繊毛の個数を示し、行数に応じてジョイントの長さも変化する。実験では、Fig. 10に示した4節、8列、6行の現行試作機を基準とし、各パラメータを変化させ、推進力を測定する。

Fig. 11に実験装置を示す。現行試作機を硬質ポリ塩化ビニル管VP20内で駆動し、現行試作機の後部に繋げたフォースゲージ(FGPX-0.5, 日本電産シンボ株式会社)を用いて推進力を測定した。フォースゲージと現行試作機後部はFig.12に示すように取り付けた。取付部品はケブラーワイヤとゴムを使用している。振動推進型ロボットは振動を推進原理としているため、振動に併せて断続的に推進力を発生させる。そのため、測定される推進力にはばらつきが生じ、一際大きな衝撃力が発生することもある。この衝撃力の観測を抑制するため、現行試作機とフォースゲージの間にゴムを挟み、緩衝材として使用している。

推進力は、専用のソフトを用いて連続データとしてExcelへの取り込みを行った。取り込み周波数を100 Hzとして、一回の測定で10秒間のサンプリングを行う。1種類の測定対象に対して10回の測定を行うため、合計で10000個のサンプルが生成される。

測定した推進力は、各回の測定の上位10個のサンプル、すなわち10回の測定における合計100個のサンプルの平均を用いた。先述した通り、振動推進において観測される推進力にはばらつきがあり、本実験において各パラメータを変化させて測定を行う場合には、測定対象によりサンプルの分布も異なる。そのため、平均値や中央値での評価は、各パラメータ変化と推進力変化の相関関係を調査するという本実験の目的の達成には不適であると考えられる。以上より、推進力の評価基準として、最上位のサンプル群を用いることが適切であるとした。

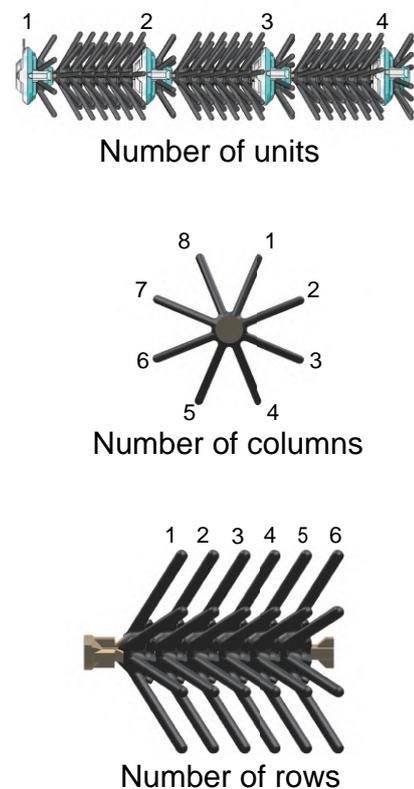


Fig. 10 Parameters to be varied in the experiment.

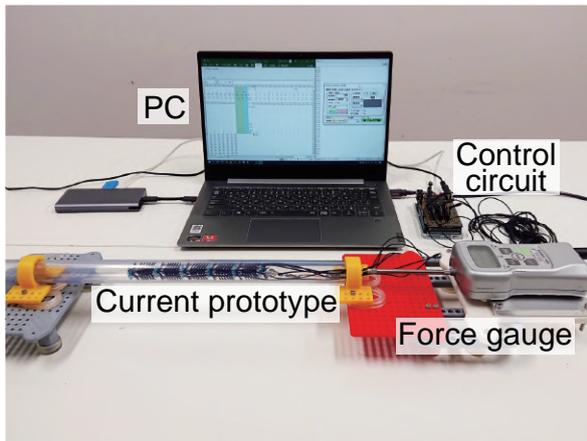


Fig. 11 Experimental setup for the driving force measurement.

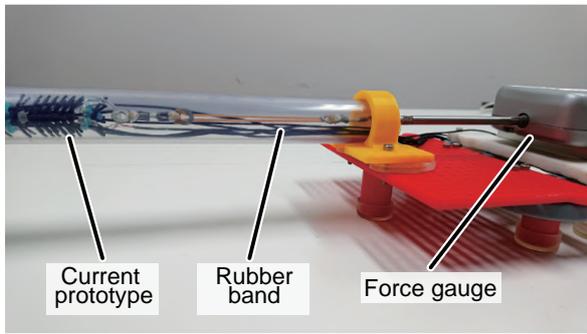


Fig. 12 Enlarged view of the connection between the force gauge and the current prototype.

4.2 実験結果及び考察

Fig. 13 から Fig. 16 に実験結果を示す。ただし、列数変化に関しては繊維形状の一部変更を行い追加実験を行ったため、節数変化、行数変化と同様の繊維形状にて行った実験結果を Fig. 14 に、追加実験の結果を Fig. 15 に示す。

Fig. 13 より、節数とともに推進力が増加していることが確認できる。これは、節数の増加により、振動モータ、繊維数ともに増加したためであると考えられる。推進力増加の観点から見た場合には、エルボ部の通過が容易になる、積載物の搭載が可能になるなどのメリットが挙げられる。しかし、現行試作機のサイズでは十分な電力容量の電池の搭載が困難であるため振

動モータへの電力供給は有線ケーブルを用いて行っており、節数の増加は有線ケーブルの増加へと直結する。有線ケーブルの摩擦や重量によるロボットへの負担、有線ケーブルの断線の危険性などの観点から、過剰な節数の増加は好ましくない。そのため、節数の増加は推進力増加においては有効であるが、実際の運用を想定した場合には、過剰な節数の増加は不要であると考えられる。

Fig. 14 より、列数とともに推進力が増加していることが確認できる。この結果より、繊維の増設が推進力の向上に有効であることが確認できた。ここで、現行試作機の構造上、8列以上の繊維の成形は不可能であるが、8列以上の推進力変化についても調査が必要であると考え、繊維形状の設計変更を行い、追加実験を行った。

Fig. 15 に結果を示す列数変化追加実験では、ジョイント部繊維の繊維径を $\phi 1.1$ mm から $\phi 0.9$ mm に変更したものをを用いた。また、ジョイント部繊維の列数に因らず、ボディ部繊維は常に8列のものを使用した。実験結果より、4列から8列までは Fig. 14 と同様に推進力が増加するが、8列以降は推進力が低下することが確認された。これは、列数の増加により繊維同士の間隔が減少することで、繊維が変形する際にお互いが干渉し、十分に変形できずに元の形状に戻るといった事態が発生するためであると考えられる。

Fig. 16 より、4行から6行の間は推進力は増加し、それ以降は減少する事が確認できる。列数と同様に、一定の繊維本数までは推進力向上に繊維の増設が寄与することが確認できた。6行以降で推進力が減少した原因として、ジョイント長さの増加が挙げられる。ジョイントへの振動伝播は両端のボディから行われるため、ジョイント中心部付近はボディから離れていることにより振動が減衰する。列数とともにジョイント長さが増加すると、ジョイント中心部付近の繊維に十分な振動が伝わらず、推進力を阻害する摩擦力が発生するために、6行目以降は急激

に推進力が減少したと考えられる。

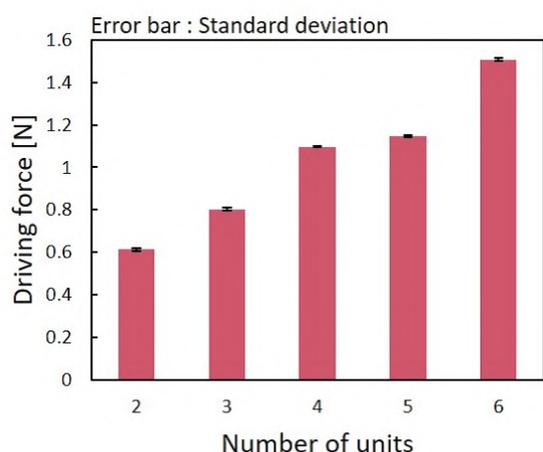


Fig. 13 Result of change in the number of units.

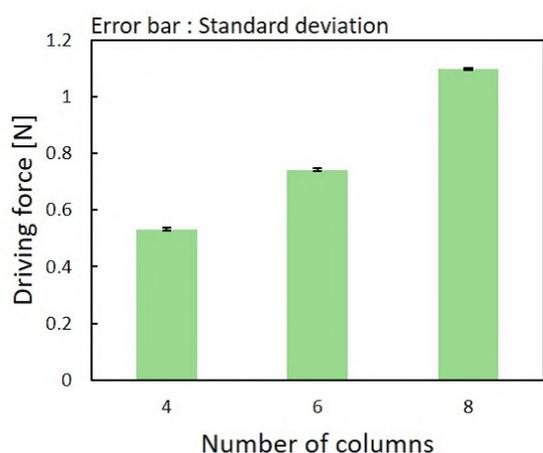


Fig. 14 Result of change in the number of columns.

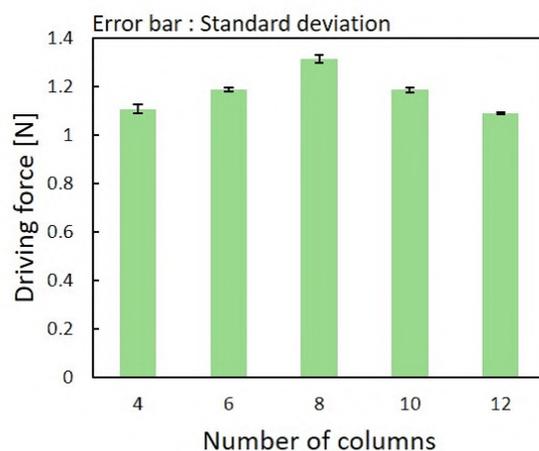


Fig. 15 Result of change in the number of columns (Additional measurements).

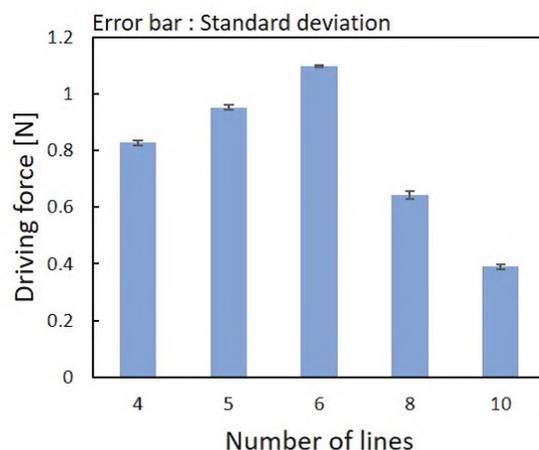


Fig. 16 Result of change in the number of lines.

5. 結言

本稿では、過去の実験データを基に開発した、呼び径 20 mm 配管に対応可能な現行試作機について述べた。また、現行試作機を用いて推進力測定実験を行い、複数節のロボットにおける節数や繊毛本数と推進力との関係について調査を行った。現行試作機の設計コンセプトの一つである、繊毛の増設による推進力の向上は、ある一定値までの繊毛本数の増加は推進力に寄与するが、過剰な繊毛本数は推進力減少の原因になることが確認できた。

今後は、現在研究している繊毛移動のモデル化による繊毛形状最適化システムに、現行試作機より得られたデータを反映してより実用的なものとするのに加え、最終目標である、呼び径 13 mm 配管に対応可能な試作機の製作を目指す。

参考文献

- 1) M. Mori and S. Hirose: Locomotion of 3d snake-like robots—shifting and rolling control of active cord mechanism acm-r3-, Journal of Robotics and Mechatronics, **vol. 18** no. 5, 521/528 (2006)
- 2) 藤原茂, 金原了二, 岡田徳次, 実森毅: 分節型主要配管内検査点検ロボットの開発, 日本ロボット学会誌, **vol. 12** no. 2, 318/327 (1994)
- 3) 永瀬純也, 重本佳孝: 管内走行を目的とした円筒状湾曲型弾性クローラの開発, 日本ロボット学会誌, **vol. 33** no. 1, 55/62 (2015)
- 4) 衣笠哲也, 大谷勇太, 土師貴史, 吉田浩治, 大須賀公一, 天野久徳: 柔軟全周囲クローラ (fmt), 日本ロボット学会誌, **vol. 27** no. 1, 107/114 (2009)
- 5) 中村太郎: 生物・生体の機能を規範としたソフトロボティクス, システム／制御／情報, **vol. 61** no. 7, 265/270 (2017)
- 6) 嵯峨宣彦, 上田晋也, 中村太郎: 人工筋アクチュエータを用いた蠕動運動型ロボットの開発, 計測自動制御学会論文集, **vol. 41** no. 12, 1013/1018 (2005)
- 7) 勝又大介, 大野学: イモムシを模倣した空気圧駆動式管内走行ロボット, 精密工学会誌, **vol. 79** no. 9, 873/878 (2013)
- 8) 則次俊郎, 久保田充彦: 空気圧ソフトアクチュエータを用いた管内移動ロボットの開発, 日本ロボット学会誌, **vol. 18** no. 6, 831/838 (2000)
- 9) 瀬口昌俊: 狭隘空間探査用索状移動ロボットの研究, 29, 山形大学大学院理工学研究科博士前期課程 修士学位論文 (2018)