

## 狭隘空間を探索する索状移動ロボットの研究

### Study on a cord-shaped mobile robot to explore narrow space

○瀬口昌俊\*, 木村遥輔\*, 工藤弘瀬\*,  
藤本敏彰\*\*, 多田隈建二郎\*\*, 多田隈理一郎\*

○Masatoshi Seguchi\*, Yohsuke Kimura\*, Hirose Kudo\*,  
Toshiaki Fujimoto\*\*, Kenjiro Tadakuma\*\*, Riichiro Tadakuma\*

\*山形大学, \*\*東北大学

\*Yamagata University, \*\*Tohoku University

キーワード： 管内探査 (Pipe inside exploration), 可視化 (Visualization), 偏心モータ (Eccentric motor),  
繊毛 (Cilia), 3D プリンタ (3D printer)

連絡先： 〒 992-8510 山形県米沢市城南 4-3-16

山形大学大学院 理工学研究科 機械システム工学専攻 多田隈研究室

瀬口昌俊, Tel.: (0238)26-3893, Fax.: (0238)26-3205, E-mail: tca45136@st.yamagata-u.ac.jp

## 1. 緒言

生活空間や工場に水道管やガス管など多くの配管が存在し、それらは地中や高所などの人間が近づけない所に設置されている。そして、管の内径が 100mm 未満のものも数多くある。近年では、そのような古い配管内を探索することで老朽化した箇所を把握し、修繕することが必要になっている。1) また、古い配管はその設計図面が現存していないことが多く、配管がどのように張り巡らされているのか不明である。そこで、管内探査が容易にできるような安価なロボットの開発が急務である。

実際に現在まで、多くの管内探査が可能なロボットが開発されてきた。しかし、それらは機構が複雑で小型化が難しく、高価なものが多数を占め、実際の管内検査の現場に広く普及したロボットは少ない。現在では工業用スコープカ

メラでの管内検査が主流であるが、時間・コスト・労働力が必要であること、垂直な箇所やエルボが存在する配管の検査が困難であること<sup>2)</sup>など、克服すべき課題が多くある。このような背景から、機構を単純化し低コストな管内探査ロボットの開発が必要である。

本研究の目的として、まず、偏心モータと繊毛を推進機構とする索状の管内探査ロボットを製作する。最終的には、そのロボットによって建物内の配管がどのように配置されているのか特定し、立体的な地図情報を作成し可視化する。そのため、ロボットは、管内に存在すると考えられる汚れや錆の塊に対応する必要がある。また、管内から外へ戻ることができなくなったことを考慮しロボットの回収を容易にするため、ロボットの外径は管の内径よりも十分に小さくしなければならない。想定する管の内径は、50mm～300mm 程度である。場合によっては、探査して

いる場所にしばらくの間残しておくことも考えられる。以上のことから、軽量で安価な管内探索ロボットの製作を目指している。

## 2. 偏心モータと繊毛を用いた推進機構について

Fig.1 に節の中の重心の位置と進行方向の関係を示す。偏心モータとは、DC モータの軸に偏心おもりを取り付けたもので、回転させるとモータ自身が振動するようになっている。このモータは主にタッチパネルを搭載した携帯型電子機器や車載用電子機器などで採用されており、ロボットの中に組み込むことで単位節全体に振動を伝えることができる。ここで、ロボットの単位節の中で偏心おもりのある位置が前に寄っている場合、節全体の重心も前方向に寄り、節の進行方向は「前」になる。この状態で偏心モータを回転させるとロボットに取り付けられた繊毛に微小なたわみを与え、床面からの反作用を受けて前進するようになっている。

また、Fig.2 にモータの回転方向及び繊毛の向きと進行方向の関係を示す。このロボットは、奇数節と偶数節で繊毛を取り付ける向きを変えている。ロボットの背面から見て Fig.2 の (1) のように繊毛が取り付けられているとき、モータが反時計回りに回転すると節は左方向に力を出す。また、Fig.2 の (2) のように繊毛が取り付けられているとき、モータが時計回りに回転すると節は右方向に力を出す。これらの節を交互に組み合わせることでロボット全体は真っ直ぐに進むことができる。それを表す模式図を Fig.3 に示す。

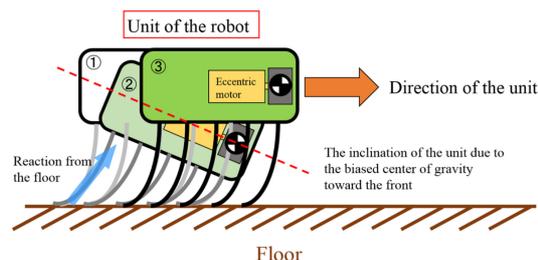


Fig. 1 Relation between the position of the center of gravity in the unit and the motion direction

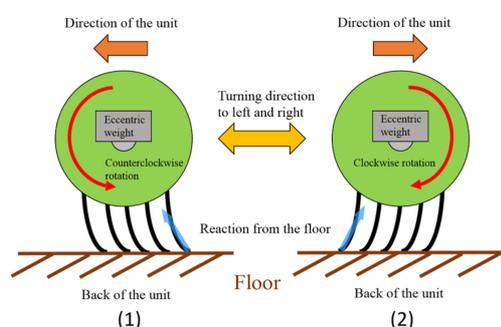


Fig. 2 Relation of direction of the motor's rotation, inclination angle of the cilia, and motion direction of the robot

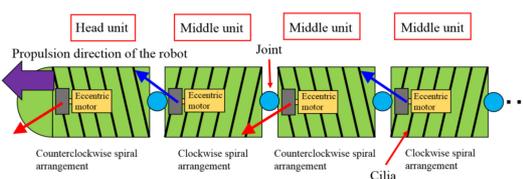


Fig. 3 Method of propulsion of the whole body of the robot

## 3. 現在までに試作したモデル

### 3.1 一次モデル

Fig.4 に試作した一次モデルを示す。ボディは 3D プリンタで製作し、繊毛は針金入りの「ねじ

りっこ」と呼ばれるバインダーを使用した。4節を連結して基礎的な走行実験を行った結果、繊毛の傾きの方向と、モータの正転・逆転の回転方向の組み合わせにより、前方向に直進することが可能であった。

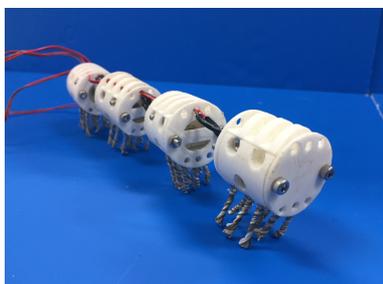


Fig. 4 First prototype of the robot

### 3.2 二次モデル

Fig.5に試作した二次モデルを示す。ボディは3Dプリンタで製作し、繊毛は軟らかい樹脂を用いて3Dプリンタで造形したものを使用した。節の接続部にはユニバーサルジョイントを使用した。4節を連結して基礎的な走行実験を行った結果、一次モデルと同様の結果が得られた。繊毛が軟らかいため、走行時の騒音が軽減された。

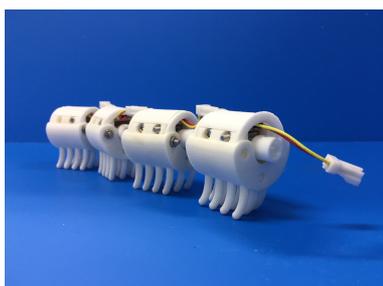


Fig. 5 Second prototype of the robot

### 3.3 三次モデル

Fig.6に試作した三次モデルを示す。ボディと繊毛は3Dプリンタで製作し、繊毛はボディの穴に直接取り付けられるようにした。また、ボディ表面を覆うように繊毛を取り付けた。節の接続

部にはボールジョイントを使用し、接続部をよりフレキシブルにした。6節を連結して基礎的な走行実験を行った結果、一次・二次モデルと同様の結果が得られた。しかしながら、一部の繊毛が折れてしまう問題が発生した。これは、繊毛を硬い樹脂で細く製作したためである。

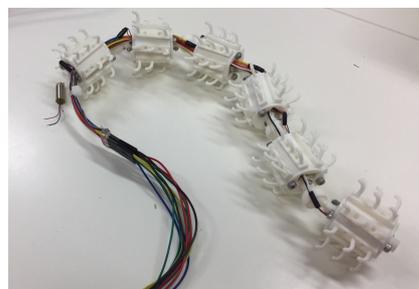


Fig. 6 Third prototype of the robot

#### 3.3.1 管内走行実験

三次モデルでは基礎的な走行実験と併せて、透明なビニル管の中を走行させた。Fig.7に実験装置を示す。また、走行させた管のパターンを以下に示す。

- 1) 水平な管
- 2) 角度  $15^\circ$  の下向きの管
- 3) 角度  $10^\circ$  の上向きの管
- 4) 直角のカーブが連続する管

また、それぞれのパターンにおいてロボットの平均移動速度を算出した。



Fig. 7 Experimental setup

### 3.3.2 実験結果

Table 1 に実験結果を示す。

水平な管を走行させたとき、推力は弱い而走破可能であった。平均移動速度は 28mm/s となった。

角度 15° の下向きの管を走行させたとき、水平な管のときよりも速く走破可能であった。平均移動速度は 38mm/s となった。

角度 10° の上向きの管を走行させたとき、本来の進行方向とは逆に進んでしまい、走破不可能であった。原因として、斜面の角度に対して推力が足りないからだと思われる。また、繊維の材質が硬く摩擦の小さいものであることも考えられる。進行方向とは逆に進んだため、進行方向への平均移動速度は求められなかった。

直角なカーブが連続する管を走行させたとき、カーブ内側の微小段差でつまずき引っかかってしまった。また、その部分を先頭節が走破できても中間節が引っかかってしまった。よって、途中で止まってしまい走破不可能であった。原因として、推力の他に繊維の材質・形状・長さが原因だと考えられる。材質は軟らかいもの、形状は現状よりも細いもの、長さはより短いものが良いと思われる。平均移動速度は 15mm/s となった。

Table 1 Experiment results

Pipe pattern	Running or not	Moving velocity
Horizontal pipe	○	28[mm/s]
15° downward pipe	○	38[mm/s]
15° upward pipe	×*	-
Right-angled pipe	△†	15[mm/s]

## 4. 1次元ジャミング転移機構

本研究では、偏心モータによって繊維を振動させる推進方式以外にも、車輪などを用いた推進方式についても並行して進めている。その1

つである1次元ジャミング転移機構を用いた推進方式について説明する。

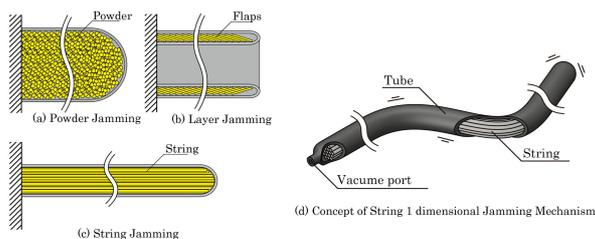
ジャミング転移現象は可変剛性を実現するために工学的研究分野において、広く用いられつつある。従来の粉体によるジャミング転移を用いたものは細長い比率の袋に搭載した際には、剛性が高い状態にあるとされるモードにおいても、座屈が起きやすいなどの問題があった (Fig.8(a))。また袋状構造の破損により、粉が外部にもれてしまい、外環境を汚染することに加え、アーム構造そのものの特性も内部粉体量の変化により大きく変動してしまうといった問題も実用上は存在した。板状ジャミング現象においては、その構造を内部に封入した袋状構造の可動範囲といったものが非常に限定されるといった問題を有していた (Fig.8(b))。

本研究では、将来的に索状移動ロボットと統合することを考え、且つ上記の問題を鑑み、Fig.8(c)に示すような線状の物体を複数内部に有するジャミング転移機構について考案した。Fig.9に示すように、実機を具現化して剛性比較実験を行い、従来の粉体を用いるジャミング転移現象を用いた機構よりも耐せん断力特性が向上するという基礎特性を確認した。今後は線の材質や撚り方や本数、粉体や機能性流体等との混合併用、線状ゆえの長さの可変、導電性繊維を用いてのセンシング機能および能動駆動機能の付加などに取り組んでいく予定である。

また、貫通穴を有するユニットを複数つないで、内部に線状物を配置し、線状物を引張ることでユニット同士が接触してジャミング転移現象と同様の剛性向上を起こす方法も以前提案している。このユニットにおいて、内部力補償磁石機構 (IB マグネット) を用いることで、摩擦抵抗を無視すると非常に低い力でユニット同士の磁氣的連結の ON-OFF を切り替えることが可能となるといった新規構造 IB マグネットジャミング機構も考案し具現化を進めている。

\*本来のロボットの推進方向とは反対に進んでしまう

†途中で止まってしまう



- 2) 山本知生: 空気圧アクチュエータを用いた配管内高速推進ロボットの開発, pp.1-28, 東北大学 (2016)

Fig. 8 Internal structure of Jamming Mechanism and Concept of String 1 dimensional Jamming Mechanism



Fig. 9 Overall view of prototypes

## 5. 結言

偏心モータと絨毛を推進機構とする索状の管内探査ロボットの試作モデルを3通り製作した。その後簡単な動作確認と、実際に透明なビニル管の中を通してロボットがどのような挙動をするのか検証し、データを取った。

今後は、絨毛の形状・材質の検討、先頭節への方向転換の機能の実装など、検証によるデータから得られた課題を元にロボットを改善していく。また、車輪やジャミング転移機構などの絨毛以外の推進機構についても並行して検討を進め、それらの機構も推進原理に取り込んだ最適な索状移動ロボットの開発を行っていく。

## 参考文献

- 1) 高山俊男, 倉田稔, 小俣透: 形状記憶合金を用いたらせん捻転管内移動の原理と検証, 日本ロボット学会誌 Vol.31, No.5, pp.879-886(2013)