

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19H02101

研究課題名（和文）超複合起歪機構を基軸とする全方向駆動システムの拡張的体系化

研究課題名（英文）Extensive Systematization of Omnidirectional Driving System based on Super-Transformable Mechanism

研究代表者

多田 隈 理一郎 (Tadakuma, Riichiro)

山形大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：50520813

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究においては、超複合起歪機構としての繊毛を振動させることにより、全方向へと駆動するシステムを開発し、配管内部などの狭隘空間を前後左右に移動しながら、三次元地図情報を生成することに成功した。

特に、超複合起歪機構を駆動するためのモータの個数を1個に留めた上で、繊毛を弾性変形させるのみならず、移動ロボット先端の頭角機構を無限回転させることにより、角運動量保存則を用いて、移動ロボット胴体の回転方向を時計回り・反時計回りに切り替えて、ロボットを前後に移動させられるようにしたり、配管内のT字分岐路において、頭角の方向を切り替えることで、左右の進行方向選択を可能としたりした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究における成果として、超複合起歪機構を駆動するためのモータの個数を、回転頭角内部の1個に留めた上で、そのモータを、弾性を有する繊毛を振動させることに用いるのみならず、ロボット全体の角運動量を制御して、胴体の回転方向を切り替えることに用いたことが挙げられる。この頭角の回転方向の切り換えにより生じる角運動量を最大限利用するための繊毛の断面形状やヤング率も、実験を通じて明らかにできた。これにより、ロボットを小型・軽量に留めた上で、狭隘空間において、前後左右へ全方向駆動することが可能となり、同様に体系化された推力生成原理を、物流や配管探査などの、様々な分野に拡張することが可能となった。

研究成果の概要（英文）：In this study, the omnidirectional mobile robotic system with vibration of flexible cilia has been developed. This omnidirectional mobile system is composed of multiple flexible materials for its cilia, body, and tilted horn. The mobile robot can generate 3D map information while moving inside of the narrow place such as complicated pipes by using sensors. In particular, by limiting the number of motors inside of the mobile robot only one, the tilted horn can be rotated to control the angular momentum of the whole body of the robot while the horn can vibrate the flexible cilia to make the thrust of the robot. This function can change the orientation angle of the robot not only back and forward but also left and right at a T-shaped branch in the pipe.

研究分野：ロボット工学

キーワード：繊毛振動型移動機構 超複合起歪機構 全方向駆動システム

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

本研究開始当初の背景として、災害後の瓦礫の中で生存者を探したり、古い建屋内の配管を探索して三次元地図を作製しながら補修の必要な箇所を特定したりすることが可能な、小型・軽量及び低コストの全方向駆動機構の開発が望まれていたということが挙げられる。このような需要に対して、東北大学の田所研究室において開発された能動スコープカメラ(Active Scope Camera, ASC)[1]は、光ファイバースコープの入った、外表面に繊毛を有する円筒形の機構を、振動モータにより振動させて、繊毛に働く環境からの反力によって、前後にのみ推進し、瓦礫内などの狭隘空間を探索するというものであった。

本研究においては、前後のみならず、左右方向を含めた全方向への駆動を可能とする小型・軽量及び低コストの移動機構を実現し、古い建屋内の配管内部などを探索して三次元地図を作製することを目指し、移動機構表面における繊毛の形状や分布のさせ方を、実験を通じて最適化し、その繊毛を振動させるための機構を設計・製作した。

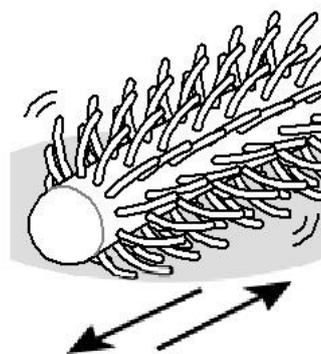


図1 前後のみ推進する
能動スコープカメラ[1]

2. 研究の目的

本研究の目的は、不整地や狭隘空間において、任意の方向に進みつつ探索を行うことが可能な全方向駆動システムを開発することである。

特に、モータ1個のみの回転方向や周波数の制御によって実現できる、独立した自由度の最大数はいくらかということと、「偏心重りの回転に基づく振動モータ」以外に、繊毛を振動させる方法が有るかどうかを明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 超複合起歪機構である繊毛を、偏心重りの回転に基づく振動モータによる振動させると、図2のように、繊毛が振動で縮んでまた伸びるときに、弾性力で配管内壁を蹴り上げ、その反力が、ロボットの推力となる。これが、研究開始時点における、全方向駆動システムの基本的な推力生成原理であるが、この方式のみでは、図3のよう

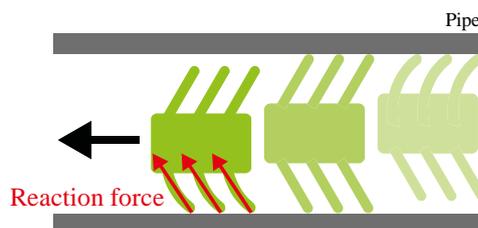


図2 繊毛の振動による
配管内部での推力生成の原理

に、「T字分岐路」における左右方向への方向転換ができないため、屈曲した頭角を回転させて、左右方向への方向転換を可能としたものが、図4に示す配管探索ロボットである。

図4に示す配管探索ロボットは、内径 $\Phi 75\text{mm}$ の配管内部を移動するためのもので、図5に示すように、回転頭角を回転させるためのモータとは別に、繊毛を振動させるための偏心重りが付いた振動モータも、胴体部分に有しているものである。胴体の長さは 130[mm] 、胴体の外径は $\Phi 52\text{[mm]}$ 、繊毛も含めた直径は $\Phi 80\text{[mm]}$ であり、全重量は 172[g] である。また、Formlabs 社製の Elastic 50A で3Dプリンタにより造形した繊毛の断面は、円形である。

ただ、図4、図5に示す配管探索ロボットは、図2のように前進することと、T字分岐路における左右方向の切り換えを図3のように行うことは可能であったが、「後退」することはできない機構であった。

この配管探索ロボットは、2022年5月21日～22日にかけて山形市の霞城セントラルにて開催された「第1回パイロボコン世界大会」に出場し、「アイデア賞」と「デザイン賞」を受賞した。

電源を配管探索ロボットの外部に配置して、電源供給用のケーブルを回収用の命綱として利用可能としたものが、図6に示すロボットである。このロボットは、胴体部分の振動モータを用いず、頭角を回転させるモータが、振動モータの機能も兼ねており、頭角の重心の偏りを利用して、繊毛にも振動を伝えて、弾性変形させ、推力を図2の原理で生成することを可能としている。

こちらのロボットも、図2のように前進することと、T字分岐路における左右方向の切り換えを図3のように行うことは可能であったが、「後退」することはできない機構であり、ケーブルを引っ張ることで、ロボット本体を回収することを可能としていた。

Formlabs社製のElastic 50Aで3Dプリンタにより造形した繊毛の断面は、円形であり、胴体の長さは45[mm]、胴体の外径は $\Phi 20$ [mm]、繊毛も含めた直径は $\Phi 39.5$ [mm]であり、全重量は22[g]である。この配管探索ロボットは、内径 $\Phi 40$ mmの配管内部を移動することが可能である。

以上の開発段階を経て、図7の見取り図に示すように、Formlabs社製のElastic 50Aで3Dプリンタにより造形した繊毛の断面を長方形にして、回転頭角と反対側に、ロボット胴体が、角運動量保存則により回転するときに、配管内壁との間で働く摩擦抵抗により、繊毛の傾き方向が反対に折れ曲がるように設計することで、配管探索ロボットが「後退」もできるようにした。この繊毛は、図8の見取り図に示すように、ロボットの前方に対して、基部が45°傾いており、そのことによって、胴体の回転方向が時計回り・反時計回りに変化する際に、図7のように、繊毛の折れ曲がる方向が前後に切り替わるようになっている。この原理により、回転頭角の回転方向に応じて、配管内部を前後に移動することを可能にした配管探

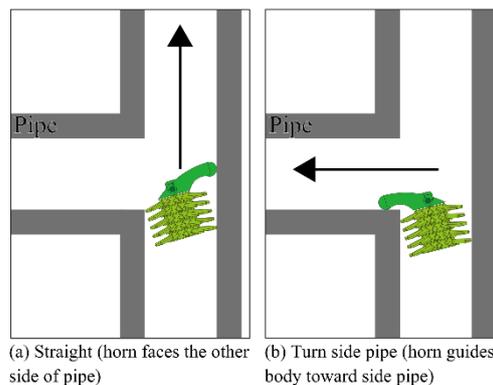


図3 T字分岐路における方向転換を可能とする回転頭角の機能



図4 回転頭角を有する配管探索ロボットの全景

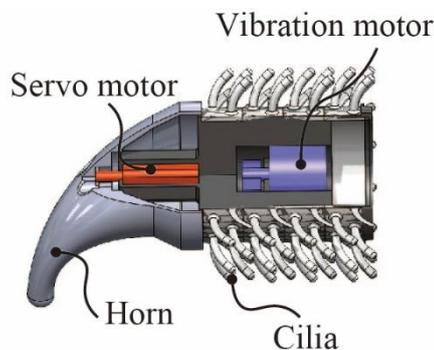


図5 回転頭角を有する配管探索ロボットの見取り図（側面図）



図6 有線式の回転頭角付き配管探索ロボットの全景

査ロボットの全景を、図9に示す。

4. 研究成果

図9に示すロボットの胴体の長さは53.9[mm]、胴体の外径は $\Phi 20$ [mm]、繊毛も含めた直径は $\Phi 44$ [mm]であり、全重量は27.3[g]である。この配管探索ロボットも、内径 $\Phi 40$ mmの配管内部を移動することが可能である。また、このロボットは、図10のように電池と制御回路を内蔵した無線制御可能な移動機構となっている。

繊毛の断面が長方形をしていることから、その長方形の辺の長さを調整し、繊毛の片持ち梁としての断面二次モーメントおよび曲げ剛性を制御することで、頭角の回転方向に応じて、前後への方向転換を行うことが、図11、図12に示すように可能となっている。

頭角が反時計回りに回転するときには、図11のようにロボットは前進し、頭角が時計回りに回転するときには、図12のようにロボットは後退する。前進と後退の切り換えは、図13のように、鉛直上下方向においても可能である。さらに、図14に示すように、頭角の屈曲した方向を、T字分岐路において、「ロボットが進行すべき方向」に差し込むことにより、左右方向の経路選択を行うことが可能である。

このように、超複合起歪機構としての繊毛の弾性変形に基づく推力のみならず、頭角の回転による繊毛の折れ曲がり方向の切り換えを含めたステアリング機能により、T字分岐路における左右方向の経路選択機能のみならず、前後への方向転換も可能となり、全方向駆動システムとしての配管探索ロボットを製作することが可能となった。

この全方向駆動システムとしての配管探索ロボットを、鉛直管・水平管を含めた様々な配管内部に走行させる実験を行い、このロボットが、十分な狭隘空間走破性能を有していることが確認できた。

本研究を通じて、ロボットが走破する環境に応じて、超複合起歪機構としての繊毛の断面二次モーメントやヤング率および回転頭角の形状を最適化することにより、様々な狭隘空間にロボットを適応させることが可能となる見通しがついたため、今後は、建屋内の配管内部のみならず、生体内も含めた様々な狭隘空間内部を探索・点検するための装置として、このロボットシステムを発展させてゆく予定である。

本研究で開発した全方向駆動システムは、図6のような有線型と、図9のような無線型とがあ

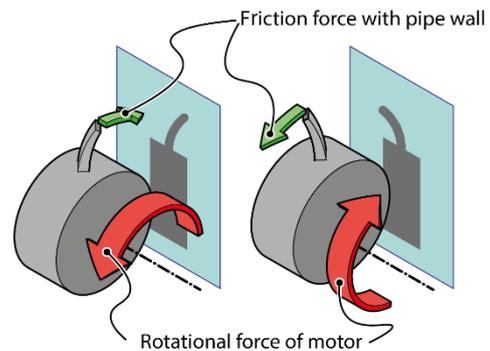


図7 胴体の回転方向に応じて、折れ曲がる方向を切り替える繊毛

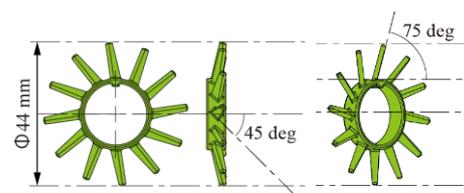


図8 長方形の断面を有し、傾けて胴体に固定された繊毛

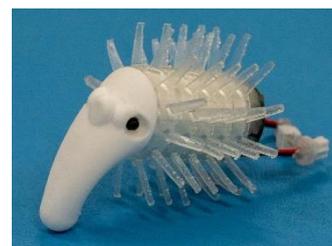


図9 頭角の回転方向に応じて前後へ方向転換することを可能にした配管探索ロボットの全景

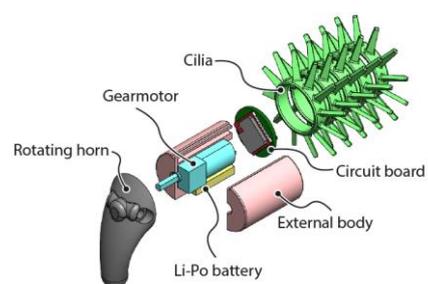


図10 配管探索ロボットの内部構成

るが、このような電源供給・通信のためのケーブルも、必要に応じて、全方向駆動システムとしての狭隘空間探査ロボットに取り付けることで、もし万が一、全方向駆動システムが環境内に引っ掛かってしまって自分の推力だけでは出発地点に戻って来られなくなった場合においても、回収用の命綱としてケーブルを引っ張ることにより、ロボットを回収することが可能となるという利点がある。さらに、電源や制御回路をロボット内部に図 10 のように内蔵しておく必要が無くなり、ロボットの小型・軽量化を進めることに役立つと考えられる。

また、本研究で開発した全方向駆動システムの推力を十分に大きなものと出来たため、この推力を、全方向駆動システム自身の移動用のみならず、全方向駆動システムが固定された環境内における物体搬送のためにも用いることが可能となる。超複合起歪機構により推力を発生させることで、食料や生体などの柔軟物を搬送する場合においても、被搬送物を傷つけることなく、本質的に安全な搬送が可能になるものと考えられる。搬送装置として、今回開発した全方向駆動システムを利用する場合においては、超複合起歪機構も、本研究における片持ち梁（繊毛）としての形状のみならず、被搬送物体の重量に応じた形状や曲げ剛性を持てるように、その設計・製作プロセスを、引き続き、拡張的に体系化してゆく予定である。

<引用文献>

- ① 福田, 竹内, 昆陽, 田所, 山崎, 廣瀬, 青木, 金森: 「鉛直降下探査のための能動スコープカメラの開発」, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013, 1A1-R16

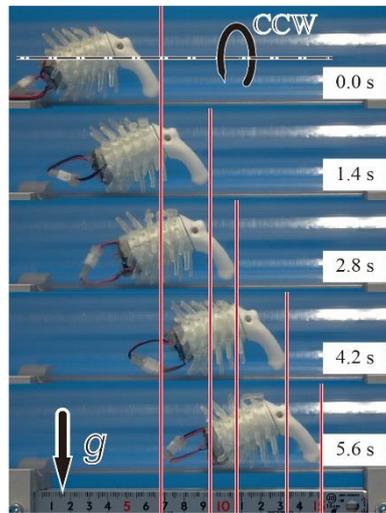


図 1 1 ロボットの前進

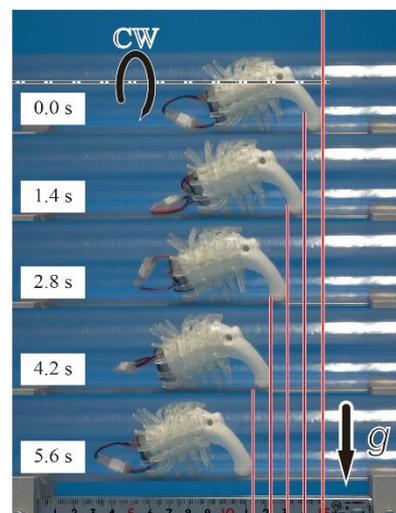


図 1 2 ロボットの後退

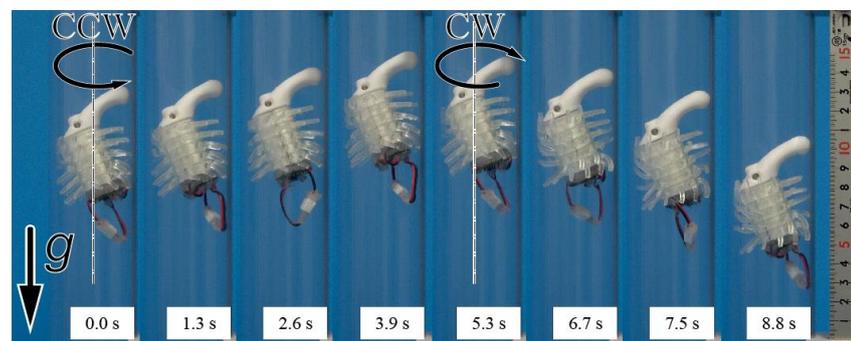


図 1 3 鉛直上下方向の方向転換

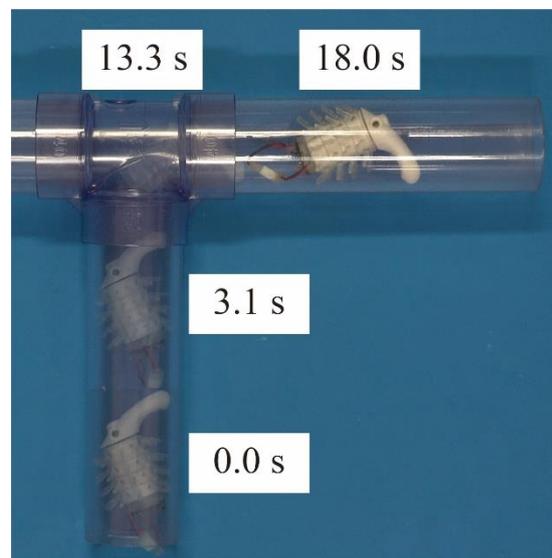


図 1 4 T 字分岐路における進行方向の選択機能

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 多田隼 理一郎, 岡田 龍斗, 酒井 柊, 菅井 祐太	4. 巻 60
2. 論文標題 回転頭角を有する配管用移動ロボットの推進機構に関する研究	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 計測自動制御学会論文集	6. 最初と最後の頁 58 ~ 66
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.9746/sicetr.60.58	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Zambrano Adrian, Abe Kazuki, Suzuki Ikumi, Combelles Theo, Tadakuma Kenjiro, Tadakuma Riichiro	4. 巻 34
2. 論文標題 Study on visual machine-learning on the omnidirectional transporting robot	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 917 ~ 930
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/01691864.2020.1762734	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Aizawa Tetsuya, Iizima Haruhiko, Abe Kazuki, Tadakuma Kenjiro, Tadakuma Riichiro	4. 巻 35
2. 論文標題 Study on portable haptic guide device with omnidirectional driving gear	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 320 ~ 336
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/01691864.2021.1888796	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kazuki Abe, Gaku Matsui, Kenjiro Tadakuma, Mitsuhiro Yamano and Riichiro Tadakuma	4. 巻 34
2. 論文標題 Development of the omnidirectional transporting table based on omnidirectional driving gear	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 358-374
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 山廻邊和史, 酒井柊, 菅井祐太, 阪本惇暉, 笹川一輝, 多田隈理一郎
2. 発表標題 三次元地図生成機能を有する振動推進型配管探査ロボットの研究
3. 学会等名 第40回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 阪本惇暉, 山廻邊和史, 多田隈理一郎
2. 発表標題 回転頭角を有する配管用移動ロボットの推進機構に関する研究
3. 学会等名 第23回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 笹川一輝, 阪本惇暉, 菅井祐太, 山廻邊和史, 村上久斗, 多田隈理一郎
2. 発表標題 振動推進型ロボットにおける自己位置推定および配管図構築の研究
3. 学会等名 一般社団法人 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2022
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Riichiro Tadakuma Laboratory https://tadakuma.yz.yamagata-u.ac.jp/

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	多田 隈 建二郎 (Tadakuma Kenjiro) (30508833)	東北大学・タフ・サイバーフィジカルAI研究センター・准教授 (11301)	
研究 分 担 者	戸森 央貴 (Tomori Hiroki) (30783881)	山形大学・大学院理工学研究科・助教 (11501)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関