

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 22 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25289057

研究課題名(和文) 環境順応型受動蛇行による狭隘地形内の長距離3次元移動探査の実現

研究課題名(英文) Realization of long travel and inspection in 3D narrow spaces by passive meandering adaptable to the environment

研究代表者

塚越 秀行 (Tsukagoshi, Hideyuki)

東京工業大学・工学院・准教授

研究者番号：50313333

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、狭隘地形環境でスムーズな移動と探査を長距離に渡って実現するために、体幹中に推力と支持力を均一的に生成できる、細径かつ柔軟な線形構造の移動体の創出を目指した。その解決のため、2本の柔軟チューブから成る線形柔軟構造を導入した。すなわち、チューブ間に推力が生じると、その反動で一方のチューブが受動的に蛇行して地形に順応しながら支持力を生成し、それを足場に他方のチューブが推進するという移動方式である。試作機による実験の結果、内部に空気圧0.4MPaを印加することにより、上記の手法で17Nの推力を生成でき、内径50mmの曲がり管や鉛直管を含む配管内で距離17m程度推進できることを確認した。

研究成果の概要(英文)：In this study, we tried to invent a novel type of mobile robot with small diameter and linear soft structure, which enabled to generate both propulsion force and supporting force uniformly in the long body, aiming to make it travel and search in the long distance inside narrow spaces. To solve it, Twin-tube structure composed of two flexible tubes were introduced, which could perform flexibly and adapt itself to narrow environment. While the propulsion force is generated between two tubes, one of the tubes passively meandered, gaining stiffness, and then generated the supporting force inside the pipes. Judging from the experimental results by the developed prototype, we could make it sure that the proposed method generated 17 N for propulsion force, traveling 17m distance inside 50mm diameter pipes, when the tube was pressurized by 0.4MPa pneumatic pressure.

研究分野：ロボット工学

キーワード：ソフトメカニクス アクチュエータ

1. 研究開始当初の背景

災害現場の人命探査・原子炉内の配管亀裂検査などにおいて、有線探査機(カメラ・マイク・超音波探知機など)を狭隘地形の深奥部まで搬送し、情報収集を効率よく行える手段が求められている。しかし、従来までの技術には、以下のような課題があった。すなわち、棒カメラやファイバースコープなどの押し込み方式は、奥に進むほど移動環境との摩擦が増し、湾曲を伴う経路内では目標方向に進ませることが困難だった。また、車輪駆動・多関節駆動・多毛構造による振動などの能動推進方式では、支持力生成用のアクチュエータや機構が曲がり部での推進を阻害する傾向がみられた。

2. 研究の目的

(1) 3D 狭隘地形(狭い曲がり・経路幅の変化・鉛直上りを含む地形)でのスムーズな移動を実現するために、細口径の線形柔軟体であり、そのうえ地形に順応して体幹を支持しながら推進し、長い体幹中に推力と支持力を均一的に生成できる、全く新しい移動体の創出を目指す。

(2) 本研究では、2本の柔軟チューブから成る線形柔軟体により狭隘地形の移動を目指すこととした。すなわち、チューブ間に推力が生じると、その反動で一方のチューブが受動的に蛇行して地形に順応しながら支持力を生成し、それを足場に他方のチューブが推進するという移動方式の有効性を検証する(図1)。

(3) 当該原理をもとに、原子炉配管内や災害現場での情報収集(図2)への応用も視野に入

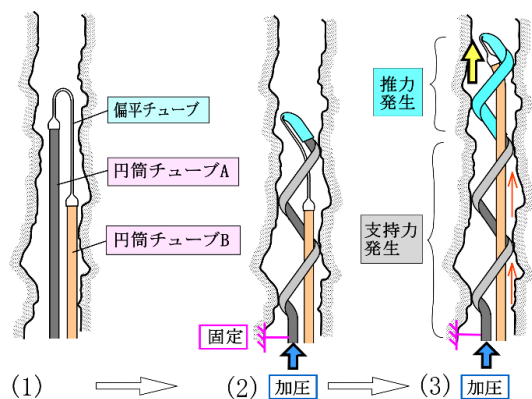


図1 受動蛇行で推進する原理

れ、1)Twin-tube 型移動体の有効性、2)受動蛇行の特性解析、3)方向操舵手法、4)長距離配管内を移動するための構成、5)配管内以外の狭隘環境での移動の可能性、などを検討する。

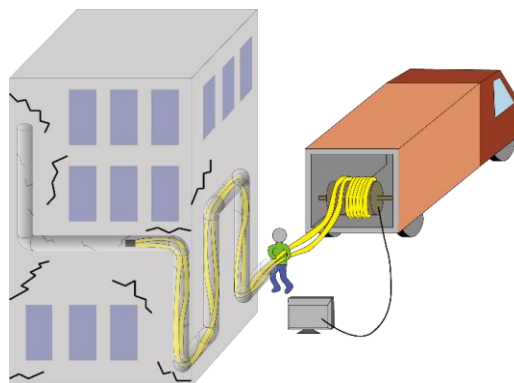


図2 災害直後の復旧作業における配管検査への適用

3. 研究の方法

柔軟構造体の受動蛇行により支持力を発生するメカニズムを解明し、従来手法では実現されなかった複雑狭隘地形での移動探査の達成を目指す。そのため、以下2項目を研究の柱とする。

1) 推進用アクチュエータと受動蛇行による支持力生成用線形柔軟体、これら双方に関する設計法・制御手法の理論的解析を行い、試作機を用いた実験によりこれらの有効性を検証する。

2) 当該移動体の産業応用も視野に入れ、配管検査ロボット・凹凸がれき内や土中を推進する人命救助ロボットとして適用を考慮した試作機を開発し、移動性能と探査性能の双方をフィールド実験により検証する。

4. 研究成果

(1) Twin-tube 構造による推進の確認

2本の柔軟な円筒チューブ、それらを連結する偏平チューブ、先頭部で推力を生成するヘッドユニットから成る移動体の試作機を製作した。

推力は、 Λ -drive(ラムダドライブ)と名付けた駆動原理によりヘッドユニットで生成できることを確認した。すなわち、偏平チューブの内部を一方から流体圧で加圧すると

座屈が生じ、この座屈点が流路を遮断しつつ下流側にスライドすることで推進するという原理である。従って、加圧側のチューブを環境に固定すると、無加圧側チューブが前方に繰り出される。また、加圧側チューブを切替えることにより、交互に前進することが可能となる。さらに、逆に無加圧側チューブを固定して加圧すると、加圧側チューブが後退する動作も生じる。これらの各動作について、空気圧 0.4MPa を印加したとき、推力 17N を生成できることを確認した。

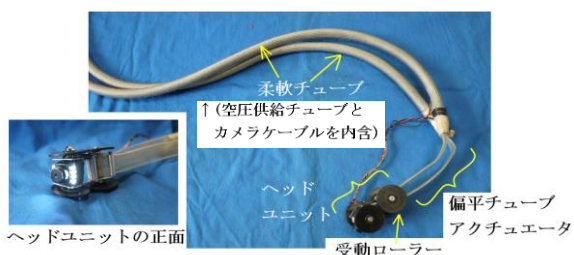


図3 Twin-tube 型移動体の試作機

項目	スペック・材質
円筒チューブ	外径 8 mm、長さ 20m、ナイロンコーティング付きシリコンチューブ
偏平チューブ	偏平幅 10 mm、肉厚 1 mm、ウレタンチューブ
ヘッドユニット	スライダ、受動車輪 4 個、LED 付 CCD カメラ (有線)
駆動源	空圧 (0.4MPa)

(2) 受動蛇行による鉛直配管内の移動

考案した Twin-tube 型移動体は、以下の原理により配管内で支持力を受動的に生成できることを確認した。すなわち、推進反力で受動的に蛇行した円筒チューブの剛性が増加すること、および当該円筒チューブが配管内壁に接触して摩擦力が増加すること、これら双方の効果により支持力を生成したと考えられる。よって、推力と同等の支持力が生成されるまで蛇行した時点で、移動体は前進し始めると考えられる。配管内径 $D=50\text{mm}$ 、 65mm 、 130mm の各場合において、負荷によってたわむ変位と配管軸方向に作用する支持力との関係を測定した結果が図 4 である。チューブ内には推進時と同様に 0.4MPa の圧力を印加した。この結果、負荷によってたわむ

変位が大きくなるごとに支持力が増加していることが確認できた。そして、内径 50mm の配管内の場合、約 80mm だけ変位しながら鉛直管内を移動した(図 5)。これは、推力 17N を生成する場合にたわむ変位と一致する。

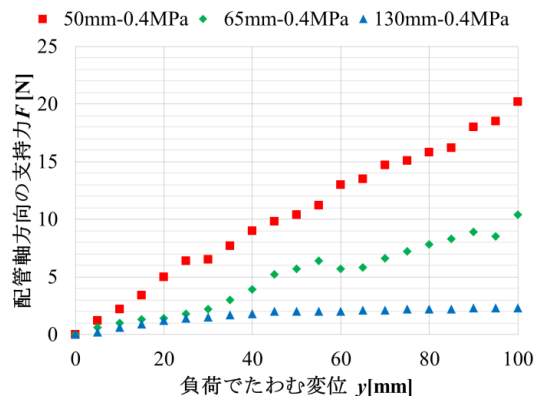


図4 受動蛇行した円筒チューブの変位量と支持力との関係

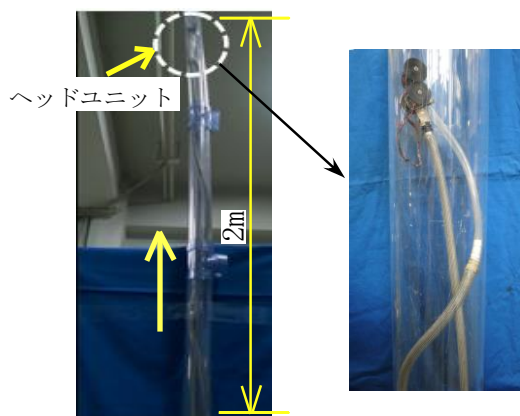


図5 受動蛇行により鉛直管内を移動する Twin-tube 型移動体

(3) 分岐管における方向操舵

分岐管で目標方向に湾曲しながら推進するために、円筒チューブと偏平チューブの接続部に方向操舵用のアクチュエータを 3 本装備した(図 6)。当該アクチュエータは、ペンシル状の柔軟チューブ構造から成り、内部を流体圧で加圧すると軸方向に伸長する特性を有するものである。これにより、加圧されたアクチュエータが湾曲外側に配置されるように移動体の先頭部が能動的に湾曲することが可能となる。また、当該アクチュエータ 3 本の圧力を制御することにより、任意の湾曲方向を選択することも可能となる(図 7)。

内径 50mm、65mm の T 型分岐管において、

操縦者はカメラの画像で進行方向を判断しながら移動体を目標方向に操舵可能であることを確認した(図8)。

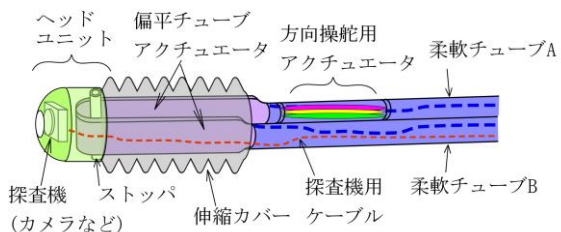


図6 方向操舵機能も含む Twin-tube 型柔軟移動体の構成

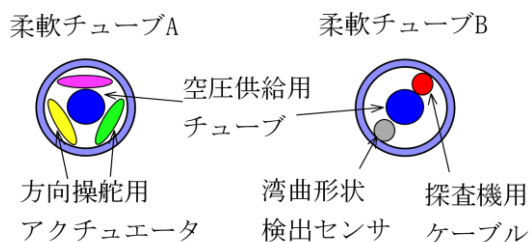


図7 柔軟チューブの断面



図8 T型分岐管における90度の操舵

(4) 長距離移動を実現するためのラダー構造の導入

推力/体幹長比を一様に高く保持し、長い体幹でも摩擦を上回る推力を生成する構成を検討した。その実現のため、複数の推進用の扁平チューブアクチュエータを一定間隔毎にラダー状に配置し、これらを同期させて駆動する方式を考案した(図9)。予備実験より、当該アクチュエータを2~3m間隔に配置する構成が最も効率が高いことが明らかとなっていた。このような構成により、内径50mmの配管内を20分程間に17m進めることを確認した。

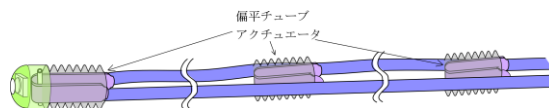


図9 推進用アクチュエータをラダー状に配置した構成

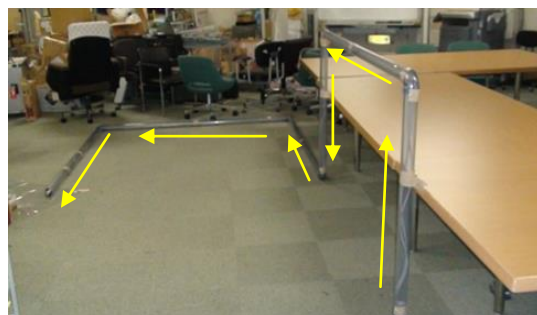


図10 曲がり管・分岐管を含む内径50mm 長さ17mの配管内の移動

(5) 多様な移動環境での検証実験

本研究で提案した手法は、整備された配管内以外の環境で移動可能であることを検証した。

1つ目は、配管内に障害物が存在した状態での移動である。このような状態では、方向操舵用アクチュエータで移動体の先頭部を湾曲させることにより、障害物の乗り越え動作が可能となる。実験では、内径50mmの配管内に高さ20mm、幅70mmの障害物を設け、上記手法により乗り越え可能となることを確認できた(図11)。

2つ目は、配管外のクランク状狭隘地形での移動である。2本の円筒チューブ間に拘束材を設け、配管外の環境でも受動蛇行を生成しやすい措置を施した。その結果、幅60mm程度の狭隘地形でも移動可能となることを確認した(図12)。



図11 配管内の障害物の乗り越え動作



図 12 クランク状狭隘地形の移動

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① Hideyuki Tsukagoshi、Kazutaka Fuchigami、Eyri Watari、Ato Kitagawa、
“Deformable Anchor Ball for Thrown Referring to Octopus Suckers”、
Journal of Robotics and Mechatronics、
査読有、Vol. 26、No. 4、477-485(2014)

[学会発表] (計 6 件)

- ① 穂坂 憲一、劉 海博、塚越 秀行、北川 能、
“繰り出し式柔軟流体アクチュエータによる狭隘地形内の移動探査ロボット — 第 3 報：受動蛇行を利用した鉛直管路内の移動—”、日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会、筑波、2013 年 5 月 23 日発表、2A1-P02(2013)
- ② 劉 海博、穂坂 憲一、塚越 秀行、“繰り出し式柔軟流体アクチュエータによる狭隘地形内の移動探査ロボット — 第 4 報：受動蛇行の支持力特性—”、日本ロボット学会第 31 回学術講演会、首都大学東京、2013 年 9 月 5 日発表、3D1-01(2013)
- ③ 楯 貴志、劉 海博、塚越 秀行、“Twin 構造チューブによる配管内探査ロボットとその災害対応への応用、”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、東京ビッグサイト、2014 年 12 月 16 日発表、SI2014 論文集、1D4-1(2014)
- ④ 劉 海博、楯 貴志、塚越 秀行、“Twin 構造チューブによる狭隘地形内の移動探査ロボット 長距離推進のための対応、”日本ロボット学会第 32 回学術講演会、九州産業大学、2014 年 9 月 5 日発表、1M2-04(2014)
- ⑤ 楯 貴志、劉 海博、塚越 秀行、“Twin 構造チューブによる狭隘地形内の移動探査ロボット -第 4 報：方向操舵の検討-

”日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 (2014)、富山、2014 年 5 月 26 日発表、1P1-H02(2014)

- ⑥ 楯 貴志、塚越 秀行、“砂中移動を目指した流体駆動による柔軟索状体” ROBOMECH2016 in Yokohama (ロボティクス・メカトロニクス講演会)、パシフィコ横浜、2016 年 6 月 9 日、2A1-04b2(2016)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.cm.ctrl.titech.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

塚越 秀行 (TSUKAGOSHI、Hideyuki)

東京工業大学・工学院・准教授

研究者番号：50313333