

令和 5 年 6 月 14 日現在

機関番号：82626

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2019～2022

課題番号：19K23502

研究課題名（和文）複数の細径ソフトアクチュエータを用いた極狭隘空間におけるロボット駆動法の創出

研究課題名（英文）Mechanism and driving method of robot in narrow space with multiple soft actuators

研究代表者

山本 知生 (Yamamoto, Tomonari)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・研究員

研究者番号：20849898

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、細径配管内などの狭い空間において高い運動性能を実現するためのロボット構成法を提示することを目的としたものである。主な学術的成果は、(1)複室構造を持った新たなソフトアクチュエータの構造と駆動原理の提案、(2)新しいロボット走行原理の提案、(3)複数のアクチュエータを一括して制御する空気圧制御手法の提案、である。さらに、これら研究成果を活用して狭い細径配管内を点検可能なロボットシステムを開発した。本ロボットは内径25mmの配管内を約45mm/s（水平走行時）で走行しながら映像を撮影することが可能である。リアルタイムで内部の様子を確認できるため、配管設備点検等での活用が期待できる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

柔軟材料を用いたソフトロボットの研究は近年急速に研究が進められているが、未知の事柄が多い分野である。その中において、本研究課題の成果は、そのようなソフトロボットの新たな構成方法を示したものである。また、ソフトロボットを動かす上で共通の課題となる空気の制御方法の点においても新たな知見が得られており、他のソフトロボットの制御手法の検討にも資すると考えられる。

本研究課題で開発したロボット点検システムは、これまで点検が難しかった細い配管の内部点検を可能にするものである。本技術は配管設備の維持管理や保守点検に資すると考えられ、設備の長寿命化や安全性の担保に貢献できると期待される。

研究成果の概要（英文）：This study aimed to propose a new robot configuration to achieve high locomotion performance in narrow spaces such as inside narrow pipes. The main contributions were: (1) a new structure and working principle for a soft actuator with a duplex-chamber mechanism, (2) a new locomotion generation method with the proposed actuator, and (3) a new pneumatic control method to control multiple actuators with the same air supply line. Furthermore, the robot inspection system for narrow pipes was developed using these research findings. The robot was capable of moving through at a speed of 45mm/s through a horizontal pipe with an inner diameter of 25 mm. Since the robot can take images of pipes in real-time, it would be useful to inspect pipe facilities.

研究分野：ソフトロボティクス

キーワード：ソフトロボット ソフトアクチュエータ 機構設計 フィールドロボット 空気圧アクチュエータ 配管ロボット 配管点検 空気圧制御

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

狭隘な空間はロボットにとってチャレンジングな活動環境であるとともに、実社会においてロボットの適用が強く求められる環境である。そのような環境の代表例が狭い細径配管の内部である。このような環境下で活動できるロボットの研究は、インフラや産業設備の保守点検の劇的な広域化・省力化という実用的側面だけでなく、ロボット適用範囲の拡大へ向けた基盤技術の構築という学術的側面においても意義が大きい。

細径配管内を動くロボットには「コンパクト性」「柔軟性」「高速性」「長推進距離」「防爆性」などの能力が求められる。しかし、これらの性能を有し細径配管内で高い能力を発揮できるロボットは未だ存在しない。その要因は、極狭隘空間に適したロボット推進機構の構成法が明らかではないためである。従来のロボットに多用されてきた剛体アクチュエータはコンパクト性や柔軟性に乏しく、狭隘な環境には不適である。また、既存のソフトアクチュエータは柔軟性に優れているが、それらを単純に小型化しただけでは推進速度や発生力が低下してしまい、上記性能を達成することができない。ゆえに、細径配管用のロボットを実現するためには、従来のロボット機構に代わる新たなロボット構成手法や設計論、制御手法の創出が必要である。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、柔軟材料を用いたアクチュエータと新たな駆動原理によるアプローチによって、狭隘空間でのロボットの運動性能を飛躍的に向上させるロボットの構成法を提示することである。具体的な研究課題としての以下 3 点に取り組み、これらの研究を通して既存のロボット推進機構の課題を打破し、狭隘空間におけるロボットの運動特性を飛躍的に向上させることを目指した。

- (1) 高速動作・大発生力を有する細径の柔軟な流体駆動アクチュエータ
- (2) 複数のソフトアクチュエータの協調による運動様式
- (3) アクチュエータの運動制御手法に関する研究開発

## 3. 研究の方法

本研究では配管部材として頻繁に用いられる呼び径 25A (内径 25 mm) あるいは 32A (内径 35 mm) の配管に適応できるロボットの実現を念頭に、次の点に注力して研究を行った。

- (1) 高速動作・大発生力を有する細径骨格の流体駆動ソフトアクチュエータの研究開発

流体印加による柔軟素材の伸縮を利用し、長手方向への直動運動および半径方向への膨張運動を取り出せる駆動原理を検討し、耐久性・頑強性を兼ね備えたアクチュエータの開発を行った。同時にアクチュエータの解析を行いながら構造的特徴を整理し、機構設計へ還元した。

- (2) 複数のソフトアクチュエータの協調による運動様式の研究開発

提案アクチュエータ機構を用いた新たなロボット運動様式を検討し、細径配管を長距離にわたり走行可能なロボット推進様式の開発を行った。アクチュエータの組み合わせにより生成され得る運動パターンを検討しながら、推進速度や制御性などの観点から最適な推進運動の創出に取り組んだ。

- (3) アクチュエータの運動制御手法に関する研究開発

できるだけ少ない流体印加チャンネル数で複雑な推進運動を生成できる流体制御手法の開発を行った。アクチュエータの機構や制御方法も勘案しながら、空気の圧縮性を活用した流体制御方法や有効断面積の違いによる圧力印加時の流量変化などを活用した運動制御原理を研究した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 複室構造を持った新たなソフトアクチュエータ構造と駆動原理の提案

シリコンゴム等の柔軟素材を活用して、複室構造を持った中空複室型ソフトアクチュエータを開発した (図 1)。このアクチュエータはシリコンゴム製の多層構造のバルーンを内部に備えており (図 2)、細径かつ大伸縮であるとともに、流体・運動制御機能を内包しているという際立った特徴を有している。アクチュエータには前後方向への伸縮運動する部分が 1 箇所、半径方向への膨張運動をする部分が 2 箇所、すなわち計 3 箇所の運動部位があるが、これらの部位の運動を 2 本のエアチューブの圧力差を利用することでコントロールすることができる。このような特徴のため、多彩な運動を少数のエアチューブで生成することを可能となる。また、本アクチュエータは内部に貫通穴を設け、その空間にワンタッチで内視鏡やセンサ類を搭載することができる構造になっている。ゆえに本機構を使用することで、市販の内視鏡にアクチュエータを取り付けることが可能となる。



図 1 中空複室型ソフトアクチュエータ

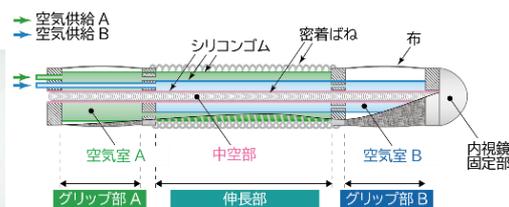


図 2 アクチュエータの内部構造

##### (2) ソフトアクチュエータに加える空気の圧力差を利用したロボット走行原理の提案

前述のアクチュエータを利用して、アクチュエータに加える空気の圧力のあるパターン (図 3) に従って変化させることで尺取り虫運動が生成可能であることを見出した。また、これを用いて細径配管内での走行を実現した。センサ類を搭載しない状態で呼び径 25A の水平配管内において 45.5mm/s での推進を実現した。これは同サイズのロボットと比較して世界最速の速度である。また、25A の垂直配管内における 23.7mm/s での上昇、54.4mm/s での下降も実現した (図 4)。さらに、内視鏡を搭載した状態でも水平・垂直配管や曲管を走行できることを確認した。

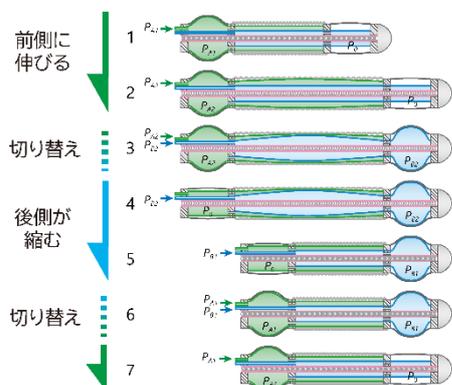


図 3 圧力差を活用した推進パターン

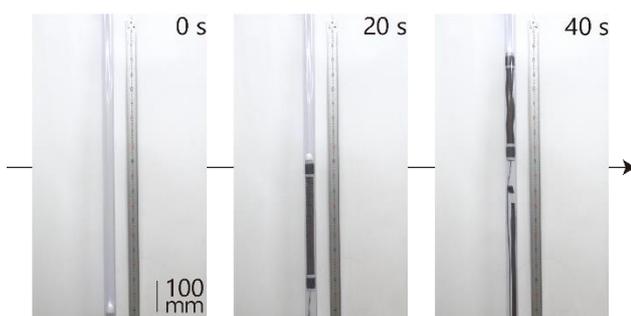


図 4 25A 垂直配管内走行の様子

##### (3) 複数のアクチュエータ一括制御する空気圧制御手法を提案

長距離に渡る配管点検を実現するために、複数のアクチュエータを連結して駆動させる手法を開発した。従来、複数の空圧アクチュエータを駆動させる際には個々のアクチュエータに対して個別に空気供給チューブを接続することが一般的である。しかし、配管内点検用途のロボットでは空気供給チューブが増えると牽引抵抗が増えてしまうため望ましくない。そこで、複数アクチュエータを数珠つなぎに連結して同一の空気供給チューブにより駆動させるという手法を開発した (図 5)。また、前述の駆動方法によって生じる応答性の低下や動作のばらつきなどの問題に対して供給空気の制御によりこれらを解決する手法を見出した。具体的には空気の初期吐き出し量を増大させるようなステップ状のバルブ制御を行うこと、およびエアチューブに意図的

に圧力損失を付与することによって、これら問題が改善することを確認した（図 6）。これらの協調制御方法を組み合わせることで、3 台のアクチュエータを組み合わせることで距離 10m にわたり走行可能なことを実験室環境において確認した。

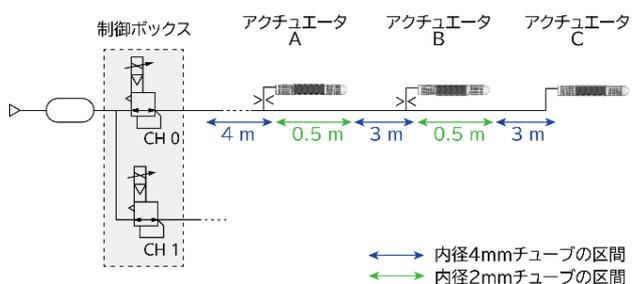


図 5 同一の空気供給チューブによる駆動方法

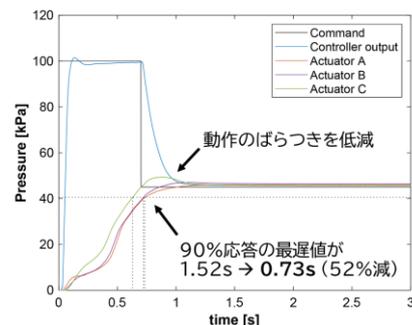


図 6 空気制御による応答の改善効果

#### (4) 成果を活用した配管点検ロボットシステムを開発

前述の研究成果を利用して 25A 配管内の点検を想定した配管内点検ロボットシステム（図 7）を開発した。このシステムは手元のタブレットからロボットの操作、カメラやセンサ情報の取得と共有が可能になっており（図 8）、配管内を容易に点検できるように工夫されている。また、ロボットの駆動に必要な機器類をパッケージ化し可搬サイズに収めたことで、現場での容易な運用を実現している。さらに、コンプレッサを含めてバッテリー駆動となっているため、電源が取れない現場においても運用することが可能である。



図 7 開発した配管内点検ロボットシステム

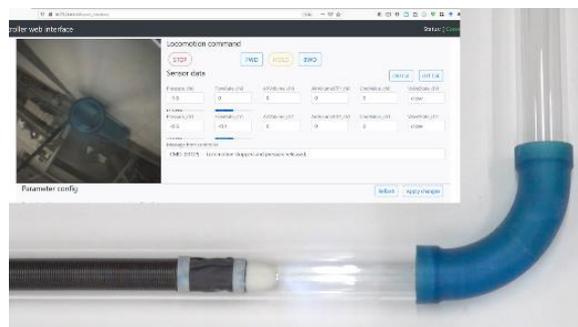


図 8 点検中のロボットと操作画面

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2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 Yamamoto Tomonari, Kamimura Akiya	4. 巻 15
2. 論文標題 Design and Characterization of a Hollow and Duplex-Chambered Propulsion Module for Narrow Pipe Inspection	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Mechanisms and Robotics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1115/1.4054765	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 山本知生	4. 巻 61 (2)
2. 論文標題 空気圧駆動型細径配管内点検ロボットの開発：中空複室構造のソフトアクチュエータを用いた推進力生成機構	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 油空圧技術	6. 最初と最後の頁 17-21
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 無
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 Yamamoto Tomonari, Sakama Sayako, Kamimura Akiya	4. 巻 5
2. 論文標題 Pneumatic Duplex-Chambered Inchworm Mechanism for Narrow Pipes Driven by Only Two Air Supply Lines	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 5034 ~ 5042
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/LRA.2020.3003859	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6件（うち招待講演 0件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 山本知生, 神村明哉
2. 発表標題 複数のソフトアクチュエータで駆動する配管ロボットの長尺化に伴う応答性改善の検討
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 山本知生
2. 発表標題 中空複室型ソフトアクチュエータを用いた小径配管内点検ロボットの発生力特性の考察
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomonari Yamamoto
2. 発表標題 Pneumatic Duplex-Chambered Inchworm Mechanism for Narrow Pipes Driven by Only Two Air Supply Lines
3. 学会等名 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山本知生
2. 発表標題 2系統の空気供給で駆動する尺取り虫型小径配管内推進機構
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山本知生
2. 発表標題 工業用内視鏡に取り付け可能な中空複室型構造の小径配管用柔軟推進ユニットの提案
3. 学会等名 第21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
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山本知生, 坂間清子, 神村明哉
2. 発表標題 2系統の空気供給で駆動する尺取り虫型小径配管内推進機構
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2020
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計0件

〔取得〕 計1件

産業財産権の名称 移動装置	発明者 山本知生	権利者 国立研究開発法人産業技術総合研究所
産業財産権の種類、番号 特許、第7274217号	取得年 2022年	国内・外国の別 国内

〔その他〕

-

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

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