

令和 6 年 6 月 27 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02105

研究課題名(和文) チューブ形自励振動システムの創成とその進行波式柔軟移動ロボットへの展開

研究課題名(英文) Creation of tube type self-excited vibration system and its application to the traveling wave type flexible mobile robot

研究代表者

塚越 秀行 (Tsukagoshi, Hideyuki)

東京工業大学・工学院・教授

研究者番号：50313333

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)：空圧駆動系の配管や配線の簡素化・完全無電力化を目指して、一定の供給圧力から自励振動を誘発し、アクチュエータの内圧を周期的に切替える自励振動式空圧駆動システムの設計法の構築を目指した。まず、偏平チューブ・拘束部・永久磁石・ホルダーから成り、質量1g程度でコインサイズのチューブ形振動子を開発した。次に、振動子の入力側に圧力源、出力側にアクチュエータを接続する2ポート系において、周期的な加減圧動作を生成する設計条件を明らかにした。さらに、3ポート以上に接続可能な構成に展開し、完全無電力による進行波移動ロボットへの実装を通して、提案手法の有効性を検証し、残された課題を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

1つ入力ポートに空圧エネルギーを供給するだけで、複数の出力ポートに周期的かつ高速(数十Hzのオーダー)に切替動作を生成できる自励振動デバイスは世界初の試みである。これにより、多数チャンバーの空圧駆動系において、弁や配管数を軽減でき、著しく簡素でスリムな空圧駆動系を構築できる可能性が開けた。また、本研究で創出された偏平チューブと永久磁石の組み合わせから生じる自励振動現象は、従来の人工物では試みられなかった独創的な流体現象であり、他の分野でも適用できると見込まれる。さらに、本手法が空圧式進行波移動ロボットの設計を簡素化する際にも適用可能なことが実験的に示された。

研究成果の概要(英文)：Aiming to simplify the piping and wiring of the pneumatic drive system and to make it completely powerless, we challenged to develop a design method for a novel pneumatic drive system that induces self-excited vibration from a constant supply pressure and periodically switches the internal pressure of the actuator. First, we developed a coin-sized tube-shaped vibrator with a mass of about 1g, consisting of a flat tube, a restraining part, a permanent magnet, and a holder. Next, we clarified the design conditions for generating periodic pressurization and depressurization operations in a two-port system in which a pressure source is connected to the input side of the vibrator and an actuator is connected to the output side. Furthermore, we expanded the configuration to three or more ports, and implemented it in a completely powerless traveling wave mobile robot to verify the effectiveness of the proposed method and clarify remaining issues.

研究分野：ロボット工学

キーワード：自励振動 空圧駆動

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

生物にみられる進行波を利用した移動は、従来の剛体構造による無限回転運動では対応しづらい狭隘地形や脆弱な環境でも、踏破できる可能性を秘めている。当該手段を工学的に具現化するにあたって、柔軟かつ出力密度の高い空圧駆動のソフトロボットは、有望な駆動系の一つである。しかし、現状の空圧駆動系には上記用途への適用を阻む以下の課題が内在している。

その一つに、たとえソフトなアクチュエータを局所的に設計しても、配管・配線・弁を含めると、システム全体の構成が複雑化し、柔軟かつコンパクトな構成の実現が困難となる。

また、従来の一般的な電磁弁や機械式切換弁には、弁を小型化すると有効断面積も縮小するため、大流量を許容する弁の設計が困難となることも課題となっていた。

もし、電磁弁や機械式切換弁とは異なり、アクチュエータを駆動する作動流体自体で弁を切換えてしまう駆動系を導入できれば、配管や配線の簡素化・完全無電力化・駆動の高速化を同時に実現する、全く新しい空圧駆動系が展開できることとなる。

2. 研究の目的

本研究では、空圧エネルギーで誘発される自励振動現象に着目し、アクチュエータの内圧を自動的に切換えるチューブ形振動子を導入して、スリムかつ柔軟性を有する空圧駆動系の設計手法の構築を目的とする。これにより、1つ入力ポートに空圧エネルギーを供給するだけで、複数の出力ポートに周期的かつ高速に圧力切換動作を生成できる全く新しい自励振動デバイスの創成につながる(Fig.1)。その実現にあたって、従来の人工物では試みられなかった偏平チューブと永久磁石による流体振動現象に着目する。

3. 研究の方法

小型化と高速化を図れる自励振動式空圧駆動システムを創出し、柔軟かつ高出力の空圧式進行波移動ロボットへの応用を目指して、以下3項目を研究の柱とする。まず、チューブ形振動子の動作解析および設計方法の確立を目指す。次に、進行波を生成する駆動系への適用を目指し、 n ポート($n \geq 3$)に接続可能な構成への展開を目指す。最後に、完全無電力による進行波移動ロボットを開発し、提案手法の有効性を検証する。

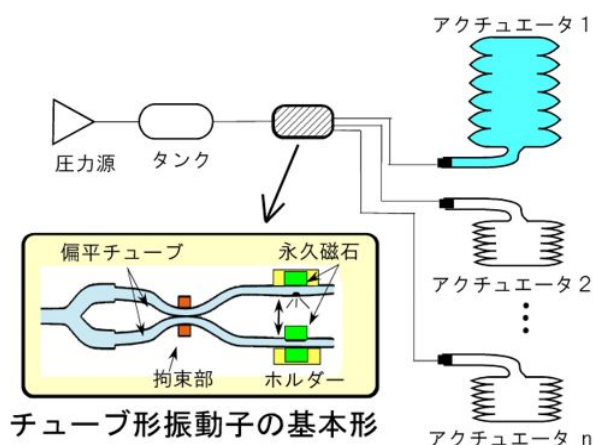


Fig. 1 本研究で目指す空圧駆動系の概念図

4. 研究成果

4.1 自励振動の切換圧力および周波数を決定づける振動子の設計パラメータの解析

切換圧力を定める物理量として、永久磁石の吸着力・振幅・および偏平チューブ(Fig.2)の受圧面積に着目し、それらの関係を数理的に明らかにするとともに、振動子の力学的モデルを構築した。また、実験により、供給圧力が変動しても、(1)切換圧力は設定値を維持できること、(2)供給圧力が高くなると振動数も増加すること、などを確認した。さらに、偏平チューブの設計パラメータ(長さ・幅・粘性係数)拘束部における拘束具合の影響が振動条件に与える影響を実験的に明らかにした。

これらをもとに、駆動する空圧アクチュエータの特性が与えられたとき、当該アクチュエータを目標の周波数および切換圧力で駆動するための、チューブ形振動子の設計法を構築した。構築した設計法の妥当性を検証するために、復元力・粘性抵抗・負荷などの動作条件が異なる様々なタイプの空圧アクチュエータを用いて自励振動式空圧駆動システムの動作実験(Fig.3)を行った。その結果、当該設計法から導かれる理論値と概ね一致する振動数の生成が実験により確認され、本手法の妥当性を確認できた。

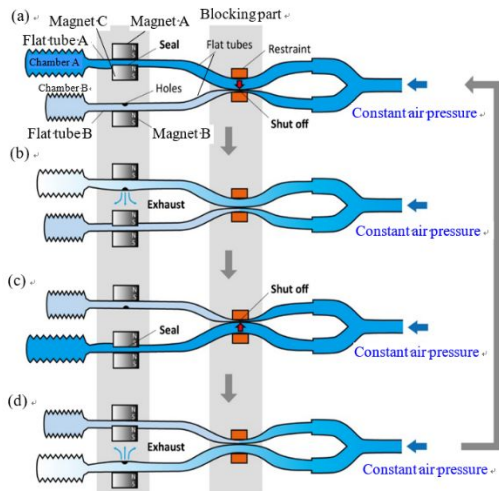


Fig. 2 自励振動弁の動作原理

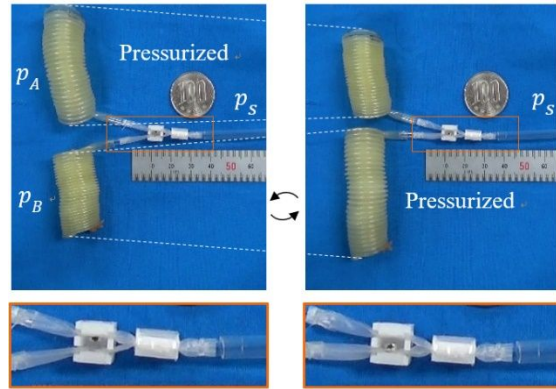


Fig. 3 試作した自励振動弁と螺旋状チューブアクチュエータを自動的に交互に加減圧させている様子

4.2 nポート(n ≥ 3)に接続可能な構成への展開

3個以上の空圧アクチュエータに自励振動を生成するための振動子を検討した。新たな振動子として、1つ前のステップで駆動されるアクチュエータの内圧を検知する構成を導入した(Fig. 4)。本構成により、当該アクチュエータの内圧上昇がトリガとなり、次のステップのアクチュエータの加圧を誘発する。また、上記振動子を30mm立方内の小型サイズに収めるため、チューブの積層構造を開発した。シート状波形生成アクチュエータと上述の振動子の融合により、進行波を生成しながら推進可能なことを実験的に確認した(Fig. 5)。

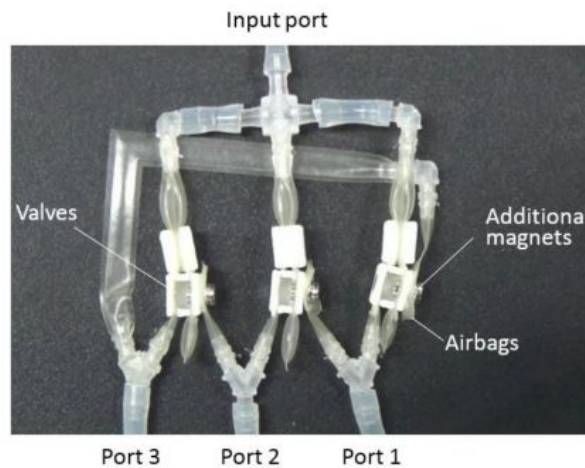


Fig. 4 3ポート切換式自励振動弁の外観

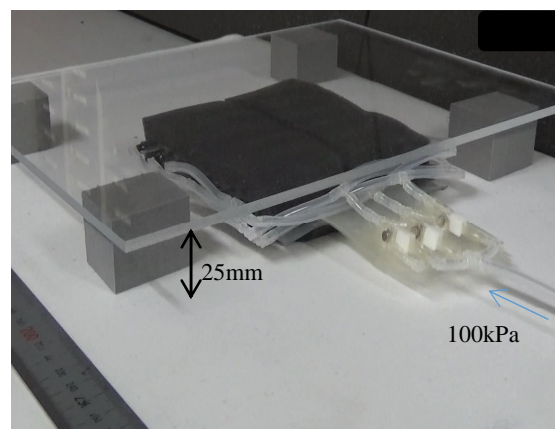


Fig. 5 3ポート出力型自励振動弁により単一のチューブから供給される一定空気圧のもとに、進行波を生成しながら狭隘空間内を移動しているシート状波形生成アクチュエータ

4.3 完全無電力による進行波移動ロボットの創製

ドライアイスの三重点における液化現象に着目した小型大容量空圧源との融合を図った。ドライアイスと水を密封容器に入れて放置すると、圧力0.4MPaで三重点に達し液化する現象は先行研究より確認済みである。本状態では、液化から気化に瞬時に変換されるため、タンクを用いなくとも大流量を得られる。チューブ形振動子の入力側に当該圧力源を適用し、空圧システムのスリム化を図った。

そして、本研究で構築した自励振動式空圧システムの設計手法を進行波生成式柔軟移動ロボットに適用した (Fig. 6)。複数個の螺旋偏平アクチュエータを交互に自励振動で駆動させて進行波を生成することにより、理論値にほぼ匹敵する速度で推進可能なが確認された (Fig. 7)。これにより、本研究での提案手法の実機への有効性が検証された。

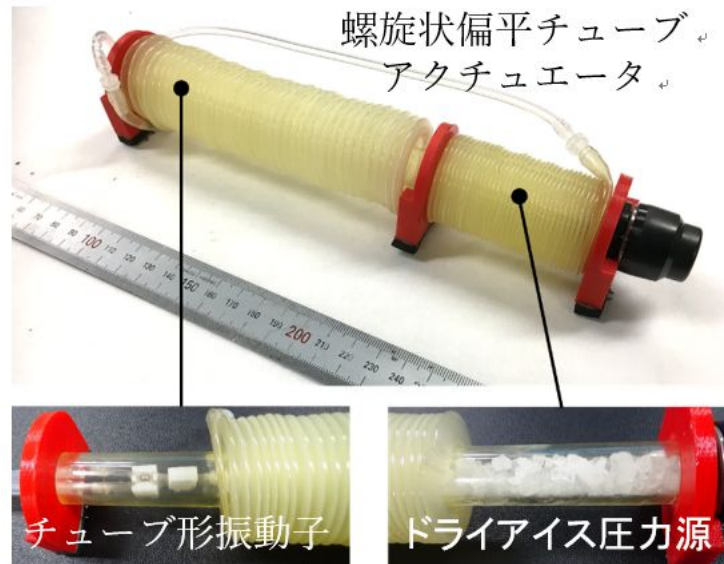


Fig. 6 開発した完全無電力による進行波移動ロボットの構成

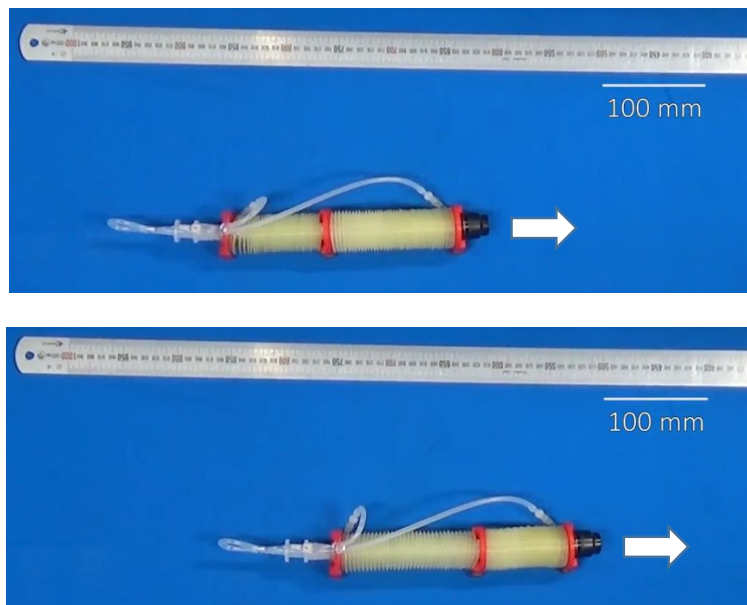


Fig. 7 自励振動弁による自動切換動作の有効性を検証するために試作した進行波移動ロボットの移動の様子

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yuji Miyaki, Hideyuki Tsukagoshi	4. 巻 Vol.5, No.3
2. 論文標題 Self-Excited Vibration Valve That Induces Traveling Waves in Pneumatic Soft Mobile Robots	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE ROBOTICS AND AUTOMATION LETTERS	6. 最初と最後の頁 4133/4139
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/LRA.2020.2978455	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	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 塚越秀行、宮木悠二
2. 発表標題 進行波の生成を目指した自励振動式柔軟小型バルブ
3. 学会等名 2019年春季フルードパワーシステム講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宮木 悠二、塚越 秀行
2. 発表標題 進行波を生成する自励振動式柔軟小型バルブ
3. 学会等名 第37回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 飯田侑美、塚越秀行
2. 発表標題 自励振動バルブの同期現象を用いた流体圧ソフトアクチュエータ群の制御
3. 学会等名 第20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（SI2019）
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 流体圧制御装置、流体圧作動バルブ、それを用いた移動体、搬送装置	発明者 宮木悠二、塚越秀行、 今井勇樹	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019- 18058	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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
---------	---------