

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 30 年 6 月 20 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05922

研究課題名(和文) 流体のみにより動作・制御される自己推進柔軟マニピュレータの3次元化

研究課題名(英文) Self propulsive soft manipulator driven and controlled by fluid power capable of three dimensional motion

研究代表者

伊達 央 (Date, Hisashi)

筑波大学・システム情報系・准教授

研究者番号：50531985

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：ヘビの推進原理に着想を得た、流体によって動作・制御される柔軟マニピュレータについて3次元的な動きを実現する方法を検討した。ヘビは体幹を屈曲させることのみにより推進力を得ることができるが、この原理をマニピュレータに応用することで、複雑な空間に入っていくことのできる工業用あるいは医療用の内視鏡の実現が見込まれる。本研究では、これまで実現していた体幹曲線の曲率微分に基づく制御を流体の作用のみで駆動制御する方法を発展させ、2次元的な運動しかできなかった問題を解決する。

研究成果の概要(英文)：This research aims at achieving three dimensional motion of a soft manipulator driven and controlled by fluid. Inspired by snakes capable of progressing solely by bending their body, a kind of endoscopic device that can progress into a complicated narrow space is expected to be realized by the similar mechanism. In this research, a two dimensional hyper-redundant manipulator with curvature derivative control is revised to realize three dimensional motion.

研究分野：非線形制御、移動ロボット、ロボット制御

キーワード：柔軟マニピュレータ 流体機械 ヘビ型ロボット 内視鏡

### 1. 研究開始当初の背景

医療用の内視鏡や床下点検等に用いられる工業用内視鏡は先端のみが屈曲し、複雑に入り組んだ空間に挿入すると座屈によりうまく奥に到達できない。これに対し生体のヘビは、全身において屈曲力を発生し、狭い空間において巧みに移動する。このヘビの推進原理に着想を得て、代表者はこれまでに定式化した曲率微分に基づく制御手法を取り入れることで、先端のみならず全体で屈曲力を発生する能力をもつマニピュレータを開発した(図1、文献)。これは圧縮空気のみを制御・駆動に用いるもので、先端部分の方向をワイヤを通じて変化させると、全体的にその方向に進路を変え、複雑に入り組んだ壁面を押しながら推進力を発生させるものである。提案機構は電気モータを使用しないため設計自由度が高く、ヘビのような運動能力をスリムな体幹により実現する可能性を持った機構であったが、2次元平面内の運動に限定されていたため、現実的な問題に適用可能とするために3次元空間を移動できる能力が求められていた。



図1 2次元空圧駆動マニピュレータ

### 2. 研究の目的

先行研究における流体の作用のみにより動作・制御される自己推進マニピュレータが歯車とピストン機構を用いた原理から、2次元平面内の運動に限定されていた。これを3次元的な運動が可能なものとなるような新たなメカニズムを考案し、その有効性を明らかにすることを目的とする。

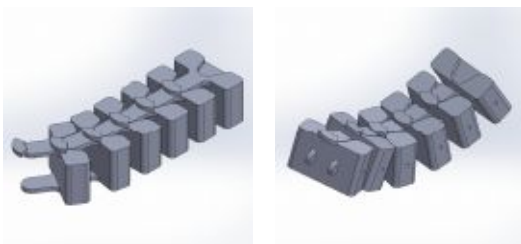


図2 左右のみ屈曲する2次元平面運動(左)  
左右上下屈曲可能な3次元運動(右)

### 3. 研究の方法

本機構の特徴は、「一つ前の関節角と同じ角度になるように、後続の関節角を制御する」という分散制御により制御が実現される点である。すなわち、それぞれの関節角をどのような角度にすべきかを一つの制御器により制御することなく、各関節で個別に制御することにより実現できるため、関節数が増

えても複雑さが増加しない。従来手法の問題点は、一つ前の関節角の情報を後続の関節角に伝達するために平歯車を用いていた点にあった。平歯車が機能するためには、対となる歯車の軸は平行でなければならず、このため実現可能な運動が2次元平面内に限られていた。

この問題を解決すべく、まず、歯車機構の噛み合わせに遊びをもたせ、かつ本体の各関節に柔軟性をもたせることで、受動的に上下方向の屈曲を実現する方法を検討した。この方法は本研究の計画段階から構想していたものであった。しかしながら、角度伝達と柔軟性を歯車により両立するのは困難であることが判明し、別の方法を模索した。

剛体リンクにより結合された折れ線状の胴体を想定するのではなく、円弧状に柔軟に屈曲するチューブ様の「節」が連なった構造の胴体を考え、一つ前の「節」の曲率が後続の節に伝達され、後続の節の曲率が一つ前の節と同じ曲率になるような制御手法を考案した。図3はこのアイデアを2次元運動について説明するものである。図には上下二つの節が描かれており、体幹の外周に沿ってワイヤが張られており、一方が節に、他方が摺動弁に結合されている。同様の構造が反復する。体幹を通じて高圧空気が供給されている(黄色)。屈曲していない間、摺動弁は閉じた状態にある。

上の節が屈曲すると(図中央)ワイヤに引っ張られて中央の摺動弁(赤)が右方に移動する。すると、摺動弁(青)との間に間隙が生まれ、高圧空気が右下側の蛇腹に流入する。蛇腹は高圧空気により押し広げられ下側の節を屈曲させる。すると下側の節に張られているワイヤにより摺動弁(青)が移動し、やがて間隙が閉じたところで蛇腹の加圧も停止する。本手法の特徴は、直行する屈曲を妨げない点にある。すなわち、曲率微分制御を実現する機構の要素であるワイヤや蛇腹が、別方向の屈曲を妨げることが無いため、同様の屈曲機構を直行させるように組み合わせることで、3次元的な屈曲が可能となる。

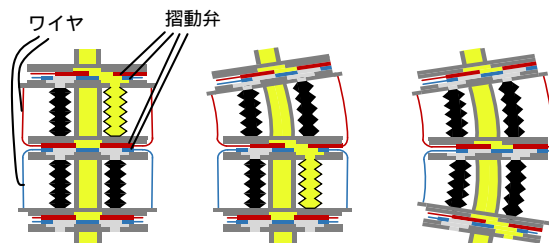


図3 二重摺動弁とワイヤを用いて曲率微分制御を実現する機構

本研究では、上記アイデアを実現すべく、機械工作により複数の機構を試作し、評価した。本手法において最も重要であるのが二重摺動弁の機能の実現であり、複数の改良を要した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 高精度加工による二重摺動弁

二重摺動弁は二つの弁体が同時に移動しつつ漏れを防ぐ必要があるが、シールが難しい。そこで、弁体の厚みを精密に加工することにより、隙間を数 $\mu$ 程度に抑えることで漏れを小さくすることを試みた。図4は、炭素鋼(S45C)を精密加工して作成した試作機である。図の右側が上の節における摺動弁を移動して屈曲を試みている状態を示しているが、屈曲を目視することができなかった。分析の結果、弁体の僅かな傾きにより大きな漏れが発生し、蛇腹に有効な圧力が作用しないことが判明した。二つの弁体が同時に摺動することに起因する現象であり、一度漏れが発生するとその隙間を拡大する方向に空圧が作用することが観察された。これにより、隙間の抑制だけでは気密を保持できないことが明らかとなった。

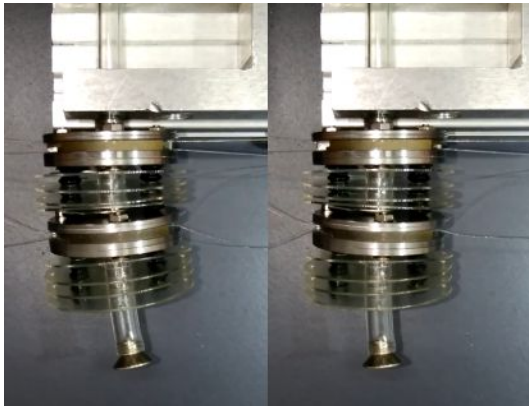


図4 炭素鋼の精密加工による二重摺動弁を備えた屈曲実験の様子

##### (2) 押え板による気密の向上

隙間を抑制するだけでは二重摺動弁を正しく動作させることができないため、図5のように、押さえ板をゴム(オリング)により押さえつけ、常時摺動面を一定の圧力で予圧することとした。これにより気密が大幅に向上することが明らかとなった。

図6はこれを検証した様子であり、まず最上部の摺動弁を手動で摺動させて上の節を屈曲させ、その屈曲により中央の摺動弁が動作して下の節が自動的に屈曲することを確かめた実験の様子である。精密加工のみによる摺動弁の実験(図4)と比べ、大きな屈曲が発生していることが確かめられた。

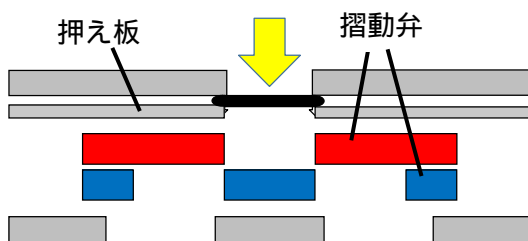


図5 押え板による摺動弁の予圧

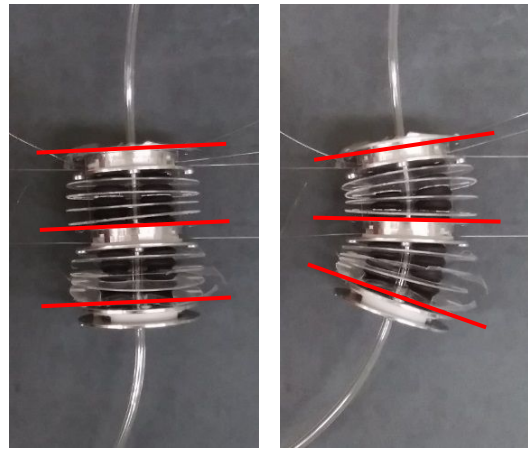


図6 押え板により気密を向上させた試作機による屈曲実験

##### (3) 結言

本研究は、3次元運動可能なマニピュレータの開発を目指して行われた。先行研究において歯車機構を用いていたために2次元運動に限定されていた制約を打ち破るため、ワイヤと二重摺動弁を用いた機構により曲率微分制御の実現を試みた。研究期間内においては2次元運動の検証にとどまり、真の3次元の運動が実現できたわけではないが、3次元マニピュレータの実現において重要な問題を解決し、道筋が立てられたものと考えている。今後は、本研究で得られた知見を活かし、前後左右に屈曲可能な構造を実現する予定である。

##### <引用文献>

伊達 央、滝田 好宏、空圧駆動超冗長アクチュエータによるマニピュレーション、日本機械学会論文集(C編)、77巻784号、pp.4425-4433、2011

##### 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)

(学会発表)(計 2件)

日原 弘太郎、伊達 央、大矢 晃久、曲率微分制御により蛇行推進する流体駆動マニピュレータの3次元化、第18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論文集、No.3A6-14、2017  
日原 弘太郎、伊達 央、大矢 晃久、曲率微分制御による流体駆動柔軟マニピュレータ、日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2018 論文集、No.1P1-H09、2018

〔産業財産権〕

出願状況（計 1 件）

名称：アクチュエータ  
発明者：伊達 央  
権利者：国立大学法人筑波大学  
種類：特許願  
番号：16-092  
出願年月日：平成 30 年 6 月 1 日  
国内外の別： 国内

〔その他〕

ホームページ等  
<http://cr.iit.tsukuba.ac.jp>

6．研究組織

(1)研究代表者

伊達 央 (DATE, Hisashi)  
筑波大学・システム情報系・准教授  
研究者番号：50531985

(2)連携研究者

大矢 晃久 (OHYA, Akihisa)  
筑波大学・システム情報系・教授  
研究者番号：30241798

(3)研究協力者

日原 弘太郎 (HIHARA, Kotaro)