

令和 2 年 4 月 21 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06255

研究課題名(和文) 柔軟繊維アクチュエータを用いた全体が柔軟に変形可能な検査用移動ロボット

研究課題名(英文) Flexible mobile robot for inspection driven by ciliary actuators

研究代表者

木村 仁 (Kimura, Hitoshi)

東京工業大学・工学院・助教

研究者番号：60376944

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：生物の水力学的骨格に学び、密閉した袋状構造を利用した全体が柔軟な機構の開発を行った。本申請課題では生物の繊毛運動に注目し、有効打と回復打を行うアクチュエータの開発を行った。過去の申請者らの研究では複数の袋状構造を組み合わせることで繊毛駆動機構を実現していたが、本課題では特殊な形状の袋状構造を利用することでひとつの袋状構造で繊毛アクチュエータを実現し、必要な制御弁の数を低減した。また、小型大流量の機械式弁を層状に構成し、積層することで多数の管路を制御できる専用弁の開発も行った。これらの技術を利用し、薄型全方向繊毛移動ロボットを製作した。さらにこの技術を利用して、柔軟に変形可能な寝具の開発も行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

柔軟な機構は近年研究が増加しつつあるものの、本研究の様に構造部品まで全て柔軟なものを利用して全体が柔軟に変形する機構はまだ少ないと言える。特に繊毛アクチュエータについては、いくつかの既存研究があるものの、やはり構造全体が柔軟に変形するものは少ない。機械システムが人間に近い空間に存在することが予想される昨今の情勢において、本研究の様に全体が柔軟な機械システムは安全性および利用者の安心感の面から重要な意味をもつと考えられる。このような観点から人体に直接触れる可能性のある全体が柔軟な機械システムは社会的意義から考えても有用であると言える。

研究成果の概要(英文)：A hydraulic skeleton of living organisms can be applied to flexible mechanisms with sealed bag structures. In this application, we focused on the ciliary movement of living organisms and developed a ciliary actuator that performs effective and recovery strokes. In our previous research, the ciliary actuator was realized by combining multiple bags. This mechanism requires a large number of control valves. In this study, we have developed a new actuator by one bag with a special shape. The new actuator enables to reduce the number of control valves. This study also developed a dedicated mechanical valve that can control a large number of pipelines by stacking layer structured mechanical valves. Utilizing these technologies, a thin omnidirectional ciliary mobile robot was manufactured. In addition, we have also developed flexible bedding with these technologies.

研究分野：フレキシブルメカニズム

キーワード：水力学的骨格 柔軟ロボット 繊毛アクチュエータ 機械式制御弁

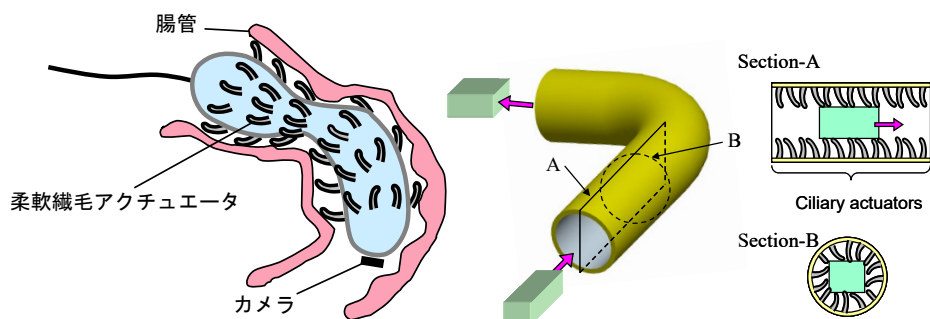
## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

全体が柔軟な機構は従来の剛体を利用した機械に比べて非常に安全な上、環境に適応的に変形可能という特徴を有するが、大変形などの問題から国内外を問わずその研究例は少ない。柔軟な袋状構造体は周囲を傷つけにくく、外力を受けても適応変形するという受動的柔軟性を有している。しかし、柔軟アクチュエータで剛体部品を駆動する様な機構の研究例は多いが、提案機構のように全体が柔軟に変形可能な構成のものは大変形の問題や実機製作の困難さからほとんどなく、全く新しい分野の機構と言える。

### 2. 研究の目的

本申請課題では狭隘な地形に利用可能な生物の繊毛運動に着目した。一般に繊毛は推進力を生み出す有効打と、次の有効打の準備として繊毛を元の位置に戻す回復打とを繰り返すことで進行波を生成している。繊毛運動を生じる類似の研究は既にいくつか存在するが、いずれも繊毛部分の材料の剛性を利用した、言わば硬い繊毛の機構である(1)(2)。しかし、提案する機構はウレタンゴムのような非常に柔軟な材料を利用するものである。提案機構は図1(a)に示すように、アクチュエータが柔軟なだけでなく本体部分も方向や体幹幅を変更可能であり、非常に地形を傷つけにくく、床下や瓦礫内部、配管内のような狭隘地形の探査用途に限らず腸内検査のような生体への応用にも有利であると考えられる(3)。また、柔軟なシート上に多数の繊毛アクチュエータを配置した柔軟繊毛アクチュエータシートは薄型の柔軟な搬送コンベアとして曲率が変化するように曲面の上にも配置できる(図1(b))。



(a) 腸内検査用柔軟移動機構

(b) 狭い曲面に貼付可能なコンベア

図1 提案する柔軟繊毛アクチュエータの応用例

提案する繊毛アクチュエータは2気室による単方向駆動型と3気室による双方向駆動型が考えられる。図2は2気室の繊毛アクチュエータの駆動の様子を示した模式図である。図内の気室1は回復打用の補助気室であり、気室2が有効打における繊毛の役割を果たす。回復打用の気室1が加圧された状態を初期姿勢とし、気室1を減圧し気室2を加圧すると気室2は内圧を受けてまっすぐな形状になろうとして有効打となる。次に気室2を減圧して気室1を加圧すると、気室2は柔軟になって地形に対して力を発揮せずに初期姿勢に戻る。図中の気室2の右隣(気室1の反対側)にもう一つ補助用の気室3を加えると、双方向に駆動可能な3気室構造の繊毛となる。

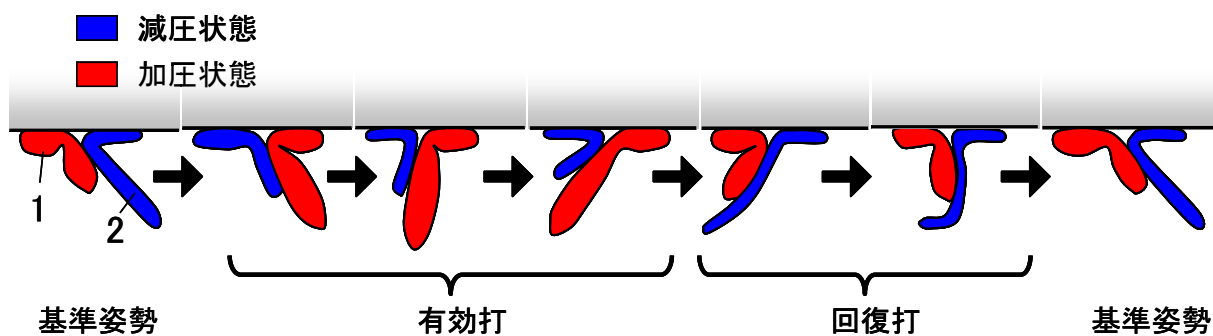


図2 柔軟繊毛アクチュエータの駆動原理

提案アクチュエータでは屈曲部分の体積変化が外界に対する仕事を発生させている。繊毛単体のサイズを大きくすると、消費流量に対する外部への仕事量の割合が減少するため、繊毛は小型のものを多数利用することが望ましい。

小さい繊毛を多数用意するために、本研究では一つの管路に複数の繊毛アクチュエータを楕円に成形する。この楕円の袋状構造体は大きさの異なるものを作成し、柔軟シート上に複数配置すると全体的に柔軟な繊毛アクチュエータシートが完成する。図3は3気室構造のアクチュエータシートの模式図である。

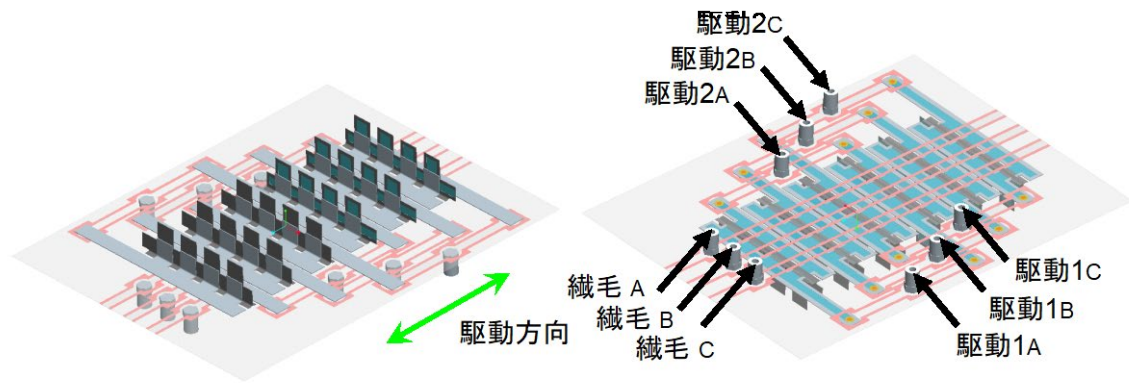


図3 柔軟繊毛アクチュエータシート

楕円形繊毛を利用したアクチュエータシートの動作確認のために、2気室構造の繊毛アクチュエータシートを柔軟な本体に丸めて貼り付けた管内移動ロボットを試作した。体節に相当する部分は受動関節になっている。

図4はその動作の様子である。透明な管の直径は90mm、管の曲率半径は約100mmである。腸内検査のような用途には試作したロボットのサイズはまだ大きいものの、本試作機は図中の180°の屈曲部分を約30秒で通過した。

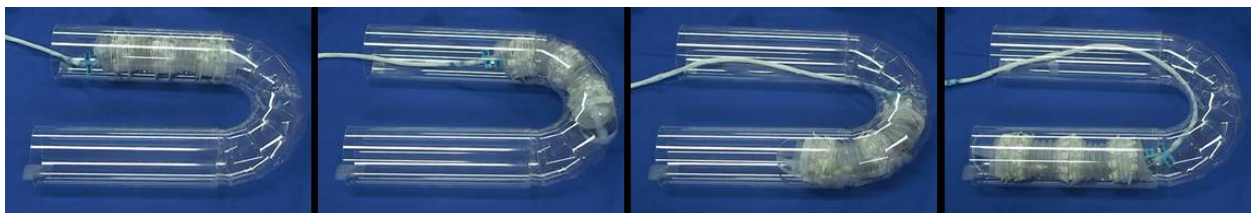


図4 試作管内検査ロボットの動作の様子

本申請課題ではこのような繊毛アクチュエータを利用した実用的な移動ロボットの開発を目的とする。また、バッテリーやポンプなどを全て搭載した、自立型移動が可能なもので、本体の方向を変更可能な能動関節と、能動的な体節幅調整機能をもつ狭隘地形用繊毛アクチュエータ移動ロボットの開発を最終的な目的とする。

### 3. 研究の方法

試作している袋状構造の柔軟繊毛アクチュエータは、材料に0.1~0.3mmの厚さのウレタンゴムシートを超音波溶着で加工したものを利用してしている。しかし、薄肉なため耐圧が低い問題がある。そこでアクチュエータの出力を強化するために、申請課題では繊維材料でアクチュエータ外部を補強する方法を計画する。本手法によってアクチュエータの高出力化を実現できれば、柔軟繊毛アクチュエータを利用したロボットの実用的な応用が可能になると考えられる。また、同時に複数のアクチュエータを制御可能な大流量の機械式制御弁の開発も行う。

また、自立移動ロボットについては、体節部を袋状構造で変形させて進行方向を変更可能にする機能および、体幹部の圧力に応じて体節の内圧を自動制御する弁を開発し、体幹幅を自動調整する機能を実現することを計画する。

### 4. 研究成果

(1) Z字状に折れ曲がった複雑な形状を有する1気室型の繊毛アクチュエータを量産する目的で、金属型や、紙を利用して選択的に溶着箇所を指定することでアクチュエータの加工に必要な時間の短縮を図った(図5)。

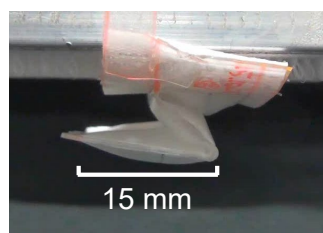


図5 新型Z字アクチュエータの試作機

(2) 非線形有限要素解析を利用して、繊毛アクチュエータの挙動を計算した(図6)。複数のアクチュエータサイズでシミュレーションした発生力の結果を利用し、Box-Behnkenの実験計画法から必要な発揮力に応じた適切なアクチュエータ幅と長さについてモデル化した。

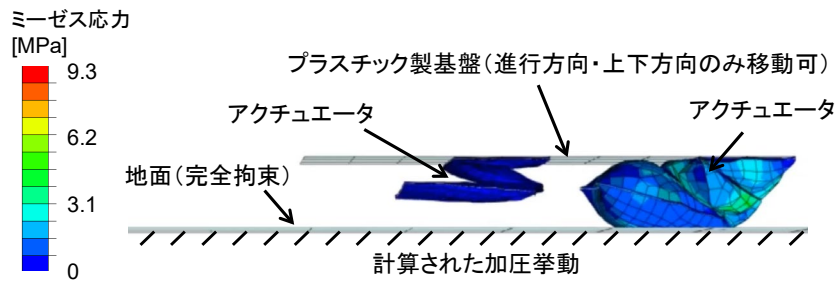


図6 新型Z字アクチュエータの試作機

(3) 複数のアクチュエータを協調的に同時制御する目的の機械式多分岐弁“MACS-Valve”の弁構造を改良し、これまでカムを利用した弁の層数が2層までだった制限をなくす構造とし、理論的にはいくらかでも積層可能な設計とした。この機械式弁の試作を行い、3層のカム(1層で2カム=4管路)で同時に12の管路の同時制御を実現した(図7)。

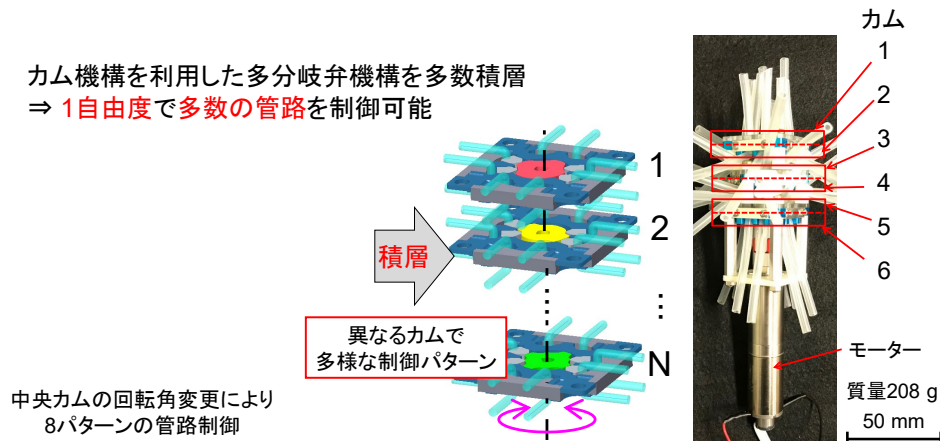
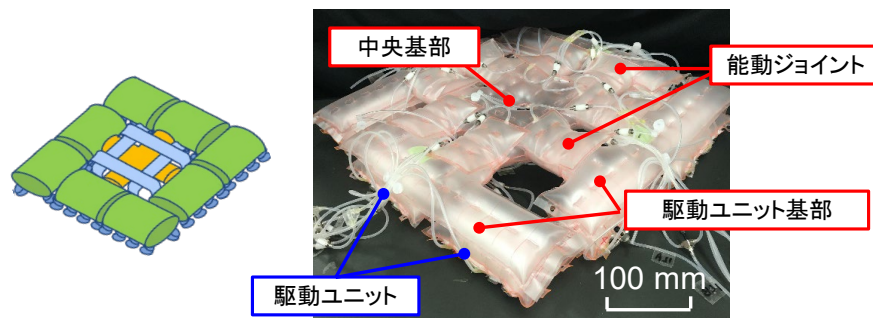


図7 カムを利用したピンチ型小型大流量多分岐機械式弁

(4) 柔軟袋状構造の表面上記(1)で述べた新型繊毛アクチュエータを複数貼り付けた長方形の駆動ユニットを正方形の周上に配置することで、四辺にクローラが配置されたのと同様な構造となった、超心地旋回も可能な四角形の扁平な全方向移動ロボットを提案した。このロボットは正方形の中心部に配置された柔軟能動関節群によって駆動ユニットを選択的に上下することも可能であり、移動に利用しない方向の繊毛アクチュエータを有する駆動ユニットは地面から浮上する構造になっている。この機能によって効率的な平面移動や、段差乗り越え動作などが期待される。試作機ではリフティング機能を利用することで、平面上で1.5 mm/sだった移動速度が4.2 mm/sまで向上することが確認できた(図8)。



薄型全方向ロボット概念図

試作機の概観

図8 提案薄型全方向移動ロボット概念図と試作機の概観

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 篠嶋透, 木村仁, 伊能教夫
2. 発表標題 水力学的骨格を利用した柔軟繊維全方向移動ロボット
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 安井大貴, 池田隆史, 木村仁, 伊能教夫
2. 発表標題 袋状構造を利用した柔軟なアクチュエータの開発
3. 学会等名 第23回日本IFTOMM会議シンポジウム
4. 発表年 2017年～2018年

1. 発表者名 安井大貴, 篠嶋透, 池田隆史, 木村仁, 伊能教夫
2. 発表標題 柔軟繊維アクチュエータによる自立走行
3. 学会等名 電気学会 電子・情報・システム部門大会
4. 発表年 2017年～2018年

1. 発表者名 安井大貴, 木村仁, 伊能教夫
2. 発表標題 小型大流量の多分岐・多積層式機械弁とその動作実験
3. 学会等名 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(SI2017)
4. 発表年 2017年～2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔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
--	---------------------------	-----------------------	----