

令和 2 年 6 月 23 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：17K06253

研究課題名(和文) 多重チューブアクチュエータの開発

研究課題名(英文) Development of Bundled Tube Actuators

研究代表者

高山 俊男 (Takayama, Toshio)

東京工業大学・工学院・准教授

研究者番号：80376954

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では複数本の空気圧で膨張収縮可能なシリコンゴムチューブを周期的に編み、それらを順に加減圧することで駆動するソフトアクチュエータを開発した。3本のチューブをらせん状に編んだ管内推進装置は、使用目的の管内径から、どのような設計パラメータとすれば利用可能となるかの理論解析を行い、6本のチューブを編んだ管内推進装置は、分岐管等で任意の進行方向に進むための制御方法を開発した。また円筒状に編んだチューブ内に軸を通した1軸2自由度アクチュエータは内視鏡を保持駆動することが可能で、医療への応用が期待される。面状に編んだアクチュエータは、それ自身が移動したり、上に載せた物を運搬することが可能であった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ソフトアクチュエータは軽量で高い柔軟性を持ち、パワーアシスト装置やリハビリ装置等の人間に働きかける装置への応用が期待される。一方で空気圧を用いたゴムの伸縮を利用するため、繰り返し使用すると壊れやすく、安価で大量生産が可能であることが求められる。本研究では複数本のシリコンゴムチューブを周期的に配置し、順に加減圧することで駆動するソフトアクチュエータを提案し、管内推進装置、1軸2自由度アクチュエータ、面状2自由度アクチュエータ等を開発した。

研究成果の概要(英文)：In this research, we developed some soft actuators that consist of bundled silicone rubber tubes. The tubes are inflated and deflated periodically by an air pressure to generate waving motion. The in-pipe propulsion device made by helically bundled three tubes was theoretically analyzed its deformation of the body. It can be used to design the parameter of the device so that it can be used in a target pipe to move. Moreover, we developed a control method of 6-braided tubes in-pipe mobile device that can select the progress direction at the branched pipe. A device that has a rod in a cylindrically bundled tubes can drive its rod to the axis and rotational direction. It can drive an endoscope for medical use. Moreover, a plane knitted device can move or carry an object on it to two directions on a plane surface.

研究分野：メカトロニクス

キーワード：ソフトアクチュエータ 管内移動ロボット

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

ロボットはこれまでは工場の様な人から隔離された空間で利用されており、こうしたロボットに用いられるアクチュエータには高い剛性と正確な位置決め動作が求められてきた。一方近年ロボットが人から隔離されない空間で用いられるようになってきており、人と協調作業を行ったり、人に装着することでパワーアシストを行ったり、手術装置やリハビリ装置等では人を操作対象とした動作を行ったりするようになり、こうしたロボットでは高いコンプライアンス性や電氣的な安全性が求められるようになった。空気圧駆動装置は、空気の圧縮性による高いコンプライアンス性と動作部には電気を用いていないため人やガスなどの環境に対して安全であるという特徴を持ち、こうした用途に適しており、中でも装置そのものを柔軟なゴム状の材質で構成し、内圧をかけることでの膨張収縮を用いて駆動するソフトアクチュエータは、駆動部に金属を用いないことから小型軽量化が容易であるという特徴を持つ。ソフトアクチュエータ自体は1960年代頃に盛んに研究がおこなわれており、この頃に論文等も多く出ている。しかし、このころのソフトアクチュエータの作り方は、簡単な形状の部材を組み合わせた型でシリコンゴムを注型したり、ゴムシートなどを貼り合わせて作っているため、構造が簡単で、複雑な動作もできなかった。一方近年、安価な立体造形機の普及により、複雑な形状の型が試行錯誤的に作れるようになり、様々な形状のソフトアクチュエータを作ることが可能となったため、複雑な動きや多自由度動作をするソフトアクチュエータの開発が盛んになっている。ソフトアクチュエータは柔軟な部品が伸縮を繰り返すため壊れやすく、実用化するためには安価に大量生産が可能で交換可能な部品とする必要がある。しかし、複雑な形状のソフトアクチュエータは、内部に複雑な形状の気室を必要とし、一体成型で作ると中から型を取り出すことができない。そのため複数の部品を作って後から貼り合わせる工程が必要となり、生産性が低く大量生産には向いていない。そのため生産性の高い簡単な構造で多自由度の複雑な動作を行えるソフトアクチュエータの開発が必要である。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は簡単な構造で複雑な動作を行えるソフトアクチュエータの開発を行うことを目的としている。提案する手法は、空気圧で膨張収縮可能な柔軟なシリコンゴムのチューブ複数本を編み、それらを順に加減圧することで装置全体が湾曲し、波を伝播することで装置自体が移動したり、装置に接触しているものを運搬したりする装置を開発することである。また加減圧の順序や周期を変えることで、異なる波を発生させ、一つの装置で多自由度な動作を実現することも目的とする。また近年細いシリコンゴムチューブを細いメッシュ状の筒で覆った細径マッキベン型の空気圧人工筋も利用可能となっており、通常のチューブでは十分な動作ができない場合には、これを同様に編むことでより大きな力で駆動できるかどうかを試す。チューブの編み方としては、紐状、筒状、面状の3種類の編み方を提案する。紐状に編んだ装置はそれ自身が移動して細い管内を移動することができることから、管内探索ロボットに利用できる。筒状に編んだ装置は内部に入れたものを動かすことができることから、棒状の物を操作することが可能となる。面状に編んだ装置は、上に載せたものを運んだり、それ自身が移動することができることから、がれきの隙間に入っていく、がれきや被災者を運び出すようなレスキューロボット等に利用できる。

### 3. 研究の方法

紐状の装置はチューブを捩り合わせて紐状にして駆動することで、蛇のように屈曲しながらパイプ内等の狭い空間内を移動できる装置を目指す。研究代表者はこれまでにチューブ3本を螺旋状に束ねて順に加減圧することで管内を前後進する1自由度の軟性内視鏡装置を提案している。この装置はチューブを加圧して螺旋状に変形する際に、初めは変形とともに螺旋の外径が大きくなっていくが、さらに変形させると螺旋の外径が頭打ちになり、小さくなってしまいうことが実験的に確認されており、これまではチューブの太さや束ねるピッチなどを試行錯誤的に変えて望ましい変型形状を求めていたが、実用化のためには、変形を数値的に求める手法を確立し、利用するパイプの太に合わせて設計パラメータを決められるようにしなければならない。そこでまずチューブの膨張によりどのように螺旋状に束ねた装置が変形するかの数値モデルを作成する。

また、この装置はチューブを右ねじりに束ねると管内で左回りに回転しながら推進し、左ねじりに束ねると右回りに回転しながら推進する。このため管内の特定の位置でとどまったまま回転することができず、任意の方向の管壁面を詳細に観察したり、分岐管で任意の方向に進んだりすることができなかった。そこで研究代表者らは

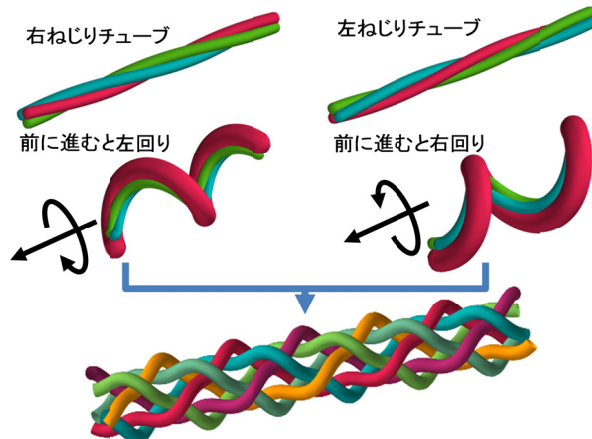


図1 六つ編み式管内推進装置

チューブ6本からなる組紐状の装置を提案していた。6本の組紐は図1に示すように右ねじり3本と左ねじり3本から構成されることから、両者を同時に進行方向に動かすことで推進動作のみ発生させて、回転動作を打ち消しあったり、両者の推進方向を逆方向に動かすことで、回転動作のみを発生させて推進動作を打ち消しあったりすることができると考え、試作した装置でそうなることも確認していた。しかしながら移動時には装置全体が蛇のように波打つため、分岐路で推進方向を選択するまでには至っていなかった。そこで本研究では単純な周期動作ではなく、これまでにない6本のチューブの加圧パターンを考えることで、分岐路で任意の方向に進める制御を考案する。

筒状の装置はチューブを筒状の組み紐の様に編み、これを駆動することで、筒内に入れた物を軸方向や軸回りに運動させることを目指す。研究代表者らはこれまでに図2に示す膨張可能なチューブ6本を筒状に編んだ装置で、内部に入れた軸を動作させることに成功していたが、その動作速度は遅く、推進力も小さかった。そこで筒状に編んだチューブの変型を定式化し、チューブの周期的な加減圧により筒内部に発生する波の振幅を求める。これにより中に通す軸の太さに応じた最適な筒の内径や編み角を求める方法を開発する。また応用先として腹腔鏡下手術等に用いる硬性内視鏡の駆動装置を考え、これを駆動できる速度と推進力を目指す。硬性内視鏡は、腹部に設けられた円筒状のポートを介して腹腔内に挿入され、外部から操作されることで、上下左右の2自由度で振られて見る方向を変え、ポートに対する押し引きと回転動作の2自由度で、視野を近づけたり、傾きを変えたりする。この内視鏡を外部から操作するロボットの開発も行われているが、4自由度を必要と、装置自体が大きくなるものとなる。一方で、提案する筒状の装置が実現できれば、装置自体をポートに組み込むことで、内視鏡の押し引きと回転動作の2自由度が実現でき、内視鏡保持ロボットはポートを傾ける2自由度だけの簡単な装置とすることが可能である。

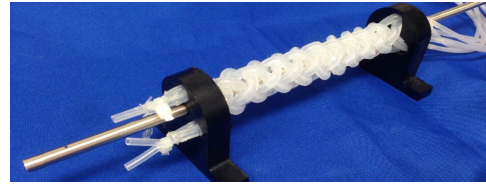


図2 円筒編み式2自由度アクチュエータ

面状の装置はチューブを編み物の様に平面上に編み、これを駆動することで面全体が湾曲し波を発生させることで、上に乗せたものを運搬したり装置自体が移動したりすることを目指す。

#### 4. 研究成果

紐状の管内推進装置の変型として、まずチューブを螺旋状に束ねて駆動する螺旋型の装置の変型解析を行った。体軸が螺旋形状に変形しても、その外側に巻き付けられたゴムチューブが体軸に対して初めの巻き付け角を維持するとするという仮定で定式化し、これにゴムチューブの直径方向と軸方向の膨張の割合を加えることで、螺旋の最大外径の大きさがほぼ予測可能となった。これにより、製造に用いるチューブ単体でその軸方向と径方向の膨張の割合を実験的に求めておけば、目的とする管に合わせてどのようなピッチで螺旋状に束ねれば良いかが設計できるようになった。図3に理論値と実験地の比較を示す。変形により螺旋のピッチが縮まり、最大外径が大きくなり、頭打ちになっている様子がわかる。また同じ外径4[mm]のチューブを用いているが、チューブを束ねる初期ピッチの違いにより最大外径も変わっていることがわかる。この結果を元に、円筒管太さから内部で移動可能な螺旋型の推進装置初期螺旋ピッチを求め、図4の様な径の異なる2本の円筒管の片側に螺旋型装置を固定することで、装置の管内移動を利用して伸縮するアクチュエータを開発した。外力の方向により螺旋の変型が異なり、押す場合と引く場合で異なるコンプライアンスを示すため、パワーアシスト装置等の、重力方向には力を出したいが、逆方向に素早く人が動かしたいときには力が抜ける様な装置で利用可能なアクチュエータとなった。

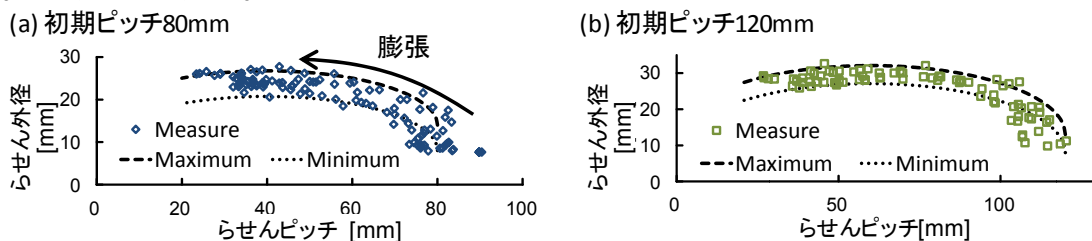


図3 螺旋状編みチューブ式管内推進装置の変型予測

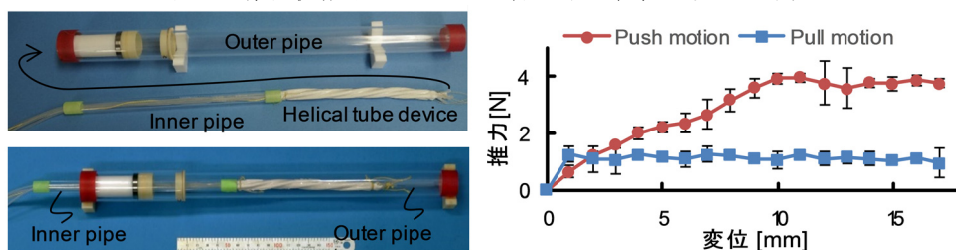


図4 螺旋捻転式アクチュエータ

また六つ編みの管内推進装置の変型については、これまでは図5のパターン1, 2の様に、右回りのチューブ R1, R2, R3 の3本と左回りのチューブ L1, L2, L3 の3本をそれぞれ順番に加減圧してただけであったが、この方法では右回りと左回りで周期をずらしても振幅の方向が変わるだけで、蛇のような首振り動作自体は変わることが無かった。そこでパターン3の様に特定のチューブを使わない加圧方法をする、パイプ内で特定の方向に装置を押し付けながら首振り動作が出来ることを発見した。この原理を用いて外径 2.5[mm]のシリコンゴムチューブ6本をピッチ 44[mm]で編んだ装置を用いて、図6の様に内径 14[mm]の管の分岐部で自在に進行方向を選べる装置を開発した。また同等の大きさで内視鏡を取り付けた装置も開発し、管内で駆動した。本装置は移動時に首振り動作を行うため画面が大きく左右に振られ、視野が安定しないが、駆動周波数に合わせて画像を間引くことで、先端が同じ方向を向いている状態の画像だけを抽出し、視野を安定させることができることも確認した。

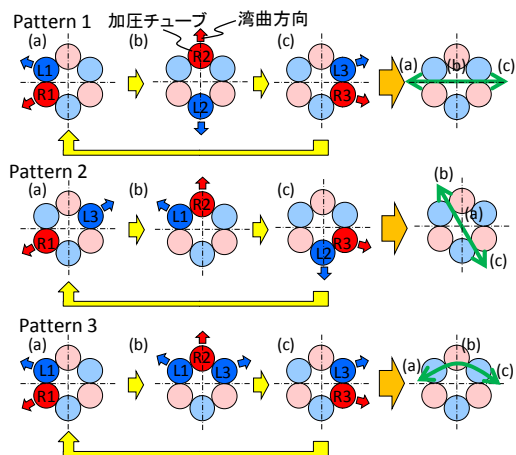


図5 六つ編み推進装置の駆動パターン

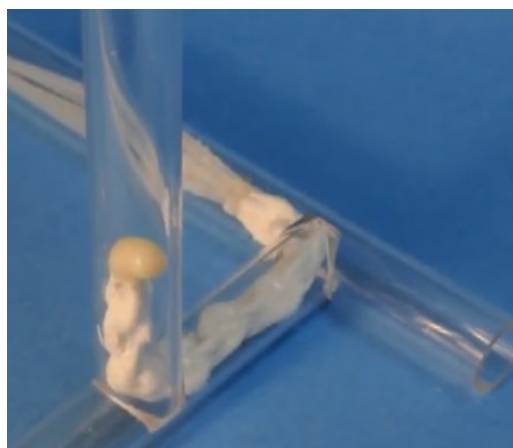


図6 分岐管での推進実験

筒状の2自由度アクチュエータに関しては、その変形を考えると、円筒全体が湾曲したときに、長いチューブが中心軸から離れた位置に、短いチューブが中心軸に近い位置にくる。すなわち中に入れた軸に接触し駆動するのは短いチューブである。そのため図7の様に加圧によって伸びるチューブを用いた場合、軸に接触するのは加圧していないチューブである。そのため伸びたチューブが容易に座屈してしまい軸に大きな力を加えにくい。一方加圧によって縮むチューブを用いれば、加圧したチューブが軸と接触するため大きな力を加えやすい。そこでチューブに細径マッキベン型空気圧人工筋を用いた装置を開発した。また収縮により変形する場合、筒の両端の距離が短くなることから、図8の様に筒状の端部を自在に移動可能とする構造にした。また、変形形状を定式化することで中に入れた軸に合わせて最適な円筒内径を求める方法を開発し、図9に示す内視鏡駆動装置を開発した。直径 10[mm]の内視鏡を駆動するために、内径 14[mm]の薄肉シリコンゴムチューブの周りに、初期外形 3[mm]の細径マッキベン型人工筋をピッチ 120[mm]となるように12本で編まれている。これを駆動することで 2[mm/s], 32[rpm]で動作させることができた。また推進力も図10に示すように駆動圧 0.3[MPa]で 2[N]を上回っており、実験で用いた 170[g]の内視鏡を垂直に駆動することができることが確認された。

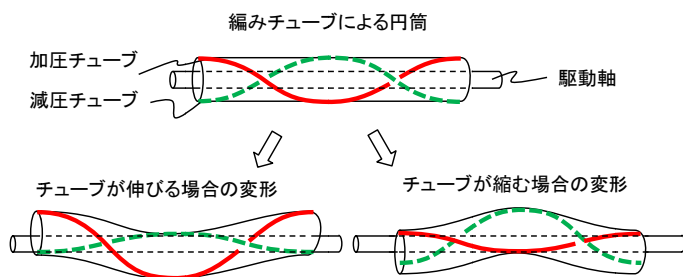


図7 伸びるチューブと縮むチューブによる接触の違い

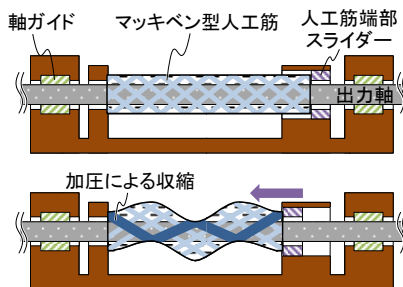


図8 アクチュエータの構造

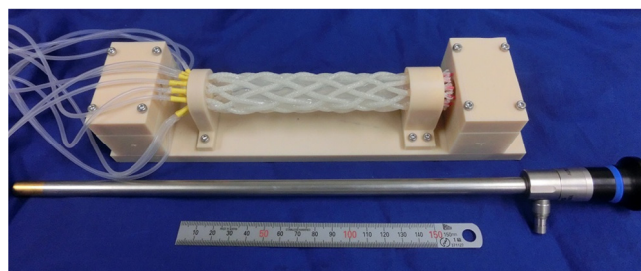


図9 開発した編みチューブ式2自由度アクチュエータ

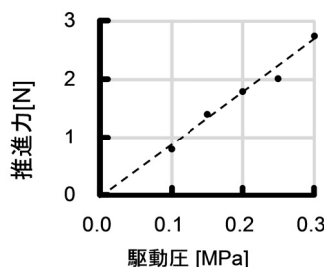


図10 駆動圧と推力

面状に編んだアクチュエータは、通常の布の様に1本ずつ交互に面の上下にチューブが往来してしまうと、周期運動により波を発生させることが出来ない。波を発生させるには3本以上の周期でチューブが交差しなければならない。そこで図1-1に示すようなチューブの編み方を提案し、外径6[mm]のシリコンゴムチューブをチューブ間ピッチ12[mm]で編んだ装置を開発した。チューブは4本周期で上面と下面を往来し、膨張してチューブが伸びるときにより大きく湾曲するために、中立面には伸びない糸で編んだ網が張ってある。本装置は駆動チューブの本数が多いことから、ソレノイドバルブを駆動してからすべてのチューブが膨らむまでに遅れが生じる。そのため動作周期を早くしすぎると、大きく変形できない。そのためチューブ単体で膨らむのに掛かる時間を計測して、最適な動作周期を求め、周期1.25[Hz]、0.14[MPa]で駆動した場合、最大3.5[mm/s]の速度で上に載せた板を図1-2の様に運搬することができた。一方縦に張ったチューブを駆動すれば縦方向に、横に張ったチューブを駆動すれば横方向に上に載せたものを運搬するはずが、チューブの方向に対してほぼ斜め45°の図に示す矢印の方向に運搬されてしまうことが分かった。これは、面を大きく湾曲させるために中立面に張った糸が、チューブが上下面を行き来する場所で図1-1の様に干渉し、チューブが軸方向にきれいに膨らまず、面が大きく湾曲できず、チューブの径方向の膨張により軸と垂直方向にも波が発生してしまうためである。そこで中立面の糸とチューブが干渉しない編み方として図1-3の様に糸を45°傾けて張る編み方を開発した。この編み方により図1-4の様にチューブ自体の間隔も小さく編むことが出来た。これにより小さなものでも運搬だけでなく、運搬速度 $V$ も、装置の厚み $T$ 、波長 $\lambda$ 、振幅 $A$ 、膨張収縮の周波数 $\omega$ とすると、理論値は $V = -\pi\omega AT/\lambda$ となり、密度が高くなって $\lambda$ が小さくなることでより速くなることが期待できる。この装置を用いて駆動したところほぼチューブの方向と同方向に物を運搬できることが分かったが、速度はほぼ同じであった。これは伸びない糸の網がチューブに対して傾いているため、チューブが軸方向に延びるときに、網がひし形に変形し、振幅が小さくなっているためと考えられる。この変形を起こさないためには縦のチューブと横のチューブを同時に駆動して波を斜めに発生させる新しい制御方法を開発する必要があると考えられる。

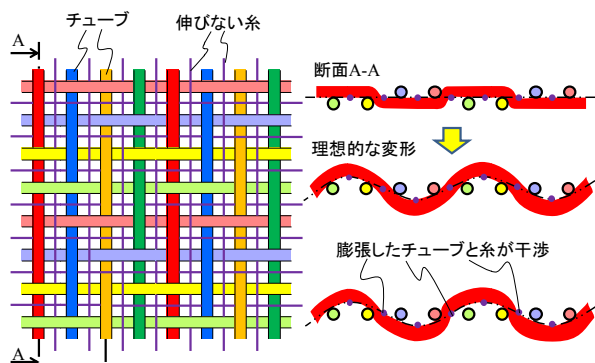


図1-1 提案する平面状のチューブの編み方

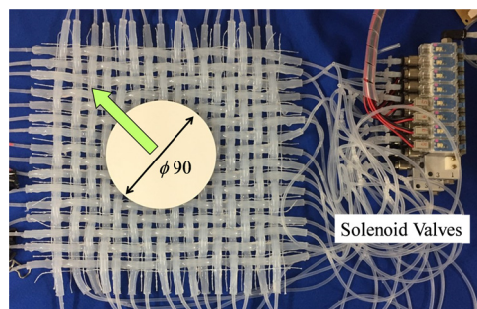


図1-2 平面2自由度アクチュエータの実験

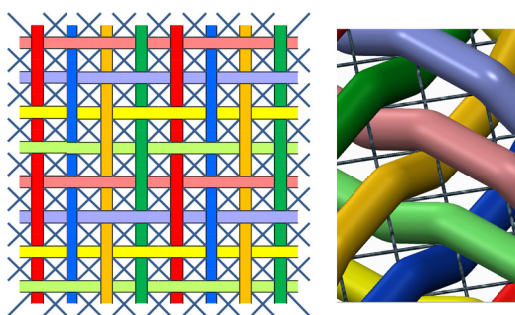


図1-3 チューブと糸が干渉しない編み方

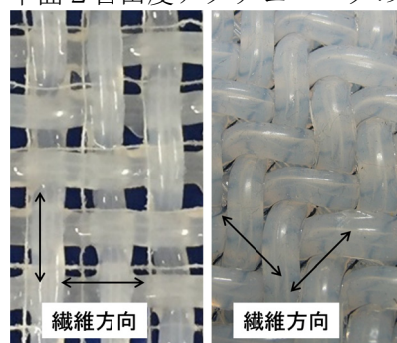


図1-4 繊維方向による密度の違い

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3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 Hirozumi Takeshima and Toshio Takayama	4. 巻 5
2. 論文標題 Development of a steerable in-pipe locomotive device with six braided tubes	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 ROBOMECH Journal	6. 最初と最後の頁 31
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40648-018-0127-5	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 -

1. 著者名 Hirozumi Takeshima and Toshio Takayama	4. 巻 23
2. 論文標題 Geometric Estimation of the Deformation and the Design Method for Developing Helical Bundled-tube Locomotive Devices	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE/ASME Transactions on Mechatronics	6. 最初と最後の頁 223-232
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TMECH.2017.2770140	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 竹島啓純, 辻賢一郎, 高山俊男	4. 巻 Vol. 38, No. 2
2. 論文標題 組紐状細径空気圧人工筋を用いた同軸回転直動アクチュエータ	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本ロボット学会誌	6. 最初と最後の頁 185-191
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7210/jrsj.38.185	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5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Toshio Takayama
2. 発表標題 Bundled tube locomotive device: the first idea came from the movement of a microorganism
3. 学会等名 Workshop on IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高山俊男, 種田宇志
2. 発表標題 平面編みチューブ式 2 自由度アクチュエータの軸系とチューブの干渉を避ける編み方
3. 学会等名 第20回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

1. 発表者名 竹島啓純, 高山俊男
2. 発表標題 カメラ搭載型六つ編み型多重チューブ推進機構
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 ' 19
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 竹島啓純, 高山俊男
2. 発表標題 高いコンプライアンス性を示す多重チューブ直動ソフトアクチュエータ
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 ' 18
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 種田宇志, 高山俊男
2. 発表標題 平面編みチューブ式ソフトロボットの開発
3. 学会等名 第35回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2017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
研究 分担 者	小俣 透  (Omata Toru)  (10262312)	東京工業大学・工学院・教授    (12608)	研究代表者の転出により、装置の継続利用や旧所属 学生の指導のため。