

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 17 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420213

研究課題名(和文)多重チューブ推進機構による管内推進装置の開発

研究課題名(英文)Development of bundled-tube locomotive devices for pipe inspection

研究代表者

高山 俊男 (Takayama, Toshio)

東京工業大学・総合理工学研究科(研究院)・准教授

研究者番号：80376954

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：多重チューブ推進機構は、空気圧で伸縮可能な柔軟なチューブ数本を束ね、それらを交互に加減圧するだけで管内を推進する管内移動装置である。気密性が高く耐環境性が高く、柔軟で管を傷つけず、複雑な屈曲部を制御せずに通過可能である。本研究では押し出し成型器の金型を回転させることで螺旋型多重チューブ推進機構の大量生産方法を確立した。装置が長くなると動作周期が低下することから、水道管内で駆動可能な小型の自励式流路切替バルブも開発した。また小型化にも挑戦し、血管内で利用可能なサイズの試作装置も製作した。さらに新しい形状の推進装置として六つ編み型を開発し、推進と軸周りの回転を独立に制御可能であることを確認した。

研究成果の概要(英文)：Our proposing bundled-tube locomotive devices are composed of a few bound elastic tubes, and it can travel in pipes only by inflating them in turns. The device is strongly resistant to the environment and very flexible, thus it does not scratch the inner wall of the pipe and can pass through an elbow-pipe without requiring complicated control. In this study we established a mass production manner of the helical type bundled-tube locomotive device by an extruder that can rotate its die. On the other hand, if the device becomes long the operating frequency and travel velocity become slow. Therefore, we developed self-oscillated air flow passage changer. The dimensions of the device are enough small to use it in a standard 25A water pipe. We challenged to downsize the mechanism, aimed to utilize the device in the small pipe such as a blood vessel. Moreover, we developed a new bundled-tube locomotive device with 6 tubes. It can control traveling and rotating motion independently.

研究分野：Mechatronics

キーワード：Soft robotics In-pipe robot Endoscope

1. 研究開始当初の背景

軟性内視鏡は工業用途において、管内の腐食や亀裂等を目視確認できる有用な器具である。また医療分野においても非侵襲・内科的に消化器管内の検査・治療が行える有効な器具である。しかし現在使用されている柔軟な紐状のカメラを後方から押して入れるだけでは、複雑に屈曲した場所に挿入することが難しい。そこで研究代表者らは空気圧で伸縮可能な柔軟なチューブを複数本束ねて接着し、それらのチューブを順に加減圧するだけで管内を推進する多重チューブ推進装置を提案し、これまでに螺旋状に束ねた螺旋捻転推進装置と三つ編み状に束ねた三編型推進装置を開発した。

2. 研究の目的

申請時の研究目的は以下のとおりである。

(1) 腸管のような環境で推進するための胴体形状や表面処理を試みる。

(2) 膨張により変形する本装置は、図1(a)の様に全長が長くなると膨張に必要な空気量が多くなり、動作周期が遅くなる。そのため図1(b)の様に膨張しないチューブを接続し、先端だけを駆動させる方法も考えられるが、周期的な加減圧をすると、圧力波が先端に届くまでの時間が掛かるため、やはり動作周期が遅くなると考えられる。そこで図1(c)の様に1本のチューブで先端近くまで圧力を供給し、先端部のみを駆動するための機械的なバルブ切替え装置を開発する。

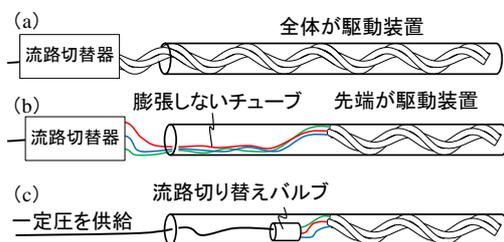


図1 推進装置の駆動方法

(3) 螺旋捻転型の多重チューブ推進装置は、螺旋捻転運動と呼ばれる転がり運動によって推進する。そのため、3本のチューブが捻じれてしまうことから、圧力供給チューブの捻じれ対策を行う。

(4) 自動装置よりも、手動動作の装置の方がコスト、信頼性の点から実用化が早い。螺旋捻転駆動装置はすでにワイヤ駆動ができていたので、三つ編み方式の推進装置をワイヤ駆動により手動駆動を行う。

(5) 心臓の手術などで用いられる血管用カテーテルを足の大動脈から挿入すると、図2の様に心臓の手前で大きく屈曲する必要があるため通過が難しい。そこで本装置を血管用カテーテルのサイズまでの小型化が可能であるか確認する。

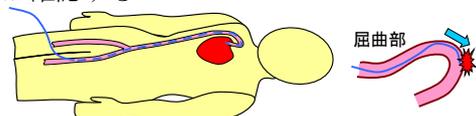


図2 血管用カテーテルの問題

(6) 手作業での製作は部品が小さくなると、品質誤差が大きくなり、またコストも高くなる。産業応用を考え、一体成型による製造方法を確立する。

(7) 管の分岐路で進行方向を制御する。

(8) 構造や形状による屈曲率向上を目指す。

3. 研究の方法

(1) シリコンゴムに滑り止めとなりそうな材料を混ぜる実験を行う。また表面に突起等を設けてグリップ力を高める。

(2) 入力部と先端部の圧力変化を計測し、チューブが長くなった場合の動作周期の低下を確認して必要性を示し、流路切り替えバルブを設計製作する。

(3) 捻じれ対策として、空圧用ロータリージョイントを導入する。また(2)のバルブを用い、1本のチューブであれば捻じれが問題とならないことを確認する。

(4) 平面上に屈曲可能な心材にワイヤを三つ編み状に巻き、これらを順に引くことで三つ編み屈曲運動が行えることを確認する。

(5) 外径1mm程度のチューブを用いて、直径3mm以下の寸法で、試作を試みる。

(6) 積層造形による一体成型や金型による一体成型を試みる。

(7) チューブの加圧状態によって先端の屈曲方向が異なる原理を利用し、分岐路で動作パターンを変えて進行方向を選択する。

(8) 本体に糸を巻き、軸方向に伸びやすく直径方向に伸びにくい構造としてより大きな屈曲を得る。糸を巻く方式では手間がかかるため、束ねるチューブ自身の形状により、同様の特性を持たせる方法を模索する。

4. 研究成果

以下研究目的の項目順に成果を述べる。

(1) 有機溶剤を含むものをシリコンゴムの製造時に混ぜると、ゴムが早く硬化したり、硬化不良を起こしたりといった問題が生じた。手術用の手袋等に用いられるラテックスでシリコン表面を覆う方法も試したが、湿潤な環境では滑りを抑えることができなかった。ただし、現時点で滑りやすいために、後方から押し込むと先端が隙間を押し広げながら進む現象がみられ、小腸内視鏡の挿入補助装置としては十分に機能している。

(2) チューブを長くすると、入力圧が先端に伝わるまでの時間が掛かることが確認できた。そこで図3に示す自励式流路切り替えバルブを開発した。円柱状の胴体に3本のプランジャが入っており、プランジャの頭はボール状の抑えで支えられた傾斜板に押し付けられ、一本のプランジャが突出すると、他のプランジャは押下される構造となっている。プランジャを格納するシリンダは図4の様な流路で接続されており、入力ポートに圧をかけると、自励動作により3本の出力ポートに順に圧力を出力する。

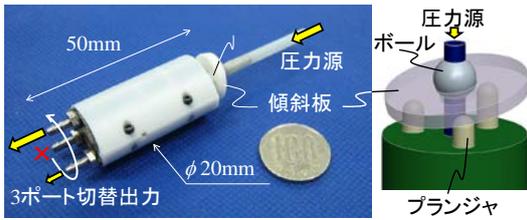


図3 自励式3ポート流路切り替えバルブ

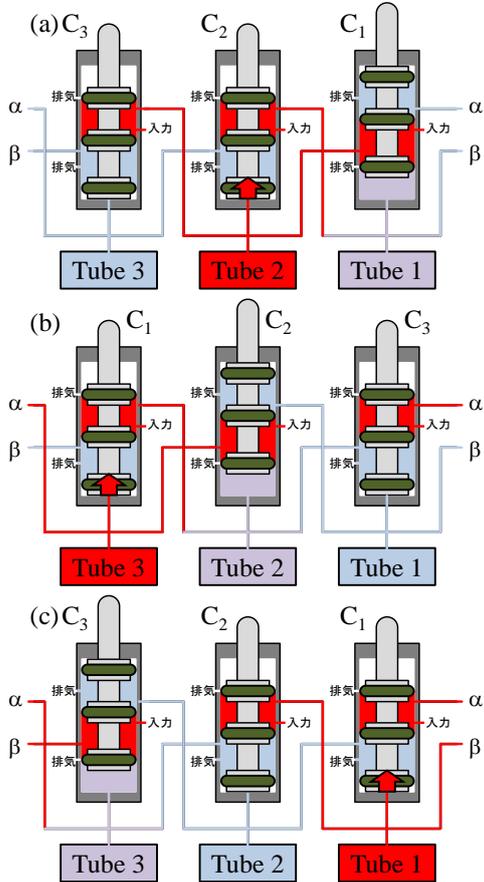


図4 3本のプランジャの自励動作原理

本装置は25A管内での使用を想定して寸法を決定した。本装置に後述する(6)で開発した一体成型型の推進装置を取り付け、25Aの水道管で走行実験をした様子を図5に示す。この装置は非磁性体で構成されており、電気も使用しないため、MRI環境下での利用もでき、カテーテルをMRI環境下で動作させるだけでなく、近年研究が行われているMRI環境下対応の手術器具を駆動させるパルス駆動式の空圧式モータ等の駆動にも利用可能である。



図5 25A管内での動作実験

(3) 図6の様にロータリージョイントをモータで駆動することで、螺旋捻転駆動装置のチューブの捻じれを吸収できた。また(2)

の自励式切替機を用いた場合、1本のチューブであるため、接続部が容易に回転することができ、ねじれは問題とはならなかった。

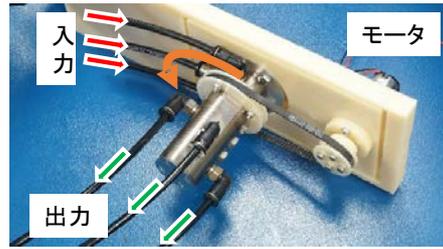


図6 導入したロータリージョイント

(4) 螺旋を平面に投影すると正弦波となることから、図7の屈曲方向を拘束するジョイント多数を一列に接続し、円周状に空けられた穴に3本の糸を120度間隔で螺旋状に通し、糸を順に引くことで平面波状の屈曲運動をさせることが可能であった。

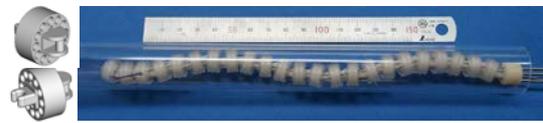


図7 ワイヤ駆動三編屈曲推進装置

さらに実用化を考え、より簡単な構造として、図8に示す、板バネとなるプラスチックの板に銜を取り付け、三つ編み状に糸を通す方式の試作装置を作ったところ、同様の変形が得られた。また糸を3本交互に引くことで波が伝播し、外側にかぶせたパイプが移動することが確認できた。

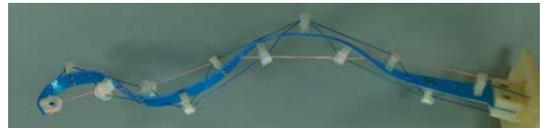


図8 簡易型ワイヤ駆動三編屈曲運推進装置

(5) 外径1mm内径0.8mmのチューブ3本を捩り合わせて螺旋捻転駆動装置を製作した。膨張時に直径方向に膨らむと細い管内で屈曲できないため、外周に糸を密に巻き、表面をラテックスでコートすることで、直径方向に膨張せずに屈曲のみを行う構造とした。これにより、図9に示す様に外径2.2mmの試作装置で内径2.5mmの管内を移動可能となった。ただし狭い管内で屈曲が小さいことから、一周あたりの推進量が少なく、またチューブが細いと空気の流れが悪く、動作周期が2Hz強程度と遅くなってしまい(外径6mmの試作装置では10Hz程度で動作できる。), 移動速度は11~15mm/minと遅くなってしまった。

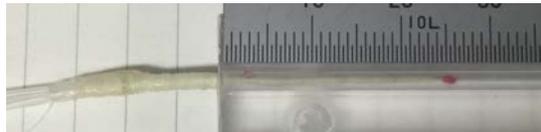


図9 細径化螺旋捻転推進装置

(6) 当初予定した積層造形機による製造では、材質的に十分な柔らかさが得られなかつ

た。また型にシリコンゴムを流し込んで硬化させる方法も十分な長さを作成できないことから、押し出し成型による製造方法を試みた。複雑な断面形状での押し出し成型が可能であることから、図 10 のような押し出しながら口金を回転させる装置を作成し、図 11 の様な断面の外径 6mm の螺旋捻転駆動装置の製造が可能となった。

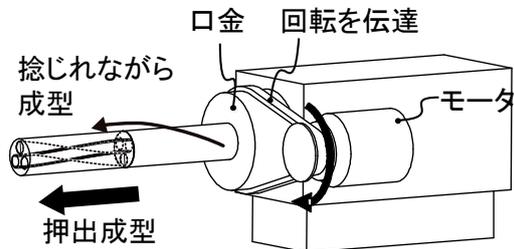


図 10 口金が回転可能な押し出し成型装置



図 11 製造した螺旋捻転駆動装置

また螺旋捻転装置の変形解析を行い、図 12 様に、チューブの変形に伴って螺旋のピッチが小さくなっていくと共に、螺旋の外径が最大値を持って変化することが分かった。すなわち、製造時のねじれのピッチにより、螺旋形に変形したときの最大螺旋外径が決定される。よって、螺旋形状の本体が管内壁に張り付くには、使用対象となる管径に合わせて、製造時の螺旋のピッチを決定する必要がある。

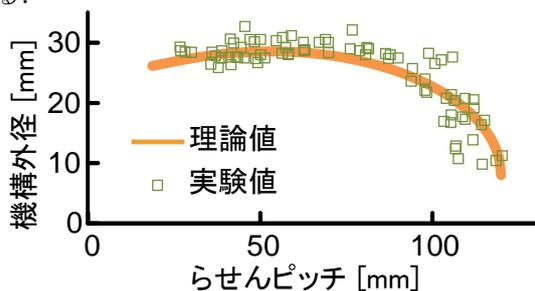


図 12 螺旋変形に伴う外径の変化

押し出し成型の螺旋ピッチを 200mm 程度として製造し、この装置と図 6 のロータリージョイントを接続して、図 13 に示すエルボ 2 か所を含む 25A 管 5m での移動実験を行い、水平な U 字型のコースを 53mm/min で移動できることを確認した。また図の様に垂直な経路を含むと、移動速度が遅くなるものも通過可能であることを確認した。

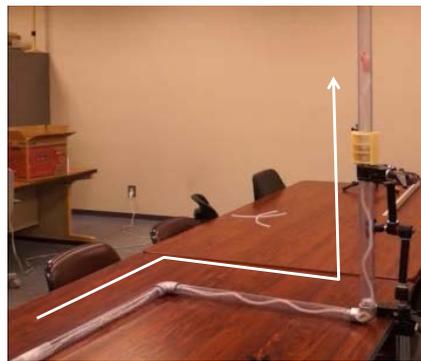


図 13 水道管検査を想定した動作実験

(7) 推進装置の動作が滑りを伴わない場合、常に同じ位置が壁面に接していることから、分岐部において、一旦後退しても、常に同じ周期の姿勢で分岐部に侵入すると当初考えていたが、望まない方向に進んだ場合、後退するために全てのチューブの圧を抜いた瞬間に、内壁への接触位置が変わるため、その後また推進させると、ほぼ 50% の割合で分岐部での進行方向が変わることが確認された。このことから、内視鏡などで確認しながら推進させた場合、特に推進方向を選択することなく、望む方向に進むまで繰り返し分岐部での推進を繰り返せばよいとわかった。

(8) (5) のように、糸を巻くことでチューブの膨張を軸方向に拘束し大きな屈曲を得ることが可能である。押し出し成型の試作機でも同様の効果は得られたが、柔軟なチューブに糸を密に巻く作業は手間がかかり、大量生産の製品には適さないと考えられる。またチューブ形状を図 14 の様な断面形状にすることで、肉厚部が直径方向への膨張を抑え、薄肉部で軸方向にのみ伸びず工夫も行ったが、こちらも断面形状が一定となる押し出し成型には向かない構造である。

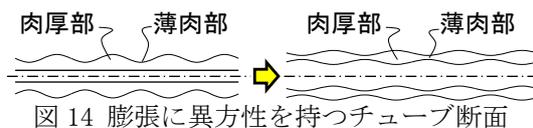


図 14 膨張に異方性を持つチューブ断面

(9) その他の成果として、螺旋型、三つ編み型以外の束ね方として図 15 に示す六つ編み型の多重チューブ推進装置を開発し、その動作を解析した。螺旋捻転型は転がり運動によって移動するため、胴体の軸周りの回転が制御できず、三編みは平面波によって移動するため、胴体軸周りに回転をすることができなかったが、六編みは 3 本の右巻螺旋チューブと 3 本の左巻螺旋チューブの組み合わせでできており、片方だけを駆動すれば、螺旋捻転、両者を推進方向に同時に駆動すると平面波屈曲動作、交互に推進方向と後退方向に駆動すると、その場で回転が、それぞれ独立に制御可能であった。

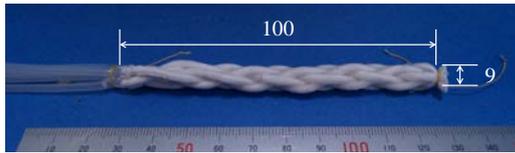


図 15 六編型多重チューブ推進装置

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)

[雑誌論文] (計 2 件)

① Toshio Takayama, Hirozumi Takeshima, Tomoyuki Hori, and Toru Omata, "A Twisted Bundled Tube Locomotive Device Proposed for In-Pipe Mobile Robot," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 査読有, Vol. 20, Issue 6, Dec., 2015, pp. 2015-2923, DOI: 10.1109/TMECH.2015.2411752

② 高山 俊男, "多重チューブ推進機構による管内移動", 配管技術, 日本工業出版, 査読無, 第 56 号第 12 号 (758 号), Oct., 2014, pp. 41-46

[学会発表] (計 8 件)

① Hirozumi Takeshima and Toshio Takayama, "Six-Braided Tube In-pipe Locomotive Device," Proc. of The 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 査読有, Sep. 28-Oct. 2, 2015, Hamburg, Germany, pp. 1125-1130, DOI: 10.1109/IRROS.2015.7353511

② 竹島 啓純, 高山 俊男, 小俣 透, "波状断面チューブを用いた多重チューブ推進機構の屈曲性能向上", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会' 14, 2A2-N04, 富山, May, 2014

③ 竹島 啓純, 高山 俊男, 小俣 透, "多重チューブ推進機構の定量的設計のための容量制御による変形計測", 第 32 回日本ロボット学会学術講演会, 1M2-06, 九州, Sep. 2014

④ 角 悠介, 高山 俊男, 小俣 透, "螺旋捻転推進機構の細径化", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会' 15, 1P1-B06, 京都, May, 2015

⑤ 竹島 啓純, 高山 俊男, "多数のチューブを備えた多重チューブ推進機構", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会' 15, 1P1-B07, 京都, May, 2015

⑥ 高山 俊男, 角 悠介, "多重チューブ推進機構のための自励式空圧流路切り替え装置", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会' 16, 2A2-08b2, 横浜, Jun, 2016

⑦ 竹島 啓純, 高山 俊男, 十々木 一仁, 山田 吉郎, "押出成形によるらせん型多重チューブ推進機構", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会' 16, 2A2-08b7, 横浜, Jun, 2016

⑧ 竹島 啓純, 高山 俊男, "ワイヤ駆動を用いた三つ編み屈曲管内推進機構", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会' 16, 2P1-15a2, 横浜, Jun, 2016

[産業財産権]

○出願状況 (計 3 件)

名称: 管内推進装置および管内推進装置を備えた内視鏡

発明者: 高山俊男, 竹島啓純

権利者: 東京工業大学

種類: 特願

番号: 2014-203514

出願年月日: 2014/10/1

国内外の別: 国内

名称: 管内推進装置および管内推進装置を備えた内視鏡

発明者: 高山俊男, 竹島啓純

権利者: 東京工業大学

種類: 特願

番号: 2015-100188

出願年月日: 2015/5/15

国内外の別: 国内

名称: 自励式流路切り替装置及びこれを用いた多重チューブ推進装置

発明者: 高山俊男, 竹島啓純

権利者: 東京工業大学

種類: 特願

番号: 2016-107059

出願年月日: 2016/5/30

国内外の別: 国内

○取得状況 (計 2 件)

名称: 管内推進装置および管内推進装置を備えた内視鏡

発明者: 高山俊男, 小俣透, 堀智幸

権利者: 東京工業大学

種類: 登録

番号: 5875043

取得年月日: 2016/1/29

国内外の別: 国内

名称: 管内推進装置および管内推進装置を備えた内視鏡

発明者: 高山俊男, 小俣透, 堀智幸

権利者: 東京工業大学

種類: 登録

番号: 5544608

取得年月日: 2014/5/23

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

http://www.olab.pms.titech.ac.jp/research/research_multiplex.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高山 俊男 (TAKAYAMA, Toshio)

東京工業大学・総合理工学研究科・准教授

研究者番号: 80376954

(2) 研究分担者 (無し)

(3) 連携研究者

小俣 透 (OMATA, Toru)

東京工業大学・総合理工学研究科・教授

研究者番号: 10262312

田中 直文 (TANAKA, Naofumi)

東京医科歯科大学・医学部附属病院・講師

研究者番号: 90280982