

機関番号：15301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20700408

研究課題名(和文) 空圧式ゴム製デバイスによる剛性変化型大腸内視鏡の開発

研究課題名(英文) Development of Variable Stiffness Colonoscope Consisting of Pneumatic Drive Devices

研究代表者

脇元 修一 (WAKIMOTO SHUICHI)

岡山大学・異分野融合先端研究コア・助教

研究者番号：40452560

研究成果の概要(和文)：容易かつ安全に挿入することが可能な大腸内視鏡装置の実現が求められている。本研究では剛性が制御可能なシリコンゴム製の剛性変化デバイスを開発し、これを複数、直列に配置した新しい可変剛性型の大腸内視鏡の実現を目的としている。試作した可変剛性内視鏡は任意の箇所を任意の剛性に調節することができる。大腸モデルへの挿入実験を行った結果、特別な挿入技術を必要とせず大腸最深部までの挿入が可能であった。

研究成果の概要(英文)：A colonoscope which can be inserted reliably and safely is required. In this study, variable stiffness device whose stiffness can be controlled was developed, and also a prototype colonoscope consisting of multi variable stiffness devices was manufactured. Using the colonoscope, insertion experiments into the colon phantom were conducted, and it can be inserted into the deepest part of the colon without special techniques.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：ソフトメカニクス

科研費の分科・細目：人間医工学・医用システム

キーワード：ソフトメカニズム、大腸内視鏡、可変剛性、ソフトアクチュエータ

1. 研究開始当初の背景

図1は大腸ファントム(KOKEN社製)を示している。本ファントムは、医師の大腸内視鏡挿入訓練用に開発されたものであり、実際の大

腸と類似した特性を有する。ただし、内視鏡の挿入状態が視認できるよう透明色で腸管部を製作している。図に示すように大腸は多くの屈曲部を有しており、また、腹腔内に固定

されていない。そのため、内視鏡を肛門から盲腸まで挿入することは容易ではなく、患者が痛みを訴えるケースもある。特にS状結腸のような屈曲の激しい部位は挿入が困難であり、内視鏡の導中部の高い剛性を利用することで意図的に部位を直線化するなど高度な技術が必要となる。そのため、これまでに、容易な挿入性を有する大腸内視鏡の実現を目指した様々な能動的メカニズムが考案されてきた。

一方、医師が内視鏡を挿入する際の押しこみ力の大きさは、実質的に挿入に必要な力に対して十分に大きいことに着目すると、挿入の困難さの克服に対して、必ずしも内視鏡に能動性を加えることが必要であるとはいえない。このような背景から、剛性が可変な内視鏡の開発が行われているが、単純な機構で各所の剛性を任意に変化させるものはない。

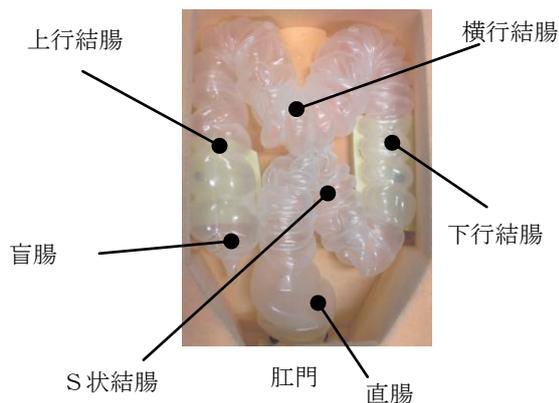


図1 大腸ファントム

2. 研究の目的

上記を踏まえて、本研究では、空気圧の印加によって剛性が可変な新しいゴム製デバイス（剛性変化デバイス）を実現し、これを複数個用いることで導中部の各所の剛性が可変な大腸用内視鏡の開発を目指している。剛性変化デバイスはシリコーンゴムと強化繊維から構成されるものであり、これまでの内視鏡に能動性、あるいは剛性変化機能を実現するメカニズムと比較し極めて単純な構造である。更に剛体材料を用いないため、高い安全性を

有し、また、安価に製作することが可能である。

図2は大腸ファントムを用いて、既存の大腸内視鏡を挿入している様子である。S状結腸部において、先端ステアリング部は大腸経路方向に向いているものの、他の部位の剛性が高く挿入力が経路方向に転換されないため、挿入が困難である。

図3に開発する剛性変化型内視鏡の挿入概念図を示す。内視鏡の先端はステアリング部であり、他は剛性変化デバイスを直列につないだ構成である。剛性変化デバイスは各々、独立に剛性を変化させることが可能である。

大腸経路が比較的直線的な部位において剛性変化デバイスの剛性が高い状態であれば、医師からの挿入力が効率的に伝わり、内視鏡が容易に導入されていく。図3に示すような大腸の屈曲経路部においては、ステアリング機構によって先端を大腸の経路方向に向けるとともに、湾曲部に到達する剛性変化デバイスの剛性が低い状態であれば腸壁に過度な負荷を与えることなく、腸壁に沿って湾曲部を通過することが可能である。このように、各部の剛性を変化させることによって、安全で、効率的な挿入を実現する。

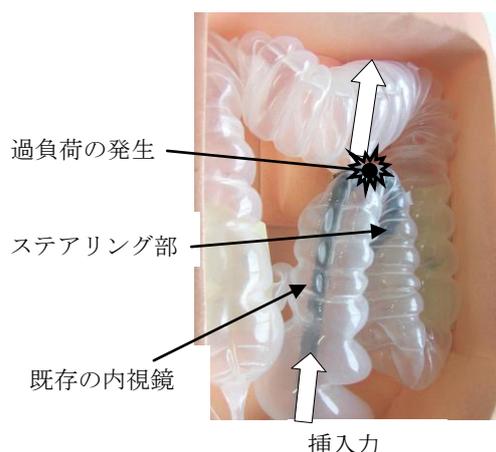


図2 既存の内視鏡による予備挿入実験

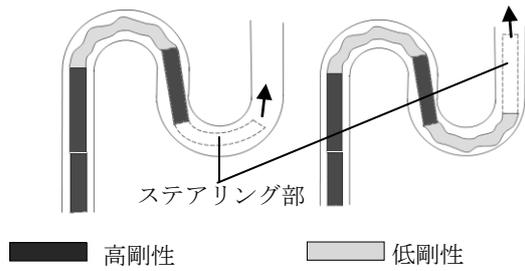


図3 剛性変化大腸内視鏡の挿入概念

3. 研究の方法

(1) 剛性変化デバイス

剛性変化デバイスは McKibben 型アクチュエータを基本構造とし開発した。McKibben 型アクチュエータは代表的な空気圧駆動ラバーアクチュエータである。図4は McKibben 型アクチュエータの模式図を示しており、繊維強化されたチューブ状のゴム体の両端を封止した構造である。内部に空気圧を印加することで、径方向に膨張し、軸方向に収縮する。この収縮運動をアクチュエータの出力として利用することが一般的である。



図4 McKibben 型アクチュエータの構造

McKibben 型アクチュエータの特性は、収縮力を F 、直径を D 、印加圧力を P 、繊維角度を θ 、収縮率を ε として定義した場合、式(1)で示されることが知られている。

$$F = \frac{\pi}{4 \sin^2 \theta} D^2 P \{3(1-\varepsilon)^2 \cos^2 \theta - 1\} \quad (1)$$

アクチュエータの収縮力 F が 0 となるときにアクチュエータの収縮率は最大となるため、最大収縮率 ε_{\max} は、

$$\{3(1-\varepsilon_{\max})^2 \cos^2 \theta - 1\} = 0 \quad (2)$$

より

$$\varepsilon_{\max} = 1 - \frac{1}{\sqrt{3 \cos \theta}} \quad (3)$$

となる。よって、式(3)より繊維角度 θ を 54.7 度とした場合、最大収縮率 ε_{\max} が 0 となり、McKibben 型アクチュエータは印加圧力によらず変位が生じないこととなる。すなわち、この繊維角度 54.7 度が理論平衡角であり、これより小さい場合、アクチュエータは収縮し、大きい場合、伸長する。つまり、繊維角度を平衡角としてアクチュエータを製作すれば、収縮、伸長が生じず、剛性のみが変化する事となる。

この平衡角の妥当性は非線形有限要素法によっても確かめており、繊維角を 54.7 度とした場合、圧力を印加してもアクチュエータの変位量が極めて小さいことが解析結果として得られた。

図5に開発した剛性変化デバイスを示す。空気圧を -50kPaG から 400kPaG まで変化させながら、曲げ剛性を測定した結果、 $1.13 \times 10^{-3} \text{ Nm}^2$ から $4.46 \times 10^{-3} \text{ Nm}^2$ までの変化が可能であった。



図5 剛性変化デバイス

(2) 剛性変化型内視鏡の構成

①ステアリング機構

内視鏡の先端のステアリング部には Flexible Microactuator (FMA) と呼ばれる湾曲動作が可能な空気圧アクチュエータを用いた。このアクチュエータは、周方向に繊維強化されたゴム構造体であり、内部に複数の空気圧室を有する。繊維強化によって径方向への膨張が抑制されるため、空気圧が印加された際には、その空気圧室は軸方向のみに伸長する。そのため、空気圧室間に異なる圧力が印加されると全体として湾曲運動が発生

する。

本研究では2つの空気圧室からなるFMAを製作しており、時計周り、反時計回りに湾曲動作が可能である。図6にアクチュエータの構造図を図7に製作したアクチュエータの駆動の様子をそれぞれ示す。空気圧の印加によって、大きな湾曲動作が実現できていることがわかる。アクチュエータの外径は12 mm、長さは100 mmであり、型成型によって製作している。

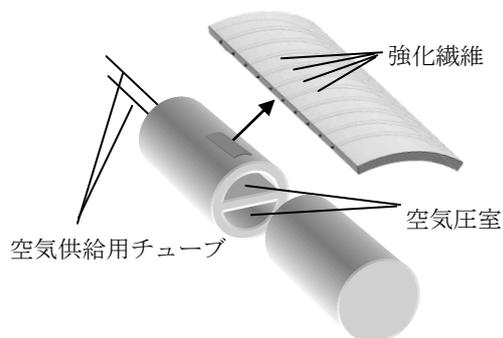


図6 FMAの構造

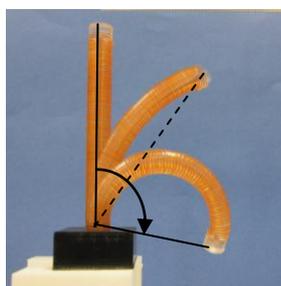


図7 FMAの湾曲運動

②構成

8つの剛性変化デバイスを直列に接続し、また、先端にFMAを繋げることで内視鏡の導中部とステアリング部を構成した。図8に製作した内視鏡を示す。全長は1060 mmである。剛性変化デバイスを駆動するための空気圧供給チューブ8本とFMA駆動用の空気圧供給チューブ2本が内蔵されている。これらのチューブは外径1.0 mm、内径0.5 mmの小径シリコンチューブであり、また、FMAと剛性変化デバイス、および剛性変化デバイス間は、シリコンゴム製のコネクタによって連結

されている。なお、現在、内視鏡にはカメラが搭載されていない状態であり、剛性変化デバイスの内視鏡導中部としての可能性を確認することに主眼をおいた。

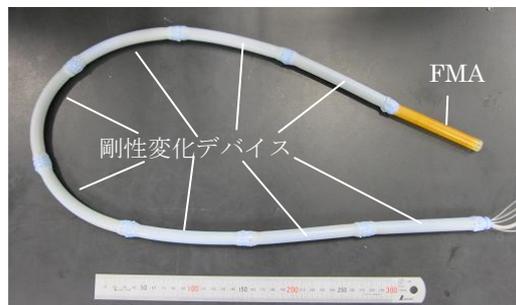


図8 剛性変化型内視鏡のプロトタイプ

(3) ファントムへの挿入実験

剛性変化型内視鏡の有効性を確認するため、図1に示した大腸ファントムを用いて内視鏡挿入経験のない7人のオペレータにより挿入実験を行った。被験者は、大腸ファントムを上方から目視で確認しながら、内視鏡を順手で押しこみながら先端部のステアリング操作を行い、内視鏡を挿入した。ステアリング機構であるFMAのインターフェースにはジョイスティックを用いた。各剛性変化デバイスへの空気圧は隣り合うデバイスと逆位相とした周期10秒のパルス状圧力で-50kPaGと200kPaGを交互に繰り返す状態とした。また、比較のため、現在、使用されている大腸内視鏡による挿入実験も行った。なお、剛性変化デバイスはゴム材料や強化繊維数を変えることで初期剛性と剛性変化範囲の異なるものを数種類製作し、各々について内視鏡を構成した。本報では、実験的に最も効率が優れていたデバイスに関してのみ言及している。

4. 研究成果

3. (3)の挿入実験の結果、従来の内視鏡では、非訓練者であるオペレータは誰もS状結腸を通過することができなかった。既存の内

視鏡では、S 状結腸を通過するためには高度な技術が必要であり、上方からの目視による挿入であっても、挿入未経験者には難しい。

それに対して、本内視鏡を用いた挿入実験では、全員が大腸最深部までの挿入が可能であった。7 名のうち最も短い挿入時間は 2 分 4 秒であり、最も長い挿入時間は 7 分 41 秒であった。平均挿入時間は 4 分 59 秒であった。挿入時間には差があったものの、内視鏡挿入未経験者でも、本内視鏡を用いることで大腸最深部までの挿入が可能であることが確認された。ファントムへの挿入の様子を図 9 に示す。



○先端部の位置



図 9 大腸ファントムへの挿入実験

本内視鏡は、安価に製作可能であり、また、既存の大腸内視鏡と比較し、腸壁への負担が極めて低く高い有効性を有している。今後、

本内視鏡にカメラを内挿し、カメラ映像を使用した挿入実験を実施する。また、剛性変化デバイスへの最適な空気圧印加アルゴリズムに関して調査を行っていく予定である。

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 1 件)

- ① Shuichi Wakimoto, Issei Kumagai and Koichi Suzumori, Development of Variable Stiffness Colonoscope Consisting of Pneumatic Drive Devices, International Journal of Automation Technology, (2011) 査読有.

[学会発表] (計 4 件)

- ① Issei Kumagai, Shuichi Wakimoto and Koichi Suzumori, Development of Large Intestine Endoscope Changing Its Stiffness -2nd report: Improvement of Stiffness Change Device and Insertion Experiment-, 2010 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, pp. 241- 246, 12/2010, China.

- ② Shuichi Wakimoto, Issei Kumagai and Koichi Suzumori, Development of Large Intestine Endoscope Changing Its Stiffness, 2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, pp. 2320- 2325, 12/2009, China.

- ③熊谷一星, 脇元修一, 鈴森康一, 空圧駆動柔軟デバイスを用いた剛性変化型大腸内視鏡の開発 -第 2 報 剛性変化デバイスの改良と挿入基礎実験-, 日本機械学会 2010 年度年次大会, pp. 349-350, 9/2010, 愛知.

- ④脇元修一, 熊谷一星, 鈴森康一, 空圧駆動柔軟デバイスを用いた剛性変化型大腸内視鏡の開発, 日本機械学会ロボティクス・メカ

トロニクス講演会 2009, 2A1-K11, 5/2009,
福岡.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

脇元 修一 (WAKIMOTO SHUICHI)
岡山大学・異分野融合先端研究コア・助教
研究者番号：40452560