

令和 2 年 6 月 12 日現在

機関番号：34316

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K01429

研究課題名(和文) 医師の技量に依存しないクローラ型自走式大腸内視鏡デバイスの開発

研究課題名(英文) Autonomous Colonoscopes using Crawler Mechanism that do not depend on Doctor's Skill

研究代表者

永瀬 純也 (Nagase, Jun-ya)

龍谷大学・理工学部・講師

研究者番号：70582245

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：大腸内視鏡検査は、内視鏡を肛門から盲腸まで挿入して検査するが、大腸は柔軟で複雑な構造をしているため、医師には非常に高い技術が要求され、挿入時間や大腸への負荷は医師の技量に大きく依存する。そこで本研究では、高い技量を要さず短時間でかつ大腸への負担が少ない大腸内視鏡の実現を目指して、索状フレキシブルクローラを開発することを目的とした。試作した索状フレキシブルクローラの大腸モデルへの挿入実験では4連結タイプにて最深部(盲腸)までの挿入に成功し、提案機構の大腸内視鏡デバイスの推進機構としての有用性を示すことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

1. クローラ機構は、建設機械や農業機械など様々なタイプが開発されたものの、構造が複雑でモータを複数要するため、内視鏡サイズまで小型化に成功した例が無い。本研究で開発したクローラは最外径16mmと世界最小径の新しいクローラ型移動機構である。
2. "索状クローラ"を提案できたことは特に意義深い。従来のクローラは大きく・硬い構造である。これに対し本研究の索状クローラは、細く・柔らかい構造で、これまでにない新しいクローラ構造である。
3. 本研究成果は、安全かつ患者への負担が少ない内視鏡検査に繋がることはもちろん、配管検査ロボットおよび医療用カテーテルへの応用など、本研究の波及効果は極めて高いものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：The number of people with cancer of the large intestine has been increasing steadily. Early detection and treatment of diseases by colonoscopy can enable complete recovery. Nevertheless, conventional colonoscopes require extremely high skills of the doctors who use them. Therefore, many robots to facilitate colonoscopy-related operations have been developed recently. Unfortunately, they cannot move independently or quickly. We therefore propose a novel autonomous propulsion mechanism for colonoscopy named the "Funicular Flexible Crawler." It is suitable for propulsion through narrow spaces because it is driven by multiple small diameter crawler units connected to a flexible shaft. Experimentation with a large intestine phantom confirmed that the flexible crawler can run from the rectum to the cecum. As described herein, this propulsion mechanism is applicable for self-traveling colonoscopy.

研究分野：医療デバイス

キーワード：自走式大腸内視鏡 クローラロボット

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

わが国では大腸癌を初めとする大腸疾患が増加傾向にあり、早期発見の手段である内視鏡による大腸検査の需要が急増している。現在の内視鏡検査は管状の内視鏡を肛門から盲腸まで挿入していくことでその内部の診察を行っている。その際に、大腸は柔軟で複雑な構造をしているため、医師には高い技術が要求され、また挿入時間や大腸への負荷は医師の技量に大きく依存する。そのため、これまでに自走式の大腸内視鏡装置が数多く開発されているものの、推進能力が不十分であるために目的到達地点までの挿入時間が長く、あるいは大腸への負荷が高いことなどから、内視鏡の患者への負担は依然として大きなままである。

2. 研究の目的

柔軟で高い推進性能を有する細径の索状フレキシブルクローラ機構を新たに提案・開発し、さらに大腸モデル内挿入実験により本推進機構の自走式大腸内視鏡デバイスへの応用可能性を示すことを目的とした。

3. 研究の方法

3. 1 提案構造

図1に索状フレキシブルクローラ(以下、索状クローラ)の構造図を、図2にクローラユニット部を示す。この索状クローラは、アクチュエータユニット、推進用クローラユニット、ステアリング用クローラユニット、フレキシブルインナーシャフト、そしてフレキシブルアウターシャフトから構成されている。アクチュエータユニットには、単一のギヤモータが配置されており、ギヤモータはカップリングを介してフレキシブルインナーシャフトに接続されている。フレキシブルインナーシャフトには、モータとの接続部と反対側のシャフト先端およびシャフト先端までの複数箇所に、ウォームが配置されている。また、それぞれのウォームは、フレームの中心に軸受支持されており、フレームには、円環状のゴム製クローラベルトがウォーム歯と噛み合うように軸対称に複数配置されている。フレキシブルインナーシャフトの外側に配置された中空のフレキシブルアウターシャフトは、各フレーム間およびフレームとアクチュエータユニット間

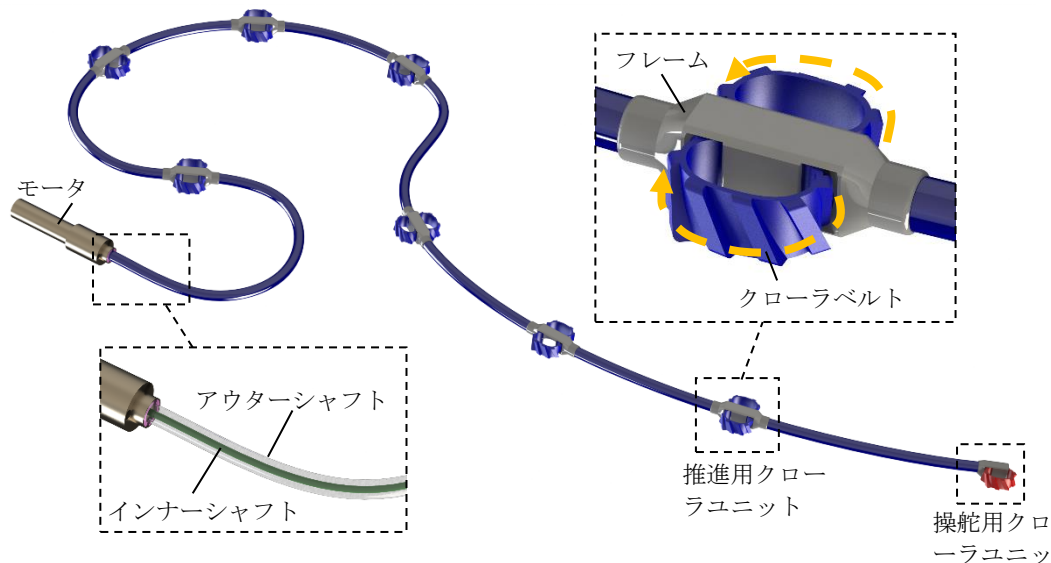


図1 索状フレキシブルクローラの機構。

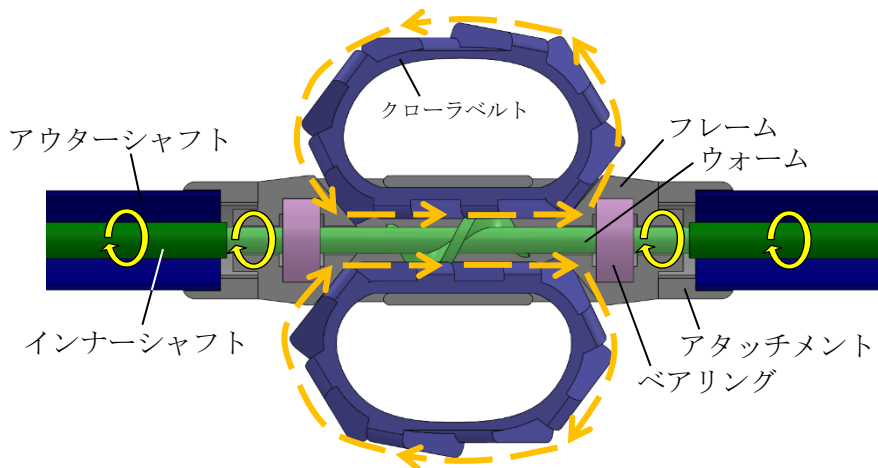


図2 クローラユニット部

に接続されている。

次に、索状クローラの駆動原理について説明する。まず、アクチュエータユニットのギヤモータを駆動することで、フレキシブルインナーシャフトにトルクを発生させる。これによってフレキシブルインナーシャフトに複数配置されたウォームが回転することによってそれと噛み合ったクローラベルトが回転する。そして、回転するクローラベルトとその接地面に発生する摩擦力によって、索状クローラに推進力が発生する。このとき、クローラベルトおよびフレームには、長軸周りにも回転力が発生するが、フレームを介してモータフレームに接続されたフレキシブルアウトターシャフトの反力により、ベルトおよびフレームに回転方向の変位は発生しない。

次に、索状クローラの特徴について述べる。ギヤモータがフレーム内部に配置されている円筒状湾曲型クローラに対して、索状クローラは、単一のギヤモータがフレキシブルシャフトの片端に配置されている。これにより、大腸内視鏡検査においては、ギヤモータを体外に配置することが可能になるため、デバイス全体の大幅な小型化が見込める。さらに、クローラユニットは、シャフト全域に渡って複数個配置されているため、クローラ単一の場合の比べて高い推進力が発生可能になると考える。

また、従来のスコープ型大腸内視鏡は、手の押し込み力をスコープ先端に伝達させながら挿入していくため、スコープ全体の剛性が高い。そのため、大腸に多大な負荷が掛かる恐れがある。一方、この索状クローラは、シャフト全体の剛性が従来型のスコープ型大腸内視鏡よりもはるかに低いため、大腸に掛かる負荷を最小限に抑えることが可能となる。

以上より、索状フレキシブルクローラの特徴を以下にまとめる。

- ・索状のデバイス全域にクローラ構造を配置しているため、デバイス全体に推進力を発生することが可能である。
- ・デバイスに配置した各クローラを駆動するためのギヤモータは体外に配置可能であるため、デバイスの大幅な小型化が可能である。後述する試作機の製作においては、デバイスの最外径をφ16mmまで小型化することに成功している。
- ・フレキシブルシャフトの曲げ剛性は、既存のスコープ型大腸内視鏡のシャフトよりもはるかに低いため、大腸に対する負荷を大幅に低減できる。

3. 2 索状フレキシブルクローラ機構による大腸内視鏡挿入戦略

本節では、索状クローラで構成した大腸内視鏡デバイスの挿入戦略について記述する。まず、大腸内視鏡は肛門から体内へ侵入していき、直後に直腸に差し掛かる。直腸の内部は鋭角カーブを有するため、既存の大腸内視鏡ではアングル操作によって、カーブを通過させる必要がある。これに対して本研究の索状クローラでは、シャフトを軽く押し込むことで、シャフト先端部に配置されているクローラベルトがカーブ外側の腸壁に柔軟に押し当たることで、シャフト外側を後方に移動するベルトと腸壁に摩擦力が発生することにより、デバイスがカーブ内側に向かって推進する。

直腸を通過すると次にシャフト先端がS状結腸に差し掛かる。S状結腸は、内蔵に固定されておらず、弛みを有する。そのため、既存の大腸内視鏡では、そのまま押し込んでいくと腸がループを形成し、さらに押し込んでいくと大腸は内視鏡の押し込み力によって圧迫されて引き伸ばされることによって、患者は激しい痛みを感じるとともに、大腸に多大な負荷が掛かることで出血や穿孔を生じさせる恐れがある。本研究の索状クローラは、先端のステアリング用クローラでシャフト先端を適切な姿勢に保ちながら、クローラの推進力を利用してS状結腸のカーブに沿ってシャフトを奥へ挿入する。これにより、既存の大腸内視鏡より大腸に対する負荷を大幅に低減できると考えた。

S状結腸を通過すると下行結腸に差し掛かる。このとき、S状結腸がループ形状の場合、無理に押し込むことによって、S状結腸部への負荷が過大となるが、索状クローラでは、S状結腸の腸壁の各所には、クローラ部が配置されているため、小さな押し込み力のみで、S状結腸部および下行結腸部にあるクローラに推進力を発生させながら、さらに奥へと挿入することが可能になると考える。本研究の索状クローラでは、シャフト先端のクローラユニットのベルトを脾湾曲部のコーナー外側に軽く押し当てて弾性変形させることで、シャフト先端が横行結腸に向かって姿勢を整えつつ、シャフト全体が推進用クローラユニットの推進力によって前進し、脾湾曲を通過する。

横行結腸は、S状結腸と同様に内蔵に固定されておらず弛みを有する。術者はS状結腸のときと同様に、先端のステアリング用クローラでシャフト先端を適切な姿勢に保ちながら、クローラの推進力を利用してS状結腸のカーブに沿ってシャフトを奥へ挿入する。また、内視鏡デバイス先端部が横行結腸を通過して肝湾曲に到達したとき、術者は、脾湾曲のときと同様に、シャフト先端のベルトを肝湾曲部のコーナー外側に軽く押し当てて、ベルトを弾性変形させることで、シャフト先端が上行結腸に向かって姿勢を整えつつ、シャフト全体が推進用クローラユニットの推進力によって前進し、肝湾曲を通過する。シャフト先端部が肝湾曲を通過して上行結腸に進入すると、前方には盲腸が表れ、内視鏡デバイスを前進させて盲腸まで到達させる。

3. 3 試作

本提案機構の基礎特性調査および大腸内視鏡への応用可能性を検討するために、提案機構の試作を行った。図3に試作機を示す。試作機の全長は1.4m、最外径については、先頭用クロー

ラユニット，駆動用クローラユニットそれぞれ，ベルトに外圧が掛かっていない状態ではφ24.5mm，φ37.9mm，フレーム側面まで変形させた状態ではφ16.8mm，φ12.7mmである．また，試作機は，3機の駆動用クローラユニット，1機の前頭用クローラユニット，各機体間および機体-フレーム間を接続するフレキシブルシャフト，そして，アクチュエータユニットから構成されている．以下に，それぞれの構造について詳しく記述する．

駆動用クローラユニットはフレーム，クローラベルト，ウォーム，アタッチメント，ベアリングから構成されている．フレームの材質はエポキシ樹脂であり，光造形 (Form2, Formlabs 製) にて造形を行った．フレームは2パーツで構成しており，それぞれにある凹凸の突起物で位置調整をしてから接着剤 (PPX, セメダイン) で固定した．クローラベルトはシリコンゴム製であり，シリコン原液をベルト型に流して成形したベルトを，表面にサラサラコーティングが施されたシリコンゴムシートに貼り付けられている．またベルトの歯数は7歯とする．ウォーム，アタッチメントは，アルミ棒 (A2017) を，NC (ZCL-40A, MDX-40A Roland 製) で製作し，ウォームはフレキシブルインナーシャフト，アタッチメントはフレキシブルアウターシャフトに接着剤 (メタルロック, セメダイン) でそれぞれ固定した．さらに，フレームとアタッチメントはピンで引っ掛けることで固定し，離れないようにしている．また，ベアリングは外径6mm，内径2mmのものを使用し，ウォームにメタルロックで接着することでインナーシャフトが移動しないようにした．

前頭用クローラユニットはフレーム，ウォーム，ベアリング，アタッチメント，クローラベルトから構成されている．各部品の材質，製作方法，固定方法は駆動用クローラユニットと同様である．異なる点は，ウォームを両端でなく片側だけで支持している点，ベルトが2本でなく1本だという点である．

フレキシブルインナーシャフトは内径2.1mm，外径2.9mm，フレキシブルアウターシャフトは内径7mm，外径8mmの中空シャフト (ライナーブレードチューブ, ハギテック) を使用した．フレキシブルインナーシャフトが長い場合，フレキシブルインナーシャフトの捻りトルクに起因して，フレキシブルアウターシャフトにねじれが生じてしまう．そのためフレキシブルインナーシャフトに外径φ6mm，内径φ3mmのミニチュアボールベアリングを複数接着することで対策した．

アクチュエータユニットはモータフレーム，カップリング，モータフレーム用アタッチメント，カップリング用アタッチメントから構成されている．モータはMaxon motor 製の EC13 6W 減速比131のギヤモータを使用した．モータフレーム，カップリングの材質はエポキシ樹脂であり光造形にて製作した．モータフレーム用アタッチメント，カップリング用アタッチメントは NC (MDX-40A) で製作し，モータフレーム用アタッチメントはフレキシブルアウターシャフトに金属用接着剤で固定した．

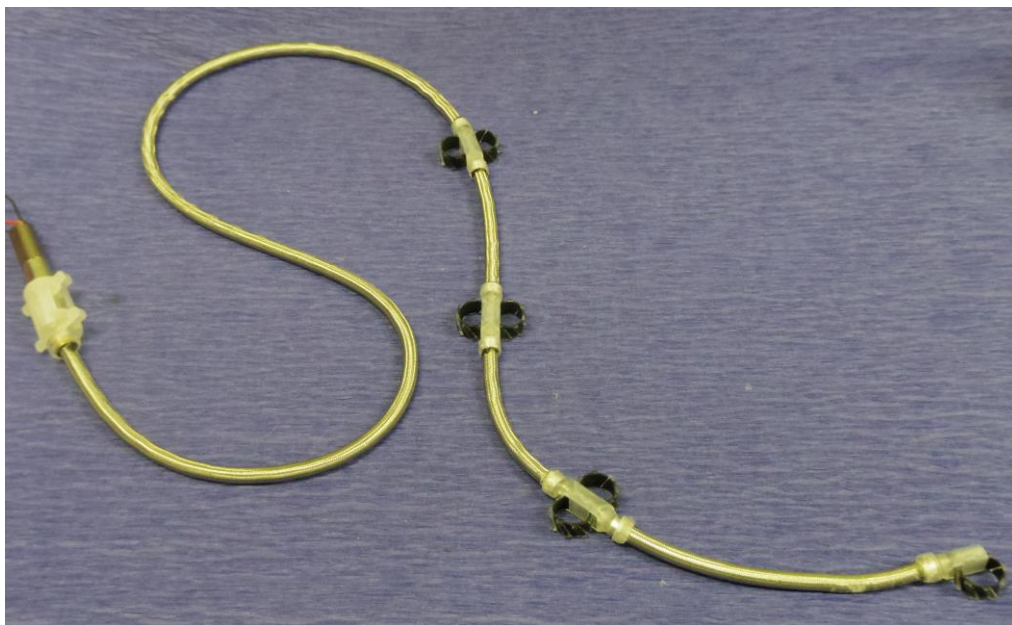


図3 試作機

4. 研究成果

索状フレキシブルクローラによる大腸モデルへの挿入実験を実施した．大腸モデルには内部に潤滑剤を塗ることもでき，形状，表面の状態も実際の大腸に似た状態となっている．大腸検査では，肛門から直腸，S状結腸，下行結腸，脾湾曲，横行結腸，肝湾曲，上行結腸，そして盲腸部まで内視鏡を挿入することで検査を行っている．そこで，製作した索状フレキシブルクローラ試作機が目標到達部である盲腸まで挿入できるか実験で確認した．今回，駆動用クローラユニットが1機，2機，3機，4機の4種類の索状フレキシブルクローラ試作機を用いて大腸モデルへの挿入実験を行った．

前頭用クローラユニットの1機のみで走行させると，直腸を通過するまでだけで4分32秒と時間を要してしまい，下行結腸の途中までしか走行できなかった．前頭用クローラユニットしか

ないため、推進力が足りなかったことが原因だと思われる。先頭用クローラ1ユニットと駆動用クローラ1ユニットで走行させると、先頭用クローラユニットのみの場合と同じで、下行結腸の途中までしか走行できなかった。盲腸まで移動できない原因は推進力が足りなかったことが原因だと考えられる。しかし、駆動用クローラユニットがないときには下行結腸まで5分39秒かかっていたのに対し、駆動用クローラユニットがあることで2分21秒となり、半分以上時間短縮できる結果となった。これは駆動用クローラユニットがあることで推進力が発生したことが主な要因であると示唆される。先頭用クローラ1ユニットと駆動用クローラ2ユニットで走行させると、横行結腸の途中まで走行することができた。駆動用クローラユニットの数を増やしたことにより推進力が増え、走行距離が長くなったと考えられる。先頭用クローラ1ユニットと駆動用クローラ3ユニットで走行させると、目標到達部である盲腸部までの挿入に成功した。図4にこのときの実験の様子を示す。横行結腸から肝湾曲を通過するまでに時間を要してしまったが、挿入にかかった時間はわずか6分42秒と、短い時間で盲腸部まで機体が走行できたことを確認できた。本実験結果は、提案機構が大腸内視鏡の推進装置としての有効性を示唆する。

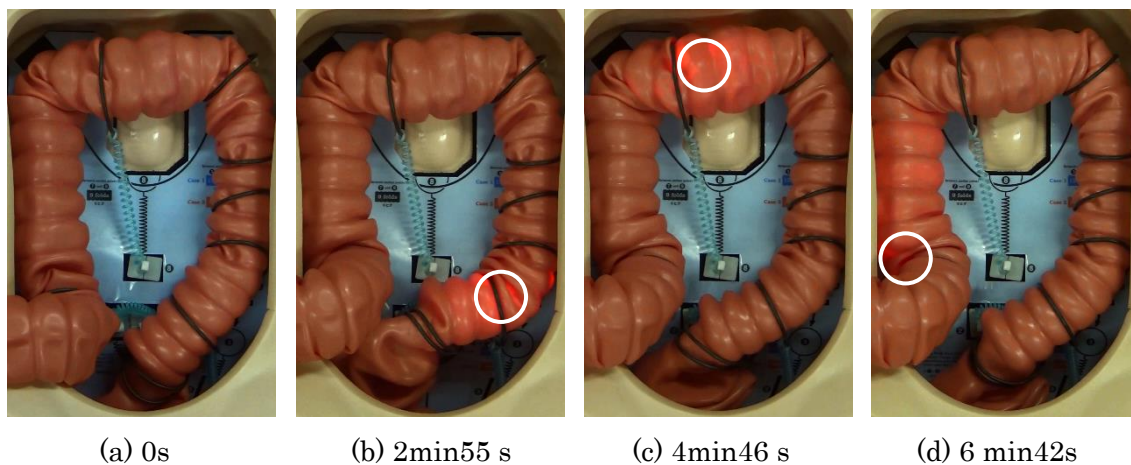


図4 大腸内視鏡モデル挿入実験(4機の場合)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Jun-ya Nagase, Fumika Fukunaga, Keiji Ogawa, Norihiko Saga	4. 巻 1
2. 論文標題 Funicular Flexible Crawler for Colonoscopy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics	6. 最初と最後の頁 22-29
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TMRB.2019.2895800	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2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Jun-ya Nagase, Fumika Fukunaga and Keiji Ogawa
2. 発表標題 Development of a Funicular Flexible Crawler for Colonoscopy
3. 学会等名 2018 7th IEEE RAS/EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 永瀬純也, 福永二三佳
2. 発表標題 索状フレキシブルクローラの開発
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 クローラ型ロボット	発明者 永瀬純也, 福永二三佳	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2018-029233	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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	小川 圭二 (Ogawa Keiji) (80405232)	龍谷大学・理工学部・准教授 (34316)	