

平成 29 年 6 月 15 日現在

機関番号：34316

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26750172

研究課題名(和文)アメーバの推進原理にヒントを得た自走式大腸内視鏡デバイスの開発

研究課題名(英文)Development of autonomous colonoscopy inspired by amoeba locomotion

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) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：近年、食生活の欧米化に伴いわが国でも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。内視鏡を安全に挿入するために、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、ほとんどは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。本研究では、高い推進性能と柔軟性を有する自走式大腸内視鏡デバイスの実現を最終目標として、アメーバの推進原理にヒントを得た小型のクローラロボットを開発し、内視鏡デバイスの推進機構としての有用性を示唆した。

研究成果の概要(英文)：Recently, the number of the colorectal cancer or polyp patient has been increasing. Colonoscopy is often used to diagnostic and treatment from rectal to colon. However, passing an endoscope through the sigmoid colon in the large intestine is the most difficult operation in conventional large intestine endoscopy. Therefore many robots are developed but they cannot moves by itself or fast. Thus we newly proposed a simple and compact cylindrical crawler mechanism inspired by amoeba locomotion for colonoscopy. In this experiment, the utility of developed crawler robot for colonoscopy was demonstrated.

研究分野：ロボット工学

キーワード：クローラロボット アメーバ 大腸内視鏡

1. 研究開始当初の背景

近年、食生活の欧米化に伴いわが国でも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、またその挿入時間や大腸への負荷は医師の技量に大きく依存しているのが現状である。そのため医師の技量に依存することなく内視鏡を安全に挿入するために、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、それらのほとんどは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

本研究では、高い推進性能と柔軟性を有する自走式大腸内視鏡デバイスの実現を最終目標として、アメーバの推進原理にヒントを得た小型のクローラロボットを開発し、内視鏡デバイスの推進機構としての有用性を示唆する。

3. 研究の方法

3.1 基本構造

図1にアメーバの推進原理を示す。アメーバは基本的に、内質と外質、および仮足から成る、単細胞生物である。移動原理は、粘性の高い外質の内側を、流動性の高い内質が前方へ連続的に流れて仮足を前に押し出すことによってアメーバ自身が推進するといわれている。

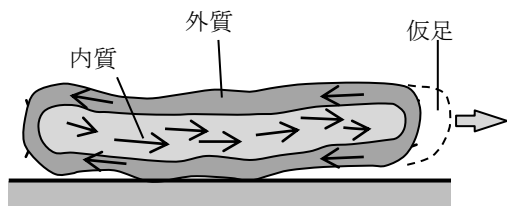


図1 アメーバの推進原理

この推進原理を基に本研究で考案したクローラ機構を図2に示す。このクローラ機構は、ゴム製のクローラベルト6本、ギヤモータ1つ、ウォーム1つおよび円筒状のフレームで構成されている。クローラベルトは、ベルトの外側にウォーム歯と噛み合うための歯が形成されており、フレームの軸周りに対して等間隔に6本配置されている。また、それぞれはフレームを囲うように湾曲させて1本の輪状にしてある。また、ギヤモータはフレームの内部に、その同軸上に固定されている。ウォームはモータ軸に取り付けられ、クローラベルトの歯とそれぞれ噛み合うように配置されている。

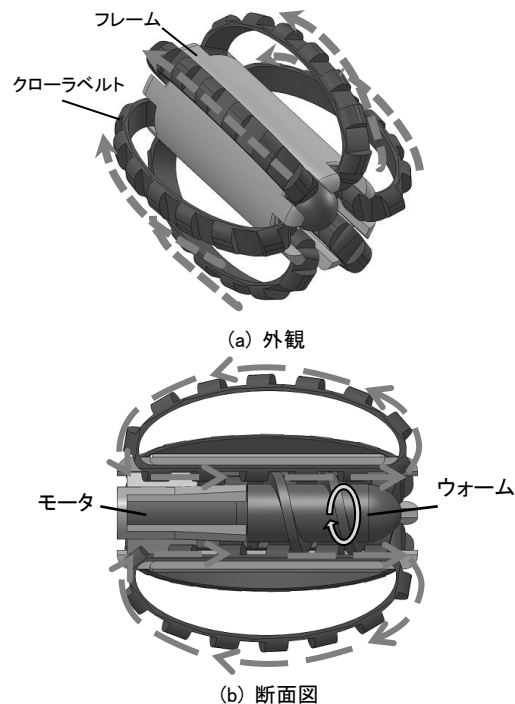


図2 本研究で提案するクローラ構造

駆動原理は、まず、フレームに固定されたギヤモータを駆動させると、モータ軸に取り付けられているウォームが回転を始め、ウォーム歯とクローラベルトの歯が噛み合う。これにより、全てのクローラベルトが同一方向に移動することで、ロボットに推進力が発生する。また、モータを逆回転させることで、同じ原理で後退をすることも可能である。

本クローラ型ロボットは、単一のアクチュエータの源動力から単一のウォームを介し、円筒状のフレームに複数配置したクローラベルトを駆動させる、非常にシンプルな構造のため大幅な小型化が可能である。

さらに、クローラベルトはフレームに対して撓ませて巻かれた構造となっているため、垂直管内の走行時においては、クローラベルトの弾性変形により発生する弾性力によって、クローラ自身を管の内壁に保持しながら管内上昇を行うことが可能となる。これまでに開発されている管内走行用ロボットの管内上昇では、推進用のアクチュエータの他に、ロボットを管内に押しつけてロボットの管内保持を行うアクチュエータと機構を要していたが、本クローラ型ロボットでは管内保持のアクチュエータを必要としない。

また、異径管内の走行の際には、湾曲したクローラベルトが異径管に対し柔軟に弾性変形することにより、管内段差を容易に走行することが可能である。このことにより、本クローラ型ロボットではアクチュエータを使用した段差を乗り越える機構は必要なく、またタイムロスを伴うことなく異径管に入ることができる。曲管においても、異径管と同様に曲面に対しクローラベルトが柔軟に弾性変形することで走行が可能である。

さらに、クローラベルトは円筒状のフレームに対して軸対象に配置されており、ロボットの上下および左右が同時に壁面に接触しても走行可能である。そのため、螺旋運動等で機体を管内段差や曲面などの走行面に対して有意な姿勢に調整する必要はなく、直進運動のみで実際に想定される管内環境を走行することが可能である。従って、水平管内だけでなく垂直管内や異径管内、曲管内においても、使用するアクチュエータは単一のモータのみで走行が可能である。

本クローラ型ロボットの特徴をまとめると、以下のようになる。

- (i) 本クローラ機構はウォームラック機構で駆動するシンプルな構造であるため、大幅な小型化が可能であり、狭い空間内、特に管径の小さな配管内における走行に適している。
- (ii) 垂直管内では、クローラベルトの弾性力を用いることで管内上昇動作が可能となる。
- (iii) さらに、異形管内においてはクローラベルトが管径に応じて柔軟に弾性変形することで、管内段差を容易に走破できる。
- (iv) クローラベルトを軸対称に複数配置しており、ロボットの上下および左右が同時に壁面に接触しても走行可能であるため、走行する管内面に対して旋回運動等で機体を有意な姿勢に調整する必要はなく、直進運動のみで管内を走行することが可能である。

3.2 試作

提案するクローラ型ロボットの試作を行った。はじめに、フレームとウォームの製作について述べる。まず、3DCADによって作成した形状データを、3Dプリンタ(Dimension Elite, Stratasys 製)に転送し造形を行った。なお、材質はABS樹脂である。次に、クローラベルトの製造方法について述べる。まず、液状ゴム(KE1600, 信越シリコン製)を注入した型に蓋をかぶせ、そのまま70℃の恒温室に60分間放置させた。その後、固まって成形されたゴムを取り出し、フレームを囲うように1本の輪状にして、片端に液状ゴムを塗布した後、両片端を密着させた。その状態で再び恒温室に60分間放置して接着させた。また、造形したウォームを、選定したギヤモータ(GP13A SL, Maxon motor 製)の軸に取り付け、フレーム内に配置した。

図3に試作したロボットの写真を示す。試作機は、全長は92mm、質量は0.12kgである。外径は、クローラベルトに外圧が掛かっていない状態ではφ90mm、外圧を掛けてベルトをフレームに接触するまで弾性変形させた状態ではφ46mmである。



図3 試作したクローラロボット

4. 研究成果

4.1 クローラロボットの走行実験

試作したクローラ型ロボットの管内走行実験を行った。はじめに、水平管内および垂直管内走行の実験を行った。水平管および垂直管には、呼び65A相当(内径φ68mm)の亚克力パイプを使用した。また、クローラ型ロボットの走行特性を評価するために、次式に示す速度効率 η [%]を定義する。

$$\eta = \frac{V'}{V} \times 100 \quad (1)$$

ここで V は(1)式で求められるクローラベルトの移動速度の理論値、 V' は走行中の動画からモーションキャプチャにより求めたロボットの実際の移動速度の実験値である。図4、図5にロボットが水平管内と垂直管内をそれぞれ走行している様子を示す。ロボットの管内の移動速度はそれぞれ同一の約30mm/sとなるように走行させた。

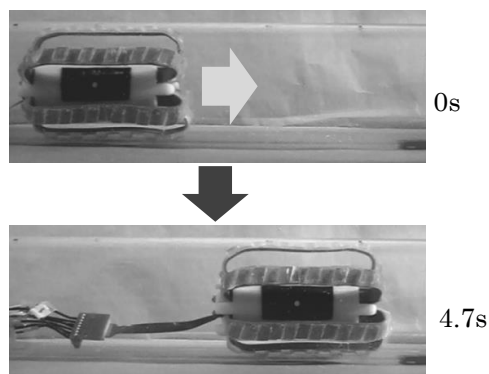


図4 水平管の走行の様子

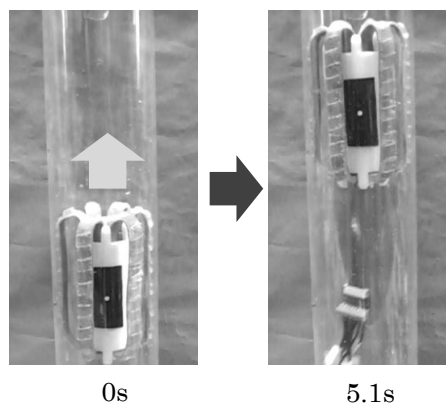


図5 垂直管の走行の様子

まず、試作したロボットは水平管内において、すべてのベルト歯が内壁に接地して走行していることを確認した。また、垂直管内の走行では、弾性変形したクローラベルトの弾性力によって機体を管内保持し、ロボットが管内上昇を行えていることを確認した。図6に水平管内及び垂直管内走行の実験で得られた速度効率を示す。水平管内走行の実験では98.8%の速度効率を得られた。100%とならなかった要因としては、設計の際に、ウォーム歯とベルト歯の歯面同士の摩擦を小さくし噛み合いを滑らかにするため、ウォーム歯ピッチの寸法の16.3mmに対し、ベルト歯ピッチの寸法を15.0mmとし、1.3mmのバックラッシュを設けている。このバックラッシュが、ロボットの移動速度の理論値であるクローラベルトの移動速度 V とロボットの実際の移動速度 V' に誤差を生じさせたと考える。

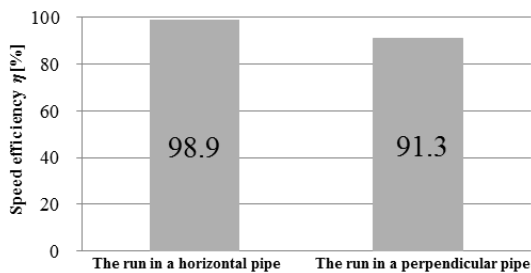


図6 ロボットの速度効率

また、垂直管内走行においては91.3%の速度効率を得られた。管内上昇の際に、機体の軸の若干のブレとわずかなクローラベルトの滑りを確認したことから、垂直管内の走行において8.7%の滑りが生じた要因を以下のように考察する。駆動している1本のクローラベルトにおいて、ベルト歯がバックラッシュを経てウォーム歯と噛み合うまでの間は、モータの駆動力がクローラベルトに伝達しないため、瞬間的に6本のうちいずれかの1本のクローラベルトが駆動しない状態となる。また、ウォーム歯と6本それぞれのベルト歯との幾何学的位置関係により、クローラベルトが駆動しない状態が発生するタイミングは6本それぞれで異なり、ウォームの回転に伴って順々に生じる。このことにより、6本のクローラベルトが駆動をしている際にそのうちの1本がわずかに駆動しないことで、推進方向とは逆向きの微小な負荷がその駆動しないクローラベルトに生じる。そのため、そのクローラベルトの方向へ機体が傾いてしまう。この機体の傾きが順々に生じることでロボットの中心軸は、配管の中心軸に対し若干のブレを生じながら走行を行ってしまうため、管内壁面とベルト歯の接地歯数が一定とならないことから、一定の摩擦係数を得ることができない。従って、垂直管内におけるロボットの管内保持の条件より、鉛直下方向に働く Mg の力に対し、保持力を保てなくなったベルトに滑りが生じたことが、速度効率を低下させた要因として挙げられる。

次に、異径管内走行の実験を行った。実際の配管内は、継ぎ手部、および内径の大きな主管と内径の小さな支管の境界部などに管内段差が存在する。そこで、本クローラ型ロボットは、そのような異径管内においても管内段差の走行が可能かどうかを実験により検証した。図7にロボットが水平の異径管内を走行する様子を示す。異径管の主管には呼び65A相当(内径 $\phi 68\text{mm}$)の亚克力パイプを、支管には呼び50A相当(内径 $\phi 50\text{mm}$)の亚克力パイプを使用した。図7から本クローラ型ロボットは異径管内の走行において、主管から段差を乗り越え支管へ進入する際に、クローラベルトが管内径に対し柔軟に弾性変形することで、異径管内の段差乗り越えを行えていることを確認した。

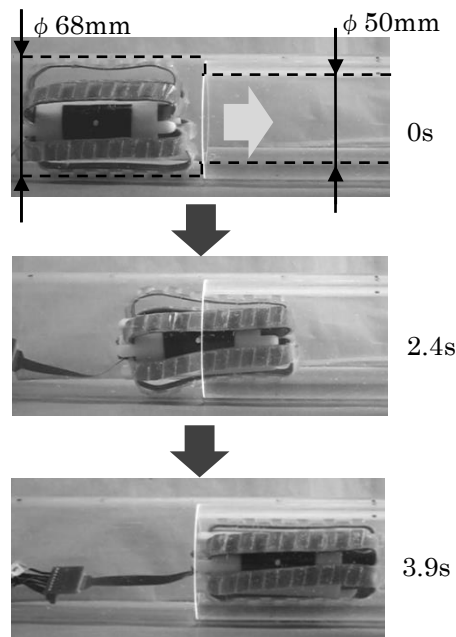


図7 異径管走行の様子

さらに、ロボットが段差乗り越え時に、移動速度を維持して走行しているかを評価するために、ロボットを、主管部のみの様な水平管内、および主管と支管から成る水平異径管内においてそれぞれ走行させ、両者の平均速度の比較を行った。実験では、水平管については内径 $\phi 68\text{mm}$ の亚克力パイプを、異径管についても主管部は内径 $\phi 68\text{mm}$ そして支管部には $\phi 50\text{mm}$ の亚克力パイプを使用した。どちらも長さ200mmの管内を走行させたときの平均速度を測定した。また、異径管内の段差は走行距離の半分である100mm地点に設けた。ロボットの移動速度は、どちらの管内も同一の約30mm/sとして走行させた。図8にその平均速度の結果を示す。主管部のみの様な水平管内を走行させた時の平均速度は31.0mm/sだったのに対し、異径管内を走行させた時の平均速度は30.0mm/sであったため、今回の実験において、本クローラロボットは段差部においても速度が低下することなく異径管内をスムーズに走行する

ことが可能であることが確認できた。

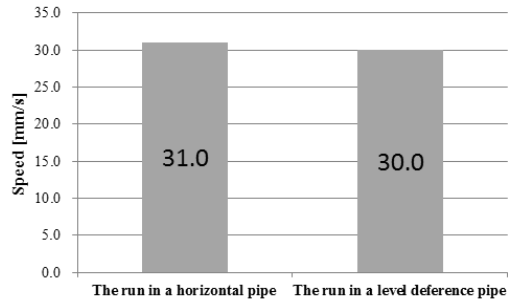


図8 速度効率の比較

4.2 ワイヤーシャフト駆動クローラ

上記のモータ内蔵型ではφ50mmの管内走行が可能であったものの、大腸内を走行するためにはさらにロボットを小型化する必要があるが、小型化しようとした場合、必然的にモータも小さくなるため、駆動力が著しく低下することで推進のために有効な駆動力を得られない問題が生じる。そこで、この問題の解決手段として、図9のようにモータを外付けとし、その回転力をフレキシブルシャフトを通してロボット内部のウォームギヤに伝達する、フレキシブルシャフト駆動機構を設計した。これにより、機体内にモータを取める必要が無いため、大幅な小型化が可能である。

さらに、外付けしたモータの大きさはロボットのサイズや検査対象である腸の大きさに制約されること無く選定可能となるため、従来のモータ内蔵型の問題点であった低トルクに起因した移動速度不足や牽引力不足を解決できる。

提案機構では、フレキシブルシャフトの一端を、機体から外付けしたモータの軸に、もう一端をウォームに接続することで、外付けしたモータのトルクを機体内部に伝達させることができる。ウォームには、その回転軸上に、ロボットフレームの軸方向と同軸上にベアリングで支持された丸棒軸が取り付けられている。また、3本のクローラベルトが円筒状のロボットフレームの軸周りに対して等間隔に、ベルト歯がウォーム歯と噛み合うように配置されている。

このロボットは全長が29.5mmでフレーム直径は16mmであり、3本のゴム製クローラベルトを有している。フレームとウォームは3Dプリンタで製作され、ウォームには全長1mのフレキシブルシャフト(HFS-5.0x7.8, 株式会社ハギテック)が接続されている。

4.3 走行実験

試作したフレキシブルシャフト駆動型が、水平な一様管内の走行が可能であるかの検証を行った。一様管には、内径φ28mmと内径φ25mmの亚克力パイプを使用した。

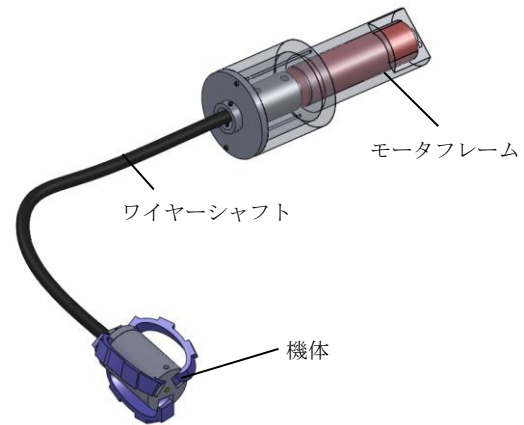


図9 ワイヤーシャフト駆動型クローラ

走行の様子を図10に示す。動作実験を行った結果、モータの回転をフレキシブルシャフトを介してウォームに伝え、ウォームと噛み合うすべてのクローラベルトが駆動して前進する様子を確認した。また、モータ内蔵型が走行可能な最小管内径がφ50mmであったのに対し、フレキシブルシャフト駆動型はその径よりも小径のΦ25mmの管内を走行できることを実証した。

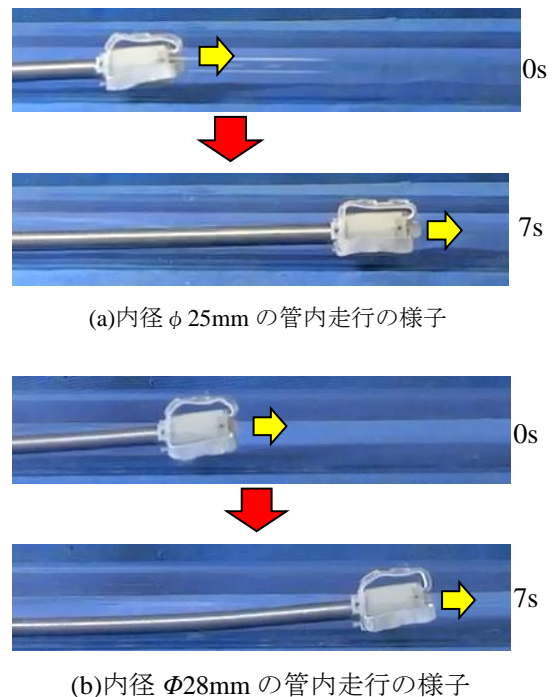


図10 管内走行の様子

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) 永瀬 純也, 重本 佳孝, "管内走行を目的とした円筒状湾曲型弾性クローラの開発", 日本ロボット学会誌, Vol. 33, No. 1, pp. 55-62, 2015. (査読有)
- (2) Jun-ya Nagase, Koichi Suzumori and

Norihiko Saga, "Development of ameba-inspired crawler mechanism using worm gear", International Journal of Biomechatronics and Biomedical Robotics, Vol. 3, No. 2, pp. 92-99, 2014. (査読有)

[学会発表] (計 4 件)

- (1) Fumika Fukunaga and Jun-ya Nagase, "Cylindrical elastic crawler mechanism for pipe inspection inspired by amoeba locomotion", 2016 6th IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob), pp. 424-429, 27 Jun. 2016, Singapore.
- (2) Jun-ya Nagase and Fumika Fukunaga, "Development of a novel crawler mechanism for pipe inspection", 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON 2016, pp. 5873-5878, 27 Oct. 2016, Fiorentina (Italy).
- (3) Jun-ya Nagase and Fumika Fukunaga, "Development of cylindrical elastic crawler for 25A pipe inspection", 2016 International Conference on Manipulation, Automation and Robotics at Small Scales (MARSS 2016), pp. 1-3, 20 Jul. 2016, Paris (France).
- (4) 永瀬純也, 重本佳孝, "円筒状湾曲型弾性クローラの研究—ベルト剛性と牽引力の関係—", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016, 2A1-06b2, 2016年6月10日, パシフィコ横浜(横浜市)

[産業財産権]

○取得状況 (計 1 件)

名称: クローラ型ロボット及びそれを連結した走行ロボット連結体
発明者: 永瀬 純也
権利者: 学校法人龍谷大学, 水 ing 株式会社
種類: 特許
番号: 特許第 6109643 号
取得年月日: 平成 29 年 3 月 17 日
国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 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: 7 0 5 8 2 2 4 5