S152022

大腸内視鏡搭載型ロボットの開発と死んだ豚の大腸内動作実験*

横島 真人^{*1}, 樋高 裕也, 安達 和紀, 中村 太郎^{*2}

Development of an Endoscopic Robot and Experiments in the large intestine of a Dead Swine

Masato YOKOJIMA^{*1}, Yuya Hidaka, Hirokazu ADACHI and Taro NAKAMURA^{*1} Chuo Univ. Dept. of Precision Mechanics, Faculty of Science and Engineering
1-13-27 Kasuga, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8551, Japan

The number of large intestine cancer patients is increasing. However, large intestine cancer can be completely cured if it is treated at an early stage. An endoscope is used in diagnosis and also in treatment of a diseased part of an intestine. However, the large intestine is long and has slack in it such as the sigmoid and transverse colons. Therefore doctors must straighten this slacks to insert the endoscope, which may cause patients pain and discomfort.

In this study, we developed an endoscopic robot with an artificial rubber muscle that moved with peristaltic crawling. Unlike other endoscopic robots, this robot can be attached to a conventional endoscope.

We confirmed that the robot can pull up the slack of the sigmoid colon in a large intestine model that is similar to that of a human body. For it move forward in the large intestine of a dead swine, we fabricated a new mechanism. In addition, we performed two experiments of the robot moving forward through the intestine and pulling up it.

Key Words : Artificial muscle, Air pressure actuator, Peristaltic crawling, Large intestine

1. 緒 言

近年, 消化器官のがん患者が増加傾向にあり, 大腸がんの患者数はがん患者全体の約 16% である⁽¹⁾. しかしながら, 大腸がんは早期に検査・処置を行えば完治が可能である. そのため, 大腸がんの治療には送気, 送水, 組織検査, 治療処置などを行うことが可能な大腸内視鏡が広く使用されている.

大腸の長さは約 1.5 [m] あり, S 状結腸や横行結腸のような部位には弛みが存在しているため, 医師は図 1 のように弛みの直線化を行い内視鏡を挿入しなければならない. 大腸に内視鏡を使用する際, S 状結腸を通過することが最も困難な操作と言われている. また, 内視鏡操作は右手で挿入し, 左手で先端の屈曲を操作するなど, 両手で別の作業をしなければならないことから, 不慣れな医師では検査・処置に時間がかかるという問題がある.

Fig. 1. Images of large intestine and linearization of slack

^{*1} 学生員, 中央大学 理工学研究科

^{*2} 正員, 中央大学 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

E-mail: ^{*1} m_yokojima@bio.mech.chuo-u.ac.jp, ^{*2} nakamura@mech.chuo-u.ac.jp

これまでに、内視鏡ロボット⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾やカプセル内視鏡⁽⁷⁾などの研究が行われてきた。しかし、検査用のものが多く、治療処置ができないといった問題がある。そこで本研究では、管内走行に有効なミミズの蠕動運動⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾を規範としたロボットの開発を行った。本ロボットは大腸内視鏡が搭載可能であることにより、従来の内視鏡の機能はそのまま、通常は医師が行う「内視鏡の推進」と「腸の手繰り寄せ作業」を同時に実現することができる。と考える。

2. 軸方向繊維強化型人工筋肉

ミミズの体節に相当する収縮部には、本研究室で開発した軸方向繊維強化型人工筋肉⁽⁸⁾⁽⁹⁾を用いる。図2に伸長時と収縮時の人工筋肉を示す。人工筋肉には天然ゴムラテックスを用いる。本素材をチューブ状に成形し、ゴム膜内にマイクロカーボン層を内包した構造を有する。マイクロカーボン層は数 μm レベルの細さを持つカーボンロービング繊維をシート状にしたもので、ゴム膜の変形にあわせて繊維幅も広がる。本人工筋肉に空気を供給すると、ゴム層は膨張するが繊維は伸びず軸方向に拘束される。その結果、人工筋肉は半径方向に膨張し軸方向に収縮する。その収縮力をアクチュエータとして利用する。

Fig. 2. An exterior view of the artificial rubber muscle

3. ミミズロボットの概要

3・1 ロボットの構造

これまでに開発したロボット⁽¹⁰⁾の構造を図3に、1ユニットの仕様を表1に示す。本ロボットは内視鏡を搭載可能とするため、フランジ内側は中空機構とし、内視鏡外径 11.5 [mm]に対し内径 13.5 [mm]を確保している。チャンバは人工筋肉とベローズの間であり、チャンバ内に空気圧を供給するための空気チューブは、フランジに設けたガイドによりベローズと内視鏡の間をスライドする機構となっている。

Fig. 3. Schematic diagram of the air tube slide robot (4 units)

Table 1. Specification of one unit

Contraction rate [%]		24.4
Length [mm]	Max	48.0
	Min (0.06[MPa])	36.3
Width [mm]	Max	23.0
	Min (0.06[MPa])	48.1

3・2 動作方法

ロボットの制御システムは、H8 マイコンから出力された信号を、D/Aコンバータ(MCT, MCP4920)を介して比例電磁弁に入力する。信号を入力した比例電磁弁(SMC, TV0030-2M)がコンプレッサからの空気を制御し、各ユニットに供給することで動作する。

3・3 動作パターン

図4に実験で用いる3つの動作パターンを示す。動作パターン2-1-1は、波長2、送り1、波数1としたものである。7SM(7 Step Motion)は、1ユニットずつ順番に動作させていくパターンである。5SMは7SMの動作の中で、前方3ユニットの伸長を1度で行う動作をもつパターンである。

Fig.4. Movement pattern

4. 空気噴射装置

4・1 空気噴射装置の概要

これまで本研究では、実際に医師が内視鏡トレーニングで使用する大腸モデル(京都科学,M4011361-000)で前進・手繰り寄せ実験を行い、横行結腸手前までの走行に成功した。そこで、より人間の大腸の環境に近い死んだ豚の大腸を用いて実験を行った。しかし、豚の大腸は大腸モデルに比べ粘性と弾性が高いため、ユニット伸長時においても腸がロボットに張り付き、前進動作を行うことができなかった。

そこで、我々は本ロボットのユニット間に空気噴射装置を搭載することで、伸長時の張り付きを防ぐことができると考えた。空気噴射装置を搭載したロボットの構造を図5に、送気時の大腸とロボットの関係図を図6に示す。空気噴射装置はベローズの外周にゴムチューブを配置し、フランジ内部を通った空気チューブから送気される。ゴムチューブは後端のみ固定し、前方は開いている。そのため、噴射装置の一つ前方のユニットが伸長する時と同時に送気することで、ユニット伸長時の大腸の張り付きを解除できると考える。

Fig. 5. Schematic diagram of the air-emit robot (4 units)

Fig.6. An influence of wrinkles

4・2 摩擦力測定実験

空気噴射装置による大腸の張り付きへの効果を検証するため、静止摩擦力の測定実験を行った。実験ではロボットの先端に糸を固定し、滑車を介して荷重を加えていく。このとき、ロボットが動いたときの荷重を

測定し、静止摩擦力とする。実験では送気を行わない場合と、全ての空気噴射装置から送気する場合の2パターンで行った。実験装置の概要を図7に、結果を表2に示す。

Fig. 7. Apparatus for the experiment of friction force

Table 2. Comparison of the friction

Air-OFF	1.79 [N] (Average)	Max 2.01 [N] Min 1.60 [N]
Air-ON	1.39 [N] (Average)	Max 1.54 [N] Min 1.16 [N]

表2より、送気を行うことによって静止摩擦力が低下することを確認した。また、送気を行わない場合、大腸のヒダによる引っかかりが多いときに静止摩擦力が大きくなった。しかし、送気を行ったことで大腸の粘性による張り付きだけでなく、ヒダによる引っかかりが解除されていた。ヒダの引っかかりはロボットの前進の妨げになるため、解除できる噴射装置は豚の大腸に対して有効であると考ええる。

5. 死んだ豚の大腸内実験

5・1 前進走行実験

図8に死んだ豚の大腸を用いた実験環境を示す。大腸の長さは約1[m]であり、前進実験は大腸の両端を固定して行う。動作パターンは2-1-1,5SM,7SMの3パターンを用い、ロボットに標点をつけ、MOVIAS Pro(Nac社製)で動画解析を行った。実験結果を図9に示す。

Fig. 8. Apparatus for the movement experiment

Fig. 9. Speed of the robot

実験結果より、送気を行わない場合はほぼ前進することができなかったが、送気を行うことで全ての動作パターンで前進することができた。今回、7SMは5SMと比較し速度が大きくなった。これは7SMが1ユニットずつ動作するため慣性力が小さくなり、戻りを減らすことができたからだと考ええる。

5・2 手繰り寄せ実験

腸の手繰り寄せ実験では、ロボットが前方に進まないよう手を使って固定し、その状態で動作させ手繰り寄せを行う。大腸に標点をつけ、前進動作と同様に動画解析を行う。図10に手繰り寄せ実験の結果を示す。

Fig. 10. Speed of pulling motion (7SM)

図 10 より、手繰り寄せ開始から 60 秒後までの手繰り寄せ速度は平均約 0.26 [mm/s]であった。しかしながら、手繰り寄せ動作を続けるにつれ徐々に速度が減少し、最終的には手繰り寄せを行えなくなってしまう。これは腸を手繰り寄せるにつれて、ユニット間に手繰り寄せた腸が蓄積してしまうからだと考える。そこで、手繰り寄せができなくなった後に、前進動作を行うことで蓄積した腸を後方に送り、再び手繰り寄せを試みた。その結果、再び腸を手繰り寄せることに成功した。

6. 結 言

豚の大腸内の粘性と弾性に対応するため、空気噴射装置を開発した。装置の有用性を検討するため、直線配置した豚の大腸内において静止摩擦力の測定、前進走行、手繰り寄せ実験を行った。

今回、直線配置した豚の大腸内での走行には成功したが、人間の大腸と同様に配置した場合、横行結腸まで到達できなかった。そのため、今後は横行結腸に到達するようロボットの柔軟性を向上させる必要がある。また、手繰り寄せの際にユニット間に腸が蓄積するため、それを解除する機構の開発を行っていく。

文 献

- (1) Foundation for Promotion of Center Research, Statistics of cancer in 2007.
- (2) E. V. Mangan, D. A. Kingsley, R. D. Quinn, and H. J. Chiel, "Development of a Peristaltic Endoscope," Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2002), pp. 347-352.
- (3) G. Yan, and K. Wang, "A Wireless Robot for Gastrointestine," Proceedings of IEEE Transactions on Robotic, vol. 24, no. 1, February 2008, pp. 206-210.
- (4) A. B. Slatkin, J. Burdick, and W. Grundfest, "The Development of a Robotic Endoscope," Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Robot and Systems (IROS 1995), pp. 162-171.
- (5) M. Shinkai, N. Murai, K. Itoh, H. Ishii, A. Takanishi, K. Tanoue, S. Ieiri, K. Konishi, and M. Hasizume, "Development of a robotic endoscope that locomotes in the colon with flexible helical fins," 31st Annual International Conference of the IEEE EMBS, September 2009, pp. 5126-5129.
- (6) S. Wakimoto, and K. Suzumori, "Fabrication and Basic Experiments of Pneumatic Multi-chamber Rubber Tube Actuator for Assisting Colonoscope Insertion," Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2010), May 2010, pp. 3260-3265.
- (7) Y. Ueda (OLYMPUS), "Micromachine: Possibility of Capsule Endoscope and Pancreatic Endoscope," Clinical digestive tract internal medicine, vol. 12, no. 7, 1997, pp. 1059-1064.
- (8) T. Nakamura, and H. Shinohara, "Position and Force Control Based on Mathematical Models of Pneumatic Artificial Muscles Reinforced by Straight Glass Fibers," Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2007), pp. 4361- 4366.
- (9) T. Nakamura, N. Saga, and K. Yaegashi, "Development of Pneu-matic Artificial Muscle based on Biomechanical Characteristics", Proceedings of IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT 2003), pp. 729-734
- (10) Y. Hidaka, M. Yokojima, and T. Nakamura, "Peristaltic Crawling Robot with Artificial Rubber Muscles Attached to Large Intestine Endoscope," Proceedings of 1st International Conference on Applied Bionics and Biomechanics (ICABB 2010), October.