磁気アクチュエータによる大腸内視鏡誘導と腸内観察

Colon endoscope navigation by magnetic actuator and intestine observations

千葉 淳・仙道雅彦・石山和志・須田祐司*・荒井賢一・小丸達也*・白土邦男*

東北大学電気通信研究所, 仙台市青葉区片平 2-1-1 (〒980-8577)

*東北大学大学院医学系研究科, 仙台市青葉区星陵町 2-1 (〒980-8575)

A. Chiba, M. Sendoh, K. Ishiyama, Y. Suda*, K. I. Arai, T. Komaru*, and K. Shirato*

Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai 980-8577

* Graduate School of Medicine, Tohoku University, 2-1 Seiryomachi, Aoba-ku, Sendai 980-8575

A magnetic actuator for colon endoscope navigation was fabricated. We conducted motion tests of the actuator in the small intestine of a pig and the large intestine of a living dog. The actuator is composed of a permanent magnet and a spiral structure, and is attached to the pointed end of an imitation endoscope. When a rotational magnetic field is applied, the actuator rotates and moves in the intestine. It was able to draw the imitation endoscope forward without injuring and changing the shape of the intestine. This result shows that the actuator has the potential to be used for colon endoscope navigation.

Key words: magnetic actuator, spiral structure, colon endoscope, intestine, in vivo test

1. はじめに

近年, 大腸癌は増加傾向にあり, 早期発見・治療が求められている。その大腸癌に代表される大腸疾患の発見手段として, 大腸内視鏡検査は広く用いられている。ヒトの大腸は 1 m を超える長さを持ち, S 状結腸などに代表されるように非常に複雑な構造を持っている。大腸内視鏡は肛門から挿入し, 内視鏡先端の屈曲と押し込みのみで深部まで挿入する。このため, 複雑な屈曲部分は直線化して挿入する必要がある¹⁾。内視鏡直線化の技術習得は難しく, 最深部までの到達が困難であり, 患者への苦痛も医師の熟練の度合によって異なる。また, 押し込みのみで深部へ挿入するので, 腸に穴を開けてしまう穿孔といった事故も起きる可能性がある。このように, 患者により異なる腸の形状や検査を行なう医師の熟練度合によって, 患者の苦痛や事故率が大きく異なるのが現状である。よって, 患者及び医師の負担を軽減するため, 大腸内視鏡挿入を容易にする機構の開発が熱望されている。

我々は先に永久磁石とらせん構造からなるスパイラル型磁気マイクロマシンを開発し, ワイヤレスで推進方向制御が可能であることを示した²⁾³⁾。それを基に, らせん構造をもつ磁気アクチュエータの内視鏡誘導機構を報告した⁴⁾。本研究では, 腸内映像を得るために CCD カメラを内蔵した模擬内視鏡を試作し, プタの腸内で動作を確認した。また, らせん構造をもつ磁気アク

チュエータが生体内でどのような動作をし, 損傷があるかを調べるためにイヌを用いた動物実験を行なったので報告する。

2. 素子構成

市販の大腸内視鏡は硬く, 複雑に折れ曲がった腸の形状を保持しての挿入は困難である。本研究では, 非常に柔軟な CCD カメラのケーブルを用い, また, 外装のシリコンゴムチューブも柔軟な模擬内視鏡を試作した。磁気アクチュエータ付模擬内視鏡の概観を Fig. 1 に示す。磁気アクチュエータは外径 15 mm, 内径 11 mm, 長さ 20 mm のチューブ状永久磁石にゴムをらせん状に巻いた構造をもつ。模擬内視鏡は, CCD カメラ, LED, 送気兼送水用, 吸引用シリコンゴムチューブを配した構造をもつ。腸内粘膜による CCD レンズの汚れを取り除くために送気兼送水チューブはレンズを洗浄できる構造になっている。これらの先端部分にベアリングを介して磁気アクチュエータを取り付けた。磁石は直径方向に着磁しており, 外部から回転磁界を印加することで磁石を回転させ, らせん構造より回転を推力に変える。このとき, ベアリングの働きによりアクチュエータ部分のみが回転し, 模擬内視鏡はねじれない構造になっている。

Fig. 1 Schematic view of the imitation endoscope and magnetic actuator.

3. ブタでの動物実験

3.1 実験方法

前述したアクチュエータの動作をブタの小腸内において確認した。内寸 190 mm × 190 mm × 30 mm のケース内を生理食塩水で満たし、この中にブタの小腸をピン止めした。腸内に試作した磁気アクチュエータ付模擬内視鏡を入れ、ケースごと Fig. 2 に示す回転磁界発生用 3 軸ヘルムホルツコイル内に入れ動作を確認した。3 軸ヘルムホルツコイルは、コイル間隔がそれぞれ 200 mm であり、ジョイスティックを用いて、回転磁界の回転面及び回転方向を任意にかつ 3 次元的に制御できる。模擬内視鏡の操作は 2 名で行なった。1 名が、模擬内視鏡の挿入操作及び腸内の送気・吸気操作を行い、もう 1 名がジョイスティックを用いて、回転磁界の制御を行い、磁気アクチュエータの操作を行った。回転磁界の磁界強度は 100 Oe、回転周波数は最大で 1 Hz とした。

3.2 実験結果

小腸における実験結果を Fig. 3 に示す。図中左上の白実線で囲まれた部分に内視鏡先端部分がある。右下はその腸内映像となる。送気により腸を膨らませた状態において、磁気アクチュエータの推進力と手許での押し込みによる力の両方を用いて模擬内視鏡を挿入した。腸が立体的に交差している上り勾配の部分も問題なく乗り越える事ができた。また、曲率半径が約 30 mm の湾曲部分も通過できることが示された。アクチュエータの推進はスムーズであり、長く複雑な腸の形状を変えることなく最深部まで到達できることが確認できた。CCD カメラからの映像も良好で、送水による洗浄も問題なく行なうことができた。また、約 700 mm の最深部まで 210 秒で挿入できた。実際の大腸内視鏡検査において、最深部に到達するまでの時間は検査に熟練した医師で 5・10 分程度とされている。ヒトの腸の長さを 1500 mm とすると、本実験で得た挿入速度は 7 分程度で最深部まで到達できることになり、十分な速度で推進したと考えられる。以上から、らせん構造をもつ磁気アクチュエータが腸内において、細く、柔軟なチューブを牽引しながら推進可能であることが示された。特に柔軟なチューブを用いることで腸の形状を変えることなく深部まで推進できるので患者への負担を大きく軽減できると考えられる。しかしながら、磁気アクチュエータが回転する際にはアクチュエータと腸内壁が接触するため、実際に生体への程度の影響があるかを検討する必要がある。

4. イヌを用いた動物実験

4.1 実験方法

前述した磁気アクチュエータが生体内での動作を確認し、腸内壁へのダメージがどの程度見られるかを調べるためイヌを用いた動物実験を行なった。実験では、体重 12 kg のビーグル犬を用いて実験を行なった。実際に模擬内視鏡を挿入する前に前処理を行なった。前処理として、前日分の食事から低残渣検査食を与え、夜には下剤入りの水を飲ませ、消化管内に食べたものができる限り残らないようにした。実験前に麻酔をかけ、グリ

Fig. 2 Photograph of the three-dimensional rotational magnetic field supply system.

(1) 0 s.

(2) 90 s.

(3) 210 s.

Fig. 3 Photograph of an experimental result (small intestine of a pig).

セリン浣腸にて腸内を洗浄した。その後、気道確保・持続麻酔・点滴を行った。自己呼吸・沈静状態にし、ベッドに寝かせて 3 軸ヘルムホルツコイル内にベッドごと入れた (Fig. 4)。前処理の後、前述の実験同様に磁気アクチュエータ付模擬内視鏡を挿入し、実験を行なった。一般的なビーグル犬の大腸は疑問符のような形状を呈しており、腸壁も滑らかで、管腔の太さもほぼ均一である。実験時は、模擬内視鏡の後方より消化管用電子内視鏡 (GIF-XQ240: オリンパス光学工業) を挿入して、模擬内視鏡の動作と動作後の腸内状態を確認した。この実験の操作は 3 名で行なった。内視鏡挿入に熟練した技術を持つ医師が電子内視鏡の挿入操作を、もう 1 名が模擬内視鏡の挿入操作及び腸内の送気・吸気操作を行い、残りの 1 名がジョイスティックを用いて、回転磁界の制御を行い、磁気アクチュエータの操作を行った。本実験では、

- (1) 電子内視鏡にて腸内の初期状態の観察
- (2) 磁気アクチュエータ部分のみの動作確認
- (3) 磁気アクチュエータ付模擬内視鏡の動作確認

の手順で行なった。(2)、(3) の実験後には電子内視鏡で腸内の状態を観察している。(1) の実験における、電子内視鏡で撮影した大腸内の初期状態を Fig. 5 に示す。観察の結果、このイヌの大腸の長さはヒトに比べ短く、約 400 mm であった。本実験での回転磁界の磁界強度は 100 Oe、回転周波数は最大 0.5 Hz とした。なお本実験は、「東北大学における動物実験における動物実験に関する指針」に基づいて行なった。

4.2 実験結果

はじめに、磁気アクチュエータ部分のみでの実験結果を Fig. 6 に示す。このとき後方の電子内視鏡で送気・吸気を行いながら、アクチュエータを動作させた。推進した結果、大腸内を約 250 mm 推進することが確認できた。また、腸内壁への影響は磁気アクチュエータが通過した場所のすべてにおいて目視による損傷は見られなかった。

次に、模擬内視鏡を牽引しながらの磁気アクチュエータの動作の実験結果を Fig. 7 に示す。模擬内視鏡を牽引しながら、イヌの大腸内を約 350 mm 推進することが確認できた。このときも後方から電子内視鏡を挿入しており、動作を確認している。CCD カメラからも腸内の映像が確認できた。腸内壁への損傷は、これ以上進まない場所において、約 5 分間同じ場所で回転させる事でわずかな楕円点状出血が見られた (Fig. 8)。但し、スムーズに推進した部分では、すべてにおいて目視での損傷は見られなかった。

以上の結果から、らせん構造をもつ磁気アクチュエータはイヌの腸内において、柔軟なチューブを牽引しつつ推進可能であることが示された。また、スムーズに推進した部分において目視による腸内壁の損傷は見られなかった。但し、同じ場所で約 5 分間回転させた場合には、わずかな損傷が見られた。今後、磁気アクチュエータの回転による腸内壁への影響がどの程度の時間や力で現れてくるか検討していく必要がある。

Fig. 4 Photograph of the dog being laid in 3-axis Helmholtz coils.

Fig. 5 Photograph of the original condition of the large intestine of a dog.

Fig. 6 Photograph of an experimental result (magnetic actuator).

Fig. 7 Photograph of an experimental result (imitation endoscope with a magnetic actuator).

さらに、外部回転磁界発生装置の座標系に対する位置・方向を模擬内視鏡の映像からは取得することができない。このため回転磁界面を制御することが困難になり、模擬内視鏡の誘導が困難になる場面が見られた。今後、アクチュエータの位置や推進方向等の情報を得る機構を取り入れ、改善していく必要がある。

5. まとめ

永久磁石とらせん構造からなる磁気アクチュエータの大腸内視鏡への応用を目的として、試作した模擬内視鏡の動作をブタの小腸内、更に、動物実験にてイヌの大腸内において確認した。この結果、本アクチュエータが生体内において駆動可能であり、模擬内視鏡を牽引できることが示された。特に、イヌの大腸内において、スムーズに駆動した場所で腸内壁に損傷がないことを確認した。これらの結果から、本アクチュエータが大腸内視鏡の誘導補助機構として有用であることを示している。

Fig. 8 Photograph of an experimental result (damage to the large intestine).

今後、磁気アクチュエータの回転による腸内壁への影響に関しては、腸粘膜の微細な構造を観察可能な内視鏡や粘液の潜血反応等を用いた方法で検討していく必要がある。また、磁気アクチュエータの位置・推進方向検出などを用い、腸内映像と外部磁界の座標系を一致させるなど、操作系の問題を解決し、誰でも簡単に操作できるシステムが必要である。

文 献

- 1) S. Kudoh: Colonoscopy "Questions & Answers" (Iyaku (Medicine and Drug) Journal Co., Osaka, 2000)
- 2) T. Honda, K. I. Arai, and K. Isiyama: *IEEE Trans. Magn.*, 32, 5085 (1996).
- 3) M. Sendoh, A. Yamazaki, K. Isiyama, K. I. Arai, and M. Inoue: *Trans. IEE of Japan*, 120-A, 301 (2000-3).
- 4) M. Sendoh, K. Isiyama, Y. Suda, and K. I. Arai: *J. Magn. Soc. Jpn.*, 27, 138 (2003).

2003 年 10 月 22 日受理, 2004 年 1 月 15 日採録