ブタ腸内におけるカプセル内視鏡用磁気アクチュエータの駆動

Moving of a Magnetic Actuator for a Capsule Endoscope in the Intestine of a Pig

千葉 淳・仙道雅彦・石山和志・荒井賢一
東北大学電気通信研究所, 仙台市青葉区片平 2-1-1 (〒980-8577)

A. Chiba, M. Sendoh, K. Ishiyama, and K. I. Arai
Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University, 2-1-1 Katahira Aoba-ku Sendai 980-8577, Japan

Application of a magnetic actuator to a capsule endoscope is proposed. Capsule-type magnetic actuators were fabricated and their motion properties were investigated in a silicone tube and in the intestine of a pig. The dummy capsule is 11 mm in diameter and 40 mm in length. This magnetic actuator is composed of a permanent magnet inside the dummy capsule and spiral structures outside it. The permanent magnet is magnetized in the direction of the diameter. When a rotational magnetic field is applied, the magnetic actuator rotates and moves wirelessly. The velocity of capsules with top spirals was examined in a silicone tube. In addition, a motion test was conducted in the intestine of a pig. The actuator can pass through the small and the large intestines over distances of 450 mm and 400 mm, respectively, in less than 150 s. The capsule can pass out of the bag-shaped section of the large intestine. This result shows that the actuator has the potential to be used in the guidance system of a capsule endoscope.

Key words: capsule endoscope, magnetic actuator, rotational magnetic field, spiral structure, intestine

1. はじめに

近年,世界的な高齢化の進行により患者の QOL(Quality Of Life)を向上させるための医療技術,特に低侵襲診断・治療に注目が集まっている.その中でも,飲み込むだけで胃や腸などの消化管内を観察できるカプセル内視鏡が注目されている¹⁾.このカプセル内視鏡には,現在の胃カメラや大腸内視鏡での検査のように局所麻酔をかけたり,長い管を挿入する際の苦痛がなくなるといった利点がある.また,これまで観察の難しかった小腸内の観察にも大きな期待が寄せられている.しかし,カプセル内視鏡は推進機構を持たず,消化管の蠕動運動で受動的に移動するので病変を見逃してしまう可能性がある.また,推進機構を持たないことで体内に残留して,人体に影響を与えてしまう可能性もある.したがって,カプセル内視鏡に何らかの推進機構を付加することが望まれている.カプセル内視鏡推進機構の重要な性能として,ワイヤレス駆動と3次元方向制御が挙げられる.磁気アクチュエータは,これらの性能を

満たし,カプセル内視鏡の推進機構としての役割を充分果たせると考えられる.

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,磁気アクチュエータによる大腸内視鏡誘導機構が有効であることをイヌの動物実験で示した⁴⁾.また,カプセル型磁気アクチュエータがシリコンチューブ内を駆動可能であることを示した⁵⁾.本研究では,先端部分までらせんを巻いたカプセル型磁気アクチュエータの速度特性をシリコンチューブ内で確認した.また,生体内で駆動可能であることを確認するため,ブタより摘出した腸内でカプセル型磁気アクチュエータの動作を確認したので報告する.

2. 素子構成

カプセル型磁気アクチュエータは内部に永久磁石,外部にらせん構造を持つ.永久磁石は直径方向に着磁しており,外部より回転磁界を印加することでカプセルは回転し,らせん構造により回転を推力に変える(Fig. 1).このとき,らせん形状により発生する推力や推進速度は変化すると考えられる.試作したカプセル型磁気アクチュエータの概略図を Fig. 2 に,写真を Fig. 3 に示す.試作したアクチュエータのサイズ(11 mm×40 mm)は現在実用化されているカプセル内視鏡のサイズ(11 mm×26 mm)とほぼ同サイズとした.らせんとして直径1 mmの丸断面のビニール線を用いた.

Fig. 1 Conceptual illustration of capsule endoscope-utilized magnetic actuator.

3．先端らせん

3.1 実験方法

磁気アクチュエータはらせん構造によって、推進力を発生する。らせん構造を効果的に利用できれば、推進力を向上できると考えられる。そこでカプセルの前方後方にある球面の部分にまでらせんを巻くことで、推進力を向上させることができると考えた。先端らせんの構造を持つカプセル型磁気アクチュエータの写真を Fig. 4 に示す。同図に示されるように、先端らせんはらせん構造をカプセルの先端部分まで伸ばした構造を持つ。先端部分にらせんを巻いたことで、全体のらせん長が長くなり推力の向上が考えられ、さらに前方が閉じている腸を駆動する際に、腸を広げて推進できる効果が期待される。先端らせんによる効果をシリコンチューブ内で確認した。水位を変えた場合の速度を測定し、先端らせんの有無で比較した。速度測定の実験系の概略図を Fig. 5 に示す。この実験系を Fig. 6 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、カプセル型磁気アクチュエータの推進速度を測定した。らせん形状は、らせん角度 45° 、らせん条数 2 のカプセル型磁気アクチュエータを用いた。回転磁界周波数は 1 Hz、回転磁界強度を 8 kA/m とした。

3.2 実験結果

推進速度の測定結果を Fig. 7 に示す。同図に示されるように、先端らせんを付加することで推進速度が向上していることが分かった。推進速度が向上した理由が 2 つ考えられる。1 つは、推進力を発生させるらせん長さが大きくなり、推進力が向上したこと。もう 1 つは、先端にらせんを付加したことで、前方のチューブを広げる効果が現れて推進速度が向上したことである。腸内を通過する場合には、特に後者の効果が大きいと考えられる。すなわち、閉塞部のようなカプセルの前方が閉じている場所に遭遇した際に、先端らせんの効果で容易に通過できる場合が出てくると考えられる。また、水位が高くなると先端らせんの効果が小さくなるという結果は、水圧が先端らせん部分のチューブを広げる効果を上回っているためと考えられる。以上の結果から、先端らせんは腸内を推進する際に大きな効果があると考えられる。

4．ブタ腸内での動作

4.1 実験方法

カプセル型磁気アクチュエータの動作をブタの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、この中にブタの腸をピン止めした。腸内に試作したカプセル型磁気アクチュエータを入れ、ケースごと回転磁界発生用 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

Fig. 2 Schematic view of a capsule-type magnetic actuator.

Fig. 3 Photograph of a capsule-type magnetic actuator.

a) Side view

b) Top view

Fig. 4 Photograph of a capsule-type magnetic actuator (with top spirals).

Fig. 5 Schematic view of velocity measurement.

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。回転磁界周波数は 1 Hz、回転磁界強度を 8 kA/m とした。らせん形状はらせん角度 45°, らせん条数 4 を用いた。

4.2 小腸での動作

小腸での実験結果を Fig. 8 に示す。実験で使用したボタン小腸の内径はカプセル型磁気アクチュエータの外径と同程度である。図中白実線で囲まれた部分に磁気アクチュエータがある。破線は推進経路を示している。実験の結果、腸の形状を変えることなく約 450 mm 先の目的地まで 2 分 30 秒で到達することを確認した。また、湾曲部分では曲率半径約 30 mm の湾曲部も通過できることが示された。アクチュエータの動作もスムーズであり、回転磁界による方向制御で目的地まで問題なく推進できる事が確認できた。以上の結果から、らせん構造をもつ磁気アクチュエータが管径の大きさが同程度の腸内において、推進可能であることが示された。

4.3 大腸での動作

大腸での実験結果を Fig. 9 に示す。図中白実線で囲まれた部分に磁気アクチュエータがあり、破線は推進経路を示している。同図から分かるように、大腸の管径は最大で小腸の 2~3 倍の大きさである。また、大腸にはハウストラと呼ばれる袋状の構造があるためカプセルが袋部分に入り込みやすく、推進しにくい形状になっている (Fig. 10-(a))。袋状構造の大きさは大小様々であり、すべての袋部分に入り込まず深部まで推進することは難しいと考えられる。すなわち、袋状構造から脱出できることがカプセル内視鏡の推進において重要であると考えられる。本アクチュエータは目的地までの約 400 mm を 2 分 30 秒で到達することができた。この推進時間は、袋状構造を脱出する時間も含まれており、大腸内視鏡検査の深部までの到達時間と比較しても同程度の到達時間で、十分な推進速度であると考えられる。また、外部から印加する回転磁界の周波数を 0.1 Hz 程度まで低くしつつ回転磁界面を変化させることで、カプセル型磁気アクチュエータが袋状構造から脱出できる事が確認できた。これは回転磁界の周波数を低くすることでカプセルは進まず、その場所で旋回することができ、推進方向を探ることができるためである (Fig. 10-(b), (c))。以上の結果から、カプセル型磁気アクチュエータが腸内を推進できることが確認できた。推進時間も十分であり、回転磁界面の変化による方向転換も有効であることが分かった。腸特有の袋状の構造にも方向転換で対応でき、カプセル型磁気アクチュエータが非常に有効であることが確認できた。

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カプセル内視鏡への応用を目的として、試作したカプセル型磁気アクチュエータの動作をシリコンチューブ及び

Fig. 6 Photograph of the three-dimensional rotational magnetic field supply system.

Fig. 7 Relationship between the velocity and water depth.

Fig. 8 Photograph of an experimental result (small intestine).

a) 0 s

b) 210 s

Fig. 9 Photograph of an experimental result (large intestine).

ブタ腸内において確認した。この結果、本アクチュエータがブタ腸内においてワイヤレスで駆動可能であることが示された。また、先端らせんによる推進力増加や回転磁界面を変化させることで方向転換も有効であることが確認できた。以上の結果は、本アクチュエータがカプセル内視鏡の推進機構として有用であることを示している。

今後の検討としては、今回の結果より平面配置した腸での動作確認はできたので、立体的に配置した腸での確認も必要である。また、磁気アクチュエータの推進力向上が重要であるので、そのためには、らせん形状の最適化などを検討する必要がある。更に、カプセル型磁気アクチュエータの動作を動物実験等で確認することも検討したい。一方、小型化についても検討が必要である。小型化は、患者への苦痛を軽減できるような利点がある。また、更に小型化することで腸だけではなく、血管などの細い管腔への応用の可能性が広がってくる。しかし、更なるカプセル内視鏡の小型化は、全体のらせん長さが減少することによる推

a) Dead end

b) Turn

c) Passage out of the bag-shaped section of the large intestine

Fig. 10 Schematic view of the method of passage through the large intestine.

力低下等の問題が出てくるため、今後の検討が必要である。

References

- 1). G. Iddan, G. Meron, A. Glukhovsky, P. Swain: *Nature*, **405**, 417 (2000)
- 2). T. Honda, K. I. Arai, and K. Ishiyama: *IEEE Trans. Magn.*, **32**, 5085 (1996).
- 3). M. Sendoh, A. Yamazaki, K. Ishiyama, K. I. Arai, and M. Inoue: *Trans. IEE of Japan*, **120-A**, 301 (2000-3).
- 4). A. Chiba, M. Sendoh, K. Ishiyama, Y. Suda, K. I. Arai, T. Komaru and K. Shirato: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **28**, 433 (2004).
- 5). M. Sendoh, K. Ishiyama, and K. I. Arai: *IEEE Trans. Magn.*, **39**, 3232 (2003).

2004 年 10 月 6 日受理, 2005 年 1 月 14 日採録