

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 22 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26350538

研究課題名(和文)消化管内走行カプセルの研究

研究課題名(英文)Impulse-driven Capsule for Medical Inspection

研究代表者

伊藤 高廣 (ITO, Takahiro)

九州工業大学・大学院情報工学研究院・教授

研究者番号：10367401

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：患者負担の少ない消化管内検査を目指して、体内を傷つけることなく移動できるカプセルの研究開発を行った。成果は次のとおりである。(1)消化管内移動のメカニズム検証及び解析 (2)カプセル用カメラ選択検討とテスト基板への実装、検証 (3)大腸モデル及び動物の腸管を使った検証。ニーズ調査に基づき、大腸用カプセルボディを制作し、相当する長さで強力化した駆動機構(リニアアクチュエータ)を開発した。従来の10倍の駆動力である2Nを達成した。さらに大腸モデルや動物の腸管を用いて移動が可能であることを実験により検証した。駆動原理は単純であり、より微小なサイズにも適用できる。

研究成果の概要(英文)：We have developed a capsule endoscope that can move by itself. Measuring only 11mm in diameter and 31 mm in length, it is sufficiently small to be placed in human gullet or intestines. This capsule has an electromagnetic vibration actuator which consists of a coil and a magnet, and an electric pulse drives the magnet to move the capsule. This actuator needs to generate larger driving force than frictional resistance of human gullet or intestines and weight of the capsule including a camera, a circuit board and a battery.

研究分野：マイクロメカニズム

キーワード：カプセル カプセル内視鏡 自走式

1. 研究開始当初の背景

人体のおよそ 70%は細い管で構成されているといわれている。細く柔らかい管の中を走行する微小な機械が実現すれば、従来困難であった診療・治療の可能性を飛躍的に広げ解決手段を提供できるようになる。

胃や腸などの消化管内を移動する機械については、国内外ですでにいくつかの提案がなされてきている。しかし、それらは機械外部に移動のための手足に相当する突起があるものや、水で満たした消化管内を尾ひれのような駆動装置を動かして泳ぐもので、体内を傷つける恐れがあった。また、滑らかな形状であっても、腸のぜん動運動を利用して自然に押し出されたりするもので検査に約 1 日を要し、滑らかな外形を持ちつつ自走できる微小機械は実現されてこなかった。

自走できる滑らかな形状の小さなカプセルが実現できれば、ぜん動運動に加えて自力で移動するので、検査にかかる時間、さらには入院費用を削減することができる。そこで、振動を利用して走行する滑らかな外形のカプセルを考案し実験を進めてきた。

これまでに、この消化管内走行カプセルの 1 次試作品を完成し、ブタの腸の上を含めた走行実験を行ない、基本性能を確認した。この成果は、平成 16 年 4 月 21 日の日刊工業新聞第一面に記事で紹介されるなど、注目を集めた。平成 17 年度からは科研費を給付いただき、小型化、高効率化等の改良を行った。走行カプセルの外観を図 1 に、内部構造を図 2 に示す。その結果、走行機構について長さは従来の 1/2 以下の 10mm とし、走行速度は 2 倍以上の 10mm/s へ改善を達成した。



図 1 . 走行カプセル外観

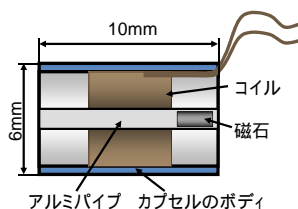


図 2 . 内部構造

また、平成 20 年度からも引き続き科研費を採択いただき、外部からの電力供給なしに走行できる無線化を施し、さらに検査投薬機能をマイクロマシン技術の応用により開発した。自走化した機体を図 3 に、投薬機構を図 4 に示す。この成果も、平成 23 年 7 月 29 日の毎日新聞、同年 9 月のロボコンマガジン誌に記事で紹介された。しかし、自走化は

達成できたものの、機体サイズが大きく、まだ消化管内に入れることはできない。そこで、さらなる駆動機構の小型化によりカメラを搭載すること。任意方向への移動の必要があり、科学研究費補助金を申請した。社会実装を目指しこれら機能の実現を迫及した。



図 3 . 自走機体
(長さ 50mm, ボトル蓋と同等の大きさ)

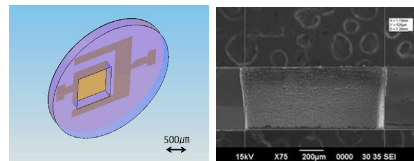


図 4 . 投薬機構と断面 SEM 写真

2. 研究の目的

高齢化社会を迎え、低負荷の医療検査技術の必要性が高まっている。本提案のメカニズムは、なめらかな外形の自走式カプセルで、生体内を傷つけることなく検査・治療が可能である。従来のカプセル内視鏡は自走できず、消化管のぜん動運動に頼って移動するため、検査に時間がかかり、従来の走行カプセル研究では、足や尾ひれなどの突起部が体内を傷つける恐れがあった。振動を利用して体内を傷つけず自走できる本マイクロメカニズムの先進性を生かし、かつマイクロロボット技術など保有する技術を駆使して、消化管内を任意方向へ走行できるカプセルカメラの実現を目的とした。

3. 研究の方法

体内任意方向自走カプセルを実現するために、

1. 平成 26 年度：シミュレーションによる走行力強化検討、駆動機構の小型化の基本的検討と実験

2. 平成 27 年度以降：小型化した駆動機構により生じたスペースに小型カメラ搭載を搭載して映像を外部に送る検討および、走行機構の開発と実験に基づく改良の順で研究を進めた。

(1) カプセル走行機構の小型化

カプセル内にカメラ搭載スペースを捻出するためには、カプセル駆動機構の小型化が必須である。走行カプセルは、内部磁石あるいはコイルの往復運動による振動を走行原理としているため、カプセル内でカメラ搭載にスペースを割くと、磁石往復運動の長さが短くなり、走行のための力を著しく弱めることとなる。この問題を克服するため、コイル

の改良による電磁力の増強、コイルに流す電流波形の改良による走行効率の改善がさらに必要となった。

(2) 任意方向移動機構 検討、開発、改良

医師からのニーズのある、カプセルの任意方向移動を実現する。このため、前後方向にのみ振動させていた駆動用磁石を、左右にも振動させる機構の検討を行なった。前後と左右の移動機構が磁力で干渉しないよう工夫するとともに、サイズを大きくせず実現する方法、機構を検討した。

(3) シミュレーションによる検討

走行カプセルの走行原理は、カプセル内磁石の往復運動による衝撃力、慣性反力である。しかし、単純な往復運動のみでは、その場で振動するだけで一方向に走行することはできない。走行のためには、左右非対称な内部構造が関係している。この走行原理を力学モデルによりシミュレーションできれば、より速く移動するカプセルを設計することが出来るようになる。

平成 26 年度は、カプセル内電磁力分布を考慮した駆動機構コイルのモデル化を行い、より実際に近い理論解析、数値シミュレーションを行なった。

(4) カメラ搭載

走行カプセルは、消化管手術後の導通検査への使用を第一目的に考えていたため、走行機能に限定されていた。しかし、検査、そして将来体内から生体試料を採取する機能、投薬機能を付加して、体内特定部位の一部を取って来る、あるいは体内特定箇所だけに薬を与える際にも映像確認が必要となる。小型カメラと伝送装置をカプセル用に選定し、映像確認の実験を行なった。

(5) 検証実験によるシステム評価

大腸モデルによる検証を行った後、腸（豚）を業者から購入し、腸内走行の検証を行った。湿った粘性のある腸内環境でも走行できることを確認した。

4. 研究成果

(1) カプセル走行機構の小型強力化

カプセル内にカメラや回路、ワイヤレス給電機構搭載スペースを確保するためには、カプセル駆動機構の小型化が必須である。成人がカプセルを飲み込むためには直径 11 mm 長さ 26 mm の現状カプセル内視鏡のサイズがほぼ限界であり、この空間内にカメラ、回路、受電コイルとともに収めるためには走行機構の長さを 8 mm に収める必要がある。

また、豚の腸モデルを用いた実験から腸壁との間の走行抵抗は 0.1 N 以内と推定でき、これを超える 0.4 N 以上の駆動力を目標とした。この問題を克服するため、コイルの改良による電磁力の増強、コイルに流す電流波形の改良による走行効率の改善を行った。駆動装置のさらなる小型化は、強力な永久磁石の組み合わせ、コイルの巻き

方の工夫、部品の加工精度向上、摩擦力低減により高効率化を達成した（図 5）。

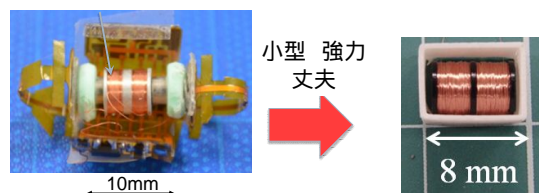


図 5 . 走行機構の小型強力化

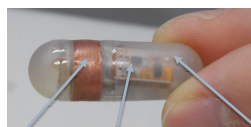
平成 27-28 年度に、駆動機構サイズを従来の 10mm から 8 mm に小型化して、かつ推進力 0.2 N にアップしたカプセルを開発した。小型化にもかかわらずカプセル走行に必要な推進力を得るため、コイルの巻き方の改良により電磁力の増強を 0.1N から 0.2N まで強化した。具体的にはコイルを稠密に巻くとともに分割巻きコイルを用いて電磁力を増強し、推進力 0.2 N を達成した。以上の検討のために、SOLIDWORKS Simulation を用いてコイル改良の効果を解析し、加振機を用いた実験により、振動数と走行速度間の関係を求めた結果、推進力 0.2 N を達成した。

平成 29 年度は、大腸用のカプセルボディに対応させるため、全長を伸ばしたアクチュエータを設計製作した。アクチュエータについては、工作精度を高め、かつ振動抵抗を小さくするために摺動部品に表面処理を施すことで、推進力 2 N を達成した。加えて、磁石移動時の空気抵抗を減らすためにアクチュエータケースに小穴を設けるなど改良を行った。この結果、温度上昇を抑え、かつ従来よりも出力を向上させた駆動機構を開発することができた。

(2) 大腸用カプセルの開発

現在の走行カプセルの問題点は、移動方向が前後に限られていることである。そこで、当初は任意方向へ移動する駆動機構の研究を計画した。しかし、医療関係者への聞き取り結果から、任意方向移動よりは、大腸内を肛門から逆走して撮影できることが、大腸内検査の時間短縮になり、大腸疾患患者数が小腸疾患患者数よりはるかに多いこと、ニーズ、市場面でも重要であることが判明した。また、自走化したカプセルは走行機構でカプセル内空間が占められているものの、消化管内の検査に使用するためにはカメラ搭載が必須でありそのための空間をカプセル内に確保する必要がある。そこで、従来の小腸用カプセルよりも 5mm 長い大腸用カプセルボディを制作し、相当する長さで強力化した駆動機構（リニアアクチュエータ）を開発した。強力な永久磁石の組み合わせ、コイルの巻き方の工夫、部品の加工精度を増し、摩擦力低減による高効率化を総合して、従来の 10 倍の駆動力である 2N を達成した。さらに大腸モデルや動物の腸管を用いて移動が可能である

ことを実験により検証した。



走行用回路 走行機構
ワイヤレス受電コイル

図6．大腸用カプセル

(3) シミュレーションによる検討

駆動機構のコイルが最大の電磁力を発生できるように、導線の巻き方、寸法を計算機シミュレーションによって検討し、実装に反映させた。

平成26-29年度は、カプセル内電磁力分布を考慮し、カプセルの走行行程全てと左右非対称な内部構造まで反映したモデル化を行い、より実際に近い理論解析、数値シミュレーションを行なった。その結果、コイルを前後2分割し、巻き線方向が逆向きにすることで最大磁力を得られることが判明した。

(4) カメラ搭載

現在の走行カプセルは、消化管手術後の導通検査への使用を第一目的に考えているため、走行機能に限定されていた。しかし、検査、そして将来体内から生体試料を採取する機能、投薬機能を付加して、体内特定部位の一部を取って来る、あるいは体内特定箇所だけに薬を与える際にも映像確認が必要となる。小型カメラと伝送装置を実装し、映像確認の実験を行なった。

平成26-28年度は、カメラ搭載の検討を行った。具体的には、超小型のカメラモジュールの選定、画像圧縮機能の設計、無線伝送機能の無線送信部の設計と基本試作を行った。その結果、先端部に搭載可能なサイズ4mm角、厚さ2mm、VGA画質のカメラを選定した。また、jpeg圧縮画像伝送のための機能構成と信号処理の見通しを得た。

平成29年度は、カメラからの画像出力信号の圧縮、変調、無線送受信、カメラモジュールコントロール機能をカプセル搭載可能なサイズで実現するための回路およびファームウェアの設計、実装、試験を実施した。これにより、カプセルから画像データを発信することが可能となった。

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 1件)

- 1) T. Ito and S. Murakami, “Capsule Micromechanism Driven by Impulse – Wireless Implementation,” Mechanisms and Machine Science, 査読有, 45, pp. 67-77, 2016

〔学会発表〕(計 2件)

- 1) Kaito OTONARI, Takahiro ITO, ICHIK, and Sunao MURAKAMI, “Impulse driven capsule for medical inspection,” EMAP 2017.
- 2) T. Ito and S. Murakami, “Capsule Micromechanism Driven by Impulse – Wireless Implementation,” MAMM-2016, Ilmenau, Germany, October 5-7, 2016.

〔図書〕(計 1件)

- 1) Lena Zentner, Burkhard Covers, Brian Jensen, Takahiro Ito, et.al. Microactuators and Micromechanisms, Springer, ISBN 978-3-319-45386-6, 2016.

〔産業財産権〕

出願状況(計 1件)

名称：小型電子機器
発明者：小野寺英晴、伊藤高廣
権利者：九州工業大学
種類：特許
番号：PCT/JP2016/083066
出願年月日：2016年11月8日
国内外の別：国外

取得状況(計 0件)

〔その他〕

ホームページ等
<http://www.micro.mse.kyutech.ac.jp/Research/Research.html>

6．研究組織

(1)研究代表者
伊藤 高廣 (ITO, Takahiro)
九州工業大学・大学院情報工学研究院・教授
研究者番号：10367401

(2)研究分担者
村上 直 (MURAKAMI, Sunao)
九州工業大学・大学院情報工学研究院・助教
研究者番号：90443499

(3)連携研究者
なし

(4)研究協力者
なし