

令和 4 年 6 月 13 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04353

研究課題名（和文）次世代型カプセル内視鏡のための連結用磁気駆動多機能モジュールの開発

研究課題名（英文）Development of magnetically driven multifunctional connection modules suitable for next generation capsule endoscope

研究代表者

本田 崇（Honda, Takashi）

九州工業大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：70295004

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、診断や治療の機能を有する次世代のカプセル内視鏡の実現を目指し、既存のカプセル内視鏡に連結するための磁気駆動の多機能モジュールの提案を行った。本モジュールは永久磁石を組み込んだアクチュエータを内蔵し、外部磁界でワイヤレスで駆動される。細胞診、生検、穿刺注入のメイン機能に加え、小腸内にとどまる機能と位置合わせの機能を付与することを試みた。実際に近い環境下における駆動試験の結果、所望の動作を確認し、本提案手法の有効性を実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

カプセル内に組み込んだ磁気アクチュエータを外部磁界でワイヤレス駆動する手法は、単一の機能であれば技術的には難しくなく、すでに多くの文献で有用性が示されている。一方、本研究で実施したような複数機能を外部磁界だけで制御した報告は皆無であり、本研究の提案手法は診断・治療を行うカプセル内視鏡の実現に大きく貢献すると期待される。また、より小型で体内に埋め込む医療機器の多機能化にも有用な技術であり、ミクロの決死圏のようなインプラントデバイスへとつながる基本技術になると期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study, magnetically driven multifunctional modules for connecting to an existing capsule endoscope were proposed with the aim of realizing a next-generation capsule endoscope with diagnostic and therapeutic functions. The modules have a built-in actuator including a permanent magnet and can be wirelessly driven by external magnetic fields. In addition to the main functions of cytopathology, biopsy, and puncture injection, this research attempted to provide the function of staying in the small intestine and the function of alignment. As a result of the drive test in an environment close to the actual environment, the desired operation was confirmed and the effectiveness of the proposed method was demonstrated.

研究分野：磁気応用

キーワード：カプセル内視鏡 永久磁石 磁気アクチュエータ 細胞診 生検 穿刺 ワイヤレス駆動

1. 研究開始当初の背景

研究代表者が究極的に目指しているのは、1966年公開のSF映画「ミクロの決死圏」の実現である。もちろん映画のように人間が小さくなるのではなく、超小型化された機械が人間の体の中に入り込み診断や治療を行うのである。その実現には様々な課題が山積しているが、最大の課題は自走や作業に必要なマイクロアクチュエータの駆動技術とそのためのワイヤレスによるエネルギー供給技術である。この2つの技術が確立できればミクロの決死圏の実現に向け大きく前進すると期待される。

研究代表者は、両課題を同時に解決する方法として、外部磁界を利用したマイクロ磁気アクチュエータのワイヤレス駆動技術に注目し、長年その基礎研究と応用研究に携わってきた。この技術はデバイスの小型化にも適しており、原理的に血管の中を自走するようなマイクロマシンの駆動も可能である。

本研究で対象とするカプセル内視鏡は、小腸を観察するための医療機器である。2001年に発表されると、その手軽さから現在では広く臨床で使用されるようになった。サイズがcmオーダーで比較的大きいものの、現段階でミクロの決死圏に最も近い医療機器の一つと言える。しかし、現状の機能は「観察」のみであり、疑わしい部位を見つけても診断や治療といった対応ができない。このような背景から観察以外の機能をカプセル内視鏡に付与する試みが国内外で精力的に進められている。それらの多くが採用しているのが、上述の外部磁界を利用した磁気アクチュエータのワイヤレス駆動技術であり、有力な手法の一つとして認められている。

しかしながら、この手法には大きな欠点がある。複数の機能にそれぞれ永久磁石を含むアクチュエータを割り当てると、他の駆動磁界で誤動作したり、磁石間の干渉が起こりやすくなる。そのため、従来の報告では機能を1つに絞った例が多く、一般的な管状内視鏡に比べると機能面で著しく劣ってしまう。「外部磁界によるワイヤレス駆動技術によってカプセル内視鏡を管状内視鏡にどこまで近づけることができるだろうか？」この問いに磁気工学を専門とする立場から挑戦したいという思いが本研究のモチベーションである。

2. 研究の目的

研究代表者のこれまでの研究で得られた知見によれば、外部磁界を利用した多機能化には次の3つの手法が有効である。

1つの永久磁石で多機能化：磁石の状態に合わせて外部磁界の印加方向を制御する方法。磁石の状態を正確に把握する必要があるのが欠点である。

複数の永久磁石で多機能化 I：共振周波数の離れた複数の磁気アクチュエータを独立に駆動する手法。振動を利用する用途に限定されるのが欠点である。

複数の永久磁石で多機能化 II：回転磁界を利用し、直交した磁気アクチュエータを独立に駆動する手法。ボルトとナットを組み合わせた2つの磁石回転型アクチュエータを直交させて配置することで個別に駆動する。平成28-30年度に実施の科学研究費補助金基盤研究(C)において、その有効性を実証している。

本研究では、この手法を基本としながら、状況に応じてとを組み合わせることで、観察機能を除く診断・治療に関連する3つ以上の機能をカプセルに付与することを目指す。具体的には、小腸の蠕動運動に逆らってその場にとどまるアンカー機能、処置具の位置合わせ機能、生検機能、細胞診機能、穿刺による薬液注入機能などを想定している。但し、既存のカプセル内視鏡内には観察機能の部品がすでに高密度で実装され空間的な余裕はない。そこで本研究では、診断・治療専用のカプセル(本研究では多機能モジュールと呼ぶ)を既存のカプセル内視鏡に連結する手法を提案し、その実現性について実験的に検討することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究は研究期間を3年間とし、1年目に複数の磁気アクチュエータによる多機能化手法の検証、2年目はアクチュエータの小型化と磁気駆動多機能モジュールの試作、最終の3年目は既存のカプセルの連結手法の開発と評価を実施する。以下にそれぞれを具体的に述べる。

1年目では、診断・治療に関連する機能として、細胞診、生検、穿刺、薬液注入、及びアンカーの機能を取り上げ、それぞれの機能に適した磁石回転型のマイクロ磁気アクチュエータの開発を行う。各機能はボルトとナットを基本構成とする磁石回転型アクチュエータで、回転磁界によって所望の動作ができるように設計する。各動作・機能の要求条件や評価法については、研究協力者の医師の意見を参考にしながら進める。その後、複数機能を選定し、前述の手法を基本にそれぞれのアクチュエータを直交させて配置し個別駆動を試みる。誤動作等が起こり期待通り動作しない場合は、磁気シールドの配置や、前述の手法を取り入れることも検討する。

2年目には、1cm×3cmのカプセル内に実装するためにアクチュエータの小型化と、カプセル内のレイアウトを検討し、磁気駆動多機能モジュールを試作し評価を行う。また、並行して3軸ヘルムホルツコイルによる駆動システムに代わる、簡便な磁界発生システムを検討する。具体的にはモータに接続された永久磁石を回転することで、回転磁界を発生させる方法を検討する。

最終年度の3年目は、多機能モジュールと既存のカプセル内視鏡を連結する手法について検討する。消化管の曲がりにも対応できるように柔軟性のある素材で連結する。最終評価では、外部から水圧を印加した模擬小腸内または食用ブタ小腸内において駆動実験を行い、本研究を総括する。

4. 研究成果

本研究では、診断や治療の機能を有する次世代のカプセル内視鏡の実現を目指し、既存のカプセル内視鏡に連結するための磁気駆動の多機能モジュールと新たな駆動システムの提案を行った。以下に本研究で得られた主な成果をまとめる。

(1) 鉗子による生検モジュール

当初、カプセル側面から円筒刃を出して組織を採取する方式を検討していたが、医師から採取量の調整ができず、穿孔や出血の危険があるとの指摘を受けた。そこで本研究では新たにカプセル前方より生検鉗子を突出し、鉗子の開閉によって組織を採取する方式を検討した。

図1に生検機能とアンカー機構を併せ持つカプセルの構造を示す。カプセル中心軸にボルトとナットからなる磁石回転型アクチュエータを配置し、ナットに鉗子駆動ユニットを取り付けてある。鉗子駆動ユニットは、平行に配置した2枚のワッシャー間に2本の圧縮バネと予圧用ボルトを組み込み、そこに生検と操作ワイヤを取り付け構成される。さらに本モジュールには、鉗子を突出させる動作に合わせて動作するアンカー機構も設置した。アンカー機構はカプセル筐体の一部を立ち上げる方式とし、小腸の内径である30mmの拡張幅を確保している。図2に鉗子を突出させてアンカーを拡張している様子を示す。ブタ小腸を使用した採取実験では、組織採取の成功率65%が得られた。

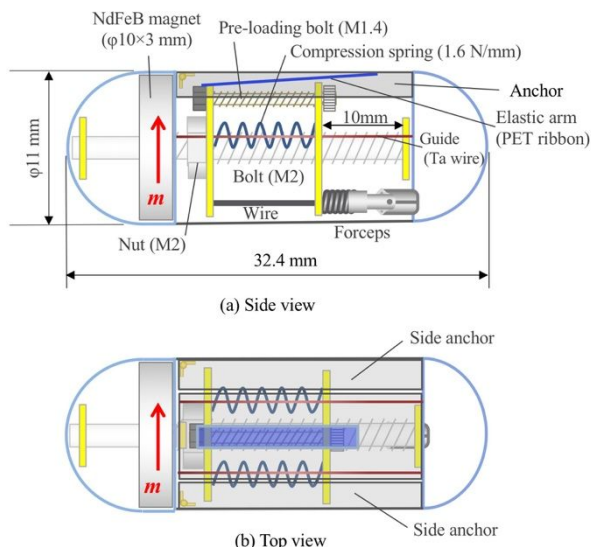


図1 生検機構を有するカプセルの構造



図2 生検機構駆動時の様子

(2) 穿刺による薬液注入モジュール

薬液の量を確保するために2つのカプセルを連結する方式を検討した。図2に、素子構成を示す。左側の薬液専用カプセル内にシリコンゴム製のバルーンタンクを設置し、注入量の調整を行う磁石回転型アクチュエータによるピンチバルブを取り付けている。右側のカプセルには磁石回転型アクチュエータを利用したアンカー機構と穿刺機構を取り付けており、2つのカプセルはシリコンチューブで結合される。左右のカプセルの磁石回転型アクチュエータは回転軸を直交させているため、回転磁界の回転面を制御することで独立に駆動することができる。

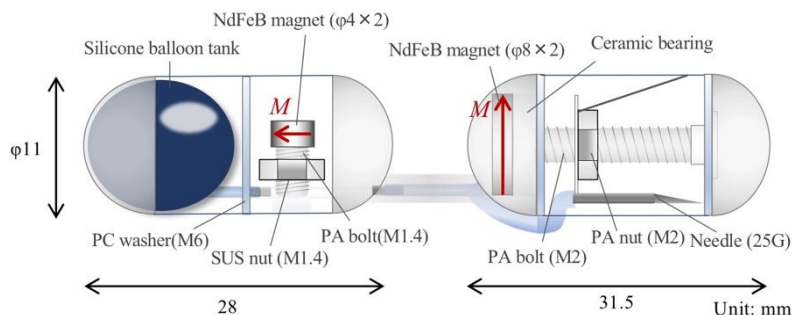
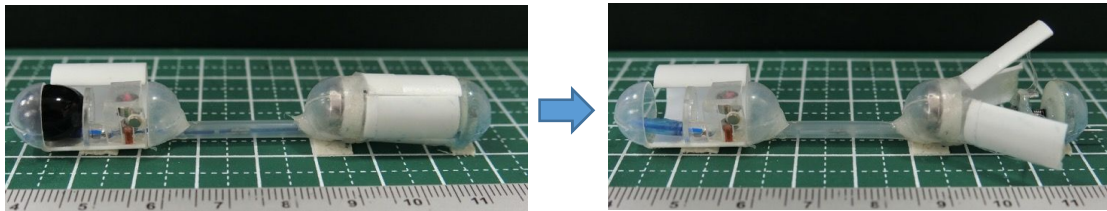


図2 穿刺機構を有する連結カプセル



(a)初期状態

(b)駆動後

図3 穿刺機構の駆動時の様子

図3に実際に駆動したときの写真を示す。初期状態では薬液タンク内に1mLの青色色素が入っており、穿刺針は右側カプセル内に格納されている。駆動は、まず右側のカプセルの磁石回転型アクチュエータを駆動し、アンカーの拡張と穿刺針をカプセル前方から突出させる。続いて、左側のカプセルのピンチバルブを開放し、薬液を穿刺針から注入する。ピンチバルブで開放と閉止を制御することで、複数回の薬液注入も可能であることを確認している。

(3) カプセル連結部を利用した新たなアンカー機構

前述の2つモジュールではアンカー機構として筐体を立ち上げる方式を採用しているが、医師からは小腸内壁の損傷を懸念する意見があった。そこで、柔軟なアンカー機構としてバルーンを膨張させるタイプも並行して検討を行った。

図4に実際のバルーンの膨張前後の写真を示す。2つのカプセルを連結しており、連結部にシリコン製のバルーンが設置されている。左側のカプセルから右側のカプセルにクエン酸水を送り込み、重曹との化学反応で発生する二酸化炭素によってバルーンを膨張させる。このときの磁気アクチュエータには磁石回転型アクチュエータによるピンチバルブを2つ用いており、互いに回転軸が直交するように配置することでクエン酸水の放出と終了後のガスの放出を独立に制御している。

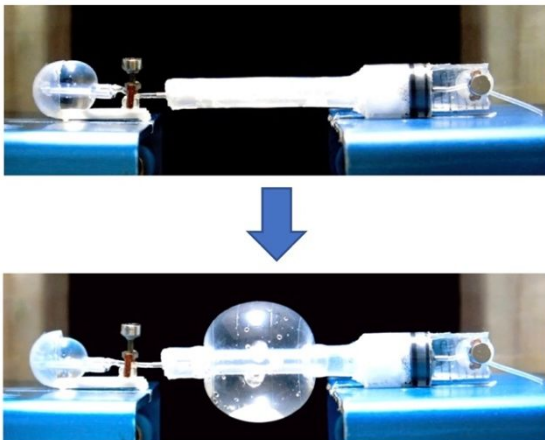


図4 バルーンの膨張を利用したアンカー機構

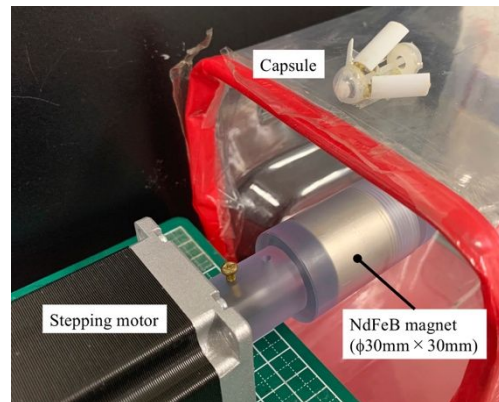


図5 外部永久磁石による駆動方法

(4) 外部永久磁石による駆動システム

本研究で提案する磁気駆動多機能モジュールを実際に臨床で応用する場合、人間の身体が収まる3軸のコイルが必要である。ジョイスティックのようなインターフェイスを使って任意の方向の回転磁界を容易に制御できるというメリットがあるが、アクチュエータの駆動に要する4k-12kA/mの磁界強度では、電源も含めた装置全体が大がかりになることが予想される。また、コイルが身体を覆うと、カプセルの位置や姿勢を確認するためのX線透過装置との併用が困難になることも懸念される。

そこで本研究では、外部永久磁石を回転させる駆動方式についても並行して検討を行った。本方式は発生する磁界に勾配や磁界強度の不均一さがあるが、構成が簡便でありX線透過装置との併用も可能である。試作した駆動システムは、30mm × 30mmの円柱状NdFeB磁石(径方向着磁)をステッピングモータに取り付けたもので、モータはPCによって制御される。図5は、細胞診機構とアンカー機構を備えたカプセルを無負荷状態で駆動したときの様子である。最終的な実験ではブタ小腸を水深5cmに沈めた負荷状態でアンカーの拡張と粘液の採取を行うことに成功しており、本駆動方式の有効性を確認している。

以上述べてきたように、本研究の提案手法は診断・治療を行う次世代型カプセル内視鏡の実現に大きく貢献すると期待される。また、より小型で体内に埋め込む医療機器の多機能化にも有用

な技術であることから、ミクロの決死圏のような究極のインプラントデバイスへとつながる基本技術になると期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 山井涼将, 本田崇	4. 巻 142
2. 論文標題 医療用カプセルのための磁気駆動生検鉗子の提案	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電気学会論文誌A	6. 最初と最後の頁 243-246
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 大古場 隆士, 山崎 悠貴, 本田 崇	4. 巻 4
2. 論文標題 カプセル型医療機器への応用を目指したブラシ細胞診とアンカー機能のための磁気アクチュエータの提案	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本磁気学会論文特集号	6. 最初と最後の頁 103-110
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20819/msj.tmsj.20TR412	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計15件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 青柳陽太, 本田崇
2. 発表標題 カプセル型医療機器に搭載する磁気駆動送りねじ型アクチュエータの高推力化
3. 学会等名 2021年度(第74回) 電気・情報関係学会九州支部連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 本田崇, 木村公亮, 好田拓矢, 田村静, 青柳陽太
2. 発表標題 カプセル型医療デバイスへの応用を目指した磁気アクチュエータ
3. 学会等名 日本磁気学会 第234回研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田村静, 財津佳治, 本田崇
2. 発表標題 外部磁界を利用したカプセル型医療機器のための薬物放出機構および穿刺機構の開発
3. 学会等名 電気学会マグネティックス研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 好田拓矢, 柴田仁, 本田崇
2. 発表標題 外部磁界を利用したカプセル型医療機器に搭載する柔軟なアンカー機構の開発
3. 学会等名 電気学会マグネティックス研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木村公亮, 本田崇
2. 発表標題 カプセル型医療機器に搭載する磁気アクチュエータの外部永久磁石によるワイヤレス駆動
3. 学会等名 電気学会マグネティックス研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山井涼将, 本田崇
2. 発表標題 カプセル型医療機器に搭載する磁気駆動生検鉗子の試作
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2020 in Kanazawa
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田村静, 本田崇
2. 発表標題 カプセル型医療機器のための磁気駆動薬物放出機構の開発
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2020 in Kanazawa
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田村静, 本田崇
2. 発表標題 カプセル型医療機器のための磁気駆動による薬物放出機構および穿刺機構の開発
3. 学会等名 2020年度(第73回)電気・情報関係学会九州支部連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 木村公亮, 本田崇
2. 発表標題 永久磁石を用いた回転磁界発生装置による医療用磁気アクチュエータの遠隔操作
3. 学会等名 2020年度(第73回)電気・情報関係学会九州支部連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 好田拓矢, 本田崇
2. 発表標題 磁気駆動ピンチバルブを使用した医療用バルーンの膨張機構の開発
3. 学会等名 2020年度(第73回)電気・情報関係学会九州支部連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山井涼将, 本田崇
2. 発表標題 磁気駆動生検鉗子を搭載したカプセル型医療機器の試作
3. 学会等名 電気学会マグネティックス研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 本田崇, 山井涼将, 木村公亮, 田村静, 好田拓也
2. 発表標題 カプセル型医療機器のための磁気アクチュエーション技術
3. 学会等名 令和3年電気学会全国大会 シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山井涼将, 松井利樹, 本田崇
2. 発表標題 カプセル型医療機器のための磁気駆動生検鉗子の試作
3. 学会等名 第31回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大古場隆士, 本田崇
2. 発表標題 カプセル型医療機器に搭載可能な磁気駆動細胞診ブラシの特性評価
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2019 in Hiroshima
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大古場隆士, 本田崇, 山崎悠貴
2. 発表標題 カプセル型医療機器への適用を目指した磁気駆動細胞診機構の試作と評価
3. 学会等名 電気学会マグネティックス 医用・生体工学合同研究会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------