

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 3 日現在

機関番号：14202

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26820085

研究課題名(和文) 飛び移り座屈を利用したMR駆動型カプセル内視鏡システムの開発と評価

研究課題名(英文) Development of MR-driven capsule endoscopy system based on snap-through buckling

研究代表者

山田 篤史 (Yamada, Atsushi)

滋賀医科大学・バイオメディカル・イノベーションセンター・特任教助

研究者番号：40534334

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、カプセル内視鏡の駆動メカニズムおよびコンソールソフトウェアの開発をおこなった。駆動メカニズムとして、小型化を想定した簡単な構造で機能的な繰り返し運動を生成するループ型アームを用いた弾性機構を開発し、特許申請をおこなった。そして、本メカニズムのアプリケーションとして、1.7 Fr. (外径0.58mm)のアクティブマイクロカテーテル、屈曲角度を任意に変更可能な操舵型の針などを試作した。体内での受動的な運動を把握するために、カプセル内視鏡を想定した塞栓物質の運動を観察した。コンソールソフトウェアとして、内視鏡画像と撮像画像をダイナミックに取得可能なナビゲーションシステムを開発した。

研究成果の概要(英文)：In the present study, a novel flexible mechanism for small medical applications including capsule endoscope, active microcatheter and steerable needle was defined and developed. Console software for MRI scanner and endoscope was also developed. The flexible mechanism developed consists of a flexible sheath and loop-shaped flexible arm independent from the sheath. The arm was just inserted into the sheath and then a distal end was pushed and pulled to be able to bend the sheath repeatedly. As medical applications, 1.7 Fr. active microcatheter and a steerable needle were developed and assessed the feasibilities on animal studies and phantom studies. The console software was developed by using free open source medical imaging software, 3D Slicer with a few functional modules developed originally in the present study. The feasibility of the software was also assessed by using animal study.

研究分野：工学

キーワード：弾性メカニズム

1. 研究開始当初の背景

観察・診断・治療が同時におこなえる数少ない医療機器として、消化器内視鏡が普及しているが、部位によって異なる内視鏡を入れ替えて使用する必要があるばかりでなく、小腸は十分に観察ができない。また、のどへの表面麻酔が必要で挿入時に苦痛を伴い受診時間が長く患者への負担が大きい。それらの問題を解決する方法として、簡単に飲み込むことが可能で、体外で回収されるまでに数千枚の撮影が可能な錠剤型のカプセル内視鏡が開発されている。これは腸の蠕動運動に倣って運ばれるため、目的の部位が確実に撮影できない、現在位置が把握しづらく操作性が無い、コントロールするために外部磁場を発生する特殊な装置を必要とするなど実用的ではない。

申請者は、自然界のノミ、バッタや稚魚にみられるように、小型にもかかわらず大きな加速度を生成する運動メカニズムが、小型ロボットの運動性能および操作性を飛躍的に向上させる鍵になると考え、単純な構造により瞬発的な力を繰り返し生み出すメカニズム(弾性閉ループ構造)を考案してきた。これは、たわませた弾性帯の両端点を固定し、片側の端点を繰り返し回転させることで弾性帯に生じる瞬発的な大変形(飛び移り座屈)により推進力を得る機構である(右図中段参照)。これらは科学研究費(若手(B)20760159, 2008-2009, 研究協力者, 基盤(B)22360100, 2010-2012, 研究分担者)の補助を受けて実施した研究課題であり、国内外でも高く評価され(Best Paper Award など受賞)、特許も取得した(特許第 5191006 号)。特に、弾性閉ループ構造を用いた遊泳ロボットは、運動性能の高い推進(0.43m/s)・旋回(135deg/s)を実現した。

本研究課題では、この小型ロボットに適用可能な高い推進能力(シーズ)を、カプセル型内視鏡で観察したい場所を確実に撮影したいという要求(ニーズ)の解決策として用い、MRI で駆動する移動型カプセル内視鏡としてパッケージングするという着想に至った(上図参照)。カプセル内視鏡の移動機構に、小型生物の瞬発的な運動メカニズムが有するエネルギーの貯蓄・放出機構を実現する飛び移り座屈を用いるという着想は独創的であり、これまでの研究成果から、小型のカプセル内視鏡に高い運動機能を付与することができるかと確信している。

2. 研究の目的

本研究では、患者への負担が大きく小腸の観察が十分にできない従来の内視鏡と、確実に撮影することができずに操作性が悪い受動型カプセル内視鏡の問題を解決するため、申請者がこれまでに提案した独創的なメカ

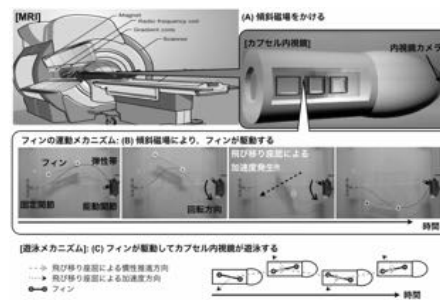


Fig.1 Concept for present work



Fig.2 Console user interface

ニズムを用いて所望の位置を確実に撮影するMR駆動型カプセル内視鏡システムを開発する(上図)。さらにその性能およびメカニズムの理論解析をおこなう。その結果、MR駆動型カプセル内視鏡が、十分な移動能力と制御性能により患部を確実に撮影できることを、消化器を模したファントムを用いた駆動実験と動物実験をおこなうことで明らかにする。

3. 研究の方法

飛び移り座屈を用いたカプセル内視鏡の駆動メカニズムの開発およびメカニズムの理論構築をおこなう。まず、申請者がこれまでに提案した、飛び移り座屈による高加速度生成メカニズムの多数のバリエーションをベースにして、構造が簡単でカプセル内視鏡のサイズおよびMRIを用いた駆動方式に適したメカニズムをデザインする。そして基礎実験をおこなう。申請者が所属する研究機関では毎日自由に使える実験用MRI(GE社製 1.5T Signa Excite)があるという利点を最大限に活用して、MRI環境下での基礎実験を高い頻度でおこない、実験結果をメカニズムデザインにフィードバックする。また基礎実験での現象を観察し、提案したメカニズムが有する弾性閉ループ構造のモデル化、数値シミュレーションをおこなう。これらの結果を変形理論、設計論としてまとめ、理論面からメカニズムのアップデートにつなげ、カプセル内視鏡の試作機の作成につなげる。MRI実験では、数値シミュレーションのデータを用いた評価実験もおこなう。

カプセル型の管体に納めたロボットメカニズムの遊泳実験をおこなう。MRI 環境下でのコントロールテストをおこなうために、MRI のスキャンシーケンスの選定・調整をおこなう。それと並行して、制御システムおよびインタフェースの開発をおこなう。インタフェースは、カメラ画像および術前に撮影した MRI 画像を統合的に確認できる術者用コンソールである (Fig. 2)。術者用コンソールは医師が必要な画像やデータを呈示するために極めて重要な役割を果たす。そこで、先進性と拡張性を維持するために、先端医用画像処理プラットフォームである 3D Slicer をベースに開発する。最後に動物実験をおこない、術者用コンソールを用いたテストをおこなう。

4. 研究成果

これまでに申請者が提案してきた弾性体を用いた独創的なメカニズムの系譜をたどり、カプセル内視鏡の駆動メカニズムに利用可能な、簡単な構造で機能的な運動を生成するユニークな弾性機械要素 (AS: Active Sheath) を開発した (Fig. 3)。具体的には、チューブ状の弾性外套にループ型弾性アームを挿入し、アームの端点の一方を固定し、もう一方を引っ張ることで、チューブを屈曲させる機構である。これを交互に繰り返すことで、チューブは左右に繰り返し動く事ができる。チューブとアームが独立しているため、様々なタイプのアームが考案できる点も特徴である (Fig. 4, 5, 6)。

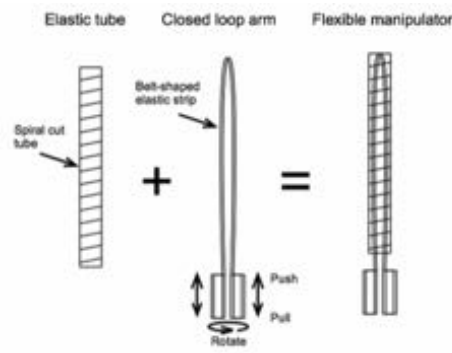


Fig. 3 Mechanism of the proposed device

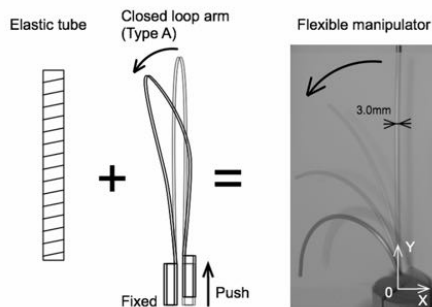


Fig. 4 Normal loop arm and bent shape of AS

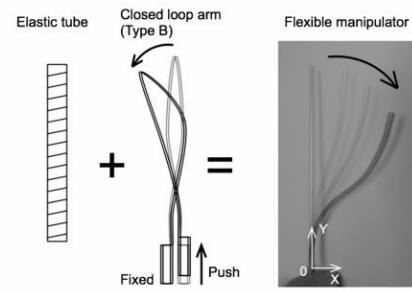


Fig. 5 One crossed loop arm and bent shape of AS

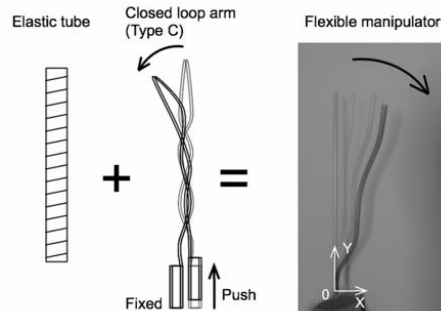


Fig. 6 Three crossed loop arm and bent shape of AS

弾性メカニズムの特性について基礎実験をおこなった。更に、試作機を開発した。その設計論を確立するために、有限要素法を用いた動力学解析をおこない、可とう片の厚さ等の幾何学パラメータに対する形状変化や外部圧力に対する形状変化の関係を求めた。成果発表をおこなった (7, 8, 9, 10)。また、特許申請 1 件 (特開 2015-192845) おこなった。

生体内では受動的な移動の活用も重要な要素になることに着目し、Interventional Radiology での塞栓物質を用いた血管塞栓術を模した動物実験により、血管内での粒子の移動を観察した (Fig. 7)。

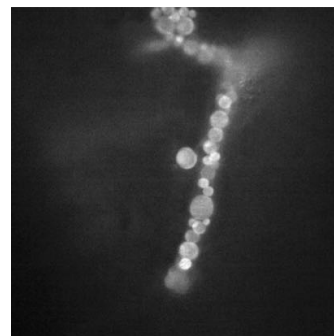


Fig. 7 Observed embolic agents recorded by high speed camera

前年に提案した弾性機構を用いて、カプセル内視鏡や医療用細径カテーテルに利用できるサイズにまで小型化した試作機を開発した。これは、駆動部分が直径約 0.41mm の

ループ構造であり、復元力を伴う柔軟性と加工性を考慮して β チタンにて製作した。開発した小型弾性機構の有用な応用先として先端を自在に屈曲可能なマイクロカテーテルを提案し、試作機および人工血管を用いたファントム実験、ウサギを用いた動物実験をおこない、駆動性能を確認した(Fig. 8, 9)。

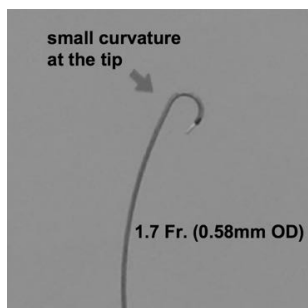


Fig.8 Active microcatheter as an application of the proposed mechanism



Fig.9 Animal experiment for assessing the feasibility of the proposed mechanism

また、機構が小型であることを積極的に利用して、屈曲可能な針としての応用事例を検討した。従来の受動的な針よりも高い制御性能を付加することができた (Fig. 10, 11)。

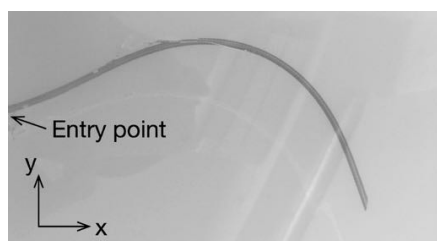


Fig. 10 Steerable needle as an application of the proposed mechanism

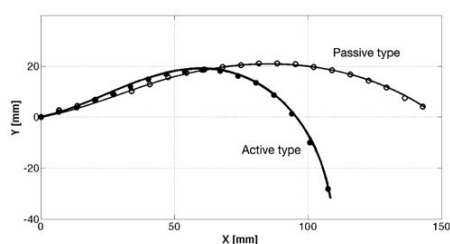


Fig.11 Steering performance compared with a conventional needle

術者用コンソールを開発し、ミニブタを用いた動物実験によりその基本性能を確認した。成果の一部は3D Slicerのモジュールとして世界中で利用可能となっている。

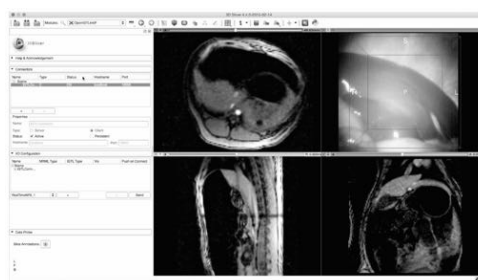


Fig.12 Console userinterface based on 3D Slicer

開発機構を傾斜磁場で駆動するシーケンスを開発するために、ワークショップを受講した。

本科研費により、駆動型カプセル内視鏡の要素開発を進めることができた。

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 3 件)

1. 山田篤史, 仲成幸, 森川茂廣, 新田哲久, 谷徹, 弾性アームに基づく操舵可能な針の屈曲機構, 日本ロボット学会誌, 2016, 条件付採録決定, 査読有
2. 山田篤史, 仲成幸, 森川茂廣, 谷徹, 内視鏡や針に利用可能な弾性アームに基づく屈曲・伸展機構, 日本コンピュータ外科学会誌, 2016, 条件付採録決定, 査読有
3. 山田篤史, ループ形状を有する弾性機構を用いたアクティブマイクロカテーテルの開発, 滋賀医科大学実験実習機器センター通信, Vol.61, 2016, 査読無

[学会発表] (計 12 件)

1. 新田哲久, Utility of an active micro catheter based on an active sheath mechanism, 第 75 回日本医学放射線学会総会 (JRS2016), 2016.4.17, パンフィコ横
2. 山田篤史, 肝動脈化学塞栓療法のための 1.7 Fr. アクティブマイクロカテーテルの開発, 第 32 回滋賀医科大学シンポジウム (審査員特別賞受賞), 2016.2.18, 滋賀医科大学
3. 山田篤史, Active Sheath を用いた 1.7 Fr. 能動マイクロカテーテルの開発, 第 24 回日本コンピュータ外科

- 学会（推薦演題），2015.11.23，東京大学
4. 山田篤史，弾性アームを用いた能動軟性導体のデザインおよび運動学モデル，第33回日本ロボット学会学術講演会（論文特集号推薦演題），2015.9.5，東京電機大学
 5. 山田篤史，内側から針やワイヤを曲げる簡単な弾性体構造，イノベーションジャパン 2015，2015.8.28，東京ビックサイト
 6. 山田篤史，滋賀医科大学の医工連携による画像支援技術を用いた手術システムの研究開発，文部科学省がんプロフェッショナル養成基盤推進プラン採択事業がんプロ国際シンポジウム（招待講演），2015.8.6，ホテルメトロポリタン盛岡ニューウイング
 7. 山田篤史，内視鏡や針に利用可能な座屈に基づく屈曲・伸展機構の開発，第23回日本コンピュータ外科学会大会（推薦演題），2014.11.9，大阪
 8. 山田篤史，内視鏡や針に使用可能な弾性体の曲げと捩れを伴う屈曲・伸展メカニズム，第52回日本人工臓器学会大会，2014.10.19，北海道
 9. Yamada, A.，MR Compatible Continuum Robot Based on Closed Elastica with Bending and Twisting, The 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2014), 2014.9.18, Chicago, Illinois.
 10. 山田篤史，座屈に基づく軟性導体の屈曲・伸展機構，第32回日本ロボット学会学術講演会（論文特集号推薦演題），2014.9.6，福岡
 11. 山田篤史，多血性肝腫瘍に対する塞栓物質の流動挙動予測シミュレータの構築，第43回日本IVR学会総会，2014.6.7，京都
 12. 新田哲久，腹部内臓動脈瘤におけるカテーテル側孔形成用シミュレータの構築，第43回日本IVR学会総会，2014.6.7，京都

〔産業財産権〕

○出願状況（計1件）

名称：屈曲・伸展装置及び屈曲・伸展方法
発明者：山田篤史，谷徹，仲成幸，森川茂廣
権利者：同上
種類：特許
番号：特開2015-192845
出願年月日：2014年9月3日
国内外の別：国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山田 篤史 (YAMADA, Atsushi)
滋賀医科大学・バイオメディカル・イノベーションセンター
特任助教
研究者番号：40534334