

平成 30 年 6 月 7 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K13906

研究課題名(和文)体内を自由に動きまわって治療を行うマイクロロボットへの挑戦

研究課題名(英文) Study on Therapeutic Intravascular Microrobot Controlled by External Magnetic Field

研究代表者

光石 衛 (MITSUISHI, Mamoru)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・教授

研究者番号：90183110

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：血管内に磁性体で構成されたマイクロロボットを挿入し、外部磁場により位置を制御することで脳動脈瘤まで誘導して治療を行うことを提案した。

まず、画像によるマイクロロボットの検出及びトラッキング、トラッキング結果を用いたフィードバック制御などを開発し、その性能を確認した。次に産業用ロボットにコイルを搭載するシステムを設計した。中大脳動脈を再現した血管モデルの中をマイクロロボットが移動する実験を行い、中大脳動脈血管モデル内の約160 mmの距離を約175秒で平均誤差3.7 mmでマイクロロボットを誘導することに成功した。

研究成果の概要(英文)：Less invasive treatment of aneurysms using a microrobot has been proposed. In this study, a microrobot, which was a neodymium disk with a diameter of 1 mm and height of 0.5 mm, was navigated in vascular models using electromagnetic coils. The navigation of the microrobot in a large workspace was feasible when the coil position and angle were controlled by an industrial robotic arm.

First, the electromagnetic system was developed, and the control method was tested in simplified vascular models. Thereafter, the same microrobot was navigated through in 3D MCA phantom (blood vessels: 1-2 mm in diameter) using one nonlinear electromagnetic coil attached to an industrial robotic arm. 160 mm of 3D MCA was navigated in 175 s with an average microrobot position error of 3.7 mm.

研究分野：マイクロロボット

キーワード：マイクロロボット 手術支援 手術ロボット 磁場制御

1. 研究開始当初の背景

外部磁場駆動型マイクロロボットの研究はスイス、カナダ、アメリカ、韓国を中心として、この10年で爆発的な広がりを見せており、国際学会での発表件数も大幅に増加している。研究代表者らは我が国初の外部磁場駆動型血管内治療用マイクロロボットを提案し、平成23年度より挑戦的萌芽研究の支援を受けて「非侵襲脳動脈瘤治療への道を開く外部磁場駆動型医療マイクロ構造体の実現」を実施した。この研究では、外部磁場駆動用コイル内に設置した内径3mmの模擬血管内でマイクロロボット(球形のNd2Fe14B磁石)を拍動流に逆らって駆動することに成功した。拍動流中でのマイクロロボット駆動方法を確立したグループは世界でも他になく、本研究ではこの成果をさらに発展させることで、マイクロロボット分野をリードする研究を推進し、カテーテル治療が困難な末梢部における脳動脈瘤治療(図1)の可能性を示す。

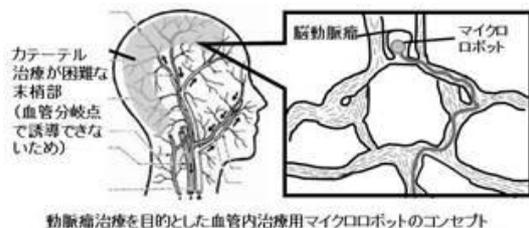


図1 提案する動脈瘤治療

脳動脈瘤は50人に1人が発症すると言われており、日本では10万件あたり22.7人が動脈瘤破裂を起こすといわれている。未破裂動脈瘤に対してはカテーテルを用いたコイル塞栓術が行われるが、大腿部から挿入したカテーテルを手元で操作しながら、血管の分岐を辿って動脈瘤までカテーテル先端を誘導する必要があり、複数の分岐を辿って末梢まで到達することは困難である。

そこで研究代表者らは、磁性体を用いて作成したマイクロロボットに糸などを取り付け、外部磁場により誘導することで、カテーテル先端が血管分岐を辿り動脈瘤まで到達するコンセプトを提案している。本研究では、更に外部磁場誘導に用いるコイルを産業用アームに取り付けることにより可動範囲を拡大する手法を提案しており(図2)、先行研究と比較して画期的である。



図2 提案するコンセプト

2. 研究の目的

本研究では、3次元の複雑な血管走行ネットワーク内において、自在にマイクロロボットを位置決めできる制御手法を開発することを目的とした。まずは簡易血管モデルを用いて磁場制御パラメータを特定した後、外部磁場コイルを産業用ロボットに搭載し、血管モデル内でのマイクロロボット誘導を実現する。

3. 研究の方法

(1) 制御手法の開発

まずは一対のコイルを用いて、血管モデルが平行に配置された場合(重力の影響がない場合)と垂直に配置された場合について研究を行った。また、模擬血流がない場合、流速が一定の場合、拍動流の場合について検討した。血管モデルについては、直線状のチューブ、Y字型に分岐させたチューブ、複数分岐を有するチューブ(平面内での分岐)を用いて研究を行った。実験の概要を図3に示す。血管モデル内を動くマイクロロボットを観察するためのカメラを設置し、画像処理によるマイクロロボットの検出及びトラッキング、トラッキング結果を用いたフィードバック制御などを開発し、その性能を確認した。

設計した実験装置を図4に示す。電流最大値は10A、最大磁場勾配は0.25 T/m、コイル間の距離は125 mm、コイルの直径は217 mm、コイルの重量は約5 kgである。

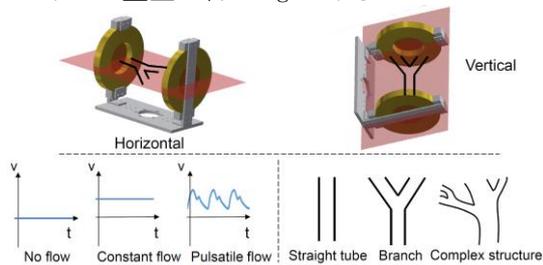


図3 実験の概要

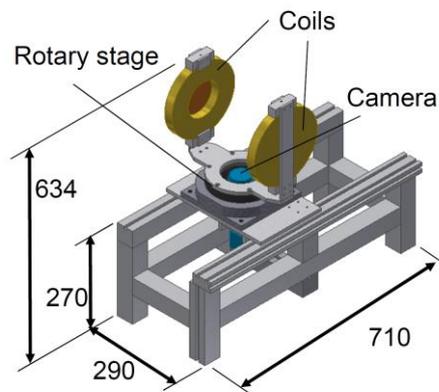


図4 実験装置

(2) 産業用ロボットアームを用いた実験
コイル塞栓術においては、平均としてコイルを3.76個挿入しており、平均治療時間は

137.41 分である。これを元に、本研究では約 10 分で目的の位置までマイクロロボットを誘導することを目標とする。誘導する距離は約 250 mm、マイクロロボットの速度は 0.5 mm/s を目標値として設定した。

本実験では、中大脳動脈瘤 MCA をターゲットとして設定し、3 次元的に分岐をする MCA の血管モデルを 3D プリンタにより作成した。作成した血管モデルを図 5 に示す。この血管内モデル内においてマイクロロボットを誘導するため、新たなコイルを作成した。コイル直径は 332 mm、コイル間距離は 225 mm、最大電流 60A、最大磁場勾配 500 mT/m であり、水冷によるクーリングを行った。コイルの重量は 10 kg である。このコイルにより頭部内において誘導可能な領域を図 6 示す。ターゲットとする領域において、十分な速度でマイクロロボットを誘導可能であることがわかる。このコイルを KUKA 製の産業用ロボットアームに搭載して実験を行った。

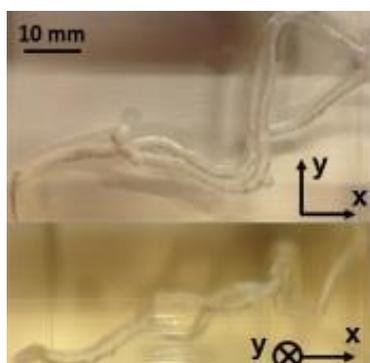


図 5 使用した MCA 血管モデル

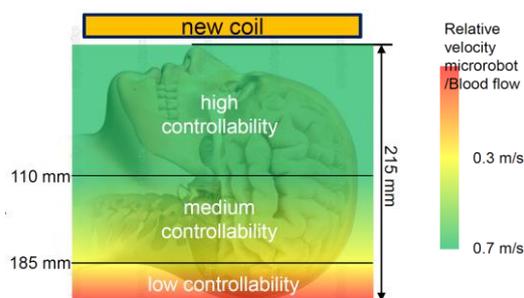


図 6 頭部内のマイクロロボットを誘導可能な領域

4. 研究成果

(1) 制御手法の開発

実験の様子及び画像処理によるマイクロロボットのトラッキングの様子を図 7 に示す。また、例として、平面内に複数の分岐点を持つ血管モデルを垂直に配置した場合の実験結果を図 8 に示す。

流速が一定の場合はマイクロロボットの位置を制御することが困難であった。拍動流の場合は、指定した分岐方向と逆の方向に移動してしまう場合があったが、一度、元の位置にロボットを戻してから再度、指定の分岐方向に誘導することができた。

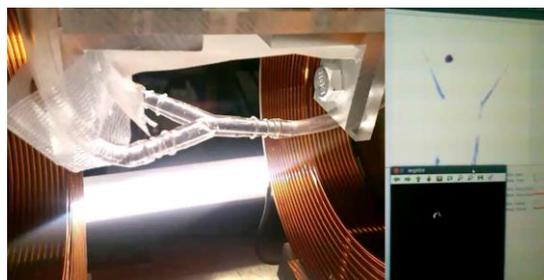


図 7 実験の様子: 左: コイル間に配置された Y 字型血管モデル, 右: マイクロロボットトラッキングの様子

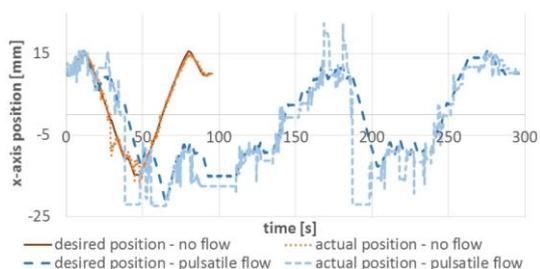


図 8 実験結果: 複数の分岐を有する血管モデルを用いた実験におけるマイクロロボットの位置

(2) 産業用ロボットアームを用いた実験

産業用ロボットアームに新たに作成したコイルを搭載した実験セットアップを図 9 に示す。この実験セットアップを用いて、MCA 血管モデルの中心線を辿るようにマイクロロボットを誘導した。本実験は流れのない状態で行った。

誘導した際の位置の目標値と実際に観測されたマイクロロボットの軌道を図 10 に示す。MCA 血管モデル内の約 160 mm の距離を約 175 秒で誘導することに成功した。また、マイクロロボットの目標値と実際の位置の平均誤差は 3.7 mm であった。この実験において、必要な磁場勾配は 79 mT/m であり、主に重力に逆らう動きに必要であった。また、電流の平均は 4.3 A であった。

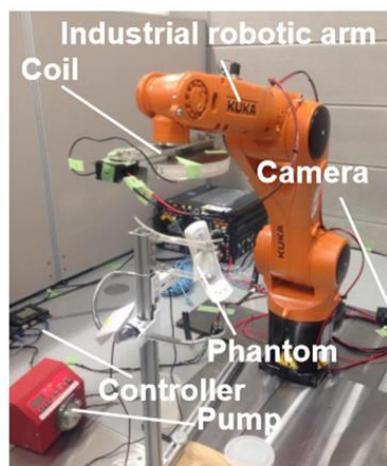


図 9 実験セットアップ

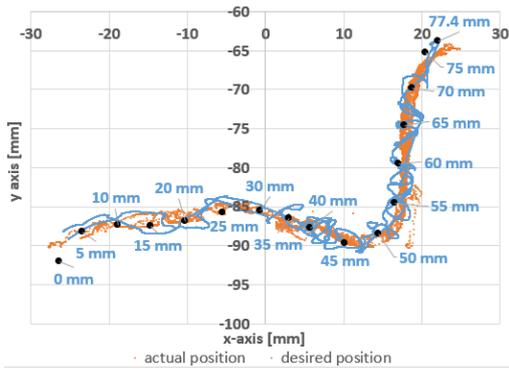


図 10 血管モデル内のマイクロロボット誘導における目標値と実際のマイクロロボットの軌道

図 1 1 にコイルを搭載した産業用ロボットアームのマイクロロボット誘導中の位置と角度の目標値および実際の移動量を示す。産業用ロボットアームの速度の制限が誤差の主な原因であった。

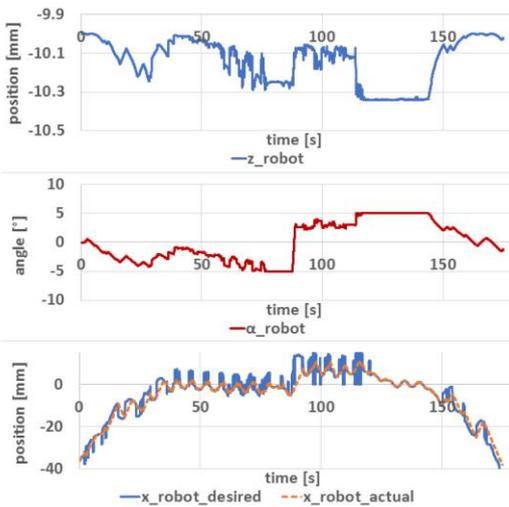


図 1 1 産業用ロボットの移動量

(4) まとめ

動脈瘤の治療を目的として、外部磁場を用いて血管内のマイクロロボットを誘導する手法を提案し、血管モデルを用いた実験によりコンセプトの有用性を確認した。また、産業用ロボットアームに取り付けたコイルを用いて、立体的に分岐する MCA 血管モデル内のマイクロロボットを誘導することに成功した。産業用ロボットアームの速度制限を解除することにより、より正確な誘導が可能になると考えられる。

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 4 件)

- ① P. Ploetner, S. Yanagisawa, K. Yoshikawa, K. Yamamoto, K. Harada, N. Sugita, M. Mitsuishi, Comparison of theoretical and measured forces on magnetically propelled microrobots in a vascular phantom, *Procedia CIRP*, 49: 157-162, 2016. (Proc. of the second

CIRP Conference on BioManufacturing, July 29-31, 2016, Manchester, UK)
DOI:10.1016/j.procir.2015.11.007

- ② Peter Ploetner, Kei Yoshikawa, Kanako Harada, Ko Yamamoto, Naohiko Sugita, Mamoru Mitsuishi, "Control of a medical microrobot in 2D vascular phantoms with pulsatile flow using a pair of electromagnetic coils," The sixth IEEE RAS/EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics (BioRob2016), pp. 359-364, College Avenue West, Singapore, 26-29 June, 2016.
DOI: 10.1109/BIOROB.2016.7523652
- ③ Kei Yoshikawa, Peter Ploetner, Ko Yamamoto, Kanako Harada, Naohiko Sugita, Mamoru Mitsuishi, "Control of a Surgical Intravascular Microrobot in a Pulsatile Flow Using Rotating Electromagnetic Coils," 2015 JSME/RMD International Conference on Advanced Mechatronics (ICAM2015), Waseda University, Tokyo, Japan, 5-8 December, 2015.
DOI:10.1299/jsmeicam.2015.6.327
- ④ Sung Hwan Kim, Kei Yoshikawa, Peter Ploetner, Ko Yamamoto, Kanako Harada, Mamoru Mitsuishi, "Preliminary Study on Control of a Magnetically Propelled Intravascular Microrobot," 2015 JSME/RMD International Conference on Advanced Mechatronics (ICAM2015), Waseda University, Tokyo, Japan, 5-8 December, 2015.
DOI: 10.1299/jsmeicam.2015.6.25

6. 研究組織

(1) 研究代表者

光石 衛 (MITSUISHI, Mamoru)
東京大学・大学院工学系研究科・教授
研究者番号: 90183110

(2) 研究分担者

山本 江 (YAMAMOTO, Ko)
東京大学・大学院工学系研究科・准教授
研究者番号: 20641880

杉田 直彦 (SUGITA, Naohiko)
東京大学・大学院工学系研究科・教授
研究者番号: 70372406

原田 香奈子 (HARADA, Kanako)
東京大学・大学院工学系研究科・准教授
研究者番号: 80409672
[辞退]