

MRガイド下凍結治療支援ロボットシステムの基礎的評価 [大会長賞記録]

五月女康作^{1,2,3}, 大内竜太郎⁴, 松下 明^{1,5}, 戸崎 光宏⁶,
鈴木 健嗣^{1,3,4}, 松村 明⁵, 山海 嘉之^{1,4}

¹筑波大学サイバニクス研究センター ²同大学院人間総合科学研究科 ³同未来医工融合研究センター
⁴同大学院システム情報工学研究科 ⁵同医学医療系脳神経外科 ⁶相良病院付属プレストセンター放射線科

はじめに

近年、磁気共鳴画像 (magnetic resonance imaging: MRI) の優れたコントラスト分解能を利用して、患部位置や針等の挿入経路を決定する MRI ガイド下針生検や凍結治療等が急速に普及している。これらの一連の手技では、腫瘍位置と穿刺位置が画像上で一致していることを確認することが極めて重要であり、そのためには数回の撮像を繰り返して穿刺位置を調節していく作業が必要となる。オープン型磁気共鳴 (magnetic resonance: MR) 装置の場合、横からのアクセスが可能である一方、多く普及している筒型 MR 装置では、穿刺作業には空間的制限を受けるため、穿刺位置を確認する画像を取得した後に、いったん患者を MR 装置から出し、医師が穿刺位置を調節した後に再度患者を装置内に入れて、画像を再び取得するという手順になる。そして、穿刺位置が腫瘍位置と異なったときには再び同じ手順を繰り返すことになり、時間と手間がかかる。このような問題を解決するために、強磁場空間である MRI 検査室内でも使用可能な MRI 対応手術支援機器の研究開発が進められている^{1)~4)}。

Dupont らは、MRI 装置が発する磁場を利用し駆動するアクチュエータの開発に取り組んでいる^{5)~7)}。彼らは、独自の撮像シーケンスを用いてアクチュエータを駆動させ、1軸の往復運動を実現した。しかしながら、この撮像シーケンスは、一般的に普及している MR 装置で汎用的に使用することはできず、また、1軸運動

のみであるため用途が限定されてしまう。

本研究では、乳腺 MR ガイド下凍結治療支援を目的とし、MRI が生み出す勾配磁場を動力源として駆動する MR 対応ロボットシステムを開発し、それを構成しているアクチュエータと針位置決め機構の基本的な性能を検証した。また、本システムでは駆動力を生むために磁性球を使用するため、磁性球が画像に与える影響も併せて検証した。

方 法

Fig. 1 に本システムの概略図を示す。本システムはアクチュエータユニットと円形針位置決め機構から構成されており、患者は腹臥位で本システム上に寝て、片側乳房を円形針位置決め機構内に入れるポジショニングを行う。

1. 磁性球の撮像阻害範囲検証

直径 400 mm、高さ 125 mm の円柱ファントムの中心に、クロム剛球の磁性球 (直径 4, 6, 8, 10, 12 mm) を貼り付け turbo spin echo (TSE) 矢状断 T₂ 強調画像 (repetition time/echo time = 4000 ms/90 ms, slice thickness = 5 mm) を撮像したときの磁化率アーチファクトのサイズを計測した。本研究で使用した MR 装置は、Achieva dStream 3.0T-TX MRI system (release 5.1.7.0; Philips Medical Systems) である。

2. アクチュエータの出力検証

Fig. 2 は作製したアクチュエータを示す。回転子 (rotor) 部分には、前述の磁性球が組み

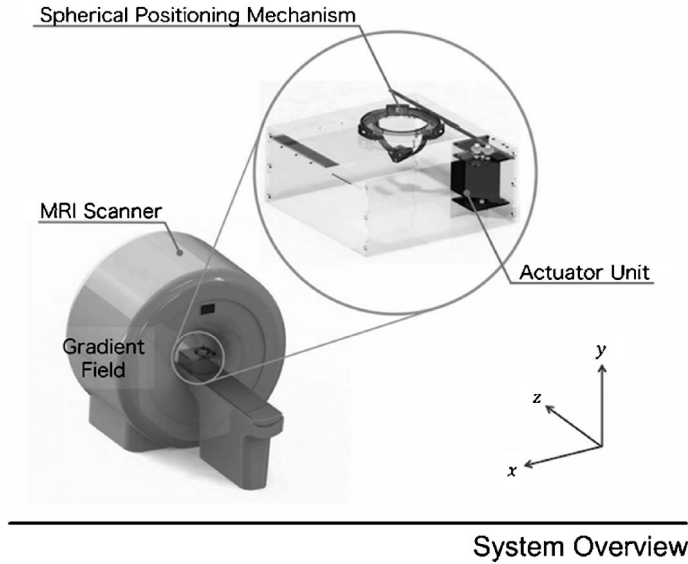


Fig. 1. System overview

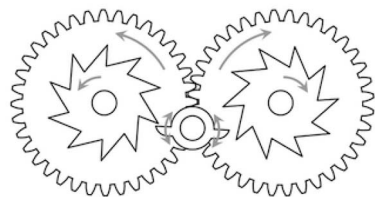
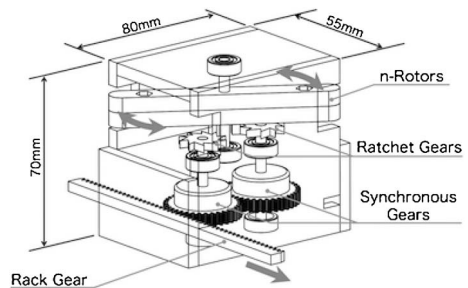
込まれており、この回転子を振り子運動させることで、連結している複数のギアで構成された機構によって、最終的にはラックギアを1方向に動かす運動を作り出す。このときの、発生トルクおよび磁性球に働く力を計測するための出力検証を行った。回転子を振り子運動させるために使用したパルスシーケンスは、TSE法の preparation パルスだけを作動させる“prep-only”機能 (TR=878 ms, number of slice=5, slice thickness=0.5 mm, slice-selective angles=40 deg) である。Prep-only 機能によって、短時間の勾配磁場を発生させて、回転子を動かした。そのとき、回転子に可動式ウェイトを搭載して力の釣り合いからアクチュエータの出力を求めた。

3. アクチュエータの動作可能範囲検証

静磁場中心 (撮像範囲中心) に設置したアクチュエータユニットの位置を徐々に移動させながらパルスシーケンスを与え、アクチュエータの動作範囲を確認した。パルスシーケンスは上記と同様である。

4. 針位置決め機構の回転精度検証

針位置決め機構では床面に対して水平な平面上での回転と半円弧状に湾曲したスライダにお



Construction of the Actuator Unit

Fig. 2. MRI-powered actuator unit

ける針ガイドのスライドという二つの動作を行うことで半球の任意の位置に対して位置決めを実現する。本実験で検証する運動は、アクチュエータからラックギアを介して行われるギアプレートとラックギアの水平方向の回転である。前述と同じ動作パルスシーケンスを用い、本実験では、ス

ライス角度を -40 度と 40 度に交互に設定することで、回転子をTR間隔で振り子運動させた。回転子の振り子運動10往復分与えたときに、ギアプレートの回転角度を計測し、理論値と比較した。ここで、回転子一つでは出力が非常に小さいため、ギアプレートを回転させるために必要な出力を求め、その結果、回転子を7個に設定して本実験を行った。

5. 針挿入経路操作検証

最後に、アクチュエータの駆動回数と針挿入距離の検証を行った。本実験では、異なる角度の勾配磁場を与えることで2軸動作（針を挿入用と進行方向変更用）を可能にするアクチュエータを用いた。回転子を14回駆動（7往復分）させたとき、針がアガロース内を進む距離を、TSE冠状断 T_2 強調画像（TR/TE = 4000 ms/90 ms, slice thickness = 0.5 mm, number of slice = 5）を撮像して確認した。針にはポリウレタン製の直径1.80 mm、内径1.20 mmのものを用いた。

結 果

1. 磁性球の撮像障害範囲検証

磁化率アーチファクトの範囲は磁性球直径が2 mm増加すると、約30 mm広がることが確認できた。磁性球直径12 mmのとき、最大で185 mmであった。後述のアクチュエータ動作可能範囲検証の結果も考慮して、アクチュエータには直径8 mmを使用することとした。

2. アクチュエータの出力検証

実験により得られた力 F は約0.21 Nで、トルクは約 6.17×10^{-3} N·mであった。

3. アクチュエータの動作可能範囲検証

撮像範囲中心から z 軸の負の方向（操作者からみて手前）に25 cm、そこから x 軸の正方向（操作者からみて右側）に20 cm移動した位置までアクチュエータの正常動作が確認できた。またその位置にアクチュエータを設置したとき、撮像中心にはアーチファクトが及ばないことが確認できた。

4. 針位置決め機構の回転精度検証

回転子の10往復動作中、8往復分の正常な動作が確認できた。また、振り子運動10往復

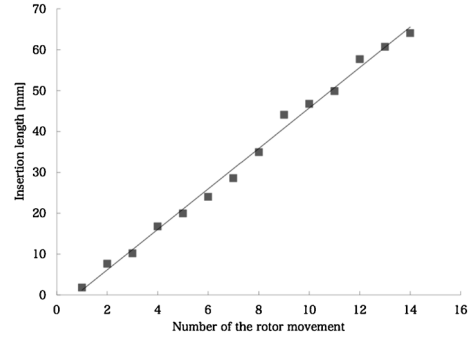


Fig. 3. Experimental results for needle insertion experiment

分の回転角度の理論値は、 38.9 度であるのに対し、計測値は 38.0 度であった。

5. 針挿入経路操作検証

Fig. 3は回転子の駆動回数と針挿入距離の関係を示す。グラフから駆動1回ごとに挿入される距離にはばらつきがあるものの、線形性を示す傾向を確認できた。駆動1回の平均挿入距離は4.58 mmであった。

考 察

本研究では、MR装置が勾配磁場を高精度に操作することができる機器であることに着目し、MRガイド下凍結治療を支援するMR対応ロボットシステムの開発とその性能検証に取り組んだ。まず、本システムに用いられたアクチュエータ部には磁性球が使用されているため、磁性球の撮像障害範囲を検証した。次に、アクチュエータの出力と動作可能範囲を検証した。さらにアクチュエータによって回転する針位置決め機構の回転精度を検証し、最後にアクチュエータ駆動回数と針挿入距離の関係を検証した。

磁性球の障害範囲とアクチュエータ動作可能範囲を考慮し、磁性球のサイズを8 mmとしたとき、アクチュエータは静磁場中央（撮像範囲中央）を中心とした 40 cm \times 50 cmの領域で動作可能であると結論づけた。それ以外の領域では、勾配磁場を印加しても磁性球が動かなかったのは、勾配磁場の傾斜よりも静磁場の均一性が上回ってしまったためと考える。

今回作製したアクチュエータユニットでは、回転子が一つでは十分な出力を得ることができず、回転子の個数を増やすことで出力の増加を図った。さらに出力を増加させるためには、磁性球の大きさ、パルスシーケンスを変更させることが現実的である。磁性球の大きさは前述の阻害範囲拡大に直結するため、トレードオフを考慮する必要がある。一方で、パルスシーケンスは、今回用いたシーケンスよりもさらに有効なシーケンスを探索する余地はあり、それによって出力があがることを期待したい。

針位置決め機構の動作検証において、10回中2回分のアクチュエータ動作が停止してしまっただけの原因は回転子が目標到達角度まで回転せずに、次の動作に移行できなかったためであった。これを解決するためには、回転子の目標到達角度にもっと幅をもたせる必要があるが、摩擦が増えるためさらに大きな出力が必要となってくる。すなわち、出力の増大によってこの問題は解決できるため、まずは出力の増大を優先的に取り組む必要がある。

挿入経路操作検証において、アクチュエータ1動作分の挿入距離のばらつきが大きく、高い線形性を示したとは言いがたい。この差が生じた一番の原因としては、自作した十字型ギアの加工精度が十分でなかったため、不必要な摩擦が生じてしまったことが考えられる。この問題は、加工精度を上げるとともに、前述したようにアクチュエータの出力増大によっても解決する課題である。

さらに、実験を行っていく上で、磁性球が磁化してしまう問題が生じた。この原因には二つ考えられ、一つは静磁場内に本ロボットシステムを設置する際に、磁性球が急激な磁場勾配を受けて磁化する場合、一つは勾配磁場印加によって同じく磁化する場合である。磁化してしまったときには、その都度、消磁装置を用いて磁性球の磁化を消磁した。この問題に対しては、磁性球の材質を再検討するなどして対処していく。

本研究はMRI装置内で駆動する新たなロボットシステム開発のための基礎研究である。MR装置が生み出す勾配磁場をシステム駆動のための要素として利用する装置の開発は、世界

的に見てもほとんど前例のない試みであるが、MR装置が高い精度で勾配磁場を操作できる点から、十分に利用可能であると考えられる。勾配磁場で駆動するロボットシステムが実現することで、画像生成のための装置として使用されていたMRIに新たな用途を見出すこととなる。それにより、MR装置を用いた新たな術式が生まれ、将来的には更なる医療分野の発展に繋がる可能性が示唆される。

結 語

本研究では、MRガイド下凍結治療を支援するMR対応ロボットシステムを開発し、その基本的な性能を検証した。本システムと一般的に普及しているMR装置に内蔵されている汎用シーケンスを使って、MRガイド下凍結治療における針位置の決定や針挿入を行うことの実現可能性を示せたと同時に多くの課題も見いだすことができた。これにより、現状のMRIガイド下手術が抱える手順の複雑さや、それに伴う術時間の増加といった問題解消のための糸口を見だし、将来的にはより簡便で精度の高い治療が行えるようになるための新たな研究の創出に繋がることを期待される。

謝 辞

本研究の一部は、総合科学技術・イノベーション会議が主導する革新的研究開発推進プログラム (ImPACT) の一環として実施したものです。また、MRガイド下治療の具体的な撮像手技に関してご指導賜りました亀田総合病院医療技術部画像診断室 加藤義明技師に深く感謝申し上げます。

文 献

- 1) Krieger A, Song SE, Cho NB, Iordachita I, Guion P, Fichtinger G, Whitcomb LL: Development and evaluation of an actuated MRI-compatible robotic system for MRI-guided prostate intervention. IEEE ASME Trans Mechatron 2012; 18: 273-284

- 2) Fischer GS, Iordachita I, Csoma C, Tokuda J, Dimairo SP, Tempny CM, Hata N, Fichtinger G : MRI-compatible pneumatic robot for transperineal prostate needle placement. *IEEE ASME Trans Mechatron* 2008 ; 13 : 295–305
- 3) Su H, Cole GA, Fischer GS. High-field MRI-compatible needle placement robots for prostate interventions : pneumatic and piezo-electric approaches. In : Gulrez T, Hassanian AE, eds. *Advances in Robotics and Virtual Reality*, Springer, 2012 ; 26 : 3–32
- 4) Larson BT, Erdman AG, Tsekos NV, Yacoub E, Tsekos PV, Koutlas IG : Design of an MRI-compatible robotic stereotactic device for minimally invasive interventions in the breast. *J Biomech Eng* 2004 ; 126 : 458–465
- 5) Vartholomeos P, Qin L, Dupont PE : MRI-powered Actuators for Robotic Interventions. *IEEE International Conference Intelligent on Robots and Systems* 2012 ; 689–694
- 6) Bergeles C, Vartholomeos P, Qin L, Dupont PE : Closed-loop commutation control of an MRI-powered robot actuator. *IEEE International Conference on Robotics and Automation* 2013 ; 690–695
- 7) Vartholomeos P, Bergeles C, Qin L, Dupont PE : An MRI-powered and controlled actuator technology for tetherless robotic interventions. *Int J Robot Res* 2013 ; 32 : 1536–1552

Evaluation of an MRI-Powered Robotic System for Cryoablation [Presidential Award Proceedings]

Kousaku SAOTOME^{1,2,3}, Ryutaro OUCHI⁴, Akira MATSUSHITA^{1,5},
Mitsuhiro TOZAKI⁶, Kenji SUZUKI^{1,3,4}, Akira MATSUMURA⁵,
Yoshiyuki SANKAI^{1,4}

¹*Center for Cybernics Research, University of Tsukuba
1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8577*

²*Graduate School of Comprehensive Human Science Majors of Medical Sciences, University of Tsukuba*

³*Center for Innovative Medicine and Engineering, University of Tsukuba*

⁴*Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba*

⁵*Department of Neurosurgery, University of Tsukuba*

⁶*Department of Radiology, Sagara Hospital Affiliated Breast Center*

Introduction : We developed a novel MRI-compatible robotic system including MRI-powered actuator units realizing multiaxial movements by using the imaging sequence already existing in the MRI system and a spherical positioning mechanism. We also aimed to develop a robotic system for needle-tip positioning in cryoablation for breast cancer treatment.

Methods : In the actuator unit, the pendulum movement of the rotor is converted to one-way rotation, and it would be the output. We conducted three experiments using Achieva 3.0T TX (Philips) to evaluate the area affected by the ferromagnetic sphere, the activation area of the actuator unit inside the gantry of the MRI, and the power output to verify the performance of the developed MRI-powered actuator unit.

Results & Discussion : The area affected by the ferromagnetic sphere showed a linear increase according to the diameter of the sphere. We, therefore, decided to use an 8-mm sphere as a power source. In addition, an activation area of 25 cm along the z-axis and 20 cm along the x-axis was confirmed. We found that the force generated by the ferromagnetic sphere was about 0.21 N and the torque was 6.17×10^{-3} N·m. Although the generated force and torque are not very strong, the power problem could be overcome by increasing the number of rotors.