

平成 22 年 3 月 31 日現在

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2008～2009

課題番号：20700413

研究課題名（和文）MR 誘導下手術ロボット駆動時の画質劣化を防ぐ
力学的エネルギー貯蓄型モータ駆動法研究課題名（英文）Motor control method using kinetic energy storage
for noiseless image in MR image guided robotic surgery

研究代表者

鈴木 孝司 (SUZUKI TAKASHI)

東京女子医科大学・医学部・助教

研究者番号：00468688

研究成果の概要（和文）：変形・移動が容易な脳・肝臓等の軟性臓器を対象として術中 MR 画像と手術支援ロボットを組み合わせた高精度な手術の実現が求められている。MRI 対応性や制御性から超音波モータが広く使用されているが駆動時の電磁波ノイズによる MR 画像劣化が問題であり、決定的な解決法は示されていなかった本研究では、撮像時間外にモータを駆動しエネルギーを力学的に貯蓄することで、撮像中にノイズレスな動力源として利用する手法を提案した。

研究成果の概要（英文）：Intraoperative magnetic resonance (MR) image guided robotic surgery is required for highly precise operation on deformable organs such as brain and liver. Ultrasonic vibration piezoelectric motor is widely used because of its MR compatibility and controllability. The electromagnetic noise from electric current for motor actuation, however, degrades the image quality. This leads to low precision surgical procedure. This study proposed a novel noiseless motor control method using kinetic energy storage. Kinetic energy is stored outside MR scanning time, and stored energy is used during scanning time as a noiseless energy source.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2009 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：人間医工学 医用システム

キーワード：手術支援, MRI, 画像誘導下手術, 超音波モータ, 電磁波ノイズ, 手術ロボット, フライホイール, KERS(kinetic energy recovery system)

1. 研究開始当初の背景

変形・移動が容易な脳・肝臓等の軟性臓器

に対する手術の際、手術前(術前)に撮影した画像(レントゲン画像や X 線 CT, MRI など)

に基づいた手術計画は有効ではあるものの、手術中(術中)に臓器の変形・移動があるために必ずしも術前の手術計画と術中の臓器形態とが一致せず、手術計画との乖離が生じ、手術精度の低下につながる。

そこで術中に手術室内に設置された MRI を用いて、変形・移動後の画像を取得し、その最新の画像を用いた手術計画に従って執刀を行う「画像誘導下手術」が徐々に普及している。

また同時に人間の手を超越した精度や動作を実現すべくロボット技術を応用した手術支援ロボットが研究されており、既に一部では臨床使用が進められている。

画像誘導下手術も手術支援ロボットも各々手術の質の向上に貢献するものであるが、それらを組み合わせることにより、術中画像の定量的データに基づいた精確な手技を行うことが可能となるため、ピンポイントで患部にアプローチが可能になる。

それらを統合して用いる場合、ロボット駆動用アクチュエータは MRI 対応性(MR 室内にてそのモータが安全に稼働し、MRI との相互干渉が生じないこと)を有するものでなければならず、水圧、空気圧等の流体圧を用いるものに加えて、制御性の高さなどから piezo素子の電歪効果を用いた超音波モータが広く用いられている。

ただし、市販されている超音波モータは piezo素子を電歪させる駆動回路からの高周波電流が画像を劣化させることが知られている(Fig. 1)。そこで様々な対策法が検討されてきたが、現在までにスタンダードと呼べる手法は確立していない。

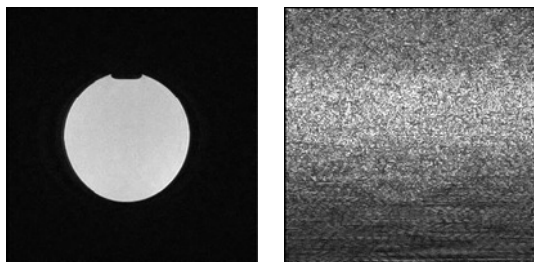


Fig.1 MR image of cylindrical water tank; (left) without noise source, (right) with noise source

2. 研究の目的

本研究では電磁ノイズによる MR 画像劣化に対して新規的な解決方法を提案し、MR 画像取得と手術支援ロボット駆動を画質劣化なく同時に実現させることを目的とする。

3. 研究の方法

本研究で提案するシステムの構想図を Fig. 2 に示す。

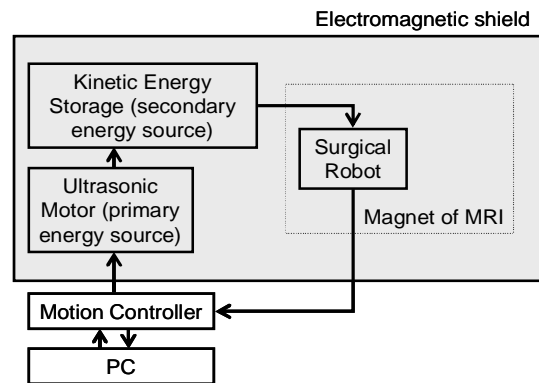


Fig.2 System Configuration of proposed noiseless motor control method.

本研究では充電電池やコンデンサに発想を得て、一時的に蓄えたエネルギーを用いることでノイズレスな駆動を可能とする方法を提案する。電気エネルギーの貯蓄と使用は電磁波ノイズの影響が予想されるため適切ではないと考え、力学的エネルギーの貯蓄を検討した。その方法としてフライホイールを用いることとした。フライホイールを加速させ回転させることによりエネルギーを蓄え、空転させることで、摩擦によるロスはあるもののエネルギーを保持することが可能になる。そしてトランスミッションを用いて出力軸とフライホイールを連結することで電氣的エネルギーを用いないノイズレスな駆動源として利用できる。

同様の手法は自動車レースの F1 においてイギリスのレーシングチーム、ウィリアムズが KERS(Kinetic Energy Recovery System) と呼ばれる一種の回生ブレーキで使用している。

具体的にはフライホイールを回転させる動力源として、MRI 対応性を有する超音波モータ(モータ本体 USR-60 および駆動回路 D6060S, 株式会社新生工業)を用いた。超音波モータは MR 画像誘導下手術支援ロボット分野で広く使用されている。駆動に使用する PC およびモーションコントローラ・駆動回路はノイズ源となるため、電磁シールドの施された MR 室外に設置し、超音波モータへの駆動電流の入力はシールド壁に設置したコネクタ(Fig. 3)を用いて行った。

超音波モータの電歪効果はケーブルを含めた全体のインピーダンスに大きく影響されるため、この壁面に設置したコネクタを含めた状態でのインピーダンス調整を行った。

またモータから戻される回転量情報はオプティカルエンコーダ(光ファイバ式ロータリーエンコーダ OFRE, 株式会社雄島試作研究

所)を用いて計測した。完全防爆型でありエンコーダ側で電流は使用せず、エンコーダのパルス信号は光ファイバを用いて伝達されるため、エンコーダ本体・伝達経路からのノイズの発生はない。そのためシールド壁に設置された導波管を經由して MR 室外に引き出した。

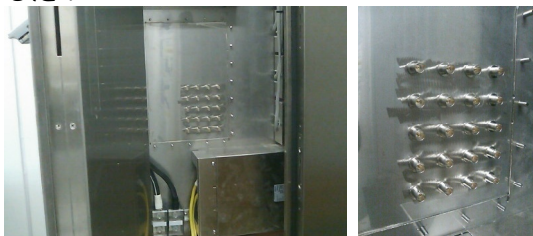


Fig.3 Connectors on the electromagnetic shielding wall

制御用 PC は産総研および JST 等で開発が進められているフリーの実時間オペレーティングシステム(OS)である ART Linux を用いた。これは Linux をベースに独自カーネルを構築したもので、通常の OS では実現できない厳密な周期制御が可能であることを特徴とする。また超音波モータの駆動を on/off するデジタル信号の出力用途にデジタル入出力ボード(PCI-2727AL, 株式会社インタフェース), 速度設定用電圧信号の出力用途に DA 変換ボード(PCI-3338, 株式会社インタフェース), 回転量を計測するためのパルスカウンタボード(PCI-6201, 株式会社インタフェース)を上記 PC の PCI バスに接続して使用した。

超音波モータによるフライホイールの加速は、超音波モータの電磁波ノイズが MR 画像取得に影響を与えないよう、撮像時間外に行う必要がある。MRI を撮像していないときにはもちろん加速可能であるが、MR 画像誘導下手術では動的に変化する治療対象を手術支援ロボットで追跡しながら撮影するなどの用途でも用いられることがあり、撮像中にも加速が必要である。そこで各シーケンス内でプロトンが緩和するのを待つ極僅かな時間(数ミリ秒から数秒)は信号受信が行われていないことから、この時間を使ってフライホイールの加速が可能である。その点からも実時間制御が必要となり、上記実時間 OS を導入した。

装置の材料として、MRI 対応性を考慮した機構に関する分野では、非磁性・強度・加工性等を考慮して樹脂材料には PEEK(ポリエーテルエーテルケトン, polyetheretherketone)を選定した。

実験環境として東京女子医科大学内に設置された日立メディコ製 AIRIS(垂直磁場型、開放型ガントリ, 静磁場強度 0.3T)を用いた。

4. 研究成果

初年度となる 20 年度は(1)機構構成の概念設計, (2)機構要素選定, (3)部分試作, (4)評価試験環境の構築, の 4 点について実施し, 21 年度は機構構成の設計, 部分試作を行った。

力学的エネルギー貯蓄の方法についてフライホイールに加えてバネ・ゼンマイとの比較検討を行った。エネルギーの再充填の際にバネやゼンマイは「巻き戻し」に相当する作業が必要である一方、フライホイールは円盤の回転動作であることから無駄な動作が少ない利点があることから有用性があると判断した。エネルギーを取り出す際の制御性についてもバネ・ゼンマイについては一度にエネルギーが開放されるため多段の減速機構を必要とするが、フライホイールにおいては二段ギアのようなものを用いることで簡潔な機構が実現可能である利点も考慮した。

機構簡略化のため超音波モータの動力入力軸を正転のみとし、出力段に正逆および空転の切り替えるためのラチェット機構を 2 個 1 組取り付けのデザインとした。これにより 2 個のラチェットを両方とも閉じることによりブレーキとなり、どちらかを開放することで正転/逆転を実現する。そして両方を開放することで駆動軸が空転可能になり、パッシブな動作や緊急時の取り外しが可能になる機構構成とした。

速度制御手法も同様に検討した。コンデンサに電荷を蓄え回路に電流を供給した場合の電流変化量が回路全体の時定数によって決定されるのと同様に、フライホイールにより貯められた回転エネルギーが出力される際は手術支援ロボットの持つ慣性モーメントおよび負荷から決定される。慣性モーメントはロボットの各関節角や位置によって変化するため、フライホイールの回転速度やトランスミッションの接続状況による速度制御は困難であると結論づけた。そこで出力軸にステップ駆動様の機構を追加することで速度制御に影響されない駆動方式を用いるものとし、位置決め制御に特化した制御性を持たせることが考えられた。しかし本研究の対象外であると考え、この部分については取り組まなかった。

将来展望として、今後は臨床使用を視野に入れながら応用対象を選定し、個別の工学的仕様(サイズ, 回転数, 出力等)および医学的仕様(清潔性の維持, メンテナンス等)について検討し、実機としての有用性を検証する。

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)

デディ ヌル ザマン, 鈴木孝司, 小林英津子, 佐久間一郎, MR 磁場を利用するアクチュエータに関する研究, 日本コンピュータ外科学会誌, 10(3):441-442, 2008.

〔学会発表〕(計 1 件)

デディ ヌル ザマン, 鈴木孝司, 小林英津子, 佐久間一郎, MR 磁場を利用するアクチュエータに関する研究, 第 17 回日本コンピュータ外科学会大会, 2008 年 11 月 2 日, 東京.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木 孝司 (SUZUKI TAKASHI)

東京女子医科大学・医学部・助教

研究者番号: 00468688