MRI 環境対応小型手術支援 7 自由度マニピュレータの開発

The development of 7DOF Manipulator Driving Surgical Tools for the Compact Surgical Support System with MR-compatibility

○正 岸 宏亮(日立機械研,早大) 橋爪 誠(九大)

正 藤江 正克(早大) 正 佐久間 一郎(東大) 正 土肥 健純(東大)

Kousuke KISHI, Hitachi, Ltd. / Waseda Univ. kosuke.kishi.zt@hitachi.com

Makoto HASHIZUME, Kyusyu Univ.

Masakatu G FUJIE, Waseda Univ.

Ichiro SAKUMA, Univ. of Tokyo.

Takeyoshi DOHI, Univ. of Tokyo.

The concept and specification of a compact surgical manipulator for intervention support systems in MRI (Magnetic Resonance Imager) was studied with authorities. Based on this specification, the design/prototype production was performed about a compact surgical manipulator, surgical tools, and a control unit. In consideration of spatial interference with the receiving coil or a patient body surface in the gap of opened type MRI, modularization, and number of the necessary degree of freedom, we developed seven-degree-of-freedom compact surgical manipulators driving surgical tools. This manipulator can work in space of 430[mm] high. In addition, the surgical tool is exchangeable, and has three degree of freedom at the tip that the manipulator can drive without using a wire. We evaluated MR compatibility of the manipulator, and confirmed that no problem occurred in both sensors and a movement range.

Key Words : MRI, MR compatibility, Forceps, Tendon wire mechanism, Power transmission mechanism

1. 序 論

できるだけ小さな切開(侵襲)で、内視鏡と術具を用いて治療を施す低侵襲手術は、術者が直接患部を見ることも触ることもできないため、外科医への負担が大きい。そこで、低侵襲治療の普及をより拡大させ、これを安全かつ確実に施行するために、従来術具では困難であった手術操作や動作範囲、アプローチ方法をマニピュレータの支援により可能とし、さらに高機能診断機器からの情報を用いることにより限られた視野を補完し、危険領域への誤ったアクセスを回避するナビゲーションを有するシステムの実現が重要である。これを実現するために、高機能診断機器として MRI を用い、その中で動作可能な小型軽量化した手術支援マニピュレータシステムと、術中の患部およびその周辺の情報を提供する画像誘導ナビゲーションから成り立つ手術支援システムを開発する⁽¹⁾。

2. システムコンセプト

本システムが目指す概念図をFig. 1に示す。診断装置である開放型 MRI、患部を観察する内視鏡、これら複数の画像情報を統合して提供する情報統合コントローラ、および本研究で開発中のマスタ・スレーブマニピュレータシステム、マニピュレータシステムと開放型 MRI を物理的に統合する手術台から構成される MR 画像誘導手術支援ロボティクスシステムの実現を目指している。本システムを用いる際には、外科医は術中に、情報統合コントローラによって提供される術中ナビゲーション画像や内視鏡画像、術前診断画像等をもとに、マスタデバイスをを用いて多腕の MRI 対応小型手術支援マニピュレータ(スレーブマニピュレータ)を操作し、治療行為を行う。スレーブマニピュレータ先端には、内視鏡や術具、穿刺針等を取り付けられるようにする。対象とする手術は、体腔内臓器や器官全般の手術であるが、まずは解剖学的に比較的明確になっている肝臓をターゲットとして研究を進める。

本報では、本システムで用いるスレーブマニピュレータ

のうちのひとつである術具駆動マニピュレータについて述べる。術具駆動マニピュレータは、MRI 環境下における穿刺針治療の際の対象の保持や、作業空間を作るための臓器圧排といった動作、内視鏡下手術における把持・切開・吻合といった様々な手技の実現を目的とする。

Fig. 1 Conceptual image

3. 術具駆動マニピュレータ

3.1 技術課題

術具駆動マニピュレータを開発するにあたり問題となる課題は、(1)高さ 430[mm]という MRI ガントリの狭隘空間性、(2)高周波強磁場空間(0.3[T])、(3)医療機器としての安全性確保といった大きく分けて 3 つの項目が挙げられる。MRI 環境下において体腔内で任意の手技を行うためには、これらの課題を解決し、術具先端部で位置姿勢の 6 自由度と術具開閉の 1 自由度を有する必要がある。

MRI の狭隘空間において、患者や MRI の RF コイル、他の医療機器などと干渉せずにマニピュレータを設置するためには、体腔内に挿入される術具以外のマニピュレータ高さを 15[cm]程度に収めなければならないことがわかった。高さ 15[cm]程度の中に、体腔内で直径 15[cm]程度の円を動作範囲とするために、マニピュレータとして大きな体積を占める駆動源をマニピュレータ構造体から分離し、動力伝達手段を確立することによりマニピュレータを小型化する。

駆動源をマニピュレータ本体から分離するという事は、高周波高磁場空間対策にもつながる。磁場との干渉を防ぐために、マニピュレータの駆動源として超音波モータ(新生工業:USR-60 非磁性タイプ)を用いる。MRI 撮像領域中心から超音波モータをどれだけ遠ざければMRI 画像に影響がないかを実験的に調べ、約 50[cm]以上遠ざければ問題がないことを確認した。そこで、本システムは安全率を見込み 70[cm]以上遠ざけた位置から 7 自由度を駆動する配置とした。構造体は、高周波高磁場環境および滅菌性を考慮し、撮像中心に近い部分では、PEEK®やチタン合金を用いる。センサとしては、超音波モータと一体型の電気式エンコーダにノイズ対策を施したものを使用する。

よって、これらの条件をデザインレベルで考えると、(a)70[cm]以上の動力伝達手段の確立、(b)約 15[cm]で 7 自由度という小型な形状でありながら、磁場環境に影響を与えない材料で、医療機器として運用可能な機構の確立、(c)これらを制御する超音波モータのサーボ制御技術の確立、といった技術的課題が浮かびあがる。これらの問題点を解決した術具駆動マニピュレータについて本報では(a)、(b)の観点を中心に述べる。

3.2 自由度配置

内視鏡下手術では術具径に相当する穴(刺入点)を体表に開け、術具が刺入点を中心にピボット運動する必要がある。すでに報告済みの術具保持マニピュレータ⁽²⁾は、平行リンクを用いた RCM(Remote Center Motion)機構により 2 自由度のピボット運動を実現し、刺入点の位置決めはガイドフレームおよびその取り付け具により設定可能となっている。これに更なる自由度、即ち術具の直動、術具軸の回転、術具先端での 2 自由度、開閉の 1 自由度を追加して 7 自由度の術具駆動マニピュレータを開発する。3.1(b)で述べたように、医療機器として考えると、術具は術中の状態に応じて様々な種類のものを交換して利用する必要があるため、マニピュレータに対して容易に着脱可能にできる必要がある。そこで術具自体を直動、回転させる術具駆動部と、先端 3 自由度を有する術具を開発し、術具駆動部と術具は、工具を使うことなく容易に着脱可能な構造とした。

3.3 制御性を向上させる術具

開発した術具は、屈曲 2 自由度、開閉 1 自由度の先端 3 自由度を、一切のワイヤを用いず剛体のロッドとリンク、ギアにより駆動を実現する。また、屈曲の 2 自由度は干渉することなく独立に駆動が可能であり、動作範囲はそれぞれ $\pm 90[\text{deg}]$ となっている。これにより、ワイヤの断裂や、ワイヤたるみによるヒステリシス、頻繁な術具メンテナンスといった問題が解決し、制御性が向上する。

3.4 動力伝達手段

3.1(a)を実現するために、撮像中心から 70[cm]以上離れた位置に配置した超音波モータからタイミングベルトにより動力を伝達し(この機構を駆動部と呼ぶ)、そこからさらに各関節へ蛇管ワイヤ機構を用いて 50[cm]程度の距離を動力伝達することにより実現している。蛇管ワイヤ機構は、マニピュレータを任意の位置に配置可能にするために用いている。また、術具先端 3 自由度へ動力を伝達する機構として、フッ素チューブの中に可撓性を有するエンジニアリングプラスチックのロッド(仁礼工業:PEEK®ロッド)を通し、PEEK®ロッドの両端に、ラックを切った剛体のロッドを取り付け、駆動力を直動運動として伝達する蛇管ロッド機構

を開発した。蛇管ロッド機構は、蛇管ワイヤ方式のように 1 自由度に 2 本の管を必要とすることなく、一本のロッドの押し引きにより動力を伝達するため空間効率が高い。また、蛇管ロッド機構では、蛇管ワイヤ方式のようなワイヤの断裂、緩みといった問題が発生しにくく、メンテナンスの必要頻度が大幅に低減する。中継ボックスと駆動部は、工具を使うことなく容易に着脱が可能である。

3.5 評価

Fig. 2 に術具駆動マニピュレータ及びその駆動系、Fig. 3 に着脱可能なワイヤを用いない 3 自由度術具を示す。

開発した本システムが、MRI が有する高周波高磁場環境に対して影響を及ぼしていないか、逆にマニピュレータが MRI から影響を受けていないか、また MRI の狭隘空間において、マニピュレータが物理的に干渉することなく動作が可能かどうか、を評価するために、実際に MRI(日立メディコ: AIRIS II comfort, 静磁場強度 0.3[T])内部に配置して駆動実験を行った。Fig. 2 に示すように、MRI 装置との機械的な干渉もなく、MRI 磁場環境下で動作可能であり、MR 画像への影響も運用により臨床への影響がないレベルであることを確認した。

Fig. 2 Manipulator system for driving surgical tools in MRI

Fig. 3 Interchangeable wireless forceps

4. 結論

70[cm]の距離で動力を伝達する駆動部、ワイヤを用いずに先端で 3 自由度駆動可能な術具、術具が容易に着脱可能な術具駆動部を開発することにより、全 7 自由度の術具駆動マニピュレータを開発した。これを MRI 環境下で用い、影響を受けずに動作可能であること、逆に MR 画像への影響が臨床に使えるレベルであることを確認した。

謝辞

本研究は独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO) 基盤技術研究促進事業「未来型医療を実現する小型手術用ロボティクスシステムの研究開発」の委託により実施した。

文献

- [1] 岸宏亮他, “MR 画像誘導小型手術支援システムのコンセプト,” ROBOMECH2005 講演論文集, 2P1-N-122, 2005.
- [2] 岸宏亮他, “MR 画像誘導小型手術支援穿刺針保持マニピュレータの開発,” 第 14 回日本コンピュータ外科学会大会論文集, pp.179-180, 2005.