深部脳神経外科手術支援システムの操作性向上に関する研究

Improvement of Operability for Micro-Neurosurgical Robot in the Deep Surgical Field

学 高橋 弘樹 (東京大) ○学 米村 翼 (東京大)
正 杉田 直彦 (東京大) 楚良 繁雄 (NTT 関東病院)
森田 明夫 (NTT 関東病院) 正 光石 衛 (東京大)

Hiroki TAKAHASHI, The University of Tokyo, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo
Tsubasa YONEMURA, The University of Tokyo
Naohiko Sugita, The University of Tokyo
Shigeo SORA, Kanto Medical Center NTT EC
Akio MORITA, Kanto Medical Center NTT EC
Mamoru MITSUISHI, The University of Tokyo

Master and Slave system to assist the surgeon has been studied actively. In the neurosurgery, the development of micro neurosurgery system that is manipulatable in the deep surgical field with the engineering techniques is also studied, and there are some famous robots. However, regarding the master system, manipulator should be designed for each surgical field, because the target workspace and precision are different. Furthermore, operability is important for the safety reason. Therefore, the authors tried to develop a master manipulator with higher operability especially designed for micro neurosurgical system.

Key Words: Surgical Robot, Master-Slave System, Neurosurgery, Microsurgery, Operability

1. 緒言

脳神経外科手術は、狭い術野の中で微細な作業を行う必要があり、特に脳深部での作業は困難を極める。脳神経外科手術を支援するシステムとしては、neuroArm[1]、NeuRobot[2]などがある。しかしながら、前者は未だコンセプトの段階であり、後者は十分な動作領域を有しておらず、脳深部を対象とした実用可能なシステムは開発されていない。本研究では、マスタ・スレーブシステムを採用した深部脳神経外科手術支援システム[3]の操作性向上を目的として、微細手術動作に適したマスタ・マニピュレータの開発と自由度対応の検討を行った。

2. 深部脳神経外科手術支援システムの操作性向上

2.1 深部脳神経外科手術支援システムとその問題点

従来用いられてきたシステムには、PHANTOM (SensAble社)などの様に、汎用的なマニピュレータが用いられてきた。これらのマスタ・マニピュレータの操作をスケールダウンしてスレーブを動作させることで、精度を上げて作業を行ってきたのである。しかし、脳神経外科手術に特化したシステムに用いる場合、このシステムのままではその汎用性ゆえに操作性に問題が生じる。そもそも、脳神経外科手術では、スケールの大きな作業もあるが、血管吻合などの微細な作業時には、手術用顕微鏡を覗きながら手を頭蓋などに乗せて安定させた状態で指先の動作のみで鑷子を扱う。そのため、脳神経外科手術に特化したシステムのマスタ・マニピュレータにおいても、同じ様な動作が行えるシステムを開発しなくてはならない。

そこで、微細手術に適したマスタ・マニピュレータを開発し、深部脳神経外科手術支援システムの操作性を向上させることを目的とする。

2.2 システムの操作性向上

システムをより操作しやすくするため、以下の2点について

て検討する。

(1) 軽量で操作者の卓上動作に合わせたワークスペースを有するマスタ・マニピュレータを設計・開発する。

(2) 微細手術動作に適したマスタ・スレーブの動作対応を検討し、実装する。

3. マイクロ用マスタ・マニピュレータの開発

3.1 ワークスペースと機構設計

まず、人の卓上での手の動作について、自由度の確認とワークスペースの解析を行った。姿勢3自由度について、人の手は図1のような屈曲、回転自由度を有する。これを取得する姿勢機構部については、ジンバル機構を採用した。

Fig.1 Hand posture

並進動作について、腕の動きに伴い、手の位置だけでなく手の姿勢(把持した器具の姿勢)も変化する。ジンバル機構の特異点を回避するためには、姿勢機構部は可能な限り手首の姿勢変化のみに対応し、並進動作時は姿勢機構部の基本姿勢が腕の動作に追従するような機構であれば良い。そこで、腕の動きによる手の位置とその際の手に持った器具の姿勢の

解析を行い、手の位置を始点、器具の姿勢をベクトルとして表現した(図2)。ここで、人の卓上での腕の動作を、上腕、前腕の垂直平面内の動作と、肩を通る垂直な軸周りの回転運動と仮定した。そして同様のベクトル場を動作範囲、姿勢として有するリンク機構の設計を行った。

Fig.2 Arm working area / posture

まず初めに、卓上に手を乗せた状態で作業可能な様に、操作者の腕に対して上方からアプローチする図3のようなリンク機構を考える。適当なパラメータを定めることにより、動作範囲は一致させることが可能であるが、姿勢機構部の姿勢は合わない。この場合、姿勢機構部の姿勢はリンク L1 に対応させる方が良い。

Fig.3 Linkage mechanism (1) / Working area (overlay)

そこで、途中に平行リンク機構を組み込むことにより、把持部の姿勢をリンク L1 に依存させる機構を提案する(図4)。なお、L1 と L3, L4 と L6 と L7 は一体のリンクである。適当なパラメータを設定することにより、姿勢機構部の動作範囲と姿勢を図2のベクトル場とある誤差以下で一致させることが可能である。そこで、この機構、パラメータを用いて、マニピュレータの設計を行った。

Fig.4 Linkage mechanism (2) / Working area (overlay)

3.2 マスタ・マニピュレータの実装

開発したマスタ・マニピュレータの外観、操作時の様子を図5に示す。材料には主に PEEK (ポリエーテルエーテルケトン)、A2017 を用い、軽量化を図った。各関節にはロータリエンコーダを取り付け、関節角度から手の位置、姿勢を測定する。また、並進機構部、把持部には DC モータを取り付け、

操作者への力覚の提示や重力の補償を行う。

(a) Overview

(b) Operator

Fig.5 Master manipulator

4. 微細手術に適したマスタ・スレーブの動作対応

開発したマスタ・マニピュレータとスレーブ・マニピュレータは任意の動作対応で操作することが可能である。マスタは把持動作を除いて片腕 6 自由度(並進 3 自由度, 姿勢 3 自由度)を有するのに対し、スレーブは片腕 5 自由度(並進 3 自由度, 屈曲 1 自由度, 回転 1 自由度)を有する。

4.1 並進動作対応

医師が鑷子などを用いて手術を行う際、その先端部の位置が重要となる。大きな動作は肩や腕から行うが、微細血管の縫合などの精密な作業を行う際には、手を患者の頭蓋などに乗せて安定させた状態で、手首、指先によって動作を行う。マスタ・スレーブ間で 1/10~1/20 程度のスケールダウンを行い、医師のマスタでの動作スケールは実際の手術作業よりは大きなものとなるが、それでも細かい作業であることには変わりない。そこで、操作する医師の手の位置ではなく、把持した器具の先端部の位置と対応させることを検討する(図6)。

4.2 屈曲/回転動作対応

マスタ、スレーブでは姿勢自由度の数が一致しない。そのため、マスタ・マニピュレータの把持部とスレーブ・マニピュレータの鉗子先端部の姿勢を完全に一致させるような制御は不可能であり、鉗子の回転、屈曲自由度を制御するための適当な動作対応を検討する必要がある。そこで、スレーブの鉗子先端把持部の動作を、鑷子で行う際に動作させる軸と対応させることを検討する。具体的には、図7中で示すように、鉗子の屈曲動作を姿勢部の α 軸の動作に、回転動作を γ 軸の動作に対応させる。

Fig.6 Correspondence of linear motion

Fig.7 Correspondence of bending / rotation

5. 評価実験

5.1 マスタ・マニピュレータの機構の評価

本研究で開発したマスタ・マニピュレータは、並進機構部のワークスペースを人の手の動作範囲、姿勢と似せたものにする事で、姿勢機構部の自由度を操作者の手首動作にのみ割り当て、姿勢に関するワークスペースを広く取ることを目指したものである。そこで、この点について確認を行った。

被験者に手首の姿勢変化を行わずに手を並進動作させてもらい、その際の姿勢機構部の姿勢動作のしやすさを確認する。この際の評価法とし可操作度 ω を用いる。これは、マニピュレータの位置や姿勢の動かしやすさを表す指標であり、本研究では姿勢機構部のヤコビアン J を用いて次のように表される。

$$\omega = |\det J| = \sqrt{\det JJ^T} = |\cos \beta| \quad (1)$$

これを使って、被験者一名（工学系の院生）で実験した。並進動作時の手の位置と、その位置に手があるときの姿勢機構部の可操作度を計算したものが図8 (a) である。上下方向の動作時に多少可操作度の値が変化するが、常に高い値を保っていることが確認できる。これは、操作がどの位置に手を持って行っても、そこでの手の姿勢動作が容易であることを示している。これより、本研究で提案したマスタ・マニピュレータの並進機構部が、操作者の手の位置だけでなく、姿勢にも追従する機構であることが確認できた。操作者の手の並進動作に依らず、姿勢機構部は操作者の手に合った姿勢自由度を提供するため、手首に無理な姿勢を強いることが無く、また、スムーズな動作が可能であると考えられる。参考に従来のマスタ・マニピュレータで同様に可操作度を計算したものを図8 (b) に示す。把持した時から可操作度が比較的小さく、並進動作に伴い大きく変化していることが確認できる。

(a) Proposed master (b) Conventional master
Fig.8 Manipulability of posture

5.2 マスタ・スレーブの動作対応の評価

提案する並進動作対応について、操作性の評価実験を行った。提案する動作対応を評価するに当たって、一対比較法を用いる。比較対象として、

- (A) : 把持部の中心の位置を鉗子先端部の位置に対応
- (B) : 把持部先端の位置を鉗子先端部の位置に対応とする (図9)。

Fig.9 Translation A, B

設定したタスクとしては、1[mm]方眼紙の格子点に対してのポインティングとした。ロボット鉗子先端に30Gの注射針を固定し、針先端にて格子点になるべく正確にポイントする (図10)。中央の0から中心と各点を順次往復してもらい、その時間を計測する。

Fig.10 Graph paper for pointing experiment

3名の被験者に右手、左手でA→B→Aの動作対応の順で5回ずつタスクを行ってもらい、操作時間、位置決め誤差を測定した。結果を図11に示す。実験結果からは、必ずしも提案する動作対応Bの方が操作しやすいという結論は得られなかった。タスクを行った被験者からは、動作対応Bの方が移動は行いやすいが、Aと比べて動作時のスレーブの振動が大きく、その点では操作しにくいとの評価を得た。これは、姿勢機構部関節のエンコーダの分解能が並進機構部のものに比べて低く、把持部先端の位置分解能が低いためであると考えられる。

Fig.11 Average time / Average error

6. 結言

深部脳神経外科手術支援システムの操作性向上を目的として、人と同様の動作範囲を有するマスタ・マニピュレータの開発と、微細手術に適した動作対応の検討を行った。

参考文献

- [1] Deon F. Louw, Tim Fielding, et al., "Surgical Robotics: A Review and Neurosurgical Prototype Development," Neurosurgery, Vol. 54, No.3, pp.525-537, 2004.
- [2] T. Goto, K. Hongo, et al., "Clinical application of robotic telemanipulation system in neurosurgery," Journal of Neurosurgery, Vol.99, No.6, pp.1082-1084, 2003.
- [3] A. Morita, M. Mitsuishi, et al., "Microsurgical robotic system for the deep surgical field: development of a prototype and feasibility studies in animal and cadaveric models," Journal of Neurosurgery, Vol.103, No.2, pp.320-327, 2005.