

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 20 日現在

機関番号：13601
研究種目：基盤研究(A)
研究期間：2011～2013
課題番号：23240078
研究課題名(和文) マイクロサージェリー支援マニピュレータの開発

研究課題名(英文) Development of manipulator for microsurgery

研究代表者

本郷 一博 (HONGO, Kazuhiro)

信州大学・医学部・教授

研究者番号：00135154

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 32,000,000円、(間接経費) 9,600,000円

研究成果の概要(和文)：顕微鏡下脳神経外科手術時に脳などの組織を安定かつ安全に把持牽引して良好な手術環境を提供するロボットマニピュレータを開発し検証した。マニピュレータは6自由度の多関節アーム型で、先端にピンセット等を装着する。アームは重力補償設計で精細かつ軽快な動作が可能である。術者が直接操作する受動型と、遠隔操作が可能なマスタ・スレーブ型の二種類を開発した。この装置は脳外科手術の安全性や確実性、低侵襲化に寄与する。

研究成果の概要(英文)：We developed and evaluated a robotic manipulator which helps neurosurgeons by retracting tissues safely and steadily during microsurgery. The manipulator is an articulated arm with 6 degrees of freedom. It can mount surgical equipment such as forceps. The arm has gravity compensation mechanism to realize fine and light action. Two prototypes were developed: passive type which was driven by the surgeon, and master-slave type. It can contribute for safe, reliable, and less-invasive neurosurgery.

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：医用ロボット マイクロサージェリー

1. 研究開始当初の背景

我々は脳神経外科手術にロボット技術を応用する研究を行ってきた。平成9年より脳神経外科手術支援ロボットとしてマスタ・スレーブ型脳神経外科手術ロボットの開発を行い、硬性内視鏡様の細径筒型の筐体内に立体内視鏡と3系統のロボットアームを内蔵した NeuRobot と呼ぶロボットを開発し、マスタ・スレーブ型脳神経外科手術ロボットとして世界初の臨床使用を行った。平成18年からは EXPERT と名付けた自動追従型手術用手台ロボットの開発研究を行った。このロボットは、モータ駆動に依らない受動的動作の多関節アーム先端に力覚センサを介して術者が腕を置く台を搭載し、各関節のエンコーダと力覚センサの情報から術者の意図を判断して各関節の電磁ブレーキを制御するものであった。多関節アームの各軸回りで重量配置の適正化とバネによる支持機構搭載による重力補償を組み入れ、精細かつ軽快な動作を実現した。この開発を通じて我々は術者の腕の動きに自動的にロボットアームを追従させる技術を確立した。EXPERT は本研究開始時には既に実臨床への応用を果たしており、市販化計画段階に入っていた。

脳神経外科手術で顕微鏡下操作の大部分を占める操作は、脳実質、脳血管、脳神経、病変などの剥離作業である。鉗等を用いた切離によって鋭的な剥離を行うには、被切離組織に適度な張力を与えることが必要である。被切離部位の両側をそれぞれ同時に牽引しながら切離操作を行うので、剥離操作には計3系統の操作系が必要である。術者の手は二つしかないので、牽引の少なくとも一方は、助手が担当するか、脳ヘラを自在固定蛇腹に接続して担わせることが一般的であった。しかし、助手による牽引には疲労や不安定性といった問題があり、脳ヘラと自在固定器も、牽引の位置と方向を調節する度に固定解除と再固定という煩雑な操作が必要であるという問題があり、脳ヘラでは圧排による牽引は可能でも把持しての牽引は不可能であるという制限もあった。我々が過去のロボット開発を通じて確立してきた手法を応用すれば顕微鏡下での脳神経外科手術においても使用可能な精度で安定して組織を把持牽引する装置の開発に実現可能性があると考えられたことから、従来の顕微鏡下脳神経外科手術における牽引の諸問題を解決する手段として本研究が計画された。

2. 研究の目的

本研究では、顕微鏡下脳神経外科手術において、術野で脳などの組織を把持牽引するロボットマニピュレータを開発し、その有用性を検証することを目的とした。このロボットは、術野で脳などの組織を安全かつ安定的に

把持牽引し、術者が手術手技を行うための良好な作業環境を提供して術者を間接的に支援することで、手術手技の難易度を軽減し、既存の手術技術を向上させて手術時間の短縮と安全性の向上、手術の低侵襲化や手術成績の向上に寄与すると予想された。マニピュレータは自重補償機構を備えた多関節アーム型として先端に6自由度を付与し、先端には鑷子などの手術器具を装着し、同部を術者が直接手で持って操作する受動型装置を製作して評価し、更にマスタ・スレーブ型の装置を構築して遠隔制御を実現することを目的とした。受動型装置のアーム各関節は電動アクチュエータを持たず、バネ機構と術者自らの直接駆動によって動作する機構とし、基本的動作と遠隔制御時のマスタとしての利用可能性の検証に供することを目的とした。更に、マスタ・スレーブ型の装置では本研究の構想における電動アクチュエータに拠る能動的動力機構や遠隔操作機構の性能および臨床使用への発展可能性について検証することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) まず研究計画全体に要求されるロボットの基本的な性能項目を検討した。ロボットのユーザーとしては顕微鏡下で脳神経外科手術を行う脳神経外科専門医を想定した。研究分担者、研究協力者らとロボットに要求されるべき性能について協議を重ね、不明確であった項目を明確化した。マニピュレータ先端に接続される手術器具として、脳ヘラ、鉤付きヘラ、銀ヘラなどの先端に可動部分を持たない術具だけでなく、実際の手術において頻用される鑷子が使用できることを条件とした。

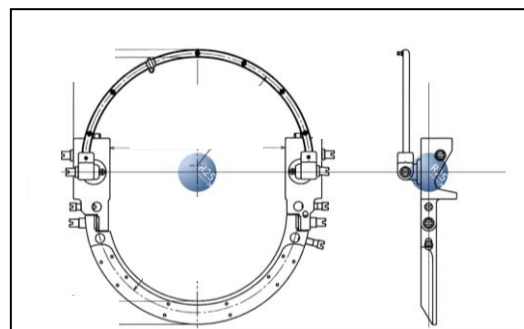


図 1. 設計時に設定した牽引器具先端の想定動作範囲。既存の手術環境である杉田式ヘッドフレームでは、手術操作は専らフレームの中央で行われるため、そこに半径 25mm の球状の動作範囲を想定し、この領域内で所期の性能を発揮できるように設計した。

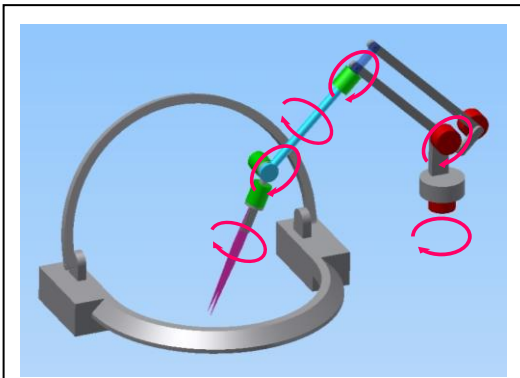


図 2. マニピュレータの基本設計案と自由度構成。既存の手術環境の脇に設置して使用できる、6自由度の多関節アーム先端に、鑷子が搭載されている。

(2) 上記要求項目を踏まえて、装置の基本的設計を行った。臨床使用時の環境を想定して、装置に要求される剛性と、既存の手術の妨げることなくロボットに占有が許容される術野上の空間的制限の双方を整合して、その範囲で最大限の動作環境が得られるよう、マニピュレータの動作範囲（図 1）、サイズ・自由度構成（図 2）を検討した。既存の手術器具と比較検討して新規技術導入の必要性と優位性を検証し、既存の素材、市販要素部品や加工方法に関する知見からのフィードバックを行いながらマニピュレータの全体的デザインを策定して推敲を重ね、設計を最適化した。マニピュレータ先端へ搭載する手術器具については、接続機構を検討し、市販品の流用あるいは改造の適否、若しくは専用品の新規設計製作の可否を考察した。

(3) 基本的設計を基に、装置の具体的設計を行った。具体的設計案に基づく詳細な設計は日立情報通信エンジニアリング株式会社に発注した。前項の基本的設計に基づき、具体的設計の各過程で同社の担当チームと基本設計者である工学者、医師との間で協議を重ね、全体及び細部の設計を評価検討して推敲を重ね、具体的な設計の進捗に伴って発生した問題点をその都度討議して設計の変更を行い、設計の最適化に努めた。顕微鏡下での手術術野を妨げず、我々の既存の脳神経外科手術環境である杉田式ヘッドフレームと整合することなどを重点とし、ロボットの機構自体についても可及的に既存の市販部品や加工方法との整合を図って設計した。

(4) 上記設計に基づき、一号機を製作した。(5) 完成した一号機の有用性についての評価を行った（図 3）。頭蓋、脳、脳血管の臨床教育用模型を用いて顕微鏡下脳神経外科手術を再現した実験環境を構築し、脳外科医を被験者として、手術用顕微鏡下で手術時の剥離操作を模してくも膜を模したラップフィ

ルムを切離一号機を使用して切離するタスクを課す実験を行った。

(6) 一号機を用いた前項実験結果で判明した一号機の設計及び製作調整上の問題点を洗い出して討議検討を重ね、それらを反映させて自重補償のための重量配置の見直しやバネ機構の変更などをはじめとした装置各部の再設計を行った。

(7) 再設計案をもとに、鑷子接続部に力覚センサを搭載し、各関節エンコーダからのアーム位置情報とともに、術者からの操作応力を検知して出力可能な二号機を設計製作した。この二号機は単体でも受動型ロボットマニピュレータとして一号機と同等の目的で使用できるとともに、マスタ・スレーブ装置のマスタ側としても使用可能な設計とした（図 4 左）。

(8) 受動型の二号機とペアとなる、スレーブ側ロボットマニピュレータを設計製作した。これまでの受動型あるいはマスタ側のマニピュレータと同じアーム長と関節可動域を有し、類似の重力補償に配慮した重量配置とするなど、これまでの設計と最大限同一の設計とし、新たに各関節には電動モータを搭載して、マスタマニピュレータに加えられた術者からの操作を一対一対応でスレーブ側に追従再現させる設計とした。

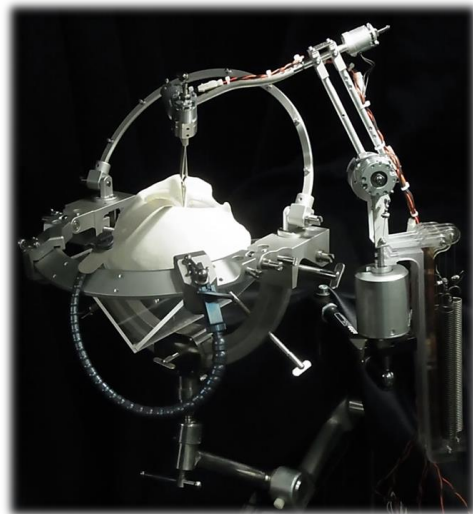


図 3. 一号機と、有用性評価のための実験装置。脳神経外科手術用の杉田式ヘッドフレーム（頭蓋固定器具）に、頭蓋・脳の模型を組み合わせた。手術台上に固定した受動型マニピュレータ（一号機）の先端に鑷子が搭載されている。この一号機は、術者が直接手で持って操作する。

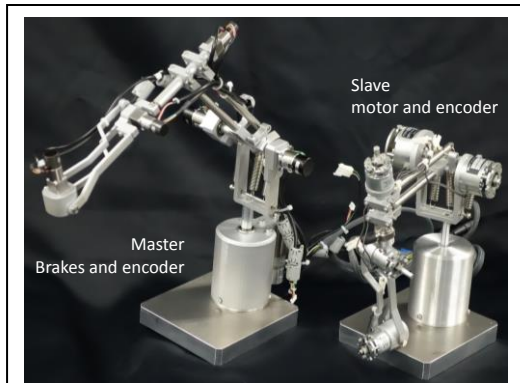


図4. マスタ・スレーブ型装置。左：受動型二号機を使用したマスタ側マニピュレータ。術野外で操作者が手で持って操作する。右：スレーブ側マニピュレータ。マスタの動作を術野で再現する。

(9) マスタ・スレーブ装置の有用性評価を行った。上記(5)項と同一の頭蓋、脳、脳血管、くも膜を模した評価系を用いて、マスタ・スレーブ装置を稼働させ、有用性を評価した。

4. 研究成果

受動型の一号機を用いた有用性評価では、本装置を用いて良好な膜切離による剥離操作が可能であり、本装置の使用によって膜切離による剥離作業が容易になることが判明した。しかし、一号機では精細かつ軽快な動作性能を優先した設計の結果、重力補償下での動作範囲が狭小であり、直径数センチメートルの範囲でしか良好な重力補償性を得られなかった。結果を考察し重力補償下で作業できる空間領域を拡大する必要があると判明し、バネ機構の調整、変更などを行って検討し、二号機の重量配置設計にも反映させた。

上記改良と、構成部品の一部見直しと再設計によって慣性質量の低減に努めたことにより、受動型二号機（マスタ側マニピュレータ）では重力補償範囲が拡大され、操作性についても向上が得られた。

スレーブ・マニピュレータを設計製作する際に、受動型の設計製作経験を参考応用して最大限共通の設計とすることにより、能動的に動作するロボットマニピュレータとしての開発作業が低減されかつ容易となり、開発期間および開発経費の低減が達成された。

マスタ・スレーブ装置の有用性評価では、受動型と同様の操作が可能で、剥離作業を容易ならしめることが示唆された。しかしながら、本装置の多関節アームは6自由度であるため、アーム先端に搭載した鑷子の位置と角度が決まると、アームの位置および姿勢は一意に決定される。このため、場合によっては

術者の手術操作や視軸と本装置が干渉する可能性も否定できないことは、本課題内では解決できない問題であった。この問題を解決するには、ヘッドフレームと本装置の相対的位置関係を調節可能とするような自由度の追加など、根本的な改良が必要と判明した。また、スレーブ・マニピュレータの多関節アームは受動型のような電磁ブレーキではなくモータによって姿勢制御したことから、アーム静止時の精度に課題が生じた。この問題については装置を作りこんでいくことで解消できると判断した。

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)

[学会発表] (計5件)

- ① 原洋助, 後藤哲哉, 岡本淳, 伊関洋, 本郷一博 (微細脳神経外科手術のための組織把持ロボットの開発) 第72回日本脳神経外科学会総会, 2013. 10. 16, 横浜
- ② 後藤哲哉, 原洋助, 本郷一博, 岡本淳, 伊関洋 (微細脳神経外科手術のための組織把持ロボットの開発～コンセプトと一次試作の結果～) 第22回日本コンピュータ外科学会, 2013. 9. 15, 東京
- ③ Goto T, Hara Y, Hongo K, Okamoto J, Iseki H (Robot-assisted tissue holding system for microneurosurgery) 15th World Federation of Neurosurgical Societies, 2013. 9. 11, Seoul, Korea
- ④ Goto T, Hongo K, Hara Y, Okamoto J, Iseki H (Robot-assisting holding system for microneurosurgery) Computer Assisted Radiology and Surgery, 27th International Congress and Exhibition, 2013. 6. 28, Heidelberg, Germany
- ⑤ Hongo K, Goto T, Hara Y (Master-slave manipulators for neurosurgical procedures) World Federation of Neurosurgical Societies Neurosurgical Technology Meeting, 2013. 2. 8, Hannover, Germany

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

名称: 外科手術用装置

発明者: 本郷一博、後藤哲哉、原洋助、岡本淳

権利者: 国立大学法人信州大学、学校法人東京女子医科大学

種類: 特許

番号: 特願 2013-130843

出願年月日: 平成 25 年 6 月 2 1 日

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

<http://www.shinshu-u.ac.jp/faculty/medicine/chair/i-noge/research/minimally-invasive-surgery.php#p07>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

本郷 一博 (HONGO, Kazuhiro)

信州大学・医学部・教授

研究者番号：00135154

(2) 研究分担者

後藤 哲哉 (GOTO, Tetsuya)

信州大学・医学部附属病院・講師

研究者番号：30362130

岡本 淳 (OKAMOTO, Jun)

東京女子医科大学・医学部・助教

研究者番号：10409683

伊関 洋 (ISEKI, Hiroshi)

東京女子医科大学・医学部・教授

研究者番号：90119892

堀内 哲吉 (HORIUCHI, Tetsuyoshi)

信州大学・医学部・准教授

研究者番号：40303466

(4) 研究協力者

原 洋助 (HARA, Yosuke)

信州大学大学院・医学系研究科脳神経外科学専攻・大学院生

研究者番号：なし