

様 式 C - 1 9、F - 1 9 - 1、Z - 1 9 （共通）

科学研究費助成事業 研究成果報告書



令和 2 年 6 月 22 日現在

機関番号：32612

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2018～2019

課題番号：18H06263・19K21355

研究課題名（和文）脳神経外科手術における力触覚鑷子の開発

研究課題名（英文）Development of haptics forceps in neurosurgery

研究代表者

柴尾 俊輔（SHIBAO, Shunsuke）

慶應義塾大学・医学部（信濃町）・共同研究員

研究者番号：50528792

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,300,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は脳神経外科手術において微細な力触覚を術者に伝達することにより、正確かつ精密な手術操作を行うための脳神経外科手術機器の開発を行い、非臨床実験によるPOC獲得を達成し、脳神経手術用ハプティックデバイスの実用化を加速させることである。本研究では力触覚通信技術を搭載した手術器具として力触覚鑷子を開発した。プロトタイプである1号機とより実用化を考慮に入れた2号機を作成した。それぞれを用いて豆腐を用いた脳モデルおよびマウスの脳腫瘍モデルを用いて硬さの可視化と硬さの判別が可能であることが示された。以上の結果は、力触覚鑷子の臨床応用を進める上で重要な結果と考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

脳神経外科手術のなかで脳腫瘍摘出術において、安全かつ最大限の摘出をすることが患者の予後改善に寄与することがこれまでの研究でわかっている。安全かつ最大摘出を実現するために様々な術中支援技術が発達してきた。術中に脳神経機能をモニターする電気モニタリング、術中に腫瘍の位置を把握しながら摘出することができるナビゲーションシステム、低侵襲に脳の深部を観察できる神経内視鏡装置などが挙げられる。これらは、視覚情報、電気情報を伝達するシステムと捉えることができるが、本研究における力触覚鑷子は触覚情報を伝達することができるという点で、これまでにない新しい術中支援技術を脳神経外科手術に提供できることが期待される。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to develop the equipments which help operators to feel stiffness and to perform the operation safely, and to accelerate practical application of such equipments. In this study, we develop the master-slave integrated haptics forceps as a surgical device with the technique of haptic transportation. We have created unit 1 forceps as a prototype one and unit 2 forceps as a practical one. We showed that it was possible to visualize stiffness and to distinguish the stiffness between normal brain and brain tumor by using tofu model and mouse brain tumor model. These results would be helpful to accelerate clinical application of the master-slave integrated haptics forceps.

研究分野：脳神経外科

キーワード：力触覚通信技術 脳神経外科手術 力触覚鑷子 硬さの可視化 硬さの判別

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

1．研究開始当初の背景

顕微鏡下でのマイクロサージェリーに代表される脳神経外科手術は、非常に微細な感覚の変化に基づいて行う繊細な手技である。たとえば、ほとんどの脳腫瘍は正常脳組織との境界が不明瞭であり、視覚的には判別困難なことが少なくなく、術者は、主に経験に基づいて微細な性状の違いを感じて切除範囲を決定する。そのため、高精度な脳神経外科手術を広く提供するためには、微細な性状の違いをより客観的に判別し、また手ぶれの影響を少なくする手術デバイスの開発が必要となる。

一方、力触覚の人工的な伝送、記録、再現に関する学問であるハプティクス技術は、1950年頃のロボットの遠隔操作研究に始まり、生産加工などの産業分野のみならず、医療、リハビリ、介護分野などにおける直接的な身体支援に向けて応用研究を加速させてきた。この力触覚技術は力の伝送のみならず、力触覚の増幅、力加減も含む動作の記録など幅広い応用性を有する。このことから、鉗子などの手術機器に操作部と効果器部とを分離して埋め込むことで、力データの取得や動作の反復再現、接触物の把持感覚の増幅といった多彩な機能を実現することが可能であると考えられる。

これらの機能は、繊細な操作を要する脳神経外科手術において非常に助けになるものであるとの着想を得た。例えば、感覚を感じながら操作できることは手先の感覚で正常脳組織と腫瘍組織を識別している脳外科医にとって有用であり、さらにその感覚を増幅できればその識別はより正確性を増す。また、力の数値化・可視化は腫瘍病変などの硬さに関する情報のデータ集積にも利用でき、動きの再現は感覚情報も含めた手術教育にも応用が可能と考えられる。

力触覚通信技術の脳神経外科手術への応用の第一段階として、単純ではあるが使用頻度の高い鑷子において、このような技術の応用が可能か実臨床で使える器具が作成できるのかという問題を解決するために本研究をスタートするに至った。

2．研究の目的

本研究の目的は超微細な力触覚を医師に伝達することにより、経験や技量への依存度の小さな、正確・精密な繊細作業を行うための脳神経外科手術機器（鑷子、吸引管、穿刺機器、鉗子）の開発を行うこと、そして、非臨床実験による POC 獲得を達成し、脳神経手術用ハプティクスデバイスの実用化を加速させることである。

超微細な力触覚が医師に伝達されることにより、腫瘍と正常脳組織との性状の違いなどが増幅して術者に伝わり、手元の震えが最小化される手術機器が開発されれば、経験や技量への依存度が小さく、誰でも同様に正確・精密な繊細作業を行うことが可能となる。よって、術者の経験、コンディション、器用さに左右されない、高精度の脳神経外科手術が提供可能となり、治療成績の均てん化と向上が期待される。また、手術のエキスパートの感覚を再現することでその感覚を体験できる教育という側面や力触覚機能を搭載したロボット開発にも応用できる可能性がある。

3．研究の方法

本研究では、力触覚通信技術を搭載した手術器具を開発し力触覚の伝達性能を計測する基本試験、生体性状が識別できるかの計測試験を行った。患部の物理的な特性を対象とするため、誤差解析や周波数特性解析を実施した。

具体的には、脳神経外科手術において最も頻繁に用いる手術器具として鑷子に着目した。力触覚通信技術を搭載した鑷子（力触覚鑷子）を試作し、硬さの識別、血管拍動の検知が可能かどうかを検証した。力触覚鑷子はボイスコイルモーター（VCM）を操作側と被操作側に搭載することで、バイラテラル制御によって2つのVCMが相互に力と位置の情報を伝達する仕組みになっている。そうすることで被操作側が受けた力＝操作側の反力となることで力触覚を伝達できる。

硬さ識別の検証

豆腐（木綿豆腐 vs 絹豆腐）マウス脳腫瘍モデルにおいて行った。鑷子をそれぞれ対象物の中で閉じたときの、VCMの動き（位置と力）を測定した。

血管拍動の検知の検証

豆腐の中に血管を模擬したチューブを入れ、それを鑷子で挟んだ際のVCMの動き（位置と力）を測定した。

次に研究協力者らとデバイスに求められる性能、形状について再度協議を重ね、問題点を明確化した。

それらのアイデアをもとに改良機を作成した。改良機においても豆腐（木綿豆腐 vs 絹豆腐）マウス脳腫瘍モデルを用いて同様の実験を行った。

4. 研究成果

まず、力触覚通信技術を搭載した手術器具として力触覚鑷子一号機を作成した。この力触覚鑷子はボイスコイルモーター（VCM）を操作側と被操作側に搭載することで、バイラテラル制御によって2つのVCMが相互に力と位置の情報を伝達する仕組みになっている。まず最初に、力触覚鑷子においてVCMにバイラテラル制御が適応できるかどうか、さらにスケーリング（力や位置の増幅や減衰）が可能であるかどうかを検証し、いずれも問題ないことを確認した。

続いて、硬さの可視化を検証した。脳のモデルとして豆腐を用いて、力触覚鑷子を豆腐内で閉じることで測定される位置と力のデータをグラフ化した。横軸を位置、縦軸を力として測定したデータをプロットした場合、描かれたグラフの傾きが硬さを表すこととなり硬さが可視化できた。また、木綿豆腐と絹豆腐の硬さの違いが判別可能かを検証した。木綿豆腐と絹豆腐それぞれの中で力触覚鑷子を閉じた際の位置と力のデータをプロットしたところ、木綿豆腐の方が傾きが大きい、つまり硬いという結果が得られた（図1）。

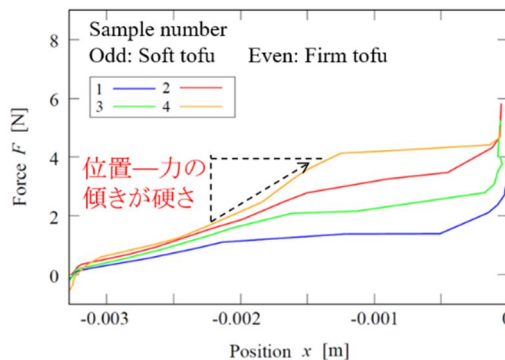


図1 豆腐の硬さ識別実験結果

さらに、血管拍動の検知を検証するために血管拍動モデルを用いた。2.0mm、3.0mm、4.0mm、5.4mmの血管拍動モデルにて、1Hzの脈動の検知が可能であったが、1mm以下の径ではうまく検知できなかった。

以上の結果から、力触覚鑷子にて対象物の硬さの識別が可能であること、2.0mm以上の血管拍動の検知が可能であることが示唆された。

次に、より実臨床での応用を意識した力触覚鑷子として、軽量化、高精度、配線類の簡略化を重視した仕様となる2号機を作成した（図2）。



図2 力触覚鑷子2号機

2号機を用いて、脳腫瘍モデルを使用して、正常脳と腫瘍との硬さの判別が可能なかどうかの検証および血管拍動の検知の検証を行った。脳腫瘍モデルとして、Ink4a/Arf-/-マウス由来の神経幹細胞にH-RasV12を過剰発現させて作製した腫瘍起源細胞をマウスの前脳に移植し形成されるグリオーマ様悪性脳腫瘍のマウスモデルを用いた（図3）。腫瘍が形成されたマウスの脳を取り出しホルマリンにて固定した腫瘍および正常脳の硬さをそれぞれ力触覚鑷子2号機を用いて測定した。腫瘍が脳内に形成されたサンプルにおいては、腫瘍が正常脳より硬いというデータが得られ、腫瘍と正常脳の硬さの違いを判別することが可能であることが示唆された（図4）。



図3 脳腫瘍マウスモデル断面図

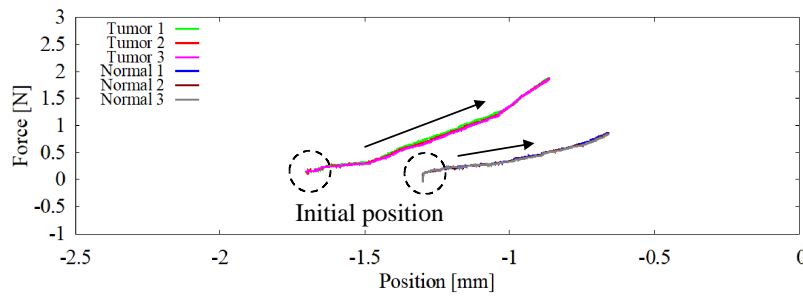


図4 脳腫瘍の硬さ識別実験結果

また、血管拍動の検知実験として、マウスの心臓、腹部大動脈、尾動脈の把持実験を行った。マウスでは個体の大きさが小さすぎるため、明確な血管拍動の検知は困難であった。力の増幅の設定を調整しても同様の結果であった。この結果からより大型の動物の血管での触知実験が妥当であることが示唆され、今後はラットを使用した血管拍動検知実験を検討している。

脳神経外科手術のなかで脳腫瘍摘出術において、安全かつ最大限の摘出をすることが患者の予後改善に寄与することがこれまでの研究でわかっている。これまで安全かつ最大摘出を実現するために様々な術中支援技術が発達してきた。術中に脳神経機能をモニターする電気モニタリング、術中に腫瘍の位置を把握しながら摘出することができるナビゲーションシステム、低侵襲に脳の深部を観察できる神経内視鏡装置などが挙げられる。これらは、視覚情報、電気情報を伝達するシステムと捉えることができるが、本研究における力触覚鉗子は触覚情報を伝達することができるという点で、これまでにない新しい術中支援技術を脳神経外科手術に提供できることが期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Mika Aoki, Tomoyuki Shimono, Takuya Matsunaga, Takahiro Mizoguchi, Kohei Ohnishi, Hikaru Sasaki, and Shunsuke Shibao
2. 発表標題 Discrimination Method of Environmental Stiffness using Haptic Forceps for Brain Surgery
3. 学会等名 The 2018 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Aoki, T. Shimono, T. Matsunaga, T. Mizoguchi, S. Shibao, H. Sasaki, M. Nishimoto, E. Ishihara, and K. Ohnishi
2. 発表標題 Utility Consideration of Haptic Forceps for Brain Surgery
3. 学会等名 IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (SAMCON2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 医療用把持装置	発明者 下野誠通、佐々木光、大西公平、柴尾俊輔ほか	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2018-129425	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	下野 誠通 (SHIMONO Tomoyuki)	横浜国立大学大学院・工学研究院・准教授 (12701)	