

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 5 月 22 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24650288

研究課題名(和文)変形に伴う組織の破壊を考慮した脳深部病変への最適手術経路計画

研究課題名(英文)Optimization of Neurosurgical Path to Avoid Damage Caused by Deformation of Brain Tissues

研究代表者

辻田 哲平(Tsujita, Teppei)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：40554473

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文): 脳組織などの柔軟組織を対象とする手術においては、術具による脳組織の圧排操作を行い、術野を確保する。圧排時の負荷状態によっては損傷を引き起こす危険性がある。本研究では術具による圧排に伴う脳組織の損傷を回避する最適手術経路の生成を行い、より安全な手術経路計画の実現を目指す。有限要素法と大域的最適化手法(Pattern SearchおよびGenetic Algorithm)を組み合わせた経路生成システムと経路生成フレームワークを開発し、人間の脳の材料特性および構造を単純化した有限要素モデルを用いて、脳ベラで脳裂を圧排し深部に到達する状況において、最適な脳ベラの位置・姿勢の計算を行えるようにした。

研究成果の概要(英文): In neurosurgery, in order to secure an operating field, a brain fissure is retracted by surgical tools. Therefore, effects of deformation of soft tissue should be considered to avoid damaging brain tissues. The goal of this study is to develop an automatic path planner considering the deformation of brain tissues. This paper shows a scheme which combines FEM (Finite Element Method) and an optimization method for optimization of retraction in order to approach a deep part of a brain with a spatula. In this scheme, Pattern Search and Genetic Algorithm are implemented as a global optimization method. The FE model of a human brain used in FEM is based on simplified mechanical structure and properties of an actual human brain. This scheme enabled computing optimal posture and position of the spatula.

研究分野：ロボット工学

キーワード：手術計画 脳神経外科 有限要素法 大域的最適化

## 1. 研究開始当初の背景

近年の医療技術，科学技術の発達により様々な手術支援システムが開発されている．難易度が高いとされる脳神経外科分野においても様々な手術手技や手術支援技術が開発され，手術の安全性や，患者の QOL (Quality Of Life) が向上してきた[1]．しかし，多くの手術手技において，安全に手術を遂行するためには病変部を処置するための手術経路の事前検討が必要である．これまでの手術経路は，MRI (Magnetic Resonance Imaging) などの断面画像やそれから復元された三次元統合画像をもとに病変部の位置や大きさを確認し，医師の経験等により検討されてきた．近年，手術経路の新しい検討材料として計算機によって自動生成された手術経路が注目されている．Fujii らは脳組織を損傷した際のリスクを部位ごとに設定し，任意の頭表位置から病変ヘリスクが低くなる経路の自動生成を行い[2]，また，生成された手術経路の類似性から脳裂を経由した経路の優位性について示した[3]．Shamir らは，断面画像から取得した脳や主要な血管を考慮し，重要な血管から距離をとった鍵穴手術用の手術経路の自動生成を行っている[4]．しかし，これらの研究では手術中の脳べらによる圧排などの脳の変形が考慮されていない．組織の変形を考慮した例として，Rilk らが機能的内視鏡下副鼻腔手術において術具と鼻腔組織の接触に伴う反力を考慮して経路計画を行っている[5]．しかし，組織に発生する応力とそれに伴う損傷については言及していない．

## 2. 研究の目的

手術経路計画において，病変に接近し，処置する際に伴う脳の変形と発生する負荷を考慮することで，より安全な手術経路を自動的に生成することを目的とする．

本研究では脳神経外科手術における開頭手術時のかき分け操作に着目した．脳深部に病変が位置する場合，図1に示すように脳裂と呼ばれる脳表面に存在する深い溝や脳槽と呼ばれる空間を経由して病変に接近する経路が有効であり，適用できる症例も多い[6]．しかし，病変を処置するための術野を確保するためには脳組織をかき分ける必要がある．術野確保はその後の処置の難易度を左右するため，術野を大きく確保したいが，無理にかき分けていると脳組織を損傷する危険性が高まる．このように術野の確保と脳の変形に伴う負荷はトレードオフの関係にあるといえる．そこで本研究では脳組織が損傷しないかき分け負荷に対して，確保する術野を最大化する手術経路を最適な手術経路と定義する．最適化手術経路は術具によるかき分け操作によって実現されるため，最適手術経路を求めるとい問題は，かき分け操作時の最

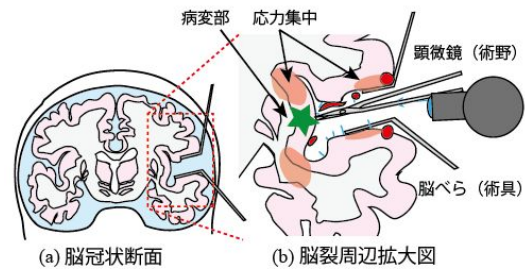


図1 開頭手術におけるかき分け操作

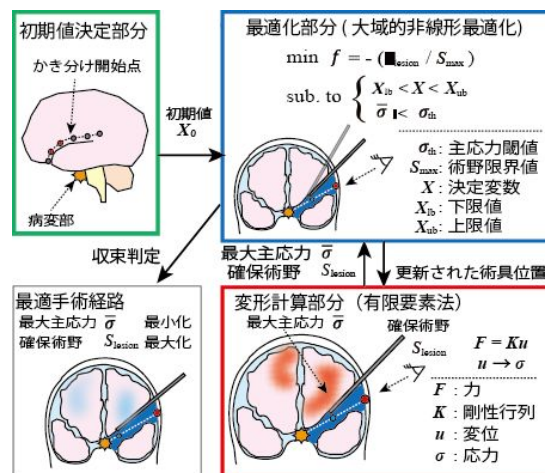


図2 システムの構成

適な術具の位置姿勢を求める問題に帰着される．この問題に対して，有限要素法と最適化手法を組み合わせたシステムを構築し，かき分け操作時の最適な術具の位置姿勢を求める．

## 3. 研究の方法

最適な術具の位置姿勢を求めるために，本研究では有限要素法による脳の変形計算と最適化手法を組み合わせたシステムを構築する．図2に示すように，本システムは変形計算部分，最適化部分，初期値決定部分の三つから構成される．それぞれの部分について以下に詳細を述べる．

### (1) 変形計算部分

変形計算部分では脳の変形を有限要素法にて計算する．はじめに術具と脳の干渉計算を行い，脳の変形計算に必要な境界条件を求める．次に脳の変形計算を行い，脳に発生した負荷と変形によって確保された術野の大きさを評価する．本研究では問題を単純化するために，術野を確保する過程での術具の位置変化を考慮せず，最終的に術野を確保する術具の位置姿勢に対する脳の変形を考えた．また，脳組織のような粘弾性体の持つクリープ現象等は考慮しない．したがって，術具と脳の干渉による脳の変形は静的問題として扱った．

確保される術野も変形計算部分で求める。顕微鏡下手術において、ベテラン医師は顕微鏡の位置姿勢を状況に応じて変化させ、病変周辺の術野を確保する。術野評価におけるシミュレーション中のカメラの位置姿勢も状況に応じて変化させて評価することで、ベテラン医師の顕微鏡操作を考慮することが望ましい。本研究ではカメラアングルを任意の場所に固定もしくは病変部と術具を結ぶ直線上に配置し、画面に描画される病変部分の大きさによって簡易的に術野を評価した。最適化プロセスにおいて、変形計算は多数試行される。このため、脳の変形計算を高速に行う事が可能な手術シミュレーションソフトウェア（学会発表）を利用した。

## (2) 最適化部分

最適化部分では術具の位置姿勢を更新することで、拘束条件として脳に発生する負荷を損傷指標よりも低く抑えつつ、目的関数として確保する術野が最大化されるような術具のかき分け位置を探索する。術具の位置姿勢をモデル化して幾つかの決定変数により表現した。したがって、最適解の探索は決定変数の更新によって遂行される。本研究で扱う最適化問題は非線形有制約問題であり、大域的非線形有制約問題の解法である Pattern Search Algorithm (PA) や Genetic Algorithm (GA) を用いた。最適化部分の実装は数値計算ソフト MATLAB の Global Optimization Toolbox を利用した。各アルゴリズムで必要となる、探索の初期値に関しては経験的に手動で設定した。

## (3) 最適経路生成プロセス

はじめに、かき分け開始位置と決定変数の初期値を決定する。次に、変形計算部分で入力された決定変数に応じた脳の変形を有限要素法により計算する。術具と脳の干渉によって生じた脳の負荷と確保された術野の大きさを算出し、最適化部分の入力とする。最適化部分では入力された応力や術野の値をもとに評価関数を計算し、術具の位置姿勢を示す決定変数の更新を行う。決定変数の探索は PA や GA を用いて行われる。最適化部分で更新された決定変数を変形計算部分に入力し、再び変形計算を行う。変形計算と決定変数の探索を繰り返すことでかき分け操作における最適解の探索を行い、評価関数と決定変数の変動がある閾値を下回れば探索を終了し、最適解とする。

## 4. 研究成果

変形計算部分で使用する有限要素モデルには図3に示したモデルを使用した。右図において、青い球状箇所が病変である。本研究では、変形計算部分で変形を計算した後、視野

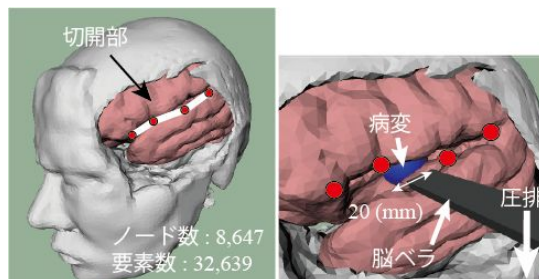


図3 脳モデル

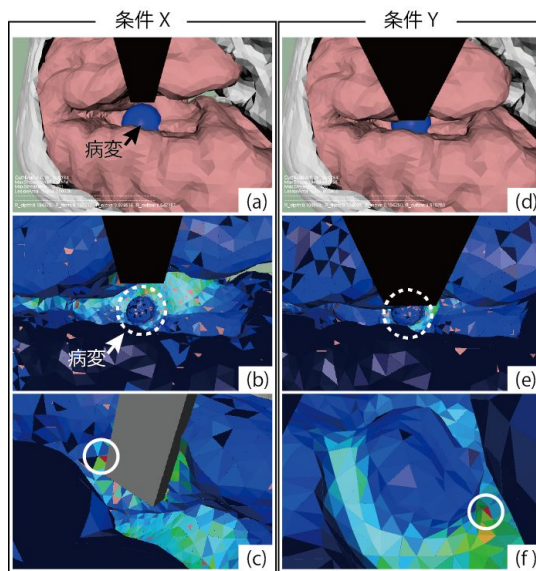


図4 最適化結果

を定量的に求めるために可視化画像を画像処理している。この画像処理を行いやすくするために、青く着色している。また、図3の左図において、白く線を引いている箇所を切開部と見立て、脳ペラを挿入し脳実質を圧排する。なお、現段階では切開部は予め切開済みであると仮定しており、くも膜の切開等の考慮は今後の課題である。本モデルを用いて、病変部のヤング率が異なる以下の2つの条件下で最適化を行った。この脳実質と病変の物性値は文献[7]に従い設定した。

表1 最適化条件

| 部位  | 物性値       | 条件 X              | 条件 Y              |
|-----|-----------|-------------------|-------------------|
| 脳実質 | ヤング率 (Pa) | $2.1 \times 10^3$ | $2.1 \times 10^3$ |
|     | ポアソン比 (-) | 0.45              | 0.45              |
| 病変  | ヤング率 (Pa) | $2.1 \times 10^3$ | $2.1 \times 10^4$ |
|     | ポアソン比 (-) | 0.45              | 0.45              |

また、文献[8]に従い、脳組織を破壊しないための拘束条件として、主応力が 3.5 (kPa) 以下となるように設定した。本条件下での、最適化の結果を図4に示す。図4(a)と(d)を比較すると病変部のヤング率の高い条件 Y に

おいては、脳ペラによる圧排量が比較的抑えられていることがわかる。図 4(b)および(e)に応力を可視化した状態の図を示す。これらの図において、最も応力が高くなった箇所付近の拡大図を図 4(c)および(f)に示す。図 4(c)においては術具付近の組織で応力が高くなっており、図 4(f)においては、病変部付近で応力が高くなっている。このように、病変部のヤング率の値が最適結果に影響を有意に及ぼしていることが示されている。従って、実際の手術においても、超音波画像や MRI 画像より組織の硬さを同定可能な Elastography 技術と組み合わせることで、患者の状況に応じて最適な圧排方法を算出できるようになる。

本研究期間内においては、病変部を露出するために 1 回で脳裂をかき分ける状況を考え、最適な術具の位置姿勢のみを求めるに留まったが、実際には複数回に渡りかき分けながら慎重に進んで行く。今後、複数回に渡るかき分け操作の最適化を行い、より実践的な手術経路計画を実現する。

#### 参考文献

- [1] N. Chalouhi, et al., Surgical Treatment of Ruptured Anterior Circulation Aneurysms: Comparison of Pterional and Supraorbital Keyhole Approaches, *Neurosurgery*, vol. 72, pp. 437-422, 2013.
- [2] T. Fujii, et al., Neuropath Planner - Automatic Path Searching for Neurosurgery, *International Congress Series*, vol. 1256, pp. 587-596, 2003.
- [3] 藤井哲也他, 脳神経外科手術支援のための手術パス自動決定における手術パスの類似性に関する解析, *電子情報通信学科*, vol. 57, pp. 7-12, 2003.
- [4] R. R. Shamir, et al., Reduced Risk Trajectory Planning in Image-Guided Keyhole Neurosurgery, *Medical Physics*, vol. 39, no. 5, pp. 2885-2895, 2012.
- [5] M. Rilck, et al., Path Planning for Robot-Guided Endoscopes in Deformable Environments, *Advances in Robotics Research*, Springer Berlin Heidelberg, pp. 263-274, 2009.
- [6] M. G. Yasagil, *Microneurosurgery in 4 Volumes IV B*, Thieme, 1995.
- [7] M. I. Miga, et al., "Modeling of Retraction and Resection for Interaoperative Updating of Images, *Neurosurgery*, vol. 49, no. 1, pp. 75-85, 2001.
- [8] J. Zhong, et al., Brain Retraction Injury, *Neurological Research*, vol. 25, pp. 831-838, 2003.

#### 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)

Akira Fukuhara, Teppei Tsujita, Kazuya Sase, Atsushi Konno, Xin Jiang, Satoko Abiko and Masaru Uchiyama, Proposition and Evaluation of a Collision Detection Method for Real Time Surgery Simulation of Opening a Brain Fissure, *ROBOMECH Journal*, Springer, vol. 1, 1:6, 26 September, 2014. (査読有り)

(学会発表)(計 9 件)

Akira Fukuhara, Teppei Tsujita, Sase Kazuya, Atsushi Konno, Xin Jiang, Satoko Abiko and Masaru Uchiyama, Optimization of Retraction in Neurosurgery to Avoid Damage Caused by Deformation of Brain Tissue, *Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, pp. 588-594, Bali (Indonesia), 7 December, 2014.

福原洸, 辻田哲平, 佐瀬一弥, 近野敦, 姜欣, 安孫子聡子, 内山勝, 術具による脳組織圧排に伴う損傷を回避する深部病変部への最適手術経路計画, 日本ロボット学会第 32 回記念学術講演会講演論文集, RSJ2014AC3H2-01, 九州産業大学 (福岡市・福岡県), 9 月 6 日, 2014.

佐瀬一弥, 福原洸, 辻田哲平, 近野敦, 実時間脳外科手術シミュレータのためのロバストな生体組織変形・剥離モデルと力覚インタラクション, 日本ロボット学会第 32 回記念学術講演会講演論文集, RSJ2014AC3H2-03, 九州産業大学 (福岡市・福岡県), 9 月 6 日, 2014.

永安伸大, 近野敦, 辻田哲平, 佐瀬一弥, 小水内俊介, 縫合シミュレーションのための糸のモデリングおよび生体組織との接触判定, 日本ロボット学会第 32 回記念学術講演会講演論文集, RSJ2014AC3H2-02, 九州産業大学 (福岡市・福岡県), 9 月 6 日, 2014.

永安伸大, 近野敦, 辻田哲平, 佐瀬一弥, 小水内俊介, 柔軟組織の実時間縫合シミュレーション, ロボティクス・メカトロニクス講演会'14 講演論文集, 資料番号 3P1-A04, 富山市総合体育館 (富山市・富山県), 5 月 28 日, 2014.

佐瀬一弥, 近野敦, 辻田哲平, 福原洸, 陳曉帥, 小水内俊介, GPGPU を活用した実時間脳腫瘍摘出シミュレーション, ロボティクス・メカトロニクス講演会'14 講演論文集, 資料番号 3A1-B04, 富山市総合体育館 (富山市・富山県), 5 月 28 日, 2014.

佐瀬一弥, 近野敦, 辻田哲平, 福原洸, 陳曉帥, 小水内俊介, 脳腫瘍摘出シミュ

レーションのための安定な柔軟物破壊モデル, ロボティクス・メカトロニクス講演会 '14 講演論文集, 資料番号 3A1-B03, 富山市総合体育館(富山市・富山県), 5月28日, 2014.

Atsushi Konno, Masano Nakayama, Xiaoshuai Chen, Akira Fukuhara, Kazuya Sase, Teppei Tsujita and Satoko Abiko, Development of a Brain Surgery Simulator, Proceedings of the International Symposium on Interdisciplinary Research and Education on Medical Device Developments (IREMD), I-6, 弘前大学創立50周年記念会館(弘前市・青森県), 13 September, 2013.

福原洸, 辻田哲平, 佐瀬一弥, 近野敦, 姜欣, 安孫子聡子, 内山勝, 脳裂開放シミュレーションのための接触判定法の提案, ロボティクス・メカトロニクス講演会 '13 講演論文集, 資料番号 2A1-L01, つくば国際会議場(つくば市・茨城県), 5月24日, 2013.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

辻田 哲平 (TSUJITA, Tepei)  
東北大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号: 40554473

### (2) 研究分担者

内山 勝 (UCHIYAMA, Masaru)  
東北大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 30125504

姜 欣 (JIANG, Xin)  
東北大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号: 30451537

安孫子 聡子 (ABIKO, Satoko)  
東北大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号: 40560660

### (3) 連携研究者

富永 悌二 (TOMINAGA, Teiji)  
東北大学・大学院医学系研究科・教授  
研究者番号: 00217548

中川 敦寛 (NAKAGAWA, Atsuhiro)  
東北大学・大学病院・助教  
研究者番号: 10447162