

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 27 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22591587

研究課題名（和文）多点接触力覚呈示脳モデルの基礎的研究

研究課題名（英文）Fundamental research about the multi-contact force display brain model

研究代表者

藤田 敦史 (FUJITA ATSUSHI)

神戸大学・大学院医学研究科・助教

研究者番号：60379360

研究成果の概要(和文):我々が開発したコンピュータシミュレーションによる脳変形モデルを、力覚呈示装置と組み合わせることで、手術操作時に反力を生成する手術シミュレーションシステムを確立した。実際の手術操作に近い反力生成のために、手術器具と脳実質の接触判定方として新しい多点接触法を開発した。この新しい反力生成プログラムを手術トレーニングシステムに実装することで、現実操作に近いシミュレーションが可能となった。

研究成果の概要(英文):The neurosurgical computer training system which generates reaction force at the time of brain retraction was established by combining with tactile sensation device. For the real surgical force generation, a multipoint contact force display model was newly developed. This new reaction force generating brain retraction model served virtual reality in the field of neurosurgery.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
平成 22 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
平成 23 年度	900,000	270,000	1,170,000
平成 24 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：医歯薬学

科研費の分科・細目：外科系臨床医学・脳神経外科学

キーワード：コンピュータ外科，脳変形モデル，バーチャルリアリティ，力覚フィードバック，手術シミュレーション，医療情報システム，医用・生体画像，仮想現実感

### 1. 研究開始当初の背景

生体脳の変形をコンピュータシミュレーションにて解析するための基礎研究としては、頭部外傷時の脳変形解析が主体であり、解剖学的微細構造を省略した簡易脳変形モデルでの解析しかなされていない。

脳神経外科顕微鏡手術に使用するナビゲーションシステムは術中の脳変形により誤差が生じることが判明しているが、複雑な解剖学的構造を含んだ脳のシミュレーションの困難さから、手術時のブレインシフト変形解析の研究は少数の報告のみで

ある。また、これまで行われてきた変形解析を手術トレーニングシステムに流用する際には、入力（手術操作に伴う変形量）に対する変形解析は可能であったが、加える操作で得られる脳実質からの反力を出力することは不可能であった。手術操作は術者の手から入力される（感じる）力学的な情報が大切であり、この情報のフィードバックなしでは、正確な手術操作も不可能であり、手術トレーニングシステムとしても実践的になり得ない。脳変形で生じる力学情報をこれまでの視覚的変形情報と組み合わせることが、実践的な脳神経外科手術トレーニングシステムとして必須であるとの認識で研究課題として着想した。

## 2. 研究の目的

本研究においては、実践的脳神経外科手術トレーニングシステムを開発するために、以下のことを検討して明らかにすることを考えた。

(1) これまでに開発した有限要素脳変形力学モデルの変形におけるアルゴリズムの再検討、計算の高速化を行うために以下改良を行う。

- ① 有限要素モデルまたはバネ・質点系を用いた集中質量系でのモデル化
- ② 線形モデルによる生体軟組織の変形解析による大変形解析での誤差増大
- ③ 節点間の距離計算に基づく接触判定による計算時間の低減困難

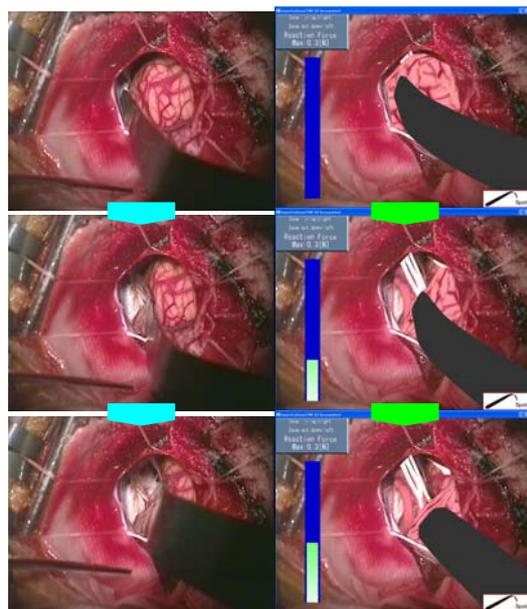
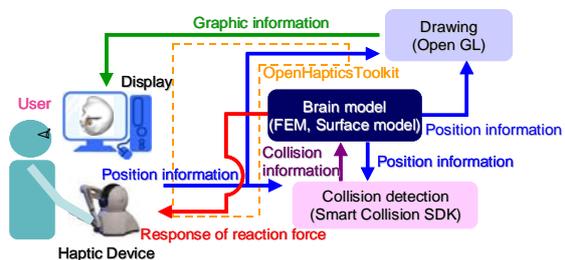
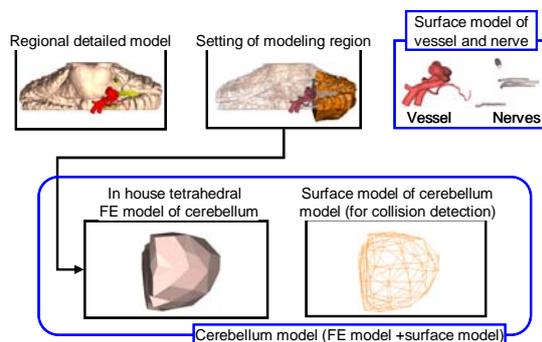
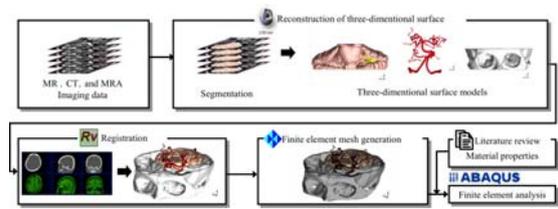
- (2) 反力発生アルゴリズムの検討、反力発生装置への出力
- (3) 反力発生装置における出力の質的評価
- (4) シミュレーション画面での脳画像変形アルゴリズム

## 3. 研究の方法

ナビゲーション手術におけるブレインシフトの補正を目的として開発した三次元脳変形モデル変形解析のための計算高速化アルゴリズムの改良を行う。われわれが開発した詳細な解剖学的構造物を組み込んだ脳三次元変形モデルで、手術中に発生するブ

レインシフトの解析を行ってきた。このモデルでは脳実質を等方性の材料、均一な超弾性体と仮定して変形解析を行ってきた。

下段に我々が開発してきた脳神経外科手術トレーニングシステム構成を示し、実臨床での手術操作（左列）と変形計算結果（右列）を対比した。



現実感のあるシミュレーションに応用するためには計算時間の高速化が最重要課題であり、早期に解決する。また、視覚情報が高精度化されている中で、力覚変形解析で生成する力覚情報に不備があり、有限要素モデルまたはバネ・質点系を用いた集中質量系でのモデル化及び、節点間の距離計算に基づく接触判定による計算時間の低減困難が問題となる。これらの問題点を解決するために、医用画像データから変形解析用のボクセルモデルを作成する。ボクセルモデルは任意の構成式が組み込み可能であり、われわれが構築した脳有限要素モデルで用いた応力緩和特性を考慮した超弾性体の構成式を組み込む。また、圧排部位近傍のみ詳細にボクセル分割し、変形の進行に伴って再分割することで変形解析の精度を保持しながら計算時間の短縮を図る。また、接触解析では、工作機械の形状加工の研究で提案されているボクセルモデルを用いた干渉判定を利用した計算の高速化を目指す。力覚発生装置はコマースライズされた装置を流用する。術者が入力する操作を力覚発生装置から入力し、反力をリアルタイムに算出するためのアルゴリズムを検討する。

次年度に反力発生装置における出力の質的評価を行う。反力発生装置への出力を質的に評価する、評価にはエキスパートの術者による質的、主観的評価を行う。特に、当該年度は力覚発生装置を両手による操作が可能ないように二機に増設、改良することで、両手で行う実際の手術との比較検討を行う。また、反力発生装置への出力を術者の視覚情報に変換する際には、三次元脳モデルを介した情報ではなく、手術画像に投影したものとするために、画像変形アルゴリズムを検討する。

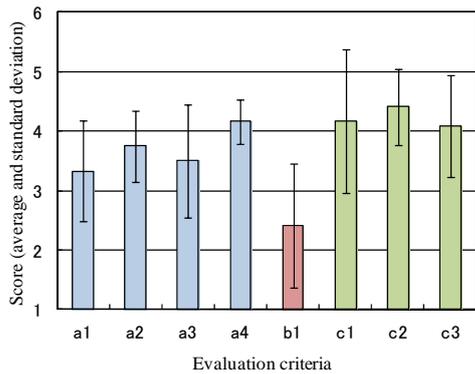
最終年度には、力覚発生装置を二系統とし、両手での操作を模倣したシミュレーションを可能とするために、計算負荷を軽減するためのチューニングを行う。

#### 4. 研究成果

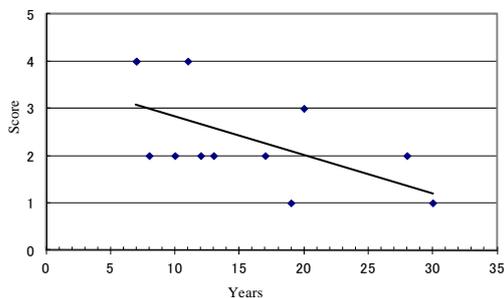
平成 22 年度は、脳変形解析モデルの計算時間短縮化のために我々が提案してきた手法である 1) 術野から離れた変形の少な

い領域を力覚境界に置換する、2) 応力緩和を考慮した超弾性体モデルに変わり、線形弾性体でモデル化するという二つの要素を組み合わせ、処理高速化に改良を加えた。変形解析に要する時間は、初期モデルと比較して約 70%の時間短縮となり、また計算機の処理能力向上に伴い、約 96%の時間短縮が得られた。しかし、現段階で変形解析に要する計算時間は約 13 時間が必要であり、リアルタイムの変形計算の実現という点からは課題が残った。変形解析の高速化と平行して、手術の「手応え」である力覚呈示装置からの入力に対する反力発生アルゴリズムの設計、開発を行った。手術器具との接触判定に用いる脳モデルは、変形モデルとは別の脳表面モデルを用い、このモデルと手術器具モデルとの接触判定を行った。得られた干渉深度ベクトルをモデルに入力する強制変位ベクトルとし、脳組織の変形量を有限要素法で計算、脳有限要素モデルの節点での節点力と変位量を算出した。算出した節点力を手術器具モデルに生じる反力として変換出力されるシステムを構築した。

平成 24 年度には反力発生装置における出力の質的評価を行った。12 名の脳神経外科専門医(臨床経験年数の平均 15.2 年)を対象に、トレーニングシステムで脳べらによる左小脳半球の圧排操作の評価を行った。評価項目は、視覚評価 4 項目、力覚評価 1 項目、機能評価 3 項目の計 8 項目で、各項目について 5 段階評価とした。その結果、力覚評価の平均値が最も低く、続いて視覚評価で小脳と脳神経系が低評価となった。標準偏差については、機能評価での器具の切り替えと術野の拡大・縮小に続いて、力覚評価で大きい値となった。力覚評価ではスコア 1(本物に近くない)が 2 名、スコア 2(どちらかという本物に近くない)が 6 名となり、12 名の評価者の内 8 名が力覚評価において「低い」評価を行った。



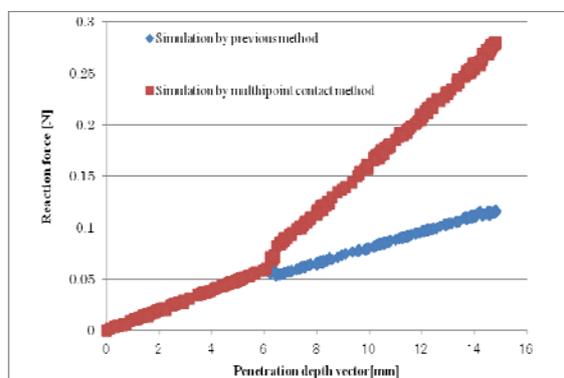
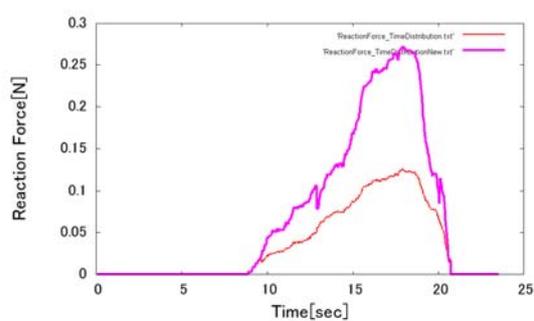
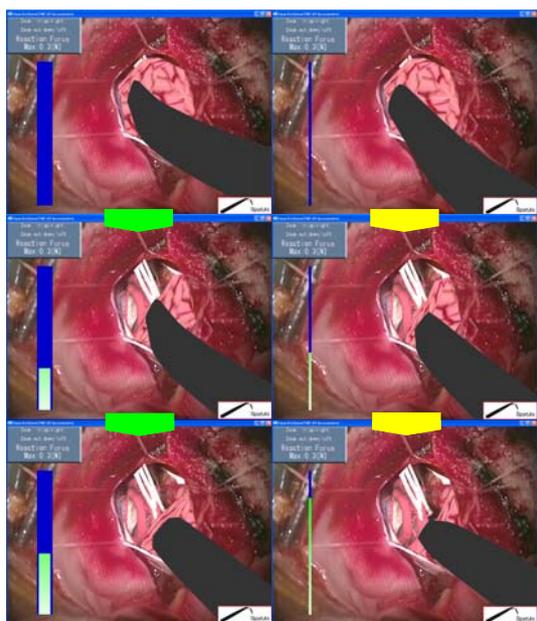
力覚評価において低い評価を行った評価者のコメントでは、「圧排時の感覚がやや軽すぎる」や「圧排時の抵抗はあまり感じなかった」などの指摘があった。一方、評価者の臨床経験年数と力覚評価のスコアをプロットした検討から、経験年数が増加するに従ってスコアが低下する傾向が認められた。このことから、経験年数が高い熟練した専門医ほど、実際の手術時の圧排の手応えと力覚提示装置で生成する手応えの差を敏感に識別している可能性が示唆された。



本シミュレーション装置の根幹となる脳の手応えに関して、これまで実験データに頼っていた材料常数であるが、実用化に向けて実地医の感とは乖離があることが判明した。

実際の手術時の圧排の手応えと力覚提示装置で生成する手応えの差に乖離があることが判明し、平成23年度には反力発生装置における出力の質的改善を行った。これまで使用したモデルでの有限要素解析時には、手術器具と脳モデルの干渉状態にある接触点に最近傍3節点にのみ、変形解析がなされていた。しかし、実際の接触では3点のみでは不十分であり、接触状態により接触している節点数を変化させ、最適な強制変

位を与えるプログラムへの改良が必要であると考えられた。このため、最終年度には多点接触による反力生成がなされるプログラムの改良を行った。新しく組み込んだ多点接触による反力生成モデルでは、脳べらの圧排に伴い接触状態にあると判断された節点に対して節点の位置情報、および判別ベクトルと判別四角形の交点位置情報により変位ベクトル(押し込み量)を算出し、強制変位として有限要素法による変形量の解析時に与えるプログラミングとした。脳べらと脳が接触しているにも関わらず、脳表の接点を判別四角形が貫通していると判断されない場合を勘案して、多点接触が行えていない場合には最近傍接点に生じる反力平均値を出力することとした。スタイラスへの出力は最近傍三節点に生じる反力の平均値と、最近傍接点以外で脳べらと接触状態にあると判定された接点で生じた反力を合わせて出力することで質的評価の改良が得られた。下図に改良前のトレーニングシステム(左列)と多点接触反力生成プログラムを実装したトレーニングシステム(右列)での小脳圧排時の様子を時系列で対比した計算結果を示す。また、スタイラスに出力した反力の時刻歴をさらに下段に示す。赤線が改良前の反力生成方法での反力時刻歴を表し、桃線は多点接触による反力生成方法での反力の時刻歴を示しているが、圧排操作に伴い反力が増大している状況が明確に示された。更に下段には、干渉深度ベクトルの長さとの関係を示している。多点接触による反力生成方法では、干渉深度ベクトルの長さ按比例して反力も大きくなっていることが示された。



## 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)

〔雑誌論文〕(計2件)

- ① 安達和彦, 東 洋平, 藤田敦史, 甲村英二, 有限要素法を用いた脳神経外科シミュレーションのための材料特性に関する研究, 日本コンピュータ外科会誌, 査読有, 12巻, 2010年, 23-32ページ
- ② 長谷川 悠, 安達和彦, 東 洋平, 藤田敦史, 甲村英二, 神吉 博, 脳神経外科手術トレーニングシステム開発のための小脳圧排シミュレーションの研究, 日本コンピュータ外科会誌, 査読有, 12

巻, 2010年, 533-543ページ

〔学会発表〕(計10件)

- ① 安達和彦, 正路圭太郎, 藤田敦史, 甲村英二, 力覚提示装置を用いた脳神経外科手術トレーニングシステムの再現術野改良に関する研究, 日本機械学会 関西支部第87期定時総会講演会, 2012.3.16, 大阪
- ② 安達和彦, 正路圭太郎, 藤田敦史, 甲村英二, 力覚提示装置を用いた脳外科手術トレーニングシステムの開発と評価, 日本機械学会第24回バイオエンジニアリング講演会, 2012.1.7, 大阪
- ③ 今井 良輔, 安達和彦, 林 雅人, 伊関洋, 村垣 善浩, 鈴木 孝司, 小西 良幸, 安達和彦, 有限要素解析に基づく腫瘍摘出後の脳変形シミュレーションの誤差定量評価, 第21回日本コンピュータ外科学会, 2012年11月4日, 徳島
- ④ 正路圭太郎, 安達和彦, 小林央祐, 藤田敦史, 甲村英二, 脳神経外科手術トレーニングシステムのための局所詳細モデルの開発, 日本コンピュータ外科学会, 2011年11月3日, 福岡
- ⑤ 安達和彦, 小林央祐, 正路圭太郎, 藤田敦史, 甲村英二, 線形弾性体モデルを用いた脳自重変形解析時間の短縮, 日本コンピュータ外科学会, 2011年11月2日, 福岡
- ⑥ 小林央祐, 安達和彦, 正路圭太郎, 藤田敦史, 甲村英二, 力覚提示装置を用いた脳神経外科手術トレーニングシステムの開発, 日本コンピュータ外科学会, 2011年11月2日, 福岡
- ⑦ 藤田敦史, 安達和彦, 正路圭太郎, 甲村英二, 有限要素脳変形モデルと力覚提示装置を用いた脳神経外科手術シミュレーションシステムの構築, 第70回日本脳神経外科学会総会, 2011.10.14, 横浜
- ⑧ Adachi K, Shoji K, Kobayashi K, Fujita A, Kohmura E, Development of a neurosurgical training system using haptic device, CARS 2011, 2011.6.23, Berlin, Germany
- ⑨ Adachi K, Shoji K, Kobayashi K, Fujita A, Kohmura E, Development of regional detailed model considering vessels and cranial nerves for neurosurgical training system, CARS 2011, 2011.6.23, Berlin, Germany
- ⑩ Adachi K, Azuma Y, Fujita A, Kohmura E, Effect of brain soft-tissue material properties on computation for neurosurgical simulation based on finite element analysis, CARS 2010, 2010.6.23, Geneva, Switzerland

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤田 敦史 (FUJITA ATSUSHI)  
神戸大学・大学院医学研究科・助教  
研究者番号：60379360

(2) 研究分担者

安達 和彦 (ADACHI KAZUHIKO)  
神戸大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号：30243322