

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 11 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H01707

研究課題名(和文) 実時間動力学シミュレーションによる脳外科手術支援システム

研究課題名(英文) Neurosurgery Supporting System based on Real-Time Dynamics Simulation

研究代表者

近野 敦 (Konno, Atsushi)

北海道大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：90250688

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,700,000円

研究成果の概要(和文)：脳神経外科手術では、手術部位の3次元位置を計測し手術前に撮影した患者のCT画像やMRI画像を重ねることで病変部の位置を手術者に視覚提示するニューロナビゲータが広く用いられている。しかし手術中の脳脊髄液漏出や腫瘍除去によって引き起こされるブレインシフトと呼ばれる脳変位により、ナビゲーションが不正確になるという問題があった。本研究では、実時間動力学手術シミュレーションにより、ブレインシフトや応力分布を実時間で手術者に提示できるシステムを開発した。また、CTやMRIなどの医用画像から、実時間動力学手術シミュレーションで用いる患者の脳の有限要素モデルを半自動で生成する手法を開発した。

研究成果の概要(英文)：Neuronavigation has been widely used in neurosurgery, which localizes the 3D position of the affected area and displays the position on the preoperative medical image such as CT or MRI images. However, the displayed position becomes unreliable when brain is deformed by the loss of cerebral spinal fluid (CSF) or removable of the affected area. Such deformation is referred to as brain shift. In this work, a supporting system for neurosurgery was developed, which visualizes the estimated brain shift and stress distribution in the brain based on the real-time dynamics simulation. Furthermore, a semi-automated method to generate the finite element model of the brain of the patient from the preoperative medical images was developed.

研究分野：ロボット工学

キーワード：手術支援システム 手術シミュレーション ブレインシフト

1. 研究開始当初の背景

脳外科手術では、手術部位の3次元位置を計測し、手術前に撮影した患者のCT画像やMRI画像を重畳することで病変部の3次元位置を手術者に視覚提示するニューロナビゲータ(引用文献①)が広く用いられている。ニューロナビゲータは、手術前に撮像した医用画像を用いて、手術中に患部の3次元位置を確認するための装置である。しかしニューロナビゲータは術前に撮影した画像を用いるため、手術中の脳脊髄液漏出や腫瘍除去によって引き起こされるブレインシフトと呼ばれる脳変位により、ナビゲーションが不正確になるという問題があった(図1)。

そのため近年では術中MRIにより病変部の位置を確認しながら手術を行うことが盛んになりつつある。しかし全国で術中MRIが可能な施設は限られており、ほとんどの病院では術中MRIを利用できる環境にはない。そのような場合は、動力学シミュレーションによる脳変位推定が有効な手段となる。

脳外科手術シミュレータの開発例として、カナダ国家研究評議会(NRCC)のNeuroTouch(引用文献②)、ImmersiveTouch社のImmersiveTouch(引用文献③)がある。しかしNeuroTouchは実時間計算のために手術部位の局所的モデルを用いているため、脳全体の変位を扱えない。ImmersiveTouchは、動力学を用いて脳変形計算を行っていない。ABAQUSやLS-DYNAなどの市販の非線形有限要素解析ソフトを用いてブレインシフトを計算する研究は数多くあるが、計算に多大な時間を要するため、術中に用いることは難しい。

2. 研究の目的

以上の背景から、本研究では、これまでに培ってきた実時間手術シミュレーション技術(引用文献④)を応用し、術中にブレインシフトや応力分布を実時間で術者に提示できる脳外科手術支援システムを開発することを目的とする。動力学シミュレーションにより術中MRIが使用できない環境でもブレインシフトを推定し術者に提示できる。また、脳裂圧排などによる過大な応力発生などを術者に提示するシステムはこれまでになく、術者は指先の感覚に頼ってきた。本研究で提案するシステムでは、応力分布などによる損傷危険性評価を定量的に術者に提示することにより、脳外科手術の安全性を高めるものと大いに期待される。

3. 研究の方法

本研究では、全脳モデルを用いたブレインシフト推定手法を確立し検証する。また、患者の映像へのCGモデル重畳表示を行うことで実時間ブレインシフトの可視化するシス

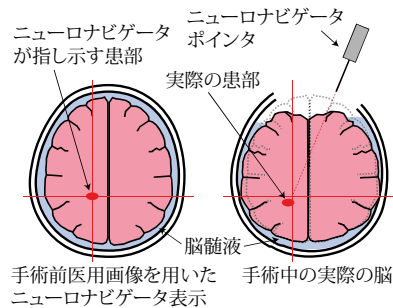


図1 ブレインシフト

図: FEM ⊗: 流体粒子 ○: 節点粒子

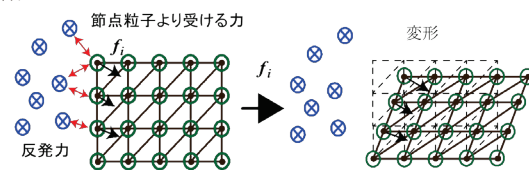


図2 MPS-FEM 連成解析

テムを構築する。具体的には、以下の(1)~(4)の四つの課題に分け、研究を実施した。

- (1) 全脳モデルを用いたブレインシフト実時間推定技術の確立
- (2) 患者の映像へのCGモデル重畳表示技術の確立
- (3) 脳組織損傷モデルの構築
- (4) 情報提示インタフェースの構築

4. 研究成果

- (1) 全脳モデルを用いたブレインシフト実時間推定技術の確立

ブレインシフト推定には、(a) 粒子法を用いた流体-構造物連成解析、(b) 静水圧モデルによる解析、の二つの手法を試みた。

- ① 粒子法を用いた流体-構造物連成解析によるブレインシフト推定

ブレインシフトは様々な要因により発生するが、主な要因は、手術前の器具と手術中の患者の位置変化、手術器具(例えば、脳ペラ、マイクロ剪刀)、脳髄液流出による浮力の減少などである。脳髄液と脳変形を解析するために、脳髄液を粒子法の一つであるMPS(Moving Particle Semi-implicit)法(引用文献⑤)で、脳をFEM(有限要素法)でモデル化し、流体-構造物連成解析を行うことで、脳と脳髄液の相互作用による術中のブレインシフトを推定する手法を確立した。

図2のように有限要素モデルの各節点に節点粒子を配置し、MPS法の計算により算出された節点粒子の加速度より節点に印加される力(節点荷重)を算出し、その力を有限要素モデルへ与えられる外力とすることでMPS法とFEMの連成解析を行う。

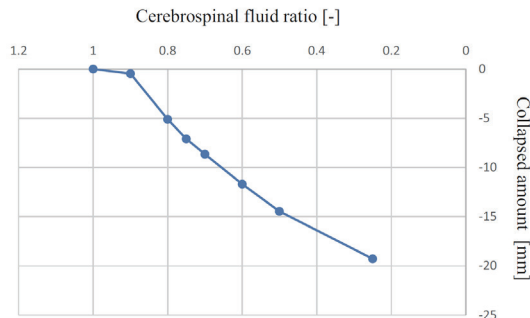


図3 脳髄液流出に対する、脳の有限要素モデルの最上端位置の変位

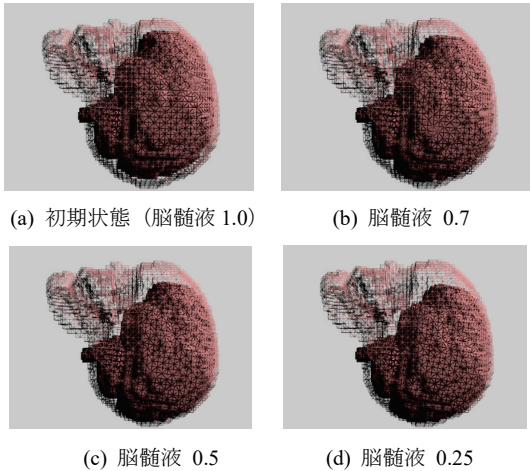
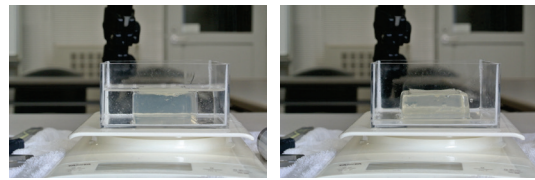


図4 MPS-FEM 連成解析によるブレインシフト推定シミュレーション

MPS-FEM 連成解析を用いて、脳髄液流出によるブレインシフト推定のシミュレーションを行った。脳髄液が満たされている初期状態から徐々に脳髄液の量を減らし、浮力喪失によるブレインシフト推定を行った。脳髄液流出に対する、脳の有限要素モデルの最上端位置の変位を図3に示す。図3の横軸は初期状態の脳髄液量を1.0としたときの、脳髄液残量の割合を示す。このときのブレインシフトの様子を図4に示す。脳髄液残量が初期状態に対して0.25となったとき、約19.3 mm変位する結果となった。引用文献⑥で報告されている臨床データによれば、ブレインシフト量は仰向け状態で開頭時におけるブレインシフト量は平均で5.3 mm、最小3.3 mm、最大7.5 mmである。引用文献⑥では脳髄液流出量を測定していないが、図3と比較すると、約20~30 [%]の脳髄液が流出していたと推定される。

② 静水圧モデルによるブレインシフト推定 (学会発表⑤)

(1-1)のMPS-FEM連成解析では、MPS法計算で計算不安定性を回避するためにサンプリングタイムを小さく設定する必要があり、実時間でのブレインシフト推定が困難であった。そこで、有限要素解析と静水力学に基づくブレインシフト推定手法を構築した。



(a) シリコンオイル 175 g (b) シリコンオイル 10 g
図5 ゼラチンを用いたモデル検証実験

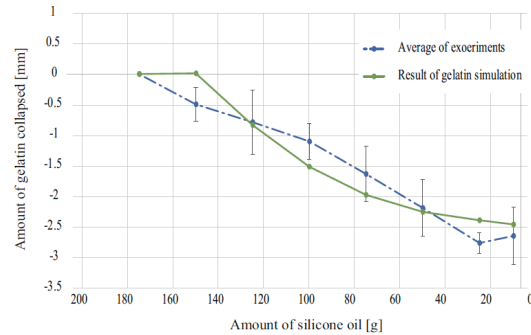


図6 MPS-FEM 連成解析手法によるシミュレーションと実験との比較

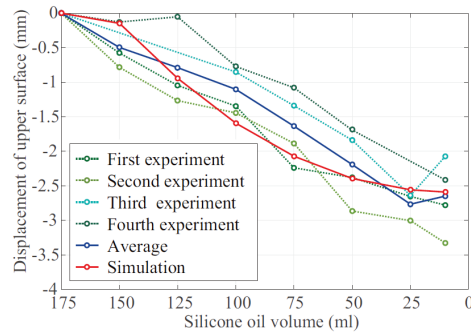


図7 静水圧モデルによるシミュレーションと実験との比較

③ 構築したシステムの検証と評価

(1-1), (1-2)で開発したブレインシフト推定手法を、ゼラチンを用いた実験で検証する。ゼラチンブロックの周りをシリコンオイルで浸し、シリコンオイルを徐々に除去し、そのときの重力によるゼラチンの変形を計測し、MPS-FEM連成解析、および静水圧モデルによるゼラチンの変形推定と比較し、モデルの妥当性を検証する。使用したゼラチンの物性値、ヤング率およびポアソン比は小型卓上押し込み試験機を用いて測定した。

図5は実験の様子である。実験ではゼラチンの入った容器にシリコンオイルを175 ml入れ、25 mlずつオイルを抜いていったときのゼラチン表面の高さを測定した。ゼラチン表面の高さ測定にはRGB-Dカメラを使用し、得られた点群データの平均値から求めた。

MPS-FEM連成解析、および静水圧モデルによるゼラチン変形推定結果を検証実験と比較する。MPS-FEM連成解析手法の結果を図6に示す。図6より実験平均との誤差はシリコンオイル量が10 mlの時点で約0.19 mm、また実験平均との最大誤差は150 mlの時点で約0.51 mmとなった。静水圧モデルによる



図 8 AR を用いた人間への脳の重畳表示

シミュレーション結果と実験結果の比較を図 7 に示す. 脳シフトモデルの精度を数値的に評価するために, 実験データと静水圧モデルによるシミュレーション結果の間の誤差を計算した. シミュレーション結果はシリコンオイル量が 100 ml のときの結果を除けば, 実験データのばらつきの範囲内にある. 100 ml でのシミュレーション結果は実験データよりもわずかに低いが, 実験平均による誤差は 0.49 mm である. ゼラチンブロックの高さは 25 mm であるので, 平均誤差 0.49 mm は元の高さの 2% であり, 十分に小さいと言える.

(2) 患者の映像への CG モデル重畳表示技術の確立

AR (Augmented Reality: 拡張現実) を用いて患者の頭部を捉えたカメラ映像に脳の変形モデルを重畳することで, 実時間でブレインシフトを可視化するシステムを構築した.

本研究では, 人間を立体マーカーとして登録した. 重畳表示を始める前に立体マーカー (人) と脳モデル表示位置の調整を行う. 重畳表示中は, 立体マーカーとして登録した人をカメラが捉えると, 立体マーカー (人) の姿勢や向きに合わせてローカル座標系が形成される. ローカル座標系は人やカメラの動きに合わせて実時間で修正される. 立体マーカーを認識すると決められた座標位置に脳の 3D モデルを表示し, 重畳された映像をユーザに提示する (図 8).

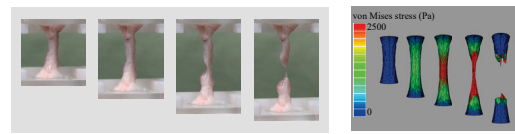
(3) 脳組織損傷モデルの構築 (学会発表②, 雑誌論文③)

手術シミュレーションでは, 切開や患部の切除, 生体組織の破断などを模擬する必要がある. 生体組織の中でも皮膚, 肝臓, 筋肉は破断が一気に進行する脆性破壊を起こすことが報告されている. しかしブタの脳試料は破断が徐々に進行する延性破壊を起こすことが実験で確認された. 従来のモデルでは, 延性破壊を精度良く模擬できなかった.

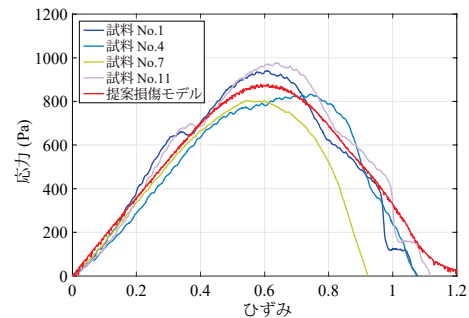
そこで本研究ではマイクロボイド (微小空乏) による損傷モデルを提案し, ブタの脳試料を用いた引っ張り試験結果を精度良く再現できる損傷モデルを提案した (図 9).

(4) 情報提示インタフェースの構築

脳外科手術における手術操作は, 応力発生により脳組織に損傷を与える可能性がある



(a) 引張試験実験結果 (b) シミュレーション結果



(c) ひずみ-応力特性での比較 (引張速度 1.0 mm/s)

図 9 引張試験実験結果とシミュレーション結果の比較

が, そのような操作時の力加減は術者の経験に頼られていた. 客観的な指標に基づく手術操作を実現するために, 実時間動力学シミュレーションによって得られる脳組織内部の応力分布を術者への提示することが有効と考えられる. しかしながら, 医用画像に基づく患者固有モデル作成には多大な手作業を要し, 実用化の妨げとなっていた. 深い溝構造などの複雑形状を持つ脳全体を対象に実時間動力学シミュレーションを行うためには既存技術の結合だけでは困難であり, 従来の考え方にとらわれない実現方法の検討が求められていた.

そこで, 脳外科手術操作時の脳組織変形・応力分布を推定し術者に提示することを実現する, 医用画像に基づく患者固有モデル (有限要素メッシュ) の自動生成手法の開発と, 得られた患者固有モデルを利用した実時間動力学シミュレーション手法および内部応力分布の提示手法の開発した.

① 患者固有モデル自動生成手法 (学会発表①, 雑誌論文④)

図 10 に開発した有限要素モデル生成アルゴリズムの流れを示す. まず, 対象領域全体を含む正方格子を作成する. 次に, 各セルの内部に着目し, 複数の分離領域が含まれていれば, それぞれに対して同じ場所に同じ大きさのセル (重複セル) を生成する. そして, 生成されたセルをもとの領域の結合関係を維持するように結合する. これによって, 形状の局所領域の結合関係 (トポロジ) が有限要素モデルにおいても保存される. その結果, 狭い空隙で区切られた溝構造の保存を実現することができた.

医用画像に適用する場合は, メッシュ生成の前に, 脳部位ごとの領域抽出 (セグメンテーション) を行い, どの画素がどの部位であるかをラベルで表したラベルマップを取得

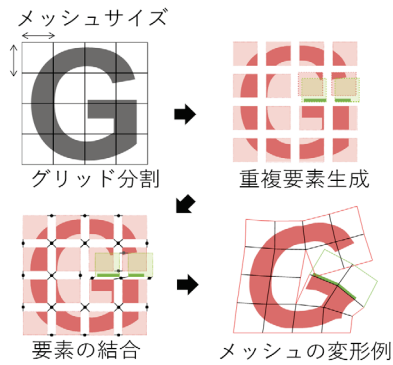


図 10 メッシュ生成の流れ

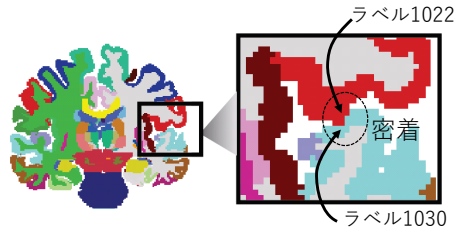


図 11 ラベルマップの例

する。この処理には多くの先行研究があり、既存のソフトウェアを用いることができる。ラベルマップの例を図 11 に示す。ラベルマップでは部位の領域同士が画素レベルで密着している場合がある(図 11 中のラベル 1022 と 1030)。脳裂と呼ばれる溝を脳へらで広げる脳裂圧排操作のシミュレーションでは、有限要素解析における溝の分離は必須である。そこで、分離すべき部位同士のラベルの組みを「分離ラベルペア」と定義し、メッシュ生成の入力に分離ラベルペアを与えることで自動的に指定部位が分離されたメッシュが生成されるアルゴリズムを開発した。

この手法によってシルビウス裂が分離したメッシュを様々な解像度で生成することに成功した。本手法は並列化による高速化が容易であり、頂点数 2×10^5 規模のメッシュ生成を約 6 秒で生成可能であった(引用文献⑦の従来手法では約 22 秒)。

以上によって溝構造保存の実現が確認されたが、正方格子によって得られる有限要素メッシュは表面が階段状になっており、CG による描画にそのメッシュを用いると視覚的品質が低い。そこで詳細な 3D モデルを有限要素メッシュに対応付け、メッシュの変形に応じて 3D モデルを変形させる実装を行った。この手法は CG の学術分野で「埋め込み」と呼ばれる。埋め込まれた 3D モデルは後述の接触判定にも利用される。また、三次元ボクセルデータである医用画像も埋め込みによって変形することができる。

② 実時間動力学シミュレーション手法(学会発表③, 雑誌論文①, ④)

動力学シミュレーションでは、後退オイラー法を用いた陰的時間積分により定式化し、

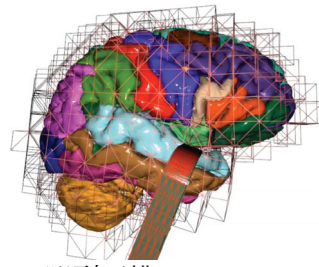


図 12 脳裂圧排シミュレーション

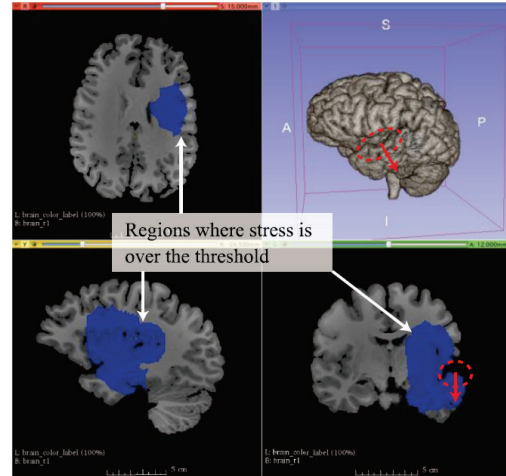


図 13 脳裂圧排時の応力分布

数値的安定性を向上させた。

接触応答についてはペナルティ法を用いて実装した。ペナルティ法では接触部における干渉を解消するバネ要素を設置する処理が行われるが、本研究ではこのバネ要素を、有限要素メッシュの全節点と術具の剛体運動の自由度を含めた全体の系に含め、後退オイラー法で定式化することで接触時の安定性を向上させた。

実現した脳裂圧排シミュレーションの例を図 12 に示す。この例は側頭葉を圧排してシルビウス裂の深部の術野を確保している例である。生成された非適合正六面体メッシュは各六面体を四面体分割して用いられた。メッシュの節点数は 3,343、四面体要素数は 9,180 であった。実装はマルチコア CPU により並列化され、1 ステップの動力学計算部の計算時間は平均 10.4 ms であった。GPGPU による並列化は期間内には未完成となったが、さらなる高速化の余地があり、それによってより大規模なメッシュの実時間シミュレーションの実現が期待される。

③ 応力分布の表示(雑誌論文③)

応力分布の表示については、有限要素メッシュに医用画像を埋め込んで変形させ、有限要素解析で得られた最大主応力などの分布を医用画像に重畳することで実現した。図 13 は側頭葉圧排時において、最大主応力が、ある閾値を超えた領域を色付けして表示した例である。これによって、過度な応力の発生を術者に提示するための基本的機能が実現された。

<引用文献>

- ① Y. Kosugi, et al., "An Articulated Neurosurgical Navigation System Using MRI and CT Images," IEEE Trans. on Biomedical Engineering, 35(2): 147-152, 1988.
- ② S. Delorme, et al., "NeuroTouch: A Physics-Based Virtual Simulator for Cranial Microneurosurgery Training," Neurosurgery, 71(ons32-42), 2012.
- ③ P. Pat Banerjee, et al., "Accuracy of ventriculostomy catheter placement using a head- and hand-tracked high-resolution virtual reality simulator with haptic feedback," J. of Neurosurgery, 107, pp. 515-521, 2007.
- ④ A. Konno et al., "Development of a Brain Surgery Simulator," Proc. of Int. Symp. on Interdisciplinary Research and Education on Medical Device Developments, pp. 29-32, 2013.
- ⑤ S. Koshizuka et al., "Moving-Particle Semi-implicit Method for Fragmentation of Incompressible Fluid," Nuclear Science and Engineering, 123(3): 421-434, 1996.
- ⑥ I. Michael et al., "Model-Updated Image Guidance: Initial Clinical Experiences with Gravity-Induced Brain Deformation," IEEE Trans. on Medical Imaging, 18(10):866-874, 1999.
- ⑦ D. Boltcheva, et al., "Mesh generation from 3D multi-material images," Proc. MICCAI 2009, Part II. LNCS, 5762:283-290, 2009.

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 5 件)

- ① Kazuya Sase, Akira Fukuhara, Tepei Tsujita and Atsushi Konno, GPU-accelerated surgery simulation for opening a brain fissure, ROBOMECH J., 2(17), 2015.
- ② A. Fukuhara, T. Tsujita, K. Sase, A. Konno, A. Nakagawa, T. Endo, T. Tominaga, X. Jiang, S. Abiko and M. Uchiyama, Securing an Optimum Operating Field without Undesired Tissue Damage in Neurosurgery, Advanced Robotics, 30(9):1245-1259, 2016
- ③ Xiaoshuai Chen, Kazuya Sase, Atsushi Konno, Tepei Tsujita and Shunsuke Komizunai, A simple damage and fracture model of brain parenchyma for haptic brain surgery simulations, J. of Biomechanical Science and Engineering, 11(4):16-00323, 2016.
- ④ Kazuya Sase, Tepei Tsujita, Atsushi Konno, "Haptic Interaction with Segmented Medical Image Embedded in Finite Element Mesh," J. of Japan Society of Computer Aided Surgery, 19(2):pp. 89-99, 2017.
- ⑤ Xiaoshuai Chen, Kazuya Sase, Akito Ema, Atsushi Konno, Tepei Tsujita, Parameter Identification for a Model of Stress Relaxation at Brain Retraction from Experimentations using Porcine Brain, J. of Japan Society of Computer Aided Surgery, 20(1):22-32, 2018.

[学会発表] (計 5 件)

- ① Kazuya Sase, Tepei Tsujita, Atsushi Konno, "Embedding Segmented Volume in Finite Element Mesh with Topology Preservation," Proc. of the 19th Int. Conf. on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention, 116-123, 2016,
- ② Xiaoshuai Chen, Kazuya Sase, Atsushi Konno,

and Tepei Tsujita, Experimental and Numerical Analysis of Damage Fracture Mechanics of Brain Parenchyma, Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics, pp. 485-490, 2016

- ③ Kazuya Sase, Tepei Tsujita, Atsushi Konno, "Haptic Rendering of Contact Between Rigid and Deformable Objects based on Penalty Method with Implicit Time Integration," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics, pp. 1594-1600, 2016.
- ④ Xiaoshuai Chen, Kazuya Sase, Atsushi Konno, Tepei Tsujita, A Viscoelastic Model of Brain Parenchyma for Haptic Brain Surgery Simulations, Proc. of IEEE/SICE Int. Symp. on System Integration, pp. 490-495, 2016.
- ⑤ Xiaoshuai Chen, Akito Ema, Kazuya Sase, Tepei Tsujita, and Atsushi Konno, A Simple Brain Shift Estimation for Neuronavigation Based on Finite Element Method and Hydrostatics, Proc. of IEEE/SICE Int. Symp. on System Integration, WeE4.3, 2017.

[図書] (計 2 件)

- ① 近野敦, 佐瀬一弥, 陳曉帥, 脳神経外科手術シミュレータ, 精密工学会誌, 83(6): 504-508, 2017 (解説記事)
- ② 近野敦, 陳曉帥, 佐瀬一弥, VR・ARを応用した脳神経外科手術シミュレータ, 最先端医療機器の病院への普及展望と今後の製品開発, 4章第6節: 213-223, 技術情報協会, 2018

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ

<http://scc.ist.hokudai.ac.jp/research/brainsurgery/brainsurgery-j.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

近野敦 (KONNO, Atsushi)
北海道大学・大学院情報科学研究科・教授
研究者番号: 90250688

(2) 研究分担者

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, Atsuhiko)
東北大学・大学病院・特任准教授
研究者番号: 10447162

辻田 哲平 (TSUJITA, Tepei)
防衛大学校・システム工学群・准教授
研究者番号: 40554473

小水内 俊介 (KOMIZUNAI, Shunsuke)
北海道大学・大学院情報科学研究科・助教
研究者番号: 40708004

※2017年度追加

陳 曉帥 (CHEN, Xiaoshuai)
弘前大学・大学院理工学研究科・助教
研究者番号: 40812277