

補助事業番号 2018M-156

補助事業名 2018年度 粒子法—有限要素法連成解析手法の開発 補助事業

補助事業者名 北海道大学 大学院情報科学研究科 システム情報科学専攻 近野敦

1 研究の概要

脳神経外科手術のニューロナビゲーションにおけるブレインシフト(図1)による誤差を解消するため、脳と脳髄液の動力学を考慮した動力学解析に基づくブレインシフト補償手法の開発を目指している。本研究課題では、脳髄液を流体、脳を弾性体にモデル化し、それらの相互作用を解析可能な粒子法—有限要素法連成解析手法の開発を目的とした。粒子法にMPSを用い、流体—構造の境界面での相互作用を弱連成により定式化した。さらにGPUを用いた高速化を行い、医療現場での利用を想定した実用的な計算時間の実現を目指した。開発した解析手法により、流体中に浮かぶ弾性体の挙動の動力学計算が可能となった。計算精度の検証のため、シリコンオイルとゼラチン(50×50×25 mm)を用いた基礎実験を行い、開発手法の解析結果との比較を行った。その結果、ゼラチン上面の変位の最大誤差が0.5 mm程度となった。さらに、頭蓋と脳のモデルを作成し、ブレインシフトシミュレーションを行った。その結果を過去に報告されている事例と比較し、脳変位量の大きさが概ね妥当であることを確認した。

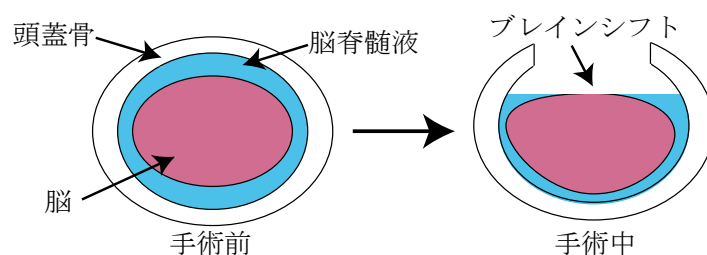


図1 ブレインシフト

2 研究の目的と背景

脳神経外科手術では、手術中の脳脊髄液流出や病変部摘出により、手術の進行につれ、手術前に撮影した医用画像と実際の脳の位置がずれてくるブレインシフトと呼ばれる脳変位によって病変部を見失うことが問題となっていた。そのため、本研究者らはモデルによりブレインシフトを予測し、手術者に提示する手術支援システムを開発中である。そのためには脳脊髄液により脳が受ける浮力の影響を精度良く解く必要がある。

本研究は、流体中の弾性体の挙動解析を行うため、粒子法で流体の挙動を模擬し、有限要素法で弾性体の挙動を模擬、境界面での相互作用は弱連成を仮定した流体—構造連成解析法を開発することを目的とした。

3 研究内容

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

(1) 流体—構造体連成解析法の開発

脳脊髄液に浸された大脳のように流体中の構造物が複雑な形状の場合は界面が自由に変化し、このような問題に従来よく用いられる流体—構造体連成解析に用いられるALE法を適用することは困難であった。本研究課題では、流体を粒子の集合体と考え、粒子を追跡して移動先で力学計算を行う粒子法を用いることで界面が自由に変化する場合でも対応可能な流体—構造体解析の開発を行った。粒子法は移動先で力学計算を行うラグランジュ法的一种であり、そのため構造解析との親和性が良い。粒子法では、陽解法のSmoothed Particle Hydrodynamics (SPH)法と半陰解法のMoving Particle Semi-implicit (MPS)法が代表的である。本研究ではMPS法的一种であるExplicit MPS (E-MPS)法と有限要素法の連成解析手法を開発した。また、実装においてはGPUによる高速化を行った。粒子法において粒子同士の相互作用を計算するための近傍粒子探索にバケットデータ構造を利用したリンクリスト構造を用いた。また、FEMにおける連立一次方程式の解法に共役勾配法を用い、大規模疎行列ベクトル積をGPUで実装することで高速化した。

(2) シリコンオイル—ゼラチン実験による精度検証

脳に近い柔らかさを持つゼラチンを用いて流体浮力の喪失による変形量を調査する基礎実験を行った。ゼラチンは水溶性であるため、流体として水ではなくシリコンオイルを使用した。ゼラチンのヤング率とポアソン比は圧縮試験機と圧縮変形画像の画像処理により求めた。実験ではゼラチン直方体をシリコンオイルに浸し、シリコンオイルを徐々に除去した際のゼラチン直方体の変形を測定した。ゼラチン直方体は50×50×25 mmの大きさに切り出して容器に入れ175 mlのシリコンオイルで満たした。注射器でシリコンオイルを25 mlずつ抜いていき、その際のゼラチン上面の高さを上方に取り付けたRGB-Dカメラで測定した。結果として、シリコンオイルを10 mlまで減らしたとき、ゼラチン直方体は浮力喪失により、平均で約2.7 mm下方に変位した。

この実験に合わせた条件で連成解析を行い実験結果との比較を行った。ゼラチン直方体の有限要素モデルは一辺5 mmのボクセルメッシュで作成した。容器は密接に配置した粒子(壁粒子)でモデル化した。図2にシミュレーションの様子を示す。図2で緑色の粒子は有限要素モデルの節点に配置された節点粒子、水色の粒子は流体粒子、桃色の粒子は壁粒子である。実験同様に、流体粒子を175 mlから25 mlずつ減らした。有限要素モデルの上面高さを実験結果の比較を図3に示す。最大誤差はシリコンオイル量が150 mlのときの0.51 mm、誤差の平均は0.28 mmであった。

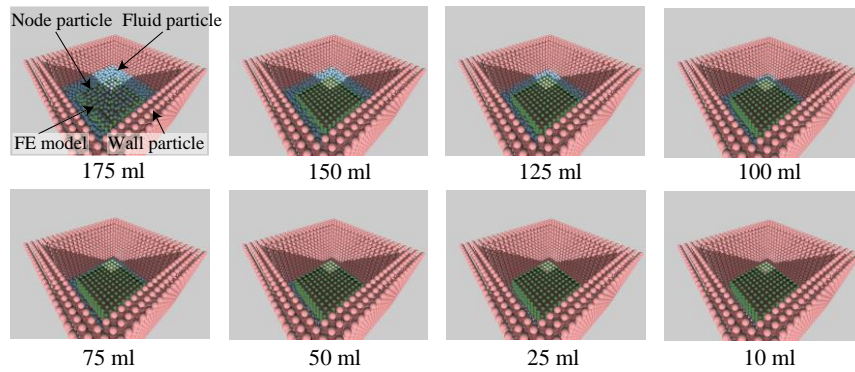


図2 シリコンオイル-ゼラチン実験再現シミュレーション

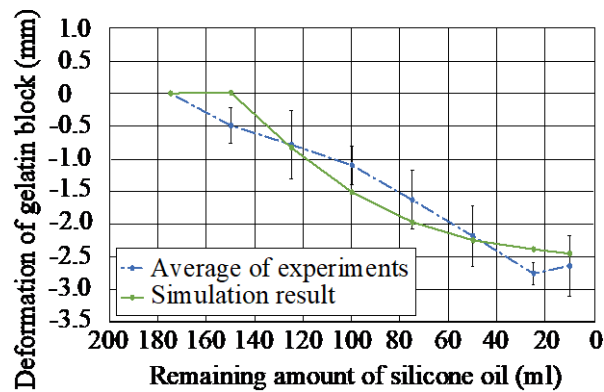


図3 シリコンオイル-ゼラチン実験再現シミュレーション結果

(3)ブレインシフトシミュレーション

頭蓋骨と脳モデルを用いたブレインシフトシミュレーションを行うために、頭蓋骨の粒子モデル、脳髄液の粒子モデル、脳の有限要素モデルを作成した。これらのモデルは、ライフサイエンス統合データベースセンターが公開している人体モデルBodyParts3D/Anatomographyのデータに基づいて作成した。このモデルと開発した連成解析手法により、脳髄液を徐々に除いた時の脳変形の解析を行った。シミュレーションの結果を図4に、残脳髄液の割合(初期状態を基準とした割合)に対する脳変位を図5に示す。

東京女子医科大学との共同研究により、ある脳神経外科手術における術前MRI画像と術中MRI画像の比較から、開頭直後のブレインシフト(脳変位)量は重力方向に10.30 mm、全体として16.29 mmであることを求めた(成果 [2])。この手術において術中MRIの間、患者は仰向けに寝ており、頭蓋骨切除部分の最下端は頭部最下端から89 mm上方であった。このとき頭部最上端は最下端から169 mmの位置にあり、この割合から脳髄液の残量の割合は $89/169 \approx 0.52$ と推定される。図に示したシミュレーション結果では、残脳髄液割合が0.5のとき、重力方向への変位量は14.46 mmである。Robertsら(1998)は28手術例について開頭直後のブレインシフト量を測定し、最大24.6 mm、平均10 mmと報告している。Hillら(1998)は21手術例について、最大ブレインシフト量は10 mm以上と報告している。シミュレーションで得られたブレインシフトは、これらの症例報告と概ね一致する。

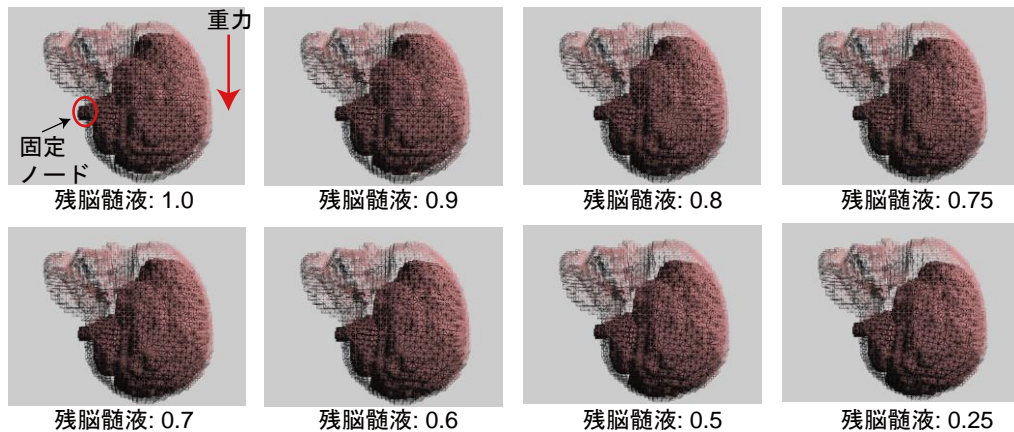


図4 ブレインシフト推定シミュレーション

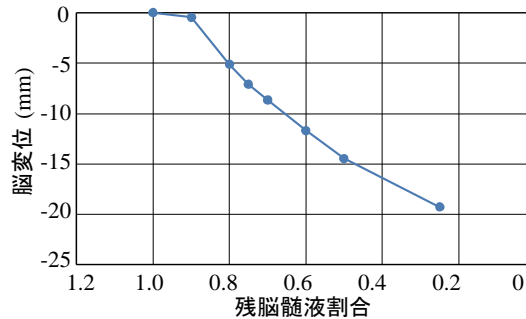


図5 残脳髄液割合と脳変位

4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

本研究では、開発した粒子法—有限要素法連成解析手法をブレインシフト(脳変位)解析に応用した。患者固有モデルを用いて開発手法により解析を行うことで、脳神経外科手術におけるニューロナビゲーションの精度向上が期待され、より安全で術者への負担が少ない手術の実現に貢献できると考えている。また、脳神経外科手術の支援だけでなく、外傷性脳損傷解析への応用により、ヘルメット、エアバッグ、シートベルトの設計支援などにも応用できる可能性がある。このような実社会への応用を目指し、開発手法のより詳細な妥当性評価と、実際の応用現場での利用に則した解析モデルの作成や解析条件の設定方法を検討したいと考えている。

5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

本研究課題の研究者らは、実時間動力学解析を応用した手術シミュレータの研究開発を行ってきた。これまでは手術技能訓練システムの開発に主に取り組んできた。本研究課題は、技能訓練に留まらない手術支援への展開に向けた取り組みである。本研究課題の遂行においてはこれまでの研究要素を基盤とし、新しい挑戦として流体解析の導入に取り組んだ。本研究課題は、ブレインシフト解析を念頭に置いたものだが、流体—構造連成解析の技術は技能訓練システムにも適用できる可能性があり、研究者らの研究領域を広げる重要な機会となったと考えている。

6 本研究にかかわる知財・発表論文等

知財

該当なし

発表論文

- [1] 白井, 陳, 佐瀬, 小水内, 辻田, 近野, 脳神経外科手術支援ブレインシフトAR 表示, 第19回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会予稿集, pp. 134-138, 2018年12月13~15日, 大阪, 優秀講演賞受賞
- [2] X. Chen, R. Shirai, K. Masamune, M. Tamura, Y. Muragaki, and A. Konno, Presenting a Simple Method of Brain Shift Estimation for Neuronavigations and Considering its Practicality, Proc. of IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII 2019), pp. 112-117, Paris, France, January 14-16, 2019.
- [3] X. Chen, K. Sase, T. Tsujita, and A. Konno, Numerical Model of Connective Tissue for Splitting Brain Fissure Simulation, Proc. of IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII 2019), pp. 118-123, Paris, France, January 14-16, 2019.
- [4] K. Ebina, T. Abe, S. Komizunai, T. Tsujita, K. Sase, X. Chen, M. Higuchi, J. Furumido, N. Iwahara, Y. Kurashima, N. Shinohara and A. Konno, A measurement and skill evaluation system for laparoscopic surgical procedures, Proceedings of SICE Annual Conference 2019 (SICE2019), pp. 1099-1106, Hiroshima, Japan, September 10-13, 2019. (発表者の Ebina が International Award 受賞)
- [5] R. Shirai, X. Chen, K. Sase, S. Komizunai, T. Tsujita and A. Konno, AR Brain-Shift Display for Computer-Assisted Neurosurgery, Proceedings of SICE Annual Conference 2019 (SICE2019), pp. 1113-1118, Hiroshima, Japan, September 10-13, 2019.
- [6] X. Chen, M. Hashimoto, K. Sase, T. Tsujita, and A. Konno, Vessel Dissection Simulation for Neurosurgery Simulators Considering Subarachnoid Space Structure, 2019 IEEE International Conference on Cyborg and Bionic Systems (CBS2019), Paper No. 006, Munich, Germany, September 18-20, 2019. (CBS2019 Best Conference Paper Finalist)
- [7] A. Konno, N. Shido, K. Sase, X. Chen, and T. Tsujita, A Hepato-Biliary-Pancreatic Deformable Model for a Simulation-Based Laparoscopic Surgery Navigation, Proceedings of 2020 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII 2020), pp. 39-44, Honolulu, Hawaii, USA, January 12-15, 2020.

- [8] X. Chen, K. Sase, T. Tsujita, and A. Konno, A Simple Deformation and Reaction force Numerical Calculation Method for Nonlinear Brain Tissues, Proceedings of 2020 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII 2020), pp. 1388-1393, Honolulu, Hawaii, USA, January 12-15, 2020.
- [9] K. Ebina, T. Abe, S. Komizunai, T. Tsujita, K. Sase, X. Chen, M. Higuchi, J. Furumido, N. Iwahara, Y. Kurashima, N. Shinohara and A. Konno, Development and validation of a measurement system for laparoscopic surgical procedures, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol. 13, No. 4, 2020 (accepted)

7 補助事業に係る成果物

(1)補助事業により作成したもの

該当なし

(2)(1)以外で当事業において作成したもの

該当なし

8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名: 北海道大学(ホッカイドウダイガク)

住 所: 〒060-0814

北海道札幌市北区北14条西9丁目

担 当 者: 教授 近野敦(コンノアツシ)

担 当 部 署: 大学院情報科学研究科(ダイガクインジョウホウカガクケンキュウカ)

E - m a i l: konno@ssi.ist.hokudai.ac.jp

U R L: <http://scc.ist.hokudai.ac.jp/index-j.html>