



Title	Numerical Models of Blunt Dissection and Brain Retraction for Neurosurgery Simulations [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	陳, 曉帥
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第12650号
Issue Date	2017-03-23
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/65733
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.1/jp/
Type	doctoral thesis
File Information	Xiaoshuai_Chen_review.pdf, 審査の要旨



学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称 博士 (工学) 氏名 陳 曉帥

審査担当者 主 査 教 授 近野 敦

 副 査 教 授 北 裕幸

 副 査 教 授 金井 理

学位論文題名

Numerical Models of Blunt Dissection and Brain Retraction for Neurosurgery Simulations

(脳神経外科手術シミュレーションのための鈍的剥離と脳圧排数値モデル)

若手医師の手術トレーニングのために、これまでは模型や動物などが使用されてきたが、近年は計算機シミュレーションと仮想現実技術を組み合わせた手術シミュレーションが着目されている。手術シミュレーションの最大の特徴は、患者が診察時に撮影する CT や MRI などの医療画像から再構成する患者固有の 3 次元モデルを使うことができる点であり、手術トレーニングのみならず、手術計画の立案や検証への応用が期待されている。特に、脳には言語機能や運動機能をつかさどった部位が密集しているため、手術では周辺組織を出来るだけ残しながら病変部のみを丁寧に削除する高い技量が求められると同時に、実際の手術前に綿密な手術計画を立てることが必要である。腹腔鏡手術については複数の欧米の会社が手術ハプティックシミュレータを販売しており、医療機関などでも広く用いられているが、脳神経外科手術に関しては、このような市販のシミュレータが無く、開発が期待されていた。

脳神経外科手術では、メスや剪刀で組織を切る切開 (鋭的剥離) とともに、脳ベラなどで組織の一部に応力を集中させて破断させる鈍的剥離と呼ばれる手技が頻繁に用いられる。脳の深部に病変部がある場合、脳の溝 (脳裂) を開放していきながら、手術器具の病変部へのアクセスを確保する。その際、鋭的剥離と鈍的剥離を組み合わせ、脳裂に満たされているくも膜小柱などの結合組織を破断しながら脳裂を開放していくが、血管は傷つけないように注意を払う必要がある。このような手術のシミュレーションを行う場合は、脳組織の破壊モデルが必要となる。しかしこれまでの脳神経外科手術シミュレータでは、コンピュータモデル内のメスが接触している脳組織の要素を単に削除するなど、脳組織の切開や破断を単純化していた。しかしそのような単純化では、血管を温存しつつ、くも膜小柱を破断するような手術を模擬することは困難だった。また、脳組織では一定のひずみに対して、時間とともに応力が低下していく応力緩和という現象がみられる。これまでは応力緩和を再現するために一般化 Maxwell モデルが用いられてきたが、組織の切開や破断で孤立した要素が生成されると剛性行列が特異となり、有限要素計算ができなくなるという問題があった。

本論文は以上の問題を解決するために、新しい脳組織損傷破壊モデルと非線形変形モデルを提案するもので、全編 5 章からなる。

第 1 章は序論であり、本研究の背景および目的を述べている。

第 2 章では、手術シミュレーションで用いる脳組織の動的有限要素モデル、および数値積分に陰解法を用いた数値安定シミュレーション法について述べている。

第 3 章では、鋭的剥離や鈍的剥離を精度良く模擬するための、脳組織の損傷破壊モデルを提案し

ている。生体組織では筋肉や血管のようにひずみを徐々に進展させると、ある点で一気に破断するぜい性破壊を示す組織も多いが、脳組織では破断が徐々に進展し、破断の進展とともに応力が緩やかに減衰する延性破壊がみられる。脳組織の破壊特性を明らかにした研究はこれまで無かったため、本章ではブタの脳組織を用いた引っ張り試験を行い、脳組織の破壊特性を明らかにしたうえで、延性破壊を精度良く模擬するモデルを提案している。ブタの脳組織を用いた引っ張り試験結果との比較により、提案モデルが精度良く模擬できることを検証した。脳組織の破壊特性を実験により明らかにしたこと、その破壊特性を精度良く模擬するモデルを提案したことは、病変部の切除や脳裂開放などの手術を精度良く模擬するために極めて重要な成果である。

第4章では、脳の材料非線形性を考慮しつつ数値安定性を保証する非線形変形モデルを提案している。提案するモデルは、一般化 Maxwell モデルに慣性項を付加することで模擬精度を高めつつ、剛性行列が特異になった場合でも有限要素計算が不安定にならないという特徴を持つ。またブタの脳を用いた大脳縦裂開放実験で、脳の応力緩和特性を明らかにした。この実験結果との比較により、提案する非線形モデルが応力緩和現象を精度良く模擬できることを検証した。脳神経外科手術では、過大な応力を長時間かけることにより脳損傷が発生することが問題となっているが、本章の成果はシミュレーションで脳損傷の可能性を予測するうえでの極めて重要な成果である。

第5章は結論である。

以上要するに、本論文はブタの脳を用いた実験により破壊特性、応力緩和特性を明らかにし、その特性を精度良く模擬するためのモデルを提案したもので、本成果により、病変部の切除や術野確保のための脳裂開放を精度良く模擬すること、脳組織圧排時の発生応力を精度良く予測することが可能となったことを考慮すると、システム情報科学、ロボット工学、および医工学の発展に寄与するところ大である。

よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。