HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Development of a Real-time Brain Retraction Simulator Using Patient-specific Model [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	佐瀬, 一弥
Citation	北海道大学. 博士(工学) 甲第12647号
Issue Date	2017-03-23
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/65621
Rights(URL)	http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.1/jp/
Type	theses (doctoral - abstract and summary of review)
Additional Information	There are other files related to this item in HUSCAP. Check the above URL.
File Information	Kazuya_Sase_review.pdf (審査の要旨)

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

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　佐瀬 一弥

審査担当者　主　査　教　授　近野 敦
副　査　教　授　五十嵐 一
副　査　教　授　金井 理

学位論文題名

Development of a Real-time Brain Retraction Simulator Using Patient-specific Model
（患者固有モデルを用いた実時間脳組織圧排シミュレータの開発）

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. そのため脳神経外科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. そのため, 若手医師の手術トレーニングや, 術前計画の立案・検証を目的とした手術シミュレータへの関心が高まっている. 特にハプティックデバイス (力覚提示装置) を用いたハプティックシミュレーションは, 操作者が仮想手術中の実際の力加減を知覚することができ, 近年注目を集めている. 例えば病変部の鈍的剥離は術具を押しつけて病変部と周囲の境界部に応力を集中し破断して剥離しようとする手技であるが, その際, 過大な応力を作用すると正常な部位まで損傷させる危険性がある. 腹腔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. しかし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.

脳神経外科手術シミュレータは欧米を中心に幾つか開発例があるが, ハプティックシミュレーションでは脳組織の変形と反力を実時間で計算しなければならないため計算負荷が高く, シミュレーションする部位を限定するか, 反力計算を簡易化するなど機能が限定されており, 例えば術野確保のための脳圧排などの脳の大変形を伴うシミュレーションができなかった. また, ハプティックシミュレーションでは仮想術具と脳モデルの接触力を提示する必要があるが, 計算負荷が高いシミュレーションでは接触力が安定して提示できないという問題があった. さらに患者の診察時に撮影する CT や MRI などの医療画像から, ハプティックシミュレーションに必要な患者の 3 次元有限要素モデルの作成が困難で, これまでは半自動で生成されたモデルに対して人間が手動で修正するなど, 多大な時間を要していた.

本論文は以上の問題を解決するために, 患者の医療画像を用いた 3 次元有限要素モデルの自動作成, 軟組織の実時間変形計算, 安定な力覚提示を提案するもので, 全編 6 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, 患者の医療画像を用いた 3 次元有限要素モデルの自動作成法について述べている. 医療画像から 3 次元幾何モデルを生成するのはこれまでも自動化できていた.3 次元幾何モデルから 3 次元有限要素モデルに変換する際に人手による多大な労力を必要としていたが, 提案する手法は 3 次元幾何モデルを取り囲むようにボクセルモデルを生成するもので, 完全自動化されている. この手法は脳裂などの再現が困難であるが, その問題を解決するために「分離ラベルペア」という概念を提案し分離部位を含むボクセルを多重化することで脳裂部の分離を再現した. 医療画像から 3 次

元有限要素モデルの生成が大幅に省力化され, かつ他の部位の手術シミュレーションにも応用できるため, 極めて重要な成果である.

第 3 章では,GPU を用いた有限要素計算の高速化手法について述べている. この高速化により, 並列化処理を行わない CPU のみの計算に比べ 6.1 倍の高速化を実現した. この高速化により, ハプティックシミュレーションに必要な実時間計算が可能となった.

第 4 章では, ハプティックデバイスによる反力提示の安定性を改善するために, 実際のハプティックデバイスの位置とモデル内の仮想手術器具の位置との間に仮想的なばねとダンパーを挿入するバーチャルカップリングを導入している. この手法では仮想手術器具に対し, 脳モデルとの接触に伴う動力学を計算する必要があるが, 既存手法では大きい時間刻みに対し安定な接触応答を得ることができないという問題があった. 提案する手法はペナルティ法に基づく接触力を陰解法により時間積分することで数値的安定性を向上させるものである. この手法の導入により, 接触力提示における不安定性が解決された.

第 5 章では, 第 2 章で提案した 3 次元ボクセルモデルを用いて接触計算を行う手法を述べている.3 次元ボクセルモデルは 3 次元幾何モデルを取り囲むように生成されるために,3 次元ボクセルモデルを用いて接触計算を行うと, 接触が正しく計算されないという問題があった. そのため接触計算には 3 次元幾何モデルを用いる手法を提案している.3 次元幾何モデルに SDF という 3 次元内部位置に対する最近傍表面までの距離を格納したスカラー場を定義する. これにより 3 次元幾何モデルと仮想手術器具の接触検出を高速に実行することが可能となった. この技術は第 2 章で提案したモデルを用いて仮想手術器具との接触力を計算するうえで, 極めて重要である.

第 6 章は結論である.

以上要するに, 本論文は患者固有のモデルを用いた脳神経外科手術ハプティックシミュレーションを実現するために, 患者の医療画像を用いた 3 次元有限要素モデルの自動作成, 軟組織の実時間変形計算, 安定な力覚提示を提案したもので, 患者固有モデル生成の大幅な省力化, 大規模計算の高速化, ハプティックシミュレーションの安定化を実現し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.