

## 先端研究助成基金助成金(最先端・次世代研究開発支援プログラム) 実績報告書

本様式の内容は一般に公表されません

研究課題名	力覚触覚提示装置を用いた脳外科手術シミュレータの開発
研究機関・ 部局・職名	北海道大学・大学院情報科学研究科・教授
氏名	近野 敦

1. 研究実施期間 平成23年2月10日～平成26年3月31日

2. 収支の状況

(単位:円)

	交付決定額	交付を受けた額	利息等収入額	収入額合計	執行額	未執行額	既返還額
直接経費	99,000,000	99,000,000	24,229	99,024,229	99,024,229	0	0
間接経費	29,700,000	29,700,000	0	29,700,000	29,700,000	0	0
合計	128,700,000	128,700,000	24,229	128,724,229	128,724,229	0	0

3. 執行額内訳

(単位:円)

費目	平成22年度	平成23年度	平成24年度	平成25年度	合計
物品費	0	51,655,260	16,796,302	21,283,952	89,735,514
旅費	0	93,740	1,037,260	912,361	2,043,361
謝金・人件費等	0	0	6,474,322	0	6,474,322
その他	0	19,000	280,275	471,757	771,032
直接経費計	0	51,768,000	24,588,159	22,668,070	99,024,229
間接経費計	63,000	15,467,400	10,086,000	4,083,600	29,700,000
合計	63,000	67,235,400	34,674,159	26,751,670	128,724,229

4. 主な購入物品(1品又は1組若しくは1式の価格が50万円以上のもの)

物品名	仕様・型・性能等	数量	単価 (単位:円)	金額 (単位:円)	納入 年月日	設置研究機関名
制御システム連携型操作作用アーム型装置	ソリッドレイ SOL- DDPP36SET	1	21,252,000	21,252,000	2011/10/12	東北大学(納入時), 北海道大学(現在)
脳外科手術シミュレーション計算機システム	DELL Power EdgeR610 20ノード	1	28,350,000	28,350,000	2012/2/28	東北大学(納入時), 北海道大学(現在)
テラステーション	BUFFALO TS-8VH16TL/R6	1	650,000	650,000	2012/3/7	東北大学(納入時), 北海道大学(現在)
KRONOS S810ワークステーション	Ciara Technologies社製 フックマウント型	3	1,033,200	3,099,600	2012/10/30	北海道大学
デスクトップパソコン	Apple MacPro ZOP2	1	643,320	643,320	2013/2/12	北海道大学
モーションキャプチャシステム	米国NaturalPoint社製 OptiTrack Prime41(12) 外	1	6,550,950	6,550,950	2013/2/27	北海道大学
デスクトップPC	システムワークス社 POWER MASTER Vision S9924	1	843,465	843,465	2013/7/12	北海道大学(東北大学へ貸与中)
没入型ディスプレイ	DevinSense Display 700	1	4,830,000	4,830,000	2014/1/24	北海道大学
GPUクラスタシステム	(株)オー・ティ・ピー	1	11,014,500	11,014,500	2014/1/10	北海道大学

5. 研究成果の概要

本研究では、病変部への視野確保、病変部摘出などの脳外科手術における基礎技術を模擬可能な脳外科手術シミュレータを開発した。操作者は力覚提示装置によって手術操作中の仮想力を感じながら、臨場感の高い手術模擬が行える。脳全体のモデルを用いた実時間手術模擬には高い計算能力が必要で、これまで国内外で開発された脳外科手術シミュレータでは実現できていなかった。本研究では、複数GPUの利用や計算アルゴリズムの工夫により、脳全体のモデルを用いた実時間手術模擬が可能となった。実際の手術の前にシミュレーションで試行錯誤することにより、手術計画を綿密に立てることができ、手術の安全性を飛躍的に高める効果が期待される。

課題番号	LR003
------	-------

## 先端研究助成基金助成金(最先端・次世代研究開発支援プログラム) 研究成果報告書

本様式の内容は一般に公表されます
------------------

研究課題名 (下段英語表記)	力覚触覚提示装置を用いた脳外科手術シミュレータの開発
	Development of a Brain Surgery Simulator using Haptic Devices
研究機関・部局・ 職名 (下段英語表記)	北海道大学・大学院情報科学研究科・教授
	Hokkaido University, Graduate School of Information Science and Technology, Professor
氏名 (下段英語表記)	近野 敦
	Atsushi Konno

### 研究成果の概要

(和文):

本研究では、病変部への視野確保、病変部摘出などの脳外科手術における基礎技術を模擬可能な脳外科手術シミュレータを開発した。操作者は力覚提示装置によって手術操作中の仮想力を感じながら、臨場感の高い手術模擬が行える。脳の大規模モデルを用いた実時間手術模擬には高い計算能力が必要で、これまで国内外で開発された脳外科手術シミュレータでは実現できていなかった。本研究では、複数GPUの利用や計算アルゴリズムの工夫により、脳全体のモデルを用いた実時間手術模擬が可能となった。実際の手術の前にシミュレーションで試行錯誤することにより、手術計画を綿密に立てることができ、手術の安全性を飛躍的に高める効果が期待される。

(英文):

In this research, a brain surgery simulator is developed, which can simulate fundamental operations in a brain surgery such as opening a brain fissure to expose lesions and removal of the lesions. A surgeon can perform virtual medical operation with feeling virtual reaction force by haptic devices. Real-time surgery simulation using a large-scale brain model requires high computational cost, hence it has not been realized so far. In this research, efficient calculation methods using multiple GPU are studied, and real-time surgery simulation using a whole brain model is realized. Surgeons can make a detailed preoperative surgery plan through trial and error using the developed simulator, which is expected to contribute to drastic improvement of safety in a brain surgery.

1. 執行金額 128,724,229 円  
(うち、直接経費 99,024,229 円、 間接経費 29,700,000 円)

2. 研究実施期間 平成23年2月10日～平成26年3月31日

### 3. 研究目的

#### (1) 研究の背景

近年、手術トレーニングや難手術の術前計画を目的とした手術シミュレータへの関心が高まっており、多くの手術シミュレータが開発されてきた。特に、腹腔手術については Surgical Science 社や Simbionix 社などが手術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、脳外科手術については脳のモデルが複雑になりすぎ、実時間シミュレーションが困難であることなどの理由から開発例も少なく、実用化されるには至っていない。

胃がんや肺がんなどの手術では、がん細胞を残さぬよう病変部の周辺組織まで大きく切除している。ところが脳外科手術では、病変部の周辺組織まで削除してしまうと、その部位がつかさどっていた言語機能や運動機能が失われる危険性があるため、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ことが求められる。また、脳外科手術においては、術具によって脳組織に過大な応力を与えると、脳組織が損傷を受け重大な後遺症が残る危険性があり、術中の力覚・触覚情報は視覚に劣らず重要である。

そこで本研究では、手術模擬中の視覚・力覚・触覚情報を術者に提示する脳外科手術シミュレータを開発する。これまでも脳外科手術のためのシミュレータの開発例はあるが、脳組織からの反力や触覚を提示するものはほとんど無い。

#### (2) 研究期間内に何をどこまで明らかにし、また達成しようとするのか

脳外科手術の術技は多岐にわたる。そのなかで比較的共通に行われる基礎技術である、鋭的剥離(鋭利な術具を用いた切開を伴う病変部剥離)、鈍的剥離(切開を伴わず術具の押しつけによる病変部などの剥離)、腫瘍除去の模擬が可能なシミュレータを開発する。これらの基礎術技において、脳組織の変形やそれによって発生する反力を実時間で計算し、力覚・触覚提示装置で術者に力覚や触覚を提示する。またそのときに発生する応力や変形を視覚提示する。具体的な手術例として、シルビウス裂の奥にある島部に腫瘍がある状況を想定し、シルビウス裂の開放による病変部術野確保(鈍的剥離)、腫瘍剥離(鈍的剥離)、腫瘍摘出のシミュレーションを行い、開発するシミュレータの有効性を検証する。

#### (3) 本研究の特色(優れている点、斬新・独創的な点及び本研究の重要性・意義等)

本研究で開発する脳外科シミュレータは、鋭的剥離、鈍的剥離、病変部摘出といった脳外科手術に必要な基礎術技を、視覚、力覚、触覚を提示しながら模擬するもので、手術者の技術の向上に役立てることが出来る。特に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。手術模擬中の力覚・触覚情報を、視覚的にかつ実際の力覚・触覚情報を術者に提示することにより、手術者は現在脳組織に作用している力を知ることができ、より安全な手術のための手技のトレーニングが可能となる。手術者が手術模擬を通して十分にその術技を向上させることにより、脳外科手術の安全性を飛躍的に高める効果が期待される。

#### 4. 研究計画・方法

力覚・触覚提示装置とそのシステム開発、および脳組織モデルの構築を研究期間前半の1年数ヶ月程度で行い、研究期間後半の2年で各種手術手技の模擬手法の開発、手術の具体例を題材とした評価、を行っていく。具体的には、平成22年度後半および23年度に、力覚・触覚提示システムの開発と脳組織モデルの構築を、平成24年度以降はマイクロ剪刀による切開模擬、鋭的剥離操作模擬技術の開発、鈍的剥離操作模擬技術の開発、脳腫瘍剥離・摘出を題材としたシステムの評価、を行う。

#### 5. 研究成果・波及効果

ノード数9,126、四面体要素数34,401、表面三角メッシュ数12,608の全脳有限要素モデルを作成した(図1)。各要素には線形弾性モデルを用い、弾性係数、ポアソン比、破断応力は、豚の脳実質試料を用いた引っ張り試験(図2)で求めた。作成した脳モデルを、別途作成した頭蓋モデルに統合した(図3)。頭蓋モデルと統合した全体モデルは、ノード数12,331、四面体要素数48,316、表面三角メッシュ数15,865となった。頭蓋モデルの側面には、手術用の穴を開けてある。

脳は柔軟組織であり、手術中の脳の挙動を正確に模擬するためには動的な挙動の再現が不可欠である。そのため、有限要素モデルを用いた動力学方程式を導いた。手術シミュレータにおいて、動力学計算は陽解法を用いて解く方法が一般的であった。陽解法は高速に求解できる反面、サンプリング時間を極めて細かくとらないと計算が不安定になる。そのため開発するシミュレータでは陰解法による求解を用いた。陰解法では数値的な不安定化は発生しない。

脳ベラのモデルには両面に接触点をアレイ状に配置し、これら接触点と脳モデルの表面三角形との位置関係から、脳ベラと脳の接触を判定している。脳裂(例えばシルビウス裂など)のような凹部に脳ベラを差し込むと、脳ベラの両面

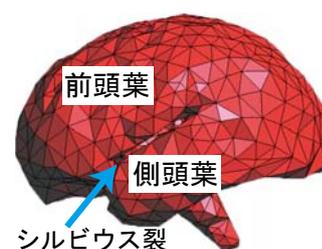


図1 全脳の有限要素モデル

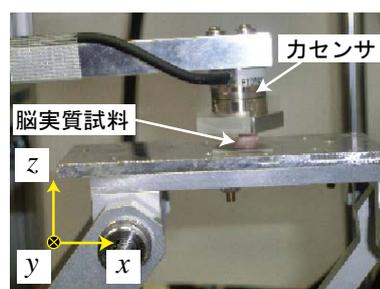


図2 脳実質引っ張り試験

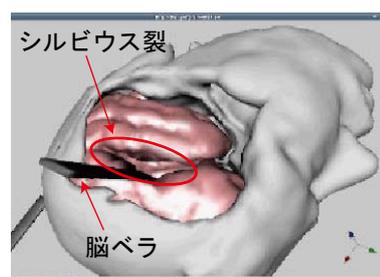


図3 頭蓋モデルとの統合

で脳裂の壁面と同時に接触する状態となるが、これまでに提案されてきた接触点検出法では、このような凹部での複数部位接触を検出するのが困難であった(図 4)。そのため、凹部での複数部位接触を検出する手法を新たに開発した(図 5)。接触判定は術具と脳のみでは無く、脳と頭蓋骨との接触についても行っている。

図 3 のモデルを用いて、脳ベラによる脳裂開放シミュレーションを行った。全ての計算を行った場合、シミュレーションの 1 ループに要する時間は約 700 [ms]であった。このシミュレーションでは 2 本の脳ベラを用い、2 本の脳ベラに対し、同時に接触判定を行っている。

最終年度(平成 25 年度)に、それまで個別に開発してきた、脳組織モデル、頭蓋骨モデル、力覚・触覚提示シミュレーション技術、手術器具による切開シミュレーション技術、実時間変形・反力高速計算技術などを、脳外科手術シミュレータとして統合した。脳の側面にあるシルビウス裂(図 1)をかき分けた奥にある島部と呼ばれる部位に腫瘍があると想定し、その腫瘍を取り除く手術をシミュレーションの題材とした。島部腫瘍摘出手術の中で、(1)シルビウス裂を脳ベラで開放し(圧排)島部への視野を確保(図 6)、(2)島部の視野が確保された状態で左手に吸引管、右手にマイクロ剪刀(はさみ)を持ち、腫瘍部を周りの正常な組織から剥離し摘出(図 7, 8)、の二つの手術場面を再現しシミュレーションを行った。できるだけ精密なモデルを用いつつ実時間でシミュレーションを行うために、上記(1)、(2)の二つの手術場面に対し異なる脳モデルを用いた。また、(1)、(2)の手術場面に不要な、脳全体を覆う硬膜、くも膜などは、高速化のために今回のモデルでは省略した。

(1)のシルビウス裂開放手術シミュレーションでは頭蓋と脳の半球モデルを用い、脳の半球モデルは、ノード数 8,647、四面体要素数 32,639、表面三角メッシュ数 11,792 とした。脳ベラは 6 本とし、最大で 6 本の脳ベラと脳モデルとの接触判定を行っている。このときの 1 ループに要する計算時間は、約 122 [ms]であった。(2)の腫瘍部剥離・摘出手術シミュレーションでは、島部詳細モデルとシルビウス裂壁面粗モデルのみを用いた。島部詳細モデル(腫瘍部を含

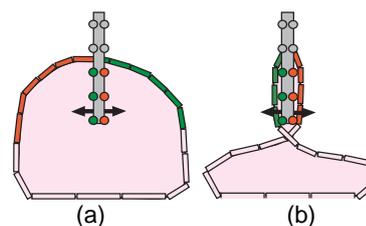


図 4 接触判定失敗例

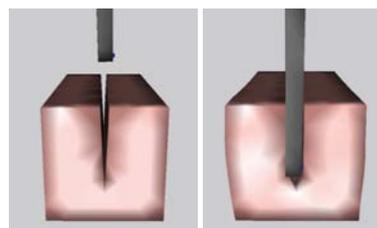


図 5 術具との多点接触による生体組織複数部位同時変形



図 6 シルビウス裂圧排



図 7 脳腫瘍摘出



図 8 腫瘍部の剥離(切開)

む)は、ノード数 3,628, 四面体要素数 12,932, 表面三角メッシュ数 5,288 である。腫瘍部の特性は、過去の文献で報告されている値を用いた。吸引管、マイクロ剪刀などの術具と脳組織の接触判定は、術具の先端部分のみで行っている。ハプティックデバイスのグリップ部にあるボタンに、吸引管とマイクロ剪刀の操作を割り当て、左のハプティックデバイスのボタンを押すと吸引管が作動し、腫瘍部などを吸引することができる。右のハプティックデバイスのボタンを押すとマイクロ剪刀のはさみ部が閉じ、その間にある組織を切開できる(図 8)。

精密なモデルを用いつつ実時間でシミュレーションを行うために、(a) 手術器具と脳モデルの接触判定、(b) 脳の全体剛性行列の再構築、(c) 連立一次方程式の求解、の部分の計算を GPU (Graphics Processing Unit) で行い、高速化した。脳モデルにトポロジー変化が生じない限り(b)の計算は最初の一度のみ必要で(c)の計算も最初の一度のみ

時間がかかり後は高速に行える。しかし脳腫瘍摘出では、腫瘍部と周辺組織の境界組織の切開が必要であり(図 8)、切開に伴い脳モデルにトポロジー変化が生じるために、そのたび脳の有限要素モデルの全体剛性行列の再構築が必要となり、計算負荷の高い(b)、(c)の計算を高速に行う必要が生じる。

脳の大規模モデルを必要とする脳裂圧排などの手術シミュレーションは、従来研究では高計算負荷のために実時間で行うことができず、これまで開発されたカナダ国家研究評議会(NRCC)の NeuroTouch, ImmersiveTouch 社の ImmersiveTouch などでは実現されていない。国内で脳全体のモデルを用いて小脳圧排のシミュレーションを行った例があるが、オフラインでの計算であり、そのため力覚の操作者への提示も行われていない。本研究では動力学計算に、計算が不安定化しない陰解法を用いることでサンプリング時間を比較的長めにとり、かつ計算のボトルネックとなっている部分の計算を GPU で行うことにより高速化し、実時間で力覚提示を行うシミュレーション(ハプティックシミュレーション)を実現した。このような脳全体モデルを用いたハプティック手術シミュレーションの実現例は国内外で見当たらない。

開発した脳外科手術シミュレータの評価を、東北大学大学院医学研究科の 2 名の脳神経外科医に依頼し、図 6, 7 に示す(1) シルビウス裂圧排、(2) 脳腫瘍摘出、の二つを体験していただいた。実際の手術との操作感の違いなど、有用な指摘をいただいた。また、今後の実用化に向けて、手術を行う外科医の技量を数値的に表現する機能があると良い、という意見をいただいた。今後、本シミュレータを発展させていく上で、大いに参考としたい。なお、シミュレータは没入型ディスプレイと 6 自由度ハプティックデバイスに実装しているが(図 9)、評価は東北大学で行ったために簡易版のハプティックデバイスを使用した。



図 9 没入型ディスプレイと 6 自由度ハプティックデバイスへの実装

6. 研究発表等

<p>雑誌論文 計 3 件</p>	<p>(掲載済み一査読有り) 計 2 件</p> <p>Masano Nakayama, Satoko Abiko, Xin Jiang, Atsushi Konno and Masaru Uchiyama, Stable Soft Tissues Fracture Simulation for Surgery Simulator, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 23, No. 4, pp. 589-597, August 2011.</p> <p>Teppei Tsujita, Kazuya Sase, Atsushi Konno, Masano Nakayama, Chen Xiao Shuai, Koyu Abe, Masaru Uchiyama, Design and Evaluation of an Encountered-type Haptic Interface Using MR fluid for Surgical Simulators, Advanced Robotics, Vol. 27, No. 7, pp. 525-540, 2013.</p> <p>(掲載済み一査読無し) 計 0 件</p> <p>(未掲載) 計 1 件</p> <p>Akira Fukuhara, Teppei Tsujita, Kazuya Sase, Atsushi Konno, Xin Jiang, Satoko Abiko and Masaru Uchiyama, Proposition and Evaluation of a Collision Detection Method for Real Time Surgery Simulation of Opening a Brain Fissure, ROBOMECH Journal, 2014 (accepted).</p>
<p>会議発表 計 10 件</p>	<p>専門家向け 計 10 件</p> <p>Masano Nakayama, Atsushi Konno, Xin Jiang, Satoko Abiko, and Masaru Uchiyama, Linear Elastic Fracture Model for Brain Surgery Simulation, Proceedings of 2011 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Budapest, Hungary, pp. 333-338, July 3-7, 2011.</p> <p>Xiaoshuai Chen, Masano Nakayama, Teppei Tsujita, Xin Jiang, Satoko Abiko, Koyu Abe, Atsushi Konno and Masaru Uchiyama, Identification of Physical Properties of Swine Liver for Surgical Simulation Using a Dynamic Deformation Model, Proceedings of 2011 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, pp.655-660, Kyoto, Japan, December 20-22, 2011.</p> <p>Teppei Tsujita, Manabu Ohara, Kazuya Sase, Atsushi Konno, Masano Nakayama, Koyu Abe and Masaru Uchiyama, Development of a Haptic Interface Using MR Fluid for Displaying Cutting Forces of Soft Tissues, Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation, RiverCentre, Saint Paul, Minnesota, USA, pp. 1044-1049, May 2012.</p> <p>佐瀬一弥, 中山雅野, 佐竹恵和, 安孫子聡子, 姜欣, 辻田哲平, 近野敦, 内山勝, 実脳モデルを用いた脳裂開放シミュレータの実時間性評価, ロボティクス・メカトロニクス講演会'12 講演論文集, 日本機械学会, (2012/5/28-29), 2P1-U03.</p> <p>庄司怜平, 井上祐人, 陳曉帥, 中山雅野, 阿部幸勇, 姜欣, 安孫子聡子, 辻田哲平, 近野敦, 内山勝, 脳神経外科手術シミュレータ用力覚提示装置の開発と評価, ロボティクス・メカトロニクス講演会'12 講演論文集, 日本機械学会, (2012/5/28-29), 2P1-U04.</p> <p>Takuya Kameyama, Teppei Tsujita, Atsushi Konno, Xin Jiang, Satoko Abiko, and Masaru Uchiyama, Displaying Cutting Force of Soft Tissue Using MR Fluid for Surgical Simulators, Proceedings of IEEE Haptics Symposium, pp. 283-288, 2014.</p> <p>Atsushi Konno, Masano Nakayama, Xiaoshuai Chen, Akira Fukuhara, Kazuya Sase, Teppei Tsujita, and Satoko Abiko, Development of a Brain Surgery Simulator, The International Symposium on Interdisciplinary Research and Education on Medical Device Developments, pp. 29-32, 2013.</p> <p>福原洸正, 辻田哲平, 佐瀬一弥, 近野敦, 姜欣, 安孫子聡子, 内山勝, 脳裂開放シミュレーションのための接触判定法の提案, ロボティクス・メカトロニクス講演会'13 講演論文集, 2A1-L02, 2013.</p> <p>井上祐人, 辻田哲平, 安孫子聡子, 姜欣, 内山勝, 近野敦, 脳外科手術シミュレータ用マイクロ剪刀モジュールによる切断感覚提示, 第 31 回日本ロボット学会学術講演会, 1G2-03, 2013.</p> <p>Atsushi Konno, Development of a Brain Surgery Simulator, The 2nd International Joint Workshop on Intelligent Convergence Technology, Sapporo, Japan, July 23, 2013.</p> <p>一般向け 計 0 件</p>

様式21

図書 計0件	
産業財産権 出願・取得 状況 計0件	(取得済み) 計0件  (出願中) 計0件
Webページ (URL)	脳外科手術シミュレータの開発 <a href="http://scc.ist.hokudai.ac.jp/research/brainsurgery/brainsurgery-j.html">http://scc.ist.hokudai.ac.jp/research/brainsurgery/brainsurgery-j.html</a> <a href="http://scc.ist.hokudai.ac.jp/research/brainsurgery/brainsurgery-e.html">http://scc.ist.hokudai.ac.jp/research/brainsurgery/brainsurgery-e.html</a>
国民との科学・技術対話の実施状況	2012年3月18日(日)13:00～16:40, 仙台国際センターにて「世界をリードする東北大学機械系の若手研究者が目指す未来社会」と題した市民講座を開催した。東北大学機械系でNEXTプログラムに採用された他の5名の研究者とともに講演を行った。参加者数は一般市民約50名。  2012年10月27日13:30～16:30, 北海道大学サステナビリティウィークイベントの一環として, 北海道大学学術交流会館第4会議室にて「やさしい情報科学とライフイノベーション公開講座」と題した市民講座を開催した。北海道大学大学院情報科学研究科でNEXTプログラムに採択されている他の2名の研究者と共に講演を行った。  2013年6月8日(土)13:30～15:30に北海道大学工学部において公開講座「情報科学から知る医療応用」を開催した(北海道大学大学院情報科学研究科 平田拓教授, 舘野高教授との共同開催)。この公開講座は, (公財)北海道生涯学習協会が主催する道民カレッジ <a href="http://manabi.pref.hokkaido.jp/hsgk/college/">http://manabi.pref.hokkaido.jp/hsgk/college/</a> の連携講座として開催し, 道民カレッジの受講生に, 多数参加いただいた。
新聞・一般雑誌等掲載 計0件	
その他	

7. その他特記事項