応用論文

脳動脈瘤クリッピングシミュレータの開発

庄野直之¹⁾, 金 太一¹⁾, 斉藤雄介²⁾, 斎藤 季²⁾, 斉藤延人¹⁾, 小山博史²⁾

1. はじめに

脳動脈瘤に対する開頭クリッピング術とは脳動脈瘤の頸を金属性のクリップで挟み脳動脈瘤を閉塞させる手術のことである。これは脳神経外科で広くおこなわれている代表的な手術であり、高度な診断・戦略・技術を要する。本手術用に百種類以上の金属クリップが市販・実用されており、脳神経外科医は、適切なクリップをどのように、何個使用するのかを個々の症例に応じて選択しなければなら

ない。現状ではこれを術前に正確に決定することは極めて困難である。よって手術中に様々なクリップを試行錯誤することになる。しかし、そのため周囲構造物や動脈瘤の損傷のリスクが高くなり、出血などの致命的な合併症を来す可能性が高くなる。さらに、本手術は頭蓋内の狭い範囲で行われることが多く、脳動脈瘤とそれ以外の組織（骨、脳、神経、血管）との多様な位置関係によって手術ワーキングスペースが限られ、適切なアプローチやクリップ選択を術前に正確に把握するこ

Development of a Virtual Cerebral Aneurysm Clipping Simulator

Naoyuki SHONO, Taichi KIN, Yusuke SAITO, Toki SAITO, Nobuhito SAITO, Hiroshi OYAMA

Abstract :

BACKGROUND: Subarachnoid hemorrhages may occur spontaneously from a ruptured cerebral aneurysm. The placement of clips around the neck of the aneurysm (clipping) is one of the very common surgical treatments. However, clipping is a challenging surgery for most neurosurgeons. To help support the surgeon's decision-making process and preoperative surgical planning, we developed a VR clipping simulator (ClipSim).

METHODS: High definition 3DCG models such as aneurysms, arteries, and brain were segmented by Amira® software (FEI, Hillsboro, OR) and surgical clips were modeled by Maya® software (Autodesk, San Rafael, CA). These models were integrated and simulated into Unity® (Unity Technologies, San Francisco, CA) software.

RESULTS: We successfully developed a real-time, interactive, clipping simulator with an aneurysm deformable model used by PhysX real-time physics engine (Ageia, Santa Clara, CA). In conclusion, the simulator may be useful prior to surgery during the surgeon's decision making process for selecting the most appropriate clips.

Key words :

Cerebral Aneurysm, Clipping, Simulator

1) 東京大学大学院医学系研究科脳神経外科学, Dep. of Neurosurgery, Graduate School of Medicine, Univ. of Tokyo

2) 東京大学大学院医学系研究科臨床情報工学, Dep. of Clinical Information Engineering, Graduate School of Medicine, Univ. of Tokyo

とは困難である。よって手術前に仮想手術野上で本手術のシミュレーションが可能となれば、術前検討や訓練に極めて有用なツールとなり得る。しかし、現段階で実臨床現場で広く使用されている脳動脈瘤クリッピング術シミュレーションシステムは存在しない。その理由として、1) 現実の手術野を高精度に反映させた高精細で変形可能な脳動脈瘤やクリップの3次元ポリゴンモデルを作成する手法がないこと、2) 画像構築方法や操作方法が難解であるため、一般の臨床医が誰でも容易に使用することが可能な画像処理ソフトウェアがないこと、などが挙げられる。

本研究の貢献は、身近なデバイスで高精細な脳動脈瘤3次元CGモデルでの変形を実現したこと、またそれによって動脈瘤クリッピング時のクリップ選択などのシミュレーションが可能となったことである。

2. 脳動脈瘤クリッピングシミュレータ“ClipSim”

2.1 概要

当研究室で独自にクリッピング手術のVR (virtual reality) シミュレータを開発することとした。システムの機能仕様を脳神経外科専門医から聴取し、①3Dビューワ機能を持つこと、②高精細な3D脳動脈瘤モデルを使用すること、③インタラクティブに変形する脳動脈瘤モデルであること、④変形と移動機能を持つクリップモデルを使用すること、⑤ユーザビリティの高いインターフェイスを持つこととした。本研究は東京大学医学部附属病院で倫理委員会の承認を受け（承認番号：2332-(2)）、患者には書面で同意を得て行った。

2.2 医用3次元ポリゴンモデル構築

CT (computed tomography), MRI (magnetic resonance imaging) 及び脳血管撮影などの複数の異なる医用画像データセットを、初期値設定方法

を独自に開発した正規化相互情報量法で画像処理ソフトウェア Amira® (FEI, Hillsboro, OR) 上で位置合わせを行った¹⁾。

生体組織のセグメンテーションは Kin et al. が開発した手法を用いた¹⁾。すなわち、標的組織に対して複数の医用画像データセット及び複数の閾値を設定することによって、ノイズが少なく、かつこれまでの医用画像可視化ソフトウェアよりも高い空間分解能を有するポリゴンモデルをレンダリングした。

脳神経外科手術で一般に使用されている複数のクリップのポリゴンモデルを作成し、クリップの閉鎖運動をリギングによる変形によってシミュレートした。ソフトウェアは Maya® (Autodesk, San Rafael, CA) を用いた。

2.3 シミュレーションソフトウェア開発

作成されたCGモデルを統合開発環境の Unity® (Unity Technologies, San Francisco, CA) によって統合し、クリップの移動や接触判定などの機能を実装し、ソフトウェア化した (図3)。この時 Unity (ver4.6.1f1) 内蔵の物理エンジン (NVIDIA 社の PhysX ver2.83) を用いて血管・動脈瘤に弾性変形機能 (interactive cloth 機能, Position Based Dynamics を主に使用²⁾) を利用することとした。ただし、変形は動脈瘤と周囲の血管のみとし、複数種類のクリップを複数個使用して、それぞれ任意に移動させてクリッピング動作をシミュレートできることとした。変形挙動については、材料特性などは設定せず、Unity のパラメータを脳神経外科専門医である筆頭著者自身が調整することで最適化した。モデル全体に対して実時間処理を行い、実時間処理周期は0.02秒とした。また、変形する動脈瘤周囲血管は1251ポリゴンで、血管全体は47218ポリゴンであった。ソフトウェアはマルチプラットフォーム (Windows, Mac OS, Android) でも利用できることとした。開発したアプリケーションを実際市販のPC・ノートPC・タブレット・

スマートフォンにインストールし、動作確認をした。また、脳神経外科医 10 名により評価実験を行った。評価については、質問紙法(図 4)により行った。

図 1 Amira® による fusion 3D 画像
Fig.1 Fused 3D image processed with Amira®

図 2 Maya® による 3D 脳動脈瘤クリップモデル
Fig.2 3D aneurysm clip model made with Maya®

図 3 Unity® による統合
Fig.3 Integration of each elements with Unity®

実験環境については、MacBook Pro (Retina, 13-inch, Mid2014, Intel Core i7 3GHz, メモリ 16GB) を用いた。操作は市販の 3 ボタンマウス (Logicool M325) を用いて行った。

3. 結果

今回開発した ClipSim システムの操作画面を図 5 に示す。使用した形状モデルは頭蓋骨、脳表、脳動脈、脳静脈、動脈瘤手術用クリップ 3 種類と

図 4 評価実験で使した質問紙
Fig.4 Questionnaire used in the user test

図 5 インターフェイス概観 A: クリップ操作ボタン, B: モデル表示切り替えボタン, C: クリップ切り替え・追加ボタン, D: その他ユーティリティボタン

Fig.5 Overview of interface A: Clip manipulation buttons, B: Model switching buttons, C: Clip switching/adding buttons, D: Other utility buttons

し、ポリゴンモデルを使用した。ステレオでの観察可能なモード（図7）も実装した。これにより、

図6 専門医ユーザーテスト外観

Fig.6 Appearance of the user test by board certified neurosurgeons

図7 ステレオ操作画面：開始シーン

Fig.7 Stereoscopic view: Starting scene

図8 クリップ操作時動脈瘤変形の連続写真

Fig.8 Sequential image of aneurysm deformation during clip application

クリップの進め方や深度、脳動脈瘤と周辺の脳動脈や脳静脈相互の立体的位置関係の把握が容易となった。ステレオ視については、通常の液晶モニター画面上に横並びになった2個の画像を平行法で立体視することを前提としており、HMD（Head Mounted Display）など特殊な表示デバイスを必要としない。

動脈瘤をクリップで挟んだ場合の変形をシミュレーションするために本研究では弾性血管で構成された脳動脈瘤モデルを作成（cloth シミュレーション機能を援用）し、Unity が有する接触判定機能を用いて複数種類のクリップモデルを複数個用いてクリッピングを行った場合の血管変形シミュレーションを可能とした（図8）。なお、Cloth シミュレーション機能は、Unity 上でポリゴンメッシュに「布のような」挙動をさせるようにリアルタイムにメッシュ編集を行う機能である。

操作方法はマウスとタッチパネルで共通のインターフェイスを用い、ビューワ機能で視点の回転、平行移動、拡大縮小（マウス操作ではそれぞれ左ボタンドラッグ、右ボタンドラッグ、スクロールホイールに割り当て、タッチ操作ではそれぞれ一本指ドラッグ、二本指ドラッグ、ピンチイン・アウトに割り当てた）ができ、クリップ移動もインターフェイス上のボタンを押してから左ボタンドラッグする（タッチでは一本指ドラッグ）ことで回転（3方向）、平行移動（3方向）が可能である。他にクリップを追加するボタンとクリップを別の種類に取り替えるボタンを用意した。マウスとタッチパネルで共通のインターフェイスを用いることで単純化を実現した。手術のアプローチ方法についてもビューワ機能を使ってシミュレート可能であるため、任意の症例で実際の手術・術野に酷似した形での手術シミュレーションを可能とした。

クリップ閉鎖後の血管・動脈瘤変形を任意の方向から観察できるため、不完全な動脈瘤閉塞や母血管の血流障害などを予見できるような拡張性をもたせた。

また、市販の一般的なモバイル端末も含めたデバイスで実用的に動作することを確認した。

評価実験（図 6）の結果については、5 段階 Likert Scale を用いた質問紙を用意した。結果の一例として、本シミュレータの手術検討における有効性の質問項目では、有用との返答（scale で 4, 5）した被験者の割合が 90%（9 名）となった。他方、操作方法の分かりやすさについての質問項目では、わかりやすいと返答（scale で 4, 5）した被験者の割合は 70%（7 名）にとどまった。

4. 考察

本シミュレータで実現を試みた内容は、高精細融合 3 次元画像の変形という意味においては成功したと言える。しかし、そのクオリティについては、まだ改善の余地がある。また、ユーザビリティに関しても、評価実験の結果で明らかになったように、すべてのユーザーに実感してもらうには、まだ努力が必要である。他方で、臨床での有用性についてはすでに好評価を得ており、今後実臨床症例に適応していきながらさらに評価・検討・フィードバックしていくことが必要となる。

VR 技術を用いたシミュレータは航空業界をはじめとして、結果が大きな社会的・経済的影響力を持つ業務を伴う分野ではすでに実用化されている。そしてコンピューティングパワーの急速な向上に伴い、その精度は多くの点で改善されている。医学の領域もその一例であり、特に消化器外科の領域で 2000 年代から先行して発達してきている。これは、低侵襲治療への社会的需要の高まりとともに普及してきた腹腔鏡の操作が、それまでの開腹手術と比較して不自然な認知と操作を要求され、難易度が高かったことに起因する。多くの研究が行われ、手術教育におけるシミュレータの有用性はすでに確立している³⁾。さらには手術前の warm-up としてシミュレータを用いることで手術成績が向上するなどの知見も得られてきている⁴⁾。

他方で 3D プリンタの普及に伴い、実体モデルを用いたシミュレーションも盛んに行われるようになってきている。AR (augmented reality) 技術なども取り入れられ、近年加速度的に研究が進められている分野であり、コスト削減の方向性も模索されてきている⁵⁾。

脳神経外科領域は、もとより手術結果が容易に致命的になりうる点でシミュレーションの潜在的需要が高い。実際、近年実体モデル⁶⁾や VR 技術によるシミュレータが開発されるようになってきており、市販されるものもでてきているが、少なくとも国内で広くは普及していない。現在先行しているものとしては、NeuroTouch^{7, 8)}、Immersive Touch⁹⁾などが代表的である。他にビューワに近いものも複数発表されている。血管内治療や神経内視鏡領域¹⁰⁾のシミュレータはこれらの中では先行しているが、クリッピング術などの細かい血管構築に焦点を置いた開頭手術用シミュレータは脳神経外科の中で脳動脈瘤への関心が高いこと¹¹⁾とは対照的に、ほとんど発表されていない。

脳動脈瘤に対するクリッピング手術において、クリップで動脈瘤を閉塞させた際の変形の形状情報は重要であり、これを予測するのは多くの経験を要してもなお不確実である。そしてこれは動脈瘤の形状が複雑であるほど顕著となる。頭蓋内のように作業空間が限られた部位では、微妙な予測の誤差も脳梗塞や術中破裂など致命的な合併症に繋がりうるものであり、手術に関する情報は多いほどよい。従って、本シミュレータのように複数のクリップを選択して動脈瘤に実際にかけた場合の変形を想定するシステムは潜在的に広く必要とされていると思われる。

このような方向性を持ち、一つ本研究に直接先行する研究として Bambakidis et al. により開発されているクリッピングシミュレータがあり¹²⁾、これは脳血管障害の領域で世界的に著名な Barrow Neurological Institute でもトレーニングプログラムの一つとして採用されているとのことである¹³⁾。

しかし、多くのシミュレータも同様だが、導入コストは莫大であり、専用の端末でのみ使用可能という点で全世界的な普及への障壁は大きいと言わざるを得ない。他に 3D モデルや変形の精度に向上の余地があると思われる。ただし、FDA 承認を受けていることや自動画像取り込みなど特筆すべき点も多いシミュレータであることは付言しておく。なお、動脈瘤の破裂などの組織破壊に主眼をおいたシミュレータは現状では存在せず、本シミュレータも含めて、部分的にシミュレートしているのみである（本シミュレータでも血管壁が破壊される機能は Unity の物理エンジンにより実装されているが、validation はされていない）。これは、個人差も含めて考えると、血管の材料特性などを反映させることが不可能であることに起因する。

シミュレータにおける画質は没入感に直結しており、これはシミュレータの成否に関わる重要な要素である。本シミュレータは一般的なプラットフォームで一般的なユーザーインターフェイスを用いた上で、高精細な動脈瘤とクリップの相互変形を可能にするシステムであり、その事実は本システムを独創的なものにしてしている。他方で、まだ全てのクリップを網羅できていないことや、各症例でのモデル作成などが自動化されていないことは、さらなる改善の余地があることを示唆している。また、今後の展望としては、クリップによる動脈瘤閉塞後の血流変化のシミュレーション機能や脳そのものの変形機能などの実装が考えられる。血管障害の術中に操作した血管の血流を（目視だけでなく）客観的に確認するのは現代脳神経外科ではほぼ常識となってきた^{14, 15)}。そのほか、十分性能のよいシミュレータならば実際の手術での習熟度とよい相関を持つことが知られており¹⁶⁾、シミュレータを用いて逆に手術習熟度を検定することも考えうる¹⁷⁾。

本研究の限界は、変形の検証がなされていないことに尽きる。今回の検討で専門医による定性的評価は概ね上々であったが、変形に関する定量的

な検証は不十分であり、これについては評価方法からさらなる検討が必要である。

5. 結語

脳動脈瘤クリッピング術のアプローチからクリップ操作による動脈瘤のインタラクティブな変形までシミュレート可能なシステムを作成した。また、手近な PC やタブレットなどで使用可能であった。

参考文献

- 1) Kin T., Nakatomi H., Shojima M. et al. A new strategic neurosurgical planning for brainstem cavernous malformation using an interactive computer graphics with multimodal fusion images. *J Neurosurg* 117: 78-88, 2012.
- 2) Müller M., Heidelberger B., Hennix M.: Position Based Dynamics. *Journal of Visual Communication and Image Representation* Apr:18(2): 109-118, 2007
- 3) Lobel D. A. and Rezai A. R.: Frontiers in neurosurgery: simulation in resident education. *Congress Q.* 12(3):46, 2011
- 4) Kahol K., Satava R. M., Ferrara J. and Smith M. L.: Effect of short-term pretrial practice on surgical proficiency in simulated environments: a randomized trial of the "preoperative warm-up" effect. *J Am Coll Surg.* 208(2):255-268, 2009
- 5) Moreira-Pinto J., Silva J. G., de Castro J. L. R. et al.: Five Really Easy Steps to Build a Homemade Low-Cost Simulator. *Surgical Innovation* 20(1):95-99, 2013
- 6) Kimura T., Morita A., Nishimura K. et al: SIMULATION OF AND TRAINING FOR CEREBRAL ANEURYSM CLIPPING WITH 3-DIMENSIONAL MODELS. *Neurosurgery* 65:719-726, 2009
- 7) Gélinas-Phaneu N., Choudhury N., Al-Habib A. R. et al: Assessing performance in brain tumor resection using a novel virtual reality simulator. *Int J CARS* 9:1-9, 2014
- 8) Delorme S., Laroche D., DiRaddo R. et al: NeuroTouch: A Physics-Based Virtual Simulator for Cranial Microneurosurgery Training. *Neurosurgery* 71 [ONS Suppl 1]:ons32-ons42, 2012
- 9) Alaraj A., Charbel F. T., Birk D. et al: Role of 9ranial

- and Spinal Virtual and Augmented Reality Simulation Using Immersive Touch Modules in Neurosurgical Training. *Neurosurgery* 72:A115-A123, 2013
- 10) Filho F. V. G., Coelho G., Cavalheiro S.: Quality assessment of a new surgical simulator for neuroendoscopic training. *Neurosurg Focus* 30 (4)E17, 2011
 - 11) The UCAS Japan Investigators. The Natural Course of Unruptured Cerebral Aneurysms in a Japanese Cohort. *N Engl J Med* 366:2474-82, 2012
 - 12) Bambakidis N. C., Selman W. R. and Sloan A. E.: Surgical Rehearsal Platform: Potential Uses in Microsurgery. *Neurosurgery* 73:S122-S126, 2013
 - 13) Chowdhry S. A. and Spetzler R. F.: Genealogy of Training in Vascular Neurosurgery. *Neurosurgery* 74:S198-S203, 2014
 - 14) De Oliveira J.G., Beck J., Seifert V. et al.: Assessment of flow in perforating arteries during intracranial aneurysm surgery using intraoperative near- infrared indocyanine green videoangiography. *Neurosurgery*. 61(3 suppl):63-72, 2007
 - 15) Kuroda K., Kinouchi H., Kanemaru K. et al.: Intra-arterial Injection Fluorescein Videoangiography in Aneurysm Surgery. *Neurosurgery* 72[ONS Suppl 2]: ons141-ons150, 2013
 - 16) Langelotz C., Killian M., Paul C. et al.: LapSim virtual reality laparoscopic simulator reflects clinical experience in German surgeons. *Langenbecks Arch Surg* 390:534-537, 2005
 - 17) Loukas C. and Georgiou E.: Multivariate Autoregressive Modeling of Hand Kinematics for Laparoscopic Skills Assessment of Surgical Trainees. *IEEE TRANSACTIONS ON BIOMEDICAL ENGINEERING* Nov;58(11):3289-97, 2011