

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 5 月 21 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24300180

研究課題名(和文) 実際の手術器具による脳神経外科手術シミュレーション/トレーニングシステムの開発

研究課題名(英文) The development of simulation and training system for neurosurgical operation using the real operation tools

研究代表者

梶田 泰一 (Kajita, Yasukazu)

名古屋大学・医学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：70303617

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、実際の手術環境を極力模擬するヴァーチャルシミュレーション・トレーニング技術を開発することにあつた。3D virtual画像生成ソフトウェアNew Virtual endoscopy (New VES)に、磁気式および光学式位置センサを実際の手術器具に取り付け、3Dバーチャル画像内で手術器具の位置姿勢と対応付けた。手術の進行や操作に伴い脳が変形する実際の手術に近いシミュレーションを実現するために、変形の対象領域を節点とバネでモデル化した後、外力を加えることでモデルを変形する技術を開発した。若手脳神経外科医において術前シミュレーションおよびトレーニングに教育的効果を確認した。

研究成果の概要(英文)：Neurosurgical simulation, the use of which is for technical training of residents and maintenance or upgrading of surgical skills in clinical practice, is important to safely perform the operation. To optimize the learning exercise, it is important that simulation system is set up to best present a real-world experience. We developed simulation/training system using 3D virtual image produced by new virtual endoscope (VES) software and maneuver the virtual operations tool on 3D image by input of the real ones. Real operation tools tracked optically or magnetically employ intelligible virtual tools for suction, removing or deforming. To close the real world tumor removal operation the surrounding cortex was deformed, accompanied with tumor removal. This simulation of suction tool procedure was well educational for making surgical planning especially for young neurosurgeons.

研究分野：コンピューター外科学

キーワード：手術シミュレーション 手術トレーニング 脳神経外科手術 3D virtual 画像

### 1. 研究開始当初の背景

脳神経外科手術を、安全かつ確実に行うためには、重要な脳機能部位(運動、言語など)、脳神経線維、脳血管の存在を3次元的に把握して、最適な手術計画を作成し、手術を遂行することである。

入念に作成した術前計画を実際の脳神経外科手術で遂行することが困難なことも多い。脳神経外科手術では、(1) 開頭術に伴う髄液の漏出や、脳腫瘍手術では腫瘍摘出に伴い脳が変形する、(2) 実際の顕微鏡下手術において、脳内の狭い間隙内では手術器具が挿入できない、手術器具が顕微鏡視野の妨げになる、周囲脳に接触して、手術器具が思い通りに操作できない、脳深部手術では、術前2次元視シミュレーションでは奥行きがわからず簡単に操作できた事が、実際の3次元視手術では、脳深部で高難度の手術手技が要求されるなどがある。現在、脳神経外科医が、脳神経外科手術に特有な手技(適切な手術計画の作成、最適な手術視野を得る顕微鏡操作、精細な手術器具操作など)を学ぶトレーニングシステムがないことも大きな問題である

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、実際の手術環境を極力模擬するバーチャルシミュレーション・トレーニング技術を開発し、現在の脳神経外科手術をさらに安全・確実に実施することにある。開発された本シミュレーション技術により、術者は、術前に、実際に遂行可能な手術計画を作成し、最適な手術器具操作法を模索する。現在、脳神経外科手術で実地に学ばざるをえなかった脳内の狭い間隙内での適切な手術器具操作法を訓練することが可能となる。また、本研究は、若手脳神経外科医の技術向上の時間を短縮し、熟練術者が慢性的に不足している脳神経外科手術状況も改善する。

### 3. 研究の方法

(1) 脳腫瘍、血管、脳神経などの重要構造物が描出された3Dバーチャル画像を生成する技術  
CT、MRIやPETなど様々な種類の画像を統合的に扱うための画像間の位置合わせの技術を開発した。さらに、位置合わせされた複数の画像の情報を用いて重要構造物を自動あるいは半自動的に効率的に抽出する技術を開発した。これにより、シミュレーション・トレーニングで重要となる脳腫瘍、血管、脳神経などの重要構造物が描出された3Dバーチャル画像を生成することが可能になった。

(2) 手術顕微鏡と同様に3Dバーチャル画像をステレオ視する技術

脳神経外科手術では、手術顕微鏡を用いて術野をステレオ視しながら手術を行っているため、3Dバーチャル画像生成ソフトウェアに実際の手術顕微鏡をシミュレーションして左目と右目の画像をそれぞれ生成する機能を追加し、ステレオビューワで観察する。

(3) 脳偏倚などの手術進行に伴う脳変形をリア

ルタイムにシミュレーションする画像変形の技術  
術中の髄液流出に伴う脳偏倚や、腫瘍摘出、脳へら操作などの手術進行に伴う脳変形シミュレーションするために、3Dバーチャル画像をリアルタイムに変形する画像変形技術の開発を行った。変形の対象領域を節点とバネでモデル化した後、外力を加えることでモデルを変形した。変形前後のモデルの対応関係を用いて画像を変形した。変形に要する時間を極力短縮し、3D画像を、真にリアルタイムに変形することで、4Dバーチャル画像を実現した。

(4) 実際の手術器具を用いて、バーチャル空間内でバーチャル手術器具を操作する技術

3Dバーチャル画像を用いて脳神経外科手術のシミュレーション・トレーニングを行う際に、実際の手術器具を用いて操作できる技術を開発した。手術器具の形状をポリゴンモデルで表現してバーチャル空間内にバーチャル手術器具を表示する。磁気式の位置センサを実際の手術器具に取り付け、実空間での手術器具の位置姿勢を取得する。バーチャル空間内でのバーチャル手術器具の位置姿勢をセンサより取得した実空間での手術器具の位置姿勢と対応付ける。これにより、バーチャル空間内のバーチャル手術器具は、実際の手術器具を用いて操作することが実現した。

(5) 脳外科医が、適切に脳内3次元構造をイメージし、繊細な顕微鏡、手術器具操作を習得するトレーニングシステム

開発された要素技術を統合して脳神経外科手術のシミュレーション・トレーニングシステムを構築した。脳神経外科手術症例において、術前に本技術を用いたシミュレーションを行い、実際の手術操作と比較検討し、有用性を評価した。

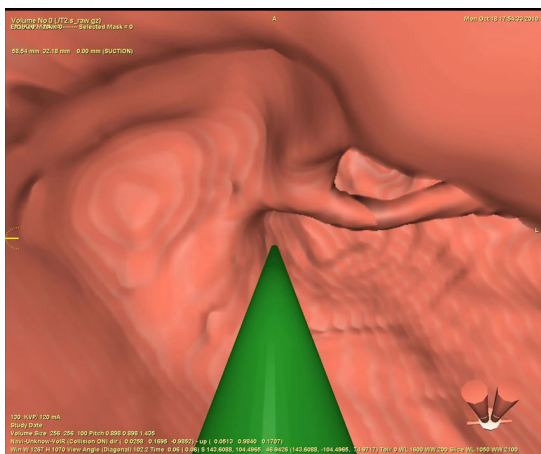
### 4. 研究成果

(1) 脳腫瘍、血管、脳神経などの重要構造物が描出された3Dバーチャル画像を生成する技術  
脳腫瘍症例において、解剖学的画像であるMRI、CT、DTI tractography および機能画像であるFDG-PET、Methionin PET、fMRIを画像間の位置合わせを行い、術前計画に有用な統合画像を作成した。脳腫瘍モデルにおいては、脳腫瘍、運動野、錐体路などの重要な構造物が反自動的に抽出された3Dバーチャル画像が作成された。この3Dバーチャル画像は、脳腫瘍摘出術やてんかん外科手術において、後遺症を防ぐために最適なapproach法を、直感的に検討することが可能となった。また、手術の進行に伴い脳が偏倚した術中MRI画像に、変形fusion技術を用いて、術前PET情報を統合した3Dバーチャル画像は、残存脳腫瘍を追加切除する手術法を検討する上で、有用であった。特に、術中撮像されたMRI上の摘出腔周辺の異常影が、手術操作にともなう浮腫などの異常影が、残存腫瘍影であるか、区別することは困難である。メチオニンPETは、腫瘍を特異的に描出するために、術中撮像されたMRIに重畳することにより、浮腫などの異常影が、残存腫瘍影かの鑑別が可能となった。

(2) 手術顕微鏡と同様に 3D バーチャル画像をステレオ視する技術

3D バーチャル画像生成ソフトウェアのステレオ視の出力を顕微鏡手術の疑似体験が可能なステレオビューで観察し、実際の手術顕微鏡視野との妥当性を検証した。特に、内視鏡手術においては、通常、2D 画像で施行されるが、2 眼式の内視鏡で3D viewerを用いて、立体視で実手術器具を用いて、手術操作をすることを可能とした。通常、2D 画面で奥行きが実感できずに内視鏡手術に慣れない若手の脳神経外科医にとり、本シミュレーション技術のトレーニングで有用となった。

(3) 脳偏倚などの手術進行に伴う脳変形をリアルタイムにシミュレーションする画像変形の技術  
頭蓋底手術では、手術計画を作成するための、開頭に必要な骨切除範囲などにおいては、3D バーチャル画像の応用は実手術に近いシミュレーションが可能である。一方、脳実質内腫瘍を摘出する際には、腫瘍摘出にともない周囲脳が変形するために、実手術のシミュレーションにはなりにくい。脳実質内腫瘍の手術においても、より実手術に近いシミュレーションを実現するために、バネ理論を用い、変形前後のモデルの対応関係を用いて画像を変形した。本変形関係の最適化は、当院の術中 MRI 画像と対応することにより行った。また、変形に要する時間を極力短縮し、3D バーチャル画像を、真にリアルタイムに変形することで、3D バーチャル画像に時間軸を追加した他に類をみない 4D バーチャル画像を実現した。この変形技術が実現したことで、実手術に近い、脳腫瘍摘出にともなう脳へらの使用、顕微鏡の視察方向などのシミュレーションが可能となった。

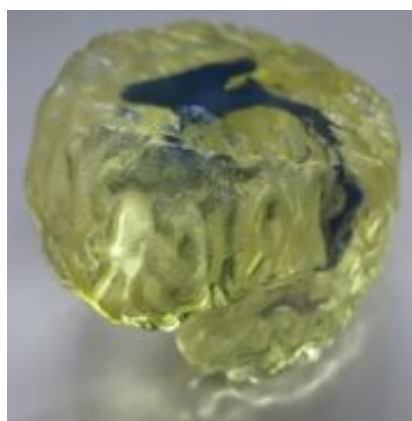


脳内の 3D virtual 画像 (緑色は仮想吸引管) 吸引管で腫瘍摘出をすすめたり、脳へらなどで操作することにより、周囲脳は変形し、より実手術環境に近いシミュレーションが可能となった。

(4) 実際の手術器具を用いて、バーチャル空間内でバーチャル手術器具を操作する技術

光学式、磁気式の位置センサを実際の手術器具に取り付け、バーチャル空間内のバーチャル手術器具を操作した。脳腫瘍摘出術に実際に使用する手術器具として、吸引管やバイポーラーに位置センサを装着し、腫瘍の摘出などの手

術手技が、実手術と同様に実施できることを確認した。この技術は、従来の入力装置であるジョイスティックなどと比較し、実手術に近いシミュレーションシステムを確立した。すなわち、従来の入力装置では不可能であった脳深部の腫瘍摘出における、手術器具の挿入方向や、狭い摘出腔内での手術操作を習得することが、可能となった。また、手術器具のトラッキングシステムとしては、光学式、磁気式ともに、位置精度に有意な差はなく、磁気式は、小型化が可能であり、より簡便であった。



3Dプリンターで作成したてんかん外科手術用脳モデル(側頭葉海馬への approach 法を検討・青は脳室)

(5) 脳外科医が、適切に脳内 3 次元構造をイメージし、繊細な顕微鏡、手術器具操作を習得するトレーニングシステム

脳腫瘍症例において、手術進行および脳へら操作による脳偏倚に対応するリアルタイム変形技術の有用性を検討した。リアルタイム変形技術を導入する前には、3D バーチャル画像上の脳腫瘍全摘出に要する時間に、若手脳神経外科医や学生と、熟練脳外科医に差はなかったが、リアルタイム変形技術を導入することで、より実手術のシミュレーションに近づき、若手脳神経外科医は、シミュレーションを重ねると共に、腫瘍摘出に要する時間は短縮し、トレーニング効果も確認した。さらに、患者個々の MRI より 3D プリンターの内部構造造形法を用いて、半透明モデルの内部に脳室、海馬などを造形し、てんかん外科手術のシミュレーションを行った。内側側頭葉てんかんの扁桃体・海馬切除術におけるアプローチに有用であった。さらに、運動野などの重要な脳機能皮質近傍の脳腫瘍手術やてんかん外科手術においては、脳機能を電気生理学や術中脳波記録をモニタリングしながら、手術を行うため、術中の電気生理学的情報を統合しながらの手術シミュレーション技術の開発も進めた。脳波や誘発電位記録を観察しながら、手術シミュレーションすることで、安全な手術操作を術前に習得することが可能となった。さらに、電気生理学的情報を自動解析するソフトウェアを導入することにより、若手脳外科医のトレ

ーニングやシミュレーション技術の向上に役立つことを検証した。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

(雑誌論文)(計 14 件)

- 1) 森 健策, 3D プリンティングの現状と将来展望:医用画像処理と 3D プリンタによる臓器実体モデル作成とその利用 光技術コンタクト, 2015, 査読無, 53(2), 20-27
- 2) 森 健策, `特集 RSNA 2014 A Century of Transforming Medicine: 15. 3D プリンタ, ユーザーインターフェイスの動向を中心に` インナービジョン, 査読無, 2015, 30(2), 46-47
- 3) Abe S, Kajita Y, 他 8 名 9 番目 Estimation of regional cerebral blood flow using N-isopropyl-p-123I iodoamphetamine acquisition data from the lungs and brain. An improved non-invasive technique. Nuklearmedizin, 査読有, 2014, 53(6), 221-6
- 4) 森 健策, 画像処理・表示技術, インターフェイス, 3D プリンタ等の動向を中心に -画像表示技術としての 3D プリンティングとユーザーインターフェイス インナービジョン 査読無, 2014, 29(2), 51-52
- 5) 森 健策, 3D プリンタによる臓器モデル作製 作製方法から診断応用まで インナービジョン, 査読無, 2014, 29(1), 71-73
- 6) 森 健策, 12. 画像処理・表示技術, インターフェイス, 3D プリンタ等の動向を中心に 画像表示技術としての 3D プリンティングとユーザーインターフェイス 日本バーチャルリアリティ学会誌, 2014, 査読無, 29(2), 51-52
- 7) 森 健策, 画像情報処理技術を活用した診断・治療支援 ~ 腹部のがん治療を助ける画像処理技術 ~、電気評論, 査読無, 2014, 99, (6), 19-24
- 8) Liang Z, Kajita Y, Mori K 他 6 名 7 番目 Anatomical annotation on vascular structure in volume rendered images. Comput Med Imaging Graph, 査読有, 2013, 37(2), 131-41
- 9) Fujitani S, Kajita Y 他 7 名 7 番目 Statistical parametric mapping of interictal 123I-iomazenil SPECT in temporal lobe epilepsy surgery. Epilepsy Res, 査読有, 2013, 106(1-2), 173-80
- 10) Arata J, Kajita Y 他 8 名 6 番目 Surgical bedside master console for neurosurgical robotic system. Int J CARS, 査読有, 2012, 8, 75-86
- 11) 梶田泰一, 森 健策 他 4 名 1 番目 ナビゲーション脳神経外科手術の現況と展望, 査読無, Jpn J Neurosurg, 2013, 22, 510-518
- 12) 梶田泰一, 林 雄一郎, 森 健策 他 2 名 1

番目, 3D ヴァーチャル画像を用いた術前・術中遠隔手術支援システムの開発. PROGRESS IN COMPUTED IMAGING. (査読有), 2013, 35, 29-36

- 13) Arata J, Kajita Y 他 8 名 6 番目, Surgical bedside master console for neurosurgical robotic system. Int J CARS, 査読有, 2012, 8, 75-86
- 14) Nagai T, Kajita Y 他 5 名 2 番目, Preoperative regional cerebral blood flow and postoperative clinical improvement in Patients with Parkinson's disease undergoing subthalamic nucleus deep brain stimulation, Neurol Med Chir (Tokyo), 査読有, 2012, 52(12), 865-872

(学会発表)(計 28 件)

- 1) 森 健策, 医用画像処理と 3D プリンタによる臓器モデル生成と診断治療支援への応用, 電子情報通信学会 2015/03/13, 滋賀県草津市 立命館大学びわこ・くさつキャンパス
- 2) 森 健策, 3D 画像処理と 3D プリントによる診断治療支援, 第 7 回 3DPACS 研究会 in 名古屋, 2014/12/21, 愛知県名古屋市名古屋大学大幸キャンパス
- 3) 森 健策, 計算解剖モデルに基づく消化器がんの診断治療支援, 第 15 回名古屋消化器疾患研究会, 2014/12/13 愛知県名古屋市名古屋東急ホテル
- 4) Kensaku Mori, 3D Printed Liver Models for Diagnostic and Surgical Assistance: How to Prepare Data, Print and Utilize? RSNA 2014 (Radiological Society of North America) Scientific Assembly and Annual Meeting, 2014/12/1, Chicago, U.S.A
- 5) 森 健策, 多元計算解剖に基づく診断治療支援, アドバンスド・エレクトロニクス・シンポジウム 2014 -健康、医療分野における電子・情報技術の展開-, 2014/11/27, 京都府京都市京都リサーチパーク
- 6) 森 健策, 画像処理による医用画像の認識理解と診断治療支援への応用, 日本光学学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2014, 2014/11/5, 東京都文京区筑波大学東京キャンパス文京校舎
- 7) 森 健策, 産学連携・医工連携 :3D プリンタによる臓器作成のための画像処理, 第 27 回日本内視鏡外科学会総会, 2014/10/3, 岩手県盛岡市いわて県民情報交流センター
- 8) 森 健策, 画像認識理解とコンピュータビジョンに基づく胸部画像診断支援, 郡山臨床呼吸器カンファランス, 2014/10/2, 福島県郡山市ホテルハマト
- 9) Kensaku Mori, Geodesic Patch-based Segmentation, MICCAI 2014, 2014/9/15, Boston, USA

- 10) 森 健策、計算解剖モデルと可視化・可視化に基づく消化器領域における診断治療支援、第6回 桜山消化器がん懇話会、2014/9/5、愛知県名古屋市長古屋マリオットアソシアホテル
- 11) 森 健策、画像処理による医用画像の認識理解と診断治療支援への応用 -3次元画像処理の基礎から応用まで-、東海支部第24回基礎セミナー「バイオメディカルエンジニアリング」、応用物理学会・東海支部、2014/9/5、愛知県名古屋市長古屋大学
- 12) 森 健策、3D プリンタによる患者個別臓器モデルと診断治療への応用 - 画像処理から利用法まで、電子情報技術部会 マイクロナノシステムと材料・加工分科会、2014/7/15、東京都千代田区新化学技術推進協会(JACI)会議室
- 13) 森 健策、医用画像認識理解と可視化・可視化に基づく手術ナビゲーション、クリニカルサミット、メディカルイメージングの最先端～ナビゲーションとロボティクス～、2014/7/14、東京都文京区東京医科歯科大学M&Dタワー
- 14) Kensaku Mori, Clinical application of 3D virtual navigation system to laparoscopic gastrectomy, International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, 2014/6/27, Fukuoka, JAPAN, Fukuoka International Congress Center
- 15) Kensaku Mori, Abdominal organ recognition from CT images and clinical applications: abdominal CAD, CAS and 3D printing, CARS 2014 Computer Assisted Radiology and Surgery 28th International Congress and Exhibition: Special Session on Abdominal CAD - ACAD, 2014/06/26, Fukuoka, JAPAN, Fukuoka International Congress Center
- 16) Kensaku Mori, Recent Advancement and Fundamental Technologies in Medical Image Computing and Visualization, 10th Asian Conference on Computer Aided Surgery (ACCAS 2014) In conjunction with CARS 2014: Session 8: Educational Seminar, 2014/06/24, Fukuoka, JAPAN, Fukuoka International Congress Center
- 17) Kensaku Mori, Development of laparoscope surgery navigation system activated by utterance of anatomical name based on automated anatomical name recognition of abdominal blood vessels, International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, 2014/6/26, Fukuoka, JAPAN, Fukuoka International Congress Center
- 18) 森 健策、パネルディスカッション10 デジタルネイティブに対するバーチャルリアリティ応用の実践 計算解剖モデルに基づく診断治療支援、第102回日本泌尿器科学会総会、2014/4/25、兵庫県神戸市国際会議場
- 19) 森 健策、計算解剖と3Dプリンタ - 医療分野における3Dプリンタの活用法、近畿化学協会エレクトロニクス部会、2014/4/23、大阪府大阪市大阪科学技術センター
- 20) 梶田泰一、脳神経外科手術を支援する3D virtual 画像解析技術の開発、第43回日本神経放射線学会、2014/3/23、鳥取県米子市米子コンベンションセンター
- 21) 梶田泰一、機能的脳神経外科手術を支援する4次元画像、第53回日本定位・機能神経外科学会、2014/02/08、大阪府大阪市大阪国際会議場
- 22) Kensaku Mori, Computational Anatomy for Abdominal Area, 2nd Biomedical Image Analysis Summer School : Modalities, Methodologies & Clinical Research, 2013/07/09, Paris, France
- 23) Kensaku Mori, Computational Anatomy for Abdominal Area, 2nd Biomedical Image Analysis Summer School : Modalities, Methodologies & Clinical Research, 2013/07/08, Paris, France
- 24) Kensaku Mori, Workshop : Whole-Body Computational Anatomy and its Application to Computer Aided Diagnosis and Therapy, The 35th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC'13), 2013/07/04, Osaka, Japan, Osaka International Congress Center
- 25) 梶田泰一、機能的脳神経外科手術を支援する4次元画像生成技術の開発、第36回日本脳神経 CI 学会総会、2013/2/22 広島県広島市全日空ホテル
- 26) 梶田泰一、機能的脳神経外科手術を支援する4次元画像生成技術の開発、第52回日本定位・機能神経外科学会、2013/1/18、岡山県岡山市岡山コンベンションセンター
- 27) 梶田泰一、Neuro mate robot を使った次世代定位脳手術：アジア初の手術ロボットを安全に臨床応用するために、第54回日本手術看護学会東海地区支部会、2012/9/29、愛知県名古屋市長古屋ウインク愛知
- 28) 梶田泰一、ナビゲーション脳神経外科手術の展望、第32回日本脳神経外科コンgres総会、2012/5/11、神奈川県横浜市横浜国際平和会議場

[図書] (計3件)

- 1) 中坪大輔、梶田泰一、永井俊也. 先端医療技術研究所定位、先端医療シリーズ45 臨

- 床医のための最新脳神経外科 2014、590  
(158-161)
- 2) 梶田泰一、剣持 一、荒田純平. 先端医療技術研究所、先端医療シリーズ45 臨床医のための最新脳神経外科、2014、590  
(144-146)
- 3) 森 健策、メディカルレビュー社、  
Nephrology Frontier、2014、354(70-74)、

#### 6. 研究組織

##### (1)研究代表者

梶田 泰一 (Kajita, Yasukazu)

名古屋大学・大学院医学系研究科・准教授

研究者番号: 70303617

##### (2)研究分担者

森 健策 (Mori Kensaku)

名古屋大学・情報連携統括本部・教授

研究者番号: 10293664