

令和 4 年 6 月 23 日現在

機関番号：20103

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K12845

研究課題名（和文）脳腫瘍摘出術における熟練医の手技と臨床知を可視化する手術工程同定・解析システム

研究課題名（英文）Surgical Process Identification and Analyze System to Visualization of Skilled Surgeon Surgical Procedures and Clinical Knowledge in Brain Tumor Resection

研究代表者

佐藤 生馬（Sato, Ikuma）

公立ほこだて未来大学・システム情報科学部・准教授

研究者番号：00586563

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：脳腫瘍摘出術において、最大限の腫瘍切除と最小限の合併症とすることが重要である。熟練医は患者の腫瘍の位置やその周辺の脳構造や機能などを把握し、術後を考慮しながら腫瘍を切除する。そして、患者ごとに腫瘍の位置などが異なり、手術の流れや作業内容および手術時間も異なる。このため、若手医師や経験の浅い手術スタッフにとって、手術の流れを把握し、次の作業を予測することは困難である。本研究では、脳腫瘍摘出術における若手外科医や手術スタッフが熟練医の手術工程を把握できる手術工程同定・解析システムを実現することを目的としている。そこで、我々は手術工程モデルの提案および手術工程システムの開発を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義
術中情報および機械学習と深層学習を活用した医療情報解析により、熟練医の手技と臨床知を可視化する手術工程同定・解析システムを目指している。本提案システムが実現した暁には、類似症例における脳機能、腫瘍摘出率と合併症等関係から最適な治療法が明らかとなり、治療の均一化・標準化が可能となると期待される。同時に、手術スタッフと詳細な工程や腫瘍摘出進捗率の可視化と終了時刻予測による情報共有により手術の最適化が可能である。さらに、熟練医の判断プロセスや暗黙知を踏まえた臨床知を知ることができるので、若手医師の教育やAI手術ロボット開発の一助となると考える。

研究成果の概要（英文）：In glioma surgery, maximum tumor resection and minimum complications are important. An expert surgeon will resect the glioma based on the brain structure, function and tumors position for each patient, by considering postoperative complications. Therefore, surgical process, work contents and duration for surgery vary by cases. Hence, it is difficult for young surgeons and surgical staff to understand the surgical process and to predict the next work in awake surgery for glioma. We aim to develop the system of the surgical process identification / analysis that enables young surgeons and surgical staffs to understand surgical processes of the expert surgeon in real time during awake surgery for glioma. Therefore, we proposed a surgical process model, developed a surgical process identification system.

研究分野：コンピュータ外科

キーワード：覚醒下手術 脳腫瘍摘出術 手術工程 顕微鏡 手術ナビゲーションシステム 機械学習 深層学習 画像処理

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

熟練の外科医が必須となる困難な手術の一つである脳腫瘍摘出術では、詳細な手術状況と脳構造・機能の可視化および熟練医の術後の予後を予測する暗黙知や判断プロセスを含む臨床知(以下 臨床知)を明らかにし、これらをもちいた治療技術の均一化・標準化による全ての病院での治療成績の向上が望まれている。この脳腫瘍摘出術において、術後の5年生存率は腫瘍の摘出率と相関がある。このため、熟練医は己の知識・経験に基づき術後の予後と合併症を考慮して最大限の摘出を行う。この最大限の摘出のために、腫瘍周辺の正常部位も含めて摘出することとなる。しかし、摘出時に脳機能部位を傷つけると術後の合併症の発生につながる。よって、熟練医は患者ごとに異なる脳機能位置と構造および腫瘍位置を考慮し、腫瘍の摘出領域を判断しつつ摘出を行っている。これらの判断に用いられる熟練の経験と知識は暗黙知とされており、症例によっては熟練医でも判断に迷うことがある。さらに、手術をサポートする助手や看護師などの手術スタッフも、現状の手術工程と腫瘍の摘出状況などから熟練医の次の動作が予測できず、次に何をすればいいのかわからないことがある。このように、脳腫瘍摘出術は熟練の知識と経験および技術が必要とされており、手術状況可視化や各工程の進捗率と終了時刻および術後の予後の推定や熟練医の臨床知の可視化などによる支援が求められている。

2. 研究の目的

本研究では、脳腫瘍摘出術における熟練医の手技と暗黙知や判断プロセスを含む臨床知の解明や詳細な手術状況の可視化および予後予測などによる治療の均一化を目指し、熟練医の手技と臨床知を可視化する手術工程同定・解析システムを開発することを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、特に熟練医の手技と暗黙知や判断プロセスが必要となる覚醒下脳腫瘍摘出術を対象にした。そして、熟練医の手術手技や判断プロセスの可視化は、手術の流れを同定・解析することで可能であると仮定し、基盤技術である手術工程同定手法や手術工程同定に必要なアルゴリズムの提案し、手術工程同定・解析システムを開発する。そして、覚醒下脳腫瘍摘出術における手術工程を同定可能とするために、術中に取得可能な情報からの特徴を用いて、手術工程モデルの提案を行う。それと同時に、術中情報からの特徴量の抽出アルゴリズムの提案を行い、手術同定システムを開発し、精度や有効性の評価を行う。さらに、システムの機能拡張および精度向上するために、手術工程モデルや特徴量抽出アルゴリズムの改良を行う。このために以下の3つの研究を行った。

(1) 覚醒下脳腫瘍摘出術における手術工程モデルの構築と術工程同定システムの開発

覚醒下脳腫瘍摘出術における手術工程を同定するため、術中情報を用いて手術工程モデルを構築する。本研究で構築するモデルは、執刀医の手技や判断プロセスが含まれるとされる覚醒下手術におけるMRI撮像後の手術準備から腫瘍切除終了までの工程を対象とする。対象と類似の過去症例の手術映像および音響情報や手術ナビゲーションシステムログ(以下ログ情報)から取得した特徴量を手動で記録し、手術工程の要素とした。これら記録した情報をもとに4階層の手術工程と執刀医の手技が含まれる工程モデルを作成した。表1に定義した手術工程の定義を示す。

本システムによる手術工程同定は特徴量の抽出と手術工程モデルにもとづく機械学習により行われる。本システムの処理は3つのSTEPで構成される(図1)。そして、使用する手術工程モデルは、提案したモデルの第3層目までを用いる。

STEP1では、術中MRIとログ情報を用いた術具の種類および術中処置箇所を取得を行う。このステップでは、執刀医が手術内で使用した術具の種類とこの処置箇所を画像処理によって取得する。本研究における取得可能な術具の種類は、バイポーラと電気刺激プローブである。また、処置箇所の定義として、脳領域である「脳表、腫瘍内部、正常組織部位」

表1 手術工程の定義

1 st Layer	2 nd Layer	3 rd Layer	4 th Layer
p^1 : Pre-Tumor removal process	P^1_1 : Preparation	P^2_1 : Preparation	-
		P^2_2 : Verification of the tip position of the surgical instruments	-
	P^2_3 : Intra-operative rapid diagnosis	P^2_3 : Cortical mapping	P^2_{31} : Electric discharge
		P^2_4 : Treatment for convulsions and Functional field marking	P^2_{32} : Treatment for convulsions
p^2 : Tumor removal process	P^2_5 : Tumor resection	P^2_5 : Blood vessel coagulation and incision for arachnoid incision	P^2_{52} : Functional field marking
		P^2_6 : Arachnoid incision and Sampling of glioma	P^2_{51} : Arachnoid incision
	P^2_7 : Brain mapping	P^2_7 : Separating of vein and sulcus; Cortical incision	P^2_{71} : Sampling of glioma
		P^2_8 : Closing the passage of the blood vessel	P^2_{72} : Separating of vein
	P^2_9 : Brain mapping	P^2_9 : White matter incision, Tumor aspiration and removal	P^2_{91} : Separating of sulcus
		P^2_{10} : White mapping	P^2_{92} : Cortical incision
	P^2_{11} : Treatment for convulsions and Functional field marking	P^2_{11} : Electric discharge	
	P^2_{12} : Sampling of glioma	P^2_{12} : Functional field marking	
		P^2_{13} : Idling	

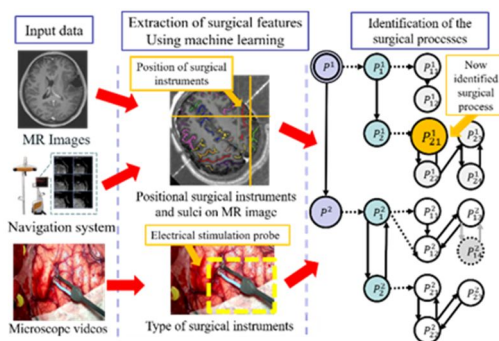


図1 手術工程同定手法概観

辺」と「術野外」の4つとする。取得前の処理として、脳領域を明確化させるために、術中MRI画像から脳領域をSPM (Statistical Parametric Mapping)による半自動セグメンテーションを行い、各領域にラベル付けを行う。そして、ラベル付けしたデータとログ情報を用いて、3次元画像処理により時間ごとの術具の種類と処置箇所を取得する。

STEP2では深層学習を用いた手術顕微鏡映像を用いた術具の種類の取得を行う。このステップでは、執刀医が手術内で使用した術具の種類を深層学習によって取得する。これは、手術ナビゲーションシステムのログ情報が欠損した場合やログ情報に記載されていない術具が使用された場合の補間としての役割を持つ。このため本研究では、主に術者が利き手で使用する3つの術具(バイポーラ、電気刺激プローブ、剪刀)の自動取得を深層学習手法のYOLO(You Only Look Ones)により、手術顕微鏡から映像を1フレームごとに取得して術具の種類の取得を行う。

STEP3では取得した情報による手術工程同定を行う。このステップでは手術工程同定は、機械学習により手術工程モデルにもとづいて同定する。本研究では、マルコフ性を持ちかつリアルタイム性を考慮するため、HMMの手法であり、階層型のモデルに合わせてHierarchical Hidden Markov Model (HHMM)を用いる。はじめにSTEP1およびSTEP2で取得された情報を統合し、1つの特徴量とし、1秒ごとの時系列特徴データとして値を保存する。次に、時系列ごとに並んだ特徴データを入力情報として、HHMMにより手術工程を同定する。同定処理は、手術工程モデルで定義した第1階層から順に行い、第3階層まで実施する。同定にあたり、計算量の低減のため、Viterbiアルゴリズムを採用し、最も確率の高い手術工程を結果として算出する。

(2) 術前・術中画像情報と立体顕微鏡画像を用いた処置状況の可視化手法と処置状況に合わせた情報提示手法の提案

本手法は、立体顕微鏡画像からステレオ画像を用いて術具や血管などの特徴量を抽出し、3次元情報を再構築し、術具先端との血管等の距離や軌跡などの処置状況を可視化可能とする。同時に、術前・術中MRIから抽出した血管、脳溝、腫瘍の画像情報を手術状況に合わせて、顕微鏡画像上に重畳表示することで直感的な脳構造や腫瘍位置の把握を可能とする。

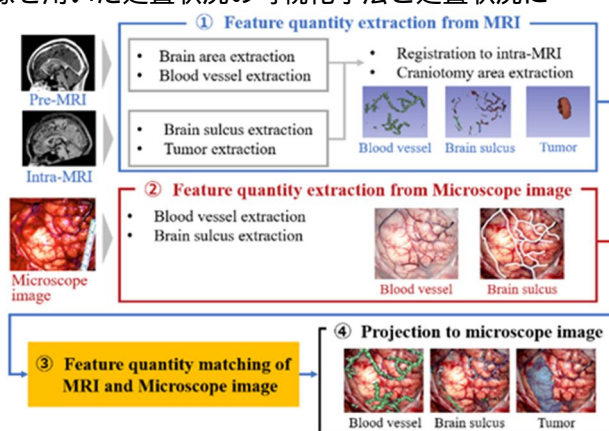


図2 MRI情報と顕微鏡情報の統合手法概観

このステレオ画像からの処置状況の可視化では、深層学習手法であるPix2PixHDにより、術具や血管情報を抽出する。そして、これらの情報を用いて、ステレオマッチングにより術具や脳表や血管の3次元情報化を行う。次に、術前や術中MRIから血管、脳溝、腫瘍といった特徴量の抽出し、非剛体レジストレーションにより、これらの情報を術中MRIに統合する(図2)。立体顕微鏡からの情報と統合した血管、脳溝、腫瘍の画像情報を手術状況に合わせて顕微鏡画像上に重畳表示することで直感的な脳構造や腫瘍位置の把握を可能とする。

(3) 手術工程同定のためのMRI画像および手術映像から特徴量抽出手法の提案

本研究では、覚醒下脳腫瘍摘出手術における手術工程の高精度な可視化と解析に向けて、顕微鏡画像および術前・術中MRI画像から深層学習を用いた特徴量抽出手法を提案する。本手法により、顕微鏡画像からの特徴量として、深層学習を用いて脳表面の血管および使用される術具を高精度に抽出可能とする。

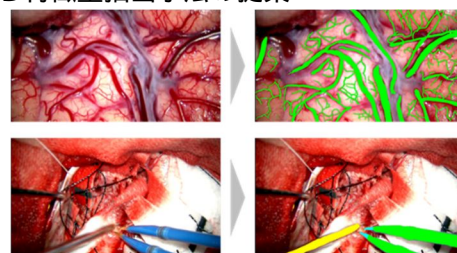


図3 顕微鏡からの特徴量抽出

4. 研究成果

(1) 覚醒下脳腫瘍摘出手術における手術工程モデルの構築と術工程同定システムの開発

本システムにおける手術同定精度を3名分の取得済みの過去症例を用いて評価した。そして、覚醒下脳腫瘍摘出手術が行われた3症例を用いた手術工程同定は12工程に分類した手術工程モデルにおいて90%を超える精度を得た(表2)。また、本システムにより、高精度に手術工程を同定し、可視化が可能であった。本システムのUIは、術中と術後に手術工程同定結果が確認可能なUI設計であ

表2 手術工程同定結果

	Patient A	Patient B	Patient C
Layer 1	96.8%	96.6%	95.6%
Layer 2	94.3%	96.5%	95.5%
Layer 3	91.1%	95.3%	90.1%

り、ユーザの操作により画面が切り替わる(図4)。術中で、入力された手術ナビゲーションシステムから得た情報や手術顕微鏡映像に合わせ、同定した結果を呈示する。術後では、術中と同様の情報に合わせ、手術の流れをグラフにより表現することで、直観的に手術工程の箇所が理解できる。また、術中にUIを切り替えることにより、この時点までの工程を同定し、術後の機能同様にUIから手術工程や動画などが確認可能である。

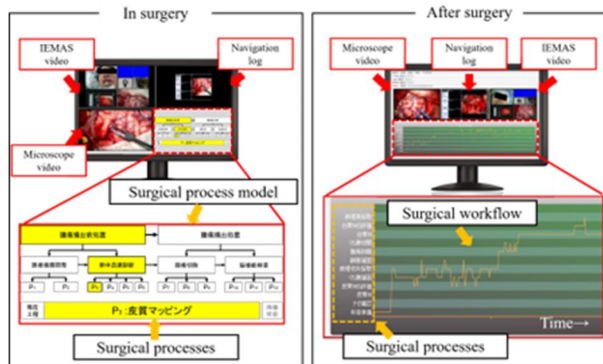


図4 手術工程同定システム UI

(2) 術前・術中画像情報と立体顕微鏡画像を用いた処置状況の可視化手法と処置状況に合わせた情報提示手法の提案

顕微鏡画像から手動で抽出した特徴量を正解データとし、本提案手法における術前・術中画像情報と顕微鏡画像の統合精度を評価した。結果、合精度評価の結果、術前・術中 MRI と顕微鏡画像から抽出した血管・脳溝情報の統合誤差は $6.5 \pm 3.4\text{pixel}$ であった。

処置位置周辺の脳構造・推定脳機能位置重畳表示の実装のため、術具と血管情報の接近タイミング検出機能の実証を行った。本実証結果を図5に示す。本実証では各顕微鏡画像フレームにおける、顕微鏡画像(図左上)視差画像(図中央上部)術具マスク画像(図右上)各フレームにおける術具先端のz座標と術具が血管情報に接近したタイミングの記録(図下)を行った。

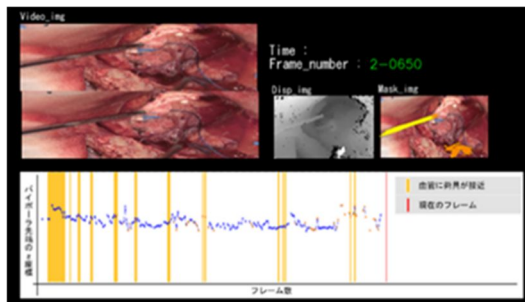


図5 術具と血管情報の接近状況取得結果

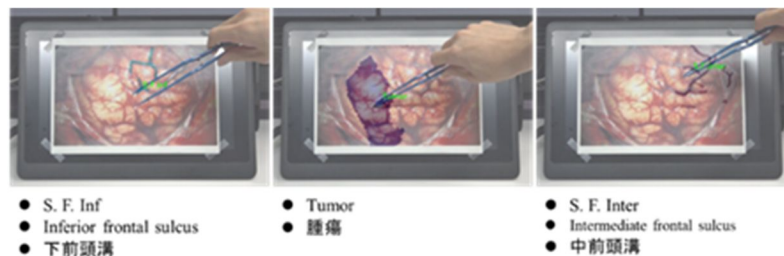


図6 処置位置周辺の脳構造重畳表示結果

処置位置周辺の脳構造・推定脳機能位置重畳表示機能の検証を行った。

この結果、術具が接近している脳構造のマスクを重畳表示可能とした。これらの機能によって、執刀医が処置をしている位置の脳構造の把握が可能となると考えられる。

(3) 手術工程同定のための MRI 画像および手術映像から特徴量抽出手法の提案

本手法による術具の正解画像と生成画像のIoU値および術具検出精度から評価した。それぞれの術具における正解画像と生成画像のIoU値はパイポラが95.6%、パイポラ先端が68.1%、電気刺激装置が96.1%、電気刺激装置先端が42.1%、剪刀が96.6%、吸引管が88.2%、鉗子が91.7%、鑷子が96.3%、ペンが88.0%であった。そして、手術顕微鏡動画を切り出し、その画像を術具ごとに、約20枚ずつ抜き出し、術具検出精度を評価した。結果、術具検出精度は、パイポラが99.0%、パイポラ先端が97.0%、電気刺激装置が96.0%、電気刺激装置先端が89.0%、剪刀が100%、吸引管が96.0%、鉗子が97.0%、鑷子が100%、ペンが90.0%であった。

本手法による顕微鏡画像からの血管情報抽出精度評価を行う。本実験では、顕微鏡動画に対して、評価用の血管情報正解データを10枚作成した。そして、正解データと生成データの一致度を画素単位で算出し、評価した。顕微鏡画像からの血管情報抽出精度評価結果を図7に示す。顕微鏡画像からの血管情報抽出精度における平均正解率は99.3%であった。

	元画像	生成画像	正解画像	正解率	F値
1				98.4%	96.3%
2				99.4%	95.0%
3				99.4%	96.1%
4				99.0%	96.1%
5				99.5%	97.2%
6				99.6%	96.2%
7				99.5%	95.0%
8				99.6%	96.0%
9				99.4%	94.6%
10				99.5%	95.2%
	全面像平均			99.3%	96.0%

図7 血管情報抽出精度評価結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 田村 学、佐藤 生馬、Jean-Francois MANGIN、藤野 雄一、正宗 賢、川俣 貴一、村垣 善浩	4. 巻 38
2. 論文標題 標準脳機能アトラスの投影による未来予測手術の具現化	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Medical Imaging Technology	6. 最初と最後の頁 222 ~ 227
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11409/mit.38.222	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 永井 智大、佐藤 生馬、藤野 雄一、堀瀬 友貴、楠田 佳緒、田村 学、村垣 善浩、正宗 賢	4. 巻 22
2. 論文標題 覚醒下脳腫瘍摘出術における手術工程同定システム	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本コンピュータ外科学会誌	6. 最初と最後の頁 87 ~ 101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5759/jscas.22.87	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Tamura Manabu, Kurihara Hiroyuki, Saito Taiichi, Nitta Masayuki, Maruyama Takashi, Tsuzuki Shunsuke, Fukui Atsushi, Koriyama Shunichi, Kawamata Takakazu, Muragaki Yoshihiro	4. 巻 12
2. 論文標題 Combining Pre-operative Diffusion Tensor Images and Intraoperative Magnetic Resonance Images in the Navigation Is Useful for Detecting White Matter Tracts During Glioma Surgery	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Frontiers in Neurology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fneur.2021.805952	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Chen Xiaoshuai, Shirai Ryosuke, Masamune Ken, Tamura Manabu, Muragaki Yoshihiro, Sase Kazuya, Tsujita Teppei, Konno Atsushi	4. 巻 4
2. 論文標題 Numerical Calculation Method for Brain Shift Based on Hydrostatics and Dynamic FEM	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics	6. 最初と最後の頁 368 ~ 380
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/tmrb.2022.3168075	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 A. Sato, I. Sato, K. Ohshima, Y. Fujino, K. Kusuda, Y. Horise, M. Tamura, Y. Muragaki, K. Masamune
2. 発表標題 Overlay of brain structure and estimated brain function position onto microscopy using pre- and intra- operative MRI in awake surgery for glioma
3. 学会等名 Computer Assisted Radiology and Surgery Proceedings of the 34th International Congress and Exhibition (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐藤新, 佐藤生馬, 大島一真, 藤野雄一, 楠田佳緒, 堀瀬友貴, 田村学, 村垣善浩, 正宗賢
2. 発表標題 覚醒下脳腫瘍摘出術における術中脳構造・推定脳機能位置重畳表示
3. 学会等名 第29回日本コンピュータ外科学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田村学, Mangin Jean-Francois, 丸山隆志, 齋藤太一, 新田雅之, 都築俊介, 福井敦, 生田聡子, 正宗賢, 伊関洋, 川俣貴一, 村垣善浩
2. 発表標題 脳溝自動命名ソフト「BrainVISA」の臨床活用 -てんかん診断から覚醒下手術まで-
3. 学会等名 第79日本脳神経外科学会総会シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田村学
2. 発表標題 標準脳機能アトラスの投影による未来予測手術の具現化
3. 学会等名 東京女子医科大学・早稲田大学研究交流会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 A. Sato, I. Sato, K. Ohshima, Y. Fujino, K. Kusuda, Y. Horise, M. Tamura, Y. Muragaki, K. Masamune
2. 発表標題 Proposal of Method for Integration Pre-Operative and Intra Operative MRI and Microscope Images in Brain Tumor Surgery
3. 学会等名 The 17th International Conference on Biomedical Engineering (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 瀬谷巧美, 佐藤生馬, 南部優太, 藤野雄一, 楠田佳緒, 堀瀬友貴, 田村学, 正宗賢, 村垣善浩
2. 発表標題 覚醒下脳腫瘍摘出術における術前・術中情報を用いた手術工程・手技可視化手法の検討
3. 学会等名 第28回日本コンピュータ外科学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤新, 佐藤生馬, 大島一真, 藤野雄一, 楠田佳緒, 堀瀬友貴, 田村学, 村垣善浩, 正宗賢
2. 発表標題 脳腫瘍摘出術における術前・術中画像情報と顕微鏡画像の統合手法の提案
3. 学会等名 第28回日本コンピュータ外科学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤生馬, 田村学, 山口智子, 楠田佳緒, 吉光喜太郎, 藤野雄一, 村垣善浩, 正宗賢
2. 発表標題 腫瘍摘出術における立体顕微鏡画像からの術具位置による情報呈示方法の検討
3. 学会等名 第30回日本コンピュータ外科学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中村朝陽, 佐藤生馬, 田村学, 山口智子, 楠田佳緒, 吉光喜太郎, 村垣善浩, 正宗賢, 藤野雄一
2. 発表標題 高速通信ネットワークを介した脳腫瘍摘出手術工程解析における外科手術支援環境の構築
3. 学会等名 医用画像研究会 (MI)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 田村学, 佐藤生馬, 村垣善浩	4. 発行年 2020年
2. 出版社 オーム社	5. 総ページ数 9
3. 書名 「放射線治療AIと外科治療AI」のうち . AI外科治療編, Chapter4 AIによる脳外科治療を担当	

1. 著者名 Tamura M, Sato I, Muragaki Y	4. 発行年 2022年
2. 出版社 Springer Singapore	5. 総ページ数 pp. 173 - 180
3. 書名 Normalized Brain Datasets with Functional Information Predict the Glioma Surgery. In: Hashizume M (ed) Multidisciplinary Computational Anatomy: Toward Integration of Artificial Intelligence with MCA-based Medicine	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	岡本 淳 (Okamoto Jun) (10409683)	東京女子医科大学・医学部・非常勤講師 (32653)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	田村 学 (Tamura Manabu) (80453174)	東京女子医科大学・医学部・准教授 (32653)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関