

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 15 日現在

機関番号：12602

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2020

課題番号：16H03191

研究課題名(和文) 軟組織を対象とした手術ナビゲーションのための臓器位置・変形計測に関する研究

研究課題名(英文) Study on the measurement of soft-tissue position and deformation for surgical navigations

研究代表者

中島 義和 (Nakajima, Yoshikazu)

東京医科歯科大学・生体材料工学研究所・教授

研究者番号：40343256

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,400,000円

研究成果の概要(和文)：可視光画像からtextureを持った表面形状を計測し、形状情報とtextureの両方を用いた安定で高精度な物体移動と変形追跡を実現した。レーザ光デバイスと高速カメラによるステレオ形状計測を用い、さらに、形状情報とtextureを用いた物体移動と変形追跡を行った。形状照合による相対位置姿勢計算と、texture照合による表面上の対応点探索の統合手法について検討した。具体的には、空間統合処理を行った後、非線形変形にも対応した対応点探索を行った。さらに、それを手術プロジェクションマッピングシステムへ実装し、変形を補正して誤差1.2 mmで手術計画を投影した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

医療に使用できるレベルの高信頼性、高精度な可視光による画像3次元計測手法、およびそれを用いた物体追跡手法を確立した。具体的には、可視光画像からtextureを持った表面形状を計測し、形状情報とtextureの両方を用いた安定で高精度な物体移動と変形追跡を実現した。変形を伴う物体追跡では2次元画像の対応点探索手法をそのまま適用できないため、形状とテクスチャの空間統合処理を行った後、非線形対応点探索を行った。さらに、それを手術ナビゲーションに実装してマーカレス手術ナビゲーションシステムを試作し、性能を確認した。臓器変形推定誤差は1 mm以下であり、従来法と比べて半減した。

研究成果の概要(英文)：We provided the surface shapes and textures with laser-beam pattern projection and camera image capturing. In addition, we provided its application to estimate soft-tissue deformation and finally projected a surgical plan directory onto the brain surfaces by projection mapping accurately. A laser optical device and a high-speed camera were employed to measure a textured surface of the object with stereo measurement, and then texture image processing and non-linear deformation tracking provided high-accurate compensation of soft-tissue deformation during surgeries. It was implemented into a projection mapping system that we have developed as a surgical navigation. The system showed the performance of surgical-plan projection within the errors around 1.2 mm.

研究分野：医用システム

キーワード：臓器変形トラッキング 手術支援 形状計測 非接触計測 ブレインシフト

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

高精度な手術ナビゲーションを実現するためには、術中における臓器移動の補正に加え、脳外科手術中に生じるブレインシフト（脳の変形）や外科手術中に生じる肝臓など軟組織の変形を補正することが求められる。

手術ナビゲーションシステムでは、術中における患部の移動量を補正するため、随時、患部の位置を計測し更新する。現在、臨床に導入されている手術ナビゲーションシステムでは、計測方式に関わらず、例えば光学式、磁気式、あるいは超音波式などいずれであるかに関わらず、位置計測用のマーカ（図1左ならびに中央）を臓器の対象部位に固定する必要がある。臓器へのマーカの固定は、皮膚や筋肉組織の切開などの外科的な侵襲を伴うだけでなく、時にマーカが術野の一部を覆ってしまい手術行為を妨げる要因になり得る。また、マーカを固定する方法は、骨などの固い組織に対しては十分であるが、脳や肝臓など柔らかく変形を生じる組織に対しては、固定が難しく、さらに変形量の捕捉に十分な空間分解能を得るために多くのマーカを必要とすることから、適しているとは言い難い。これら軟組織に対しては、非接触計測が有効である。

非接触かつマーカを用いない方法としては、レーザ測距による臓器位置補正が試されている。しかしながら、1点かつセンサに対して奥行きのみでの計測では、測距方向に直交する移動成分が得られず、補正の精度が不十分であった。これに対して、ラインレーザ光投影によるステレオ形状計測あるいはモアレ法により、臓器表面の形状を3次元計測し、位置補正する手法が試されている。3次元表面形状を獲得して移動前後の形状を対応付けすることにより、臓器の剛体的な移動量（平行移動量および回転移動量）が推定できるが、この手法では臓器の変形に対応できない。術中MRIによるボリューム画像計測についても同様である。これらに対して臓器変形量を計測するため、ICPアルゴリズム（表面形状の再近傍点探索による対応付け）に基づく非線形変形推定が試みられているが、多くの誤対応を生じ、必ずしも十分な精度を得られていない。

我々は、軟組織表面を対象とし、非接触でかつマーカを使わない移動量ならびに変形量の計測手法を確立した。まず、臓器表面をスキャンし3次元形状を得る。同時に、texture（模様）を取得し、textured形状（図1右）を生成する。Textureは、変形量計算における対応点探索に利用して変形量推定の安定化ならびに高精度化を図る。脳、皮膚ならびに腹腔内臓器の多くはその表面にtextureを有している。形状に加えてtextureを利用することで、安定にかつ高精度に移動量と変形量を推定できる。本手法は、軟組織を対象とした移動・変形計測を実現する手法であり、世界に先駆けて、軟組織手術ナビゲーションを実用化に導くものである。



図1 光学式マーカの例（左：赤外LEDマーカ，中央：反射式マーカ）と提案するtextured形状計測の例（右：胃内壁）

### 2. 研究の目的

本研究は、我々が、医用画像計測、空間統合手術ナビゲーションシステム、手術支援ロボットの研究開発で培ってきた技術と経験を生かし、医療に使用できるレベルの高信頼性、高精度な可視光による画像3次元計測を確立するものである。形状情報に加えて表面上のtexture情報を持つ3次元textured形状を計測し、物体移動・変形追跡を行う。

現在、手術支援における3次元計測は、光学マーカを利用した計測が主である。光学式計測手法は、磁気や超音波による計測手法に比べ、計測環境変化の影響を受けにくく、手術環境下でも

安定して高精度な計測が可能である。しかしながら、光学マーカを用いる手法は、人体への光学マーカの固定を必要とし、利便性、患者への侵襲などの課題が残る。3次元形状計測に基づく手法は光学マーカを必要としないことから利便性が向上することに加え、マーカ固定が出来ずに適用困難であった手術手技、例えば内視鏡下手術などに適用範囲を拡げることができる。従来手法では、レーザデバイス-カメラシステムやステレオ/マルチカメラシステムで3次元形状計測を行い、表面曲率など局所形状情報を用いて形状間の対応付けを行い、物体追跡を行っていた。代表的なシステムとしては、マイクロソフト社製 Kinect やリープモーション社製ジェスチャーマウス Leap Motion があるが、いずれも形状照合による追跡である。手術支援において計測対象である皮膚や内臓は緩やかな曲面形状であることが多いが、緩やかな曲面で構成される物体を対象としたとき形状照合による追跡手法では十分な精度および安定性が得られないことがあり、これらのシステムを患部の臓器追跡に適用することは出来ない。

医師が臓器のわずかな移動量や変形量を texture に基づいて把握しているように、texture を利用することで緩やかな曲面に対しても高精度な移動・変形追跡を実現できる。我々が提案する手法は形状情報と texture の両方を利用した手法であり、初めて医療応用出来る計測の安定性、精度の高さを実現する。

### 3. 研究の方法

本研究は、医療に使用できるレベルの高信頼性、高精度な可視光による画像3次元計測手法、およびそれを用いた物体追跡手法を確立するものである。具体的には、可視光画像から texture を持った表面形状を計測し、形状情報と texture の両方を用いた安定で高精度な物体移動・変形追跡を実現し、その高精度化、高速化を目指す。手術手技によって計測の対象や周辺環境は変わるため、レーザ光デバイスと高速カメラによるステレオ形状計測を検討する。レーザ光デバイスと高速カメラによるステレオ形状計測を用い、位相差法、多重解像度空間コーディング法を実装し、医療応用における性能を検証する。

形状情報と texture を用いた物体移動・変形追跡を行い、形状照合による相対位置姿勢計算と、texture 照合による表面上の対応点探索の統合手法について研究する。変形を伴う物体追跡の場合は空間形状が異なるため、2次元画像の対応点探索手法をそのまま適用できない。そのため、空間統合処理を行った後、非線形変形にも対応した対応点探索を行う。

さらに、それを手術ナビゲーションに実装してマーカレス手術ナビゲーションシステムを実現する。具体的には、我々が研究開発を進めてきた手術プロジェクションマッピング（以下、PM と表す）システムへ導入し（図 2）、その有用性を検証する。

### 4. 研究成果

レーザ光デバイスと高速カメラによるステレオ形状計測について、計測システムを手術ナビゲーションシステムに実装し、手術誘導プロジェクションマッピングを行なった。実装したシステムの概要ならびに処理フローを Fig. 1 に示す。デバイスは縦横それぞれの正弦波パターンを、位相をずらしながら照射し、それを高速カメラで撮影した。撮影した画像の位相変化より、対象臓器の表面形状を復元した。また、同カメラを用いて撮影した対象臓器表面のテクスチャ画像から、Graph cut により脳表面領域を抽出した。用いた脳表面テクスチャ画像に対し Frangi の線強調フィルタを適用し、脳血管ならびにそれらの結節点を抽出した。脳血管ならびに結節点の3次元位置情報をもとに変形量を求め、またそれに合わせて術前手術計画データを変形させて、幾何的整合性をとった3次元術計画データ（画像）を生成、レーザプロジェクタにより術野に投射した。

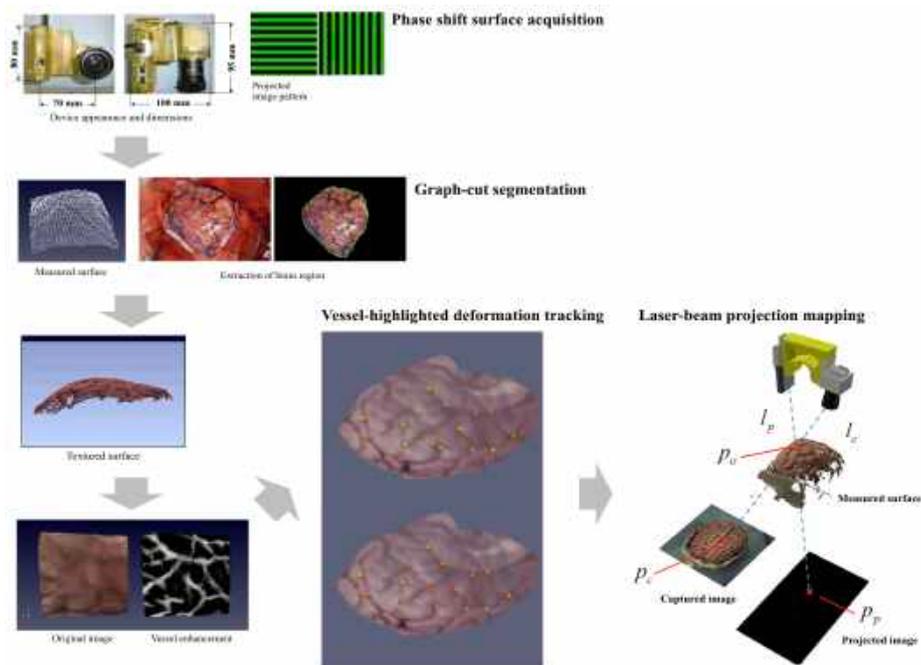


Fig. 1 Processing flow of the method.

ブタ摘出脳を用いた実験により臓器変形のトラッキング誤差を検証した。実験概要を **Fig. 2** に示す。ブタ摘出脳は 5 つ使い、**Fig. 2(a), 2(b)** に示すようにそれぞれ脳側方からの圧縮力ならびに脳下方からの伸張力を与え、脳を変形させた。変形量は 300-500 mm であった。**Fig. 2(c)** に示すように変形前および変形後の脳血管結節点の三次元位置を光学式位置計測センサ (OPTOTRAK™, Northern Digital Inc., Canada) で計測し正解とした。誤差検証に用いた脳血管結節点群は **Fig. 2(d)** に示すように 15 点を用い、これら特徴点群の RMSE を算出した。

結果を **Fig. 3** に示す。トラッキングは提案手法の他に iterative closest point (ICP) 法ならびに non-rigid ICP 法を用いて行われ、誤差を比較した。**Fig. 3(a)** は脳伸張変形、**Fig. 3(b)** は脳圧縮変形の結果であり、横軸はそれぞれに与えた変形量、縦軸はそれら特徴点群の RMSE である。ICP による推定誤差は伸張変形において 0.7 mm から 1.1 mm まで変形量増加につれて増加し、また圧縮変形において 0.9 mm から 1.1 mm まで概ね線形に変形した。Non-rigid ICP による推定では、伸張変形においては ICP と比べて緩やかではあるが変形量増加について増加した。圧縮変形においては、明らかな増加は見られず RMSE は 0.7 mm 近傍で推移した。提案法による推定はいずれの場合においてもこれら 2 つの手法より小さな誤差を示し、概ね 0.8 mm 以下であった。

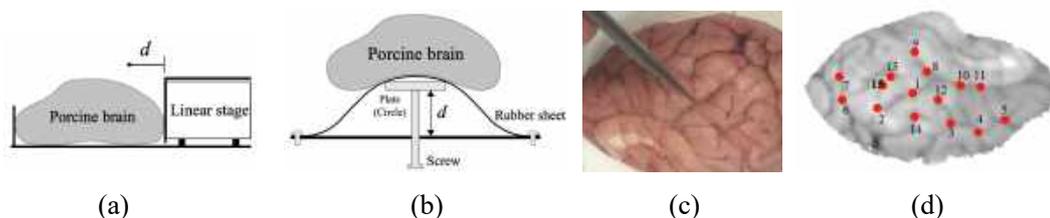


Fig. 2 Experimental set up: (a) vertical extension, (b) horizontal compression, (c) localizing vessel bifurcations, and (d) localized bifurcations.

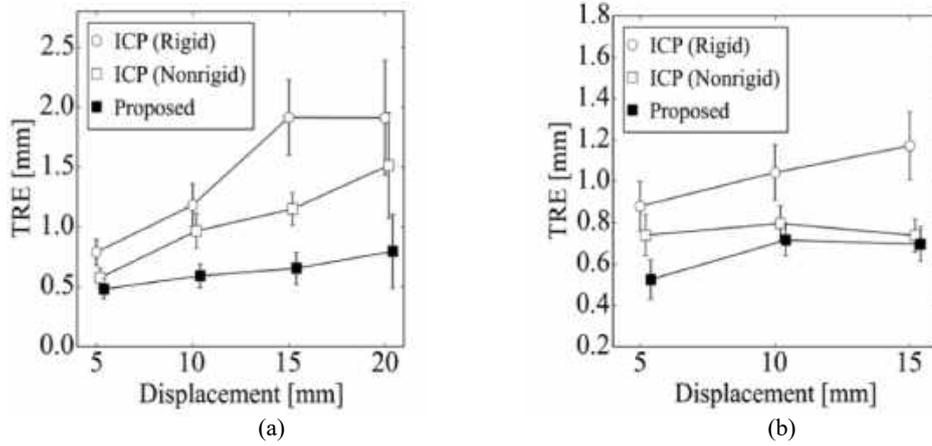


Fig. 3 Accuracy of brain deformation tracking: (a) compression deformity and (b) extension deformity.

Fig. 3 に示した結果のうち、non-rigid ICP と提案手法による誤差を、脳表面に沿った誤差成分  $TRE_H$  と垂直な誤差成分  $TRE_V$  に分解した。結果を Fig. 4 に示す。横軸に脳変形量、縦軸に推定誤差を示し、それぞれの変形量において左に non-rigid ICP による推定誤差、右に提案手法による推定誤差を示す。推定誤差のうち脳表面に垂直な成分は、いずれにおいても提案手法による推定誤差がわずかに小さくなったものの、non-rigid ICP による推定誤差と提案手法による推定誤差で明瞭な差はみられなかった。脳表面に沿った推定誤差成分は、2つの手法の間で違いがみられ、提案手法による推定誤差は non-rigid ICP による推定誤差に比べおおむね半減した。

提案手法を手術支援プロジェクションマッピングシステムに実装した。投影対象にはラバーならびにプラスチック製脳ファントムを用いた。仮想的に手術計画マップを作成し、脳の位置姿勢移動ならびに変形を補正しながら手術計画をファントム表面に投影した。プロジェクションマッピングの様子を Fig. 5 に示す。計測時間とトラッキング時間は、それぞれ 1.7 秒および 1.5 秒であった。剛体物体へのプロジェクション位置誤差は 0.1 mm であり、変形推定誤差も含めた誤差は 1.2 mm であった。

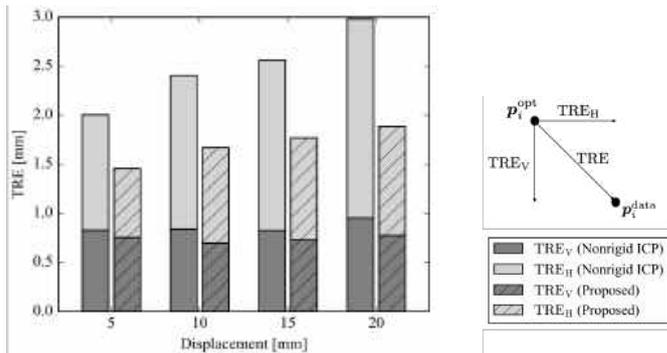


Fig. 4. Error components of brain deformation tracking

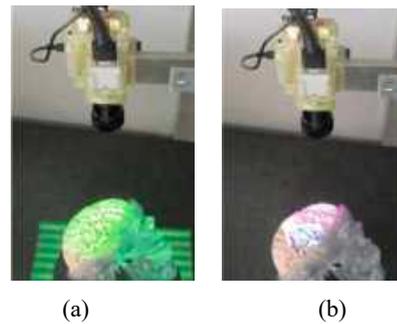


Fig. 5. Projection mapping for surgical plan visualization: (a) shape acquisition and (b) plan visualization

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Yoshikazu Nakajima, Yoshio Sohma, Jue Jiang	4. 巻 32(3)
2. 論文標題 Laser-beam projection mapping with the compensation of soft-tissue deformation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Sensors and Materials	6. 最初と最後の頁 935-945
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.18494/SAM.2020.2386	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 該当する
1. 著者名 Jue Jiang, Yoshikazu Nakajima, Yoshio Sohma, Toki Saito, Taichi Kin, Hiroshi Oyama and Nobuhito Saito	4. 巻 11(9)
2. 論文標題 Marker-less Tracking of Brain Surface Deformations by Non-rigid Registration Integrating Shape and Texture International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery (IJCARS)	6. 最初と最後の頁 1687-1701
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s11548-016-1358-7	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 J. Kim, Y. Nakajima, K. Kobayashi	4. 巻 23(1)
2. 論文標題 A Suction-Fixing, Stiffness-Tunable Liver Manipulator for Laparoscopic Surgeries	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE/ASME Trans. on Mechatronics	6. 最初と最後の頁 262-273
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TMECH.2017.2777507	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 Y. Nakajima, R. Suzuki, Y. Suzuki, T. Sugino, T. Kawase, S. Onogi, H. Seki, T. Fujiwara, K. Ouchi	4. 巻 15(10)
2. 論文標題 Suction-fixing surgical device for assisting liver manipulation with laparoscopic forceps	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery	6. 最初と最後の頁 1653-1664
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s11548-020-02239-3	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 Y. Nakajima, T. Kawase, R. Suzuki, T. Sugino, S. Onogi, K. Kawashima, K. Ouchi	4. 巻 33(5)
2. 論文標題 Finite Element Method Analysis and Structure Design of Stiffness-tunable Beam-shaped Material	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Sensors and Materials	6. 最初と最後の頁 1703-1716
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18494/SAM.2021.3333	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19件 (うち招待講演 8件 / うち国際学会 15件)

1. 発表者名 Y. Nakajima, Y. Sohma, J. Jiang
2. 発表標題 Projection-mapping navigation with image deformation tracking for brain surgeries
3. 学会等名 2019 Computer Assisted Radiology and Surgery International Congress (CARS 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中島義和, Jue Jiang, 相馬芳男
2. 発表標題 臓器変形トラッキング機能を有する手術支援プロジェクションマッピングシステムの開発
3. 学会等名 第58回日本生体医工学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshikazu Nakajima
2. 発表標題 AI collaboration for medicine and its feasibility for supporting population aging
3. 学会等名 The 22nd East-Asia round table meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshikazu Nakajima
2. 発表標題 AI collaboration towards strong AI realization
3. 学会等名 The 7th international symposium on the Dialogue for Global Innovation (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshikazu Nakajima
2. 発表標題 Computerization of Medicine and Biology
3. 学会等名 International Symposium on Frontier of Science, Technology and Engineering (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Joonhwan Kim, Yoshikazu Nakajima, Hiroshi Tsukihara, Hidemichi Kiyomatsu, Sakura Uto, Ichiro Sakuma
2. 発表標題 Effectiveness and invasiveness evaluation of the organ manipulation finger in in-vivo trial
3. 学会等名 The 14th Asian Conference on Computer Aided Surgery (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中島義和
2. 発表標題 ステレオ透視撮影による刺入直線計画とレーザー光誘導による穿刺ナビゲーション
3. 学会等名 第27回日本コンピューター外科学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yoshikazu Nakajima
2. 発表標題 Strong-AI data analysis in medicine by using autonomous networking of small and weak AIs
3. 学会等名 The 6th International Symposium of Dialogue for Global Innovation on Technology and Humanity (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yoshikazu Nakajima
2. 発表標題 Knowledge sharing among small AI computers in medicine
3. 学会等名 IKCEST International Symposium 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yoshikazu Nakajima
2. 発表標題 Autonomous Networking of Small and Weak-AI Computers and Its Applications for Medical Assistance
3. 学会等名 The 21st East Asia Round Table Meeting of Academies of Engineering (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Gaibin and Y. Nakajima
2. 発表標題 Recognizing of hand pose in basic surgical tasks using depth images
3. 学会等名 017 Computer Assisted Radiology and Surgery International Congress (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Y. Nakajima
2. 発表標題 Artificial Intelligence and IoT in Medicine
3. 学会等名 International Symposium on Frontier of Science, Technology and Engineering (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Y. Nakajima
2. 発表標題 Integration of Sensing, Simulation and AI Analysis in Medicine
3. 学会等名 The 2nd International Symposium on Biomedical Engineering (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Y. Nakajima
2. 発表標題 Computer integrated analysis of pre- and intra-operative surgical data
3. 学会等名 The 4th Joint Symposium between IBB/TMDU and Chulalongkorn University on Biomedical Materials and Engineering (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 J. Kim, Y. Nakajima, K. Kobayshi
2. 発表標題 Suction-fixing and stiffness-tuning manipulator for laparoscopic liver resection
3. 学会等名 2017 Computer Assisted Radiology and Surgery International Congress (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 K. Sukondhasingha, Y. Nakajima
2. 発表標題 Sucker design improvement of stiffness-adjustable grasping pads for laparoscopic surgeries
3. 学会等名 2019 Computer Assisted Radiology and Surgery International Congress (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Nakajima, R. Suzuki, J.Kim, T. Sugino, K. Sukondhasingha, K. Ouchi
2. 発表標題 Stiffness-tunable device for assisting liver manipulation in laparoscopic surgeries
3. 学会等名 2019 Asian Conference on Computer Assisted Surgery (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中島 義和
2. 発表標題 可変剛性機構を備えた臓器マニピュレーションハンドル
3. 学会等名 フレキシブル医療IT研究会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Nakajima, R. Suzuki, Y. Suzuki, T. Sugino, H. Seki, T. Fujiwara, K. Ouchi
2. 発表標題 Suction-fixing surgical device for assisting liver manipulation with laparoscopic forceps
3. 学会等名 2020 Computer Assisted Radiology and Surgery International Congress (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 臓器追跡装置、臓器追跡方法及び臓器追跡プログラム	発明者 中島 義和	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2018-48534	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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	齋藤 季  (SAITO Toki)  (00646466)	東京大学・大学院医学系研究科(医学部)・特任助教   (12601)	
研究分担者	小山 博史  (OYAMA Hiroshi)  (30194640)	東京大学・大学院医学系研究科(医学部)・教授   (12601)	
研究分担者	金 太一  (KIN Taichi)  (90447392)	東京大学・医学部附属病院・助教   (12601)	
研究分担者	中富 浩文  (NAKATOMI Hirofumi)  (10420209)	東京大学・医学部附属病院・准教授   (12601)	R1(H31,2019)年度まで分担者

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
---------	---------