

平成 29 年 6 月 22 日現在

機関番号：82723

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2012～2016

課題番号：24686029

研究課題名(和文)機能性流体の鎖状クラスタ切断抵抗を利用した力学的脳組織模擬手法の確立

研究課題名(英文) Establishment of mechanical imitation method for brain tissue utilizing cutting resistance force of chain-like cluster of functional fluid

研究代表者

辻田 哲平(Tsujita, Teppei)

防衛大学校(総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、電気情報学群及びシステム工・その他部局等・准教授)

研究者番号：40554473

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：医師は様々な手術器械を使用しながら手術を行うため、手術シミュレータにおいても、様々な外科器具を介して反力を提示する必要がある。そこで、MR流体を用いた脳外科手術シミュレータ用の遭遇型力覚提示装置を開発している。本研究では、2自由度力覚提示のための力制御器を提案および左右の手に独立した反力を表示できる8自由度力覚提示装置の開発を行った。提案した制御器では、ブタ肝臓の切断力を模倣することに成功した。また、8自由度力覚提示装置では、脳外科手術訓練のために、2つの力覚提示部を有しそれぞれを4自由度のモーションテーブルで駆動することで、両手に持った術具に対して独立に力を提示可能とした。

研究成果の概要(英文)：During surgery, a surgeon uses a variety of surgical instruments. Therefore, a haptic interface for surgical training should be able to display reaction force through various surgical instruments. Based on this concept, a novel encountered-type haptic interface using MR (Magneto-Rheological) fluid for neurosurgery simulators have been developed. In this research, force feedback controller for 2 DOF force display is proposed and an 8 DOF haptic interface which can display independent reaction force on each hand is developed. The proposed force feedback controller can imitate cutting force of a swine liver using MR fluid and 2 DOF motion table driven by servo motors. The newly developed 8DOF haptic interface has two display parts which consists of MR fluid, a container of the fluid, a force sensor, an electromagnet coil and a yoke. The display part is miniaturized based on magnetic field analysis and moved by a 4 DOF motion table for the application of neurosurgery training.

研究分野：ロボット工学

キーワード：MR流体 機能性流体 力覚提示装置 ハプティックインタフェース 手術シミュレータ

1. 研究開始当初の背景

医療現場において、手術計画の検討や技術向上のために力触覚提示装置を有した手術シミュレータの導入が必要である。手術は様々な術具を交換しながら行われ、シミュレータにおいても実物と同形の術具を脱着可能とし、様々な術具を介した力触覚を提示することで臨場感が増す。特に脳外科手術においては、脳組織圧迫に伴う脳細胞破壊を回避しつつ繊細な手技を行う必要があり、力触覚情報の提示が重要であるが、様々な術具を介した力触覚提示が可能な脳外科手術用シミュレータの実用化はなされていない。

先行研究において、モータで駆動される力触覚提示装置に機械的に術具を固定している例[1][2]があるが、着脱に手間がかかり現実感を損なう。そこで、Bingham 流体としての挙動を示す機能性流体である MR (Magnetorheological) 流体[3]を仮想生体組織に見立て、MR 流体の鎖状クラスタに対して術具で切断等の操作を行う革新的手段を提案する。術具の交換が容易であり、術具と MR 流体が接触していない時の拘束感が無い利点を持ち、手術シミュレータの現実感を飛躍的に向上することができる。

2. 研究の目的

(1) これまで MR 流体を仮想臓器に見立て、直接手術器械で MR 流体に対して切断等の操作を行うことができ、器具の交換が容易な 2 自由度遭遇型力覚提示装置を開発してきた(雑誌論文)。この装置を用いて、生体組織の切断した際の抵抗力を提示するための指令値とするために、豚レバー切断実験を行った。

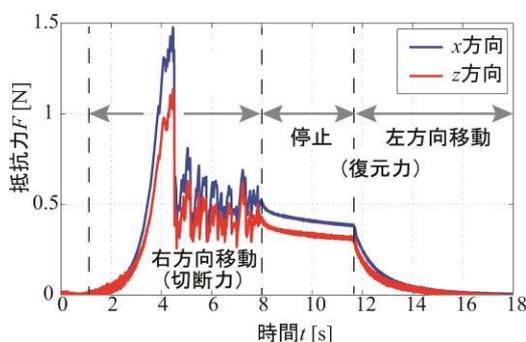


図 1 レバーの切断力および復元力

豚レバーを台の上に接着剤で固定し、THK 社製リアアクチュエータ GLM-10 でフェザー社製外科手術用ブレード No.10 を移動させ、その際の力を ATI Industrial Automation 社製 6 軸力センサ Nano 17 によって測定した。レバーは、実験日の早朝に屠殺された豚から取り出し、立方体形状(50 mm×30 mm×10 mm)に切り出して使用した。また、ブレードの取り付け角度は 60°、

切断深さは 5 mm とした。ブレードは 5 mm/s で右方向に移動距離 30 mm 程度レバーを切断しながら進み、2 秒弱停止した後、左方向に 1 mm/s で移動した。切断方向を x 軸方向、鉛直上方向を z 軸方向と定義し、図 1 に測定された各方向の力履歴を示す。この実験より明らかなように、生体組織の切断時には、切断方向と鉛直方向の二方向に力が計測されており、力覚提示装置においても、この二方向の力を提示する必要がある。そこで、本研究において、垂直方向の力も考慮した二方向力覚提示制御則を提案する。

(2) また、実際の手術では、多くの術具を頻りに交換しながら行われるため、手術シミュレータにおいてもこれらの術具を容易に交換できることが望ましい。より現実感の高い脳外科手術シミュレータを実現するために、2 自由度遭遇型力覚提示装置を拡張し、脳外科手術を想定して左右の手に持った術具を介して独立した力覚を提示可能な装置を開発する。

3. 研究の方法

(1) 図 1 において、時刻 $t=1$ s から 4 s 程度まで、レバーがブレードによって押され急激に力が上昇している。反力が x 軸方向、z 軸方向ともに 1~1.5 N 程度まで上昇した後、振動的な力が計測されている。この振動的な力が発生している区間において、組織が切断されているものとする。時刻 $t=8$ s においてブレードが停止した後も、0.5 N 弱の力が観測されて続けている。これは、レバーの有する弾性によってブレードに復元力が加わり続けているためと考えられる。時刻 $t>11.6$ s においてブレードが左方向に進むとともに、レバーを圧縮していた力が開放され、徐々に力が低下している。これらの趨勢は、x 軸方向の力 F_x および z 軸方向の力 F_z ともに有していることが図より見て取れる。また、鉛直方向の力 F_z は、切断方向の力 F_x に比べてわずかに小さいが、概ね同程度の力が観測されており、無視することはできない。従って、力覚提示装置においても、この F_x および F_z の双方の力を再現する。

(2) 一方、2 自由度力覚提示装置では幅 5 mm × 高さ 20 mm × 奥行き 80 mm の上部が開放された容器に MR 流体を入れ、開放部から術具を挿入し、移動させることで生体組織の切断感覚等を提示した。この容器の幅が 5 mm と狭かったため、幅の広い脳ペラ等の術具を挿入することができなかった。また、左右の手に持った術具を介して独立した力覚を提示ができず、実際の手術を再現するには限界があった。そこで以下の設計要求をもとに、新たに遭遇型力覚提示装置を開発する。

1. 脳外科手術で使用される脳ペラや剪刀を利用可能とする。
2. 術具による切断・圧排が可能な方向を拡

- 大する．
3. 左右の手に対して独立に並進 3 自由度の大変形粘弾性特性を提示可能とする．

4. 研究成果

(1) MR 流体の機械的特性を変化させるためには印加磁束密度を制御する必要がある．しかし、磁束密度はスカラー値であり、x 軸方向と z 軸方向といったように独立して制御することはできない．そこで、x 軸方向と z 軸方向の計 2 自由度を有するモーションテーブルを使い、図 2 に示すように F_{MRx} および F_{MRz} を指令値に追従させる二方向力覚提示則を提案した．

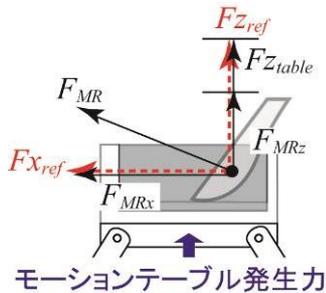


図 2 垂直方向の力の制御

まず、切断力提示時の制御手法について示す．図 2 において x 軸方向の力は MR 流体への印加磁場強度を変化させることで、力指令値 F_{xref} に追従するように制御系を設計する．一方、z 軸方向に関しては、図 2 に示した MR 流体のみで得られる z 軸方向の力 F_{MRz} と力指令値 F_{zref} との差異を吸収するように、MR 流体が入った容器を動かすことができるモーションテーブルによって、下側から力を加える（減らす）ように制御系を設計する．図 2 の例では、力指令値 F_{zref} に対して MR 流体のみで発生する力 F_{MRz} は小さいため、モーションテーブルによって力 F_{Ztable} を加算している．

図 3 に本研究で提案する切断力提示時のブロック線図を示す．赤枠が x および z 軸方向の力制御器を表している．青枠は力覚提示装置を示しており、MR 流体に磁場を印加するコイルへの電流指令値やモーションテーブルの速度指令値を入力とし、MR 流体を介してナイフ先端へのせん断応力に変換される．このナイフに発生した力は、流体容器に取り付けられた力センサによって計測し、各力制御器に入力している．また、モーションテーブル制御器では、運動学に基づき手先指令速度をモータ速度に変換している．基準入力要素では、予め実験的に求めたコイルへの印加電流 I と F_{MRx} の関係から、力指令 F_{xref} に基づきコイル指令電流 I_{com} を算出している．また、x 軸方向に関しては MR 流体への印加磁場強度を変化させて制御することとしたため、モーションテーブルの指令速度を 0 とし静止させている．一方、z 軸方向のモ-

ーションテーブルの運動は PD 制御器により指令する．

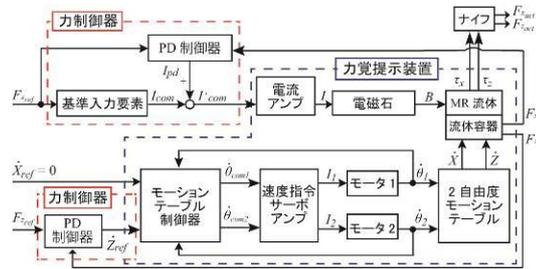


図 3 切断力提示時のブロック線図

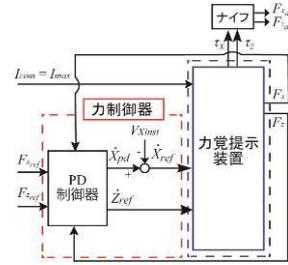
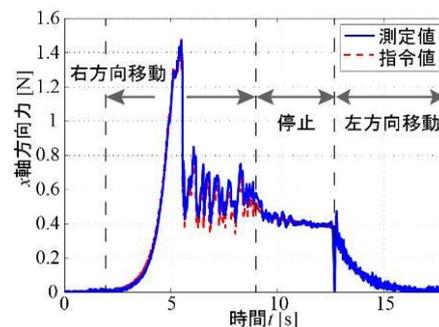


図 4 復元力提示時のブロック線図

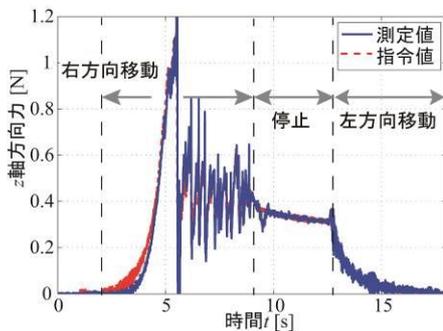
次に、図 4 に復元力提示時のブロック線図を示す．復元力提示時は、MR 流体へ印加する磁束密度が最大となる電流 I_{max} をコイルに与え、ナイフがモーションテーブルに固定されているような状況を作りだし、x 軸方向および z 軸方向ともにモーションテーブルの力制御により目標値に追従させる．

LORD 社製 MR 流体 MRF-140CG を用いて、上述の制御則の検証を行った．レバーを用いた切断実験で測定した力を指令値 F_{xref} および F_{zref} として与え、その際の力履歴を力覚提示装置に搭載された力センサによって観察した．ナイフの動作は、図 1 のレバー切断実験と同様に設定した．

図 5 に本実験で計測された x 軸および z 軸方向の力 F_x , F_z を青実線で示す．赤点線は各方向の力指令値 F_{xref} , F_{zref} を示している．図 5 (a) を見ると、x 軸方向の指令値に良く追従しており、図 5 (b) の z 軸方向の力を見ると、概ね指令値に追従していることが判る．



(a) x 軸方向



(b) z 軸方向

図 5 二方向理機械提示実験時の力履歴

しかし、図 5 (b)において振動的な力を提示する区間において、測定値が指令値に比較して大きめに振動している様子が見て取れる。今後、この問題を明らかにし、より追従性能に優れた制御則を検討する。

(2) 第 3 章(2)で示した設計要求 1 を満たすために、容器内部の幅を 15 mm に拡大することとした。また、2 自由度力覚提示装置では、X 軸方向しか術具を移動させることができなかったが、設計要求 2 を満たすために、力覚提示部を MR 流体の中心を通る鉛直軸（図 6(a) に点線で示す）周りに回転させる。操作者が手に持った術具の動きをモーションキャプチャシステムで取得し、常に術具の方向と容器の向きを一致させることで、切断・圧排が可能な方向を拡大した。

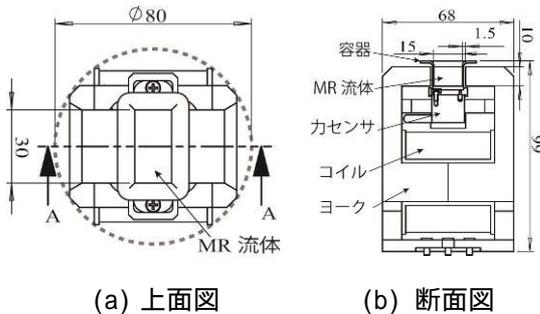


図 6 力覚提示部の寸法

また、設計要求 3 を満たすために、二つの力覚提示部を配置し、左右の手に持った術具を別々に MR 流体容器に挿入する。2 自由度力覚提示装置では X 軸、Z 軸方向に移動が可能な平行機構の上に力覚提示部を載せて生体組織の弾性的な挙動の再現を実現した。より実際の手術手技の再現性を高めるために、並進 3 自由度に拡張し、それぞれの力覚提示部を独立したモーションテーブルで駆動する。また、実際の手術では、左右の手に持った術具同士が先端で接触するほどの距離で利用することもある。従って、各力覚提示部の MR 流体容器は可能な限り接近して配置できることが好ましい。この中心間距離を

より短くするためにコイルを一つにまとめ、ヨークの角を面取りすることで図 6 (a)の点線に示す様に直径 80 mm 以内に収めた。従って、力覚提示装置の中心間距離を 80 mm まで接近させることを可能とした。図 6 (b)に同図(a)の A-A 箇所の断面図を示す。チタン製の MR 流体容器は非磁性体で作られた 6 軸力センサ ATI 社製 Nano17Ti を介して固定されており、この力センサによって術具に生じている抵抗力を測定する。ヨークと MR 流体容器の間には 1 mm のギャップを設けており、容器がヨークに触れ力が正しく計測できなくなることを防いでいる。2 自由度遭遇型力覚提示装置では、力センサをヨークの外側に配置し、力センサと MR 流体間距離が長かった。このため、力センサに過大なモーメントが印可される問題があったが、図 6 (b)に示した構造では容器の直下に力センサを配置することでモーメントの発生を抑えた。

コイルは直径 0.85 mm のポリウレタン銅線を 849 巻きすることとし、空冷で使用を考え最大消費電流を 50 W 以下に抑えるために、最大印可電流は 3 A とした MR 流体には LORD 社製 MRF-140CG を用いる。本条件下で、JSOL 社製磁場解析ソフトウェア JMAG を用いて、MR 流体に印可される磁束密度を計算した。図 7(a) に印可電流 3 A 時の断面のコンター図を、同図(b)に MR 流体中のベクトル図を示す。図 7(a) に示したように、MR 流体に 0.6 T 程度印可されていることが分かる。また、図 7(b) に示したように MR 流体に様に磁場が印可されている。0.4 T 程度の印可磁場強度で豚レバーの切断感覚を提示可能であるため、より柔軟な脳の組織も提示可能と考えられる。

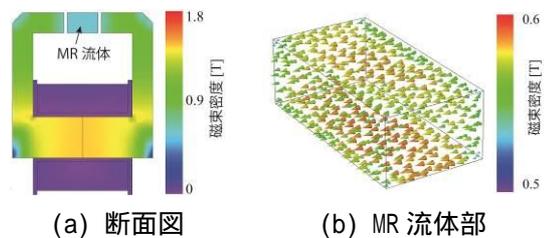


図 7 磁場解析結果(3 A)

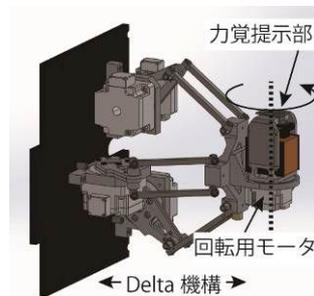
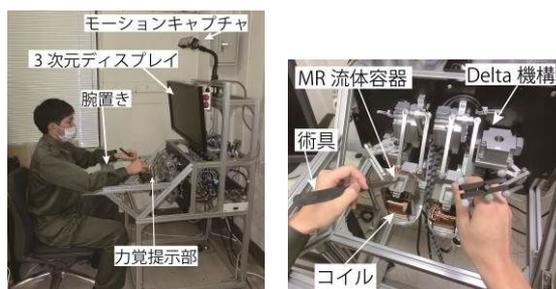


図 8 4 自由度モーションテーブル

左右の力覚提示部を独立に 3 自由度の並進および鉛直軸周りに回転させるための 8

自由度モーションテーブルを開発した。図 8 に示すように並進 3 自由度の Modified Delta 機構[4] の手先にモータを取り付け、力覚提示部を 3 自由度の並進および鉛直軸周りに回転させる。これを左右対称に配置することで、合計 8 自由度の力覚提示装置とした。図 9 に装置全体の概略図を示す。



(a) 装置全体図 (b) 力覚提示部

図 9 8 自由度力覚提示装置の外観

MR 流体容器の開口部がおおむね床面から高さ 840 mm となるように配置し、力覚提示部の前方には実際の手術環境においても用いられている腕置きを設置し、トレーニング中の疲労感の低減や手の震えを抑制する。図 9 (a) に示す様に 操作者の前方には BenQ 社製 3 次元ディスプレイ XL2720Z を設置し、上部には NatralPoint 社製モーションキャプチャシステム V120:DUO を設置した。モーションキャプチャシステムで取得した実環境の術具の位置姿勢を脳外科手術シミュレーションソフトウェア(雑誌論文 など)に入力し、仮想環境内の術具と連動させ、仮想術具と仮想臓器との間に働く力を計算する。本研究で開発した力覚提示装置は、この計算された力に基づいて本章(1)で確立した制御則を実装し、実環境の術具に働く力を制御する。また、3 次元ディスプレイには、シミュレーションソフトウェアによって可視化された術野を描画する予定である。

(参考文献)

- [1] Goksel et al., Haptic Simulator for Prostate Brachytherapy with Simulated Needle and Probe Interaction, IEEE T. on Haptics, vol. 4, no. 3, pp.188-198, 2011.
- [2] 高木 他, 脳外科手術シミュレータ用ハプティックインタフェースの開発, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'10 講演論文集, 1A1-C09, 2010.
- [3] J. D. Carlson and M. R. Jolly, MR fluid, foam and elastomer devices, Mechatronics, vol. 10, pp. 555-569, 2000.
- [4] Tsumaki, Y., et al., Design of a Compact 6-DOF Haptic Interface, in Proc. of the 1998 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 2580-2585,

1998.

5. 主な発表論文等

(雑誌論文)(計 8 件)

Kazuya Sase, Teppei Tsujita, Atsushi Konno, Haptic Interaction with Segmented Medical Image Embedded in Finite Element Mesh, Journal of Japan Society of Computer Aided Surgery, vol. 19, no. 2, pp. 89-99, 2017.

Akira Fukuhara, Teppei Tsujita, Kazuya Sase, Atsushi Konno, Atsuhiko Nakagawa Toshiki Endo, Teiji Tominaga, Xin Jiang, Satoko Abiko and Masaru Uchiyama, Securing an Optimum Operating Field without Undesired Tissue Damage in Neurosurgery, Advanced Robotics (AR), Taylor & Francis, vol. 30, issue 19, pp. 1245-1259, 22 July, 2016.

Kazuya Sase, Akira Fukuhara, Teppei Tsujita, Atsushi Konno, GPU-accelerated surgery simulation for opening a brain fissure, ROBOMECH Journal, Springer, vol.2, no.1, Article 17, 29 December, 2015.

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, Springer, vol. 1, 6, 26 September, 2014.

Teppei Tsujita, Kazuya Sase, Atsushi Konno, Masano Nakayama, XiaoShuai Chen, Koyu Abe and Masaru Uchiyama, Design and Evaluation of an Encountered-type Haptic Interface Using MR fluid for Surgical Simulators, Advanced Robotics (AR), Taylor & Francis, vol. 27, no. 7, pp. 525-540, 2 April, 2013

(学会発表)(計 30 件)

大成大樹, 安孫子聡子, 辻田哲平, MR 流体を用いた遭遇型ビジュアルハプティックディスプレイの開発ロボティクス・メカトロニクス講演会'17 講演論文集, 資料番号 2P1-N03, 郡山, 5月12日, 2017

Hiroki Ohnari, Satoko Abiko, Teppei Tsujita, Encountered-type Visual Haptic Display Using MR Fluid, Asia Haptics 2016, 30A-3, Tsukuba, Japan, 1 December, 2016.

Kazuya Sase, Teppei Tsujita and Atsushi Konno, Haptic Rendering of Contact Between Rigid and Deformable Objects Based on Penalty Method with Implicit Time Integration, Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), pp. 1594-1600, Qingdao, China, 6 December, 2016.

辻田哲平, 曾我佳紀, 近野敦, MR 流体を用いた脳外科手術シミュレータ用遭遇型力覚提示装置の開発ロボティクス・メカトロニクス講演会'16 講演論文集, 資料番号 1A1-20a6, 横浜, 6月9日, 2016

辻田哲平, 亀山卓也, 近野敦, 安孫子聡子, 姜欣, 内山勝, MR 流体を用いた手術シミュレーション用遭遇型力覚提示装置による二方向力覚提示, 日本ロボット学会第 33 回学術講演会講演論文集, RSJ2015AC3J3-04, 東京, 9月5日, 2015. Akira Fukuhara, Teppei Tsujita, Kazuya Sase, Atsushi Konno, Xin Jiang, Satoko Abiko and Masaru Uchiyama, Optimization of Retraction in Neurosurgery to Avoid Damage Caused by Deformation of Brain Tissue, Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), pp. 588-594, Bali, Indonesia, 7 December, 2014. 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 the 2014 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS), pp. 283-288, Houston, USA, 25 February, 2014.

Teppei Tsujita, Takuya Kameyama, Atsushi Konno, Xin Jiang, Satoko Abiko and Masaru Uchiyama, Encountered-Type Haptic Interface Using Magneto-Rheological Fluid for Surgical Simulators, The 2014 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS), D04, Houston, USA, 25 February, 2014.

井上祐人, 辻田哲平, 姜欣, 安孫子聡子, 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, 日本ロボット学会第 31 回学術講演会講演論文集, RSJ2013AC1G2-03, 東京, 9月4日, 2013. 福原洸, 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, 資料番号 2A1-L02, つくば, 5月24日, 2013.

井上祐人, 亀山卓也, 佐瀬一弥, 辻田哲平, 姜欣, 安孫子聡子, 内山勝, MR 流体を用いた手術シミュレータ用遭遇型力覚提示装置による切断感覚提示, 第 13 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会予稿集, pp. 1307-1310, 福岡, 12月19日, 2012.

亀山卓也, 辻田哲平, 佐瀬一弥, 姜欣, 安孫子聡子, 内山勝, 生体軟組織切断感覚提示のための MR 流体の流動特性解析, 第 13 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会予稿集, pp. 1318-1321, 福岡, 12月19日, 2012.

〔産業財産権〕

取得状況 (計 1 件)

名称: 力覚提示装置
発明者: 辻田哲平
権利者: 国立大学法人東北大学
種類: 特許
番号: 2011-166637
取得年月日: 2016年2月5日
国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ等

http://www.nda.ac.jp/cc/tsujita/researches/MR_Haptic.html (日本語)

http://www.nda.ac.jp/cc/tsujita/researches/MR_Haptic-e.html (英語)

アウトリーチ活動

東京都市大学第 112 回総研セミナー, MR 流体を利用したハプティックインタフェースの開発, 東京, 2016年10月31日

日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門, 計測自動制御学会 SI 部門ロボティクス部会共催 特別講演会「ヒトとロボティクス」, ロボット技術を活用したヒトの模倣, 仙台, 2016年9月27日

(公財)横須賀市産業振興財団 産学交流セミナー「ロボット工学でヒトをまねる」, 横須賀, 2016年7月8日

カーネギーメロン大学を訪れた陸前高田の中高生に手術シミュレータについて解説, 一般社団法人子どものエンパワメントいわて, Pittsburgh, USA, 2014年8月6日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

辻田 哲平 (TSUJITA, Tepei)
防衛大学校・システム工学群・准教授
研究者番号: 40554473