

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 4 月 30 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22760181

研究課題名（和文） 術具による生体軟組織の切断感覚を提示可能なハイブリッドハプティックインターフェース

研究課題名（英文） Hybrid Haptic Interface which can display cutting force of biological soft tissue by a surgical instrument

研究代表者

辻田 哲平（TSUJITA TEPPEI）

東北大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：40554473

研究成果の概要（和文）：

新たな手術シミュレータ用の遭遇型ハプティックインターフェースを提案した。MR (Magneto-Rheological)が入った容器に、操作者が術具等を挿入し動かすことで反力を感じることが可能である。術具等が機械的にハプティックインターフェースに固定されておらず、容易に術具を交換することが可能であり、様々な術具を利用した手術シミュレーションが可能である。

研究成果の概要（英文）：

A novel encountered-type haptic interface for surgical simulators is proposed. This interface has a container of MR (Magneto-Rheological) fluid and an operator puts a surgical tool into the fluid and can feel resistance force by moving the tool. Since the tool is not mounted mechanically on a haptic interface, an operator can change tools easily and the device can be applied to simulations which require several tools.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：ロボティクス，機能性流体，ハプティックインターフェース

1. 研究開始当初の背景

近年の医療現場では、低侵襲手術や心臓血管外科における冠動脈バイパス術など、医師の技能が求められる先端医療が盛んに行われ、外科医への負担は急増している。先端医療における大きな問題として、医師の手術手技訓練環境の不足が挙げられる。従来から行われてきた医師の訓練方法として、ブタやラットを使用した動物実験や、サージカル・トレーナと呼ばれる生体に近い構造や質感を

持つ人体模型を使用した訓練などがある。しかし、先端医療における手術手技の特殊性から、対象手技によっては適切なモデルの準備が困難、再利用可能な訓練対象ではないためランニングコストが高いといった問題が生じている。そこで、本研究ではバーチャルリアリティ技術を利用した手術シミュレータを開発する。

2. 研究の目的

手術シミュレータでは、計算機内で構築された仮想人体に対して手術を行った際の反力を、ハプティックインタフェースを用いて術者に提示することで、より現実感の高い手術感覚を体験可能である。手術においては、ナイフや剪刀など多くの術具が用いられるため、ハプティックインタフェースにおいても、生体組織の切断時の反力を、術具を介した感覚として提示するのが望ましい。術具を介した感覚を提示するために、簡便な方法としてサーボモータ等で駆動されるハプティックインタフェースの手先部に機械的に術具を固定する方法が考えられるが、術具を交換する際にネジなどを外す必要があり術具を頻繁に交換することができない。そこで、本研究では MR(Magneto-Rheological) 流体を仮想臓器に見立て、直接術具で MR 流体に対して切断等の操作を行うことが可能なハプティックインタフェースを提案し、術具の交換を自然に行える現実感の高い手術シミュレータを開発する。

3. 研究の方法

本研究では、本章に示すコンセプトに基づき切断感覚提示手法を提案し、第4章に示すように試作機を製作し検証を行った。

(1) コンセプト

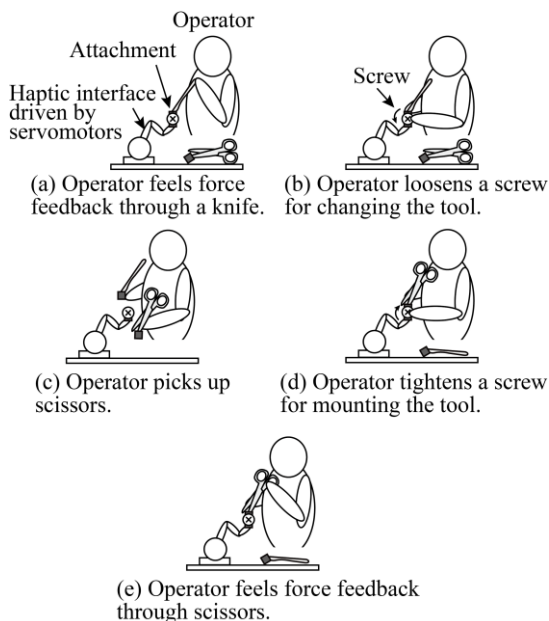


図 1 サーボモータで駆動されるハプティックインタフェースに機械的に術具を固定し反力を提示する例

図 1 にサーボモータで駆動されるハプティックインタフェースに術具を固定し反力

を提示する場合において、術具を交換する場合の例を示す。図 1(a)において、操作者はナイフを介してハプティックインタフェースからの力を感じている。次に、ハサミを利用するために、まずナイフとハプティックインタフェースを固定しているネジを外す(図 1(b))。そして、図 1(c)に示すように、ハサミをとり、図 1(d)のように、ハサミを取り付け、ネジを締める。これにより、図 1(e)のようにハサミを介した力を感じることができるようになる。図 1 の(b)と(d)は、実際の手術には存在しない作業であり、これらが手術シミュレーション中の現実感を低下させる。

MR 流体は印加磁場強度を変化させることで、見かけの粘性を短時間で変化させることができる流体である。磁場を印加した状況において、この流体を術具で切断することで、あたかも生体軟組織を切断しているような感覚を感じることが出来る。術具にかかる抵抗力の強さは、コイル電流によって制御可能である。この方法では、術具を機械的に拘束していないため、術具が MR 流体と接していないときは自由に術具を動かすことができ、また、術具を簡単に交換することが可能である。図 2 に MR 流体により切断力を提示する場合において、術具を交換する手順を示す。図に示すように、実際の手術と同じように簡単に術具を交換することができる。

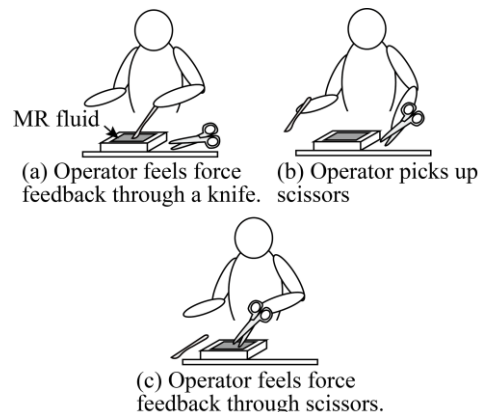


図 2 MR 流体による切断力提示

(2) 切断感覚提示手法

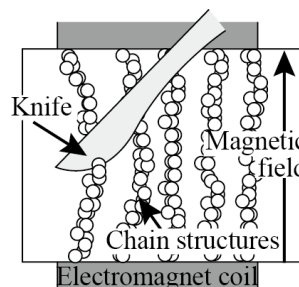


図 3 ナイフによる鎖状クラスタの切断

MR 流体とは、シリコンオイルなどの油を分散媒とし、その中に強磁性体粒子を分散させたコロイド溶液である。MR 流体中に分散されている磁性体粒子は磁場の印加により、鎖状クラスタを形成し、クラスタの結合力は印加磁場強度で調節することができる。本研究では、図 3 に示すように、この鎖状クラスタを直接ナイフやせん刀等の術具で切断し、生体軟組織の切断感覚を模擬する。

磁場が印加されると MR 流体はビンガム流体に類似した挙動を示し、せん断応力 τ とせん断速度 $\dot{\gamma}$ の関係は次式で表される [1]。

$$\tau = \tau_y(B) + \eta\dot{\gamma}, \quad (\tau > \tau_y) \quad (1)$$

ここで、 τ_y は磁束密度 B に応じて誘起される降伏せん断応力、 η は MR 流体の無磁場時の基底粘度である。せん断応力が誘起降伏せん断応力以下（降伏前）の場合は、次式のようにひずみ γ に対してせん断応力が変化する弾性的な挙動を示す。

$$\tau = G\gamma, \quad (\tau < \tau_y) \quad (2)$$

ここで、 G は材料に依存した係数であり、弾性的な挙動を示すのは、ひずみが 10^{-3} 程度で変位が非常に小さい領域に限られる。

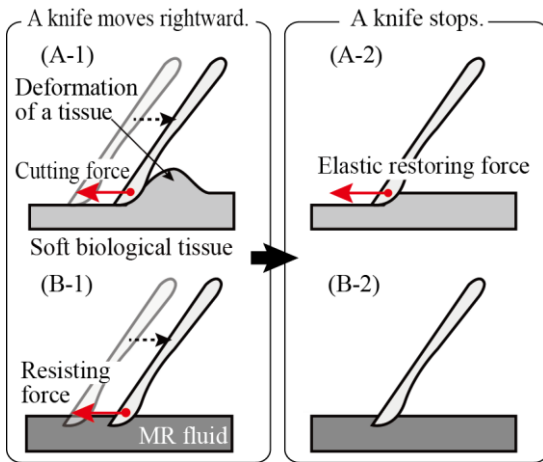


図 4 生体軟組織と MR 流体の差違

生体軟組織は大変形をともなう粘弾性体である。このため、図 4 の (A-1) で例示するように、臓器を右方向に切断した場合、切断力が左方向に生じる。また、ナイフによって加えられた力により臓器全体が変形する。この変形を復元しようとする力によって、ナイフの運動を停止させても、(A-2) に示すように切断方向と反対（左方向）に力が生じる。一方、MR 流体が式 (2) で表されるような弾性的な挙動を示すのは微少変位に限られるため、ごくわずかにナイフの位置が切断方向と反対に動いただけで、反力は急激に低下し、生

体軟組織切断時とは異なる挙動を示す（図 4 の (B-2)）。

そこで本研究では、図 5 に示すように、臓器全体の粘弾性特性はサーボモータで表現し、細胞と刃の間の微細な切断挙動に関しては MR 流体を用いて提示することで、MR 流体と生体軟組織の間に存在する差違を無くす。上部が開口した容器に MR 流体を入れ、この容器をサーボモータで駆動し MR 流体と手術機械の間に発生する抵抗力の方向や大きさを制御する。たとえば、図 4 の (B-2) の状況においては、MR 流体の容器を左方向に引っ張ることで、抵抗力を左方向に生じさせることが可能となる。

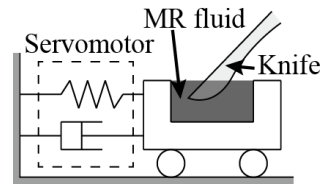


図 5 サーボモータによる大変形の提示

図 6 に、本研究で開発するハプティックインタフェースを用いて手術シミュレータを実現するための構成例を示す。ナイフの位置姿勢をモーションキャプチャによって取得し、数値シミュレータ内の仮想生体軟組織に作用した際の反力を計算によって求め、インタフェースに目標反力として指令する。インタフェース部は、MR 流体を格納した容器と電磁コイルから成る切断感覚提示部と、サーボモータにより制御されるモーションテーブルから構成される。目標反力に対して、モーションテーブルの動作や MR 流体に印加される磁束密度を決定し、連動して動作させることで、操作者に組織を切断した際の感覚を仮想的に提示することが可能となる。

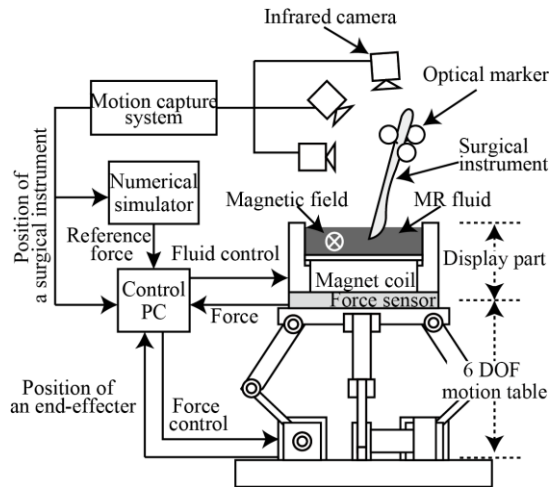


図 6 手術シミュレータの構成例

4. 研究成果

第3章で示した基本概念に基づき、ハプティックインタフェースを試作した。本章では、試作したインタフェースの詳細を述べる。

(1) 必要切断抵抗力の決定

MR 流体を用いたハプティックインタフェースで実現する抵抗力の最大値を決定するために、豚肝臓をナイフで切断する実験を行った。図7に示すように、リニアアクチュエータにナイフを取り付け、X 軸負方向に 5 [mm/s] で等速移動させ豚肝臓を切断した際の力を ATI Industrial Automation 社製力センサ Nano17 で測定した。なお、豚肝臓はステンレス台に接着剤で固定した。図8の黒実線で示すように、おおむね 2 [N] 以下であったため、本研究で開発する装置でも 2 [N] 程度の力を提示できることを目指す。

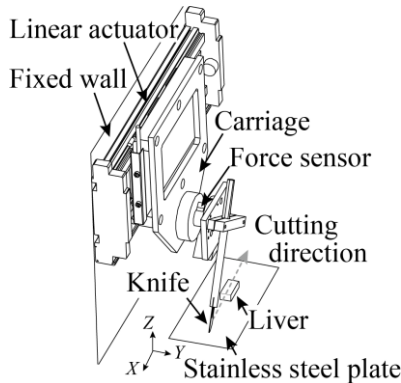


図7 豚肝臓の切断実験

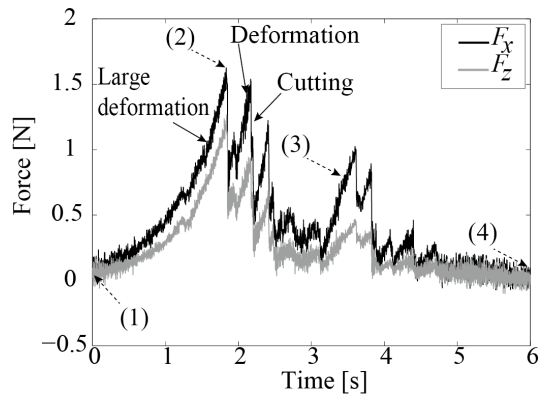


図8 豚肝臓の切断抵抗力

(2) 切断感覚提示部の設計

図9に設計した切断感覚提示部の断面図を示す。MR 流体部のギャップ幅は、人がナイフを挿入しやすいように 5 [mm] の幅を持

たせることとした。また、深さは一般的なナイフの有効深さを考慮し 20 [mm] とすることとした。この MR 流体に対して、垂直かつ一様に磁場が印加されるように設計した。コイルは MR 流体格納容器の周辺で術具の動きを制限しないように水平に二つ配置し、サイズと消費電力の面から、コイル一つあたり、線径 0.45 [mm] のポリウレタン線を 991 回巻き、印加電流を 1[A] とした。また、MR 流体には、誘起せん断応力の大きい LOAD 社製 MRF-140CG を、ヨークには圧延鋼材 SS400 を用いることとした。図10に JSOL 社製電磁界解析ソフトウェア JMAG を用いて解析した磁束密度のコンター図を示す。黒色が 1 [T]、白色が 0 [T] を示している。MR 流体には 0.43 [T] 程度の磁束密度が印加されている。

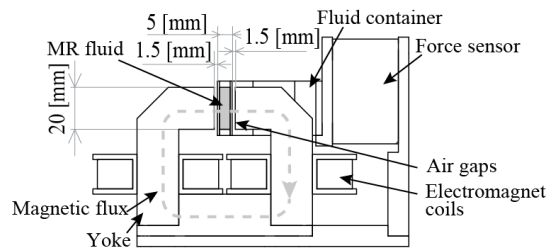


図9 切断感覚提示部の断面図

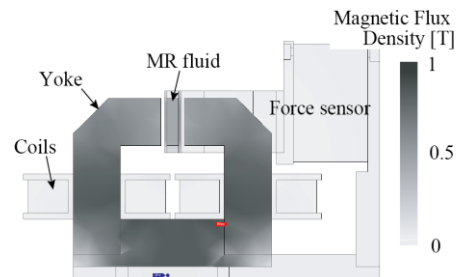


図10 磁場解析結果 (コンター図)

この切断感覚提示部は、幅 151 [mm] × 奥行 130 [mm] × 高さ 100 [mm]、重量 4 [kg] となった。

(3) ハプティックインタフェースの開発

重量 4 [kg] の切断感覚提示部を効率的に駆動するために、平行機構を用いたモーションテーブルを設計した。手術シミュレータとして使用するには、6 自由度のモーションテーブルであることが望ましいが、ここでは制御手法検討のためのプロトタイプとして、2 自由度モーションテーブルとした。対象をナイフに設定し、刃に生じる切断方向と垂直上向きの力を提示できるようにすること目標とする。図11にハプティックインタフェ

ースの外観を示す。2 自由度の平行機構の上に、切断感覚提示部が搭載されている。

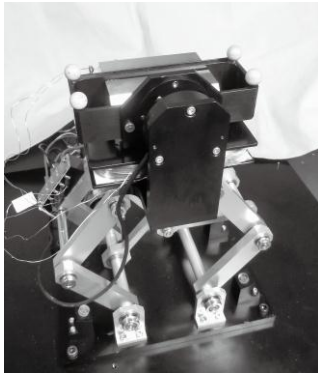


図 11 ハプティックインタフェースの外観

(4) 検証実験

開発した装置の検証実験を行った。刃の材質を黄銅に変更したナイフを MR 流体の中に入れ、豚肝臓切断試験と同条件で等速切断を行った。図 12 に示すように、コイルに印加する電流を増加させるにつれて、切断抵抗力が増大し、1 [A] 時において、約 2.7 [N] の抵抗力が発生している。従って、豚肝臓切断実験より求められた目標提示力 2 [N] を実現できていることが確認できた。

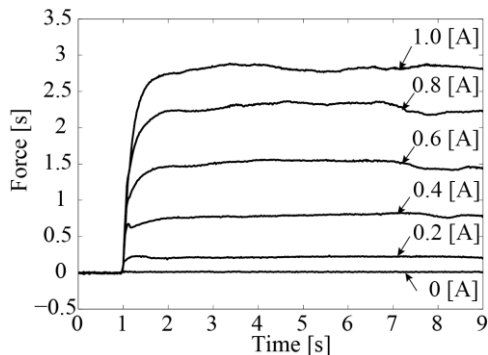


図 12 コイル電流と抵抗力の関係

また、モーションテーブルを制御することによって MR 流体中でナイフを静止させた場合 (図 4(B-2) に示した状況) においても、抵抗力を提示可能かどうか確認した。ナイフに赤外線反射マークを取り付け、その位置をモーションキャプチャによって取得した。この実験では、ナイフを手を持ち、MR 流体を切断した。また、位置情報と同期して、MR 流体で発生している抵抗力をハプティックインタフェースに取り付けた ATI Industrial Automation 社製力センサ Nano17 で測定した。

図 13 に、モーションテーブルを静止させている場合の X 軸方向 (切断方向) の術具位

置と抵抗力の関係を示す。図中、約 1.3 [s] ~ 3.6 [s] の間、ナイフの位置はほぼ変化せず、おおむね静止している状態となっている。この時、MR 流体が発生する力はほぼゼロとなっており、流体だけでは生体組織の弾性的挙動を提示することが困難であると言える。

次に、モーションテーブルをインピーダンス制御し、ナイフが静止しても、MR 流体容器を押すようにした。図 14 にその際のナイフの位置と反力の関係を示す。図中、約 1.7 [s] ~ 4 [s] の間、ナイフの位置はほぼ変化せず、おおむね静止している状態となっている。この時、MR 流体が発生する力はゼロとならず、反力を提示し続けており、MR 流体だけでは困難な生体組織の弾性的挙動を提示できる可能性を示した。

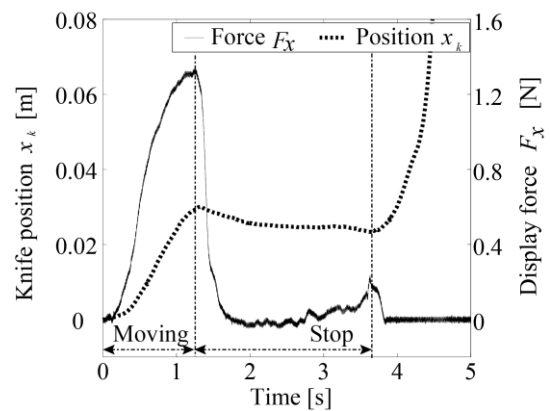


図 13 モーションテーブルを固定した際の提示力

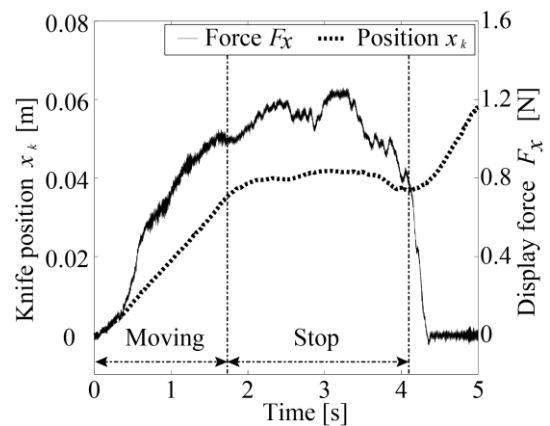


図 14 モーションテーブルにより MR 流体容器を押した場合の提示力

本実験では、動作検証のために、モーションテーブルをインピーダンス制御によって動作させたが、今後目標提示力に基づいてコイル電流とモーションテーブルの動作を決定する統合制御則を開発することで、生体組織変形計算ソフトウェアと組合せた手術シミュレータを実現することが可能となる。

参考文献

- [1] J. D. Carlson and M. R. Jolly: "MR fluid, foam and elastomer devices," *Mechatronics*, vol. 10, no. 4-5, pp. 555-569, 2000.

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 1 件)

- ① 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*, Taylor & Francis, vol. 27, no. 7, pp. 525-540, April 2, DOI:10.1080/01691864.2013.777013, 2013. (査読有)

[学会発表] (計 11 件)

- ① 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, 福岡, 12 月 19 日, 2012.
- ② 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 福岡, 12 月 19 日, 2012.
- ③ 佐瀬一弥, 中山雅野, 佐竹恵和, 安孫子聡子, 姜欣, 辻田哲平, 近野敦, 内山勝, 実脳モデルを用いた脳裂開放シミュレータの実時間性評価, ロボティクス・メカトロニクス講演会'12, 浜松, 5 月 29 日, 2012.
- ④ Teppei Tsujita, Manabu Ohara, Kazuya Sase, Atsushi Konno, Masano Nakayama, Koyu Abe and Masaru Uchiyama, Development of a Haptic Interface Using MR Fluid for Displaying Cutting Forces of Soft Tissues, *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, St. Paul, USA, May 15, 2012.
- ⑤ Xiaoshuai Chen, Masano Nakayama, Teppei Tsujita, Xin Jiang, Satoko Abiko, Koyu Abe, Atsushi Konno and Masaru Uchiyama, Identification of Physical Properties of Swine Liver for

Surgical Simulation Using a Dynamic Deformation Model, *IEEE/SICE Int. Symp. on System Integration*, Kyoto, Japan, December 22, 2011.

- ⑥ 佐瀬一弥, 陳曉帥, 富田将茂, 辻田哲平, 近野敦, 中山雅野, 阿部幸勇, 内山勝, MR 流体により力覚提示する手術シミュレータの開発, 第 12 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, 京都, 12 月 24 日, 2011.
- ⑦ 中山雅野, 辻田哲平, 陳曉帥, 姜欣, 近野敦, 内山勝, 生体軟組織破壊シミュレーションの検証, 生体医工学シンポジウム, 長野, 9 月 17 日, 2011.
- ⑧ 辻田哲平, 佐瀬一弥, 小原学, 近野敦, 中山雅野, 阿部幸勇, 内山勝, MR 流体により生体軟組織切断感覚を提示するハプティックインタフェースの開発, 第 29 回日本ロボット学会学術講演会, 東京, 9 月 8 日, 2011.
- ⑨ 陳曉帥, 中山雅野, 辻田哲平, 近野敦, 内山勝, 軟組織動的モデルを用いた手術シミュレーションの検証実験, 第 29 回日本ロボット学会学術講演会, 東京, 9 月 8 日, 2011.

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 力覚提示装置

発明者: 辻田哲平

権利者: 東北大学

種類: 特許

番号: 特願 2011-166637

出願年月日: 23 年 7 月 29 日

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ

<http://www.space.mech.tohoku.ac.jp/~tsujita/mrhaptic-j.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

辻田 哲平 (TSUJITA TEPPEI)

東北大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 40554473

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: