

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 26 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2012～2014

課題番号：24240020

研究課題名(和文) 触力覚に基づく技能伝承のための仮想実地訓練環境の構築

研究課題名(英文) Towards Hand-skill Transfer through remote virtual hands-on Training in multi-point and multi-user Haptic Collaborative Virtual Environments

研究代表者

田中 弘美 (TANAKA, HIROMI)

立命館大学・情報理工学部・教授

研究者番号：10268154

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,100,000円

研究成果の概要(和文)：“時空の壁を超えた”VR実地訓練により技能の伝承を図ることを目的とした。そのために、1)熟練者の手技を観測した視触力覚データからそのプロセスを記述する手技モデル化を確立し、2)得られた手技モデルから視触力覚的提示により手技を再現する手技シミュレーションを構築し、3)手技シミュレーションにより再現される熟練者の“仮想手”による教示力を提示する多指型力覚提示デバイスを開発し、4)それらを遠隔多地点VR手術訓練に応用し、あたかも傍らで熟練医が“手を添えて指導する”遠隔触覚協働VR手術実地訓練環境を構築した。一般回線により3地点を結んだ検証実験により、研究成果の有効性を実証した。

研究成果の概要(英文)：We have developed haptic collaborative virtual environments for hand-skill transfer, where remote hands-on training by experts become enabled with haptic force feedback, based on the hand-skill process models. Toward to this goal, we have developed: 1) hand skill modeling from visual and haptic data which observed the processes of hand-skill procedure by experts, 2) a hand-skill procedure simulator based on the hand-skill model, 3) a multi-finger type haptic feedback device, and 4) a virtual hands-on training environment for the surgery-skill transfer, where remote hands-on training by an expert physician become enabled with haptic force feedback, based on the surgery skill process model. We have demonstrated the performance of the proposed HCVE(Haptic Collaborative Virtual Environ) system through experimental verification.

研究分野：総合領域

 キーワード：ヒューマンインターフェース ハプティック 触覚情報通信 遠隔協働仮想環境 柔軟物シミュレーション
 ヲン 手術シミュレーション 可視化 力学モデリング

1. 研究開始当初の背景

近年の急速な少子高齢化やグローバル化の加速に伴い、高度な技能の効率的な習得や伝統技能の保存・伝承が、先進国共通の課題とされていた。手指の動きを伴う技能は手技(しゅぎ)とよばれ、外科・手術手技や、匠・職人手技など、主に、医療分野と伝統技能の分野で使われている。

医療分野においては、生体組織のモデリングやシミュレーションの研究の重要性が増していた。患者の負担や動物愛護の観点から VR シミュレータを用いる手術訓練への期待も高まり、手術シミュレータも実用化されていた。しかし、シナリオが固定で、臨床で役立つ手術シミュレータが実現に至っていなかった。また、高度な低侵襲手術手技の習得の効率化や事故防止の観点から、複雑な手術プロセスの手順や動作を記述する手術プロセスのモデル化やモデル生成の自動化が課題とされていた。

一方、ロボティクス分野において、実環境で触覚情報を記録・保存し、遠隔の訓練生やロボットへ伝達し、再生あるいは転写する研究が行われた。CMU の The QoL Tech. 研究で Virtual Coach 研究が行われたが、柔軟物を扱う手技伝統技能の伝承までは至っていなかった。

そこで、実環境において熟練者の手技プロセスや対象物の変化を計測・モデル化し、仮想環境において、熟練者による“時空の壁を超えた実地訓練(Hands On Training)”の実現が期待されていた。つまり、触力覚に基づく技能の伝承は大きく進展させるために、“いつでも、どこでも、何度でも”、あたかも熟練者が傍で、訓練生の動作に応じて、手を取るように指導し、訓練生自らの手へ返される反力や感触を通して熟練者の技能を体得させる方法の確立が期待されていた。

2. 研究の目的

触力覚に基づく熟練者の技能を観測データより自動モデリングする方法を確立し、熟練者による“時空の壁を超えた仮想実地訓練”により、技能の伝承の効率化を図ることである。まず、(1) 熟練者の手技を観測した視触力覚データから手技のプロセスを記述する手技モデルを自動生成し、(2) 手技モデルから手技を視触力覚的フィードバックにより再現する手技シミュレータを構築し、(3) 手技シミュレーションにより再現される熟練者の「仮想手」による教示と、対象からの反力の触力覚フィードバックを独立に提示できる多指型触力覚提示デバイスを開発し、(4) それらを用いて、熟練者があたかも傍らで“手を取るように指導する”仮想実地訓練環境を構築し、(5) 医療分野における、“状況変化に柔軟に対応する”熟練医の手術手技の学習に応用する。

3. 研究の方法

代表者と分担者らが定期的に共同研究会(6回/年程度)を開催し、互いの進捗を議論し

ながら有機的に連携し、以下の5研究項目を並行して進めた。以下の(1)、(2)、(3)は平成24年度より、(4)と(5)は平成25年度以降並行して進めた。

(1) 視触力覚データに基づく手技モデリング

①物体接触時における、手指に作用する、法線方向と接線方向の分布力を滑り覚センサ等を用いて計測する。得られた触力覚データを、MR 画像から作成した指先モデルを用いて、触覚受容器に伝達される信号を解析しモデル化する。

②熟練者の手技を観測した視触覚データから手指運動と姿勢および対象物体の3次元形状を推定し、手技プロセスモデルを生成する。

(2) 非一様軟組織モデリングと VR 手術シミュレータ構築

①個体差から生じる臓器や脈管の特性のばらつき等を幾何的、位相的バリエーションと捉え、VR 臓器・脈管等異型バリエーションモデルを生成する。②埋め込み型非一様軟組織基盤シミュレーションを構築し、それを基に臓器・脈管等異型バリエーションを対象とする VR 低侵襲手術シミュレータを構築する。従来研究成果である連続体力学に基づくオンラインリメッシュ型変形モデルを拡張し、オンラインリメッシュ型の多重解像度埋め込み型非一様柔軟物シミュレーションを構築する。

(3) 両手多指型触力覚提示デバイスの開発

手の甲に対して並進と回転の6自由度、各指15自由度の計21自由度、各指10N、手の甲20N、精度1mmを達成可能な両手多指デバイスを開発することより教示と反力の独立提示を可能にする。

(4) 手技モデルを用いる仮想実地訓練法

手技プロセスモデル(状態遷移モデル)を用いる仮想実地訓練法を開発する。まず、手技モデル(熟練者の手技計測データ)と訓練生の手技の計測データとの差異を求め、熟練者と訓練生の手指動作の進行を比較し、その差に対してゲインを掛けた力を教示力として力覚提示する。同時に、操作物体の表面や内部構造の透視等の視覚情報をフィードバックする。以上により、熟練者があたかも傍らで“手を取って訓練する”VR 手術実地訓練環境を実現する。

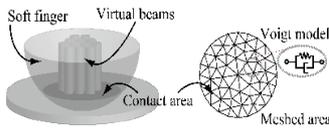
(5) 手技シミュレーションによる仮想実地訓練環境構築

(1)、(2)、(3)、(4)の研究成果を、仮想実地訓練環境構築に集約させ、手術手技モデルに記述された熟練医の異型を扱う低侵襲手術手技プロセスを、手技シミュレーションより再生し、熟練医の手術手技を視触覚フィードバックにより繰り返し学習する方法を実現する。

4. 研究成果

(1) 視触力覚データに基づく手技モデリング

①手指に作用する分布力の計測と解析
感圧導電布を用いた触覚・近接覚センサを実現し、人の指先の構造を有する力学モデルとロボット指を試作し、滑り覚のメカニズムを探った。



人の触覚のメカニズムを探るために、ビーム束モデル(左図)を用いて人の指先の力学モデルを構築し、指先内部の歪み分布を計測した。

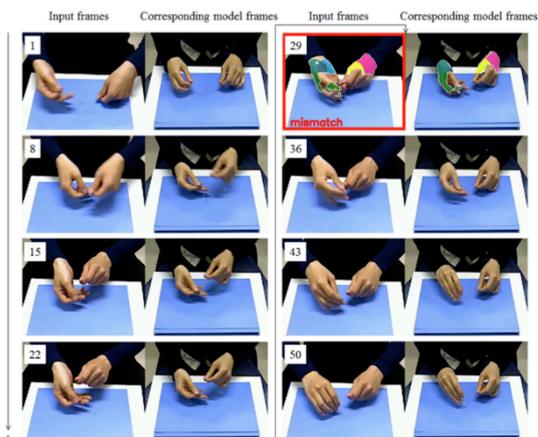
②糸結び手技の自動訓練のためのプロセスモデリング



外科手術における手術手技の訓練システムという具体的な課題場面を設定して、傷縫合時の糸結び手技(上図)を比較同定し、教師の模範動作に対して異なる箇所を指摘する課題を設定した。糸結びは対象の糸を両手で繰り返しながら一方の端で輪を作ってからもう一方を通し、その後端同士をひっばる、といった手指自体と対象物=糸の状態変化を伴う一連のプロセスとして定義できる。手指の複雑な隠れに対応するために kinect 深度センサを用いて三次元点群情報を得て、各糸結び時系列データをモデリングした。

kinect センサにより時系列で三次元点群を取得し、その三次元形状特徴(ここでは 3D SHOT 特徴を採用した)を用いて k-means クラスタリングにより生成した特徴単語辞書に基づく bag-of-words 特徴によって手の形状分類を行った。これに基づいて典型的な糸結び手技の各プロセス状態を分節記述しておく、入力テストシーケンスとの照合を行って手技の進捗状況を識別することを試みた。その結果単純な SHOT 特徴の利用では分節化や照合が不安定であり、手技プロセスの識別には記述性能が不足することがわかった。そこで、教師の模範動作の深度センサ情報の時系列入力フレームをモデルフレームと照合する事例ベースのモデリング手法を採用した。

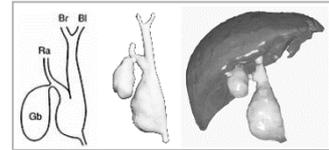
訓練動作に対して模範動作との差異を指摘する、という応用に鑑みれば入力時系列の途中に本来の動作とは異なる揺れ動作が挿入されることを想定しなくてはならず、これが本研究の課題である。そこで、入力時系列の各フレームに対しモデル動作には含まれない未知のフレームへの照合パスを導入した動的計画法による照合方法を提案する。これにより数種類の糸結び動作を別人物間で照合し時空間的に照合できない部分を実際



に指摘できることを示した(上図)。これによる糸結び訓練システムの試作に向けてモデルと入力系列の照合のロバストネスを向上させることが課題として残った。

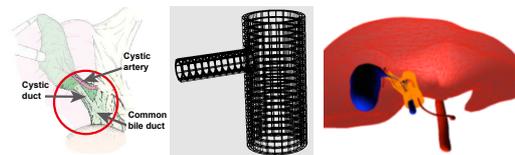
(2)非一様軟組織モデリングと VR 手術シミュレータ構築

①脈管の異形の組み合わせや管の厚み等のバリエーションは多岐に渡り、モデリングに要するコストが問題であった。脈管の走行異常等の異型をも考慮可能なシナリオ可変型手術シミュレータ構築のために、脈管の各種異形バリエーションをモジュール化して保持しておき、シナリオに応じて任意の異形を組み合わせた術野構築法を開発した(右図)。



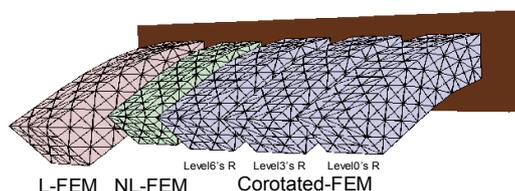
②多層弾性膜による漿膜結合組織モデリング

胆嚢動脈系の異形への対応および脈管を覆っている漿膜および結合組織(下図左)は CT や MRI で捉えられずモデル化が困難であった。しかし結合組織の剥離に多くの時間と高度の技術を要している。そこで、胆嚢管や胆嚢動脈の走行異常バリエーションモデルを多層構造の T 字型弾性膜(下図中)を用いて半自動構築する手法(下図右)を提案した。



③オンラインメッシュに基づく共回転型変形シミュレーション

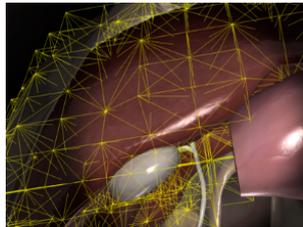
手術シミュレーションにおいては、臓器等の実物体間で整合性のとれた変形シミュレーションが重要であり、幾何学的非線形性および異方性材料特性を考慮可能、かつ低計算量の変形モデルが必要となる。そこで、オンラインメッシュ法に基づく効率的な共回転型変形モデルを提案した。1) 共回転型変形モデルに多重解像度モデルを適用し、上位階層の要素の回転行列を下位階層の要素の回転行列として代用することで計算コストを削減する手法、2) Byers らの極分解をベースとした、回転運動成分の抽出処理の効率化手法、3) 適応的メッシュの直方性を活用した内力計算の高速化手法を提案した。線形有限要素モデル(下図左 (L-FEM)), 非線形有限要素モデル(下図中 (NL-FEM)), 提案手法(下図右 (Corotated-FEM)間)で、変形精度および計算時間の比較実験から提案手法の有効性を示した。



④ 非一様柔軟物適応的埋込み変形シミュレーション

医療分野では、手術の訓練や計画などのために、臓器等の非一様仮想柔軟物体との力覚フィードバックを考慮した対話的変形操作が可能な変形シミュレーションの開発に期待が寄せられている。また、臓器は複雑な脈管分布構造や様々な力学特性を持つ組織で構成される非一様柔軟物である。しかし、この非一様性を考慮した変形シミュレーションでは、細かく分割したメッシュを用いる必要があるため、計算コストが高くなる問題がある。

そこで、オンラインリメッシュ法と埋め込み変形モデルとを組み合わせ、効率的な変形計算手法を提案した。オンラインリメッシュ法と埋め込み変形モデルの既存の手法を組み合わせた場合は、変形シミュレーションで解くべき連立方程式の計算に用いる行列のサイズが、オンラインリメッシュによって変化する。連立方程式を解くために逆行列の計算をする必要があるが、効率良く計算するために計算コストを低く抑える必要もある。そこで具体的には、オンラインリメッシュが発生した場合において、変形計算で用いる全体剛性行列の逆行列を高速に更新する方法を提案した。更に、GPUによる更なる高速化を行い、力学の伴う対話的変形操作への応用を図った(右図)。



(3) 両手多指型触力覚提示デバイスの開発

手術シミュレーションの際に生じる力覚と動作を修正する教示の力を手首に提示する手法の提案し、装置とシステム(下図)を開発した。

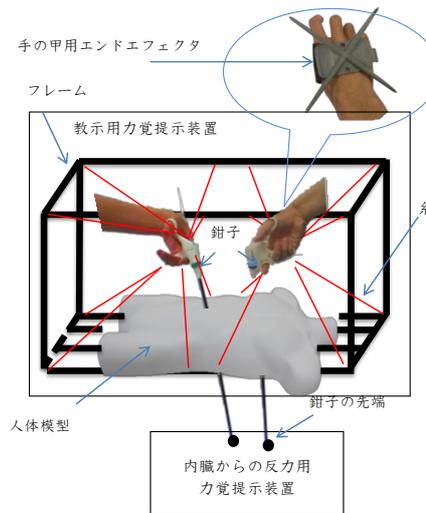
手の甲に装着するエンドエフェクタは、できる限り装着した際の違和感を与えないための設計を行った。主に、大きさ、曲率、固定方法について、人体計測データより評価し、設計を行った。また、3DCADにより設計したエンドエフェクタは3Dプリンタを用いることで制作し、試行錯誤を繰り返してできるだけ違和感を与えない形状とした。



教示の力をエンドエフェクタ(右上図)に提示し、内臓からの反力は鉗子に提示することで、2つの異なる力を手首に与えることを可能とした。

設計・開発した両手力覚提示装置およびシステムを統合し性能評価した。両手力覚提示の性能と、力覚提示可能領域における力覚提示精度と機能評価と、VR世界における両手10本の指先ポイントとVR物体を配置して操作の評価し、十分な性能達成を確認した。

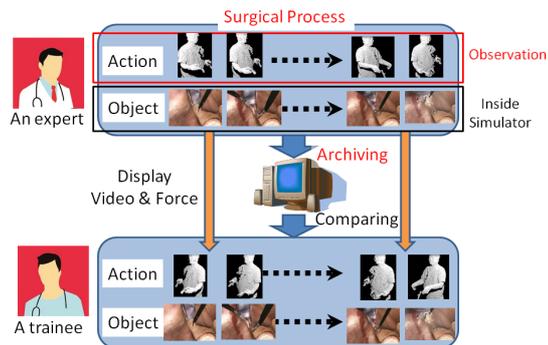
このシステムを実現することで、教示を可能とした手術シミュレータによる技術の取得の効率化を図った。



(4) 手技モデルを用いる仮想実地訓練法

① 手技モデルを用いる手術訓練支援

腹腔鏡から得られる視野の狭い映像をもとに、手術器具からの反力の乏しい状況下で手術を行わなくてはならない等、医師には高度な技術が要求される。訓練支援のために、各種シミュレータ等も開発されてきてはいるものの、それらは基本的には訓練医自身による繰り返し練習を支援するものであり、経過時間や器具の移動距離、出血量といったいくつかの評価指標にしたがって結果を評価するだけである。そのため、熟練医が立ち会って行う指導のような、状況に応じた適切な教示を代替することは難しい。そこで、VRシミュレータを用いて、熟練医の器具操作の記録から各手術プロセスにおける動きを切り出すと同時に、研修医に対して手術の進行状況に応じて適宜熟練医の動きを訓練に提示することで研修医に対して訓練の支援が可能なフレームワーク(下図)を提案した。



手術の進行状況の認識に関しては Neumuth らの提案した手術プロセスモデルによる記述を採用した。手術プロセスモデルでは、1つの手術プロセスを「Functional(操作内容)」「Organizational(操作者(身体部位))」「Operational(使用機材)」「Spatial(操作対象)」「Behavioral(操作時間)」の

5つの要素を用いて記述する。VR シミュレータからは器具（種類、位置、姿勢）と臓器の状態（処置されている臓器の種類、把持・切断・クリップ留め処理の有無）に関する記録を獲得できるため、本研究では

「Operational」に相当する器具を選択しているか、「Spatial」に相当する臓器に近づいているか、「Functional」に相当する処理ができていないか、を順に判定・受理する有限オートマトンを設計し手術プロセスの認識を行った。熟練医の手の動きを訓練医に伝える方法として、研修医の手に装着した力覚提示装置に対し、熟練医の動き情報をマスター・スレーブ型制御によって提示により誘導することで実現した。腹腔鏡下胆嚢摘出術における、胆嚢管のクリッピング×3→胆嚢管切断の流れを各自3回ずつ実践した結果、全9回の試行中7回について正しく認識できており、残り2回にも被験者による作業の途中中断によるものであることから、手術プロセス認識手法の有効性が確認できた。

② 腹腔鏡下手術手技の暗黙知抽出のための熟練者・初心者の注視行動分析

腹腔鏡下手術の実践には高度な技術の習得が要求される。特にアイハンドコーディネーションと呼ばれる、目で適切に状況を把握し、適切な器具操作を行う技術は非常に重要である。通常、この技術の習得は熟練者の一対一の指導による暗黙知伝達の形で行われることが多いが、熟練者も現役で実際の手術を行うため、指導のための十分な時間を確保することが困難である。そこで本研究では、熟練者による指導を代替可能な腹腔鏡下手術トレーニング支援実現のため、アイハンドコーディネーションにおける暗黙知を、システムを通じて伝達可能な形式知化する初期段階として、熟練者と初心者の注視行動とそれに伴う鉗子操作の分析を行った(下図)。一人称視点画像から特徴点(処置対象位置・手術器具先端位置・注視位置)を抽出し、処置対象位置と経過時間に基づいて正規化した後、既存のクラスタリングアルゴリズムを用いた解析を行った。その結果、熟練者・初心者間で視線移動距離や手術器具移動距離について差異があること、また、熟練医については視線と手術器具を同時に移動させることが少ないことが確認できた。



(a) Gaze points distribution



(b) tip's positions distribution

(5) 仮想実地訓練環境構築

下図に示す、滋賀県内の3拠点(東近江総合医療センター、滋賀医大、立命館大)に、遠隔多地点手術シミュレータを導入した。通信回線として、SINET および関西電力系の一般回線を使用し全域をL2VPNで接続した。

東近江総合医療センターには熟練外科医(指導医)を、配置下図(a)、滋賀医大と立命館大学の2拠点にはそれぞれ訓練生1名ずつを配置した下図(b)(c)。まず、①指導医の指示のもとに模擬手術を進める遠隔協働作業と、②指導医が手本を見せ、拠点(c)がそれに倣って胆嚢を拳上、拠点(b)が胆嚢周辺を剥離すると



いう遠隔協働手術シナリオに沿って進めた。

③指導医が示す規範手術操作での鉗子先端位置を訓練生の各拠点の鉗子装置で提示し、その動きを学習する遠隔教示試験を行った。



(a)指導医

(b)助手

(c)訓練生

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 23 件)

1. Van Anh Ho and Shinichi Hirai “A Novel Model for Assessing Sliding Mechanics and Tactile Sensation of Human-Like Fingertips during Slip Action” *Robotics and Autonomous Systems* 63 巻 3 号 pp253-267 2015 (査読有) DOI:10.1016/j.robot.2014.09.00
2. Satoshi Yamaguchi, Koji Satake, Yoshio Yamaji, Hiromi T Tanaka, “Three-dimensional semiautomatic liver segmentation method for non-contrast computed tomography based on a correlation map of locoregional histogram and probabilistic atlas”, *Computers in Biology and Medicine* vol. 55, pp. 79-85, Oct. 2014 (査読有) DOI:10.1016/j.compmed.2014.10.003
3. Satoshi Yamaguchi, Kihei Tsutsui,

Koji Satake, Shigehiro Morikawa,
Yoshiaki Shirai, Hiromi T. Tanaka,
“Dynamic analysis of a needle
insertion for soft materials:
Arbitrary Lagrangian-Eulerian-based
three-dimensional finite element
analysis”, Computers in Biology and
Medicine, vol.53, pp.42-47, 2014 (査
読有)

Doi:10.1016/j.combiomed.2014.07.012

4. 田川和義, 田中弘美, 来見良誠, 小森優,
森川茂廣, “臓器異型バリエーションの
構成的多重解像度モデリング”, 電子情
報通信学会論文誌 D, Vol. J96-D, No. 5,
pp. 1365-1373, 2013 (査読有)
5. 田川和義, 中川智史, 田中弘美, “直方
四面体ベース・オンラインリメッシュ型
非線形有限要素モデルによる効率的な
変形・剥離シミュレーション”, 日本
バーチャルリアリティ学会論文誌,
Vol.18, No.1, pp.73-80 2013 (査読有)
6. 田川和義, 田中弘美, 小森優, 来見良
誠, 森川茂廣, “一人称視点映像と誘導
力提示による腹腔鏡下手術手技の VR 訓
練システム” 日本 VR 医学会論文誌,
vol.10, No.1, pp1-8, 2012 (査読有)
DOI:10.3233/978-1-61499-209-7-431
7. K. Tagawa, H. T. Tanaka, Y. Kurumi,
M. Komori, S. Morikawa, “Expression
of Cystohepatic Duct Anomaly Using
Modular Structured Organ Model in a
Laparoscopic Surgery Simulator”
International Journal of Computer
Assisted Radiology and Surgery, Vol. 7,
Suppl. 1, pp.S194-S196, 2012 (査読有)
[学会発表] (計 100 件)
1. 丸谷宜史, 田川和義, 島田伸敬, 田中弘
美, 小森 優, 来見良誠, 森川茂廣, “腹
腔鏡下手術の技能分析・学習支援のため
の手術プロセス認識手法の検討”, 看護
理工学会, 第 2 回看護理工学会学術集会,
大阪府 豊中市・大阪大学豊中キャン
パス 大学会館, 2014 年 10 月 5 日.
2. 田上想馬, 神田輝, 赤羽克仁, 丸谷宜史,
田中弘美, 佐藤誠, “手術シミュレーシ
ョンのための手首力覚提示承知に関す
る研究”, 日本バーチャルリアリティ学
会, 第 19 回日本バーチャルリアリティ
学会大会, 愛知県 名古屋市・名古屋大
学, 2014 年 9 月 19 日.
3. 加藤十磨, 田川和義, 丸谷宜史, 田中弘
美, 神田輝, 赤羽克仁, 佐藤誠, “6 自
由度力覚提示装置を用いた手術手技訓
練支援の基礎的検討”, 日本バーチャル
リアリティ学会, 第 19 回日本バーチャ
ルリアリティ学会大会, 愛知県 名古屋
市・名古屋大学, 2014 年 9 月 18 日

[産業財産権]

○出願状況 (計 2 件)

名称: 周辺組織付臓器モデル生成装置及び周
辺組織付臓器モデル生成方法

発明者: 田川和義, 田中弘美

権利者: 学校法人立命館

種類: 特許

番号: 特願 2014-095112

出願年月日: 2014/5/2

国内外の別: 国内

名称: 遠隔地点間変形シミュレーションシ
ステム及び変形シミュレーション装置

発明者: 田川和義, 田中弘美

権利者: 学校法人立命館

種類: 特許

番号: 特願 2014-106718

出願年月日: 2014/5/23

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中 弘美 (TANAKA HIROMI)

立命館大学・情報理工学部・教授

研究者番号: 10268154

(2) 研究分担者

佐藤 誠 (SATO MAKOTO)

東京工業大学・精密工学研究所・教授

研究者番号: 50114872

平井 慎一 (HIRAI SHINICHI)

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号: 90212167

島田 伸敬 (SHIMADA NOBUTAKA)

立命館大学・情報理工学部・教授

研究者番号: 10294034

森川 茂廣 (MORIKAWA SHIGEHIRO)

滋賀医科大学・医学部・教授

研究者番号: 70205219

来見 良誠 (KURUMI YOSHIMASA)

滋賀医科大学・医学部・教授

研究者番号: 70205219

小森 優 (KOMORI MASARU)

滋賀医科大学・医学部・教授

研究者番号: 80186824

脇田 航 (WAKITA WATARU)

立命館大学・情報理工学部・助教

研究者番号: 80584094

赤羽 克仁 (AKAHANE KATSUHIRO)

東京工業大学・精密工学研究所・助教

研究者番号: 70500007

田川 和義 (TAGAWA KAZUYOSHI)

立命館大学・立命館グローバル・イノベー
ション研究機構・准教授

研究者番号: 40401319