

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24500158

研究課題名(和文) 超臨場感遠隔手術訓練環境構築のための適応的・階層型埋込み柔軟物体表現と可視触化

研究課題名(英文) An Adaptive, co-rotated and embedded representation approach of elastic objects for realizing ultra-realistic haptic collaborative virtual environments

研究代表者

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：臓器のような、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複合材料体(非一様柔軟体)を共有可能、かつ視覚的な相互インタラクションを可能とする、遠隔手術訓練環境の基盤となる手法を確立することを目的として、(a) 柔軟物変形の幾何学的非線形性と柔軟物内部の非一様性を効率良く考慮することが可能な適応的共回転系埋込み変形モデル、(b) 適応的共回転系埋込み表現された臓器と術具間の面接触インタラクション手法、(c) インタラクションの同時性の共有手法の考案・実装・評価を行った。

研究成果の概要(英文)：The objective of this research is realizing an approach for multi-point and multi-user haptic interaction with complex inhomogeneous elastic objects (e.g. organs which have various physical properties and geometries). We proposed (a) adaptive, co-rotated and embedded deformation model which can consider geometric non-linearity and non-uniform physical properties, (b) surface contact simulation approach between the embedded deformation model and a rigid body, and (c) an approach for synchronization of deformation of shared elastic objects. Then we implemented these approaches into our surgery simulation system, and we confirmed effectiveness of these approaches.

研究分野：バーチャルリアリティ, 医用システム

キーワード：バーチャルリアリティ 力覚インタラクション

1. 研究開始当初の背景

変形する対象物のモデル化と表現の実現は、古くから CG の領域で多くの研究がなされている。古典的にはバネマスモデルや FEM などによるシミュレーションが用いられてきており、実時間でのインタラクションのための高速化手法も検討されてきた。

最近では VR の分野で、視覚だけでなく力覚を伴うインタラクションの実現が検討されている。力覚提示の実現には 1kHz 程度以上の更新レートが必要であるとされるが、上述の力学的シミュレーションを実用的な解像度のモデルについて実時間実行することは難しい。このため高速化手法として、a) 算法の工夫（計算順序の変更による演算回数の削減等）や、b) 計算の自由度を削減する方法（Condensation 手法等）、c) 記録再生型変形モデルの利用（代表者らのインパルス応答変形モデル等）、d) 時空間適応的変形モデルの利用（代表者らのマルチレート・オンラインリメッシュ手法等）、e) GPU 等による並列計算の利用等が試みられている。しかしながら、いずれのアプローチについても、十分な規模の仮想柔軟体を実時間でシミュレートするまでには至っていなかった。

さらに臓器は、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複合材料体（非一様柔軟体）である。これらの非一様性を精度良く考慮するためには、細分割したメッシュを用いる必要がある。この問題に対応するために、従来、合板・繊維強化プラスチック等の周期的なローカル構造を持つ複合材料体を解析する分野では、均質化法が提案されてきた。この方法は、全体構造を荒いモデルで表現したグローバルモデルに、詳細構造を表現したローカルモデルの変形特性を埋め込む方法であり、計算の自由度を削減する一手法である。しかし臓器の内部空洞や脈管の分岐の変形特性を正しく考慮することができず、手術シミュレーションへの適用は難しい。Nesme らは、連成方法の工夫やグローバル要素の多重化によりこれらの考慮を試みているが、切断・剥離等のトポロジ変化の考慮や、オンラインリメッシュの適用はなされていなかった。

加えて、仮想柔軟体を対象とした遠隔間の仮想世界共有は、特に VR と医学の複合領域で手術の協働作業を対象とした研究がなされている。まず国内では、慈恵医大の球の集合で表現した小規模の柔軟体モデルをドイツ-日本間で遠隔共有した例、国外では、オーストラリア連邦科学産業研究機構(CSIRO)の Haptic Workbench を用いた遠隔触覚協働環境(HCVE)、スタンフォード大の HAVnet があげられる。しかしながらいずれも共有される仮想柔軟体は小規模にとどまっていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、遠隔多地点間にて、高精細・大規模な仮想柔軟体（複雑な脈管分布構

造を持つ臓器）を共有可能、かつ視力覚的な相互インタラクションを可能とする、遠隔手術訓練環境の基盤となる手法を確立することである。

具体的には、(a) 適応的埋込み変形モデルの開発、(b) 適応的埋込み変形モデルに対する面接触インタラクション、(c) インタラクションの同時性の共有手法（多地点の計算機間で、仮想柔軟体の変形・切断状態の同時性を確保する手法と、遠隔間のインタラクションにおいてもユーザに違和感を与えない反力の同時性を確保する手法）を確立する。また、(d) 以上の手法の評価を忠実性とユーザの感性の両面から行う。

3. 研究の方法

(1) 適応的埋込み変形モデルの開発

対象物の非一様性、もしくは応力の分布状態に応じて、メッシュの空間的解像度をオンラインで更新することが可能な、適応的埋込み変形モデルを確立する。さらに、図 1 に示すように、適応的四面体ボリュームメッシュは 3 軸の直交軸を有する 3 種類の直方四面体のみで構成される。この直方性を利用することで、共回転系の変形計算（線形 FEM による変形計算、および要素の回転量の抽出計算）の高速化を実現するとともに、GPU に適した変形計算アルゴリズムを開発する。

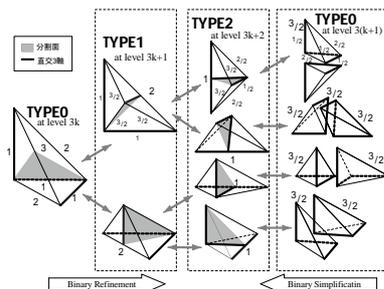


図 1 適応的四面体ボリュームメッシュが持つ直交 3 軸

(2) 適応的埋込み変形モデルに対する面接触インタラクション

埋込み変形モデルに対する面接触計算の考案・実装する。従来の埋込み変形モデルでは、点接触でのインタラクションのみしか確立されていない。そこで埋込み変形モデルに対する 6 自由度力覚レンダリング手法を確立する。

(3) インタラクションの同時性の共有機構

適応的埋込み変形モデルの同期方法の検討・実装する。本研究では各計算機が独立して埋込み変形モデルを持ち変形計算を行うが、各計算機の変形モデルの適応化の状態（時空間解像度）が異なる場合は、一致した変形を得ることができない。そこで各計算機の変形モデルの変形・適応化・トポロジ変化の状態を、低い通信コストで効率的に同期することが可能な、二分木の特性を活用した共有アルゴリズムを検討・実装する。

(4) 評価

以上の手法の評価を忠実性とユーザの感性の両面から行う。埋込み変形モデルの変形や反力について、変形・反力の精度や現実感を検証する。

4. 研究成果

(1) 適応的埋込み変形モデルの開発

手術シミュレーションにおいては、臓器等の実物体との間で整合性のとれた変形シミュレーションが可能であることが重要であり、特に幾何学的な非線形性を考慮可能であること（臓器をめくり上げる等の操作の際に回転運動が発生するため）や、異方性の考慮が可能であることが要求される。よって、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。

近年、CG の分野では、共回転系変形モデルが提案されている。共回転系変形モデルでは、変形前後の要素間で形状マッチングを行い、ローカル座標系を定義し直すことで、回転を含む運動成分を除去する。その上で線形変形モデルを用いて変形計算を行うため、幾何学的非線形性の考慮が可能となる。また、非対称の剛性行列を有するモデルを用いれば、異方性の考慮も可能となる。しかし、上記の回転運動成分の抽出処理に多くの計算時間を要する問題があった。

そこで、効率的な変形計算を可能とする新たな共回転型変形モデルを開発した。具体的には、a) 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、b) Byers と Xu の極分解を利用した、回転運動成分の抽出処理の効率化、c) 適応的メッシュの辺と辺の間の直交性を活用した内力計算の高速化手法を開発した。

オンラインリメッシュ型回転抽出と変形計算を用いる共回転系変形シミュレーション

適応的四面体メッシュにおいては、図1に示すように、適応的四面体を再帰的に二分割することにより二分木構造が構成される。この過程において、1つの親四面体から2つの子四面体、4つの孫四面体等が作り出される。このため、これら子、孫や子孫の四面体の回転行列は、それらの先祖の四面体の回転行列に近い値の行列要素を持つことになる。

そこで、回転抽出および変形計算を行う四面体解像度をそれぞれ独立かつ動的に変更する、オンラインリメッシュ型回転抽出法と変形計算法を提案した。変形計算とは別に回転抽出用の四面体の階層を別途決定し、もしその子孫の四面体を用いて変形計算を行う場合は、その先祖の四面体の回転行列をその回転行列として代用することで、回転運動成

分の抽出処理の計算回数を削減する（図2）。

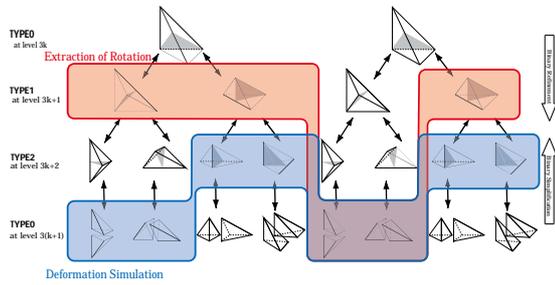


図2 回転抽出と変形計算のための2つの多重解像度モデル

具体的には、ある四面体 $T_m$ の回転行列を $R^{T_m}$ 、その隣接四面体 $T_n$ の回転行列を $R^{T_n}$ とすると、これらの差分行列 $R^{T_m} - R^{T_n}$ のフロベニウスノルムの2乗と回転角度差 $\theta$ との関係は、

$$\|R^{T_m} - R^{T_n}\|_F^2 = 4(1 - \cos\theta) \quad (1)$$

となる。この関係式より許容する隣接四面体間の回転角度差 $\theta$ に対応するフロベニウスノルムの2乗を閾値として設定することが可能となる。式(1)のフロベニウスノルムの二乗の計算は容易であるため、クォータニオンを用いる方法と比較して、高速処理が可能である。

評価実験として、1) 提案手法、2) 線形有限要素モデル、3) 非線形有限要素モデルとの間で、片持ち梁を対象に変形と反力精度および計算時間の比較実験を行った。その結果、非線形有限要素モデルの結果に対する提案手法の最大のずれは3.6 mm以下でありながらも（図3）、計算時間が最大で約70%削減されることがわかった（図4）。

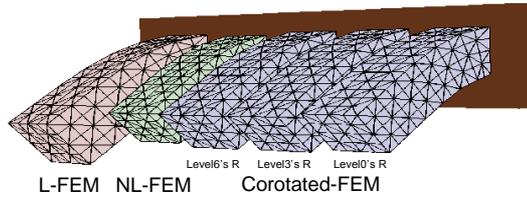


図3 変形（80秒経過後）

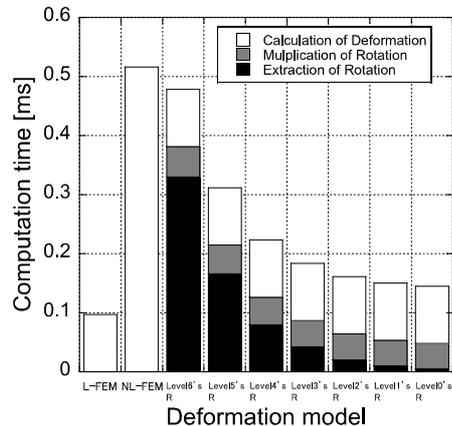


図4 計算時間

Byers と Xu の極分解を利用した、回転運動成分の抽出処理の効率化

では回転運動成分の抽出処理の実行回数の削減を試みたが、では抽出処理自体を高速化する。

四面体 $T$ の回転成分と伸び成分を含んだ変換行列 $A$ は次のように表すことができる。

$$\begin{bmatrix} A & t \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_{1x} & q_{2x} & q_{3x} & q_{4x} \\ q_{1y} & q_{2y} & q_{3y} & q_{4y} \\ q_{1z} & q_{2z} & q_{3z} & q_{4z} \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{1x} & p_{2x} & p_{3x} & p_{4x} \\ p_{1y} & p_{2y} & p_{3y} & p_{4y} \\ p_{1z} & p_{2z} & p_{3z} & p_{4z} \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \quad (2)$$

ここに、 $p$ と $q$ はそれぞれ四面体 $T$ を構成するノードの初期座標と変形後の座標値である。

本研究では行列 $A$ からの回転成分の抽出に以下の Byers と Xu の極分解法を利用する。

$$\mathbf{X}_{k+1} = \frac{1}{2}(\zeta_k \mathbf{X}_k + \zeta_k^{-1} \mathbf{X}_k^T), \quad \mathbf{X}_0 = \mathbf{A} \quad (3)$$

$$\zeta_0 = \frac{1}{\sqrt{ab}}, \zeta_1 = \sqrt{\frac{2}{\sqrt{\frac{b}{a}} + \sqrt{\frac{a}{b}}}}, \zeta_k = \sqrt{\frac{2}{\zeta_{k-1} + \zeta_{k-1}^{-1}}} \quad (4)$$

$$r = \|\mathbf{X}_k - \mathbf{X}_k^T\|_F \quad (5)$$

式(3)の計算を収束条件 $r < \sigma$ が満たされるまで繰り返す。ここに、 $\sigma$ は収束の閾値である。式(4)の変数 $a$ と $b$ はそれぞれ $a \leq \|\mathbf{X}_0^{-1}\|_2^{-1}$ 、 $b \geq \|\mathbf{X}_0\|_2$  ( $a = \|\mathbf{X}_0^{-1}\|_2^{-1}$ 、 $b = \|\mathbf{X}_0\|_2$ を用いるのが良いとされる)によって決定されるが、既に親四面体の回転抽出処理が済んでいる、あるいは前回計算時からの変形状態の変化が小さい場合は、親四面体あるいは前回計算時の $a$ と $b$ を利用することで計算コストをさらに削減することができる。と考える。

評価のため、Müller らの手法 (四面体を構成するノード $i$ の初期位置ベクトル $\mathbf{p}_i$ と回転後の位置ベクトル $\mathbf{q}_i$ 間の差の二乗和 $\sum_i (\mathbf{A}\mathbf{q}_i - \mathbf{p}_i)^2$ をノード $i$ の質量 $m_i$ で重み付けしたものを最小化)、Etzmuß らの手法 (固有値・固有ベクトルを用いる極分解を使用)、提案手法を用いて回転抽出を行った時の計算時間を比較した。その結果、Müller らや Etzmuß らの手法と比較して、計算時間を約 93%削減可能であることがわかった。

適応的メッシュの辺と辺の間の直交性を活用した内力計算の高速化手法

本研究では、四面体 $T$ の剛性行列 $\mathbf{K}_T$ を用いて弾性力を計算している。図5に示すように、筆者らの適応的四面体メッシュは3種類の直辺四面体のみで構成されている。そのため、本論文ではこの辺と辺の間の直交性を用いた効率的な計算手法を提案する。

図5に示す直方四面体の直交軸に沿ってローカル座標系を定義する。これらの座標系を用いることにより、四面体(TYPE0)の要素剛性行列 $\mathbf{K}_T$ の要素の49%が0、四面体(TYPE1)の要素剛性行列 $\mathbf{K}_T$ の要素の28%が0、四面体(TYPE2)の要素剛性行列 $\mathbf{K}_T$ の要素の39%

が0となる。したがって、これらの比率にほぼ比例した高速化が可能となる。

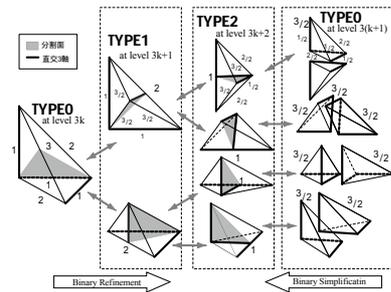
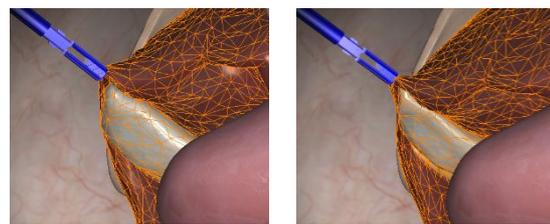


図5 適応的四面体ボリウムメッシュが持つ直交3軸

評価のため、四面体の辺と辺の間の直交性を活かして内力計算を行った場合と、通常の計算を行った場合の計算時間の比較を行った。その結果、通常的手法に比べ、計算時間が約 37%削減可能であることがわかった。

最後に、提案手法を手術シミュレータに組み込み、術具 (鉗子) で牽引した際の臓器の変形を線形有限要素法との間で比較した。いずれの手法においても、臓器モデルを適応的四面体格子に埋め込んで、変形シミュレーションを行った。図 6(a)に線形有限要素法を用いた結果を、図 6(b)に提案手法の結果を示す。提案手法においては、体積増加のアーチファクトが見られないことがわかった。加えて提案手法の GPU 実装についても検討を行い、全体剛性行列の保持方法として ELL 方式が最も提案手法に適していることが判明した。さらに、一部ではあるが、このアルゴリズムの試験的 GPU 実装・評価も進めた。その結果、力覚的実時間 (2ms) 内で、変形シミュレーションおよびメッシュの処理が可能であることが示唆された。



(a) 線形有限要素法 (b) 提案手法

図6 手術シミュレータへの実装結果

(2) 適応的埋込み変形モデルに対する面接触インタラクション

適応的四面体ボリウムメッシュの木構造と Dual Grid を用いる接触検出法

術具 - 臓器間の干渉 (接触) を効率的に検出する手法として、対象臓器を外包する適応的四面体格子を多重解像度のバウンディングボリウムと捉え、目的の (干渉が発生していると考えられる) 候補四面体を階層的に効率良く探索する方法を検討した。さらに、

探索結果の干渉候補四面体が保持する隣接四面体情報 (Dual Grid 情報) および干渉候補四面体に埋め込まれたサーフェス情報から Triangle Strip を抽出し、詳細かつ効率的に干渉判定する接触検出法を考案した。

### 埋め込み変形モデルに対する面による接触の応答計算法

本研究では、埋め込み変形モデルを用いて対象柔軟物の変形等をシミュレーションする。このため、埋め込み変形モデルに対する接触シミュレーション法の確立が必要となる。本研究では下記のアルゴリズムにて接触応答の処理を行うことで、埋め込み変形モデルに対する面接触の応答計算を実現した。

1. 剛体表面に接触判定用のノード群をあらかじめ割り振っておく。

2. これらノード群と四面体格子内に埋め込まれたサーフェス表面との間でペナルティ法による接触応答の処理を行う。接触力が発生する場合は、この接触力を四面体格子ノードへの外力として与える。

### (3) インタラクションの同時性の共有機構

柔軟物体の細分割 (大変形) 領域の変形同期と変形の外挿補間によって時間的整合性を保証する遠隔触覚協働環境を構築し、遠隔多地点協働型 VR 手術シミュレータへの実装・評価を行った。

柔軟物体の変形シミュレーションにおいて、ユーザによる変形操作が与えられた局所領域は最も変形が大きい。本研究では、オンラインリメッシュ型変形モデル (適応的変形モデル) を用いており、変形が大きい局所領域の四面体が細かく分割され、高精度に計算される。そこで、この変形が大きく高精度に計算される局所領域のキーフレーム情報のみを各地点が共有することで、柔軟物変形の同期制御を行うこととした (図7)。シミュレーションの時間の進みを示すシミュレーションタイムを各地点間で送信し、自地点と他地点のシミュレーションタイム差により各地点間の計算機性能差を推定する。その結果、必要に応じて局所領域のキーフレーム情報を送受信する。各地点は受信したキーフレーム情報を基に、二分木の状態の同期と局所領域の変形の同期、およびの変形の外挿補間を行う。これらの処理は、簡易な論理演算式によって高速に処理される。

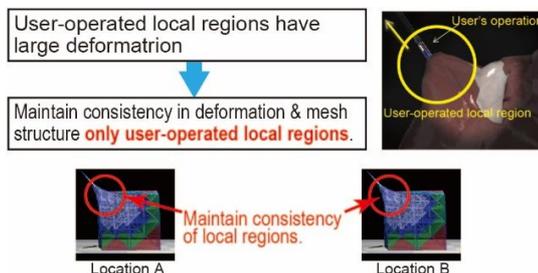


図7 柔軟物変形の同期制御

図8に示す滋賀県内の3拠点 (東近江総合医療センター、滋賀医科大学、立命館大学) に、この遠隔多地点手術シミュレータを導入し、実地試用を行った。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。QoS 補償は行わず、律速部分の機器速度は 100 MBps であった。東近江総合医療センターには熟練外科医 (指導医) を配置、滋賀医科大学と立命館大学の2拠点にはそれぞれ訓練生1名ずつを配置し、この3拠点間にて実験を行った。まず、術野に対して3拠点がそれぞれ自由に操作できる状態を設定し、指導医の指示のもとに模擬手術を進める遠隔協働作業を行った。胆嚢摘出術を対象に、指導医が胆嚢拳上の手本を見せ、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手術シナリオに沿って進められた。次に、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。この結果、操作に対する反力と提示される映像の応答時間や分解能は訓練用途としては支障がないことが確認された。通信による応答遅延も、手技訓練としては支障のない範囲 (数 ms 程度の遅延) であった。



図8 適応的四面体リメッシュを持つ直交3軸

### 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16件)

- (1) 田川和義, 山田隆洋, 田中弘美, 「オンラインリメッシュ型回転抽出と変形計算による共回転系変形シミュレーションの高速化」, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J99-D, No.9, Sep. 1, 2016. (印刷中)

( 査読有 )

- (2) K. Tagawa, H. T. Tanaka, Y. Kurumi, M. Kormori and S. Morikawa, "Evaluation of Network-Based Minimally Invasive VR Surgery Simulator", Stud Health Technol Inform, Vol.220, pp.403-406, 2016. ( 査読有 )  
他 14 件

[ 学会発表 ] ( 計 4 4 件 )

- (1) K. Tagawa, H. T. Tanaka, M. Komori, Y. Kurumi, S. Morikawa, "Remote and Low Cost VR Surgery Simulator", Proc. IEEE-VR, pp.CD, March 21, 2016, Greenville ( 米国 ) .  
(2) K. Tagawa, T. Yamada, H. T. Tanaka, "A Study on Corotated Deformation Model for Simulating Soft Tissue in Large Deformation", Proc. InMed, pp.333-343, September 11, 2015, 立命館大学 ( 京都府・京都市 ) .  
(3) R. Kuriki, K. Tagawa and H. T. Tanaka, "A Surgery Simulator Using an Optimized Space and Time Adaptive Deformation Simulation on GPU", Proc. of AsiaHaptics, November 19, 2014, つくば国際会議場 ( 茨城県・つくば市 ) .  
(4) K. Tagawa, T. Yamada and H. T. Tanaka, "A Rectangular Tetrahedral Adaptive Mesh Based Corotational Deformation Model for Interactive Soft Tissue Simulation", Proc. of IEEE EMBC (IEEE-EMBC2013), pp.7164-7167, July 7, 2013, グランキューブ大阪 ( 大阪府・大阪市 ) .  
(5) K. Tagawa, T. Oishi and H. T. Tanaka, "Adaptive and Embedded Deformation Model: An Approach for Haptic Interaction with Complex Inhomogeneous Objects", Proc. of WorldHaptics (IEEE-Haptics2013), pp.169-174, April 15, 2013, Daejeon( 韓国 ) .

他 39 件

[ 産業財産権 ]

○出願状況 ( 計 3 件 )

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：平成 26 年 5 月 23 日

国内外の別：国内

名称：非線形変形計算システム及び手術シミュレータ

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 2014-030740

出願年月日：平成 26 年 2 月 20 日

国内外の別：国内

他 1 件

[ その他 ]

ホームページ等

<http://www.tagawa.info>

6 . 研究組織

(1)研究代表者

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