

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 24 年 3 月 4 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2009～2011

課題番号：21240017

研究課題名（和文）

超臨場感遠隔協働のためのインタラクティブ柔軟物シミュレーションと可視触化の研究

研究課題名（英文）

Soft object simulation and visuo-haptic interaction for haptic collaborative virtual environment with realistic sensation

研究代表者

田中 弘美（HIROMI TANAKA）

立命館大学・情報理工学部・教授

研究者番号：10268154

研究成果の概要（和文）：

触覚情報が重要な遠隔協働タスクとして医療分野における低侵襲手術訓練を想定し、触覚フィードバックによる遠隔実地訓練を可能にする遠隔協働型超臨場感仮想環境を実現した。そのために、(1) マイクロセンサを用いた内部センシングに基づく、生体軟組織等の非一様変形パラメータ群推定法、(2) オンラインリメッシュ型インタラクティブ柔軟物シミュレーションの実装と高速化法、(3) 腫瘍や血管などの微細構造の変形と連動させた大規模ボリュームデータの可視化法を確立し、(4) 遠隔3地点間で低侵襲胆嚢摘出手術と穿刺手術訓練が可能となるボリュームベース遠隔触覚協働環境システムのプロトタイプの実現し、検証実験により有効性を実証した。

研究成果の概要（英文）：

We have developed haptic collaborative virtual environments where remote hands-on training of minimally invasive surgery become enabled by tactile feedback.

For this purpose, we have developed: (1) an estimation method of deformation parameters of non-uniform soft objects, with use of micro force sensors to observe the internal structure of the soft objects, (2) non-uniform soft object simulation with online-remesh, (3) a visualization method of large volume data that have linked the deformation of the microstructure, such as blood vessels and tumor, and (4) a prototype of remote hands-on training system of minimally invasive surgery among three remote locations. We have demonstrated the performance of the proposed system through experimental verification.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|---------|------------|------------|------------|
| 2009 年度 | 11,600,000 | 3,480,000 | 15,080,000 |
| 2010 年度 | 11,400,000 | 3,420,000 | 14,820,000 |
| 2011 年度 | 11,400,000 | 3,420,000 | 14,820,000 |
| 総計 | 34,400,000 | 10,320,000 | 44,720,000 |

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：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、手術シミュレーション、可視化、力学モデリング、MEMS、ヒューマンインタフェース

1. 研究開始当初の背景

医療分野において、メディカルロボティクスやバーチャルメディスンと呼ばれる分野が誕生し、生体軟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。

従来、医師は長い臨床経験と動物実験を介してその技量の向上をはかってきたが、近年は、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外科手術訓練への期待が高まっていた。サーフェスペースの外科手術シミュレータも実用化されていたが、反力再現の精度が課題であった。

一方、ハプティック(触覚)デバイスの実用化も進み、遠隔地点間で触覚を共有するハプティックコミュニケーションの研究が始められていた。触覚協働仮想環 HCVE(Haptic Collaborative Virtual Environment)の研究も開始されていた。2005年にはオーストラリアとスウェーデン間で HCVE を共有した遠隔手術シミュレーションの成功が報告されていた。しかし、リアルタイム性を優先させるために、対象の臓器は物理ベースの(物理法則に基づく)変形計算はせず低速で移動するに留まっていた。また、国内では、慈恵医大を中心としたグループが、HCVE を共有するロボット手術トレーニング用遠隔手術シミュレーションシステムを開発し、世界をリードしていた。しかし同様に、リアルタイム性を優先するために、臓器の変形モデルは物理ベースではなく幾何ベースの簡易変形シミュレーションに基づいており、力学的変形特性がパラメータ化されていないため、物理法則に忠実なシミュレーションを行えず、実物の臓器の力学変形特性に忠実でかつ高速高精度の物理ベースシミュレーションの実現が課題となっていた。

そこで、生体軟組織などの柔軟物の力学的変形特性に忠実な変形計算を行いながら、リアルタイム性を有する手法の確立が、遠隔触覚協働環境実現のために期待されていた。

2. 研究の目的

実世界における「触感」を提供し、さらに、コンピュータ支援により実世界では直接視ることも触ることもできない物体表面下の内部の透視や触知感を与える、独自のボリュームベース遠隔触覚協働環境を実現するための基盤技術を構築し、それらを遠隔協働低侵襲手術訓練に応用することである。

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4研究項目を並行して進めた。

(1)内部センシングに基づく非一様柔軟物の

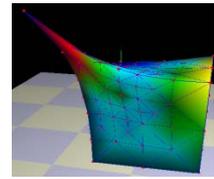
リアリティーベース力学モデリングの研究：

①分担者が開発した2mm角の柔軟物理込み用センサを非一様柔軟物内部に埋め込み、既知外力の作用による表面の変形を観測し、内部変形や力学量の分布の変化から、皮膚の弾力を表すような力学的変形特性や内部構造を自動抽出する方法を研究する。

②生体組織の初期状態と変形状態をMR装置で撮像し、撮像画像間の特徴点を追跡しマッチングすることにより、生体組織の変形特性を自動抽出する方法を研究する。

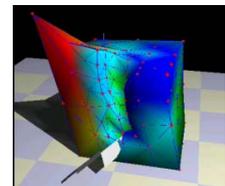
(2)オンラインリメッシュ型非一様柔軟物体シミュレーションの研究：

①生体等の柔軟物の変形特性を高精度に表現するために、研究代表者が提案した、柔軟物のオンラインの任意の変形に応じてメッシュの整合性を保存する、物理ベースのオンラインリメッシュモデル(動的適応的ボリュームモデルDDAM:



Dynamic Deformable Adaptive Grid) (右上図)を基盤とし、変形精度の向上を図るためにDDAMを連続体力学に基づく動的適応的変形モデルに拡張し、変形歪や物体間のインタラクションによる摩擦力を高精度に表現する。

②DDAMに基づく、非一様柔軟物のオンラインリメッシュ型切断および剥離シミュレーションを構築する(右図)。



(3)非一様柔軟物シミュレーションのリアルタイム可視化の研究：

分担者の提案したMPU法(多階層分割型陰関数曲面構成法)を基盤とし、柔軟物の変形や切断シミュレーションなどで生じる、格子点の配置や粗密が不規則な非構造格子状のボリュームデータを、 n 次元で微分可能なデータに補間して正規格子化し、リアルタイムに可視化する。

(4)パラメーター同期交信型ボリュームベース遠隔触覚協働環境構築：

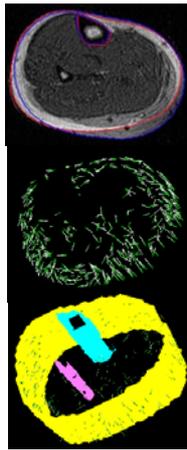
遠隔多地点間で「触覚」を1000HZで提供するボリュームベース臨場感通信を実現するために、各地点の操作パラメータを世界時間のタイムスタンプを添付してサーバに集め、サーバがタイムスタンプに従って同期をとり、同期させた全地点の操作パラメータを全地点へ同時に配信するシステムを構築する。同期がとれた遠隔協働仮想環境において、複数人(3人)が同一対象臓器へ協調操作する低侵襲手術訓練タスクを達成する。

4. 研究成果

(1)内部センシングに基づく非一様柔軟物のリアリティーベース力学モデリングの研究：

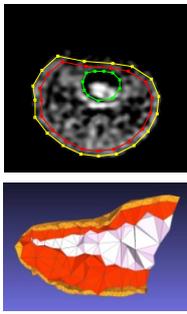
①MR 画像を用いた内部観測による非一様柔軟物(下腿)の変形特性抽出:

MR 画像を用いて生体組織の内部変形を観測することにより、各領域の非一様な変形特性を抽出した。生体組織の初期状態と変形状態を MR 装置で撮像し、撮像画像間の特徴点を追跡しマッチングすることにより、生体組織の変形特性を抽出した。右図は上から、下腿の MR 画像、特徴点追跡結果、変形(各小領域の 3 次元移動ベクトル)の 3 次元表示を示す。

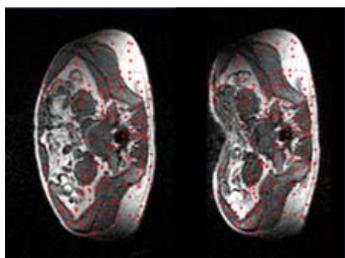
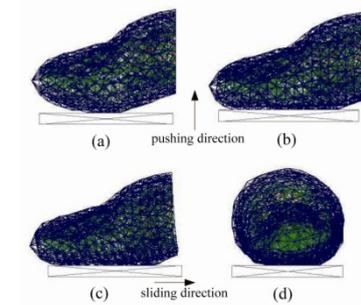


②生体(指先)の力学モデリング:

複数の組織から構成されるヒトの指先の力学モデルを構築した。指先の三次元構造を MR 画像(右図)から抽出し、多層モデルを構成し、指先変形の力学シミュレーションを実現した。指先の三次元構造の抽出では、指先の MR 画像の各スライスで輪郭を抽出し、スライス間を接続することにより指先の三次元構造を構成した。上図に示す指先の三次元モデルは、骨、組織、皮膚の三層から成っている。各層を弾性体でモデリングし、それぞれにヤング率、粘性率、ポワソン比を割り当てた。各層を制約安定化法で接続し、シミュレーションを行った(右図)。



押し動作と滑り動作に起因する変形と力分布を推定した。また、変形前と変形後の MR 画像から、変形場を計算するアルゴリズムを構築した。画像間の対応する特徴点を求め(下図)、変形モデルに基づき誤対応を除去することで、より正確な変形場を求める手法を提案した。



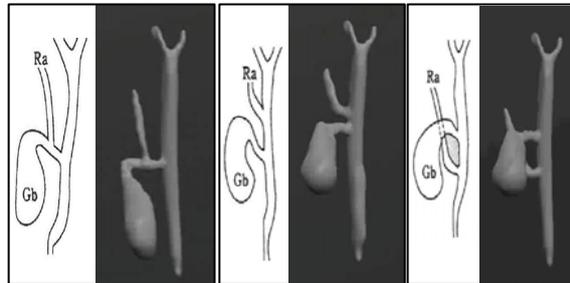
(2)オンラインリメッシュ型非一様柔軟物体シミュレーションの研究:

複数人の操作による、非一様柔軟物の変形挙動や物体同士やツールとのインタラクションを変形特性と摩擦を考慮して忠実に再現し視触覚提示する、物理ベース柔軟物シミュレーションを構築した。

①軟組織ボリュームモデリングと手術シミュレーション

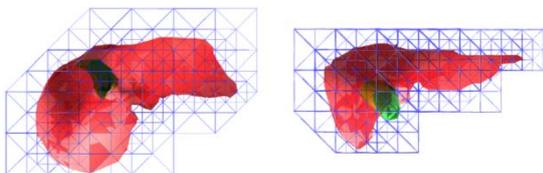
・肝臓と胆嚢の異形等のモデリング:

患者個体で異なった走行や分岐が観られる胆嚢管・総胆管の異常走行(異型)をモデル化した。これまでに術中に現れた異常走行例から 10 種類の異型モデル(下図)を作成した。さらに、訓練シナリオ毎に複数の異型モデルモジュールから選択し、異なる形状が現れるよう、組み換え可能なデータ構造を考案・実装した。



・表面と内部構造に適応的なモデリング:

生体や臓器等は多様な形状を有するとともに、内部の物性が非一様である。そこで、対象物体の表面形状および内部の非一様性に対して、適応的に四面体格子やサーフェス情報を生成する手法を開発した。開発中の手術シミュレータでは、対象物体の表面形状および内部の非一様性を高精度に表現するために、表面の曲率および内部の非一様性に応じてメッシュの解像度を変更する、多重解像度ボリュームモデリング手法を用いる(下図)。

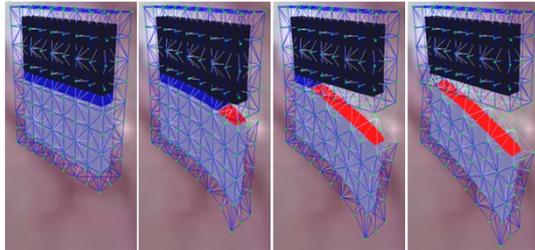


この手法の拡張を進め、マーチングテトラ法を用いて生成されたサーフェス情報を各解像度の四面体に埋め込む処理の追度のより一層の向上を実現した。加を行った。これにより、表面形状の近似精

・異方性をもつ弾性膜のモデリングおよびしよう膜の剥離シミュレーション:

剥離の際に生じる剥離面やしよう膜などのサーフェスを、オンラインで動的にモデリングする手法を開発した。剥離面に位置する

四面体は、剥離により物理的に分離された異なる軟組織領域を内包することになる。したがって、この剥離面を内包する四面体を動的に重複生成し各軟組織領域に割り当てることで、軟組織の剥離を伴う変形表現を可能とした。加えて、臓器を覆うしょう膜等の弾性膜のモデリングおよびしょう膜の剥離シミュレーション(下図)を開発した。



初期状態 剥離過程1 剥離過程2 剥離後

②手術シミュレーションの高速化

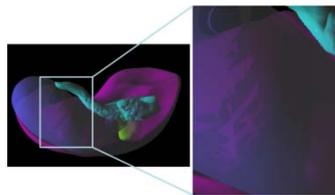
現状のオンラインリメッシュモデルでは、精度および処理速度は、臓器を構成する要素数に依存しているのが現状である。そこでより精度の良い臓器変形処理を実現するために、GPGPU (General Purpose computing on Graphics Processing Units)を用いたハードウェアアクセラレーションをフル活用した高速変形処理の実装を行った。また、描画スレッドと変形・補間処理(計算)スレッドとの同期処理を行い、同時に、排他処理を行うことにより、CPUやメモリバスの不要な使用やお互いのスレッドで負担になることを避ける処理を組み入れた。さらに、CPUからGPUへの転送するデータ量を変形処理に必要なデータ量だけに限定することによって、変形・補間処理全体の高速化を行った。

これらの処理の追加により、約90[fps]でシミュレーションを実行することが可能となり、2.5倍から4倍程度の高速処理を実現した。フレームレートの向上に伴い、CPUの使用率も6割程度で実行することを可能とした。

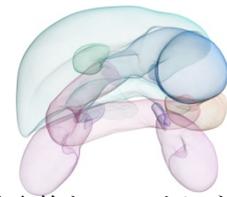
(3)非一様柔軟物シミュレーションのリアルタイム可視化の研究：

①高信頼性「透視」(半透明可視化)法：

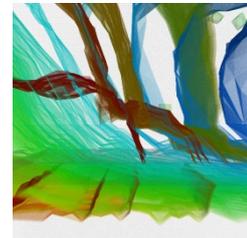
手術シミュレータの標準画面では、現実の手術を模して臓器群は不透明な状態で可視化される。我々は、CGの利点を生かし、人体の奥の方であって見えにくい手術対象臓器を、仮想的に見える状態にする臓器群の半透明な「透視」を実現した。CGで「透視」実装する場合は、複数の臓器が互いに接触する接触面で異なる臓器の表面がまだらに混在して描かれてしまう(右図)。



この問題を解決するために、粒子ベースレンダリングを開発した。これは、不透明発光粒子を、ボリューム、サーフェス、スライスなどを描く際の基本形状とし、これに確率的なアルゴリズムを適用することで、正しい透視を実現する技術である。粒子ベースレンダリングによって描かれた透視図を示す(上図)。

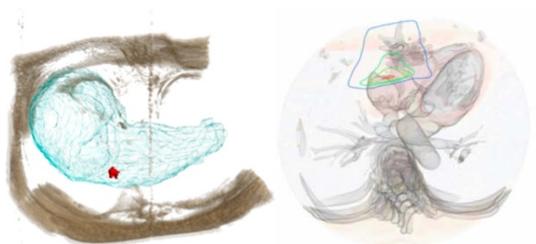


さらに、手術中に臓器に加わる力の分布の変動を正確に可視化する方法を開発した。各時刻(シミュレーションにおいては各ステップ)における力の大きさの分布を、半透明等値面として可視化し、かつ、複数あるいは全ての時刻での等値面を重畳可視化する。これにより、一枚の静止画の中で、力の分布の全時間的な変動を外観できる。異なる時刻での等値面は互いに複雑に交差し得るが、粒子ベースレンダリングを用いれば正確かつ高速な可視化が可能である。右下図に可視化例を示す。青→水色→緑→黄色→赤の順に時間が経過している。



②異なる医用可視化を融合する半透明可視化

医用ボリュームデータの主な可視化は3つある第1は、適当な密度値の等値面を可視化する「間接的ボリュームレンダリング」、第2は、ボリュームデータ全体をゼリー状の半透明物質に見立てて可視化する「直接的ボリュームレンダリング」、第3は、人体の切断面を可視化する「スライスレンダリング」である。上記の3種の可視化にはそれぞれ利点があり、通常は、適宜に使い分けられる。本研究においては、これらの3種の可視化を半透明融合し、同時に実行する技術を開発した。これにより、例えば、スライスレンダリングで病変部の人体断面を精査しながら、直接的/間接的ボリュームレンダリングによってその断面の位置を



確認できる。上左図に、間接的ボリュームレンダリング(肝臓(水色))と直接的ボリュームレンダリング(腫瘍(赤)、周辺臓器(茶色))の半透明融合可視化例と、上右図に、臓器群の間接的ボリュームレンダリングと、適当な切断面上での放射線治療における線量分布の等高線の、半透明融合可視化例を示す。

(4) パラメーター同期交信型ボリュームベース遠隔触覚協働環境構築:

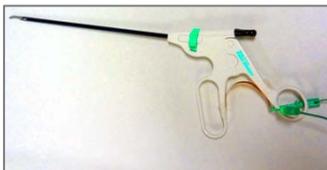
①遠隔3地点間(立命大, 滋賀医大, 滋賀病院)間で手術シミュレータを導入し, ボリュームベース遠隔視触覚協働仮想環境を実装した. さらに, 各地点の操作パラメータを世界時間のタイムスタンプを添付してサーバに集め, サーバがタイムスタンプに従って10mm秒程度で同期をとり, 同期させた全地点の操作パラメータを全地点へ同時に配信するシステムを構築した.

②一対多の一斉配信により, 指導医が被訓練者のシミュレータを作動して“1指導者が多被訓練者に同時にあるいは並列に手を沿えて指導する”, ネットワーク型の遠隔協働型低侵襲手術訓練システムを開発した. 力覚フィードバックによる“手を沿えた指導”の実現に加えて, ビデオ会議システムを利用した手元映像情報と音声情報の共有によるマルチモーダルな遠隔指導環境(右図)を構築した. さらに, 本システムを用いた訓練での学習効果を評価した.



③手術作業台/コックピットの開発

鉗子ハンドルに力覚提示が可能な手術作業台/コックピットを開発した. 力覚提示装置の構造に関して, 一般的に, (a) やわらかい対象物を提示する場合には, 高い位置分解能, 高い力分解能が要求され, (b) かたい対象物を提示する場合には, 高い剛性, 高い出力が要求される, (c) 滑らかで低慣性な動作の実現において, 高いバックドライバビリティ, 軽量の機構(低慣性)が要求される. そこで, やわらかい対象物(臓器など)とかたい対象物(骨など)の双方の提示に対応する必要があるため, 上記すべての条件を満たすことが可能な, 提示デバイスの検討を行った. その結果, (1) ブレーキ機



構を用いたパッシブな提示方式, (2) レリーサを用いた方式を考案し, 提示デバイスの試作した.(下図)

国内外における位置付け

以上の研究成果は, 世界のコンピュータ外科研究を先導する国際会議 CARS(Computer Assisted Radiology and Surgery), IEEE Haptics, IEEE ICRA(Robotics Automation), 最も歴史のある VR 技術と医療研究の国際会議の MMVR (Medicine Meets Virtual Reality), EuroVis など, IEEE の国際会議を始め, 世界の研究を先導する国際会議や学会誌において発表した(研究業績を参照のこと).

5. 主な発表論文等

【雑誌論文】(計97件)

①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, pp. 11-18, 2012. 査読有

②田川和義, 藤井健史, 山口哲, 田中弘美, “力覚提示を伴う高品質な穿刺シミュレーションのためのマルチレート・オンラインリメッシュ法”, 日本VR 医学会論文誌, 査読有, Vol. 9 No. 1, 2011, pp. 7-16. 査読有

③田川和義, 佐々木康行, 田中弘美, “オンラインリメッシュ型変形計算のGPU による高速化と大規模仮想柔軟物体との力覚インタラクション”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 16 No. 3, 2011, pp. 479-487. 査読有

④脇田 航, 田中弘美, “同一力覚デバイスによるテクスチャベースの摩擦時計測・モデル化・提示システムの開発,” vol. J94-D, no. 5, pp. 814-820, 2011. 査読有,

⑤Van Anh Ho and Shinichi Hirai, “Modeling and Analysis of a Frictional Sliding Soft Fingertip, and Experimental Validations”, AdvancedRobotics, Vol. 25, No. 3. 2011, pp. 291-311, 査読有

⑥脇田 航, 村井博一, 田中弘美, “同一力覚デバイスによる摩擦時計測・提示システム”, 電子情報通信学会論文誌D「システム開発論文」特集号, 査読有, vol. J93-D no. 10, 2010, pp. 2330 - 2333, 査読有

⑦S. Tanaka, K. Hasegawa, S. Nakata, H. Nakajima, T. Hatta, F. Rambu Ngana, T. Kawamura, N. Sakamoto, K. Koyamada, “Grid-Independent Metropolis Sampling for Volume Visualization”, Int. J. of Modeling, Simulation, and Sci. Computing, Vol. 1, No. 2, 2010, pp. 119-218. 査読有

⑧柴田 瑞穂, 太田 剛士, 平井 慎一, “摘み滑り動作を利用した布地の展開動作”, 日本ロボット学会誌, 査読有, Vol. 27, 2009, pp. 1029-1036. 査読有

⑨木村彰徳, 山添悠, 田中覚, 田中弘美, “ボリュームデータの局所特徴に基づく並列三次元領域抽出”, 画像電子学会論文誌, Vol. 38, No. 4, 2009, pp. 471-480. 査読有

〔学会発表〕(計 183 件)

- ①K. Tagawa, H. T. Tanaka, Y. Kurumi, M. Komori and S. Morikawa, “Expression of Cystohepatic Duct Anomaly Using Modular Structured Organ Model in a Laparoscopic Surgery Simulator”, International J. of Computer Assisted Radiology and Surgery (CARS2012), June 27-30, 2012, Pisa (Italy). 査読有
- ②S. Tanaka, K. Hasegawa, Y. Shimokubo, T. Kaneko, T. Kawamura, S. Nakata, S. Ojima, N. Sakamoto, H. T. Tanaka, and K. Koyamada” Particle-Based Transparent Rendering of Implicit Surfaces and its Application to Fused Visualization; EuroVis 2012, June 5-8, 2012, Vienna (Austria). 査読有
- ③K. Tagawa, Y. Sasaki and H. T. Tanaka, “Online Re-Mesh and Multi-Rate Deformation Simulation by GPU for Haptic Interaction with Large Scale Elastic Objects”, In Proc. of IEEE Haptics, pp.531-538, Mar. 4-7, 2012, Vancouver (Canada). 査読有
- ④Z. Wang, Y. Abe, S. Hirai, and S. Morikawa “A 3D FE Dynamic Model of Human Fingertip Based on MRI Data” 2011 IEEE Int. Symp. on Haptic Audio-Visual Environments and Games (HAVE2011) pp8-12, October 14-17, 2011, Hebei (China) 査読有
- ⑤S. Kohara, T. Tateyama, Amir H. Foruzan, A. Furukawa, S. Kanasaki, M. Wakamiya, X. Wei and Yen-Wei Chen “Preliminary Study on Statistical Shape Model Applied to Diagnosis of Liver Cirrhosis” Proc. IEEE Int. Conf. Image Processing pp2978-2981, Sept. 11-14, 2011, Brussels (Belgium). 査読有
- ⑥Yu Masuda, Tomoko Tateyama, Wei Xiong, Jiayin Zhou, Makoto Wakamiya, Syuzo Kanasaki, Akira Furukawa and Yen Wei Chen “CT IMAGE CONTRAST ENHANCEMENT AND LIVER TUMOR DETECTION BY USING PROBABILITY DENSITY FUNCTION AND EM/MPM ALGORITHM” Proc. of IEEE Int. Conf. on Image Processing, Sep. 11-14, 2011 pp1453-1456. Brussels (Belgium). 査読有
- ⑦K. TAGAWA, S. NAKAGAWA, H. T. TANAKA, Y. KURUMI, S. MORIKAWA and M. KOMORI, “Efficient Detachment Simulation Using Online-Remesh Deformation Models of Rectangular Tetrahedral Volume Mesh”, Int. J. of CARS2011, Vol. 6, Supp.1, 2011, pp. 118-120, June 20-25, 2011, Berlin (Germany). 査読有,
- ⑧Z. Wang and S. Hirai “Green Strain Based FE Modeling of Rheological Objects for Handling Large Deformation and Rotation” Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and

Automation 査読有 2011 pp4762-4767, May 9-13, 2011, Shanghai (China).

⑨Tagawa K, Bito T, Hiroimi T. Tanaka “A method of synchronization for haptic collaborative virtual environments in multipoint and multi-level computer performance systems”, MMVR2011 pp638-644, Feb. 8-12, 2011, California (USA). 査読有

⑩Tagawa K, Tanaka H T “A hybrid dynamic deformation model for surgery simulation.” MMVR2011 pp645-649, February 8-12, 2011, California (America). 査読有

⑪T. Kawamura, K. Koyamada, N. Sakamoto, S. Tanaka “A High-Quality Sampling Technique of PBVR for Unstructured Hexahedral Mesh Data” Proc. IEEE Visualization 2010, Oct. 24, 2010, Taipei (Taiwan) 査読有

〔その他〕

ホームページ等

[URL] <http://www.cv.ci.ritsumei.ac.jp/haptic/works.html>

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

平井 慎一 (HIRAI SHINICHI)

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号：90212167

陳 延偉 (CHIN ENI)

立命館大学・情報理工学部・教授

研究者番号：60236841

田中 覚 (TANAKA SATOSHI)

立命館大学・情報理工学部・教授

研究者番号：60251980

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：60220042

来見 良誠 (KURUMI YOSHIMASA)

滋賀医科大学・医学部・教授

研究者番号：70205219

山口 哲 (YAMAGUCHI SATOSHI)

大阪大学・歯科研究科・助教

研究者番号：30397773

小森 優 (KOMORI MASARU)

滋賀医科大学・医学部・教授

研究者番号：80186824