

## 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 5月25日現在

機関番号：34315

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010 ～ 2011

課題番号：22700129

研究課題名（和文） 大規模超臨場感遠隔協働環境構築のための適応的・階層型柔軟物体表現と可視触化の研究

研究課題名（英文） An adaptive and hierarchical adaptive deformation model for 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・ポストドクトラルフェロー

研究者番号：40401319

研究成果の概要（和文）：

本研究では、遠隔多地点間において大規模仮想柔軟体（ノード数3万以上）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、遠隔協働環境の基盤となる手法を確立することを目的とし、(a)時空間適応的変形モデルによる大規模仮想柔軟体シミュレーション、(b)階層型変形モデルによる大規模仮想柔軟体シミュレーション、(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大規模仮想柔軟体の変形・切断・剥離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）の確立、(d)以上の手法の評価、の項目について研究を行った。

研究成果の概要（英文）：

To realize a haptic collaborative virtual environment which is able to share large scale deformable objects, we studied 1) a multi-rate and adaptive (multi-resolution) deformation simulation, 2) a hierarchical deformation model, and 3) a method for preserving consistency of shared deformable objects. We implemented these approaches into our prototype surgery system and confirmed feasibility and effectiveness of these approaches.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2011年度	1,500,000	450,000	1,950,000
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：複合領域

科研費の分科・細目：情報学，メディア情報学・データベース

キーワード：バーチャルリアリティ，遠隔医療，ハイパフォーマンス・コンピューティング，臨場感通信

## 1. 研究開始当初の背景

まず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系モデルや 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に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。このために、静的な線形モデルの近似や、変形に応じてメッシュを再分割するもの（申請者の適応的ポリウムメッシュを用いた手法を含む）等が試みられている。

一方で、力学的なモデルによらない変形あるいは力覚表現の可能性が検討されている。古くは、衝突の際の振動をシミュレーションではなく記録波形の再生により提示することで対象の硬さなどについての力覚的現実感が向上することが報告されており、変形特性についても、実時間インタラクションを可能とする試みとして、状態空間によるモデル化手法や申請者の記録再生型変形モデル（インパルス応答変形モデル）などの提案がなされている。

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い。モデルを階層的に結合することで、剛体については比較的大規模な仮想世界の実時間操作が実現されつつあるものの、柔軟体については十分な検討がなされていない。

次に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遠隔協働手術シミュレーションを対象として研究がなされている。まず国内においては、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、国外においては、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おり、大規模仮想柔軟体を遠隔で共有する研究はなされていなかった。

## 2. 研究の目的

本研究では、遠隔多地点間において大規模仮想柔軟体（ノード数 3 万以上）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、遠隔協働環境の基盤となる手法を確立する。具体的には、(a)時空間適応的変形モデルによる大規模仮想柔軟体シミュレ-

ーション、(b)階層型変形モデルによる大規模仮想柔軟体シミュレーション、(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大規模仮想柔軟体の変形・切断・剥離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行う

## 3. 研究の方法

### (1) 大規模仮想柔軟体の時空間適応的変形・切断・剥離シミュレーション

対象物の変形状態に応じて、1)メッシュの空間解像度、2)シミュレーションの時間解像度をオンラインで更新する手法を確立する。すなわち、ユーザの力覚ポインタ近傍の局所領域を細かいメッシュかつ高い周波数で計算し、それ以外の領域を粗いメッシュかつ低い周波数で計算する。

加えて、GPU での処理に適した変形計算アルゴリズムを考案する。

### (2) 大規模仮想柔軟体の階層型変形・切断・剥離シミュレーション

ユーザと力覚ポインタ近傍の局所領域との間に高速なフィードバックループを確保するとともに、対象物の局所領域のモデルと大域のモデルとを連成して解くことで精度の高い反力を求める手法を確立する。このため、本研究では各計算機にそれぞれ変形モデルを持たせて、独立して変形計算を行うアプローチを取る。

加えて異種の変形モデル（記録再生変形モデル、condensation 手法、質点・バネモデル）を融合したハイブリッド変形モデルを確立する。対象の部位ごとに、変形の大きさ・トポロジ変化の有無・動特性の考慮の必要性に応じて、最適な変形モデルを割り当てる。これら異種の変形モデルを連成して安定・効率的に解く方法を確立する。

### (3) 大規模仮想柔軟体に対するインタラクションの同時性の共有手法

複数の計算機間で大規模仮想柔軟体の変形の同時性を共有する手法を確立する。本研究では各計算機が独立して変形モデルを持ち、変形計算を行う。よって 1)各計算機の変形モデルの適応化の状態（空間・時間解像度）が異なる場合、2)各計算機の性能が異なる場合、3)通信遅延が発生す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・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、適応的変形モデルのツリーの特性を活用した共有アルゴリズムを確立する。

#### 4. 研究成果

##### (1) 大規模仮想柔軟体の時空間適応的変形・切断・剥離シミュレーション

GPU 上にて、マルチレート・オンラインリメッシュ型変形モデルの変形計算を効率よく行うための手法を提案した。具体的には、1)ノードリストと接続表とで構成されるリクータブルなデータ構造 (図 1), 2)リメッシュの際に、ノードリスト (図 1) と接続表 (図 2) を高速に更新することが可能なアルゴリズムを提案した。さらに変形計算のみならず、リメッシュの判定処理や反力計算を、GPU を併用しながら効率よく行うための方法も提案した。

提案手法の有効性を検証するため、大規模仮想柔軟体とのインタラクションが可能な VR システムを実装した (図 3)。立方体モデル (初期ノード数: 4913, 最大ノード数: 35937) の場合、毎ステップの変形計算に要した処理時間は 0.158[ms] (最大でも 0.531[ms])、リメッシュの処理に要した処理時間は一定で、GPU 側では 0.110[ms]、CPU 側では 0.047[ms] であった。これに対して、すべての処理を CPU 上で行った場合、6.33[ms]を要した。これは力覚提示を行うには不十分な処理時間であり、反力に違和感を覚える結果となった。

なお、CPU と GPU 間のメモリ転送に要した処理時間は 0.281[ms]であった。将来的には、変形計算・干渉計算・視覚提示の処理を GPU 上を実装することで、このメモリ転送を省くことが可能であると考えている。

P <sub>n-1</sub>			P <sub>n</sub>			P <sub>n+1</sub>		
X <sub>n-1</sub>	Y <sub>n-1</sub>	Z <sub>n-1</sub>	X <sub>n</sub>	Y <sub>n</sub>	Z <sub>n</sub>	X <sub>n+1</sub>	Y <sub>n+1</sub>	Z <sub>n+1</sub>

図 1 ノードリスト

P <sub>n</sub>	NodeID <sub>n</sub>	D <sub>n</sub>	C <sub>n</sub>	NUM <sub>n</sub>	N <sub>n,0</sub>	LEN <sub>n,0</sub>	K <sub>n,0</sub>	N <sub>n,1</sub>	LEN <sub>n,1</sub>	K <sub>n,1</sub>	N <sub>n,max</sub>	LEN <sub>n,max</sub>	K <sub>n,max</sub>
P <sub>n</sub>	NodeID <sub>n</sub>	D <sub>n</sub>	C <sub>n</sub>	NUM <sub>n</sub>	N <sub>n,0</sub>	LEN <sub>n,0</sub>	K <sub>n,0</sub>	N <sub>n,1</sub>	LEN <sub>n,1</sub>	K <sub>n,1</sub>	N <sub>n,max</sub>	LEN <sub>n,max</sub>	K <sub>n,max</sub>
P <sub>n+1</sub>	NodeID <sub>n+1</sub>	D <sub>n+1</sub>	C <sub>n+1</sub>	NUM <sub>n+1</sub>	N <sub>n+1,0</sub>	LEN <sub>n+1,0</sub>	K <sub>n+1,0</sub>	N <sub>n+1,1</sub>	LEN <sub>n+1,1</sub>	K <sub>n+1,1</sub>	N <sub>n+1,max</sub>	LEN <sub>n+1,max</sub>	K <sub>n+1,max</sub>

図 2 接続表

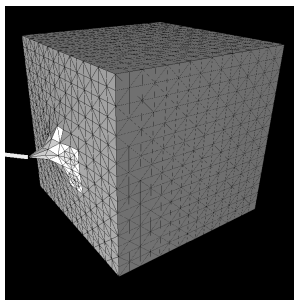


図 3 インタラクションの様子

##### (2) 大規模仮想柔軟体の階層型変形・切断・剥離シミュレーション

一般に手術対象の臓器は、血管や癒着により臓器の一部が内腔に固定され、また変形や切断等の操作の対象は一部に限定されると考えることができることが多い。この場合、

操作対象の近傍領域には大変形およびトポロジ変化が発生する。しかし、それ以外の領域については、変形は比較的小さく、トポロジ変化も発生しないと考えられる。

Cotin らは、FEM とテンソル・マスモデルを接続したハイブリッド変形モデルを提案した。このモデルを用いると、大変形およびトポロジ変化が発生する領域はテンソル・マスモデルを用い、それ以外の領域は FEM を用いて安定的に計算することができる。しかしながら、1)オンラインリメッシュに対応していない、2)柔軟物体の動特性が考慮できないという問題点があった。

そこで、記録再生型変形モデルの一種であるインパルス応答変形モデル (IRDM) とオンラインリメッシュ型変形モデルとを接続したハイブリッド動的変形モデルを提案した。

提案手法を実験システムに実装し、その有効性を検証した。シミュレーション対象の柔軟物体として、高さ:128[mm]、幅:128[mm]、奥行:32[mm]の直方体を用意した。このうち、上半分はオンラインリメッシュ型変形モデル、下半分は IRDM とした。初期におけるオンラインリメッシュ型変形モデルおよび IRDM のノード数はそれぞれ 135 であった。

図 4 にユーザの操作による変形と破壊の例を示す。物体の底面は固定されており、ユーザが物体上部を上へ引っ張ると、オンラインリメッシュにより変形が大きい箇所のメッシュが細かく分割され、破壊されていくのわかる。ユーザが引っ張り続けると、図 5 に示すように、最終的に物体は 2 つに剥離した。

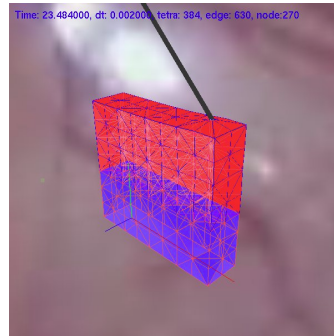


図 4 初期状態

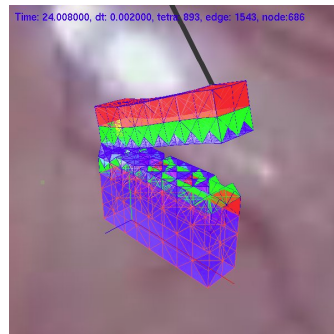


図 5 引っ張りによる剥離結果

### (3) 大規模仮想柔軟体に対するインタラクションの同時性の共有手法

近年、遠隔地間でネットワークを介して様々な協働作業を行う研究が盛んに行われており、その中でも遠隔手術シミュレーションや遠隔手術プランニングなどの医療分野への応用が期待されている。遠隔地間で生体や臓器等のような仮想柔軟物体を共有し、複数ユーザで視覚を伴う協働作業を行うことができる多地点遠隔触覚協働環境に関する様々な研究が行われているが、遠隔地間の通信遅延や計算の遅れを起因とする、柔軟物モデルの変形状態および力覚の不整合の解決が課題である。そこで、1) 柔軟物体の細分割（大変形）領域の変形同期、2) 変形の外挿補間によって、時間的整合性を保証する多地点遠隔触覚協働環境の構築を行い、その有効性の評価を行った。

我々が開発を行っている遠隔触覚協働環境では、各地点に計算機、力覚提示デバイス、モニタが配置されている。遠隔地の各ユーザが仮想空間内の柔軟物モデルにインタラクションした際の力覚を力覚提示デバイスによって提示し、モデルがどのように変形したのかをモニタによって視覚として提示する（図6）。各地点のユーザは、力覚提示デバイスを操作して仮想空間上にあるボリュームデータで表現された柔軟物体にインタラクション可能であり、互いに視覚を伴った協働作業を行うことができる。

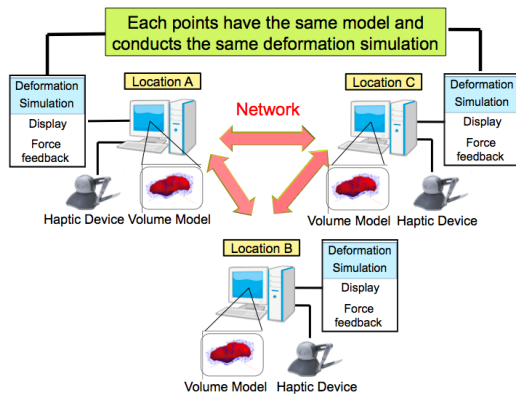


図6 遠隔触覚協働環境

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。本システムでは、オンラインリメッシュ型ボリューム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。この変形が大きく高精度に計算される局所領域の情報のみを各地点が共有することで、各地点のモデルの変形同期制御を行う。

変形同期制御では、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が交信し、自地点と他地点のシミュレ

ーションタイム差の比較により各地点の計算機の性能を推定し、必要に応じて同期パケットを送受信する。各地点は受信した同期パケットを基に、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。

#### ■ 二分木状態の同期

下記の手順を踏むことで、クラックのない整合性の取れたメッシュ（同期が取れた二分木の状態）を低計算コストかつ低通信コストで得ることができる。まず、各地点の対象モデルの二分木の状態をビット列で表現する。二分木の状態は、二分木で構成された四面体を1、そうでない四面体を0として、二分木の状態をビット列で表現する。次に、生成されたビット列データを各地点間で交信する。自地点の二分木の状態を表すビット列を $T_0$ とし、他地点の二分木の状態を表すビット列を $T_1 \sim T_{N-1}$ とすると、自地点と他地点との間での二分木の状態の差分 $T'_0$ は以下の式1で求めることができる。

$$T'_0 = (T_0 \oplus T_1 \oplus T_2 \oplus \dots \oplus T_{N-1}) \vee T_0 \quad (1)$$

最後に $T'_0$ のビット列中に1があれば、これに対応する四面体を二分木のリーフとして有効にすることで、二分木の状態の同期が完了する。

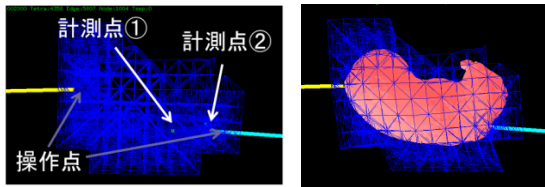
#### ■ 局所領域の変形の同期

変形モデルに対して変形操作を与えると、操作部近傍の四面体は局所的に分割され、それらの四面体は二分木の階層が深い（分割レベルの高い）頂点として表現される。これらの四面体を構成する頂点の座標と1ステップ前の座標を他地点に送信し、他地点の対応する頂点の変形を更新する。

通信遅延が発生し、性能が異なる計算機を使用する環境下で、2地点で柔軟物体にインタラクションした時の各地点の柔軟物体の変位を比較し、変形同期制御の精度を評価した。操作対象の柔軟物体として、図7に示す肝臓のボリュームモデル（初期頂点数930、最大頂点数5186）を用意し、各地点の操作者は、それぞれ異なる2点の操作点に対して、正弦波状（振幅40[mm]、周波数0.34[Hz]）の強制変位を与えた際の、各地点の柔軟物体内部の計測ノードの座標を計測した。

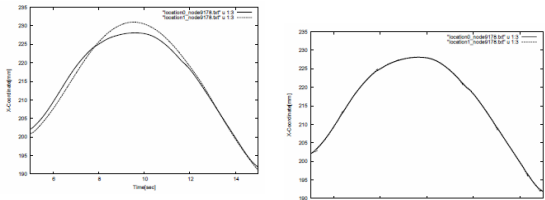
計測点のx座標の時間的変化を図8に示す。図8(a)は変形同期制御無しの場合、(b)は変形同期制御有りの場合である。縦軸は計測ノードのx座標[mm]、横軸はシミュレーションを始めた時刻からの経過時間[s]である。図8に示すように、変形同期制御を行った場合は、ほとんどずれがみられないことが確認できた。





(a) 計測点と操作点 (b) 内包された肝臓モデル

図7 実験条件



(a) 同期制御なし (b) 同期制御あり

図8 各地点の計測点の x 座標

## 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 3 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, 2012 年発行予定 (印刷中). (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, Vol. 9, No. 1, pp.7-16, 2011. (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, pp.479-487, 2011. (査読有)

[学会発表] (計 35 件)

- (1) K.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 Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery (CARS2012), 2012.6.27~30,Pisa (Italy).
- (2) K.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, 2012.3.4~7, Vancouver (Canada).

- (3) K.Hirota, K.Tagawa, "Acquisition of Elastically Deformable Object Model Based on Measurement", Haptics: Perception, Devices and Scenarios, LNCS 5024 (Eurohaptics2012), 2012.6.12~15, Tampere (Finland)
- (4) 山田隆洋, 田川和義, 田中弘美: オンラインリメッシュ型共回転系変形モデルの提案, 電子情報通信学会総合大会, 2012.3.20~23, 岡山大学 (岡山県)
- (5) 吉谷宏太, 田川和義, 田中弘美: 遠隔手術手技訓練における反力の適応制御を用いた通信遅延の補償, 電子情報通信学会総合大会, 2012.3.20~23, 岡山大学 (岡山県).
- (6) 備藤達郎, 田川和義, 田中弘美: 時間的整合性を保証する多地点遠隔触覚協働環境の構築, 力触覚の提示と計算研究会, 2012.3.13, 筑波大学 (茨城県)
- (7) 広田光一, 田川和義: 計測に基づく弾性変形モデルの構築, 力触覚の提示と計算研究会, 2012.3.13, 筑波大学 (茨城県)
- (8) Y. Sasaki, K.Tagawa and H. T. Tanaka, "Acceleration of Online-Remesh Deformation Computation by GPU for Haptic Interaction", In Proc. of ACM Haptic and Audio Interaction Design, 2011.8.25, 立命館大学 (滋賀県)
- (9) 田川和義, 佐々木康行, 田中弘美: GPU によるマルチレート・オンラインリメッシュ型変形計算の高速化, 日本バーチャルリアリティ学会第 16 回大会, 2011.9.22, 公立ほこだて未来大学 (北海道)
- (10) K.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", International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery (CARS2011), Volume 6, Supplement 1, 2011.6.22~25, Berlin (Germany)
- (11) K.Tagawa, T.Bitto and H. T. Tanaka, "A Method of Synchronization for Haptic Collaborative Virtual Environments in Multipoint and Multi-level Computer Performance Systems", Stud Health Technol Inform (MMVR2011), 2011.2.8 ~ 12, Newport Beach (USA)
- (12) K.Tagawa and H. T. Tanaka, "A Hybrid Dynamic Deformation Model for Surgery Simulation", Stud Health Technol Inform (MMVR2011), 2011.2.8 ~ 12, Newport Beach (USA)
- (13) 小森優, 田川和義, 田中弘美, 森川茂廣, 来見良誠: 腹腔鏡手術シミュレータのための臓器異型モデル構築, VR 医学会大会,

- 2011.8.27, 奈良先端科学技術大学院大学 (奈良県)
- (14) 田川和義, 田中弘美: マルチレート・オンラインリメッシュ法と GPU を用いた仮想柔軟物体との力覚インタラクション, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2011.5.26~28, 岡山コンベンションセンター (岡山県)
- (15) 備藤達郎, 田川和義, 田中弘美: 多地点遠隔触覚協働環境におけるオンラインリメッシュ型ボリュームモデルの変形同期手法, 日本バーチャルリアリティ学会第15回大会, 2010.9.15~17, 金沢工業大学 (石川県)
- (16) 佐々木康行, 田川和義, 田中弘美: 連続体力学に基づくオンラインリメッシュ型変形シミュレーションと GPU による高速化, 日本バーチャルリアリティ学会第15回大会, 2010.9.15~17, 金沢工業大学 (石川県)
- (17) 田川和義, 佐々木康行, 田中弘美: GPU によるオンラインリメッシュ型変形シミュレーションの高速化, 日本バーチャルリアリティ学会第5回力触覚の提示と計算研究会, 2010.11.1~2, 東北大学片平キャンパス (宮城県)
- (18) 備藤達郎, 田川和義, 田中弘美: 多地点遠隔協働環境における柔軟物シミュレーションの同期法, ヒューマンインタフェースシンポジウム, 2010.9.7~10, 立命館大学びわこ・くさつキャンパス (滋賀県)
- (19) 田川和義, 長谷川恭子, 備藤達郎, 小森優, 来見良誠, 森川茂廣, 田中覚, 李周浩, 平井慎一, 田中弘美: 「どこでも高度医療」実現のためのボリュームベース遠隔触覚協働環境の研究開発, 日本 VR 医学会大会, 2010.9.4, 京都リサーチパーク (京都府)
- (20) 中川智史, 田川和義, 田中弘美: 連続体力学に基づくオンラインリメッシュ法を用いた物理ベース剥離シミュレーション, 日本 VR 医学会学術講演会, 2010.9.4, 京都リサーチパーク (京都府)
- (21) 大石達弥, 田川和義, 田中弘美: 一对多の教示機能を備えた遠隔触覚協働環境の構築, 日本 VR 医学会学術講演会, 2010.9.4, 京都リサーチパーク (京都府)
- (22) 田川和義, 田中弘美: 大規模柔軟体の特定部位を対象とした力覚インタラクションのためのハイブリッド動的変形モデル, 電子情報通信学会 MVE 研究会, 2010.6.30, 東京大学山上会館 (東京都)
- (23) 佐々木康行, 田川和義, 田中弘美: オンラインリメッシュ型柔軟物シミュレーションの GPU による高速化, 電子情報通信学会 MVE 研究会, 2010.6.30, 東京大学山上会館 (東京都)

[図書] (計1件)

- (1) K.Tagawa, K.Hirota and M. Hirose, "Manipulation of Dynamically Deformable Object using Impulse-Based Approach", in Book of "Advances in Haptics" (ISBN 978-953-307-093-3), 2010.

[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・ポストドクトラルフェロー

研究者番号: 40401319