

平成 30 年 6 月 26 日現在

機関番号：33934

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H02742

研究課題名(和文)非一様かつ大変形を伴う仮想柔軟物間の精緻な実時間視力覚インタラクション手法の研究

研究課題名(英文)A study of haptic interaction between inhomogeneous elastic objects with large deformation

研究代表者

田川 和義 (TAGAWA, Kazuyoshi)

愛知工科大学・工学部・准教授

研究者番号：40401319

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,400,000円

研究成果の概要(和文)：手や臓器などの内部が非一様かつ大変形を伴う仮想柔軟物が接触し合う状況下においても、視力覚的実時間でのシミュレーションを可能とする手法を確立することを目的として、(a) 内部が非一様かつ大変形を伴う仮想柔軟物の、高速かつ安定的な連続体力学ベース埋め込み変形シミュレーション手法、(b) 複数非一様仮想柔軟物間の実時間視力覚インタラクション手法を考案し、さらに、(c) これらの手法を触診シミュレーションに応用した。

研究成果の概要(英文)：The objective of this research is realizing approaches for haptic interaction between inhomogeneous elastic objects (e.g. hands or organs which have various physical properties and geometries) with large deformation. We proposed several approaches for (a) fast, stable, continuum dynamics based and embedded deformation simulation, (b) computationally effective collision detection and a coupled simulation. Then we implemented these approaches into our palpation simulation system, and we confirmed feasibility and effectiveness of these approaches.

研究分野：バーチャルリアリティ

キーワード：バーチャルリアリティ 変形・接触モデル 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 (Computer Graphics) の領域で多くの研究がなされている。古典的には質点-バネ系モデルや FEM (Finite Element Method) 等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。

さらに VR (Virtual Reality) の分野では、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、上述の力学的シミュレーションを実時間実行することは困難であったが、近年の高速化手法の開発や GPU 等の計算性能の向上により、柔軟物-剛体間かつ中規模のモデルであれば実時間でのインタラクションが可能となりつつある (例として、申請者らが開発した時空間適応的変形モデルを用いる手術シミュレータや、柔軟手モデル等があげられる)。

しかし実世界では、柔軟物-剛体間のみならず、柔軟物同士のインタラクションも発生する。この実時間シミュレータが実現できれば、各種手技の訓練/リハーサルシステム等を構築することが可能となり、熟練者の技能伝承の効率化が期待できる。

このような柔軟物同士の実時間視力覚シミュレータを実現するにあたって問題となるのは、大きな計算コストである。特に、1) 変形計算に要する計算コスト (高レート演算が必要、かつ柔軟物内部の非一様性や大変形の考慮が不可欠) と、2) 接触力計算に要する計算コスト (高レートでの柔軟物間の干渉計算および Stick Slip 現象を含む接触力計算が不可欠) が問題となる。

これまで高速化手法として、1) については、i) 算法の工夫 (例えば、計算順序等の変更による演算回数の削減や、陰解法ソルバの利用等)、ii) 変形計算の自由度を削減する方法 (例えば、Condensation 手法や、埋め込み変形モデル等)、iii) 記録再生型変形モデルの利用 (例えば、研究代表者らのインパルス応答変形モデル等)、iv) 時空間適応的変形モデルの利用 (例えば、研究代表者らの時空間適応的変形モデル等)、v) GPU (Graphics Processing Unit) による並列計算の利用が試みられている。しかし、これらの手法を併用・統合した手法はほとんど検討されておらず、非一様性の考慮、高速性および安定性を同時に満たす手法は確立されていなかった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、手や臓器などの内部が非一様 (非均一な材料特性) かつ大変形を伴う仮想柔軟物が接触し合う状況下においても、視力覚的実時間でのシミュレーションを可能とする基盤技術を確立し、これにより、従来では達成できなかった複雑度の高い複数

仮想柔軟物間の精緻なインタラクションを実現することである。

具体的には、I. 内部が非一様かつ大変形を伴う仮想柔軟物の、高速かつ安定的な連続体力学ベース埋め込み変形シミュレーション手法、および II. 複数非一様仮想柔軟物間の実時間視力覚インタラクション手法を確立する。さらに、III. これらの手法を触診シミュレーションに応用する。

3. 研究の方法

I. 時空間適応的埋め込み変形シミュレーション手法の技術開発

手や臓器などの内部の非一様性を効率よく考慮可能な変形シミュレーションを実現するため、モデル全体の運動や変形を、荒く近似されたグローバルモデルを用いて求め、モデル内部の詳細な運動や変形を、内部の非一様変形特性が記述されたローカルモデルおよび準静的な釣り合い関係から求める、埋め込み変形シミュレーションと、時空間適応的変形シミュレーションとを併用する手法を考案する。

さらに、変形シミュレーションの効率化が見込め、なおかつ複数の仮想柔軟物の連成計算の効率化も図れる方法として、改良型のマルチレート変形計算手法も考案する。

II. 埋め込み表現された複数柔軟物間の実時間インタラクション手法の技術開発

臓器 (柔軟物) - 術具 (剛体) 間の接触を想定し、効率的な干渉計算法として、対象柔軟物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ュームと捉え、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考案する。

さらに柔軟物の接触に対応した、実時間多重解像度接触検出・接触力計算法を考案・実装する。多重解像度表現を行うことで、処理の効率化を実現する。さらに、複数柔軟物双方について、非接触・固着・滑りの状態遷移 (Stick Slip 現象) のシミュレーションを行う。

III. 触診シミュレーションへの応用

ワイヤ駆動型多指力覚提示装置 SPIDAR を用いた多指インタラクションシステムを構築し、3 本指の指先座標位置の入力、柔軟手モデル・物体モデルの変形シミュレーション、シミュレーション結果の提示を実現する。

続けて、触診シミュレータの開発を行う。触診の対象としては、胆嚢 (胆石症)、リンパ節 (乳ガン等)、大動脈 (動脈瘤)、前立腺 (前立腺肥大症) 等があげられ、術中に触診を行うものとそうでないもの、触診を行う者が医師であるものと一般人も含むものとに分けられ、それぞれ要求精度が異なる。I、II を通して実現したシミュレータの精度等を考慮しながら、適切な触診対象を選択し、

触診対象モデルと手モデルとのインタラクションを実現する。

4. 研究成果

I. 時空間適応的埋め込み変形シミュレーション手法の技術開発

まず、時空間適応的な変形シミュレーションに適した疎行列格納法・更新法の検討と、GPU(CUDA)への実装を進めた。最初に、リメッシュ処理（二分割二統合に基づくオンラインリメッシュの際の全体剛性行列の更新）および変形シミュレーション（勾配法等による収束演算）に適した全体剛性行列（大規模疎行列）の圧縮／格納／更新手法を検討し、固定幅の CSR 方式（ELL 方式に相当）の拡張フォーマットとこれを用いる更新手法を提案した。そして、提案手法の評価のため、適応的有限要素変形シミュレーションコードを独自カーネルを用いて GPU(CUDA)実装し、鉗子（剛体）による臓器モデル（柔軟物）に対する力覚を伴う変形操作を対象とした処理時間の評価を行った。その結果、モデルの複雑さによらずリメッシュ処理に要する処理時間が 0.65 ms 程度であり、力覚提示への応用にも十分であることがわかった。

次に改良型のマルチレート変形計算手法の考案を行った。柔軟物体が何らかの物体に接触すると、接触境界面で応力波が生じ、物体内部を伝播する。一方、従来のマルチレート変形計算手法では、ノードごとに必要最低限の更新レートで変形計算を行うことで計算コストを削減していた。つまり、計算されない領域は隣接する領域からどれだけ力を受けても変形しないことから、応力伝播の不整合性が生じていた。そこで、適応的四面体メッシュの階層構造を利用したマルチレート法のための応力伝播近似手法を提案した。具体的には、マルチレート法により各ステップでの変形計算の対象領域を随時変更するとともに、変形計算されないノードの変形を先祖の四面体で構成されたモデルの計算結果から補間によって求める（図 1）。解像度の異なる 2 つのモデルを同時に変形計算することになるが、補間対象のモデルと比べ、先祖

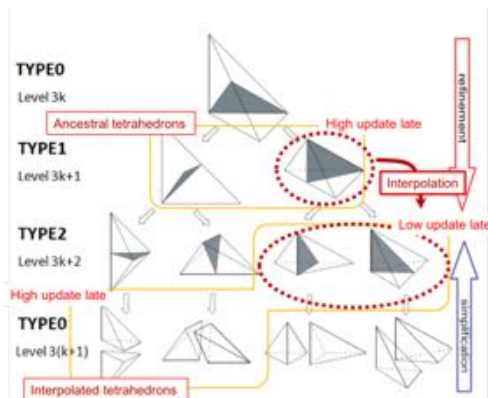


図 1 適応的四面体メッシュの階層構造を利用した応力伝播近似手法

の四面体で構成されたモデルはノード数が少ないため、結果として計算時間の削減に繋がる。また、本手法により各ステップで全てのノードの変位が応力伝播に基づき更新されるため、伝播の不整合性の改善に繋がった（図 2）。

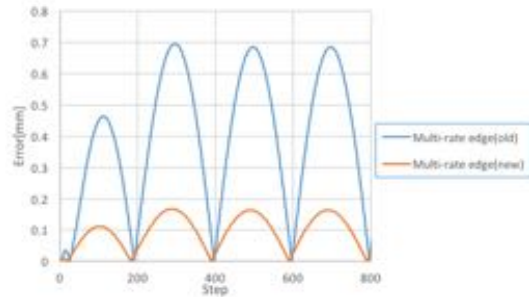


図 2 マルチレート法の適用に伴い生じる変位誤差

II. 埋め込み表現された複数柔軟物間の実時間インタラクション手法の技術開発

まず、対象物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ュームと捉え、目的の候補四面体を階層的に探索する方法と、隣接四面体を辿りながら目的の四面体を探索するローソンの探索法を併用した、柔軟物対応の効率的な干渉検出法を考案した。従来の探索法（ローソンの探索法のみを使用）と比較して、探索回数が 1/10 程度となることがわかった。

次に、仮想柔軟手で仮想物体をなぞる際のシミュレーションモデルの検討を行った。接触する対象物を一様な平面とし、柔軟な指紋（図 3）と剛体平面間の Stick-Slip 現象を考慮した接触・滑りのシミュレーションモデル（四面体 2 次要素を利用、クーロン摩擦を仮定）の考案を行った。生成された Stick-Slip 現象の周波数を評価した結果、おおよそ妥当な値が得られていることがわかった（図 4）。

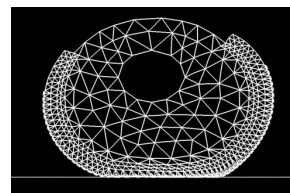


図 3 仮想柔軟指（平面をなぞる様子）

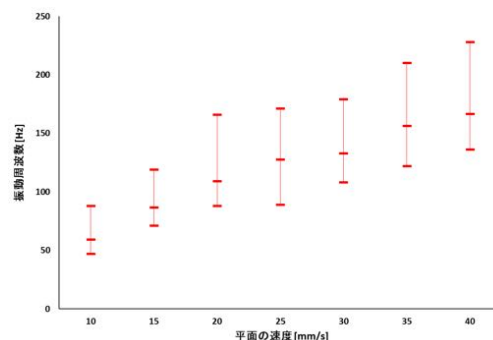


図 4 なぞり速度の変化に伴う指紋の振動周波数の変化

III. 触診シミュレーションへの応用

胆嚢（胆石症）の触診を想定し、仮想柔軟手で仮想柔軟物体（肝臓）を触れた際の接触・変形シミュレーションを行った。図5にその結果を示す。

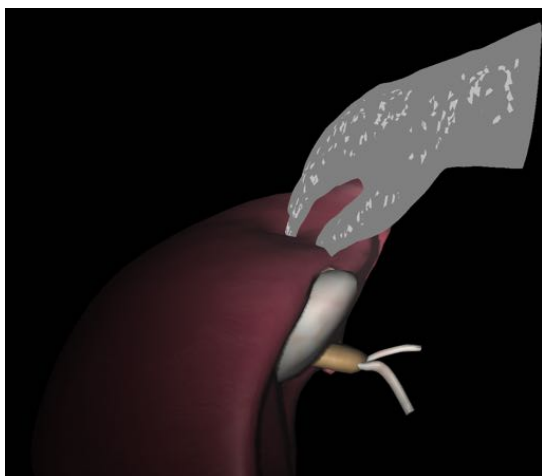


図5 仮想柔軟手と仮想柔軟物体（肝臓）とのインタラクション

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計8件）

- (1) R. Kuriki, K. Tagawa, H. T. Tanaka, “A Fast Update Approach of a Stiffness Matrix for a Multi-Rate Finite Element Deformation Simulation”, Lecture Notes in Electrical Engineering, Vol. 432, pp. 257-260, 2017. (査読有)
- (2) S. Fujioka, T. Uchiyama, K. Tagawa, K. Hirota, T. Nojima, K. Akahane, M. Sato, “Object Manipulation by Hand with Force Feedback”, Lecture Notes in Electrical Engineering, Vol. 432, pp. 261-266, 2017. (査読有)
- (3) 田川和義, 小森 優, 近江奈帆子, 田中弘美, 来見良誠, 「多様なVR術野構築のための漿膜・結合組織のT型分岐構造モデリング」, 日本VR医学会論文誌, Vol. 14, No. 1, pp. 1-8, 2016. (査読有)
- (4) 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, pp. 959-968, 2016. (査読有)
- (5) K. Tagawa, H. T. Tanaka, Y. Kurumi, M. Komori and S. Morikawa, “Evaluation of Network-Based Minimally Invasive VR Surgery Simulator”, Stud Health Technol Inform, Vol.220, pp.403-406, 2016.
- (6) T. Marutani, T. Kato, K. Tagawa, H. T. Tanaka, M. Komori, Y. Kurumi and S. Morikawa, “Active and Passive Haptic Training Approaches in VR

Laparoscopic Surgery Training”, Stud Health Technol Inform, Vol.220, pp.215-218, 2016.

他2件

〔学会発表〕（計28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. Hirota, K. Tagawa, “Interaction with Virtual Objects using Deformable Hand”, Proc. IEEE-VR, pp.49-56, March 21, Greenville (米国) .
- (3) 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 12, 2015, 立命館大学朱雀キャンパス (京都府・京都市)
- (4) R. Kuriki, K. Tagawa, and H. T. Tanaka, “Toward an adaptive embedded co-rotated and CSR-FEM based soft-tissue simulation with binary online re-mesh model”, Proc. Machine Perception and Robotics, November 26-27, 2015, 福岡国際会議場 (福岡県・福岡市) .
- (5) N. Tani, K. Tagawa, and H. T. Tanaka, “Hierarchical collision simulation between rigid and elastic embedded objects for realistic haptic rendering”, Proc. Machine Perception and Robotics, November 26-27, 2015, 福岡国際会議場 (福岡県・福岡市) .

他23件

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.tagawalab.org>

6. 研究組織

(1)研究代表者

田川 和義 (TAGAWA, Kazuyoshi)
愛知工科大学 工学部 情報メディア学科・准教授
研究者番号：40401319

(2)研究協力者

田中 弘美 (TANAKA, Hiromi)
立命館大学 情報理工学部 知能情報学科・教授
研究者番号：10268154

広田 光一 (HIROTA, Koichi)
電気通信大学 大学院情報理工学研究科・教授
研究者番号：80273332