

令和 2 年 6 月 10 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17H01775

研究課題名（和文）計測に基づく手モデルの構築と操作シミュレーションの精緻化

研究課題名（英文）Construction of hand model based on measurement and realization of sophisticated operation

研究代表者

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

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,700,000円

研究成果の概要（和文）：計測に基づくリンクモデル・変形モデルの構築手法を開発した。リンクモデルについては、3つの異なる姿勢で撮影されたMRI画像から、各関節の回転軸と回転中心を求めることで、これを推定する手法を開発した。変形モデルについては、皮膚と骨の表面の情報から、軟組織の領域をメッシュモデルとして生成する手法を開発した。接触・変形計算シミュレーション手法の改良について検討した。従来一般的に用いられているFEMの陰解法の代わりに、FEMの陽解法およびインパルス応答変形モデル（変形を力作用に対するインパルス応答として表現するモデル）による計算を試み、その可能性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

画像から手モデルを構成するというアイデアは新しいものではないが、骨格のリンクモデルを精度よく求める手法は必ずしも確立されていなかった。本研究では、この点に焦点を当てている点に意義があると考えている。手は個人差の大きい器官であり、実世界の衣類や装具と同様に、手モデルをオーダーメイドに構成することは、合理的なアプローチである。本研究は、このための基盤技術を確認するという意味で重要な意義をもつ。

研究成果の概要（英文）：We have developed a method for constructing link models and deformation models based on measurement. For the link model, we developed a method to estimate the rotation axis and center of rotation of each joint from MRI images taken in three different postures. For the deformation model, we developed a method to generate a soft tissue region as a mesh model from the information of the skin and bone surfaces. The improvement of the contact/deformation calculation simulation method was examined. In place of the FEM implicit method that has been generally used in the past, the calculation was performed using the explicit FEM method and the impulse response deformation model (a model in which deformation is expressed as an impulse response to a force action), and the possibility was confirmed.

研究分野：触力覚提示

キーワード：VR手モデル 把持操作 バーチャルリアリティ インタラクション ヒューマンインタフェース

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

VR環境で現実と同じような手を使った操作を実現するためには、手とVR物体との相互作用を精度よく、すなわち現実と近くなるようにシミュレートすることが重要である。VR環境においては、ユーザの実手の代理となる手モデルを構築し、これとVR物体との相互作用を実時間でシミュレートし、視覚などの感覚情報としてユーザに提示することで、操作が実現される。手モデルに関する研究の多くは、VR物体との接触計算に焦点を当てている。接触点でのモーメントを簡易なモデルにより定義する[1]、あるいは指の腹などに局所的な変形モデルを持たせること[2]などが試みられてきた。最近では、手全体の軟組織を変形モデルとして定義して、実時間で変形と接触力の計算を行うことが可能になってきた[3]。

VR環境における操作の実現のもう一つの重要な処理は、実手の動きを手モデルに正確に反映することである。手は個人差が非常に大きい部位である。実手と手モデルの大きさの違いは、操作における違和感や誤差につながる。手姿勢の計測には、グローブ型のデバイスで関節角を直接的に計測する方法と、マーカーなどによる特徴点の位置から逆運動学(IK)により関節角を推定する方法とがあるが、実手と手モデルの指の長さや回転軸の違いが、前者の方法では指先位置の誤差を、後者の方法では関節角の推定誤差を生じる。いずれの方法でも、実手のリンク構造を手モデルに正確に反映することが重要である。

計測に基づいて手をモデル化する試みは、手の運動特性の解明[4]や、皮下組織の精密なモデル化による接触特性の解明[5]などを目的としたものが知られており、また、皮膚組織の変形シミュレーションについても触覚の生理学的メカニズムの解明[6]を目指すものが知られているが、いずれもVR環境における操作を直接の目的とするものではなかった。

### 2. 研究の目的

本研究は、手の形状や特性の計測に基づく手モデルの構築および操作シミュレーションの精緻化の手法を開発することを目的とする。VR環境で手を使った操作が難しい理由の一つは、手を表現するモデル(手モデル)の形状や挙動が現実の手(実手)から乖離していることにあり、具体的には手の姿勢推定と接触・変形計算の過程で生じる誤差にあると考えられる。本研究では、これらの過程で用いられる手の運動学モデル(リンクモデル)および変形の力学モデル(変形モデル)を個人の手の計測に基づいて構築すること、これらのモデルを用いて手姿勢の推定の精度の向上と接触・変形計算の精緻化・高速化を図ることによりVR環境の操作性を現実と近づけることを試みる。

### 3. 研究の方法

本研究では、(1)計測に基づくリンクモデル・変形モデルの構築手法の開発、(2)接触・変形計算シミュレーション手法の改良、について検討した。

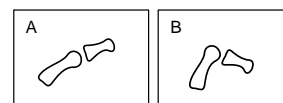
#### (1)計測に基づくリンクモデル・変形モデルの構築手法の開発

手の3次元画像に基づいて、リンクモデルと変形モデルを構築する。リンクモデルは、指などの関節の位置とその自由度を表現するもので、関節の屈伸にともなう骨の移動や、逆運動学(IK)による骨格の姿勢推定のための幾何学的制約を提供する。関節の回転中心や軸は、骨の形状から推定することもある程度可能であるが、結果の妥当性を確認することが難しい。本研究では、それぞれの関節で結合される骨の複数の姿勢における位置関係から、関節の回転中心および軸を推定することを試みる(図1)。変形モデルは、姿勢変化や物体との接触にともなう皮膚の変形を計算するための力学モデルである。皮膚や皮下の組織は骨に比べると柔軟に変形する性質を持っており、関節の屈伸に伴う骨の移動に対して組織に変形を生じる。また、外力によっても変形の状態が変化する。柔軟な物体の変形のシミュレーション手法は連続体力学分野で確立されており、代表的には有限要素法(FEM)が知られている。この手法では、柔軟物体を空間的な要素に分割し、それぞれの要素内のひずみと応力の関係から要素の変形にともなう力を定義する。すべての要素について、境界条件をみだす力のつり合いを求めることで、変形を計算する。本課題においては、手の軟組織を四面体要素のメッシュにより表現したモデルを構築する。変形の特徴は、本来は組織(皮膚、脂肪、筋肉など)によって異なるが、以下の実験では均一と仮定し、従来研究で計測されたパラメータを用いた。

#### (2)接触・変形計算シミュレーション手法の改良

シミュレーション計算の手法として、これまでは主に線形有限要素法(線形FEM)の陰解法が用いられてきた。陰解法は微小時間ごとにつり合いを求める方法であるため、計算が安定である(発散しない)という利点がある反面、連立方程式を解くために比較的大きな計算量を必要とする。また、疎行列とベクトルとの積の計算の中で配列に対する順序的でない参照が発生し、計算の効率を低下させることが問題である。以下の実験では、線形FEMの陽解法(中央差分法)、変形をインパルス応答として表現するモデル(インパルス応答変形モデル(IRDM))を取り上げて、比較を行った。GPUのアーキテクチャを考慮したアルゴリズム及び実装の最適化も検討し、実時

【撮影画像】



【マッチング処理】

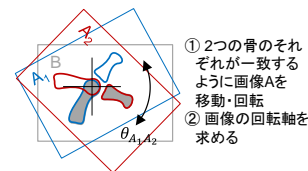


図1 関節の回転軸の推定

間での処理の可能性を検討した。線形 FEM の陽解法は、計算の安定性は保証されず、1 ステップの離散時間を非常に小さく設定する必要があるが、ステップあたりの計算は単純化されるので、これらの効果が相殺されれば実時間での実行の可能性がある。インパルス応答変形モデル (IRDM) は、力の作用に対する変形をインパルス応答として表現し、畳み込み演算により処理する考え方で、計算量は比較的大きいが GPU 等を用いた並列処理による高速化が容易である。

#### 4. 研究成果

##### (1) 計測に基づくリンクモデル・変形モデルの構築手法の開発

リンクモデルについては、3つの異なる姿勢における MRI 画像から回転中心と軸の推定を試みた。推定のためには、画像間でそれぞれの関節の角度変化が大きいことが望ましいことから、ここでは、脱力した自然な姿勢 (relax 姿勢)、握った姿勢 (goo 姿勢)、開いた姿勢 (paa 姿勢) の3姿勢で撮影を行った。MRI 撮影においては、10分以上にわたって手の姿勢を保つ必要がある。goo 姿勢および paa 姿勢については、姿勢を保つことが難しいことからこれを補助する治具 (グリップ) を作成した (図2)。また、指尖骨は比較的小さく、画像上の抽出の精度が劣ることから、指尖骨と一体であると考えられる爪にマーカーを装着して、補助的な情報として使用することとした。



図2 姿勢保持のためのグリップ

画像から骨の領域を抽出し、姿勢間のマッチングとるが、その際に次の制約を仮定した。手根骨 (C) は一体とする。手根骨と示指・中指中手骨 (M1, M2) は一体とする。薬指・小指中手骨 (M3, M4) は手根骨に対して1軸回転とする。それぞれの指について IP 関節の軸は平行とする。示指～小指の MP 関節は中心を共有する2軸回転とする。これらは、運動学的な制約を近似的に導入したものである。さらに、モデルの自由度を限定するために次の仮定をおいた。示指～小指の MP 関節の第2軸は IP 軸に平行とする。示指～小指の MP 関節の第1軸は第2軸に直交とする。母指の MP 関節は中心を共有しない2軸とする。これらの仮定の下、次の手順で推定を行った (図3)。はじめに、C+M1+M2 のマッチングにより、手根の姿勢間 (画像間) の対応を求める。次に、M3 および M4 それぞれのマッチングにより C-M3 軸および C-M4 の軸を推定する。各指の指骨のマッチングにより IP 軸の推定を行う。

マッチングの指標として、画像相関 (Normalized Cross-Correlation) を用いた。NCC は、個々の骨と推定された骨のリンク構造とのいずれについても計算が可能である。前者と後者の間の NCC の劣化は、上述の制約の影響によると考えることができる。図4に骨ごとの NCC と、推定されたリンク構造の制約を加えた場合の NCC を計算した結果を示す。指骨の領域で評価の低下が比較的大きいことから、IP 関節の平行性に関する仮定に課題がある可能性が示唆されている。

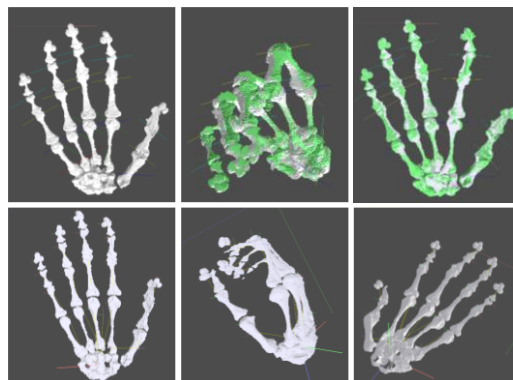


図3 骨のマッチングと推定された軸

変形モデルは、relax 画像において、骨領域と皮膚領域を抽出し、これらの表面に囲まれる領域を FEM のための四面体メッシュに分割することで生成される。骨領域の抽出は基本的には適応的な明るさ補正と閾値処理によるが、部分的に手作業による領域の分離を行っている。完全な自動化は現状では難しいと考えている。得られた領域から画素間の補間によるポテンシャル関数を定義し、Marching Cubes 法によりポリゴン化を行い、モデリングソフトウェアによるポリゴンリダクションを行ったうえで、メッシュ生成プログラム (Adventure Tetmesh, 東京大学) により四面体メッシュを生成している。生成されたモデルと、姿勢変化に伴う皮膚の変形シミュレーションの様子を図5に示す。

##### (2) 接触・変形計算シミュレーション手法の改良

線形 FEM の陽解法 (中央差分法) については、力学の分野で定式化が行われており、ここでは実時間での計算の可能性を中心に検討を行った。計算の高速化の有効な手法の一つは GPU のような並列性の高いプロセッサを適用することで、このためには並列化に適したデータ構造お

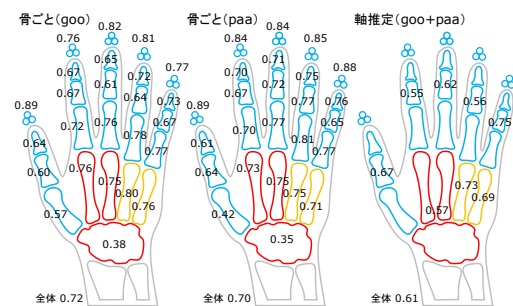


図4 NCC によるマッチングの評価

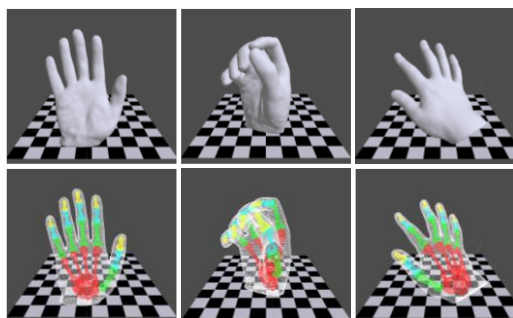


図5 変形モデルと変形シミュレーション

よびアルゴリズムを検討する必要がある。GPU ではメモリアクセスのオーバーヘッドを軽減することが効率向上の重要なポイントとなる。そこで、実験では次のような考え方に基づく改善を試みた。まず、行列バンド幅の圧縮と列によるソートを行った。これにより、アクセスするアドレスの範囲を狭め、アクセス順序を整理する。これにより、領域全体のアクセスの回数が減少することが期待される。また、GPU の構造を活用する工夫として、行ごとにプロセッサを割り当て、プロセッサが担当する行を内部メモリにコピーして計算に使用する方法を採った。一般に、内部メモリは、大域メモリより高速なアクセスが可能であり、とくに GPU 内での反復処理を行う場合には大域メモリのアクセスの削減に寄与する。

実験では指のモデル (図 6) を用いた。これは、表面のノードの間隔がおおよそ 1mm であり、ノード数 5800、四面体要素数 27737 で構成されている。上述の計算上の工夫により、計算の時間ステップを 0.01ms とした場合、実時間で 10ms の計算に計算時間 25ms 程度まで接近できることを確認した。シミュレーションの時間ステップは計算の安定性を考慮して決定している。手モデルへの適用の検討には着手できていないが、自由度に対する計算時間に関する知見は手モデルの計算量の推定に基礎となるデータを提供する。

インパルス応答変形モデル (IRDM) は、作用力から変形を計算する手法であり、これにより FEM による計算を置き換えることができると考えられる (図 7)。FEM の陰解法による計算量は  $O(n_f^{1.6})$  から  $O(n_f^{2.1})$  である。自由度  $n_f$  は、自由ノードの数に比例し、ノードの密度が一定であればサイズ  $s$  の 3 乗に比例する ( $n_f \propto s^3$ )。IRDM の計算量は、畳み込み演算のサイズで決定され、すなわち入出力自由度  $n_i, n_o$ 、時間ステップ数  $n_t$  に対して、 $O(n_i \times n_o \times n_t)$  となる。 $n_i, n_o$  は操作する表面積に比例 ( $n_i, n_o \propto s^2$ ) することを考えると、IRDM のほうが FEM 陰解法に比べて、オーダーの面で有利となることが期待される。一方で、IRDM では応答を有限時間で打ち切ることから、計算される結果に誤差を生じることが予想される。以下では、摩擦表現における両モデルの比較を行った。

実験で用いた IRDM は、入出力ノード数 256、離散時間間隔 1ms、インパルス応答の時間ステップ数 512 (応答時間 0.512 秒) とした。また、このインパルス応答は FEM 陰解法 (離散時間間隔 0.1ms) により計算した。摩擦の条件により、皮膚の振動が生じる場合と生じない場合があり、発生しない場合については、両モデルで比較的良好な一致が得られた。結果の例を図 8 に示す。振動が発生する場合については、IRDM では振動の振幅が比較的小さく計算されている。これは、インパルス応答の長さが有限であり、持続時間の長い変形を表現することができないことが原因の一つであると考えている。

実験で用いた IRDM は、入出力ノード数 256、離散時間間隔 1ms、インパルス応答の時間ステップ数 512 (応答時間 0.512 秒) とした。また、このインパルス応答は FEM 陰解法 (離散時間間隔 0.1ms) により計算した。摩擦の条件により、皮膚の振動が生じる場合と生じない場合があり、発生しない場合については、両モデルで比較的良好な一致が得られた。結果の例を図 8 に示す。振動が発生する場合については、IRDM では振動の振幅が比較的小さく計算されている。これは、インパルス応答の長さが有限であり、持続時間の長い変形を表現することができないことが原因の一つであると考えている。

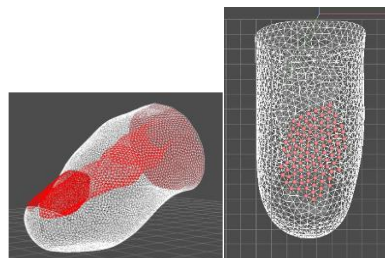


図 6 指の変形モデル (左) と陽解法シミュレーション (右)

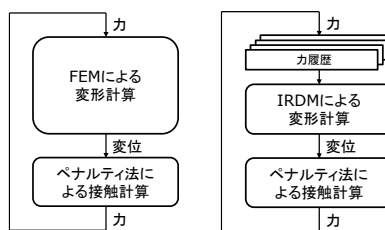


図 7 FEM 計算 (左) の IRDM 計算 (右) による代替

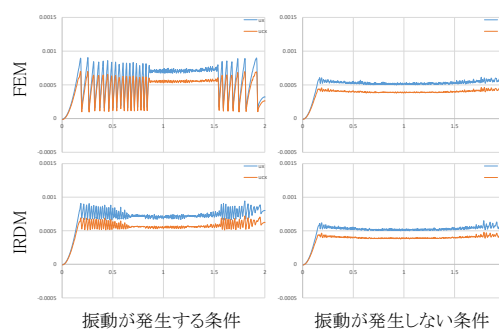


図 8 FEM と IRDM との挙動の比較 (摩擦方向の変位の時間変化)

#### <参考文献>

- [1] Talvas, A., Marchal, M., Duriez, C., Otaduy, M.A.: Aggregate Constraints for Virtual Manipulation with Soft Fingers; IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics, 21(4), 452-461, 2015.
- [2] Jacobs, J., Froehlich, B.: A soft hand model for physically-based manipulation of virtual objects; IEEE VR 2011, 11-18, 2011.
- [3] Garre, C., Hernandez, F., Gracia, A., Otaduy, M.A.: Interactive simulation of a deformable hand for haptic rendering; Proc. World Haptics 2011, 239-244, 2011.
- [4] Ryu, J.H., Miyata, N., Kouchi, M., Mochimaru, M., Lee, K.H.: Analysis of Skin Movements with Respect to Bone Motions using MR Images; Intl. J. CAD/CAM, 3(2), 61-66, 2003.
- [5] 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(3), 253-267, 2015/01
- [6] Maeno, T., Kobayashi, K., Yamazaki, N.: Relationship between structure of finger tissue and location of tactile receptors; JSME intl. journal Series C, 41(1), 94-100, 1998.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ujitoko Yusuke, Sakurai Sho, Hirota Koichi	4. 巻 1
2. 論文標題 Influence of Sparse Contact Point and Finger Penetration In Object on Shape Recognition	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Haptics	6. 最初と最後の頁 1~1
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/toh.2019.2954882	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 1件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 広田光一, 田川和義, 小森 優, 櫻井 翔, 野嶋琢也
2. 発表標題 計測に基づく手のリンクモデルの構築
3. 学会等名 日本VR学会 ハプティックス研究会 第22回
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takaaki Taniguchi, Sho Sakurai, Takuya Nojima, Koichi Hirota
2. 発表標題 Multi-Point Pressure Sensation Display using Pneumatic Actuators
3. 学会等名 Eurohaptics 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 広田 光一
2. 発表標題 VR環境における 変形物体の表現と操作
3. 学会等名 第17回日本VR医学会学術大会（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 広田 光一
2. 発表標題 人間の手のモデル化と操作
3. 学会等名 計測自動制御学会 ライフエンジニアリング部門シンポジウム2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 田川和義, 井垣友貴, 田中弘美
2. 発表標題 指紋を有する指先のStick-Slipシミュレーション
3. 学会等名 第24回日本バーチャルリアリティ学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田川和義, 井垣友貴, 田中弘美
2. 発表標題 指紋を有する指先のStick-Slipシミュレータの構築
3. 学会等名 2019年電気学会電子・情報・システム部門大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	田川 和義  (Tagawa Kazuyoshi)  (40401319)	愛知工科大学・工学部・教授(移行)   (33934)	

## 6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	小森 優  (Komori Masaru)  (80186824)	滋賀医科大学・医学部・非常勤講師    (14202)	
研究 分 担 者	山田 篤史  (Yamada Atsushi)  (40534334)	滋賀医科大学・医学部・特任講師    (14202)	