

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：12612

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25280072

研究課題名(和文)手の変形と接触特性を考慮した実時間把持操作モデル

研究課題名(英文)Object manipulation based on deformable hand model and contact simulation

研究代表者

広田 光一(Hirota, Koichi)

電気通信大学・大学院情報システム学研究科・教授

研究者番号：80273332

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 9,400,000円

研究成果の概要(和文)：変形する手モデルの構築手法を開発した。手の表皮と骨の間の領域を軟組織として有限要素法によりモデル化する。関節の構造をリンクモデルとして定義し、関節の屈曲に伴う骨の運動を計算する。骨と物体が与える境界条件に基づいて変形を計算する。物体のモデルをメタボールモデル(等ポテンシャル面)により定義する手法を提案した。表面の内外にポテンシャル勾配が定義されることを利用して、手モデルとの接触および滑りを計算する。手の運動を精度よく計測する手法を開発した。手モデルと物体モデルを統合して実時間の把持操作を実現した。操作の現実感についてアンケートによる主観評価を行った。

研究成果の概要(英文)：An approach to implementation of deformable hand model was proposed. Soft tissue of hand between skin and skeletons were modeled by a finite element model. Skeletal structure of the hand was represented by a link model, and the motion of finger bones by the rotation of joints was computed using the link model. The deformation of the soft tissue was simulated based on the boundary conditions given by the bones and virtual objects. The virtual object was defined using a Metaball model, or an equipotential surface of the field. Also, a method of computing contact and slip of hand on the surface of the object model using the gradient of potential filed inside and outside of the equipotential surface. A method of capturing hand motion based on the measurement of finger nails and a palm was developed. Real time simulation of object manipulation was realized by combining the hand and object models. Evaluation of reality in the object manipulation based on a questionnaire was performed.

研究分野：バーチャルリアリティ

キーワード：手モデル 有限要素法 触力覚計算 ハプティックレンダリング 変形計算 触力覚フィードバック

1. 研究開始当初の背景

手による操作の実現は、一般の VR 環境の構築と同様に、操作入力、シミュレーション、感覚提示からなるループにより実現される。操作入力については、手のもつ多くの自由度の計測から、精緻な手のモデルを作ることが、技術的な課題である。グローブ形のセンサの自由度や精度の向上が図られてきたほか、磁気センサにより絶対位置・姿勢を計測する手法も検討されている。操作に関係する感覚提示としては、触力覚が重要な感覚情報であり、これを実現するデバイスがさまざまな角度から検討されている。接触やテクスチャを振動や電気刺激により高い分解能で提示する試み、指先に圧迫力やせん断力を提示できる装着型のデバイスの開発、多指に対する絶対力の提示技術など、多くの研究が知られている。

操作入力と感覚提示を関係づけるシミュレーションについては、手による操作を目的としたモデルについて十分に検討されてきたとはいえない。手の形状モデルの向上については改善が試みられ、CTやレンジファインダによる精細な手モデルの構築が試みられている。しかしながら、手と物体との接触では、必然的に手の変形が生じ、これが物体との接触領域を増やすなど、操作性や安定性に寄与していると考えられる。これらの接触領域では皮膚に力が作用し、触覚を生じることになる。ポリゴンモデル相互の干渉応答計算や、変形の近似モデルでは、干渉領域の大きさに基づく支持モーメントの増加は期待できるが、接触領域内の接触状態分布を計算することができない。また、手指を点群で表現する方法は、暗黙に変形や分布的な接触状態変化を仮定しているものの、点相互の関係性はなく、皮膚の特性を表現したものではなかった。指を FEM 解析する試みはあるが触覚特性の解明を目的としており、操作のための実時間シミュレーションを目的としたものではなかった。

現実に近い操作を実現するには、変形する表面をもつ手のモデルと物体との接触を計算することで、より精度の高い接触と操作力を求める必要がある。

2. 研究の目的

VR 環境において、手の変形および接触特性を考慮した把持操作を実現するためのモデルについて検討する。現状の VR 環境においては、現実環境では普通におこなえる操作を、必ずしも容易におこなうことができない。この理由には、感覚フィードバックの欠如や手の動作の計測精度の問題などに加えて、手と操作対象物との接触状態やそれともなう力を計算するモデルの問題があると考えられる。とりわけ、皮膚の変形による対象物への密着や摩擦特性の変化は、操作の安定性に大きく寄与していると考えられる。本研究では、皮膚の変形を考慮した手指モデルと接

触シミュレーション手法を構築し、この手法による操作性の改善への寄与を評価する。

3. 研究の方法

本研究では、以下の 4 つの課題について検討を行った。

(1) 手モデルの構築

骨と軟組織による手指の有限要素モデルを構築した。メッシュ形状は、人体形状データベースに含まれる手の皮膚および骨格形状のデータをもとに構築した。モデルの構成については従来研究を参考に、皮膚の軟組織と深部の骨を区別して扱うものとした。通常の手モデルと同様に、骨の接続を関節におけるリンクとして表現し、関節角は後述のようにユーザに対する計測により得られるものとした。すなわち、軟組織に対して骨は強制変位境界条件を与えるモデルとした。

(2) 対象物のモデル化

対象物のモデル化について検討した。従来一般的に用いられているポリゴンモデルは、ポリゴン境界で微分値に不連続を生じることが問題であった。本研究では、メタボールモデル(ポテンシャル関数による等値面)を用いることで、この問題を回避することを試みた。また、表面の性質として、摩擦モデルの導入を試みた。メタボールモデルに摩擦のシミュレーションを適用する手法を開発した。

(3) 操作環境の構築

以上の手モデルおよび対象物モデルを統合して、物体の把持操作が可能な実験環境を構築した。操作の実現に適した手の動作計測手法と、上述のモデルに基づいて実時間のシミュレーションを実現する実装とについて検討した。さらに、触力覚提示デバイスを統合することで、指先への操作反力を提示するシステムを試験的に構築した。

(4) モデルの評価

構築された環境において把持操作を評価した。操作の現実感について、アンケートによる定量化を試みた。

4. 研究成果

(1) 手モデルの構築

手の形状モデルは人体の 3D モデルのデータベースである BodyParts3D のデータをもとに作成された。皮膚と骨について、手首より先のデータを切り出し、両者の間が軟組織であると仮定して変形モデルを構築した。このモデルとしては四面体一次要素による有限要素モデルを用いた。四面体メッシュの生成には、Adventure Project により公開されている TetMesh プログラムを用い、ノード間隔がおよそ 2.5mm のメッシュを得た(図 1 (a))。具体的には、32,471 ノード(このうち自由ノードは 24,885 ノード)、33,696 四面体要素で構成される。

一方、関節のリンクモデルを、骨の形状に基づいて関節の回転軸を推定することで構

築した。母指 CM 関節に 2 自由度、MP 関節、IP 関節に各 1 自由度、それ以外の指の CM 関節に 1 自由度、MP 関節に 2 自由度、PIP 関節、DIP 関節に各 1 自由度、合計 25 自由度をもつ。構築されたリンクモデルを図 1 (b) に示す。図では、各関節が x 軸 (赤色) まわりの回転自由度をもつものとして表現されている。同一の中心をもつ 2 自由度の関節については、原点を同じくする 2 つの座標系で表されている。なお、図中の各指先端に示されている座標系は後述の位置・姿勢センサの座標系であり、回転の自由度ではない。

物理パラメータは、ヤング率 $E = 1.0 \times 10^5$ 、ポアソン比 $\nu = 0.4$ とした。これは、現実の手の柔らかさの粗い近似を意図したものである。



(a) メッシュモデル (b) リンクモデル

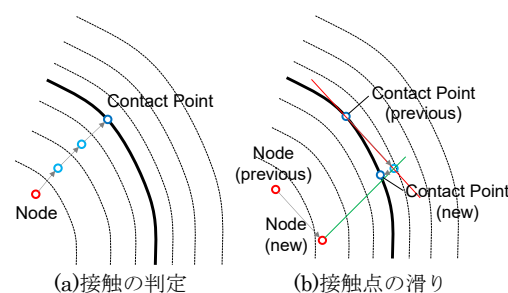
図 1 構築された手モデル

手モデルの変形では、手のリンクモデルの関節角が計測値として与えられるものとした。すなわち、リンクモデルと連動する骨の表面のノードに強制変位の境界条件が与えられる。一方、物体との接触による境界条件は、後述のようにペナルティ法により力および接触弾性として与えられる。これらの境界条件のもとに軟組織の変形が計算される。有限要素法には線形のモデルを用いた。手のモデルにおいては、指の屈曲により大きな回転変位が発生し、いわゆる幾何学的非線形性を無視できない。この問題を軽減するために、共回転法を用いた。共回転法の一般的な実装では、要素毎に回転を定義するが、この方法では要素毎の回転変換を求める計算と、個別に変換を適用する計算とによる負荷が比較的大きい。本研究では、指骨の回転に伴って、近傍の組織がほぼ同様の回転を生じることに着目して、各指骨の近傍の軟組織について、この指骨と等しい回転変換を仮定することとした。すなわち、メッシュをいずれの指骨の近傍にあるかによりグループ分けをおこない、それぞれのグループに共通の回転変換を適用した。

(2) 対象物のモデル化

物体モデルをメタボールにより表現することを試みた。ポテンシャル関数として 4 次多項式による近似ガウス関数を用いた。このポテンシャル関数は影響範囲が与えられた半径内に限定される。この性質を利用して、後述の実装ではポテンシャル場の計算を高速化している。

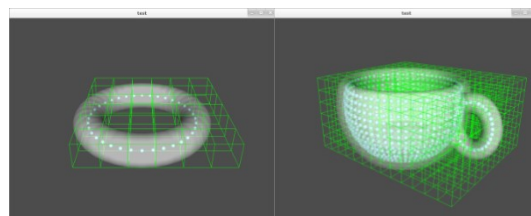
物体との接触には、上述のようにペナルティ法を用いたが、この際に、メタボールモデルに対する手モデルのノードの (a) 初期接触位置の特定と (b) 物体表面でのすべりの計算を行える必要がある。ポテンシャルモデルの特徴は、物体の表面だけでなく、その内外のポテンシャル勾配が定義されていることであり、本研究ではこれを利用して、これらの計算を近似的に実現した (図 2)。具体的には、(a) はノード位置からポテンシャル勾配にしたがって表面に降下することで計算下。(b) は前サイクルで得られた接触位置における接平面上の滑りを求めたのちに、勾配に従って表面に降下する処理により実現した。降下には、制限付きニュートン法を用いた。摩擦のモデル化は、動摩擦と静摩擦の 2 状態を用い、法線力と接線力の比やすべり速度によって、両状態を遷移するものとした。



(a) 接触の判定 (b) 接触点の滑り

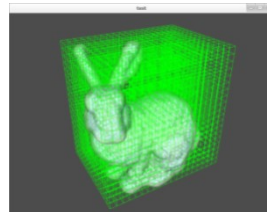
図 2 ポテンシャルモデルによる接触計算

実験的な実装では、複雑さの異なる 3 種類の物体モデルを作成して用いた (図 3)。ポテンシャル関数の影響半径を利用して、ポテンシャル値の計算の高速化を試みた。物体を含む空間を影響半径と等しいサイズの格子に分割し、それぞれの中に中心をもつメタボールをあらかじめ登録しておく。ポテンシャル値の計算では、計算対象のノードが含まれている格子の 27 近傍の格子に登録されているメタボールのみを対象にポテンシャル値 (あるいはその勾配) の計算を行う。図 3 では、メタボールの中心が水色の球で、格子が緑色のワイヤフレームで示されている。



(a) トーラス

(b) カップ



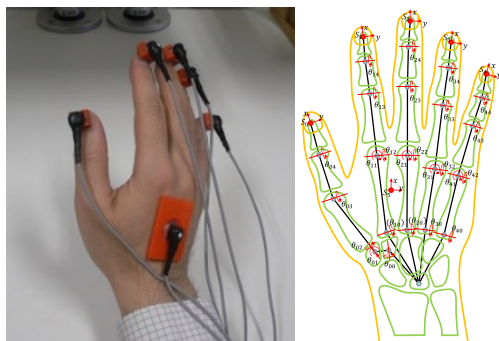
(c) バニー

図 3 メタボールによる物体の表現

物体の運動は、手モデルと物体モデルの間に作用する力にもとづいて運動方程式を解くことで実現された。シミュレーションの安定性のために、ペナルティによる弾性に加えて、粘性の成分を仮定した。これは、現実では皮膚の特性に起因すると考えられる。このモデルはそのままでは計算量が大きいことから、これを線形化して、並進・回転各3自由度の粘弾性支持により近似する。この簡略化により、シミュレーションの時間ステップを細かくとることが可能になり、計算の安定性が向上する。

(3) 操作環境の構築

手の運動計測は爪および手の甲に磁気センサを装着することで行った (図 4 (a))。爪は指尖骨と比較的強固に結合しており、その位置・姿勢を正確に反映する。手の甲は、皮膚の滑りにより接線方向の剛性は低いが、接触面積を大きくとることで、法線方向については比較的精度の良い計測が可能と考えられる。手形状の計測は、磁気センサの位置・姿勢から各指関節自由度の角度を推定する、逆運動学問題である。角度の定義は、上述の手のリンクモデルのうち、図 4 (b) に示す 23 自由度を用いた。

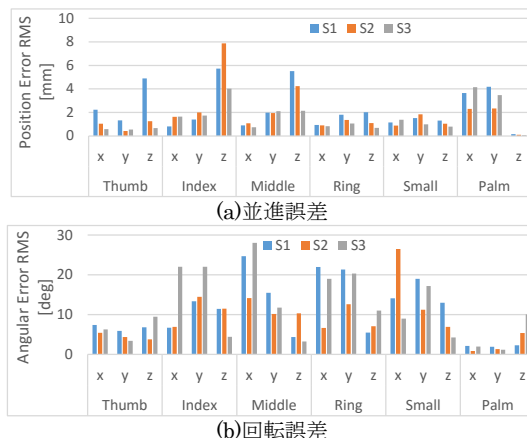


(a) センサの装着の様子 (b) 推定自由度
図 4 手の動作計測と推定モデル

評価関数は、リンクモデルから得られる指先位置・姿勢とセンサによる計測で得られる値の誤差の重みづけ二乗和として定義した。推定には最急降下法を用いた。重み係数に計測値の信頼度 (手の甲の接線方向の位置は誤差が大きいなど) を反映することで、精度の向上を試みた。この手法による指先および手の甲の位置・姿勢の推定誤差を、図 5 に示す。指先に対しては、各自由度平均で位置について約 1.8mm、角度について約 12 度である。掌については、上述の誤差関数の重みづけにより、法線方向の誤差が低く抑えられていることが確認された。なお、計算処理は、センサの更新レートである 240Hz で実行される。

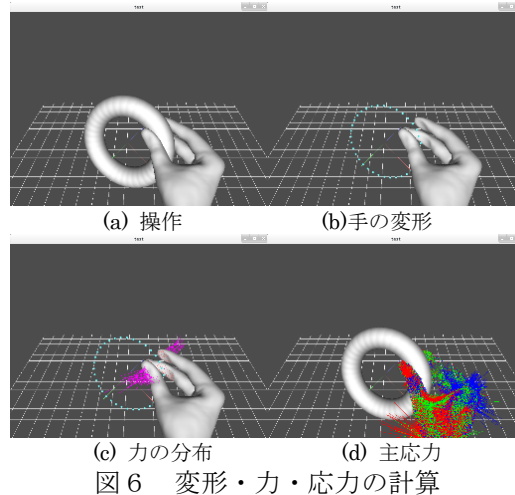
手の変形の計算では、有限要素法による連立方程式の計算がもっとも負荷の大きい処理である。これまでの実装では、解法として、共役勾配法を用いている。収束の判定に用いる誤差の閾値は、精度よりも実時間性を優先して決定した。共役勾配法の反復計算では、行列と共役ベクトルとの積を繰り返し行う。

この中では、剛性行列が疎行列であることを利用して、GPU に最適化した演算アルゴリズムにより、計算を高速化した。



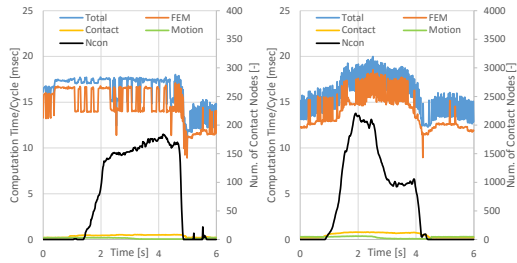
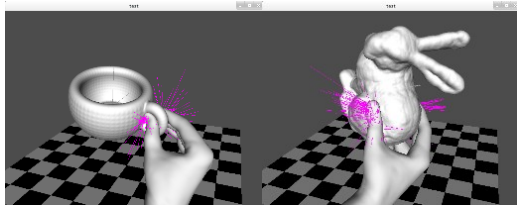
(a) 並進誤差 (b) 回転誤差
図 5 指先および手の甲における推定誤差

実験システムは手形状推定のサブシステムと、シミュレーションおよび表示のサブシステムより構成される。前者は、3次元磁気センサ (Liberty240 8-8) と推定計算用 PC (Core i7-860 2.8 GHz, Windows 7 64 bit) からなる。磁気センサのサンプリングレートは 240Hz である。後者は、シミュレーション用 PC (Core i7-4820K 3.7 GHz, CentOS 7.0)、GPU カード (GeForce GTX 980×2 and Quadro k4000, nVIDIA)、3D モニタ (VG278HE, ASUS)、および液晶シャッターメガネ (3D Vision, nVIDIA) より構成された。両社はネットワーク (Ethernet) を介して TCP により接続された。操作の様子を図 6 に示す。



(a) 操作 (b) 手の変形 (c) 力の分布 (d) 主応力
図 6 変形・力・応力の計算

操作に伴う計算の負荷の変化を図 7 に示す。処理時間のほとんどが有限要素法の計算に割かれている。接触ノードの変化に対する有限要素法の計算の負荷の変動は比例的ではなく、いずれの操作についてもサイクルの計算時間はおよそ 20ms 以下となっている。図 7 (b) のバニーの操作は、実験として行った操作の中でもっとも接触ノード数の大きく、計算負荷の大きな操作の一つである。



(a) コップを掴まむ動作 (b) バニーを持つ動作
図7 計算時間

(4) モデルの評価

以上で構築された操作システムの現実感を評価した。デモ発表の際に体験者にアンケートを行うことで、主観的な体験を定量化した。アンケートでは、(a)手モデルが現実の手を反映しているか、(b)手モデル自体の変形(物体と接触していない)は現実的か、(c)手モデルの操作に伴う変形は現実的か、(d)接触や力の表現は現実的か、について評価を求めた。この結果(図8)より、手モデルの現実感は比較的良好であるが、操作については劣ることが示された。これは、アンケートのコメントなども総合すると、力覚の欠如により手が物体に過度にめり込むことが原因の一つと考えられる。また、アンケートでは、体験者の手のサイズについても回答を求めた。このデータを用いて、体験者の手のサイズがモデルの手のサイズと異なることによる現実感の違いについて検討したが、この調査では有意な違いを確認することができなかった。

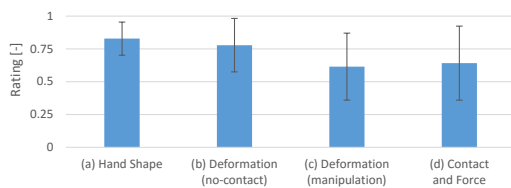


図8 メタボールによる物体の表現

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計0件)

[学会発表] (計8件)

1. 宇治土公雄介, 広田光一, 田川和義: 把持操作のための柔軟な手モデルの構築; 日本VR学会第18回大会, グランフロント大阪(大阪府 大阪市), 2013. 9. 20
2. 宇治土公雄介, 広田光一, 田川和義: 実時間の柔軟な手モデルに関する研究; 日本VR学会 力触覚の提示と計算

- 研究会 第12回研究会, 東京大学 本郷キャンパス(東京都 文京区), 2014. 3. 19
3. 桐山和也, 広田光一, 田川和義, 宇治土公雄介: VR環境における操作性向上のための手モデル; 日本VR学会第19回大会, 名古屋大学 東山キャンパス(愛知県 名古屋市), 2014. 9. 18
4. Koichi Hirota, Yusuke Ujitoko, Kazuya Kiriya, Kazuyoshi Tagawa: Object Manipulation by Deformable Hand; AsiaHaptics2014, Tsukuba International Congress Center (Tsukuba, Ibaraki), 2014. 11. 18-20
5. 広田光一, 田川和義: 変形可能な手モデルによる把持操作; 日本VR学会第20回大会, 芝浦工業大学 豊洲キャンパス(東京都 江東区), 2015. 9. 9-11
6. 内山貴雄, 赤羽克仁, 佐藤誠, 広田光一: 磁気的干渉の少ない多指力覚提示装置の提案; 日本VR学会 力触覚の提示と計算研究会 第17回研究会, 東京工業大学 すすかけ台キャンパス(神奈川県 横浜市), 2016. 3. 18
7. 山崎朱華, 広田光一, 藤本雄一郎, 藤田欣也: 3D物体に対する手への多点力覚提示アルゴリズム; 日本VR学会 力触覚の提示と計算研究会 第17回研究会, 東京工業大学 すすかけ台キャンパス(神奈川県 横浜市), 2016. 3. 18
8. Koichi Hirota, Kazuyoshi Tagawa: Interaction with Virtual Object using Deformable Hand; IEEE VR 2016, Hyatt Regency Greenville (South Carolina, USA), 2016. 3. 21

[図書] (計0件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計0件)
- 取得状況 (計0件)

[その他]

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

広田 光一 (Hirota, Koichi)

電気通信大学・大学院情報システム学研究科・教授

研究者番号: 80273332

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

田川 和義 (Tagawa, Kazuyoshi)

立命館大学・立命館大学グローバル・イノベーション研究機構・准教授

研究者番号: 40401319