

解剖学的構造をもつ手の陰的モデリング

中田 聖人 藤代 一成
慶應義塾大学 理工学部情報工学科

1 背景と目的

手は、人体のなかでも外界と最も頻繁にインタラクションするため、第一人称的にもきわめて誘目性の高い部位である。近年の VR の進歩に伴い、手に対してよりリアルな動きが求められている。一般的な手の CG モデルは、表面メッシュと、そのメッシュを動かすための概念的な骨格を与えるボーンから構成されている。しかし、実際は骨の他に、腱や筋肉といった器官が内部を構成している。筋肉の収縮のような動きも外見に変化を与え、さらにキャラクターの感情を表現する重要な要因のひとつである力感をも表現する。メッシュとボーンとの重みづけだけでは、このような内部構造の動きによる外見の変化を再現するのはきわめて困難である。

近年、体の他の部位については、表面だけでなく内部構造も含むモデリングがなされている。例えば Pascal Bérard ら [1] は目について、眼球だけでなく光彩や血管も含めたモデリングを試みている。そこで本研究では、骨や腱、筋肉といった手の内部構造をスカラ関数として表現し、そのような内部構造の動きから、手の表面の変化を陰的にモデリングできる手法を提案する。

2 概要

本手法の概略を図 1 に示す。本手法の処理は前処理部と本処理部に分かれる。さらに前処理部は骨分割処理、骨パラメタ決定処理、初期化処理から構成され、本処理部は骨の処理、腱・筋肉の処理、皮膚の処理、レンダリングのループから構成される。各処理の内容を表 1 に記述する。

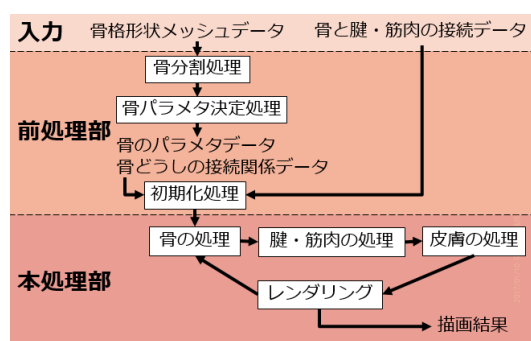


図 1: 本手法の概略。前処理部の後、本処理部で器官ごとの処理を反復し描画する。

表 1: 各処理の内容

	処理名	処理内容
前処理部	骨分割処理	骨格形状メッシュデータを骨ごとに分割
	骨パラメタ決定処理	分割されたメッシュデータから骨どうしの接続関係と骨ごとのパラメタを決定
	初期化処理	各器官の初期位置の指定、初期状態のパラメタを計算
本処理部	骨の処理	毎フレーム指定される各関節角をもとに骨を移動、骨格のスカラ関数を決定
	腱・筋肉の処理	骨の位置をもとに制御点を移動し、腱・筋肉のスカラ関数を決定
	皮膚の処理	内部構造を覆うように制御点を移動し、皮膚のスカラ関数を決定
	レンダリング	スカラ関数の等値面ポリゴンを描画

3 手法

本手法では、手のモデルを骨、腱、筋肉、皮膚の 4 つの器官に分けて表現する。最初に骨を組み合わせて骨格を形成し、骨格を基準に腱と筋肉を配置する。その後、内部構造を覆うように皮膚のスカラ関数を決定する。等値面ポリゴンのレンダリングには OpenGL を使用した。

3.1 骨の処理

入力のひとつである骨格形状メッシュデータには、東京大学と産業技術総合研究所が開発した、成人男性骨格形状データ [2] を使用した。このデータは体全体の骨格がメッシュデータとして表現されており、骨ごとに頂点がグループ分けされている。

前処理部では、最初に骨分割処理で骨格形状メッシュデータをグループに従って分割し、骨どうしの接続関係を決定する。根元で他の骨（親骨）とつながっている骨の場合は、その回転中心を、親骨先端に存在する 3 つの頂点から推定する。そして、回転中心を原点とし、骨が x 軸に沿うように、各骨固有の局所座標系を導入する。骨どうしの接続関係データは、親骨とその座標系における回転中心の座標で表現した。

骨のスカラ関数導出の際に、Rodolphe Vaillant らの Hermite Radial Basis Function (HRBF) を用いた手法 [3] を適用し、式 (1) のように、骨座標系での位置 p におけるスカラ関数 $f(p)$ として骨の形状を表現した：

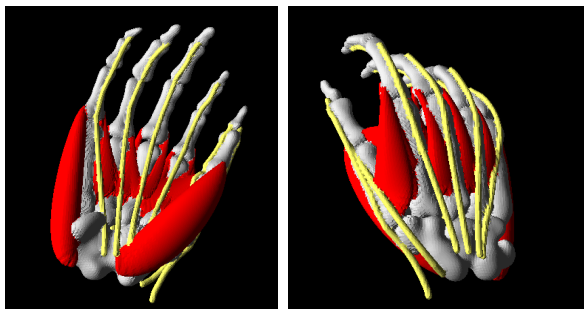
$$f(p) = \sum_{k=1}^N \{ \lambda_k \phi(p - c_k) + \beta_k^T \nabla \phi(p - c_k) \}, \quad (1)$$

ここで $\phi(x)$ はベクトル x を引数とする放射基底関数である．本手法では，文献 [3] と同様に $\phi(x) = \|x\|^3$ とした． c_k は表面上にあるべき点の位置ベクトルで， N はその本数である．本手法では，各骨のメッシュの頂点を使用した．骨パラメタ決定処理では，各骨の座標系におけるメッシュ頂点の座標と法線情報から，各骨の λ_k と β_k を決定する．2つの処理で出力した，骨どうしの接続関係データと各骨の HRBF のパラメタデータをもとに，初期化処理で骨の初期位置と骨の形状を表すスカラ関数を決定する．

本処理部では，親骨の回転中心座標と関節角の情報を用いて，各骨固有の座標系を世界座標系へ変換し，すべての骨の位置情報と回転情報を世界座標系に統合することで，骨格全体の形状をスカラ関数として表現する．

3.2 腱・筋肉の処理

腱と筋肉は，制御点をつなぐエルミート曲線を直線分で近似し，各直線分からの最小距離をスカラ関数として使用することで，太さをもつ曲線として表現した．制御点には骨につながる始点と終点，腱の場合は，腱の通る滑車構造となる点を使用した．腱は太さが一定であるが，筋肉はエルミート曲線のパラメタによって太さを変更した．さらに筋肉の場合は，本処理部で毎フレーム，曲線の長さを計算する．筋肉の膨張，収縮を表現するために，現在の曲線の長さとの初期状態での曲線の長さとの比をスカラ関数に使用し，太さを変化させた．3.1 項，3.2 項の処理により，スカラ関数として表現し，レンダリングした骨格，腱，筋肉を図 2 に示す．



(a) 手のひら側

(b) 手の甲側

図 2: スカラ関数として表現された手の内部構造．白色は骨，黄色は腱，赤色は筋肉を表す．

3.3 皮膚の処理

骨の処理と同様に，皮膚のスカラ関数導出の際にも Rodolphe Vaillant らの HRBF を用いた手法 [3] を適用し，スカラ関数を式 (1) のように表現した．骨をもとに，手全体を複数の領域に分割した．初期化処理では，各領域で 3.1 項，3.2 項でスカラ関数として表現した内部構造の表面に制御点を配置する．本処理部では，骨の移動にもとづいて内部構造の表面に存在するように，制御点を世界座標系上に配置する．その際に皮膚の厚さを考慮し，各領域で内部構造を表すスカラ関数の勾配方向に制御点を移動し，修正する．修正した制御点を式 (1) で使用する点 c_k とし，

その座標と法線情報から HRBF のパラメタを決定する．

3.4 レンダリング

スカラ関数として表現された内部構造や皮膚を表示するために，マーチングテトラヘドラルアルゴリズムを使用して，スカラ関数の等値面を表現するポリゴンを抽出する．手のモデル全体を覆う空間を複数の四面体に分割する．分割された四面体の頂点におけるスカラ関数値をもとに，等値面上のメッシュを導出している．また，器官ごとにメッシュの色を変更することで，器官を区別して表示する．

4 表示結果

図 3 に本手法で作られた手のモデルを動かした際の結果を示す．人差し指の動きに従って，内部の腱・筋肉が動き，表面が変化している様子が確認できる．

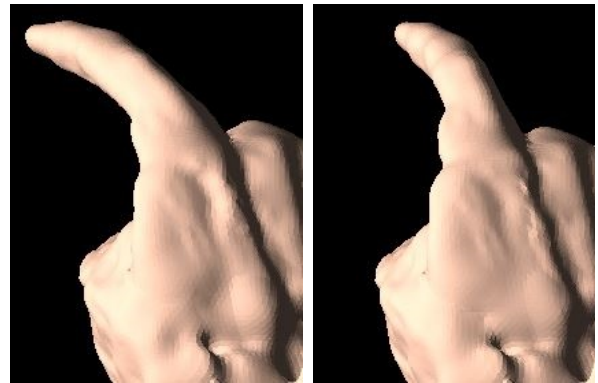


図 3: 表示結果．人差し指を左右に振ることで腱，筋肉もともに動く．

5 結論と今後の課題

本稿では内部構造をスカラ関数として表現し，手のモデルに組み込むことで，内部構造の動きによる表面の変化をモデリングできる手法を提案した．

今後の課題としては，骨の可動範囲や腱・筋肉の正確な位置，形状等，解剖学にもとづいた情報の適用，複数器官による食い込み防止といった相互作用処理が挙げられる．

謝辞

本研究の一部は，平成 28 年度科研費基盤研究 (A) 26240015 の支援により実施された．

参考文献

- [1] Pascal Bérard, Derek Bradley, Markus Gross, and Thabo Beeler: "Lightweight Eye Capture Using a Parametric Model," *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 35, No. 4, Article 117, 2016.
- [2] 中村仁彦・山根克・諏訪元・近藤修・河内まき子・川地克明・持丸正明, 2008: 成人男性骨格形状データ (産総研 H20PRO-905)
- [3] Rodolphe Vaillant, Loïc Barthe, Gaël Guennebaud, Marie-Paule Cani, Damien Rohmer, Brian Wyvill, Olivier Gourmel, and Mathias Paulin: "Implicit Skinning: Real-Time Skin Deformation with Contact Modeling," *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 32, No. 4, Article 125, 2013.