

# 人体設計のためのソリッドモデラー機能拡張

宇田紀之† 本村文隆†† 鶴岡信治† 三宅康二†

† 三重大学工学部電子工学科  
†† ミシガン大学電子&コンピュータ学科

## (要約)

皮膚変形の仕方は身体各部位において特徴的であり、身体動作を制御する骨格動作と筋肉運動は外見から推察するとはできない。関節の3次元座標を特定したスケルトン構造に身体部位の形状を近似するプリミティブをあてはめ、立体的な人体形状を表現するボリュームモデリングでは、皮膚変形を表現する初期形状の設計と動作における効果的な変形制御機構の導入がイメージのリアリティを決める重要な問題となる。

本研究では、多面体を組み合わせて定義した人体の大まかな形状に、多面体細分割処理を施して人体曲面を近似する方法を検討し、現在開発中のソリッドモデラーに人体設計のための新機能を追加して、ボリュームモデリングを試みた。ここで、動作過程をいくつかのフェーズに分割し、初期形状を定義する多面体の接続面と接続面の間隔を制御することで十分リアルなイメージの得られることを確かめた。人体設計の手続きと変形アルゴリズムについて報告する。

## A New Functions for Human Character Design on Solid Modeling System

Noriyuki Uda, Shinji Tsuruoka, Yasuji Miyake  
Department of Engineering, Mie University

Kimura Fumitaka  
Department of Electronic and Computer  
Michigan University

In volume design of human character, which imposes primitives approximating the limbs on the bones network specified joint position in the modeling coordinate and designs the topological shape of human character, the definition of primitives shape and deformation control during motion are key-points of reality of human image. Both tasks requires a lot of knowledge about human body and a lot of experiences on modeling.

This report discusses the modeling method which generates the human surfaces by applying polyhedral subdivision the initial control shape which is composed of several polyhedra with different shape and mess and draws an outline of humane character. The new function for volume rendering of human character is implemented on the solid modeler we have been developing and produces a sample images of human character. Skin deformation process during joint rotation is divided some phases and on each phases the shape of attach-face of primitives and the space between attach-faces change. These tasks makes quality of skin deformation animation more realistic. The procedure of shape design and algorithm of skin deformation are reported in this paper.

## 1. 序

人体の表面形状は、主に骨格構造とそれを取り巻く筋肉運動によって決まるが、屈伸運動における皮膚表面の伸縮変形も考慮する必要がある。人体モデリングでは、ワールド座標に関節位置のネットワークで定義し、関節の回転運動によって人体キャラクターの動作を幾何学的に表現する動作生成のプロセスと、関節のネットワークに、身体部位の形状を近似するプリミティブをあてはめ、立体的な人体形状を表現するボリュームモデリングのプロセスが区別できる。コンピュータグラフィックスの人体動作制御には、ロボット工学における逆キネマティックアルゴリズム(1)やダイナミクス制御の手法(2)を適用して、かなり精密な動作生成が可能となっている。しかし、ボリュームモデリングにおいては、動作を制御する筋肉構造はかなり複雑で、外見から筋肉運動を特定することはきわめて困難なうえ、変形過程は身体各部位において特徴的であることから、皮膚表面の変形表現は、まだデザイナーの技量に依存するところが大きいのが実状である。

本研究では、多面体を組み合わせて定義した人体の大まかな形状に、多面体細分割処理を施して人体曲面を近似する方法を検討し、現在開発中のソリッドモデラーに人体設計のための新機能を追加して、ボリュームモデリングを試みた。ここでは、基本動作をいくつかの動作フェーズに分割し、初期形状を定義する多面体の接続面の形状と接続面間の間隔を変化させることで、十分リアルなイメージの得られることを確かめた。多面体の組み合わせで人体の大まかな形状を定義するブロックデッサン法は、デザイナーには馴染みやすい手法であり、一度定義した多面体の頂点を移動させる対話的な操作で、初期制御多面体を変形して人体の個人差を表現することも可能である。人体設計の手続きと変形アルゴリズムについて報告する。

## 2. 人体形状モデリングに関する研究

人体形状のモデリング技法としては、身体各部位に多面体(3)や回転体(4)をなどをあてはめるプ

リミティブ合成法がよく用いられている。この方法で、滑らかな人体曲面まで表現するには、膨大な量のプリミティブが必要となり、形状修正も難しい。しかし、逆に少ないプリミティブで人体のおおまかな形状を規定する場合には、それなりに有効な方法である。

滑らかな人体曲面や動作変形を扱う方法として、曲面パッチを用いた自由曲面近似(5)や、分布関数を使って楕円体を変形させる方法(6)があり、屈伸運動における関節部位の筋肉の収縮などを考慮したパラメトリックな形状表現も可能となっている。ただ、自由曲面生成における制御点の配置や分布関数のパラメータ設定は視覚的なイメージ構成の感覚とは異なり、形状設計は必ずしも容易ではない。モデリングには熟練が要求される。動作における皮膚表面の柔軟な変形表現には、筋肉に作用する力やトルクを特定した有限要素法の適用や、弾性変形の近似方程式が用いられている。

本論文で提案する多面体再分割を用いたモデリング技法は、身体部分に多面体をあてはめて形状設計を行う点でプリミティブ合成法と同じである。しかしこの多面体は固定したのではなく、頂点の周囲に新頂点を発生させ、それらを結ぶエッジからなる面を再定義することによって、およそ4倍の面を持った多面体に変形する。すなわち、この多面体細分割処理を繰り返すことによって、初期設定した多面体は曲面体に近似してゆく。この場合、初期設定した多面体の頂点は自由曲面形成におけるパッチの制御点に相当する。

多面体間の接続は、接続面間の間隔と形状を関節変形を制御するための多面体を挿入して、多面体の滑らかな接続と、関節部位の変形を表現した。また、皮膚表面の状態変化を回転角度に応じていくつかのフェーズに分割し、身体動作過程の筋肉変形のシミュレーションを試みた。おおむね満足のゆく人体形状の表現ができたと考える。なお、この人体モデリングにおけるデータ操作には、本研究室で開発中のソリッドモデラーを使用し(8)人体設計における諸機能を関数として追加拡張した。使用言語はLISPである。

### 3. 人体の形状設計

人体の設計の手順は、まず、人体の各部位の形状を近似した多面体を、関節部位の空間配置を示したスケルトン構成図に配置し、接続面を接合して初期多面体を設定する。次に関節に設定したオブジェクト座標で軸回転を定義し、屈伸運動における皮膚変形を多面体の変形によって定義する。ここでは、回転角度における状態変化をいくつかのフェーズに分割して、この皮膚状態変化を制御する関数のパラメータ設定を行なった。最後に多面体細分割処理を加えて滑らかな人体曲面を生成する。それぞれの手順について説明する。

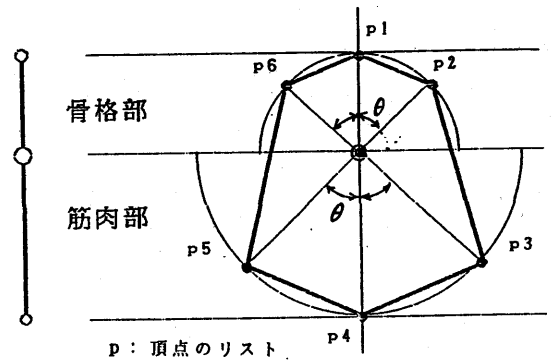


図1：プレートの設計

#### 3.1 初期多面体の設計

##### (部位の設計と人体構成)

人体の部位形状を近似する多面体は、対応する多角形の頂点をスキニングしてつくる多角柱である。この多面体を規定する多角形はプレートといい、人体の断面形状を近似して設計する。複雑な筋肉変形を示す体幹部位については、起伏の特徴点を一つづつプロットしてプレートを設計する。一方、四肢の部位は骨格を皮膚が取り囲んでほとんど変形しない部分と、筋肉動作で著しく変形する部分が区別できるので、これを六角形を用いて表現している。まず、側面図から部位の高さ  $h$  と骨格の中心位置  $o$  を抽出する。線分  $h$  の両端点を  $p1, p3$  とし、 $o$  を中心として偏平度だけ回転させた時の両端点の位置を頂点  $p1, p4$  とし、また回転したときの位置を  $p6, p2$  とする頂点のリストをプレートとして使う(図1)。動作時の筋肉の膨張は、筋肉部位の半径を拡張して筋肉部を拡張して表現する。

多面体は、関節部位の断面を示す関節ソリッドと、部位を示す部位ソリッドを区別する。関節ソリッドは、プレートを2枚重ね合わせた厚みのない多面体(ヌルソリッド)で、複数のプレートをスキニングして生成する部位ソリッドは体積を持つ。動作を伴わない姿勢を想定したスケルトン構造(初期設定座標)に、関節ソリッドと部位ソリッドを交互に配置して、おおまかな形状を確認する。関節ソリッドと

##### J: 関節の3次元位置リスト

(関節オブジェクト座標のリスト)

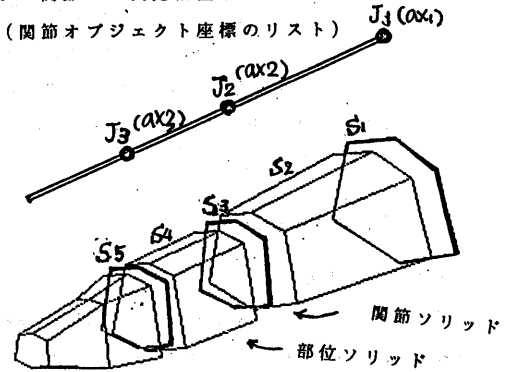


図2：ソリッドの配置

部位ソリッドの間には、皮膚の収縮を制御するための間隔を残しておく。図2は人さし指の設計をおこなったものである。

##### (部位の依存構造の定義)

初期制御多面体を構成する関節ソリッドの回転中心点にオブジェクト座標(ax)を設定する。動作は初期設定座標を原点とした相対的な角度変化で表す。図2に示した一群のソリッドの体幹部位から末端部位にいたる依存関係は、ソリッドの頂点リストをオブジェクト座標の属性として再定義することで表現する。指関節の3個のオブジェクト座標を  $ax1, ax2, ax3$  は次のように定義する。

```
(setq (v1(vset s1) v2(vset s2)
      v3(vset s3) v4(vset s4)
      v5(vset s5))
      頂点座標の取り出し)
(setq (av2(vset ax2) av3(vset ax3))
      'vset:ソリッドの頂点リストをつくる関数。
```

```
(putpro('ax3 v4 'vset-aux))
(putpro('ax3 v4 'rot-aux))
(putpro('ax2 v2 'vset-aux))
(putpro('ax2 v2 'rot-aux))
      座標属性の設定
```

```
(putpro('ax3 v5 'vset))
(putpro('ax2 (append v5 v4 v3 a3) 'vset))
(putpro('ax1 (append v5 v4 v3 v2 v1 a3 a2) 'vset))
      依存構造の設定
```

### (接合処理)

隣接する多面体の接続面の対応する各頂点間を連結するエッジを発生させる。接続面を削除して、2つのソリッドを1個のソリッドに接合(グルー)する。この接続処理をすべての接続面に施して、人体の初期制御多面体を構成する。なお、接続面の頂点数が一致しない場合には、体幹部に近い多面体のエッジ上に新頂点を設定、あるいは旧頂点を削除して、接合しようとする接続面(f2)の頂点数に一致する新接続面(f1')を定義する。この処理は、肩部や股部において必要となる。

## 3.2 多面体の変形制御

### (回転動作の制御)

関節の回転運動は、オブジェクト座標(AXNAME)、回転軸(AX)、回転角(d)と関数BENDで制御する。回転運動はオブジェクト座標を中心に、その関節に依存する末端部位の全頂点をd回転させ、オブジェクト座標を設定した関節ソリッドの頂点リストは、回転制御定数CDによって減衰した回転角で回転させる。これは、関節部位における皮膚の伸張と屈曲を調整して滑らかな連続性を保持するためのものである。回転制御定数CDは関節部位によって異なるが、初期値は0.5を設定してある。

```
(defun bend (ax d axname)
  (setq m (fine (get ax 'rot-aux) d)
        (rotv1 (get ax 'vset) d axname axpar(aval ax))
        (rotv1 (get ax 'vset aux) m axname axpar(aval ax)))
  nil)
```

ax:回転するオブジェクト座標 d:回転角  
axname:回転軸 m:関節ソリッドの回転角

### (フェーズ分割)

動作を限定した場合、関節の運動範囲はかなり狭く、皮膚変形にもいくつかの規則性を観察できる。そこで観察データに基づきながら、回転運動における皮膚表面の状態変化を特徴づけるフェーズを識別して、多面体の形状を変えながらフェーズでの筋肉変形を近似する関数を定義していく。図6は、人さし指の屈曲動作表現を試みたものである。第1関節の回転が35度付近を限界にして、皮膚の重なりによる屈曲線が発生することに注目して、回転角35度を変換点にして人さし指動作の二つのフェーズを識別した。

### (第1フェーズ)

曲げのない初期状態から、回転角35までの範囲ではソリッドの形状には変化はない。関節の回転によって骨格部の頂点p1間の距離 $l_1$   $l_2$   $l_3$ は初期設定距離よりも長くなるが、これは皮膚の伸張として実際の動作に一致する。なお第2関節は、第1関節回転角度の1/3だけ回転するものとする。

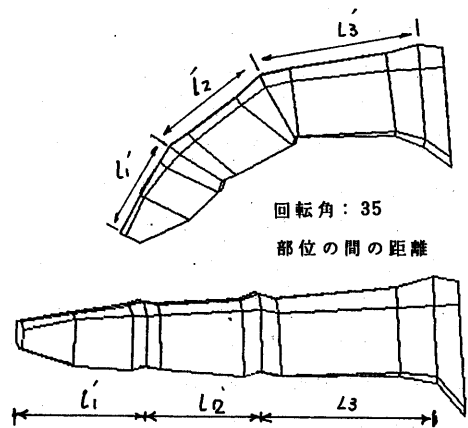


図3: 指動作の第1フェーズ

### (第2フェーズ)

35度以上の回転運動では、皮膚の重なりによって屈曲線の発生する。部位ソリッドは相互に干渉できないので、プレートの筋肉部分の半径を拡張してプレート面積を拡張することで表現する。このとき中間の関節座標は逆に縮小して、接続面の相互干渉を回避すると同時に接続面の重なりで屈曲線の発生

を表現する。ソリッド体積の増分は関節間の距離を短くして、体積一定を保持する。

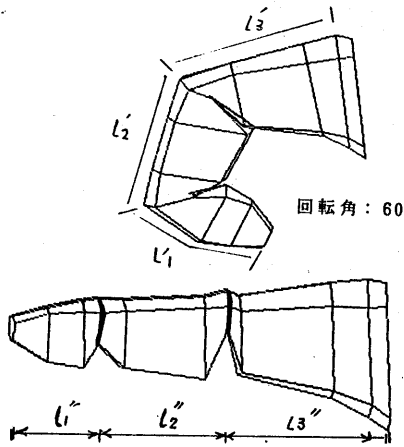


図4：指動作の第2フェーズ

### 3.3 多面体再分割による曲面生成

本モデルで用いる多面体再分割処理は、基本的に次の処理を行う。まず、多面体の各面に対して、その頂点数に等しい新頂点を面上に発生させたのち、新頂点を用いて新たに示す3種類の面を発生させて多面体を再構成する。新頂点を以下のように計算すると、多面体再分割を反復して得られる多面体は、双二次スプライン曲面に近似していく(S)。

再分割多面体のすべての頂点は、それぞれたった1つのFACE-faceに隣接しているので、FACE-faceの頂点座標を計算すれば、すべての頂点座標が計算できる。再分割多面体のあるFACE-faceの頂点座標を $V_i'$ 、そのFACE-faceに対応する制御多面体の面の頂点座標を $V_j$ とすると、 $V_i'$ は次式で求めることができる。

$$V_i' = \sum_{j=1}^n W_{ij} \cdot V_j$$

$$W_{ij} = (n+5)/4n \quad (i=j)$$

$$W_{ij} = [3+2\cos\{2\pi(i-j)/n\}]/4n \quad (i \neq j) \quad (1)$$

## 4. 表示例

人体の形状設計では、表面の起伏と動作変形を考慮してプレートを設計し、効果的な初期形状と変形パラメータを設定することが要領である。ただしそのような形状が一意に決まるものではない。本研究で使用したソリッドモデラーでは、最初は単純な多面体を使って初期形状を定義し、ディスプレイのイメージからピックした頂点を移動させて多面体形状の再構築を行う対話的な設計機構をもっている。

たとえば、関節回転によるソリッドの干渉を避けるためのプレート間隔の決定はこのような対話処理機構なしでは難しい。体幹部位の設計と手の運動表現について説明する。

### (体幹部位の設計)

体幹の初期多面体は、起伏の特徴点を頂点とする七角形を7プレート入力し、胸や肩の頂点を移動させて初期形状を整えた。左右対称を仮定して構築しているため、実際は4プレートの設計で十分である。

最後に頸、腕、腰の接続面のエッジを削除して新接続を準備し、隣接部位を接続した。細分割処理によって生成した面の数は425個である。

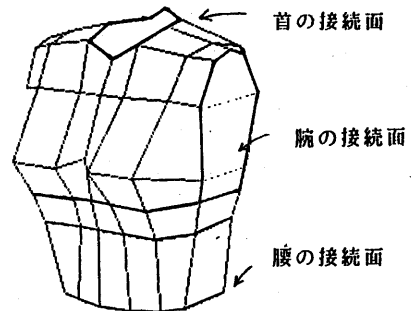


図5：体幹部位の設計

### (手の設計)

手の設計では、母指球の堅さを残すために曲面化の効果を抑制するためのエッジを何本か加えた。細分割処理による面の数は1223個であった。ここでは回転制御定数を.5として握る動作を試みた。

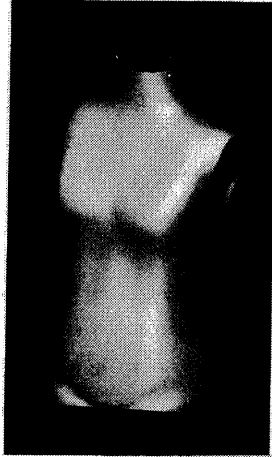
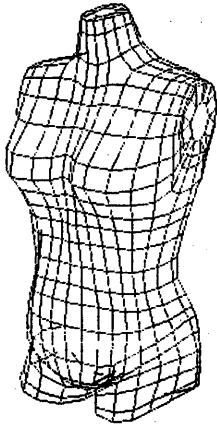


図6：体幹部位の表現

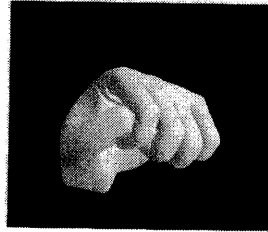
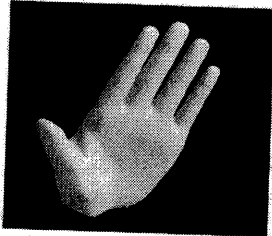


図7：手の動作表現

## 5. 結語

本報告では、動作変形を考慮した多面体による人体設計の手続きと多面体細分割処理による曲面近似の方法を説明した。また、多面体の間隔を制御する簡単な制御関数でも十分リアルな変形表現が可能であることがわかった。

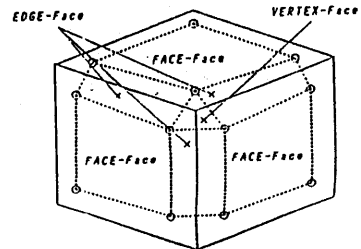
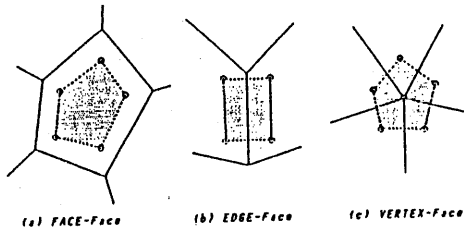


図8：新頂点と3種類の面

## (文献)

1. Balder, N and Nanoochienri, K: "Arituculate Figure Positioning by Multiple Constrains", IEEE, CG&A, pp28-38, 1987
2. Burzel, R and Barr, A: "A modeling System Bsed on Dyanmics Constraints", Pro. SIGGRAPH'88, 1988
3. Harbinson-Evans, D: "A Numeric Utility and Displ aying Ellipsoid Solid", Pro. SIGGRAPH'78, 1978.
4. Potter, T and Wilmert, K "Three dimensional Human Display Model", Compter Graphics, vol19, pp102-110, 1978
5. Thalmann, N and Thalmann, D "Computer Animaton", S pringer Verlag, 1988
6. 大村 皓一他: "柔軟な歩行モデルの開発とキャラクターアニメーションの制作技法"テレビジョン学会技術報告IPD90-3, 1984
7. 小松 功児: キャラクタアニメーションのための人体曲面モデル情報処理学会誌vol125, pp7-19, 1988
8. 木村 文隆: L I S Pによるソリッドモデラーの開発 PIXELNo72図形処理センター1988
9. Doo, D and Sabin, M: " Behavior of recursive division surfaces near extrodinary points", CADvol10, no6, 1987

## 付録：多面体細分割における新頂点の生成

多面体の各面に対してその新頂点を発生させた後、新頂点を用いて3種類の面を発生させる。