

キャラクタ・アニメーションのための人体の曲面モデル†

小松 功 児**

3次元コンピュータ・グラフィックスによるキャラクタ・アニメーション（人間や動物を扱うアニメーション）は、放送、映画、各種シミュレーションなどでのいろいろな利用が期待できる。しかし、人間の体のような柔らかな形状の表現や動作の自然な表現が困難であるため、現在のところ、その制作には多くの制約がある。本論文では、キャラクタ・アニメーション制作のために開発した人体の曲面モデルについて述べる。人体の曲面モデルは、人体のなめらかな皮膚形状を表現しており、また、いろいろな体型のモデルを作り出すことができる。このモデルはスティックフィギュアモデルを骨格とし、そのまわりになめらかに接続された Bézier パッチ、Gregory パッチを配置して表面の形状を表現している。骨格の形や骨と皮膚との間隔（肉の厚み）などを変更することにより表面の形状の修正が容易に行え、いろいろな体型のモデルをデザインすることができる。そして、各関節における曲げ、ねじりの角度を与えると表面の形状を自動的に変形し、デザインしたモデルを動かすことができる。このとき、関節部分の自然な変形や筋肉のふくらみの表現を実現している。ここでは、これらの手法について述べ、このモデルを使用したアニメーション制作手法について述べる。

1. ま え が き

キャラクタつまり人間や動物のように、それぞれの個性、特徴を持つものを扱うアニメーションをキャラクタ・アニメーションと呼ぶ。キャラクタ・アニメーションは、セル・アニメーション、人形などを実写するペペ・アニメーションなどにより作られてきたが、近年、コンピュータ・グラフィックスを用いてキャラクタ・アニメーションを制作することが試みられている¹⁾。最初は、2次元のセル・アニメーション的なものであったが、最近では、よりリアリティのある3次元のアニメーションが制作されるようになってきている。3次元のキャラクタ・アニメーションは、乗り物の操作性の確認²⁾や人間が行うには危険な動作のシミュレーション³⁾などのために制作されている。また、放送や映画などのために、実際にあるものを測定し再現するという手法で、魅力的な映像も制作されている⁴⁾。様々なキャラクタ・アニメーションが制作されているが、形状と動作のリアルな表現は困難な問題で、多くの研究が行われている^{1), 5), 6)}。人間の体のように柔軟な皮膚を持ち、動作に従って変形する対象は、従来の曲面表現手法では扱いにくい。また、無限にあり、周囲の環境により変化する動作をリアルに表現することは難しい。このような課題を解決し、高度な表現力を持つキャラクタ・アニメーションを容易に制作できるようになれば、放送、映画、各種シミュレーションなどで、日常的に使用することができる。

放送においては、実際の俳優との共演、ダンス、スポーツなどの模範演技やシミュレーション、危険な環境で演技するスタントマンの代行など番組制作の多くの分野で多様な利用が期待できる。

このようなことから、キャラクタ・アニメーション制作手法の研究を進めており、人体の形状を表現するモデルとして、本論文で述べる人体の曲面モデルを開発した。このモデルは、表面がなめらかであり、動作に伴う自然な変形や筋肉のふくらみのような形状の変化を表現でき、また、骨格の形などの体型の特徴を変更することにより、いろいろな体型のモデルを作り出すことができるという特徴を持つ。以下、2章でこのモデルの形状表現法の概略について述べ、3章で骨格に対する曲面の配置、4章で形状のデザイン、5章で動作による曲面の変形について述べる。そして、6章でこのモデルを用いたアニメーション制作手法について述べる。

2. 形状表現法

人体の形状モデルを開発するにあたり、人間の形状をリアルに表現するために必要な条件として、以下のことを考慮した。

- ①形状全体がなめらかであること。
- ②内部に骨格を持ち、関節のところで曲げたり、関節と関節の間をねじったりする動作が可能であること。
- ③動作に伴う骨格の形の変化が表面の形状に反映され、形状のなめらかさ、自然さが常に保たれていること。

† Human Surface Model for Character Animation by KOJI KOMATSU (Video Engineering and Data Processing Research Division, NHK Science and Technical Research Laboratories).

** NHK 放送技術研究所画像研究部

ること。

- ④筋肉のふくらみのような形状の変化を表現できること。

モデルの形状表現法として、形状を測定して多面体近似する方法や回転体、2次曲面などのプリミティブを合成する方法がよく用いられる。多面体近似する方法は、データを細かくとればとるほどリアルな形状に近づけることができるが、データ入力作業がたいへんであり、体型を変えるなどの形状の変更ができず汎用性に欠ける。プリミティブを合成する方法では、球⁹⁾、楕円体⁷⁾、楕円柱⁸⁾などを用いて多くのモデルが作られているが、関節部分で不連続の生ずるロボットのモデルしか実現できない。また、いずれの方法も、動作に伴う関節部分の形状の自然な変形や、筋肉のふくらみのような形状の変化の表現が困難である。

これらに対し、ここで述べる人体の曲面モデルでは、自由曲面を使用している。このモデルは、基本となる骨格の形状を決めたのち、そのまわりに肉付けするようにあらかじめ接続された曲面を配置して表面の形状を表している。そして、動作による骨格の変化に従って、骨のまわりの曲面を自動的に変形することにより、自然な形状変形、筋肉のふくらみを実現しており、先に挙げた条件に適合するモデルとなっている。また、骨格を利用して、容易に全身の形状を制作、修正でき、いろいろな体型のモデルを作ることができる。

3. 人体のモデルの構成

このモデルは、図1のスティックフィギュアモデル



図1 スティックフィギュアモデル
Fig. 1 A stick figure model of a human body.

を骨格としている。この骨格に対して、肉付けするような形で、頭部、胸部、腰部、脚部、各指を構成する筒状に接続された双4次 Bézier パッチを図2のように配置する。Bézier パッチを用いたのは、変形などの処理が容易なためである。

ここで、Bézier パッチは、2つのパラメータ u, w の多項式として次式により表される⁹⁾。

$$P(u, w) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n B_{i,m}(u) B_{j,n}(w) Q_{ij} \quad (0 \leq u, w \leq 1)$$

ここで、 $B_{i,m}(u) = \binom{m}{i} (1-u)^{m-i} u^i$

$$\binom{m}{i} = \frac{m!}{i!(m-i)!} \quad (1)$$

Q_{ij} は制御点と呼ばれる位置ベクトルで、この点の配置によってパッチの形状が決まる。

双4次 Bézier パッチは、 $m=4, n=4$ で制御点の数は、 5×5 の25個である。図3に制御点とそれによって定まる双4次 Bézier パッチの例を示す。

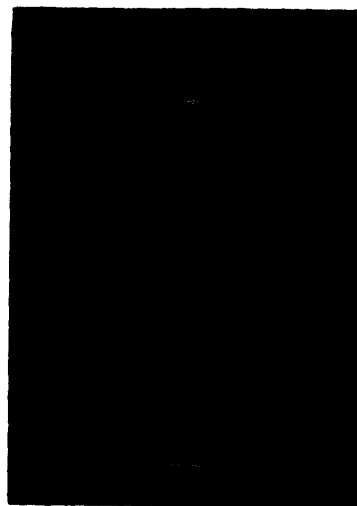


図2 Bézier パッチの配置
Fig. 2 The arrangement of Bézier patches.

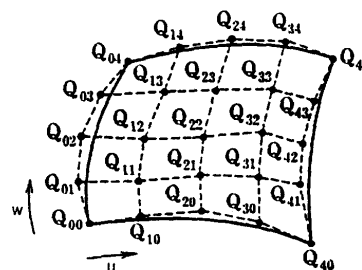


図3 双4次 Bézier パッチ
Fig. 3 A biquartic Bézier patch.

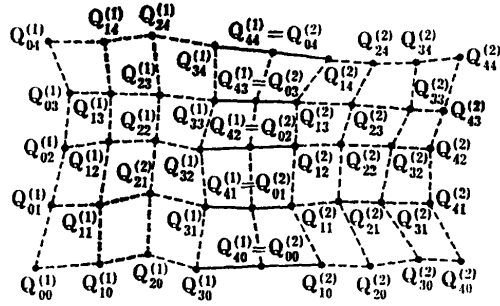


図 4 双 4 次 Bézier パッチの接続
Fig. 4 The joint of biquartic Bézier patches.

モデルの形状を作るときには、パッチを何枚もなめらかに接続していく。図 4 のように双 4 次 Bézier パッチを 2 枚接続する場合、Bézier パッチの性質により、次式のような簡単な関係が制御点間に成り立っていれば、パッチはなめらかに接続される。

$$\begin{aligned}
 Q_{0j}^{(2)} &= Q_{4j}^{(1)} \\
 Q_{1j}^{(2)} - Q_{3j}^{(2)} &= h(Q_{1j}^{(1)} - Q_{3j}^{(1)}) \\
 (j=0\sim 4, h: \text{定数}) & \quad (2)
 \end{aligned}$$

パッチのほかの 3 辺での接続についても、境界線に対応する制御点とその一列内側の制御点を (2) 式と同様な条件を満足するように配置すれば、パッチはなめらかに接続される。また、双 4 次 Bézier パッチの場合、中央の制御点 Q_{22} は、どの辺から見ても二列内側にあり、このなめらかな接続の条件には関係しておらず、自由に位置を選ぶことができる。後述するように、このモデルでは、双 4 次 Bézier パッチのこの性質を使って筋肉のふくらみを表現している。また、これが、双 4 次形式を使用した理由である。

Bézier パッチの配置を図示すると図 5 のようになり、頭部と胸部、胸部と腰部、腰部と脚部、指と手のひらは離れている。各部を接続して、体全体がなめらかにつながっているようにする。接続部分のパッチの配置は、頭部と胸部、胸部と腰部、腰部と脚部については図 6 (a) のようになっている。また、親指以外の指と手のひらでは図 6 (b)、親指と手のひらでは図 6 (c) のようになっている。(a) では表の左右、裏の左右の 4 か所で、(b)(c) では各指について表裏の 2 か所で以下の接続処理を行う。この処理では、図 7 のようにパッチを接続して作られた五辺形、六辺形の曲面を用いる。

[接続処理]

(A) 図 8 のように Bézier パッチを分割し、それぞれ S_a, S_b とする。

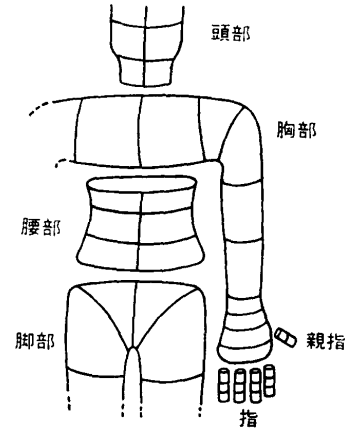


図 5 Bézier パッチの配置
Fig. 5 The arrangement of Bézier patches.

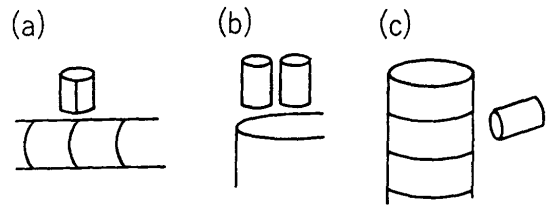


図 6 接続部分のパッチの配置
Fig. 6 The arrangement of patches to be joined.

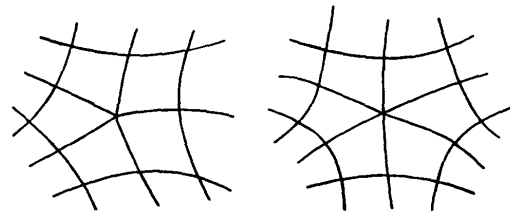


図 7 パッチの五辺形、六辺形の接続
Fig. 7 A pentagonal and hexagonal joint of patches.

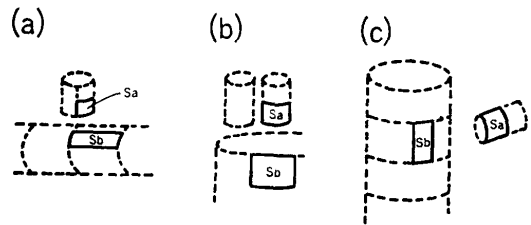


図 8 パッチの分割
Fig. 8 The division of patches to be joined.
(The pre-processing of the generation of a pentagonal of hexagonal surface.)

- (B) S_a, S_b をまん中で分割し、それぞれ S_1, S_2, S_3, S_4 とする。(図 9(a))
- (C) 作ろうとする五辺形、六辺形の曲面の中央の

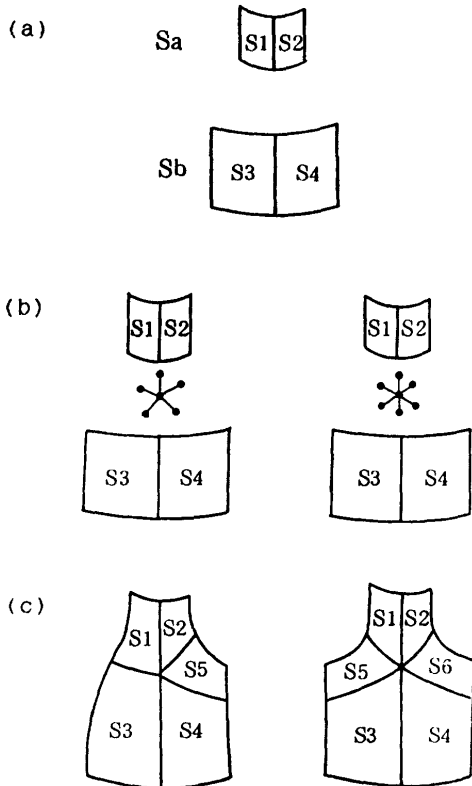


図 9 五辺形, 六辺形の曲面の生成
Fig. 9 The generation of a pentagonal or hexagonal surface.

- 点の位置を決め, そのまわりに, 正五角形, 正六角形の形に点を配置する¹⁰⁾. これらを $S_1 \sim S_4$ の新しい制御点とする. (図 9 (b))
- (D) (C) で決めた新しい制御点の位置を使って, $S_1 \sim S_4$ の他の制御点の位置を変える. 次に, 図 9 (c) のように, 五辺形の場合は S_5 , 六辺形の場合は, S_5, S_6 のパッチを新たに生成する.
- (E) 周囲の曲面 (裏および左右に存在する) になめらかに接続されるように, 制御点の位置を補正する.
- (F) 五辺形, 六辺形の内部のパッチどうしがなめらかに接続されるように, 制御点の位置を補正する.

以上の処理により, 図 10 のように周囲の曲面になめらかに接続された五辺形, 六辺形の曲面が作られる. ここで, (E), (F) では, $S_1 \sim S_5, S_6$ 以外のパッチ, すなわち, 図 10 の点線部のパッチの形状が変化しないようにする. Bézier パッチでは, $S_1 \sim S_5, S_6$ 以外のパッチの形状を変化させずに (F) を行うことができない. これは, 制御点 $Q_{11}, Q_{13}, Q_{31}, Q_{33}$ が, それ

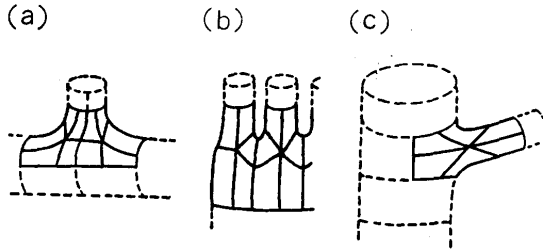


図 10 接続処理後
Fig. 10 After the joint procedure.

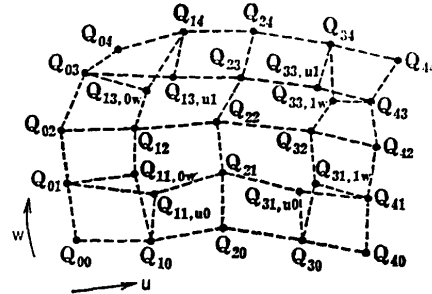


図 11 Gregory パッチの制御点
Fig. 11 Control points of a Gregory patch.

ぞれ, u と w , 二方向のパッチの接続に関係しているためである. そこで, $S_1 \sim S_5, S_6$ には, 拡張された Bézier パッチ (Gregory パッチ)¹¹⁾ を用いる.

双 4 次 Gregory パッチは次式のようになり, その制御点は図 11 のようになる.

$$P(u, w) = \sum_{i=0}^4 \sum_{j=0}^4 B_{i,4}(u) B_{j,4}(w) Q_{ij}(u, w) \quad (0 \leq u, w \leq 1)$$

ただし, $Q_{ij}(u, w) = Q_{ij}(Q_{11}, Q_{13}, Q_{31}, Q_{33})$ 以外)

$$Q_{11}(u, w) = \frac{wQ_{11,0w} + uQ_{11,u0}}{u+w}$$

$$Q_{13}(u, w) = \frac{(1-w)Q_{13,0w} + uQ_{13,u1}}{u+(1-w)}$$

$$Q_{31}(u, w) = \frac{wQ_{31,1w} + (1-u)Q_{31,u0}}{(1-u)+w}$$

$$Q_{33}(u, w) = \frac{(1-w)Q_{33,1w} + (1-u)Q_{33,u1}}{(1-u)+(1-w)} \quad (3)$$

Gregory パッチでは, $Q_{11}, Q_{13}, Q_{31}, Q_{33}$ は, それぞれ一方向の曲面の接続に関係した 2 点を結ぶ直線上を u と w の値に従って移動する. これにより, Gregory パッチでは, 各境界でのパッチの接続を独立に行え, 周囲のパッチの形状を変えることなく, (F) を行うことができる.

また, (F) で, なめらかな接続のための制御点の条件は次式のようになる (図 12).

$$b_0 = a_0$$

$$b_1 = a_1 + \frac{1}{4}hc_0$$

$$b_2 = a_2 + \frac{1}{2}hc_1$$

$$b_3 = a_3 + \frac{3}{4}hc_2$$

$$b_4 = a_4 + hc_3$$

$$h = -2 \cos \theta$$

$$\text{正 } n \text{ 角形の場合 } \theta = \frac{360}{n} (\text{deg}) \quad (4)$$

中央部の制御点の配置を正五角形、正六角形としたのは、変形したときの曲面の形の制御を行いやすくするためである。また、このような形に決めたことにより、接続の条件式は、比較的簡単なものとなっている。

4. 形状のデザイン

以上のように構成されたモデルの形状を作る場合、パッチの制御点を一点ずつ決める方法では、希望の形状を得るまでに、かなりの作業量が必要となる。そこで、制御点の位置を段階的に決めていく方法により形状のデザインを行う。すなわち、わずかなデータを入力して、まず大まかな形を決め、少しずつデータをふやして、細かなところまで形を決めていくわけである。

形状のデザインの際の座標系は図13のようになる。モデルは、 $x-z$ 平面に直立し、背骨、頭部の関節、先端部は $y-z$ 平面内にあり、形状は $y-z$ 平面に対して対称としている。そして、次のようなデータを入力し、すべてのパッチの制御点の配置を決定する。

- ①各関節、体の先端部の位置
- ②各関節、体の先端部のまわりの太さ
- ③五辺形、六辺形の曲面の形状を指定するパラメータ
- ④関節と関節の間の太さ
- ⑤制御点の修正位置

ここで、データ①～③は、制御点を配置するのに最低限必要となるデータである。データ①により、図1のスティックフィギュアモデルが作られ、これとデータ②、③により、すべてのパッチの制御点が配置され、モデルの大まかな形状が決まる。そして、データ④、⑤を入力して、だんだん細かな形状を付加していくわけである。このほかにも、特殊なデータとして、曲げ

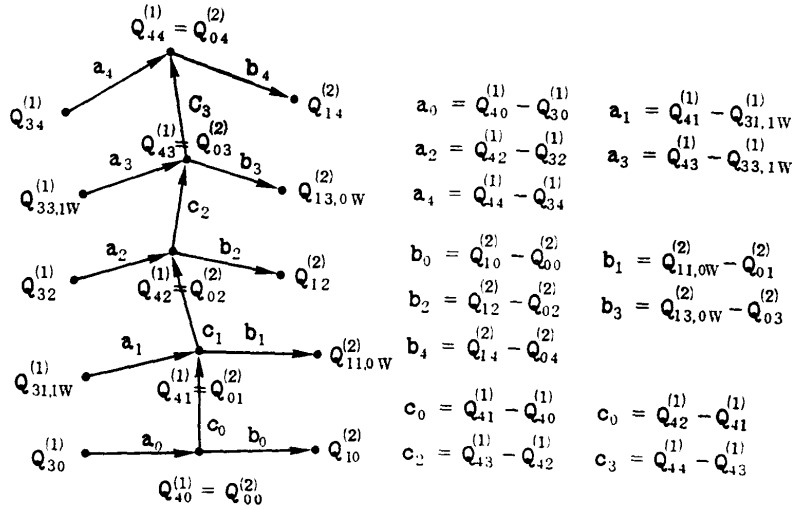


図 12 Gregory パッチの接続
Fig. 12 The joint of biquartic Gregory patches.

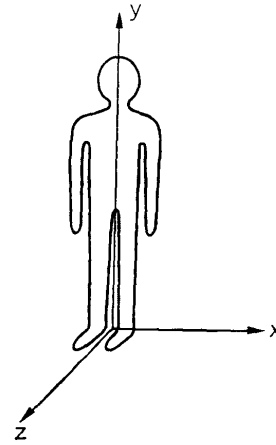


図 13 形状のデザインの際の座標系
Fig. 13 The coordinate system of the design of the figure.

の動作の回転軸の方向を決めるパラメータや五辺形、六辺形の曲面を生成する際の Bézier パッチの分割位置を決めるパラメータなどがあるが、ほとんど変更することはない。

モデルはリアルタイムに視点を変えられるグラフィックディスプレイに表示されており、これらのデータの輸入は、タブレットを用いて容易に行える。データ②、④は正面および側面から見た肉の厚みを入力する。データ③は中央の制御点の位置（指の付け根においては、関節からの方向 V と高さ H ）とそのまわりに正五角形あるいは正六角形に配置される制御点の拡がり S を入力する（図 14）。データ⑥は制御点の位置を直接入力して、制御点の位置を一点ずつ修正するこ

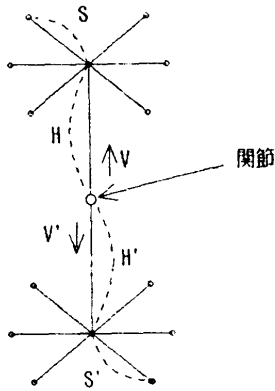


図 14 五辺形, 六辺形の曲面の中央の制御点
Fig. 14 The central control point of a pentagonal or hexagonal surface.

とであり, これにより, 頭部, 肩, 足の付け根など形状が複雑な部分を作る. このようにして入力されたデータに応じて, パッチの制御点の配置が変更され, 修正された形状がディスプレイに表示される. ここで, データ⑤により付加される局所的な形状は, データ①~④を変えても保存されるようにしている.

これらのデータにより, すべてのパッチの制御点の配置を決定するわけであるが, このとき, 次の条件を満たすようにしている.

- (1) パッチは, すべてなめらかに接続される.
- (2) ほとんどの関節において, その曲げ運動の回転軸上に, Bézier パッチの四隅の点に対応する制御点が存在する.

条件(2)は, 変形したときに, 手や足の長さが変わるといった不自然さを生じさせないための条件である. これは, パッチの四隅においては, パッチ上の点と制御点が一致するという Bézier パッチの性質を利用している. 形状を作るとき, 制御点の配置にこのような拘束条件を課して, 後述する動作による変形のアルゴリズムが適用できるようにしている.

それでは, 上記のデータを用いた制御点配置の手順について説明する. この方法では, Bézier パッチの制御点を, 骨方向に, パッチの境界に対応する制御点 A, その一列内側の制御点 C, 境界から二列内側の制御点 B の 3 つにグループ分けしている. 腕, 足, 指など体の大部分では, A, B, C は図 15 のようになり, A は関節のまわりの制御点となる. この部分に適用されている方法を具体的に示しながら, 制御点配置の手順を以下に説明する. step 1~4 で Bézier パッチの制

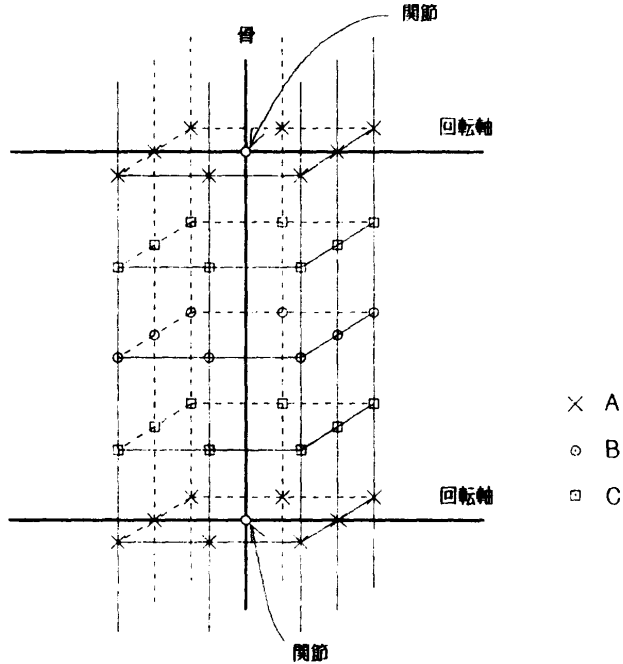


図 15 骨のまわりの制御点の配置
Fig. 15 The arrangement of control points around bones.

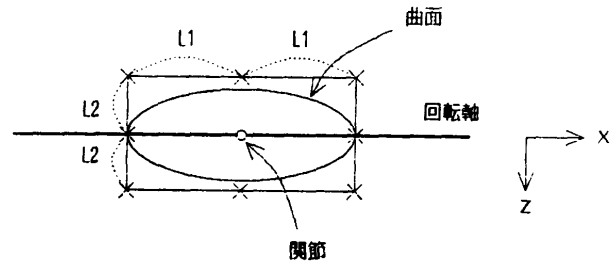


図 16 関節のまわりの制御点の配置
Fig. 16 The arrangement of control points around joints.

御点が配置され, step 5~7 で Gregory パッチの制御点が配置される.

[step 1]

データ②により, Aの制御点を配置する. 図 15 の場合は, 図 16 のように, Aの制御点を関節のまわりに長方形の形に配置する. 図 16 で, L_1, L_2 はデータ②で, それぞれ, 正面 (z 軸方向), 側面 (x 軸方向) から見た肉の厚みとして入力した値である. この例では, 曲げ運動の回転軸は $x-y$ 平面上にあるとしている. Bの制御点をそれぞれ対応するAの制御点の midpoint としてその位置を決める.

[step 2]

データ④により, Bの制御点の位置を修正する. 図 15 の場合は, 図 17 のように, Bの制御点により作ら

れている長方形の大きさと位置を修正する。Cの制御点をそれぞれ対応するAとBの制御点の中点としてその位置を決める。

[step 3]

データ⑤により制御点の位置を修正した後、データ⑤を、step 2 までで決まっている制御点の位置からの変位に変換して記憶しておく。すでに、変位が記憶されている制御点については、その変位を step 2 までで決まっている制御点の位置に加える。

[step 4]

パッチのなめらかな接続の条件により制御点の位置を補正する。Aの制御点は、関節のまわりの制御点であり、位置が変わってはいけない。Cの制御点の位置を変えることにより、なめらかな接続の条件が満足されるようにする。すなわち、(2)式で、 $Q_{3j}^{(2)}$, $Q_{1j}^{(2)}$ を変えることに相当する。1つの式に対し2自由度があるので、制御点の位置ができるだけ変化しない条件として、補正前と補正後の制御点間の距離の2乗和が最小という条件を加える¹²⁾。補正後の制御点をそれぞれ $Q_{3j}^{(2)'}$, $Q_{1j}^{(2)'}$ とすると次式のようになる。

$$\begin{aligned} Q_{1j}^{(2)'} &= (1+h)Q_{1j}^{(2)} - hQ_{3j}^{(2)'} \\ |Q_{3j}^{(2)'} - Q_{3j}^{(2)}|^2 + |Q_{1j}^{(2)'} - Q_{1j}^{(2)}|^2 &\rightarrow \text{minimum} \\ (j=0\sim 4) \end{aligned} \quad (5)$$

上式より、

$$Q_{3j}^{(2)'} = \frac{Q_{3j}^{(2)} + h(1+h)Q_{1j}^{(2)} - hQ_{1j}^{(2)}}{1+h^2} \quad (j=0\sim 4) \quad (6)$$

この式を用いて制御点の位置を補正し、Bézier パッチがすべてなめらかに接続されるようにする。以上で、すべての Bézier パッチの制御点は、先に挙げた配置の際の条件を満足するように配置される。次に、2章で述べたように各部の接続を行う。

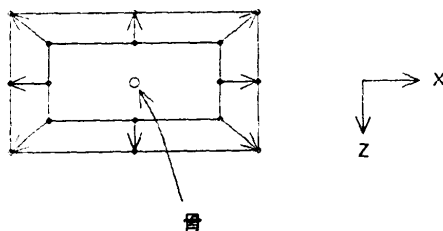


図 17 関節と関節の中間の制御点Bの位置の修正
Fig. 17 The adjustment of the position of control points that are middle of joints (control points B in Fig. 14).

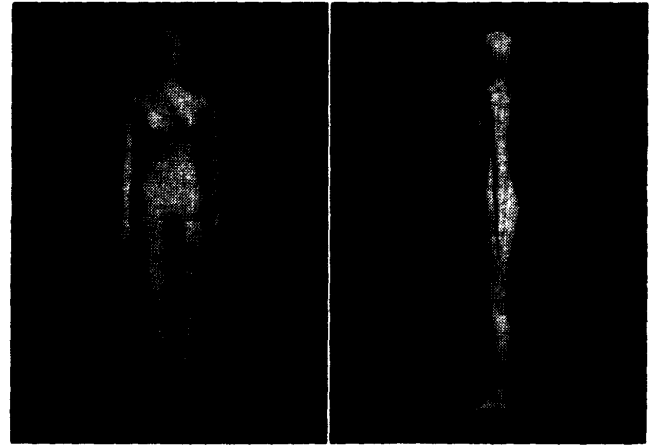


図 18 人体の曲面モデル
Fig. 18 Human surface model.

[step 5]

2章の接続処理の(D)まで行う。五边形、六边形の曲面は、Bézierパッチを分割して作られるので、Bézierパッチの制御点の修正に伴い自動的にその制御点の位置は修正されることになる。

[step 6]

データ⑤により Gregory パッチの制御点の位置を修正する。方法は step 3 と同様にして、step 5 までで決まっている制御点の位置を修正する。

[step 7]

2章の接続処理の(E), (F)を行う。

以上述べた方法によりデザインされたモデルが図 18 である。これは、デザイナーにより描かれた人体の正面図、側面図よりデータ①, ②を入力し、作られた形状を対話的に修正して制作された。

このデザイン法では、局所的な形状をかえることなく、全体を伸ばしたり、太らせたりすることができる。すなわち、一つのモデルを修正して、他の形状のモデルを作ることが容易であり、比較的容易にいろいろな体型の人体をデザインすることができる。なお、図 18 のモデルでは、Bézier パッチを 156 枚、Gregory パッチを 172 枚使用している。

5. 動作による変形

このモデルは動きに伴う骨格の変化に従って、骨のまわりの曲面の変形を自動的に行うので、各関節での曲げ、ねじりの角度を与えるだけで図 18 のモデルを動かしてアニメーションを制作することができる。

図 19(a) で、関節 2 で曲げの角度 θ ということは、関節 2 を通る回転軸を中心に角度 θ 回転すること

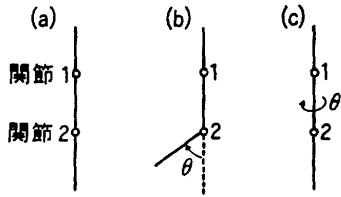


図 19 曲げとねじりの動作
Fig. 19 The bending and twisting motion.

である (図 19(b)). また, 関節 2 でねじりの角度 θ ということは, 関節 1 と関節 2 を結ぶ骨を中心に角度 θ 回転することである (図 19(c)). いずれもまったく動作を行っていない状態 (図 1 のスティックフィギュアモデルの状態) を 0 度とし, それからの相対的な角度により変化を表す. 各関節での曲げおよびねじりの角度を指定していくことにより, 人間が行うほとんどの動作を実現することができる.

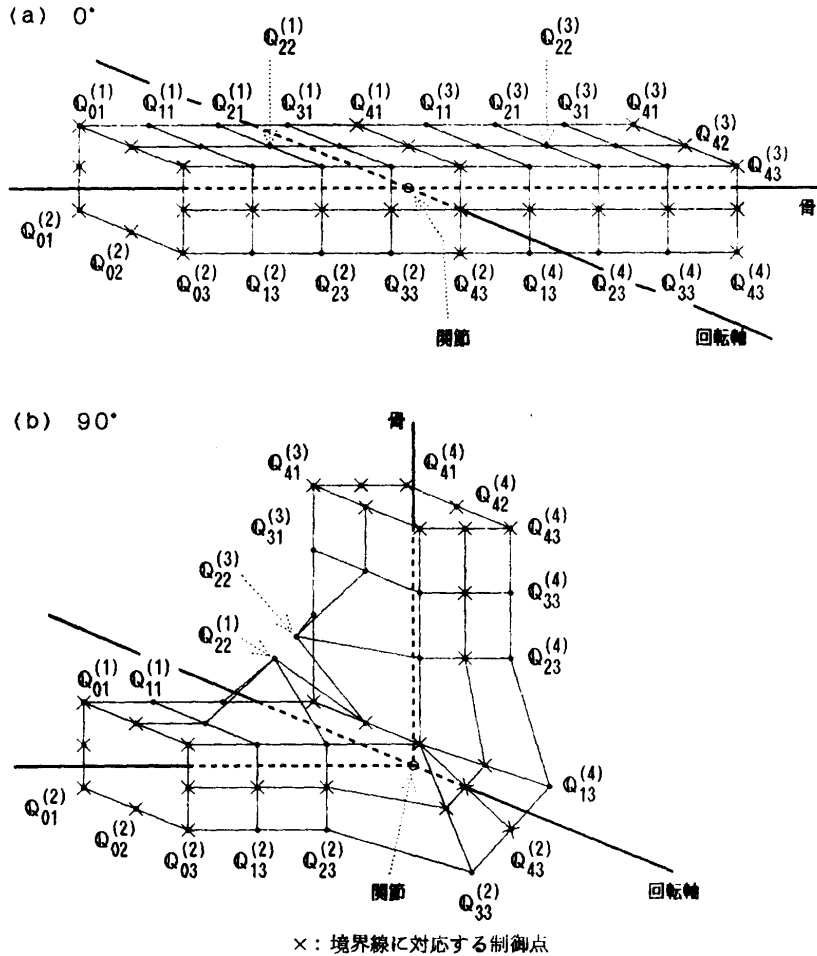
曲げおよびねじりの変形処理は体の先端部のほうから行う. 各関節においては, ねじりを先に行くと曲げの回転軸が変化するので, 曲げの処理を行ってから, ねじりの処理を行っている.

動きによる曲面の変形処理は, 体のどの部分かによって若干異なる. 最も多くの部分に適用されている処理について説明する.

5.1 曲げによる曲面の変形

先に説明した配置法により, 腕, 足, 指など体の大部分では, Bézier パッチの制御点は, 骨格に対して図 20(a) のように配置されている. (この状態の曲げの角度が 0 度である.) この部分に適用されている変形処理について説明する.

図のように, パッチの四隅の点に対応する制御点は関節を通る回転軸上にある. この回転軸を中心に, 関節より体の先端に近い制御点を曲げの角度回転する.



×: 境界線に対応する制御点

図 20 骨に対する制御点の配置
Fig. 20 The arrangement of control points around bones.

ただし、関節のまわりのパッチの接続に関係した制御点については、自然な変形を行うために、以下のような処理を行っている。この処理では、90度するときの制御点の配置を決め、0度と90度するときの制御点の配置からの内挿、曲げの角度の半分の角度の回転、そして、パッチのなめらかな接続の条件を使って制御点の位置を決めている。ここで、角度 θ 曲げたときのパッチの制御点を $Q_{ij}(\theta)$ とする。

(A) 90度の曲げを行ったとき、図20(b)のように、関節のまわりの制御点で、曲げの動きの内側にある制御点 $Q_{1j}^1, Q_{1j}^2=Q_{1j}^3, Q_{1j}^3$ が縮退するとする。縮退点を $Q_{1j}^1(90)$ とし、 $Q_{1j}^1(\theta)$ を次式により決める。(以下、すべて、 $j=1\sim3$ である。)

$$Q_{1j}^1(\theta) = Q_{1j}^1 + \frac{\theta}{90}(Q_{1j}^1(90) - Q_{1j}^1) \quad (7)$$

(B) $Q_{1j}^2, Q_{1j}^3, Q_{2j}^2, Q_{2j}^3$ を $\theta/2$ 回転し、それぞれ、 $Q_{1j}^2', Q_{1j}^3', Q_{2j}^2', Q_{2j}^3'$ とする。

(C) (A)により決められた $Q_{1j}^1(\theta), Q_{1j}^3(\theta)$ と回転軸上の制御点を使い、なめらかな接続の条件により、 $Q_{1j}^2(\theta), Q_{2j}^3(\theta)$ を決める。 $Q_{2j}^2(\theta)$ は次式により決める。 $(Q_{2j}^2', Q_{2j}^3', Q_{2j}^3')$ の位置関係ができるだけ変化しないようにしている。

$$Q_{2j}^2(\theta) = Q_{2j}^2' + ((Q_{1j}^1(\theta) - Q_{1j}^1') + (Q_{2j}^3(\theta) - Q_{2j}^3'))/2 \quad (8)$$

(D) (B)で求めた Q_{1j}^2', Q_{2j}^2' を次式で修正し、これを Q_{1j}^2'', Q_{2j}^2'' とする。 (Q_{1j}^2', Q_{1j}^3') を Q_{1j}^2'' へ、 (Q_{2j}^2', Q_{2j}^3') を Q_{2j}^2'' へ平行移動している。

$$\begin{aligned} Q_{1j}^2'' &= Q_{1j}^2' + (Q_{1j}^1(\theta) - Q_{1j}^1') \\ Q_{2j}^2'' &= Q_{2j}^2' + (Q_{2j}^3(\theta) - Q_{2j}^3') \end{aligned} \quad (9)$$

(E) $Q_{1j}^2(\theta), Q_{2j}^2(\theta)$ を次式により決める。

$$\begin{aligned} Q_{1j}^2(\theta) &= Q_{1j}^2'' + \frac{\theta}{90}(Q_{1j}^2(\theta) - Q_{1j}^2'') \\ Q_{2j}^2(\theta) &= Q_{2j}^2'' + p \frac{\theta}{90}(Q_{2j}^2(\theta) - Q_{2j}^2'') \end{aligned} \quad (10)$$

ここで、 p により、 $|Q_{2j}^2 - Q_{2j}^2'|$ を調整でき、曲げの外側の丸みを変えることができる。このように、変形処理を行ったときの形状の変化のしかたを調整するパラメータを変形パラメータと呼ぶ。なお、 $\theta > 90$ のときは、 $Q_{1j}^2(90), Q_{2j}^2(90), Q_{2j}^3(90)$ を $(\theta - 90)/2$ 回転して、その角度での位置としている。

(F) なめらかな接続の条件により、関節のまわり

の他の制御点の位置を決める。

上記の処理により、図20(a)の状態から図20(b)の状態へなめらかに変化させることができ、関節部分の自然な変形を実現している。

また、パッチの中央の制御点 Q_{22}^1, Q_{22}^2 は、パッチの接続の条件に関係していないので、自由に位置を決めることができる。そこで、この制御点を曲げの角度が大きくなるに従い、筋肉のふくらむ方向へ移動している。これにより、曲げの動きに伴う筋肉のふくらみを表現している。この移動の大きさも変形パラメータとして与える。なお、ここで、曲面の体積を一定にするように Q_{22} の位置を決めるアルゴリズムも考えられる(付録)。

肩や足の付け根などは、より複雑な変形の処理を行っているが、どの部分も基本的には、変形パラメータで90度における制御点の配置を決め、任意の角度においては、回転と内挿により制御点の位置を決めている。

指の付け根の変形は、五辺形、六辺形の曲面の形状を変形しなければならない。これらの曲面の形状は、中央の制御点の位置とそのまわりの制御点の拡がりにより決めることができる。そこで、曲げの角度90度におけるこれらの値(図14の H と S)をパラメータとして与え、任意の角度においては、これらの値を線形内挿して形状を決めている。

5.2 ねじりによる曲面の変形

ねじりによる曲面の変形は、ねじった角度に応じてパッチを分割し、制御点の組み合わせを変えることによって行っている。図21(図20(a)と同じ)でAの制御点を骨を回転軸として回転し、そのまま曲面を生成すると図22のように真ん中がくびれた不自然な形状が得られる。ねじられたパッチの両側の断面は、図23のようになっている。

パッチの回転方向のパラメータを w 、骨方向のパラメータを u とする。このとき、以下のようなアルゴリズムで、自然な形状を生成するようにしている。

(A) もとのパッチを S_1, S_2 、すべての制御点を回転

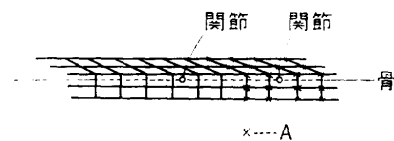


図21 骨に対する制御点の配置
Fig. 21 The arrangement of control points around bones.

したパッチを S_1', S_2' とする (図 24).
 それぞれのパッチを(11)式のパラメータ
 w_1, w_2 を使って次のように分割する.
 パッチ S_1 $w=w_2$ で S_{11} と S_{12}
 パッチ S_1' $w=w_1$ で S_{11}' と S_{12}'
 パッチ S_2 $w=w_1$ で S_{21} と S_{22}
 パッチ S_2' $w=w_2$ で S_{21}' と S_{22}'

$$w_1 = \begin{cases} \frac{\theta}{180} & (\theta \geq 0) \\ 1 - \frac{|\theta|}{180} & (\theta < 0) \end{cases} \quad \begin{matrix} \theta \text{ はねじった角度} \\ \text{(deg)} \end{matrix}$$

$$w_2 = 1 - w_1 \quad (11)$$

(B) S_{11} の左側のパッチの接続に関係した制御点と
 S_{12}' の右側のパッチの接続に関係した制御点を
 組み合わせて新しいパッチを生成する. 真ん中
 の制御点については, どちらか一方のパッチの
 のものを選ぶ. S_{12} と S_{22}' , S_{21} と S_{11}' および S_{22}
 と S_{21}' についても同様の処理を行い合計 4 枚
 の新しいパッチを生成する.

以上の処理を行うことにより, 左右両側のパッチに
 なめらかに接続された自然な形状の曲面を生成するこ
 とができる (図 25). ただし, 新しく生成されたパッ
 チどうしてもなめらかに接続されるためには, もとのパ
 チ S_1 と S_2 で, このパッチどうしの接続に関係し
 た制御点は, 接続の条件式(2)で $h=1$ でなければな
 らない.

図 18 のモデルを, 曲げとねじりの処理を用いて変
 形した例を図 26 に示す.

6. アニメーション制作手法

このモデルを使ったアニメーションの制作
 は, 図 27 のように行う.

形状データの制作では, まず, 基本形状 (ま
 ったく変形を行っていない形状) を定める. 形
 状制作の手法は, 4 章で述べた方法で, 骨格の
 形や関節のまわりの太さなどのデータを対話的
 に修正しながら希望の人体形状を作っていく.
 次に, 作られた基本形状の各部分を実際に変形
 して, 5 章で述べた変形パラメータを調整して
 筋肉のふくらみなどを変える.

動作データ, カメラワークは, 図 1 のスティ
 ックモデルを用いて, 線画のリアルタイムのアニメ
 ションを見ながら制作する. 動作データの制作では,
 キーフレーム法や歩行¹³⁾, 走行動作を関数で近似した

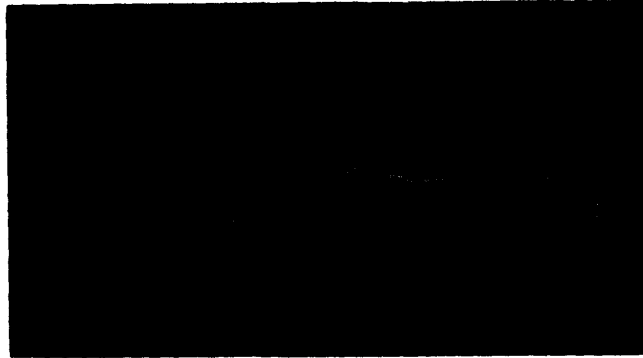


図 22 ねじられた曲面 (未処理)
 Fig. 22 Twisted surfaces (untreated).

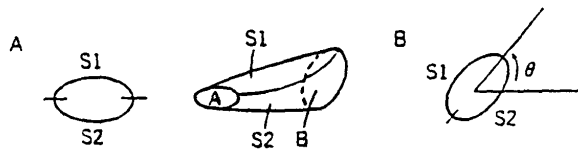


図 23 ねじられた曲面の断面
 Fig. 23 Sections of twisted surfaces.

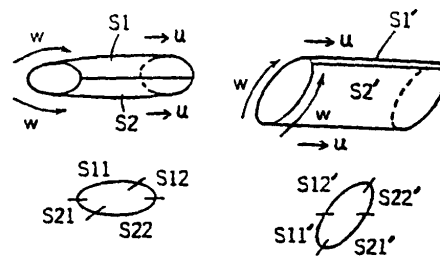


図 24 パッチの分割
 Fig. 24 The division of patches.



図 25 ねじられた曲面 (処理後)
 Fig. 25 Twisted surfaces (treated).

動作モデルを用いて, スティックフィギュアモデルを
 実際に動かしながら, 各コマにおける各関節の曲げと
 ねじりの角度を決める. カメラワークは, カメラの位

置の変化と注視点の位置の変化を空間曲線として与える。動作データとカメラワークのデータによって作られる線画のアニメーションを見ながら対話的にこれらのデータを修正する。ここで見られるアニメーションは線画ではあるが、最終的に作られるアニメーションと同じものである。

最後に、背景、光源などの環境条件を決め、画像を生成する。この画像をVTRでコマ録りしてアニメーションが完成する。

7. むすび

この人体のモデルは、形状の制作が容易であるとともに、表面のなめらかさ、関節部分の変形の自然さ、筋肉のふくらみの表現などがある程度実現している。

このモデルを用いて制作したアニメーションは、従来のロボットのものと異なり、より人間らしさを感じさせるものとなっている。さらに、リアリティを増すためには、しわなどを表現しなければならないが、マッピングの利用が考えられる。

また、ここで説明した自由曲面を用いた形状の制作、変形の手法は、人体だけでなく、動物など関節を持ったものに対して適用できる。

キャラクター・アニメーションのための形状モデルには、今後の課題として、以下のことが挙げられる。

- ①顔およびその表情の表現
- ②形状の微妙な凹凸の表現
- ③髪、皮膚などの質感の表現
- ④衣服の表現

また、動作の表現法、指定法も検討していかなければならないもう一つの大きな課題である。

謝辞 日頃ご指導いただく沓沢画像研究部長、石川主任研究員にお礼を申しあげるとともに、有益な討論をしていただいた画像研究部各位に感謝します。

参 考 文 献

1) Magnenat-Thalmann, N. and Thalmann, D.: *Computer Animation*, p. 240, Springer-Verlag,

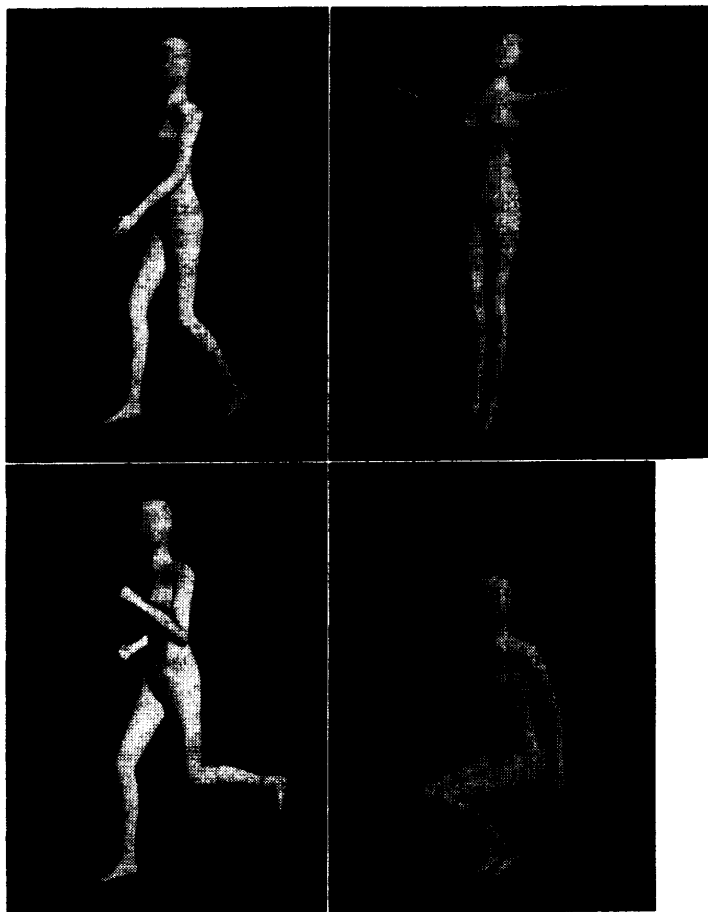


図 26 変形したモデル
Fig. 26 Transformed human surface model.

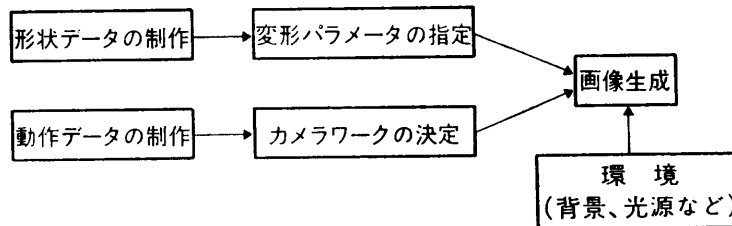


図 27 アニメーション制作手法
Fig. 27 The production procedure of animations.

Tokyo (1985).
 2) Fetter, W. A.: A Progression of Human Figures Simulated by Computer Graphics, *IEEE CG&A*, Vol. 2, No. 9, pp. 9-13 (1982).
 3) Badler, N. I., O'Rourke, J. and Toltzis, H.: A Spherical Representation of a Human Body for Visualizing Movement, *Proc. IEEE*, Vol. 67, No. 10, pp. 1397-1403 (1979).
 4) Byles, T.: Displays on Displays: Commercial Demonstrates State-of-the Art Computer Animation, *IEEE CG & A*, Vol. 5, No. 4, pp. 9-12 (1985).

- 5) Badler, N. I.: Human Body Models and Animation, *IEEE CG & A*, Vol. 2, No. 9, pp. 6-7 (1982).
- 6) Wilhelms, J.: Toward Automatic Motion Control, *IEEE CG & A*, Vol. 7, No. 4, pp. 11-22 (1987).
- 7) Herbison-Evans, D.: NUDES 2: a Numeric Utility Displaying Ellipsoid Solids, Version 2, *Proc. SIGGRAPH '78, Computer Graphics*, Vol. 12, No. 3, pp. 354-356 (1978).
- 8) Potter, T.E. and Willmert, K.D.: Three-dimensional Human Display Model, *Computer Graphics*, Vol. 9, No. 3, pp. 102-110 (1975).
- 9) 山口富士夫: 形状処理工学(II), p. 218, 日刊工業新聞社, 東京 (1982).
- 10) 穂坂, 木村: 3次元自由形状設計制御理論とその手法, *情報処理*, Vol. 21, No. 5, pp. 481-492 (1980).
- 11) 千代倉弘明: ソリッドモデリング, p. 140, 工業調査会, 東京 (1985).
- 12) Beeker, E.: Smoothing of Shapes Designed with Free-form Surfaces, *Computer-aided Design*, Vol. 18, No. 4, pp. 224-232 (1986).
- 13) 井上, 吉良, 井沢: 柔軟な歩行モデルの開発とキャラクター・アニメーション制作手法, *テレビ学技報*, IPD 90-3, Vol. 8, No. 25, pp. 13-18 (1984).

付 録

双4次 Bézier パッチは次式のようになる。

$$P(u, w) = (x, y, z) = uM_B B M_B^T w^T$$

$$u = [u^4 \ u^3 \ u^2 \ u^1 \ 1] \quad w = [w^4 \ w^3 \ w^2 \ w^1 \ 1]$$

$$B = \begin{bmatrix} Q_{00} & Q_{01} & Q_{02} & Q_{03} & Q_{04} \\ Q_{10} & Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} & Q_{14} \\ Q_{20} & Q_{21} & Q_{22} & Q_{23} & Q_{24} \\ Q_{30} & Q_{31} & Q_{32} & Q_{33} & Q_{34} \\ Q_{40} & Q_{41} & Q_{42} & Q_{43} & Q_{44} \end{bmatrix}$$

$$M_B = \begin{bmatrix} 1 & -4 & 6 & -4 & 1 \\ -4 & 12 & -12 & 4 & 0 \\ 6 & -12 & 6 & 0 & 0 \\ -4 & 4 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$Q_{ij} = (x_{ij}, y_{ij}, z_{ij})$ として,

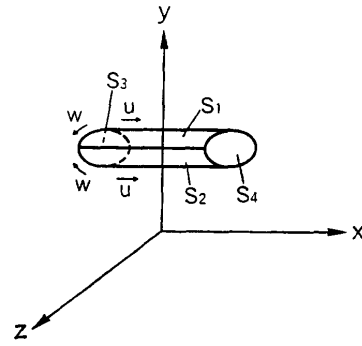
$$X = M_B B_X M_B^T \quad Y = M_B B_Y M_B^T \quad Z = M_B B_Z M_B^T$$

$$B_X = \begin{bmatrix} x_{00} \cdots x_{04} \\ \vdots \\ x_{40} \cdots x_{44} \end{bmatrix} \quad B_Y = \begin{bmatrix} y_{00} \cdots y_{04} \\ \vdots \\ y_{40} \cdots y_{44} \end{bmatrix} \quad B_Z = \begin{bmatrix} z_{00} \cdots z_{04} \\ \vdots \\ z_{40} \cdots z_{44} \end{bmatrix}$$

とおくと,

$$x = uXw^T \quad y = uYw^T \quad z = uZw^T$$

付図のように, パッチ S_1, S_2 の境界線は, z 軸に平行な平面 S_3, S_4 上にあるとする。このとき, S_1, S_2, S_3, S_4 が囲む部分の体積 V は次のように計算できる。



付図

$$V = \iiint_V dx dy dz = \iint_{S_1} z dx dy + \iint_{S_2} z dx dy$$

$$+ \iint_{S_3} z dx dy + \iint_{S_4} z dx dy$$

$$= \iint_{S_1} z dx dy + \iint_{S_2} z dx dy$$

$$\iint_{S_i} z dx dy = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 (-1)^{i+j} [u^{(i)} Y W_j Z^T$$

$$U_i X w^{(j)T} - u^{(i)} X W_j Z^T U_i Y w^{(j)T}]$$

$$u^{(1)} = w^{(1)} = [4 \ 3 \ 2 \ 1 \ 0]$$

$$u^{(2)} = w^{(2)} = [12 \ 6 \ 2 \ 0 \ 0]$$

$$u^{(3)} = w^{(3)} = [24 \ 6 \ 0 \ 0 \ 0]$$

$$u^{(4)} = w^{(4)} = [24 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

$$U_1 = W_1 = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & 1 \\ 9 & 5 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & \cdots & 1 \\ 5 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad U_2 = W_2 = \begin{bmatrix} 1 & \cdot & 1 & \cdots & 1 & \cdot & 1 \\ 9 & 10 & \cdots & 5 & 6 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \cdot & 1 & \cdots & 1 & \cdot & 1 \\ 5 & 6 & \cdots & 1 & 2 \end{bmatrix}$$

$$U_3 = W_3 = \begin{bmatrix} 1 & \cdot & 1 & \cdot & 1 & \cdots & 1 & \cdot & 1 \\ 9 & 10 & 11 & \cdots & 5 & 6 & 7 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \cdot & 1 & \cdot & 1 & \cdots & 1 & \cdot & 1 \\ 5 & 6 & 7 & \cdots & 1 & 2 & 3 \end{bmatrix}$$

$$U_4 = W_4 = \begin{bmatrix} 1 & \cdot & 1 & \cdot & 1 & \cdots & 1 & \cdot & 1 & \cdot & 1 \\ 9 & 10 & 11 & 12 & \cdots & 5 & 6 & 7 & 8 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \cdot & 1 & \cdot & 1 & \cdots & 1 & \cdot & 1 & \cdot & 1 \\ 5 & 6 & 7 & 8 & \cdots & 1 & 2 & 3 & 4 \end{bmatrix}$$

筋肉のふくらむ方向が y 軸の方向であると、体積を一定にするため, S_1 の y_{22} を変化させる。

$$B_{Y_1} = B_Y - B_{Y_1} \quad B_{Y_1} = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & y_{22} & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}$$

$$V_1 = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 (-1)^{i+j} [u^{(i)} M_B B_{Y_1} M_B^T W_j Z^T U_i X w^{(j)T} - u^{(i)} X W_j Z^T U_i M_B B_{Y_1} M_B^T w^{(j)T}]$$

とおき、一定とすべき体積を V_0 とする。このとき、次式により、 y_{22} の値を求めれば、体積が一定になるように曲面をふくらませていることになる。

$$y_{22} = \frac{V_0 - \iint_{S_2} z \, dx \, dy - V_1}{\sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 (-1)^{i+j} [a_2^i b_2^{j'} - c_2^{i'} d_2^j]}$$

ただし、

$$\mathbf{u}^{(i)} M_B = [a_0^i \ a_1^i \ a_2^i \ a_3^i \ a_4^i]$$

$$M_B^T W_j Z^T U_i X \mathbf{w}^{(j)T} = [b_0^{i'} \ b_1^{i'} \ b_2^{i'} \ b_3^{i'} \ b_4^{i'}]^T$$

$$\mathbf{u}^{(i)} X W_j Z^T U_i M_B = [c_0^{i'} \ c_1^{i'} \ c_2^{i'} \ c_3^{i'} \ c_4^{i'}]$$

$$M_B^T \mathbf{w}^{(j)T} = [d_0^j \ d_1^j \ d_2^j \ d_3^j \ d_4^j]^T$$

(昭和62年6月18日受付)

(昭和62年11月11日採録)



小松 功児 (正会員)

昭和34年生。昭和56年東京大学工学部電子工学科卒業。同年NHKに入局。昭和59年より放送技術研究所画像研究部に勤務し、現在に至る。コンピュータ・アニメーションの研究に従事。電子情報通信学会、テレビジョン学会各会員。