

ボロノイ分割を利用した 生体皮膚の質感表現

石井智海*、倉知忠彦**、安田孝美**、横井茂樹**、鳥脇純一郎**

* 花王(株) 文理科学研究所

** 名古屋大学工学部 情報工学科

本論文では、コンピュータグラフィックスにおける皮膚の質感表現について述べる。今回は特に、皮膚の表面形状に注目し、その幾何学的特徴である皮野・皮溝及びその集合体についてモデル化を行なった。モデルの実現にあたっては、表面を皮野に分割する処理においてボロノイ分割手法を用い、皮野の断面形状の表現にベジェ曲線を用いた。

Rendering the surface of skin
using Voronoi-division

Tomomi ISHII^{*}, Tadahiko KURACHI^{**}, Takami YASUDA^{**}, Shigeki YOKOI^{**},
and Jun-ichiro TORIWAKI^{**}

* KAO Institute for Knowledge & Intelligence Science, KAO Corp.

** Dept of Information Engineering, Nagoya University

This paper describes a shading model for human skin in computer graphics. Human skin surface has geometrical features such as furrows and ridges. We have established and implemented a numerical model for the furrow, the ridge, and even their aggregation on a computer. In our model, Voronoi-division-method is used to make the skin surface have naturally looked ridges, and Bezier-curve is applied in order to represent the vertical section of a ridge.

0. はじめに

コンピュータグラフィックス (CG) による人体表現に関する研究が盛んである。それらは、体の形状や運動¹⁾、毛髪表現および動き²⁾、顔の表情や口の動き³⁾、さらにメイクアップシミュレーション⁴⁾や手術シミュレーション⁵⁾など多岐に渡っている。筆者らのグループでも頭蓋形成手術シミュレーションをはじめとして様々な手術シミュレーションの研究を行っている。この際、患者に安心感を与える意味で、手術後の術部の皮膚状態まで含んだシミュレーション画像は有用である。また、CGにより人体表示のリアリティを追求する上でも、皮膚の表現は必要不可欠な要素となるであろう。こうした必要性をふまえて、筆者を含む研究グループは皮膚の表現について研究を行っている。

これまで皮膚の表現については、皮膚の実画像に対して2次元FFTを施し周波数領域で操作を加えた後にテクスチャーを得るという方法が報告されている⁶⁾。

これに対し今回筆者らは、皮膚の内部については考えずに皮膚表面の幾何形状に着目し、この幾何形状をモデル化することにより皮膚表面の表現を行ったので報告する。以下、1章ではモデルを実現する上で重要な手法となったポロノイ分割手法について簡単に述べる。2章では皮膚表面の構造について述べる。3章では2章の内容に基づいた皮膚表面幾何形状のモデルを提案する。4章ではコンピュータ上でのモデルの実現例を示し、5章でこの実現例でのCGの表現力を示した後、皮膚の表示を行う。

1. ポロノイ分割によるテクスチャーの生成

ポロノイ分割とは、ある平面上に有限個の点が与えられたとき、最近傍則によってこの平面を排斥な多角形群に分割する手法である。この手法は様々な分野で利用され、生態学・地理情報処理学の分野ではポロノイ分割後の多角形群のパターンを勢力圏として応用されている⁷⁾。画像処理の分野ではテクスチャー解析などに応用されている⁸⁾。

形態学ではホ乳類の細胞の動きや樹木の成長を表現するのに利用されている^{9)・10)}。

CGでの応用を考えてみると、表面が排斥な小領域の集合で構成されているテクスチャーの生成にポロノイ分割は有効であると考えられる。生成される多角形群に対しては、分割の際最初に与える点群の位置を制御することにより、いろいろなパターンに変形することが可能である(図1)。また、擬似フラクタル図形で用いられる中点変位法を用いて多角形に揺らぎを加え、直線部分を排除することも可能である。こうして作成された多角形群のデータをもとに2次元テクスチャーの作成は容易に行え、さらに高さ情報或いは法線情報を何らかの方法で付与することにより3次元の或いは擬似3次元のテクスチャー表現も可能である(図2)。皮膚表面の幾何形状も、2次元的に眺めると、基本的に小領域の集合であると考えられポロノイ分割の適用が期待される。

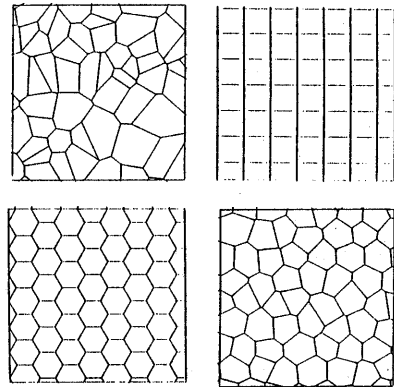


図1 様々なパターン

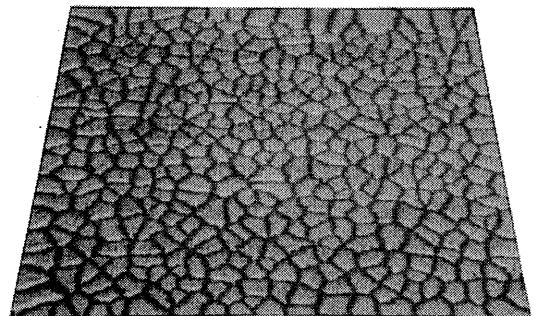


図2 法線情報付加によるシェーディング

2. 皮膚表面の外観について

皮膚表面で観察される要素としては、皮溝・皮野・毛口・汗口の4つがある。皮溝は皮膚の表面を網目状に走る細い溝である。皮野は皮溝に囲まれた様々な形の領域である。毛口は皮溝と皮溝が交差するところにある穴で、ここから毛がのびてくる。汗口は皮野の中心に1個ずつ開いている穴で、ここから汗が出る¹¹⁾。これら4つの構成要素のうち、毛口や汗口に比べ皮溝と皮野の2つがその幾何形状により、皮膚表面の見え方に大きな役割を果たしていると考えられる。また、皮溝・皮野は、単体として皮膚表面の見え方に影響を与えているばかりでなく、集合体としても見え方の特徴を与えていると考えられる。特徴の一つは方向性である。手首回りで顕著であるように、場所によって皮溝・皮野はある方向に強い指向性を持っていることが観察できる。もう一つの特徴は階層性である。一つの皮野の中には複数の小さな皮野が存在することが観察できる。この仕組みの繰り返により皮膚表面上の皮野の間には階層構造が存在すると考えられる。

3. 皮膚表面のモデル化

皮膚表面の構成要素としての皮溝・皮野およびそれらの集合体が有する特徴である方向性と階層性を考慮して皮膚表面のモデル化を行う。尚、皮野を立体としてモデル化することで皮溝のモデル化も同時に行われる。

3.1 皮野(単体)

底面が xy 平面上の多角形であり(以後この多角形を底面多角形と呼ぶ)、底面多角形の辺から中心点(たとえば重心点)に向かって z 値が増してゆく立体形状を皮野とする。高さの増加していく割合はなんらかの関数で表す。

3.2 方向性

底面多角形の中心点を通る直線と、この直線と交差する2辺の交点間距離をすべての皮野の底面多角形について求め、その合計距離が最大となる直線の方に皮膚は方向性を持つとする。

3.3 階層性

ある皮野の底面多角形の内に小さな多角形が複数存在し、これらがこの皮野の内に存在する小皮野の底面多角形であるとする。この構造をすべての皮野について階層のレベル数だけ繰り返す。平面上のある一点での高さ及び法線ベクトルは、その一点の位置座標を底面多角形内に含む皮野における高さ、法線ベクトルを各階層レベルで求め、それらを合成したものである。

4. モデルの実現例

皮膚表面のモデル化に基づき、皮野・方向性・階層性を計算機上に実現した例を示す。

4.1 皮野

皮野については、底面多角形を平面形状として、また、底面多角形の中心点を通る縦切断面の形状を断面形状として2つに分けて実現した。

・平面形状

平面形状の実現には、2次元平面上のポロノイ分割手法を用いる。ポロノイ分割により2次元平面は複数の多角形に分割される。これら多角形の1つ1つが皮野の底面多角形を表す。ただしポロノイ分割によって発生する多角形は、辺の数が3~8位の多角形でありその直線性が際だってしまう。そこで、実際の皮野に存在する平面形状としての微妙な揺らぎを実現するため、擬似フラクタル図形で用いられる中点変位法を用いて多角形に揺らぎを加える(図3)。分割の際の点の与え方や中点変位の揺れ幅を変えることにより様々な平面形状が表現可能である。

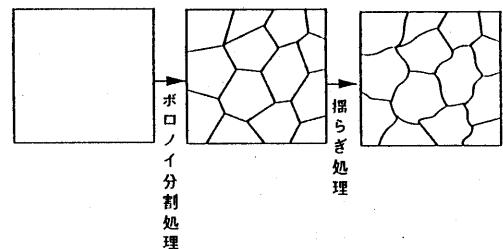


図3 ポロノイ分割処理と揺らぎ処理

・断面形状

断面形状の実現には形状を表す関数として3次のベジェ曲線を用いる。今、平面形状の多角形がxy平面上にあるとしたとき、多角形内の一点 $p_1(x_1, y_1)$ における皮野表面までの高さ z_1 及び皮野表面上の点 $q_1(x_1, y_1, z_1)$ における法線ベクトル \vec{N}_1 を3次のベジェ曲線を用いて求める(図4)。

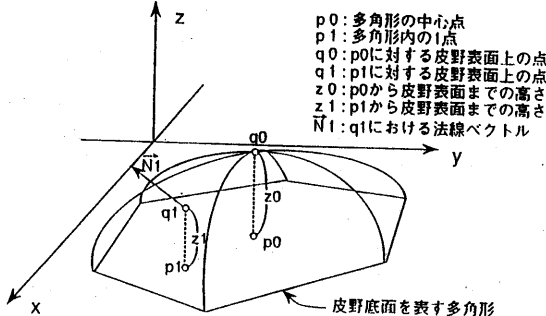


図4 皮野を表す立体イメージ

まず、点 p_0 から点 p_1 の方向をx軸、点 p_0 から点 q_0 の方向をz軸、右手系でx軸とz軸に垂直な方向をy軸とする多角形中心のボディー座標系を考える(図5)。そしてx軸を横軸、z軸を縦軸として、3次のベジェ曲線の4つの制御点を設定し断面形状関数として定義する(図6)。このとき点 p_1' における皮野表面までの高さ z_1 は、x値を点 p_1' のx成分値 $p_1'.x$ としたときのz値であり、ベジェ曲線の4つの制御点と $p_1'.x, z_1$ の値から求めることができる。 $(p_1'.x, z_1)$ における傾き s も同様に求めることができる。この傾き s と点 p_0 から点 p_1 に向かう単位方向ベクトルから、点 q_1 における法線ベクトル \vec{N}_1 が定まる(図7)。

ベジェ曲線の制御点の選び方を変えたり、複数のベジェ曲線で断面形状を定義したりすることにより、同一の底面多角形に対して様々な皮野立体を表現することが可能である。

4.2 方向性

皮野の底面を表す多角形の頂点座標を特定の方向にだけ1.0以上のスケールを施すことにより、方向性を実現する。

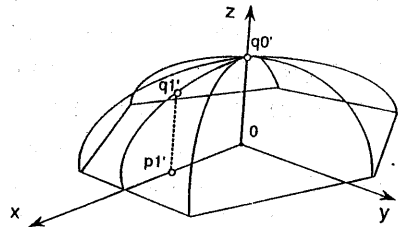


図5 ボディー座標系での皮野立体

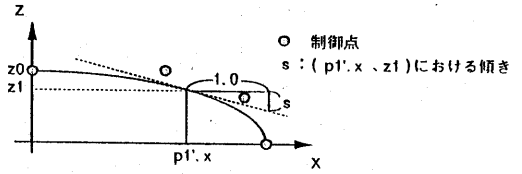


図6 断面形状のベジェ曲線による表現

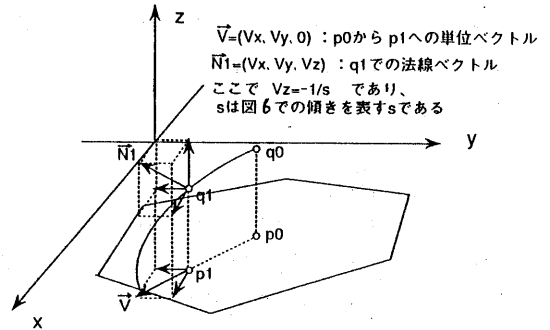


図7 皮野表面での法線ベクトル

4.3 階層性

皮野と同様に階層性でも平面形状と断面形状の2つに分けて考える。

・平面形状について

皮野の平面形状を表す底面多角形の内部において、更にボロノイ分割処理と揺らぎ処理を行う。そして、新しく生成された底面多角形群1つ1つについても同様の処理を行う。この処理をすべての底面多角形について指定した階層レベル数まで再帰的に繰り返す(図8)。この際、第n階層の底面多角形と第n+1階層の底面多角形との間の親子関係の情報を保持しておく(図9)。

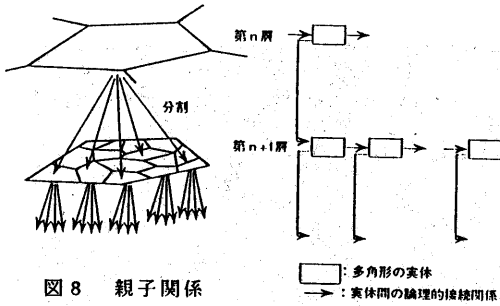


図8 親子関係

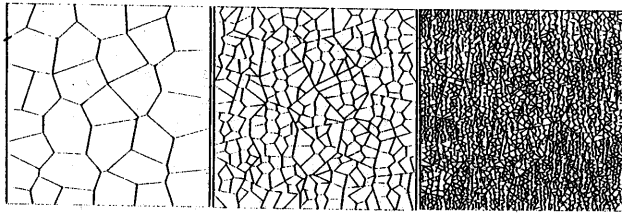


図9 階層レベルの違いによる底面多角形表示

・断面形状について

平面上のある点における高さ及び法線ベクトルを求めることを考える。まず、平面上の指定した点を内部に含む多角形を各階層レベル毎に求める。この時、平面形状の処理の際つくられた階層の異なる底面多角形間の親子関係を利用して、上位の階層から下位の階層にむけて探索する。そして、4.1節で皮野の断面形状を求めた方法でそれら多角形での各点における高さ及び単位法線ベクトルをそれぞれ求める。こうして求めた各多角形での高さ及び法線ベクトルの和を指定した点における求めるべき高さ及び法線ベクトルとする。(図10)

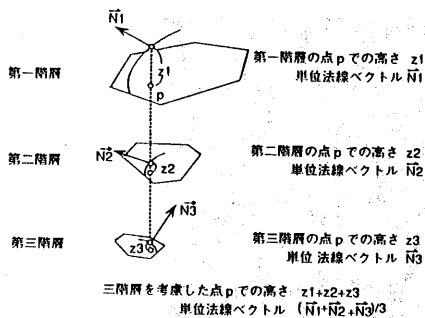


図10 階層を考慮した高さ・法線ベクトル計算

5. CG表示例

各種パラメータを変化させた時の見え方の変化を示した後、これらパラメータを組み合わせて得られた皮膚の表示例を示す。今回の表示はシェーディングの際に高さは考えず法線ベクトルのみを考慮したバンプマッピングを用いた。(2)

5.1 断面形状の変化

・ベジェ曲線の制御点移動による変化

ベジェ曲線の制御点を変化させてなだらかな断面や急な断面を表現したり、ベジェ曲線を2つ用いて微分不連続な断面等を表現する(図11)。

・ベジェ曲線の拡大による変化

底面多角形の頂点から離れるに従ってベジェ曲線を連続的にx軸方向に拡大することにより丸みを帯びた陰影を表現する(図12, 図13)。

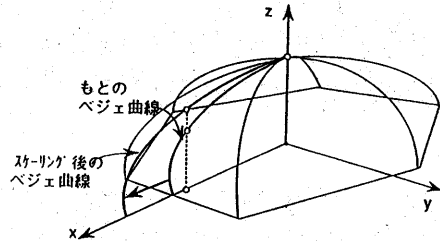


図12 ベジェ曲線の拡大

5.2 平面形状の変化

・分割の中心点の分布の変化

ポロノイ分割の際、中心となる点を三角格子状に配置しこれらを一様乱数により位置を変化させた(図14)。

・揺らぎによる変化

中点変位法により、ポロノイ分割により生成された多角形の辺に揺らぎを加えた(図15)。

5.3 階層性の変化

階層のレベルを1から3まで変化させた(図16)。

5.4 方向性の変化

縦方向、横方向に方向性をもたせた(図17)。

5.5 皮膚の表示について

以上の4つのパラメータを用いて、皮膚の表示を行った(図18)。(a)は、階層を3レベルにし方向性はないものとして、他の断面形状・平面形

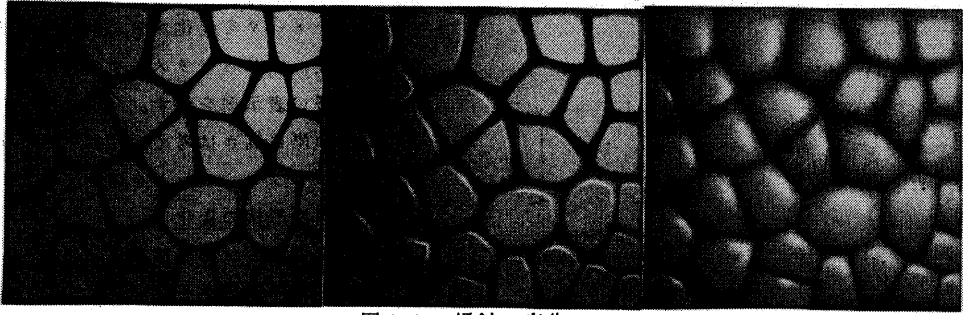


図 1 1 傾斜の変化

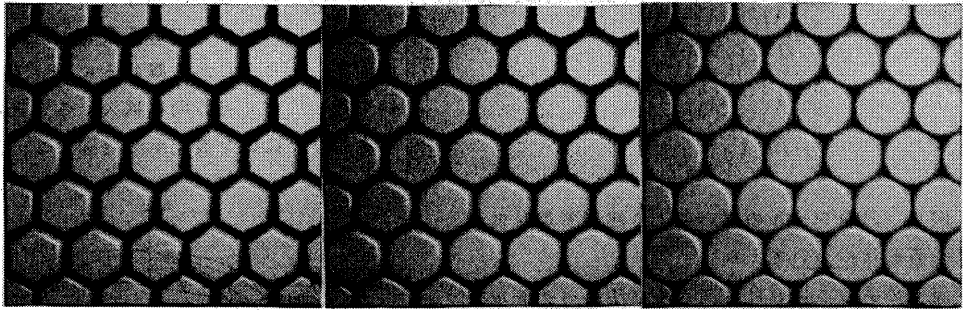


図 1 3 丸みの変化

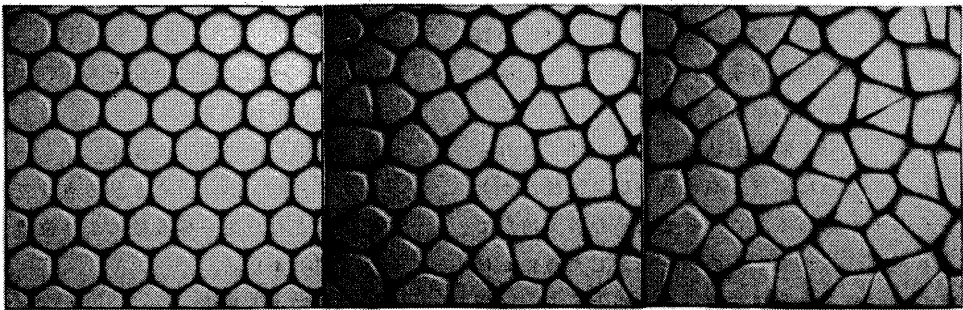


図 1 4 中心点分布の変化

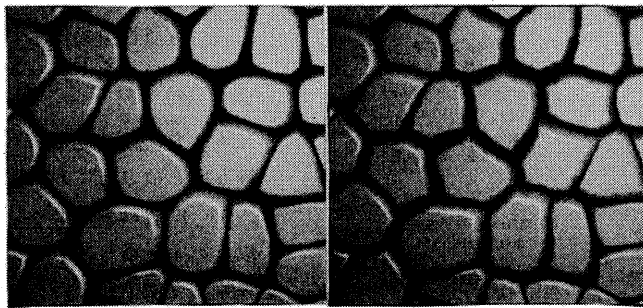


図 1 5 揺らぎの変化

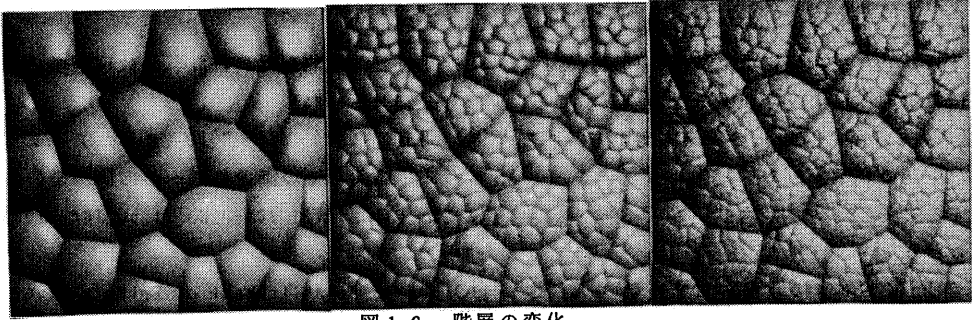


図 1 6 階層の変化

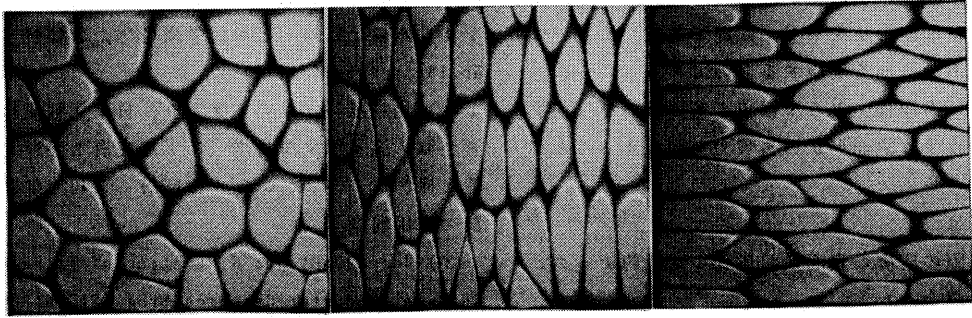
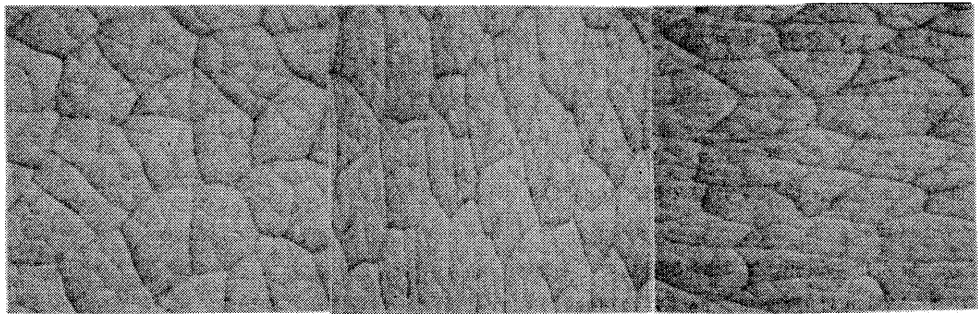


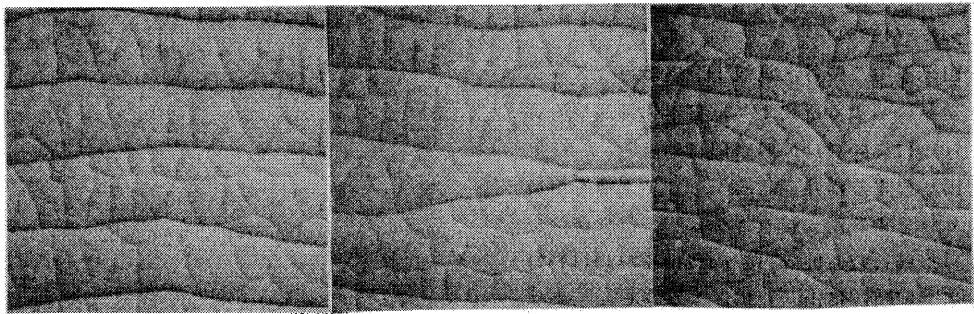
図 1 7 方向性の変化



(a)

(b)

(c)



(d)

(e)

(f)

図 1 8 皮膚の表示例

状のパラメータを適当に設定した場合の表示である。(b),(c)は,(a)を縦方向・横方向にそれぞれ方向性を持たせた場合の表示である。(d),(e)は横方向に特徴的な皮溝が存在する場合の表示である。(f)は第一階層の皮野にのみ横方向の方向性を持たせた場合の表示である。

6. おわりに

本文では、CGによる皮膚の質感表現の一手法について述べた。これは皮膚の表面幾何形状に着目したもので、表面の平面形状をボロノイ分割で生成し縦断面形状をベジェ曲線で生成することにより皮膚の表面を実現するものである。さらに、階層性・方向性・丸み・揺らぎ等の機能を付加することにより表面形状の表現力を向上することが可能である。

今後は、

- 1) 実際の皮膚の表面幾何形状の定量的データとの照合
- 2) ボロノイ分割により生成される形状の制御
- 3) 部位によって異なる皮膚表面の実現について検討していく予定である。

<参考文献>

- 1) 小松：“キャラクタアニメーションのための人体の曲面モデル”，情処学会論文誌，Vol.29，No.1，pp.7-19(1988)
- 2) 渡辺，末永：“逆光下における頭髮のアニメーション”，NICOGAPH論文集，pp.69-77(1989)
- 3) 小松：“キャラクタアニメーションのための顔の曲面モデル”，情処学会グラフィックスとCAD研究会，31-5，pp.1-8(1988)
- 4) 石田，篠田，柴谷，湯浅：“皮膚色とメイクアップ効果に関する研究2”，日本化粧品技術者会誌，Vol.118，No.2，pp.91-95(1984)
- 5) 安田，橋本，横井，鳥脇：“CT画像を用いた形成外科手術計画支援システム”，信学会論文誌(D)，Vol.J70-D，No.11，pp.2134-2140(1987)
- 6) 長沼，岡田，横山，北川：“コンピュータグラフィックスにおける人体皮膚の表示について”，

情処学会36回全国大会論文誌，1Z-6，pp.2079-2080(1988)

7) 種村：“空間配置の統計”，数理科学，No.246，pp.25-32(1983)

8) 間瀬，鳥脇，福村：“拡張されたデジタルボロノイ線図とその画像処理への応用”，信学会論文誌(D)，Vol.J64-D，No.11，pp.1029-1036(1981)

9) Honda：“Establishment of Epidermal Cell Columns in Mammalian Skin:Computer Simulation”，J.theor.Biol.81，pp.745-759(1979)

10) 本多：“樹木の幾何学模型”，数理科学，No.184，pp.18-25(1978)

11) 化粧品科学ガイドブック 日本化粧品技術者会編 第4編皮膚科学 第1章皮膚と毛髪 構造と機能 1.2目にみえる皮膚 東邦大学医学部 安田利顕

12) James F.Blinn：“Simulation of Wrinkled Surface”，Computer Graphics(Proc. SIGGRAPH 78)，Vol.12，No.3，pp.286-292(1978)