

表面の微細形状に注目した皮膚の質感表現の一手法[†]

石井 智海^{††} 安田 孝美^{†††}
横井 茂樹^{†††} 鳥脇 純一郎^{†††}

コンピュータグラフィックスによる皮膚の質感表現は、人体表現のリアリティの実現および手術シミュレーション等への応用といった点から重要であると考えられている。しかしこれまでのところ皮膚の質感を実現する有効な手法は確立されておらず、実写の皮膚画像をテクスチャマッピングするといった簡略的な方法で代用されている。これに対し筆者らは、皮膚の表面形状に注目しその幾何学的特徴である皮野・皮溝およびその集合体についてモデル化を行い、皮膚の質感を実現した。本論文では、皮野・皮溝およびその集合体の性質である階層性・方向性についてのモデル化およびモデルの実現法について述べた後、皮膚の表示例を示す。モデルの実現にあたっては、表面形状を平面形状と断面形状に分けて考え、平面形状生成には計算幾何学におけるボロノイ分割手法を用い、断面形状生成にはベジェ曲線を用いた。また、各種パラメータを設定することにより、形状をさまざまに変化させることが可能であることも確認した。

1. 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。本研究はこうした必要性をふまえて行われたものである。

これまで CG による皮膚の表現についてはほとんど報告がなく、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を得るという方法が報告されているのみである⁶⁾。しかし、この方法では実画像を用いているため皮膚の表現に対する基本的な構造のモデルとなっておらず、便宜的な表現方法にすぎない。

これに対し今回筆者らは、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、2章ではモデルを実現する上で重要なツールとなったボロノイ分割手法について簡単に述べる。3章では皮膚表面モデルの考え方について述べる。4章では導いたモデルに基づく画像生成手順とパラメータの設定方法について述べ、5章で画像生成例を示す。

2. ボロノイ分割によるテクスチャの生成

ボロノイ分割とは、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反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ボロノイ分割後の多角形群のパターンが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)}。

ボロノイ分割はその特徴を考慮すると、CG においては、表面が排反な小領域の集合で構成されているテクスチャの生成に有効であると考えられる。しかしながら CG による皮膚のテクスチャ生成に应用することを考えるとそのままの形では利用できず、テクスチャ生成において工夫が必要である。

すなわち、

(1) 生成したいテクスチャ形状を表現するパターン生成: これはボロノイ分割の際に最初に与える点群の位置を変化させることによりある程度制御可能である (図 1)。

(2) 生成した多角形は直線で構成されているため、自然のテクスチャ表現にはこの線図形に揺らぎを与える必要がある。: これは擬似フラクタル図形生成

[†] Human Skin Rendering Based on the Surface Microstructures by TOMOMI ISHII (Kao Institute for Knowledge and Intelligence Science, Kao Corporation), TAKAMI YASUDA, SHIGEKI YOKOI and JUN-ICHIRO TORIWAKI (Department of Information Engineering, Faculty of Engineering, Nagoya University).

^{††} 花王(株)文理科学研究所

^{†††} 名古屋大学工学部情報工学科

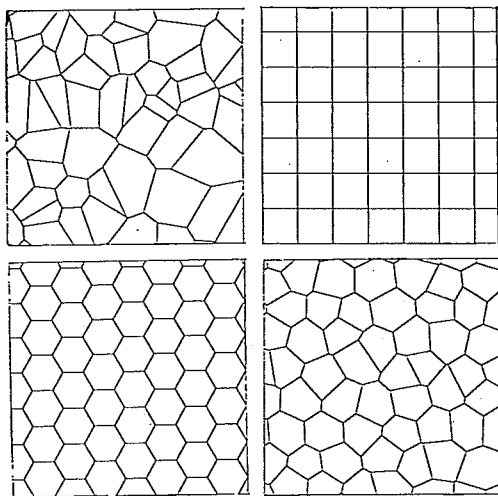


図1 ボロノイ分割による様々なパターン
Fig. 1 Various patterns by Voronoi-division.

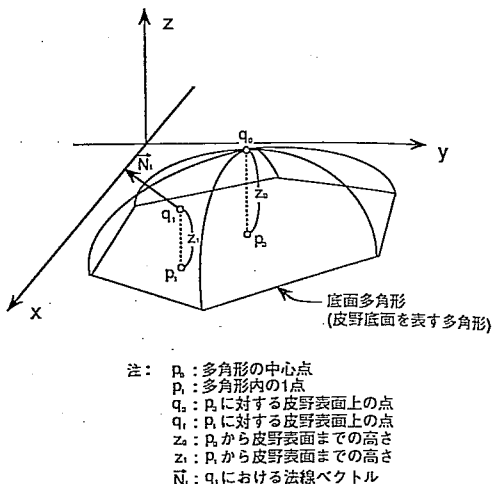
に用いられる中点変位法¹⁴⁾を用いて生成できる。

(3) 皮膚の形状はテクスチャの各図形内部が自然な盛り上がりを持った3次元的形状を持つため、この表現が必要である。この効果は線図形からの距離に応じて表面の法線を変化させることによって表現可能である(図2)。

3. 皮膚表面の形状モデル

3.1 皮膚表面の外観の特徴

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^{14,15)}。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1つは方向性である。手首の周辺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1つの特徴は階層性である。1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し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。



- 注: p_i : 多角形の中心点
 p_i : 多角形内の1点
 q_i : p_i に対する皮野表面上の点
 q_i : p_i に対する皮野表面上の点
 z_i : p_i から皮野表面までの高さ
 z_i : p_i から皮野表面までの高さ
 N_i : q_i における法線ベクトル

図3 皮野を表すモデルの具体化
Fig. 3 Modeling of three dimensional form of a ridge.

3.2 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。なお、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。

3.2.1 皮野のモデル

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)に向かって高さ(z 値)が増してゆく立体形状を皮野のモデルとして考える(図3)。このモデルの具体的実現を、底面多角形を定める平面形状および底面多角形の中心点を通る縦切断面の形状を定める断面形状の2つに分けて行う。

(1) 平面形状

平面形状の実現には、2次元平面上のボロノイ分割手法を用いる。ボロノイ分割により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。ただしボロノイ分割によって

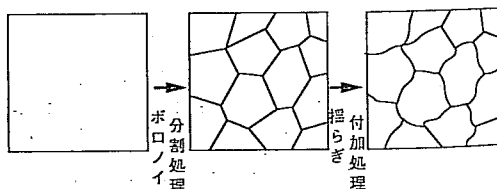


図4 ボロノイ分割処理と揺らぎ付加処理
Fig. 4 Voronoi-division and perturbation.

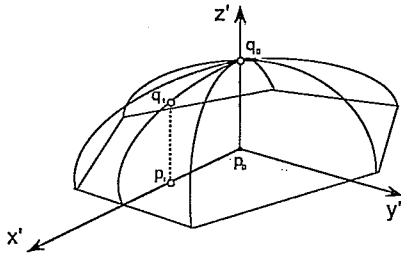


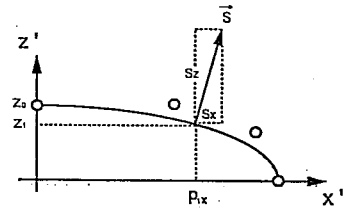
図 5 ボディ座標系での皮野立体のモデル
Fig. 5 Body coordinate expression for a ridge.

発生する多角形は、辺の数が3~8位の多角形でありそのままでは直線性が際だって自然さが表現されない。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の生成において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4)。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。

(2) 断面形状

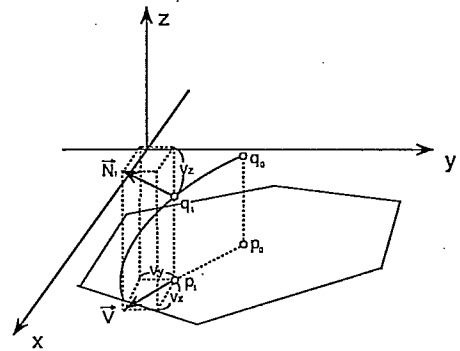
皮野モデルの断面形状は、以下のように、断面形状を表す関数として3次のベジェ曲線を用いて定める。今、平面形状の底面多角形を xy 平面上にとり、多角形内の一点 $p_1(x_1, y_1, 0)$ における皮野表面上の点 q_1 までの高さ z_1 と、皮野表面上の点 $q_1(x_1, y_1, z_1)$ における法線ベクトル \vec{N}_1 を求める(図3)。ここで、底面多角形の中心点 p_0 を原点とし、点 p_0 から点 p_1 の方向に x' 軸、多角形面に垂直に z' 軸をとる(これをボディ座標系と呼ぶ)(図5)。そして $x'z'$ 平面上に4個の制御点を設定して3次のベジェ曲線を定め、これを $x'z'$ 平面上での断面形状関数と定義する(図6)。図6での点 p_1 におけるベジェ曲線の値を p_1 における皮膚表面までの高さ z_1 とする。また点 p_1 における $x'z'$ 平面内でのベジェ曲線の法線ベクトル \vec{S} を、 p_1 での皮膚表面の法線ベクトル \vec{N}_1 とする(図7)。以上より、モデル化された表面形状を表示する場合に必要とされる、底面多角形内の任意の点における皮野表面までの高さおよび表面での法線ベクトルが求められる。

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



注1: O: 制御点
 $\vec{S}=(S_x, S_z)$: 点 (P_x, Z_1) における単位法線ベクトル
注2: P_x は点 P_1 の x 座標値

図 6 ベジェ曲線による断面形状の表現
Fig. 6 Vertical section represented by the Bézier curve.



注1: $\vec{V}=(V_x, V_y, 0)$: p_0 から p_1 方向のベクトル
 $\vec{N}_1=(N_x, N_y, N_z)$: q_1 での法線ベクトル
注2: 図6の S_x, S_z に対して $V_x^2 + V_y^2 = S_x^2, V_z = S_z$ が成り立つ。

図 7 皮野表面での法線ベクトル
Fig. 7 Normal vector on the ridge's surface.

対して様々な皮野立体を表現することが可能である。

3.2.2 方向性の表現

皮野の底面多角形の頂点座標を特定方向に伸縮させる変換を行うことにより、方向性を実現する。

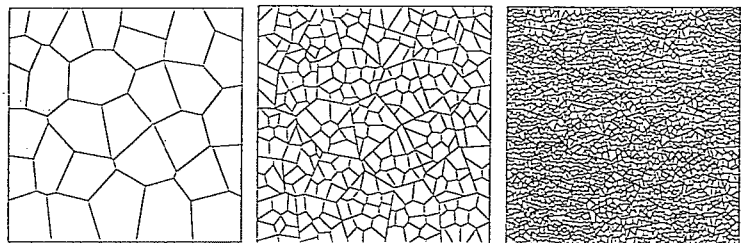


図 8 異なる階層レベルをもつ底面多角形表示
Fig. 8 Base polygons with different hierarchical levels.

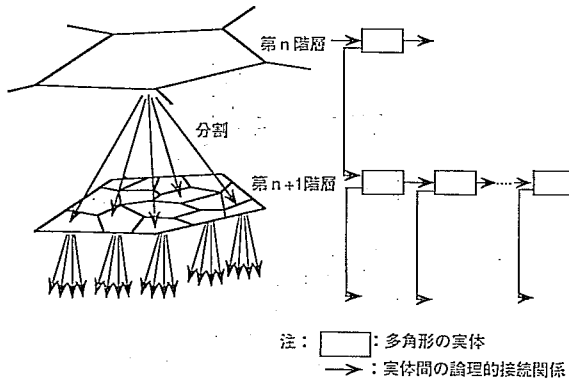
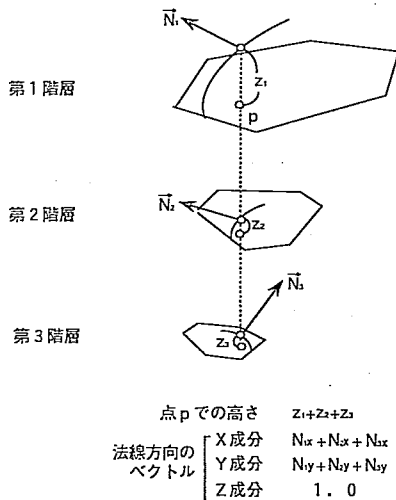


図9 皮野モデルの底面多角形における親子関係の記憶
Fig. 9 Store of parent-children relation among base polygons.

3.2.3 階層性の表現

ある皮野の底面多角形の内部に小さな多角形を複数生成し、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および法線ベクトルは、その点を底面多角形内に含む皮野における高さおよび法線ベクトルを各階



注1: $\vec{N}_1, \vec{N}_2, \vec{N}_3$ は法線方向のベクトルで、z成分が1.0に正規化されているもの
注2: N_{ix} はベクトル \vec{N}_i のx成分の値 (他の類似形も同様)

図10 階層を考慮した高さ・法線ベクトル計算 (階層数が3の場合)
Fig. 10 Calculation of height and normal vector considering hierarchical levels (in the case that the number of hierarchical levels is three).

層レベルで求め、それらを合成したものとす。皮野と同様に階層性表現においても平面形状と断面形状の2つに分けて考える。

(1) 平面形状

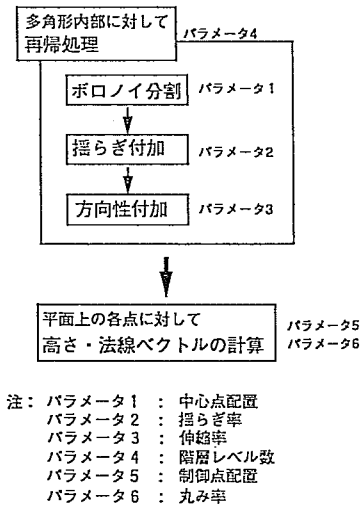
皮野の平面形状を表す底面多角形の内部において、さらにポロノイ分割処理と揺らぎ処理を行う。そして、新しく生成された底面多角形群1つ1つについても同様の処理を行う。この処理をすべての底面多角形について指定した階層レベル数まで再帰的に繰り返す (図8)。この際、第n階層の底面多角形と第n+1階層の底面多角形との間の親子関係の情報を保持しておく (図9)。

(2) 断面形状

階層性を考慮した上で、底面多角形内の任意の点における表面までの高さおよび表面での法線ベクトルを求めなければならない。これは以下のようにして行われる。まず、平面上の指定した点を内部に含む底面多角形を各階層レベルごとに求める。次に3.2.1項の方法で、各階層ごとに皮野の断面形状を定め、指定した点における各階層レベルでの高さの総和に等しい高さを持つ表面を皮野表面とする。この表面での法線ベクトルは、各階層レベルでの対応する点の法線ベクトルから容易に計算できる (図10)。

4. 処理の流れとパラメータ設定

この章では、前章の皮膚モデルに基づく画像生成手



注: パラメータ1 : 中心点配置
パラメータ2 : 揺らぎ率
パラメータ3 : 伸縮率
パラメータ4 : 階層レベル数
パラメータ5 : 制御点配置
パラメータ6 : 丸み率

図11 処理の流れとパラメータ
Fig. 11 Processing flow and parameters.

順の流れとパラメータの設定方法について述べる (図 11).

4.1 処理の流れ

まず、2次元平面上の多角形の内部に設定された複数の点を基にボロノイ分割処理が行われる。そしてこの処理により生成された底面多角形群について、各多角形の辺の線図形に対する揺らぎ付加処理が施される。次いで底面多角形に対して方向性に基づく伸縮変換が与えられる。これら一連の処理過程は、それぞれの階層レベルにおける底面多角形に対して再帰的に適用される。階層レベル数に等しい回数の再帰処理が終了した後に、底面多角形間の親子関係 (図 9) を利用して平面上の各点における皮野表面までの高さおよび表面での法線ベクトルが計算される。

4.2 パラメータ設定

本モデルに基づいて具体的に画像を生成する際には、以下のような 6 種類のパラメータを設定する (図 11).

(1) パラメータ 1: 中心点配置

ボロノイ分割の際に中心となる点の配置について以下に示す 3 種類の項目を用意する。

① 基本配置

三角格子配置, 正方格子配置, 一様乱数配置のいずれかを指定する。

② 配置変動

三角格子および正方格子配置の際には, 基本配置の変動として一様乱数変動, 正規乱数変動のいずれかを指定する。

③ 変動率

配置変動の際の最大変動の大きさを格子間距離に対する割合すなわち変動率として指定する。

(2) パラメータ 2: 揺らぎ率

多角形の辺に揺らぎを付加する際の中点変位法による揺らぎの変位量 V を次式の形で表す。

$$V = A \cdot 2^{-n \cdot h} \cdot \text{Rnd} \cdot L$$

ただし, A : 変位量の増幅率 (=揺らぎ率)

Rnd : 平均 0, 分散 1 の正規乱数

L : 辺の長さ

n : 分割レベル

h : n の増加に伴う変位の減衰率

上式において変位量の増幅率 A を揺らぎ率として指定する。

(3) パラメータ 3: 伸縮率

多角形に方向性を持たせるための頂点座標の伸縮変

換は次式で与えられる。

$$x' = Sx \cdot x$$

$$y' = Sy \cdot y$$

ただし, (x, y) は元の頂点座標, (x', y') は伸縮後の頂点座標である。ここで (Sx, Sy) を伸縮率として指定する。

(4) パラメータ 4: 階層レベル数

生成するテクスチャの階層数 (再帰処理における繰返し回数) を階層のレベル数として指定する。

(5) パラメータ 5: 制御点配置

皮野の断面形状を表すベジェ曲線の制御点配置は, 各階層に対して, 次の 2 つの項目により指定される。

① セグメント数

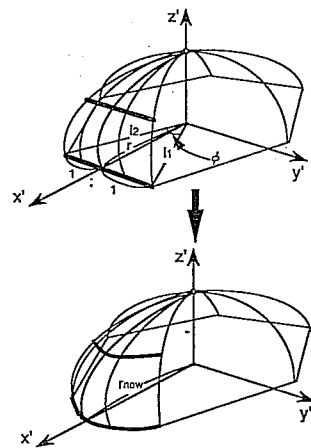
断面形状を表すために使用するベジェ曲線のセグメント数を指定する。

② 各セグメントに対する制御点座標

各セグメントに対して 4 つの制御点座標を指定する。

(6) パラメータ 6: 丸み率

底面多角形の辺の中心にいくに従い, 断面形状を表すベジェ曲線の制御点の位置を円弧状に変化させると, 皮野陰影の丸み (直線的に, 皮野表面を表す曲面の等高線の形) を変化させることができる (図 12)。



$$r_{now} = r + p \cdot (s-r) \cdot A(\phi)$$

$$s = (l_1 + l_2) / 2$$

$$A(\phi) = \begin{cases} 1 & (0 \leq \phi \leq \pi/2) \\ \sqrt{2} \cdot \cos(\phi/2) & (\pi/2 < \phi \leq \pi) \end{cases}$$

p : 丸み率

図 12 ベジェ曲線の制御点の変化による曲面の変形
Fig. 12 Deformation of surface by changing the control points' positions of the Bézier curve.

制御点座標を変化させる割合を丸み率とよぶ。

5. 表示結果

本章では、上記6種類のパラメータを変化させたときの見え方の変化の例を示した後、皮膚の表示例を示し、最後に計算時間について述べる。今回の表示は厳密な表面形状を生成することは行わず、立体的表面形状を仮定した法線ベクトルを計算し、陰影値を求めるバンパマッピング¹³⁾の手法を用いている。

画像サイズは縦横ともに400画素であり、1画素あたりR, G, B各8ビットが割り当てられている。計算機はシリコングラフィックス社製IRIS 4D/60Gを使用し、プログラム言語はC言語を使用した。

5.1 断面形状に関するパラメータの変化

5.1.1 制御点配置の変化

ベジェ曲線の制御点配置を変化させることにより、様々な断面形状を表現することができる。例として傾斜の変化の効果を示す画像を図13に、そのときのパラメータ値を表1(図番号: 図13)に示す。図13(a)はベジェ曲線セグメントを2つ用いて微係数が不連続に変化する断面をもった傾斜を表し、図13(b)は連続ではあるが急な変化をもつ傾斜、図13(c)はなだらかな変化を持つ傾斜を表している。

5.1.2 丸み率の変化

同一の底面多角形に対して、丸み率を変化させて異なった表面形状を表現する。その一例の画像を図14に、パラメータ値を表1(図番号: 図14)に示す。図14(a)は陰影に丸みを持たない場合である。図14(b)は若干丸みを持ち、図14(c)の陰影はほぼ円形である。

5.2 平面形状に関するパラメータの変化

5.2.1 中心点配置の変化

ポロノイ分割の際に中心となる点の配置を変化させることにより平面形状の変化を実現できる。例として、基本配置に三角格子、配置変動に一樣乱数を用い、変動率を変化させた場合の平面形状の変化を図15に、そのときのパラメータ値を表1(図番号: 図15)に示す。図15(a)は一樣乱数による変動が全くない場合である。図15(b)では変動が若干加わり、図15(c)ではさらに大きく変動が加わっている。

5.2.2 揺らぎ率の変化

底面多角形の辺に揺らぎを加える際の揺らぎ率を変化させることにより、平面形状を変化させる。画像を図16に、パラメータ値を表1(図番号: 図16)に示

す。図16(a)は揺らぎ率がゼロで揺らぎがない場合、図16(b)は揺らぎがある場合である。

5.2.3 伸縮率の変化

伸縮率をかえることにより平面形状の方向性を変化させた画像を図17に、対応するパラメータ値を表1(図番号: 図17)に示す。図17(a)は等方性の場合、図17(b)は縦方向に方向性をもつ場合、図17(c)は横方向に方向性をもつ場合である。

5.2.4 階層レベル数の変化

階層レベル数の変化により皮野の階層性を変化させた場合の画像の例を図18に、パラメータ値を表1(図番号: 図18)に示す。図18(a)は階層レベル数が1の場合、図18(b)は2の場合、図18(c)は3の場合である。

5.3 皮膚の表示

上記の検討結果を基に皮膚の表示を試みた例について生成画像を図19に、パラメータ値を表1(図番号: 図19)に示す。図19(a)は、階層レベル数を3に設定し方向性は等方性とした場合の表示である。図19(b), (c)は図19(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例である。図19(d), (e), (f)は第1階層の皮野にのみ方向性を持たせた場合の表示例である。図20は図19(f)のタイプの皮膚画像を手首回りにバンパマッピング¹³⁾した表示例である。

5.4 計算時間

計算時間はパラメータの設定値により異なり、特に、階層レベル数と揺らぎ率の有無により大きく変化する。具体的な計算時間を以下に示す。例えば、階層レベル数が1、揺らぎがない場合(図18(a))で約8分、階層レベル数が2、揺らぎなし(図18(b))で約15分、階層レベル数が3、揺らぎなし(図18(c))で約20分である。一方、揺らぎの有無については、階層レベル数が1、揺らぎあり(図16(b))で約15分である。そして、階層レベル数が3、揺らぎありの図19の皮膚画像で約25分である。

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。これは皮膚の表面の微細な形状に着目したもので、まず、表面の平面形状をポロノイ分割で生成し縦断面形状をベジェ曲線で表現し、テクスチャの階層構造をモデル化することにより、皮膚の表面の表示のための基本モデルを構成した。次に、このモデル

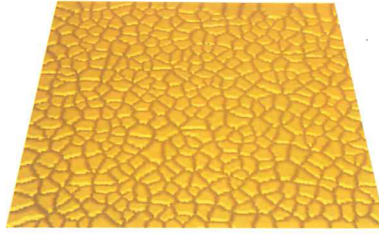


図 2 ポロノイ分割に法線情報を付加したシェーディング例
 Fig. 2 An example of shaded images based on the Voronoi-division and the surface normal.

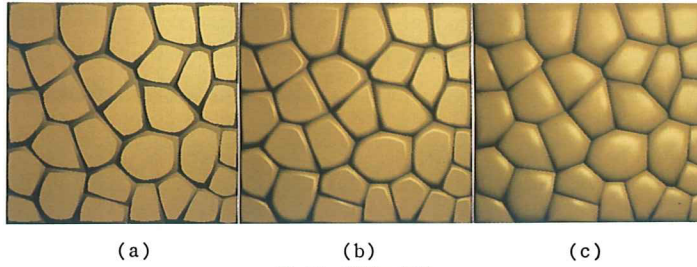


図 13 傾斜の変化
 Fig. 13 Changes in slope.

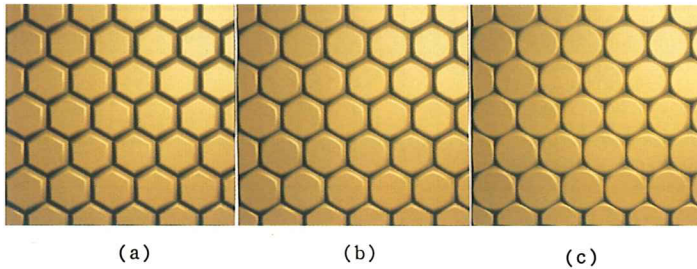


図 14 丸みの変化
 Fig. 14 Changes in roundness.

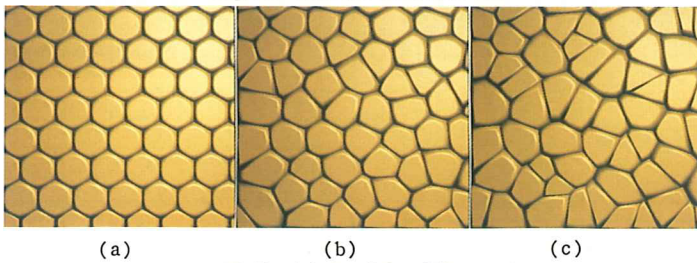


図 15 中心点の分布の変化
 Fig. 15 Changes in center-points distribution.

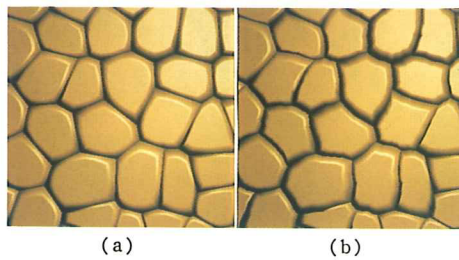


図 16 揺らぎの変化
 Fig. 16 Changes in perturbation.

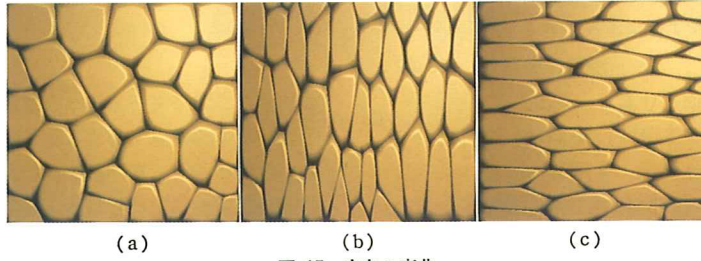


図 17 方向の変化
Fig. 17 Changes in direction.

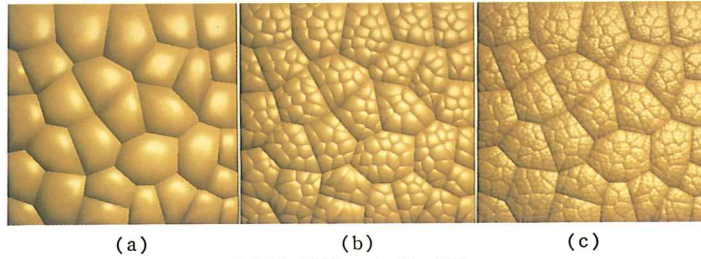


図 18 階層レベル数の変化
Fig. 18 Changes in the number of hierarchical levels.

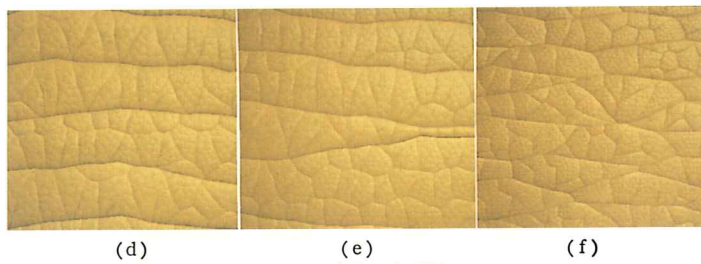
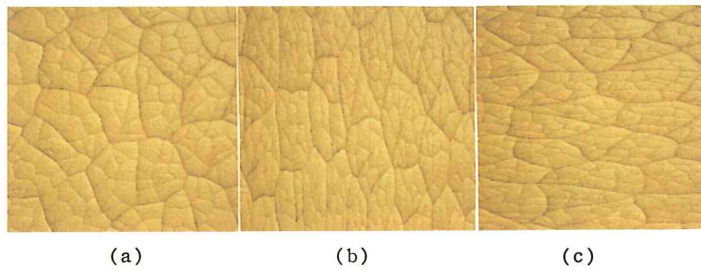


図 19 皮膚の表示例
Fig. 19 Examples of skin rendering.

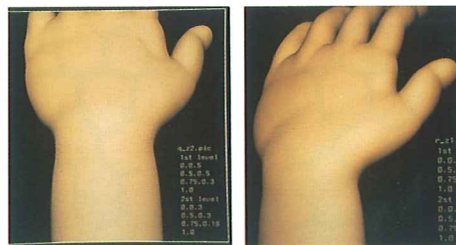


図 20 手首回りの皮膚表示
Fig. 20 Examples of rendering the skin around the wrist.

表 1 図 13 から図 19 におけるパラメータ値
Table 1 Parameter values from Fig. 13 to Fig. 19.

図番号	中心点配置			揺らぎ率	伸縮率		階層レベル数	制御点配置			丸み率
	基本配置	配置変動	変動率		Sx	Sy		階層	セグメント数	制御点座標 (x1, y1)~(x4, y4)	
図13 (a)	三角格子	一様乱数	0.5	0.0	1.0	1.0	1	1	2	(0,3.0),(2,3.0),(4,3.0),(8,3.0) (8,3.0),(9,1.5),(95,75),(1,0)	0.2
図13 (b)	三角格子	一様乱数	0.5	0.0	1.0	1.0	1	1	2	(0,3.0),(2,3.0),(4,3.0),(7,3.0) (7,3.0),(8,3.0),(9,2.5),(1,0)	0.2
図13 (c)	三角格子	一様乱数	0.5	0.0	1.0	1.0	1	1	1	(0,3.0),(5,3.0),(8,2.5),(1,0)	0.2
図14 (a)	三角格子	一様乱数	0.0	0.0	1.0	1.0	1	1	2	(0,3.0),(2,3.0),(4,3.0),(7,3.0) (7,3.0),(8,3.0),(9,2.5),(1,0)	0.0
図14 (b)	三角格子	一様乱数	0.0	0.0	1.0	1.0	1	1	2	(0,3.0),(2,3.0),(4,3.0),(7,3.0) (7,3.0),(8,3.0),(9,2.5),(1,0)	0.4
図14 (c)	三角格子	一様乱数	0.0	0.0	1.0	1.0	1	1	2	(0,3.0),(2,3.0),(4,3.0),(7,3.0) (7,3.0),(8,3.0),(9,2.5),(1,0)	1.0
図15 (a)	三角格子	一様乱数	0.0	0.0	1.0	1.0	1	1	2	(0,3.0),(2,3.0),(4,3.0),(7,3.0) (7,3.0),(8,3.0),(9,2.5),(1,0)	0.2
図15 (b)	三角格子	一様乱数	0.4	0.0	1.0	1.0	1	1	2	(0,3.0),(2,3.0),(4,3.0),(7,3.0) (7,3.0),(8,3.0),(9,2.5),(1,0)	0.2
図15 (c)	三角格子	一様乱数	1.0	0.0	1.0	1.0	1	1	2	(0,3.0),(2,3.0),(4,3.0),(7,3.0) (7,3.0),(8,3.0),(9,2.5),(1,0)	0.2
図16 (a)	三角格子	一様乱数	0.5	0.0	1.0	1.0	1	1	2	(0,3.0),(2,3.0),(4,3.0),(7,3.0) (7,3.0),(8,3.0),(9,2.5),(1,0)	0.2
図16 (b)	三角格子	一様乱数	0.5	0.1	1.0	1.0	1	1	2	(0,3.0),(2,3.0),(4,3.0),(7,3.0) (7,3.0),(8,3.0),(9,2.5),(1,0)	0.2
図17 (a)	三角格子	一様乱数	0.5	0.0	1.0	1.0	1	1	2	(0,3.0),(2,3.0),(4,3.0),(7,3.0) (7,3.0),(8,3.0),(9,2.5),(1,0)	0.2
図17 (b)	三角格子	一様乱数	0.5	0.0	1.0	3.0	1	1	2	(0,3.0),(2,3.0),(4,3.0),(7,3.0) (7,3.0),(8,3.0),(9,2.5),(1,0)	0.2
図17 (c)	三角格子	一様乱数	0.5	0.0	3.0	1.0	1	1	2	(0,3.0),(2,3.0),(4,3.0),(7,3.0) (7,3.0),(8,3.0),(9,2.5),(1,0)	0.2
図18 (a)	三角格子	一様乱数	0.5	0.0	1.0	1.0	1	1	1	(0,3.0),(5,3.0),(7,2.0),(1,0)	0.2
図18 (b)	三角格子	一様乱数	0.5	0.0	1.0	1.0	2	1	1	(0,3.0),(5,3.0),(7,2.0),(1,0) (0.5),(5.5),(7.3),(1,0)	0.2
図18 (c)	三角格子	一様乱数	0.5	0.0	1.0	1.0	3	1	1	(0,3.0),(5,3.0),(7,2.0),(1,0) (0.5),(5.5),(7.3),(1,0) (0.1),(5.1),(7.07),(1,0)	0.2
図19 (a)	三角格子	一様乱数	0.5	0.1	1.0	1.0	3	1	1	(0.4),(5.4),(9.3),(1,0) (0.2),(5.2),(9.15),(1,0) (0.06),(5.06),(9.04),(1,0)	0.2
図19 (b)	三角格子	一様乱数	0.5	0.1	1.0	3.0	3	1	1	(0.4),(5.4),(9.3),(1,0) (0.2),(5.2),(9.15),(1,0) (0.06),(5.06),(9.04),(1,0)	0.2
図19 (c)	三角格子	一様乱数	0.5	0.1	3.0	1.0	3	1	1	(0.4),(5.4),(9.3),(1,0) (0.2),(5.2),(9.15),(1,0) (0.06),(5.06),(9.04),(1,0)	0.2
図19 (d)	三角格子	一様乱数	0.5	0.1	20.0*	1.0	3	1	1	(0.6),(5.6),(9.4),(1,0) (0.4),(5.4),(9.3),(1,0) (0.1),(5.1),(9.07),(1,0)	0.2
図19 (e)	三角格子	一様乱数	0.5	0.1	15.0*	1.0	3	1	1	(0.6),(5.6),(9.4),(1,0) (0.4),(5.4),(9.3),(1,0) (0.1),(5.1),(9.07),(1,0)	0.2
図19 (f)	三角格子	一様乱数	0.5	0.1	5.0*	1.0	3	2	1	(0.6),(5.6),(9.4),(1,0) (0.4),(5.4),(9.3),(1,0) (0.1),(5.1),(9.07),(1,0)	0.2

注： *は第1階層のみ引き伸ばした。

に方向性・丸み・揺らぎ等により修飾を加えることにより自然な皮膚形状を実現できるようにした。

CG のための皮膚モデルに関しては従来ほとんど検討されていなかったが、本モデルによってかなり現実感のある画像が生成できることが示された。しかしながら、さらに高度な質感の実現のためには、主として以下のような課題が残されており、今後検討していく

予定である。

(1) 実際の皮膚表面形状の定量的データとの照合
今回生成された皮膚画像については、モデル中のパラメータ値の決定は人間の視覚評価と試行錯誤によるものであった。今後、医学分野などにおける皮膚表面の実測値を基に、理論的根拠に基づくパラメータ値の設定法を確立することが望まれる。

(2) 色の考察

今回の手法は皮膚の表面幾何形状のモデル化であるが、皮膚の色について検討していく必要がある。具体的には、皮膚が半透明であることから血管・色素等内部の構成物や皮膚表面での反射モデルなどを考慮する必要があると考えられる。

謝辞 本研究の機会を与えてくださった花王(株)文理科学研究所美濃順亮所長に感謝します。基本的な実験・考察をして頂いた名古屋大学工学部電気学科倉地忠彦氏(現(株)リンクス)に感謝します。また、日頃熱心に御討論頂く名古屋大学鳥脇研究室ならびに花王(株)文理科学研究所の皆様へ感謝します。

本研究の一部は、文部省科研費(重点領域 02215106)による。

参考文献

- 1) 小松功児: キャラクタアニメーションのための人体の曲面モデル, 情報処理学会論文誌, Vol. 29, No. 1, pp. 7-19 (1988).
- 2) 渡辺保日郎, 末永康二: 逆光下における頭髮のアニメーション, NICOGRAPH 論文集, pp. 69-77 (1989).
- 3) 小松功児: キャラクタアニメーションのための顔の曲面モデル, 情報処理学会グラフィックスとCAD 研究会資料, 31-5, pp. 1-8 (1988).
- 4) 石田 忠, 篠田真理, 柴谷順一, 湯浅正治: 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) 安田孝美, 橋本安弘, 横井茂樹, 鳥脇純一郎: CT 画像を用いた形成外科手術計画支援システム, 電子情報通信学会論文誌 (D), Vol. J70-D, No. 11, pp. 2134-2140 (1987).
- 6) 三船英明, 藤本永子, 岡田謙一, 横山光男, 北川 節: C.G. を目的とした人体皮膚の特徴抽出, 第 36 回情報処理学会全国大会論文集, 1Z-7, pp. 2081-2082 (1988).
- 7) 種村正美: 空間配置の統計, 数理科学, No. 246, pp. 25-32 (1983).
- 8) 間瀬健二, 鳥脇純一郎, 福村晃夫: 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, 電子情報通信学会論文誌 (D), Vol. J64-D, No. 11, pp. 1029-1036 (1981).
- 9) Honda, H.: Establishment of Epidermal Cell Columns in Mammalian Skin: Computer Simulation, *Journal of Theoretical Biology*, Vol. 81, pp. 745-759 (1979).
- 10) 本多久夫: 樹木の幾何学模型, 数理科学, No. 184, pp. 18-25 (1978).
- 11) 日本化粧品技術者会(編): 化粧品科学ガイドブック, (株)薬事日報社 (1979).
- 12) 清寺 真, 黒住一昌, 三島 豊(編): 基礎皮膚科学, 朝倉書店 (1973).
- 13) Blinn, J.: Simulation of Wrinkled Surface, *Comput. Gr.*, Vol. 12, No. 3, pp. 286-292 (1978).

- 14) Fournier, A., Fussell, D. and Carpenter, L.: Computer Rendering of Stochastic Models, *Comm. ACM*, Vol. 25, No. 6, pp. 371-384 (1982).

(平成 2 年 9 月 5 日受付)
(平成 3 年 2 月 12 日採録)

石井 智海

昭和 62 年筑波大学第三学群情報学類卒業。同年花王(株)入社。コンピュータ・グラフィックス関連の研究に従事。



安田 孝美 (正会員)



昭和 57 年三重大学工学部電気工学科卒業。昭和 62 年名古屋大学大学院博士課程修了(情報工学専攻), 同年同大学工学部情報工学科助手, この間日本学術振興会特別研究員(昭和 61 年)。コンピュータ・グラフィックス, 医用画像の 3 次元表示とその応用に興味をもつ。電子情報通信学会, 日本 ME 学会各会員。

横井 茂樹 (正会員)



昭和 46 年名古屋大学工学部電気工学科卒業。昭和 52 年同大学院博士課程修了。工学博士。名古屋大学助手, 三重大学助教授を経て, 現在, 名古屋大学工学部情報工学科助教授。

画像処理, コンピュータ・グラフィックスの基本手法, およびその医学応用に関する研究に従事。電子情報通信学会, 日本 ME 学会, 日本形成外科学会各会員。

鳥脇純一郎 (正会員)



昭和 14 年 7 月 20 日生。37 年名古屋大学工学部電子工学科卒業。42 年同大学院博士課程修了。同年 4 月名古屋大学工学部助手。以後, 45 年同助教授, 49 年名古屋大学計算機センター助教授, 55 年豊橋技術科学大学情報工学系教授, 58 年名古屋大学工学部電子工学科教授を経て, 60 年 4 月より同情報工学科教授。工学博士。パターン認識, 画像処理, グラフィックス, および, それらの医学情報処理への応用に関する研究に従事。著書「画像理解のためのデジタル画像処理 (I) (II)」(昭晃堂)。電子情報通信学会, 日本 ME 学会, 医療情報学会, 米国 IEEE 各会員。