

は虫類皮革の質感表現の一手法

東海彰吾 安田孝美 横井茂樹 鳥脇純一郎

名古屋大学 工学部 情報工学科

コンピュータ・グラフィクスの分野では、自然物の表示に関心が持たれており、我々のグループでは、生物の皮膚（皮革）のリアルな表現手法について研究を行っている。本文では、は虫類を対象として、その皮革の最大の特徴であるウロコの文様に注目し、幾何学的な手法（ボロノイ分割、ベジェ曲線）を用いた皮革の質感表現の手法について述べ、これにより生成される皮革モデルを用いた、簡単な皮革製品形状へのマッピングによる表示例を紹介する。

A METHOD FOR RENDERING SKINS OR LEATHERS OF REPTILES

Shogo TOKAI, Takami YASUDA, Shigeki YOKOI and Jun-ichiro TORIWAKI

Dept. of Information Engineering,
Fac. of Engineering, Nagoya University
Chikusa-ku, Nagoya 464-01 Japan.

In this paper, we discuss a method for rendering skins or leathers of reptiles such as lizards, snakes, crocodiles, etc. with computer graphics. The scale pattern of the leather can be generated by Voronoi division and Bezier curves. We propose a leather model based on these schemes, and generate some images of industrial leather products.

1 はじめに

コンピュータ・グラフィクス (CG) の分野では、よりリアルな表現を目標として、物体の要素 (動き、形状、質感など) について、様々な手法が提案されてきた¹⁾。最近では、自然物や生物 (人間、動植物) を対象とした表現の研究が盛んに行われている²⁾³⁾⁴⁾。しかし、人間以外の動物 (は虫類など) を対象とした研究は少なく、製品材料としても使われる動物の皮革の表示についても、実写した皮革や人間のデザインした皮革モデルのマッピングによる表示について紹介されている程度である⁵⁾。我々のグループでは、CGにおける生物の皮革 (皮膚) の質感表現について研究を行っており、本文では、は虫類の皮革 (主としてワニ皮革) を対象として、その形状に注目し、幾何学的手法を用いた皮革の質感表現の一手法について報告する。これは、皮革製品などの工業デザインへの応用などが考えられる。

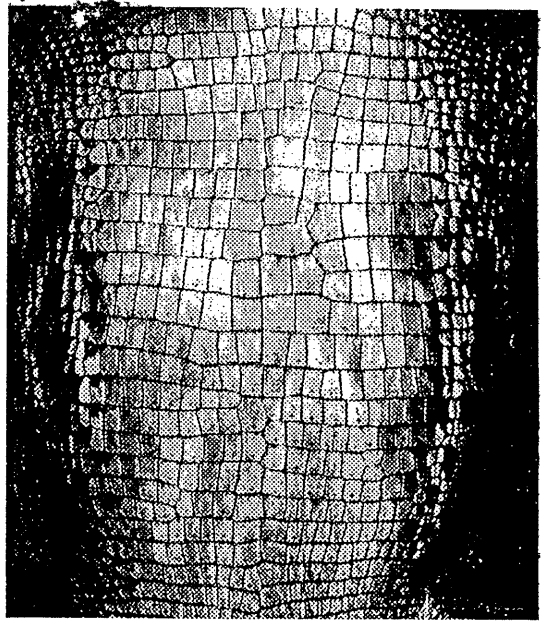


写真1 実際のワニ皮革 (腹部)

2 は虫類皮革の特徴

は虫類の実際の皮革 (生体、製品) において、最大の特徴はウロコによる独特の文様であり、これが材質感に大きく影響していると考えられる。写真1は実際のワニ皮革 (腹部) の⁶⁾よりであるが、一面に隙間なく並んだウロコの文様 (以下、ウロコ・パターンと書く) が見られ、以下に挙げるような、様々な特徴が観察できる。

- 1 一つ一つのウロコはほぼ四角形で規則正しい配列になっている。
- 2 左右のパターンの境界部分に独特の文様 (左右の接合文様) が生じている。
- 3 ウロコの大きさが、中央から左右に行くにつれて小さく変化している。
- 4 立体形状はほぼ偏平で、境界部分は溝になっている。
- 5 ウロコの配列に分岐・融合が起こっている。
- 6 ウロコ自体の形状も、場所により変化している。

本文では、上記特徴1~4に着目し、皮革形状モデルを生成した。

3 皮革モデルの生成

皮革モデルの生成は、まず、(1) ボロノイ分割を利用してウロコ・パターン (線図形) の生成を行い、(2) ウロコの立体形状を設定して皮革の立体的なモデルを生成するという、二段階で行う。

3.1 ウロコ・パターンの生成

ウロコ・パターンの生成には、ボロノイ分割 (図1) を用いる。ボロノイ分割とは、平面上に配置された有限個の基準点 (これをシードと呼ぶ) が与えられたとき、最近傍則によって平面を排反な多角形群に分割する手法である。このボロノイ分割により生成される図形に対してシードの配置を制御することにより、細胞の配列のようなパターンの生成が可

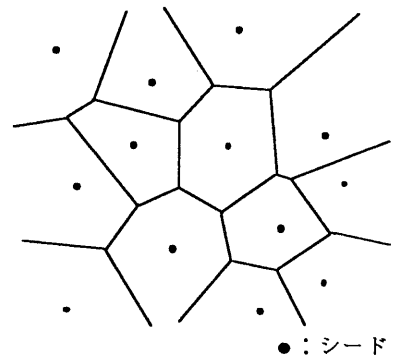


図1 ボロノイ分割

能である。この図形と一つ一つのウロコとを対応させることができることから、皮革モデルの生成手法の一つとしてボロノイ分割は有効であると考えられる。しかし、ワニ皮革のようなウロコ・パターンの形状（個々の領域がほぼ四角形である規則的配列）を、そのまま生成することはボロノイ分割の性質上、困難である（三角形から数角形が生成される）。そこで、このボロノイ分割を二段階で使用し、先に述べた皮革の特徴を実現するためにそれぞれの段階でのシードの配置と変位方向を制御することによってワニ皮革のウロコ・パターンを生成する。なお、ウロコ・パターンは、縦方向に y 軸、横方向に x 軸をとった、大きさ100×100の正方形領域の中に生成することとする。二段階の分割では、まず y 軸方向の分割を、次に x 軸方向の分割を行い、これにより、ほぼ四角形のパターンの生成が行なえる。この2段階はともに以下に示す4つの処理からなる（図2）。

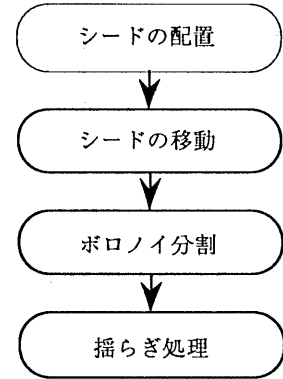


図2 ウロコ・パターン生成処理の流れ

処理1：シードの配置

各段階で特有のシードの配置を行なうが、基本的に格子点上の等間隔な配置である。

処理2：シードの移動

シードの間隔に対する相対変位度と[0,1)の一樣乱数を使って、変位量を次のように求める。

$$\text{変位量} = \text{シード間隔} \times \text{相対変位度} \times 2 \times (\text{乱数} - 0.5) \quad (1)$$

処理3：ボロノイ分割

計算幾何学的アルゴリズム⁷⁾を用い、連続平面上での分割を行なっている。

処理4：揺らぎ処理

生体らしさの表現のために行い、分割によって得られた多角形の各辺を中点変位法を用いた疑似フラクタルにより変形するものである。

以下では、ウロコ・パターンの生成のための2段階の処理手順を具体的に述べる（図3）。

(1) 第1段階（縦方向の分割）

第1段階では、縦方向の分割と、中央部の重なり合いパターンの生成を行う。縦方向の分割は、y軸に平行にシードの列を置いたボロノイ分割を行うことによって得られる。また、中央部のパターンを作るために初めのシードの配置を中心軸の両側に軸に関して対称な位置にしている。以下に第1段階の手順を示す。

処理1：y軸に平行で等間隔の直線上で、中心軸から等距離の点にシードを置く。

処理2：乱数を用い、y軸に平行な方向へ式(1)の変位量だけシードを移動する。

処理3：シードを基準にしてボロノイ分割を行う。

処理4：ボロノイ多角形の辺を疑似フラクタルを用いて処理する。

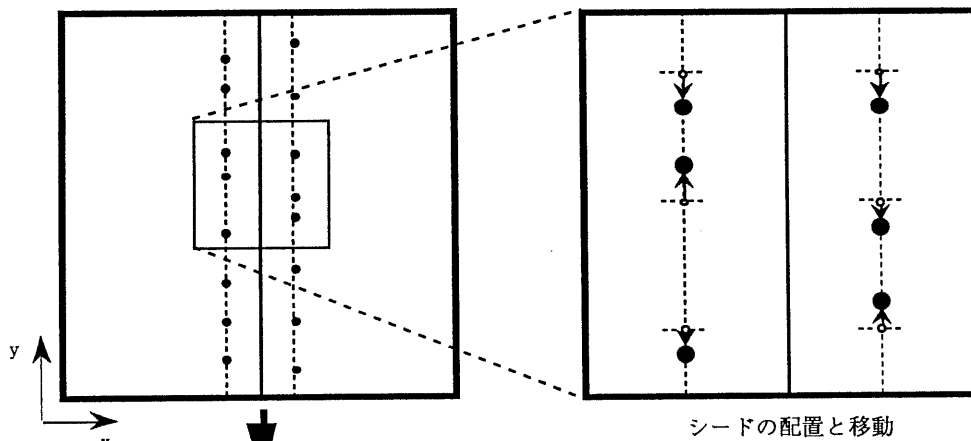
これらの処理により第1段階で生成される線図形（写真2）を見ると、中央部の重なり合いパターンが生成されているのが分かる。このそれぞれの多角形に対して第2段階の処理を施す。

(2) 第2段階（横方向の分割）

第2段階では、第1段階で生成されたパターン（多角形）の内部を横方向に分割して、最終的なパターンを作る。横方向の分割は、x軸に平行にシードの列を置いたボロノイ分割を行うことによって得られる。また、中心から両端にむかってパターンのサイズを小さくするために基準のシードの配置の間隔を徐々に狭くしている。以下に第2段階の手順を示す。

処理1：x軸に平行にシードを置く。この際、シードの間隔は端にいくにしたがって狭くなるようにする。

第1段階



- : 元のシード
- : 移動後のシード

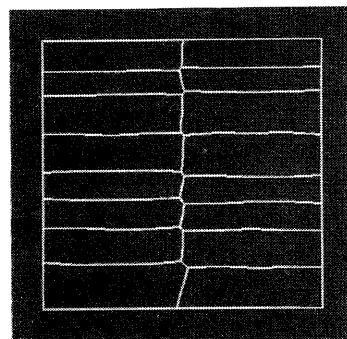
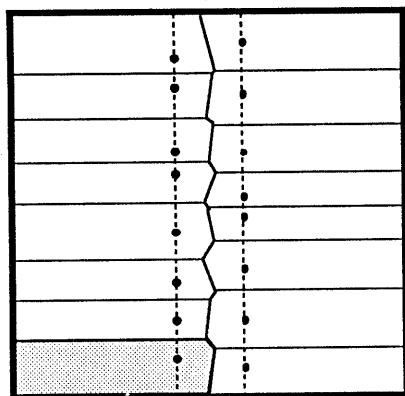


写真2 第1段階終了まで

第2段階

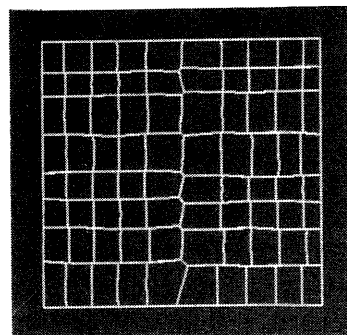
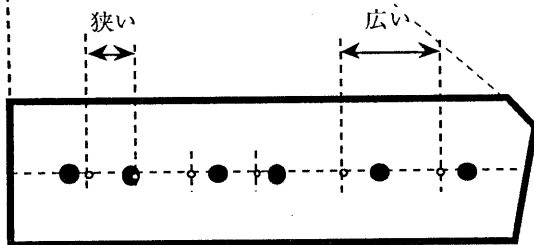
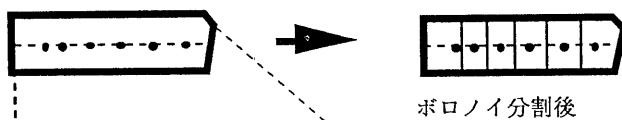


写真3 第2段階終了まで

図3 ウロコ・パターンの生成方法

処理2：乱数を用い x 軸に平行な方向へシードを動かす。

処理3：シードを基準にして第1段階の多角形内でポロノイ分割を行う。

処理4：分割後の多角形の辺を疑似フラクタルを用いて処理する。

これら2段階の処理により、ウロコ・パターンの線図形（写真3）が生成される。このパターンは多角形群であり、個々の多角形がウロコに対応している。このように生成されたパターンを見ても、2. で述べた特徴が実現されていることがわかる。

3. 2 立体形状の設定

3. 1 で生成されたウロコ・パターンに立体形状を与えることにより、三次元の皮革モデルを生成する。皮革モデルの立体形状は、3次ベジェ曲線により与えられたウロコの断面形状により設定する。3次ベジェ曲線は以下の式で与えられる³⁾。

$$P(t) = (1-t)^3 p_0 + 3t(1-t)^2 p_1 + 3t^2(1-t)p_2 + t^3 p_3 \quad (0 \leq t \leq 1) \quad (2)$$

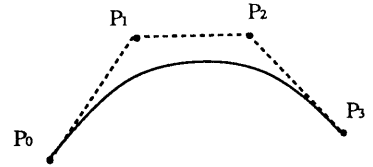


図4 3次ベジェ曲線

これは、4個の制御点(P_0, P_1, P_2, P_3 ;位置ベクトル)によって設定される曲線である(図4)。この曲線を図5の様に配置し、以下の手順で立体形状を設定する。

まず、ウロコ・パターンの、ある一つの多角形について、頂点の座標から重心 $m(mx, my)$ を求める。 m から多角形の辺上的一点 $p(px, py)$ の方向に r 軸を取り、この軸上にベジェ曲線を断面形状として置く(図5(a))。曲線上の一点 q_0 (r - z 座標上で (r_0, z_0))は、曲線のパラメータ $t=t_0$ ($0 \leq t_0 \leq 1$)を(2)式に代入することにより計算できる。また、シェーディングの際に重要となる法線情報については、(2)式を t で微分してえられる次の式、

$$\frac{d}{dt} p(t) = 3\{-(t^2 - 2t + 1)p_0 + (3t^2 - 4t + 1)p_1 - (3t^2 - 2t)p_2 + t^2 p_3\} \quad (3)$$

を用いることによって求められる図5(b)の dr, dz と、 r 軸の x - y 平面上での方向ベクトル (nx, ny) から法線ベクトル $n(nx, ny, nz)$ が計算できる。なお、各変数の間には以下の関係式が成り立っている。

$$\begin{cases} nx = px - mx \\ ny = py - my \end{cases} \quad nr = \sqrt{(nx)^2 + (ny)^2} \quad nz = -\frac{dr \cdot nr}{dz} \quad (4)$$

$n(nx, ny, nz)$ は正規化する

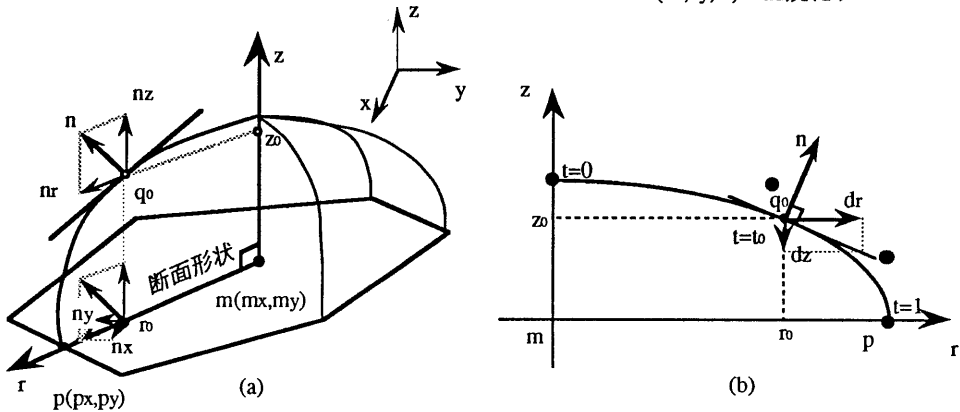


図5 断面形状の配置と法線ベクトルの算出

これらを、各辺、各多角形について計算することにより、皮革モデル全体の形状が決定する。これを配列に格納しておき、後のマッピングに用いる。本文では、試行錯誤的に定めた断面形状を用いており、図6及び写真4は、凸あるいは凹なウロコを想定した断面形状と、生成された立体的な皮革モデルである。ウロコ・パターンが多角形の辺の部分(点p)では、特徴4の溝ができるように制御点を工夫する必要がある。なお、ここで使用しているのは3次曲線であるが、4次・5次などの高次の曲線の使用や、複数の曲線を接続(連続・不連続)することによって、より複雑な形状を扱うこともできる。

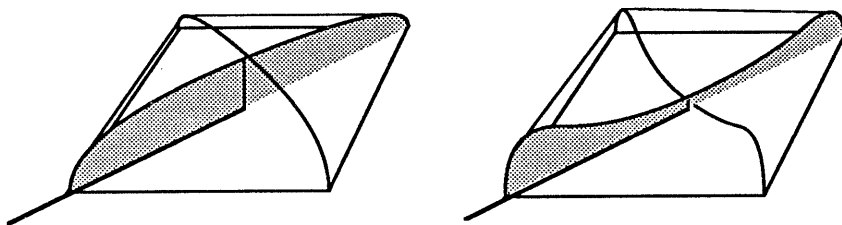


図6 断面形状と立体形状

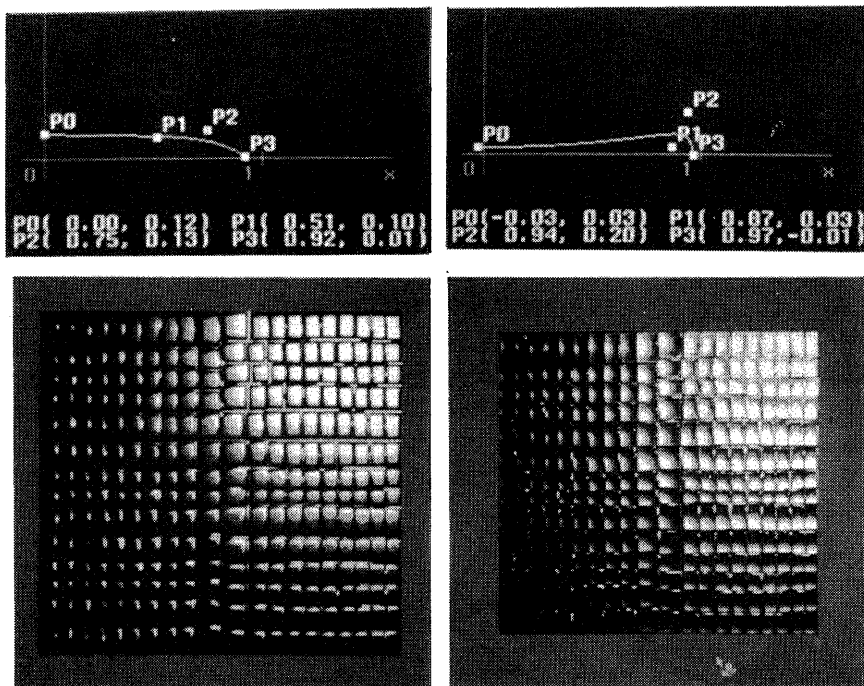


写真4 断面形状と皮革モデル

4 製品モデルとマッピング

皮革製品の表示などを考えた場合、曲面による製品の構成とその曲面への皮革モデルの貼り付け(マッピング)は重要な問題である。CADの分野でも曲面に関する様々な研究が行なわれているが、今回は主に3次ベジェ曲面を使用して製品のモデリングを行なった。3次ベジェ曲面は以下の式で与えられる。

$$P(u,v) = \sum_{i=0}^3 \sum_{k=0}^3 p_{ik} B_i(u) B_k(v) \quad B_k(u) = \frac{3!}{k!(3-k)!} u^k (1-u)^{3-k} \quad (0 \leq u, v \leq 1) \quad (5)$$

この曲面(図7)は、16個の制御点(P_{00} - P_{33} ;位置ベクトル)によって設定され、曲面上の座標(軸・値)が皮革モデルのマッピングに適している。曲面上の点は2個の座標値($0 \leq u, v \leq 1$)を持ち、皮革モデルの平面上の座標値(x, y)との対応がとれている。これにより曲面上のある点に、皮革モデルのどの部分をマッピングするかが決定できる。但し、曲面の形状を決定する16個の制御点の与え方によっては、 u, v の値は空間座標から見ると、かなり歪んだものとなることがあり、マッピング後の皮革パターンにも影響がでるため、空間座標の値も利用してマッピングすべき皮革モデル上の座標値を決定している。現段階では、皮革モデル上の長方形(座標軸にそったもの)の領域についてマッピングが可能である。

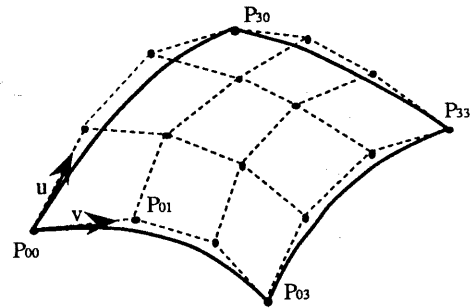


図7 3次ベジェ曲面

皮革モデルのマッピングには、直接立体形状を用いない手法であるバンプマッピング⁶⁾を使用する。この手法は、皮革モデル上の2つの座標方向の表面の凹凸の傾きと曲面上の座標の方向ベクトルから、皮革モデルに対応した曲面上の法線ベクトルを算出する。従って、立体形状自体は変えずにシェーディングの際の輝度計算にこの法線ベクトルのみを用いることで、凹凸感の表現が可能となる。

5 表示結果

製品などを構成する曲面はいくつかのポリゴンのパッチで表されており、各パッチにおいて、頂点に3次元の座標値と曲面の法線ベクトル、および、マッピングに必要な情報(u, v の値など)を与えておく(パッチ・パラメータ)。パッチ内部の点に関するパラメータは、頂点におけるそれらの値から線形補間により求める。皮革のモデルのマッピングは、シェーディングの際に行なう。陰面消去にはZ-バッファ法を用いる。なお、ポリゴンの影やアンチエイリアシングなどの処理は行っていない。

写真5、6はハンドバッグを想定した皮革製品形状(分解図)と、試作した皮革モデル(凸なウロコの形状)をマッピングして表示した例である(400×400画素)。製品の形状は、先に述べた3次のベジェ曲面によるセグメント7個、球形のセグメント2個により構成されている。シェーディングには、プリンのモデルを使い、皮革部分(黒)および金具部分(Gold)でそれぞれ試行錯誤的に定めたパラメータにより陰影付けを施している。なお、光源は2個の点光源を用いた。

本研究ではハードウェアとしてSiliconGraphics社のIRIS-4Dを用い、C言語を使用した。計算時間は、約10分である。

6 むすび

は虫類の皮革の質感表現の一手法として、ポロノイ分割の利用と、これにより生成された皮革モデルを用いた表示例を紹介した。

本研究では、うろこの配列と形状に着目したが、各パラメータは試行錯誤的に決定したものであり、皮革表面の反射特性などもほとんど考慮されておらず、実際の皮革(ワニ皮革製品など)との比較検討が必要である。また、今回提案したポロノイ分割によるウロコ・パターン生成法の生物学的妥当性についての検討も必要であり、パターンの発生要因を考慮したモデルを得ることは、よりリアル

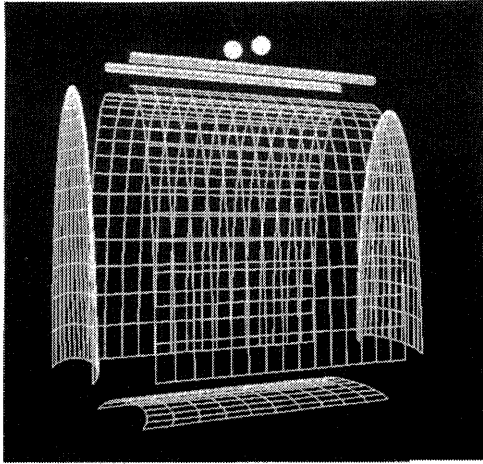


写真5 製品モデル (分解図)

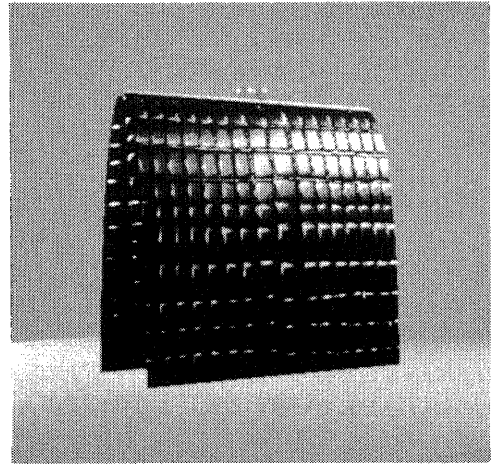


写真6 表示例 (ハンドバッグ)

な表現のためには重要であると考えられる。

また、実際の皮革製品は、ほぼ平面である皮革材料から立体形状を作り出すため、マッピングなどに際して、展開図と立体形状との関係を知る必要がある。さらに、実際の皮革加工の仕上げ方の違いなどの質感に与える影響とそれを考慮した皮革モデルについても考えて行きたい。

本研究では、主としてワニ皮革を対象にしたが、その他の皮革（牛革など）に対する質感表現の手法の研究も重要であり、本手法の応用などについても考えたい。

謝辞

日頃から熱心に御討論いただく名古屋大学工学部情報工学科鳥脳研究室の皆様へ感謝します。

参考文献

- 1)安田、横井：布独特の材質感を表現するシェーディング・モデル、日経CG、(41):150-159、1990
- 2)動物、植物のCG表現とその応用、情報処理学会グラフィクスとCAD研究会報告、52、1991
- 3)石井、安田、横井、鳥脳：表面の微細形状に注目した皮膚の質感表現の一手法、情報処理学会論文誌、Vol.32, No.5, pp.645-654、1991
- 4)渡辺、末永：三角柱と房のモデルによる頭髮像の生成、電子情報学会誌(DII)、J73-D-II(3):367-373、1990
- 5)G.S.P.Miller: The Motion Dynamics of Snakes and Worms, Computer Graphics, Vol.22, No.4, pp.169-178, 1988
- 6)大石：ワニの民・メラネシア芸術の人びと、冬樹社、1983
- 7)杉原：パターン認識の道具としてのボロノイ図構成算法の整備、情報処理学会グラフィクスとCAD研究会報告、37(1):1-8、1989
- 8)J.F.Blinn: Simulation of Wrinkled Surfaces, Computer Graphics, Vol.12, No.3, pp.186-192, 1978