

毛穴で構成される皮革形状の特徴抽出手法の一提案

松藤 和夫[†] 河合 直樹[†] 櫻井 快勢[‡] 宮田 一乗[‡]
[†]大日本印刷株式会社 情報コミュニケーション研究開発センター
E-mail: {Matsufuji-K2|Kawai-N}@mail.dnp.co.jp
[‡]北陸先端科学技術大学院大学 知識科学教育研究センター
E-mail: {kaisei|miyata}@jaist.ac.jp

本研究では多数の毛穴で構成される皮革形状を対象に、その特徴を簡潔に記述する一手法を提案する。まず毛穴とその集合である複合毛包で構成される2階層構造モデルを導入する。次に実物の皮革表面を計測したハイトフィールドから毛穴および複合毛包の位置を推定して2階層の幾何学的構造を構成する。最後に毛穴と複合毛包の相対的な位置関係を統計的に解析し、複合毛包の分布を少数のパラメータで近似することで、皮革形状の特徴を簡潔に記述する。抽出されたパラメータを混合して手続き的テクスチャ生成に利用することで、複数のテクスチャの特徴を組み合わせたバリエーション制作が容易になると期待できる。

A Characterization Method for Leather Textures Consisted of Pores

Kazuo Matsufuji[†] Naoki Kawai[†] Kaisei Sakurai[‡] Kazunori Miyata[‡]
[†]Media Technology Research Center, Dai Nippon Printing Co., Ltd.
[‡]Japan Advanced Institute of Science and Technology

This paper proposes a method for characterizing leather textures concisely intended for leather that consist of pores. We first introduce a two-layered geometry model for representing follicle and pores. Then we estimate position of pores and follicles from height field of real leather and apply them to the geometry model. Finally we characterize the leather geometry with a few parameters by analyzing distribution that illustrates relative positions between follicles. It is expected to make designing new textures that inherited characters from some textures easier by combining parameters obtained from different textures and applying them to procedural texturing methods.

1. はじめに

動物の皮革は、表面が皺や毛穴、鱗のような微細凹凸形状で構成され独特な風合いを持つことから、自動車のシートやバッグ、靴など多くの製品で装飾に利用されている。このような皮革製品のCG画像制作において、皮革の質感再現が画像品質に大きな影響を与える。CGでは物体表面の質感表現のためにさまざまな手法が提案されている。代表的な手法として、テクスチャマッピングやバンプマッピングが挙げられ、写真を利用して物体表面の模様や凹凸形状を擬似的に表現することができる。テクスチャの制作方法として、少数のパラメータからアルゴリズムのみでテクスチャを生成する手続き的な手法が提案されている。実在するテクスチャの特徴を解析して手続き的な生成アルゴリズムに必要な少数のパラメータで記述できれば、意図する画像を自動で生成することが容易に

なり、さらに複数のテクスチャの特徴を組み合わせて中間の特徴を持ったバリエーションを制作することが可能になると期待できる。

本研究では、多数の毛穴で構成された皮革形状を対象とし、毛穴位置および毛穴の集合である複合毛包位置を推定した後、複合毛包の分布を少数のパラメータで近似することにより、皮革形状の特徴を簡潔に記述する手法を提案する。

以下、2章ではマッピングに用いるテクスチャの制作方法について概観し、3章にて毛穴で構成される皮革の構造を考察して、その表現に適した2階層構造モデルを提案する。4章では皮革表面形状を解析して2階層構造の位置データを取得する処理手順と、その特徴を簡潔なパラメータで記述するための近似手法を提案する。5章では、実物の皮革形状を計測したデータに提案手法を適用した結果を示し、提案手法の有効性を示す。

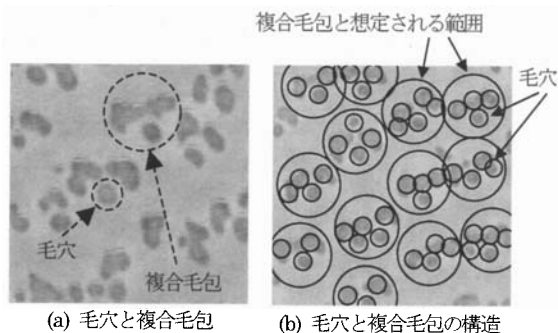
2. 従来手法

マッピングに用いるテクスチャの制作方法として、実物の写真を基にレタッチ作業で修正する方法と、手続き的テクスチャ生成に大別できる。マッピングではテクスチャが繰り返して利用されるため、テクスチャの上下および左右がシームレスになるように仕上げるのが望まれる。

写真を利用する場合、皮革の写真を画像編集ソフトで加工する方法と、サンプルからテクスチャを生成する方法(テクスチャ生成)が考えられる。画像編集ソフトで加工する場合の課題として、シームレス処理に高度なレタッチ技術が必要である点や、バリエーション制作が困難な点が挙げられる。一方、テクスチャ生成を利用する場合、画像の上下と左右の辺を繋ぎ合わせながら生成することでシームレス処理を実現することができる。代表的なテクスチャ生成方法として、パッチの重なる部分の色情報を比較して誤差が最も小さい境界で繋ぎ合わせる Efros らのイメージキルティング [1] や、入力画像と生成画像を複数の解像度でマッチングさせる Heeger らの手法 [2]、類似した構造の複数のテクスチャをモーフィングする Matusik らの手法 [3] などが提案されている。

手続き的な皮革(皮膚)のテクスチャ生成手法としては、パーティクルを用いて皮膚の成長過程をシミュレーションしてメタボールで表面形状を生成する宮田らの手法 [4] や、階層的なボロノイ分割により皮膚の表面形状を生成する石井らの手法 [5] が提案されている。手続き的な手法では与えるパラメータの組み合わせにより多数のバリエーションを制作できることが利点と言えるが、意図するテクスチャを生成するために必要なパラメータを推定することは容易ではなく、制作に試行錯誤を要する。

一方、産業デザインの観点からは、複数の実物の皮革を参考にして、それぞれの特徴を併せ持った新規のテクスチャを制作したいというニーズがある。このような特徴の掛け合わせを行うことは、レタッチ作業では困難である。テクスチャ生成では、Efros や Heeger の手法では複数のテクスチャの特徴を掛け合せることは困難であり、Matusik の手法では掛け合わせが可能ではあるが構造がいたテクスチャの組み合わせに限定される。手続き的な手法を利用する場合、複数のテクスチャの特徴を含んだパラメータを与えることができれば、それぞれの特徴を継承したテクスチャを生成することが期待できる。このような背景から、皮革テクスチャの特徴を簡潔なパラメータで表現するこ



(a) 毛穴と複合毛包 (b) 毛穴と複合毛包の構造
図1 毛穴で構成される皮革形状

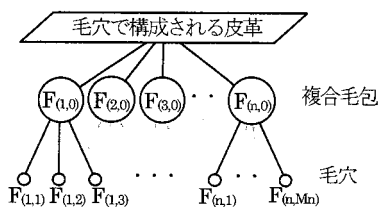


図2 毛穴と複合毛包で構成される2階層構造モデル

とが望まれる。

3. 毛穴で構成される皮革形状のモデル

3. 1. 毛穴で構成される皮革形状の特徴

皮革表面は、毛穴や、皮溝と呼ばれる溝、皮溝に囲まれ盛り上がった皮丘などから構成されている。皮革表面の毛穴や皮溝、皮丘の構成は、動物種、部位、年齢に応じて変化する。例えば、関節部のように皮膚が伸縮する部位は皮溝が深い傾向にある。一方、仔牛や仔羊の皮革は、皮溝や皮丘が少なく、数個ずつが密集した多数の毛穴で構成される。密集した毛穴の単位は複合毛包と呼ばれる。毛穴で構成される皮革形状の例を図1に示す。この図は、皮革を表面形状3次元測定装置で計測したハイトフィールドをグレースケールで表現した画像であり、明るいほど浅く、暗いほど深いことを示す。

3. 2. 毛穴と複合毛包の2階層構造モデルの導入

図1(b)を観察すると3個以上の毛穴がグループを形成し、各グループの毛穴が似た分布や形状を持つことが確認できる。各グループを複合毛包とみなし、全ての毛穴はいずれかの複合毛包に属すると仮定すると、図2に示す2階層構造モデルを導入することにより、毛穴と複合毛包で構成された構造を記述することができる。

4. 毛穴で構成される皮革形状の解析

4. 1. 毛穴と複合毛穴の2階層構造のデータ構成

4. 1. 1. 毛穴の位置の検出

毛穴は周囲の平坦部より深い(暗い)。そこで注目画素とその周辺 $n \times n$ 画素の領域を比較し、注目画素値が最小(暗い)であれば、注目画素を毛穴の候補点とする(図3)。この候補点は、毛穴と実際には毛穴でない点(平坦部)を含む。これは平坦部にも最小値が存在するためである。候補点から平坦部の点群をできる限り削除し、残りを毛穴として検出する。

図4に全ての候補点群の深度に関するヒストグラムを示す。この分布には、毛穴と平坦部の点を含み、ある深度を中心に分布する毛穴のヒストグラムと別の深度を中心に分布する平坦部のヒストグラムが足し合わされたものと仮定する。また、最頻値は毛穴の分布の中心であると仮定する。この2つの仮定に基づいて毛穴と平坦部の点を分離する深度(閾値)を求める。ここで毛穴の分布は、最頻値を中心に左右で同じ頻度であると考えのが合理的であるため、求める閾値は最頻値より深い範囲の頻度 S_R と、最頻値から浅い方向に積算した頻度 $S_L(t)$ が等しくなる深度 t と推定できる。この閾値を用いて平坦部の点を削除した例を図5に示す。

4. 1. 2. 複合毛穴の位置の推定

複合毛穴は、毛穴をグループ化した単位であり、その位置はホワイトフィールドから直接検出できないため、毛穴位置から推定する。ここでは階層的クラスタリングを用いる。全ての毛穴位置の点群を初期クラスとし、クラス間の距離に基づいてクラス群を生成し、各クラスの重心位置を複合毛穴位置として推定する。複合毛穴位置の推定結果を図6に示す。ここまでの処理により2階層モデルのデータを構築できたこととなる。

ここで、複合毛穴が均一に分布していると仮定すると、階層的クラスタリングの終了条件である閾値は、隣接する複合毛穴の平均距離の半分とみなすことができる。ただしクラスタリング前では複合毛穴の位置が未知なため、複合毛穴間の距離は決定できない。そこで、隣接する全ての毛穴間の距離を算出し、その最大値を複合毛穴の平均距離とみなす。

4. 2. 毛穴と複合毛穴の特徴量の抽出

ここでは毛穴と複合毛穴の位置の分布を図示し、複合毛穴の分布の特徴を少数のパラメータで簡潔に記述する。

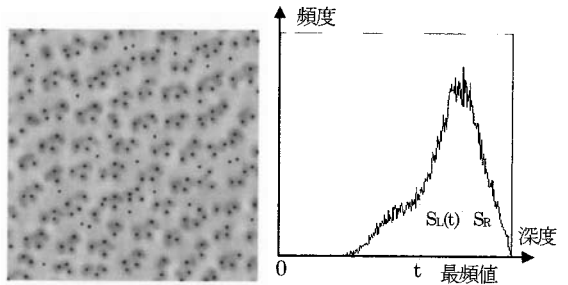


図3 毛穴候補点の抽出結果

図4 候補点群ヒストグラム

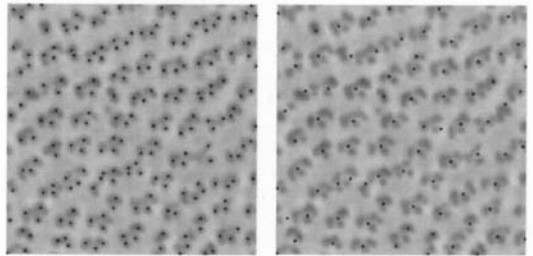


図5 毛穴以外の点の削除結果 図6 複合毛穴位置の抽出結果

4. 2. 1. 複合毛穴内の毛穴の分布

複合毛穴は、3個以上の密集した毛穴で形成され、含まれる毛穴は似た分布で現れる傾向にある。この分布は、皮革の種類により明確に特徴が現れる。そこで複合毛穴内の毛穴の分布を図示することを試みる。ここでは対象を3個以上の毛穴を含む複合毛穴に限定する。

まず、横軸を x 、縦軸を y とする投票座標系 V を定義し(図7)、各複合毛穴について、複合毛穴位置から見た毛穴位置に投票し、毛穴の分布を図示する。

$$\begin{aligned} V(\bullet) &= 0 \\ \text{for } n \in (1 \dots N) \\ &\text{if } (M_n \geq 3) \\ &\quad \text{for } m \in (1 \dots M_n) \\ &\quad \quad V(F_{(n,m)} - F_{(n,0)}) \quad += 1 \end{aligned}$$

ここで、 $V(\cdot)$ は投票座標系 V 、 N は複合毛穴の総数、 M_n は n 番目の複合毛穴に属する毛穴の個数、 $F_{(n,0)}$ は n 番目の複合毛穴位置、 $F_{(n,m)}$ は n 番目の複合毛穴に所属する m 番目の毛穴位置を表す。投票結果は毛穴分布図と呼び(図8)、複合毛穴内の毛穴位置の分布を示す。

4. 2. 2. 複合毛穴の分布

隣接する複合毛穴の分布を図示することを試みる。ここで隣接とは複合毛穴群のドロネー図においてドロネー辺で接続関係にある場合を意味する。

まず, 図7と同様の座標軸で投票座標系 V_F を定義する. 次に推定した全ての複合毛包について, 注目する複合毛包位置から見た隣接する複合毛包位置に投票し, 複合毛包の分布を図示する.

$$\begin{aligned}
 &V_F(\bullet) = 0 \\
 &\text{for } n \in (1 \dots N) \\
 &\quad \text{for } m \in (1 \dots N) \\
 &\quad \text{if } (\text{Connect}(n, m)) \\
 &\quad \quad V_F(F_{(m,0)} - F_{(n,0)}) \quad + = 1
 \end{aligned}$$

ここで, $V_F(\cdot)$ は投票座標系 V_F , N は複合毛包の総数, $\text{Connect}(n, m)$ は n 番目と m 番目の複合毛包位置が隣接なら 1, 隣接しないなら 0 を返す関数, $F_{(n,0)}$ は n 番目の複合毛包位置を表す. 投票結果は, 複合毛包分布図と呼び (図9), 隣接する複合毛包の分布を示す.

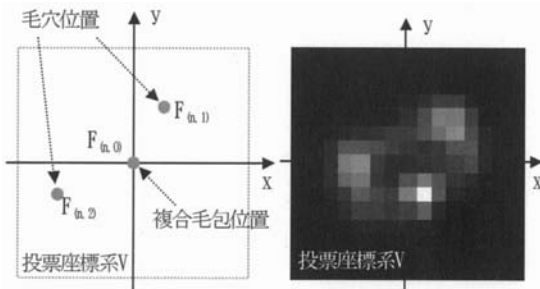


図7 投票座標系

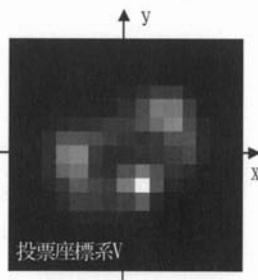


図8 毛穴分布図

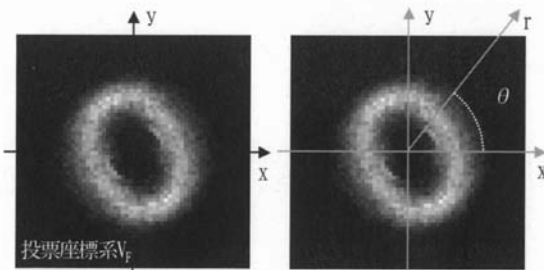


図9 複合毛包分布図

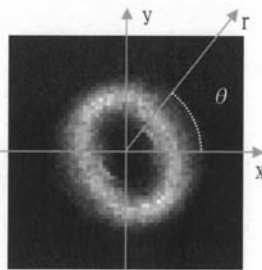


図10 座標系変換

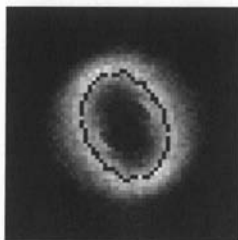


図11 密度分布の重心群

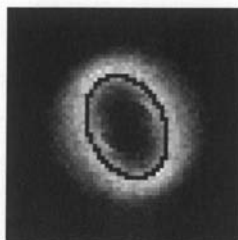


図12 楕円形状の推定結果

4. 2. 3. 複合毛包分布図のパラメータ化

図9の密度分布を観察すると, 傾いた楕円形を中心に分布していることが確認できる. ここでは, 中心となる楕円形と, 楕円形を中心とした密度分布を少数のパラメータで推定する.

(1) 楕円形の推定

複合毛包分布図の密度分布の中心を成す楕円形を推定する. まず, 複合毛包分布図の投票座標系 V_F に対し極座標系を導入する (図10). 次にいくつかの角度 θ における r 方向の密度分布の重心を算出する (図11). 最後に重心群から下記の楕円形の方程式の係数を最小二乗法で推定する.

$$\frac{(x \cos \beta + y \sin \beta)^2}{a^2} + \frac{(x \sin \beta - y \cos \beta)^2}{b^2} = 1$$

ここで β は楕円形の傾き, a, b は楕円形の 2 軸の長さを表す. 推定結果を図12に示す.

(2) 楕円形を中心とした密度分布のパラメータ化

次に楕円形の周辺の密度分布を関数で近似する. まず, 推定した楕円形と複合毛包分布図に極座標系を導入し (図10), いくつかの角度 θ における r 方向の密度分布と, 推定した楕円形の θ 方向の径 μ を取得する (図13). ここで r 方向の密度分布は径 μ を境に左右で異なる偏りの分布を示す. この分布を少ないパラメータで近似するため, 左右の分布を独立した2つの正規分布とみなし, 左右独立に標準偏差を算出し, 2つの標準偏差を r に基づいて補間することで関数を連続的に接続する.

$$\begin{aligned}
 f(r) &= \frac{1}{\sqrt{2 \times \pi \times \sigma(r)^2}} e^{-\frac{(r-\mu)^2}{2 \times \sigma(r)^2}} \\
 \sigma(r) &= \sigma_1 \times (1 - p(r)) + \sigma_2 \times p(r) \\
 p(r) &= \int_{-\infty}^r \frac{1}{\sqrt{2 \times \pi \times \sigma_2^2}} e^{-\frac{(r-\mu)^2}{2 \times \sigma_2^2}} \\
 &\text{ただし, } \sigma_2 > \sigma_1, \int_{-\infty}^{\infty} f(r) = 1
 \end{aligned}$$

$f(r)$ は径 μ を境に左右で異なる分布を表現するための新しい分布関数, σ_1 と σ_2 は径 μ を境に左右独立に算出した標準偏差, $p(r)$ は密度分布の r 方向の存在範囲を十分含むように, 2つの標準偏差のうち大きい方の標準偏差の累積分布関数に基づいた補間係数, $\sigma(r)$ は標準偏差 σ_1 と σ_2 の値を $p(r)$ で補間した標準偏差を表す. このようにして角度 θ における r 方向の密度分布は3つのパラメータ, 標準偏差 σ_1 と σ_2 , 径 μ で決定できる.

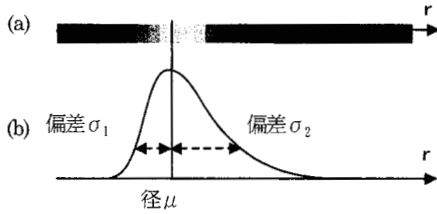


図13 極座標系の角度 θ における r 方向の密度分布

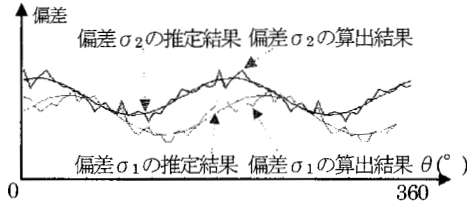


図14 2偏差の算出結果と推定結果

これらのパラメータは θ の関数となっており、複合毛包分布図を記述するためには、 $\sigma_1(\theta)$ 、 $\sigma_2(\theta)$ 、 $\mu(\theta)$ の3つの関数を決定する必要がある。径 $\mu(\theta)$ は楕円形として推定できている。ここで角度 θ の変化に対する標準偏差 $\sigma_1(\theta)$ 、 $\sigma_2(\theta)$ の変化を図14に示す。2つの標準偏差を観察すると正弦波に近い分布を示す。そこで下記の正弦波の方程式を最小二乗法で推定する。

$$\sigma(\theta) = d \times \sin(\theta - e) + g$$

ここで、 d は振幅、 e は位相、 g は標準偏差の平均値とする。このようにして標準偏差 $\sigma_1(\theta)$ 、 $\sigma_2(\theta)$ は、2つの正弦波関数で近似できる。

以上の手順により、複合毛包分布図を楕円形についての傾き β 、2軸の長さ a 、 b と、2つの標準偏差についての振幅 d 、位相 e 、平均値 g 、合計9つのパラメータで記述できる。

5. 実験と考察

毛穴で構成された皮革の例として仔牛の皮革を対象に、毛穴および複合毛包の位置の推定からパラメータの推定までを行い、提案手法の有効性を検証する。

5. 1. 実験

毛穴で構成された仔牛の皮革形状を3種類用意した(図15(a))。表面形状3次元測定装置(キーエンス社センサLK-G30及びブステージK2-300)を用いて9cm×9cmの領域を90 μ m間隔で計測して、ハイトフィールドデータを取得後、256階調に量

子化してグレースケール画像とし、入力データとした。

ここで、毛穴検出時の極小値の比較領域範囲 n を5ピクセルとし、3種類の入力データに対しパラメータの推定までを行った。その結果を図15に示し、推定されたパラメータを表1に示す。また、パラメータから再現した複合毛包分布図(図15(f))と、櫻井ら[6]の手続き的な皮革形状のパターン生成手法に対し、毛穴分布図(図15(d)下)と複合毛包分布図(図15(e)下)を与えて生成した結果(図16)を示す。

5. 2. 考察

図15(a)上の入力データの毛穴の分布を観察すると、右斜め上方向に狭い間隔で並んで分布する傾向が見られる。図15(d)の毛穴分布図においても同様の傾向が見られ、分布の特徴を良く捉えている。また、図15(a)上の入力データの複合毛包位置の推定結果(図15(c))を観察すると、右斜め上方向に狭い間隔で分布しており、直交する方向に広い間隔で分布しているのが確認できる。複合毛包分布図においても同様の分布が見られ、分布の特徴を良く捉えている。他の2つの入力データに関しても良好な結果が得られている。

図16と入力データ(図15(a)下)を比較すると、毛穴の分布に関しては似た傾向が確認できる。

6. まとめと今後の課題

本研究では毛穴で構成された皮革形状を対象に、特徴を簡潔に記述する手法を提案した。まず、毛穴とその集合である複合毛包で構成される2階層構造モデルを導入した。次に、毛穴で構成された皮革形状から毛穴と複合毛包の位置を推定後、毛穴や複合毛包の分布を図示し、複合毛包の分布をパラメータ化した。また、毛穴分布図と複合毛包分布図が皮革の特徴の傾向を表すことを確認し、提案手法の有効性を示した。

今後は、毛穴分布図のパラメータを簡潔に記述する手法の開発を行いたい。また、毛穴や複合毛包だけでなく、毛穴の形状や毛穴の向き(仰角、方位角)、大局的な毛穴の向きの流れ、皮革表面の平坦部なども質感に影響を与えるためこれらの特徴抽出を図りたい。さらに毛穴で構成された皮革形状だけでなく、皮溝や皮丘、ウロコで構成された皮革形状を対象とした特徴抽出方法を検討したい。

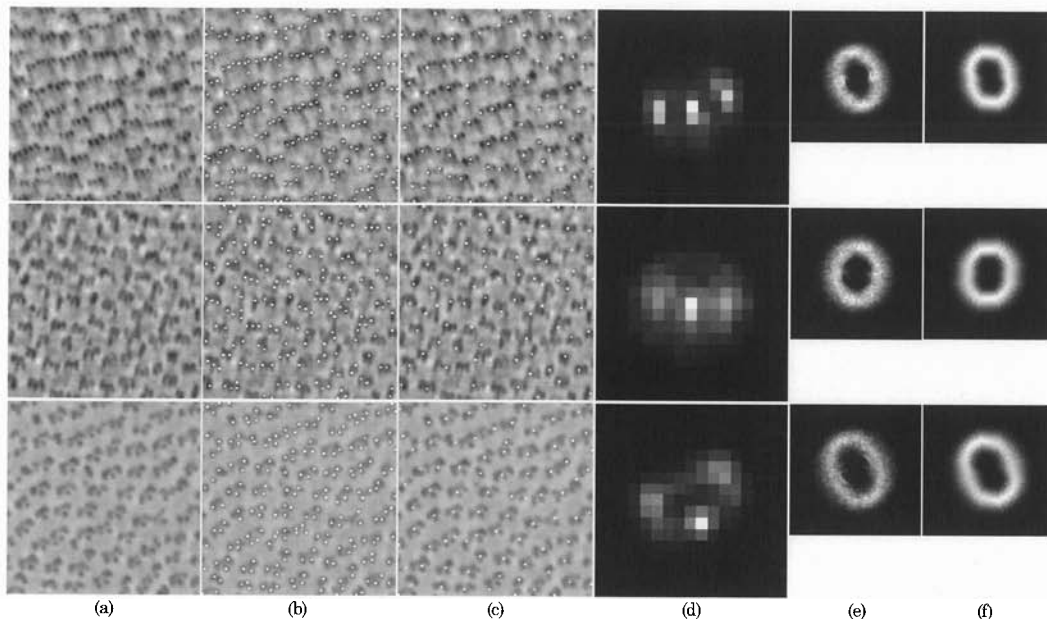


図 15 実験結果 (a)3 種類の入力データ (b)毛穴位置 (c)複合毛包位置 (d)毛穴分布図 (e)複合毛包分布図 (f)パラメータから再現した複合毛包分布図

表 1 複合毛包分布図から抽出したパラメータ群

入力データ	楕円形			偏差 σ_1 の正弦波			偏差 σ_2 の正弦波		
	傾き β (°)	軸 a (ピクセル)	軸 b (ピクセル)	振幅 d (ピクセル)	位相 e (ラジアン)	平均値 g (ピクセル)	振幅 d (ピクセル)	位相 e (ラジアン)	平均値 g (ピクセル)
1	12.6145	8.6831	11.6496	0.1524	0.0498	2.5141	0.3098	-0.6545	2.8911
2	81.6816	11.8062	9.9274	0.2361	-0.6048	2.5249	0.3357	-0.6195	3.1394
3	24.0652	10.2865	14.0121	0.1596	-0.4322	2.8180	0.5504	-0.3891	3.0938

参考文献

- [1] Alexie Efros, William Freeman, Image quilting for texture synthesis and transfer. Proceedings of SIGGRAPH '01, pp. 341-346, 2001
- [2] David J. Heeger, James R. Bergen, Pyramid-Based Texture Analysis / Synthesis. Proceedings of SIGGRAPH '95, pp. 229-238, 1995
- [3] W. Matusik, M. Zwicker, F. Durand, Texture Design Using a Simplicial Complex of Morphable Textures. Proceedings of SIGGRAPH '05, pp. 787-794, 2005
- [4] 宮田 一乗, 坂口 嘉之, 今尾 公二, 須崎 亮太郎, パーティクルとメタボールを用いた皮革テクスチャの生成法. 情報処理学会研究報告, 2006-CG-125, Vol. 2006, No. 19, pp. 13-18 (2006)
- [5] 石井 智海, 安田 孝美, 横井 茂樹, 鳥脇 純一郎, 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 Vol. 32, No. 5, pp. 645-654 (1991)
- [6] 櫻井 快勢, 宮田 一乗, 松藤 和夫, 河合 直樹, 毛穴で構成される皮革形状のパターン生成. 情報処理学会研究報告, 2007-CG-129, Vol. 2007, No. 19, to appear, 2007

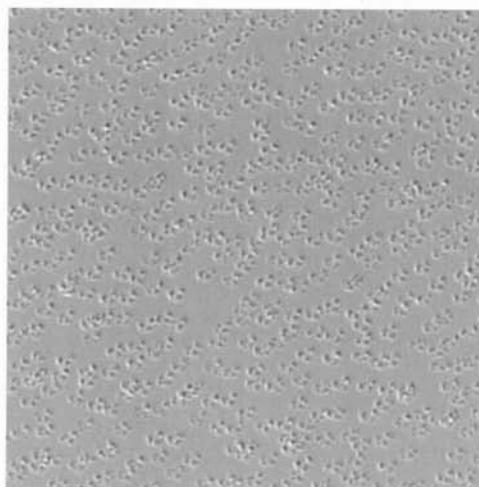


図 16 毛穴分布図と複合毛包図から再現した皮革形状