

毛孔で構成される皮革模様の特徴抽出と再構成

松 藤 和 夫^{†1} 櫻 井 快 勢^{†1}
宮 田 一 乗^{†2} 河 合 直 樹^{†1}

本論文は、多数の毛孔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手法および、その特徴量から皮革形状を再構成する手法を提案する。はじめに皮革模様の階層構造モデルを導入する。続いて、皮革表面の計測値を統計的に解析し、皮革形状の特徴を簡潔に記述するパラメータを抽出する。その後、抽出されたパラメータを基に、皮革模様の階層構造モデルに従って皮革形状を再構成する。

Characterization and Reconstruction Method for Pore Pattern on Leather Texture

KAZUO MATSUFUJI,^{†1} KAISEI SAKURAI,^{†1}
KAZUNORI MIYATA^{†2} and NAOKI KAWAI^{†1}

This paper proposes a characterization and reconstruction technique for pore pattern on leather texture. We first introduce a layered geometric model for pore pattern on leather texture. Next, we analyze data of leather texture statistically in order to extract a few parameters for representing the leather geometry. Then, the method reconstructs the leather texture based on the layered geometric model using the captured parameters.

1. はじめに

皮革は古くから我々の身近に存在しており、鞆や財布、ベルトなどの皮革製品、自動車の

内装、その他のさまざまな加工品の質感を高めるために使われている。

皮革の特徴は、採取する動物の種類や部位に大きく依存している。たとえば、牛革では皮溝と呼ばれる溝や、皮溝に囲まれ盛り上がった皮丘で形成される模様が印象的である。ワニなどの爬虫類では比較的皮丘が大きく、その起伏も激しい。一方、豚革では毛孔が目立ち、複数の毛孔が密集する傾向にある。

本論文では、豚や馬、羊などの皮革に見受けられる、毛孔で構成される皮革模様に注目し、実サンプルからの特徴量の抽出と模様の再構成手法を提案する。

2. 皮革について

本章では、はじめに研究の背景について述べる。続いて、対象とする皮革模様の特徴とそのモデルを示し、最後に提案手法の全体像について述べる。

2.1 研究の背景

多くの工業製品には、商品の質感を高めるために、革シボ加工と呼ばれる表面加工がなされている。革シボ加工では、牛や爬虫類などの動物の皮膚の模様を金型に転写し、樹脂などの表面を成型する。転写された天然の模様は、現状では職人が手作業で修正している。多くの場合、これらの作業は3カ月から半年ほどの長時間を要しており、また、職人の高齢化などによる諸問題から、作業工程の効率化が望まれている。

本論文の第1の目的は、皮革パターンデザインの効率化である。本論文では、この問題を解決するために、実サンプルから皮革模様の特徴を抽出し、その特徴量に基づいて新たな皮革模様を再構成する枠組みを提案する。本論文で扱う対象は、多様な皮革模様の一部ではあるが、同様の枠組みを他の皮革模様にも応用できると考える。

2.2 毛孔で構成される皮革模様の特徴

皮革表面は、毛孔や皮溝および、皮丘などから構成されている。皮内に埋もれている毛の部分を毛根と呼び、毛根は毛包で鞘状に囲まれている¹⁾。すなわち、皮革表面の毛孔は、毛が抜け落ちた毛包部にあたる。

皮革模様の構成要素は、動物種や部位、年齢に応じて変化する。たとえば、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、仔牛や仔羊の皮革では皮溝や皮丘が目立たず、数個ずつが密集した多数の毛孔で構成される。密集した毛孔の単位を複合毛包と呼ぶことが多いため、本論文でもそのように呼称する。毛孔で構成される皮革模様の例を、図1に示す。図1の画像は、三角測量法によりスポットレーザ光で深度を計測する3次元測定装置を利用して、15mm四方の大きさ、100 μ mの分解能で仔牛の皮革の深度情報

^{†1} 大日本印刷株式会社
Dai Nippon Printing Co., Ltd.

^{†2} 北陸先端科学技術大学院大学
Japan Advanced Institute of Science and Technology

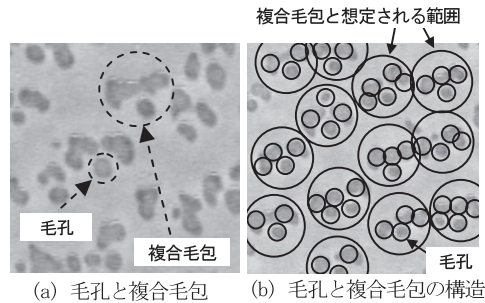


Fig. 1 A scanning height field of a leather surface with pores.

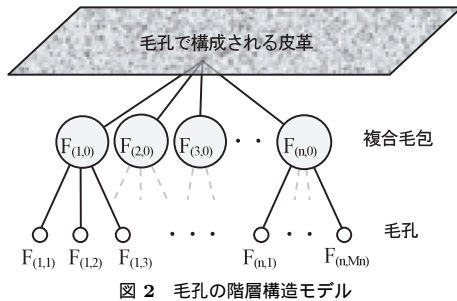


Fig. 2 The layered geometric model for representing pores.

を計測し、深度高低差 $32.14 \mu\text{m}$ を 256 階調に正規化後、グレースケールで表示した画像である。明るいほど浅く、暗いほど深いことを示す。

2.3 皮革モデル

図 1 (b) の観察から、3 個以上の毛孔がクラスタを形成し、各クラスタの毛孔が似た分布や形状を持つことが確認できる。本論文では、各クラスタを複合毛包と見なし、すべての毛孔はいずれかの複合毛包に属すると仮定する。図 2 に示す 2 階層構造モデルにより、毛孔と複合毛包で構成された構造を記述することができる。ここで、 $F_{(i,0)}$ は $F_{(i,j \neq 0)}$ を複合するものとする。

2.4 手法の全体像

手法の全体像を図 3 に示す。まず、3 次元形状測定装置で皮革の実サンプルの表面形状を

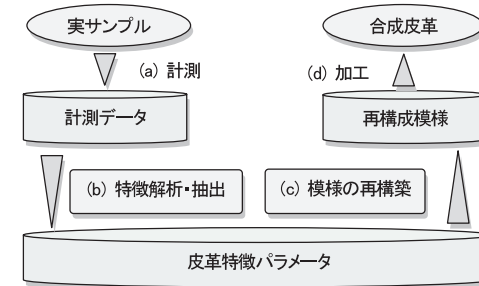


図 3 手法の全体像
Fig. 3 Our method overview.

測定する (a)。続いて、計測データを用いて皮革模様の特徴を解析し、皮革特徴パラメータを抽出する (b)。その後、そのパラメータに基づいて皮革模様を再構成する (c)。最後に、得られた模様を用いて合成皮革などの製品に加工する (d)。4 章以降では、(b) と (c) の手法について述べる。

3. 関連研究

本章では、関連研究として、テクスチャ生成法、皮革模様の生成法および、点の分布法について述べる。

3.1 テクスチャ生成

小さなサンプルテクスチャから大きなテクスチャを生成する方法が数多く報告されている。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つなぎ合わせる Efros らのイメージキルティング²⁾ 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³⁾、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⁴⁾ などがあげられる。

これらのテクスチャ生成法では、実サンプルから生成するために、質の高いテクスチャを得ることができる。一方で、実在するもの以外のテクスチャは生成することは困難であり、合成皮革のデザインという目的からは、若干の隔たりがあると考えられる。

異なるアプローチとして Turk⁵⁾ や Witkin⁶⁾ は、拡散反応方程式を用いたテクスチャ生成手法を提案している。これらの手法では、複数の物質の相互作用をシミュレーションすることにより生物の表面に現れる模様を再現するが、複雑系のセルオートマトンであること

から、意図する模様を生成する適切なパラメータを予測することが難しい。

3.2 皮革模様の生成

3.1 節で述べた手法とは異なるアプローチとして、手続き的なテクスチャ生成法がある。手続き的なテクスチャ生成法のうち、皮革に注目した模様生成は、これまでもいくつか発表されている。石井らの手法⁷⁾は、皮膚の表面形状の特徴である皮丘・皮溝を階層構造化してモデル化している。そして、皮溝パターンをポロノイ分割法で生成し、皮野の断面形状をベジェ曲線で求めている。Wuらの手法⁸⁾では、ドロネー三角化を用いて輪郭を生成し、細部の形状を生成する手法を提案している。Bandoらの手法⁹⁾では、皮革の形状ではなく、曲げによってできるしわを生成している。これは三角形メッシュで体の部位を形成し、その部位の動きによってしわを生成している。Itohらの手法¹⁰⁾では閉領域を擬似ポロノイ分割により敷き詰めを行い、サブディビジョンサーフェイスで詳細形状を生成する。最近では、宮田ら¹¹⁾や Sakuraiらの手法¹²⁾が報告されている。宮田らの手法では、皮革表面の細胞をパーティクルシステムによってシミュレーションし、その結果にドロネー三角化を行い、皮革の形状を生成している。この手法はこれまでの乱数によって生成していたものより、皮革の表面を考慮された手法になっている。Sakuraiらの手法では、皮革に見受けられる“流れ”に注目し、パネモデルを用いて皮革表面の皮溝を生成している。

本研究では、従来の研究で行われていない、毛孔で構成するような皮革形状を生成することを目的とする。ここで、仔牛の毛孔の皮革が市場の大半を占めることから、対象の素材として主に仔牛を用いることとする。

3.3 点の分布

本論文で提案する手法では、複合毛包の配置時に、近隣の複合毛包の中心点との位置関係を考慮する。

均一な点の効率的な配置法として、Dnbarらの手法¹³⁾や Ostromoukhovの手法¹⁴⁾があげられる。

Dnbarらの手法では、Poisson-disk分布を高速に行う手法を提案している。Poisson-disk分布とは、分布された各点からの指定された半径内には他の点を分布しないという処理を繰り返すことによって、点の均一な分布を行う手法である。

Ostromoukhovの手法では、Polyominoをある平面に敷き詰めることで、点を均一に分布させる。点群の密度を調節するためにLloyd's relaxationを行っている。Lloyd's relaxationとは、近隣の点に影響を与え合い、点を移動させることで点群の分布を変える手法である。

本手法では、点の配置のためにPoisson-disk分布とリラクゼーションを行うが、従来手

法のような均一な点の配置ではなく、4.3.2項において後述する複合毛包分布図と同様の分布になる点群を配置することで隣接する点間の距離にばらつきを生じさせる。均一に配置された点群の周波数スペクトル¹⁵⁾は、ブルーノイズ特性を示すが、本手法によって配置された点群は、ばらつきの度合いに応じてブルーノイズ特性を軽減できる。

4. 皮革模様の分析

本章では、皮革表面を計測データから毛孔および複合毛包の位置を推定し、5章で述べる再構成法で利用する特徴パラメータを抽出する手法について述べる。

4.1 特徴分析の流れ

毛孔で構成される皮革模様の特徴とは、毛孔の配置規則が主となる。特徴抽出には、まず、皮革表面を計測したハイトフィールドデータから、毛孔および複合毛包の位置を推定する。そして、これらのデータから、図2に示した2階層の皮革モデルを構築する。最後に毛孔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。

4.2 皮革模様の構成要素の取得

本節では、皮革模様の特徴分析の第1段階である、模様の構成要素の取得法について述べる。なお、ハイトフィールドデータは、256階調のグレースケール画像で表すものとする。

4.2.1 毛孔位置の検出

毛孔は周囲の平坦部より深い。そこでハイトフィールドデータの注目画素とその周辺 $n \times n$ 画素の領域内の画素とを比較し、注目画素値が最小であれば、注目画素を毛孔の候補点とする。ここで n の値は目測で毛孔の直径程度に設定することで、精度良く候補点が検出できる。 n を5とした場合の毛孔候補点の抽出例を図4に示す。これらの候補点(図中の白点)は、平坦部にも最小値が存在するため、実際には毛孔でない点も含まれる。したがって、候補点から平坦部の点群をできる限り削除し、残りを毛孔として検出する。

図5にすべての候補点群の深度に関するヒストグラムの例を示す。この分布は毛孔と平坦部の点を含み、ある深度を中心に分布する毛孔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合算されたものと仮定する。また、毛孔の分布は最頻値を中心に左右で同じ頻度であると仮定する。

この2つの仮定に基づき毛孔と平坦部の点を分離する閾値となる深度値を求める。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 t より浅い点を平坦部の点とし削除した例を、図6

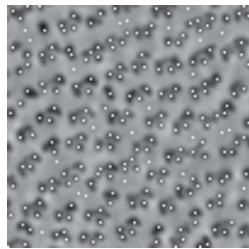


図 4 毛孔候補点の抽出例

Fig. 4 An example of extracting candidate points as pores.

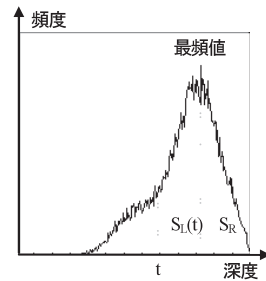


図 5 候補点群ヒストグラム

Fig. 5 A histogram of candidate points as pores.

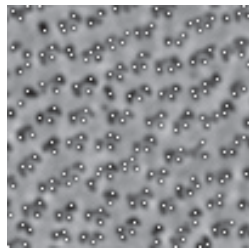


図 6 毛孔以外の点の削除結果

Fig. 6 A result of deleting non-pores in candidate points as pores.

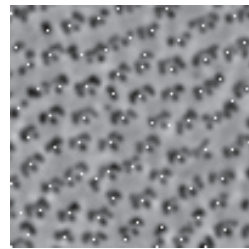


図 7 複合毛孔位置の推定結果

Fig. 7 An result of estimating pore-set positions.

に示す。なお、図中の白点が候補点となる。

4.2.2 複合毛孔位置の推定

複合毛孔は毛孔をグループ化した単位であり、その位置は、以下に述べる階層的クラスタリングを用いて求める。

すべての毛孔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孔位置と定義し、推定する。複合毛孔位置の推定結果を図 7 に白点で示す。

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、複合毛孔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、隣接する複合毛孔の平均距離の半分と見なすことができる。ただしクラスタリング前では複合毛

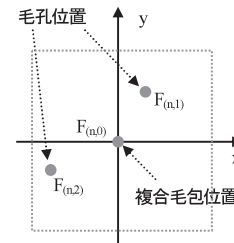


図 8 2次元ヒストグラム

Fig. 8 A two-dimensional histogram.

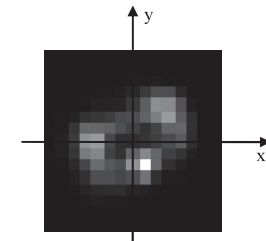


図 9 毛孔分布図

Fig. 9 A pore distribution map.

包の位置が未知なため、複合毛孔間の距離は決定できない。そこで、隣接するクラスタリング前のすべての毛孔間距離を算出し、その最大値を複合毛孔の平均距離と見なす。隣接とは、毛孔位置の点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。

4.3 テクチャ構成要素の分布の特徴付け

本節では、毛孔と複合毛孔の位置の分布傾向を示し、複合毛孔の分布の特徴を少数のパラメータで簡潔に記述する手法について述べる。

4.3.1 毛孔配列の傾向

複合毛孔は 3 個以上の密集した毛孔で形成され、含まれる毛孔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。ここでは対象を 3 個以上の毛孔を含む複合毛孔に限定し、複合毛孔内の毛孔の分布を図示することを試みる。

まず、図 8 のように、横軸を x 、縦軸を y とする 2 次元ヒストグラム V を定義し、各複合毛孔について複合毛孔位置から見た毛孔位置に投票し、毛孔の分布を図示する。毛孔の分布の投票アルゴリズムを擬似言語で記述する。

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

ここで、 $V(\cdot)$ は 2 次元ヒストグラム V 、 N は複合毛孔の総数、 M_n は n 番目の複合毛孔に属する毛孔の個数、 $F_{(n,0)}$ は n 番目の複合毛孔位置、 $F_{(n,m)}$ は n 番目の複合毛孔に所属する m 番目の毛孔位置を表す。図 9 に投票結果を示す。以降、この複合毛孔内の毛孔位置の分布を示す図を、毛孔分布図と呼ぶ。

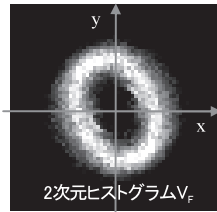


図 10 複合毛包分布図

Fig. 10 A pore-set distribution map.

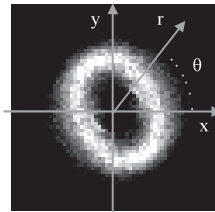


図 11 座標系変換

Fig. 11 A coordinate transformation to polar coordinate system.

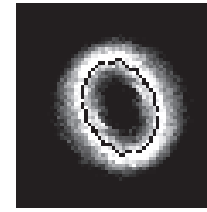


図 12 密度分布の重心群

Fig. 12 Barycentrics of a density distribution

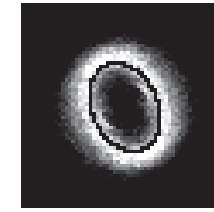


図 13 楕円形状の推定結果

Fig. 13 A result of estimating an elliptical shape on each direction.

4.3.2 複合毛包配列の傾向

次に、隣接する複合毛包の分布を図示することを試みる．ここで隣接とは複合毛包群のドローネー図においてドローネー辺で接続関係にある場合を意味する．

まず、図 8 と同様の座標軸で 2 次元ヒストグラム V_F を定義する．次に推定したすべ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．複合毛包の分布の投票アルゴリズムを擬似言語で記述する．

$V_F(\cdot) = 0$

for $n \in (1 \dots N)$

for $m \in (1 \dots N)$

if(Connect(n, m))

$V_F(F_{(m,0)} - F_{(n,0)}) += 1$

ここで、 $V_F(\cdot)$ は 2 次元ヒストグラム V_F 、 N は複合毛包の総数、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．図 10 に投票結果を示す．以降、この隣接する複合毛包の分布を示す図を、複合毛包分布図と呼ぶ．

4.4 複合毛包分布のパラメータ近似

図 10 を観察すると、複合毛包は傾いた楕円形状に分布していることが確認できる．以降、分布状態を定義する楕円形と、楕円形を中心とした密度分布をいくつかのパラメータで推定する．

4.4.1 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、図 11 に示すように、複合毛包分布図の 2 次元ヒストグラム V_F に対し極座標系を導入する．次に、図 12 に示す

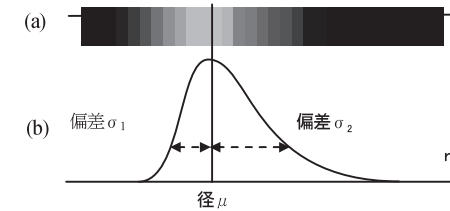


図 14 角度 θ における r 方向の密度分布

Fig. 14 A density distribution on a direction of r in angle θ .

ように、いくつかの角度 θ における r 方向の密度分布の重心（図中の白いリング内の黒点）を算出する．最後に重心群から式 (1) の楕円形の方程式の係数を最小二乗法で推定する．

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

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 13 に示す．

4.4.2 楕円形を中心とした密度分布のパラメータ化

続いて、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 14 に示すように、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．ここで r 方向の密度分布は径 μ を境に左右で異なった偏りの分布を示す．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 つの正規分布と見なし、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．

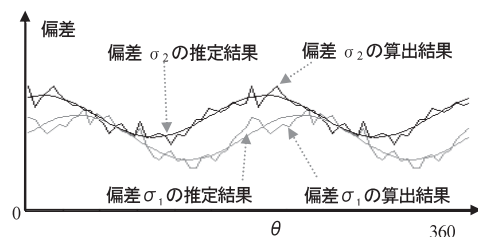


図 15 2 偏差の算出結果と推定結果

Fig. 15 Comparisons of calculating and estimating two deviations.

$$f(r) = \frac{1}{\sqrt{2 \times \pi \times \sigma(r)^2}} e^{-\frac{(r-\mu)^2}{2 \times \sigma(r)^2}} \quad (2)$$

$$\sigma(r) = \sigma_1 \times (1 - p(r)) + \sigma_2 \times p(r) \quad (3)$$

$$p(r) = \int_{-\infty}^r \frac{1}{\sqrt{2 \times \pi \times \sigma_2^2}} e^{-\frac{(r-\mu)^2}{2 \times \sigma_2^2}} \quad (4)$$

$$\text{ただし, } \sigma_2 > \sigma_1, \int_{-\infty}^{\infty} f(r) = 1$$

式 (2) の $f(r)$ 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を表し, 式 (3) の $\sigma(r)$ 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. 式 (4) の $p(r)$ 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.

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 15 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. そこで式 (5) の正弦波の方程式を最小二乗法で推定する.

$$\sigma(\theta) = d \times \sin(\theta - e) + g \quad (5)$$

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 , および平均値 g の合計 9 個のパラメータで記述できる.

5. 皮革模様の再構築

毛孔で構成される皮革形状のパターンを生成するために, 次の手順を行う.

1. 複合毛包の中心点の生成
2. 毛孔のマッピング
3. 毛孔の形状定義

本章では, これらの手順について述べる. 入力情報として, 複合毛包分布図を近似した関数の 9 個のパラメータ群と複合毛包の密度 ρ , 複合毛包内の毛孔の分布図, 毛孔の形状を用いる.

5.1 複合毛包位置の決定法

皮革模様の再構築の第 1 段階として, 複合毛包の中心点となる点を分布させる.

複合毛包分布図を式 (1)–(5) に 9 つのパラメータを入力し再生成する. ここで, 複合毛包分布図の確率によって点の位置を推定する方法では, 計算時間がかかる. 高速化のために, 大まかな点群を Poisson-disk 分布¹¹⁾ によって生成させ, その後, パラメータより再生成した複合毛包分布図と近い分布ができるように, 発生させた点群を移動させる.

5.1.1 Poisson-disk 分布

はじめに, Poisson-disk 分布を用いて大まかな点群を 2 次元上に生成する. 大まかな点群とは, 発生するはずのない点群を排除した点群のことである.

複合毛包分布図はある点の近隣に発生する点の確率を示している. すなわち, 複合毛包分布図の中心から複合毛包が存在しうる領域までは, 点群が発生しない領域といえる. これを抽出したものが図 16 (b) に示す排他的な領域である.

指定した領域に対し, 密度 ρ から, 最終的にできる点群の数 N を算出しておく. $2N$ 以内の十分な数の点を発生させ, 発生させた点に, 排他的な領域を設定し, 他の点が打たれないようにする. 排他的な領域で全領域が充填された場合, 本処理を終了する.

5.1.2 点の順位と点の削除

入力の複合毛包分布図と 5.1.1 項の点群の複合毛包図を比較して, 点を削除するための順位をつける. 点を削除する理由は, 入力に出力結果を近づけるためである. すべての近隣に対して複合毛包分布図を照合し, 点に複合毛包分布図の確率を加算していく. すべての点にその処理が終わったとき, ソートし順位を決める.

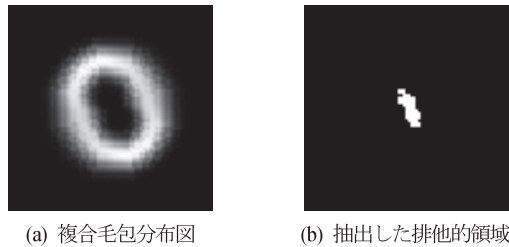


図 16 排他的な領域
Fig. 16 An exclusive region.

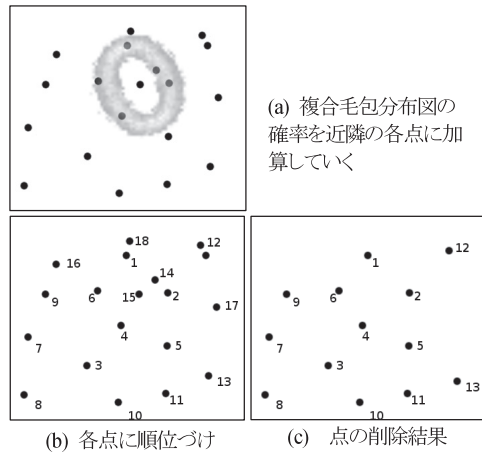


図 17 順位付けによる点の削除
Fig. 17 A deletion of points by ranking.

図 17 に示すように、順位が最終点群数 N より低いものを削除し、プロットされている点群の複合毛包分布図を入力複合毛包分布図に近づける。

5.1.3 リラクゼーション

5.1.2 項の点の削除処理のみでは、再生成した複合毛包分布図と 5.1.2 項までの処理後の点群の複合毛包分布図との差が大きい。そのため、点の移動を行うことでその差を軽減する。

再生成した複合毛包分布図の勾配ベクトル場 M を求め、点を移動させる。このとき、ベクトル場 M のみを考慮した点の移動では、尾根部分に点の分布が集まる。点群の分布を再

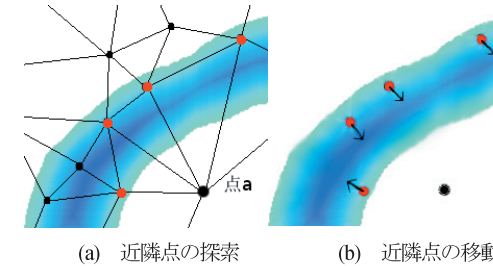


図 18 点の移動
Fig. 18 Our relaxation.

生成した分布に近づけるため、分布された点群から複合毛包分布図を計算し、再生成した複合毛包分布図との差の勾配ベクトル場をベクトル場 M に加算する。なお、ベクトル場 M の各ベクトルは正規化する。分布された点群の複合毛包分布図と再生成された複合毛包分布図の差を移動量の係数とし、図 18 のようにベクトル場に従った移動をすべての点に行う。ここで、ベクトル場の影響を与えられるのは、ドロネー三角化を用いて判定する近隣点のみとする。

5.2 複合毛包内の毛孔の配置

続いて、生成された複合毛包の中心位置に毛孔を配置する。毛孔位置の分布には、図 19 (d) に示すような複合毛包内の毛孔の分布図を用い、複合毛包の中心点に割り当てる。分布図は毛孔の中心の分布を示すもので、形状を定義するわけではない。形状に関しては、5.3 節で後述する。

5.3 毛孔の形状定義

5.2 節で求めた結果の毛孔位置に毛孔の形状をあてていく。図 19 (a1), (a2), (a3) を観察すると、毛孔の周囲が隆起している傾向が見られる。毛孔周辺の隆起の形状を関数によって定義し、擬似的に再現する。ここでは式 (6) に示す Laplacian of Gaussian を用いる。

$$f(d) = \begin{cases} \text{if}(f_{LoG} > 0) & p_{coef} \cdot f_{LoG}(d) \\ \text{else} & m_{coef} \cdot f_{LoG}(d) \end{cases} \quad (6)$$

$$f_{LoG}(d) = -v \cdot \left(1 - \frac{d^2}{\sigma^2}\right) \exp\left(-\frac{d^2}{\sigma^2}\right)$$

ここで d は毛孔の中心点からの距離、 v は高さ、 σ は幅を決める定数、 p_{coef} は隆起部分に

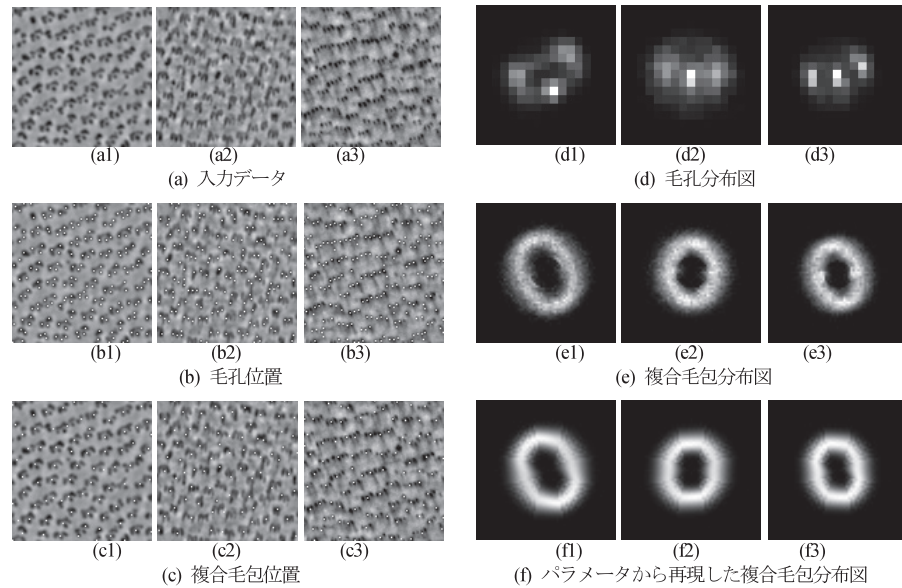


図 19 特徴抽出の結果
Fig. 19 Characteristic extraction.

かかる係数, m_{coef} は毛孔の部分にかかる係数である。なお, 毛孔の形状に揺らぎを付加するために, v と σ にランダムな値を足し, 式 (6) で示す関数によって形状を定義する。これらのパラメータの値は, 入力データの毛孔の形状から推測して決定する。

6. 結果と考察

本章では, 毛孔で構成された皮革の例として仔牛の皮革サンプルを対象に, その特徴抽出と, 皮革模様の再構成の 2 つに分けて, 結果と考察を示す。

6.1 皮革サンプルからの特徴抽出

毛孔で構成された仔牛の皮革サンプルとして, 図 19(a) に示す 3 種類を用意した。3 次元形状測定装置 (キーエンス社製: センサ LK-G30, ステージ K2-300) を用いて $9\text{ cm} \times 9\text{ cm}$ の領域を $90\ \mu\text{m}$ 間隔で計測し, 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, 毛孔検出時の極小値の比較領域範囲

表 1 抽出したパラメータ
Table 1 Extracted Parameters.

入力データ		1	2	3
楕円形	傾き β	24.07	81.68	12.62
	軸 a	10.29	11.81	8.68
	軸 b	14.01	9.93	11.65
偏差 σ_1 の正弦波	振幅 d	0.160	0.236	0.152
	位相 e	-0.432	-0.605	0.050
	平均値 g	2.818	2.525	2.524
偏差 σ_2 の正弦波	振幅 d	0.550	0.336	0.310
	位相 e	-0.389	-0.620	-0.655
	平均値 g	3.094	3.139	2.891

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推定した。その結果を図 19 に示すとともに, 推定されたパラメータを表 1 に示す。

図 19(a1) の毛孔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。これは, 図 19(d1) の毛孔分布図においても同様の傾向が見られ, 毛孔の分布の特徴をよくとらえているといえる。また, 入力データの複合毛孔位置の推定結果を示す。

図 19(c1) 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。図 19(e1) の複合毛孔分布図においても同様の分布が見られ, 複合毛孔の分布の特徴をよくとらえているといえる。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。

6.2 皮革模様の再構成

皮革模様の再構成に用いた計算機環境は, OS: Windows XP, CPU: Intel Pentium4 3.4 GHz, 1 GB メモリである。まず, 図 19(e1) の複合毛孔分布図を入力とした, 複合毛孔の点群の生成結果を図 20 に示す。図 20 は, 点のリラクゼーション処理の効果を示したものである。図 20(c1) と (c2) から, リラクゼーションにより入力とした複合毛孔分布図に近付いたことが確認できる。このことを定量的に確認するために, 図 19(e1), (e2), (e3) の複合毛孔分布図を入力とした再構成について, リラクゼーション前後の複合毛孔分布図と原点を一致させ, 絶対誤差の総和をそれぞれ算出した結果, 表 1 の入力データ 1 の場合は 17,473 から 8,721, 入力データ 2 では 22,903 から 6,667, 入力データ 3 では 20,554 から 8,460 にそれぞれ低減した。

続いて, 得られた点群に毛孔形状を付加したものを図 21(b1), (b2), (b3) に示す。

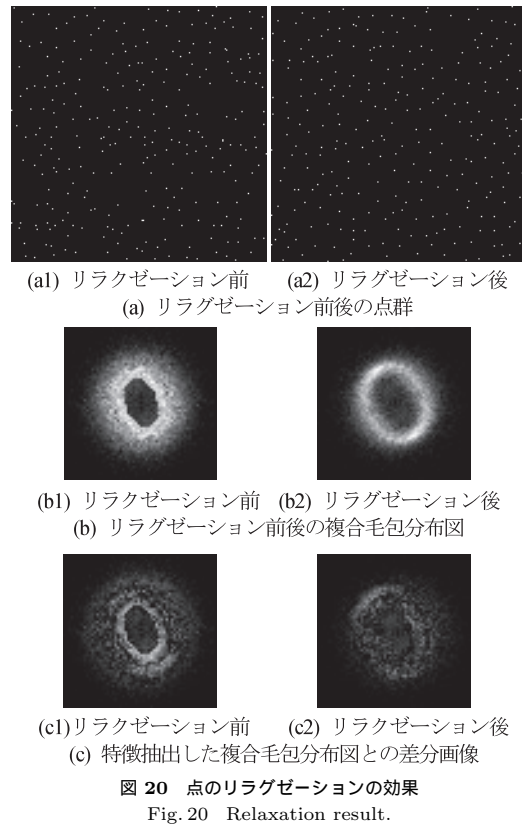


図 21 (a1), (a2), (a3) は図 19 (a1), (a2), (a3) をエンボス処理した画像である。ここで、図 21 (b1), (b2), (b3) はそれぞれ、図 19 (e1), (e2), (e3) に対する結果であり、図 22 (b) は図 22 (a) に対する結果である。

特徴を表すパラメータの操作により皮革模様の生成が可能であれば、多様な皮革模様を直感的に生成することが望める。表 1 の入力データ 1 のパラメータを基準とし、楕円形の傾き β を 0° (図 23 (a1)), 楕円形の軸 b を 1.2 倍 (図 23 (b1)), 偏差 σ_1 の正弦波の振幅 d を 10 倍 (図 23 (c1)) にそれぞれ変更して、複合毛包分布図を再生成し、各複合毛包分布図と入力データ 1 の毛孔分布図を用いて毛孔の皮革模様を再構成した (図 23 (a2), (b2),

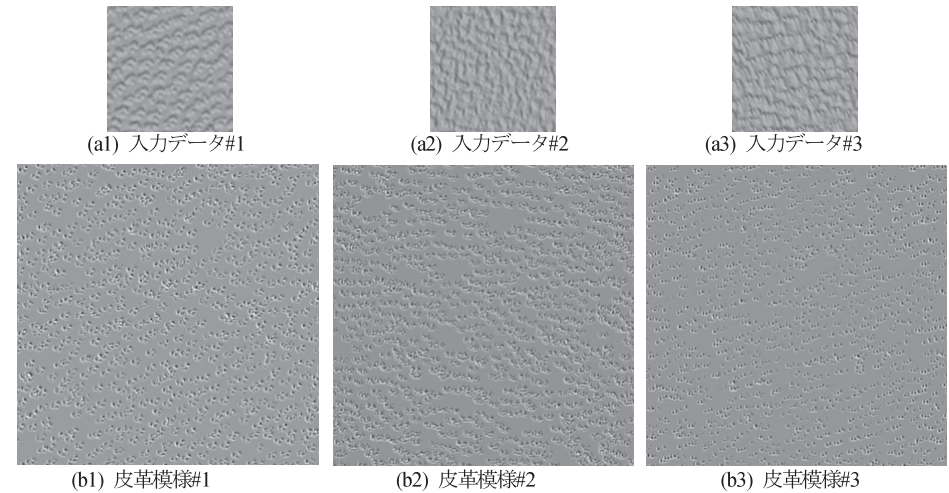


図 21 仔牛の入力データと皮革模様の再構成例
 Fig. 21 Input data and reconstructed examples (calf).

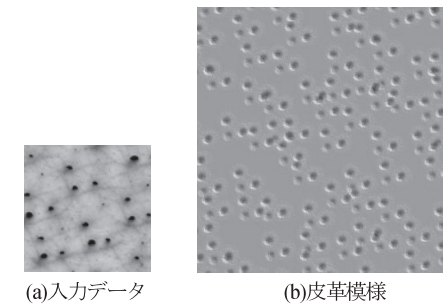


図 22 豚の皮革模様の再構成例
 Fig. 22 Input data and a reconstructed example (pig).

(c2)). 図 23 (a1) では楕円形の傾きを 0° にしたため、図 23 (a2) では複合毛包が縦方向に連なる傾向にある。図 23 (b1) では楕円形の軸 b が基準より長くなるため、図 23 (b2) では軸 b の方向に複合毛包の間隔が広がる傾向にある。図 23 (c1) では複合毛包分布図の内側の振幅が増加したことで、複合毛包の間隔のばらつきが軸 b の方向付近で基準より小さく、

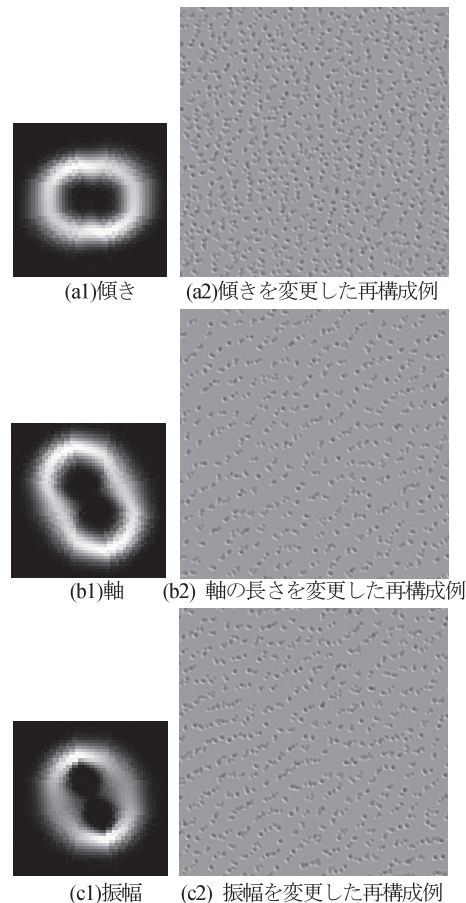


図 23 複合毛包分布図のパラメータを変更したときの皮革模様の再構成例

Fig. 23 Reconstructed examples in changing parameters of the pore-set distribution map.

軸 a の方向付近で大きくなる。これは軸 b の方向では複合毛包が一定間隔で配置されやすくなることを意味し、図 23 (c2) では複合毛包の連なりがより明らかに現れている。このようにパラメータの変更により、複合毛包分布図が変化し、その変化に応じて皮革模様が再構成されるため、多様なバリエーションをパラメータの操作によって直感的にデザインできる

ことが確認できる。

図 24 は、手帳のモデルの表面に図 21 の結果ならびに図 22 (b) をマッピングさせた例である。参考までに、左上に一部を拡大した画像を載せる。この例から、毛孔の分布の違いによる見た目の差異が見てとれる。

デザイナーがインタラクティブに皮革模様をデザインするには、応答時間が 3 秒程度以内、表示サイズが 10×10 cm 以上 (画像サイズでは 400×400 ピクセル以上) であることが望ましい。本手法での計算時間は、画像サイズ 400×400 ピクセルで、最終的な複合毛包の点の数 N が 10,000 個のとき、複合毛包の位置を計算するための時間が約 1 分、毛孔の形状定義にかかる時間が約 30 秒である。複合毛包位置を計算する時間のほとんどが点の移動に関するもので、この処理の高速化を図ることで時間の短縮が望める。また、形状定義に関しては、関数を用いて形状を定義しているが、本実装では高速化をほどこしていないため、空間分割手法を用いるとさらに高速になると考える。

7. おわりに

本研究では毛孔で構成された皮革模様を対象に、特徴を簡潔に記述する手法と、抽出したデータから皮革模様を再構成する手法を提案した。

皮革模様の特徴抽出にあたり、まず、毛孔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、毛孔で構成された皮革形状から毛孔と複合毛包の位置を推定後、毛孔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、毛孔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。

皮革模様の再構成に関しては、複合毛包の分布と複合毛包内の毛孔の分布の 2 段階の分布処理を行い、最後に毛孔の形状を生成した。複合毛包の分布では、近隣の複合毛包の存在確率を用いて、大まかな点群を生成し、そこから点の削除と点の移動を行い、複合毛包の中心点の点群を生成した。毛孔の分布では、生成された複合毛包の中心から、毛孔の存在確率を貼り付け、毛孔の位置を推定した。最終的に、関数で定義された毛孔の形状を適用し、皮革模様形を生成した。

今後は、毛孔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、毛孔や複合毛包だけでなく、毛孔の形状や毛孔の向き (仰角, 方位角), 大局的な毛孔の向きの流れ, 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、模様の質感向上に努めたい。さらに特徴量の混合による、新たな皮革模様のデザイン手法の確立も目指す。

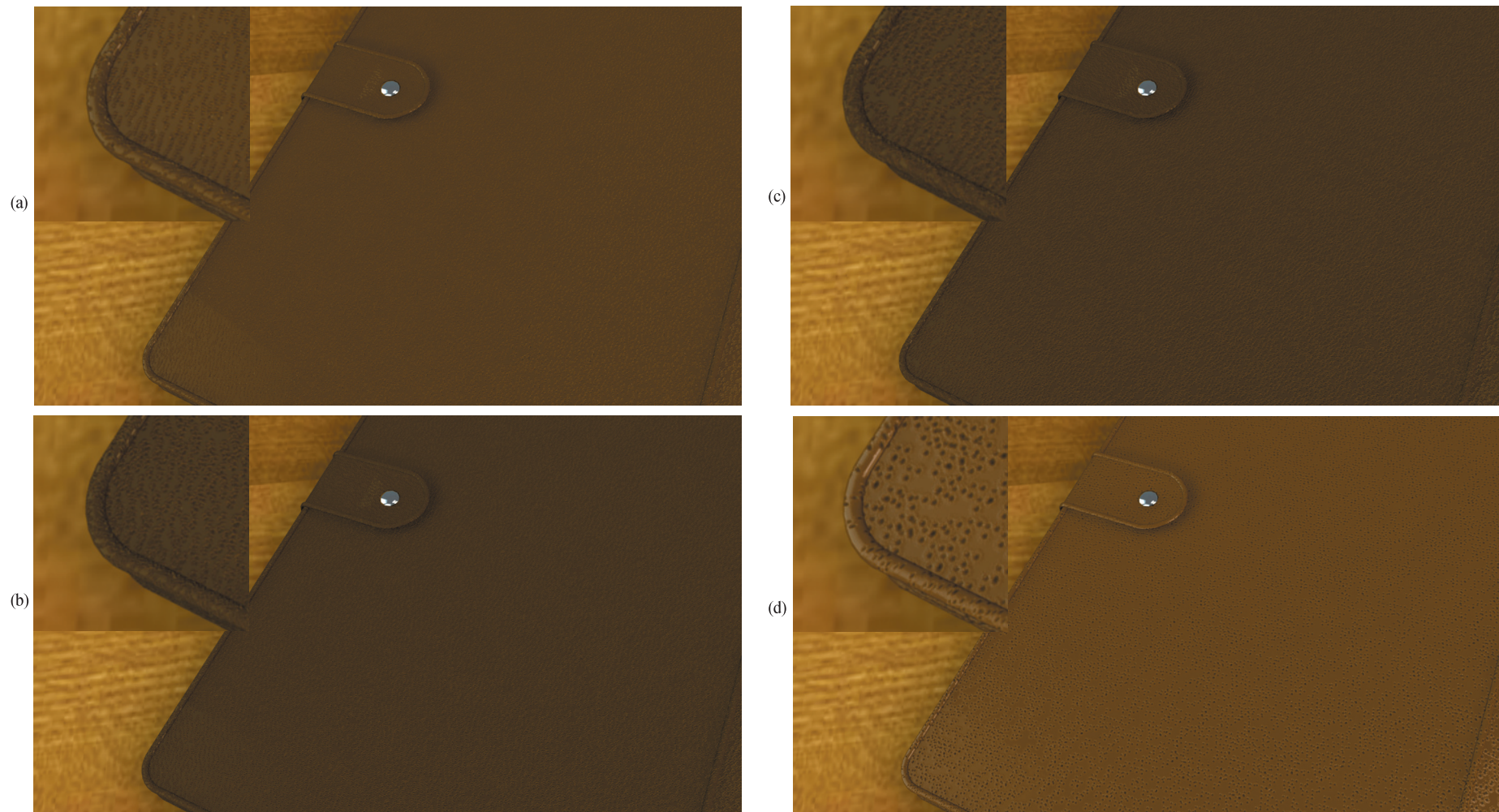


図 24 再構成した皮革模様のレンダリング画像と拡大図
Fig. 24 Rendering images and the close-up with the reconstructed examples.

謝辞 皮革サンプルを提供いただき、デザイナーの観点から貴重な意見をいただいた栗原豊氏ならびに中島康成氏に深謝する。

参 考 文 献

- 1) 小川和朗ほか(編): 人体組織学, 第2巻 結合組織・皮膚とその付属器, 朝倉書店(1984).
- 2) Efros, A. and Freeman, W.: Image quilting for texture synthesis and transfer, *Proc. SIGGRAPH '01*, pp.341-346 (2001).
- 3) Heeger, D.J. and Bergen, J.R.: Pyramid-Based Texture Analysis/Synthesis, *Proc. SIGGRAPH '95*, pp.229-238 (1995).
- 4) Matusik, W., Zwicker, M. and Durand, F.: Texture Design Using a Simplicial Complex of Morphable Textures, *Proc. SIGGRAPH '05*, pp.787-794 (2005).
- 5) Turk, G.: Generating textures for arbitrary surfaces using reaction-diffusion, *Proc. SIGGRAPH '91 Computer Graphics*, Vol.25, No.4, pp.289-298 (1991).
- 6) Witkin, A. and Kass, M.: Reaction-diffusion textures, *Proc. SIGGRAPH '91 Computer Graphics*, pp.299-308 (1991).
- 7) 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, *情報処理学会論文誌*, Vol.32, No.5, pp.645-654 (1991).
- 8) Wu, Y., Kalra, P. and Thalmann, N.M.: Simulation of Static and Dynamic Wrinkles of Skin, *Proc. Computer Animation '96*, pp.90-97 (1996).
- 9) Bando, Y., Kuratate, T. and Nishita, T.: A Simple Method for Modeling Wrinkles on Human Skin, *Proc. Pacific Graphics 2002*, pp.166-175 (2002).
- 10) Itoh, T., Miyata, K. and Shimada, K.: Generation of Organic Textures with Controlled Anisotropy and Directionality via Packing, Rectangular and Elliptical Cells, *IEEE CG & A*, Vol.23, No.3, pp.38-45 (2003).
- 11) 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).
- 12) Sakurai, K., Miyata, K., Kawai, N. and Matsufuji, K.: Leather Texture Generation Considering Sulci Flow, *Proc. IEVC2007*, 1B-1, pp.1-6 (2007).
- 13) Dnbar, D. and Humphrys, G.: A Spatial Data Structure for Fast Poisson-Disk Sample Generation, *Proc. SIGGRAPH 2006* (2006).
- 14) Ostromoukhov, V.: Sampling with Polyominoes, *Proc. SIGGRAPH 2007* (2007).
- 15) Ulichney, R.A.: Dithering with blue noise, *Proc. IEEE*, Vol.76, Issue 1, pp.56-79 (Jan. 1988).

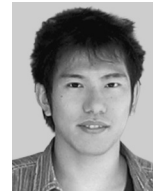
(平成 20 年 10 月 20 日受付)

(平成 21 年 5 月 13 日採録)



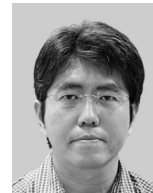
松藤 和夫

1999年東京農工大学工学部電子情報工学科卒業, 2001年東京農工大学大学院工学研究科博士前期課程修了, 同年大日本印刷(株)入社。現在, 大日本印刷(株)情報コミュニケーション研究開発センター勤務。CG技術を利用した質感表現技術および画像処理技術に関する研究・開発に従事。ACM 会員。



櫻井 快勢

2006年金沢工業大学工学部情報工学科卒業。同年北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科博士前期課程入学。質感表現の研究に従事。ACM 学生会員。



宮田 一乗(正会員)

1984年東北大学工学部応用物理学専攻卒業。1986年東京工業大学大学院総合理工学研究科物理情報工学専攻修士課程修了。同年日本アイビーエム(株)東京基礎研究所研究員。1998年東京工芸大学芸術学部助教授。2002年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教授。現在に至る。博士(工学)。コンピュータグラフィックス, メディア表現に関する研究に従事。電子情報通信学会, 画像電子学会, 芸術科学会, IEEE, ACM 各会員。



河合 直樹(正会員)

1988年名古屋大学工学部電気学科卒業。1990年同大学大学院工学研究科情報工学専攻修士課程修了。同年大日本印刷(株)入社。コンピュータグラフィックス, 画像処理の産業デザインへの応用に関する研究に従事。現在, 大日本印刷(株)情報コミュニケーション研究開発センター SP メディア研究所主席研究員。IEEE, ACM SIGGRAPH 各会員。