2006－CG－125 (3)
2006／11／16

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

宮田 一乗† 坂口 嘉之‡ 今尾 公二‡ 須崎 亮太郎‡
†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
‡デジタルファッション(株)

本報告では，パーティクルシミュレーションとメタボールモデル(ブロッブモデル)を用いた皮革テクスチャの自動生成手法を提案する．はじめに，三次元のパーティクルシステムを用いて，皮革テクスチャ内の皮革細胞の配置パターンを決定する．その後，各皮革細胞に対してメタボールを付加して表面形状を生成する．提案手法を用いることで，細胞の配置パターンを各種パラメータや細胞の向きなどで制御し，さまざまな皮革パターンを得ることが可能になる．

A Method of Leather Texture Generation using Particle and Blobby Model

Kazunori Miyata†, Yoshiyuki Sakaguchi‡, Koji Imao‡, Ryotaro Suzaki‡
†Center for Knowledge Science, Japan Advanced Institute of Science and Technology
‡Digital Fashion, Ltd.

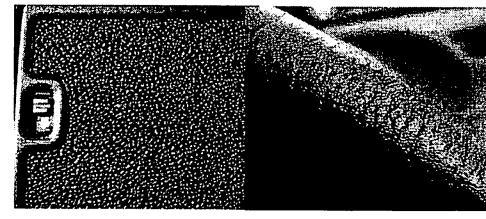
This paper introduces a new method for generating leather texture by means of particle simulation and blobby model. The method first generates a cell arrangement pattern using a 3D particle model, and the detailed surface geometry of each of the cells is then created by applying a blobby model. A user can create various types of realistic looking leather textures with ease by simply choosing a cell arrangement type, and selecting directionality for each section, along with inputting control parameters in the texture generator.

1. はじめに

生物の皮膚面における材質感表現は，皮革製品や自動車の内装材の CG 表現，または特撮映画での利用などが想定される．特に，“革シボ”と呼称される素材は，自動車の内装材として幅広く利用されており，内装の質感を大きく左右する要因でもある．高級車では内装に本革を使用している例もあるが，ダッシュボード周りでは革シボのパターンを金型に転写してプラスチック成型したものが多用される．革シボを用いた工業製品の例を図 1 に示す．

これらの金型のシボ加工には，エッチングなどの化学的除去法や，サンドブラストなどの物理的除去方法が用いられており，金型の成型技術の進歩とともに，シボデザインが商品の意匠価値を高める要因となっている[1]．現状のシボデザイン工程では，職人が手作業で転写したパターンを編集しており，短時間で種々のバリエーションを検証できるほど効率的ではない．

本報告では，シボ加工のデザイン工程の効率化を目指した，皮革テクスチャの自動生成手法について述べる．



(a) カメラの裏蓋　　(b) 車のステアリング
図1 革シボを用いた工業製品の例

2. 関連研究

物体表面の微細構造を表現する手法としては，バンプマッピングやディスプレイスメントマッピングおよ

び，レリーフマッピングなどの各種マッピング手法が広く用いられている．一方，表現する素材を特化して，3次元の石垣パターンの生成を提案した例[2]や，石畳を表現した例[3]が報告されている．

また，本研究で題材としているような有機的な素材の表現法としては， Reaction-diffusion方程式のテクスチャ生成への応用 [4, 5]や，Perlinのノイズ関数を応用したテクスチャ生成法[6]などが挙げられる．

本手法と関連の深い研究としては，まず，人の皮膚の微細形状を自動生成する手法[7]が挙げられる．この手法では，皮膚の表面形状の特徴である皮野・皮溝を階層構造化してモデル化している．そして，皮溝パターンをボ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．

Cellular Texture 法[8]（以下，CT 法）では，セルプログラムにより性格付けされたパーティクルが，位置や方向性および，周囲のパーティクルの影響などを考慮しながら，テクスチャを貼り付ける物体表面に配置される．その後，配置された各パーティクルはとげや半球などの幾何形状に置き換えられ，最終的な物体表面のテクスチャが生成される．これにより，うろこやとげなどの表面の詳細形状を生成することが可能である．

一方，CT 法を拡張した手法である，異方性メッシングによる有機的な表面形状の自動生成法[9]では，物体表面をパーティクルモデルにより擬似ボロノイ分割し，分割された各ポリゴンに対してフラクタルノイズを伴ったサブディビジョン曲面を発生させて，物体表面の詳細形状を生成する手法を提案している．

本手法では，従来研究に対して，生物の皮膚細胞の成長シミュレーションを適用し，より自然な皮革テクスチャの生成を試みた．

3. 皮革モデルと細胞の成長シミュレーション

本章では，皮革細胞モデルとパーティクルシステムを用いた細胞の成長シミュレーション法について述べる．

3.1 皮膚の構造

本手法では，以下に述べるような生物学的なモデルに基づいた細胞の配置手法を用いている．

図2に示すように，一般に動物の皮膚は，内側から真皮，表皮(+角質)などから構成される多層レイヤー構造を持つ．真皮は表皮を下支えする構造物であり，表皮と真皮との境界にある基底膜を介して，栄養や酸素，および老廃物を交換する．表皮の細胞は，基底膜近辺で定期的に細胞分裂し，体表面に向かって押し出されていく．そして，角質層に至った細胞は，やがて役目を終えて，体表面から剥離する[10]．

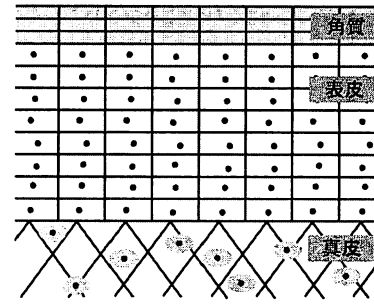
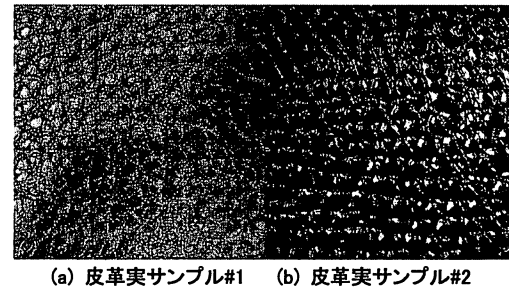
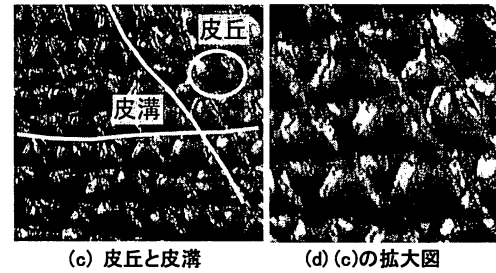


図 2 皮膚の構造



(a) 皮革実サンプル#1　(b) 皮革実サンプル#2



(c) 皮丘と皮溝　(d) (c)の拡大図

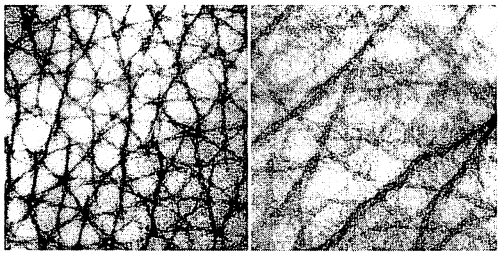
図 3 皮革の実サンプル

図3に皮革の実サンプルを示す．皮革の外観である角質層では，図 1(c)の白線に示すような，皮溝と呼ばれる溝が刻まれており，皮溝により形成されている閉領域を皮丘と呼ぶ．皮丘は，底面が三角形もしくは四辺形の形状をしているものが多く，領域の中心に向かって丘のように若干盛り上がっている．

皮膚表面の特徴量である，皮溝と皮丘の関係を把握しやすくするために，レーザ変位測定器を用いて皮革サンプルの表面の凹凸を測定し，グレイスケールの画像として表示した結果を図 4 に示す．

図4の画像中の画素が白に近いほど，対応する測定点における高さが高くなっている．この図からも明らかなように，皮溝はメッシュ状に配置されており，その閉領域がほぼ三角形もしくは四辺形の形状で構

成されていることが観察できる.



(a) 皮革の表面 #1　　(b) 皮革の表面 #2

図 4 皮革表面の観察結果

3.2 皮革細胞モデルとシミュレーション

本手法では，いくつかの細胞をクラスタ化したものを，マクロレベルでの皮革細胞と定義する．そして，この皮革細胞を楕円体パーティクルとしてモデル化し，楕円体パーティクルの3次元空間内での挙動をシミュレーションする．

3.2.1 パーティクルの誕生・成長・死滅

各パーティクルは，図5に示すような生成から死滅までのライフサイクルを有するものとする．パーティクルは，直方体で定義されたシミュレーション空間の底部(皮膚モデルの基底膜付近に相当する)で生成され，シミュレーションサイクルの経過に伴い，成長しながら上方，すなわち体表面へと移動する．この際，パーティクルは近傍の他のパーティクルと干渉しながら移動する．そして，定められた寿命を迎えると死滅し剥離する．

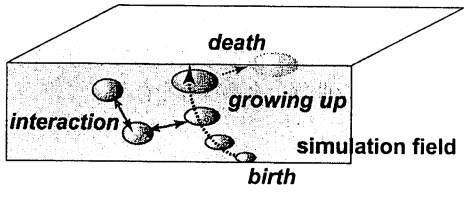


図 5 細胞の成長モデル

細胞の誕生すなわち，パーティクルの発生速度は，シミュレーションサイクル(1世代)ごとに式(1)で表させるシグモイド関数で制御し，求められた個数分を基底面で発生させる．式(1)のシグモイド関数を用いることで，発生個数は世代を経るにしたがって図6に示すような減衰，すなわち新陳代謝の老化を模すことになる．

$$NumberofBirth = a \cdot e^{-\exp(-k(t-t0))} \qquad (1)$$

ここで，a は初期値，t0 はシグモイド曲線の変曲点の位置，k は変曲点における傾きを表す．誕生するパーティクルの大きさも，同様にシグモイド曲線で制御し，時間の経過にしたがって生成するパーティクルの大きさを縮小させる．

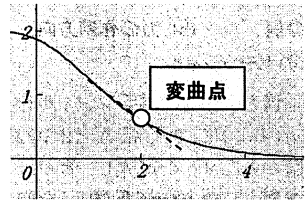


図 6 シグモイド曲線の例

パーティクルは，式(2)で定義される関数で，シミュレーションサイクルごとにパーティクルの大きさを大きくして成長させる．

$$CurrentSize = InitialSize \times (1 - e^{-ratio \times t}) \qquad (2)$$

ここで，ratio は成長率，t はシミュレーションサイクルの世代である．

パーティクルは閾値以上の時間を経ると死滅し，シミュレーション空間から削除する．

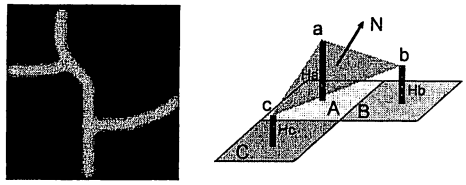
3.2.2 パーティクルシミュレーション

パーティクル間に働く力は，バブルメッシュ法[11]で用いられているモデルを応用した．個々の楕円体に，分子間力(ファンデアワールス力)に類似した粒子間力(引力または斥力)が作用するものと仮定する．また，隣接粒子間の安定距離を，粒子半径の和とする．

隣接粒子間の安定距離を w_0，安定距離に対する現在の粒子間距離をwとしたときに，式(3)で示すような3次関数を用いて粒子間力 F_pを算出する．ここで，a,b,c,d は定数である．

$$F_p = \begin{cases} aw^3 + bw^2 + cw + d & (0 < w < 1.5w_0) \\ 0 & (1.5w_0 < w) \end{cases} \qquad (3)$$

また，シミュレーション空間には，パーティクルの配向を制御する場のポテンシャルを定義できる．場のポテンシャルは，場に対して一定方向に作用する力，もしくは，グレイスケールの画像(画素値は0から255の間)として与えることが可能であり，基底膜にあたるシミュレーション空間の底面に割りあてられるものとする．



(a) 場のポテンシャルの例　　(b) 力の作用方向

図 7 場のポテンシャル

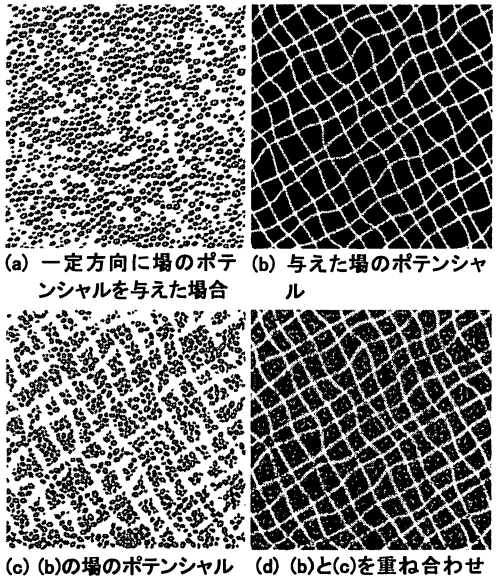
図 7(a)に示すような画像として場のポテンシャルを与えた場合，図 7(b)に示すように，ある点 A と2つの隣接点 B,C での画素値から△abc を定義し，その三角形の法線方向 Nを求め，Nの方向に斥力 F_nを作用させる．ここで，図 7(b)中の点 a,b,c における高さ Ha,Hb,Hc の値は，画素値に比例するものとする．

以上述べた粒子間力 F_pと場のポテンシャルによる斥力 F_nを合力して，式(3)に示す運動方程式を解くことで，シミュレーションサイクルごとの全パーティクルの挙動を計算する．

$$m\ddot{x} + c\dot{x} = F_p + F_n \qquad (3)$$

なお，計算には Runge-Kutta 法[12]による数値積分を用いた．ここで，m はパーティクルの質量を，c は粘性係数(定数)である．

図 8 に，パーティクルシミュレーションの例を示す．



(a) 一定方向に場のポテンシャルを与えた場合　(b) 与えた場のポテンシャル

(c) (b)の場のポテンシャルを与えた場合　(d) (b)と(c)を重ね合わせて表示

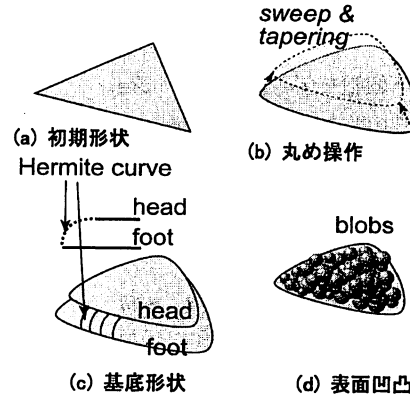
図 8 パーティクルシミュレーションの結果

4. 皮革テクスチャの生成

皮革テクスチャは，3 章で述べた手法で生成された皮革細胞の配置パターンを基に，図 9 に示すように各皮革細胞に対してテクスチャリングを行うことで求められる．

皮革細胞のテクスチャリングでは，以下の2段階の処理を施す．

(1) 皮革細胞の基底形状の生成
(2) メタボールを用いた表面の微細形状の付加



(a) 初期形状　(b) 丸め操作

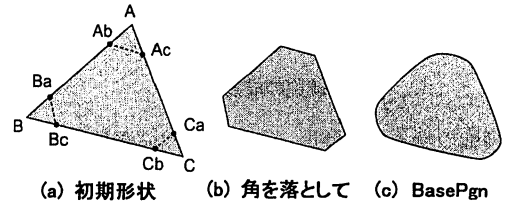
(c) 基底形状　(d) 表面凹凸

図 9 皮革細胞のテクスチャリング

4.1 皮革細胞の基底形状の生成

皮革細胞の基底形状の生成の前に，パーティクルの中心点を連結して，メッシュの生成を行う．そして，皮革細胞の基底形状は，領域分割したメッシュの各閉領域の形状(以降，初期形状とよぶ)に基づいて生成する．

まず，図 9(a)に示す初期形状に対して，図 9(b)のようにスプライン曲線で丸め操作を行う．



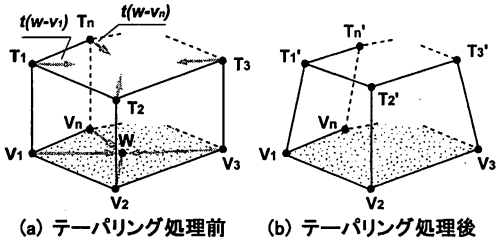
(a) 初期形状　(b) 角を落として 6 頂点へ　(c) BasePgn

図 10 丸め操作

丸め操作には，図 10(a)に示すように，初期形状である△ABC の各頂点から，辺の長さを s 倍した距離に位置する点を計6つ求める．例えば，頂点 A から辺 AB の s 倍の距離に位置する点 Ab，辺 AC の s

倍の距離に位置する点 Acを求める．求められた6頂点で張られるスプライン曲線を多角形近似した BasePgn を求め，丸め操作を完了する．

つづいて，BasePgn を底面とし，底面を指定された高さだけ底面の法線方向に掃引した多角柱を生成する．掃引の際には，パラメータで指定された量だけテーパリングを行い，上面が底面よりも小さくなるような処理を行う．



(a) テーパリング処理前　(b) テーパリング処理後

図 11 テーパリング処理

テーパリングは，図 11 に示すように，角柱の上面の各頂点 $T_1, T_2, \cdots, T_n$を，向心ベクトル $t(\bar{w}-\bar{v}_i)$で変位させる．ここで，t はユーザが指定するテーパ・パラメータで，$\bar{w}$ は角柱の底面の重心ベクトルである．大きなテーパ・パラメータを設定すると，尖った表面形状が得られる．

最後に，図 9(c)に示すように，上面と底面の間の側面部分をエルミート曲線で張られる面で補完し，最終的な基底形状とする．すなわち，図 12 に示すように，与えられた接ベクトル *Vv* および *Vh* を用いて，側面に相当する図 12 中の点線で示された部分をエルミート曲線で補完し，任意の点pにおける高さ Hp を求めることで側面形状を生成する．

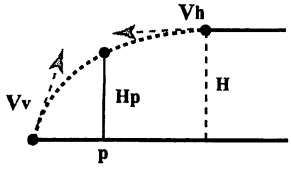


図 12 エルミート曲線による皮丘形状の生成

4.2 メタボールによる表面凹凸の付加

基底形状の生成後，その表面にメタボールによる微細な凹凸付けを行う．凹凸付けは，基底形状の上面の領域に，小さなメタボールを複数個散らばせることで行う．

配置するメタボールの個数は，配置先の閉領域の面積に依存するものとし，密度パラメータで制御する．また，メタボールの大きさやばらつきなどもパラメータで指定する．なお，メタボールの配置は，ランダムに決定される．

メタボールの生成後，それらの融合演算を行い，その結果を皮革テクスチャの基底形状の表面の凹凸形状とすることで，最終的な皮革テクスチャの形状を得る．

4.3 テクスチャデータとテクスチャ画像

以上述べた手法で生成された表面の凹凸形状は，テクスチャデータの各点における高さ情報として格納される．これとは別に，皮革表面の光学属性や色をパラメータとして与え，シェーディング処理を施してテクスチャ画像をレンダリングして表示する．

なお，テクスチャデータは，CG ソフトの質感表現に対するハイトマップデータとして利用できる．

5. 生成結果と考察

本手法で生成した皮革テクスチャの例を，図 13 に示す．以下，各サンプルについて簡単に述べる．

図 13(a)の細胞シミュレーションの結果に対して，基底形状のみを生成したのが図 13(b)であり，図 13(c)は，図 13(b)の結果にメタボールを付加したものである．図 13(d)は，細胞の大きさのばらつきを大きく設定した結果である．図 13(e)では，水平方向に扁平な細胞を配置するようにパラメータを設定した．図 13(f)は，図 8(b)で示した場のポテンシャルを与えて生成したものである．

実験は，CPU に PentiumM 2GHz，1GRAM の実装メモリで，Microsoft Visual Studio .NET2003 の環境下で行った．処理に要する時間は，シミュレーションサイクルや，パーティクルの数に大きく依存するが，図 13 に示した例の平均は，細胞シミュレーションに約 35 秒,皮革テクスチャの計算に約 13 秒要した．

提案手法により，ある程度，現物に似た皮革テクスチャを得ることはできたが，皮溝における複雑なしわの表現や，マクロな視点で観察できる大きなしわは表現し切れていない．これらの問題の原因は，パーティクルからの幾何形状変換だけでは，皮溝の連続性（流れのようなもの）に対処できないからではないかと考えている．

6. おわりに

以上，パーティクルシミュレーションとメタボールモデルを用いた皮革テクスチャの自動生成手法を提案した．新たに皮革細胞の成長モデルを導入することで，より革シボの質感に近い皮革テクスチャを得ることが出来た．

今後は，生成モデルの見直しを含めて，皮革テク

スチャの質感を大きく左右する皮溝の表現に注力しながら，テクスチャ生成手法の改善に取り組む予定である．

参考文献

[1] 棚澤八光社 WEB サイト, http://www.tanazawa.co.jp/home3.html

[2] K. Miyata, "A method of generating stone wall patterns," *Proc. of SIGGRAPH '90*, pp.387-394 (1990)

[3] 宮田,伊藤,嶋田, "正方形粒子の最密充填手法を用いた石畳テクスチャの生成", 情処論誌, Vol.42, No.11, pp.2743-2751 (1991)

[4] G. Turk, "Generating textures for arbitrary surfaces using reaction-diffusion," *Proc. of SIGGRAPH '91*, pp.289-298 (1991)

[5] A. Witkin and M. Kass, "Reaction-diffusion textures," *Proc. of SIGGRAPH '91*, pp.299-308 (1991)

[6] S. Worley, "A Cellular Texture Basis Function," *Proc. of SIGGRAPH '96*, pp.191-294 (1996)

[7] 石井，安田，横井，鳥越，"表面の微細形状に注目した皮膚の質感表現の一手法"，情処論誌，Vol.32, No.5, pp.645-654 (1991)

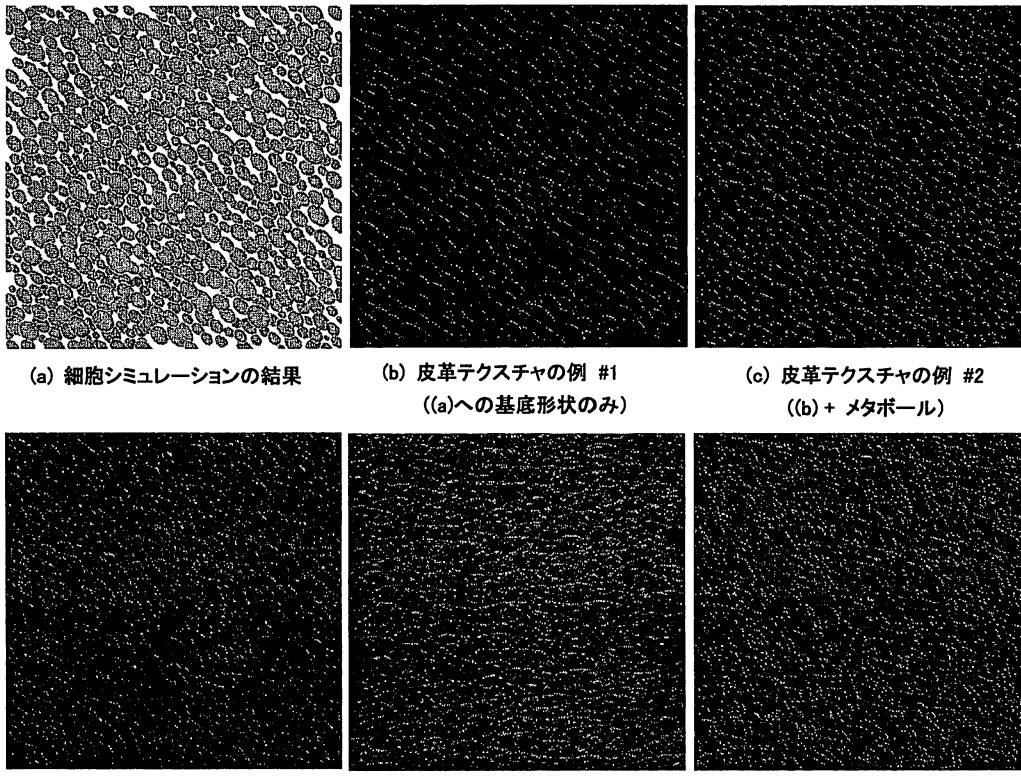
[8] K.W. Fleischer, et al., "Cellular texture generation," *Proc. of SIGGRAPH '95*, pp. 239-248 (1995)

[9] T.Itoh, K.Miyata, K.Shimada, "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)

[10] 服部道広，"スキンケアの科学"，裳華房，pp.6-13 (1997)

[11] K. Shimada, D. C. Gossard, Bubble Mesh: Automated Triangular Meshing of Non-manifold Geometry by Sphere Packing, *Third Symposium on Solid Modeling and Applications*, pp. 409-419 (1995)

[12] Namir Shammas(著), 鈴木治郎(訳), "C/C++数値計算アルゴリズムブック", 海文堂出版, pp.107-120 (1997)



(a) 細胞シミュレーションの結果　(b) 皮革テクスチャの例 #1 ((a)への基底形状のみ)　(c) 皮革テクスチャの例 #2 ((b) + メタボール)

(d) 皮革テクスチャの例 #3　(e) 皮革テクスチャの例 #4　(f) 皮革テクスチャの例 #5

図 13 結果画像