

# 3D-04 3次元モデルの表面に対する詳細形状の自動モデリング手法 —有機的な表面形状の自動生成

宮田 一乗

東京工芸大学/芸術学部

伊藤 貴之

日本アイビーエム(株)/東京基礎研究所

嶋田 憲司

カーネギーメロン大学/工学部/機械工学科

## 1. はじめに

現在のコンピュータグラフィックス (CG) による映像制作においては、表現する対象物のモデリング作業は最も手間のかかる作業のひとつである。顔のしわや爬虫類のうろこ、壁面のレンガによる凹凸などの物体表面の詳細形状は、物体の材質感を大きく左右する要素であるが、モデリングする手間は非常に大きい。

本報告では、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。

本手法は、CG 映像の質に影響を与える物体表面の詳細形状を、自動的に生成するものであり、映像制作の過程における重要な役割を果たすであろう新しい試みであるとする。

## 2. 研究の背景

本章では、有機的な表面形状の持つ性質と過去の類似研究との比較について述べる。

### 2.1 有機的な表面形状の特長

図1に示すような実際の例を観察すると、以下のような傾向を仮定できた。

- ・ 有機的な表面形状は、主に六角形と四角形の小領域の組み合わせで構成されている。
- ・ ある方向に沿って各小領域が整列している。
- ・ 各小領域が、ある方向に伸びたようになっている。

これらの特徴を表現するためには、以下の2つの問題点がある。

- (1) 四角形が混在したセルの配置：従来のパーティクルモデルでは六角形しか取り扱えない。
- (2) セルの異方性の表現。

これらの2つの問題は、すなわち、与えられた領域をいかに分割するかの問題であり、生成される表面形状のリアリティに大きく関わる問題でもある。与えられた閉領域の分割法としては、例えば、一般的なボロノイ分割 [11] などが考えられるが、本報告では、ある方向に沿って四角形が配列されるような分割法を提案する。

以上の特徴を満たす分割は、従来提案されたパーティクルモデルでは不可能である。従来の手法としては、ポリゴンモデルの再タイリング法 [17]、サーフェイス・モデリング [18]、陰関数曲面の表現 [19, 20]、異方性三角メッシング [21] などが挙げられる。これは、すなわち、パーティクルモデルが六角形メッシュを生成するようなモデルだからである。

本報告では、バブルメッシュと呼ばれるパーティクルモデルを用いている。この手法は元々は FEM 解析における様々なメッシング問題を解決するために提案された手法であり、多種類の充填粒子を取り扱うことが出来る。これに関しては、等方的な三角形メッシュへの円の充填 [1]、異方的な三角メッシュへの楕円の充填 [2]、等方な四辺形への正方形の充填 [3]、異方的な四辺形への長方形の充填 [4] などが報告されている。

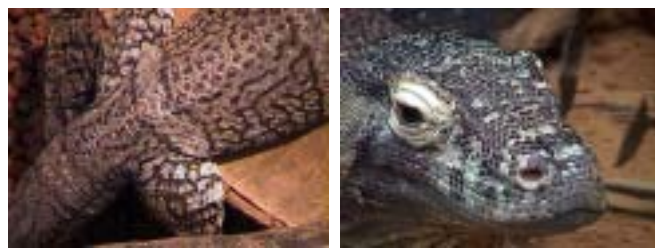


図1 有機的な表面形状の例：蛙に(左)、とかげ(右)

An automatic surface detail modeling method for 3D geometry data

Kazunori Miyata<sup>1)</sup>, Takayuki Itoh<sup>2)</sup>, Kenji Shimada<sup>3)</sup>

- 1) Tokyo Institute of Polytechnics
- 2) IBM Research, Tokyo Research Lab.
- 3) Carnegie Mellon University

### 2.2 関連研究

従来の関連研究としては、(1) タイリングテクスチャの生成、(2) 有機的な素材の表現法、(3) Cellular Textures 生成法 [7] (以下 CT 法と略す) の3つの領域が挙げられる。この中でも、CT 法は、本手法と同様にパーティクルシステムを応用した手法であり、関連性が高い。

#### 2.2.1 タイリングテクスチャ

様々なパターンやタイリングの参考書として、文献 [9] が挙げられる。Yessios は、2次元の線分の組み合わせで、木目や石材のタイリングパターンの生成を試みた

[13]. Miyata は、この手法を拡張して、3次元の石垣パターン<sup>1</sup>の生成を提案した[12]. このようなタイリングパターンは、3次元物体にマッピングした場合の不都合が残される。

### 2.2.2 有機的な素材の表現

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 [14, 15] や、貝殻の模様の生成[16], Perlinのノイズ関数[26]を応用したテクスチャ生成法[25]などが挙げられる。

### 2.2.3 Cellular Texture生成法 (CT法)

Fleischerらは、うろこや羽、とげなどの表面の詳細形状を生成する手法としてCellular Texture法を提案した[7]. 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、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、各パーティクルは棘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。

本手法と Cellular Textures 生成法とは、アルゴリズムの大筋では非常に類似している。特に、

- ・各粒子がエネルギーポテンシャルを持つ。
- ・各ポテンシャルは、隣接粒子との距離や方向性から算出される。
- ・ポテンシャルの総計を最小化するための反復処理を行う。

という3つの点では、両手法の概念は一致している。しかし、本手法で用いるパーティクルシステムには以下の2つの特徴がある。

- ・異方性を持つセルを生成できる
- ・四角形が混在したパターンが生成できる

CT法が例示しているモデルでは、各粒子のプログラムは隣接粒子への引力や斥力などを明示的に算出しない。ただし、引力や斥力を算出するプログラムを書くこと自体は可能ではある。一方、本手法では隣接粒子への引力や斥力を陽に算出するので、隣接粒子の移動方向が明確である。この結果として、本手法のほうが収束性の点で有利であると考えられる。実際に、CT法では計算時間が数時間かかった例があることを論文中で指摘しており、経験的に本手法のほうが計算時間ははるかに短いと考えられる。

## 3. 手法の概要

本手法は、図2に示すような3つの手順から構成される。

1. パッキングパターンの生成: 物体表面を異方性メッシング手法により、擬似ポロノイ分割する。(以下、擬似ポロノイ分割により生成されたポリゴン

をキャンセルと呼ぶ。)

2. スキン幾何形状の生成: 生成された各スキンセルに対して、フラクタルノイズを伴ったサブディビジョン曲面を生成して、表面の三次元幾何形状を得る。
3. レンダラ: 生成された詳細形状の幾何データと属性データなどを用いてレンダリング画像を生成する。

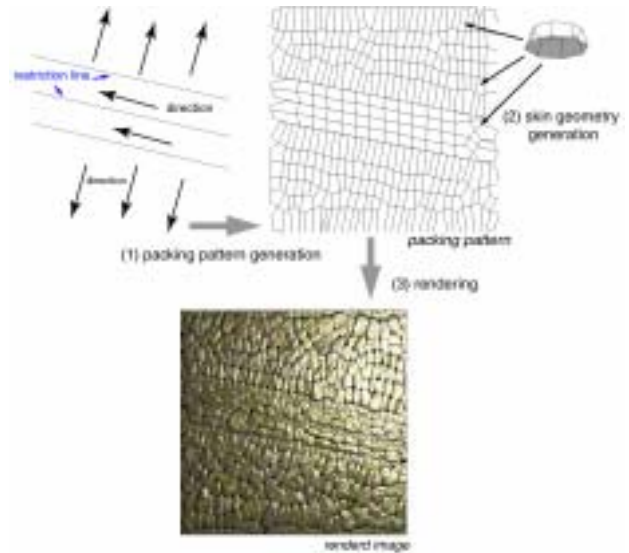


図2. 手法の概要

パッキングパターンの生成後、スキン幾何形状が生成される。その後、レンダリングした画像が生成される。

## 4. 異方性メッシングによる擬似ポロノイ分割

本章では、物体表面を擬似ポロノイ分割する手法について述べる。本手法では、

- (a) 形状領域
  - (b) スカラ関数で表現されるポロノイの大きさ分布
  - (c) ベクタ関数で表現されるポロノイの整列方向分布
  - (d) スカラ関数で表現されるポロノイの細長さ分布
- を入力として
- (e) 入力データの示す大きさ、整列方向、細長さを反映して生成されたポロノイ分割結果
- を出力する。

本手法は、以下の3技術により構成される。

- (1) パーティクルモデルを用いて、楕円(または直方体)粒子を形状領域に充填する(図3(左)参照)。
- (2) 粒子の中心点を結び、異方性三角(または四角)メッシュを生成する(図3(中)参照)。
- (3) 三角(または四角)メッシュの要素の中心点を結び、主に六角形(または四角形)で構成されるポロノイパターンを生成する(図3(右)参照)。

図4は本手法の実行例を示している。

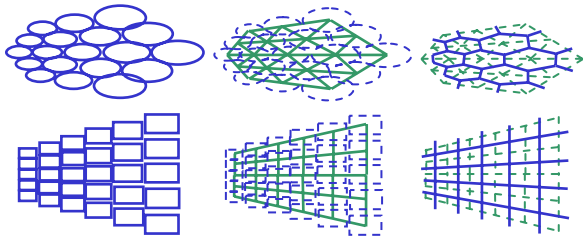


図3. (上) 楕円粒子, 三角メッシュ, 六角形ポロノイパターン.  
(下) 直方体粒子, 四角メッシュ, 四角形ポロノイパターン.

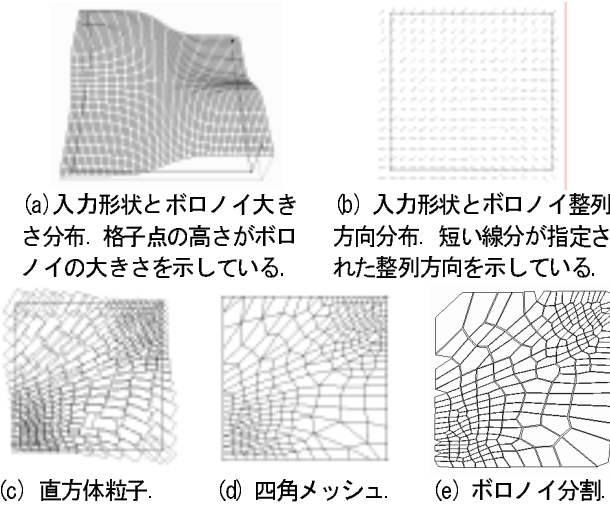


図4 ポロノイ分割の実用例

#### 4.1 パーティクルモデルによる粒子の充填

本報告で述べるパーティクルモデルは、三角メッシュ生成のために提案されたバブルメッシュ法 [1] の拡張であり、楕円や長方形の粒子を形状領域に充填する。

バブルメッシュ法では、個々の円形粒子に、分子間に類似した粒子間力（引力または斥力）を仮定する。また、隣接粒子間の安定距離を、入力された大きさ分布関数から求められる粒子半径の和とする。隣接粒子間の安定距離を  $l_0$ 、安定距離に対する現在の粒子間距離の比を  $w$  としたときに、図 5(a) にグラフで示すような 3 次関数を用いて粒子間力を算出する。

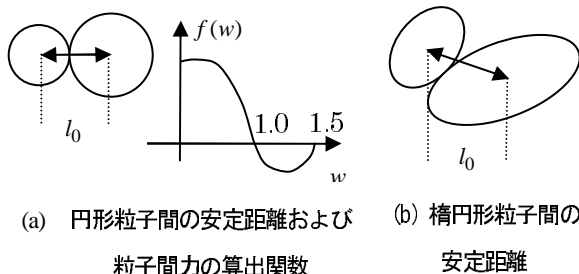
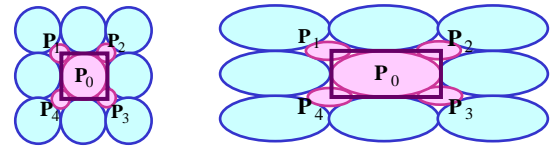


図5. 円形粒子および楕円形粒子の充填モデル



(a) 5個の粒子間力関数を用いた正方形粒子の表現  
(b) 5個の粒子間力関数を用いた長方形粒子の表現

図6. 正方形粒子および長方形粒子の充填モデル

バブルメッシュ法は後に、楕円粒子の充填モデル [2] に拡張された (図5 (b) 参照)。この充填モデルでは、粒子の整列方向分布をベクタ関数で入力し、そのベクタ関数から楕円の長軸と短軸を算出する。さらにバブルメッシュ法は、正方形粒子の充填モデル [3] にも拡張された (図6 (a) 参照)。この充填モデルでは、正方形粒子の4頂点  $P_1, P_2, P_3, P_4$  にも粒子間力関数  $f_{P_1}, f_{P_2}, f_{P_3}$ , and  $f_{P_4}$  を仮定する。また、楕円粒子モデルと正方形粒子モデルを組み合わせることで、長方形粒子の充填モデル [4] も実現された (図6 (b) 参照)。

これらの充填モデルでは、質点モデルとダンピング係数を想定した運動方程式をたてて、粒子の密度を適応的に制御しながら、反復的に粒子の安定位置を算出する。

#### 4.2 充填された粒子を用いたポロノイ分割

本手法では、文献[2, 4] に示した手法によって楕円粒子または直方体粒子を充填し、その粒子の中心点を連結して異方性三角メッシュを生成する。粒子中心点の連結には、異方性 Delaunay 三角メッシュ生成法 [2, 4] を用いる。Delaunay 三角メッシュ生成法では、三角形要素の外心円の内部に他の三角形要素の頂点が存在しないように三角メッシュを生成するが、異方性 Delaunay 三角メッシュ生成法では外心円のかわりに外心楕円を用いる。

異方性四角メッシュが必要なときには、まず直方体粒子を充填し、異方性 Delaunay 三角メッシュ生成法によって粒子の中心点を連結する三角メッシュを生成し、最後にその三角メッシュを四角メッシュに変換する [3, 4]。この変換処理では、まず三角メッシュの辺を消去してできる全ての四角形の形状を採点し、続いて採点結果順に辺を消去して、三角形要素を四角形要素に変換する。この手法は全ての三角形要素を四角形要素に変換することを保証しない。しかし本報告の目的において、四角メッシュ中に三角形要素が残存することは差し支えない。

最後に、三角または四角メッシュの相対であるポロノイパターンを生成する。この処理では、メッシュ頂点を囲む三角形要素または四角形要素の中心点を連結することで、スキンセルを生成する。ただし、領域の境界線に接する三角形要素または四角形要素においては、要素の

中心点を連結するかわりに、境界線上の要素辺の中点を連結する。また、領域の境界線上にあるメッシュ頂点については、スキンセルの生成を行わない。

### 5. 表面の詳細形状のモデリング法

表面の詳細形状は、4章で述べた手法で生成される擬似ボロノイポリゴン（スキンセル）に、スキン幾何形状を生成して得られる。スキン幾何形状の生成は、以下の3つの手順による。

- (1) 各スキンセルに対し、初期スキンメッシュを生成する。
- (2) 初期スキンメッシュに対し、サブディビジョン曲面を生成する。
- (3) フラクタルノイズを表面に付加して、微細凹凸を生成する。

以下、各手順を説明する。

#### 5.1 初期スキンメッシュの生成

各スキンセルに対して、初期スキンメッシュを以下のように生成する。

はじめに、スキンセルをより緊密に充填したい、もしくはは隙間を開けたい場合など、スキンセルを必要に応じてスケーリングする。

つづいて、図7(a)に示すように、スキンセルを底面とし底面を指定された高さだけ、スキンセルの法線方向  $\vec{n}$  に掃引した角柱を生成する。この場合、掃引の量  $H$  は次式で与えられる。

$$H = SkinSize \times Sr,$$

ここで、 $SkinSize$  はスキンセルの重心から各頂点までの長さの平均、 $Sr$  はユーザが指定する掃引率である。

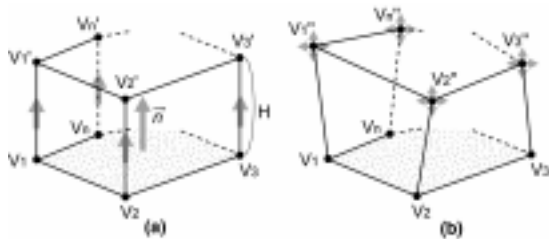


図7. スキンセルの3次元化掃引: (a) スキンセルの掃引 (b) 角柱の変形

さらに、生成された角柱は、角柱の上面に位置する各頂点、 $V_1', V_2', \dots, V_n'$  を、図7(b)に示すようにランダムに移動させて変形される。変形率  $Dr$  を用いて、変形の範囲を次式で定義する。

$$DisplacementRange = SkinSize \times Dr \times RandomNumber,$$

ここで、 $RandomNumber$  は 0~1 の値をとる一様分布乱数である。

変形された角柱は、図8に示すように、指定されたフローベクトル  $\vec{F}$  に沿ってスキューイングされる。角柱の

上面の各頂点  $V_1', V_2', \dots, V_n'$  は、スキューイングベクトル  $s\vec{F}$  で変位される。ここで、 $s$  はユーザが指定するスキュー・パラメータである。このスキューイング操作は、うろこ状の表面形状を得るときなどに有効である。

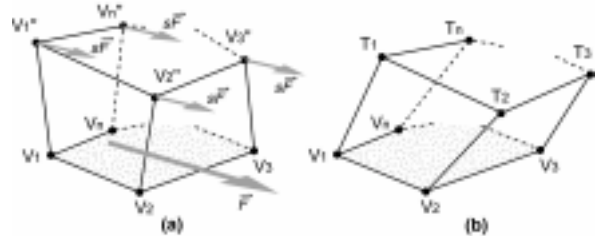


図8 スキューイング操作: (a) スキューイングを定義するフローベクトル (b) スキューイング操作後

角柱は、さらに、図9に示すようなテーパ操作がなされる。テーパ操作は、角柱の上面の各頂点  $T_1, T_2, \dots, T_n$  を、向心ベクトル  $t(\vec{w} - \vec{v}_i)$  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、 $\vec{w}$  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。

以上のプロセス終了後、角柱を粗い三角形メッシュで表し、この三角形メッシュを初期スキンメッシュと呼ぶ。このようにして生成された初期スキンメッシュをもとに、以降の処理で詳細形状が自動生成される。

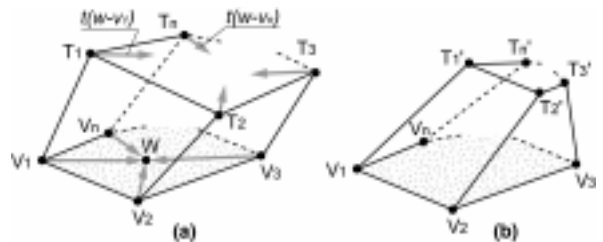


図9 テーパ操作: (a) 向心ベクトルによる変形前 (b) テーパ操作後

#### 5.2 メッシュのスムージング

5.1 節で生成された初期スキンメッシュを制御格子と想定して、サブディビジョン曲面の生成による角柱のスムージング(丸め)処理を行い、表面のおおまかな形状を生成する。

サブディビジョン曲面の生成手法には、Doo-Sabin の手法[6]や、Catmull-Clark の手法[5]、Loop の手法[10]などが報告されている。本手法では、三角形メッシュが生成されることなどの理由から、筆者らの開発環境になじみやすい Loop の手法を用いている。以下に、Loop のアルゴリズムを簡単に述べる。

Loop のサブディビジョンサーフェイス生成のアルゴリズムでは、図10(a)のように与えられた三角メッシュの各エッジに対し、図10(b)に示すように新しい頂点(図中の黒丸)が計算され、各エッジは2つに分割される。さらに、新しい頂点同士を結んで、1枚の三角形が4枚の三角形に新たに分割

され、分割前の三角形を置き換えていく。新しい頂点の位置は、周囲の頂点の位置とエッジの接続状況などから計算される。この操作を再帰的に繰り返すことで、メッシュがスムージングされる。

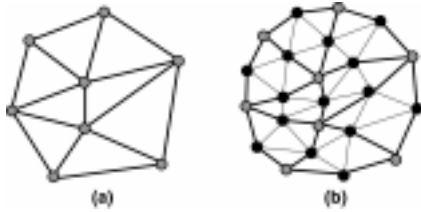


図 10 メッシュの分轄: (a) 与えられたメッシュ (b) 1回分割されたメッシュ

### 5.3 表面の微細凹凸の付加

メッシュのスムージング操作と並行して、スキンメッシュの各ノードをフラクタルノイズで変位させることで、微細な凹凸を表面に付加できる。



図 11: 3次元フラクタルノイズ: 左の三角形が、各エッジを分割して4枚に分割される。この手順が繰り返される。

3次元フラクタルノイズは、図 11 に示すように、与えられた三角形の各エッジを分割して変位させることを再帰的に繰り返すことで生成できる[8]。本手法では、各分割レベルにおける各ノードの変位ベクトルを格納しておき、図 12 に示すように、得られたサブディビジョン曲面の各ノードにマージし、表面の微細凹凸を付加する。

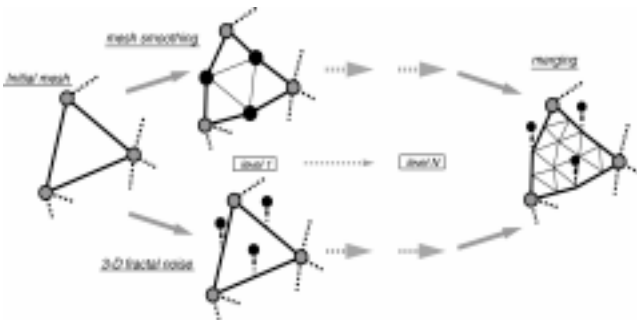


図 12 表面への微細凹凸の付加: スキン幾何形状は、最終的にサブディビジョン曲面の表面にフラクタルノイズを付加して得られる。

## 6. 実験結果と考察

本章では、提案手法で生成された表面形状の例を示す。

4章と5章で述べたように、表面形状を生成する時に、以下に示すパラメータを用いる。

$Ga$ : 異方性の度合い (セルのアスペクト比)

$Sr$ : 各セルのスケーリング率

$Sr$ : 初期スキンメッシュの掃引率

$Sc$ : 初期スキンメッシュのスキュー・パラメータ

$Tc$ : 初期スキンメッシュのテーパ・パラメータ

$Dr$ : 初期スキンメッシュの変形率 ( $0.0 < Dr < 1.0$ )

$Fd$ : 表面に付加するフラクタルノイズのフラクタル次元 ( $1.0 < Fd < 2.0$ )

$Af$ : フラクタルノイズの振幅

### 異方性の度合い (アスペクト比) $Ga$ による違い

本手法の特長のひとつとして、表面形状の異方性を制御できることが挙げられる。図 13 は、充填するセルのアスペクト比を変化させた例である。高いアスペクト比を設定すると、指定された“流れ”の方向にセルが伸びて充填されていることがわかる。

### スキュー・パラメータ $Sc$ による違い

図 14 は、スキュー・パラメータを変化させた場合の違いを示している。スキュー・パラメータを大きくすると、スキンセルがオーバーラップし、うろこ状の表面形状が得られることがわかる。

### テーパ・パラメータ $Tc$ による違い

図 15 に、テーパ・パラメータを変化させた場合の違いを示す。テーパ・パラメータを大きくするに従って、スキンセルの膨れ (丸み) が大きくなることがわかる。

### 六角形セルと四角形セルの混在

図 16 に示された例は、より複雑な有機的な表面形状となっている。提案手法の特長として、図 16 に示された例のような、六角形セルと四角形セルの混在したパッキングが挙げられる。また、図 16 の例では、拘束線がいくつか指定されているが、スキンセルがこれらの拘束線に沿って位置していることがわかる。

### 3次元モデルへの適用

本手法は、3次元モデルの表面に直接に詳細形状を生成できる。図 17, 18 は、入力された3次元モデルの表面に詳細形状を生成した例である。両者とも、脚の形状の方向にスキンセルが整列されていることがわかる。

### 計算時間

計算時間はスキンセルの個数に大きく依存している。本章で提示した例の場合、Intel の Pentium III 650 MHz を用いて、擬似ポロノイ分割のプロセスに 10~20 秒、詳細形状の生成に 10 秒前後かかる。

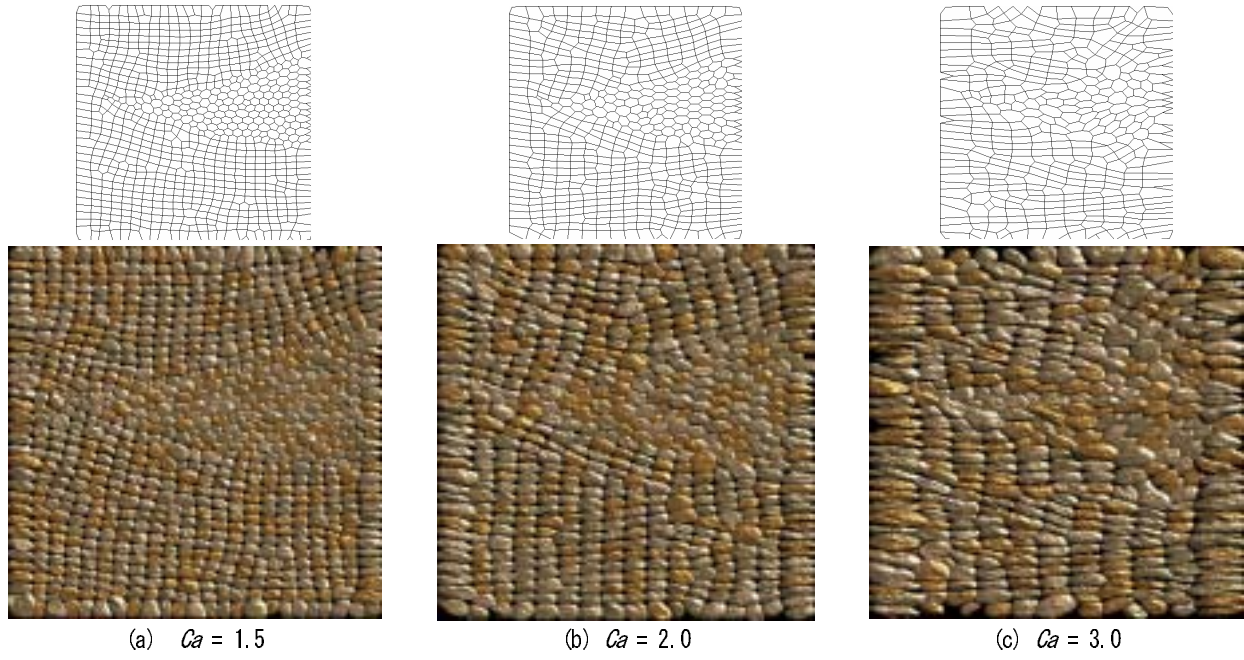


図 13: 異方性 (アスペクト比) による違い

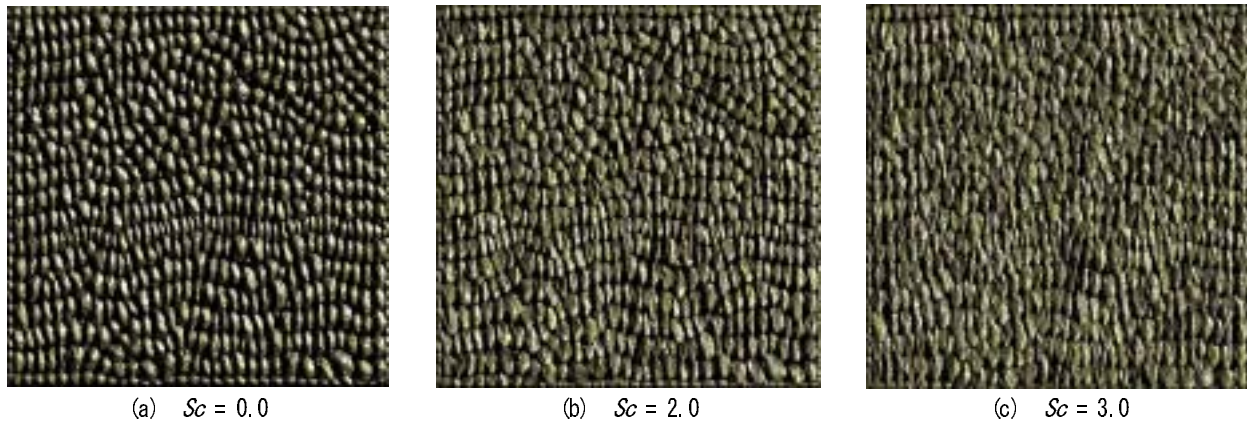


図 14: スキューパラメータによる違い

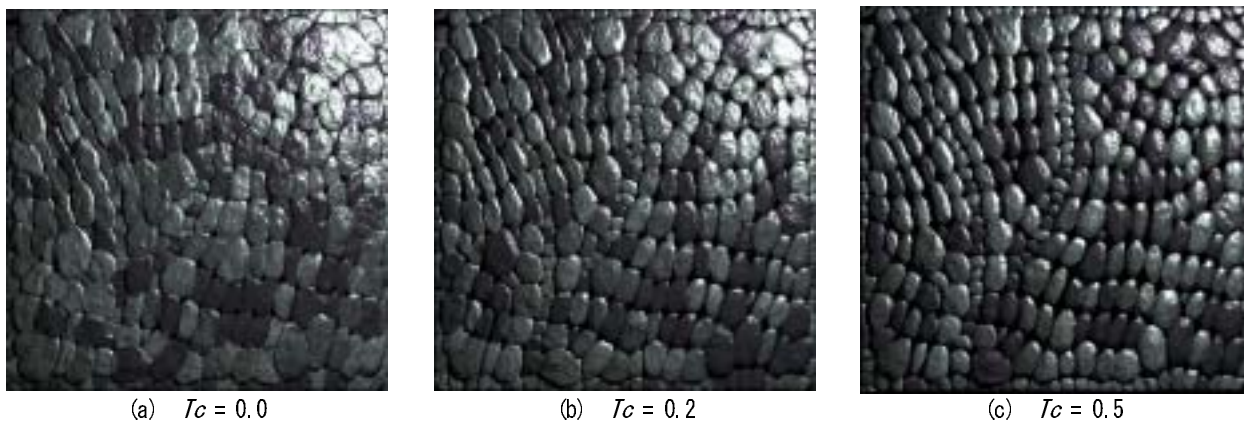


図 15: テーパーパラメータによる違い

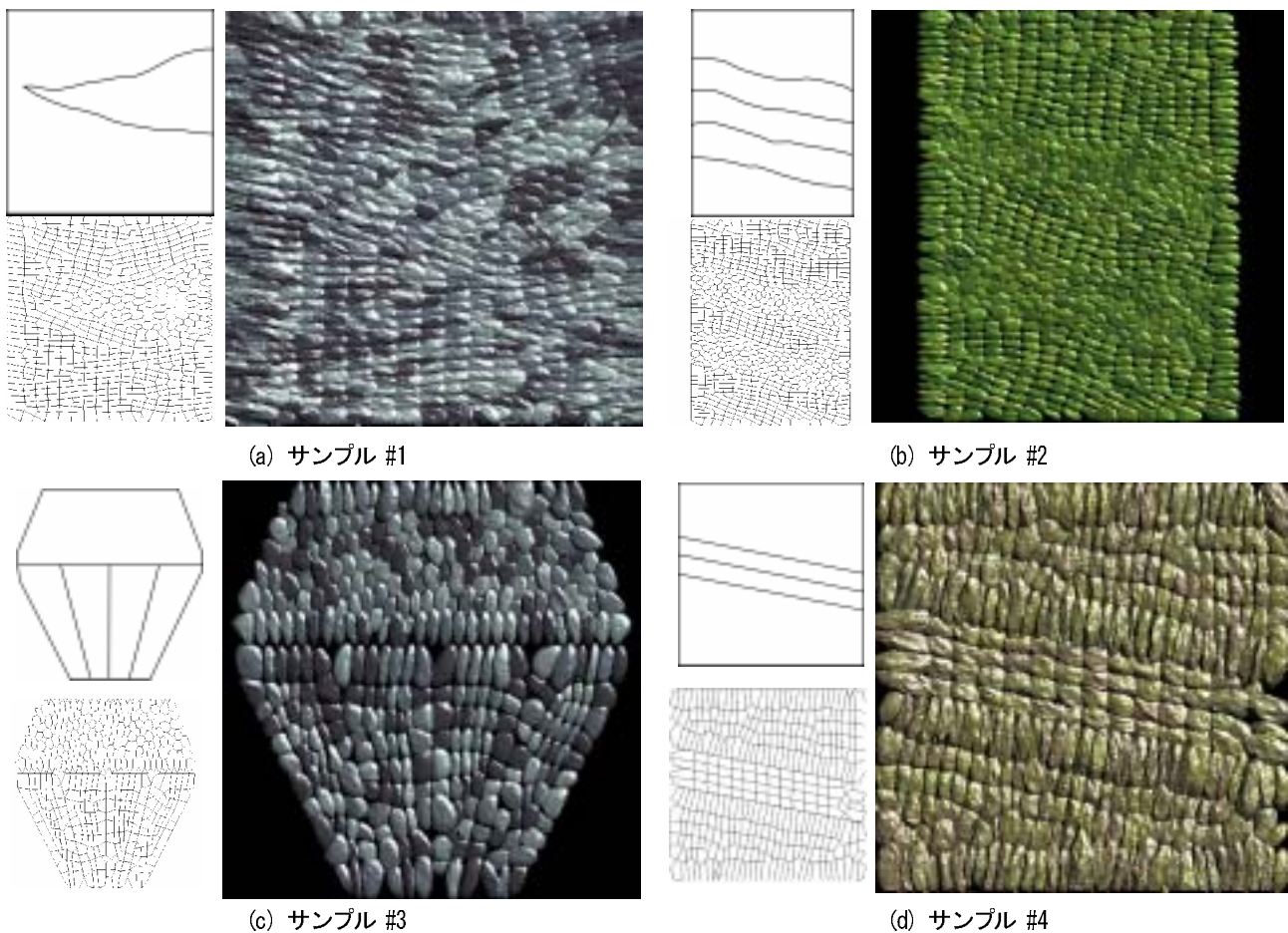


図 16: 様々な有機的な表面形状の例 (左上: 入力形状, 左下: 生成された擬似ポロノイポリゴン, 右: 得られた表面形状)

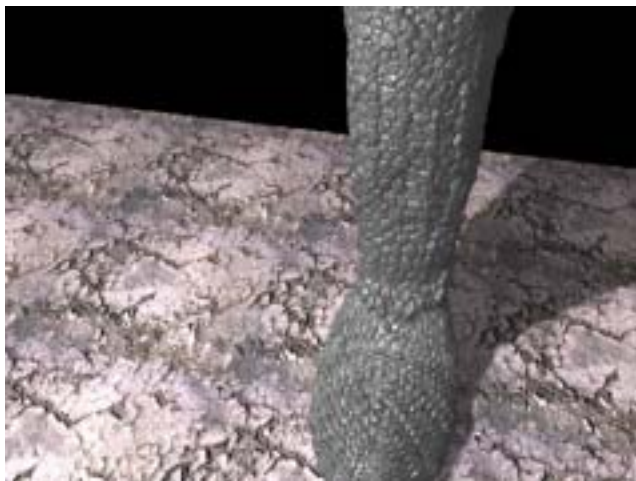


図 17: 鎖かたびら



図 18: クリーチャーの脚 (一部)

## 7. おわりに

以上, 異方性メッシング手法を用いた有機的な表面形状の自動生成法について報告した. 提案した新しいパーティクルモデルを用いることで, 六角形だけでなく四角形も混在した皮膚のパッキングパターンを生成できることを示した. 生成に際して, 外郭形状と皮膚

の流れの方向, およびそれぞれのスキンセルに対する皮膚形状のパラメータを設定することで, リアリティのある有機的な表面形状が得られる.

今後は, 以下の項目について取り組む予定である.

## 経年変化

本報告で提示された例は、実際の動物の皮膚と比較して、非常にきれいである。石材の経年変化に関しては、既にいくつか報告されている[22, 23]。皮膚素材に関しても、傷やしみ、へたりのような経年変化をシミュレーションすることで、一層のリアリティを追求できるものとする。

## 様々な皮膚の表現

本手法では、皮膚の形状をプロシージャルな手法で生成したが、実際のサンプルから形状データのパラメータを抽出して、同じような形状を自動生成する試みが考えられる。さらに、皮膚のウェット感[24]などをシミュレーションし、様々な皮膚の状態を表現する。

Table 1: 図 13-16 の生成に用いたパラメータリスト

Fig. No.	<i>Ca</i>	<i>Sv</i>	<i>Sr</i>	<i>Sc</i>	<i>Te</i>	<i>Dr</i>	<i>Fd</i>	<i>Af</i>
Fig.13 (a)	1.5	1.4	1.0	0.0	0.2	0.0	1.1	0.1
Fig.13 (b)	2.0	1.4	1.0	0.0	0.2	0.0	1.1	0.1
Fig.13 (c)	3.0	1.4	1.0	0.0	0.2	0.0	1.1	0.1
Fig.14 (a)	2.0	1.4	2.0	0.0	0.8	0.05	1.1	0.2
Fig.14 (b)	2.0	1.4	2.0	2.0	0.8	0.05	1.1	0.2
Fig.14 (c)	2.0	1.4	2.0	3.0	0.8	0.05	1.1	0.2
Fig.15 (a)	2.0	1.3	1.0	0.0	0.0	0.05	1.1	0.1
Fig.15 (b)	2.0	1.3	1.0	0.0	0.2	0.05	1.1	0.1
Fig.15 (c)	2.0	1.3	1.0	0.0	0.5	0.05	1.1	0.1
Fig.16 (a)	2.0	3.0	1.0	2.0	0.7	0.05	1.1	0.1
Fig.16 (b)	2.0	1.4	0.8	0.0	0.2	0.05	1.1	0.1
Fig.16 (c)	2.0	1.6	2.0	0.0	0.2	0.1	1.1	0.1
Fig.16 (d)	2.0	1.4	1.0	0.0	0.1	0.0	1.1	0.1

## 謝辞

本研究は NSF CAREER Award (No. 9985288) , 日本アイビーエム (株) , および本田技研のご支援による。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] K. Shimada, A. Yamada, T. Itoh, Anisotropic Triangulation of Parametric Surfaces via Close Packing of Ellipses, International Journal on Computational Geometry & Applications, Vol. 10, No. 4, pp. 417-440, 2000.
- [3] K. Shimada, J. Liao, T. Itoh, Quadrilateral Meshing with Directionality Control through the Packing of Square Cells, 7th International Meshing Roundtable, pp. 61-76, 1998.
- [4] N. Viswanath, K. Shimada, T. Itoh, Quadrilateral Meshing with Anisotropy and Directionality Control via Close Packing of Rectangular Cells, 9th International Meshing Roundtable, pp. 227-238, 2000.
- [5] E. Catmull and J. Clark, "Recursively generated B-spline surfaces on arbitrary topological meshes,"

- Computer Aided Design, Vol.10, No.6;350-355, 1978
- [6] D. Doo and M. Sabin, "Analysis of the behavior of recursive division surfaces near extraordinary points," Computer Aided Design, Vol.10, No.6; 356-360, 1978
- [7] K.W. Fleischer, et al., "Cellular texture generation," Proceedings of SIGGRAPH '95, 239-248, 1995
- [8] A. Fournier, D. Fussell, and L. Carpenter, "Computer rendering of stochastic models," Communications of the ACM, Vol. 25, No. 6, 371-384, 1982
- [9] B. Grünbaum and G.C. Shephard, Tiling and Patterns, W.H. Freeman and Co., New York, 1987
- [10] C. Loop, "Smooth subdivision surfaces based on triangles," Master's thesis, University of Utah, Department of Mathematics, 1987
- [11] K. Mehlhorn and S. Näher, LEDA: a platform for combinatorial and geometric computing, 686-707, 1999
- [12] K. Miyata, "A method of generating stone wall patterns," Proceedings of SIGGRAPH '90, 387-394, 1990
- [13] C.I. Yessios, "Computer drafting of stones, wood, plant and ground materials," Computer Graphics, Vol.13, No.2, 190-198, 1979
- [14] G. Turk, "Generating textures for arbitrary surfaces using reaction-diffusion," Proceedings of SIGGRAPH '91, 289-298, 1991
- [15] A. Witkin and M. Kass, "Reaction-diffusion textures," Proceedings of SIGGRAPH '91, 299-308, 1991
- [16] D.R. Fowler, H. Meinhardt, and P. Prusinkiewicz, "Modeling seashells," Proceedings of SIGGRAPH '92, 379-388, 1992
- [17] G. Turk, "Re-tiling polygonal surfaces," Proceedings of SIGGRAPH '92, 55-64, 1992
- [18] R Szeliski and D Tonnesen, Surface modeling with oriented particle systems, Proceedings of SIGGRAPH '92, 185-194, 1992
- [19] L. H. Figueiredo, J. M. Gomes, D. Terzopoulos, and L. Velho, Physically-based methods for polygonization of implicit surfaces, Proceedings of Interface '92, 250-257, 1992
- [20] A. P. Witkin and P. S. Heckbert, Using particles to sample and control implicit surfaces, Proceedings of SIGGRAPH '94, 269-277, 1994
- [21] F. Bossen and P.S. Heckbert, A pliant method for anisotropic mesh generation, Proceedings of 5<sup>th</sup> International Meshing Roundtable, 63-74, 1996
- [22] J. Dorsey and P. Hanrahan (1996), "Modeling and rendering of metallic patinas," Proceedings of SIGGRAPH '96, 387-396, 1996
- [23] J. Dorsey, et al (1999), "Modeling and Rendering of Weathered Stone," Proceedings of SIGGRAPH '99, 225-234, 1999
- [24] H.W. Jensen, J. Legakis, and J. Dorsey, Rendering Wet Materials, Proceedings of Tenth Eurographics Workshop on Rendering, Granada, Spain, pp. 273-282, 1999
- [25] S. Worley, A Cellular Texture Basis Function, Proceedings of SIGGRAPH '96, pp.191-294, 1996
- [26] K. Perlin, An image synthesizer, Proceedings of SIGGRAPH '85, pp.287-296, 1985