

化石による恐竜のデジタル復元

土井 紀枝 金子 豊久 栗原 芳巳 栗山 繁

豊橋技術科学大学 情報工学系

〒 441-8580 豊橋市天伯町字雲雀ヶ丘 1-1

E-mail: {norie,kaneko}@mmip.tutics.tut.ac.jp

近年、計算機の処理能力の向上やソフトウェアの発達によりあらゆる対象がCGで表現される様になった。その中でも恐竜は映画などにも起用され、CGに馴染み深い対象物である。その反面、想像力に任せた復元がされやすく、学術的な理解がされにくいのも事実である。本研究では、豊橋市自然史博物館の協力の下、学術的な根拠を利用して簡単に外皮形状を復元し、表皮の模様を表現する方法を考察する。まず、展示されている恐竜の骨格を画像を用いた3次元再構成手法を用いて生成し、できるだけ学術的根拠に基づいた外皮形状の復元を行なう。また、作成された外皮形状に対して、バブルメッシュ法を応用したテクスチャマッピングの生成を試みる。

Generation of CG Models based on Dinosaur fossil

Norie DOI and Toyohisa KANEKO and Yoshimi KURIHARA and Shigeru KURIYAMA

Department of Information and Computer Sciences

Toyohashi University of Technology, Tenpaku, Toyohashi, 441-8580, Japan

This paper is concerned with reconstruction of a dinosaur from a fossil skelton. This work has been carried out with the cooperation of the Natural History Museum of Toyohashi. The first step is to reconstruct a skelton three-dimensionally, employing a common digital camera. The second step is to build a surface and the third step is to place textures on the polygonal surface, where a bubble mesh method, which is commonly used for generating a mesh on a 2D or 3D object, has been applied to our problem. The resulting CG model is satisfactory for use at the museum.

1 はじめに

恐竜は年齢に関係なく人気の高い対象物である。恐竜の形状や表皮模様の復元は、そのために必要な知識を得ることは大変な作業であるため、学術的根拠なしに行なわれることが多い。

そこで、本研究では展示された恐竜骨格(アナトサウルス:体長664cm,体高305cm)を使用し、可能なだけ学術的根拠を利用した外皮形状の復元と表皮模様の作成を試みる。本研究では、自然史博物館で使用する教育用教材を念頭に置き、復元を行なう。復元には以下のステップを必要とする。

1. 展示された骨格標本の形状を画像から構築する。
2. 骨格形状から外皮形状を復元する。
3. 表皮上に模様を作成する。

本論文ではまず最初に、復元方針を述べた後、上の順に述べることにする。

2 復元方針

恐竜の学術的な復元は骨格復元後、筋肉復元を行ない、これを包み込むように外皮が作成される [1] [2]。筋肉復元には動作、生活習慣など多数の情報が必要とし、研究者間でも必ずしも一致するものでもない。本研究では筋肉復元を行わず、骨格から外皮を直接作成することにする。

表皮模様は化石から復元することが不可能なので、気候や時代、食性などを考慮して作成される。また、近縁種である爬虫類の模様も利用されるが、実際の作成に関しては想像の域を出ない。そこで本研究では、主に爬虫類を見本とした模様の作成を試みる。

3 骨格のCG表現

骨格形状を3DCG化するためには、対象物の3次元的位置を知る必要があるが、一般に用いられる

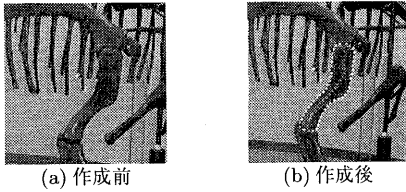


図 1: 中心軸と輪郭線の作成

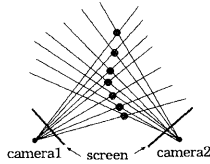


図 2: 点列とカメラを結ぶ直線群の交点

3次元スキャナで恐竜データを獲得するのは難しい。そこで本研究では、対象物と位置が既知の基準点をデジタルカメラで多数撮影し、この画像を使って3次元形状を推定する方法を採用。以下にその手法について述べる。

3.1 撮影・実測

撮影を行なう際、部屋の大きさなどの制限から、恐竜骨格全体をフレーム内に収めることは困難となる場合がある。そこで、化石表面と周辺に基準点を複数個配置して座標を測定し、以下に注意して撮影を行なう。

- 一つの直線には、同一平面上にない基準点を4個以上収める。
- 形状を推定するため、同一部分を複数方向から撮影する(3.2参照)。

カメラ(Nikon Cool Pix 900: 解像度 1280 × 960)の画像歪みについては、格子画を撮影して測定した結果、無視できるほど小さいことが判明した。

3.2 骨格表面の生成

頭蓋骨を除き、恐竜の骨形状はほぼ円柱状である。そこで、本手法では骨の中心軸と輪郭線を利用した円柱を作成することで骨格表面を定義する。

3.2.1 骨の中心軸、輪郭点列の2次元位置の取得

撮影した各画像を下書きに、骨の輪郭と仮想的な中心軸を点列で作成する。このとき、特徴的な点を考慮すると正確な位置を得ることができる(図1)。

3.2.2 中心軸点列の3次元位置の取得

撮影した2枚の画像を用いて、カメラの位置と各中心点を結ぶ直線群を考える(図2)。各画像から2直線間の距離が最短となる直線の組合せ L_1, L_2 を選び、各直線において他方の直線に最も近付く点 P_1, P_2 を求める(図3)。この時、点 $P_3 (P_3 = (P_1 + P_2) / 2.0)$ を3次元上の骨の中心軸点とする。つまり、直線 L_1 上

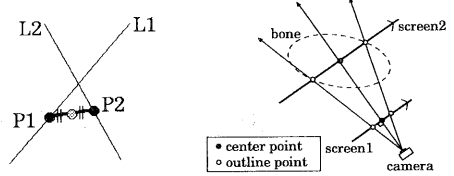


図 3: 3次元位置の決定 図 4: 輪郭の3次元座標

の点 A, C と、直線 L_2 上の点 B, D を用いてそれぞれの直線を式1と表すと、点間の距離 $l = |P_1 - P_2|$ を最小にするパラメータ t, u は式(2)を解くことで得られる。

$$\begin{cases} L_1 : A(x, y, z) + t \times C(x, y, z) = P_1 \\ L_2 : B(x, y, z) + u \times D(x, y, z) = P_2 \end{cases} \quad (1)$$

$$\frac{\partial l^2}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial l^2}{\partial u} = 0 \quad (2)$$

ここで、 t, u から P_1, P_2 を求めることが可能なので、この中点を求めることにより、中心軸点列の3次元位置を取得することができる。

3.2.3 輪郭点列の3次元位置の取得

3.2.2から得た中心軸点を含み、2次元画像平面と平行な平面を考える。この平面に輪郭点列を投影し、使用した中心軸点に最も近い左右1点ずつをこの中心軸点での輪郭点として3次元上に配置する(図4)。

3.2.4 輪郭点の補間

3.2.3より、1つの中心軸点に4つの輪郭点に対応する。この4点を3次のエルミート曲線で補間することで輪郭点を追加する。隣あった輪郭点を p_n, p_{n+1} とし、中心軸点を O とする。点 p_n, p_{n+1}, O を含む平面上にあり、ベクトル $\vec{Op_n}$ に直交するベクトル p'_n を点 p_n における接線ベクトルとした場合、点 p_n, p_{n+1} 間の補間は式3で示される。

$$p = b_1 p_n + b_2 p'_n + b_3 p'_{n+1} + b_4 p_{n+1} \quad (3)$$

$$\begin{cases} b_1 = 1 - 3t^2 + 2t^3 \\ b_2 = t - 2t^2 + t^3 \\ b_3 = -t^2 + t^3 \\ b_4 = 3t^2 - 2t^3 \quad (0 \leq t \leq 1) \end{cases} \quad (4)$$

作成した輪郭を繋ぐことにより骨形状を表現する。

3.3 頭蓋骨の作成

頭蓋骨は円柱状ではないため、3.2と同様な手法では形状を得ることができない。そこで、撮影時に頭蓋骨表面に特徴点を配置し、3.2.2と同様な手法により3次元座標を取得する。この特徴点群を用いて多角形を構成することで表面を作成する。表面作成は撮影画像を見て手作業で行なう。

3.4 作成結果

展示品(図5)を用いた作成結果を図6に示す。使用した画像は約40枚、生成した骨は243個である。

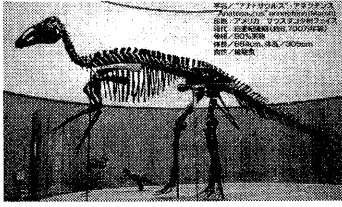


図 5: アナトサウルス骨格写真

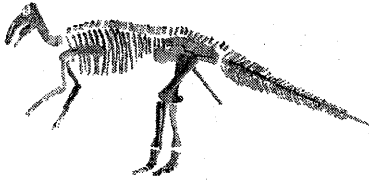


図 6: 3DCG での骨格形状

4 外皮形状の復元

前節で得られた骨格形状に基づいて外皮を復元する。本手法では、種類別での複雑なアルゴリズムの変更を避けるため、可能な部分のみ学術的根拠を用いることにより形状の復元を試みる [3] [4]。外皮は次の 3 部分に分けて考える。

1. 頭部は骨の上に筋肉が均一の厚みを形成していると考え、外皮を作成する。
2. 体は肋骨の存在する部分で断面形状を作成し、これを利用して全体の断面形状を作成する。また、作成された形状に筋肉の厚みを考えて外皮を作成する。
3. 脚、腕、指は断面形状が楕円に近似できるので、断面形状を楕円で作成して外皮を表現する。

4.1 頭部

頭蓋骨表面から垂直方向に一定距離 $d[cm]$ の厚みの筋肉を考えて外皮表面を定義する (図 7)。このために目などの穴埋め処理が必要である。存在するほとんどの穴部分は頭蓋骨に対して小さいので、穴の重心点と穴の周辺頂点を結ぶことで穴を塞ぐ (図 8)。

4.2 体部分

図 9 から骨だけでは内臓など、形状の判断できない部分があることが分かるが、背骨に垂直な断面を考えると、それぞれの断面が相似形であると想像できる。また、肋骨の部分は、骨と皮膚が一定間隔を保つことが現存する生物について確認できる。

そこで、肋骨と坐骨の最下点、尻尾の任意点を利用することにより下腹のラインを設定し、これと肋骨を使って断面の基本形状を作成する。また、基本形状を首と尻尾方向に並行移動することにより体全体の仮形状を作成する。また頭部同様、表面から垂直方向に厚み $d[cm]$ を考えることで最終的な外皮形状を作成する。

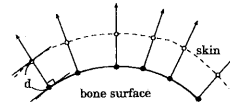


図 7: 頭部の外皮定義

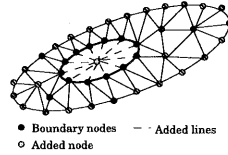


図 8: 穴埋め処理

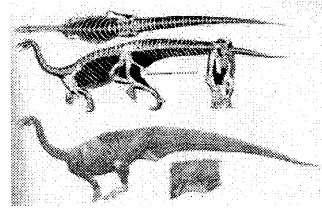


図 9: デイノニクスの筋肉復元図 (Paul, 1982 より)

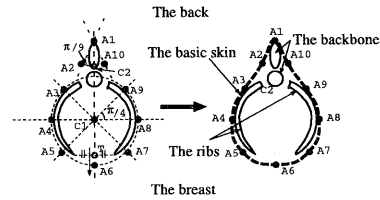


図 10: 胴体部の基本断面形状の作成

4.2.1 断面の基本形状の作成

作成における概念図を図 10 に示す。内臓部分を考慮するため、点 A_5, A_7 の中点 T を求め、これと坐骨の最下点を結ぶ直線をスムージング処理することにより腹部の形状 (点 A_6 の点列) を求める (式 5)。

$$A_{6i} = \frac{T_{i-1} + 2T_i + T_{i+1}}{4.0} \quad (5)$$

まず骨から点 A_1, A_3, A_4, A_8, A_9 を求める。次に、せびれを作成するため、 $\vec{A_1C_2}$ を点 A_1 を中心に 20 度回転させ点 A_2, A_{10} を求める。また点 C_1 を中心とし、点 A_4, A_6, A_8 を通る楕円から 45 度点をサンプリングして点 A_5, A_7 を求める。これは、骨から直接求めた時、場合によっては断面形状に実際にはありえない凹形状ができてしまうことを避ける。

以上の処理を最下点の肋骨の位置まで行なう。

4.2.2 その他の形状作成

4.2.1 で作成した基本形状のうち、首と尻尾にそれぞれ最も近い作成形状を基本形状とする。

尻尾の断面形状は、4.2.1における最も尻尾に近い断面形状を基本形状として作成する。図 10 における点 A_1 を骨から、点 A_6 を骨または T の作成点列から取得する。次に、 $\overrightarrow{C_1A_1}$ を点 C_1 を中心に 90 度回転させた位置に、それぞれ点 A_4, A_8 を作成する。これは、種によっては側面に骨が存在しない場合があるためである。最後に点 A_1, A_4, A_6, A_8 と基本形状点との比を求め、その他の点を求める。

首の断面形状は、4.2.1における最も首に近い断面形状を基本形状として作成する。尻尾部分と同様な処理を行なうが、点 A_6 を取得できないため、頭部と整合がとれるように、基本形状を一定倍率で縮小処理して断面形状を定義する。

4.3 腕, 脚, 指

本来、腕や脚、指の外皮形状は、生物データから決定することが望ましい。CT データの情報を用いて、化石との比較を行ない、CT の断面形状を使用するのが最適と思われるが、存在する CT データは人間や一部の動物 (犬) に限られ、利用が困難である。

そこで、本研究では楕円を断面形状として使用することで外皮形状を作成する。断面は、骨の中心軸に垂直な断面とするが、断面上に骨が 2 本存在する場合、骨 2 本の中心軸点の平均を中心軸とする。

4.3.1 腕および指形状の作成

腕の断面形状は、犬などの断面から、楕円中心と中心軸が一致し、楕円形状は円に近いことが分かっている。そこで、末端ほど円半径を小さく定義し、中心軸に沿って並行移動することで外皮形状を作成する。

指の断面形状は生物からの情報取得が困難であり、全体に比べて大変小さいので、断面を円として定義し、腕と同様に外皮形状を作成する。

4.3.2 脚

脚の断面形状は楕円と仮定するが、楕円中心と中心軸は必ずしも一致しない。ここで、長軸を a 、短軸を b とすると、生物データから $a:b = 1:0.7$ であることが推測された。また、中心軸は後方に位置することが分かったが、軸ずれや半径は、人間の CT を参考にして復元することとした。

4.4 作成結果

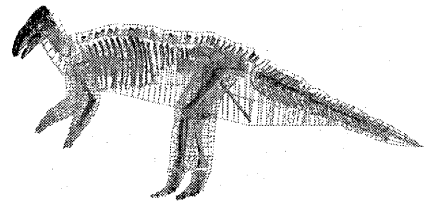
各パラメータを表 1 とし、首の最終地点での形状が基本形状にくらべて 70% 縮小するように線形的に変化させた場合、図 11 に示す結果を得た。作成形状はポリゴンが荒く、凹凸が激しい。

4.5 皮膚の平滑化処理

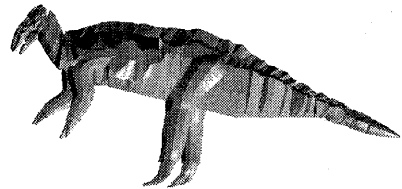
作成された形状の凹凸を緩和するため、NUSD-システムを用いて皮膚表面を平滑化する [5]。

凹凸の原因として、測定上の問題による骨格作成の不正確さと、断面のサンプル間隔の荒さが考えられる。そこで、頭部を除き、ポリゴンの細分化を行ない、増加したポリゴン頂点を移動点として平滑化を行なう。

平滑化処理によって得た結果を図 12 に示す。



(a) 骨とワイヤーを表示



(b) 皮膚表面を表示

図 11: 外皮形状作成結果

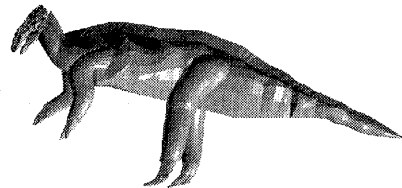


図 12: 平滑化処理結果

5 恐竜の模様の作成

ポリゴン表面に模様をつける手法として、一般的に用いられるのはテクスチャマッピングである [6][7]。しかし、恐竜の画像は取得不可能なため、容易に用いることができる手法はなく、また、爬虫類全身のテクスチャが取得可能としても、各部位の比が異なるなど多数の問題が生じる。

1 枚の画像を派生させ、全表面にマッピングする手法も考えられるが [8]、動物の画像を使用した場合、3 次元閉曲面であるために画像の境目ができ、任意に模様の大さを制御できないという問題が生じる。

表 1: 外皮形状作成に用いたパラメータ値

部位名	設定パラメータ	設定値 [cm]
頭	骨からの垂直距離	25
体	作成形状からの垂直距離	50
腕	円半径最大値	250
	円半径最小値	100
脚	長軸最大値	400
	長軸最小値	120
指	円半径最大値	100
	円半径最小値	80

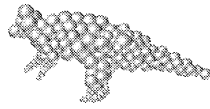
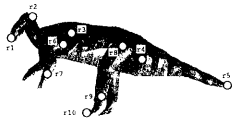


図 13: バブル半径の定義 図 14: バブル配置結果



図 15: 読み込み画像 1 図 16: 読み込み画像 2

この他に、生物の細胞レベルで色素を用いた模様の生成も考えられるが [9]、本研究ではバブル・メッシュ法 [10] を用いた模様の生成を提案する。

5.1 バブル・メッシュ法の利用

本手法では、バブル・メッシュ法を通常メッシュ構成ではなく、模様の生成に応用する。鱗などの規則的な模様を表すには、均等なバブル配置が利用できるからである。またバブル半径によって任意に模様の大さを制御可能である。

本手法ではバブルを離散的に移動させることにし、ポリゴン頂点をバブルの稼働点として、表面上にバブル配置を完成させた [11]。また、頭、胴体部、尻尾部、左右の腕、左右の脚の7部分のそれぞれの領域の両端に半径を与え、間は線形的に半径を求めることでバブル半径を決定する。指は半径一定として定義する。これは、指が全体に対して大変小さいためである。

以上の方法で、バブル半径を表 2 とし、図 13 のように設定した結果、図 14 のバブル配置を得た。

5.2 テクスチャマッピングの利用

任意の部分について模様の大さを制御するため、バブルを用いたテクスチャマッピングを示す。本手法では、バブルによって連続的な領域を効率良く小領域に分け、1 領域に 1 枚の画像をマッピングする。これにより、半径によって模様の制御が可能となる。

マッピングはバブル中心と画像中心を一致させ、模様の流れを考慮するため、画像の流れを示すベクトルと、骨の中心軸を示すベクトルが一致するようにする。

図 14 のバブル配置を用い、図 15 をマッピングすると図 17、同様に図 16 をマッピングすると図 18 の結果を得た。この結果から、画像の同士の境界が認識されてしまうことが分かる。これを改善するには、画像またはブレンディングに何らかの工夫が必要である。

表 2: バブル半径定義例

部位名	最大半径 [cm]	最小半径 [cm]
頭	269.1 (r_1)	228.7 (r_2)
胴体部	293.6 (r_3)	193.5 (r_2)
尻尾部	199.0 (r_4)	193.5 (r_5)
右腕	237.8 (r_6)	84.1 (r_7)
左腕	237.8 (r_6)	84.1 (r_7)
右脚	303.1 (r_8)	240.7 (r_9)
左脚	303.1 (r_8)	240.7 (r_9)
指	-	84.1 (r_{10})

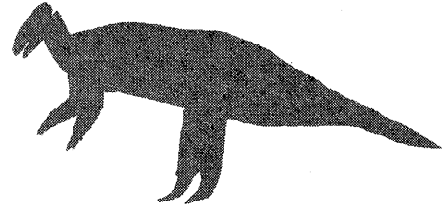


図 17: マッピング結果 1

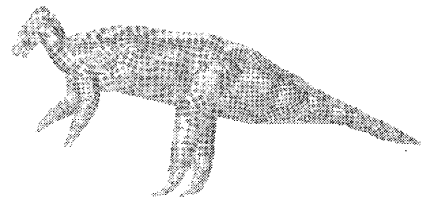


図 18: マッピング結果 2

5.3 バブル中心を利用した模様の生成

5.2 では境界が目立って認識されてしまうという問題が生じた。そこで本研究では、バブルを利用した模様の作成手法を提案する。本手法は、バブル中心を特徴点とし、注目点と特徴点との距離を用いた関数によって注目点での輝度を決定する [12]。その結果、3 次元閉曲面においても連続した模様が作成可能となる。

任意のポリゴン頂点 x から最も近い特徴点までの距離を $F_1(x)$ とし、 n 番目に近い特徴点までの距離を $F_n(x)$ とする ($0 \leq F_n(x) \leq F_{n+1}(x)$)。このとき、輝度 $Q(x)$ を式 7 で定義する。

$$T = aF_1 + bF_2 + cF_3 + dF_4 \quad (6)$$

$$Q(x) = \frac{T(x) - T_{min}}{T_{max} - T_{min}} \quad (7)$$

a, b, c, d は変数であり、この値を変えることで様々な模様が作成可能である。また、基本色を (R_c, G_c, B_c) とした場合、色は式 8 で決定する。

$$\begin{cases} R(x) = R_c \times Q(x) \\ G(x) = G_c \times Q(x) \\ B(x) = B_c \times Q(x) \end{cases} \quad (8)$$

図 14 のバブル配置を用い、図 19 の腹部を参考に変数を $(a, b, c, d) = (-1, 1, 0, 0)$ とした結果、図 21 を得た。また、実際に爬虫類 (図 20) からバブル配置を作成し (図 22)、変数を $(a, b, c, d) = (1, -1, 0, 0)$ とした結果、図 23 を得た。

バンプマッピングを施せば、鱗のような表現が可能であると考えられる。また、バブル配置を 2 種類



図 19: 恐竜模型



図 20: 恐竜模型

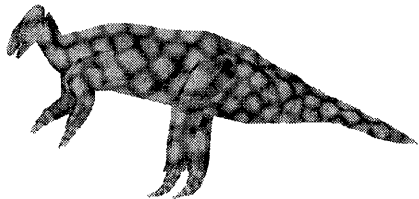


図 21: 模様を作成結果 1

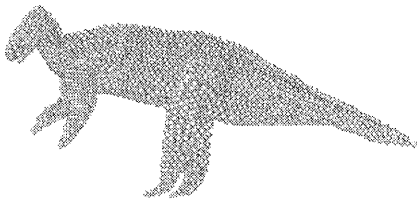


図 22: 爬虫類を利用したバブル配置

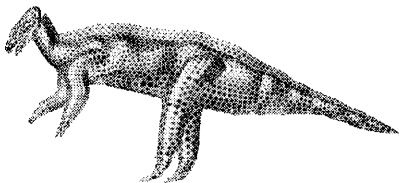


図 23: 模様を作成結果 2

用いることで、特徴の異なる 2 つの模様を制御可能である。

6 まとめ

本研究では、実存する恐竜化石を用いて、できるだけ学術的根拠を利用した 3 次元形状および模様を再現することを目標とし、対象物の特性にとらわれない形状の構築と作成支援について研究を進めた。その結果、複数枚の骨格の展示写真と実測値、模様の作成に利用する爬虫類の写真などを使用することにより、形状と模様を再現することができた。本研究で用いた手法は骨格の変化に容易に対応できるため、骨格復元の参考シミュレーションとしても使用できると考えられる。

今後の課題として、以下の点があげられる。

1. 動物の CT データを利用した外皮の作成
2. 容易に変更可能な外皮作成ソフトウェアの構築
3. 特徴的な模様が作成できる手法の検討
4. バブルメッシュ法の利用法の再検討
5. 簡単な運動シミュレーションの作成

復元過程を体感し、学術的知識を学ぶことを目的とした、教育用教材としての応用も検討する必要がある。

謝辞 本研究を遂行するにあたり、恐竜骨格の測定を快く承諾していただいた豊橋自然史博物館の方々、特に多数の有益な御助言を頂いた松岡敬二学芸係長に感謝する。

参考文献

- [1] 小島郁生, 犬塚則久, 山崎信寿, 杉本剛, 瀬戸口列司, 木村達明, 平野弘道: 恐竜学, 東京大学出版会 (1993).
- [2] Christopher McGowan: *Dinosaurs, Spitfires, and Dragons* (恐竜解剖), 工作舎 (1998).
- [3] Richard S. Lull, Nelda E. Wright: *Hadrosaurian Dinosaurs of North America*, University of Washington Press (1942).
- [4] Natural History Museum of Los Angeles County: *Dinosaurs Past and Present Volume 1 and 2*, University of Washington Press (1987).
- [5] 栗山繁: 不等間隔の拡散システムを用いたポリゴン曲面の平滑化および張力制御, 情報処理学会論文誌, Vol. 40, No. 3, pp. 1169-1176 (1999).
- [6] Kurt W. Fleischer, David H. Laidlaw, Bena L. Currin, Alan H. Barr: Cellular Texture Generation, *SIGGRAPH '95 Proceedings*, pp. 239-248 (1995).
- [7] Greg Turk: Generating Textures on Arbitrary Surface Using Reaction-Diffusion, *SIGGRAPH '91 Proceedings*, pp. 289-298 (1991).
- [8] David J. Heeger, James R. Bergen: Pyramid-Based Texture Analysis / Synthesis, *SIGGRAPH '95 Proceedings*, pp. 229-238 (1995).
- [9] Marcelo Walter, Alain Fournier, Mark Reimers: *Clonal Mozaic Model For the Synthesis of Mammalian Coat Ratterns*, Graphics Interface '98, pp. 82-91 (1998).
- [10] Kenji Shimada: *Physically-Based Mesh Generation: Automated Triangulation of Surfaces and Volumes via Bubble Packing*, Massachusetts Institute of Technology (1993).
- [11] 高橋英嗣, 金子豊久: 手術シミュレーションのためのバブルを用いた 3 次元メッシュの生成, 情報研報, Vol. 98, No. 16, pp. 43-48 (1998).
- [12] Steven Worley: A Cellular Texture Bases Funcion, *SIGGRAPH '96 Proceedings*, pp. 291-293 (1996).