

## Wavelet 変換を用いたテクスチャマッピングされたポリゴンの 合成型多重解像度表現と LOD 制御

三浦夕季, 伊達宏昭, ○金井 理

北海道大学 大学院工学研究科 システム情報工学専攻  
〒060-8628 札幌市北区北 13 西 8  
E-mail: kanai@coin.eng.hokudai.ac.jp

テクスチャマッピングされた 3 次元ポリゴンモデルにおいて、ポリゴン面数やテクスチャ画像解像度が增大すると、表示や転送を効率化するための多重解像度表現や LOD 制御手法が必要となる。そこで本研究では、まずテクスチャマップされた任意位相ポリゴンモデルから、画像を含めて Wavelet 変換が可能な Semi-regular 位相のポリゴンモデルへ変換するリメッシュ化手法を提案する。さらに、リメッシュ後のポリゴンモデルと画像に対し、それぞれ 3 次元と 2 次元 Wavelet 変換を適用し、用途に応じてポリゴンと画像の解像度を独立に制御できる合成型多重解像度表現されたモデルを構成する手法について述べる。

### Wavelet-based Multi-resolution Representation and LOD Control for Texture-mapped Polygonal Model

Yuki MIURA, Hiroaki DATE and Satoshi KANAI

Dept. of Systems and Information Engineering, Graduate School of Engineering, Hokkaido University  
Kita-13, Nishi-8, Kita-ku, Sapporo 060-8628, JAPAN

A multi-resolution representation and its LOD control become necessary for efficiently processing a texture-mapped polygonal model with huge faces and high-resolution texture images. For this purpose, first, we propose a re-meshing algorithm where the texture-mapped polygonal model with arbitrary topology can be converted into the one with semi-regular topology suitable for wavelet transform. Then, we discuss how to compose the multi-resolution representation of the texture-mapped polygonal model where the resolutions of the polygon geometry and the texture image can be individually controlled by respectively applying the 3D and 2D wavelet transforms to the polygonal model and to the texture images of the re-meshed model.

#### 1. はじめに

CG 分野では、計算機の記憶容量や計測システム性能の向上に伴い、非常に複雑で面数の多い 3 次元ポリゴンモデルの取り扱いが要求されてきている[1]。また表示のリアリティをさらに増すため、デジタル画像がポリゴンモデル上にテクスチャマッピングされたモデルが利用されることも多い。このテクスチャマッピングされた 3 次元ポリゴンモデルにおいて、ポリゴン面数やテクスチャ画像サイズが増加すると、膨大な記憶領域が必要となり、表示・転送に多くの時間を要するといった問題が生ずる。

そこで本研究では Wavelet 変換を利用し、テクスチャマップされたポリゴンモデルに対する、形状の解像度とテクスチャ画像の解像度とを独立に制御できる合成型多重解像度表現の提案を目的とする。Wavelet 変

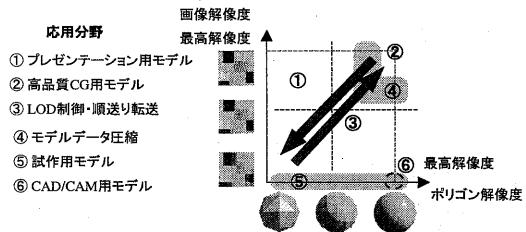


図1 合成型多重解像度表現の概念

換は、ポリゴンモデルと画像のそれぞれに対して統一的な理論で多重解像度表現を構成でき、またデータ圧縮や段階的転送にも適した手法である。

このような合成型多重解像度表現の実現により、図1に示す通り、高解像度な画像と形状をもつ単一モデルから、プレゼンテーション用・CAD/CAM 用・ラピッ

ドプロトタイピング装置での試作用・ネットワーク上での転送用といった、様々な用途に適した幾何形状と画像の解像度をもつモデルを統一的に生成することが可能となると思われる。

本研究では、任意のテクスチャ付ポリゴンモデルに対して、提案する合成型多重解像度表現を構成するため、下記の2点に関して議論する。

- (1) テクスチャマッピングされた任意位相のポリゴンモデルから、メッシュパラメタライゼーション手法を利用して、Wavelet 変換が可能な Semi-regular 位相構造のポリゴンモデルへ変換を行うリメッシュ化手法を提案する。また、このリメッシュ化にともなうテクスチャ画像の分割・統合による再定義手法を提案する。
- (2) リメッシュ後のポリゴンモデルとテクスチャ画像に対し、それぞれ3次元および2次元 Wavelet 変換を適用し、モデルの合成型多重解像度表現を構成する手法を提案する。また、この合成型多重解像度表現に対し、指定されたポリゴンモデル形状とテクスチャ画像の解像度に従った Wavelet 逆変換を行い、低解像度のモデルを生成する LOD 制御手法を述べる。

2節ではテクスチャマッピングされたポリゴンモデルの多重解像度化に関する関連研究について述べる。また、3節ではポリゴンモデルのリメッシュ化と画像の再定義法、4節では Wavelet 変換に基づく合成型多重解像度表現への変換、ならびにこの表現を利用した LOD 制御手法について述べ、5節で実行例を示す。

## 2. 関連研究

ポリゴンモデルを対象とする単純化、圧縮、多重解像度表現に関しては、これまで数多くの研究がなされている[2,3,4]。しかし従来の研究は、ポリゴンモデルの形状のみを対象とした解像度制御を目的としており、テクスチャ画像とポリゴンモデル形状の両者の解像度を独立に制御することを目的とした研究例は、殆ど報告されていない。またテクスチャマッピング手法それ自体の研究例は、数多く報告されているが[5],ポリゴンの解像度制御とテクスチャとの関係を議論した研究も数少ない。

Soucy らは、ポリゴンモデルが低解像度化されても表示品質を損なわないテクスチャマッピング手法を提案しているが[6], 画像そのものの解像度制御は取り扱っていない。Hoppe らのポリゴン削減技術においても[7], 色情報は頂点属性として形状と同等に取り扱う議論しかなされていない。また細分割曲面に対するシームレスなテクスチャマッピング手法も提案されているが[8], 画像の解像度制御までは議論されていない。

一方 Certain らは、Wavelet 変換を応用し、色情報付ポリゴンモデルの多重解像度表現と、そのプログレッシブ転送効率化手法を提案した[9]。この研究では、ポリゴンとテクスチャ画像の解像度を独立に制御する手法が実現されている。しかし、画像情報がポリゴン頂点の色情報として保持されているというケースを主に議論しており、一般的なテクスチャ付ポリゴンへの応用が難しい。またポリゴン頂点がテクスチャ座標情報をもつ場合にも言及しているが、画像に対して幾何形状用の基底関数を使って Wavelet 解析を行うため、画像の解像度とサイズは実質的に減少されない。また、任意のテクスチャ付ポリゴンモデルから多重解像度表

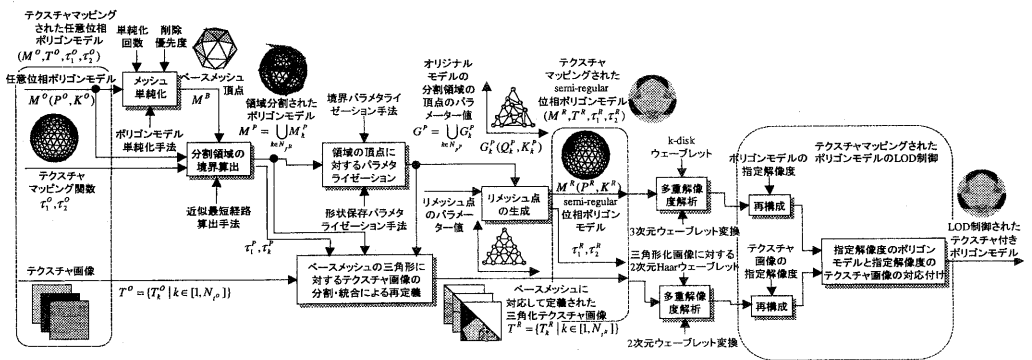


図2 テクスチャマッピング付ポリゴンモデルのリメッシュ化と多重解像度表現生成手順

現へ変換するリメッシュ法についても議論していない。

一方、伊達らはDEMデータに航空写真をマッピングした地形モデルに対し、画像と地形の両者を別々の基底関数でWavelet解析し、各々の解像度を独立に制御する手法を提案している[10]。

これらの研究に比較し本手法は、ポリゴン幾何形状と画像に対し別個の基底関数を利用したWavelet解析を行い、幾何形状と画像の両者の解像度を独立に容易に制御できること、また任意のポリゴンモデルから画像を含めて多重解像度表現可能なモデルへ変換する手法をも議論していること、を特徴とする。

### 3. テクスチャマッピングされたポリゴンモデルのリメッシュ化

#### 3.1 モデルの表記

入力となるテクスチャ付任意相ポリゴンモデルを  $(M^O, T^O, \tau_1^O, \tau_2^O)$  と表す。また、リメッシュ化で得られる semi-regular 位相をもつテクスチャ付ポリゴンモデルを  $(M^R, T^R, \tau_1^R, \tau_2^R)$  と表す。ここで  $M$  はメッシュを表し、 $M = (P, K)$ 、 $P = \{p_i \in \mathbb{R}^3 | i \in [1, N_p]\}$  (メッシュ幾何)、 $K = V \cup E \cup F$  (メッシュ位相)、頂点集合  $V = \{\{i\} | i \in [1, N_p]\}$ 、稜線集合  $E = \{\{i, j\} | i, j \in [1, N_p]\}$ 、面集合  $F = \{\{i, j, k\} | i, j, k \in [1, N_p]\}$  とする。また、 $T = \{T_k | k \in [1, N_t]\}$  は、メッシュにマッピングされているテクスチャ画像 ( $N_t$ : テクスチャ画像枚数) である。 $\tau_1 = \{\tau_{1k} | k \in [1, N_t]\}$ 、 $\tau_2 = \{\tau_{2k} | k \in [1, N_t]\}$  は、テクスチャマッピング関数であり、メッシュの面と頂点に対するテクスチャ座標を、 $\tau_{1k}: F \times V \rightarrow T_k \times [1, 0] \times [0, 1]$ 、 $\tau_{2k}: [1, 0] \times [0, 1] \rightarrow [I_k - 1, 0] \times [0, J_k - 1]$  のように与える。 $I_k, J_k$  は、 $k$  枚目のテクスチャ画像の縦横画素数である。

#### 3.2 リメッシュ化手順概要

Wavelet 変換に基づいた多重解像度解析が行えるポリゴンモデルは、Semi-regular な位相構造を持つものに限定される[11]。しかし、一般のポリゴンモデルはこのような位相構造を必ずしも持っていない。そこで本研究では、メッシュのパラメタライゼーションを応用し、任意位相のポリゴンモデルを Semi-regular な位相構造へ変換するリメッシュ化手法を開発した。またこのリメッシュ化に伴い、テクスチャ画像の分割統合による再定義も行い、テクスチャ画像に関しても Wavelet 変換による画像の多重解像度解析を実行可能

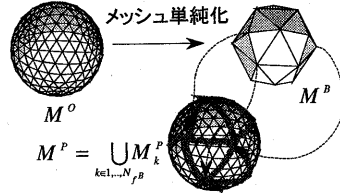


図3 メッシュ単純化とメッシュ領域分割

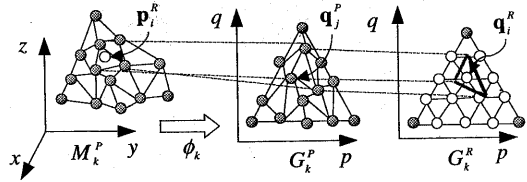


図4 パラメタライゼーションとリメッシュ点生成

な形式へ変換する。

図2に、与えられたオリジナルモデル  $(M^O, T^O, \tau_1^O, \tau_2^O)$  を、semi-regular 位相をもつモデル  $(M^R, T^R, \tau_1^R, \tau_2^R)$  へリメッシュ化する手順概要を示す。以下に、これら処理手順の詳細を述べる。

#### 3.3 メッシュ単純化とメッシュの領域分割

オリジナルモデル  $M^O = (P^O, K^O)$  に対し、等角写像と頂点削除とに基づいたメッシュ単純化手法[12]を適用し、指定された回数に応じモデルを段階的に単純化し、図3のように  $M^O$  の最粗近似となるベースメッシュ  $M^B = (P^B, K^B)$  を生成する。

次に、オリジナルポリゴンモデル  $M^O$  上で、ベースメッシュ  $M^B$  の頂点間を結ぶ最短経路を、[13]のアルゴリズムにより求める。求められた最短経路対応した新たな頂点・稜線・面を  $M^O$  内に追加した後、この経路を境界エッジとする  $N_{f^B}$  ( $= |F^B|$ ) 個の複数領域に  $M^O$  の表面を分割する。この領域分割されたメッシュを  $M^P = (P^P, K^P)$ 、各領域を  $M_k^P = (P_k^P, K_k^P)$  ( $k \in [1, N_{f^B}]$ ) と表す。

#### 3.4 パラメタライゼーションとリメッシュ点の生成

図4のように、生成された分割領域  $M_k^P$  ごとに、境界エッジの長さに応じて境界頂点を2次元パラメータ平面  $(p, q)$  上の三角形エッジ上に配置し、形状保存パラメタライゼーション手法[14]を用いて、領域  $M_k^P$  に対するパラメタライゼーション  $G_k^P = (Q_k^P, K_k^P)$  を生成す

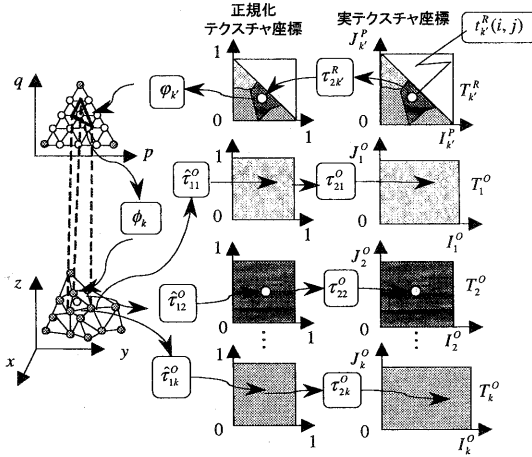


図5 テクスチャ画像の分割・統合による再定義

る。ここで、領域  $M_k^p$  内の頂点集合  $V_k^p$  に対応するパラメータ値の集合を  $Q_k^p = \{q_j^p \in \mathbb{R}^2 \mid j \in [1, N_{p,k}]\}$  とし、パラメタライゼーションを構築する写像を  $\phi_k: V_k^p \rightarrow Q_k^p$  と表す。

さらに、このパラメタライゼーション  $G_k^p$  を利用し、リメッシュ点座標値とリメッシュ点に対応するテクスチャ座標値を計算する。リメッシュ頂点の配置は、Wavelet 変換が適用できる Semi-regular な位相構造となるよう、図4に示すよう、 $G_k^p$  内で4対1細分割連結性を持つように配置する。リメッシュ点  $\{i\} \in V^R$  の3次元座標値  $p_i^R$  とテクスチャ座標値は、点  $i$  を包含するオリジナルポリゴンモデルの頂点を  $G_k^p$  内で探索し、それらの重心座標補間により求める。以上により、多重解像度解析可能な semi-regular 位相をもつポリゴンモデル  $M^R = (P^R, K^R)$  が生成される。

### 3.5 テクスチャ画像の分割と統合による再定義

最後にポリゴンモデルのリメッシュに応じ、オリジナルのテクスチャ画像の分割と統合、リメッシュ頂点へのテクスチャ座標の割り当てを行う。この再定義では、2.2で作成された分割領域  $M_k^p$  に、正方形画像の下三角部分にのみ画素が定義されている1枚の三角化テクスチャ画像が対応付けられる。画像を三角化することで、分割領域への対応付け、および4.2の画像に対する2次元 Wavelet 変換が容易となる。

$M_k^p$  に対応する新たなテクスチャ画像を  $T_k^R$  とする。 $T_k^R$  内の画素  $(i, j)$  の RGB 値  $t_k^R(i, j)$  は、図5

から次式(1)の合成関数により求まる。

$$t_k^R(i, j) = \tau_{2k}^o \circ \hat{\tau}_{1k}^o \circ \phi_k^{-1} \circ \tau_{2k}^{p^{-1}}(i, j) \quad (1)$$

ここで、 $\phi_k$  は2次元パラメータ平面を正規化テクスチャ座標系の下三角領域に線形に写像する関数である。また、 $\hat{\tau}_{1k}^o$  はリメッシュ頂点位置に対応した正規化テクスチャ座標値を、 $M_k^p$  上の面頂点もっている正規化テクスチャ座標値  $\tau_{1k}^o$  の重心補間から求める関数である。これにより、ポリゴンモデルの分割領域  $M_k^p$  ごとに対応づけられた、三角化テクスチャ画像  $T_k^R$  が再定義できる。また、3.4により生成されたリメッシュ点のテクスチャ座標値から、三角化画像へのテクスチャマッピング  $\tau_1^R$ 、 $\tau_2^R$  が新たに定義される。

## 4. Wavelet 変換に基づくテクスチャ付ポリゴンの合成型多重解像度表現

### 4.1 K-disk Wavelet 変換によるポリゴンモデルの多重解像度表現

リメッシュ処理から作られた Semi-regular 位相をもつポリゴン  $M^R$  に対し、K-disk Wavelet による3次元 Wavelet 変換[15]を行うことで、 $M^R$  の多重解像度表現が構成できる。その基本概念は図6に示すように、メッシュ上の三角形の四対一統合によりモデルを低解像度に近似すると共に、その次に失われた詳細部を Wavelet 係数ベクトルとして分解するものである。

リメッシュ後のポリゴンモデル  $M^R$  を、最高解像度レベル  $J$  のメッシュ  $M^J (= M^R)$  である考えると、 $M^J$  に対する K-disk Wavelet による3次元 Wavelet 変換(分解)は、式(2)で与えられる。

$$V^{j-1} = A^j V^j, \quad W^{j-1} = B^j V^j \quad (j \in [1, J]) \quad (2)$$

ここで、 $V^j$  は解像度レベル  $j$  のメッシュ頂点座標値を

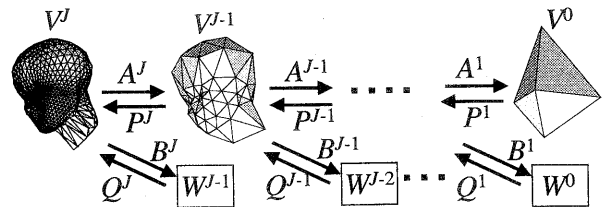


図6 ポリゴンモデルに対する Wavelet 変換・逆変換

並べた行列で  $V^j = [p_1^j, p_2^j, \dots, p_{N_p^j}^j]^T$  ( $N_p^j$  はレベル  $j$

のメッシュ頂点数), また  $A^j$  は低解像度近似モデルの頂点  $V^{j-1}$  を抽出する解析フィルタ行列,  $B^j$  は近似で失われた詳細部を表すウェーブレット係数ベクトル

$W^{j-1} = \begin{bmatrix} w_1^{j-1}, w_2^{j-1}, \dots, w_{N_w^{j-1}}^{j-1} \end{bmatrix}^T$  を抽出する解析フィルタ行列である. 一方, 低解像度の近似モデルとウェーブレット係数ベクトルから高解像度のモデルを再生する逆変換 (再構成) は, 式(3)で与えられる.

$$V^j = P^j V^{j-1} + Q^j W^{j-1} \quad (3)$$

ここで,  $P^j$  は  $V^{j-1}$  の頂点間に新たに中点を作り出す再構成フィルタ行列, また  $Q^j$  は生成された中点位置を補正する再構成フィルタ行列となる.

式(2)のウェーブレット変換を,  $M^j$  から  $j = J, J-1, \dots, 1$  と繰り返し適用することにより, 最粗近似モデル  $M^0$  とウェーブレット係数ベクトルの系列  $W^{J-1}, W^{J-2}, \dots, W^0$  から構成される  $M^J$  に対する多重解像度表現が得られる. この多重解像度表現に対し, 指定された解像度まで式(3)の再構成を行うことにより, 任意の低解像度メッシュモデル  $M^j$  を容易に得ることができる.

#### 4.2 HarrWavelet 変換による3角化テクスチャ画像の多重解像度表現

リメッシュ後の領域  $M_k^P$  に対応づけられた3角形画像

$T^J = \{t^J(k, l) \in C^3 \mid k, l \in [0, 2^J - 1], l \leq 2^J - 1 - k\}$  を,

最高解像度の画像とする. 但し  $C^3$  は RGB カラー成分値の集合とし, 画像1辺のサイズは2のべき乗と仮定する. この画像に対し, 低解像度の近似3角化画像を解析可能な2次元 HarrWavelet 変換[15]は, 次式(4)で定義できる.

$$\begin{bmatrix} t^{j-1}(k, l) \\ w_{LH}^{j-1}(k, l) \\ w_{HL}^{j-1}(k, l) \\ w_{HH}^{j-1}(k, l) \end{bmatrix} = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t^j(2k, 2l) \\ t^j(2k+1, 2l) \\ t^j(2k, 2l+1) \\ \tilde{t}^j(2k+1, 2l+1) \end{bmatrix} \quad (4)$$

但し,  $k, l \in [0, 2^{j-1} - 1]$ ,  $w_{LH}^{j-1}, w_{HL}^{j-1}, w_{HH}^{j-1}$  は画像のウェ

ーブレット係数である. また右辺  $\tilde{t}^j(2k+1, 2l+1)$  の値は, この画素値が定義済みの場合は,  $t^j(2k+1, 2l+1)$  とし, また画素が未定義の場合には

$$\left\{ t^j(2k, 2l) + t^j(2k+1, 2l) + t^j(2k, 2l+1) \right\} / 3$$

ととる. 式(4)の2次元 Wavelet 変換を,  $j = J, J-1, \dots, 1$  と繰り返し適用することにより, 三角化画像の多重解像度表現が得られる. また, この多重解像度表現に対して, 指定された画像解像度まで式(4)の Wavelet 逆変換を行うことにより, 任意の低解像度近似三角化画像  $T^{J-1}, T^{J-2}, \dots, T^0$  を得ることができる.

#### 4.3 LOD 制御された合成型多重解像度表現の構成

利用目的に応じ, ポリゴンモデル解像度  $j_M$  とテクスチャ画像解像度  $j_t$  が指定されると, それぞれ 4.1 および 4.2 の Wavelet 逆変換を用いて, 指定解像度のポリゴンモデル  $M^{j_M}$  と画像  $T^{j_t}$  を生成する. すでにポリゴンモデル  $M^J$  の各点について, パラメタライゼーションが行われているため,  $M^{j_M}$  の各頂点に対するパラメタライゼーションも容易に計算でき, 面積座標補間により  $M^{j_M}$  の各頂点の正規化テクスチャ座標が求められる. さらに近似画像  $T^{j_t}$  の三角化定義領域を, 図5のように正規化テクスチャ座標系の下三角領域へ常に対応づけるよう写像  $t_{2k}^R$  を再構成すれば, 任意解像度のテクスチャ画像を任意解像度のポリゴンモデル上へマッピングしたモデルを簡単に生成できる.

#### 5. 実行例

図7に, 3.2-3.4 節で述べたポリゴンモデルの手順を用いて, 任意位相ポリゴンモデルから Semi-regular 位相をもつ Wavelet 変換可能なポリゴンモデルへリメッシュ化した結果を示す. 提案手法に従い, 領域分割およびリメッシュが正しく行われていることが判る.

また図8に, 3.5 節で述べた分割領域に対応したテクスチャ画像の分割と統合による再定義結果を示す. テクスチャマップされたオリジナルのポリゴンモデルに対して, 表示上ほぼ等価な Semi-regular 位相をもつポリゴンモデルが生成されていることが判る.

なお, 4 節で提案する Wavelet 変換・逆変換を用いたポリゴン・画像の LOD 制御手法の実装を現在進行中である.

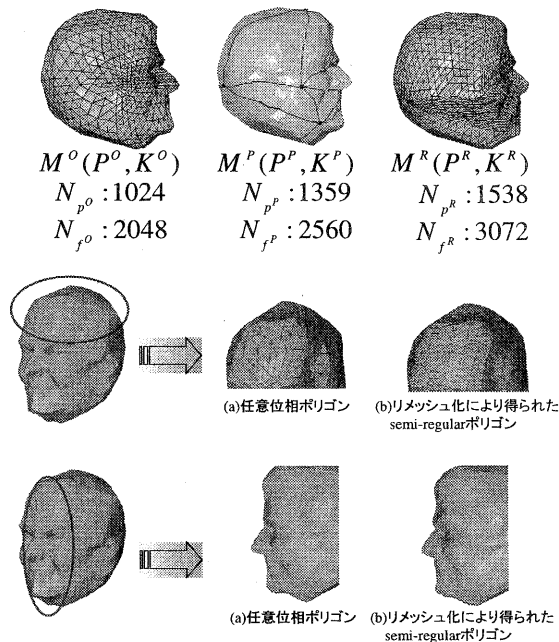


図7 Semi-regular 位相構造への  
ポリゴンモデルのリメッシュ例

## 6. まとめ

本報では、テクスチャマップされたポリゴンモデルに対し、幾何形状と画像の解像度を柔軟に制御する一手法を提案した。まず、任意位相ポリゴンモデルから、パラメタライゼーション手法を用いて、画像の分割も含めてWavelet変換が可能なSemi-regular位相のポリゴンモデルへ変換するリメッシュ化手法を提案した。さらに、リメッシュ後のポリゴンモデルと画像に対し、それぞれ3次元と2次元Wavelet変換を適用し、ポリゴンと画像の解像度を独立に制御できる合成型多重解像度表現されたモデルを構成する手法について述べた。

提案する合成型多重解像度表現により、3次元ポリゴンモデルを利用する分野において、様々な用途に適した解像度へ削減されたモデルを、統一的手法で生成することが可能となると思われる。

## 参考文献

- [1]鈴木宏正:「3次元メッシュモデルの生成と表現」, 情報処理学会誌, 41,10, pp.1103-1107, (2000).
- [2]P.Heckbert et al: Survey of surface simplification algorithms, Technical Report, CMU Dept. of Computer Science, (1997).
- [3]G.Taubin et al: 3D Geometric Compression, ACM SIGGRAPH 2000 Course Notes, 38, (2000).

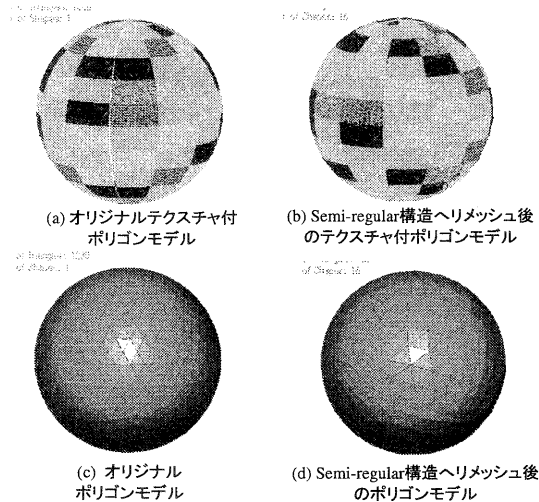


図8 Semi-regular 位相構造のポリゴンモデルに  
対するテクスチャ画像の再定義例

- [4]D.Zorin(ed.) et al: Subdivision for Modeling and Animation, ACM SIGGRAPH 2000 Course Notes, 23,(2000).
- [5]F.M.Weinhaus et al: Texture Mapping 3D Models of Real-world Scenes, ACM Computing Surveys, 29,4, pp.325-365, (1997)
- [6]M.Soucy et al: A texture-mapping approach for the compression of colored 3D triangles", The Visual Computer, 12, pp.503-514, (1996)
- [7]H.Hoppe: Smooth View-dependent Level-of-Detail Control and its Application to Terrain Rendering, Proc. of SIGGRAPH 98 pp.95-104, (1998)
- [8]D.Piponi et al.: Seamless Texture Mapping of Subdivision Surfaces by Model Pelting and Texture Blending, Proc. of SIGGRAPH 2000,pp.471-478, (2000)
- [9] A.Certain, J.Popovic, T.DeRose, T.Duchamp, D.Dalesin and W.Stuetzle: "Interactive multiresolution surface viewing", Proc. ACM SIGGRAPH'96, pp.91-98, (1996).
- [10] 伊達宏昭ほか:「テクスチャ合成型多重解像度表現による3次元地形モデルの適応的詳細度制御」, 精密工学会北海道支部講演論文, pp.56-57,(2000)
- [11] M.Lounsbery et al.: Multiresolution analysis for surfaces of arbitrary topological type, ACM Trans. Graph. 16, 1, pp 34 - 73 (1997).
- [12] A.W.F.Lee et al: Multiresolution Adaptive Parameterization of Surfaces. Proc. of SIGGRAPH 98 pp.95-104, (1998)
- [13]金井他: グラフの選択的詳細化による多面体モデル上の近似最短経路算法, 精密工学会秋季大会講演論文 p. 147, (1999)
- [14]M.S.Floater: " Parametrization and smooth approximation of surface triangulations", Computer aided geometric design, 14, pp231-250, (1997).
- [15]E.J. Stollnitz, T. DeRose and D.H. Salesin: Wavelets for Computer Graphics: Theory and Applications, Morgan