

メッシュモデルによる表面テクスチャ付き形状設計支援システム

伊達 宏昭, 金井 理, 岸浪 建史, 岩越 睦郎[†], 小林政義[†]

北海道大学大学院情報科学研究科

060-0814 札幌市北区北14西9

[†] 北海道立工業試験場

本論文では、質感や機能面から重要となるしぼやロゴ等の微小な凹凸からなるテクスチャが貼り付けられた形状の効率的な設計・試作を支援するための、三角形メッシュモデルを用いたテクスチャ付き形状設計支援システムについて述べる。本システムは、3D スキャンやテクスチャ抽出によるテクスチャメッシュデータの取得、取得したテクスチャのデジタルデータ処理、ならびに、領域や場所指定に基づくテクスチャメッシュ合成によるテクスチャ付き形状モデリング機能からなり、効率的で柔軟なテクスチャ付き形状設計を実現している。

A Textured Shape Design System using Mesh Modeling

Hiroaki Date, Satoshi Kanai, Takeshi Kishinami,
Mutsuro Iwakoshi[†] and Masayoshi Kobayashi[†]

Graduate School of Information Science and Technology, Hokkaido University

Kita-14, Nishi-9, Kita-ku, Sapporo 060-0814

[†] Hokkaido Industrial Research Institute

In this paper, we introduce a design system of textured shapes with small bumps using mesh-modeling techniques. Our system consists of three functions: 1) texture mesh data acquisition based on 3D scanning of sample texture material and texture extraction from existing textured models, 2) digital data processing of the texture mesh, and 3) textured shape modeling by combining meshes according to the user-specified region or direction of texture. These functions allow us to achieve effective textured shape design and prototyping.

1. はじめに

製品の質感や機能面から重要となる微小な凹凸からなるしぼやロゴ、幾何学模様などのテクスチャを含む製品形状の試作は、職人による実テクスチャ材の貼付けや金型表面処理により行われており、製作コスト・期間の観点から設計段階での形状評価に利用するには未だ問題が多い。より良いデザインの形状を作り出すためにはこの試作サイクルの短縮化、ならびに低コスト化が必要不可欠である。この問題の解決には RP を用いた造形技術の利用が考えられるが、現状の 3DCAD システムではテクスチャ付き形状のモデリング機能が一般的になく、そのような試作プロセスの実現は困難である。

計算機上でテクスチャ付き形状を表現・モデリングするためによく利用される方法としてバンプマップや

ディスプレイメントマップがある^[1]。バンプマップは凹凸情報に従ってモデルの法線を修正することにより、あたかも凹凸があるかのようにモデルを表示するが、実際にはモデルを変形していない。一方で、ディスプレイメントマップは、実際に形状に凹凸を加える。これらの方法では、微細形状の凹凸はグレースケール画像の輝度値によって定義されている。高精度なモデリングの際には、高解像度な画像や基本形状の多くの細分化処理がデザイナーに要求される。

近年では、カットアンドペースト (CP) による形状モデリングに関する研究がなされてきている。CP は、既存のモデルからテクスチャや部品単位の形状を切り取り、別のモデルへ貼り付ける、非常に有用なモデリング方法である。Biermann ら^[2]は細分割曲面上で、最小自乗近似による基本形状推定と高速なパラメタライ

ゼーションを用いた合成による詳細フィーチャの CP を実現している。Wang ら^[3]は、再サンプリングとフィルタリング手法に基づく詳細形状の抽出と合成手法を提案している。また、Masuda ら^[4]は、セグメンテーションとボリュームフィッティングに基づいて部品レベルに近い単位の形状の CP を実現している。

本研究では、基本のコンセプトをこの CP においた、より精巧なテクスチャ付き形状を効率よく設計・試作するためのシステムを開発した。テクスチャと、これが貼り付けられる基本形状を含む全ての形状の表現はメッシュモデルとした。メッシュは RE や他の形状表現から容易に生成できるため、メッシュを全ての形状表現に利用する事によってシステムが広い適用性を持つと言える。また、一般的な不規則メッシュを取り扱える事は、従来の方法の制限となっていた規則性(画像の規則配列^[1]や細分割連結性^[2], 規則サンプリング^[3])を考慮する必要がなく、より一般的で精度良く形状を表現できる。システムは、テクスチャ取得機能、テクスチャデータ処理機能、テクスチャ合成機能からなる。最後に本システムを用いたテクスチャ形状の設計、試作例を含め本システムの有効性を示す。

2. システム概要と表記

本研究で開発したテクスチャ付き形状設計システムを用いたテクスチャ付き形状試作手順の概要を図 1 に示す。本システムにおけるテクスチャ合成形状の試作は以下の手順で行われる：

- 1) テクスチャを合成する基本形状の設計
- 2) テクスチャデータベースからの利用したいテクスチャの選択とテクスチャデータ処理
- 3) 基本形状へのテクスチャ合成
- 4) 出力メッシュを用いた RP によるテクスチャ付きモデルの造形

本システムでは、2)のテクスチャデータベース内に登録するテクスチャデータの取得方法として、画像からのテクスチャメッシュ生成、サンプルテクスチャの物理モデルの 3D スキャン、既存のメッシュからのテクスチャ抽出の 3つの方法を実現している。

本論文では、三角形メッシュを $M = \langle P, K \rangle$ と表す。ここで P は頂点位置集合: $P = \{\mathbf{p}_i = (x_i, y_i, z_i) \in R^3 \mid 1 \leq i \leq n\}$, K はメッシュ要素間の接続性を表す位相: $K = V \cup E \cup F$ (頂点: $i \in V$, 稜線: $(i, j) \in E$, 面分: $(i, j, k) \in F$) である。また、頂点 i の法線を \mathbf{n}_i , 位相要素 t に隣接、もしくは接続する頂点、稜線、面分集合をそれぞれ v_i^* , e_i^* , f_i^* と表す。テクスチャが貼り付けられる基本形状、テクスチャ、テクスチャ付きメッシュの要素はそれぞれ上付きの B, D, S で区別する。

本研究では、テクスチャ付き形状の頂点位置は、基本形状の頂点を、その法線方向にテクスチャの高さ値

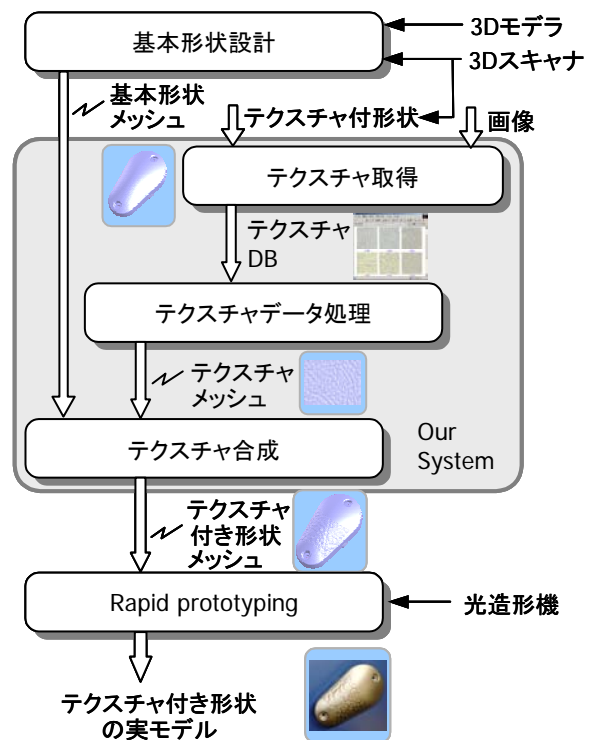


図1 テクスチャ付き形状設計支援システム機能概要とテクスチャ付き形状試作手順

z_i^D だけオフセットしたものとして定義する。これは次式で表される。

$$\mathbf{p}_i^S = \mathbf{p}_i^B + z_i^D \mathbf{n}_i^B \quad (1)$$

3. テクスチャ取得

本研究では、テクスチャデータ取得に、画像からのテクスチャメッシュ生成、サンプルテクスチャの 3D スキャン、既存のモデルからのテクスチャ抽出の 3つのアプローチを実現した。これらのアプローチから生成されるテクスチャメッシュはデータベースに蓄えられ、モデリングの際に選択され、利用される。

3.1 画像からのテクスチャメッシュ生成

画像からテクスチャメッシュを生成する方法はロゴや規則模様などの画像で記述が容易な詳細形状に有用である。画像の各画素の輝度値を高さ値 z_i^D とし、頂点間の間隔を設定する事で、それぞれの画素に対応する頂点を生成し、それらを規則メッシュで接続することにより画像からテクスチャメッシュを生成する。

3.2 サンプルテクスチャのスキャン

もし、壁紙のような平坦なテクスチャの実サンプルを持っているならば、これを直接 3次元スキャンすることによって、テクスチャの凹凸を高さ値としてもつメッシュを得て、これを利用する。

3.3 既存メッシュモデルからのテクスチャ抽出

既存のテクスチャ付きメッシュモデルからのテクスチャ抽出は、手作業での形状定義が困難なテクスチャの利用を可能にする。本研究では、図2に示すような、平滑化とパラメタライゼーションを用いたメッシュの平坦化による、新しい既存モデルからのテクスチャ抽出法を提案する。

3.3.1 テクスチャ凹凸と基本形状の分離

テクスチャの凹凸と基本形状を分離するために、本手法では、図3に示すように、2段階の平滑化処理を適用する。まず、法線の平滑化により基本形状の法線 \mathbf{n}_i^B を推定し、その後、これを用いた形状の平滑化により、テクスチャ凹凸 z_i^D と基本形状を分離する。

基本形状は、テクスチャが合成される前は滑らかであったと仮定し、基本形状の法線 \mathbf{n}_i^B は、テクスチャ付き形状の法線ベクトルの平滑化により算出する(図3(b))。この法線平滑化は単純に隣接頂点 i の法線ベクトル \mathbf{n}_i^S を、隣接頂点の法線ベクトルを用いて繰り返し平均化することにより行う： $\mathbf{n}_i^S \leftarrow \sum_{j \in \text{neigh}_i} \mathbf{n}_i^S / A$ 。ここで A は $\|\mathbf{n}_i^S\| = 1$ とするための正規化因子である。以降、平滑化後の法線ベクトルを $\bar{\mathbf{n}}_i^S (= \mathbf{n}_i^B)$ と記述する。

次に、テクスチャ凹凸と基本形状の幾何を分離するために形状を平滑化する。この平滑化時の頂点の移動量をテクスチャの凹凸 z_i^D として用いるために、本手法では、従来の平滑化法^[5,6]と異なり、頂点を $\bar{\mathbf{n}}_i^S$ 方向にのみ移動させ、完全に接線方向の頂点ドリフトを抑える(図3(c))。ゆえに、得られる z_i^D は、メッシュの密度や接続性の違いに影響を受け難いといえる。

形状の平滑化は、図4に示すように、ある頂点 i の隣接頂点 j の位置 \mathbf{p}_j^S と、その平滑化された法線 $\bar{\mathbf{n}}_j^S$ で定義される平面 $plane(j)$ 上への頂点 i の $\bar{\mathbf{n}}_i^S$ 方向の投影点を全ての隣接頂点に対し算出し、これらの平均化により行う。 $plane(j)$ は、 \mathbf{v} を任意の位置ベクトルとして、 $(\mathbf{v} - \mathbf{p}_j^S) \cdot \bar{\mathbf{n}}_j^S = 0$ と記述でき、式(1)より得られる $\mathbf{p}_i^S - z_i^D \bar{\mathbf{n}}_i^S$ を \mathbf{v} へ代入し、 $z_i^D (= d_i(j))$ について解く事により、頂点 i の隣接頂点 j に対するテクスチャ凹凸 $d_i(j)$ が得られる。形状の平滑化は、法線の平滑化と同様に、 $d_i = \sum_{j \in \text{neigh}_i} d_i(j) / |v_i^S|$ により $d_i(j)$ を平均化し、 $\mathbf{p}_i^S \leftarrow \mathbf{p}_i^S + d_i \bar{\mathbf{n}}_i^S$ と繰り返し頂点位置を修正する事により行う。

上述の平滑化処理は形状の縮小や膨張の原因となる。そこで、本手法を Laplacian の定義を拡張したものとみなし、 λ - μ アルゴリズム^[6]と同様の処理によりそのような効果を防ぐ。結果として、平滑化は、符号の異なる係数 λ と μ で重みつけられた d_i を用いた繰り返しの頂点位置修正になる。各ステップにおける d_i を保存しておく事により、滑らかな基本形状と、テクスチャの基本形状の法線方向の凹凸を表す z_i^D が得られる。

3.3.2 テクスチャメッシュ生成

3.3.1 節の処理で得られた基本形状を平坦化するこ

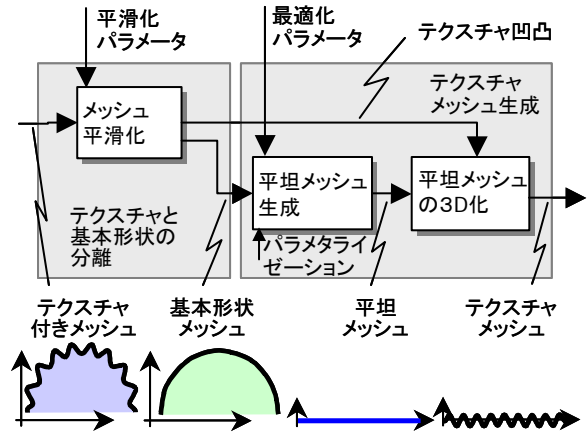


図2 テクスチャ抽出アルゴリズム

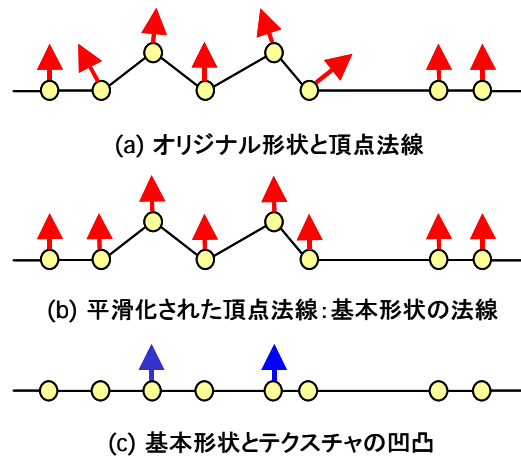


図3 テクスチャ凹凸と基本形状の分離

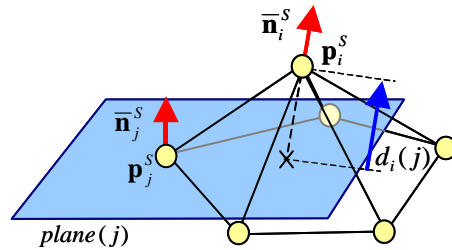


図4 隣接頂点に対するテクスチャ凹凸

とで、テクスチャメッシュの凹凸の定義域となる平坦なメッシュを得る。このために、メッシュのパラメタライゼーション法^[7,9]を用いる。

本研究では、平坦メッシュを生成するために、Maillotらのパラメタライゼーション法^[8]を用いた。なぜならば、平面グラフ構築に境界を固定する必要^[7]がなく、それらが最適化計算の結果として決定され、更に、結果として得られる平面グラフ上で3次元の稜線長が可能な限り保存されるからである。この性質は結果のグラフをテクスチャの定義域として利用する目的に非常に良く適している。

この手法では、まず、以下の2つの目的関数を定義

する.

$$E_{len} = \sum_{(i,j) \in E} \frac{(\|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j\|^2 - \|\mathbf{q}_i - \mathbf{q}_j\|^2)^2}{\|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j\|^2} \quad (2)$$

$$E_{are} = \sum_{(i,j,k) \in F} \frac{\{\det[(\mathbf{q}_j - \mathbf{q}_i)^T (\mathbf{q}_k - \mathbf{q}_i)^T] - S_{ijk}\}^2}{S_{ijk}} \quad (3)$$

ここで、 $\mathbf{q}_i = (u_i, v_i)$ は頂点 i のパラメータであり、 $S_{ijk} = \|\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_i\| \times \|\mathbf{p}_k - \mathbf{p}_i\|$ である。関数 E_{len} は、稜線長さに関する歪を表し、そして、 E_{are} は、三角形の符号付面積の歪を表し、三角形のオーバーラップの度合いを表現している。平面グラフ G は、目的関数の重み付き和 $(\alpha E_{len} + \beta E_{are})$ の、共役勾配法を用いた \mathbf{q}_i に関する最適化によって構築される。重み α, β は正であり、これらは結果として生じる平面グラフの幾何学的な性質を制御する。

得られた平面グラフは、元々のテクスチャ付き形状と同じ位相要素（頂点や稜線など）を持つ。それゆえ、各ノードの単純な3次元化： $\mathbf{p}_i^D = (u_i, v_i, z_i^D)$ により、凹凸を高さ値として持つテクスチャのメッシュを得る。

4. テクスチャデータ処理

得られたテクスチャデータはデータベースに蓄えられる。ユーザはテクスチャ一覧から利用するテクスチャデータを選択し、後のテクスチャ合成に利用する。本研究では、図5に示すテクスチャに対する、1) 局所部分切り取り、2) 凹凸の誇張やきめの調整のためのアフィン変換による拡大縮小、3) 広い領域へのテクスチャ貼り付けを可能にするための凹凸パターンの繰り返し利用によるテクスチャ定義域拡大、4) 滑らかなテクスチャ生成の為に平滑化⁶⁾の、4つの処理を実装しており、目的に応じて利用可能にしている。これらは、従来の試作法では不可能であったテクスチャのデジタル処理であり、一つのテクスチャデータから様々な種類のテクスチャ付きモデル生成が可能となる。

5. テクスチャ合成

様々なタイプのテクスチャ付き形状をモデリング可能にするため、本研究では、以下の2つのタイプのテクスチャ合成手法を実現した。

A) 領域指定型テクスチャ合成

テクスチャは基本形状の特定の領域に合成される。これは、質感向上や滑り止めのための、幾何模様からなるテクスチャ合成に有効である（図6(a)）。

B) 相対配置指定型テクスチャ合成

テクスチャは基本形状に対する位置と方向を決定することで基本形状表面に局所的に合成される。これは、ロゴやシンボルなどのテクスチャを貼り付けるのに有効である（図6(b)）。

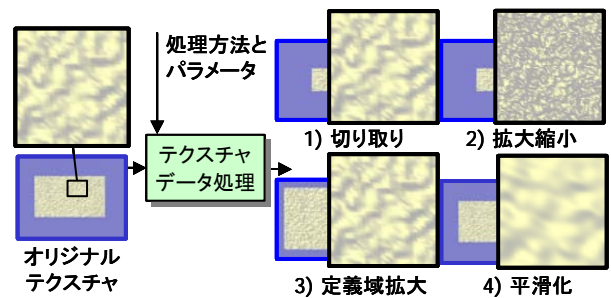


図5 テクスチャデータ処理

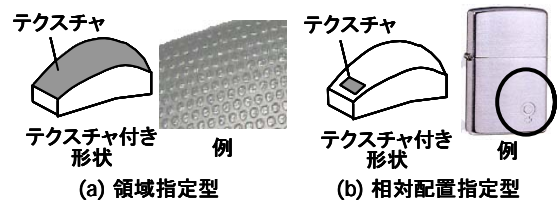


図6 テクスチャ合成法の種類

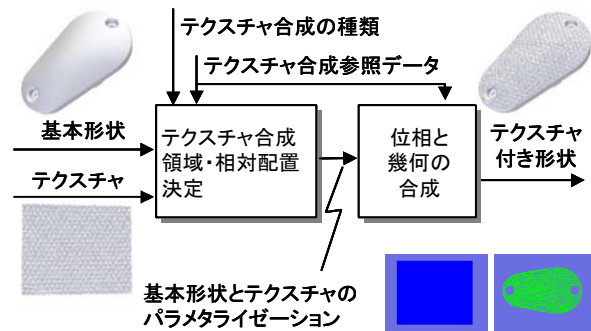


図7 テクスチャ合成アルゴリズム

5.1 テクスチャ合成手法

3次元におけるテクスチャ合成処理の複雑さを低減するため、本システムのテクスチャ合成では、先に述べたパラメタライゼーション法を用いている。これにより、メッシュ合成における2つのメッシュの相対配置決定やメッシュ位相・幾何合成が、2次元のグラフ合成や写像処理により容易に実現される¹⁰⁾。

テクスチャ合成アルゴリズムは、図7に示すように、2つのステップからなる。

ステップ1) テクスチャ合成領域・相対配置決定

ユーザの単純な入力により、基本形状とテクスチャメッシュの合成に必要な領域のパラメタライゼーション（平面グラフ G ）が構築される。同時に、2つのメッシュの相対配置も決定される。

ステップ2) 位相と幾何の合成

生成された2つのグラフ G の位相（接続性）を合成し、得られたグラフを三角形分割する。最後に、得られたグラフへの、基本形状を復元する3次元空間への逆写像適用と、テクスチャの凹凸量に従った法

線方向への頂点オフセットによりテクスチャ付き形状のメッシュモデルが得られる。

5.2 領域指定型テクスチャ合成

基本形状表面上のテクスチャを合成する領域の指定に、メッシュのセグメンテーションを用いる。本研究では入力メッシュが 3DCAD や CG モデラなどから得られるきれいな形状のメッシュ（測定ノイズを含まない、シャープなエッジを持つ）と仮定し、最も単純なセグメンテーション法を用いた。セグメンテーションは隣接面間角度に対する閾値処理による特徴稜線抽出と、特徴稜線に囲まれる面分集合のグルーピングにより行う。結果として基本形状は図 8(a)に示すような複数の面分集合に分割され、ユーザはテクスチャを貼り付けたい面分集合を選択する。

ユーザによる面分集合選択の後、そのセグメントのパラメタライゼーションを構築する。この処理は、3.2.2 節で述べた手法をそのまま用いる。テクスチャのパラメタライゼーションは平面への平行投影により得る。得られた 2 つのグラフの相対配置をパラメータ平面上で定義し、その後、5.1 節ステップ 2 の処理を適用することでテクスチャが合成されたメッシュを得る。

5.3 相対配置指定型テクスチャ合成

基本形状とテクスチャメッシュ間の相対配置決定に、有向線分を用いる（図 8(b)）。有向線分はユーザによる各メッシュの頂点のピックと最短経路算出により生成する。テクスチャは、テクスチャと基本形状メッシュの有向線分の始点と向きが一致するように、基本形状表面に沿って変形して合成されることになる。

テクスチャのパラメタライゼーションは先と同様に平行投影により得る。基本形状のパラメタライゼーションは、3.2.2 節で述べた性質に加え、有向線分の像の方向のずれ量を評価する評価関数を導入した最適化問題を解く事により構築する^[10]。この方法では、基本形状表面のテクスチャ貼り付けに必要な領域を特定するために、基本形状の平面グラフは、指定した有向線分を含む面分からテクスチャの平面グラフを覆うまで、逐次的に拡張して自動的に構築される。2 つの平面グラフの位置は、2 つの有向線分の像の始点を一致することで決定され、2 つの平面グラフを用いて位相と幾何の合成を行うことによりテクスチャ付き形状を得る。

6. 適用例と評価

以上で述べたテクスチャ付き形状モデリング手法を実装したソフトウェアの外観を図 9 に示す。モデリングは基本形状、テクスチャ、パラメタライゼーション、テクスチャ付き形状を 4 つの小窓で同時に確認しながら効率良く行うことができる。

規則模様、不規則模様のテクスチャが合成された形状へテクスチャ抽出手法を適用した結果を図 10 に示

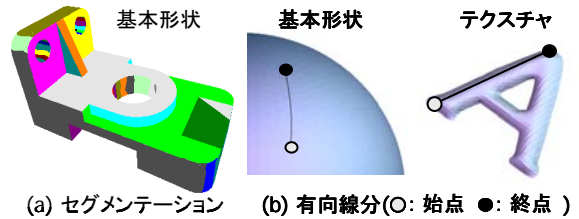


図8 テクスチャ合成の参照

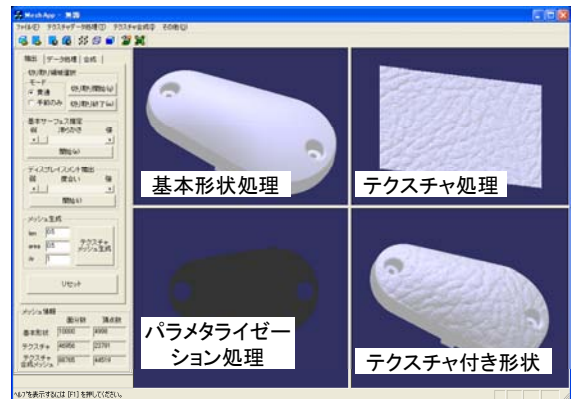


図9 テクスチャ付き形状モデリングソフトウェア

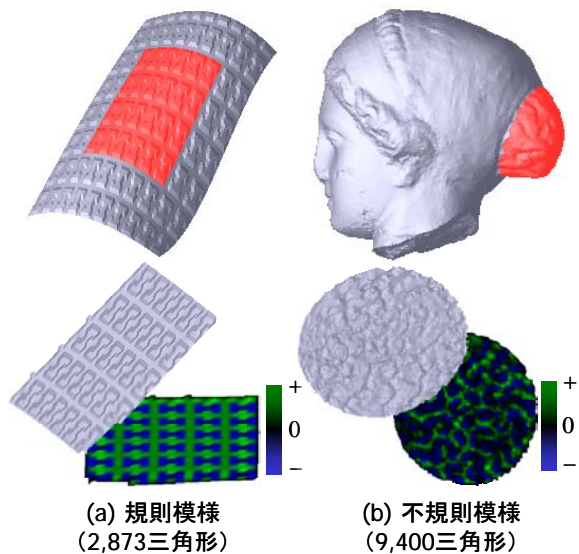


図10 テクスチャ抽出例(上:テクスチャ付き形状, 下:抽出されたテクスチャ)

す。最下図は抽出されたテクスチャ凹凸に色付けして表現したものであり、3次元の表面からの凹凸を高さ値として持つ平坦なテクスチャメッシュが得られていることがわかる。図 10(b)の例題では、抽出部分選択から各種の調整・処理を含み Pentium-M1.8GHz の PC で約 20 秒程度で抽出を行う事ができた。

サンプルテクスチャの物理モデル（平坦な壁紙）の 3D スキャンにより取得したテクスチャに、4 節で述べたテクスチャデータ処理を適用し、マウス形状（図 11(a)）に合成した結果を図 11(b)-(e)に示す。テクスチャ処理を適用することで、単一のテクスチャから異な

るタイプのテクスチャ付き形状をモデリングできることが確認された。基本形状の三角形数は1万で、合成したメッシュの三角形数は約8~20万であった。

本システムで生成したテクスチャ付き形状（図11(b)）に対する光造形モデルを図11(f)に示す。モデリングの結果得られる形状はメッシュで表現されているため、直接光造形で試作できる。本研究では、テクスチャのきめの高精度な再現のために、スライス面に対してテクスチャ面を傾けてRPのスライシング処理並びに造形を行った。光造形の積層ピッチは0.05mm（モデルサイズ:100mm×56mm×26mm）であり、テクスチャ面のスライス面に対する傾斜は、実験より傾斜角を45度程度に定めて造形することが、精度・時間の面から見て合理的であることがわかった。基本形状のメッシュが与えられてから、光造形モデルを得るまでの時間は約5時間（内、テクスチャデータ処理とテクスチャ合成：約1分、光造形用データ処理：約15分）であり、本システムを用いることによりテクスチャ付き形状試作が短時間で行えることがわかった。

最後に、既存のテクスチャ付きメッシュからのテクスチャ抽出とテクスチャデータ処理、そしてテクスチャ合成を用いてテクスチャ付き電話をモデリングした結果を図12に示す。手作業でテクスチャデータを設計することなしにテクスチャ付き形状が容易にモデリングできることが確認できた。

7. おわりに

本論文では、効率的なテクスチャ付き形状設計・試作のためのメッシュモデルを用いたテクスチャ付き形状設計システムについて述べた。本システムは、既存のテクスチャ付き形状からのテクスチャ抽出、画像の利用、サンプルテクスチャのスキャンによるテクスチャデータの取得機能、切り取り、拡大縮小、定義域拡大、平滑化の4つのテクスチャデータ処理機能、領域指定及び相対配置指定に基づくメッシュ合成によるテクスチャ形状モデリング機能からなり、これらを用いたテクスチャ形状設計と光造形によって、効率よくテクスチャ付き形状を試作できることが確認できた。

今後の課題として、より柔軟な設計を可能とするための、隣接面分集合への滑らかなテクスチャ合成や生成されたメッシュの微小面分除去などが挙げられる。

[参考文献]

- [1] G. Smith: Photoshop5 3Dtextures f/x and design, Coriolis Group, 1999.
- [2] Henning Biermann, Ioana Martin, Fausto Bernardini, Denis Zorin: Cut-and-Paste Editing of Multiresolution Surfaces, Proc. SIGGRAPH2002, 312-321, 2002.
- [3] Chensheng Wang, Joris S.M. Vergeest, Pieter J. Stappers: Freeform feature retrieval by signal processing, Proc. DETC04, DETC2004-57061, 2004.
- [4] Hiroshi Masuda et.al.: Volume-based cut-and-paste editing for early design phases, Proc. DETC04, DETC2004-57676,

- 2004.
- [5] Thouis R. Jones, Fredo Durand and Mathieu Desbrun: Non-Iterative, Feature-Preserving Mesh Smoothing, Proc. SIGGRAPH2003, 823-832, 2003.
- [6] Gabriel Taubin: A Signal Processing Approach to Fair Surface Design, Proc. SIGGRAPH95, 351-358, 1995.
- [7] M. S. Floater: Parametrization and smooth approximation of surface triangulations. Computer Aided Geometric Design, 14(3), 231-250, 1997.
- [8] Jerome Maillot et.al.: Interactive texture mapping, Proc. SIGGRAPH93, 27-34, 1993.
- [9] A. Sheffer and E. de Sturler: Parameterization of Faceted Surfaces for Meshing using Angle-Based Flattening, Engineering with Computers, 326-337, 2001.
- [10] 伊達宏昭, 金井理, 岸浪建史: パラメタライゼーションを用いた表面詳細合成形状の三角形メッシュモデリング, 精密工学会誌, 69(4), 581-585, 2003.

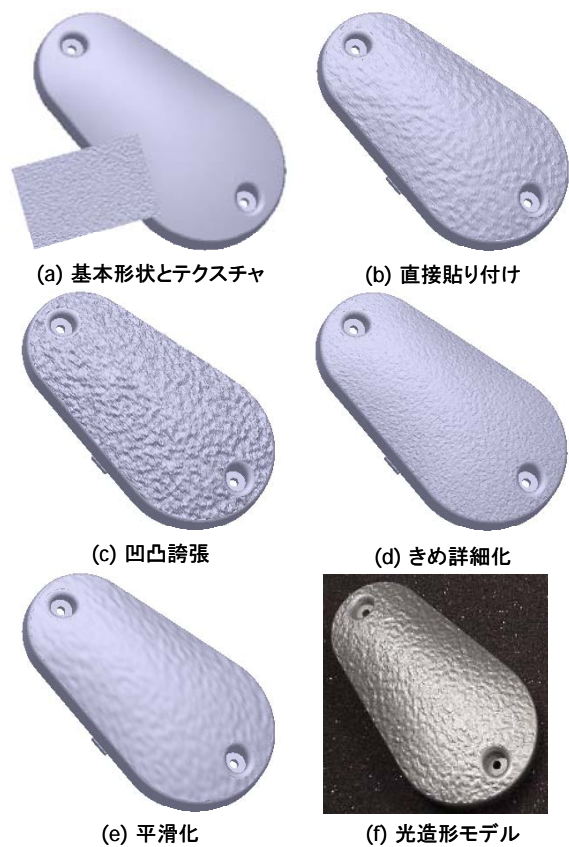


図11 テクスチャ付き形状のメッシュと光造形モデル

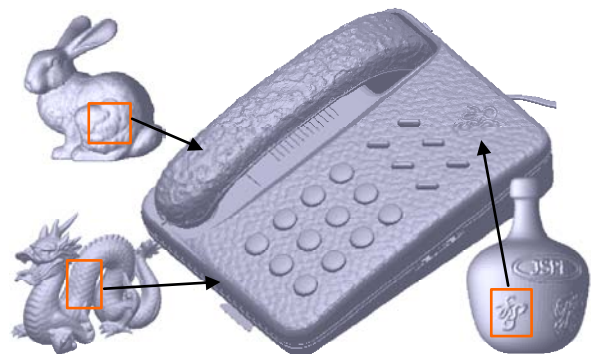


図12 テクスチャ付き電話のモデリング例