

# メッシュモデリングにおける表面詳細合成とその精度評価

北海道大学大学院工学研究科 ○伊達 宏昭, 金井 理, 岸浪 建史

## 要 旨

本研究では、微細な表面詳細形状を含む設計対象の、詳細メッシュ合成に基づく三角形メッシュモデリング手法を提案してきた。本報告では、その合成精度の数値的評価を行い、詳細メッシュ合成手法の有効性を検証し、更に、より高精度な詳細合成形状を得るための一改善法を提案する。

### 1. はじめに

工業製品にはその表面に微細な文字や幾何学模様が付加されているものが多い。本研究では、このような表面詳細が合成されている設計対象のメッシュモデリングを目的として、パラメタライゼーションを用いた詳細メッシュ合成に基づく表面詳細合成形状の設計手法を提案してきた<sup>[1]</sup>。この手法は、基本形状メッシュの一部に、表面詳細メッシュ上で課せられた幾何制約を極力満たすような合成を実現できるものである。

本報告では、提案した詳細メッシュ合成手法における合成精度を、幾つかの設定の下で数値的に評価する。また、合成精度向上のための改善法を述べる。

### 2. 詳細メッシュ合成手法

既提案の詳細メッシュ合成手法<sup>[1]</sup>の概要を図1に示す。入力は、三角形メッシュモデル  $M(M(P,K))$ , 頂点位置  $P = \{p_i \in R^3 | 1 \leq i \leq n\}$ , 位相  $K = V \cup E \cup F$ , 頂点  $i \in V$ , 稜線  $(i,j) \in E$ , 面分  $(i,j,k) \in F$  で表現された基本形状  $M_B$ , 及び、詳細メッシュ  $M_D$  である。まず、 $M_B, M_D$  に対し合成の位置, 向きを対応付ける合成基準  $L_B, L_D$  を与え, 写像  $\phi_B, \phi_D$  を用いて各々のパラメタライゼーション  $G_B, G_D$  ( $G(Q,K')$ , 頂点位置  $Q = \{q_i \in R^2 | 1 \leq i \leq m, m \leq n\}$ , 位相  $K' \subseteq K$ ) を得る。次に, パラメータ平面上で  $G_B$  と  $G_D$  の位相の合成を行い, 最後に, 基本形状の逆写像  $\phi_B^{-1}$ , 表面詳細の  $z$  値分の法線方向オフセットを行う微小修正関数  $g \cdot \phi_D^{-1}$  を  $G_C$  に適用し, 詳細メッシュが合成された形状  $M_C$  を得る。

### 3. パラメタライゼーション構築

提案手法において, 基本形状  $M_B$  及び詳細メッシュ  $M_D$  間の空間的な対応付け問題, メッシュの位相合成問題を容易にするため, メッシュモデルのパラメタライゼーションを用いた。以下に,  $M_B, M_D$  のパラメタライゼーション  $G_B, G_D$  の構築手順を記す。

Step1: 詳細形状  $M_D$  の平行投影によるパラメータ化 ( $G_D$ )

- Step2: 合成基準  $L_B$  を含む  $M_B$  の面のパラメータ化 ( $G_B$ )
- Step3: パラメータ平面上で  $G_B$  が  $G_D$  を覆うまで  $G_B$  を拡張
- Step4:  $M_D$  に課せられた幾何制約に従った  $G_B$  の修正

図2に  $M_B$  のパラメタライゼーション構築に用いた写像の性質を示す。Step2-3の, 合成領域決定の為に  $G_B$  は, 図2に示す, 合成方向一緻性, 距離保存性<sup>[2]</sup>, 干渉回避度の評価関数  $E_{dir}, E_{len}, E_{arc}$  (図2, 式(3)-(5))の重み付線形和の最小化問題(式(1))を, 共役勾配法を用いて  $\phi_B$  について解くことにより定まる。

$$\text{minimize } \alpha E_{dir} + \beta E_{len} + \gamma E_{arc} \quad (1)$$

ここで  $\alpha, \beta, \gamma$  は, それぞれの評価関数の重み ( $\alpha, \beta, \gamma \geq 0$ ) である。また,  $G_B, G_D$  間の位置関係は, 合成基準の始点の一致により定められる(図2, 式(2))。

更に, 高精度な合成を実現するため,  $M_D$  に課せられた幾何制約が合成形状上で充足されるように, 等パラメータ線が実空間で直交・等間隔となる性質<sup>[3]</sup>を導入し, 得られた  $G_B$  を修正する(Step4)。例えば, 幾何制約“平行”に対しては, 互いに平行な  $M_D$  の2本の稜線系列に挟まれた  $G_B$  の領域に等間隔性を課せばよい<sup>[1]</sup>。この性質を持つパラメタライゼーションは, 図2中式(6)(7)に示す評価関数を, D.S.I.アルゴリズム<sup>[3]</sup>により最小化して求められる。

### 4. 詳細メッシュ合成の精度評価

#### 4.1 局所領域抽出パラメータ化の重みの影響

滑らかなうねりを持つ基本形状に, 式(1)における  $G_B$  の性質を制御する重み ( $\alpha, \beta, \gamma$ ) の異なる設定 ( $\alpha + \beta + \gamma = 1$ ) で3

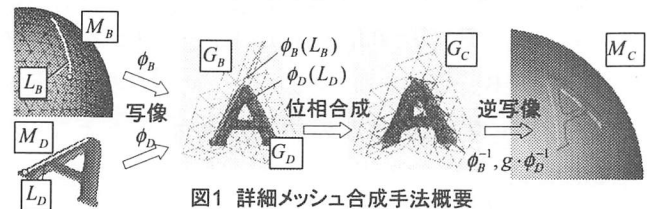


図1 詳細メッシュ合成手法概要

	合成位置の一緻性	合成方向の一緻性 ( $E_{dir}$ )	距離保存性 ( $E_{len}$ )	面干渉回避性 ( $E_{arc}$ )	等パラメータ線の等間隔性 ( $E_{hom}$ )	等パラメータ線の直交性 ( $E_{ort}$ )	各性質の評価関数(幾何学的関係)
実空間							$q_{sl_D} = \phi_B(p_{sl_B}) \quad (2)$ $E_{dir} = \sum_{T \in F} \ \phi_B(S_T) - \hat{s}_T\ ^2 \quad (3)$ $E_{arc} = \sum_{(i,j,k) \in F} \frac{[\det(\phi(p_i) - \phi(p_j), \phi(p_i) - \phi(p_k))]^2}{\ \phi(p_i) - \phi(p_j)\  \ \phi(p_i) - \phi(p_k)\ } \quad (4)$
パラメータ平面							$E_{len} = \sum_{(i,j) \in E} \frac{(\ \phi(p_i) - \phi(p_j)\ ^2 - \ \phi(p_i) - \phi(p_i)\ ^2)^2}{\ \phi(p_i) - \phi(p_j)\ ^2} \quad (5)$ $E_{hom} = \sum_{T \in F} \left[ \left( \frac{\partial \phi_x^*}{\partial X} - \frac{\partial \phi_y^*}{\partial X} \right)^2 + \left( \frac{\partial \phi_x^*}{\partial Y} + \frac{\partial \phi_y^*}{\partial Y} \right)^2 \right] \quad (6)^*$ $E_{ort} = \sum_{T \in F} \left[ \left( \frac{\partial \phi_x^*}{\partial X} \frac{\partial \phi_y^*}{\partial Y} \right)^2 + \left( \frac{\partial \phi_x^*}{\partial X} \frac{\partial \phi_x^*}{\partial Y} \right)^2 \right] \quad (7)^*$

図2 基本形状のパラメタライゼーション構築の為に用いた写像の性質

本の溝を合成した結果を図3に示す。様々な基本形状に対し異なる重み設定で詳細メッシュを合成した結果、距離保存性を強くした場合( $\beta \rightarrow$ 大, 図3(a))複雑な形状ではパラメータ空間で面の干渉が起こる, 干渉回避性を強くする( $\gamma \rightarrow$ 大, 図3(b))と形状が極度に歪む, 合成方向一致性を強くする( $\alpha \rightarrow$ 大, 図3(c))と合成基準から離れるにつれて形状が歪み, 弱くすると式(1)の最小化計算が収束しない場合がある事が確認された。これらの試験結果より, 複雑な形状においても面の干渉が生じず, 距離歪みの少ない合成が行える( $\alpha, \beta, \gamma = (0.1, 0.6, 0.3)$ )なる設定が得られ(図3(d)), これを次節の評価に用いた。

#### 4.2 合成精度の評価法と結果

図4に示す平行の幾何制約を課した3種類の詳細メッシュ  $M_{D1}$ - $M_{D3}$ を, 図5, 表1に示す様々な形状特徴を持つ基本形状  $M_{B1}$ - $M_{B5}$ に合成し, その合成精度評価を行った。 $G_C$ に対し $\phi_B^{-1}$ を適用した形状上における,  $M_D$ で平行な線分(図4,  $l_1$ - $l_3$ )間の距離の平均からの偏差(平行度)を合成精度として評価した。結果を図6に示す。結果より, 基本形状の複雑度, 表面詳細の大きさに依存して偏差にばらつきが見られるが, どの場合においても, 偏差は  $M_D$ 上の平行線分間距離の数%以内であることが確認された。

#### 5. 詳細メッシュ合成の高精度化

4.2節で得られた合成の精度は, 局所領域抽出時の  $G_B$ の面分歪みと,  $G_B$ 内の修正自由度となる頂点数に依存していると考えられる。そこで, 精度向上の一手法として, 歪み低下と修正自由度向上の為, 基本形状のメッシュの細分化を導入した。細分化は  $M_B$ の稜線の中点生成による, 面分の四分分割化を用いた。1回の細分化を行った  $M_{B1}$ - $M_{B4}$ の基本形状に対し, 4.2節と同様の評価を行った結果を図7に示す。また, 表1に  $G_B$ 内の面分数増加の様子を記す。図6と比較して偏差の減少が見られ, 本手法において, 細分化は, 合成の精度向上に有効であることが確認された。

#### 6. おわりに

本報告では, 既提案の詳細メッシュ合成手法に対する合成精度の評価を行い, 合成の高精度化のための一方法を示した。数値評価により, 平行の幾何制約に対し平行度が基準距離の数%以内であることが確認され, メッシュ細分化によりさらに合成精度が向上することが確認された。その他の幾何制約<sup>[1]</sup>に対する精度評価が課題である。

#### [参考文献]

- [1] 伊達他: 表面詳細を含む設計対象のメッシュモデリングと多重解像度表現, 2001年度精密工学会春季全国大会講演論文集, p.283, 2001
- [2] Maillot J. et al.: Interactive texture mapping, In Computer Graphics Proceedings (SIGGRAPH 95), pp.27-34, 1993
- [3] Levy B. and Mallet J.L.: Non-distorted texture mapping for sheared triangulated meshes, proc. of SIGGRAPH98, pp.343-352, 1998

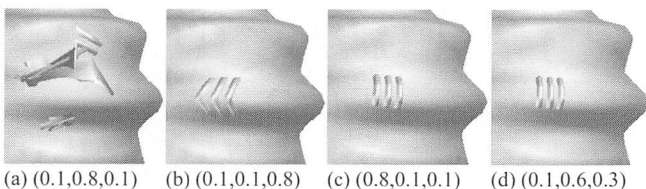


図3 局所領域抽出の異なる重み設定における合成結果( $\alpha, \beta, \gamma$ )

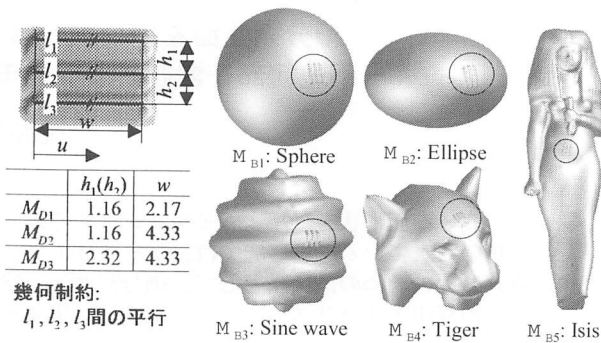


図4 表面詳細メッシュ

図5 基本形状と合成位置

表1 基本形状情報と形状特徴

	#F	#F <sub>GB</sub> (M <sub>D1</sub> )	#F <sub>GB</sub> (M <sub>D2</sub> )	#F <sub>GB</sub> (M <sub>D3</sub> )	形状特徴			
M <sub>B1</sub>	2,048	79	81	99	159	158	264	曲率一定
M <sub>B2</sub>	2,048	70	142	108	268	161	375	曲率連続変化
M <sub>B3</sub>	2,048	48	119	67	163	107	316	滑らかな凹凸表面
M <sub>B4</sub>	2,016	49	115	83	190	110	254	大きな凹凸
M <sub>B5</sub>	93,934	124		237		352		微小, 複雑な凹凸

(#F:面分数, #F<sub>GB</sub>: G<sub>B</sub>内の面分数(左:オリジナル, 右:細分後(5節)))

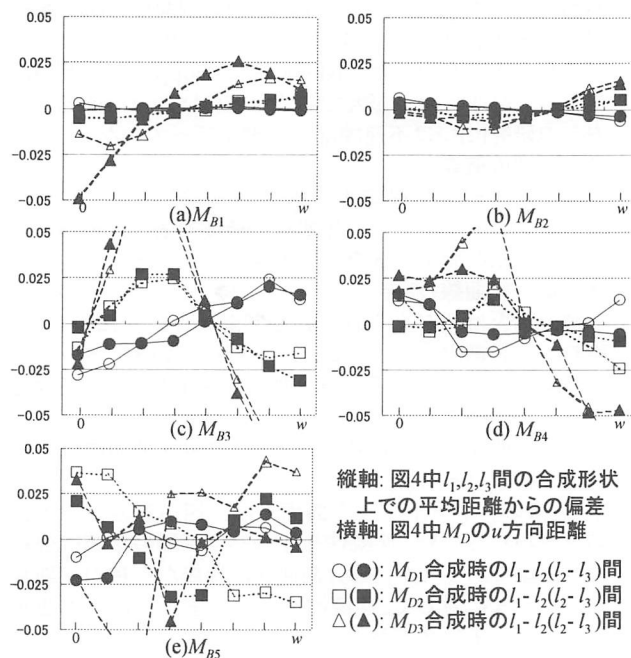


図6 合成形状上の平行線分間の距離平均からの偏差分布

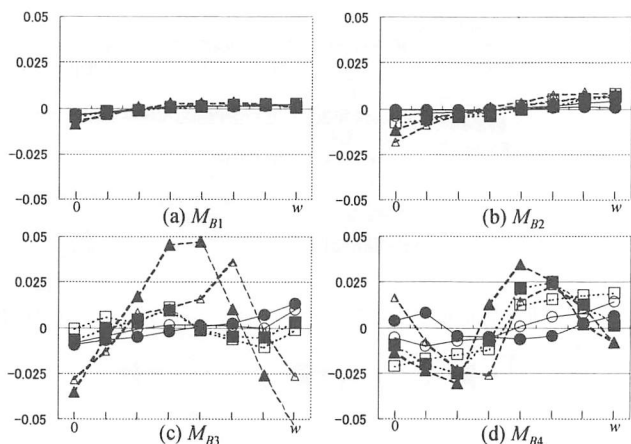


図7 基本形状の1回細分化後の偏差分布