

フィルタリングに基づくメッシュモデルの多重解像度表現化

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

本報告では、フィルタリングに基づく三角形メッシュモデルの新たな多重解像度表現生成手法を提案する。提案手法は、メッシュモデルを、形状の高周波成分を除去または保存した低解像度メッシュと、復元可能な失われた情報へ階層的に分解でき、メッシュモデルを用いた段階的なFEM解析、詳細部の転移や特徴稜線抽出などの応用に有用である。

1. はじめに

メッシュモデルの多重解像度表現は、与えられた形状を低解像度の近似と失われた情報に階層的に分解した表現法であり、メッシュモデルの効率的な表示、転送、圧縮を目的として多くの研究がなされている^{[1][2]}。本研究では、メッシュモデルのFEM解析や特徴稜線抽出などの応用を目的として、フィルタリングを用いた局所的なパワースペクトル評価に基づく多重解像度表現の生成手法を提案する。提案手法は、メッシュ簡略化の評価量の異なる順序選択により高周波成分を除去または保存した低解像度メッシュを生成でき、機能的に意味を持つ必要に応じて復元可能な失われた情報を持つメッシュモデルの多重解像度表現が得られる。

2. メッシュモデルの多重解像度表現と本研究の特徴

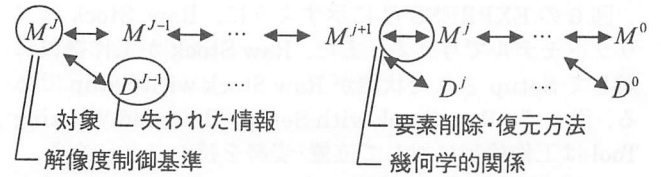
2.1 メッシュモデルの多重解像度表現

メッシュモデルの多重解像度表現(MRR)は、図1に示すように、メッシュモデル M^J を低解像度の近似 M^0 と失われた情報の系列 $D^{J-1} \dots D^0$ へ階層的に分解した表現法であり、メッシュモデルの解像度制御が容易に行える^{[1][2]}。メッシュモデルの多重解像度表現化手法は、1) 解像度制御対象(幾何や属性)、2) 要素の削除・復元順序決定のための解像度制御基準、3) メッシュモデル内の要素削除・復元方法、4) 簡略化前後の形状間の幾何学的関係、5) 失われた情報の解釈という5つの観点から分類できる。

2.2 フィルタリングに基づく多重解像度表現化

本研究では、メッシュモデルの詳細部が形状の高周波成分(HFC)であるとみなし^[3]、解像度制御基準としてフィルタリングにより得られる局所的なパワースペクトルを用いて、形状のHFCを除去または保存する低解像度メッシュを得ることが可能なMRRの生成法を提案する。上述の分類に基づく、提案手法は表1のように整理される。HFCの除去、保存により下記の2つの異なる性質と用途を持つMRRを得ることができる。

- ・HFC除去型MRR： 詳細なフィーチャやコーナーが低解像度モデルでは除去される。詳細なフィーチャの除去された低解像度モデルと復元可能な失われた情報は、多重解像度編集、FEM解析や詳細部転移による形状モデリング^[3]などに用いられる。
- ・HFC保存型MRR： 詳細なフィーチャが低解像度モデルで残る。詳細なフィーチャが残る低解像度モデルは、メッシュ上の特徴線抽出や再メッシュ化の領域分割用モデルとして用いられる。



M^J : オリジナルメッシュ M^0 : 最粗メッシュ

図1 メッシュモデルの多重解像度表現

表1 提案するメッシュモデルの多重解像度表現化

	対象	解像度制御基準		要素削除(復元)方法	幾何学的関係	失われた情報
		評価量	簡略化順序			
HFC除去型MRR	幾何	局所パワースペクトル	評価量が大きな要素から	Edge Collapse	低周波成分を近似	高周波成分
HFC保存型MRR		評価量が小さな要素から	(Vertex Split)	簡略化前形状を近似	低周波要素	

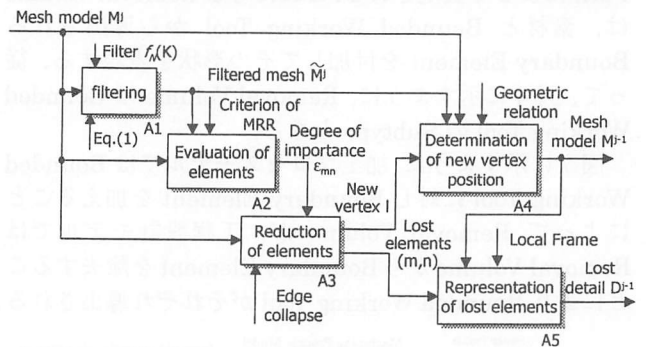


図2 提案手法の概要

3. フィルタリングに基づくメッシュモデルの多重解像度表現化手法

図2に提案手法の概要を示す。提案手法では、まず、現在のメッシュモデル M^j にローパスフィルタリングを適用してメッシュ \tilde{M}^j を得る。次に、得られた形状と元形状の差分である高周波成分の局所的なパワースペクトルを解像度制御基準として低解像度メッシュ M^{j-1} を生成し、以上の処理を繰り返すことにより多重解像度表現を得る。以下に、フィルタリングと低解像度メッシュ生成の詳細を記す。

3.1 フィルタリング

本手法では、メッシュモデルのフィルタリングに詳細なフィルタ設計が可能な Taubin らの手法^[4]を用いた。この手法では、まず、式(1)のラプラシアン $\Delta \mathbf{p}_i$ をメッシュモデルの各頂点 \mathbf{p}_i に定義する。

$$\Delta \mathbf{p}_i = \sum_{j \in I} w_{ij} (\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_i) \quad (1)$$

ここで、 i^* は頂点 i に隣接する頂点集合、 w_{ij} は j に対する総和が1となる正値の重みである。ローパスフィルタリングは式(2)により行われる。

$$\tilde{\mathbf{P}} = \{(\mathbf{I} - \mu\mathbf{K})(\mathbf{I} - \lambda\mathbf{K})\}^N \mathbf{P} = f_N(\mathbf{K})\mathbf{P} \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{K} = (\mathbf{I} - \mathbf{W})$ 、 $\mathbf{P} = \{\mathbf{p}_i\}$ 、 $\mathbf{W} = \{w_{ij}\}$ 、 λ, μ はスケーリングファクタ($0 < \lambda < -\mu$)である。式(2)の適用は、周波数を表す \mathbf{K} の固有値 k_i ($0 \leq k_i \leq 2$)に対応する固有ベクトル \mathbf{e}_i の張る空間で、図3に示すフィルタ関数 $f_N(k) = \{(1 - \lambda k)(1 - \mu k)\}^N$ を用いて低周波成分を通過させることに相当する。フィルタリングはメッシュの要素数を変化しない。

3.2 要素削除・復元方法

メッシュ簡略化のための要素削除方法として、簡略化前後の形状間の幾何学的関係の制御が容易な edge collapse^[1]を用いた。Edge collapseは、図4に示すようにメッシュモデルの稜線(m, n)を新頂点 l に縮退させる方法であり、その逆操作(Vertex split)も存在する。この方法は、簡略化前後の形状間の幾何学的関係の制御が、新要素(頂点 l)の位置決定問題として行える利点を持つ。

3.3 解像度制御基準と要素削除

メッシュ簡略化により局所的な高周波成分を除去・保存する為に、局所的なパワースペクトルを解像度制御基準として利用する。ローパスフィルタリングにより失われる高周波成分 \mathbf{D} は、 $\mathbf{D} = \mathbf{P} - \tilde{\mathbf{P}} (= \{\mathbf{d}_m\})$ として記述され(図5)、周波数区間 $[k_{PB}, 2]$ (k_{PB} : パスバンド周波数)における局所的なパワースペクトルは、 $\|\mathbf{d}_m\|^2$ として得られる。簡略化順序決定の為に頂点对(m, n)に対する評価量 ϵ_{mn} は、 $\epsilon_{mn} = \|\mathbf{d}_m\|^2 + \|\mathbf{d}_n\|^2$ と定義する。HFC除去型MRR生成においては、 $\max_{(m,n) \in E} \epsilon_{mn}$ (E : 稜線集合)、HFC保存型MRR生成においては、 $\min_{(m,n) \in E} \epsilon_{mn}$ なる頂点对から順に edge collapseを適用してメッシュを簡略化する。

3.4 幾何学的関係

HFC除去型MRR生成においては、頂点对(m, n)の edge collapseにより生成される新頂点 l の位置 \mathbf{p}_l を、ローパスフィルタリング後の形状 \tilde{M}^j を近似するように決定する。本手法では、参照形状 \tilde{M}^j への近似の度合いを制御可能にするため、図4に示すように、 M^j の頂点对(m, n)の midpointと \tilde{M}^j 上で(m, n)と対応する頂点对の midpointとの内分点 $(1 - \alpha)(\mathbf{p}_m + \mathbf{p}_n)/2 + \alpha(\tilde{\mathbf{p}}_m + \tilde{\mathbf{p}}_n)/2$ を新頂点位置 \mathbf{p}_l として定めた。ここで、 α は低解像度化が進むにつれて1に近づく係数($0 \leq \alpha \leq 1$)である。

HFC保存型MRR生成においては、新頂点の位置 \mathbf{p}_l を簡略化前の形状を近似するように決定する。このための新頂点位置 \mathbf{p}_l は、削除される頂点对(m, n)に接続する面からの自乗距離を最小化するように頂点位置を決定する手法^[2]を用いて定めた。

3.5 適用結果

図7(a)に示す形状表面に詳細なフィーチャを含むメッシュモデルに対するHFC保存型MRR化手法の適用により得られた低解像度メッシュを同図(b)(c)に示す。図より、詳細フィーチャを表す高周波成分が低解像度メッシュでも保存されていることが確認された。一方、HFC除去型MRR化手法を図7(a)のモデルに適用した結果を図8(a)(b)に示す。表

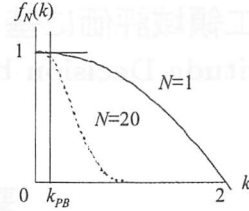


図3 Taubinのフィルタ関数

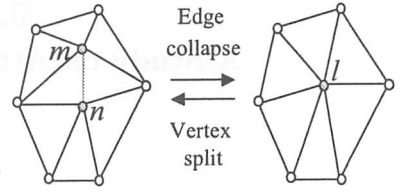


図4 Edge collapseとその逆操作

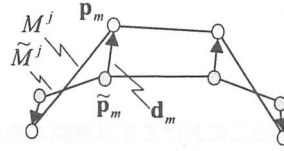


図5 高周波成分

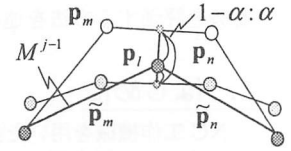


図6 幾何学的関係

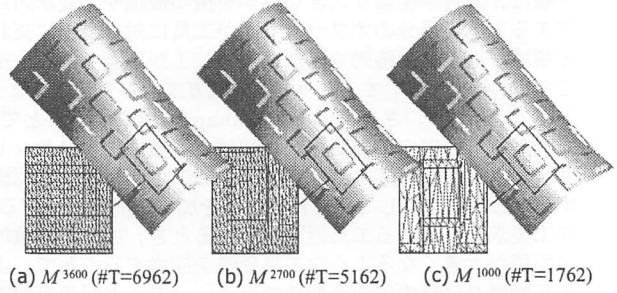


図7 HFC保存型MRR (#T:面分数)

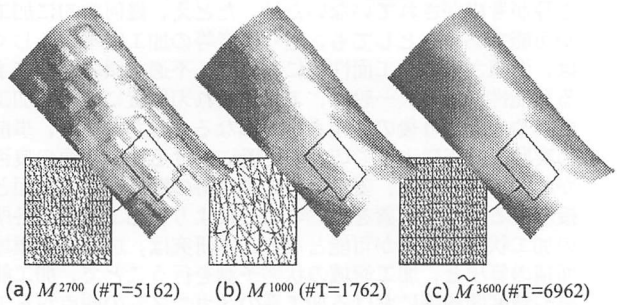


図8 HFC除去型MRR (#T:面分数)

面の詳細フィーチャが徐々に除去され低解像度メッシュはオリジナルメッシュの基本形状(低周波成分、図8(c))を近似していることが確認された。

4. おわりに

本報告では、三角形メッシュモデルの多重解像度表現のより広い応用を目的とし、フィルタリングに基づく局所パワースペクトルを解像度制御基準とした、形状の高周波成分を除去または保存する低解像度メッシュを得られる三角形メッシュモデルの多重解像度表現化手法を提案した。

[参考文献]

- [1] H. Hoppe: Progressive Meshes, proc. of SIGGRAPH'96, pp.99-108, 1996
- [2] M.Garland and P.S. Heckbert: Surface simplification using quadric error metrics, proc. of SIGGRAPH'97, pp.209-216, 1997
- [3] 伊達他: フィルタリングとパラメタライゼーションに基づくメッシュモデルの表面詳細抽出と合成, 2002年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, p.260, 2002
- [4] G. Taubin: Geometric Signal Processing on Polygonal Meshes, proc. of EUROGRAPHICS 2000, 2000