

メッシュモデルの形状特徴を認識したメッシュスムージング手法

北海道大学 ○清水 貴文, 伊達 宏昭, 金井 理, 岸浪 建史

要 旨

本研究では, 3次元スキャナから生成されるメッシュモデルの測定ノイズ除去を目的とし, 法線投票テンソルの固有値解析により形状特徴を認識し, 4種類の bilateral filtering によりモデルに含まれる形状特徴を損なうことなく測定ノイズを除去するスムージング手法を提案する。

1. はじめに

近年, 光学式や X 線 CT などの 3次元形状スキャナが普及し, デザインモックアップや工業製品の物理モデルから高密度な三角形メッシュモデルを容易に生成する技術が一般化してきた。工業製品を測定して得られるメッシュには, ソリッドモデルの位相要素(面分, 稜線, 頂点)に対応するフェイス, シャープエッジ, コーナーが含まれる。このようなメッシュモデルをメッシュの形状モデリングや CAE に利用する場合, シャープエッジは稜線方向に滑らかで, かつフェイスも滑らかなモデルであることが望ましく, これらから測定の際に含まれた測定ノイズを除去する必要がある。

メッシュモデルのノイズ除去には, 数多くのメッシュスムージング手法が提案されている。従来のスムージング手法には, 固有値解析に基づく手法^[1]や平均曲率フローを用いた拡散手法^[2]などがあるが, スムージング後にシャープエッジやコーナーが損なわれるという問題がある。近年, 提案された bilateral filtering によるメッシュスムージング手法^[3]は, シャープエッジは保存できるがエッジ自身を稜線方向に滑らかにする効果はない。

そこで本研究では, 測定ノイズを含む工業製品のメッシュモデルからまずシャープエッジを抽出し, bilateral filtering によりシャープエッジを保存しつつエッジとフェイスの測定ノイズをそれぞれ独立に除去することで, エッジ自身を稜線方向に滑らかにすることが可能なメッシュスムージング手法を提案する。

2. 提案手法

2.1 提案手法の概要

図 1 に提案手法の概要を示す。初めにノイズを含むメッシュから, 各頂点に対する法線投票テンソル^[4]の固有値解析を行いシャープエッジを抽出する。次に, 抽出されたシャープエッジに対しエッジ用 bilateral filtering を適用し, コーナーを保存するように稜線方向にスムージングを行う。最後にメッシュ全体に対しフェイス用 bilateral filtering を適用し, シャープエッジを保存するようにスムージングを行う。

2.2 シャープエッジ認識・抽出

Sun らの手法^[4]に基づき, はじめに各メッシュ頂点に対して法線投票テンソルを計算する。つぎに, 法線投票テンソルの固有値 v_1, v_2, v_3 ($v_1 \geq v_2 \geq v_3$) とそれに対応する固有ベクトル e_1, e_2, e_3 から, メッシュ頂点 i が帰属する位相要素(フェイス, シャープエッジ, コーナー)を推定する。推定にはエッジ強度 s_i を用いる。 s_i はシャープエッジやコーナー上の頂点では 1 に, フェイス上の

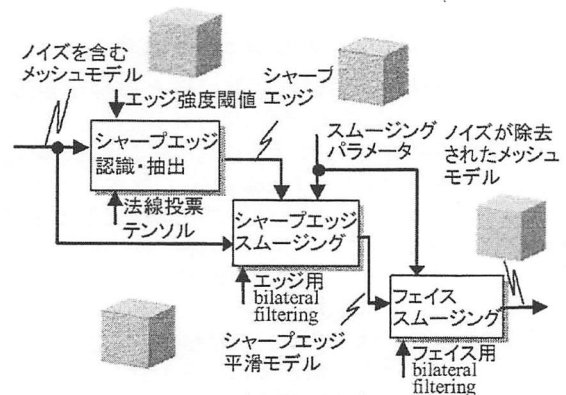


図1 提案手法の概要

頂点では 0 に近い値になる。このエッジ強度により, 始めにあるしきい値 s_s 以上のエッジ強度を持つ頂点群を抽出する。次に抽出された頂点に接続しているメッシュエッジの方向ベクトルと, 頂点の e_3 との内積があるしきい値以上であるエッジをシャープエッジとして抽出する。本研究ではこのしきい値を 0.9 に定める。

2.3 メッシュスムージング手法

Bilateral filtering は Tomasi^[5]らによって提案された, デジタル画像に対する境界保存型フィルタリング手法である。Bilateral filtering は一般的に以下のように表される。

$$O_r = \frac{1}{k(r)} \sum_{q \in S_r} I_q w_q f(X, \sigma_1) g(Y, \sigma_2) \quad (1)$$

$$k_r = \sum_{q \in S_r} w_q f(X, \sigma_1) g(Y, \sigma_2)$$

ここで, r は任意の要素, O_r は出力値, S_r , I_q , w_q はそれぞれ r の近傍要素 q の集合, 入力値, 重みである。 f と g はそれぞれ X , Y を確率密度変数, σ_1 , σ_2 を標準偏差とする Gauss 関数である。 k_r は正規化因子である。 X を要素間の距離に, Y を単純な距離ではなく, 境界を挟む要素間で大きな値とすることにより境界を保存するようにフィルタリングを作用させることができる。

本手法では, 式(1)の bilateral filtering をメッシュに拡張し, 1)シャープエッジの方向ベクトル, 2)シャープエッジ上の頂点, 3)法線ベクトル, 4)メッシュ上の頂点, それぞれに対する bilateral filtering を利用する。4 つの bilateral filtering を表 1 に示す。このうち, 1)-3)は Jones らの手法に基づき新たに提案する bilateral filtering である。 i, e, t は, それぞれメッシュ頂点, メッシュエッジ, メッシュ三角形を表し, *は近傍要素を表す。 d_e, n, l_e, a_i はそれぞれ単位方向ベクトル, 単位法線ベクトルで, l_e, a_i はそれぞれ線分長, 面積である。 p_i, c_e, c_i はそれぞれ,

表1 4種類のbilateral filtering

	r	q	O_r	I_q	w_q	X, σ_1	Y, σ_2	
エッジ用	1)	e	e^*	d'_e	d_e	l_e	$\ c_e - c_e\ , \sigma_{mf}$	$\ d_e - d_e\ , \sigma_{meg}$
	2)	i	e^*	p'_i	Π_e	l_e	$\ c_e - p_i\ , \sigma_{ef}$	$\ \Pi_e - p_i\ , \sigma_{eg}$
フェイス用	3)	t	t^*	n'_t	n_t	a_t	$\ c_t - c_t\ , \sigma_{mf}$	$\ n_t - n_t\ , \sigma_{mg}$
	4)	i	t^*	p'_i	Π_t	a_t	$\ c_t - p_i\ , \sigma_f$	$\ \Pi_t - p_i\ , \sigma_g$

頂点座標, メッシュエッジ中点, 重心点の位置ベクトルである。ダッシュ(*)はフィルタリング後のベクトルを表す。 Π_e, Π_t はそれぞれ $\Pi_e = c_e + ((p_i - c_e) \cdot d'_e) d'_e$, $\Pi_t = p_i - ((p_i - c_e) \cdot n'_t) n'_t$ で求められる投影点の位置ベクトルである。本手法では, メッシュモデルへの式を1)から4)の順で適用する。1)と3)のbilateral filteringは, それぞれ2)と4)の頂点の処理をより適切に作用させるための前処理である。1)と3)の Y が1を超えると, その近傍要素は同じ位相要素の上にはないとし, $g=0$ とすることによりスムージングへの影響を無くす。これにより, コーナー付近の方向ベクトル, シャープエッジ付近の法線ベクトルはより適切にスムージングされる。

3. スムージングパラメータの設定

Bilateral filteringによるスムージングの効果は2つのGauss関数の標準偏差 σ によって調整される。本手法では $\sigma_{mf} = a|e|/2$, $\sigma_{meg} = 0.6$, $\sigma_{ef} = a|e|$, $\sigma_{eg} = b|e|$, $\sigma_{mf} = c|e|/2$, $\sigma_{mg} = 0.6$, $\sigma_f = c|e|$, $\sigma_g = d|e|$ とした。ただし a, b, c, d はスムージングパラメータで対象のモデルに依存して定める正の実数, $|e|$ はモデル内のメッシュエッジの平均辺長である。各スムージングにおける近傍探索は, 1辺がエッジ用では $2\sigma_{mf}$, フェイス用では $2\sigma_f$ の立方体により定義する。

4. 適用結果

ノイズを含まないと思われるメッシュモデル(面分数: 51784)の頂点に平均がゼロ, $\sigma = (1/10)|e|$ のGaussianノイズを人工的に加えたモデルに対して本手法を適用した結果を図2に示す。シャープエッジ抽出における近傍空間は, 1辺が $3|e|$ の立方体により定義し, エッジ強度しきい値 s_e は0.251に設定した。まず, $(a, b) = (2, 0.1)$ でシャープエッジを2回, 次に $(c, d) = (2, 0.1)$ でフェイスを2回スムージングした。図2(d)よりシャープエッジは稜線方向に滑らかになり, かつフェイスのノイズも除去されていることが確認できた。

次に, IT機器筐体のデザインモックアップをcomet400により測定して得られたメッシュモデル(面分数: 612013, 頂点数: 305992, 図3(a))に本手法を適用した結果を図3に示す。シャープエッジ抽出における近傍空間は, 1辺が $9|e|$ の立方体により定義し, エッジ強度しきい値 s_e は0.102に設定した。まず, $(a, b) = (10, 1)$ でシャープエッジを1回, 次に $(c, d) = (2, 1)$ でフェイスを1回スムージングした。図3(b)に見られるように, シャープエッジが存在すると思われるメッシュ部分に連結されていないメッシュエッジ群が多数抽出されたが, シャープエッジスムージングによりこれらが1本の連結されたメッシュエッジ群を構成するように集約された(図3(c))。また, 図3(d)よりシャープエッジを保存しながら, フェイスのノイズが除去されていることが確認できた。処理時間は, Pen4 3.2GHz, 2GBRAMで, シャープエッジの抽出, スムージングに107s, 5.7s, フェイススムージングに142sかかった。

5. まとめ

本研究では, シャープエッジとフェイスを認識するメッシュスムージング手法を提案した。シャープエッジは, 頂点に対する法線投票テンソルの固有値解析により抽出され, シャープエッジとフェイスの測定ノイズは, 4種類のbilateral filteringにより除去される。また, 人工的にノイズを加えたモデルと実際の測定モデルに本手法を適用し, その効果を確認した。今後の課題として, 各スムージングパラメータの自動決定が挙げられる。

[参考文献]

- [1] G.Taubin : A signal processing approach to fair surface design, Proc.SIGGRAPH'95, pp.351-358,1995
- [2] M.Desbrun, M.Meyer, P.Schroder and A.H.Barr : Implicit fairing of irregular meshes using diffusion and curvature flow. Proc.SIGGRAPH'99, pp.317-324, 1999
- [3] T. R. Jones, F. Durand, M. Desbrun : Non-Iterative, Feature- Preserving Mesh Smoothing, Proc.SIGGRAPH2003, pp. 943-949, 2003
- [4] Y.Sun, D.L.Page, J.K.Paik, A.Koschan and M.A.Abidi : Triangle mesh-based edge detection and its application to surface segmentation and adaptive surface smoothing, Proc.IEEE.ICIP2002, pp.825-828, 2002
- [5] Tomasi.C, Manduchi.R : Bilateral Filtering for Gray and Color Images, In ProcIEEE Int, Conf.on Computer Vision, pp.836-846,1998

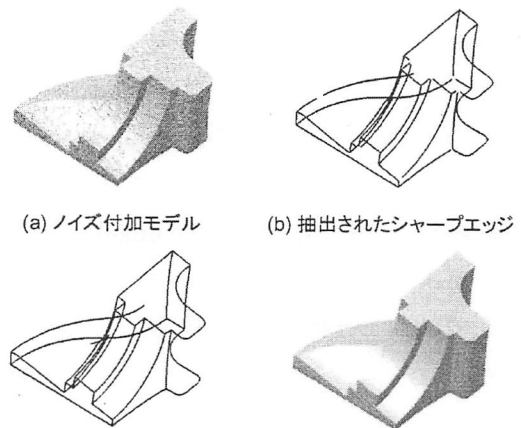


図2 本手法の適用結果。

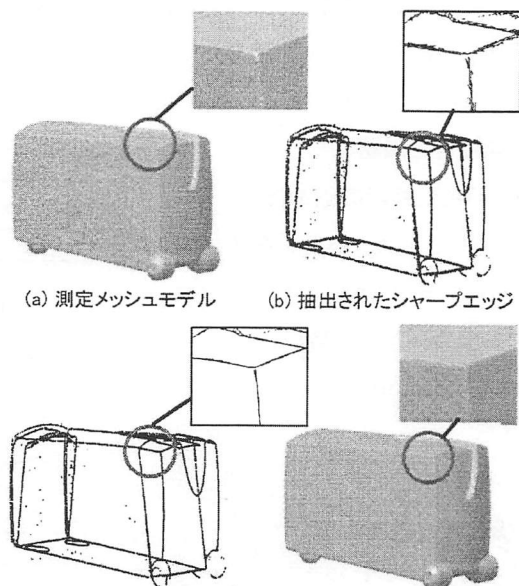


図3 IT機器筐体の測定モデルへの適用結果