

主曲率分布に基づく三次元メッシュモデルの Content-based Query に関する研究

北海道大学 大学院工学研究科 ○鎌田 雄喜、金井 理、岸浪 建史

要旨

現在三次元形状モデルに対する Content-based Query 技術の必要性が高まっている。本研究では、メッシュ頂点の主曲率分布に基づく特徴量を用いた類似検索手法を提案する。特徴量が主曲率分布に基づくため、モデル表面の凹凸分布を類似度に反映し、かつモデルの相似変換に不変な類似検索を行える。

1. はじめに

現在、3次元形状モデル(3DCADモデル、メッシュモデル等)の蓄積が社内やWeb上で加速している。形状モデルを含む膨大なデータベース(以下DB)内から、あるモデルに類似したモデルを検索する機能は、意匠デザインの発想支援や、意匠権侵害判定、製造価格の見積りや工程設計等に有効利用できるものと思われる。

3次元形状モデルの類似検索手法の中で特に、メッシュモデルを対象としたものが数多く提案されてきている。これらの手法は、モデルの形状の特徴を簡潔に表現した統計的な特徴量を利用して類似度を算出する方法が多い。このような特徴量の要件として、モデルの位置・姿勢・大きさや、メッシュ分割数、分割方法に依存しないことが求められる。このような特徴量を用いた類似検索の研究例として[1][2]がある。[1]は球面調和記述子、[2]はモデル表面上にランダムに撒かれた任意点間の距離ヒストグラムを特徴量としている。これに対し、本研究ではメッシュ頂点の主曲率分布に基づく特徴量を用いた類似検索手法を提案する。関連研究には[3]があるが、これは距離画像間の位置姿勢合わせが目的である。本研究で提案する特徴量は主曲率分布に基づくため、モデル表面の凹凸分布を類似度評価に反映した類似検索を行える。

2. 本手法の概要

本手法の手順概要を図1に示す。まず問い合わせメッシュモデル Q の各頂点での主曲率を[4]の方法で計算し、これに基づく Shape Index 値(S_I)、及び S_I のモデル内分布を示す Shape Histogram(H)を算出する。さらに、 H の分布を n 次元ベクトルで表現したモーメントベクトルを Q の特徴量 R_Q とする。この方法で予め検索対象メッシュのモーメントベクトル R_{M1}, \dots, R_{Mn} 作成し、DB内に格納しておく。類似検索では、 R_Q と、 R_{M1}, \dots, R_{Mn} との非類似度を総当りの計算する。

3. 主曲率に基づく特徴量と非類似度の計算

3.1 頂点上の主曲率計算

メッシュ頂点 v_i における隣接頂点 v_j の方向に対する方向曲率 κ_{ij} は、式(1)で計算される。

$$\kappa_{ij} = 2N_{v_i} \cdot (v_j - v_i) / \|(v_j - v_i)\|^2 \quad (1)$$

ここで N_{v_i} は頂点 v_i に接続した面法線の、面積による重み付け平均を正規化したものであり、式(2)で求められる。但し N_k は接続面 f_k の単位法線ベクトル、 F^i は v_i に接続した面集合である。

$$N_{v_i} = \sum_{f_k \in F^i} |f_k| N_{f_k} / \left\| \sum_{f_k \in F^i} |f_k| N_{f_k} \right\| \quad (2)$$

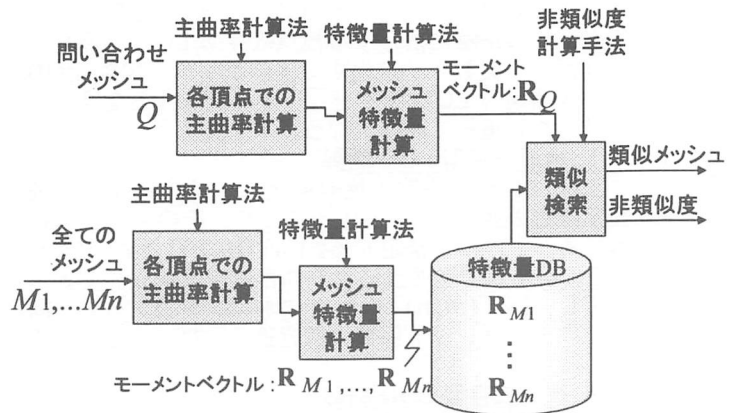


図1 本研究の手順概要

次に、この頂点における曲率テンソルと同じ固有ベクトルを持つ 3×3 行列 M_{v_i} を式(3)で求める。但し、 v^i は頂点 v_i の隣接頂点集合である。

$$M_{v_i} = \sum_{v_j \in V^i} w_{ij} \kappa_{ij} T_{ij}^t \quad (3)$$

$$T_{ij} = \frac{(I - N_{v_i} N_{v_i}^t)(v_j - v_i)}{\|(I - N_{v_i} N_{v_i}^t)(v_j - v_i)\|} \quad (4) \quad w_{ij} = \sum_{f_k \in F^i \cap F^j} |f_k| / \left(2 \sum_{f_k \in F^i} |f_k| \right) \quad (5)$$

また、行列 M_{v_i} を Householder 変換[5]により三重対角化し、さらに Givens 回転[5]により右下の 2×2 行列を対角化すると式(6)の行列 \tilde{M}_{v_i} が得られる。

$$\tilde{M}_{v_i} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \tilde{m}_{v_i}^{22} & 0 \\ 0 & 0 & \tilde{m}_{v_i}^{33} \end{pmatrix} \quad (6)$$

式(6)より頂点 v_i における主曲率 κ_1, κ_2 (但し $\kappa_1 \geq \kappa_2$ とする) は式(7)となる。

$$\kappa_1 = 3\tilde{m}_{v_i}^{22} - \tilde{m}_{v_i}^{33}, \quad \kappa_2 = 3\tilde{m}_{v_i}^{33} - \tilde{m}_{v_i}^{22} \quad (7)$$

3.2 主曲率に基づくメッシュ特徴量の算出

(1) Shape Index 値(S_I)の計算

$S_I \in [0, 1]$ は、ある頂点 v_i における主曲率に基づいた曲面形状の定量的分類指標であり、式(8)で定義される。

$$S_I(v_i) = \frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \tan^{-1} \frac{\kappa_1(v_i) + \kappa_2(v_i)}{\kappa_1(v_i) - \kappa_2(v_i)} \quad (8)$$

図2に S_I の表す形状分類とその例を示す。

平面上の点の曲率は 0 であるから、 S_I 値は不定となるため、本研究の実装では仮に $S_I = 2.0$ とする。

(2) Shape Histogram(H)の計算

$H: [0,1] \rightarrow [0,1]$ は S_I 値を量子化し、Histogram 化したものであり、式(9)で定義される。

$$H\left(S_I = \frac{k}{n_b}\right) = \sum_{i=1}^{n_v} X_k(S_I(v_i) \cdot E^i) / \sum_{i=1}^{n_v} E^i \quad (9)$$

ここで n_b は量子化の箱の数、 n_v はメッシュモデルの頂点数、 E^i は v_i の接続面の総面積であり、 $X_k(S_I(v_i))$ は $S_I \in [(k-1)/n_b, k/n_b]$ であれば 1 を返し、それ以外は 0 を返す関数である。

(3) モーメントベクトル \mathbf{R} の計算

H に基づき、メッシュモデルの特徴量となる n 次元モーメントベクトル \mathbf{R} は式(10)で定義される。

$$\mathbf{R} = (m_1, m_2, \dots, m_n) \quad (10)$$

ここで、 m_1, m_2, \dots, m_n は 1 次から n 次の Shape Histogram モーメントであり、式(11)(12)で定義される。ここで、 $\alpha \in [2, n] \subset \mathbf{Z}$ であり、メッシュモデルの平均的な形状から外れた形状特徴をより強調したい時は n を増やす。

$$m_1 = \sum_h \{h \cdot H(h)\} \quad (11) \quad m_\alpha = \sum_h \{(h - m_1)^\alpha \cdot H(h)\} \quad (12)$$

3.3 非類似度 D の計算

メッシュモデルの非類似度 D は式(13)で定義される。

$$D(\mathbf{R}_Q, \mathbf{R}_{Mx}) = \sqrt{\sum_{\alpha=1}^n (m_\alpha^Q - m_\alpha^{Mx})^2} \quad (13)$$

ここで \mathbf{R}_Q 、 \mathbf{R}_{Mx} は各々、問い合わせメッシュと検索対象メッシュのモーメントベクトルである。この非類似度は、同一形状メッシュに対しては 0 の値をとる。

4. 類似検索実験

類似検索アルゴリズムは C++ を用いて実装した。検索対象は、3D Studio MAX を用いて作成、及び web 上よりダウンロードした VRML1.0 形式のモデルとした。

4.1 予備実験

図 3 は同一形状モデル $A(n_v=92)$ 、と $B(n_v=1002)$ でメッシュ分割数と H の関係調べたものである。この結果より、解像度を上げると分布が滑らかになるものの、ピークは理想値である 1.0 に近い値が現れ、メッシュの特徴を捉えていることがわかる。また、モデルの平行移動、回転、拡大・縮小の全てに対して H は不変であることが確認された。これは S_I が主曲率に基づいているからである。

4.2 類似検索実験

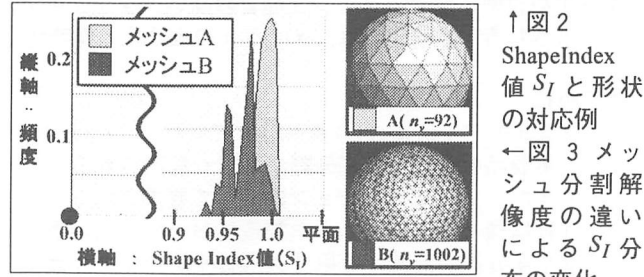
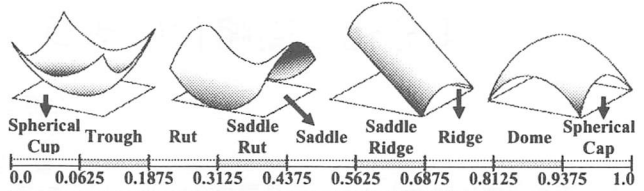
前述した形式の 47 個のメッシュを用意し、その特徴量となるモーメントベクトル \mathbf{R} を計算し、モデル毎のテキストファイルとして格納した。DB 構築は PC(P4, 2.5GHz) で 7 秒、類似検索は 1 秒以内で完了できた。図 4 に類似検索実験の結果を示す。画像下の数字は問い合わせモデルとの非類似度 D である。

5. まとめと考察

類似検索実験結果より、球のように S_I 分布が集中しているようなモデルや、人間の顔のように S_I が広範囲に分布しているようなモデルに対しては、主曲率に基づく本類似検索手法がよく機能することがわかった。今後の課題としては、曲率の空間分布を考慮した検索、表面テクスチャを含めた検索等が挙げられる。

参考文献

- [1] Thomas Funkhouser et al. "A Search Engine for 3D Models" ACM Transactions on Graphics, Vol. 22, No. 1, 2003, pp 83-105
- [2] 衣嶋 昌俊 et al. 「人間の感性に基づく 3次元モデルの形状



↑ 図 2
Shape Index 値 S_I と形状の対応例
← 図 3 メッシュ分割解像度の違いによる S_I 分布の変化

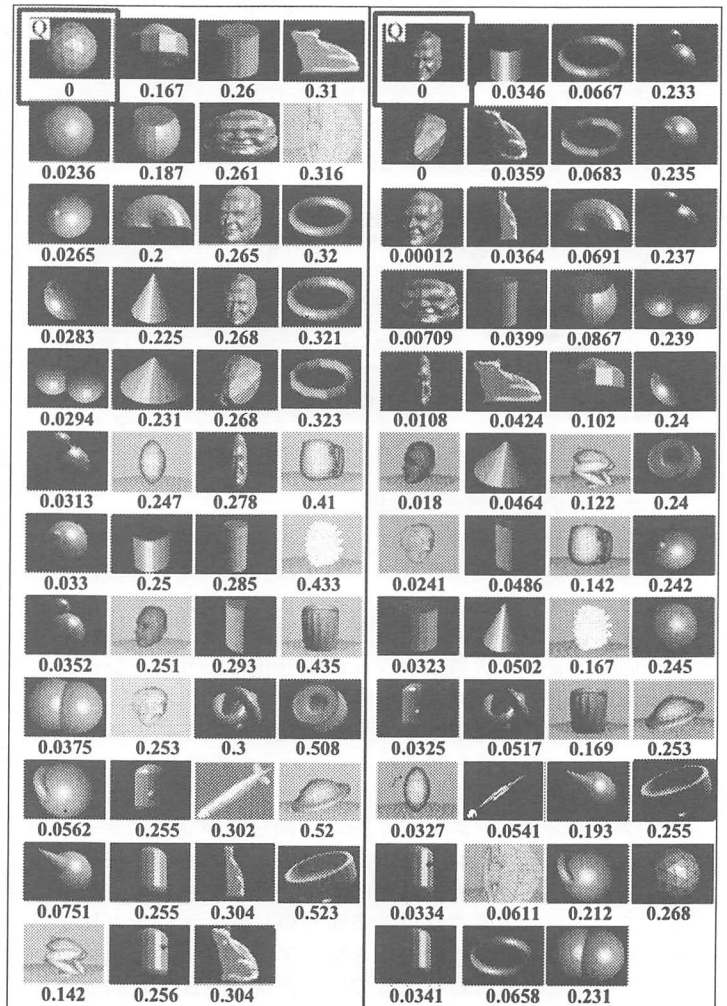


図 4 類似検索実験結果(左上が問い合わせメッシュ)

類似検索 | 情報処理学会 グラフィックスと CAD 研究会 情報処理学会研究会報告 Vol.2002, No.16, pp.25-30

[3] C.Dorai et al. "COSMOS-A Representation Scheme for 3D Free-Form Objects" IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, VOL.19, NO.10, pp. 1115-1130, 1997

[4] Gabriel Taubin "Estimating the Tensor of Curvature of a Surface from a Polyhedral Approximation" Proc. of ICCV'95, pp.902-907,1995

[5] William H.Press et al. "NUMERICAL RECIPES in C" 技術評論社