

ウェーブレット解析を用いた3次元形状の検索

3P-9

西村 美浦 稲本 実保子 市川 哲彦 藤代 一成
お茶の水女子大学理学部情報科学科

1 はじめに

近年、多様なマルチメディア情報のコンテンツに基づく検索が盛んに研究されている。データからの直接抽出が可能な特徴を用いた検索については、時系列データ [1] と2次元画像データを対象としたもの [2] が主流である。

本研究では近年の3次元入出力デバイスの普及を考慮し、形状特徴を用いた立体の類似検索を行う。形状表現方法としては、単に表現能力が高いのみならず類似性を与える数学的な基盤が整備され、かつ形状の大域的・局所の特徴の双方が取り扱えるものが必要となる。そこで本研究では、再分曲面 (subdivision surface) [3] を形状表現法として用い、ウェーブレット解析 [4] で得られる詳細係数を3次元形状の特徴量として取り扱う。

形状DBには再分曲面として表現された形状データが格納されており、問合せは形状データを直接編集すること、及び許容誤差を与えることによって記述される。エンジン部では与えられた問合せ形状をウェーブレット解析し、その詳細係数を用いて類似する形状の検索を行う。

以下、ウェーブレット解析を用いた多重解像度解析 (multiresolution analysis: MRA) について説明した後、再分曲面について述べ、検索の仕組み、ユーザーインターフェースについて説明する。

2 ウェーブレットを用いた多重解像度解析

MRAとは、関数を階層的に取り扱うための数学的な枠組であり、ウェーブレット解析もその一つである。

まず、 p_i を適当な数列としたとき、以下のような性質をもつ関数 $\phi(x)$ を考える。

$$\phi(x) = \sum_i p_i \phi(2x - i)$$

このような $\phi(x)$ はスケーリング関数と呼ばれる。この $\phi(x)$ を平行移動させたり、拡大縮小することにより、線形関数空間を定義できる。

$$V^j = \text{Span}(\phi(2^j x - i)_{i \in \mathbb{Z}})$$

この空間は、次のような入れ子空間となっている。

$$V^0 \subset V^1 \subset \dots \subset V^j \subset \dots$$

適宜定義した内積 $\langle \cdot, \cdot \rangle$ に関して V^{j+1} における V^j の直交補空間として W^j を考える ($V^{j+1} = V^j \oplus W^j$)。関数 $\psi(x) \in W^j$ を平行移動したものが空間 W^j を張るとき、 $\psi(x)$ をウェーブレットという。以上のことから、 V^j における関数

$$f^j(x) = \sum_i c_i^j \phi_i^j(x)$$

は、 V^{j-1} と W^{j-1} の基底関数を用いて次のように表せる。

$$f^j(x) = \sum_i c_i^{j-1} \phi_i^{j-1}(x) + \sum_i d_i^{j-1} \psi_i^{j-1}(x)$$

この結果、 $\{c_i^j\}$ は $\{c_i^{j-1}\}$ と係数 $\{d_i^{j-1}\}$ とに分割できる。図1はこの過程 (フィルターバンク) を示している。

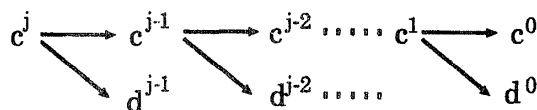


図1: フィルターバンク

上記のウェーブレット係数 d^j は、レベル j における詳細係数と呼ばれ、直観的には関数の局所の特徴を表すものと考えることができる。

3 再分曲面

再分曲面とは、3次元メッシュ構造をもった曲面表現の1つである。再分の過程はそれぞれの三角メッシュに対して辺の中点を新しい頂点として挿入し、4つの三角メッシュに分割する分割ステップとそれぞれの頂点に対し重みを付加し、頂点の位置を決定する平均化ステップの2段階から構成されている。図2は、四面体 M^0 から M^1, \dots, M^∞ への再分の様子を示している。

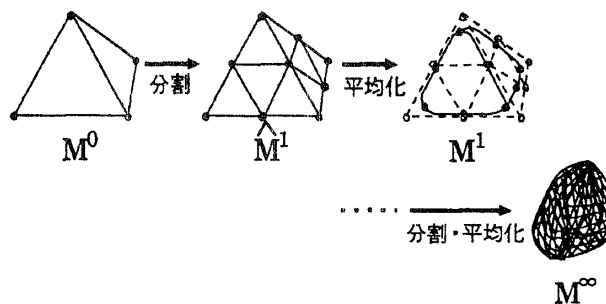


図2: 四面体における再分の過程

Querying 3D Geometry by Wavelet Analysis
Miho Nishimura, Mihoko Inamoto,
Yoshihiko Ichikawa, and Issei Fujishiro
Department of Information Sciences, Ochanomizu University
2-1-1 Otsuka, Bunkyo-ku, Tokyo, Japan

各 M^j の頂点を動かして得られる形状全体を V^j とすると、前述の入れ子空間が定義される。

$$V^0 \subset V^1 \subset \dots \subset V^j \subset \dots \subset V^\infty$$

このことから、再分曲面は前述のウェーブレットを用いた MRA が適用可能であることが示される。

4 検索の構成

4.1 検索エンジン

前述の通り、再分曲面をウェーブレット解析して得られる詳細係数は局所的な形状特徴を表すので、これを特徴量ベクトルとした検索が可能である。検索の過程は次のようになる。

step1. 入力形状をウェーブレット解析する。

step2. 得られた詳細係数の切捨て・量子化を行う。

step3. 適切なメトリックを用いて、検索空間でより近い要素を返す。

利用する基底関数の個数が有限なので、フィルタバンクの過程は行列を用いて計算できる。なおこの行列は疎行列なので、頂点の数を n とすると $O(n^2)$ ではなく $O(n)$ で表現できる。

step2 は検索の高速化のために行う。切捨ては、特徴量(詳細係数)のうち絶対値の大きなものだけを用い、残りを 0 にすること、量子化は、特徴量の値をそのまま使うのではなく、何段階かに区切ってまとめてしまうことである。

step3 では、step2 の結果得られた特徴量を検索空間に位置付け、近傍のデータを検索する。多次元空間からの選択となるので、高速な検索のためには、索引付けなどの手法の導入の検討も必要である。

また検索時の問題点として、入力オブジェクトの自由度が挙げられる。すなわち空間内の位置づけや、拡大・縮小、回転している形状の認識、点の対応づけ、パッチのとり方などの曖昧さを解決しなくてはならない。

4.2 問合せインターフェース

問合せにおいてユーザの正確な入力は期待できないため、一度で目的の形状が出力されるケースは稀である。従って出力されたオブジェクトを参考にしながら入力オブジェクトを修正、所望の形状に到達する手法が必要である。この試行錯誤的な性質に適応させるため、問合せ方法には直観性や柔軟性が求められる。

以上を考慮に入れ、本研究では xforms, OpenGL を用いた再分曲面エディタを構築した。このエディタでは再分曲面の利用により、多様なトポロジーを扱うことができる。また適切な解像度での形状編集が可能なので、直観的かつ容易に編集を行うことができる。例えば大域的な形状編集は低い解像度で、局所的な形状編集は高い解像度で操作を行えばよい(図3)。

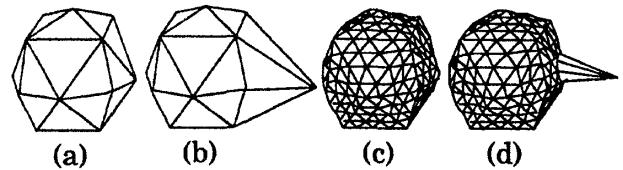


図3:異なるレベルでの操作。(a)低解像度の original, (b)大域的変更,(c)高解像度の original,(d)局所的変更。

問合せ画面を図4に示す。最初にユーザがトポロジーを選択すると、左側のウィンドウに初期形状が現れる。利用者はボタンによる解像度選択、マウスによるオブジェクトの回転や頂点移動を行うことで形状を編集する。

このように入力された形状が前述の3つのstepで処理され、右側の小ウィンドウに検索結果が表示される。

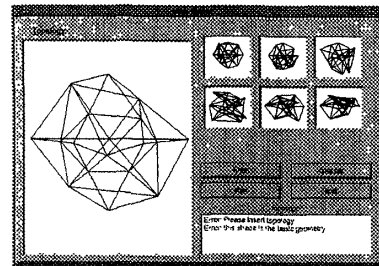


図4:問合せ画面。印刷の都合上簡略化している。

5 まとめ

ウェーブレット解析を用いた3次元形状の特徴抽出、及びそれを利用した検索を行った。検索実行の可能性は検証されているが、適切なメトリック、切捨てや量子化のパラメータ設定、索引の利用など、諸パラメータについては未評価である。

これらの評価に加え、自由度の高い問合せへの拡張、検索の高速化、一般の形状モデラーとの統合などが今後の課題である。

参考文献

- [1] C. Faloutsos, et al., "Fast subsequence matching in time-series databases," in *Proc. the ACM SIGMOD Conf.*, pp. 419-429, May 1994.
- [2] C. E. Jacobs, A. Finkelstein and D. H. Salesin, "Fast multiresolution image querying," in *Proc. SIGGRAPH '95*, pp. 277-286, Aug. 1995.
- [3] J. M. Lounsbery, *Multiresolution Analysis for Surface of Arbitrary Topological Type*, PhD dissertation, University of Washington, 1994.
- [4] E. J. Stollnitz, T. D. DeRose and D. H. Salesin, "Wavelet for computer graphics: a primer, part1," *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 15, no. 3, pp. 76-84, May 1995.