

2-3 最近のモデリング技術

増田 宏[†]

キーワード モデリング, メッシュ, 再分割曲面, ポイントベース, レベルセット

1. 形状モデリング技術

近年の形状モデリングでは、既存のモデルの編集や再利用を簡単に行う研究が盛んに進められている。3Dモデルの編集はまだ簡単ではなく、画像や文書を編集するときのような簡便さはまだ実現されていない。また、多様な3Dモデルの表現とモデリング手法も盛んに研究されており、メッシュや細分割曲面に加えて、ボリュームベース、陰関数ベース、点群ベースのモデリングも、まだ研究は要するものの、現実的なものになりつつある。

本章では、これらの観点から、3Dモデルの編集技術に関する最近の研究の解説を行う。

2. 細分割曲面の編集

細分割曲面では、あるルールにしたがってメッシュモデルを分割していくことで滑らかな曲面を生成する。複雑な曲面が1枚の曲面で表現できるので、パッチ境界の連続性を気にしなくてすむ。詳細な形状を表現する際には、多重解像度表現がよく用いられる。これは、メッシュが細分化されるたびに、各頂点にベクトルを付加して、微小な凹凸を再現する方法である。

多重解像度を持つ細分割曲面に対するカット&ペースト編集を行う手法がBiermann¹⁾らによって提案されている。多重解像度表現では、滑らかな曲面(ベース曲面)と詳細な凹凸(詳細曲面)が多重表現されているので、さまざまなレベルの詳細曲面を取出すことができる。取出した詳細曲面を他の曲面に貼り付けられれば便利であるが、これをインタラクティブな操作として実現するのは簡単ではない。

サーフェス S から詳細形状を抽出し、サーフェス T に付加する操作を行うためには大雑把にいて、① S をベース曲面 S_B と詳細曲面 S_D に分離、② T と S_D の位置合わせ、③ T をリメッシュして S_D を追加、という作業が必要となる。ここで問題となるのは、②の位置合わせの作業である。

両方が平面であればこの作業は単純であるが、曲面のベイスティングでは、両方が曲面の場合を扱う必要がある。

そこで、両方の曲面を同一の平面上に写像して、平面上での位置合わせ問題に帰着させることを考える。曲面の平面化(Flattening)は、多くの方法が提案されてきたが、ほとんどは境界が凸に限定され、形状の歪みも大きかった。そこで、Biermannらは、Shefferらの提案したAngle-Based Flatteningという手法を用いることで、比較的歪みの少ない平面化を実現している。これは、角度のみに着目した最適化で、頂点周りの三角形の角度比をできるだけ保存し、幾何的な整合性を保つための制約条件を付加して角度の再配分を行う手法である。ただし、この最適化は非線形であり、共役勾配法などの高速化手法も使えないため、共役残差法などの数値計算手法を駆使して、計算の高速化を図っている。

一般的にいて、細分割曲面におけるカット&ペーストは、まだ、歪みの低減、計算の安定性と高速化、領域指定などのインタフェースの改善など、使い易くするために解決すべき問題が残されている。

3. 点群モデルの編集

点群は、3Dスキャナ等によって取得できる一次的なデータである。点群によって表現された3Dモデルの編集方法がZwickerら²⁾によって提案されている。点群ベースのモデリングは、画像編集ツールのアナロジーと考えることができる。3Dモデルを曲面上に分布する点群と見做せば、原理的には、画像の画素に対するフィルタリングや加工と同等の処理ができるはずである。

しかし、3次元の点群では、画像とは異なり、格子上に規則正しく並んでいない。そのため、3次元の点群の操作には、点群のパラメータ表現が重要である。点 \mathbf{x}_i に対して、パラメータ $\mathbf{u}_i = (u_i, v_i)^T$ が適切に割り振られていれば、テクスチャマッピングや詳細形状の張り付けは、曲面の場合と同等に扱える。Zwickerらは、等パラメータ線が、できる限り滑らかになるような最適化によって、点群をパラメータ化している。

また、点群の加工の際には、点群を補間して頂点を生成するリサンプリングを行う。このようなパラメータに応じた点群の選択やリサンプリングによって、面の属性を変更するペイント操作、点の座標にオフセットを与える形状変

[†] 東京大学 人工物工学研究センター

"Recent Progress of Geometric Modeling" by Hiroshi Masuda (Research into Artifacts, Center of Engineering the University of Tokyo, Tokyo)

形操作, また, フィルタ操作などを実現することができる.

4. 陰関数表現モデルの編集

陰関数表現とは, 式 $f(x, y, z) = 0$ によって3Dモデルを表す方法である. 陰関数表現では, 曲面の通過点や法線を制御して形状変形を行うことができる. 陰関数表現では, 位相が変わる変形も容易に行うことができる. ここでは, 陰関数のうち特にRadial Basis Function (RBF) について示しておく. CGで利用される典型的なRBFは, 点群を \mathbf{x}_i としたとき,

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^N \lambda_i |\mathbf{x} - \mathbf{x}_i| + c_1 + c_2 x + c_3 y + c_4 z$$

という形をしている. $f(\mathbf{x}_i) = f_i$ などの条件を代入していけば, λ, c_i に関する連立一次方程式となる. 点の個数が少ないときは, 簡単に関数の形を決めることができるが, 複雑な3Dモデルでは膨大な数の頂点を通過する関数を求めることが必要になるうえ, この連立一次方程式は密なので, 高速解法が使いにくい.

Carrらの研究³⁾では, 近似解を求めるのでよければ, この計算が可能であることを示した. この方法では, 与えられた点を厳密に通過する陰関数を計算するのはあきらめて, ある精度で近くを通過する関数を算出する, という発想に基づいている. ただし高速とはいっても, 数十万点で数時間程度なので, まだ改善の余地は大きい.

5. レベルセットモデルの編集

レベルセットモデルでは, 陰関数 ϕ の等値面 (レベルセット) によって曲面を定義する. データ表現上は, 陰関数 ϕ をボリュームの格子点上でサンプリングしてボリュームデータとして表現する. このデータが偏微分方程式にしたがって時間的に変化するものと考え, 偏微分方式を制御することによって形状編集を行う.

ϕ を時間変化するスカラー関数とすると, 曲面は ϕ の等値面 $\phi(\mathbf{X}, t) = \text{const.}$ で表現できる. この両辺を t で偏微分すると,

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = -\Delta \phi \frac{dx}{dt}$$

となる.

Musethら⁴⁾は, 速度を \mathbf{v} , 曲面の法線を \mathbf{n} と置き, ϕ を偏微分した式が,

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} \Big/ \left| \Delta \phi \right| = \mathbf{n} \cdot \mathbf{v}$$

と書けることを利用して, $F(\mathbf{X}, \mathbf{n}, \phi) = \mathbf{n} \cdot \mathbf{v}$ を制御することで形状変形を行うオペレータを提案した.

形状の制御においては, $F(\mathbf{X}, \mathbf{n}, \phi) = D_q(d) C(g) G(g)$ と表現する. $D_q(d)$ は, 適当な幾何要素 q からの距離 d に応じて減衰する関数で, 特定の箇所のみへ操作を加えたいときに用いられる. $C(g)$ は幾何的な量に応じて減衰する関数で, 例えば曲率がある範囲のときのみに操作を加えることができる. $G(g)$ は, 幾何的な量に応じて速度を変化させるための関数である. これらの関数を形状編集の種類に応じて組合せて, カット&ペーストやエンボス, スムージングなどの処理を実現できることを示している.

6. むすび

最近のモデリング研究の動向を示した. 大雑把に言えば, 既存モデルの再利用法, メッシュ以外のモデリング手法の実用化, また, メッシュモデルのさらなる発展の三つに関連する研究が, 今後しばらくは続くであろうと思われる.

(2002年12月16日受付)

〔文 献〕

- 1) H. Biermann, I. Martin, F. Bernardini, D. Zorin: "Cut-and-Paste Editing of Multiresolution Surfaces", ACM SIGGRAPH 2002
- 2) M. Zwicker, M. Pauly, O. Knoll, M. Gross: "Pointshop 3D; An Interactive System for Point-Based Surface Editing", ACM SIGGRAPH 2002
- 3) J.C. Carr, R.K. Beaton, J.B. Cherrie, T.J. Mitchell, W.R. Fright, B.C. McCallum, T.R. Evans: "Reconstruction and Representation of 3D Objects with Radial Basis Functions", ACM SIGGRAPH 2001
- 4) K. Museth, D. Breen, R.T. Whitaker, A.H. Barr, "Level Set Surface Editing Operators", ACM SIGGRAPH 2002



増田 宏 (ますだ ひろし) 1985年, 東京大学工学部精密機械工学科卒業. 1987年, 同大学院工学系研究科修士課程修了. 同年, 日本アイ・ビー・エム(株)入社. 東京基礎研究所に勤務. 1998年より, 東京大学大学院工学系研究科環境海洋工学専攻助教授. 1999年より, 東京大学人工物工学研究センター助教授. 形状モデリング, 情報視覚化などの研究に従事. 工学博士.