

異なる物質の特性を表現した 点群形状モデリング手法の提案

竹内 亮太[†] 渡辺 大地^{††}

東京工科大学 大学院 バイオ・情報メディア研究科 メディアサイエンス専攻[†]
東京工科大学 メディア学部^{††}

E-mail: s2rita@nifty.com[†], earth@media.teu.ac.jp^{††}

近年の 3DCG における形状モデリング手法は、多彩なアプローチが提案されている。高精細な形状を作成する際には、ポリゴンやパラメトリック曲面などを利用した、トポロジー操作をベースとする手法を用いることが多いが、異なる材質の特性を同時に取り扱うことができるモデリングシステムは提案されてこなかった。

本研究では、複数の異なる物質を同時に取り扱うことが可能な、自由モデリング環境を提案する。本稿では GPU による処理を用いた、ポイントベースサーフェスによるリアルタイムな形状変形手法を用いて、性質の異なる変形挙動を包括的に取り扱う手法を示す。形状編集操作に対して、物質ごとに異なるインタラクションを返すことにより、目的とする造形物に応じた編集方法を提示することが可能となる。

Proposal of point-based shape modeling expressing features of different substances

Ryota Takeuchi[†] and Taichi Watanabe^{††}

Graduate School of Bionics, Computer and Media Sciences, Tokyo University of Technology[†]
Faculty of Media Science, Tokyo University of Technology^{††}

E-mail: s2rita@nifty.com[†], earth@media.teu.ac.jp^{††}

Recent years, as for the geometric modeling technique in 3DCG, variegated approach is proposed. When creating high definition form, the technique of using topology operation using a polygon, parametric surface, etc. as a base was used in many cases, but the modeling system which can deal with the characteristic of the different quality of the material simultaneously was not proposed. In this research, the free modeling environment which can deal with several different substances simultaneously is proposed. This paper shows the real time shape distortion technique by the point base surface using processing by GPU. It becomes possible by returning a different interaction for every substance to form edit operation to show the edit method according to the modeling thing made into the purpose.

1 はじめに

近年の 3DCG における形状モデリング手法は、多彩なアプローチが提案されている。高精細な形状を作成する際には、ポリゴンやパラメトリック曲面などを利用した、トポロジー操作をベースとする手法を用いることが多いが、輪郭線入力から形状を推定する Sketch [1] や、現実の特定の造形をシミュレーションしたインタフェース [2] を備えるシステムも提案されてきている。

これまでのモデリング手法は、インタフェース

の実現方法や用いるデバイスによって差別化を図ることが多く、モデリングしている物質の材質を考慮したものは少ない。現実に存在する特定の造形手法をシミュレーションしたり、クロスシミュレーションのような物理特性を再現する手法は存在するが、その場合はシミュレーション対象となっている物質の挙動しか取り扱うことができない。

例えば人間のキャラクターを作成しようとした場合、実際には人体の部位や、毛髪、着衣などの要素ごとに物体としての特性は異なり、変形時に

も異なる挙動を示すのが自然である。しかし実際には、表現しようとしている材質の硬さや柔らかさなどの違いは形状編集の段階では無視し、トポロジー操作によるモデリング手法で形状を作成するのが一般的である。

トポロジー操作に依らない自由変形による形状モデリング手法としては、メタボールを用いることが多く、これを利用した粘土細工シミュレーション [2] や、プロユースのモデリングソフト [3] も存在する。しかし、メタボールによるモデリングはポリゴン化する際の処理コストが大きいほか、メタボールで表現される材質以外との共存が難しい。

このように、形状モデリングにおける物理特性や材質のシミュレーションは、その目的に応じた固有のデータ構造を用いているため、異なる性質の物体を共存させることが考慮されていなかった。そこで本研究では、複数の異なる物質を同時に取り扱うことが可能な、自由モデリング環境を提案する。形状編集操作に対して、物質ごとに異なるインタラクションを返すことにより、目的とする造形物に応じた編集方法を提示することが可能となる。

特性の異なる変形を包括的に取り扱うため、本研究では、形状を全て点群データのみで表すポイントベースのレンダリングとモデリング技術 [4] を用いる。点群を用いた形状表現においてモデリングを行うことにより、ポリゴンメッシュという表現単位の制約を受けずに、ユーザの入力操作に対してより直感的な編集結果を提示することができると考えられる。本研究で提案する手法では、形状の内外情報とサーフェス情報を分離して保持し、編集操作を陰関数曲面ベースで行う。これによって、データ構造の単純化と陰関数曲面による滑らかな形状表現の両立を実現するとともに、様々な変形挙動を包括的に取り扱うことが可能になる。

本稿では、ポイントベースのモデリングにおける、材質を表現するためのデータ構造と、点群に対するモデリング操作の定義を行う。その後には本手法の実装結果と考察を述べて、新たなモデリング手法としての可能性を示す。

2 形状のデータ構造

本手法では、モデリングの対象とする形状データを、形状の内外情報を持つボリュームデータと、形状の表面を表す点群データの二重構造によって構成する。ボリュームデータは形状内 (1) と形状外 (0) の 2 値を持ち、編集操作を行う時に更新する。点群データは、形状の表面を表す頂点の位置ベクトルと、その頂点における法線ベクトルの配列として定義する。本稿では、この位置ベクトルと法線ベクトルの配列を点群サーフェスデータと呼称する。このアプローチは Pfister らの手法 [5] を踏襲したものであるが、後述するレンダリング処理においては個々の点に対する境界構築は省略し、インタラクティブ性の確保を優先している。

現在ではボリュームデータに基づく形状の描画を行う場合、マーチングキューブ法 [6] やその派生技術を用いて、ボリュームデータから形状の内外を分ける境界部分を抽出し、ポリゴンメッシュを形成して描画を行う手法が一般的である。しかしこれではボクセルの解像度を超える精密な形状は表現できない。形状を編集する場合は、編集によって形状の表面積が変化することを想定しなければならず、あらかじめ格子状に区切られたボリュームデータ上で表面積の変化に対応するには、ボクセル自体の解像度を高める必要があり、データ容量の増加や構造の複雑化を招く。

そこで本手法では、ボクセル解像度の制約を受けずにサーフェスを表現するため、ボリュームデータとは別個に点群サーフェスデータを保持することとした。点群サーフェスデータは、初期形状の生成時と編集操作の発生時に生成、更新する。点群サーフェスが保持する頂点数はボクセルの解像度によらず、編集を行う際に入力する陰関数領域のサンプリング精度によって自由に増減することができるため、ボクセル上に点を配置する制約を受けずに済む。編集操作は後述する陰関数表現によって行うが、その際にボリュームデータと連動した計算結果によって、点群サーフェスを生成し、配置する。これにより、点群サーフェスによる形状の精度は陰関数曲面のサンプリング精度によって決定するため、陰関数曲面による滑らかな形状表現を活かすことができる。

3 レンダリング手法

本研究で提案するモデリングインタフェース(以下、本システムとする)で行うモデリングにおいての初期形状は、6個の面を持つ直方体状を想定している。各面は頂点の均一な集合によって表現し、その頂点数は任意の解像度によって決定する。この点群で表した面に対して、システムのユーザが切削操作を指示していくことによって、任意の形状を生成可能なインタフェースを実現することが、本システムの基本機能である。

直方体状の点群を描画するにあたり、本システムでは各頂点の描画色を2次元画像のテクスチャを参照して決定する。2次元画像の色情報を反映することにより、任意の画像に対する立体形状を、金太郎飴から削り出すかのような操作によって生成することができる。

以下に、本システムで提案するモデリング形状の初期状態を示す。図1は初期形状を俯瞰した画像で、図2は形状を点群で描画していることを示すために、頂点の大きさを一定にして拡大した画像である。

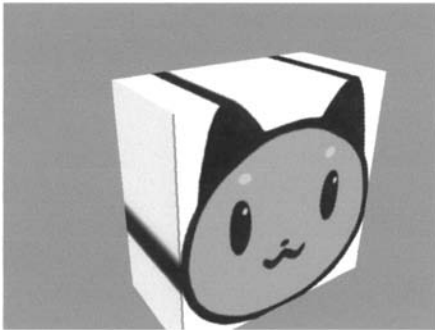


図 1: モデリング形状の初期状態

上記の形状構造を描画するにあたっては、グラフィクスハードウェアの機能であるポイントスプライト機能と、頂点やピクセル単位の並列処理をGPU上で高速に行えるシェーダプログラミング処理を併用する。テクスチャを参照するUV座標値として、頂点の座標値をUV平面上に射影し、スクエリングを調節して用いることで、頂点の座標位置に即した色情報を自動的に算出して描画する。

各頂点を描画するにあたっては、画面上での大

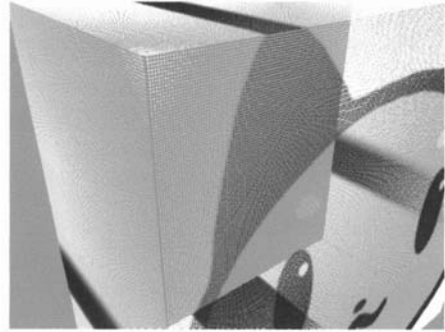


図 2: モデリング形状の初期状態 (拡大図)

きを視点からの距離に反比例するように変化させることで、頂点間の空白を擬似的に補間して描画を行う。また、各頂点にはそれぞれが属している面ごとに一律な法線ベクトルを初期値として設定する。この法線ベクトルは、後述する点群に対する切削操作によって座標値と共に変化する。

4 材質とモデリング操作の定義

本手法では、材質の差異を点群サーフェスの各頂点間の結合力によって表現する。結合力は、形状に対する伸張や圧着などの操作によって変形を行う際の係数として利用する。この結合力は、モデリング中の任意のタイミングで、任意の頂点ごとに設定することが可能である。

結合力は0~1の値を持ち、1に近づくほど変形しにくく、0に近づくほど変形しやすい性質を表す。この特性をふまえた上で、本稿では例として、以下のモデリング操作を定義する。

- 切削
- 盛りつけ
- 伸張
- 圧着

切削と盛りつけは結合力の値に関わらず可能な操作だが、伸張と圧着は結合力に応じて異なる変形を示す。結合力1の状態では切削と盛りつけ操作しか受け付けなくなり、伸張や圧着の変形操作は無効になる。

5 点群に対する切削操作

5.1 切削領域の陰関数表現

本システムでは、形状に対する切削操作を、陰関数表現による切削領域の入力によって表現する。現状では、簡易な陰関数で表現可能である球状の領域を切削に用いている。ユーザが入力した3次元空間中の位置ベクトル P を中心とし、半径 r の球によって構成する領域を、陰関数表現によって切削領域として与える。以下の式 (1) は、この切削領域の陰関数表現式である。

$$r^2 - \{(x - P_x)^2 + (y - P_y)^2 + (z - P_z)^2\} > 0 \quad (1)$$

5.2 切削処理

切削操作は、切削による形状の状態更新と、切削後の断面生成の二段階によって完了する。

まず形状の内外判定を保持するボリュームデータに対し、領域内に含まれているボクセルの値を、形状外 (0) として更新する。次に点群サーフェスデータに対して検索を行い、切削領域内に含まれている点群を全て消去する。この際、全点群に対する検索を行うと、点群の増加に伴って処理時間が増加してしまうが、本システムでは点群サーフェスを領域ごとに分割して格納している。その結果、検索対象となる点群を、切削領域とその近辺に存在するものに限定することができるため、モデリング操作の応答性向上に繋がっている。

また、点群サーフェスデータは描画処理に直接使用するデータであるため、シリアライズされている状態であることが望ましい。本システムでは点群の増減が頻繁に発生するため、点群の削除処理に際しては要素実体の削除を行わず、削除済みを表すマーク付けを行うに留めている。マーク付けされている要素は点群の追加処理時に優先して再利用されるため、メモリ効率と処理速度の向上を実現している。

5.3 断面生成処理

ボクセルの状態更新と点群サーフェスの削除が完了したら、次は断面となる点群の生成を行う。まず、切削領域である陰関数曲面のサンプリングを行い、陰関数の値が 0 となる等値面上の位置ベクトル Q を抽出する。この等値面上の点 Q を含むボクセルに対して、その周囲に形状内の状態値 (1) と形状外 (0) の状態値を持つボクセルが両方存在する場合、点 Q を含むボクセルは切削を

行って生じる断面を含むボクセルであると言えるので、点群サーフェスデータに対して位置ベクトル Q を切削断面上の新たな点群として追加する。

位置ベクトルの追加と同時に、法線ベクトルの算出も行う。断面上の点 Q の法線ベクトル N は、切削領域が球状に定義されていることから、切削領域の中心位置ベクトル P を用いて $N = Q - P$ と表すことができる。これにより、切削操作を行うごとに適切な法線を各頂点に与えて、形状に忠実なライティング処理を行うことができる。以上の処理を、切削領域の等値面上に存在する全ての点に対して行う。

以下に、本システムで提案する切削操作の編集前と編集後の状態を示す。図 3 に示す画像は、切削操作の始点と終点を球体で示し、その間をスウィープした領域を切削操作の対象領域として示している。実際に領域内の切削を行った結果を示したものが図 4 である。

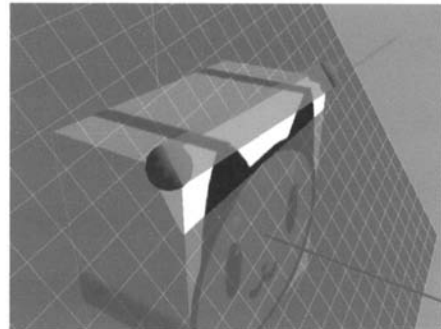


図 3: 切削操作前

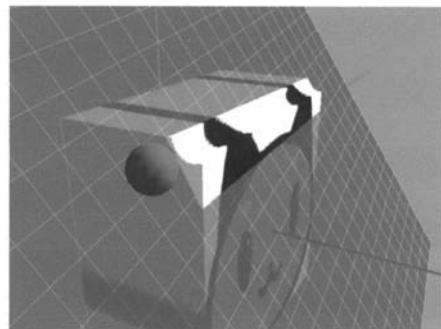


図 4: 切削操作後

5.4 盛りつけ操作

本システムでは誤って過剰に切削した場合に備えて、形状の盛り付けも可能である。盛り付け処理は、切削操作と真逆の操作を行うことで実現可能である。すなわち、以下の手順になる。

1. 切削領域内のボクセルを形状内の値 (1) に設定する
2. 切削領域内の点群を削除する
3. 切削領域の表面をサンプリングし、近傍に形状外 (0) のボクセルがあれば断面となる点群サーフェスを生成する

盛り付けを行った領域に対して再度切削を行った場合も、初期形状に対する場合と同様の切削処理が行える。以下の図 5,6 に、切削を行った部位に対する盛り付けを行っている様子を示す。

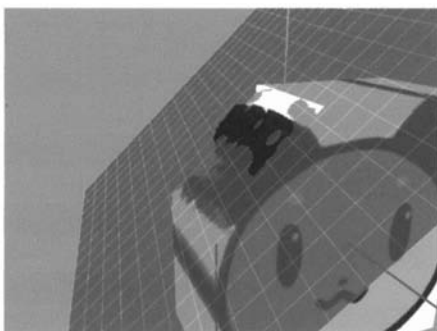


図 5: 盛り付け前の状態

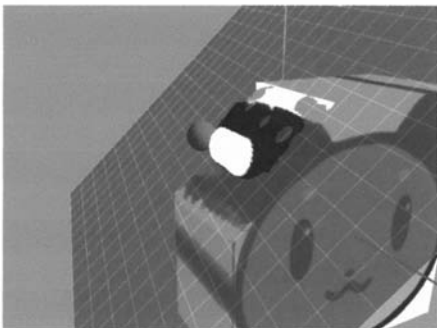


図 6: 盛り付け後の状態

6 点群に対する変形操作

本システムでは、変形操作を全て GPU 上で処理し、形状として確定させたくなくなったら CPU 側のデータへフィードバックすることによって編集を行っていく。本節では、任意に配置可能な制御球による変形操作を一例として述べる。

影響範囲を設定した球体を点群サーフェス上に配置し、その球体を動かすことによって形状を形成する点群の座標値を補正する。この時に、制御球の影響をどの程度受けるかは、制御球の中心と点群の各座標間の距離によって決定するが、各頂点に設定してある結合力によっても座標の変化量に補正を加える。制御球の影響半径を r 、制御球の設置座標を \mathbf{P} 、制御球の移動後の座標を \mathbf{Q} とし、変形処理の対象となっている座標値が \mathbf{V} で、その座標の結合力が s の時に、座標値 \mathbf{V} に加える変形ベクトル \mathbf{D} は以下の式 (2) によって求める。

$$\mathbf{D} = \frac{r - |\mathbf{P} - \mathbf{V}|}{r} (1 - s)(\mathbf{Q} - \mathbf{P}) \quad (2)$$

この変形処理は GPU 上で処理するため、変形操作の結果は高速に画面上へ反映される。変形を確定した時点で、CPU 側で保持している座標値、法線ベクトル、ボリュームデータの更新を行う。以下の図 7 は伸張操作を、図 8 は圧着操作を行っている様子を示す。

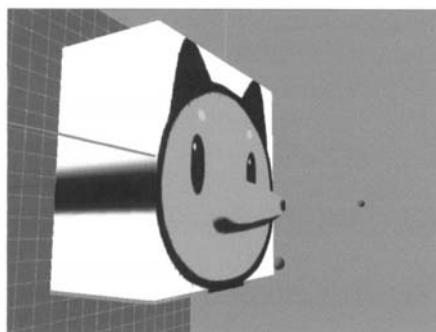


図 7: 伸張操作の結果

7 実装と実験

これまでに述べた手法に基づき、PC 上での実装実験を行った。入力デバイスは 3D マウスとペ

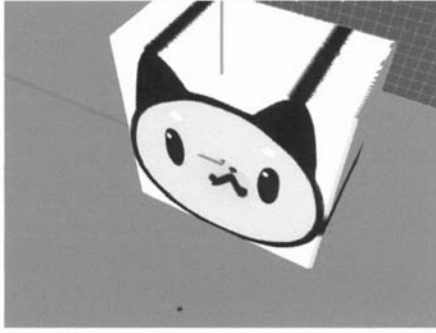


図 8: 圧着操作の結果

ンタブレットを併用してシステムを構築した。グラフィクス API は OpenGL を使用し、シェーダプログラミングには NVIDIA 社の Cg 言語を用いた。以下の表 1 に、今回の実験で使用した環境を示す。

表 1: 実装実験に使用した環境

CPU	Intel(R) Core(TM)2 Duo E8400 3.0GHz
RAM	4GB
GPU	NVIDIA GeForce 9800GTX

この環境上において、 256×256 ピクセルの入力画像を読み込み、画像に対する正面の面上の頂点数を 256×256 、上下左右の側面の頂点数を 128×256 として、全 262144 個で構成した点群を初期形状として配置し、ポイントスプライトとシェーダを利用した描画を行った。その結果、160FPS 程度の速度での描画処理を実現し、インタラクティブなモデリング操作に耐える応答性を確認した。更に、切削・盛りつけ操作と、伸張・圧着操作の動作実験を行った。結果、意図した通りの形状編集操作を行うことができた。

8 まとめ

本研究では、ポイントベースのサーフェス表現を用いた新しいモデリング手法を提案した。点群を直接形状として取り扱うことにより、面の制約を受けることのない自由な形状操作が可能となり、3次元形状モデリングに新たなアプローチを

示すことが出来た。

本手法によって生成した点群形状は、そのままでも表示に耐えるものであるが、既存のポイントグラフィクスのレンダリング技術や、ポリゴンへの再構成処理などによって、様々な用途への応用が期待できる。また、点群形状に対する自由変形により、モデリング対象とする物質の特徴を自由に設定し、同一データ構造上での形状編集を実現した。

今後は更にパラメータを付加することによる、弾性や塑性をより忠実に再現した材質の定義や、クロスシミュレーションの要素を取り入れ、端点を固定した物体の表現など、より多様な材質表現を追求したい。また、ポリウムデータに密度を格納することで、材質の質量や体積を反映した変形結果の提示など、様々な発展が考えられる。

参考文献

- [1] Takeo Igarashi, Satoshi Matsuoka, Hidehiko Tanaka, Teddy: A Sketching Interface for 3D Freeform Design, ACM SIGGRAPH'99, Los Angeles, 1999, pp.409-416.
- [2] 松宮雅俊, 陰関数曲面とパーティクルシステムを用いた仮想粘土細工による自由形状モデリングに関する研究, 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科 博士論文, 2002.
- [3] DASSALUT SYSTEMS, CB Model Pro, 2006.
- [4] 竹内亮太, 渡辺大地, 陰関数曲面を用いた点群形状モデリング手法の提案, NICOGRAPH 2007 秋季大会.
- [5] H. Pfister, M. Zwicker, J. van Baar, M. Gross, Surfels: Surface elements as rendering primitives. In SIGGRAPH 2000, pages 335-342. New Orleans, LA, July 23-28, 2000.
- [6] William E. Lorensen, Harvey E. Cline: Marching Cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm. In: Computer Graphics, Vol. 21, Nr. 4, Juli 1987.