

2002年度卒業論文

フィーチャー・ベースド・モデリングの概念を用いた有機的な3次元形状モデルの部品化と加工によるモデリング方法の研究

指導教員：渡辺 大地

メディア学部 3D アプリケーション構築プロジェクト

学籍番号 99p284

寺尾 雄太

2003年3月

2002年度 卒業論文概要

文題目

フィーチャー・ベースド・モデリングの概念を用いた有機的な3次元形状モデルの部品化と加工によるモデリング方法の研究

メディア学部
学籍番号: 99p284

氏名

寺尾 雄太

主査

渡辺 大地

副査

和田 篤

キーワード

曲面、フィーチャー・ベースド・モデリング、メタボール

生物等の有機的な3次元形状モデルは多くの曲線、曲面で構成されている形状であり、これらをモデリングする際に、いかにして曲面形状を自在に生成し、制御するかが重要であり、従来から様々な研究がなされてきた。本論文では現在、主に使用されているモデリング方法や既存研究の問題点を踏まえた上で、フィーチャー・ベースド・モデリングの概念を利用し、有機的な形状の作製に適したフィーチャーを適用して形状をモデリングすることでユーザーが想定している曲面形状を作製するモデリング方法を提案する。本論文では表面選択手法と有機的な形状に適したフィーチャーとしてメタボール・フィーチャーを提案し、その特徴と実装方法を述べる。

目次

第1章 序論	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 論文構成.....	2
第2章 有機的な3次元形状モデルとモデリング方法	3
2.1 有機的な3次元形状モデルの特徴.....	4
2.2 モデリングをする際の問題点.....	5
2.3 提案する有機的な形状に適したモデリング方法.....	6
第3章 有機的な形状に適したフィーチャーによるモデリング方法	8
3.1 フィーチャーを適用する方法.....	8
3.1.1 表面選択手法.....	8
3.1.2 表面選択手法の実装.....	9
3.1.3 形状の表面上に選択領域を表示.....	9
3.1.4 表面上の選択領域の移動.....	11
3.2 有機的な形状に適したフィーチャーの提案.....	12
3.2.1 メタボール・フィーチャーの特徴.....	12
3.2.2 メタボール.....	12
3.2.3 Marching cubes 法.....	13
3.2.4 メタボール・フィーチャーの実装の流れ.....	14
3.2.5 格子範囲の設定.....	15
3.2.6 形状オブジェクトと格子頂点との内外判定.....	16
3.2.7 メタボール・フィーチャーの変形.....	17
3.3 実行例.....	18
3.4 考察.....	20
第4章 結論	21

謝辭

参考文献

第1章 序論

1.1 研究背景

近年、工業製品の設計、各種シミュレーション、映画、テレビCMやWebコンテンツなど様々な場面で3D コンピュータグラフィック(3DCG)が利用されるようになった。そのような3DCGの普及に伴い、あらゆる物が3DCGで表現されるようになった。中でも、映画、CM等の中で実在、空想を問わず人間やその他の動物、植物などの複雑な曲線、曲面部分が多い有機的な形状を3DCGで扱う場合が多くなってきた。

ソフトウェアを使って3次元形状をモデリングする場合、主に作製する形状はポリゴンかスプラインで構成され、それらをユーザーが任意に選択し加工編集するモデリング方法が使われている。ポリゴンモデルを使って有機的な3次元形状をモデリングしようとする、ポリゴン自体は平面であるためその集合体によって曲面をモデリングするのは多大な労力が必要になる。またスプラインを使ったモデリングでは、制御点を使ってスプラインを制御しモデリングをしていくので曲面の表現は比較的簡単にできるが、複雑な形になるとユーザーが想定した形状まで加工することが困難である。有機的な形状はその形状の特徴上、複雑で微妙な曲線や曲面を用いる場合が多く、モデリングをする上でユーザーに加工のテクニックや、人体や物理などの知識が高いレベルで要求されることが多い[1][2]。

モデリングの作業において、ユーザーは得ようとする形状を想定し、ソフトウェアが持つモデリング機能の範囲内で、現在の形状を想定する形状に加工しようとする。これを実現するための手法として、ポリゴンを細かく分割することで曲面を表現できる subdivision surface 法[3]や、ユーザーが任意に選択した立方体や面状の格子に含まれる形状の大域的な変形が可能な FFD 法[4]を使った手法がある。これらの機能は有機的な形状の作製の助けにはなるが、ユーザーが想定している形状まで加工するには多くの段階や機能、操作が必要になってくる。

また、Subdivision surface 法や FFD 法以外にも曲面形状を制御、作製する方法が研究されてきた、

- ・仮想粘土を使ったモデリングをする方法[5]
- ・メタボールを使ったモデリング方法[6]
- ・手書きスケッチを利用したモデリング方法[7]
- ・Subdivision surface 法を拡張したモデリング方法[8]

- ・力覚デバイスを使ったモデリング方法[9]
- ・植物の自己相似性を使ったモデリング方法[10]

などが研究されている。しかし、これらの方法はそれぞれ特殊で高価な機器が必要、表現できる形状を作製する時の方法が使いにくい、表現できる形状が限られていたりするなど、ユーザーの使い勝手が悪いことが多い。

本論文では、フィーチャー・ベースド・モデリング[11]の概念を利用して有機的な 3 次元形状モデルをモデリングする方法を提案する。

有機的な形状を作製するのに適したフィーチャーをサポートし、それらフィーチャーを形状に適用して、操作することでモデリングをする機能を持った有機的な 3 次元形状モデルに適したモデリング方法の研究をする。

1.2 論文構成

本論文での構成は以下のようになる。

第 2 章に有機的な 3 次元形状モデルの特徴と、形状をモデリングする時の問題点を述べ、それらを踏まえた新たなモデリング方法の提案をする。

第 3 章では、提案する新たなモデリング方法の概要と実装を述べる、フィーチャー・ベースド・モデリングを有機的な形状の作製に適したものにするために、形状を作製する場合のフィーチャーの適用範囲を決める表面選択手法、有機的な形状を作製するのに有効なフィーチャーとしてメタボールを使ったメタボール・フィーチャーを提案し、その実装方法を述べ、実行例と考察を述べる。

第 4 章で、結論を述べる。

第2章 有機的な3次元形状モデルとモデリング方法

空想、実在などを問わずに図 2.1、図 2.2、図 2.3 のような人間やその他動物、草や木、花などの植物などの様々な生物が 3DCG で使われることが非常に多くなってきた。これらの3次元形状モデルは平面や単純な曲面で表現することが難しいので、滑らかに接続された多数の曲面によって形状を表現することが多い。これらの3次元形状モデルを「有機的な3次元形状モデル」と呼ぶ。

本章では有機的な3次元形状モデルの特徴、形状をモデリングする際の問題点を述べ、新たなモデリング方法の提案を行う。



図 2.1 人間の頭部



図 2.2 動物(フェレット)



図 2.3 植物(木)

2.1 有機的な3次元形状モデルの特徴

有機的な3次元形状モデルを構成している多数の曲面は互いが滑らかに接続している場合が多い。例えば動物であれば腕、手、顔、胴体、足などの各部位は滑らかに接続し、植物は無数の枝、茎、花びら、葉が接続している。図 2.4 は架空の生物であるエイリアンの顔であるが、人間やその他動物などでも顔の表面は目や鼻、口などを複雑な曲面が無数に、かつ滑らかにつながっている。また同一の人間でも、その表情は顔の筋肉によって変わり、図 2.5 の人間の胴体の部分のモデルのように、骨格や体型、大人と子供、女性と男性の筋肉などによる形状の違い、加齢などで皮膚にシワができる。左右の腕、足などで一見同じような形状の部位でも、それぞれの形状の表面は微妙な凹凸などの曲面の集合でその形状を表現しているためまったく同じというわけではない。



図2.4 エイリアンの頭



図 2.5 微妙な曲面で構成された人体モデルの一部分

2.2 モデリングをする際の問題点

図 2.6 のような簡単な形状の生物などであれば、高度な知識やテクニックを持たないユーザーであっても、従来のモデリング方法を使って作製できる。この場合は、大まかに制御格子で作って図 2.7 のように subdivision surface 法で滑らかな曲面へ加工するなどの方法を使う。しかし、リアルな生物などを作製するには筋肉や物理的なことを踏まえてポリゴンなどを加工し複雑な曲面を作製する必要がある。ユーザーが得ようと想定している曲面の形状を作製するには、様々な機能を駆使し、多くの操作と高度なテクニック、知識が要求される。曲面を作る際に使われる subdivision 機能や、格子を使った変形ができる FFD 機能では、制御する場所が制御格子の形状に対して行うので、形状に対して直接的な操作ができない。また、大きなポリゴンで作製して小さなポリゴンへ分割する作業を繰り返す階層的なモデリングになりやすい。これではユーザーが想定した形状に加工するまでに何段階もの手順が必要になり負担となる。さらに、モデリング時の形状の加工部位を選択し加工する操作方法が直感的であるとはいえないので、それがユーザーの負担になる。

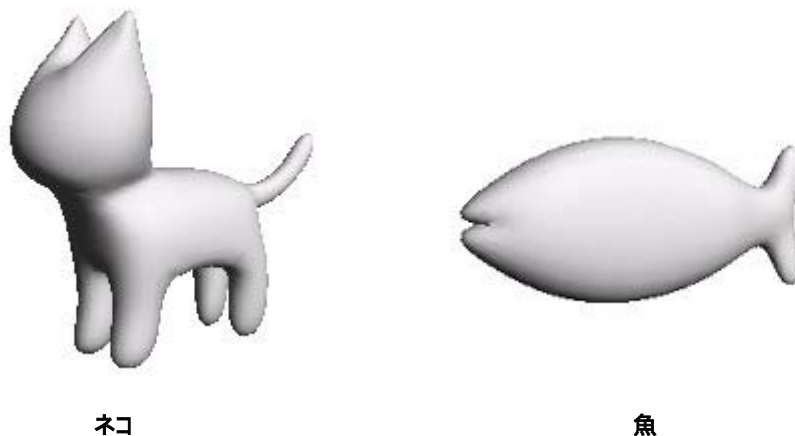


図 2.6 簡単な形状の生物モデルの例

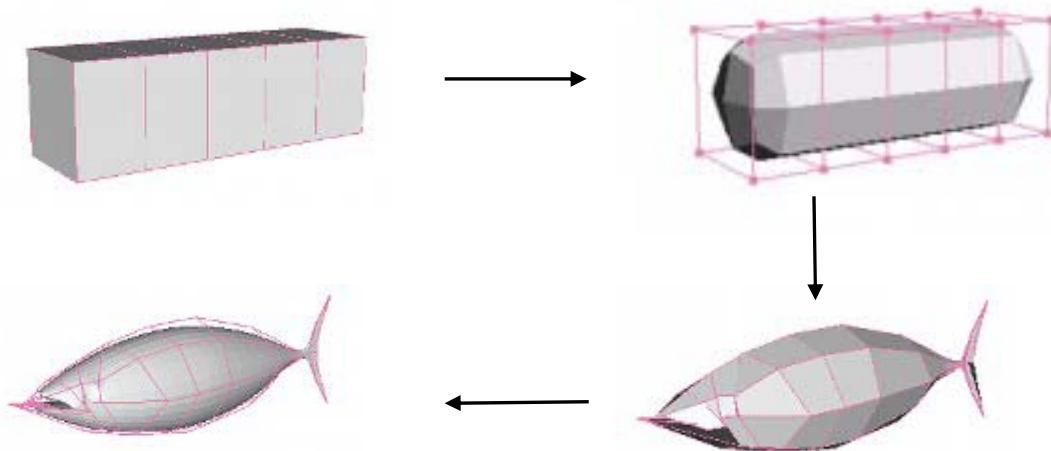


図 2.7 subdivision を使ったモデリングの流れ

2.3 提案する有機的な形状に適したモデリング方法

これまで述べた事を踏まえると有機的な 3 次元形状モデルを作製する場合、モデリングをする際の課題点は次の 2 つであると考えられる。

- ・ ユーザーが想定した有機的な形状に加工するには多くの機能や段階を踏まなければならない、モデリングする際に負担がかかる。
- ・ 既存研究では表現できる形状が限られ、粘土などの性質を利用したモデリング方法が特殊でユーザーが利用しにくい。

本論文ではフィーチャー・ベースド・モデリングの概念を用い、有機的な形状に適したフィーチャーをモデリング方法に取り入れることで、いくつもの機能や段階をへて加工していた有機的な形状を、ユーザーが形状オブジェクトにフィーチャーを加える操作をするだけで有機的な形状が作製されることで、この問題点を解決する。

フィーチャー・ベースド・モデリングの“フィーチャー”とはモデリング操作の意図を反映した部分形状のことであり、フィーチャー・ベースド・モデリングはこのフィーチャーを利用したモデリング方法である。フィーチャーはオブジェクトを構成する面(曲面、断面)または辺に対して直接適用する。例えば形状オブジ

ェクトに穴を意味するフィーチャーをオブジェクトの面に適用すると、図 2.8 のような流れで形状オブジェクトに対して穴を開けるという変形が加えられる。

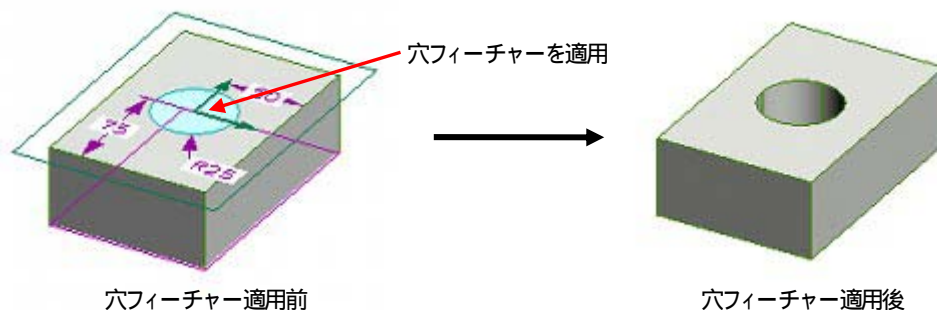


図 2.8 フィーチャー・ベースド・モデリングの例

しかし、既存のフィーチャー・ベースド・モデリングの概念を用いる場合、フィーチャーは有機的な形状のような曲面を多く持つ形状を作製するには向いていない。また、有機的な形状はフィーチャーを適用する範囲を特定することが困難である。例えば人間の顔などは 1 枚の皮膚(面)で滑らかにつながっているため、鼻の部分、目の部分といったことが曖昧な感覚によるものになる。この 2 点がフィーチャー・ベースド・モデリングの概念を有機的な形状の作製に利用する際の問題点となる。

本論文では有機的な形状の作製に適した変形をするものをフィーチャーとし、有機的な形状に適したフィーチャーとそのフィーチャーを有機的な形状に適用するための方法を開発することでフィーチャー・ベースド・モデリングの概念を利用した有機的な形状に適したモデリング方法を提案する。

第3章 有機的な形状に適したフィーチャーによるモデリング方法

本章では、既存のフィーチャー・ベースド・モデリングの概念を利用する際の問題点を解決するための方法を述べる。まずフィーチャーを適用する方法の表面選択手法と、有機的な形状に適したフィーチャーとして形状オブジェクトの選択領域内にメタボール加工ができるメタボール・フィーチャーを提案し、その特徴と実装方法を述べる。

3.1 フィーチャーを適用する方法

本節では、ユーザーが形状に対して任意の部分にフィーチャーを適用できる選択方法としての図 3.1 のような表面選択手法を述べる。

まず、本論文で使用する表面選択手法について述べ、次に実装方法を述べる。

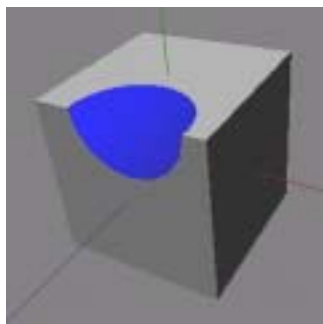


図 3.1 立方体の角を円状(青い部分)に選択

3.1.1 表面選択手法

表面選択手法において表面とは選択対象である形状オブジェクトの表面を指す。また表面選択というのは形状オブジェクトの表面上に表示された選択範囲の事である。表面選択での選択領域は形状の表面上をユーザーの操作によって移動し、加工を施したい箇所まで移動させる。選択領域は形状オブジェクトの表面上に円や四角形で表示される。これにより形状オブジェクトの凹凸にかかわらず円ならば円状

に四角形なら四角状に選択することができ、そこにフィーチャーを適用することができる。

3次元形状の表面選択を形状加工時の選択方法とすることで、ユーザーが直接、形状オブジェクトの表面を任意に選択する範囲を決められる。そのためユーザーが想定している形状モデルの操作の意図が形状の加工に伝わりやすい。

3.1.2 表面選択手法の実装

表面選択手法の実装として以下の2ステップを踏まえて実装をした。

Step 1 仮想オブジェクトを使用した形状表面上の選択領域の表示。

Step 2 選択領域を表面上で移動。

まず、形状の表面上に選択領域を表示させる方法を述べ、次に選択領域を形状オブジェクトの表面で移動させる方法を述べる。

3.1.3 形状の表面上に選択領域を表示

選択領域を表示させる際にまず、選択対象となる形状オブジェクトとは別に、仮想オブジェクトを用意する。次に、図 3.2 のように仮想オブジェクトの中心を形状オブジェクト表面上に配置し、仮想オブジェクトと形状オブジェクトが重なっている領域を選択領域とする。

オブジェクトを描画する際に OpenGL の機能を使って、形状オブジェクトと仮想オブジェクトが重なっている部分の表面を選択領域として表示させ、仮想オブジェクトそのものは表示しない。図 3.3 は左側が円状の選択領域、右側が四角状の選択領域の表示の様子である。仮想オブジェクトを球、立方体、三角柱などを使うことで様々な選択領域(円、四角形、三角形など)を表示することができる。

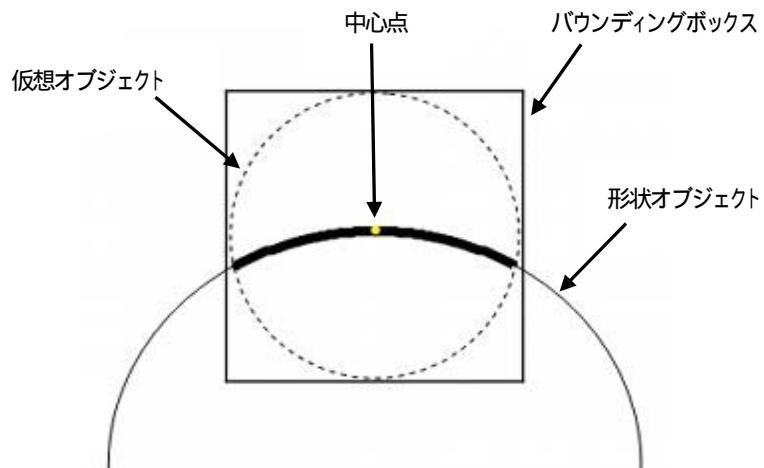
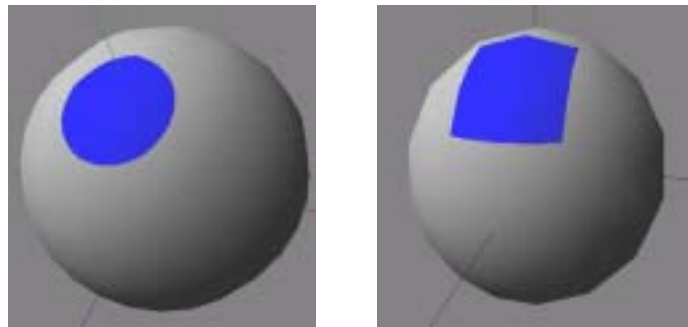


図 3.2 選択領域の表示 断面



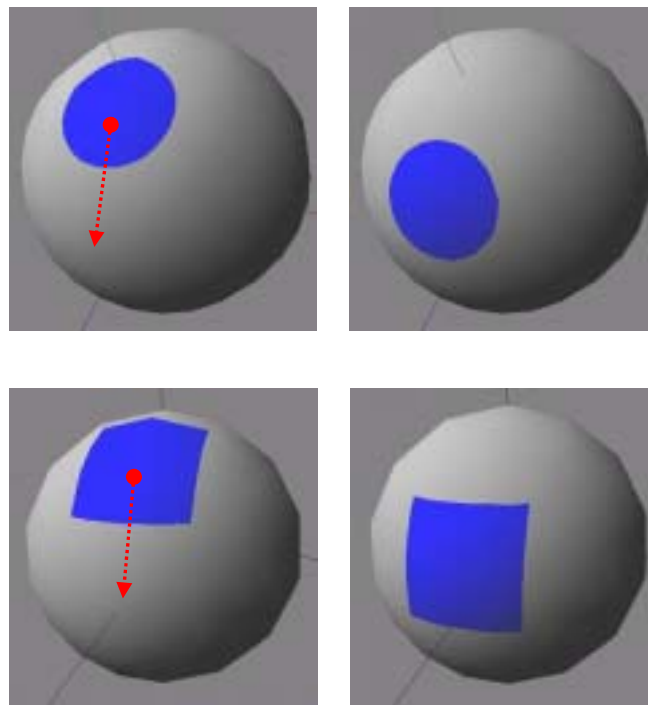
円状の選択領域

四角状の選択領域

図 3.3 仮想オブジェクトによる選択領域の表示

3.1.4 表面上の選択領域の移動

図 3.4 はユーザーの操作によって形状オブジェクトの表面上を選択領域が移動する様子である。ユーザーが指定する画面上の位置に仮想オブジェクトを移動させることで、選択領域も形状オブジェクトの表面を移動する。これによりユーザーが形状オブジェクト表面上の選択領域を操作すると選択領域も表面上を移動する。



左 移動前

右 移動後

図 3.4 選択領域が形状オブジェクトの表面を移動する様子

3.2 有機的な形状に適したフィーチャーの提案

本節では有機的な形状に適したフィーチャーとして、メタボールを使ったメタボール・フィーチャーを提案する。まずメタボール・フィーチャーによる加工の特徴と主要なアルゴリズムであるメタボールと Marching Cubes 法(以下 MC 法)の簡単な説明を行い、次に実装方法を述べる。

3.2.1 メタボール・フィーチャーの特徴

メタボール・フィーチャーはメタボールの特性と MC 法によってインタラクティブに物体同士がなめらかに接続することを利用したフィーチャーである。形状の表面上にメタボール・フィーチャーを 1 つないし複数適用し、かつパラメータとしてメタボールの核や濃度値を調整することでインタラクティブに曲面形状が作製される。

3.2.2 メタボール

メタボールは中心座標、しきい値、有効半径の各種のパラメータから成り、図 3.5 のように3次元空間内の各点を中心としてその周囲に放射状に広がる濃度分布関数によって定義される。3次元空間上にいくつかのメタボールを定義するとお互いに引き合うような形状になり、その距離によって滑らかな曲面を作ることができる。

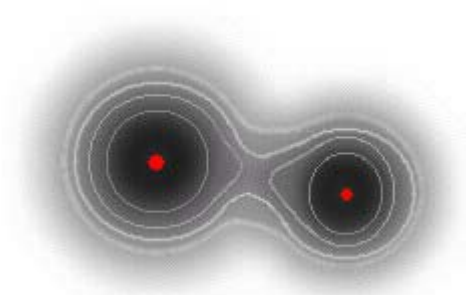


図3.5 2つのメタボールの濃度分布

3.2.3 Marching cubes 法

メタボール・フィーチャーではメタボールによって定義された濃度分布関数を可視化する方法として MC 法 [10]を利用する。MC 法はボリュームデータの表面領域をあらかじめ決められた基本パターンとのパターンマッチングを行い可視化する方法として有名である。3次元空間を格子状に分割し、格子点の値がメタボールの表面となる任意の値(しきい値)を超えるか、否かによって各格子点が表面の内側か外側にあるかどうかを調べる。隣接する格子点が異なる領域(内側と外側)にあるのなら、そこには表面が存在するので図 3.6 のようにあらかじめ求めておいた15通りの三角ポリゴンのパターンと照らし合わせ検索する。また各格子点をつなぐ辺と表面との交点座標を求め、隣接する格子点との濃度値を線形補完して正規化をすることにより、なめらかな表面が得られる。最後に三角ポリゴンの頂点位置を出力し描画する。これを描画毎に繰り返し行って表示する。図 3.7 は MC 法により生成されたメタボールである。

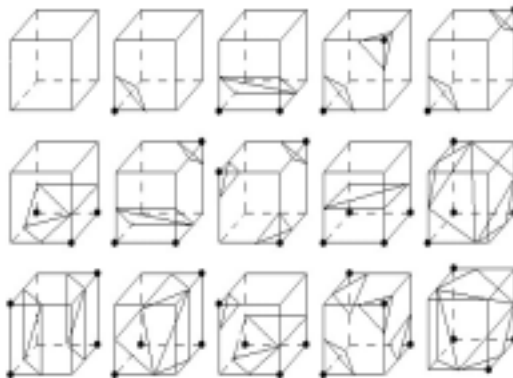


図 3.6 MC 法の基本パターン

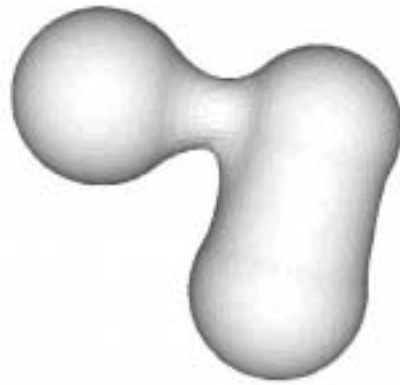


図 3.7 MC 法によるメタボールの生成例

3.2.4 メタボール・フィーチャーの実装の流れ

メタボール・フィーチャーは形状オブジェクトの選択領域に適用後、以下の流れに沿って生成される。

- Step 1 3次元空間の仮想オブジェクトのバウンディングボックスを得る。
- Step 2 バウンディングボックスを、メタボールを生成する格子範囲とする。
- Step 3 形状オブジェクト表面と格子点との内外判定し、格子点に形状オブジェクトの内側にある場合のみ内側属性を付加する。
- Step 4 設定された濃度値を格子点に入れる。
- Step 5 各格子点の濃度値とメタボールの表面となるしきい値から、生成表面との内外判定を行い内側か外側かの属性を設定する。その際、すでに内外属性が設定されている場合は変更しない。
- Step 6 各格子点に対して Step3~5 を繰り返す。
- Step 7 step3,step5 での各格子の内外属性から MC 法を用いてポリゴンを生成。
- Step 8 step2~7 を繰り返し、形状を見ながら格子点の間隔、濃度値、中心位置、表面となるしきい値などのパラメータを調整する。

3.2.5 格子範囲の設定

メタボール・フィーチャーの生成の流れではStep1~2にあたる。ポリゴンを生成する際に、MC法では生成される表面ポリゴンの精度と生成にかかる計算量が、メタボールを計算する格子範囲と、その中の格子点の数によって大きく増減する。よって計算する格子範囲を最適にするため、形状オブジェクトに適用した選択領域の仮想オブジェクトのバウンディングボックス(最小包括箱)を、メタボールを計算する格子範囲とする。また複数のメタボール・フィーチャーを適用した場合は、適用したフィーチャー全てが収まるバウンディングボックスが格子範囲となる。図 3.8、図 3.9 は適用したフィーチャーが 1 つまたは複数ある場合のメタボールを計算する格子範囲を表した図である。

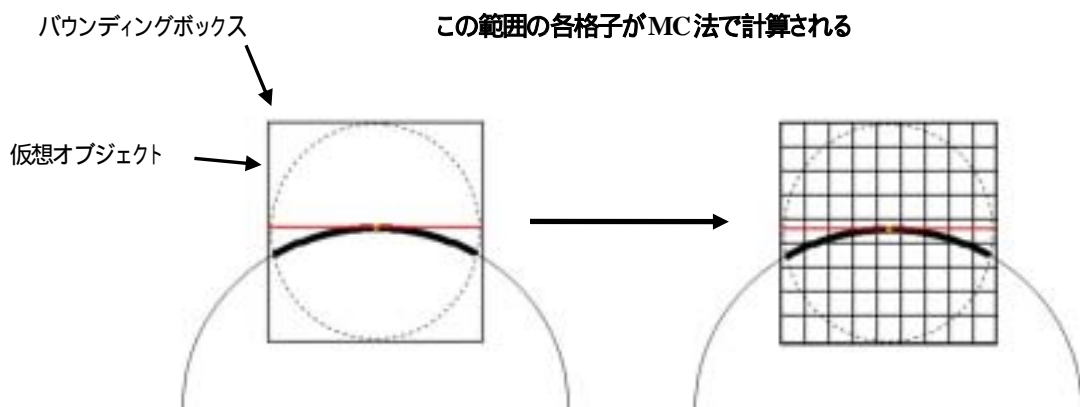


図 3.8 仮想オブジェクトを包括する格子範囲の設定

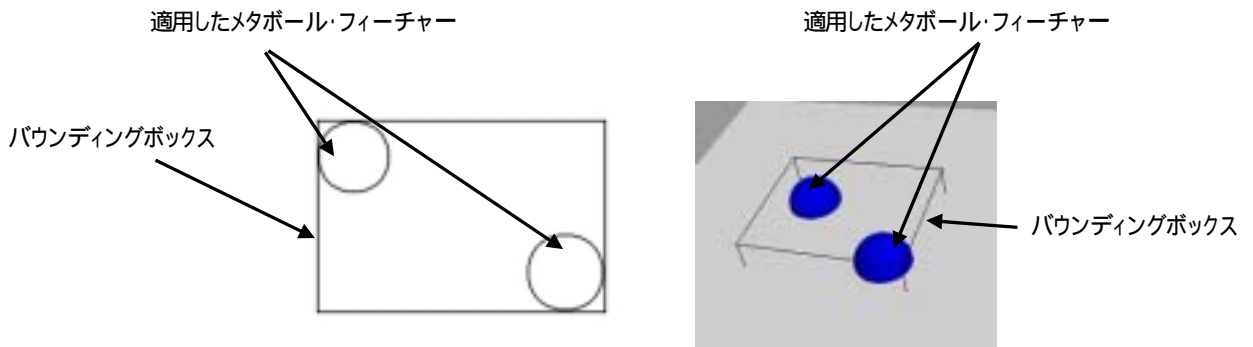


図 3.9 2つのメタボール・フィーチャーを適用した場合のバウンディングボックス

3.2.6 形状オブジェクトと格子頂点との内外判定

形状オブジェクト表面と各格子点との内外判定について述べる。メタボール・フィーチャーの生成の流れでは Step3 にあたる。このステップでは、メタボール・フィーチャーで生成される表面ポリゴンの不要な部分(形状オブジェクトの内側など)の生成を抑える処理を行う。そのために MC 法でポリゴンを生成する際に、形状オブジェクトの表面との各格子点との距離を求め、形状オブジェクトの内側か外側かを判定し、内側の場合のみ内側の属性を設定する。図3.10は形状オブジェクトとの内外判定を行って内側の属性を格子点に設定した様子である。その後、各格子点に濃度値を入れしきい値と比較してメタボールの表面との内外判定をするが、すでに形状オブジェクトとの内外判定で内側の属性が設定されている場合はその属性を変更しない。属性が設定されていない格子点にメタボールの表面の内側の属性、外側の属性を設定する。その後、属性の設定が済むと後は MC 法を使い、ポリゴンを生成していく。

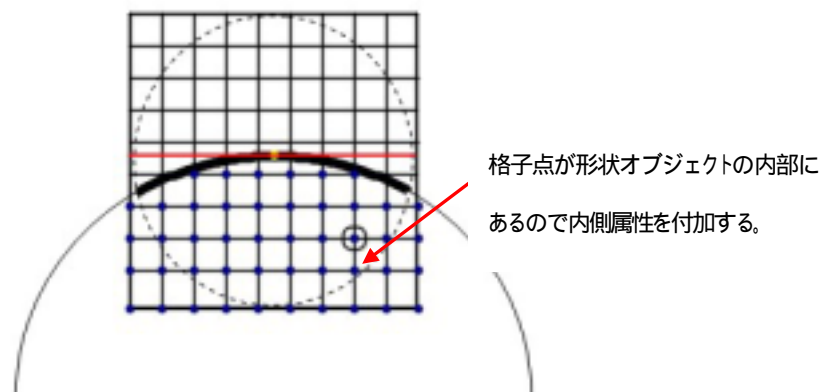


図 3.10 形状オブジェクト内の格子点

3.2.7 メタボール・フィーチャーの変形

適用したメタボール・フィーチャーの中心位置や濃度分布を変更することでメタボール・フィーチャーの形状を変形させる。初期状態では、メタボール・フィーチャーでのメタボールの中心位置は選択領域の中央に設定され、任意の格子点 $P(P_x, P_y, P_z)$ の濃度値は濃度分布関数 w により求められる。濃度分布関数 $w(P, \alpha, \beta, \gamma)$ はメタボールの中心座標 (c_x, c_y, c_z) 、定数 d 、 α 、 β 、 γ により定義される。

$$w(P, \alpha, \beta, \gamma) = \frac{d}{\alpha(P_x - c_x)^2 + \beta(P_y - c_y)^2 + \gamma(P_z - c_z)^2}$$

濃度分布の有効範囲は図3.11のように仮想オブジェクトの大きさの2倍としている。メタボール・フィーチャーの適用後の変形はメタボールのパラメータのしきい値による変化、または濃度分布の変化によってメタボールで生成される形状を変形する。図3.12は濃度分布の変化によるメタボール形状変形の例である。また複数のメタボール・フィーチャーを適用した場合はフィーチャー単位でのパラメータの調節が可能である。

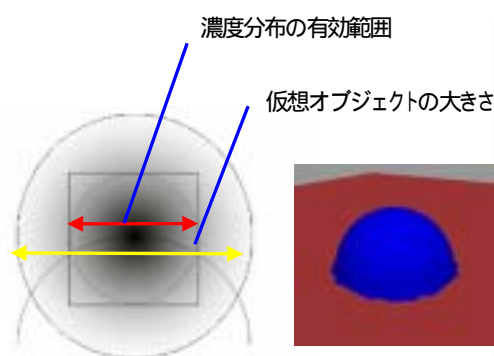


図 3.11 初期濃度分布と実行例

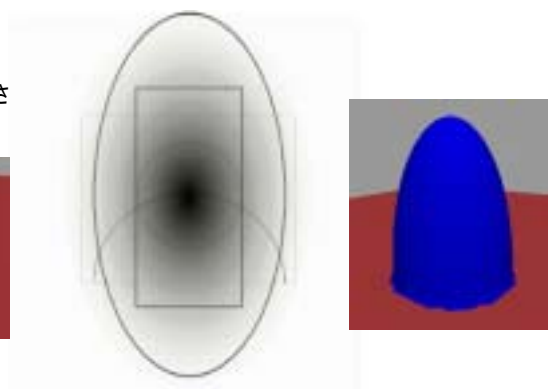


図 3.12 濃度分布と格子空間の変化と実行例

3.3 実行例

作製したシステム上で、形状オブジェクトとして基本プリミティブの球に、マウスを使って円状の表面選択で選択領域を指定し、メタボール・フィーチャーを適用した画像が図 3.13 になり、初期濃度の違いにより作製されるメタボール形状が違ふ。図3.14はメタボール・フィーチャー適用後、濃度分布の変化により形状が変形される様子である。このような形状の変形はユーザーの操作によってインタラクティブに行われる。複数のメタボール・フィーチャーを適用した場合に生成される形状が図 3.15 であり、メタボール・フィーチャー同士が互いに影響を受け滑らかな接合をした形状が生成される。またフィーチャー単位での操作もある程度可能(濃度値の変化)である。

メタボール・フィーチャーは選択した領域内のみメタボールが適用されるため、メタボールのような丸みを帯びた形状ができてしまうモデリングとは違い、平面状の形状オブジェクトにもメタボール加工などができる。またユーザーが球に直接表示される選択領域を操作しているので、ユーザーが想定している位置にフィーチャーを適用することが容易である。

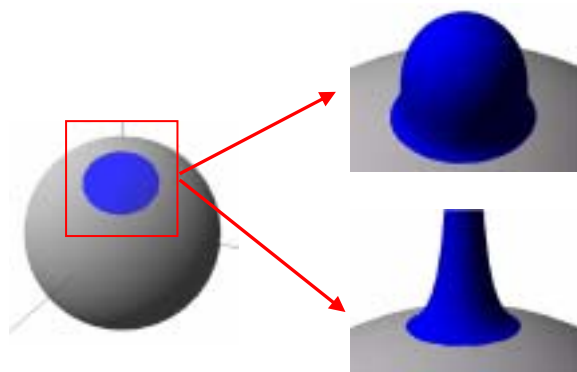


図 3.13 メタボール・フィーチャー適用例1
(初期濃度分布の違いによる例、球と円柱)

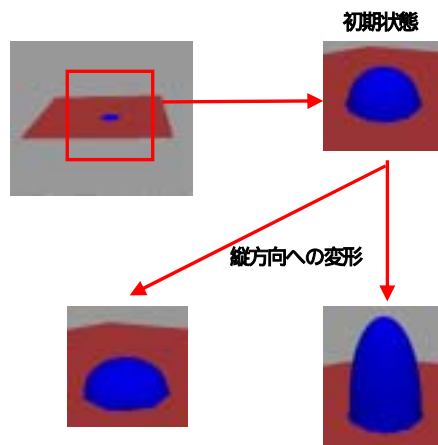


図 3.14 メタボール・フィーチャー適用例2
(パラメータ変更(濃度)による変形)

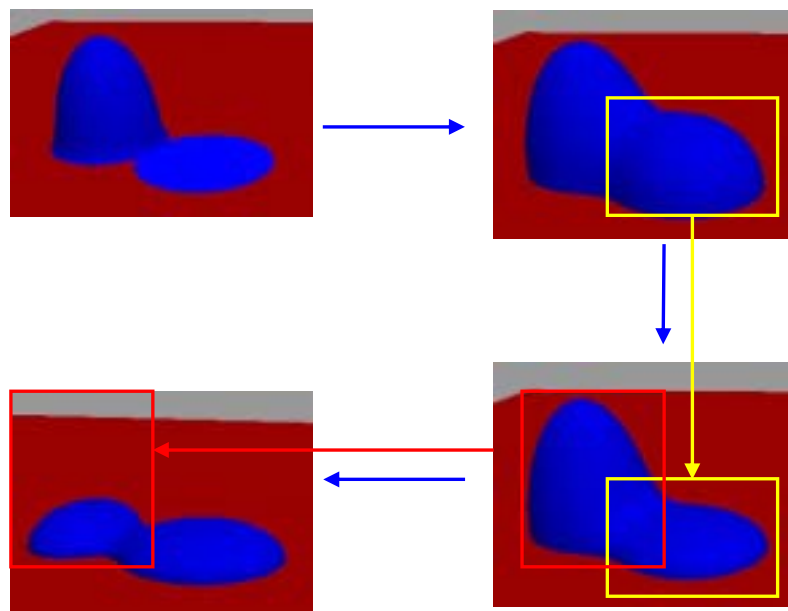


図 3.15 メタボール・フィーチャー適用例3
(2つのメタボール・フィーチャーの適用と各フィーチャーの変形例)

3.4 考察

実行例により、メタボール・フィーチャー自体は部分的にメタボールを使うため、メタボールのみを使ったモデリングより自由度が高く、一般的なサーフェイスモデルやソリッドモデルと組み合わせてモデリングが可能であることを示した。

問題点としてメタボール・フィーチャーを生成するまでの計算量が比較的多いこと、また位相的な問題でポリゴンが欠ける場合があるなどの点がある。今回はメタボールの計算の過程で MC 法の最も基本的なアルゴリズムを採用したが、MC 法の改良等では数多くの研究がなされているのでそれらを適用すれば計算の高速化と位相的な問題の解決は可能と思われる。

第4章 結論

本論文では、有機的な形状に適したフィーチャーをモデリング方法に取り入れることで、いくつかの機能や段階をへて加工していた有機的な形状を、ユーザーが形状オブジェクトにフィーチャーを加える操作をするだけで有機的な形状が作製されるモデリング方法を提案した。

現時点でのフィーチャーのパラメータ操作はキーボードからしかできないが、GUI を使ったパラメータの操作等を行うようにすればマウスのみを使ってフィーチャーの形状をインタラクティブに変形することができる。

今回作製した有機的な形状に適したフィーチャーはメタボール・フィーチャーのみであったが、その他の有機的な形状に適したフィーチャーは無数に考えられる。またフィーチャー単位での加工履歴機能などを搭載し、これらを使えば容易にユーザーが行ったフィーチャー単位での変形、削除なども可能になり、複雑な曲面形状をした生物や人体などもユーザーの負担が少なく作製できる可能性を示した。

謝辞

日頃より、ご指導、助言等を頂いた担当教官である渡辺 大地講師と副査を勤めてくださった和田 篤氏に多大な感謝をするとともに、研究室で色々とサポートをしてもらった 3D アプリケーション構築プロジェクトのメンバーに感謝いたします。また本論文の執筆にあたり、引用したオブジェクトは The 3D Studio(<http://www.the3dstudio.com>)のフリーオブジェクトからと伴氏により作製されたオブジェクトを使用し、これに感謝いたします。

参考文献

- [1] 暁(Satoshi) : "筋肉の動きを考慮した身体モデリング", Graphics World,
株式会社アイ・ディ・ジー・ジャパン, pp.98-99, 2002 年 12 月号
- [2] 今村卓也 : "細かなディテールにこだわる昆虫のモデリングテクニック", CGWorld,
株式会社ワークスコーポレーション, pp.96-99, 2003 年 2 月号
- [3] Tony DeRose, Michael Kass, Tien Truong : "Subdivision Surface in Character Animation"
SIGGRAPH'98, 1998
- [4] Ron MacCracken, Kenneth I. Joy : "Free-Form Deformations With Lattices of Arbitrary Topology"
SIGGRAPH'96, 1996
- [5] 荒田 秀樹 高井 昌彰 高井 那美 山本 強 : "仮想粘土による3次元自由形状モデリング",
情報処理学会 研究報告「グラフィックスとCAD」 No92-4, pp.19-24, 1998
- [6] Tomoyuki Nishita, Eihachiro Nakamae : "A Method Displaying Metaballs by using Bezier Clipping",
EUROGRAPHICS'94, 1994
- [7] 五十嵐 俊夫 松岡 聡 田中 英彦 : "手書きスケッチによるモデリングシステム Teddy",
情報処理学会プログラミングシンポジウム, pp.31-38, 2000.1
- [8] 澤田 泰治 : "サブディビジョンサーフェイスを利用したインタラクティブなモデリング方法",
Cyber World Modeling 2000, 千代倉研究室, 慶応義塾大学
- [9] 前野 輝 岡田 稔 鳥脇 純一郎 : "直感的な自由曲面モデリングに関する一考察",
情報処理学会 研究報告「グラフィックスとCAD」, No104-14, pp.55-58, 2001
- [10] 永江 孝則 田中 孝介 米田 知則 長橋 宏 : "ボリュウムデータの領域分割と曲面当てはめ
による植物形状のモデリング", 第15回 NICOGRAPH 論文コンテスト, 1999.12
- [11] 小西 信博 : Autodesk Mechanical Desktop プロフェッショナル技法, ソフトバンク, 1999
- [12] W. E. Lorensen, H. E. Cline : "Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction
Algorithm", Computer Graphics, vol. 21, pp. 163-169 (1987.7)