

## スケッチベース ボリュームモデリング

大和田 茂<sup>(i)</sup>、フランク・ニールセン<sup>(ii)</sup>、中沢 一雄<sup>(iii)</sup>、五十嵐 健夫<sup>(i)</sup>

本論文では、内部構造を持つ物体をモデリングするためのスケッチベース手法を提案する。この手法では物体生成時に複数の輪郭線を定義したり、一時的な切断を行い、その断面にストロークを描きこむなど、穴や空洞を持つ物体を定義するいくつかの操作が実装されている。また、ボリュームデータ構造を採用することにより、自己交差を起こすことなく物体のトポロジーを変化させることが容易に実現できる。また、エディット操作において必要な回転動作を自動化することによって、ユーザーの操作が簡略化された。我々のシステムは、初心者にとっても非常に使いやすいものである。

### Sketch-based Volume Modeling

Shigeru Owada<sup>(i)</sup>, Frank Nielsen<sup>(ii)</sup>, Kazuo Nakazawa<sup>(iii)</sup>, and Takeo Igarashi<sup>(i)</sup>

This paper presents a sketch-based modeling system for creating objects that have internal structures. Its volumetric representation solves any self-intersection problems and enables the creation of models with a wide variety of topological structures, such as a torus or a hollow sphere. To specify internal structures, our system provides various gestures. Our system also allows automatic rotation of the model so that the user does not need to perform frequent manual rotations. Our system is much simpler to implement than a surface-oriented system because no complicated mesh editing code is required. We observed that novice users could quickly create a variety of objects using our system.

#### 1. Introduction

形状モデリングの研究の歴史は非常に長い。その中で、近年ではスケッチベースモデラーと呼ばれる、ユーザーの手描きの線を入力として直感的に物体を作るモデラーが注目を集めている[15,6]。これらは非常に短時間で三次元モデルを製作することができるが、これまでのシステムは主に物体の外見をモデリングするためのものであり、人間臓器のような穴のあいた構造を持った物体を作るにはあまり適していない。とりわけ、

Teddy[6]に関して言えば、球と同相な物体しか製作できないという欠点がある。そこで我々は、これまでの Teddy の直感的なユーザーインターフェースを継承しつつ、トポロジーの変更を許す手法を提案する。このためのユーザーインターフェースとして、物体の生成時に複数の輪郭線を指定したり、物体を一時的に切断した断面に構造を描きこむ、あるいは、複数の輪郭線をスweepさせることなどによって、物体のトポロジーを変更する手法を考案した。また、データ構造としてポリ

---

i) 東京大学大学院 情報理工学系研究科 コンピュータ科学専攻 (Dept. of Computer Science, The University of Tokyo)  
ii) ソニー コンピューターサイエンス研究所 (Sony Computer Science Laboratories, Inc.)  
iii) 国立循環器病センター (National Cardiovascular Center)

ュームデータを採用することによって、トポロジーの変化を効率的に扱うことが可能となった。ポリュームデータはポリゴン化され、NPR(Non Photorealistic Rendering)を使って表示される。このレンダリングには、モデルの不要な詳細に注意を払いすぎないようにする効果がある。また、必要な回転動作を自動化することによって、ユーザーをアクティブに支援する機能も持っている。

二次元のジェスチャー入力から三次元形状を推測するには、作り出す物体に関するある種の前提知識が必要である。我々のシステムでは、丸っこいスムーズな物体を仮定している。そのため、角ばった物体、例えばビルなどの建築物をモデリングするのには適していない。

## 2.これまでの手法

ポリュームデータ構造を直接用いてモデリングを行うシステムには、サーフェスペースの手法ほどの長い歴史はない[14,4]。最近では、スクリプト言語[2]や八分木[11]、再帰分割ポリューム[10]、レベルセットベースの手法[1]などがある。三次元入力デバイスを用いたシステムも数多い[3,4,5,10]。

通常のマウス入力を用いたスケッチベースモデリングはここ 10 年ほどで大きな発展を遂げてきた。精密で大規模な物体を作ることはできないが、ラフな物体を短時間で作ることに非常に適している。最も初期のシステムの一つは Viking である[12]。このシステムは CAD モデルのプロトタイプング目的で開発された。その後の有名なシステムとしては SKETCH[15]や Teddy[6]がある。SKETCH は直方体や円錐などからなるシーンを作ることを目的としているが、Teddy は、丸っこい物体を作ることを目的としている。すでに Teddy の拡張を行う研究もなされているが[7]、トポロジーのエディットについての拡張は未解

決の問題である。

我々のシステムのユーザーインターフェースは Teddy に基づいているが、トポロジー的な自由度が大幅に向上している。

## 3.ユーザーインターフェース

ユーザーの操作は単一のウィンドウに対する手描きストローク入力と、メニューバーにあるボタンの押下によってなされる。ストロークが幾何的な情報を与え、ボタンの押下が機能の指定を行うという構造になっている。ストローク描画はマウスの左ボタンのドラッグによって行われ、物体の回転は右ドラッグによって行われる。現在の実装では、メニューバーには 4 つのボタンがある (Fig.1)。左から、シーンの初期化、物体生成、突起などの構造追加、そして、操作のキャンセルである。



Fig.1 本手法で用いるボタン

### 3.1 物体生成

物体の生成は、一つ以上の輪郭を描き、物体生成ボタンを押すことによってなされる。これにより輪郭線間の領域が三次元化され、穴のある物体も作ることができる[Fig.2]。



Fig.2 物体生成時に複数の輪郭線を指定することが許される。

### 3.2 突起形状および陥没形状

物体を生成したら、そこに突起や穴を追加するこ

とができる。ユーザーはまず物体上に閉曲線を描き、構造追加ボタンを押す。物体の回転によって視点が変わるので、追加形状の外形を表す二度目のストロークを描く。この時、ストロークの両端が、最初に描いた輪郭の(回転後の)端点とできるだけ近い場所に位置するように気をつける(さもないと、このストロークはスweepと解釈される。3.4章参照)。この二度目のストロークを物体の外側方向に描けば突起となるし、内側方向に描けば穴となる(Fig.3 (d-g))。ポリウム構造を採用したことにより、複雑なポリゴンモデルのCSGを実装しなくても自己交差の心配はない。なお、(g)に見られるように、物体内部の隠された輪郭線は点線で描かれる。

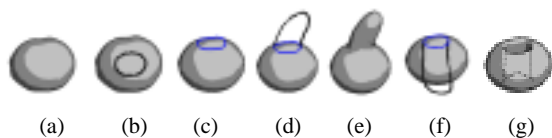


Fig.3 物体に突起・陥没形状を付け加える例

### 3.3 一時的な切断

このシステムではさらに、中空の物体を作ることができる。このために、まずユーザーは物体を一時的に切断し (Fig.4 (a-c))、その断面に輪郭を描きこむ(Fig.4 (d))。そして、構造追加ボタンを押して物体を回転させたのち、最初に描いた輪郭線を囲むように最後の外形を描くと物体の内部に穴をあけることができる(Fig.4 (e))。ここで最初に物体を切断するオペレーションは、物体の一部を不可視状態にするだけである。この区別は、ストロークの最後を直角に曲げることにより行う。この曲げが存在すれば一時的切断であり、そうでなければ通常の切断である。一時的切断の場合には、曲げる方向が不可視状態にされる部分を決定する。不可視領域は、点線によりレンダリングされる。

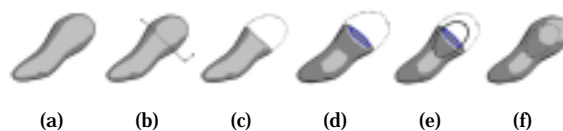


Fig.4 内部に穴のある物体の作り方。

この一時的切断は、物体内部に操作を施すためのものである。物体がもともと内部構造を持つ場合には、その内側の表面に操作を施すこともできる。例えば、Fig.5のように、物体内部にさらに突起を加えることも可能である。次の節で説明するスweep操作も、この内部の表面に行うことができる。

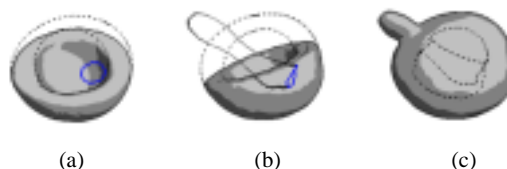


Fig.5 一時的切断を用いた、内部表面からの突起生成。

### 3.4 スweep

物体表面にストロークを描き、構造追加ボタンを押して回転が起こったのち、最初の輪郭線をスweepすることもできる。これは、二度目のストロークとして、最初の輪郭線を一度だけ通り抜ける開曲線を描くことにより行う。この場合には、最初の輪郭線を複数描くことができる。これにより、管状の物体を作ることができる(Fig.6)。

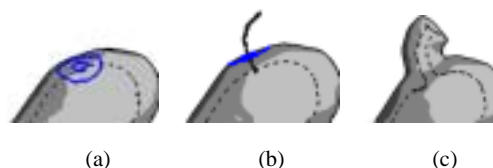


Fig.6 二重の輪郭線をスweepする例。

### 3.5 自動回転による操作の支援

構造の追加においてはストローク描画は二段階に分かれており、その間に物体をおよそ90度回転し、二度目のストロークは最初とは違う方向から行う必要がある。この回転操作は決まりきった

ものであるため、構造追加ボタンを押すと自動的に行われるようになっている(Fig.7 (a-c))。この自動回転機能は、物体の切断でも行われる。この場合には、切断面がスクリーンと平行になるように行われる(Fig.7 (d-f))。

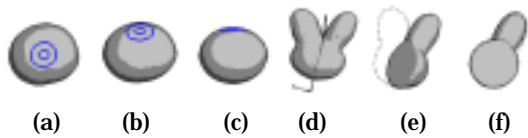


Fig.7 自動回転によるユーザー支援の例。

#### 4.実装

我々は、普通の二値ボリュームをデータ構造として用いた。本論文中で用いられている例では、このボリュームデータのサイズ(ボクセル数)はおよそ  $100^3$  程度である。このボリュームデータは、マーチングキューブ法を用いてポリゴン化される[9]。このポリゴンモデルはスムージングされる[13]、最後に NPR スタイルで表示される[8]。また、不可視領域のシルエットは点線で描画される。物体の生成は、ユーザーの輪郭線入力を円の集合で近似し(Fig.8 (b))、次に各円を球だと解釈して三次元空間に配置すればよい(Fig.8 (c))。この円集合による近似を行うためには、物体の Medial Axis を求めればよい(Fig.8 (a))。



Fig.8 物体の生成アルゴリズム。

突起や凹み生成は、Teddy システムと同様の手法でまずポリゴンで形状を作成し、それをボクセル化してから元の物体に加減算することとした(加算か減算かは、そのストロークが外向きか内向きかによって区別する)。また、一時的な切断によって中空領域生成を行う際の二度目のストローク(一度目のストロークを囲むもの)では、通常の凹み生成を、切断面の両側に対して行えばよい。

このようにすれば、ポリゴンベースでの CSG では必要なポリゴンの縫い合わせ処理が必要なく、自己交差の心配もないという大きなメリットがある。スweep操作では、このようなボリュームベースの CSG を二度行う必要がある。まず、再外側の輪郭線を、元のモデルから引き算する(Fig.9 (a-c))。次に、全体のスweepを行って、元の物体に加算する(Fig.9 (d))。こうすることによって、内側領域が元の物体によって埋められることが防がれる。

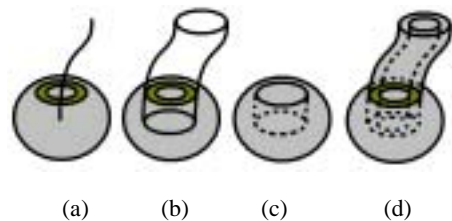


Fig.9 スweep処理。

物体の切断処理においても、ボリュームデータ構造を用いることによって実装が非常に簡単になる。まず、切断ストロークから、スクリーン平面において消去領域と残す領域を計算する。この際に、ストロークの両端点は、スクリーンの外枠か、カットのストローク自身と交わるまで延長される。領域が決まったら、各ボクセルをスクリーンに投影し、消すかどうか決定される。この手法は、ポリゴンモデルとカット平面の交線を求め、その分のメッシュを再計算するのに比べ、非常に単純である。

#### 5. 結果

我々が実験に使用したマシンは Pentium 4、2GHz、メモリは 512MB である。グラフィックカードは NVidia GeForce3 Ti500、ビデオメモリは 64MB である。このスペックで、ユーザーはインタラクティブに物体を作ることができる。さらに、タブレット付きディスプレイを用い、ペン

により直感的な入力を行うことができる。しかし、このデバイスではマウスの右ボタンがペンの側部のボタンに割り当てられており、右ドラッグを行うには、このボタンを押した状態でペンをディスプレイから浮かせた状態で動かさねばならないため、物体の回転に困難を感じるユーザーもいた。

Fig.10 は我々のシステムを用いて作られたモデルである。Fig.10 (a-c)は初心者が、15分のチュートリアルのにちに15分以内に製作したものである。それ以外のモデルは、熟練したユーザーによって作られたものである。ユーザーテストによって、このシステムを用いれば初心者でも内部構造を持った物体を短時間に製作できることがわかった。

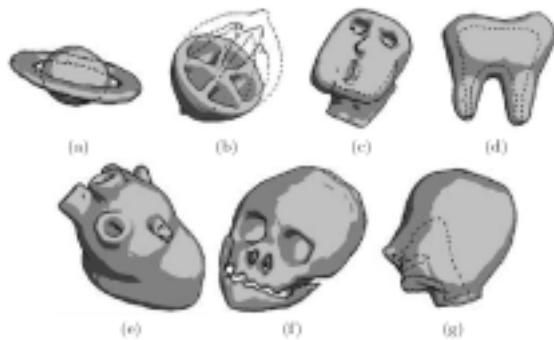


Fig.10 我々のシステムを用いて製作したモデルの例。

しかしながら、一方で問題点も判明した。このシステムでは、物体の深度情報を決め打ちにして部分があるため、Fig.11のような場合に予期しない穴があいてしまうことになる。

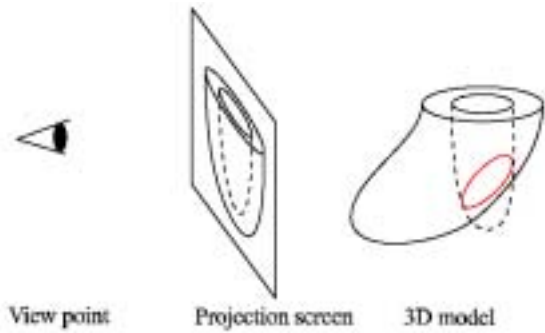


Fig.11 深度をコントロールできないために、予期しない穴があいてしまう例。

## 6. 結論および今後の研究課題

本論文では、内部構造を持つ物体をフリーハンドのスケッチによって定義する手法を提案した。ポリウムデータ構造を用いることによって、トポロジーの変化を容易に扱うことができる。ユーザーは、複数輪郭線を用いた物体生成や物体の一時的切断、構造の追加、スイープなどの操作を用いて、物体のトポロジーを変化させることができる。また、必要に応じて物体を自動回転させることによって、ユーザーの負担を軽減することができる。

本手法は大雑把なモデルを短時間で製作するには適しているが、精密なモデリングには適していない。また、物体形状を部分的に変更する手法も十分ではない。また、すでに述べたように、深度情報をコントロールできないのも問題である。また、本手法ではバイナリポリウムデータを用いているが、最終的には内部のテクスチャなど、色やその他の属性値もスケッチベースで取り扱うことのできるシステムを開発したいと考えている。

1. Bærentzen, J.A. and Christensen, N.J.: Volume Sculpting Using the Level-set Method. Proc. 2002 International Conference on Shape Modeling and Applications (2002) 175--182
2. Cutler, B., Dorsey, J., McMillian, L., Müller, M. and Jagnow, R.: A Procedural Approach to Authoring Solid Models. ACM Transactions on Graphics, 21(3), 2002, pp.302--311

- 3.Ferley, E., Cani, M.P. and Gascuel, J.D.: Practical Volumetric Sculpting. *The Visual Computer*, 16(8), 2000, pp.469--480
- 4.Galyean, T.A. and Hughes, J.F.: Sculpting: An Interactive Volumetric Modeling Technique. In *Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH 91)*, 25(4), 1991, pp.267--274
- 5.Hua, J. and Qin, H.: Haptics-based Volumetric Modeling Using Dynamic Spline-based Implicit Functions. In *Proc. 2002 IEEE Symposium on Volume Visualization and Graphics*, 2002, pp.55--64
- 6.Igarashi, T., Matsuoka, S. and Tanaka, H.: Teddy: A Sketching Interface for 3D Freeform Design. In *Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH 99)*, 1999, pp.409--416
- 7.Karpenko, O., Hughes, J.F. and Raskar, R.: Free-form Sketching with Variational Implicit Surfaces. *Computer Graphics Forum*, 21(3), 2002, pp.585--594
- 8.Lake, A., Marshall, C., Harris, M. and Blackstein, M.: Stylized Rendering Techniques for Scalable Real-Time 3D Animation. In *Proc. Symposium on Non-Photorealistic Animation and Rendering (NPAR 2000)*, 2000, pp.13--20
- 9.Lorensen, W.E. and Cline, H.E.: Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm. In *Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH 87)*, 21(4), 1987, pp.163--169
10. McDonnell, K.T. and Qin, H.: Dynamic Sculpting and Animation of Free-Form Subdivision Solids. *The Visual Computer*, 18(2), 2002, pp.81--96
11. Perry, R.N. and Frisken, S.F.: Kizamu: A System for Sculpting Digital Characters. In *Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH 2001)*, 2001, pp.47--56
12. Pugh, D.: Designing Solid Objects Using Interactive Sketch Interpretation. *Computer Graphics (1992 Symposium on Interactive 3D Graphics)*, 25(2), 1992, pp.117--126
- 13.Taubin, G.: A Signal Processing Approach to Fair Surface Design. In *Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH 95)*, 1995, pp.351--358
- 14.Wang, S.W. and Kaufman, A.E.: Volume Sculpting. *Computer Graphics (1995 Symposium on Interactive 3D Graphics)*, 1995, pp.151--156
- 15.Zeleznik, R.C., Herndon, K.P. and Hughes, J.F.: SKETCH: An Interface for Sketching 3D Scenes. In *Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH 96)*, 1996, pp.163--170