

## 吹き付けによる3次元形状モデリングの提案

野田靖之† 田中敏光‡ 大西昇†

†名古屋大学工学部情報工学科

‡名古屋大学大型計算機センター

### 概要

本報告では、吹き付け加工の模倣による直感的なモデリング手法を提案する。この方法は仮想空間に置いたスプレーから物体に粒子を吹き付けることで物体の加工を行うもので、吹き付ける範囲や粒子の量、分布を変えることで大まかな加工も詳細な加工も行える。このため、スプレーを動かすという単純な操作だけで、さまざまな形状をモデリングできる。提案手法では物体とスプレーは接触しないので、粘土細工や彫刻を模倣する手法で求められる力感のフィードバックは必要としない。また作業面を限定することで、マウスなどの2次元ポインティングデバイスを用いて容易に模倣できる。我々は、吹き付けモデリングの第一歩として2.5次元形状の加工システムを作成し、2次元のペイントシステムのような手軽なモデリングができることを確認した。

## Interactive 3D Modeling with Spraying

Yasuyuki Noda†, Toshimitsu Tanaka‡, Noboru Ohnishi†

†Department of Information Engineering, School of Engineering, Nagoya university

‡Computer Center, Nagoya university

### ABSTRACT

An interactive method is presented here for direct and simply 3D modeling. The method sprays particles onto object surfaces due to shave or swell the surfaces. It is a simulation of sandblast operations in virtual space. Various modifications of object shapes from dull to sharp and wide to narrow are available by controlling size of a sprayed area, number of particles, and a projection pattern. Thus several objects can be created by the method. Ordinary methods which simulate sculpturing or clay modeling in virtual space need interactive devices for feedback of reaction. However the spraying is easily operated by using a computer mouse because sprays do not touch objects. A 2.5D interactive modeling system was implemented. Experimental results confirmed that objects were created with very simple operations which are similar to those of 2D painting systems.

## 1 はじめに

近年、3次元モデルは、製品の設計や製造だけでなく、デザインの初期段階での形状確認やテレビ、映画などの映像メディア、電子芸術など様々な分野で利用されるようになっている。これに伴い、ユーザの思い描く複雑な3次元形状をイメージより直感的にモデリングしたいという要求が生じている。

一般的に用いられている3次元CADでは、立方体や球、円柱などのプリミティブを組み合わせたり、物体の各面を三面図で与えることで立体形状を定義する。これらの方は形状を数値的に厳密に定義できるので形が確定した物体を入力するには適しているが、曖昧なイメージを立体化する場合には、部品への分割が困難であったり処理手順が直感的でなかったりする問題がある。また、形状が確定していない物体の入力では対話的な変形や修正が避けられないが、従来のCADでは内部のデータ構造を理解したうえで操作しないと思つたように変形できない。

曖昧な形を計算機に入力する時は、形状の数値的な正確さよりは入力や変形の手順が単純で直感的であることのほうが重要である。例えば、ペイントシステムで絵を描くように簡単な操作だけで立体形状が入力できれば、3次元CGがいっそう容易に利用できると考えられる。

実世界でも、粘土細工に代表されるように、単純な変形操作を繰り返しながら形を作っていく手法が広く用いられている。このような方法で対話的に形状入力できるならば、手軽な3次元モデリングが実現できると考えられる。対話的なモデリングでは形状操作を実時間で行う必要があるが、グラフィックハードウェアの進歩で環境は整いつつある。

これまでにも、直感的なモデリングをめざして彫刻刀やろくろなど身近な形状定義手段を仮想空間で模倣する手法が提案されている[1,2,3,5,6]。これらの方法はある程度現実に近いモデリング環境を提供してくれるが、彫刻刀やろくろの操作

で必須である力感のフィードバックが適切に再現されていないため、実際の操作感覚とはほど遠いものとなっている。これは、現在の対話デバイスがきわめて限定された触覚情報しか与えてくれないことによる。様々な対話デバイスの改良が提案されてはいるが[3,4]、現状の技術ではろくろに必要な手のひら全面の感覚を再現することは困難である。彫刻刀の模倣では、1回の切削範囲を回転橈円体領域に固定することで位置情報だけによる形状変形を実現している手法[1]もあるが、彫刻刀を動かして直線を削り出すといった連続的な操作ができないため、作業回数が増えたり滑らかな表面が入力できなかつたりする問題がある。

彫刻やろくろで力のフィードバックが必要とされるのは、これらが道具と物体の接触により形状を変形させるためである。非接触の形状変形方法を模倣すれば、力感の問題を避けて通ることができる。このような手法に、サンドブラストと呼ばれる石材加工方法がある。この方法は細かい砂を高圧の空気で石やプラスチックに吹き付けて表面に絵や文字を刻むもので、処理の範囲や処理結果の善し悪しは視覚で判断する。吹き付けでは器具の位置と粒子の量が形状変形のパラメータとなるため、簡単なデバイスで操作を模倣できると考えられる。そこで、本研究では吹き付けによる3次元モデリング手法を提案する。

## 2 吹き付けによるモデリング

本研究では、ユーザは仮想空間に用意されたスプレーで物体に粒子を吹き付けることでモデリングを行う。実際のサンドブラスト加工では削るのみだが、仮想空間では造形の自由度を増すため、粒子を物体に付着することで物体表面を盛り上げることも可能にする。

吹き付けモデリングの利点として、次の2つが考えられる。1つ目は、吹き付け作業では物体と道具が接触しないため、力のフィードバックを必要としないことである。スプレーと物体との距離

の違いによる加工の差も、粒子を吹き付ける範囲と量の調節で置き換えるので、スプレーと物体との距離は指定しなくても良い。このため、マウスのような2次元デバイスを用いて、現実に近い操作感覚を再現できる。

2つ目は、スプレーを動かしながら吹き付けを行うという単純な操作だけで、様々な形状をモデリングできることである。大まかな加工も詳細な加工も吹き付けの範囲や吹き付ける粒子の量、粒子の分布関数を変えることで対応できる。このため、形状が曖昧な段階から計算機を用いて作業することができる。

### 3 2.5 次元形状モデリングシステム

吹き付け作業で2.5次元形状をモデリングするシステムを作成した。ここでいう2.5次元形状とはレリーフのように高さ方向に重なりのない形状を指す。本研究では、吹きつけ加工で一般的な3次元形状のモデリングを行うことを目的としている。しかし、完全な3次元形状の場合、形状操作に伴ってトポロジイが変化するため、形状を表現するデータの保持、修正が複雑になる。対象形状を2.5次元に制限すれば形状操作でトポロジイが変化することはないので、データが高速に修正できる。また、2.5次元形状でも吹き付け加工の形状入力インターフェースとしての有効性は確認できる。そこで、3次元形状のモデリングを行う前段階として2.5次元形状のモデリングシステムを作成することにした。実験システムはSGI社のOnyx(R4400 200MHz)上にC言語とOpenGLを用いて構築した。

#### 3.1 データ構造

2.5次元形状は、ある平面上の各点が高さの値を1つだけ持つ形状なので、平面をx-y面に選び、座標( $x, y$ )に対する高さ $z$ を2次元配列  $Height(x, y)$  で記述する。本システムではx軸方向、y軸方向

の解像度は任意に設定できるが、所有するハードウェアで実時間処理を実現するためにそれぞれ512とした。

#### 3.2 システムの外観

図1に示すように、システムは3つの部分；作業ウィンドウ、確認ウィンドウ、コントロールパネルから構成されている。ユーザはマウスを用いてこれらを操作し、物体のモデリングを行う。

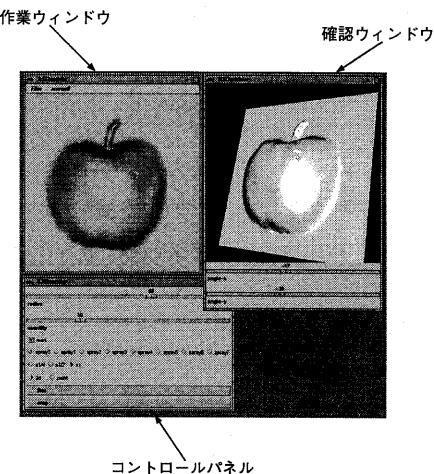


図1：システムの外観

##### 3.2.1 作業ウィンドウ

ユーザは作業ウィンドウで形状変形を行う。作業ウィンドウには物体を高さ方向から見た投影図が示され、その上にマウスの位置と粒子が吹き付けられる範囲が重ねて表示される。これらの画像はユーザの操作に対してリアルタイムに変更される。

##### 3.2.2 確認ウィンドウ

確認ウィンドウにはモデリングしている物体の透視投影図が表示される。また、現在のスプレー

の位置に対する吹き付け加工の範囲も重ねて表示される。物体の形状やマウスの位置は作業の進行に合わせてリアルタイムに更新される。視点の位置はマウスを用いて自由に変更することができる。現実の加工作業と同じように物体の形を様々な角度から確認しながら作業を進めることができる。

### 3.2.3 コントロールパネル

コントロールパネルは吹き付けのパラメータ、つまり、吹き付けの範囲、吹き付ける粒子の量、吹き付ける粒子の分布関数を変更するために用いる。また、後述するサンドペーパーツールを操作するために使う。

## 3.3 形状操作ツール

ユーザは吹き付けによる切削・盛り上げとサンドペーパーによる表面平滑化処理の2つの手段で形状操作できる。詳細は以下に述べる。両者はコントロールパネルで切り換えることができる。

### 3.3.1 吹きつけツール

作業用ウインドウ上で、マウスのボタンを押すことで吹き付け加工を行う。マウスの位置で加工する場所を指定し、ボタンを押す長さで変形の程度を指示する。ボタンを押しながらマウスを移動することで、微妙な変化を持つ曲面などの複雑な形状をモデリングすることができる。

吹き付け作業で設定できるパラメータは粒子を吹き付ける範囲、単位時間あたりの吹き付ける粒子の量、粒子の分布関数の3つである。吹き付ける向きは高さ方向に固定されている。これは、斜め方向の吹き付けを許すと2.5次元で表現できないう形状になってしまふことと、スプレーの向きや角度を変更すると作業が煩雑になてしまうことによる。

吹き付けの範囲はマウス位置を中心とした円内で、その半径  $R$  はコントロールパネルにあるス

ケールを用いて調節できる。範囲を広くすれば、表面処理などの全体にわたる作業を行なうことができ、狭くすれば細かい彫り込みや微妙な修正ができる。

吹き付ける粒子の量  $k$  も同様にコントロールパネルから指定できる。このパラメータは変形の速さを調節するためのもので、吹き付け量を少なくすれば微妙な変形が可能になる。

粒子の分布はコントロールパネルに用意されたノズルを選ぶことで変更できる。現在のインプリメンメントでは、(1)滑らかにエッジが目立たないよう削る(あるいは付加する)ためのノズル、(2)エッジを立てたいときなどに用いる鋭角に削るノズル、の2種類が用意されている。それぞれの分布関数  $f(r)$  を図2と3に示す。 $r$  は各点のx-y座標とマウスの位置との距離である。

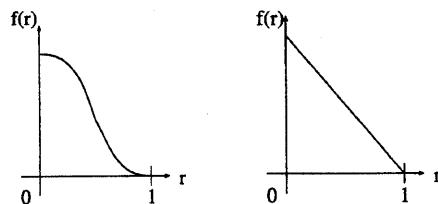


図2: 滑らかに削るノズル

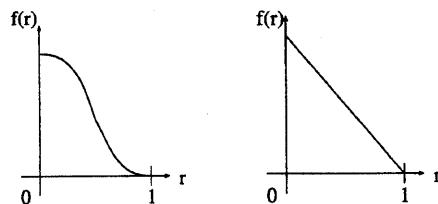


図3: 鋭角に削るノズル

以上をまとめると吹き付けによるデータの修正は、範囲内の全ての点に対して、高さ  $z$  を

$$z \leftarrow z + k \cdot f\left(\frac{r}{R}\right)$$

のように更新することで行われる。

### 3.3.2 サンドペーパーツール

全ての形状が吹き付けによって加工できるが、でこぼこの表面を平らにするような作業には時間がかかり、ユーザに精神的な負担を強いる。このような作業はサンドペーパーをかけるように出っぱったところだけを選択的に削るほうが実際とあっている。そこで仮想的なサンドペーパーとし

て、ある範囲内の各点に対してその高さを近傍での平均値で置き換えるツールを用意した。

処理範囲は吹き付けツールと同様にボタンを押しながらマウスを動かすことで指定できる。指定された範囲は作業・確認ウインドウ上に色を変えて表示される。コントロールパネルのサンドペーパーボタンを押すことで、指定した範囲を移動平均フィルタで平滑化する。平均を求める近傍領域の大きさはコントロールパネルから指定する。近傍領域を大きくすると平らになる度合いが高くなるが、これは目の粗いサンドペーパーを選ぶことに相当する。

### 3.4 表示データの削減

立体形状を画面で確認するには現実感のある描画を行う必要がある。このため、実験システムでは形状をポリゴンで記述して鏡面反射を含む陰影表示を行っている。一方、対話的なモデリングを実現するには、ユーザーの操作に対してリアルタイムに画面を書き換える必要がある。一定時間で表示できるポリゴン数には限界があるので、表示データの削減を行い、システムの応答性向上する。

実際のモデリングでは、はじめに全体を見渡しながら大まかな形を作り、次に細部を作り込むという過程で作業を行うことが多い。大まかな形を入力する時にはディテールは必要ないので、分解能は低くてよい。一方、細かい部分を作り込む時には高い分解能が必要となるが、作業に必要な部分だけが表示されていればよい。そこで、作業・確認の両ウインドウに全体の概要を表示するモードと一部分を詳細に表示するモードを用意した。

実験システムでの形状の分解能は  $512 \times 512$  に設定されているが、概要表示モードではデータが間引きされて、 $128 \times 128$  の分解能で全体を表示する。詳細表示モードでは縦横それぞれ 4 分の 1 領域をデータに忠実に表示する。これにより、ユーザーの操作に対する画面の応答時間を小さくすることができる。

### 3.5 画面再描画方法の改良

ユーザが吹き付け操作を行なう度に形状データを変更して画面を再描画しなければならないが、一度の操作で変形されるのは局部形状に限られる。一方、実験システムで用いる SGI 社製 Onyx にはデータの変更されない部分を高速に再表示する機構がある。そこで、データを x 軸、y 軸方向にそれぞれ 32 分割し、修正されない部分を高速表示することで、再描画時間を短縮している。

また、作業用ウインドウでは物体の重ならない方向からの投影図が常に表示されているので、吹き付けの行われた部分だけを書き換えることで高速に再描画できる。吹き付け範囲の大きさにもよるが、両者を組み合わせることで応答時間を半分から 6 分の 1 に短縮できる。

以上に述べた表示データの削減と再描画の高速化により、約 0.1 秒の応答速度を達成している。これは、対話的なモデリングを行なうのに問題のない速度である。

## 4 モデリング例

図 4～7 に本システムを使って筆者がモデリングを行った例を示す。図 4 はリンゴを入力したもので、範囲の大きなノズルを用いておおまかな土台を作成した後、小さなノズルを用いて大体の形を整え、サンドペーパーツールを用いて仕上げを行なった。右上部の虫食いは細いノズルを用いて作成した。作業に要した時間はおよそ 30 分であり、このようななめらかな曲面で構成された形状も比較的簡単に入力できた。

図 5 は木をモデリングしたもので作業に 45 分程かかった。このような凹凸の激しい形状も、吹き付けの範囲を狭くすることで容易にモデリングできた。

図 6 は顔をモデリングした例で、図 7 はそれを別角度から表示したものである。作業には 90 分程かかった。顔の輪郭、額や鼻のでっぱり、目のくぼみなどは吹き付け範囲を広くして加工し、

目や口などの細かい部分は吹き付け範囲を狭くして作成した。吹き付け範囲を調節することで、同じ操作で滑らかな曲面もシャープなエッジも造形できた。

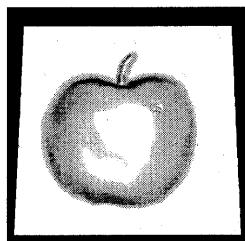


図 4: リンゴ

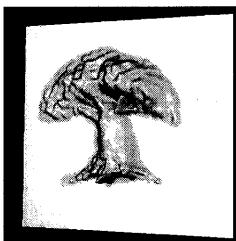


図 5: 木

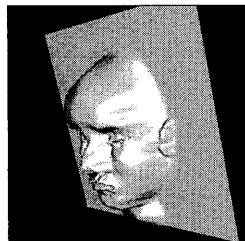


図 6: 顔

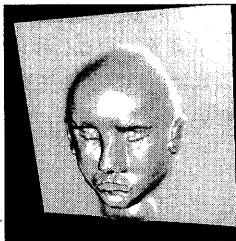


図 7: 顔

## 5 むすび

吹き付けを用いて 2.5 次元形状をモデリングするシステムについて報告した。提案システムの特徴は、操作は直感的で専門の知識を必要としないため、ペイントシステム並みの単純な操作で 2.5 次元形状のモデリングが行える点にある。

形状入力実験ではかなり複雑な形状でも比較的短時間で入力できた。今後はシステムを評価するために作業のしやすさやインターフェースの良さなどを調べる実験が必要であると思われる。

本システムを 3 次元形状のモデリングに拡張するには、データの表現方法を一般的な 3 次元形状

が取り扱える形に変える必要がある。これも今後の検討課題である。

## 謝辞

本研究を行うにあたって、熱心な御指導御討論を頂いた山村講師、工藤助手をはじめとする大西研究室の皆様に感謝致します。

## 参考文献

- [1] 水野慎士,岡田稔,横井茂樹,鳥脇純一郎: “CSG を用いた仮想彫刻”, 情処研報, グラフィクスと CAD73-7(1995).
- [2] 亀井克之,中村泰明,阿部茂: “体積制約をもつエネルギー最小化によるろくろモデル”, 第43回情処全大, 2-479 – 2-480(1991).
- [3] Tinsley A. Galyean, John F. Hughes: “Sculpting: An Interactive Volumetric Modeling Technique”, *Computer Graphics*, Vol. 25, No. 4, pp. 267-274 (1991).
- [4] 中村康浩,吉村哲也,杉浦雅貴: “3 次元直接操作インターフェースの実現”, 情処研報, グラフィクスと CAD55-1(1992).
- [5] 久保寺玄一郎,岡田稔,横井茂樹,鳥脇純一郎: “半空間プリミティブによる対話的 CSG モデラ”, 情処研報, グラフィクスと CAD55-2(1992).
- [6] 吉田英正,大野義夫: “対話的なレリーフ形状作成システムに関する研究”, 情処研報, グラフィクスと CAD58-13(1992).