

粘土細工モデリングにおける物体変形操作に関する基礎検討

前野 輝, 岡田 稔, 鳥脇 純一郎

名古屋大学大学院工学研究科情報工学専攻

あらまし: 粘土細工では, その変形過程において, 指による操作を多く使用する。指は, 物体を容易かつ直接的に人間が想像した形状へ変形させることができる。それゆえ, 形状を創成する手段として, 粘土細工のような変形過程をもつような幾何形状モデラは有用であると考えられる。また, 本論文では, このようなモデラを実現するために必要な変形手段や変形モデルの種類の提案を行う。本研究では, 三次元仮想空間内の物体を双三次ベジエパッチを組み合わせることで表現している。そして, 物体の体積を保存しながら変形を行うために必要な基礎検討として, 双三次ベジエパッチで構成された物体の体積の計算手法とその変形手法について提案する。

A Fundamental Study for Freeform Object Shape Deformation on Virtual Clay Modeling

Kagayaki MAENO, Minoru OKADA and Jun-ichiro TORIWAKI

Department of Information Engineering, School of Engineering, Nagoya University

Abstract: In clay modeling, most parts of the forming processes use fingers. Fingers can easily and directly express human imagination of a shape. Therefore the freeform object modeler using clay modeling operations is useful. In this study, a virtual object is constructed by some Bezier patches. In this paper, we introduce modeling methods and transforming processes in order to realize virtual clay modeling. For transforming an object with preserving its volume, we suppose methods to calculate the volume of closed objects surrounded by Bezier patches, and to transform it.

1 はじめに

自由曲面モデリングは3Dコンピュータグラフィクス(3DCG)やバーチャルリアリティでシーンを構成するために基本的かつ重要な技術である。これらの用途を目的とした大部分の3Dモデラは, 単に曲面を組み合わせることでより仮想物体をモデリングしている。このようなモデラでは, 自由曲面のなめらかな接続や制御点移動による曲面変形において, 多くの技術と知識が必要であった。

これに対して, 現実世界で形状を創成する場

合, 自由曲面を組み合わせた, 制御点を移動したりすることにより形状を創成するのではなく, 与えられた初期物体形状に対し, 切削, こねる, 叩く, 捻る等の手法を用いて形状を創成している。これらの手法は人間の感性に基づく直観的モデリング手法といえることができる。これにより, CGの知識のないユーザでも3DCGが容易にモデリング可能となるような, 直観的な3DCGモデラは有用であることがわかる。

本論文では, 滑らかなパラメトリック曲面で表現された仮想空間内の素材に対して, 人間が

粘土細工のようなオペレーションで形状創成できる手法の基礎検討をおこなう。本研究では、曲面を表現する手法として双三次ベジエ曲面を用いた。本論文では、形状創成を行うための操作と変形手法、ベジエ曲面で囲まれた閉曲面物体の体積の定性的計算手法について述べる。

関連研究である粘土のシミュレーションモデルとして、小田ら [1] の粒子ベースによるビジュアルシミュレーションや荒田ら [2] によるセル構造オートマトンによる仮想粘土モデリングなどがあげられる。これらはいずれも粘土の粒子を一つずつシミュレーションしたもので、粘土の表面に粒子の形状が出たり滑らかな曲面の表現が困難などの問題があった。一方、梅村ら [3] のメタボールによる粘土細工の基礎検討があるが、これは体積計算が困難であった。また、江積ら [4] は変形過程に球充填モデルを用いた内臓の弾性変形をシミュレーションしている。この手法は内臓の中に球が充填されているものと仮定し、これらの位置を移動させることにより変形させるモデルであるが、この手法も体積を正確に保存させて変形させることが困難であった。また、Geoff[5] パラメトリックな自由曲面の変形操作を比較的簡単に行う手法を提案している。

2 粘土細工を模擬した変形システム

まず、粘土の基本性質として次のような事項があげられる。

1. 外力が作用していないときは形状を維持
2. 外力を加えることにより変形
3. 1, 2の変形において物体の体積は不変

2.1 システム概要

本システムでは、ユーザは与えられた初期形状から、変形手段を用い、変形モデルに基づいて形状創成を行う。各変形モデルは物体の体積が一定であると仮定している。変形の際、システムは図1で示したプロセスをたどる。変形パラメータの決定では変形位置や変形モデルを実行するために必要なパラメータが与えられる。ここで、変形位置はパッチ番号とそのパッチ内でのパラメータの値で与えられる。そしてシス

表 1: 変形モデルの種類

変形の種類	道具			
	指	手	へら	ニッパ
押す	○	○	○	
引く	○	○	○	
穴をあける・ ひろげる・閉じる	○		○	
ひねる		○		
丸める		○		
広げる		○		
こねる		○		
線を引く・消す	○		○	
付加		○		
削る		○		
ちぎる		○		○
ならす		○	○	
のばす		○	○	

テムではユーザが選んだ変形手段とベジエパッチとの大きさを比較して必要であれば再帰分割・統合を行う。次に変形領域を決定する。変形領域は2つの領域に分かれ、変形手段の移動する空間付近に存在するパッチ領域を直接変形領域、また、直接変形領域が変形されることによる体積増減を打ち消すための領域を間接変形領域としている。各領域の大きさ、その領域内での形状変形は変形モデルにより定義される。そして、直接変形領域が変形され、次に間接変形領域が変形される。

これらの変形モデルを計算機上に実現する際、次の3つの問題に直面する。

- a. 変形手段とモデルの種類、その内容
- b. 与えられた物体の体積の計算方法
- c. 各変形モデルにおける制御点の配置方法

以下にこれらについての説明を行う。

2.2 変形手段、モデルの種類

一般に粘土細工は彫刻と違い、人間が直接手で行うことが多く、変形の種類が多数存在する。また、制作者の力入れ方などの違いによって様々な形状が創成できる。本研究では、ユーザは変形手段として指(1本)、手、へら、ニッパが使えるものとし [9]、これらの用途を考慮した変形モデルの種類を表1にまとめた。各変形モデルは“ちぎる”や“付加”などの一部を除いて体積が一定であるとしている。

2.3 制御点の移動方法

仮想空間内の物体はいくつかのベジエパッチの組合せで構成されるベジエ曲面で成り立っている。文献[10]によると、隣接パッチが滑らかに接続する条件を満たすために本論文では連結制御点群という概念を導入した(図2)。図2において、細い線で囲まれた部分が一枚のベジエパッチを表している。そして、一曲面の制御点を図2のように太線で囲まれた範囲ごとに制御点をまとめると、滑らかに接続した状態を維持して変形する際都合が良い。本研究では、変形の際にパッチの角の制御点とその周りの8つの制御点を連結制御点群と呼ぶことにし、連結制御点群が同一平面上にあるという拘束条件の下で動かすことにした。

2.4 定性的体積計算方法

ここでは複数のベジエパッチにより構成される閉じたベジエ曲面の内部の体積 V の計算方法を示す。まず、あるベジエパッチ i 上の点と原点 O を結んだ線分を束ねてできる図3のような錐体を考え、その体積を v_i とする。 v_i は式(1)で示され、ベジエパッチの表面の向きに応じて体積は符号を持つ。

$$v_i = \frac{1}{3} k_{\text{sign}} \iint_{u,v} H \cdot J du dv \quad (1)$$

$$k_{\text{sign}} = \begin{cases} 1 & (\mathbf{N} \cdot \mathbf{R}(u, v) \leq 0) \\ -1 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{R}(u, v)$ はベジエパッチ上の点である。 \mathbf{N} は $\mathbf{R}(u, v)$ における法線ベクトルであり、式(3)で表される。 \mathbf{N} と微小区域から原点へのベクトル \mathbf{R} との内積の符号により v_i の符号が定義される。

$$H = \frac{|\mathbf{N} \cdot \mathbf{R}(u, v)|}{|\mathbf{N}|} \quad (3)$$

$$\mathbf{N} = \frac{\partial \mathbf{R}(u, v)}{\partial v} \times \frac{\partial \mathbf{R}(u, v)}{\partial u} \quad (4)$$

J はヤコビアンであり、

$$J = \sqrt{J_{xy}^2 + J_{yz}^2 + J_{zx}^2} \quad (5)$$

ただし、

$$\begin{aligned} J_{xy} &= \begin{vmatrix} \frac{\partial \mathbf{R}(u, v)_x}{\partial u} & \frac{\partial \mathbf{R}(u, v)_y}{\partial u} \\ \frac{\partial \mathbf{R}(u, v)_x}{\partial v} & \frac{\partial \mathbf{R}(u, v)_y}{\partial v} \end{vmatrix} \\ J_{yz} &= \begin{vmatrix} \frac{\partial \mathbf{R}(u, v)_y}{\partial u} & \frac{\partial \mathbf{R}(u, v)_z}{\partial u} \\ \frac{\partial \mathbf{R}(u, v)_y}{\partial v} & \frac{\partial \mathbf{R}(u, v)_z}{\partial v} \end{vmatrix} \\ J_{zx} &= \begin{vmatrix} \frac{\partial \mathbf{R}(u, v)_z}{\partial u} & \frac{\partial \mathbf{R}(u, v)_x}{\partial u} \\ \frac{\partial \mathbf{R}(u, v)_z}{\partial v} & \frac{\partial \mathbf{R}(u, v)_x}{\partial v} \end{vmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

$\mathbf{R}(u, v)_x$, $\mathbf{R}(u, v)_y$, $\mathbf{R}(u, v)_z$ は $\mathbf{R}(u, v)$ の x , y , z 成分である。

また、物体全体の体積 V はそれを構成する n 個のベジエパッチにより形成される錐体の体積 v_i の総和で表される。

$$V = \sum_{i=1}^n v_i \quad (7)$$

各々のベジエパッチ i による錐体の占める体積は独立なので、変形時には局所的に体積 v_i を再計算することが可能である。

2.5 体積保存型変形手法

以上の手法を用い、実際に変形する際の概要を以下に示す。まず、直接変形領域とその移動ベクトル \mathbf{M}_A が決定する。直接変形領域の制御点群 \mathbf{P}_A は \mathbf{M}_A だけ移動される。次に間接変形領域の移動方向ベクトルを \mathbf{M}_B 、移動量パラメータを k とすると、間接変形領域の制御点群 \mathbf{P}_B は $-k \cdot \mathbf{M}_B$ だけ移動することとなる。体積を一定に保つためには式(8)の等式が成り立つ必要がある。そして、式(8)の k を導出することにより間接変形領域の移動量を決定する。

$$V(\mathbf{P}_A + \mathbf{M}_A) = V(\mathbf{P}_B + k \cdot \mathbf{M}_B) \quad (8)$$

3 指を用いた変形モデル “押す”

3.1 モデルの内容

指を用いた変形モデルには表1のようなものが考えられるが、これらの中の基本的な動きとしては“押す”及び“引く”が挙げられる。本研究ではこの“押す”モデルについて主に考えることとした。本研究では、指は断面が $y = a \cdot x^2$

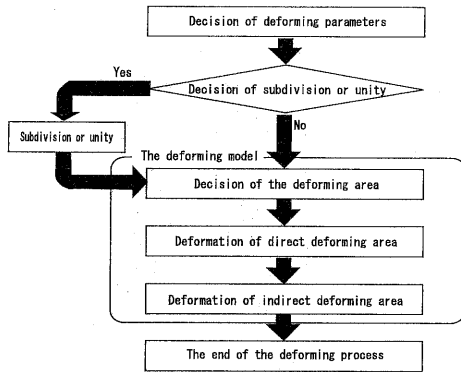


図 1: 変形過程
Fig. 1: Deforming Process

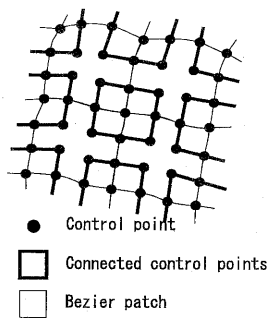


図 2: 連結制御点群
Fig. 2: Sets of connected control points

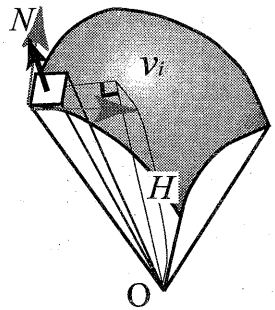


図 3: 1 ベジエパッチにより形成される錐体の体積
Fig. 3: Conic volume corresponding to a Bezier patch

の放物曲面であると想定し，“押す”という作業において，次の2つのモデルを想定した。

[モデル 1]

現実世界において“押す”という作業で創成できる形状は，押した部分がへこみ，周りが膨らむという状態である．そこで，「指で押した部分がへこみ周りが膨らむ(モデル 1)」というモデルを想定した．このモデルで十分な厚さを持つ粘土表面を指で押した形状の指先移動ベクトルに沿って切った断面図は，図 4 の太線で表されるようなものと想定する．

まず，粘土表面において指先移動ベクトルに平行に変形前から変形後までの移動距離を dis ，指先移動ベクトルからの各粘土表面までの距離を r ，指先移動量を b ，指の太さの半径を $\sqrt{\frac{b}{a}}$ としたとき，へこんだ断面図は，式 (9) で表されるものとした．そして，指先移動ベクトルからの距離 r が $0 \leq r \leq \sqrt{\frac{b}{a}}$ に存在するパッチに対し直接変形領域とする．

$$dis = a \cdot r^2 - b \quad (0 \leq r \leq \sqrt{\frac{b}{a}}) \quad (9)$$

次に，周りの盛り上がり形状は，式 (10) で表されるものとした．そして，指先移動ベクトルからの距離 r が $\sqrt{\frac{b}{a}} \leq r \leq \sqrt{\frac{f}{e}}$ に存在するパッチに対し間接変形領域とする．また， $\sqrt{\frac{f}{e}}$ は粘土の材質により色々に変化させることができる．

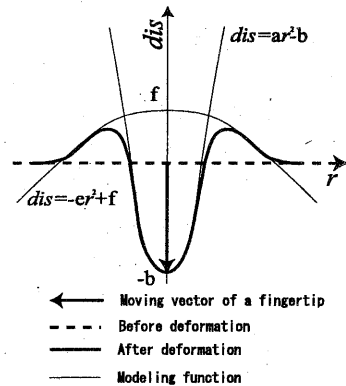


図 4: モデル 1
Fig. 4: Model 1

$$dis = -e \cdot r^2 + f \quad (\sqrt{\frac{b}{a}} \leq r \leq \sqrt{\frac{f}{e}}) \quad (10)$$

以上の2つの放物曲面を用いて，指で押した部分がへこみ，周りが盛り上がる形状が表現できる．

[モデル 2]

形状創成において，モデル 1 の「周りが膨らむ」という現象はしばしば弊害になる．そこで，「指で押した部分がへこみ全体が膨らむ(モデル 2)」というモデルを想定した．モデル 1 と

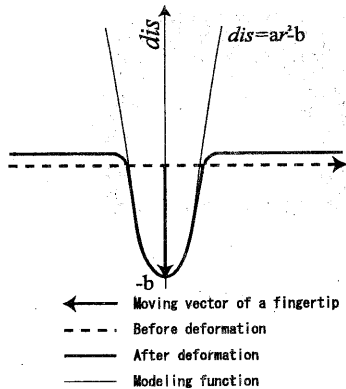


図 5: モデル 2
Fig. 5: Model 2

同じ条件で粘土を押した場合，“押す”という作業において，その指先移動ベクトルに沿って切った断面図は図5の太線のようなものと想定する．変数もモデル1と同様に考えると，へこんだ断面図は式(9)で表され，同様にこの領域を直接変形領域とする．また，間接変形領域は $0 \leq r$ すなわち，直接変形領域も含む全ての領域とし，この領域をを拡大することにより，太線のような形状になるものとした．

以上の2つの形状モデルにフィットし，かつ2.5節を満たすようにベジエ曲面の連結制御点を移動させる．

4 実験

本研究ではサンプルデータとして $z=0$ ， $-3 \leq x, y \leq 3$ で表される平面及び，Utah teapot を用いて変形の実験を行った．まず，モデル1を用いた場合，平面上のの同一地点を3つの異なる指先移動量で押したものが図6である．また，図8は，Utah teapot を押したものを3つの異なる視点位置から観測したものである．また，図7及び図9は同じ条件でモデル2を用いて変形したものである．これをみると，モデル1を用いた場合，指で押した部分がまるくへこみ，周りが盛り上がっている様子がわかり，モデル2では周りが盛り上がりならず丸くへこんでいる様子がわかる．

5 まとめ

本論文では，粘土細工のようなオペレーションで自由曲面を変形できるモデラの開発のための基礎検討について述べた．本論文では，モデラに組み込む変形手段，変形モデルの種類を述べた．また，変形システムを実現するために必要な基礎検討として，ベジエ曲面で囲まれた物体の体積の定性的計算方法，等体積変形手法についても述べた．これにより，粘土細工を指向した自由曲面モデリングが可能となる．また，指による変形モデル“押す”についても述べた．まだまだ，本システムは開発の途上である．今後の課題としては“押す”以外の様々な変形モデルの実現があげられる．また，変形の際の再帰分割によって増大したベジエパッチを減らす手法の考案などがあげられる．

参考文献

- [1] 小田泰行, 千葉則茂, “粒子ベースモデルによる粘土のビジュアルシミュレーション”, 情処研報, Vol. 97, No. 124, GCAD 97-88, pp. 25-30, 1997
- [2] 荒田秀樹, 高井昌彰, 山本強, “セル構造オートマトンによる仮想粘土モデリング”, 情処研報, Vol. 97, No. 124, GCAD 97-88, pp. 19-24, 1997
- [3] 梅村隆, 岡田稔, “メタボールを用いた会話的モデラのためのパッチの生成法”, 画像電子学会誌, Vol. 26, No. 4, pp. 306-313, 1997
- [4] 江積剛, 内山明彦, 熊野宣弘, 池本明夫, 足達吉隆, 高津光洋, 鈴木直樹, “手術シミュレーションにおける弾性臓器モデルの開発”, 第6回日本コンピュータ外科学会大会合同論文集 97, (VI)-1, pp. 91-92, 1997
- [5] Geoff Wyvill, Dean Mcrobie, and Michael Gigante “Modeling with Features,” *IEEE Computer Graphics and Applications*, pp. 40-46, 1997.
- [6] P. Bezier, “Definition numerique des courbes et surface,” *Automatisme*, Vol. 11, No. 4, pp. 625-632, 1997
- [7] 鳥谷浩志, 千代倉弘明, “3次元CADの基礎と応用”, 共立出版, 1991
- [8] 花里高宏, 筒口拳, 古川貴男, 曾根原登, 清水義雄, “双3次ベジエパッチの適応的分割を用いた衣服形状生成”, 情処研報, GCAD 97-86, Vol. 97, No. 79, pp. 61-66, 1997
- [9] 子どもの遊びと手の労働研究会編, “紙で作ろう粘土で作ろう”, ミネルヴァ書房, 1989.
- [10] 杉原厚吉, “グラフィックスの数理”, 共立出版, 1995

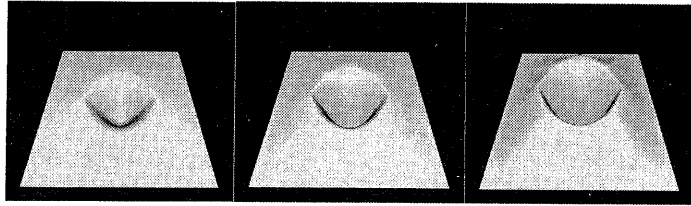


図 6: 平面の変形 (モデル 1)
Fig. 6: Deformation of a plate (Model 1)

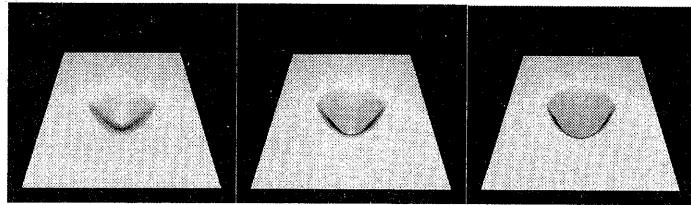


図 7: 平面の変形 (モデル 2)
Fig. 7: Deformation of a plate (Model 2)

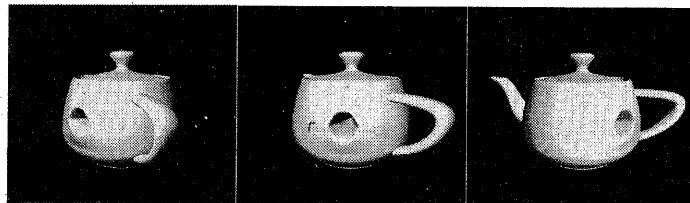


図 8: Utah Teapot(モデル 1)
Fig. 8: Deformation of a Utah Teapot(Model 1)

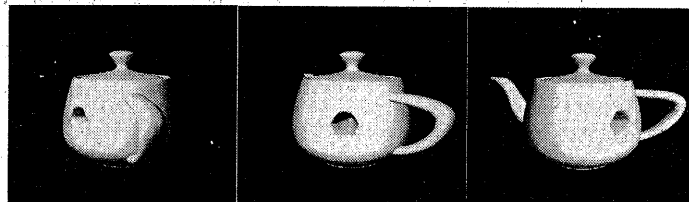


図 9: Utah Teapot(モデル 2)
Fig. 9: Deformation of a Utah (Model 2)