

直観的・対話的自由曲面モデラの変形における制御点調整法

前野 輝[†] 岡田 稔^{††} 鳥脇 純一郎^{†††}

CG制作における形状モデラでは多くの場合、数値的正確さを重視するために三面図を用いてオブジェクトを三次元空間上に配置する。この手法は多くの慣れや技術を要するため、必ずしもユーザに分かりやすいシステムではない。筆者らは形状の数値的正確性を追うのではなく、粘土をさわのような感覚でラフな形状を創成できるようなデザイナの初期発想支援システムを目指した研究を展開している。本研究では双三次ベジエ曲面に基づき、指をモデル化した形状関数を導入することにより曲面をさわのような感覚でモデリングできるようなシステムの基礎検討を行ってきた。しかし、双三次ベジエ曲面では、パッチ間の接続に関する制約があるため、連続性維持のための制御点調整において予期しない形状が生成されるなどの問題があった。そこで、本論文では先に示したモデリング手法に基づく対話操作を実現するための制御点調整に関する改良手法を提案する。また、従来対応していなかった閉曲面に対する変形を可能にするために双三次ベジエパッチで構成される曲面のデータ構造を提案し、これらの手法とデータ構造を用いて簡単なインタラクティブシステムへ応用する。

A Method for Control Points Regulation for Intuitive and Interactive Free-form Curved Surface Modeler

KAGAYAKI MAENO,[†] MINORU OKADA^{††} and JUN-ICHIRO TORIWAKI^{†††}

In most part of shape modeling processes, users model a shape by moving objects with orthographic views. This type of geometrical shape modeling tool is useful to set something with numerical accuracy in a virtual space. However, the users are required special technique and knowledge. Therefore it is not always simple and convenient for us. In the final process of shape modeling, we may need numerical accuracy at the shape. However, in the first step of the shape design, we desire to model a rough shape rapidly and intuitively. Our goal of this study is to develop a supporting system for initial shape design. In this study the authors have proposed an intuitive deformation system using Bezier surfaces. However, a Bezier surface has strict continuity constraints on its boundary edges. Therefore an unexpected shape may be generated by the former method. In this paper we propose an improved method about regulating control points, and data structure for this study. We apply this method and data structure to a prototype modeling system and discuss the availability of the method.

1. はじめに

三次元 CG 制作において形状モデリングは最も基礎的な作業の一部であり、また多くの時間を要する部分でもある。多くの場合、その制作環境では三面図などの投影面上でユーザが対話操作により点や直線などのオブジェクトを仮想空間に正確に配置しながら形状

創成を行う。このような方法は数値的正確さを持った形状が生成できるという長所がある。しかし、投影面を通して対象形状を三次元的に認識する必要があり、ユーザに作業上・思考上の負担を強いることになる。

これに対して現実世界で私たちが形状創成を行う際に、もちろん上記のような手法も用いるが、多くの場合与えられた初期形状に対して押したり、引っ張ったり、付加したり、削除したりするような方法を用いる。このような方法では数値的正確性はないものの、分かりやすく直観的な対話操作により形状創成が行えるので、デザイナーがラフなアイデアを具現化することが容易である。現在の CG 制作の現場ではデザイナーと技術者の専門化、分業化が進められており、その中でデザイナーの感性的な形状想起を具体化するためのツールとして、直観的な操作環境の提供は意義が大きい。直

[†] 松下電器産業株式会社パナソニックシステムソリューションズ社
Panasonic System Solutions Company, Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.

^{††} 早稲田大学大学院情報生産システム研究科
Graduate School of Information, Production and Systems, Waseda University

^{†††} 中京大学情報科学部
School of Computer and Cognitive Sciences, Chukyo University

観的対話操作による形状モデリング手法としては水野らによる仮想彫刻^{1),2)}や河合らによる自然言語による形状モデリング方式^{3),4)}があげられるが、生成される形状は強い拘束を受け、自由曲面の表現およびモデリングが困難である。自由曲面を用いた形状モデラとしては、物理モデルに基づく粒子ベースのモデリング手法⁵⁾や、セル構造オートマトンを用いた手法⁶⁾があげられる。これらは容易な処理で物体の形状変形が可能である一方、膨大な計算量を必要とするためにリアルタイムの対話型モデリングには不向きであるし、ユーザが触るような感覚で形状創成を行うことも困難である。また、ユーザが対話的に手書きスケッチを入力し、これを三次元化することにより直観的に形状創成が行うことが可能なモデリング手法^{7)~9)}もあげられる。これらは二次元形状を三次元化するうえでトポロジー的な強い拘束が発生するものの、特定の目的における直観的shapeモデラとしては非常に有用であると考えられる。

一方CADの分野では、制御点方式のパラメトリックパッチによる曲面表現が多く用いられる。この表現手法は自由曲面を内部表現するための強力な手段であり、また制御点を移動させることにより形状変形が可能である。しかし、この手法ではユーザは直接曲面を触るような感覚で変形できないし、制御点移動による変形形状の予測も困難である。また多数のパッチを接続して曲面を構成する場合、パッチ間の接続条件が大きな問題になる。多くのモデラの場合、このような問題を解消するためにパラメトリック表現からポリゴン表現への変換機能を有するが、ポリゴン表現^{7),8)}は曲面の内部表現としては不十分である。また、このような接続性問題を考慮することなく曲面表現が可能な手段として細分割曲面^{9)~12)}があげられる。しかし細分割曲面は分割を繰り返すことにより近似曲面を表現する手法であり、パラメトリック曲面のように与えられた数式から曲面の最終的な形状を容易に得ることが困難であるため、ポリゴン表現同様、曲面表現手段としては優れているが、内部表現手段として必ずしも適切とはいえない。

筆者らは形状に対する数値的正確性を追求するのではなく、デザイナーの初期発想支援システムとして、現実世界で形状を創成する場合と同じような過程で、仮想物体を手で触りながら形状変形可能なモデラの開発を進めている^{14),15)}。具体的には、仮想空間内におい

て双三次ベジエ曲面で表された素材に対し、直観的かつインタラクティブに粗形状の創成が可能なシステムを目指しており、文献15)ですでにベジエパッチごとの制御点決定手法やパッチ間の接続を考慮した制御点調整手法についても述べた。しかし、この文献で述べた制御点調整手法ではパッチ間の接続条件を C^1 連続としており、本研究の目的には過拘束であるため大幅に形状が変わってしまったり、また双三次ベジエ曲面で囲まれた閉じた仮想物体に対しての制御点調整には対応していなかったりする問題があった。

そこで本論文では、変形時におけるパッチ間の接続を C^1 連続から G^1 連続にすることにより制御点調整時の拘束条件を弱めた、より理想形状に近い双三次ベジエ曲面生成のための制御点調整手法について述べる。本研究の基本方式では仮想物体を表現する際、パッチ配置によっては縮退点が発生する場合がある。そこで、パッチ配置によって生じる縮退点・非縮退点における連続性を保証した処理方法を示し、提案法に基づく粘土細工を志向した対話的システムの基礎実験を行う。なお、パラメトリックパッチを用いた直観的自由曲面モデリングとしては山下らによる3D-DDM¹³⁾があげられるが、本論文で提案する手法では、それとは異なるアプローチからの自由曲面変形を行う。

2. 対話システム概要

2.1 システムの処理手順

現実に粘土細工を行う場合、手の形状・動きは重要な役割を担っており、手と物体との衝突状態により変形形状が定まる。このような環境を計算機上で実現するために本研究では指の動きを入力するためにデータグローブを、また手の位置を検出するために三次元位置センサを使用する。本システムにおける変形処理は図1のような流れになっている。一定時間ごとに、三次元位置センサからは手の位置と姿勢が、データグローブからは指の曲げ角度が計算機に取り込まれ、その値から仮想空間における手および指の関節の座標値が計算される。そして、3章で述べるデータ形式の双三次ベジエ曲面が入力されると、図1のように仮想指と自由曲面との衝突判定を行い、衝突している場合にはデータグローブから取り込まれた指の関節座標データから形状関数のパラメータを決定し、Bernstein逆写像¹⁵⁾を利用して、パッチごとの変形を行い、パッチ間の連続性を考慮して自由曲面の制御点決定を行う。

2.2 ベジエパッチの変形概要

文献15)で述べた制御点決定手法では、双三次ベジエパッチ上にパラメータ空間で等分に区切られた16

以下、本論文では1つのパラメトリック関数により定まる1区間をパッチ、それを複数接続して得られる形状を曲面と呼ぶ。

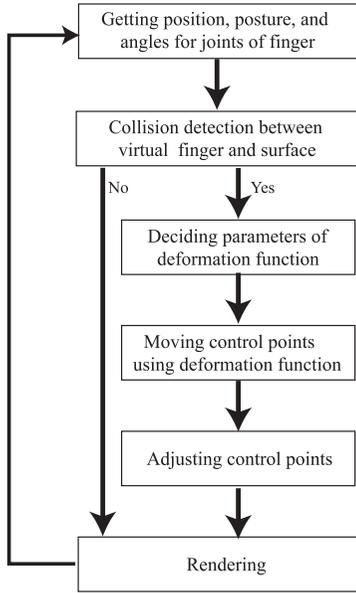


図1 変形の概要
Fig. 1 Overview of deformation cycle.

のサンプル点(サンプル点行列 \tilde{R})を配置し、これらの点をフローベクトル (F_{ij})に従って理想形状上に再配置し(サンプル点行列 \tilde{R}'), 得られたサンプル点から Bernstein 行列 \tilde{B} による Bernstein 逆写像を用いて新しいパッチの制御点行列 \tilde{P}' を計算する手法を示した。式 (2) は移動後の制御点行列 \tilde{P}' を示している。

$$\tilde{P}' = \tilde{B}^{-1} \tilde{R} \tag{1}$$

$$= \tilde{B}^{-1} (\tilde{B} \tilde{P} + \tilde{F}) \tag{2}$$

$$= \tilde{P} + \tilde{B}^{-1} \tilde{F}'$$

ここで、

$$\tilde{F}' = \tilde{B}^{-1} \tilde{F}$$

$$\tilde{P}' = \begin{pmatrix} P'_{00} \\ \vdots \\ P'_{0n} \\ P'_{10} \\ \vdots \\ P'_{nn} \end{pmatrix}, \quad \tilde{F} = \begin{pmatrix} F_{00} \\ \vdots \\ F_{0n} \\ F_{10} \\ \vdots \\ F_{nn} \end{pmatrix}$$

3. データ構造

本研究では多数の双三次ベジエパッチを接続することにより仮想物体が表現される。一般にベジエ関数は数理的に素直で単純ではあるが、接続に関する拘束条

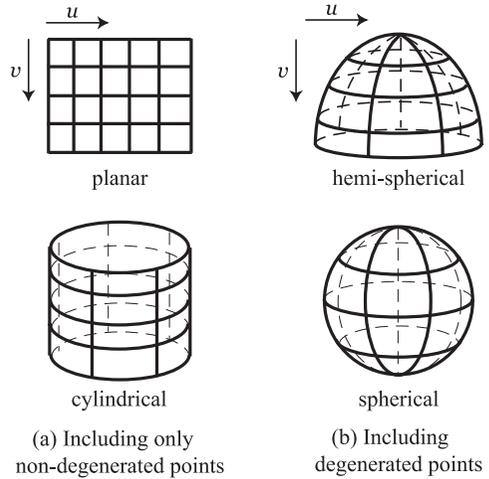


図2 曲面のパッチ構造
Fig. 2 Patch structures for curved surfaces.

件が厳しい^{15)~17)}。そこで、この問題を軽減するために、仮想物体を構成するベジエ曲面のデータ構造をベジエパッチの格子状の並びとした(図2)。この構造では、格子状に並べられたパッチは接続点において2枚あるいは4枚のパッチで接続される。また図2のように曲面の接続方法を変えることにより、平面、円筒、半球、球、トーラスのような接続トポロジーを持つ曲面プリミティブを形成することも可能である。

また、形状が球や半球である場合、1カ所でも何枚ものパッチが接続され、同一座標に多数の制御点が集中する場合がある。このような点ではパラメータ (u, v) の変化に対して座標値が変化しない。このように1カ所に2個以上の制御点が集中しパッチ形状が三角形となるような制御点を縮退点、それ以外の制御点を非縮退点と呼ぶ。本研究では、パッチ間の接続の種類により、(a) 非縮退点による接続、(b) 縮退点による接続、の2通りに分けて制御点調整を行う。また、本研究では縮退点における連続性を保証するために u, v 方向におけるパッチの枚数を偶数とした(4.1節)。

4. 制御点調整

4.1 連続性維持のための制御点補正

2.2節で提示した制御点決定手法は各パッチごとに独立に処理されるため、決定された各パッチ間の連続性は保証されていない。一般にベジエパッチ間の連続性を保証するためには、各パッチの頂点および境界線において文献 14), 17) のような連続条件を満たす必

平面と半球は形状のトポロジーは同じであるが、接続のトポロジーは異なる。

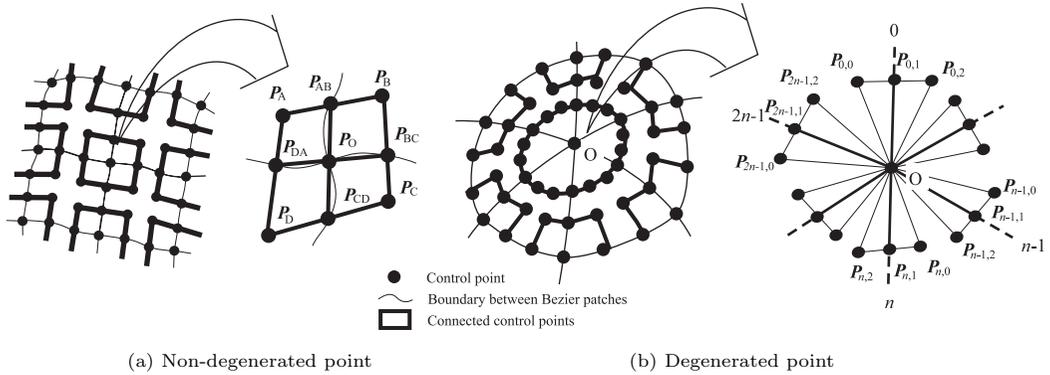


図 3 連結制御点群
Fig. 3 A set of connected control points at a non-degenerated point and a degenerated point.

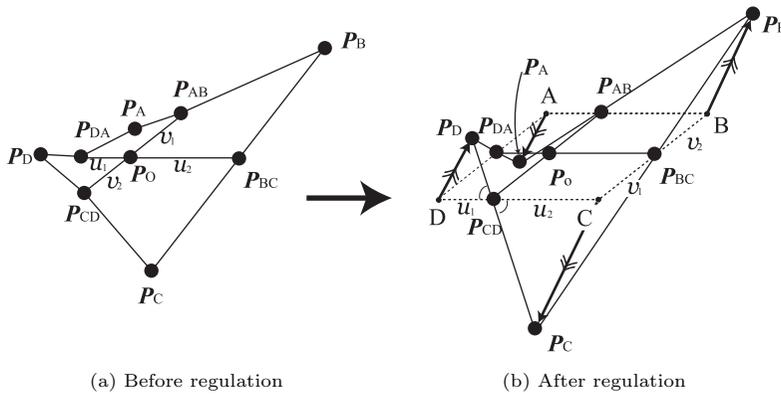


図 4 非縮退点における制御点補正
Fig. 4 Regulation of control points in the parameter space for a non-degenerated point.

要がある．双三次ベジエパッチの場合，パッチの頂点において強い制約がかかるが，パッチの頂点の制御点と隣接する制御点をひとまとめに処理すると都合がよい．本研究ではこれらの制御点群を連結制御点群¹⁵⁾と呼ぶ．

図 2 のようなデータ構造をとった場合，非縮退点では 2, 4 枚のパッチが接続され，縮退点では $2n$ 枚 ($n \geq 3$) のパッチが接続される (図 3)．そこで，パッチ間で G^1 連続を満たすために，以下のような 2 種類の手順で制御点補正を行う．

4.2 非縮退点での処理

連結制御点群においてパッチ間の連続性を G^1 にするためには図 4 (a) で実線で結ばれた隣り合う 3 つの制御点が同一直線上に存在する必要があるが，これだけでは制御点を一意に決定することは困難である．そこで本手法では下記の 3 段階の手順を用いて一意に決定した．

- (1) 曲面上に存在する P_O は固定．
- (2) パッチの稜線を決定する P_{BC}, P_O, P_{AB} と

- (3) 残りの制御点を調整．

(3) の制御点の決定には以下のような幾何的性質を利用する．(2) の手順までに P_{BC}, P_O, P_{AB} と P_{CD}, P_O, P_{DA} が同一直線上に存在し，これらによって構成される平行四辺形格子の 4 頂点を A, B, C, D とする．そして $\overrightarrow{AP_A}, \overrightarrow{BP_B}, \overrightarrow{CP_C}, \overrightarrow{DP_D}$ の各ベクトルが互いに平行になるという拘束条件を付けた場合， P_A, P_B, P_C, P_D を一意に決定することが可能である．このとき $\overrightarrow{AP_A}, \overrightarrow{CP_C}$ のノルムの和と $\overrightarrow{BP_B}, \overrightarrow{DP_D}$ のノルムの和は平行四辺形の辺の内分係数 u_1, u_2, v_1, v_2 (図 4) によって以下のように決定できる．すなわち，

$$k_1 \overrightarrow{AP_A} = k_2 \overrightarrow{BP_B} = k_3 \overrightarrow{CP_C} = k_4 \overrightarrow{DP_D} \quad (k_i: \text{任意定数})$$

$$\frac{|\overrightarrow{AP_A}| + |\overrightarrow{CP_C}|}{|\overrightarrow{BP_B}| + |\overrightarrow{DP_D}|} = \frac{u_1 v_2 + v_1 u_2}{u_1 v_1 + u_2 v_2}$$

という幾何的性質を利用して，以下の手順で調整を行う．以下の手順において， $\text{unit}(x)$ はベクトル x と同じ方向を持つ単位ベクトルを表す．

$$\text{unit}(x) = \frac{x}{|x|} \quad (x \neq 0)$$

【補正処理手順——非縮退点の場合】

- (1) 図 4 において，パッチの境界線上の制御点間のベクトル $\overrightarrow{P_{DA}P_O}$ ， $\overrightarrow{P_O P_{BC}}$ ， $\overrightarrow{P_O P_{AB}}$ ， $\overrightarrow{P_{CD}P_O}$ とそのノルムを計算する．

$$\begin{aligned} u_1 &= |\overrightarrow{P_{DA}P_O}| \\ u_2 &= |\overrightarrow{P_O P_{BC}}| \\ v_1 &= |\overrightarrow{P_O P_{AB}}| \\ v_2 &= |\overrightarrow{P_{CD}P_O}| \end{aligned}$$

- (2) $\overrightarrow{P_{DA}P_O}$ ， $\overrightarrow{P_O P_{BC}}$ と $\overrightarrow{P_O P_{AB}}$ ， $\overrightarrow{P_{CD}P_O}$ の単位平均ベクトル $\overline{u'}$ ， $\overline{v'}$ を計算する．

$$\begin{aligned} \overline{u'} &= \text{unit}(\overrightarrow{P_{DA}P_O} + \overrightarrow{P_O P_{BC}}) \\ \overline{v'} &= \text{unit}(\overrightarrow{P_O P_{AB}} + \overrightarrow{P_{CD}P_O}) \end{aligned}$$

- (3) 連結制御点群の中央の点 P_O を固定して，以下の式を用いて，制御点 P_O ， P_{AB} ， P_{BC} ， P_{CD} ， P_{DA} を再配置する．

$$\begin{aligned} P_{AB} &= P_O - v_1 \overline{v'} \\ P_{BC} &= P_O + u_2 \overline{u'} \\ P_{CD} &= P_O + v_2 \overline{v'} \\ P_{DA} &= P_O - u_1 \overline{u'} \end{aligned}$$

それを基に構成できる平行四辺形の四頂点を A，B，C，D とする．

- (4) $\overrightarrow{AP_A}$ ， $\overrightarrow{CP_C}$ ， $\overrightarrow{P_D D}$ ， $\overrightarrow{P_B B}$ の単位平均ベクトル \overline{p} を計算する．

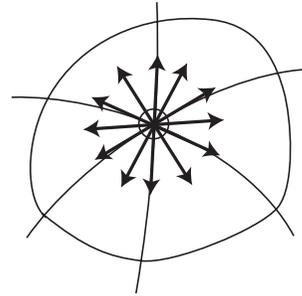
$$\overline{p} = \text{unit}(\overrightarrow{AP_A} + \overrightarrow{CP_C} + \overrightarrow{P_D D} + \overrightarrow{P_B B})$$

- (5) $\overrightarrow{AP_A}$ ， $\overrightarrow{CP_C}$ ， $\overrightarrow{P_D D}$ ， $\overrightarrow{P_B B}$ とのノルムの和 n を計算する．

$$\overline{n} = (|\overrightarrow{AP_A}| + |\overrightarrow{CP_C}| + |\overrightarrow{P_D D}| + |\overrightarrow{P_B B}|)$$

- (6) (5) で求められたノルム \overline{n} と u_1 ， u_2 ， v_1 ， v_2 を用いて新たな $\overrightarrow{AP_A}$ と $\overrightarrow{CP_C}$ のノルムを計算し，(4) で求められた単位平均ベクトルにより制御点 P_A ， P_C の再配置を行う．

$$\begin{aligned} P_A &= A + \frac{u_1 v_2}{(u_1 + u_2)(v_1 + v_2)} n \overline{p} \\ P_C &= C + \frac{u_2 v_1}{(u_1 + u_2)(v_1 + v_2)} n \overline{p} \end{aligned}$$



○ Degenerated point P_O
 ~ Boundary line of Bezier patch

図 5 縮退点における連続条件

Fig. 5 The continuous condition at a degenerated point.

- (7) 同様に制御点 P_B ， P_D の再配置を行う．

$$\begin{aligned} P_B &= B - \frac{u_2 v_2}{(u_1 + u_2)(v_1 + v_2)} n \overline{p} \\ P_D &= D - \frac{u_1 v_1}{(u_1 + u_2)(v_1 + v_2)} n \overline{p} \end{aligned}$$

4.3 縮退点での処理

縮退点における連続条件として，図 5 のように縮退点 P_O においてあらゆる方向の微分ベクトルが同一平面（接平面）に乗っている必要がある．たとえば $2n$ 枚のパッチが縮退点で接続されている図 3(b) の場合， $P_{k,l}$ と $P_{n+k,l}$ （ただし， $0 \leq k \leq (n-1)$ ， $0 \leq l \leq 2$ ）と P_O がそれぞれ同一直線上にある必要がある．また， k 番目と $n+k$ 番目の境界線において連続性を保証するためには $P_{k,0}$ ， $P_{k,1}$ ， $P_{k,2}$ と $P_{n+k,0}$ ， $P_{n+k,1}$ ， $P_{n+k,2}$ が同一直線上にある必要がある．つまり， $2n$ 枚のパッチが縮退点において G^1 連続が満たされる場合，図 6 のように k 番目と $n+k$ 番目のパッチの境界線， $P_{k,0}$ ， $P_{k,1}$ ， $P_{k,2}$ ，および $P_{n+k,0}$ ， $P_{n+k,1}$ ， $P_{n+k,2}$ が同一直線上かつ， $\triangle OP_{k,0}P_{k,1}$ ， $\triangle OP_{n+k,0}P_{n+k,1}$ （図中印）および， $\triangle OP_{k,2}P_{k,1}$ ， $\triangle OP_{n+k,2}P_{n+k,1}$ （図中印）が相似になる．この幾何的性質を用いて以下のような手順で調整を行う．

【補正処理手順——縮退点の場合】

- (1) 図 6 のように k 番目と $n+k$ 番目の境界線上の制御点およびそれに隣接した制御点に注目する．

- (2) 縮退点 P_O を基準としたパッチ境界線上の点を示すベクトルのノルム v_1 ， v_2 を計算する．

$$\begin{aligned} v_1 &= |\overrightarrow{OP_{k,1}}| \\ v_2 &= |\overrightarrow{OP_{n+k,1}}| \end{aligned}$$

- (3) $\overrightarrow{P_{k,1}O}$ ， $\overrightarrow{OP_{n+k,1}}$ の単位平均ベクトル \overline{v} を計

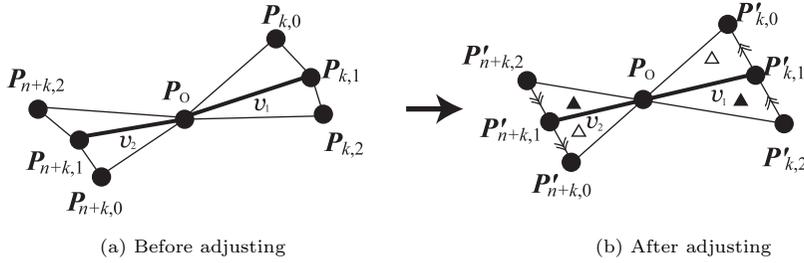


図 6 縮退点における制御点補正

Fig. 6 Regulation of control points in the parameter space for a degenerated point.

算して新たに $OP'_{k,1}$ と $OP'_{n+k,1}$ を決定する .

$$\begin{aligned} \bar{v} &= \text{unit}(\overrightarrow{P_{k,1}O} + \overrightarrow{OP_{n+k,1}}) \\ P'_{k,1} &= P_O - v_1 \bar{v} \\ P'_{n+k,1} &= P_O + v_2 \bar{v} \end{aligned}$$

(4) $\overrightarrow{P_{k,0}P_{k,1}}, \overrightarrow{P_{k,1}P_{k,2}}, \overrightarrow{P_{n+k,1}P_{n+k,0}}, \overrightarrow{P_{n+k,2}P_{n+k,1}}$ の単位平均ベクトル \bar{u} を計算する .

$$\bar{u} = \text{unit}(\overrightarrow{P_{k,0}P_{k,1}} + \overrightarrow{P_{k,1}P_{k,2}} + \overrightarrow{P_{n+k,1}P_{n+k,0}} + \overrightarrow{P_{n+k,2}P_{n+k,1}})$$

(5) $\overrightarrow{P_{k,0}P_{k,1}}, \overrightarrow{P_{n+k,1}P_{n+k,0}}$ のノルムの和 u_1 を v_1, v_2 で内分して新たな $\overrightarrow{P_{k,0}P_{k,1}}, \overrightarrow{P_{n+k,1}P_{n+k,0}}$ のノルムにより, 制御点 $P'_{k,0}, P'_{n+k,0}$ を再配置する .

$$\begin{aligned} u_1 &= |\overrightarrow{P_{k,0}P_{k,1}}| + |\overrightarrow{P_{n+k,1}P_{n+k,0}}| \\ P'_{k,0} &= P'_{k,1} - \frac{v_1}{v_1 + v_2} u_1 \bar{u} \end{aligned}$$

$$P'_{n+k,0} = P_{n+k,1} + \frac{v_2}{v_1 + v_2} u_1 \bar{u}$$

(6) (5) と同様にして, 制御点 $P'_{k,2}, P'_{n+k,2}$ を再配置する .

$$u_1 = |\overrightarrow{P_{k,1}P_{k,2}}| + |\overrightarrow{P_{n+k,2}P_{n+k,1}}|$$

$$P'_{k,2} = P'_{k,1} + \frac{v_1}{v_1 + v_2} u_2 \bar{u}$$

$$P'_{n+k,2} = P'_{n+k,1} - \frac{v_2}{v_1 + v_2} u_1 \bar{u}$$

(7) 手順 (1) ~ (6) を $n - 1$ 番目の境界線まで繰り返す .

5. 形状関数

現実世界で粘土のような物体を変形する場合, 様々な変形方式が考えられるが, “押す” という操作が基本となることが多い . そこで本研究では, まず指で押した場合の変形モデルと, その応用例として指で押し

たまま指を動かした場合の変形モデル “線を引く” を検討する . 指を使って粘土を変形させる場合, 指と仮想物体との間の様々な衝突状態によって変形形状が変わる . 以下で説明する形状関数はユーザが手を動かしたときの指の動きから変形形状を決定するための関数である . ここで示す形状関数を理想形状として, 2.2 節で述べた Bernstein 逆写像¹⁵⁾ により各々のパッチは変形される .

5.1 形状関数 “押す”

この形状関数は, 指を指先方向にまっすぐに移動して物体に衝突し, へこむ現象をモデル化したものであり, 文献 15) で検討した形状関数を利用する (図 7(a)) . 以下は本形状関数のパラメータである .

- M : 仮想指の移動ベクトル
- r_f : 仮想指の太さ
- d : サンプル点の移動量
- r : サンプル点 P から仮想指までの距離

移動量 d および変形領域は式 (3) で表される .

$$d = ar^2 - b \quad (0 \leq r \leq \sqrt{\frac{b}{a}}) \quad (3)$$

$$a = \frac{|M|}{r_f^2} \quad b = |M|$$

5.2 形状関数 “線を引く”

形状関数 “押す” を基礎として指を移動したときの軌跡を折れ線近似することにより指でなぞった状態を再現する . ここでは折れ線 1 区間の処理を以下の形状関数に基づいて行う .

- L_f : 仮想指の中心線ベクトル
- M_f : データグロブを動かすことにより得られる指のストローク
- r : サンプル点 P から指の軌跡面までの距離
- r_f : 仮想指の太さ
- d : サンプル点の移動量

ここで, L_f, M_f で構成される有限平面 S_f を指の軌跡面とする . また, $r \leq r_f$ を変形領域とした . 変形領域内のサンプル点は L_f に平行に r, d, z をロー

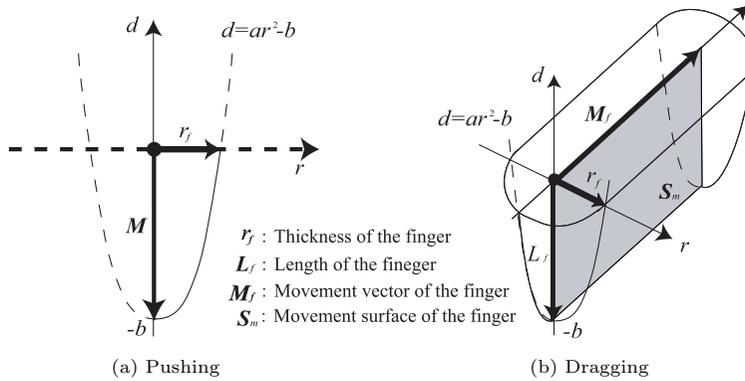


図 7 形状関数
Fig. 7 Shape functions.

カル座標とした図 7 (b) の形状へ移動される。また各サンプル点の移動量 d は式 (4) で表される。

$$d = ar^2 - b \quad (0 \leq r \leq r_f) \quad (4)$$

$$b = |L_f|, \quad a = \frac{b}{r_f^2}, \quad r_f = \sqrt{\frac{b}{a}}$$

6. 実験

4 章, 5 章で検討した手法により, 双三次ベジエ曲面がどのように変形されるかについての実験を行った。以下の検討では距離の単位として [side] を用いる。これは実験に用いる正方形パッチの 1 辺の長さに相当する。本実験では変形前の形状 (初期曲面) として 1 辺が 1 [side] の正方形の平面パッチを縦横 10 枚ずつの 100 個を並べた有限平面と縦 8 枚横 4 枚の 32 個で構成される半径 3 [side] の球をそれぞれ仮想空間内の位置 $z = 0$ に配置した。

図 8, 図 9 は非縮退点と縮退点それぞれに指先移動距離パラメータ ((b)-(e)) や指の太さパラメータ ((f)-(i)) を変えて形状関数 “押す” を適用した場合の変形結果である。それぞれの図は 2 段構成になっており, 上段は仮想物体に対し与えられたパラメータ (単位: side) で押してへこんだ様子を示しており, 下段は指先移動ベクトルを押すとは反対方向に向けることにより “引く” という動作を実現させて盛り上がる様子を示したものである。黄線はパッチの境界を示す。図 8 ((j)-(m)) は 1 点を押してからその近くの点を押すことにより溝が生成されていく様子を示したものである。また, 図 9 ((j)-(m)) は縮退点を含む球の様々な地点を押した様子である。いずれの場合も良好な連続性を持つ変形結果が得られていることが分かる。また, 制御点調整手順における従来手法¹⁵⁾ と改良手法での変形結果の比較も行った。図 10 (a) は制御点調

整前の形状, (b), (c) は制御点調整後の形状を示している。(b) は (c) より制御点調整時の拘束条件が厳しいため変形箇所の周りが不自然に盛り上がりしてしまうなど形状の変化が確認できる。

なお, 制御点調整前後でサンプル点の移動量をユークリッド距離で表すことにより, 理想形状からのずれの検討も行った。形状関数 “押す” を用い, 有限平面を押した場合のずれの分布の一例を図 11 に示す。図は座標 (0.5, 0.5, 0.0) を $r_f=1.25$ [side] の指で押した場合のずれを表したものである。この図では, 指先の移動ベクトルから各サンプル点までの距離を横軸に, ずれの距離を縦軸とした。同じ指の太さで 30 例によって評価を行った。まず, 総数 160,000 個のサンプル点のうち Bernstein 逆写像で移動したサンプル点数の平均は 80 となった。これに対し, 従来の制御点調整手法では, ずれたサンプル点数は平均 208, ずれの平均は 0.10 [side] であった。また, ずれが 0.0 ~ 0.15 [side] 生じたサンプル点はずれたサンプル点に対し 79.7% であることも分かった。一方, 改良手法では, ずれたサンプル点の数は平均 115 個, ずれの平均は 0.07 [side], ずれが 0.0 ~ 0.15 [side] 生じたサンプル点は, ずれたサンプル点の 86.1% であることが分かった。この比較結果と図 10 より, 従来手法の制御点調整に比べて改良手法の方が制御点調整による形状変形が少ないことが視覚的にも数値的にも確認された。なお, 計算時間に関しては, 100 枚のパッチで構成される曲面の場合, 1 回押すためにかかる処理時間は R10,000, 500 MHz のプロセッサを使用した場合 30 [msec] であり, ビデオレートによるリアルタイム処理への応用が可能であることも分かった。

そこで, この変形過程を簡単なインタラクティブシステムへ組み込んだ。図 12 より三次元位置センサからは手の位置データを, サイバークロップからは指の

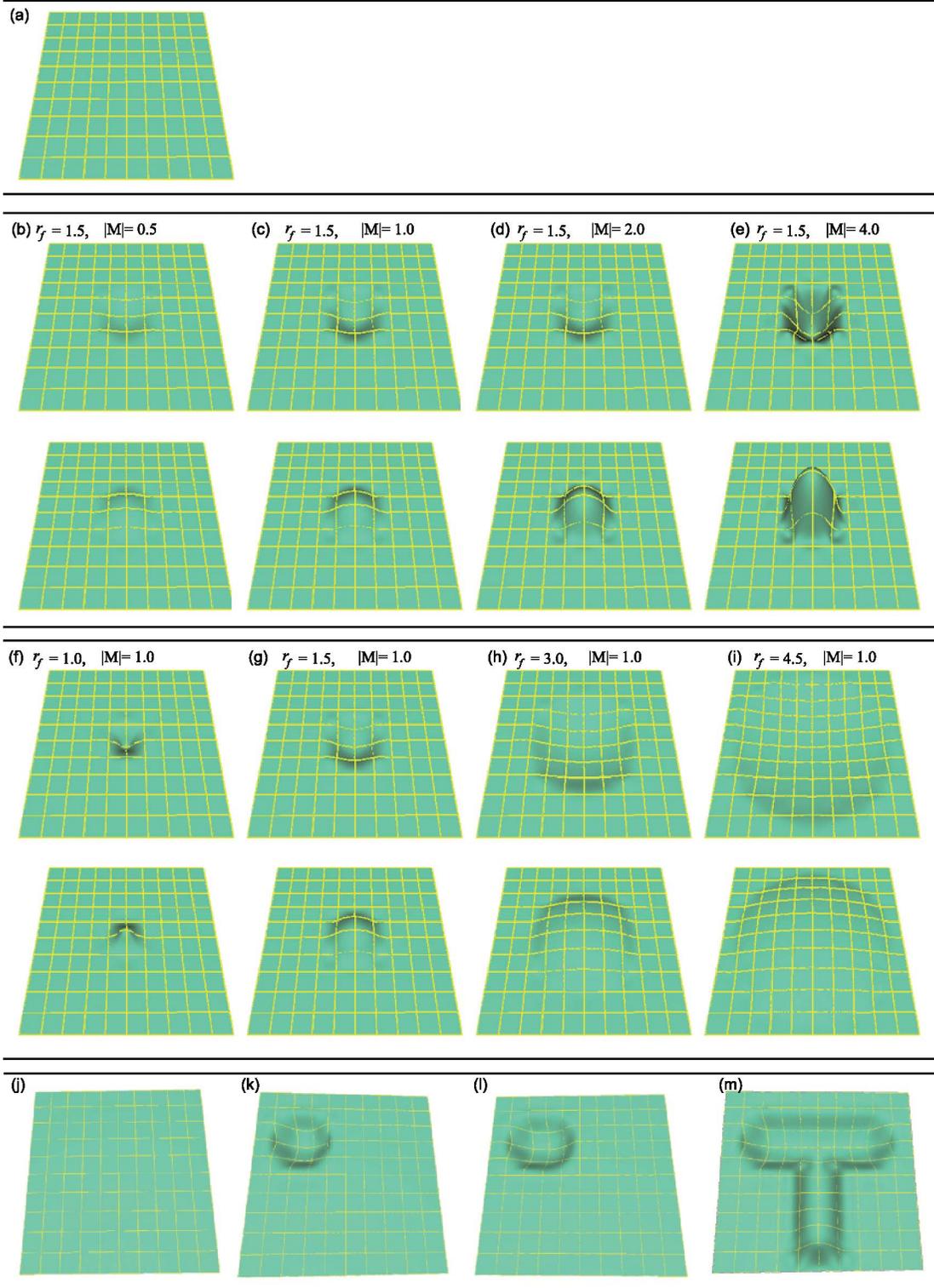


図 8 非縮退点における様々な条件下での変形状 “押す”

Fig. 8 Examples of pushing deformation under various conditions for non-degenerated points.

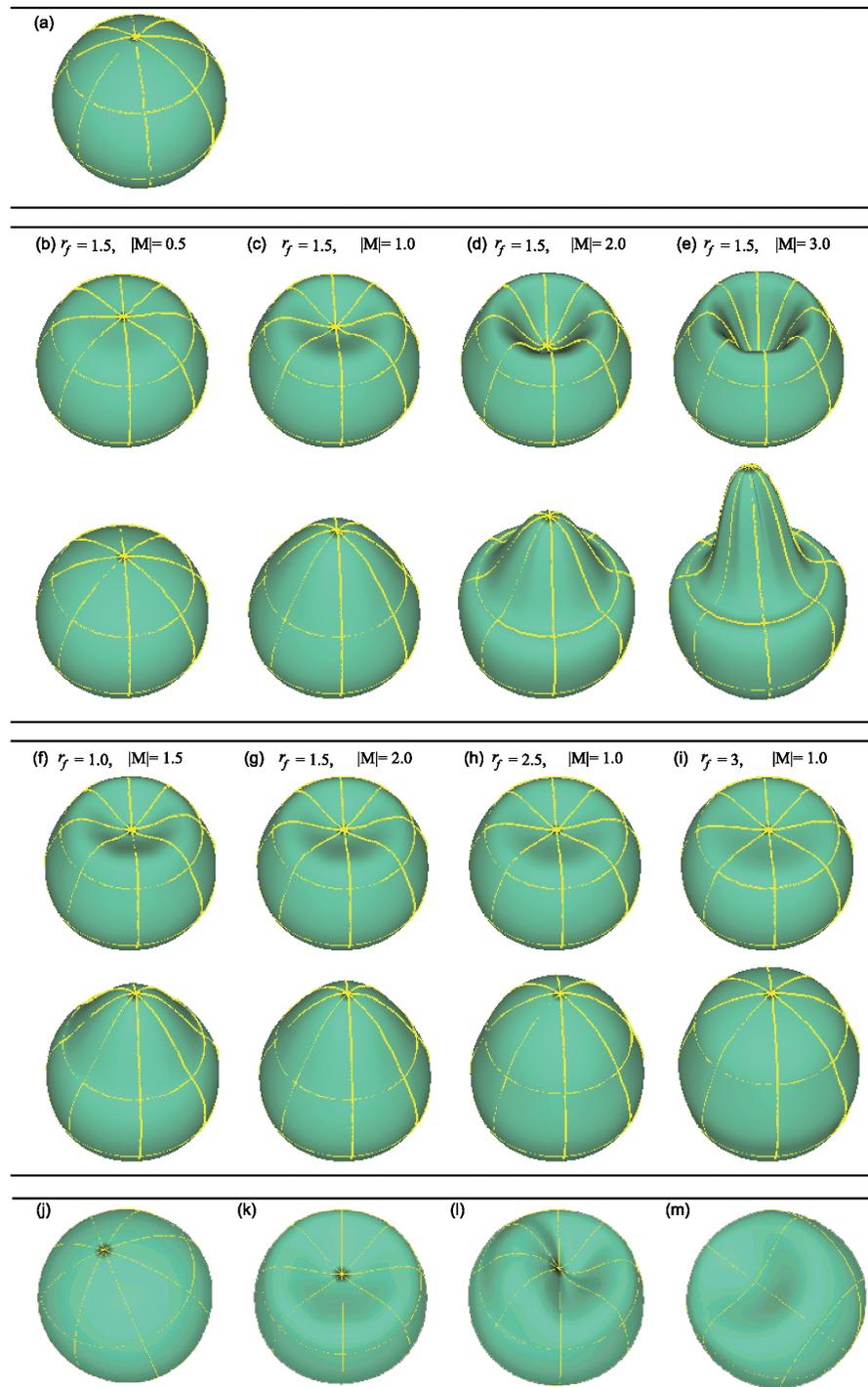
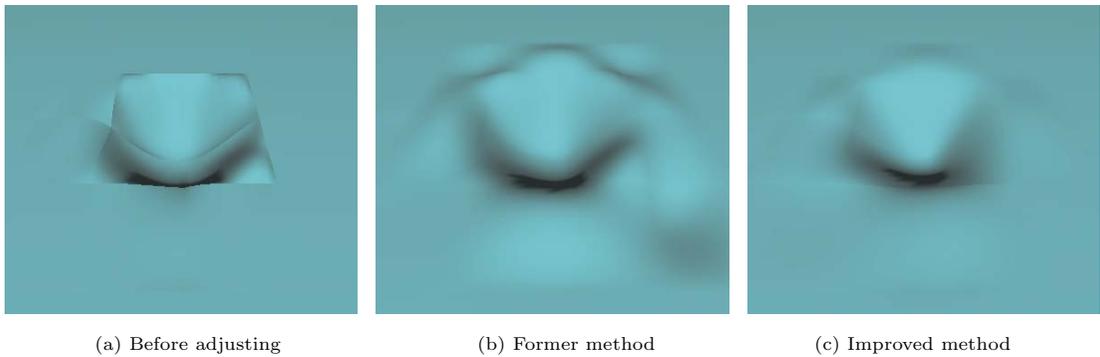


図 9 縮退点における様々な条件下での変形形状 “押す”

Fig. 9 Examples of pushing deformation under various conditions for a degenerated point.



(a) Before adjusting (b) Former method (c) Improved method

図 10 従来手法と改良手法との形状の比較

Fig. 10 Comparison of deformed shapes between the former method and the improved method.

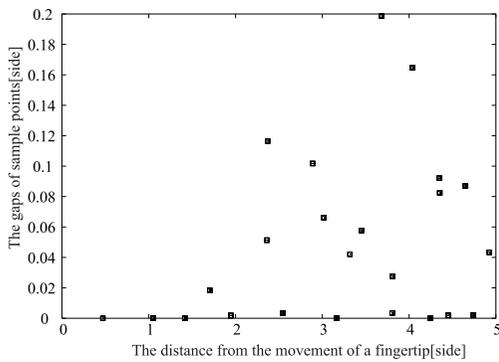


図 11 制御点調整前後におけるサンプル点のずれの分布

Fig. 11 Distribution of gap sides between sample points before and after regulating control points.

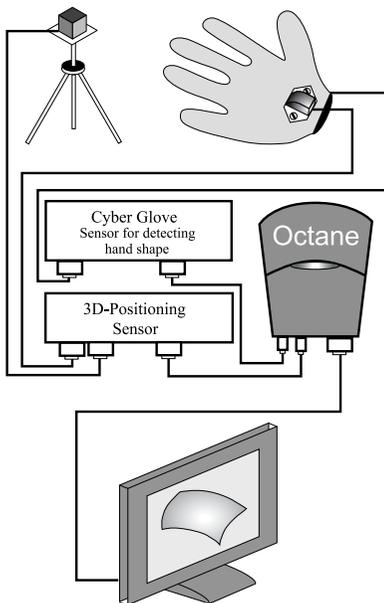
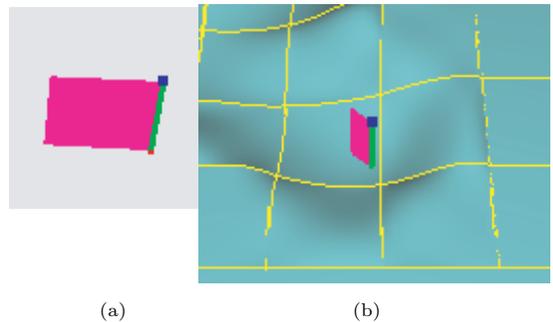


図 12 インタラクティブ変形システム

Fig. 12 The system for interactive deformation.



(a) (b)

図 13 仮想指の中心線とその軌跡面

Fig. 13 The virtual finger and its movement cross section.

角度データを得て、そのデータをもとに仮想空間に仮想手を表示して仮想物体を変形可能である。そして、新たに定義した“線を引く”という形状関数を用いて変形を試みた。図 13 (a) は仮想指の中心線とその軌跡面を表しており、同図 (b) は変形時の様子を表している。図 14 は、実際に変形していく様子を時系列に並べたものである。仮想指の移動とともに曲面が変形していく様子が観測できる。本システムによる作品例を図 15 に示す。これは 128 パッチで構成された試験管のような初期形状から 152 回の変形操作によって生成された。

7. むすび

本研究では文献 15) で述べた直観的モデリング手法を改良し、インタラクティブなシステムへの応用のための基礎検討を行った。双三次ベジエパッチは数理的に素直で単純である一方、接続点において強い制約がかかるため、この問題を解消するようなデータ構造を示した。また、変形過程における制御点調整手法を改良し、閉じた物体でも変形可能であることを示した。このとき発生するずれは、従来手法では平均

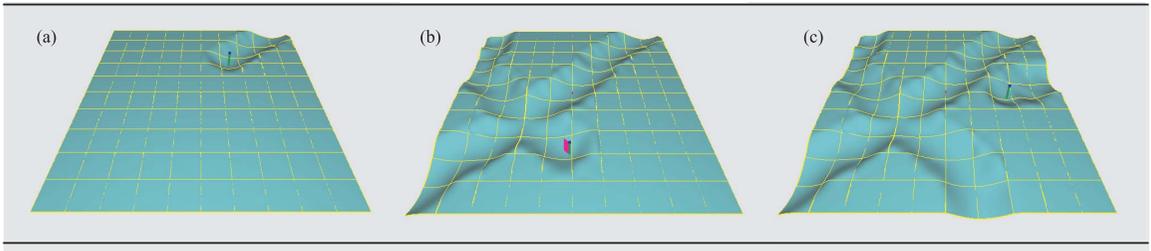


図 14 変形例

Fig. 14 Examples of dragging deformation.



図 15 作品例「壺」

Fig. 15 An example of deformation; 'a pot'.

0.10 [side], 改良手法では 0.07 [side] であることが分かり、視覚的にも数値的にも改良されたことが確認された。さらに新たな形状関数を定義し、三次元位置センサとデータグローブを用いたインタラクティブな自由形状モデリングのプロトタイプシステムを構成した。

現システムではユーザは仮想空間内で仮想指を用いることにより曲面を触ることは可能であるが、実際にユーザの手には曲面の触感がまったく伝わらないため、ユーザが曲面を触ったかどうかはユーザが画面を目視することにより形状が変形されたかどうかで判定せざるをえない。この問題に対する最も直接的な解決法は力覚フィードバックの導入であるが、現時点では全指に力覚フィードバックを対応させることは困難である。そこで、ユーザが仮想物体に触った場合に、仮想物体の色が変化したり音程が変化したりするなど、ユーザが物体を触ったかどうかを視覚、聴覚などを介して検出する方法を考えている。また、現在の変形手法では変形時に全パッチにおいて処理を行うためパッチ枚数に比例して変形処理時間がかかる。パッチ枚数の多い物体への応用を考えた場合、変形処理の高速化が必要となる。そのために、衝突したパッチと変形の及ぶパッチだけを選択するような局所変形手法を検討

中である。なお、本論文で提案したパッチ間接続の拘束条件は最適とは言えない。本研究の目的に合致した拘束条件の検討も重要な課題である。

謝辞 日頃熱心にご討論をいただく鳥脇研究室、岡田研究室の皆様へ感謝する。なお、本研究の一部は文部科学省および日本学術振興会科研費による。

参 考 文 献

- 1) 水野慎士, 岡田 稔, 鳥脇純一郎: 仮想彫刻—仮想空間における対話型形状生成の一手法, 情報処理学会論文誌, Vol.38, No.12, pp.2509-2516 (1997).
- 2) Mizuno, S., Okada, M. and Toriwaki, J.: An Interactive Designing System with Virtual Sculpting and Virtual Woodcut Printing, *Computer Graphics Forum: J. of the Eurographics Assoc.*, Vol.18, No.3, pp.184-193, 409 (1999).
- 3) Kawai, Y., Higashiyama, Y., Koyama, K. and Okada, M.: A Fundamental Study on a Natural-Language-Based 3D CG Modeling, *Proc. IEEE-SMC '99*, Vol.V, pp.714-719 (1999).
- 4) 河合善之, 岡田 稔: 自然言語による幾何形状モデリングと画像合成の一手法, 情報処理学会論文誌, Vol.42, No.5, pp.1161-1169 (2001).
- 5) 小田泰行, 村岡一信, 千葉則茂: 仮想粘土の粒子ベース・ビジュアルシミュレーション, 情報処理学会論文誌, Vol.42, No.5, pp.1142-1150 (2001).
- 6) Arata, H., Takai, Y., Takai, N. and Yamamoto, T.: Free-form Shape Modeling by 3D Cellular Automata, *Int'l Conf. on Shape Modeling and Applications (SMI'99)* (1999).
- 7) Igarashi, T., Matsuoka, S. and Tanaka, H.: Teddy: A Sketching Interface for 3D Freeform Design, *Proc. ACM SIGGRAPH'99*, pp.409-416 (1999).
- 8) 五十嵐健夫, 中嶋孝行, 小寺敏正, 田中英彦: 手書きスケッチによる自動車のボディ形状デザイン, 画像電子学会/情報処理学会 Visual Computing/グラフィクスと CAD 合同シンポジウム, pp.75-80 (1999).

- 9) 松田浩一, 近藤邦雄, 木村文彦: スケッチ情報を利用した3次元形状制御法, 情報処理学会研究報告, 99-CG-96, pp.55-60 (1999).
- 10) 三浦貴宏, 徐 崢, 近藤邦雄: 細分割曲面のメッシュ削減のための分割制御手法, 日本図学会図学研究, Vol.33, No.2, pp.37-44 (1999).
- 11) 鈴木宏正: 自由形状を表現するサブディビジョンサーフェスマデリング, 日本機械学会誌, Vol.104, No.989, p.239 (2001).
- 12) 山口 泰, 寺沢幹雄: 次世代ネットワークのための形状情報と実写画像情報の融合処理技術—細分割曲面の評価法について, 電気通信普及財団, 研究調査報告書, No.16, pp.631-637 (2001).
- 13) 山下樹里, 福井幸男, 横井浩史, 下条 誠: 3D-DDM: 三次元 B-Spline 自由曲面の直接変形手法, 電気学会論文誌, Vol. 115-C, No.2, pp.253-260 (1996).
- 14) 前野 輝, 岡田 稔, 鳥脇純一郎: 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, 情報処理学会研究報告, Vol.99, No.19, GCAD 99-CG-94, pp.7-12 (1999).
- 15) 前野 輝, 岡田 稔, 鳥脇純一郎: 形状関数を用いた双三次ベジエ曲面の直観的変形手法, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.5, No.1, pp. 811-818 (2000).
- 16) 杉原厚吉: グラフィックスの数理, 共立出版 (1995).
- 17) Watt, A. and Policarpo, F.: *The Computer Image*, Addison-Wesley (1998).

(平成 14 年 8 月 28 日受付)

(平成 15 年 11 月 4 日採録)



前野 輝 (正会員)

昭和 46 年生。平成 8 年名古屋大学工学部電子情報学科卒業。平成 10 年同大学大学院博士課程前期課程(電子情報学専攻)修了。平成 13 年同大学院博士後期課程(情報工学専攻)

単位取得後退学。現在, 松下電器産業株式会社パナソニックシステムソリューションズ社。電子情報通信学会会員。



岡田 稔 (正会員)

昭和 59 年名古屋工業大学工学部電気工学科卒業。平成元年名古屋大学大学院博士課程後期課程情報工学専攻修了。工学博士。昭和 63 年度・平成元年度日本学術振興会特別研究員,

平成 2 年名古屋大学情報処理教育センター助手, 平成 5 年同助教授, 平成 10 年同大学大学院工学研究科情報工学専攻助教授, 平成 11 年中部大学工学部教授を経て, 平成 15 年 4 月早稲田大学大学院情報生産システム研究科教授, 現在に至る。平成 7 年より 1 年間に, 米国ミシガン大学客員准教授。画像とパターンの認識・理解, 計算幾何学, 画像合成, 知能メディア情報処理の基礎理論と応用に関する研究に従事。電子情報通信学会, 画像電子学会, ACM SIGGRAPH, IEEE Computer Society (Senior), Eurographics 各会員。平成 4 年度情報処理学会研究賞, 平成 6 年度市村賞学術貢献賞, 平成 12 年度情報処理学会優秀教育賞各受賞。著書『C によるプログラミング演習』(近代科学社), 『情報科学基礎論』(朝倉書店), 『インターネット時代のコンピュータ活用法』(コロナ社)等。



鳥脇純一郎 (正会員)

昭和 14 年生。昭和 37 年名古屋大学工学部電子工学科卒業。昭和 42 年同大学大学院博士課程修了。同年 4 月同大学工学部助手。以後, 昭和 45 年同助教授, 昭和 49 年同大学大型計算機センター助教授, 昭和 55 年豊橋技術科学大学情報工学系教授, 昭和 58 年名古屋大学工学部電子工学科教授を経て, 昭和 60 年 4 月より同大学工学部情報工学科(現大学院工学研究科情報工学専攻)教授。

平成 15 年停年により退官。同年 4 月より中京大学情報科学部教授。工学博士。パターン認識, 画像処理, グラフィックス, および, それらの医学情報処理への応用に関する研究に従事。著書『画像理解のためのデジタル画像処理 [I], [II]』(昭晃堂), 『パターン情報処理の基礎』(朝倉書店), 『認識工学』(コロナ社), 『見えないイメージを見る』(共立出版), 『3次元デジタル画像処理』(昭晃堂), 『かたちの事典』(丸善, 共編著)。電子情報通信学会, 日本エムイー学会, 画像電子学会, 人工知能学会, コンピュータ支援画像診断学会, IEEE 各会員。