

直観的自由曲面変形方式に基づく 会話型モデリングシステムの構成法

An interactive and intuitive deformation system for free formed curved surface

前野 輝[†], 岡田 稔^{††}, 鳥脇 純一郎^{†††}

Kagayaki MAENO[†], Minoru OKADA^{††} and Jun-ichiro TORIWAKI^{†††}

[†] 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

^{††} 早稲田大学大学院情報生産システム研究科

^{†††} 中京大学情報科学部メディア科学科

[†] Panasonic System Solutions Company, Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.

^{††} Graduate School of Information, Production and Systems, Waseda University

^{†††} School of Computer and Cognitive Science, Chukyo University

[†] maeno.kagayaki@jp.panasonic.com, ^{††} mokada@waseda.jp, ^{†††} jtoriwak@scs.chukyo-u.ac.jp

アブストラクト: CG制作における形状モデリング過程では三面図は点や直線を仮想空間に数値的に正確に配置するための最もポピュラーかつ重要な道具であるが、これを利用して仮想物体の形状変形を行うためには特殊な技術と知識を必要とする。既に筆者らは形状創成過程におけるデザイナーの初期発想支援を目的とする、形状関数を用いた双三次ベジエ曲面の直観的変形方式を提案している。本論文では、この方式とつまみ判定機能を用いた会話型モデリングシステムの一構成法を示す。本システムでは、データグローブと三次元位置センサを用いてユーザの手の動きを入力し、つまみ判定機能を取り入れることによりユーザの意志が反映されるようなシステムを実現している。本システムのプロトタイプを実装し、いくつかの実験により実際に手で押ししたり引っ張ったりするような感覚で変形操作を行えることが確認された。

Abstract: *Orthographic views are a most popular and important tool for shape modeling in Computer Graphics, and a user can set points and lines with numerical accuracy with the views. However, its operations are not intuitive, and special technique and knowledge are required for users. Aiming supporting initial design process at shape modeling, we have proposed an intuitive deformation method using the deformation function for a bi-cubic Bezier surface. In this paper we propose an architecture of an interactive modeling system based on the method with a picking function. This system utilizes movement information from a data-glove and a 3D positioning tracker, and user's intention by the picking function. Experiments with a prototype system based on the method indicate that users can model virtual objects by touching a clayish object.*

キーワード: 双三次ベジエパッチ, 自由曲面モデリング, 形状関数, 仮想手, つまみ判定機能
Keywords: *Bi-cubic Bezier Patch, Free Formed Curved Surface, Deformation Function, Virtual Hand, Picking Function*

1 はじめに

CG制作における形状モデリングは仮想世界を構築する上で最も基礎的かつ重要な部分であり、今後ますます重要となる作業である。CADなどにおける形状モデリングツールは、形状に対する数値的正確性とともによりユーザに特殊な知識が要求され、その操作には多大な労力と慣れを必要とする。またデザイナーによる初期段階のプロトタイプ形状の設計(以下、初期形状創成という)などではコンピュータを使用せず紙によるデッサンが多用される。これは初期形状創成が特殊な技能と感性を要求されるものであり、それと同時にCADの専門的知識を併せ持つことが困難を伴うことも一因である。さて、現実世界で行われている木の切削、粘土の変形による造形作業は直観的でわかりやすい。このような作業感覚で形状モデリングを行うことが可能であれば、容易にデザイナーの発想、初期形状創成を具現化することが可能になる。また、ユーザは直観的な操作性を通して仮想世界の形状を触りながらその制作過程を楽しむことも可能であり、従来、特定のユーザにしか受け入れられなかった形状モデリングが多くの人々に受容されると考えられる。

このような直観的な操作性を重視するような形状創成に関する研究として、宮崎ら[1]は仮想空間内でポリゴンで表現された折り紙を折ることにより形状創成可能な方式の提案を行っている。水野らは、ユーザがマウスを用いて仮想空間内で彫刻操作によりプリミティブを切削して形状創成を行う仮想彫刻[2][3]を提案した。また、会話文指示により初期形状創成が可能な河合らによるDo[4][5]も直観的な操作を目的としたものであるがユーザの曖昧な表現に関する解釈が一義的でないという自然言語固有の問題が存在する。一方、Igarashiらは二次元の画面に描かれた形状を三次元化するTeddy[6]を開発した。これは直観的に形状創成を行うことが可能であるが、トポロジ的な強い拘束を受ける。

本研究ではデザイナーの初期形状創成のための発想支援システムとして、ユーザがパラメトリック曲面を指で押したり引っ張ったりする単純で直観的な動作でラフな形状を創成できるようなシステムを目指している。このための基礎検討として筆者らは文献[7][8]でユーザが指の太さと押し込みの深さを与えると、予め定義された形状関数を利用して変形後の形状が決定し、Bernstein逆写像を利用してパッチ毎の制御点が決定、パッチ間の制御点の調整が行われるような変形手法の検討を行った。本論文では、これらの変形手法に現実世界での直観的な操作を取り込み、利用者にとってわかりやすいユーザインタフェースを提供するシステムの検討を行う。現実世界の手の動きを仮想空間内に取り込むためには、手の絶対位置と手及び指の姿勢を数値データとして取り込む必要がある。このようなユーザの指の動きを入力するデバイスとしてデータグローブ、手の絶対位置と指の姿勢を入力する装置として三次元位置センサが開発されている。これらのデバイスを利用した仮想空間内における物体操作に関する研究としては舟橋らの仮想手による物体操作モデル[12][13]や田中らによるポリゴンモデルで表現された仮想物体の力覚を伴った変形・切断操作による形状変形システム[9][10][11]が存在する。本論文で提案するシステムは文献[7][8]で述べた形状関数を用いたベジエ曲面の変形手法を利用し、力覚フィードバック機構を持たないデータグローブと三次元位置センサを用い、ユーザがディスプレイに表示された仮想手を見ながらつまみ判定機能を導入することにより直観的な形状変形・形状創成が行えることを目的とする。

2 対話型形状変形システム

2.1 対話型形状変形システムの概要

現実世界で粘土のような物体を変形する場合、ユーザと物体との間には主として、(1)

ユーザの手と物体との接触，(2) ユーザの意思による変形箇所の位置決め，(3) 押し方等による形状決定，の三種類の相互作用が存在すると考えられる．仮想空間内でこれらの作用を実装する場合には，各々に対応した以下の三種類の内容を検討する必要がある．

- 仮想手と仮想物体との衝突判定
- 変形を実行するかどうかの意志確認
- 変形パラメータの決定

上記対話内容を実現するためにはユーザの手の姿勢や位置がわかるだけでなく，五指に曲面の感触が得られるような力覚フィードバック機構や，ユーザの意志確認が可能であるような情報伝達機構が必要である．このような機能を持つデバイスとしてハプティック・ディスプレイ [14] やデータグローブ等が挙げられる．このうちハプティック・ディスプレイは仮想空間内の形状から現実世界の手に触感を与える力覚フィードバックが可能である．しかし，このデバイスは特定の指にのみ力覚を伝

達することが可能ではあるが，五指それぞれに独立に力覚を伝達することは困難またはコスト高である．一方，データグローブは力覚フィードバック機構は持たないものの五指の姿勢を取り込むことが可能である．そして手の位置をトラッキングする装置として三次元位置センサが利用できれば，2つのデバイスを組み合わせて仮想空間内で手とその姿勢を表示する事が可能となる．本研究では，五指のジェスチャを用いて曲面を変形することを想定しており，変形操作に関して五指を使用可能なデータグローブと三次元位置センサを利用することにした．ただし，この場合変形時にユーザが曲面から得られる触感が存在しないため，その代替機能としてユーザが曲面に触った場合に曲面の色が変化するような，視覚で曲面に触ったかどうかを知覚できる機能を検討した．具体的な対話操作の流れは図1，その概略は図2のようになる．ユーザは手にデータグローブと三次元位置センサを装着する．システムは手の姿勢及び位置を 30[msec] 毎に計算機に取り込み，仮想空間内に仮想手

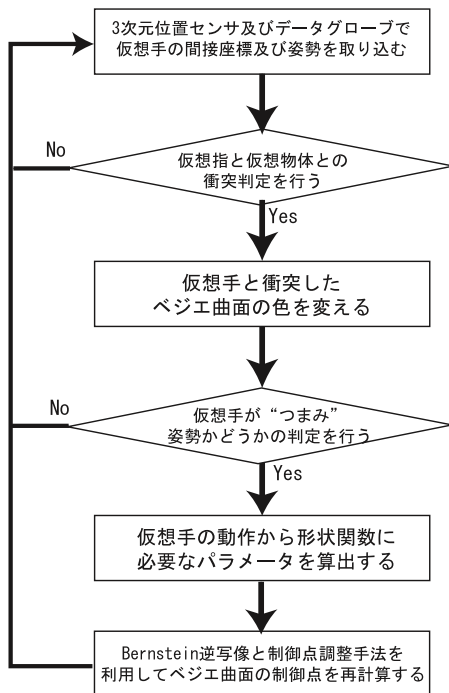


図 1: 対話操作過程

Fig. 1: Process of interactive operation.

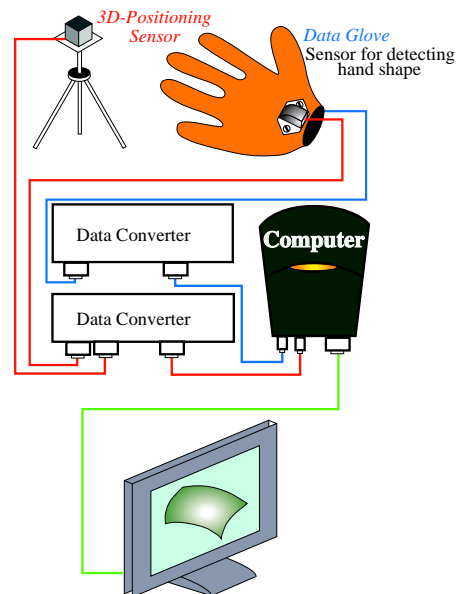


図 2: 対話型形状変形システム

Fig. 2: An overview of the interactive deformation system.

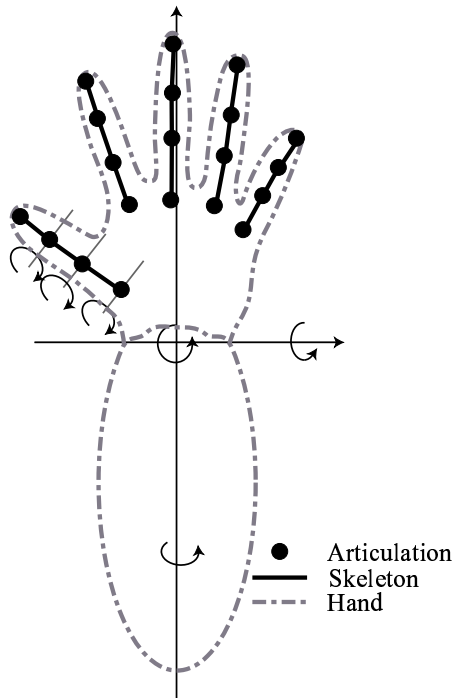


図 3: スケルトンによる仮想手の表現
Fig. 3: A Virtual hand expressed by skeleton.

を表示することが可能である。ユーザはディスプレイに表示された手を見ながら手を動かし、曲面と仮想手との対話を行う。衝突判定に関する具体的手法は 2.2 で述べるが、仮想物体の色の変化で仮想手と仮想物体との衝突状態を確認できる。また、現実世界では物体と接触した場合、この物体が変形してしまうが、これをそのまま仮想空間で実現した場合、ユーザの意図しない指の動きに対しても形状変形が発生してしまうという問題が発生する。そこで、接触した後のユーザの手の姿勢に応じて、変形形状と変形意思の確認を行うことにした。具体的には、ユーザが変形を行うかどうかを意志確認を行うためのつまみ判定機能 (2.3) を用意することにより実現した。

2.2 衝突判定機能

本研究での仮想手は図 3 に示すような 15 自由度のスケルトンで表現される。スケルトンは 15 本の線分からなるスケルトンセグメントを接続して構成する。仮想手と曲面との衝

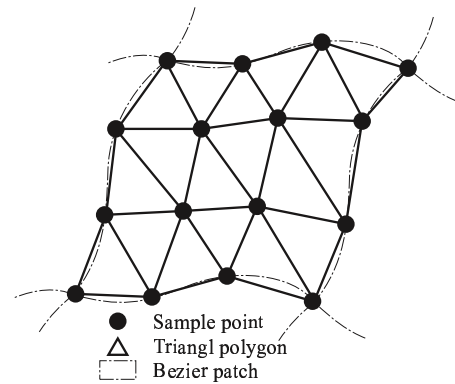


図 4: 双三次ベジエパッチのポリゴン変換
Fig. 4: Transformation of a bi-cubic Bezier patch to polygons.

突は、スケルトンを構成する各セグメントと曲面との間の交差判定により行う。双三次ベジエパッチの場合、パッチ上の座標値は 2 つの変数パラメータ u, v の双三次関数で表現されるため、交点を一意かつ高速に決定することは困難である。また、数値解析によって計算することは可能であるが計算量も多くなる。そこで、これらの計算を簡略化するためにパラメトリック曲面で表現された物体をポリゴン化し、各ポリゴンとの交差判定を行うことにした。文献 [16][17][18] より、一般に凸ポリゴンであれば直線との交差判定が可能であることから、双三次ベジエパッチを三角形パッチで近似表現した。双三次ベジエパッチの三角形分割では文献 [7] で用いられた曲面上の 16 個のサンプル点 R を利用する。これらを頂点として図 4 のように結び、三角形パッチを生成する。三角形パッチと直線との交差判定は以下の手順で行う。

- 三角形を含む平面とスケルトンセグメントの交差判定
- 交点が指領域かどうかの判定
- 交点がポリゴン領域上かどうかの判定

この処理を図 3 の 15 本すべてのスケルトンセグメントに対して適用することにより衝突判定を行う。

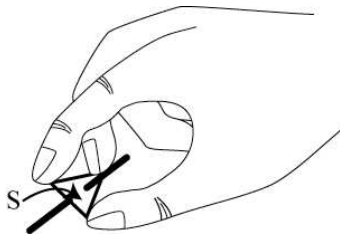
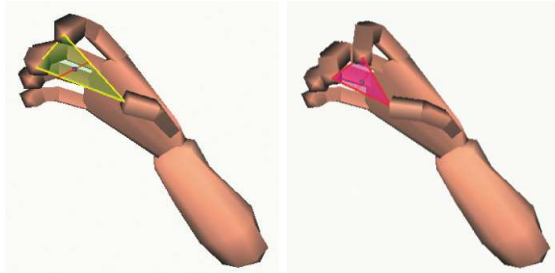


図 5: つまみ判定機能
Fig. 5: The picking function.



(a) $S_d \leq S \leq S_p$ (b) $S < S_d$

図 6: つまみ判定機能を利用した仮想手
Fig. 6: Virtual hand with the picking function.

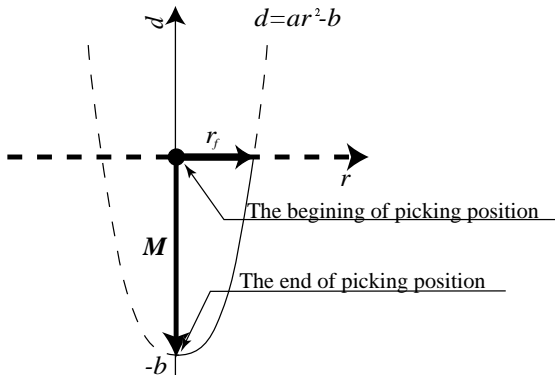


図 7: 形状関数
Fig. 7: The deformation function.

2.3 つまみ判定機能

本システムでは仮想手と曲面との衝突判定とは別に、変形に関するユーザの意志確認を行う機能として、つまみ判定機能を導入する。これは、ユーザが親指・人差し指・中指を使つてつまむ姿勢をとった場合に曲面が変形可能な状態になったことをユーザに視覚情報とし

て伝達する機能（図 5）である。その機能がアクティブとなる仮想手の状態を“つまみ状態”ということにする。具体的な“つまむ”という姿勢の判定方法は、親指・人差し指・中指の各先端で構成される三角形 (S) の面積 (S) により行う。仮想手及びつまみカーソルの状態を図 6 で示す。そして、 S に対し 2 つの閾値、 $S_d < S_p$ を与えることにより、以下の 3 つの状態を識別する。

1. $S > S_p$ の場合:
つまみ状態でなく、かつつまみカーソルが表示されていない状態。
2. $S_d \leq S \leq S_p$ の場合:
図 6(a) に示すように、つまみカーソルは表示されるものの、つまみ機能を利用して曲面変形が行えない状態。この状態では仮想手の親指・人差し指・中指の各先端で構成される三角形とその重心を通過する三角形平面の垂線から構成される黄色のつまみカーソルが観測できる。ユーザはこの状態を利用して変形位置を確認することが可能である。
3. $S < S_d$ の場合:
図 6(b) に示すように、つまみ状態であり仮想手と曲面との衝突判定が行われ、かつ曲面変形が可能な状態。つまみカーソルが赤色に着色され、実際に衝突している曲面の変形が行われる。

2.4 形状関数

現実世界で粘土を指で押し込んだ場合、押し込んで生成される穴の形状の上部は大きく広がり、指先位置である下部ではすぼみ、この断面図が二次関数に類似している。そこで本研究では指を押し込んだ場合の断面形状を図 7 で示すような二次関数 [7][8] に近似している。本システムでは衝突判定と 2.3 で述べたつまみ判定機能を用いて、ユーザは対話的につまみ動作を開始した位置から、つまみ動作を終了した位置までの仮想指の移動ベクトル M を計算することが可能である。そして移動ベ

クトル M と形状が変形する領域を決定する指の太さ r_f を利用して，図 7 のような断面が二次関数で表される形状関数を利用して形状を生成する．この関数は指を動かす方向によって曲面をへこませたり膨らませたりすることが可能である．式 (1) は形状関数，式 (2) は形状を表現する方程式である．

$$f(x) = ar^2 - b \quad (1)$$

$$d = f(x) \quad (2)$$

$$\left(0 \leq r \leq r_f = \sqrt{\frac{b}{a}} \right)$$

但し，

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

$$b = |M|$$

ここで M , r_f , d , r はそれぞれ，仮想指の移動ベクトル，指の太さ，サンプル点の移動量，サンプル点 P から仮想指までの距離である．本形状関数の変形領域は $(0 \leq r \leq r_f)$ であるが，変形領域内・外の境界上での連続性はベジエ曲面の連続性により保証される．

また，形状関数を利用した具体的変形手順は文献 [7] [8] で述べたように，まず各ベジエパッチ上に存在する 16 点のサンプル点を計算し，上述の形状関数で定義された形状にサンプル点を移動した後，Bernstein 逆写像を利用してパッチ毎の制御点を計算する．しかし，この状態ではパッチ間の連続性が保証されないため，文献 [8] によるパッチ間の連続性を保証した制御点調整を行って一連の手順は終了する．

3 実験

2.1 で述べた対話方式を実装し，実際に双三次ベジエ曲面で構成された形状の変形操作・形状創成操作を行った，以下ではその実験方法と結果を示し，変形過程と形状創成結果を検討する．なお，本実験では仮想手と変形物体の相対的な大きさについては考慮していない．

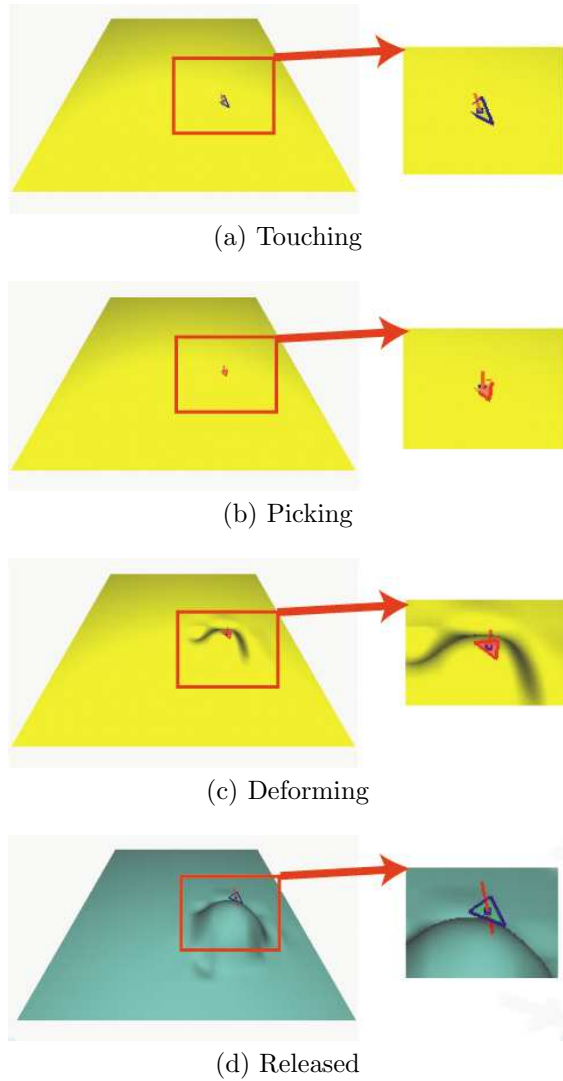


図 8: 平面の変形過程

Fig. 8: Deformation process for a planar shape.

まず第一の実験では変形前の形状として，100 枚のパッチを格子状に並べた平面，および Utah Teapot (以下，Teapot) を用いた単独の変形操作を行った．図 8 に示す平面による実験では仮想指を表示せずにつまみカーソルのみを表示した状態で変形操作を行っている．図 8(a) では，仮想手が平面に触れて平面の色が変化し，図 8(b), (c) ではつまみカーソルが変形可能状態に変化してつまみカーソルの動きにあわせて形状変化する様子を示している．変形可能状態が終了すると図 8(d) のように平面の色が元に戻ることをわかる．本シ

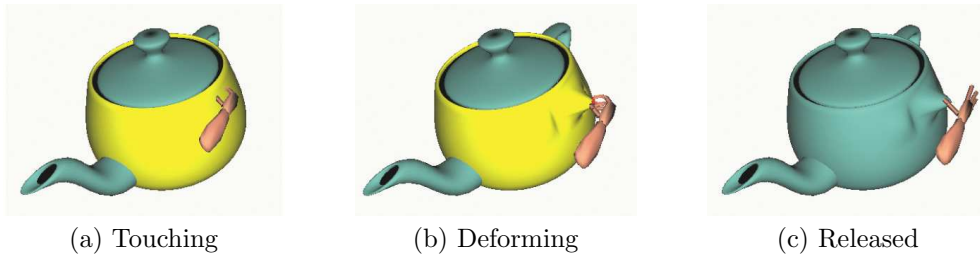


図 9: Teapot の変形過程 (1)
Fig. 9: Deformation process (1) for a teapot.

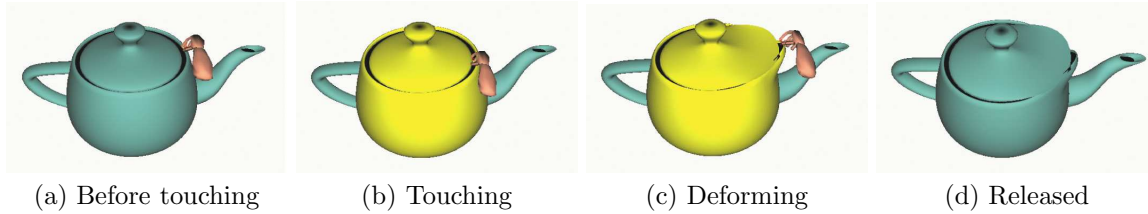


図 10: Teapot の変形過程 (2)
Fig. 10: Deformation process (2) for a teapot.

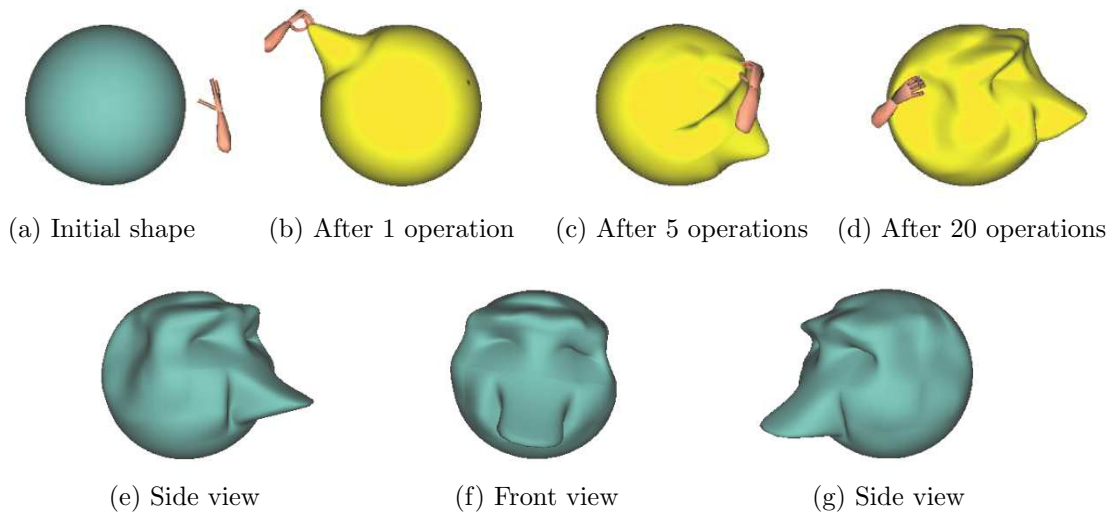


図 11: 作品例「アヒルの顔」の形状創成過程
Fig. 11: Creating process for a work; 'the face of a duck'.

ステムでは、変形に際しパッチ間は G^1 連続になるため、表面形状が連続でない複雑な物体の変形の場合ではいくつかの曲面単位で変形を行っている。一方、図 9 に示す Teapot による実験では、仮想指を表示した状態で変形操作を行っている。仮想指で Teapot を触れると曲面単位で色が変わり、選択された曲面内

部のみで変形操作が可能になる。図 9(a) では仮想指がつまみ状態で仮想物体に触ったときに曲面単位で色が変わった様子を示している。次に図 9(b) では図 9(a) の状態からさらに変形可能状態にして曲面が変形する様子を示している。変形終了後、変形可能状態を解除すれば図 9(c) のように曲面の色が元に戻り一連

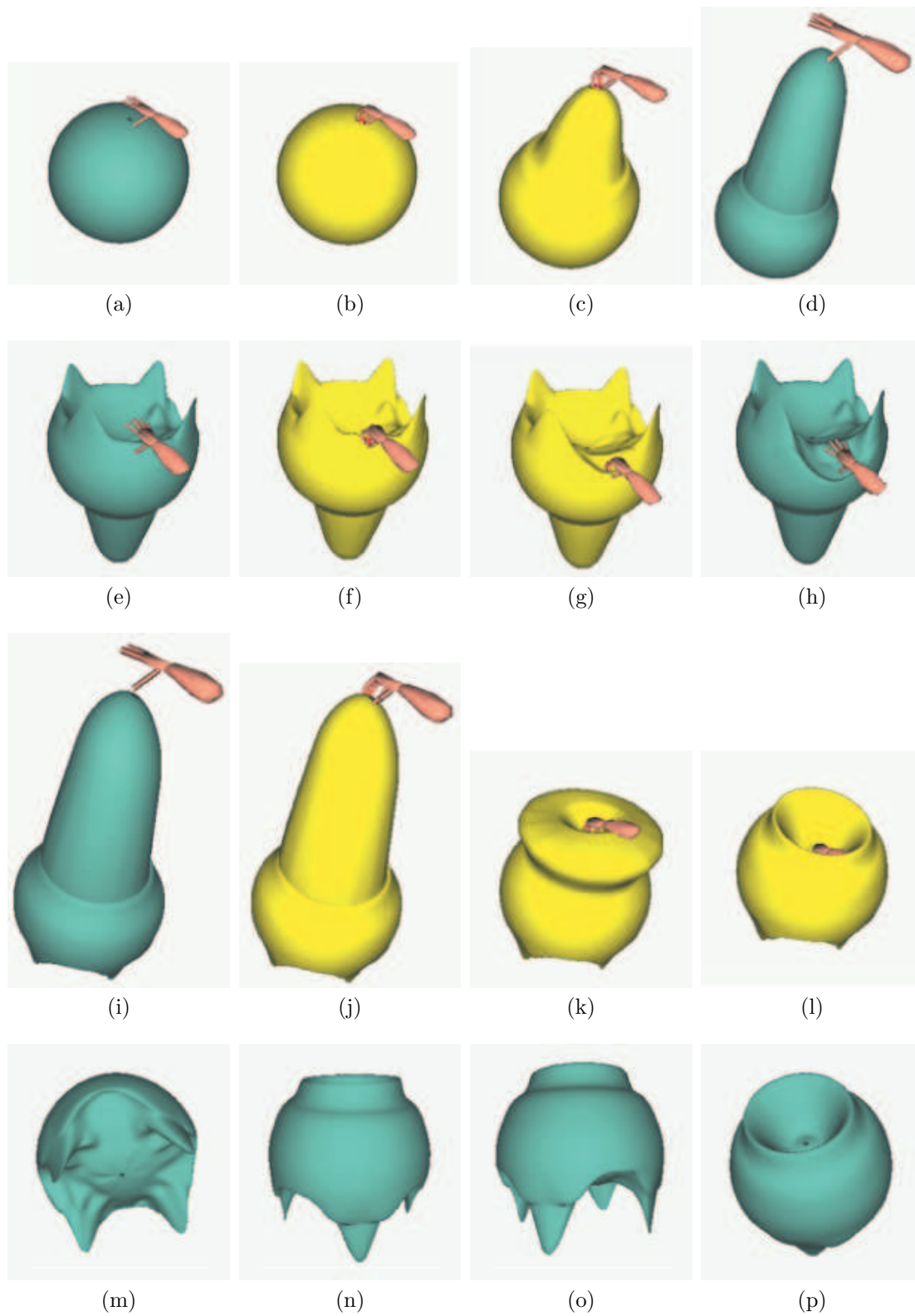


図 12: 作品例「香炉」の形状創成過程
Fig. 12: Creating process for a work; 'a censer'.

の変形過程が終了する。さらに、図 10 では仮想指が仮想物体の複数の曲面と接触し、変形している様子を示している。図 10(b) では仮想手がつまみ状態で複数の曲面と接触し色が変化した状態である。次に図 10(c) ではさらにつまみ姿勢をとり、複数の曲面を選択したままそれぞれの曲面が独立して変形する様子を表している。変形終了後、つまみ姿勢を解除すれば図 10(d) のように曲面の色が元に戻り一連の変形過程が終了する。

第二の実験として、本システムの操作性を検証するために作品の創成を想定し、128 パッチで構成された球体を初期形状として二種類の簡単な形状の創成を行った。まず、図 11 では総操作回数 34 回による作品の変形過程を示している。図 11(a) を初期形状とし、図 11(b), (c), (d) はそれぞれ、1 回、5 回、20 回の操作後の状態である。生成された形状は図 11(e)–(g) であり、創成形状の想起に要した思考時間と会話実時間の合計は 50 分であった。

次に、実際に作品の制作途中でのオペレーションの様子を示すために同じ初期形状を利用して簡単な形状の創成を行った。図 12(a)–(d)、図 12(e)–(h)、図 12(i)–(l) はそれぞれ一回の変形操作を表示したものである。図 12(a)–(d) は 1 回目の変形操作である。それぞれの状態は図 12(a) では変形位置が決まった状態、(b) ではつまみ操作を行った状態、(c) では実際につまみ操作を行って曲面を引っ張っている状態、(d) ではつまみ操作を終了して一回の曲面の変形が終わった状態である。図 12(e)–(h)、および図 12(i)–(l) も同様であるが、図 12(e)–(h) では図 12(a)–(d) とは視点位置を変更して 5 回目の変形操作で押した場合、図 12(i)–(l) では 15 回目の変形操作で引いた場合である。図 12(m)–(p) は完成状態を示している。この実験ではユーザは三面図を使うことなく、また双三次ベジェ曲面の数理的特徴を気にすることなく、押す・引くという直観的な操作のみで形状創成が行うことができた。本形状創成のための総操作回数は 15 回、創成形状の想起に要した思考時間と会話実時間の合計は 20

分であった。図 11 に対して所要時間が短縮したのは、操作の慣れと形状の相違などによると考えられる。

本システムは、つまみ判定機能を利用することにより、仮想手が仮想物体に衝突した途端にユーザの意志に関係なく変形するのではなく、変形に際しユーザの意志が反映されるため、文献 [8] で述べたインタラクティブシステムと比較して飛躍的に操作性が良くなった。また、仮想手と仮想物体の衝突状態を色の変化で表現したことも利用者が仮想空間内での仮想手と仮想物体の位置関係を知る上で非常に効果的であった。これにより、仮想空間内でも現実世界と同様の没入間を得られるような操作性も重要であるが、必ずしも現実世界と同様の物理現象を実現しなくてもユーザにとって理解しやすい操作性が重要であることもわかった。ただ、現実には操作者が想起した形状と仮想空間内に創成された形状との一致性は、その操作者の感性的な個人差があり自明ではない。またシステムの操作感覚・操作性は実験の被験者の主観によるところが無視できない。

4 まとめ

本論文ではデータグローブ、三次元位置センサを用いてユーザの手の動きを取り込み、ジェスチャによってユーザに変形意志を確認できるような形状創成システムについて述べた。これは文献 [7][8] で提案した双三次ベジェパッチの直観的変形手法にユーザの意志が反映されるような対話操作の一実現手法である。また力覚フィードバック機能を持たないデータグローブにおいて、ユーザが仮想物体に触った場合に仮想物体の色を変えることによりユーザが仮想物体に触れたかどうかを視覚で検知可能な機能を検討した。ここでは仮想手と自由曲面を近似するポリゴンの間の高速な衝突判定を行い、つまみ判定機能により変形を行うための 3 種類の対話内容を設定した。これらの手法を用いることにより、ユー

ザの意志を反映した対話操作が可能であることが実験的に確かめられ、操作性が向上したことも確認できた。

仮想手の高精度表現とそれに伴う衝突判定の高速高精度化、感性的な形状想起の反映の強化、創成形状の評価方法と操作感・使用感の個人差の調査は今後の重要な検討課題である。

参考文献

- [1] S. Miyazaki, T. Yasuda, S. Yokoi, and J. Toriwaki: An Origami Playing Simulator in the Virtual Space, *J. of Visualization and Computer Animation*, Vol. 7, No. 1, pp. 25–42 (1996).
- [2] 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).
- [3] S. Mizuno, M. Okada, and J. Toriwaki: 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 (1999).
- [4] Y. Kawai, Y. Higashiyama, K. Koyama, and M. Okada: A Fundamental Study on a Natural-Language-Based 3D CG Modeling, *Proc. of IEEE-SMC '99*, Vol. V, pp. 714–719 (1999).
- [5] 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).
- [6] T. Igarashi, S. Matsuoka, and H. Tanaka: Teddy: A Sketching Interface for 3D Freeform Design, *Proc. of ACM SIG-GRAPH'99*, pp. 409–416 (1999).
- [7] 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).
- [8] 前野 輝, 岡田 稔, 鳥脇純一郎: 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, *情報処理学会論文誌*, Vol. 45, No. 2, pp. 647–658 (2004).
- [9] 田中厚子, 広田光一, 金子豊久: 仮想空間における切断作業, *日本 VR 学会論文誌*, Vol. 3, No. 2, pp. 215–222 (1998).
- [10] 田中厚子, 広田光一, 金子豊久: 仮想切断作業における力覚の表現, *情報処理学会論文誌*, Vol. 40, No. 7, pp. 2978–2987 (1999).
- [11] 田中厚子, 広田光一, 金子豊久: 力覚をとまなう変形・切断操作による造形作業, *日本 VR 学会論文誌*, Vol. 4, No. 3, pp. 573–583 (1999).
- [12] 舟橋健司, 安田孝美, 横井茂樹, 鳥脇純一郎: 3次元仮想空間における仮想手による物体操作モデルと一実現法, *電子情報通信学会論文誌 D-II*, Vol. J81-D-II, No. 5, pp. 822–831 (1998).
- [13] 舟橋健司, 安田孝美, 横井茂樹, 鳥脇純一郎: 仮想空間における両手による協調操作モデル, *情報処理学会論文誌*, Vol. 39, No. 5, pp. 1334–1342 (1998).
- [14] SensAble Technologies, Inc., “FreeForm”, <http://www.sensable.com/>
- [15] 大芝 崇, 光延秀樹, 田中二郎: 3次元仮想空間への直接操作, *日本ソフトウェア科学会第14回大会論文集*, pp. 73–76 (1997).
- [16] 杉原厚吉: *グラフィックスの数理*, 共立出版 (1995).
- [17] 千葉則茂, 土井章夫: *3次元CGの基礎と応用*, サイエンス社 (1997).
- [18] 鳥谷浩志, 千代倉弘明: *3次元CADの基礎と応用*, 共立出版 (1991).