3 D-DDM：三次元 B-Spline 自由曲面の直接変形手法

正員 山下 樹 里 (生命工学研)

非正員 福 井 幸 男 (生命工学研)

非正員 横 井 浩 史 (生命工学研)

非正員 下 条 誠 (生命工学研)

3D-DDM: A3 Dimensional-Direct Deformation Method of B-Spline Surfaces

Juli Yamashita, Member, Yukio Fukui, Non-member, Hiroshi Yokoi, Non-member, Makoto Shimojo, Non-member (NIBH)

This paper presents 3D-DDM (3 Dimensional-Direct Deformation Method), which is a new direct deformation method of free-formed B-Spline surfaces. The method allows users to “push/twist” surfaces directly with the 3D cursor and it provides various kinds of deformations that are area-controllable. The basic idea of 3D-DDM is rearranging, creating, and deleting form representing parameters from the “pushing” action of a user to obtain appropriate deformations. The method is combined with an input device with force feedback, which the authors have developed as well, into a virtual surface modeler with haptic feedback.

キーワード：B-Spline 自由曲面，直接操作，マン・マシンインタフェース，仮想現実感（VR），CAD

1. はじめに

データの直接操作（Direct Manipulation）は，マン・マシンインタフェースにおける最も重要なパラダイムの一つである。計算機上で形状を変形操作する場合は，特に直観的理解のしやすさと操作性とから，直接操作の大切さは充分認識されてきた。しかし，現在の CAD（Computer Aided Design）システムで三次元自由形状を変形操作するには，以下の二つの問題点がある。

（1）入出力デバイスの問題 現在，形状を操作するための入出力デバイスとしては，CRT ディスプレイ，マウス，ディジタイザなどが使われている。しかし，これらはすべて二次元の情報しか入出力できないため，三次元の自由形状を扱うのはたいへん難しい。ディスプレイを区分けて 3 面図を表示するなどの工夫が凝らされているが，それでも三次元空間中の一点を特定するには困難を伴う。

最近発達してきた仮想現実感技術（Virtual Reality；VR）は，この問題を解決する重要な技術である。三次元の入力デバイスとして，三次元マウスやデータグローブなどが，また出力デバイスとして HMD（Head Mounted Display）に代表される三次元視覚情報提示装置や聴覚情報提示装置，更に触覚・力覚へのフィードバック装置が開発されつつある。特に，三次元空間内での位置決定および仮想物体形状の認識においては，視覚情報に加えて触

覚・力覚情報のフィードバックの有効性が示唆されており⁽¹⁾，今後，触・力覚情報の提示技術は仮想形状の操作において，ますます重要となることが予想される。

（2）形状変形手法の問題点 入出力デバイスとは独立して，形状変形手法そのものも問題である。現在 CAD で多く採用されている形状表現は，Bezier，B-Spline などの「パラメトリック表現」と呼ばれるものである⁽²⁾。通常，パラメトリックに表現された形状の変形方法は，制御点などの形状を定義するパラメータを変化させることにより間接的に形状を変形するというもので，デザイナーは形状そのものに触ることはできない。これは，粘土を使う場合のような，形に直接触れながらの造形と比べるとたいへん不自然で，デザイナーの不満が強い。更に，形状表現により操作できるパラメータの種類が異なるうえ，パラメータの種類ごとに変形への影響が異なるという問題がある。このためデザイナーは，常に自分の求める変形がどのパラメータのどれだけの変化に相当するかを頭の中で計算しなければならず，デザイナーの負担となっている。形状に直接触れる感覚で，手の形や動きの軌跡がそのまま造形に反映されるような，いわば触感覚で直接形状を変形操作できるインタフェースに対するデザイナーの要求は大きい⁽³⁾。

著者らは，上記のような問題点を解決し，より触覚的な形状の変形インタフェースを実現するため，力覚フィードバックを伴う三次元入力デバイス⁽⁴⁾⁽⁵⁾および形状の直接変

形手法^{(6)~(8)}の両面から研究を進めている。本論文では、三次元 B-Spline 自由曲面の直接変形操作手法 3D-DDM (3 Dimensional-Direct Deformation Method) を提案し、その原理、実装、および特徴について報告する。3D-DDM は、曲面を「押せばへこむ」という直観的でわかりやすい直接変形インタフェースと、多様な変形関数を提供する、新しい自由形状の直接操作手法である。以下、第2章で関連研究についてその問題点を明らかにする。第3章で3D-DDMの原理を導入し、試作実装システムである「バーチャルサーフェスモデラ」について述べる。第4章で本手法の特徴を考察し、第5章で将来の研究課題および方針について述べる。

なお、本論文では、読者は B-Spline などの自由形状の表現について十分な知識をもつものと仮定し、個々の形状表現の詳細については解説しない。必要であれば、文献(2)などを参照されたい。

2. 既存の直接変形手法とその問題点

本章では、形状デザインの観点から、既存の自由形状の変形手法について述べ、それらの問題点を明らかにする。既存の自由形状の直接変形を実現する試みは、以下の2種類に大別される。

(1) 物理シミュレーション法 物理モデルに基づいた有限要素法などを用い、弾性変形や塑性変形など現実の物質の物理的性質を再現するものである。Deformable Models⁽⁹⁾をはじめ、アニメーションやシミュレーション⁽¹⁰⁾でよく使われるほか、VR技術でも現実の物質の性質を触圧としてフィードバックするために、曲面の弾性変形⁽¹¹⁾や粘土を模した体積一定変形⁽¹²⁾、また形状データに voxel を使った仮想彫刻システム⁽¹³⁾などが試みられている。

これら物理世界のシミュレーションを目標としたシステムのいちばんの問題点は、計算速度と形状表現の粒度 (granularity, 形状表現の最小単位である voxel の大きさや有限要素法のメッシュの細かさなど) のトレードオフである。すなわち、Bezier 曲面など数学的に生成される面と比べても劣らない程度に、細かい粒度の形状やより現実に近い物理的性質を実現しようとするれば、データの量が膨大になって計算時間がかかりすぎ、インタラクティブ性が低下する。逆に変形の応答速度を上げようとするれば、形状表現の粒度は粗くせざるをえない。

将来、十分細かい粒度かつ十分な数の voxel データを実時間で処理できるようになれば、この方法はたいへん自然な形状操作インタフェースを提供できる可能性があるが、現在の計算機的能力では十分な粒度と速度を両立するには至っていない。

また、基本的に塑性変形が本質である形状デザインの過程においては、加えた力をゆるめると形状が元に戻ってしまう弾性変形、あるいは凹みをつくると同時に周囲に望ましくない盛り上がりを生じる体積一定変形など、実際の物

理現象の模倣がどれだけ重要であるのかは疑問である。過重な力覚フィードバックの存在が作業能率を低下させる例⁽¹⁴⁾も報告されている。

voxel をベースとしたシステムのもう一つの問題点は、大域的な変形が難しいことである。現在、voxel データを変形するには、voxel を追加・削除する方法が採られているが、そのようにして作った形状を広い範囲にわたってゆるやかに曲げるような変形の際にはその方法だけでは不十分である。二次元の pixel ベースのシステムではこれを補うため、2-Pass Mesh Warping⁽¹⁵⁾などのパラメトリックな補間方法を応用したイメージの変形手法が普及している。True ら⁽¹⁶⁾は、これを三次元の voxel データに拡張し、voxel データとパラメトリック表現の融合を試みているが、その場合にはパラメトリック形状の変形操作インタフェースが新たに問題となる。

Terzopoulos ら⁽¹⁷⁾は、超四面体とスプラインを組み合わせた形状表現と物理モデルに基づく変形の導入により、大域的な変形と細かい変形との両立にある程度成功している。形状モデリングのためには、より一般的な形状表現への拡張が求められよう。

(2) 制約法 形状変形を一種の制約ととらえ、それを満たすパラメータの解を求めることにより変形を実現する方法である。パラメトリック形状の直接変形手法に多くみられる。

制約による形状の直接変形の起源は、二次元形状などの直接操作システム ThingLab⁽¹⁸⁾に遡ることができる。パラメトリック自由形状の変形に関しては、NURBS の Weight-Based Modification⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾、自由形状上の一点をカーソルでドラッグする^{(21)~(23)}、法線ベクトルや接ベクトルなど形状の数学的性質に着目し、それらをハンドルとして向きや大きさを変える^{(24)~(26)}、また曲面上の点や曲線を指定することにより曲面を変形する方法⁽²⁷⁾が提案されている。いずれも、ドラッグされた点の変位や、指定された曲線などを制約とみなし、曲面を定義する関数の逆関数を解くことによりそれらの制約を満たす曲面パラメータを求める。

これらに共通の問題点は、変形範囲の設定である。逆関数を解くため、ドラッグした点を構成するパラメータの構造に依存した変形範囲となる。Hsu ら⁽²³⁾の手法では多数の点を同時に移動することでより広い範囲を変形することができるが、最初に設定した FFD⁽²⁸⁾の格子以上に細かい変形の実現は難しい。より広く、あるいはより狭い範囲の変形は将来の課題として残されている。また、Welch ら⁽²⁷⁾の曲線と点による制約による変形では、逆関数を解きやすい特殊な形状表現を導入しており一般性に欠けること、また変形が曲面全体に及んでしまい局所性が保証されないなどの問題点がある。

更に、曲面の接・法線ベクトルなどを編集するシステム以外では、三次元におけるひねりの自由度が変形に取り入れられていない。

3. 三次元自由曲面の直接操作手法 3 D-DDM

著者らが開発した 3 D-DDM (3 Dimensional-Direct Deformation Method) は、上述の問題点のうち以下の点を解決することを目的とした新たな B-Spline 自由曲面の直接操作手法である。

- (i) 形状を「押せばへこむ」というわかりやすい直接的な変形インタフェースを提供する。
- (ii) 形状表現には、CAD で広く使われている B-Spline を採用し、特殊な表現は導入しない。
- (iii) 変形範囲の調節が容易であること。
- (iv) ひねりの自由度を含む 6 自由度を活かした、多様な変形を実現すること。

〈3・1〉 3 D-DDM の原理 3 D-DDM は、著者らが既に二次元自由曲線の直接変形を対象に開発している DDM⁽⁶⁾⁽⁷⁾ を三次元に拡張したものである。本手法の原理は、検出されたカーソルによる形状への変形操作量を、制御点など形状を定義するパラメータの変化量に変換し、新しく決定された形状定義パラメータから形状を生成しなおすことにより、ユーザに直接形状の変形操作が行われているように感じさせるというものである。

以下に、図 1 を用いてこの原理を説明する。

〔原 理〕

(1) カーソルの位置座標 $M(x, y, z)$ および姿勢 (各座標軸周りの回転角度) $R(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$ を追跡し、カーソルが曲面 S を横断したかどうかを監視する。横断した場合、(2)へ進む。

(2) カーソルの移動量に応じた変形を実現するため、 S を定義するパラメータ (制御点およびノットベクトル) を変更する。

- M_0 : 横断直前のカーソル位置座標
- R_0 : 横断直前のカーソル姿勢 ($\theta_{x0}, \theta_{y0}, \theta_{z0}$)
- M_1 : 横断直後のカーソル位置座標
- R_1 : 横断直後のカーソル姿勢 ($\theta_{x1}, \theta_{y1}, \theta_{z1}$)
- P : カーソルが曲面を横断した点の座標
- S : P を含む曲面部分
- $\{V\}$: S を構成する制御点 $\{V_{i,j}, \dots, V_{i+m,j+n}\}$
- $\{W\}$: 点 P における制御点 $V_{i,j}$ の寄与率 (P にお

図 1 3 D-DDM の原理
Fig.1. The principle of 3D-DDM.

る $V_{i,j}$ の係数の値) $\{w_{i,j}, \dots, w_{i+m,j+n}\}$

m, n : 非負整数

u_p : P における S の u 方向ノットパラメータの値

v_p : P における S の v 方向ノットパラメータの値

$\{u\}, \{v\}$: 曲面 S のノットベクトル

以上の値より、変形後の曲面部分 S' を構成する新たな形状定義パラメータ (ここでは制御点列 $\{V'\}$ およびノットベクトル $\{u'\}, \{v'\}$) を、次のように決定する。

$$\left. \begin{aligned} \{V'\} &= F_{CP}(\{V\}, \{w\}, M_0, M_1, R_0, R_1, \\ &\quad u_p, v_p, \{u\}, \{v\}) \\ \{u'\}, \{v'\} &= F_{knot}(\{V\}, \{w\}, M_0, M_1, \\ &\quad R_0, R_1, u_p, v_p, \{u\}, \{v\}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 F_{CP}, F_{knot} : 関数、 $\{V'\}$: S' を構成する

制御点 $\{V'_{i,j}, \dots, V'_{i+m',j+n'}\}$, $\{u'\}, \{v'\}$: S' の

ノットベクトル, m', n' : 非負整数

ここで、変形関数 F_{CP}, F_{knot} が満たすべき条件は、

- 〔条件 1〕 $\{V'\}, \{u'\}$, および $\{v'\}$ から生成される新たな曲面部分 S' が微小線分 M_0M_1 と交差しないこと、すなわち M_0, M_1 が S' に対して同じ側にあること

である。変形関数の具体例を〈3・3〉節(2)項に示す。

(3) 新たに決定されたパラメータ $\{V'\}, \{u'\}, \{v'\}$ を用いて曲面 S' を生成してユーザに提示し、(1)へ戻る。

〈3・2〉 3 D-DDM の基本的性質

(1) 変形関数 F の自由度が高い 3 D-DDM では、変形関数 F が、変形の範囲や形状といった変形の諸性質を決定する。〔条件 1〕さえ満たしていれば、 F により新たに生成される制御点 $\{V'\}$ およびノットベクトル $\{u'\}, \{v'\}$ はもとの $\{V\}, \{u\}, \{v\}$ と値が異なることはもちろん、要素数が同じである必要もない。更に、 m, n により変形範囲の設定が自由であるため、広い範囲を緩やかに変形することも、狭い範囲を細かく変形することも可能である。例えば、 $m=n=0$ として変形の効果を制御点 1 個の移動に等しくすることも、 $m>0, n>0$ としてより広い範囲を変形することも可能である。また、ノット・制御点数を増してより細かい変形をしたり (図 1 で $m'>m, n'>n$ となる)、逆にパラメータ数を減らして緩やかな形状とすることもできる。ここで、パラメータを一つだけ変化させるような変形関数は、そのパラメータを変化させる通常の変形方法と等価な能力を持つことに注意されたい。すなわち、変形関数 F は、形状定義パラメータを個別に変化させる通常の変形方法を包含するものである。

(2) より柔軟なユーザインタフェースを提供

〔条件 1〕は、交点 P の変形後の点 P' (すなわち、ノットパラメータの値が u_p, v_p である点) がカーソル終端 M_1 と重なることを必ずしも要求しない。すなわち、3 D-DDM では文字通り曲面を「押して」変形するのであり、曲面上の 1 点をドラッグするのとは異なる。ドラッグは、「 P' が M_1 に常に重なる」という制約を導入したものととして表現することができる。従って、本手法はドラッグを含

む、より広い範囲のユーザインタフェースを提供するものである。

〈3・3〉 3 D-DDM の実装

(1) パーチャルサーフェスモデラ 3 D-DDM および、これと平行して開発中の力覚フィードバックを伴う三次元入力デバイス⁽⁴⁾⁽⁵⁾を結びつけることにより、力覚フィードバックを伴う三次元自由曲面の直接変形を実現するシステム「パーチャルサーフェスモデラ」⁽²⁹⁾を試作した。図2にシステム全体の構成を示す。自由曲面のデータおよび3 D-DDM による形状変形操作インタフェース（仮想形状モデラ部）は、シリコングラフィックス社のグラフィックワークステーション IRIS Indigo 上に、一部に SRA のグラフィックライブラリー集 GHL を使用して実現されている。

入力デバイスは三次元カーソルとして働くと同時に、ユーザの手に反力を返す汎用の力覚情報呈示装置でもある。デバイスとモデラはイーサネット経由で結ばれており、デバイスからはカーソル位置、姿勢（方向）、速度がモデラに入力され、モデラからは曲面との接触情報が送られる。デバイスのコントローラ（PC）はその情報に基づき、反

力を生成するようにデバイスをコントロールする⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

図3～図6は、本モデラによる三次非正規 B-Spline 曲面の直接変形の様子である。本モデラでは、制御点をいちいち指定することなく曲面を直接「押す」だけで変形できるため、作業効率がたいへん良い。しかも、三次元カーソルが面に触れるとユーザの手に反力が返るため、確実な操作感が得られる。これは、変形処理ルーチンに入るとカーソルの動きを遅くして、カーソルと連動した動きをする三次元入力デバイスの動きを遅くさせることで実現している。

(2) 変形プリミティブの実際 変形プリミティブとは、ある変形関数を用いて実現された変形インタフェースを指す。変形関数と変形プリミティブとは1対多の関係にあり、同じ変形関数でも異なるインタフェースをもつ異なるプリミティブとしてユーザに提供され得る。以下に、本モデラで実装されている変形プリミティブを列挙する。

(i) 3自由度の自由変形 ひねりの入らない自由変形である。

図2 パーチャルサーフェスモデラのシステム構成
Fig. 2. A virtual surface modeler system.

図3 3自由度自由変形の様子
Fig. 3. Deformation of 3 D.O.F.

図 4 変形範囲調節の例
Fig. 4. Effects of different deformation functions.

図 5 6 自由度自由変形によるひねりの効果
Fig. 5. The effect of 6 D.O.F. deformation.

〔操作〕 カーソルで曲面を「押す」と、面が押されただけ滑らかにへこむ (図 3, 図 4)。

〔実装〕 図 3 に示す変形は、以下の変形関数による。

$$\left. \begin{aligned} V'_{k,l} &= V_{k,l} + a w_{k,l} (M_1 - M_0) \\ \{u'\} &= \{u\} \\ \{v'\} &= \{v\} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 a : 正数、 M_0 : 横断直前のカーソル位置、 M_1 : 横断直後のカーソル位置、 $V_{k,l}$: S を構成する制御点群、 $w_{k,l}$: 点 P における制御点 $V_{k,l}$ の寄与率 (係数值)、 $k = \{i, i+1, i+2, i+3\}$ 、 $l = \{j, j+1, j+2, j+3\}$

ここで、正数 a は新たな曲面部分 S' が [条件 1] を満たすように、変形のつど 2 分法に似た方法で決定される。この場合、(1) 式における変形範囲を決めるパラメータ m, n, m', n' は、曲面の次数 3 に等しく、カーソルの一押しで同時に最大 16 個の制御点が移動される。また (2) 式は、(1) 式の具体例となっている。なお、図 3 の各図の右下は、力覚フィードバック付き入出力デバイス操作の様子である。

図 4 は、同じ平面の状態から出発して、パラメータ m, n の違いがカーソルの「一押し」にもたらす変形の差を示したものである。図 4 中、向かって右側の隆起は (2) 式による最大 16 制御点の移動による変形、左側は以下の (3) 式で表される 1 制御点の移動による変形である。同時に多数の制御点を移動するほうが、より広い範囲のゆるやかな変形となることがわかる。

$$\left. \begin{aligned} V'_{i,j} &= V_{i,j} + a (M_1 - M_0) \\ \{u'\} &= \{u\} \\ \{v'\} &= \{v\} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 a : 正数、 M_0 : 横断直前のカーソル位置、 M_1 : 横断直後のカーソル位置、 $V_{i,j}$: 点 P における重み (寄与率) が最大である制御点

(ii) 6 自由度の自由変形 ひねりの入った自由変形である。

〔操作〕 曲面をカーソルでひねりながら押すと、滑らかにひねった隆起が得られる (図 5)。

〔実装〕 ひねりの効果をわかりやすくするため、図 5 での変形は、カーソルと曲面との交点 P に最も影響す

図 6 ノット挿入によるより細かい変形の実現
Fig. 6. Finer deformation by knot insertion.

る制御点を中心に u 方向の 7 制御点を同時に動かし、カーソルのローカル座標における Z 軸周りの回転をひねりに利用する、以下のような変形関数をもつ。

$$\left. \begin{aligned} V'_{k,j} &= \text{Rot}_{P,U'Z}(\theta_{z1} - \theta_{z0}) (V_{k,j} + a w_k U'z) \\ U'z &= \text{Rot}_{O,Ux}(\theta_{x1}) \text{Rot}_{O,Uy}(\theta_{y1}) \text{Rot}_{O,Uz}(\theta_{z1}) Uz \\ \{u'\} &= \{u\} \\ \{v'\} &= \{v\} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 $\text{Rot}_{A,B}(\theta)$: 点 A を始点とするベクトル B の周りの角度 θ の回転を表すマトリックス、 Ux, Uy, Uz : x, y, z 各軸方向の単位ベクトル、 O : 原点座標 $(0, 0, 0)$ 、 a : 正数、 R_0 : 横断直前のカーソル回転角 $(\theta_{x0}, \theta_{y0}, \theta_{z0})$ 、 R_1 : 横断直後のカーソル回転角 $(\theta_{x1}, \theta_{y1}, \theta_{z1})$ 、 $V_{k,j}$: 点 P において最大の重みをもつ制御点 $V_{i,j}$ を中心として u 方向に前後 t 個ずつを加えた、計 $2t+1$ 個の制御点、 $w_k = (1 - |k-i|/(t+1))^{1/2}$ 、 $k = i-0, i-t+1, \dots, i+t, t=3$

ここで、 t は一般には 1 以上の自然数である ($t=0$ ではひねりが生じないことは自明であろう)。また、 t を大きくすればより広い範囲が同時に変形されるのは (1) 項の場合と同様である。 w_k により、どのようなひねり角度が加わるかが決まる。

(iii) ノット挿入による、より細かい範囲の変形

〔操作〕 曲面をカーソルで押すと、その曲面のノットの状態が許すよりも細かい変形が得られる(図6)。

〔実装〕 図6(上)は、B-Spline 曲面(この場合平面となっている)をノットベクトルの値で表示したものである。制御点数は 5×5 で、どの制御点を移動してもその影響は曲面全体に及ぶ。このパラメータ状態が許すより細かい変形を得るには、新たなノット・制御点の挿入が必要である。ここでは、カーソルが曲面を「押した」際に、図6(下)に見られるように新たなパラメータを挿入し、カーソルの周りに傘状に示された範囲内の細かい変形を実現している。本変形プリミティブのアルゴリズムは以下のとおりである。

```
if (the_cursor_crossed_a_surface) {  
    if (there_is_not_enough_knots_within_the_area)  
    {  
        /* Insert knots within the area  
         to obtain enough control points. */  
    }  
    /* Move control points within the area  
     and deform the surface according to  
     the deforming function shown in (1). */  
    show_surface (S');  
}
```

現在、ノットの挿入には時間がかかるため、ノット挿入を伴う変形は(1)項に比べ時間応答性が悪い。高速化が今後の課題である。

〈注意〉 上記(1)~(3)項いずれのプリミティブも、自己相貫チェックはしていないため、自分自身と交差した形状が生成されることがある。

4. 考察

上記試作システムを通じて明らかになった3D-DDMの特徴について考察する。

(1) わかりやすく多様な変形インタフェースの提供

押す、ひねるといった、直感的にたいへんわかりやすい変形インタフェースで、ひねりを含んだ6自由度の変形を実現することができた。制御点を移動することによる間接変形に比べ格段に操作感が向上した。また、様々な変形範囲の変形プリミティブが用意されていること、特に広い範囲がカーソルの「ひと押し」で変形可能となるため多数の制御点を移動せずにすむことが、ユーザの作業量の軽減に貢献すると考えられる。

(2) パラメータ操作からのユーザの解放 現在のパラメータ配置が許すより細かい変形も、自動的にパラメータを挿入する変形関数により可能となっている。これは、本手法が接点の挿入や多数の制御点の移動といったパラメータ操作からユーザを解放することを示す。

現在、変形形状に関してはまだパラメータ(特にノットベクトル)の状態に依存したものになっているが、形状の厳密なコントロールが実現できれば、本手法は完全にパラ

メータ状態から独立した変形インタフェースとなる可能性をもつ。

(3) 形状表現からの独立の可能性 本論文ではB-Spline 曲面について実装したが、それ以外の形状表現についてこれらと同等の変形関数およびプリミティブを実現することができれば、本手法は形状表現から独立した形状操作インタフェースとなる。既に二次元のDDMでは、パラメトリック表現された楕円の変形操作を実現しており、3D-DDMでも他のパラメトリック表現などに拡張が可能であると考えられる。

(4) 既存手法との並存が可能 本手法は、B-Splineの形状表現自体には手を加えていないので、既存の変形手法と併用することができる。

5. 将来の課題

本研究の今後の方向として、以下を考えている。

(1) 多様な変形の実現 変形の細かさの度合に応じて形状決義パラメータ数を自動的に増減することにより変形範囲および形状をより厳密に設定できるようにすることが必要であろう。また、二次元DDMでは既に実現されている、不動点など種々の制約に基づいた変形を三次元でも実現する予定である。

(2) 適当な変形プリミティブを選択できるインタフェースの開発 多様な変形関数を使い分けるために道具メタファの導入が有効であると考えている。すなわち、一つの変形関数を一つの道具に当てることにより、多様な変形関数の選択を容易にするのである。既に3・3節(iii)において、変形範囲の大きさを傘状のカーソル形状で示しているが、これも一種の道具といえることができる。このインタフェースを押し進め、仮想の道具を使った変形操作(“仮想こて”による平面化や“仮想型”を押しつけてその型の変形を得る“仮想型押し”など)を、変形プリミティブのバリエーションとして提供していく。

(3) リアルタイム性の追求 変形の速度が重要であるため、データ量が増加したり複雑な変形であっても速度が低下しないよう、変形アルゴリズムなどのいっそうの工夫が必要である。具体的には、なるべく局所的な処理の方法を工夫すること、場合によっては並列処理の導入を考えている。

(4) 触覚利用入力デバイスとの協調 3D-DDMと力覚フィードバック付き入力デバイスとの結合は、形状に触ったかどうかを知らせる以外にも大きな将来性がある。例えば、形状設計上の制約条件を力覚フィードバックにより表現する(肉厚に下限のある場合、その下限値に近づくと変形が重くなり、制限より薄くすることはできないようにするなど)といった応用も有効であろう。また、入出力デバイス開発の本来の目的である、人間の空間操作特性の計測・研究から、仮想形状操作時における適切な反力のあり方を模索する予定である。

(5) 形状表現からの独立の実現 B-Spline 曲面に

加えて、他のパラメトリック表現や voxel などの形状表現に拡張し、形状表現から独立したインタフェースの確立を目指す。

(6) 複数の点での同時変形操作の実現 複数の指でつまんで変形するなどの発展が考えられる。

(7) トポロジーの変化を伴う変形の実現。面に穴をあけたり、面どうしをつなぎ合わせるなど、形状のトポロジーが変わるような変形もサポートする必要がある。

(8) わかりやすさ、使いやすさの評価。従来の手法に比べて本手法がどれだけわかりやすく、使いやすくなったかを評価する必要がある。このような形状操作インタフェースの評価手法はまだ確立されていないので、まず心理物理学的な手法を応用して評価手法を開発する必要がある。

6. おわりに

三次元自由曲面を直接変形する操作手法 3D-DDM (3 Dimensional-Direct Deformation Method) を提案した。本手法は、従来制御点など形状を定義するパラメータや、法線・接ベクトルなど形状のもつ数学的属性を通じてのみ可能だった自由形状の変形を、直接カーソルで「押す」ことによる自然な変形を可能にしている。

3D-DDM の原理は、カーソルによる形状への変形操作量を形状定義パラメータの変化に自動的に変換することにより、ユーザには形状が直接変形されているように感じられるというものである。変形したい部分に直接触れることができ、形状を押ししたりひねったりするだけで変形できるため、自然でわかりやすい操作感が得られる。また、変形関数は自由度が高く、個々の形状パラメータ変化による変形を包含するだけでなく、様々な変形の特性をもたせることができる。

本手法を、著者らが同時に開発中の力覚フィードバック付き入力デバイスと結合することにより、仮想曲面モデルを試作した。ユーザは仮想曲面をデバイスで押すだけで直接変形でき、変形の際に力フィードバックを感じることができる。今後、入力デバイスとの結合を進め、人工現実感を用いたより使いやすい形状操作システムとして発展させていく考えである。(平成6年6月27日受付)

文 献

- (1) 福井・下条:「力覚をフィードバックする操作デバイスによる仮想形状のなぞり動作」, 通信学論 D-II, J74-D-II, 1052 (平3-8)
- (2) 鳥谷・千代倉編著: 3次元CADの基礎と応用(平3) 共立出版
- (3) 山中敏正: カメラデザインにおけるCADの活用, PIXEL, p. 118 (平4)
- (4) 横井浩史・山下樹里・福井幸男・下条 誠:「仮想形状操作のための直交型マニプレータの制御」, 第9回ヒューマンインタフェースシンポジウム予稿集(SICE) (平5)
- (5) H. Yokoi, J. Yamashita, Y. Fukui & M. Shimojo: "Development of 3D-Input Device for Virtual Surface Manipulation", Proc. of 3rd IEEE International Workshop on ROBOT AND HUMAN COMMUNICATION (1994)
- (6) 山下樹里・福井幸男:「曲線・曲面の直接操作」, 情報処理学会グラフィクスとCADシンポジウム'92論文集(平4)
- (7) 山下樹里・福井幸男:「形状の直接変形操作手法DDMの提案—2次元DDM—」, 通信学論 D-II, J76-D-II, 1780 (平5-8)
- (8) J. Yamashita & Y. Fukui: "A Direct Deformation Method", Proc. of IEEE VRAIS'93 (1993)
- (9) D. Terzopoulos & K. Fleischer: "Deformable models", *The Visual Computer*, 14 (1988)
- (10) J. P. Gourret, N. M. Thalmann & D. Thalmann: "Simulation of Object and Human Skin Deformations in Grasping Task", *Computer Graphics*, 23, 3 (1989)
- (11) 高橋秀智・金井 理・森澤利浩:「人工現実感を用いた形状モデリングシステムの開発」, Proc. 7th Symposium on Human Interface (1991)
- (12) 佐藤 誠・平田幸広・河原田弘:「空間インタフェース装置SPIDARの提案」, 通信学論 D-II, J74-D-II, 7 (平3)
- (13) T. A. Galyean & J. F. Hughes: "Sculpting: An Interactive Volumetric Modeling Technique", *ACM Computer Graphics*, 25, 4 (1991)
- (14) 猿渡基裕・水口武尚・平田幸広・佐藤 誠:「空間インタフェース装置による仮想物体のpick-and-place作業」, 第23回画像工学コンファレンス予稿集(平4)
- (15) G. Wolberg: Digital Image Warping (1990) IEEE Computer Society Press
- (16) T. J. True & J. F. Hughes: "Volume Warping", Proc. of IEEE Visualization '92 (1992)
- (17) D. Terzopoulos & D. Metaxas: "Dynamic 3D Models with Local and Global Deformations: Deformable Superquadrics", *IEEE Trans. Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 13, No. 7 (1991)
- (18) A. Borning: "The Programming Language Aspects of Thing-Lab, a Constraint-Oriented Simulation Laboratory", *ACM Trans. Programming Language & Systems*, 3, 4 (1981)
- (19) L. Piegl: "Modifying the shape of rational B-splines. Part 1: curves", *Computer-aided Design*, 21, 8 (1989)
- (20) L. Piegl: "Modifying the shape of rational B-splines. Part 2: surfaces", *ibid.*, 21, No. 9 (1989)
- (21) R. H. Bartels & J. C. Beatty: "A Technique for the Direct Manipulation of Spline Curves", Proc. of Graphics Interface '89 (1989)
- (22) W. Welch, M. Gleicher & A. Witkin: "Manipulating Surfaces Differentially", Proc. of Compugraphics '91 (1991)
- (23) W. M. Hsu, J. F. Hughes & H. Kaufman: "Direct Manipulation of Free-Form Deformations", *Computer Graphics*, 26, No. 2 (1992)
- (24) P. N. Georgiades & D. P. Greenberg: "Locally Manipulating the Geometry of Curved Surfaces", *IEEE Comput. Graphics & Appl.*, 1 (1992)
- (25) B. Fowler: "Geometric Manipulation of Tensor Product Surfaces", Proc. Symp. on Interactive 3D Graphics (1992)
- (26) B. Fowler & R. Bartels: Constraint-Based Curve Manipulation (1993) IEEE Computer Graphics & Applications
- (27) W. Welch & A. Witkin: "Variational Surface Modeling", *Computer Graphics*, 26, 2 (1992)
- (28) T. W. Sederberg & S. R. Parry: "Free-Form Deformation of Solid Geometric Models", Proc. of SIGGRAPH '86 (1986)
- (29) 山下樹里・横井浩史・福井幸男・下条 誠:「3次元自由形状の直接操作環境の構築」, 第9回ヒューマンインタフェースシンポジウム予稿集(SICE) (平5)

山下樹里 (正員) 1988年東京大学理学部情報科学科卒業。同年通産省工業技術院製品科学研究所(現, 生命工学工業技術研究所)入所。以来, 形状変形操作インタフェース, 人間工学データベースの研究に従事。情報処理学会, 日本人間工学会, ACM, IEEE Computer Society 会員。

福井 幸男 (非会員) 1973年京都大学精密工学科卒業。同年(株)日立製作所入社。1980年東京大学大学院機械工学専攻修了。同年通産省工業技術院製品科学研究所(現,生命工学工業技術研究所)入所。以来,形状入力システム,光学系設計システムの研究開発に従事。工学博士。情報処理学会,日本人間工学会,日本眼光学学会会員。

下条 誠 (非会員) 1973年電気通信大学機械学科卒業。1976年東京工業大学大学院精密機械システム専攻了。同年通産省工業技術院製品科学研究所(現,生命工学工業技術研究所)入所。1985年9月から1年間スターフォード大学客員研究員。福祉機器開発の研究,触覚センサシステムの研究開発に従事。工学博士。1984年度計測自動制御学会論文賞受賞。日本機械学会,計測自動制御学会,日本ロボット学会,日本人間工学会会員。

横井 浩史 (非会員) 1986年北海道大学精密工学科卒業。同年(株)トヨタ自動車入社。1993年北海道大学大学院精密工学専攻修了。同年通産省工業技術院生命工学工業技術研究所入所。以来,仮想形状操作システムの研究開発に従事。工学博士。日本機械学会,計測自動制御学会,精密工学会,International Association of Knowledge Engineers 会員。