人工現実感生成システムの 自由曲面モデリングへの応用

金 井 理* 高 橋 秀 智*

1. はじめに

自由曲面 CAD/CAM システムは、自動車・家電製品に対する金型の NC 加工などに、極めて有効に利用されている。このように意匠性が重要な製品の設計は、一般的にまず工業デザイナーによる意匠デザインから始められる。意匠デザインから金型製造までのプロセスを効率化するためには、意匠デザインの段階からデザイナー自身が CAD システムを利用して、設計対象の形状モデルを計算機内に作成する事が望ましい。しかし現状では、デザインの対象は、主にラフスケッチやクレイなど物理的な媒体上に造形されるのが殆どであり、その段階では CAD システムは有効に活用されていない。この原因は、現状の自由曲面 CAD システムが、以下のような問題点を持つからであると考えられる。

1) 自由曲面 CAD のもつモデリングコマンドの体系、入力に必要なデータ、曲面の生成や修正の手順は、自由曲面定義式の数学表現に依存して定められていることが多く、それらは、意匠デザイナーの造形感覚や造形手順に必ずしも適合していない。

2) クレイ・石膏型・木型などの物理モデル上での形状修正は、デザイナー自身によって材料の肉盛りや除去などで極めて直接的に行えるにもかかわらず、自由曲面 CAD システムでは、そのような3次元空間での直接操作で容易に形状モデルの修正が行えない。

3) 物理的モデルから3次元測定機等によってモデル上の点をサンプリングし、計算機内に自由曲面モデルを作成する作業は、2次元製図用 CAD の図形入力作業などとは比べものにならないほど時間と労力を要する。

図1(a)(b)に、意匠デザインにおける自由曲面 CAD システムの従来の利用方法を示す。(a)の方式は、物理モデル造形後にモデルを測定し曲面モデルを作成す

る方法である。また(b)の方式は、自由曲面 CAD システムで入力された曲面モデルのデータから物理モデルを加工し、そのモデルの形状を評価・修正する方法であるが、いずれの方法においても、上述の問題点は根本的に解決されていない。

これらは、自由曲面 CAD システムにおけるユーザーインターフェース機能の低さに起因するものであると考えられる。そこで図1(c)に示されるように、人工現実感生成技術を CAD システムのユーザーインターフェースに導入し、意匠デザイナーが計算機内の曲面モデルを仮想的かつ直接的に造形できる機能を実現すれば、これらの問題を解決出来る可能性がある。

筆者らは、曲面モデルの数学表現を意識させない曲面の定義や変形、および操作者による自由曲面モデルの3次元空間内での直接操作、などの機能を有し、操作者が計算機内の仮想空間にある B-Spline 曲面モデルを直接的に操作・造形できる自由曲面 CAD システムを新たに開発した。本解説では、筆者らが開発したこの自由曲面モデリングシステムの機能の概要とともに、従来の関連研究の紹介、さらに今後の課題について述べる。

2. 関連研究

特殊なインターフェースを用いて、自由曲面や曲線の形状を、より直感的に直接的にモデリングしようとする試みに関しては、いくつかの研究例がこれまでに報告されている。

ユタ大学の Clark らは、WAND と呼ばれる3次元座標入力装置および Head Mounted Display を開発し、これらを用いて B-Spline 曲面の入力と修正作業を、曲面モデルの立体像を見ながらリアルタイムで行なえるシステムを開発した¹⁾。また、Krueger らが開発した Video Desk では、操作者の指の動作をテレビカメラで計測し、CRT 画面上でスプライン曲線を指ではさんで変形させたり、粘土を手で造形させる行為が疑似的に行なえる²⁾。また Sachs らは、3次元マウスを取付けたスタイルラスと小型パレットを操作者に持たせ、空間内の任意の

原稿受付 1992 年 8 月 23 日

An Application of the Artificial Reality to the Free-Form Surface Modeling

* 東京工業大学工学部

図1 意匠デザインにおける自由曲面 CAD システムの利用形態

平面上に、直接自由曲線を入力修正できるシステムを研究している³⁾。

さらに、仮想空間内の物体モデルと操作者の手指などの接触状態や相互作用を、より詳細に認識させる目的から、力フィードバック機構を有するインターフェースの研究例が、最近報告されている。福井らは、ヘッド部に2次元ロードセンサーを装着したXYレコーダーにより、2次元自由曲線モデルのうねりや段差の感触を認識したり、曲線形状の1部を押しながら変形させることのできるシステムを開発した⁴⁾。佐藤らは、操作者の指を吊る4本の糸により、計算機内の仮想立体との接触の認識や、指の押しつけによる多面体の変形加工が可能なシステムSPIDARを開発している⁵⁾。又、岩田らも、DCモーターおよびクラッチ機構を用いて、2次元弾性体モデルを指でつぶすことにより生じる反力を、操作者の指へ帰還できるフォースディスプレイを開発している⁶⁾。

しかしながらこれらの研究例は、意匠デザインにおける自由曲面モデリングを必ずしも目的としたものではないため、曲線/曲面のデータの直接入力や、力感覚を用いた曲面形状の修正など一連の自由曲面モデリング作業への応用については議論していない。

3. 人工現実感生成技術の自由曲面モデリングへの応用

3.1 システムの概要と機能

筆者らは、曲面モデルからの力フィードバックに基づく接触感覚を認識しながら、意匠設計における自由曲

線/自由曲面のモデリング作業を、操作者が3次元空間で直接的に行なえる自由曲面モデリングシステムを新たに開発した。以下に、開発したシステムの機能と概要について簡単に説明する。

図2に、システムの全体構造を示す。操作者は、図3に示されたようなデバイスを右手に装着してモデリング作業を進める。本システムにおける自由曲面モデリング処理は、以下の流れに沿って進められる。

- 1) 操作者の手の位置/姿勢、及び指の曲げ角データが、手に取りつけられたセンサーを通じて入力される。
- 2) 入力されたデータに基づき、操作者が行なったジェスチャの解析が行なわれ、その解析結果と仮想空間内の曲面モデルの状態から、操作コマンドの種類が判別される。
- 3) 曲線/曲面の形状定義コマンドと解釈された場合には、手指の先端位置を算出し、3次元の直接ポインティング作業により、曲線/曲面の初期形状が定義される。
- 4) 曲面形状の変形を行なうコマンドと解釈された場合には、仮想空間内の手指モデルを1)から得られたデータに従って移動させる。さらに、手指モデルと曲面モデルとの接触を判定し、接触が生じている場合には、その接触により生じる曲面の弾性変形後の形状、及び変形で生じる反力を有限要素法によりリアルタイムで計算する。
- 5) 変形後の曲面形状を表示すると共に、曲面モデルからの変形反力データを反力生成機構へ送り、操作者の手指の曲げに對抗するモーメントとしてフィードバックする。

図 2 開発した自由曲面モデリングシステムの全体構造

図 2 に示されたように、センサー類のインターフェースおよび反力生成機構の制御は、パーソナルコンピュータ (PC 286 VF) で行なわれる。また、仮想空間内での曲面及び手のモデルの操作と曲面形状の弾性変形解析は、グラフィックアクセラレータ付 EWS (HP 9000/720-TVRX 2) で行なわれている。

3.2 手指動作の計測センサー⁷⁾

開発されたシステムでは、図 3、図 4 のように操作者が手にグローブ形の双方向性デバイスを装着してモデリング作業を進める。操作者の手指の曲げ角は、図 3 に示されるように、このグローブの指関節部に取付けられた導電ゴムを用いた曲げ角センサーにより計測される。計測される関節は、小指以外の各指の MP および PIP 関節の合計 8 カ所である。この曲げ角センサーの測定精度は、70 度の可動範囲に対して約 5 度である。

一方、操作者の手の空間的な位置/姿勢は、図 3 に示されたように、双方向性デバイスに取付けられた超音波

距離計により計測される。操作者の手には 3 台の超音波発信機が、またディスプレイ横に 4 台の受信機が取付けられており、それらの間の距離が計測され、発信機の空間的な位置が求められる。発信機を 1 台ずつ時分割で発信させることにより、3 台の発信機の空間位置をそれぞれ求める事ができ、手の甲の位置および姿勢が計測できる。本センサの空間位置の測定精度は、約 3 mm である。

3.3 反力生成機構

図 5 に、手指曲げへの反力生成機構の構造を示す。操作者の手の甲にはアタッチメントが取付けられ、各指には固定リングが装着されている。固定リングに接続されたワイヤーをスプリングを介してパルスモーターで引っ張ることにより、手指の PIP 関節の曲げに対する反力モーメントを生成できる。また MP 関節に取り付けられたワイヤーは、物体との接触時に機構内の電磁ブレーキによりロックされる。PIP 関節を引っ張るワイヤー張力は、後述する手指モデルと曲面モデルの接触から有限

図 3 双方向性デバイス

図 4 システムの操作状況

図 5 反力生成機構

(a) 初期形状, (b) 曲面の「ねじり」操作,
(c) 曲面の「引張り」操作, (d) 曲面の「押し」操作

図 8 システムによる自由曲面モデリング例

自由曲面モデルの弾性変形による形状修正の場合、指の操作に対するモデルの変形応答は約 0.2 秒を要する。また応答時間の約 2/3 は、システムを構成する 2 計算機間の通信処理とモデル表示処理に要している。

4. 今後の課題

意匠設計における自由曲面モデリング作業を、操作者が直接的かつ効率的に行えるインターフェース環境の実現を目的として、人工現実感生成技術に応用した自由曲面モデリングシステムを開発した。今後の課題として、以下の点が挙げられる。

- 1) センサー類の測定精度及び周波数特性の向上
- 2) 弾性変形解析モデルに対する弾性係数などの物理定数の設定方法の確立
- 3) 曲面モデル位相構造の動的変更処理の実現

4) 意匠用の物理モデルの造形作業をより意識した、仮想的な除去及び付着操作による曲面モデルの形状定義機能の実現

人間と計算機間のインターフェースは、計算機をどれだけ身近な「道具」として利用できるかどうかを決定づけるものであり、人工現実感生成に関する研究目標の 1 つもその点にあるといえよう。自由曲面モデリングシステムが、意匠デザイナーにとっての 3 次元モデル造形の「道具」となるためには、キーボード・マウス・CRT などの現状のデバイスに捕われない新たな形態のインターフェースの開発が今後も必要である。

参 考 文 献

- 1) J. H. Clark : Designing Surfaces in 3-D, Commn. of ACM, Vol.19, No.8 (1976), p. 454.
- 2) M. W. Krueger : Artificial Reality II, Addison Wesley (1991), p. 110.
- 3) E. Sachs et al.: 3-Draw : A Tool for Designing 3D Shapes, IEEE CG & A, Vol.11, No.6 (1991), p. 18.
- 4) 福井ほか：接触感覚をとまなう形状操作手法, 第 5 回ヒューマンインターフェースシンポジウム論文集, (1989), p. 19.
- 5) 佐藤ほか：空間インターフェース SPIDAR の提案, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J74-D-II, No.7 (1991), p. 887.
- 6) 岩田ほか：仮想立体の硬さを表現するためのフォースディスプレイ, 第 7 回ヒューマンインターフェースシンポジウム論文集, (1991), p. 153.
- 7) 高橋, 金井ほか：人工現実感を用いた形状モデリングシステムの開発, 第 7 回ヒューマンインターフェースシンポジウム論文集, (1991), p. 153.
- 8) 高橋, 金井ほか：計算機内モデルとの接触を可能とする双方向入出力デバイスによる形状モデリングシステムに関する研究 (第 3 報), 1992 年度精密工学会春期大会講演論文集, p. 649.
- 9) A. P. Pentland et al.: Good Vibrations : Modal Dynamics for Graphics and Animation, ACM Comput. Graphics, Vol.23, No.3 (1989), p. 215.
- 10) 高橋, 金井ほか：計算機内モデルとの接触を可能とする双方向入出力デバイスによる形状モデリングシステムに関する研究 (第 2 報), 1991 年度精密工学会春期大会講演論文集, p. 647.
- 11) H. Takahashi and S. Kanai : Free-Form Surface Modeler with Artificial Reality, Proc. of 1st Japanese-French Congress of Mechatronics, Oct (1992).

金井 理 (Satoshi KANAI)

1982年北海道大学工学部精密工学科卒業。1987年同大学院博士課程修了。同年北海道大学工学部精密工学科助手。1989年東京工業大学工学部機械工学科助教授となり、現在に至る。CAM/CAT システム用ソフトウェア、形状モデリングとモデリングインターフェースに関する研究に従事。精密工学会、日本機械学会、日本設計学会、システム制御情報学会の会員。

高橋秀智

(Hidetomo TAKAHASHI)

1987年北海道大学工学部精密工学科卒業。1989年同大学院修士課程修了。同年東京工業大学工学部機械工学科助手となり現在に至る。AR を用いた形状モデリングシステムの開発に従事。精密工学会、日本機械学会の会員。