

平面カーソルを用いた対話的な形状モデリング

関根弘隆 寺嶋廣克

日本電気(株) C&Cシステム研究所

多面体を対象とする対話的な形状モデリングシステムを試作した。本システムの特徴は、確定した数値を用いて形状を作成していくのではなく、画面上の形状表示を見ながらカーソル操作により感覚的に形状を作成していける点にある。このような特徴を実現するために、3次元空間の任意の平面を直接位置決めする平面カーソル手法を考案し、さらに立体を平面で切断するカット操作を形状作成基本操作として用いた。本稿では視覚的インタフェースを備えた形状モデリングの実現例として本システムの動作・手法について報告し、その延長上に想定している、デザイナーが自己の形状イメージを短時間に具体化できるような新しい形状モデリングの形態について述べる。

AN INTERACTIVE SHAPE MODELING SYSTEM USING A PLANE CURSOR

Hiroataka SEKINE and Hirokatsu TERAJIMA

C&C Systems Research Laboratories, NEC Corporation

4-1-1, Miyazaki, Miyamae, Kawasaki, Kanagawa, 213 Japan

An interactive geometric modeling system for a polyhedral shape has been developed. The system is designed to enable generating the shape visually and intuitively by cursor manipulation, so that there is no requirement to input numerical parameters or dimensions. For this purpose, a new cursor technique, called a plane cursor, which directly locates a plane in 3D space was developed. A cut operation, which cuts off a segment from a solid is used as a basic operation in shape generation.

The functions and techniques involved in the system, which construct a visual interface for the system, are reported. The future status of the system, in which a designer can quickly transform his shape image concept into an actual model shape, is described.

1. はじめに

1-1 形状モデリングの問題点

形状モデリングの課題の1つはユーザインタフェースの改善にあると言われている[1]。この課題を解決するために、従来よりいくつかの研究が行われているが[2][3]、必ずしも十分な解決に至ったとは言い難い。

1-2 言語的インタフェースから視覚的インタフェースへ

筆者らは、以上の点をふまえ、数値/コマンド中心の言語的なインタフェースでなく、直接操作主体の視覚的なインタフェースによる形状作成システムの開発を進めている。

想定しているシステムのイメージは、画面を介して対象が直接操作でき、彫刻や粘土細工のように感覚的に3次元形状が作成できるようなシステムである。

1-3 平面カーソルとカット操作による形状作成システム

上記方針に基づき多面体まで作成できるシステムを試作した[4][5]。このシステムの特徴は形状を数値を使わずカーソル操作のみで作成できることにある。このような形状作成システムが実現できた要因としては、3次元幾何データの入力方式として平面カーソル手法を新たに開発したこと、形状変形の基本操作として立体を切断するカット操作を用いたことがあげられる。

以下本稿では、ユーザインタフェースの側面から、平面カーソルの仕様、カット操作をベースとした形状モデリングの方法、従来手法との相違、本アプローチの延長上にある新しい形状モデリングの形態について述べる。

2. 平面カーソルの仕様

2-1 平面カーソルとは

平面カーソルとは3次元空間における平面をマウスなどの2次元座標入力デバイス(以下、単にマウスと略す)を用いて視覚的に位置ぎめする手法である。3次元空間には平面カーソルの表す平面が置かれ、立体がその平面によって切断されている画像が表示される。オペレータは画面を見な

がらその平面を試行錯誤的に動かし位置ぎめを行う(図1)。

平面カーソルには法線方向移動、回転、面上移動の3つの操作モードがあり、オペレータは操作しながら自由にモードを切り換えることができる。試作したシステムではモード切り換えはマウス上のボタンによって行っている。

2-2 平面カーソルの表示(図2)

平面カーソルの表示においては、立体が平面カーソルの表す平面によって切断され、切断面から先の部分が切り落とされた状態としてワイヤフレーム表示されている。稜線の表示は簡易陰線処理が施されている。また、立体の切断面上には平面カーソルの中心点(切断面の重心位置に設定)を示すマークが表示される。マウスを動かすと、立体の切断表示および中心点のマーク位置の表示が動的に変化する。

試作したシステムは16ビットパソコンを用いているが表示はリアルタイムに追従する。

2-3 法線方向移動モード(図3)

平面カーソルを法線方向に移動するモードである。画面上において切断面法線の方向にマウスを動かすと、表示画像において切断面および中心点のマークが法線方向に移動する。このとき切断面は向きを保ったまま形のみ変化する。

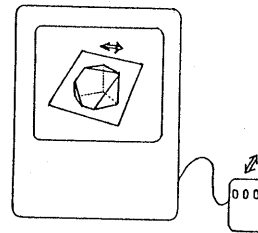


図1 平面カーソルとは

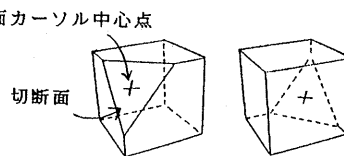


図2 平面カーソルの表示

2-4 回転モード (図4)

平面カーソルを中心点まわりに回転させるモードである。画面上で切断面を面上のいずれかの方向に押すようにマウスを動かすと、表示画像において切断面がその方向に回転する。このとき切断面の向きおよび形は変化し中心点は動かない。

法線方向移動モードと回転モードの2つのモードにより任意の無限平面を指定することができる。

2-5 面上移動モード (図5)

平面カーソルの中心点を切断平面上で移動させるモードである。画面上でマウスを切断面上の意図する方向に動かせば、表示されている中心点のマークがその方向に移動する。切断面の形は変化しない。このモードは2-7で述べる立体の選択に用いられる。

2-6 平面カーソル中心点の設定 (図6)

平面カーソルの中心点は切断面の重心位置に設定される。上記3つの操作モードの操作中には中心点の位置は各モードの動作に従うが、操作モードから一旦抜け出るか、あるいは他の操作モードに移った場合には中心点は重心位置へ自動的に修正される。

試作システムではマウス上のボタンを離すと操作モードから抜け出すことができるので、中心点位置を修正することが簡単に行える。

2-7 対象立体の選択

本システムは3-2で述べるように3次元空間に複数個の立体が存在するようなデータ構成をとっている。従って、平面カーソルの操作は1個の立体を対象とするのではなく、複数個の立体を対象としその中の1個を選択しながら行われる。平面カーソルの操作中に対象立体を切り換えるには、面上移動モードあるいは法線方向移動モードにおいて平面カーソル中心点を3次的に動かし意図する立体の内部に入れればよい(図7)。面上移動モードにおいて平面カーソルを動かしていくと、同一平面上で立体の切断面が切り換わっていくことになる(図8)。

なお、試作システムでは、立体の頂点、稜線、面をピックして別の立体に平面カーソルをセットすることも可能である。

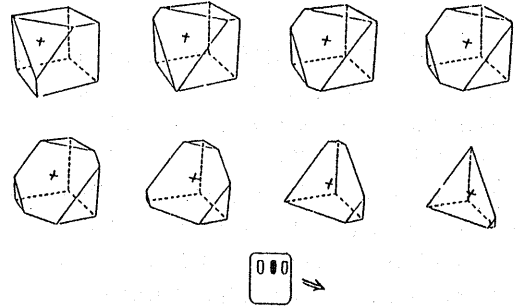


図3 法線方向移動モード

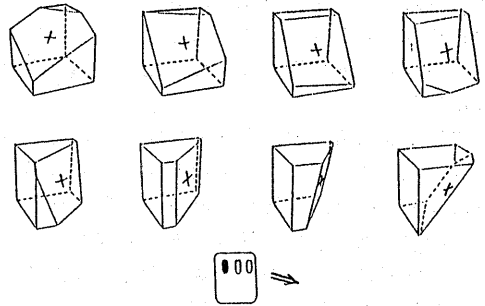


図4 回転モード

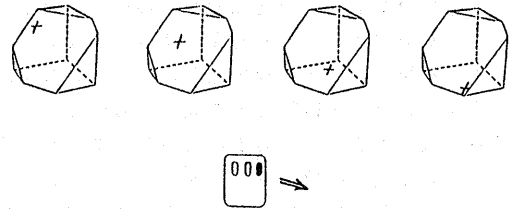


図5 面上移動モード

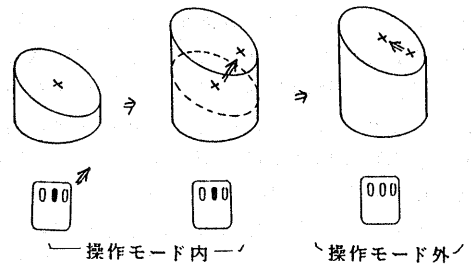


図6 平面カーソル中心点

2-8 マウス移動方向と回転モードにおける回転方向の対応づけ

回転モードにおける切断面の回転方向はオペレータのマウス移動方向から決まる。平面カーソルの操作のしやすさはこの対応関係のとり方によって大きく変わってくる。

わかりやすくするために切断面上に切断面の回転方向を表す方向ベクトルを考えることにする。切断面回転はこの方向ベクトルに基づいて次のように行われる。切断面上において方向ベクトルと直交し、平面カーソルの中心点を通るような直線を求める(図9)。この直線を回転軸とし、マウスの移動量に比例する量を回転角として切断面の回転を行う。このようにすればちょうど方向ベクトルの指す方向に切断面を押し回して回転させることになる。

次にマウスの移動方向から切断面上の方向ベクトルを決める方法について説明する。方式検討にあたって次の三点が満足されることを条件とした。

- ①画面上でマウス移動方向と方向ベクトルの画面に投影したものをできるだけ近くする。
- ②切断面上において特定の方向ベクトルが指示しにくいことがないように対応関係は一樣にする。
- ③マウスを同一方向に動かし続けた場合は回転方向も同一方向を保つようにする。

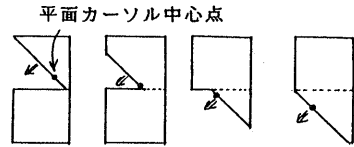
その結果、次のような方法をとることにした。

画面上にマウス移動方向を表すための2次元座標系を設定する。切断面上にも方向ベクトルを表すための2次元座標系を設定する。マウス移動方向と方向ベクトルは各々の座標系において同一成分値を持つものとする。このとき求める対応関係は2つの座標系間の変換の問題となる。

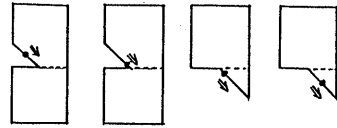
他の操作モードあるいは操作モード外から回転モードに入る時には、切断面上の2次元座標系が新たに設定される。すなわち、視点座標系において、画面を1枚の平面と見立てこの平面を切断面と一致させるように最小角度で回転させ、回転によって画面座標系が切断面に移ったものを切断面上の座標系として設定する(図10a)。

回転モードに入って切断面が回転していく時には、切断面上の座標系は切断面とともに回転するようにする。

切断面の回転を続けていき、マウス移動方向と方向ベクトルの画面に投影したものが大きくず



(a)法線方向移動モード



(b)面上移動モード

図7 対象立体の選択

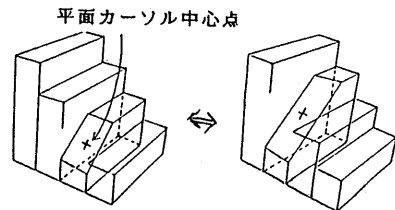


図8 立体選択による切断面の切り換わり

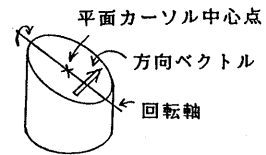


図9 回転モードにおける回転軸

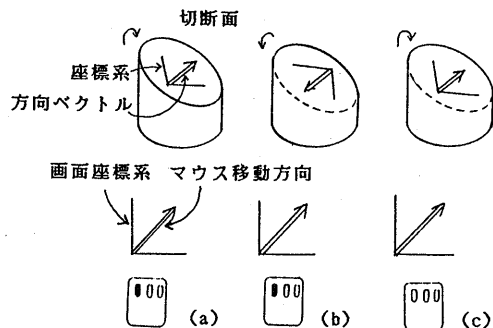


図10 マウス移動方向と方向ベクトルの対応

れてしまった場合には（図10b）、オペレータが一旦回転モードから抜け出れば、切断面上の座標系の再設定が行われるようにした（図10c）。

すなわち、回転モード操作中は対応関係を一定に保ったまま切断面が回転していき、ズレが大きくなった場合にはオペレータの判断のもとに対応関係が再設定されズレが解消されることになる。

以上がマウス移動方向から方向ベクトルすなわち切断面の回転方向が決まる過程である。このような方法をとることによりオペレータはマウスを用いて自在に平面を回転させることができる。

2-9 平面カーソルの拘束的操作

平面カーソルは中心点まわりに2次的に回転できるが、稜線ピックにより既存稜線を回転軸方向とした1次的回転も可能としている。これは一方向のみ傾斜を持つような面を生成するのに都合がよい（図11）。

また、面ピックによって既存面と平行になるよう平面カーソルをセットすることも可能である。これは平行面を生成するのに都合がよい。

3. カット操作による形状モデリング

3-1 平面カーソルによるカット操作

平面カーソルの操作において、対象立体が選択され、切断面の位置ぎめが完了したならば、カット操作のトリガを与えることによって立体の切断

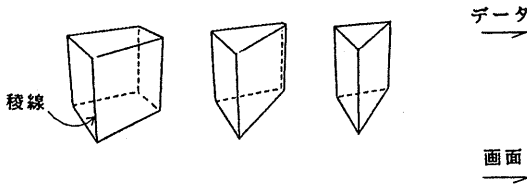


図11 稜線を回転軸とする平面カーソルの回転

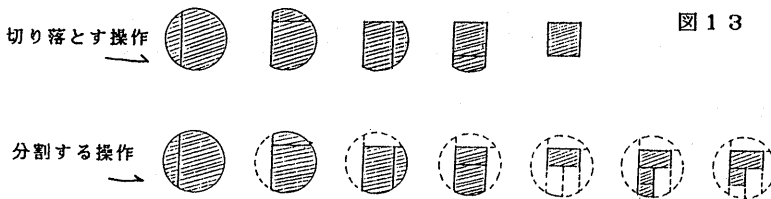


図12 カット操作の拡張

が行われ、立体の一部が切り落とされる。1回のカット操作により多面体の1つの面が生成されることになる。

3-2 任意の多面体形状の作成

凸多面体のみを対象とするならば、3-1の方法を繰り返していくことにより形状が完成するが、凹多面体を含む任意の多面体形状を作成することはできない。そこでカット操作を立体の一部を切り落とす手段から、3次元空間（ただし実際には最初に充分大きなプリミティブを用意する）を繰り返し分割していく手段へと拡張することにする（図12）。すなわち、用意されたプリミティブを複数の凸多面体に分割していき、分割された個々の凸多面体のうち必要なものを接合することにより目的の多面体形状を表すようにする。このようにすれば任意の多面体形状が複数個の凸多面体の合成形状として作成されることになる。

3-3 形状作成プロセス

以上述べた方式に基づいて形状の作成を行う。その作成プロセスを次に示す（図13）。

- ①充分大きなプリミティブ（凸多面体形状）が用意される（図13a）。
- ②平面カーソルにより切断面を位置ぎめする。
- ③立体を分割する（図13b、e）。一方は表示、他方は未表示となる（図13c、f）

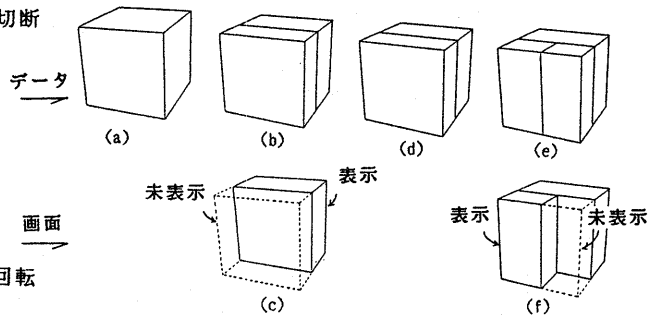


図13 形状作成プロセス

④ 3次元空間内の分割された立体（未表示も含めて）のうちから1個を選択する（図13d）。

⑤ ②③④を繰り返していく。

これだけのプロセスによりプリミティブ形状からいかなる多面体形状でも削り出すことができる。

3-4 形状作成例

本システムで作成した形状例を示す。図14は立方体に平行六面体状の穴をあける操作を示している。図15はカット操作による形状作成過程を示している。図16、図17はキーテレフォン形状、図18はCRT筐体形状である。図16、図17はどちらも15～30分程度で作成した。

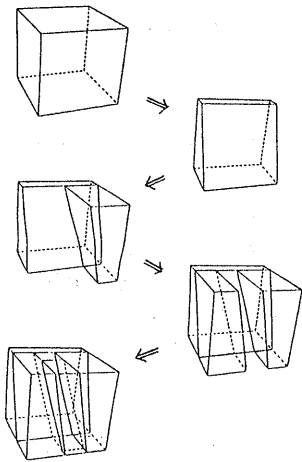


図14 穴あけ操作例

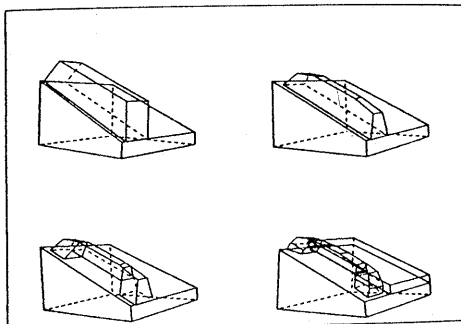


図15 形状作成過程例（キーテレフォン）

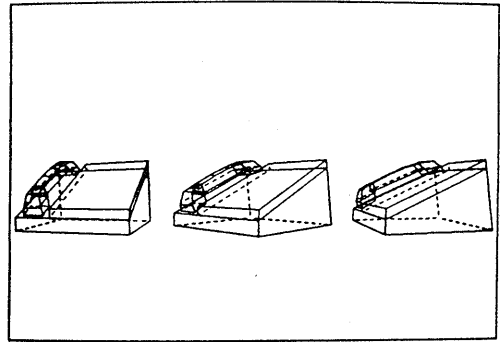


図16 形状作成例（キーテレフォン）

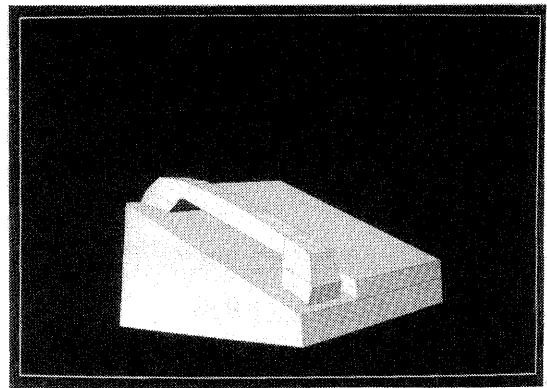


図17 シェーディング表示例（キーテレフォン）

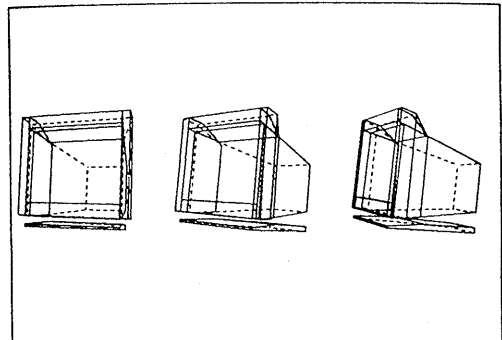


図18 形状作成例（CRT筐体）

4. 従来の手法との相違

4-1 従来の平面入力との比較

従来の平面入力は、3点を指定する方式、既存の面と平行もしくは指定した角度を持つように指示して平面を発生させる方式が多かった。これらの方法は複数回のアクションが必要であり、試行錯誤的に位置ぎめすることができない。また、3次元空間の任意の平面を入力することも難しい。

これに対して平面カーソルは視覚的な平面入力手法であり、試行錯誤的な位置ぎめ、任意の平面入力を可能としている。

4-2 平面カーソルと3次元カーソル

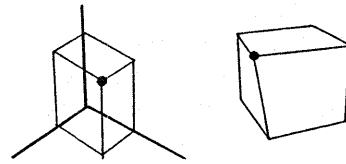
いわゆる3次元カーソルとは3次元空間における一点を指定する方法である。平面カーソルも3次元カーソルもともに視覚的な3次元幾何データ入力手段であるが、平面カーソルのほうが正確に意図するデータを入力できるようである。例えば立方体形状を両者で作り比べた場合、平面カーソルのほうが整った形に作成できる。

これはカーソルの状態を示す視覚フィードバックの差に起因すると考えられる。3次元カーソルの視覚フィードバックは図19に示すように多義的であったり作成中の形状とは無関係である場合が多い。これに対して、平面カーソルは視覚フィードバックとして切断面の表示を行っており、作成中の形状との相対的な位置関係が一義的に把握できるわけである。

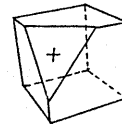
さらに副次的な効果として、平面カーソルにおいて切断形状を動的に表示させることによって、平面だけでなく対象立体に対する奥行知覚が促進される。立体を動的に回転させた場合に運動視差によって奥行知覚が促進されると近い働きと考えられる。

4-3 面単位の操作と頂点単位の操作

従来の形状作成方式には基本的な形状操作として頂点単位の操作を用いたものも多かった。例えば1つ1つ頂点の位置を決め、頂点を1周するように結びつけて面を入力するという方法等である。しかし、頂点単位の操作を基本操作とした場合、通常思いつくような形状変形を行おうとすると複数回の操作ステップを必要とする場合が多い。その結果全体として効率のよい形状作成がのぞめなくなる。



(a) 3次元カーソル



(b) 平面カーソル

図19 カーソルの視覚フィードバック

それに比べると面単位に形状を作成するカット操作は、大部分の形状を、頂点単位の操作よりも効率よく作成することができる。つまり、面単位の操作は3次元形状作成の操作単位としてちょうど良いレベルにあると言える。

4-4 集合演算やスワイプとの比較

集合演算あるいはスワイプ操作は頂点単位の操作や面単位の操作に比べると、効率よく直観的に意図する形状を作成できる方式と言える。しかし、これらの操作が効果を発揮するのはある限られた範囲内での形状作成においてであり、不規則な形状や頭に思い描く任意の形状を作成する場合には適用するのが難しくなってくる。

これに対してカット操作は不規則な形状を含む幅広い範囲の形状を作成することができ、汎用的に形状を扱える基本的操作として適している。

4-5 平面カーソルとカット操作による利点

以上述べてきたことをまとめると次のようになる。面単位の操作であるカット操作はさまざまな形状を効率よく作成するのに適した汎用的な操作であるが、任意の切断面を正確にかつ視覚的に入力する手段がなかった。

平面カーソルはこの点の解決を図ったものであり、手を1~2ストローク動かすだけで任意の切断面を入力でき、数値的な厳密さは欠けるものの

従来の視覚的入力手段に比べて数段正確に位置ぎめすることができる。

以上の方式開発の結果、数値を使わない視覚的インタフェースをベースとした任意の多面体形状を効率よく作成できる形状作成システムを実現することができた。

5. 新しい形状モデリングの形態

5-1 形状イメージを具体化する手段としての形状モデリング

形状モデリングは主として機械設計において寸法値が確定した後で、解析やNC加工のデータモデルを生成する手段であった。しかし、製品の意匠デザインやテクニカルイラスト作成等への適用を考えると、これらの作業では形状は数値化されおらず、構想段階における漠然とした形状イメージあるいは観察で得た形状イメージが原型となっている。このような作業に形状モデリングを用いようとした場合、要求されるのは、形状に対する必要以上の厳密さではなく、いかに効率よく負荷をかけずに形状イメージを具体化できるかということになる。

5-2 視覚的インタフェースによる形状モデリング

従来の形状モデリングのインタフェースはパラメータや座標値を数値で入力するという言語的なものが主流であった。しかし、5-1で述べたように数値化されていない形状イメージを具体化する手段として用いる場合、できるだけ数値を使わず、形状の空間的特徴を直接入力できるような方法をとりたい。視覚的インタフェースの目的の1つはこのように形状の空間的特徴を数値的なデータに変換せずそのまま入力できるようにすることである。

5-3 新しい形状モデリングの特徴

平面カーソルとカット操作による形状作成システムは、その延長上に、視覚的インタフェースを備え、形状イメージを具体化する手段としての形状モデリングを想定している。それは従来の形状モデリングと比べると次のような点を特徴として持つことになる。

- ①直接操作（見たままの操作）を主体とした形状操作。

- ②試行錯誤的な位置ぎめ。
- ③人間の直観になじむ形状変形。
- ④大きすぎず小さすぎず適当なレベルの操作単位。
- ⑤形状の変更修正が容易。
- ⑥概形から始め徐々に精密に仕上げていくことが可能。
- ⑦充分速いレスポンスによりリアルタイム動作が可能。
- ⑧立体形状の把握に効果的な形状表示方式。
- ⑨適当な拘束条件のもとに形状を作成していることが可能。
- ⑩ユーザフレンドリなマンマシンインタフェース。

5-4 CAD設計プロセスへの応用

CADを用いた機械設計、建築設計の分野にもこのような形状モデリングを応用していくことができる。すなわち、まず設計者の持っている形状イメージを上記の形状モデリングを用いておおまかに入力しておき、必要な寸法値や属性あるいは付与すべき拘束条件などはその形状モデルに対して後から指定していくようにすればよい。

CADが対象とするような厳密な形状データでも、このように、形状そのものを表すあいまいな空間的情報と、数値情報とに分離し、それぞれの特性に応じた入力手段を用意することにより、CADにおける課題の1つである形状データ入力の負荷軽減を実現できる可能性がある。

参考文献

- [1] 沖野, "ソリッドモデリングとコンピュータグラフィックス", 情報処理学会「グラフィクスとCADシンポジウム」60年12月
- [2] 福井ほか, "投影面スケッチによるソリッドモデル入力法", 情報処理学会論文誌26-6
- [3] 中島ほか, "等角投影法を用いた簡易な立体形状入力システムの試作第2報", 情報処理学会グラフィクスとCAD研究会報告24-1
- [4] 関根ほか, "対話型3次元形状作成システム-3次元カーソルによる形状変形-", 情報処理学会第33回全国大会3S-9
- [5] 関根ほか, "対話型3次元形状作成システム-任意の多面体形状作成-", 情報処理学会第34回全国大会5E-5

討 論

1. 平面カーソルを用いた対話的な形状モデリング

関根（日電）

川合：形状作成プロセスで未表示の部分を選択するときに、未表示の部分自体はどのように表示されるのですか。

関根：平面カーソルの中心点を未表示の部分に移動させると、その部分が表示されます。

近藤（東芝）：具体的に未表示部分をどのように選択するのですか。

関根：平面カーソルの中心点を3次元的に、すなわち法線方向移動と面上移動とによって移動させて面ピックを行います。

川越：彫刻のようなものはこうしたカット操作でうまく行くでしょうが、機械部品のようなものはカット操作だけで作るのは難しいと思います。やはり、いろいろな方法を組み合わせて使うべきではないでしょうか。

川合：穴をあける場合は、やはり集合演算で穴としてあげたいですね。

関根：ベーシックな操作としてカット操作を使って行くということであり、集合演算を排斥するというものではありません。

浜川：穴の形状を平面カーソルで定義して、集合演算で穴をあけるというような組み合わせができるわけですね。

近藤（東芝）：しかし、ご提案の方法を使うのであれば、単純な穴をあけておいて平面カーソルで形を変えて行くという方が、表面の形状作成と統一のとれた操作になるのではないのでしょうか。

関根：そうですね。

川合：平面カーソルの表示は他の平面の表示と区別されているのですか。

関根：特別に区別はしていません。平面カーソルを動かせば、どれがカーソルによる面かはすぐに分かります。

原田：形状はどのようなデータ構造で実現されていますか。

関根：ウィングドエッジデータ構造で表現しています。隠れている部分は単に表示していないだけです。

福井：平面カーソルの拘束的操作で、1点を中心とする回転などを入れてはどうですか。

関根：あまり多くの操作を入れると使い方が複雑になるので、バランスが必要だと思います。

守屋：マウス以外の入力装置は何か考えていますか。平面カーソルなのだから平面を使うとか。

（笑い）

関根：身近な入力装置としてマウスを使いました。また、3次元デジタイザを使うことも考えられます。