

解 説

幾何モデル生成・処理とマン・マシン・インタラクション*

穂 坂 衛** 木 村 文 彦***

1. ま え が き

三次元空間における物体の創成、干涉、組立の情報を取り扱う問題は、入力の問題が解決されたとしても、情報表現の難しさのため、コンピュータにとって苦手の問題に属する。工業における製品の設計から完成に至るまでの主流となる情報処理の作業は、対象を具体的に定義する情報として図面を作り、それをデータベースとして参照し、製造のための諸作業に利用していくことである。その中で上記の三次元の問題が至る所に現われるため、コンピュータは設計計算や図面清書などの補助の仕事や、工程管理、NC 制御などに多数動員されているものの、そのもとになる図面情報の生成、処理、参照の仕事は人に依存せざるを得ないのが現状である。かつて 1960 年代、コンピュータグラフィックスが現われた時には、人とコンピュータの対話によって、三次元問題は取り扱われ、設計における従来の形式の図面は不必要になるであろうと強力に宣伝されたこともあった。しかし、それには高度のパターン認識の能力と三次元空間に対する知識をコンピュータが備えていることが前提になるのに、これを唱えた人達は入力方法を含めて認識が浅く、実質的な進展はなかった。彼等の幻影はすでに霧散し、70 年代になるとこの問題に触れる人はいなくなった。筆者はかつて、その失敗の原因を分析し、批判もしたが¹⁾、同時にこの問題の中に情報工学や情報科学にとってチャレンジすべき多数の課題が含まれていることに気づき、腰をすえて問題の考察と解決とに取り組むべきであると考え、その仕事に取り掛かったのは 70 年代の初期にさかのぼる。当時、国際的には未だ何等の動きは感ぜられず、図を画くための記述言語や、機械部品の切削

のためのカット経路を定義するプログラミング言語を作ることが専ら行われており、我が国にも導入されつつあった。それらでは、人が図を解釈しているのであって、図面は人のための対象のモデルとなっている。もし、コンピュータが作業するのであれば、立体のモデルをコンピュータ内部に持たねばならない。そのためにはモデルを表現することやそれを処理できるソフトウェアを作ることが必要であると考え、我々は研究を開始した。73 年には新しいインタラクティブ言語 GIL²⁾ と共にモデル取り扱いの基本的な理論とプログラムが完成し IFIP Congress '74 においてその研究を発表した³⁾。しかし、それは時期尚早であったのと工業との関係を明確にしなかった原理的なものであり、特殊な言語を用いていたこともあって、論文の反響は大きくなかった。その後われわれは現実についてより勉強し、立体生成処理のソフトウェアの高度化、大型機の使用、ハードウェアの整備、二次元入力方式の開発をはかり、取り扱い対象も実際問題により密着させた。その成果を IFIP Congress '77 に発表したところ⁴⁾ 国際的に反響を呼び、多数の問合せや意見が寄せられ、我々としては国際交流だけでなく、引きつづく開発の速度向上をはからねばならなくなった。当然の結果として、我が国へのフィードバックが生じはじめ、より身近のループでの評価テストが行われ始めた。

我々の仕事は、広範囲にわたり、まだ発展中であるが、国際的な関心を引いた要因をあげると次のようなことになるであろう。

(1) 図面をコンピュータ言語で記述してコンピュータ内部に入れても、コンピュータの取り扱えるモデルとはならないことを認識し、対象記述によって内部モデルを生成したこと。必要とする出力は、図面も含めて、内部モデル処理により生成できることを示したこと。

(2) 二次元表現の構造と意味を分析し、それをコンピュータの入力となし得る条件を明らかにし、図面

* Geometric Modelling and Man-Machine Interaction by Mamoru HOSAKA (Institute of Space & Aeronautical Science, University of Tokyo) and Fumihiko KIMURA (Electro-technical Laboratory).

** 東京大学宇宙航空研究所

*** 電子技術総合研究所

も含めた二次元入力的方式を実現したこと。

(3) 各種の変形を受ける手書きシンボルの安定な認識方式を確立したこと。

(4) 単に幾何学的関係だけでなく、製造に必要な技術的情報の付加を行い、データベースとしての取り扱いができる方式を示したこと。これにより一貫したCAD/CAM 実現の可能性がでてきた。

(5) CRT ディスプレイ上の情報と紙に書いた情報の本質的相違を見だし、両者の特徴を組合せて利用したこと。

(6) マン・マシン・インタラクションや情報取り扱いの方式において、従来のようにインタフェースを合わせるといった単純なことではなく、深い考察にもとずきコンピュータの機能と人の機能との相違を意識し、両者の特徴をマッチさせるようにしたこと。

(7) システムのハードウェアや入出力機器に対して、各種の実験を行い、改良や機能付加がなされたこと。

これらのすべてに触れる紙面はないし、また公式に発表していない部分もあるため、すでに公表された論文の中からマン・マシン・インタラクションに関係深い部分を取り出して解説する。

2. 基本的な考え方

前章であげた特徴をもたすに至った基本的な考え方三つを説明する。そのあと幾何モデルの等価性にふれる。

第一に、幾何学的シミュレータの概念である。実体ある‘もの’を、素材から作ってゆく操作と、それが作られてゆく過程を考えると、対象の形態は操作を受ける度に変化を受けるが、結果もつねに実体のある‘もの’で、人はそれを観察できる。コンピュータによりこれに対応したシミュレーションを行おうとするならば、対象はコンピュータ内部で、ある表現をとらねばならぬ。それには実体の幾何学的性質の記述があるだけでなく、それを調べるためのテストをうけることや、要求される情報を供給することのできるデータ構造となっていなければならぬ。その構造は、切断、組立、分解、干渉、移動などの幾何学的処理によって、その構造のもつ性質とデータに従って変化を受け、結果はやはり実体に対応するデータ構造となっている必要がある。対象が現在どういう形態となっているか、どの位置にあるかは、人は細かく追跡してゆけないのだから、解析幾何によって未知数の方程式をたて、そ

の解の数値を求めるといった操作は陽にはできないし、また、将来どの様な操作を受けるかもわからないのである。この意味においてこの仕事を取り扱うためには、現実の世界に対応した、オンラインの幾何学的シミュレータが完全に作られなければならないのである。

第二は、対象の外部表現形式と解釈の主体、およびインタラクションの方法の考え方である。幾何モデルは対象の内部表現であるが、人はそれを見ることはできないし、見たとしても対象の理解はできない。対象を理解するためには、それを人にわかる外部表現に変換して示さねばならぬ。それは各種形式の図面や立体図、展開図、分解図や断面図などであり、それらには隠れ線や補助線を付加し、レンダリングをほどこす必要もある。その他計算のための数値データはもちろんのこと、製作のための工作機械制御情報も得られなければならぬ。これらの情報は解釈の主体の相違によって、表現を変えることが要求されるのである。人は目的をもって、対象を創成したり、テストしたりするのであるから、対象の外部表現に対して、処理操作を定義して指示できるようにすることが必要になる。一次的言語でこれを行うのは人にとって必ずしも都合がよくないから、他の人に対する指示と同じように外部表現の中に指示情報を付加することで実行できる必要がある。この外部指示をコンピュータはその内部表現に対する指示に変換しなければならない。それには指示の認識が可能でなければならぬ。この考えを拡張すると、人が対象を作るためにコンピュータに与える指示は、人が手書きの略図と数値や各種のシンボルを記入することでよいということになる。これで対象を明確に定義できれば、人にとって非常に便利であり、コンピュータがそれまでの操作によって作られた内部モデルの外部表現を作って、人にフィードバックすることを行えば、人は対象の理解を十分に深めることができる。形状に関係する性能や強度の複雑な計算はコンピュータがやればよく、その入力データはモデルより抽出できるし、その結果対象の変更も可能となる。以上のような人が用いる二次元的記述の方法は、コンピュータ言語とは表面上全く異なっているように見えるため、これを利用することは来従考えられていなかった。我々はその表現の重要性を認め、これの利用をはかるため、その一般的な性質と人の解釈の様式を十分に検討した結果、人がそれをつくるときのペンの運動を捕えることによって、意味把握が可能になるこ

とを示した。この方法には幾何モデル創成の分野だけでなく広い応用のあることがわかる。

第三は工業図面情報の内容のコンピュータ化についての考え方である。工業図面には単に幾何情報だけが記されているのではない。寸法一つをとっても、許容値や公差が指示され、時には製作や検査の方法まで記入される。面には粗さや平行度や直角度、部品には材料や他の部品との関係、図面の中には関連図面や費用算定のためのデータ、その他多くの製造検査に必要な情報が含まれ、それは対象製作のデータベースになって、いろいろな使われ方をする。コンピュータを用いた統合的 CAD/CAM を考えるなら、これらの情報をどの様にして、コンピュータ入力とし、データ構造の細部と関連させるかという問題を解決しておかねば、それは実用にはなり得ないであろうと思われる。我々は現在この問題に取り組みつつある。対象の内部記述の方式について、第一の問題に述べた幾何モデルと等価な圧縮した記述と、第二の問題で述べた二次元記述入力の方式の開発が行われたことによって、この第三の問題解決のめどがつき、その具体化を急いでいる。これによって、図面はアクティブなデータベース化し、従来の手のかかる図面管理を変えられるだけでなく、図面の内容のデータや意味がコンピュータによって取り出せるようになるため、製造工場における情報の扱い方に大きな変化が起る可能性がある。

これらの詳細は省き、第一の問題で述べた幾何モデルについて、少しく記す。実体を創成するのに、面を基準にするのが便利であると我々は考える。面は対象の表面を含むものとすれば、それらの交わりによって、稜線や頂点は決定される。また幾何学的処理の大部分は面間の関係の変更によって表わされるから、対象の幾何モデルは構成各面のデータと、必要最少限の面の隣接情報をもてばよい。凸体のときは後者も不必要なのである。しかし処理に際してそのような原始状態からアクセスしやすいデータ構造を、いつも作っていたのでは、実用的速度にはならないので、基本形態として、面の代わりに、それを組合せたいくつかの立体を基本に選び、それらのスケール変換、移動、組合せ、干渉によって一般物体は生成されるとしたのである。

3. 幾何モデル生成・処理システム

システムの機能構成は図-1 のようになっている。各種形式の入力データは、最終的にはコマンド列に変換されて、内部モデルを創成し、あるいは既存のモデ

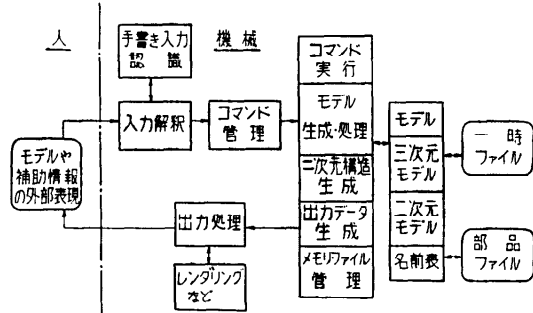


図-1 システムの構成

ルを処理する。すなわち、キーボードからの入力は直接コマンド管理モジュールに渡されるが、タブレットやカーソル、ファンクションキーなどからの入力は対応する解釈ルーティンに渡され、コマンド列に編集されてコマンド管理モジュールに渡される。タブレット上では、入力データとして図形に加えて各種の文字や記号が書かれるので、その解釈には手書き文字・記号認識ルーティンが必要になる。コマンド管理モジュールは、コマンドとそのパラメータを整え、実行順にコマンド実行モジュールへ送り出す。

内部モデルは、幾何学的データ及びトポロジカルなデータを表現するデータ構造として記述されており、必要に応じて情報を追加していくことが可能である。立体や座標系など人が直接処理の対象とする要素は名前表に登録することができる。

以下にコマンド実行モジュールの機能を概説する。

3.1 基本要素の生成

直方体、円柱、円錐、直線と円弧より成る任意形状平面形を底とする柱体（これを $2\frac{1}{2}$ 次元立体と呼ぶ）や錐体、同様の断面形を持つ回転体などが基本要素として用意されている。生成された立体の名前は立体名前表（これを以後 BNR—Body Name Register—と略称する）に登録される。

3.2 位置決めと移動

空間内に任意に座標系を設定し、名前をつけ、あるいは立体に付属させることができる。名前は座標系名前表（CNR—Coordinate Name Register—と略記する）に登録される。位置決め、及び平行移動や回転運動は絶対空間あるいは指定した座標系に相対的に指定することができる。

3.3 形状構成

任意形状立体間の和、差、積、あるいは立体の内外反転の操作が用意されているこれらの操作により、

立体の生成・消滅が起り、それに伴い BNR の内容は自動的に更新される。形状構成の便宜のために、穴あけや角の丸み付け、切断などの操作も用意されている。

3.4 立体間の関係

階層的あるいはネットワーク状の関係を立体や立体の要素間に付与することができる。関係にも名前を与えて CNR に登録できる。

3.5 二次元構造の生成

正投影図法や透視図法を指定して、三次元モデルから、二次元射影モデルを生成できる。二次元モデルは図面の表示、立体の入力図解釈などに用いられる。透視図出力のためには、模擬カメラが設定され、カメラの位置や方向等のパラメータを指定すると、それに従い図が出力され、指定すれば隠れ線も除去され、明暗表示も可能である。

3.6 ファイリング

作業途中の情報を、一時ファイルに貯えることにより、仕事の中断時や試行錯誤の過程において、処理の無駄な繰返しを避けることができる。完成部品は圧縮された形式に変形されて部品ファイルに貯えられ、必要に応じて取り出され、新部品創成の一部として利用される。

3.7 出力

三次元モデルは形状及びそれに付属する様々な情報を保持しているので、各種の指定された形式でモデル情報を出力できる。図面はもとより、データ構造の詳細や技術情報など、図形以外の形式での出力も多くある。

3.8 ユーティリティ

作業領域や BNR, CNR の状態を管理するユーティリティが用意されている。

BNR や CNR はスタック形式をとっており、外部名が与えられていない時でも、インデックスによりアクセスすることができる。これにより、形状構成操作のように処理結果の状態が前もってわからないような場合にも対処することができる。

4. 手書き文字の認識

幾何モデル生成の指示は、手書きの略図と文字・記号の組合せより成っている。従って、手書き文字を安定に識別できることが本入力方式の前提となる。

入力機器として、CRT とライトペンという手段も考えられるが、操作性が悪いこと、アクセスが間接的

になること、ハードコピーが残らないことなどの理由でこれは取り止め、タブレットを用いることにした。しかし、タブレットから入力されたデータには各種のノイズが重畳しているため、安定した文字認識を可能にするにはそれらへの対策を講じなければならなかった。さらに我々はタブレットペンの改良や、認識を容易にするためのハードウェアの開発なども行っているが、本解説ではこれらについては触れない。

文字認識アルゴリズムは、主プロセスと補助プロセスとから成る。主プロセスは平滑化、粗い特徴の抽出と文字モデルデータとの照合から成っている。補助プロセスは先に主プロセスで抽出された粗い特徴の修正と詳細化を行い、主プロセスで決定不可能であったものの識別を行う。このような手法により、大多数の文字は高速に、認識困難なものも安定に識別できるようになった。例えば、アルファベット大文字、数字及び若干の記号の範囲内では、補助プロセスへ入ることはほとんどない。

工業図面中の文字はかなり明瞭に、文字区分もはっきりと書かれるので、誤認識は少ない。また、使用者は自分の使用する文字や記号の種類や形を自分で定義して用いることができるので、各自の好みに合った書き方ができる。

5. 手書き図面の入力

5.1 基本的な概念

図面入力のために、図面中に記入される情報を次のように類別する。創成すべき形状の概略あるいは記号化された形状、名前や数値を表わす文字列、操作やその他の指示を表わす特殊記号、紙上で BNR や CNR を模擬する模擬レジスタやモデル間の拘束を表わす拘束図式、及び人に対する注釈である。紙面上が混み合わないよう、人のみに、あるいは人と機械双方にとって必要な情報のみが記入され、機械にとってのみ必要で後に参照されることのないシステム制御用の指示はキー操作などにより別に与えるようにする。

図面上には、模擬レジスタや拘束図式が記入され、人と機械双方に対して操作が明確にされる。人はこのレジスタや図式を見ることにより、操作の履歴を知ることができ、そのままでは静的な図面を、動的な操作の記述として解釈できるのである。生成された基本要素や構成物体の名前は紙上に模擬された BNR (以下、単に BNR と書く) に記入される。BNR 中の要素に対する操作は、それらを指す矢印と、操作の種類を規

のに用いられる。紙上に書かれた対象の名前をペンで囲むことにより、囲まれた対象がグループ化されて、各種の処理の対象とされる。

5.2 幾何モデル創成の手順

5.2.1 紙面の初期設定

図面を書き入れていく紙面の初期化情報として、図面名、三面図の各面図を区分する縦線と横線、模擬レジスタの基底線などを記入する。

5.2.2 基本要素の生成

基本要素の種類を示す記号と、必要なら外部名を BNR 中へ記入すると、基本要素生成のコマンドと解釈される。人はその立体の概形の三面図を書き、必要な寸法や変数名などを対応する線分や点の近くに記入していく。座標系も同様の手順で定義され、CNR に登録される。

5.2.3 位置決めと移動

BNR 中の要素に対して、矢印と記号で操作を規定してから、図中に矢印と数値を記入して、移動や回転の向きと量を定義する。

5.2.4 形状構成

上と同様に BNR 中の要素に対する矢印と記号で操作を規定する。その結果、BNR が変化する場合には、人はその変化を BNR に記録し、処理の履歴をつくっていく。

5.2.5 出力

入力と同形式の清書出力図を出せば、その出力図を再びタブレット上に置き、整理された形で入力を続行することができる。

6. 例

手書き図面入力による幾何モデル生成の一例を示す。図-2 (前頁参照) において、生成すべき部品は 'PUMP' と名付けられ、4 個の部品 B1, B2, B3, B4 から成っており、それらは幾何学的拘束をもって組立てられている。入力図は 2 枚に分かれているが、これに限らず、人が便利のように自由に紙面を利用すれば良いのである。図-2(a) には、部品形状と寸法及び生成手順が記入され、図-2(b) には座標系と拘束図式が記入されている。

まず、基本要素の種類を表わす記号 (C: 円柱, P: 直方体, T: $2\frac{1}{2}$ 次元立体) と外部名を BNR に記入し、図中に略図と寸法を記入することにより、基本要素が生成される。形状構成の操作は、和、穴あけ、立体の複製であり、各々 U, D, G の記号で矢印と共に

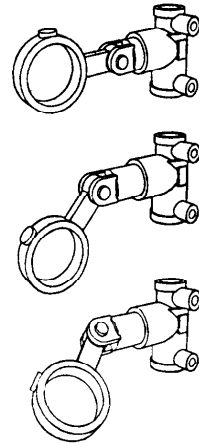


図-3 部品の運動



図-4 部品の明暗表示

記入されている。穴あけや移動に用いられた座標系は CNR に登録されているが、基本要素の位置決めのみ用いられた座標系は登録されていない。BNR の基底は 3 度変更されており、最終的に B1~B4 の 4 個の物体が登録されている。

形状が確定すると、B2 には、座標系 C2 の x 軸まわりの回転と、 x 軸に沿った移動を許すような幾何学的拘束が与えられ、また B4 には座標系 C4 の y 軸まわりの回転を許すような拘束が与えられる。図-2(b) の拘束図式において、座標系 C4 の y 軸まわりに B4 を 45° 回転し、B2, B3, B4 の集まりを C2 の x 軸に沿って 30 移動することが示されている。更に C2 の x 軸まわりの回転を B2, B3, B4 に旋す。その経過が図-3 に示されている。分解して明暗表示すると図-4 のようになる。

7. むすび

三次元物体を対象として、人とコンピュータとの情報表現や処理形態の相違を明確にし、幾何学的シミュレータと手書き図面の直接入力方式について解説した。幾何学的シミュレータは、物体の幾何モデルを創成して、あたかも実体が存在するかのごとく各種の幾何学的処理を実行する。その入力として、人の二次元的記述の動作を捕える手書き図面入力を用いることに

より、対象に関する人の思考を乱すことなく、コンピュータとの直接的なインタラクションが可能になった。

このように、人と機械とが対象に関して同等のモデルを持ち、人にとって自然な形式で通信し協力できることが、定型的でない仕事を扱うインタラクティブシステムにとって重要であり、知的なシステム実現への一つの前提条件であると我々は考えている。

幾何モデルを取り扱うシステムとして、他に、BUILD⁵⁾、PADL⁶⁾、COMPAC⁷⁾等が知られている。BUILD や PADL はパーツの設計というような特定用途に限定されたもので、モデルの範囲や内部構造に制限があり、CAD/CAM 一貫システムへの展望が明確でないように思われる。COMPAC はかなり汎用のシステムであり、設計・生産作業との関連についても良く分析されている。しかし、いずれのシステムもマン・マシン・インタラクションに対する配慮が十分でない。その意味で、我々のようなアプローチの仕方は他に見当たらないので、我々の仕事を中心に解説した次第である。

最近産業界においても統合的 CAD/CAM システムが現実のものとして話題になっており、その基礎として幾何モデルが注目を集めている⁸⁾。国内外でいくつかの計画が進行しており、今後の進展が期待されている。

参 考 文 献

- 1) 穂坂 衛：人間と機械との対話，計測と制御，Vol. 11, No. 5, pp. 33~40 (1972).
- 2) M. Hosaka, T. Matsushita, F. Kimura & N. Kakishita: A System for Computer Aided Activities, CAD Systems, pp. 169~198. North-Holland, Amsterdam (1977).
- 3) M. Hosaka, F. Kimura & N. Kakishita: A Unified Method for Processing Polyhedra, Information Processing 74, pp. 768~772, North-Holland, Amsterdam (1974).
- 4) M. Hosaka & F. Kimura: An Interactive Geometrical Design System with Handwriting Input, Information Processing 77, pp. 167~172, North-Holland, Amsterdam (1977).
- 5) I. Braid: The Synthesis of Solids Bounded by Many Faces, CACM, Vol. 18, No. 4, pp. 209~216 (1975).
- 6) H. Voelcker & A. Requicha: Geometric Modeling of Mechanical Parts and Processes, Computer, Vol. 10, No. 12, pp. 48~57 (1977).
- 7) G. Spur: Status and Further Development of the Geometric Modelling System COMPAC, in (8).
- 8) Proc. of Geometric Modeling Project Meeting: P-78-GM-01, CAM-Inc. (1978).

(昭和 53 年 6 月 14 日受付)

(昭和 53 年 7 月 14 日再受付)