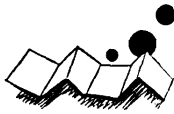


解説



CAD/CAM システム構築のための基礎技術†

木村 文彦**

1. はじめに

昨今は CAD/CAM ブームである。計算機や機械関係の雑誌では毎月のように特集が組まれ、新聞紙上にも、次々に新しい強力な CAD/CAM システムが登場し、実用に供せられたことが報じられている。はたして、CAD/CAM の技術は完全に実用期に入ったのだろうか。

CAD/CAM に関連する研究・開発の歴史は古く、計算機の初期実用期にはすでにこの方面の仕事がなされていた。それ以来、連綿として設計や生産の分野への計算機応用の努力が続けられてきた。しかし、設計・生産の諸活動を直接的に支援する組織だったソフトウェアシステムという意味での CAD/CAM システムの開発は、一部大企業を除いては、停滞気味であったことは否めない。ところが、80 年代に至って、激しい企業間競争を生き抜く一つの切り札として、CAD/CAM 技術が再び脚光を浴びるようになってきた。その原因は、近年のハードウェア、ソフトウェア両面における情報処理技術の飛躍的発展による所が大であるが、一方、後述するような形状モデリングや、コンピュータ・グラフィックスなど、CAD/CAM に直結する技術の発展も見逃せない¹⁾。

本稿は CAD/CAM システム構築に直接役立つ基礎技術の現状と今後の問題点を概説することが目的である。すでに多くの実用システムが存在すると称されているにもかかわらず、これらの基礎技術は決して完成の域に達しているとはいえない。設計生産活動とは、製品に対する要求を与えられて、設計・生産に関する種々の制約条件のなかで、要求を最適に満たす、未だ世に存在しない製品の詳細な定義情報をつくり出し、それにもとづいて、生産システムに対する各種の指令を生成する情報処理活動である。製品情報は一般に複

雑な構造をもち、設計・生産の各段階で、必要な情報が抽出され、変形され、新たな情報が付加され、激しくその構造が変化していく。この種の問題は、他の情報処理活動にはあまり現われないものである。このような問題を扱うための CAD/CAM に係わる諸技術の特異性と困難さは、近年に至ってようやく良く認識されるようになってきたが、それらの研究はほとんど開始されたばかりであるといっても良い。

以下に順次述べるように、CAD/CAM システムの構築には、設計生産活動それ自体に関する深い理解と共に、高度の情報処理技術が必要とされる。多くの情報処理技術者がこの方面に興味を持ち、未解決の問題に取り組むことが望まれる所以である。

なお、以下では主に機械製品のための CAD/CAM について考察する。

2. 総合 CAD/CAM システム

真に有効な CAD/CAM 実現のためには、設計の初期段階から生産の最終製品検査にいたるまでの全活動を一貫して援助できるような体系を考えておく必要がある²⁾。これを総合 CAD/CAM と呼んでおく。これに対し、従来の CAD/CAM は、大雑把に言えば、設計から生産にいたる情報の流れを全体として把握せず、計算機で扱いやすい所だけを個別的に自動化してきた傾向があった。

総合 CAD/CAM を考える前提として、従来の手作業による設計生産活動を十分分析しておく必要がある。そこでは図面が主たる思考、対象記述、情報伝達の手段であった。したがって、図面の表わす意味と、その役割や処理を良く理解して、それらを計算機化していくことが重要になる。従来の図面の意味解釈は人に委ねられていたが、高度の設計生産自動化のためには、図面の規定する製品の情報や、設計や生産活動の行われる環境の情報などもモデル化して、計算機で扱うようにする必要がある。そして、これらのモデルを含み、諸作業を統合化できるようなシステムの構

† Basic Techniques for the Construction of CAD/CAM Systems by Fumihiko Kimura (Dept. of Precision Machinery Engineering, Faculty of Engineering, University of Tokyo).

** 東京大学工学部精密機械工学科

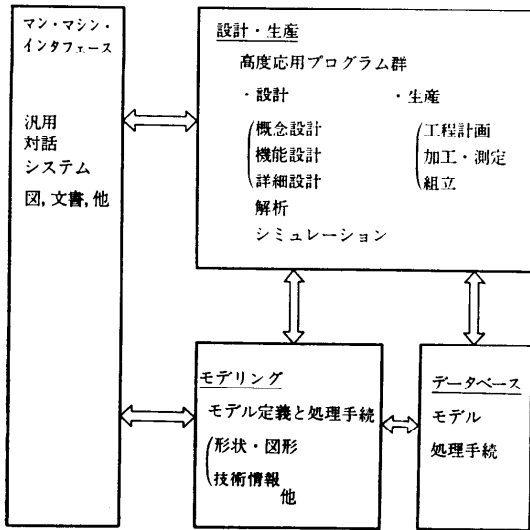


図-1 総合 CAD/CAM のソフトウェア体系

成法を考えることが重要な課題である。

総合 CAD/CAM システムの構成法については、未だに確立した見方はない³⁾。ここでは、図-1のような構成を想定して、以下の考察の助けとしたい。図に示されているように、システムは4つの主要部分から成っていると考える。それらの役割は次のようである。

モデリング：製品や設計生産環境のモデルおよびその処理手続、設計や解析のためのデータやノウハウ、などの高度の概念を表現できることが必要である。従来は扱える概念のレベルが低すぎて、本来の設計生産作業を援助するというより、その枝葉の定型の仕事のみを処理する傾向が強かった。それでは量的向上は計れても質的向上は望めない。

データベース：上述のモデルやデータ、更に各種の処理手続も含めて計算機内部で組織的に管理できるような体系を考える必要がある。将来は、これらが設計生産知識データベースとも呼ばれるような体系に整理され、設計生産過程の高度自動化達成の基礎になるであろう。

マン・マシン・インタフェース：利用者の立場に立った入出力技術の開発が必要である。近年、コンピュータ・グラフィックス技術の急速な進展もあって、図を介する入出力などは随分進歩したが、更に人に近づき、人の思考・作業形態に沿って、それを乱さないマン・マシン・インタフェースの考察が重要課題である。

設計・生産：日常業務に用いられる CAD/CAM

システムは汎用ではありえない。定型的な設計生産作業を計算機向きに組織化し、使用者に負担をかけない専用システムを随時構築できるようなシステム開発の道具が必要である。対象製品が改良、変更されていくにつれ、容易にシステムを適合させていけることが重要である。完全に定型的な仕事は自動化されるべきである。

更に、以下の諸点にも注目したい。

1) 上述の構成に従い、システムの各機能を分析し、モジュール化する必要がある。将来の高度な CAD/CAM ソフトウェアは極めて膨大なものになると予想され、システム構築に際して、すべてを渾然一体に作成することはもはや不可能である。機能別にモジュールを明確にし、モジュール間のインタフェースを確定することが必要になる。ここに標準化の重要性が浮び上がってくる⁴⁾。将来は、標準部品をうまく組合せながら複雑な機械を構成するのと同様に、標準ソフトウェア部品の蓄積と利用の方式が一般化するであろう。

2) 機能的にモジュール化されたものは更に場所的に分散化されるであろう。図-2 に示すように、利用者個人に対するワークステーション、大小さまざまなグループに対応するローカル計算機、標準技術データや過去の実績データを管理するデータベースマシン、大規模な解析やシミュレーションを行うスーパーコンピュータなどが、適切な通信ネットワークで結合されることになるだろう。設計生産活動には多種多様な仕事が必要となり、その各々の用途に適したプロセッサがネットワークに接続される。実際の仕事の体系を反

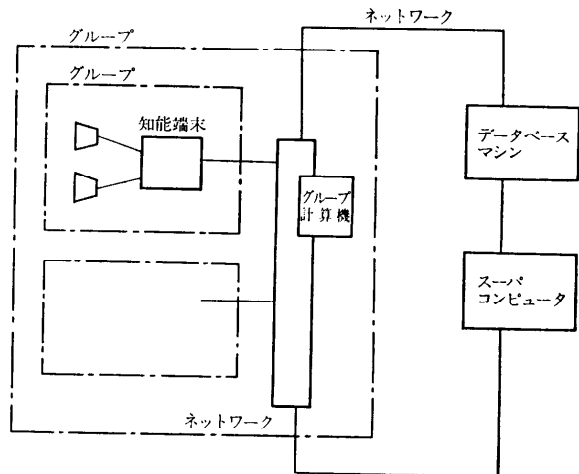


図-2 分散 CAD/CAM システム

映するようにネットワークを構成し、全体として矛盾なく効率良いシステムを構築するための分散化の技術には未だ未開発の部分が多い。

以上の諸点を念頭において、次節以降でモデリングを中心に CAD/CAM を支える諸技術の現状と将来の問題点を考察する。

3. モデリング

モデリング機能は総合 CAD/CAM の基本である。この機能を利用して、設計者は計算機内に製品のモデルを創成し、生産技術者は加工や組立の操作を模擬する。機械製品の CAD/CAM にとって、最終的な製品形状情報は最も重要なものであるが、そこに到達するまでの種々の技術的検討のために、形状に加えて、物理的性質や、機能、技術情報など、多様な情報が有機的に組織化された、対象物そのものを表わすようなモデルが必要とされる。

3.1 形状のモデリング

形状モデリングの研究は、比較的古くから行われてきたが、70年代に至り、“Computational Geometry” とか “Geometric Modeling” などの名称のもとに、形状取扱い一般に関する理論的、実際の膨大な研究が行われ、依然として多くの問題を残しながらも、実用システムへの適用が急激に進展するに至っている。これらの詳細については他文献⁵⁻⁸⁾に譲り、ここでは特に立体モデル (Solid Model) について考えていく^{9,10)}。

立体モデルとは、立体としての形状に関する性質を完全に表現しようとするものである。その基礎となる機能は、立体間の干渉検出機能（2つの立体が空間の同一位置を占有するか否かの検出）であり、この機能を基にして、立体の形状構成操作、形状に関する種々の性質抽出や計算機能などが得られる。立体の内部表現としては、立体の構成過程を保持し、必要に応じて立体形状表現を算出する方式や、図-3 に示すような立体形状を表わす立体表面のデータ構造をきちんと作成する方式などがある。後述する物体のモデル、エンジニアリング・データベース、標準化などの動向と相俟って、最近では後者の方式を主体とし、前者を併用する傾向が強い。

現在までに数多くのシステムが開発されているが、各システムに共通しているのは、対象を主として機械部品程度に限定しており、扱える面形状も、主として平面および円柱面などの単純曲面に制限されており、モデルの複雑さやデータ量、表現手法などにも色々な制限があり、これらを直ちに実用的な CAD/CAM システムの基本モデルとして利用するには問題があるということである。たとえば、自動車や航空機の外形形状を扱うにはいわゆる自由曲面が必要となるが、現状では自由曲面機能を完全に組み込んだ立体モデルは開発途上の段階にあると推察される。

今後の研究が待たれる点として、以下のようなものが考えられる。

1) 寸法規定や形状精度、公差なども含めて、形状記述の技術的側面を明らかにする。幾何学的関係式の形式的取扱法を確立して、大局的な形状変更操作などを矛盾なく行う手法も重要である。これらについては、現在活発に研究が進められているので、将来の成果が期待される。

2) 立体モデルの表現力を拡張する。立体の複雑さの尺度として、組合せの複雑さと、幾何学的複雑さがある。前者は、情報処理技術一般の進歩と共に漸次改良されることが期待される。後者、特に曲面形状の扱いについては、曲面定義手法そのものの開発も含めて現場と連携しつつ新手法の開発を進めていくことが必要であろう。

3) 設計生産過程においては、モデル化対象物を、概略から詳細にわたって、各作業に適した構成と詳細度で表現できる必要があ

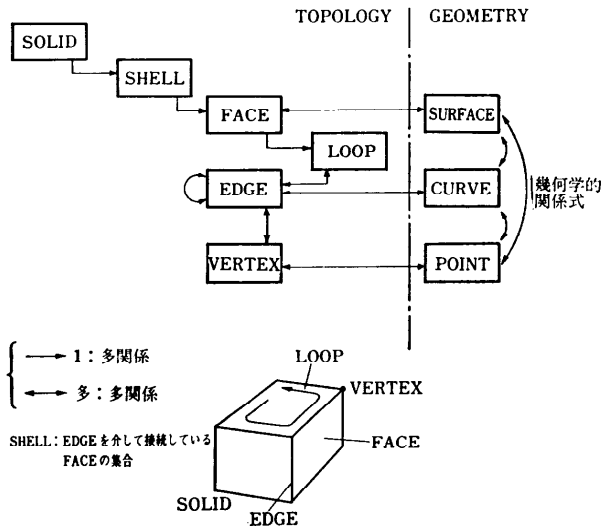


図-3 立体モデルの内部表現

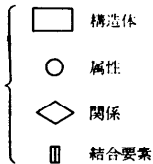
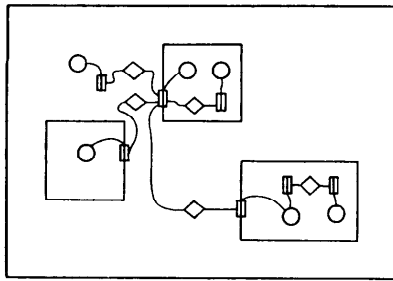


図-4 物体モデルの一例

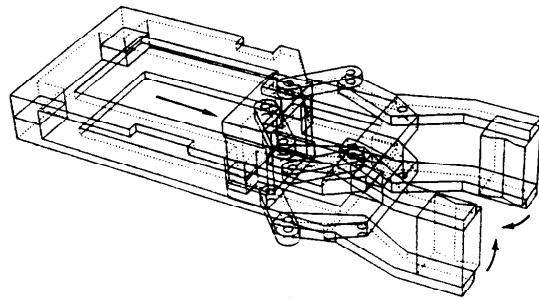
る。これら各モデルの間には色々な関係が存在し、設計から生産に至る各段階で関係を満たすようにモデルが生成され、変形される。このような状況で利用するには、現状のモデルでは不十分な点が多い。

4) モデリングシステムの頑丈さ(信頼性)、処理効率を向上させる。現在のシステムは未だ脆弱であり、現場で日常的に使用するには不安があり、また処理コストも高い。

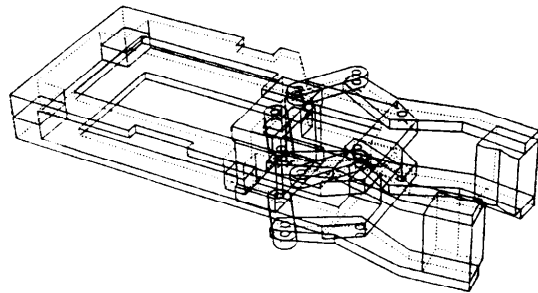
以上のような問題点はあるものの、立体モデルの概念が今後の総合 CAD/CAM の基礎となるであろうことは疑いない。しかし、常に立体モデルを用いるのが最適というわけではなく、目的に応じて他のモデル(ワイヤフレームモデルや面モデルなど)を併用すべきであることはいまでもない。

3.2 物体のモデリング

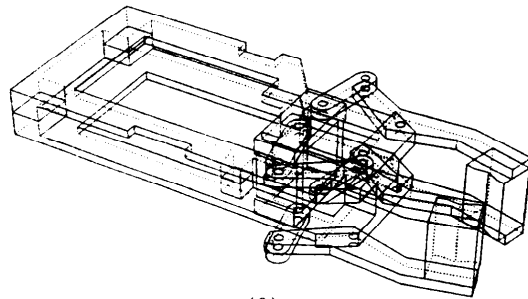
形状のみでなく、対象物そのものを表現するために必要な諸々の情報を含んだモデルのことを、ここでは物体モデル(Object Model)と呼ぶことにする。物体モデルの概念を用いて、機械製品をモデル化したものを製品モデル(Product Model)と呼ぼう。製品モデルには、人が図面および仕様書、計算書、その他の付属文書などから読みとり、利用する情報すべてが含まれているべきである。製品モデルの概念は形状モデルの概念と密接な関係があり、形状モデルが明確になって、始めて具体的に考えることができる。したがっ



(1)



(2)



(3)

図-5 物体モデルによる機構設計の一例

て、製品モデルが研究の対象となってからそれほどの時間を経たおらず、未だに目ぼしい成果が得られていないのが現状である¹⁸⁾。製品モデルの扱いが困難な原因はその対象となる情報の種類の多さにもよる。形状モデルについてはかなり汎用の取扱いができるが、製品モデルは各製品に固有のものになりがちである。これは、形状のみを扱う図学(画法幾何学)が一般的適用性をもっているのに対し、工業製図法(機械、船舶、建築など)が対象製品ごとに別規格を持っていることにも現われている。当分の間は、形状モデルに各種情報を付加して製品モデルとし、それらの情報の処理は専用のプログラムにまかせる形式をとらざるを得ないであろう。たとえば、表面精度情報を形状モデルに付加し、その解釈は数値制御加工情報生成プログラムに

まさせる、などである。この手法においては、付加情報の扱いは組織的でなく、各種矛盾の自動検出もできない。

上記とは異なった手法で、機械の機能を重視し、製品モデルを構築しようとする試みもある。将来は、機械の機能レベルの記述から、詳細形状に至るまで、用途に応じた詳細度のモデルが構築され、その間の整合性が自動的に保たれるような体系が考察されるべきであろう。

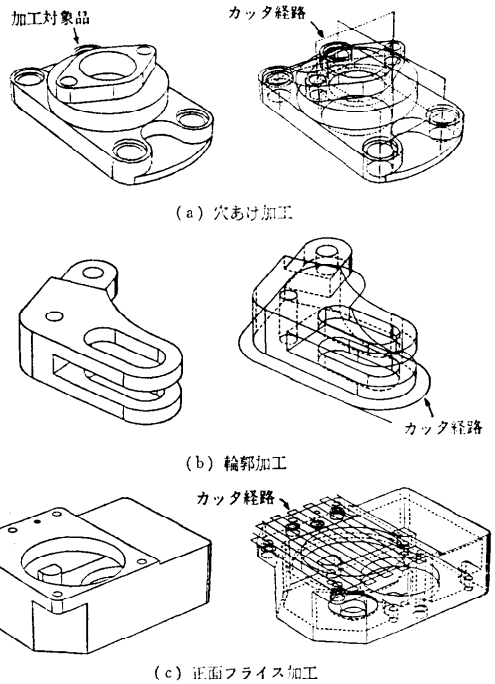
物体モデルは、上述のような製品モデルや、より広く設計・生産に関与するさまざまな物の表現のための道具となるものである。物体モデルの取扱いについては、多くの方法が模索されているのが現状であるが、ここにその一例を示そう¹¹⁾。

図-4 に示すように、物体は構造体として表わされる。1つの構造体は、その詳細化として、任意個の構造体を内を含むことができる。構造体は、属性を持ち、それらに任意に関係を設定することができる。応用プログラムは自分に適合する詳細度のモデルにアクセスし、操作を加えることができる。あらかじめ定義された範囲の操作については、モデル全体にわたって意味的整合性が保たれる。現在の所、形状、寸法、公差、運動拘束関係、部品接続関係などが表現されているが、必要に応じて追加することができる。応用例として、図-5 に、ロボットハンドをこのモデルにより設計し、運動機構解析を行い、結果を図表示したものを示す。

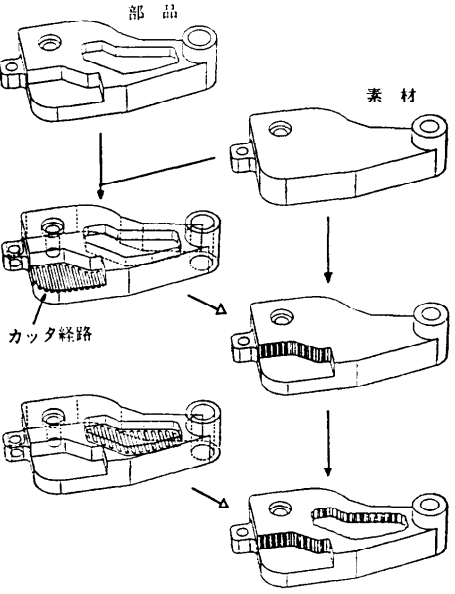
同様のモデルを用いて、加工や組立のシミュレーションや実際の動作指令生成の自動化なども行える。

図-6(1)には、加工対象品モデルにもとづき、指定された部分を指定された加工法で加工するための工作機械への動作指令を自動生成する様子を示し、図-6(2)には、生成された動作指令により、加工シミュレーションを行っている例を示す。対象品モデルを利用することにより、人手を省いて、誤りのない加工指令データを生成することができる。

図-7 は、同様の手法によるロボットの組立作業指令生成の様子を示す。まず、図-7(1)のように、組立前および組立後のロボットの作業空間の状態をモデリング機能により記述する。総合 CAD/CAM の考え方によれば、これらの情報の大部分はすでに製品設計などの段階で生成されているはずであり、改めてすべての情報を入れなおすことは要しない。次に、人が組立順序を指示すると、計算機は図-7(2)のような組立手

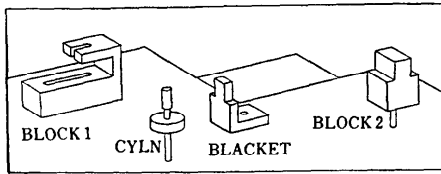


(1) 機械加工法の種類

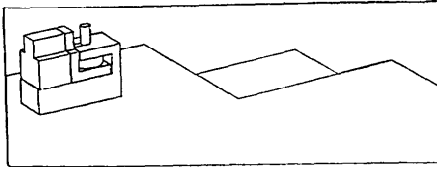


(2) 機械加工のシミュレーション
図-6 機械加工指令の半自動生成

順を生成する。さらに、図-7(3)に示すように、作業に使用するロボットのモデルを指定すると、組立に必要な手先の位置、姿勢を実現するロボットの各関節の

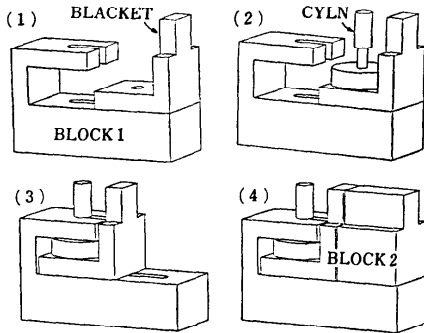


(a) 初期状態

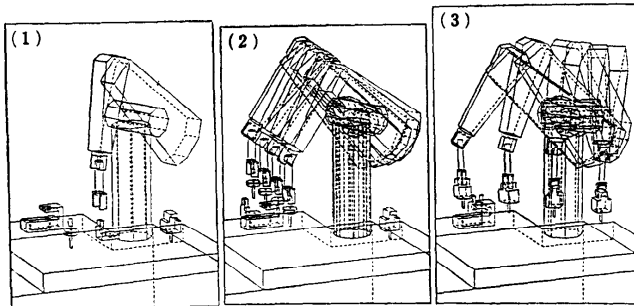


(b) 最終状態

(1) 作業対象物の配置状態



(2) 組立作業中の対象物の状態変化



(3) ロボットによる組立作業のシミュレーション

図-7 ロボット作業指令の半自動生成

動作指令が算出され、誤りのない組立作業指令が得られる。

以上に一例を示したように、設計から生産にいたる各段階で、物体モデルにもとづく製品や素材、生産機械や作業環境などのモデルを有効に利用することにより、設計生産活動の効率化と質の向上が実現されることがわかる。

4. マン・マシン・インタフェース

CAD/CAM システムは高度のマン・マシン・システムであり、人と機械との役割分担がその利用しやすさに決定的影響を及ぼす。特に入力に関しては、単にインタフェースの問題として考えることはできず、計算機内モデルに対し、いかに人が働きかけるか、という観点から考察することが重要である。この点については多くの問題が未解決のまま残されている¹³⁾。

入出力の問題は多岐にわたるので、考えを整理するために、図-8 に示すように、入出力の媒体と、その意味解釈に問題を分けてみたい。入出力媒体としては、文字列以外に、図形や画像、音声、動作（位置や速度）など色々考えられ、これらを内部記述に変換するための処理にはパターン認識やコンピュータ・グラフィックスの研究¹⁷⁾などが大いに有効であろう。しかし、人の意図する意味内容を直接伝えられるような内部記述とその意味解釈の方式を明確にすることは大きな問題である。手書図面入力について考察した例¹⁴⁾があるが、この方面の研究例は少ない。

もっとモデル寄りの問題として、設計・生産の現場ではいかにして諸作業が進められているかを反省し、それらを情報処理的視点から整理し直すことも重要である。形状設計を例にとってみると、従来は、概略の設計を終えてから、極端な場合には、詳細な図面を手作業で作成してから、計算機内に形状モデルを入力していた。これでは入力の手間が大変であり、計算機内の形状モデリングの能力を十分に利用しているとはいえない。より良いマン・マシン・インタラクションの方式としては、設計の初期段階からモデリングの機能を利用して、人のアイデアが具体化してくると共に形状モデルも詳細化していくような方式をとるべきであろう。一例を 図-9 に示す。自由形状設計において、概略形状の段階から計算機を利用し、形状評価のためには、実体3次元モデルを削り出したり、形状特徴を良く表わすような陰影表示図などを出力し、人の評価と判断により、満足のいく形

からモデリングの機能を利用して、人のアイデアが具体化してくると共に形状モデルも詳細化していくような方式をとるべきであろう。一例を 図-9 に示す。自由形状設計において、概略形状の段階から計算機を利用し、形状評価のためには、実体3次元モデルを削り出したり、形状特徴を良く表わすような陰影表示図などを出力し、人の評価と判断により、満足のいく形

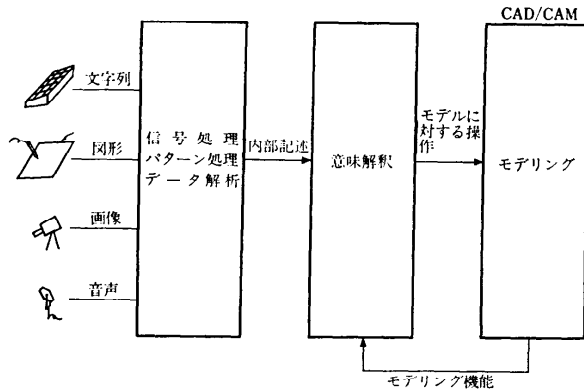


図-8 マン・マシン・インタラクション

状ができるまで修正を繰返す^{15,16)}。これは形状設計における一つの試みであるが、同様の考え方で、設計・生産の各作業におけるマン・マシン・インタフェースを考察して見ることは有意義であろう。

5. エンジニアリング・データベース

最近、データベース理論はかなり整備されてきたが、エンジニアリング应用到に焦点をあてた研究は少なく、CAD/CAM データベースの研究は開始されたばかりの段階にあると言って良い^{18,19)}。その困難さは、事務用データベースと異なり、扱うデータの中味が複雑多様であると共に、そのデータの発生、処理も定型的でないことによる。すなわち、設計は試行錯誤のプロセスであり、その過程で、データの意味や構造が激しく進化してゆくので、あらかじめ定まったデータのモデルを設定しておくことができず、しかも、設計終了時にはそれらデータの間の意味的整合性を保つことが要求されるのである。これらの事柄は、意味的には知識データベースの問題とも係わりがあり、今後長期的に広範な研究を必要とする分野である。

従来は、既存のデータモデルの拡張などを考察する例が多かったが、より基本から考察し直し、論理的に完全なデータベースの体系を考え直そうとする動きもでてきた。その一例として、設計におけるさまざまな拘束条件、規則、操作などを形式化して表現しておき、これらを用いて、設計の進展によるデータ変更と共に、データの正当性を検証し、整合性を自動的に保とうとする試みもなされている²⁰⁾。

6. おわりに

今後の問題を要約しておこう。

1) モデリングの機能をより完全なものとして、モデルに対して、設計・生産で必要となるあらゆる操作やシミュレーションができるようにすること。CAD/CAM の究極の姿は、実際の品物を扱うことなく、完全な製品情報をつくり出し、その生産管理・制御の情報を得ることである。

2) 計算機向きの入出力でなく、人の思考に従い人の動作を直接とらえ、処理結果を実物があるかの如く出力するような革新的なマン・マシン・インタフェースを実現すること。システムを利用するのは人間であり、その接点となる入出力技術はシステムの受入れ方を決定づける。

3) 設計手順やそれに必要となる諸データを組織化し、高度な自動化処理を可能とするようなCAD/CAMのためのデータベースを構築すること。真に創造的な設計は永久に人間のものであるが、日常的な設計活動の多くの部分は自動化しようと考えられる。

以上のような課題に対して、最近、人工知能の手法の導入も試みられており、今後の動向が注目される。例として、機械加工計画²¹⁾や取付具設計²²⁾などに知能工学の手法を適用したものが報告されている。

将来の高度のCAD/CAMは単に情報処理技術だけで実現されるものではない。設計生産過程それ自体の深い分析と理解、組織化の上に構築されるものであることを強調したい。情報処理技術は、そのような分析と理解を助け、設計・生産のための知識を組織化していくための強力な道具なのである。

参考文献

関係する文献は多岐にわたるので、直接引用されるものに限定した。興味のある読者は、1), 8), 9), 10), 17), 18), 19) 等の引用文献を参照されたい。

- 1) Encarnacao, J. (ed): Computer Aided Design, Springer-Verlag, New York (1980).
- 2) 穂坂 衛: CAD/CAM における情報の役割, 本特集号
- 3) Preprint of IFIP Working Conference on CAD System Framework, Rörös (1982).
- 4) Digital Representation for Communication of Product Definition Data, ANSI Y14. 26M (1981).
- 5) Lang, C. A.: Achievements in Computer Aided Design, Proc. IFIP Congress, Stockholm (1974).
- 6) Barnhill, R. E. and Riesenfeld, R. F. (eds):

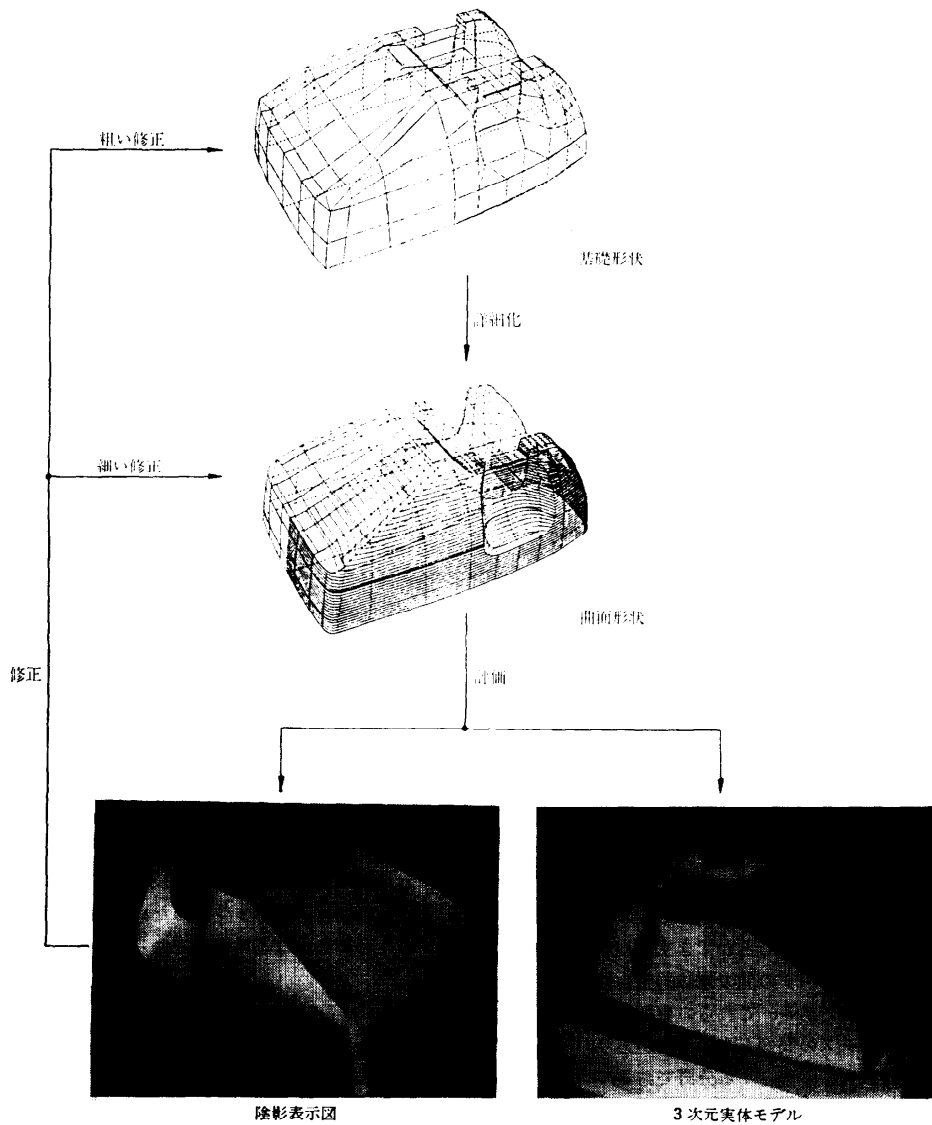


図-9 形状設計におけるマン・モデル・インタラクションの一例

- Computer Aided Geometric Design, Academic Press, New York (1974).
- 7) Forrest, A. R.: Recent Trends in Computer Aided Geometric Design, Proc. Conf. Interactive Techniques in Computer Aided Design, 78 CH 1289-8 C, IEEE Computer Society, pp. 141-146 (1978).
 - 8) Faux, I. and Pratt, M.: Computational Geometry for Design and Manufacture, Ellis Horwood (1979).
 - 9) Requicha, A. A. G.: Representations for Rigid Solids: Theory, Methods and Systems, ACM Computing Surveys, Vol. 12, No. 4, pp. 437-464 (1980).
 - 10) IEEE Computer Graphics and Applications: Special Issue on Solid Modeling, Vol. 2, No. 2 (1982).
 - 11) 川辺真嗣: 機械のモデル, 東京大学工学部精密機械工学科内部資料 (1982).
 - 12) Kimura, F., Sata, T. and Hosaka, M.:

- Integration of Design and Manufacturing Activities based on Object Modelling, Preprint of PROLAMAT 82, Leningrad (1982).
- 13) Sata, T. and Warman, E. (eds): Man-machine Communication in CAD/CAM, North-Holland, Amsterdam (1981).
 - 14) Hosaka, M. and Kimura, F.: Using Handwriting Action to Construct Models of Engineering Objects, IEEE Computer, Vol. 15, No. 11, pp. 35-47 (1982).
 - 15) 千代倉弘明, 木村文彦: 局所変形操作による立体モデルの生成とその自由形状設計への応用, コンピュータ・グラフィクス研究会資料3 (1981).
 - 16) 千代倉弘明, 木村文彦: 自由形状設計のための曲面生成法—不規則な3次元曲線モデルの内挿—, グラフィクスとCAD 研究会資料7 (1982).
 - 17) Foley, J. D. and Van Dam, A.: Fundamentals of Interactive Computer Graphics, Addison-Wesley, Massachusetts (1982).
 - 18) Encarnacao, J. and Krause, F.-L. (eds): File Structures and Data Bases for CAD, North-Holland, Amsterdam (1982).
 - 19) 松家英雄: CAD/CAMにおけるデータベースについて, 情報処理, Vol. 23, No. 10, pp. 1000-1007 (1982).
 - 20) Cholvy, L. and Foisseau, J.: Representation of Information in a Design Process, to be presented at CAPE '83 Conf., Amsterdam (Apr. 1983).
 - 21) Descotte, Y. and Latombe, J.-C.: GARI: A Problem Solver that Plans How to Machine Mechanical Parts, Proc. IJCAI, pp. 766-772 (1981).
 - 22) Márkus, A., Márkus, Z., Farkas, J. and Filemon, J.: Fixture Design by PROLOG, Proc. MICAD 82, pp. 66-80 (1982).

(昭和57年11月5日受付)

