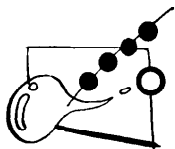


概 説

ファクトリオートメーション



FA における情報処理技術の役割†

木村 文彦††

1. はじめに

CAD/CAM の研究開発は、この数年来、極めて活発に続けられており、程度の差はあるが、多くの工業分野で実用化が進みつつある。一部の業種では、CAD/CAM はすでに企業の死命を制する、基本的に重要で必須の技術であると評価されるに至っている。一方、これより早く、数値制御工作機械などに代表される機械工場の自動化は広く普及し、生産性の向上に寄与してきた。最近に至り、両者を統合し、生産に必要な諸活動をより広く捉えて工業生産の合理化を追求しようとする動きが盛んになってきた。これの全体あるいは主要な部分を指して Integrated CAD/CAM, IMS (Integrated Manufacturing System), CAE (Computer Aided Engineering) などと呼ぶこともあるが、欧米では近頃は CIM (Computer Integrated Manufacturing) と呼ぶことが多いようである。製品製造過程の自動化に力点が置かれている場合に、我が国では FA (Factory Automation) と呼んでいるようである。言葉の定義はいまいであるが、いずれも製品の受注あるいは企画から出荷に至るまでの全活動を、進んだ情報処理技術を用いて統合 (Integrate) しようとする点で、同じ目標に向っている、ということができよう。部分の自動化から全体の統合へ、という視点の転換が重要である。概念にのみ止まらず、永年の CAD/CAM や自動化技術の開発の基礎の上に、最近の進んだ情報処理や自動化システムの技術を重ね合わせる時、統合化は現実にも可能であり、利益のあるものになってきたのである。

本稿では、まず FA の全体像を考察した後、その基礎として重要な情報処理技術をソフトウェアを中心に概観し、設計生産過程への応用について触れる。

FA は情報処理にとって重要な研究課題を提供すると共に、今後の各工業の活残りのための key technology として優れて実用的な技術でもある。ところが近年、この方面の研究者がふえ、研究が盛んになると共に、学術的に興味のある先端的研究と、実際のシステム開発・使用の現場での問題点との間にギャップが感じられるようになってきた。例えば、立体モデリングについて、処理アルゴリズムやデータ構造の理論的研究が厳密に展開され、有用な成果が得られつつある反面、真に実用に耐えうるシステムはまだ少ないことなどが思いうかぶ。ここでは、できるだけこの両側面を考えた、現状と将来を展望してみたい。

なお、FA 自体は各工業に共通の概念であるが、以下では主に機械工業に限定して議論を進める。最近の関連する文献^{1)~5)}により、不足の部分を補っていただければ幸いである。

2. FA の全体像

機械製品の生産 (Manufacturing)* には多様な活動が含まれており、業種や工場によって相違がある。一般的なモデルとしてまとめられた CAM-I の個別製品生産モデル⁶⁾ (Discrete Parts Manufacturing Model) によれば、生産活動は図-1 のようにまとめられる。生産準備のための技術的諸活動は、要求を満たす製品を設計する製品設計 (Product Design)、製造方法を決定する工程設計 (Pre-Production Planning)、詳細な作業手順を決定する作業設計 (Production Planning) の順に進行し、これらの結果を用いて実際の生産プロセス (Material Handling, Production Operation, Quality Control) が、生産管理 (Production Management, Production Support) の指令の元に行われて製品が作られていく。上記の諸活動の

† Role of Information Processing in Factory Automation 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

* 人や国により定義が異なっているが、ここでは米国の慣用に従い、製品をつくるための全活動を総称して、生産 (Manufacturing) とし、特に対象物を物理的に扱う工程を製造 (Production) ということにする。

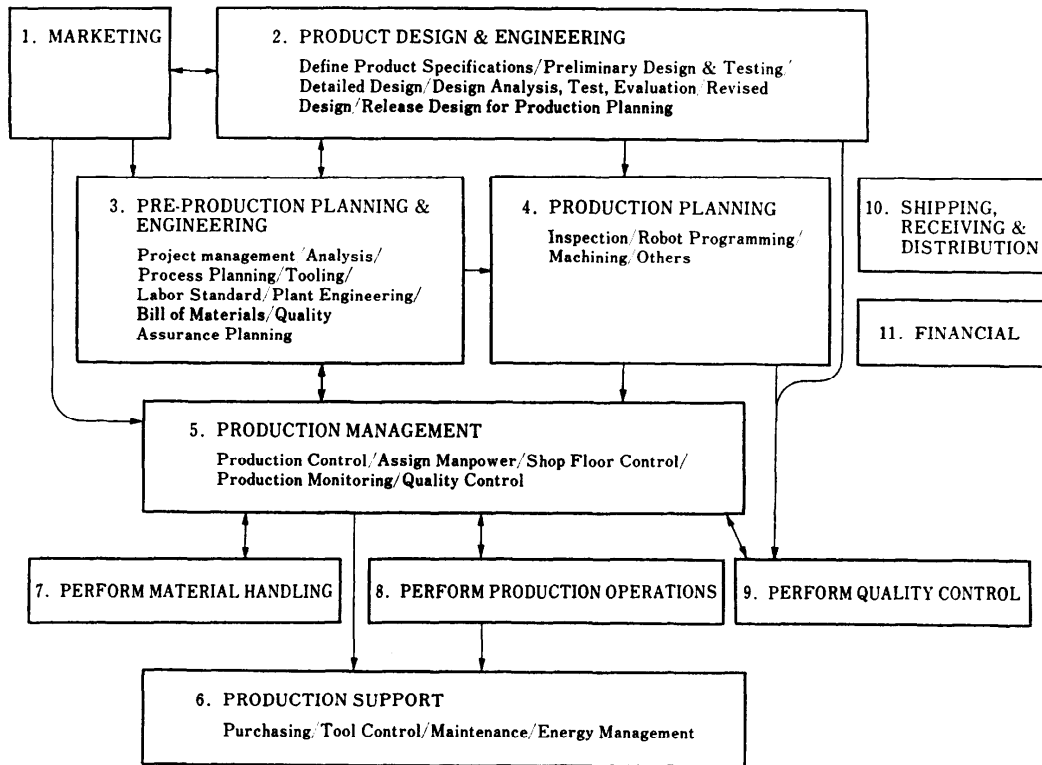


図-1 個別製品生産に関わる諸活動
(CAM-I の Discrete Parts Manufacturing Model)

中で、実際の生産プロセスを除けば、他はすべて情報処理活動である。より良い製品を、より安く、より早く生産することが、これら情報処理活動の目的であり、全体は体系化されており、一貫した情報の流れが存在する。その一部を計算機化したのでは目的達成のために不十分であり、全体を一貫した視点のもとに計算機化していく必要がある。

FA という概念は、生産のための情報処理の統合化と共に、それらの情報を効率良く利用すべく、対応する生産プロセスの高度自動化をも含むのであろう。したがって FA における情報処理という時には、製品設計から生産管理、更に生産プロセスの制御までも含むことになる。これでは余りにも広範で、そのすべてを論ずることは困難であるので、ここでは生産準備情報の生成（製品設計から作業設計まで）を主に念頭において、関連する情報処理技術を考えていくことにする。これは従来総合 CAD/CAM⁹⁾と呼ばれていたものにほぼ相当する。生産管理などの分野には固有の技

術が発達しており、製品情報とのより緊密な結合が図られることにより、新しい発展が期待できるが、これについては紙面の制約もあり触れることはできない。

さて、FA におけるソフトウェアの構成を考えてみよう。将来を見通しても、生産に関する創造的作業を完全に計算機化することは困難であると考えられる。したがって、FA ソフトウェアの目的は、生産活動において自動化が容易なものに進めつつ、人の創造的能力を十分に引き出すための支援環境を提供することである、と考えるのが妥当であろう。そのような見方から、技術者と FA ソフトウェアの関わり方を図-2 のようにまとめてみる⁷⁾。

技術者は、生産活動における種々の単純作業（計算、図面清書、情報伝達など）を、紙と鉛筆ではなく、基本技術支援 (Clever Assistant Engineer) を利用して処理する。専門知識を要するような問題（各種解析、加工や組立技術決定など）については、必要に応じて専門技術支援 (Consultant) にアプローチする。

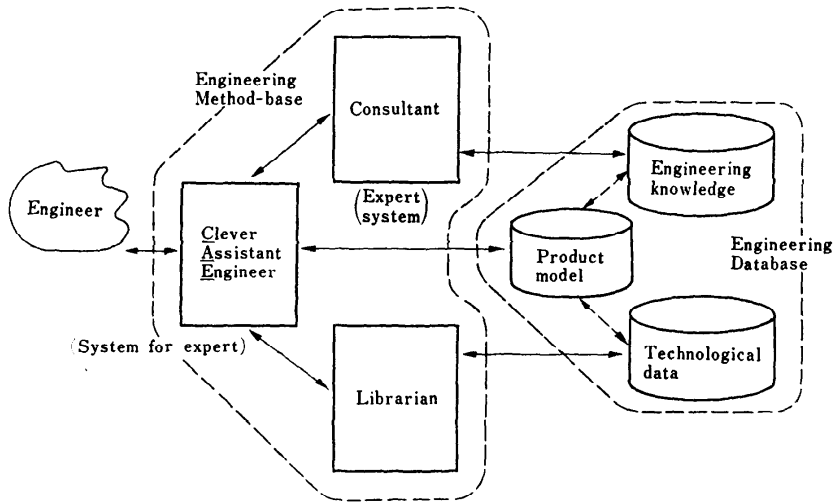


図-2 FA ソフトウェアの考え方

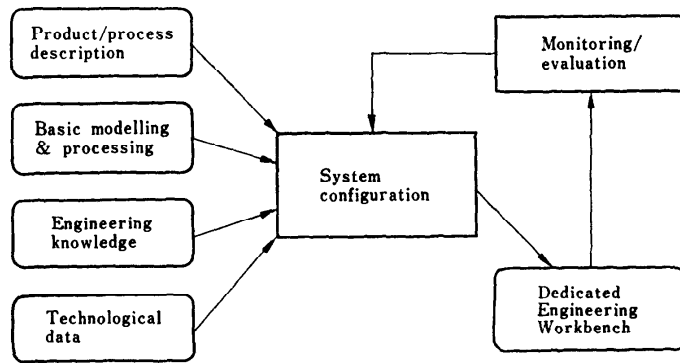


図-3 専用作業台の生成

また、各種技術資料、設計実績データ、規格などを参照することも多いが、これらは技術情報管理 (Librarian) に問い合わせる。もとより、これらの各機能は明確に分離できるものではないが、必要とされる情報処理技術の相違から分けて考えるのが便利である。すなわち、基本技術支援では処理方式の明確なもの (図形や文書処理、数式処理など) が主であるのに対し、専門技術支援においては、未だに良く体系化されていないもの (各種の技術ノウハウなど) が対象となる。技術情報管理では、複雑で多様な構造を有する大量の情報を管理する技術が必要となる。各々の要求に応じて、第3章に概説するような基礎技術が適用される。理想的にはこれらの各機能が有機的に統合され、技術支援

環境 (Engineering Method Base) を構成する。

設計者は技術支援環境が提供する諸機能と概念を駆使して、設計対象物のモデルである製品モデル⁵⁾ (Product Model) を構築していく。その過程で専門技術知識や技術情報を必要に応じて参照、利用する。製品モデルは集積、組織化され、製品モデルデータベースを形成すると共に、そこから適正な情報が抽出され、専門技術知識や技術情報が強化される。これらを合せてエンジニアリングデータベース (Engineering Database) と呼ぶ。支援機能の利用実績にしたがい、参照するデータベースが増強され、支援機能が強化されることが重要である。

以上の諸機能は、技術者が諸作業を行う作業台

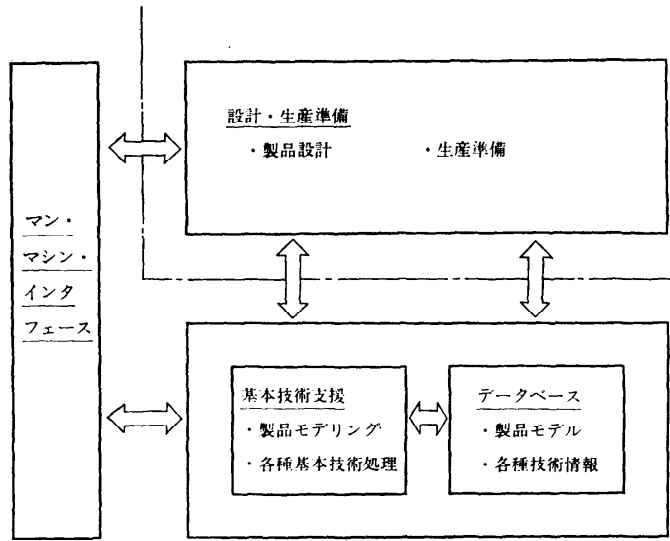


図-4 総合生産システムの構成

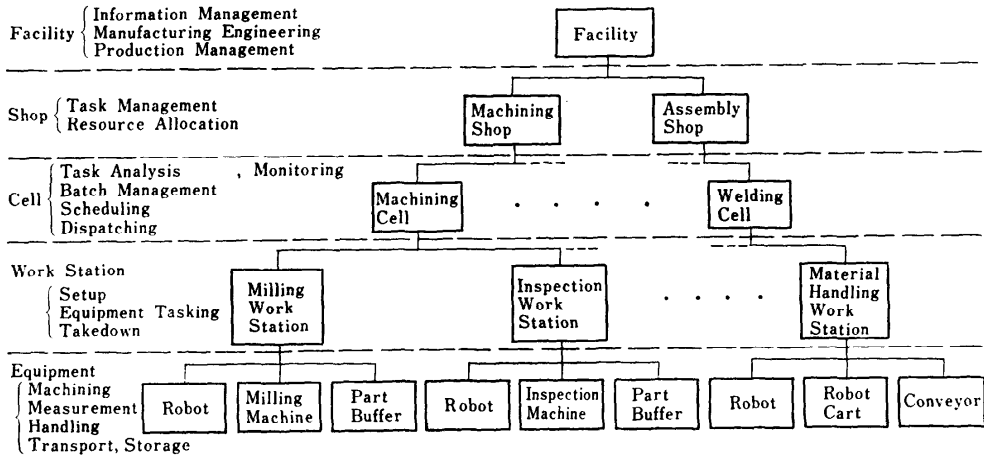


図-5 自動化工場の階層的制御システム構成の一例
(NBS の Automated Manufacturing Research Facility)

(Engineering Workbench) として利用されるが、どのような仕事にも適した汎用の作業台を用意することは実際には困難である。強力で基本的な道具を用意しておき、個々の仕事や製品に適した特有の道具を作り出し、専用の作業台を構成できるようにする方が実際的である。図-3のように、目的製品や作業環境に固有の要求を明確に規定し、専用作業台を生成する。要求を分析し、仕様を決定していくことは一般に容易ではなく、種々の体系的な手法が考えられている⁹⁾、

機械工業を念頭において、図-2 を具体化してみると、図-4 のようになるであろう。現在のところ、製品モデルに関連するモデル表現、処理に研究開発の重点が置かれているが、今後はそれらを利用する設計・生産準備機能の充実に努める必要がある。各製品ごとに図-4 に示す諸機能の発展度や重要度が異なり、その結果、出来上がった専用作業台は製品ごとに異なって見えることになる。

以下、3章と4章において、図-4 の諸機能の現状と

将来動向を概観してみる。

物理的な生産プロセスの側から見ると、例えば図-5⁹⁾に示すように整理することもできる。図-4の諸機能により生産制御情報が生成され、それが図-5の設備に供給されて、高度のFAが達成される。これらについても色々な考え方や膨大な研究があるが、本稿ではそれらに立ち入らない。本特集号の他の関連する解説を参照されたい。

3. FA ソフトウェアの基礎

3.1 モデリング

(1) 生産準備活動のためのモデル

生産の諸活動に対応して、対象製品や製造設備、材料などの「もの」のモデルを計算機内に構成できることは重要である⁵⁾。更に進んで、技術データや知識を用いて、これらのモデルを創成、操作し、生産活動を遂行していく手続きをもモデル化し、考察の対象としていくことは高度な生産自動化にとって必須である。両者のモデルははっきりと分離できるものではないが、ここでは主に前者について考え、後者については3.2で基礎的考え方について簡単に触れるに止める。

機械生産自動化に利用することを意識した「もの」のモデリング手法として様々なものが提案されてきた^{7), 10)-13)}。その一例を図-6⁷⁾に示す。これらは実験的なシステムの上で実現され、目的や範囲を限定して実用化されつつあるものもあるが、「もの」の持つ意

味の表現能力についてその理論的根拠が明確でなく、問題が残されている。すなわち、多くの対象物が種々の技術的關係のもとに存在し、同一の対象物も各生産活動に応じて、別の見方で表わされたり、異なった抽象度や詳細度で表わされたりする。あるいは、試行錯誤の過程で多くの代替案が生成されたり、モデルが変更されたりする。これらの過程でモデル間の意味的整合性が破られたりまた回復したりするが、それを明示的に制御できる必要がある。しかし、現状のモデリング手法では、これらの課題に十分に対処することができない。さらに、モデルが表現できる対象の範囲、複雑さなどの点でも不十分である。

実用的には、当分の間、工業図面の意味情報を必要な範囲で計算機内のモデルにしていくという考え方に立ち、次に記す形状モデルなどを中心としたモデルが構成されていくであろう。この場合には、モデルの意味的拘束関係については、それを操作するアプリケーションがその維持管理に責任を持つ、という方式になるであろう。

(2) 形状のモデル

図-6に示すように、形状のモデルは機械製品などを表現するための基礎概念として重要である。特に、立体形状を完全にモデル化しようとする立体モデル(Solid Model)の概念は有用で、最近の十余年の間に多くの研究が行われ、2次曲面程度の単純曲面を含む立体を取り扱えるシステムがいくつも開発された¹⁴⁾⁻¹⁶⁾。

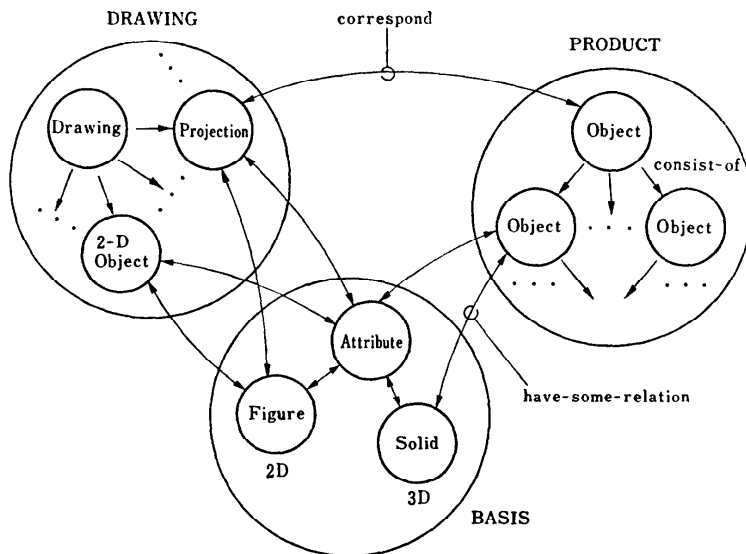


図-6 製品モデルの概念構成の一例

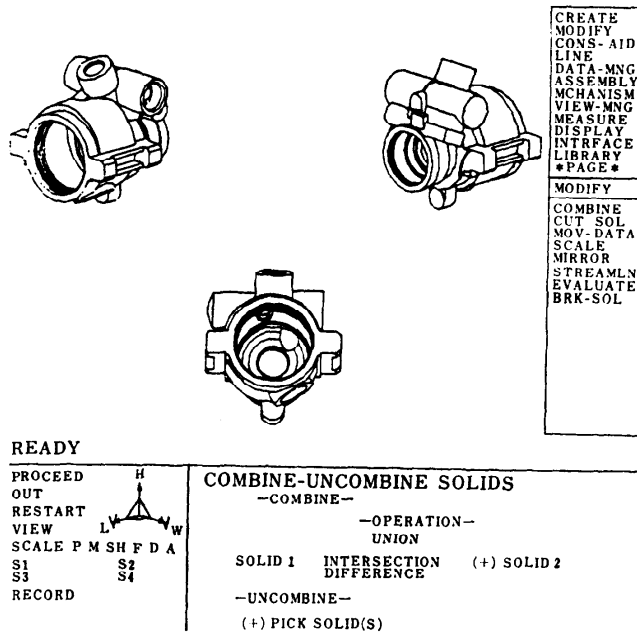


図7 GMSOLIDによる立体創成の様子

市販されているシステムも多いが¹⁵⁾、実際に生産活動の中で実用化されている例は多くないといわれている。今後は基礎研究と工業界の現実の要求とのギャップを埋めていくことが必要であろう。比較の実用化に近いといわれているシステムによるインタラクティブな立体創成の様子を図7に示す¹⁷⁾。

最近の基礎的な研究で興味深いものをあげてみると、2次曲面の交わり算出に関する理論的研究¹⁸⁾⁻²⁰⁾、立体表現や構成基本操作に関する理論および実証的研究²¹⁾⁻²³⁾などがある。これらの研究は、より頑丈 (robust) で効率の良いモデラを開発するのに有用であり、計算幾何学 (Computational Geometry) の名のもとに、今後ますます盛んになっていくものと思われる。特に処理の効率化に関しては、立体内部表現の検討が重要であり、これについて多くの研究が行われた。ひと頃のように、CSG (Constructive Solid Geometry) とか境界表現 (Boundary Representation) を対比させて論ずることはあまり意味を持たず、モデルの利用目的や処理に応じて最適の表現を考察し、必要に応じて表現を変換する方式が一般化してくると思われる。

今後の研究課題として、立体表現の基礎 (扱える立体の範囲、頑丈さ、公差や形状精度の扱いなど)、自由曲面を含む立体の処理、立体モデルの応用 (有限要

素分割、あるいはNC加工、ロボットプログラミング、鋳物などの製造技術への応用)などが論じられ、いずれも多くの未解決の問題点を含んでいることが指摘された²⁴⁾。最初の話題についてはいくつかの関連する研究²⁵⁾があるが、未だに基本的な考え方すら確定していない段階である。自由曲面導入については多くの試みがなされているが²⁶⁾⁻²⁹⁾、完全さ、頑丈さの点で満足すべき水準には未だ遠い。自由曲面理論自体についても、最近研究が盛んになってきており、新しい成果が得られつつある³⁰⁾。モデルの応用については、幾何学的処理だけで済む基礎的なものについてはほとんど完成し、今後は高度の技術的知識や判断を要するようなものが問題となってくるであろう。実用化の観点からは、複雑物体や多数の部品の組立などに対処するために、処理の一層の効率化が必要である。上述のような立体内部表現や処理の整理にもとづき、ハードウェア化の効用を探り、VLSI技術による“Solid Modelling Engine”が登場してくるの間もなくであろう。また、従来は線モデル (Wireframe Model) や面モデル (Surface Model) などというものが別個に考えられることも多かったが、使用者にとってはそのような区別は煩わしく、本質的ではない。今後は種々のレベルの形状モデルが混合して使用できるような方

式が追求されるであろう。

3.2 データベースと技術知識の表現

前節に述べたようなモデル情報はデータベース化され、多数の技術者に共有され、処理される。このようなエンジニアリング・データベースには事務応用などには少ない特有の困難な問題点があることは良く知られている³²⁾。たとえば、モデル構造の動的な変更や拡張、複数モデルとそれらの間の意味整合性、会話処理における応答性などである。

実用的には既存のデータモデルの拡張などにより対処している例が多い。代表的なものとして、ネットワーク・モデルにもとづくものがあり、ネットワーク構成機能の強化やデータの局所化による応答性の改善などを実現している^{32)、33)}。表現が直観的に理解しやすいことが特色である。最近では関係データベース^{34)、35)}や論理表現³⁶⁾を基礎として、その上に応用に応じて多層のユーザ向けのモデルを定義できるようにしている例も見られる。

大規模データの扱いや性能向上の観点から考察すると、統合的なエンジニアリング・データベースは必要に応じてそのデータを分散せざるをえない。すなわち、あらゆる基本データを管理する中央のデータベースと各作業に対応する作業用データベースを考え、必要な情報のみ中央データベースより作業データベースに移し、変更処理を加えて元へ戻す。データの意味的整合性管理に困難な点があるが、種々の実用的な工夫により問題を回避している例が多い。図-8 に実用システムの一例を示す³⁷⁾。

3.1 に述べたようなモデルの意味情報を十分に表現し、さらに生産に関する種々の技術的知識をもモデル化していくためには、既存のデータベースの枠組では不十分である。そのため技術知識の表現、獲得、利用

などを本格的に検討しようとする動きが盛んになってきている³⁸⁾。従来は、いわゆるエキスパート・システムの手法などを適用し、良く体系化されていない専門技術者の技術ノウハウや技能などを表現し、利用しようとするものが多かった。これらは分野を良く選択すれば有効であるが、対象としている知識そのものが解明されておらず、その適用範囲や発展性にも強い制約がある。むしろ、技術的諸活動の中で多用される明確な論理的基礎を持った体系化された基礎知識を計算機に教示し、技術者はこれらの基礎技術を駆使して、自分の専門知識を活用し、創造的アイデアや直観的推論によって生産活動を進めていく手法を考える方が有効であろう。計算機は、基礎的なデータ、手法や標準を提示し、計算や単純な推論を行って、設計者の忠実で有能な助手 (Clever Assistant Engineer) の役割を果たし、設計者を雑事から解放するのである。

上述のような基礎的技術を扱うことも容易ではないことは良く認識されている。たとえば、知識工学の手法³⁹⁾などを手がかりとして、実際の生産活動の中で必要とされる知識の構造を明確にしていく努力が必要とされる。単に既存の手法を適用するのみでなく、FA の立場から知識工学に対する要求を明確にしていくことが大切である。

3.3 マン・マシン・インタフェース

FA ソフトウェアは、その仕事の性質から、インタラクティブ・システムになることが多い。従来はマン・マシン・インタフェースは必要に応じてプログラムで任意につくられていたのであるが、システムが大規模、複雑になるに従い、良いユーザ環境を作ることが困難になってきた。そこで、最近ユーザ・インタフェース管理 (User Interface Management, UIM) という概念が導入されてきた⁴⁰⁾。図-9 に示すように、

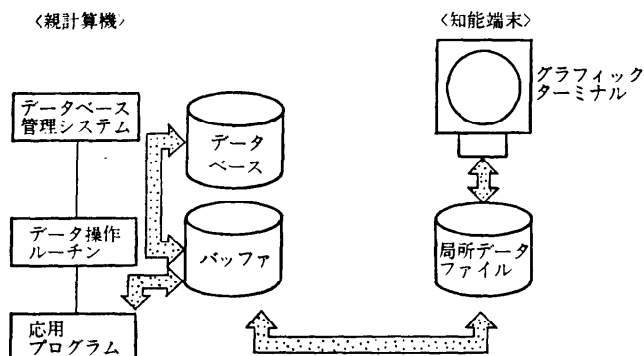


図-8 自動車外板 CAD データベースの構成例

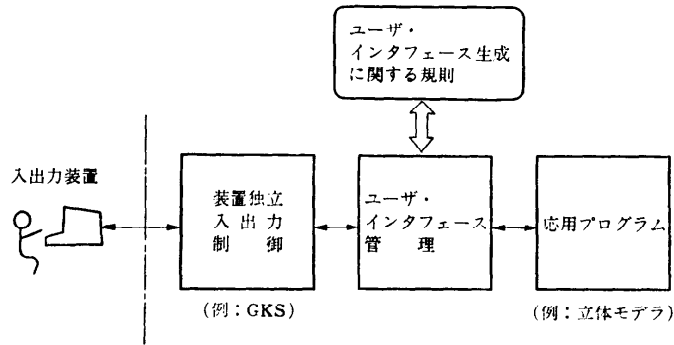


図-9 ユーザ・インタフェース管理の役割

ユーザ・インタフェースの部分を応用プログラムから独立させ、組織的に設計する道具を提供しようとするものである⁴¹⁾。ファイル管理の煩雑さに対応してデータベース管理が導入されてきたことと形式的には良く似ている。特に図形を媒介とするインタラクションについては、基本グラフィックス機能の標準化が進んでいる⁴²⁾ので、それを基礎として検討されつつある。良いユーザ環境生成に関する規則を計算機に教えておき、個別ユーザに適合するインタフェースを生成することなどが関心を呼んでいるが、まだ重要な問題点すら不明確であり、今後の研究が望まれている^{43), 44)}。

一方、入出力装置については、高解像度ビットマップディスプレイを有する高性能ワークステーションは、独自の支援ソフトウェアと共に、エンジニアリング分野への応用において新しいインタラクションの可能性を開くものとして期待されている⁴⁵⁾。しかし、高度の専門知識をもち、良く訓練された専門技術者にとって、マイコンやマウスに代表されるインタラクションスタイルが本当に適合しているか否か、などプロフェッショナルワークステーションとしていくためにはまだ不明の点も多いように思われる。

3.4 システム構成と標準化

FA システムは大規模システムであり、各種の異なる仕事を遂行するので、情報の管理は統合化されながらも、分散システムの形態をとる。個別の仕事に応じて各サブシステムは専用化される傾向が強くなるであろう。専用マシン(たとえば graphic engine, geometric engine, inference engine など)の開発も活発に進められている。

ソフトウェアもモジュール化されると共に、それらモジュール間のデータ標準化も検討されている⁴⁶⁾。先に述べたグラフィックス機能の標準化もその一つであ

り、基本グラフィックス GKS⁴²⁾、ピクチャファイル VDM⁴⁷⁾ が制定されつつあり、さらに高性能のインタラクティブ・グラフィックスの標準化⁴⁸⁾が検討されている。より広い製品定義に関しては IGES⁴⁹⁾がある。IGES は単純に言えば図面を記述するデータの標準交換形式であったが、最近では、製品そのものの記述を目指して拡張する作業が進められつつあり、立体モデル記述の草案⁵⁰⁾が出されている。これらの標準化作業は、長期的に見ると FA ソフトウェアに大きな影響を及ぼすものと考えられるので、国際的動向を見誤らぬよう、標準化活動に参加していくことが望まれる。

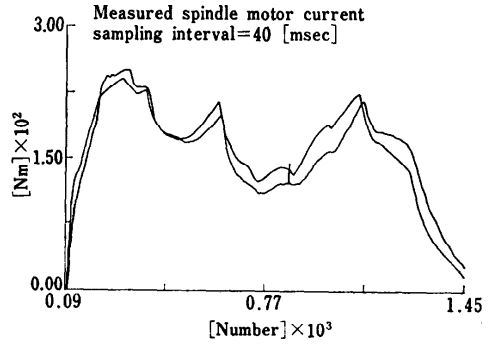
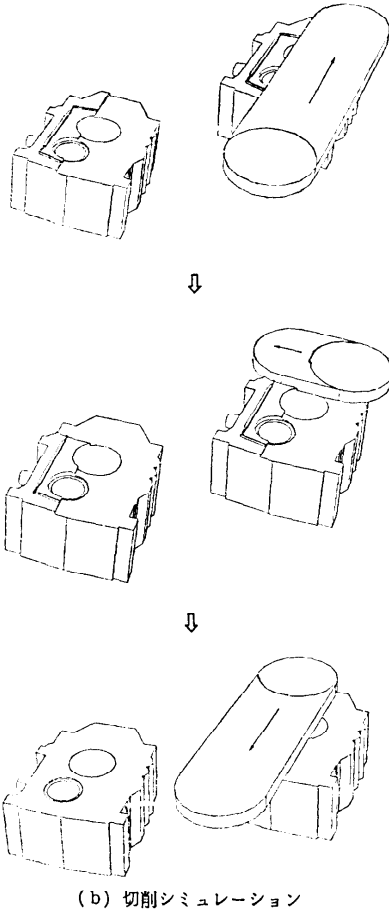
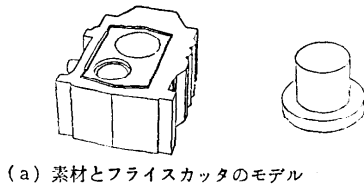
4. 生産活動におけるソフトウェア

4.1 設計

従来は、製図や数値解析、シミュレーションなどに計算機を個別的に利用していた。前節で述べたような製品のモデルなどを前提とすると、より広い計算機の利用分野が開けてくる。これらを網羅的に概観することはできないが、ごく一例をあげてみても、三面図入力⁵¹⁾、寸法指定によるパラメトリック設計⁵²⁾、部品の配置や組立のシミュレーション、有限要素法などによる各種の解析、設計形状の高精度表示による評価⁵³⁾、など色々ある。しかし設計そのものを体系的に支援するソフトウェアは未だに多くはない。現実の設計作業の分析と共に、設計論⁵⁴⁾研究の今後の発展が期待される場所である。

4.2 生産準備

生産準備分野での計算機利用例は多い。各種加工、組立などに関して多くのソフトウェアが開発されてきた。機械加工の分野では古くから研究開発が進められており、特に切削加工においては、加工情報の生成、



(c) 予測切削トルクと実測切削トルク
図-10 切削シミュレーション

検証などに関するモデルにもとづく自動処理プログラムが活発に開発された。切削トルクのシミュレーションまで行った一例を図-10に示す⁶⁵⁾。その他の加工法についても、例えば鋳造、鍛造、絞り、射出成型などに対し、材料の流れを解析し、その金型を合理的に設計する手法なども見られるようになった。これらの加工法には技術的に未知の部分も多く、基礎理論と現場での実証とを組み合わせながら、更に研究を進展させる必要がある。

近年、組立作業の自動化などに関連して、生産ラインにおけるロボットの役割が注目されている。知能ロボットに関する長い研究の歴史とは独立に、産業用ロボットは一般に動作教示方式で固定的に利用されてきた。しかし、動作教示方式の限界が明らかになり、統合的なFAソフトウェアの中でロボットを有効に使いこなすためのソフトウェアの重要性が認められてくると共に、知能ロボット研究の成果の実用化の気運が急速に高まってきた。IBMのAML⁶⁶⁾に代表されるようなロボット言語は実用期に入ろうとしているが、モデルにもとづく本格的なロボット・ソフトウェアの開発は始まったばかりである。作業の記述や指定、計画、軌道の生成などに関して多くの研究が必要とされている。色々な開発計画があるが^{67), 68)}、一例として我々の考えているシステム構成を図-11に示す。また、衝突回避軌道の自動生成例⁶⁹⁾を図-12に示すが、このようなロボット・ソフトウェアの要素技術は統合システムの基礎として重要である。

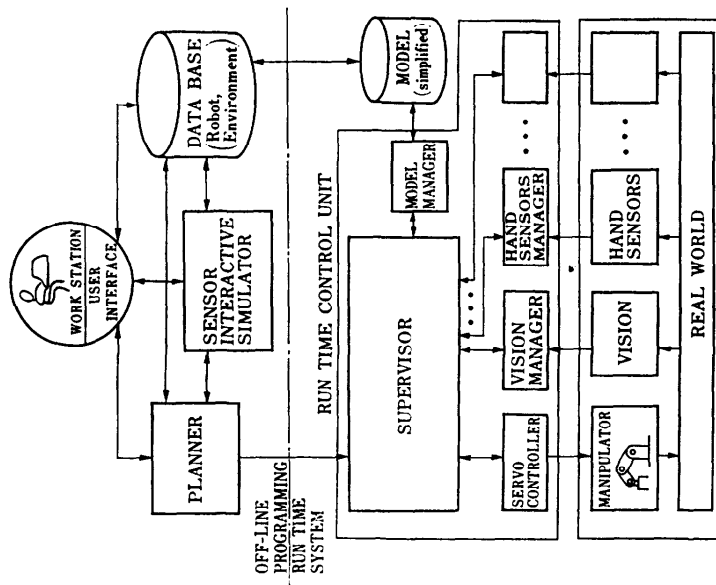


図-11 モデルにもとづく統合ロボット・ソフトウェア・システムの構成

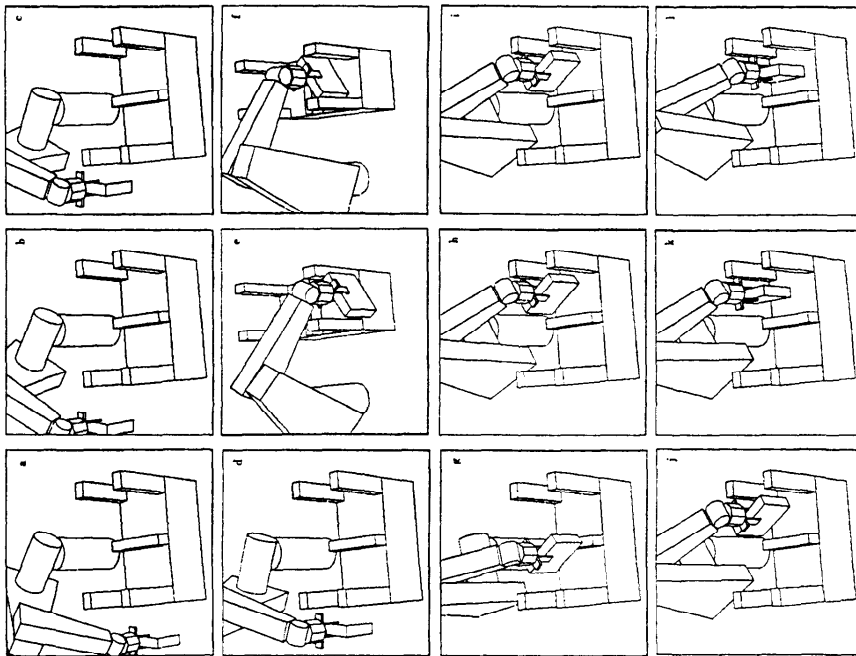


図-12 ロボット軌道の自動生成の一例

5. おわりに

いくつかの注意を記して、まとめにかえる。

(1) ある欧州の情報工学の専門家は、CAD/CAM の研究者を評して次のようにいった。「彼等は余りにもソフトウェア工学の最新技術を知らなすぎる、たとえば抽象データタイプ、オブジェクト指向プログラミング、などなど」と。これはある程度真実である。しかし逆もまた真であるかもしれない。すなわち、「情報処理の専門家はあまりにも「もの」を作らない」と。今後は、両者のより緊密な理解と協力が必要であろう。FA は情報処理研究の宝庫であり、また高度の情報処理技術を必要としているのだから。

(2) 広範な技術的知識を取り扱える枠組を前提として、技術者の知識をいかに獲得するか、を考察することが重要である。これは専門技術者を不要にすることではなく、日常的に計算機に訓練を施すことにより、専門技術者により良い助手を提供することになる。

(3) 先進的なソフトウェア技術は、生産現場から遊離していく傾向がある。良い製品を安く、早く、提供するという FA の原点に立って、基礎研究の評価と反省を行う必要がある。

(4) 大規模な FA 開発が、国際協力事業、国家事業、あるいは大企業連合として、進められつつある。米国においては IPAD, ICAM を始めとして、千万ドルの規模の研究計画は数えきれないほどあるようである。欧州では APS などがあるが、最近、情報処理全般を含む ESPRIT 計画が発足し、その一つの柱として CIM が採り上げられるに至っている。いずれもソフトウェア重視、次世代指向である点が目立っている。これらの技術は各国工業の生き残りのための基本技術であり、安易な技術導入は期待できない。我が国の新世代コンピュータ計画に対する期待は大であるといわねばならない。

参 考 文 献

- 1) 設計・生産の自動化, 情報処理特集号, Vol. 24, No. 1 (1983).
- 2) ファクトリーオートメーション, 日本機械学会誌特集号, Vol. 86, No. 779 (1983).
- 3) FA (ファクトリーオートメーション), 計測と制御, Vol. 22, No. 11 (1983).
- 4) Computer Integrated Manufacturing, CAM-I Special Report, R-83-ATPC-02 (1983).
- 5) 木村文彦: CAD/CAM システム構築のための基礎技術, 情報処理, Vol. 24, No.1, pp. 17-25 (1983).
- 6) A Discrete Parts Manufacturing Model, CAM-I, R-83-SC-01 (1983).
- 7) Kimura, F., Kawabe, S., Sata, T. and Hosaka, M.: A Study on Product Modelling for Integration of CAD/CAM, IFIP WG. 5.2/5.3 Working Conference on Integration of CAD/CAM, Proc. to be published from North-Holland, Amsterdam (1983).
- 8) Bernus, P.: Rigour and Permissiveness in the Design of CAD/CAM Systems—The Theory and Practice of a Methodology, op. cit.
- 9) Simpson, J., Hocken, R. and Albus, J.: The Automated Manufacturing Research Facility of the National Bureau of Standards, Journal of Manufacturing Systems, Vol. 1, No. 1, pp. 17-32 (1982).
- 10) Iwata, K. and Arai, E.: Development of Integrated Modelling System for CAD/CAM of Machine Products, Advances in CAD/CAM (PROLAMAT 82), pp. 35-45, North-Holland, Amsterdam (1983).
- 11) Kimura, F., Sata, T. and Hosaka, M.: Integration of Design and Manufacturing Activities Based on Object Modelling, op. cit., pp. 375-385 (1983).
- 12) Bø, K., Fuchs, H., Hasselknippe, B. and Krause, F.-L.: Advanced Production Systems (APS)-CAD/CAM Systems of the Future, CAD Systems Framework, pp. 77-104, North-Holland, Amsterdam (1983).
- 13) Grabowski, H., Anderl, R., Rausch, W. and Seiler, W.: DICAD—A CAD System for Geometric Product Modelling, op. cit., pp. 125-154 (1983).
- 14) Requicha, A. and Voelcker, H.: Solid Modelling, IEEE CG & A, Vol. 2, No. 2, pp. 9-24
- 15) Requicha, A. and Voelcker, H.: Solid Modelling, IEEE CG & A, Vol. 3, No. 7, pp. 25-39 (1983).
- 16) 三次元図形処理と形状モデリングの調査報告書, 情報処理振興事業協会技術センター, 57 技-009 (1983).
- 17) Boyse, J. and Rosen, J.: GMSOLID—A System for Interactive Design and Analysis of Solids, General Motors Research Laboratories, GMR-3451 (1980).
- 18) Sarraga, R.: Algebraic Methods for Intersections of Quadric Surfaces in GMSOLID, Computer Vision, Graphics and Image Processing, Vol. 22, pp. 222-238 (1983).
- 19) Goldman, R.: Quadrics of Revolution, IEEE CG & A, Vol. 3, No. 2, pp. 68-76 (1983).
- 20) Goldman, R.: Two Approaches to a Computer Model for Quadric Surfaces, IEEE CG & A,

- Vol. 3, No. 6, pp. 21-26 (1983).
- 21) Mäntylä, M. and Sulonen, R.: *GWB: A Solid Modeler with Euler Operators*, IEEE CG & A, Vol. 2, No. 7, pp. 17-31 (1982).
 - 22) Tikkanen, M., Mäntylä, M. and Tamminen, M.: *GWB/DMS: A Geometric Data Manager*, Proc. Eurographics '83, pp. 99-112 (1983).
 - 23) 千代倉弘明, 木村文彦: 基本変形操作を用いた形状設計過程の一表現法, 情報処理学会「グラフィックスとCAD」シンポジウム論文集 (1983).
 - 24) GMR Symposium on Solid Modeling by Computers: From Theory to Applications, General Motors Research Laboratories, Proc. to be published from Plenum Press, New York (1984). (Short Summary available in IEEE CG & A, Vol. 3, No. 8, pp. 72-74).
 - 25) Requicha, A.: *Toward a Theory of Geometric Tolerancing*, Robotics Research, Vol. 2, No. 4, pp. 45-60 (1983).
 - 26) Chiyokura, H. and Kimura, F.: *Design of Solids with Free-form Surfaces*, Computer Graphics, Vol. 17, No. 3 (SIGGRAPH '83), pp. 289-298 (1983).
 - 27) Kimura, F.: *Design Methods of Free-form Surfaces and their Integration into the Solid Modeling Package GEOMAP-III*, in (24).
 - 28) Rockwood, A.: *Introducing Sculptured Surfaces into a Geometric Modeller*, in (24).
 - 29) Sarraga, R. and Waters, W.: *Free-form Surfaces in GMSOLID: Goals and Issues*, General Motors Research Laboratories, GMR-4481 (1983).
 - 30) Barnhill, R. and Boehm, W. (eds): *Surfaces in Computer Aided Geometric Design*, North-Holland, Amsterdam (1983).
 - 31) Encarnacao, J. and Krause, F.-L.: *File Structures and Data Bases for CAD*, North-Holland, Amsterdam (1982).
 - 32) Fisher, W.: *PHIDAS-A Data Base Management System for CAD/CAM Application Software*, Computer Aided Design, Vol. 11, No. 3 (1979).
 - 33) Ulfby, S., Meen, S. and φian, J.: *TORNADO-A DBMS for CAD/CAM Systems*, in (31), pp. 335-350 (1982).
 - 34) Fishwick, P. and Blackburn, C.: *Managing Engineering Data Bases: The Relational Approach*, Computers in Mechanical Engineering (ASME), Vol. 1, No. 3, pp. 8-16 (1983).
 - 35) 稲見千賀子, 大沼啓希: *MVS 環境でのリレーショナル・データベース管理システム-DB2, QMF, DXT*, 情報処理学会第 38 回データベース・システム研究会資料 (1983).
 - 36) 柳生孝昭: *CAD のための data metamodel*, 情報処理学会「グラフィックスとCAD」シンポジウム論文集 (1983).
 - 37) Higashi, M., Kohzen, I. and Nagasaka, J.: *An Interactive CAD System for Construction of Shapes with High-Quality Surfaces*, Computer Applications in Production and Engineering (CAPE '83), pp. 371-390, North-Holland, Amsterdam (1983).
 - 38) *Automatic Software Generation, Artificial Intelligence and Expert Systems*, CAM-I, R-82-ATPC-04 (1982).
 - 39) *Special Issue on Knowledge Representation*, IEEE Computer, Vol. 16, No. 10 (1983).
 - 40) Kasik, D.: *A User Interface Management System*, SIGGRAPH '82, pp. 99-106 (1982).
 - 41) Borufka, H., Kuhlmann, W. and Ten Hagen, P.: *Dialogue Cells: A Method for Defining Interactions*, IEEE CG & A, Vol. 2, No. 5, pp. 25-33 (1982).
 - 42) Enderle, G., Kansy, K. and Pfaff, G.: *Computer Graphics Programming: GKS*, Springer, Berlin (1983).
 - 43) *Graphical Input Interaction Technique (GIIT) Workshop Summary*, Computer Graphics, Vol. 17, No. 1, pp. 5-30 (1983).
 - 44) *User Interface Management System Workshop*, Seeheim, Proc. to be published (1984).
 - 45) 高機能ワークステーション, 情報処理特集号, Vol. 25, No. 2 (1984).
 - 46) Encarnacao, J., Borufka, H., Neumann, T., Pfaff, G., Rehwald, P., Rix, J. and Weber, H.: *A Reference Model for Components and Interfaces of a CAD System*, IFIP WG 5.2/5.3 Working Conference on Integration of CAD/CAM, Proc. to be published from North Holland, Amsterdam (1983).
 - 47) *Virtual Device Metafile (VDM)*, ANSI X 3 H 3/83-15-R8, Nov. 1983 (1983).
 - 48) *Programmer's Hierarchical Interactive Graphics Standard (PHIGS)*, ANSI X 3 H 3/83-44 (1983).
 - 49) *Initial Graphics Exchange Specification (IGES), Version 2.0*, National Bureau of Standard, NBSIR-82-2631 (AF) (1983).
 - 50) *IGES Experimental Solid Specification "Strawman"*, IGES Advanced Geometry Subcommittee (1983).
 - 51) Sakurai, H. and Gossard, D.: *Solid Model Input through Orthographic Views*, SIGGRAPH '83, pp. 243-252 (1983).
 - 52) Lin, V., Gossard, D., and Light, R.: *Variational Geometry in Computer-Aided Design*, SIGGRAPH '81, pp. 171-177 (1981).
 - 53) Warn, D.: *Lighting Controls for Synthetic Images*, SIGGRAPH '83, pp. 13-21 (1983).
 - 54) Yoshikawa, H.: *Automation of Thinking in*

- Design, Computer Applications in Production and Engineering (CAPE '83). pp. 405-417, North-Holland, Amsterdam (1983).
- 55) Bertok, P.: Development of a System for Monitoring the Machining Operation in Automatic Manufacturing Systems, Technical Paper, Univ. of Tokyo (1983).
- 56) Taylor, R., Summers, P. and Meyer, J.: AML: A Manufacturing Language, Robotics Research, Vol. 1, No. 3, pp. 19-41 (1982).
- 57) Pickett, M., Tilove, R. and Shapiro, U.: ROBOTEACH: An Off-line Robot Programming System based on GMSOLID, General Motors Research Laboratories, GMR-4465 (1983).
- 58) Robotics Software Project, CAM-I (1983).
- 59) Brooks, R.: Planning Collision-Free Motions for Pick-and-Place Operations, Robotics Research, Vol. 2, No. 4, pp. 19-44 (1983).
(昭和 59 年 2 月 28 日受付)

