

解説

FA 用情報処理技術



CAD と CAM との 結合†

稲 葉 聡††

1. ま え が き

設計・生産は、アイデアまたはイメージという漠然としたものを、現実的な物に具体化する活動といえる。このプロセスにおいて、何らかの形でコンピュータを利用して、作業を進める設計・生産の一つの技術が CAD/CAM (Computer Aided Design/Manufacturing) である。

一貫した設計・生産のプロセスにおけるシステム化である CAD と CAM は、本来密接な関係があり、互いに必要な情報が必要なタイミングで授受できるようにしなければならない。また両システムを使用する上での重複作業を避けなければ各システムは、十分な効果を上げられない。

CAD と CAM の結合は、こうした個々に機能を果しているシステムを結合して、それぞれがより増大された機能を発揮させることや、結合によりプロセス全体がより効果を上げることを目的としている。そのためには、両システム間の情報の円滑な伝達や一元化と、情報そのものの質とが重要な課題となる。そこで本章では、CAD/CAM 各々の発展の経緯と現状を踏まえて、CAD システムと CAM システムとの結合の現状と課題について、機械・構造物系の CAD システムと NC (Numerical Control) システムを中心に解説する。

2. CAD/CAM 適用の歴史

2.1 先進企業における独自システムの開発

我が国における設計と生産準備部門とのシステム化は、昭和 40 年代にコンピュータの普及が進むとともに、自動車、船舶などの先進企業において、強度や性能などの技術計算や、モデルや金型の自動切削のための

能 NC の分野でコンピュータを利用することから始められた。また、グラフィックディスプレイを利用した実験システムも開発された。これらが、CAD と CAM の発展の始まりであるが、製品情報の伝達の手段として、まだ図面や模型に頼らざるをえなかった。

表-1 CAD/CAM の歴史

年 代	システム名
1961	APT (米, IITRI)
1963	SKETCHPAD (米, MIT)
1963	DAC-1 (米, GM)
1965	EXAPT (西独, EXAPT 協会)
1967	CADAM (米, Lockheed)
1968	CADD (米, McDonnell Douglas)
1973	BUILD (英, Cambridge)
1973	TIPS-1 (日, 北大)
1976	PADL (米, Rochester)
1977	GEOMAP (日, 東大)
1978	GMSOLID (米, GM)
1981	ALPHA-I (米, Utah)
1982	CAE (米, SDRC)

昭和 40 年代後半に入ると、グラフィックディスプレイの実用化が始まり、会話型グラフィックシステムが注目されてきた。製造工業の先進企業では、これを導入して、製品の 3 次元形状を数値データ化し、コンピュータの中に格納して部門間で伝達することにより、詳細設計、図面出力、NC データ出力などが行える本格的な CAD/CAM システムの構築の計画をした。当時は、まだ汎用の CAD/CAM システムが市場に存在しなかったために、各社は、それぞれ独自の大規模システムの開発を競って開始した。これらは、現在でも、各社の製品開発システムの中核をなしているが、当時のコンピュータの能力の制約と、種々のアルゴリズムが開発されたことから、サブシステムごとに異なるハードウェア/ソフトウェアを利用することも多く、サブシステム間の不整合の除去に努めているの

† Integration of CAD and CAM System by Satoshi INABA (Applications Software Div., CAD Software Development Dept., Nippon Univac Kaisha, LTD.).

†† 日本ユニバック(株)応用ソフトウェア事業部 CAD 開発部

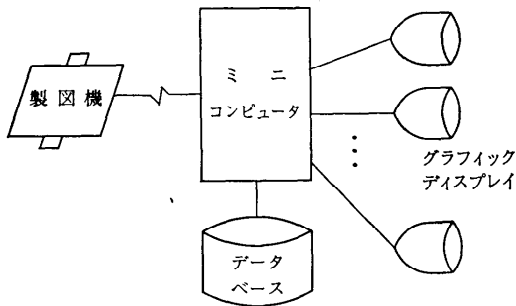


図-1 ターンキーシステムのハードウェア構成

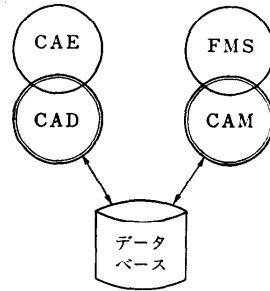


図-2 CAD と CAM の結合

が現状である。しかし、製品開発工程の効率化や高品質化に対する寄与は多大なもので、これらの企業では、もはや CAD/CAM なしでは製品の開発は、不可能となっている。

2.2 ターンキーシステムの普及

米国の CAD/CAM の歴史は、コンピュータの普及とも関連して、日本より5年以上も早く始まった。日本との顕著な違いとして、CAD/CAM システムの開発・販売を専門にするターンキーシステム・ベンダが、数多く出現したことが挙げられる。これらは、ミニコンピュータをホストとして、数台のグラフィックディスプレイをサポートするシステムである(図-1)。

当初2次元の製図システムから出発して、次第に3次元図形処理や、NC などの機能拡張がなされてきた。しかし、元来中小規模の企業や、大企業の一部門のニーズを満たすのに適していたが、トータルシステムの構築には不十分とされてきた。また、日本でも昭和50年代から、これらの米国製ターンキーシステムが、本格的に導入されるようになり、CAD/CAM 適用の普及に寄与した。

2.3 結合 CAD/CAM システムの構築

製造工業の各分野において、さまざまなレベルの CAD/CAM の普及が進んできたが、さらに、既存 CAD/CAM サブシステムとの結合、CAD システムと設計解析システムとの結合、そして CAD/CAM システムと生産との結合などの新たな動きが始められてきている。これらは、データベースの一元化、CAD と CAM のより一層緊密な結合、CAE(Computer Aided Engineering) との結合、FMS (Flexible Manufacturing System) との結合などを意図するものと思われる(図-2)。

3. CAD/CAM の現状

3.1 CAD の現状

3.1.1 製図システムと設計システム

ターンキーシステム・ベンダから、種々の CAD ターンキーシステムが市販されており、現在数多くのユーザへの導入実績が見られる。初期のターンキーシステムは、製図機能に重点がおかれていた。このような製図システムでは、従来設計者が製図板で設計していた作業を、グラフィックディスプレイにおきかえたものである。したがって、設計者の思考の援助はあまり望めないで、設計全体の工数削減には結びつかない。しかし、既設計図面の編集を主とする編集設計には大変有効で、簡単にしかも迅速に直線や円などを描く作図機能が充実している。これらの製図システムがシステム内に構築するモデルは、設計対象の物を表現するデータ構造ではなく、作図に便利のように構築されている。このために、設計された物の解析・評価、部品展開、積算などの他の CAD 周辺システムとの結合は困難になる。作図作業は、必ずしも設計対象の物と密接な関係を保ちながら行われるとは限らない。たとえば、1本の直線が、複数の部品にわり引かれることや、一つの部品を表わす直線が、隠線処理のために分断されることもある。このような製図システムは、編集設計やトレーシングの作業以外には、それほど有効ではないという見方がされているのが現状である。

最近では、解析、部品展開、積算などと同様に一つのサブシステムとして、製図を位置づける CAD システムが出現してきている。つまり図面出力は、設計結果の情報伝達の一手段でしかないという考え方で、あくまでも、主たる情報の伝達は、システム内に構築されたモデルとする考え方である。ここでは、製図主体

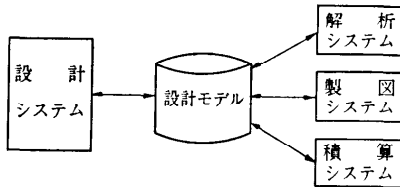


図-3 設計システム

の製図システムと比較する意味で、設計主体の CAD システムを設計システムと呼ぶことにする(図-3)。

設計システムでは、3次元の図形処理が主体として行われ、図形は、設計の単位ごとに意味のある集合としてシステム内のデータ構造に反映される。モデルが物に構造的に対応することから、部品の再配置による代替設計や、配置された標準部品の一斉変更などの設計作業に密接な操作が行える。このような操作に対処するには、複雑なデータ間の関係や膨大なデータ量に対処できるデータベースシステムが必要となる。また、このデータベースは、従来の図面や模型に相当する物を表現する情報のファイルで、ユーザにとって大変重要な役割りを果たすために、その機密保護や障害対策が重要な機能となる。

3.1.2 汎用システムと専用システム

システム・ベンダは、広く市場に提供できるシステムということから、特定の企業や設計の分野に依存しない汎用システムを販売している。多くのターンキーシステムが製図システムであるという理由には、製図については ANSI, DIN, JIS などの標準規格が確立されているので、汎用のシステム構築が比較的容易であることが挙げられる。

しかし、設計となると設計対象を特定化した方が、システム開発が容易になることや、システムの操作性が良くなることから、汎用システムは、その操作性において専用システムよりも劣る。汎用システムは、物を認識する設計システムといえども、物を点、線、面などの抽象化された図形要素とそれらの関係として捉えるので、特定の設計対象物を意識することはできない。モデルが、設計上どのような意味を持つかは、システムを操作する設計者に委ねられている。また、このモデルをシステム内で処理する場合も、モデルの要素である幾何学的な図形処理にとどめている。専用システムでは、このような図形処理つまりモデリングが、特定の分野の作業に密接な処理としてプログラムされている。以下に例を挙げて説明する

プレハブ住宅の専用 CAD システムでは、設計者

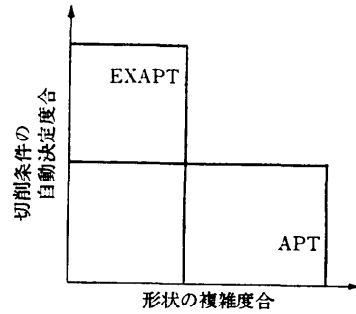


図-4 NC ソフトウェア

が操作する基本的な図形の要素は、柱や壁などの言葉使いで呼ばれる。汎用システムでは、これらを四角柱や平面で操作することになり、これらを柱や壁と認識するのは、設計者の責任となる。専用システムでは、部屋の大きさが決まると(たとえば平面図上で2点を与えれば)床、壁、天井、柱などが自動的に創成され、それらの位相関係も記憶されるので、間取りの変更に対して最小限の指示で、整合性のある変更作業が自動的に行える。これらのことは、専用システムである以上当然のことであり、その操作性は、汎用システムの及ぶところではない。しかし、企業独自のシステム開発は、かなりの費用と期間を要するために、最近では、汎用システムをベースに専用システムを構築する傾向が現われてきている。ターンキーシステムにおいても、ユーザ固有の機能を、いかに容易に組み込めるかが重要なポイントとされてきている。

3.2 CAM の現状

3.2.1 汎用システムと専用システム

プロセスプランニング、ロボットティーチングなどいろいろなシステムが、CAM の分野にあるが、最も実用化の進んでいる分野は NC システムである。

NC システムには、現在多種多様なシステムが存在するが、その中でも古典的ともいえるのが、APT と EXAPT である(図-4)。

APT は、形状処理を主体とした汎用システムであり、EXAPT は、加工条件の自動決定を主体とした汎用システムである。現在市販されている種々の NC ソフトウェアは、APT や EXAPT の特徴的な機能を、さらに拡張し専用化したシステムが多い。これらは、APT の形状処理にさらに曲線、曲面処理や領域加工の機能を発展させた金型切削のためのシステムや、APT の形状処理をさらに限定したコンパクトシステムである。また、EXAPT の加工条件自動決定

の機能を、特定のコントローラや工作機械に限定することで、自動決定のアルゴリズムを単純化し、CNC (Computer NC) やマイクロコンピュータに組み込んだシステムである。APT や EXAPT の汎用システムが、大型コンピュータで主に実行されるのに対し、これらの市販システムは、ミニコンピュータやマイクロコンピュータで利用できることから急速に普及しているのが現状である。

3.2.2 パートプログラミング

設計システムでの製図サブシステムと同様に、NC も一つのモジュールとして、CAD システムの中に組み込まれている場合も多い。NC システムに対して切削対象のモデリングや、工具動作の制御などの情報の手順を定義するのがパートプログラムである。パートプログラムの内、モデリングは、CAD で構築したモデルを利用して工具動作だけを定義すれば良いシステムと、APT のステートメントの形式でパートプログラムを創成し、計算は APT で実行させるシステムとがある。いずれのシステムも、設計モデルと工具軌跡とを重ねて表示できることが特徴である。従来のように、NC はバッチ処理主体で、しかも CAD とは独立なシステムである場合には、このような NC 処理結果の検証に便利な機能はなかった。

一方、CAD の出力であるモデルを利用しないで、NC システムで図面から直接切削対象をモデリングするシステムもかなりある。この場合、図面に記述されている図形の形と寸法から、少ない操作で自由曲面などの複雑な切削対象をモデリングできるシステムが多く出現してきているのも新しい傾向である。また、これらのシステムでは APT とは異なり、図形の定義と工具動作の定義とが明確に区別されていない場合が多い。このため、定義の順序により、動作方向が限定されるが、APT のように、図形と工具動作を逐一定義することに比べれば大変簡便である。一般に、これらのシステムは、ミニコンピュータで実現されていて、中小規模の企業には、便利なシステムとされており多くの導入実績がみられる。切削対象の形状の複雑度合は、企業規模には無関係であることから、これらの簡便な NC システムが普及したと思われる。しかし、切削対象の形状が自由曲面である場合、これらの簡便な NC システムでは、曲面と曲面および曲面と工具との干渉計算に不十分な場合が多く、曲面と曲面および工具との干渉状態をシステムではなく、パートプログラムが認識しなくてはならない。これは、形状が複

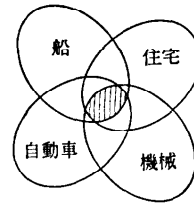


図-5 共通処理

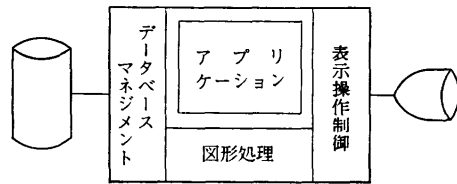


図-6 共通処理モジュール

雑になると、大変困難なことをパートプログラムに強いることになる。この問題に対して最近では、曲面と曲面との関係を定義して、工具が複数曲面との干渉を計算しながら、次々と乗り移る処理が可能な複合自由曲面 NC システムも開発されている。

3.3 CAD/CAM の要素技術

CAD/CAM システムには、それらが専用であるか汎用であるかにかかわらず、システムを構成する処理モジュールに共通的なモジュールがある。これらは、データベース管理モジュール、図形計算を行う図形処理モジュール、そして表示操作制御を行うグラフィックスモジュールである(図-5,6)。

3.3.1 データベース管理モジュール

現状の多くの CAD/CAM システムのデータベース管理ソフトウェアは、データおよび構造をポインタで管理している。先に述べた設計システムのデータベースは、多量のデータと、複雑な構造からなるために、図形間の関係の変更や、データの属性の変更に対して、ポインタの付け替えと多数のポインタによる検索が必要となることが多い。これは、大変非効率的な処理になるし、管理ソフトウェアも複雑にならざるをえない要因となる。とりわけ、システムの機能追加にともない新たなポインタを設定すると、絶望的に困難なことになる。最近これらの不都合を解消すべく、リレーショナルデータベースのアプローチを導入して、システムの開発と変更を容易

にした CAD システムが出現してきている。

3.3.2 図形処理モジュール

CAD システムにとり、モデリングは重要な要素であるが、現状は、3次元ワイヤフレームおよびサーフェスモデルが主流である。システム内のモデルが重要な情報となることは前述したが、ワイヤフレームやサーフェスモデルでは、モデルの完全性において不充分なために、最近ソリッドモデルが研究されている。

モデリングにおける図形処理の内、特に曲線、曲面処理については、各システムとも、処理の改善や機能の拡張が著しく、古典的な Coons の方式から、Bézier や B-Spline の方式へと変化している。これは、曲線、曲面を表現するデータ量が節約できること、形状の局部変更操作が容易で自由度が高いことなどによるものと思われる。

3.3.3 グラフィックスモジュール

設計が形状を扱う作業であることから、人間とコンピュータとのインタフェースは、古くからグラフィックディスプレイが使用されている。ハードウェアの傾向として、従来のリフレッシュ・ランダムスキャン型や蓄積管型から、ラスタスキャン型が主流になりつつある。線のなめらかさという画質では、ランダムスキャン型や蓄積管型が優れているが、色彩の表現、画面の表示、隠面処理のしやすさ、さらにコストにおいてもラスタスキャン型は優れている。このように、多種多様なディスプレイが使用できることから、ハードウェアの相違によるシステムの非互換性が問題になり、表示制御に関する標準が各種提案されている。代表的なのは、CORE(ACM, SIGGRAPH), GKS(ISO) および PHIGS(ANSI) である。

CORE と GKS は、図形の構造をアプリケーションの問題として捉えて、グラフィックのソフトウェアとしては、構造を否定する立場をとるのに対して、PHIGS は、明確に構造を意識していることが大きな違いである。市販されているグラフィックディスプレイ装置には、CORE 準拠としているものが多いが、仔細に見ると CORE の用語を用いてはいるが、むしろ CORE から逸脱した機能を特徴としているなど、標準化は、まだ混沌としているのが現状である。

モデルの表示制御として、隠面処理、陰影処理などが挙げられるが、現在では、そのアルゴリズムのほとんどが確立されており、実用的にはハードウェアの進歩に関連して処理速度が向上するのを待つのみである。

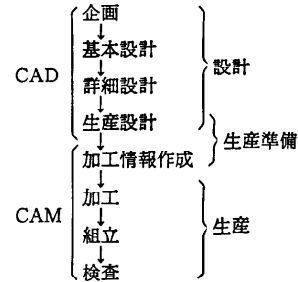


図-7 CAD/CAM の適用範囲

4. CAD/CAM の結合の現状

設計から生産までのプロセスは、いくつかの工程からなる。各工程において、上級から下流に向かうにしたがい、各工程での情報が付加され、情報は詳細化される(図-7)。

CAD/CAM の適用の歴史は、効果の大きい分野や手がけ易い分野などで始まり、必ずしも工程の順序には関連しなかったが、現在では、先進企業における相当数の工程が CAD/CAM の対象とされている。情報処理技術の観点からの CAD/CAM の結合の問題は、CAD と CAM に限らずこれらサブシステム間、すなわち CAD と CAD, CAD と CAE あるいは CAM と FMS の結合の問題と同一である。つまり、各工程間で情報が、いかに正確にかつ重複作業をともなわずに効率的に伝達されるかということである。

現在実用化が進んでいるものの一つと思われる自動車工業の車体開発を例に挙げ、結合による情報の流れとそこにおける情報の変化について説明する。車体開発の CAD/CAM 適用例を図-8 に示す。

外板データベース作成システムは、デザインの意図した車体形状を表わしたクレイモデルの3次元測定データあるいはラフスケッチ図をもとに、複雑な自由曲面からなる外板の数値モデルを作成する。このデータは、すべての後工程から参照される情報で、データベースに構築される。このシステムにおける仕事の中心は、形状を表現する主要断面線と、形状を特徴づけるキャラクターラインと呼ばれる曲線とから曲面を創成することである。ここでは少ない入力からデザイナーの意図する形状を創成すること、創成された面を評価することなどに種々の工夫がなされている。

内板部品設計システムは、外板データを参照して、内板、骨格部品などを設計するとともに、外板に関しても、外からは見えないフランジなどの延長部を加え

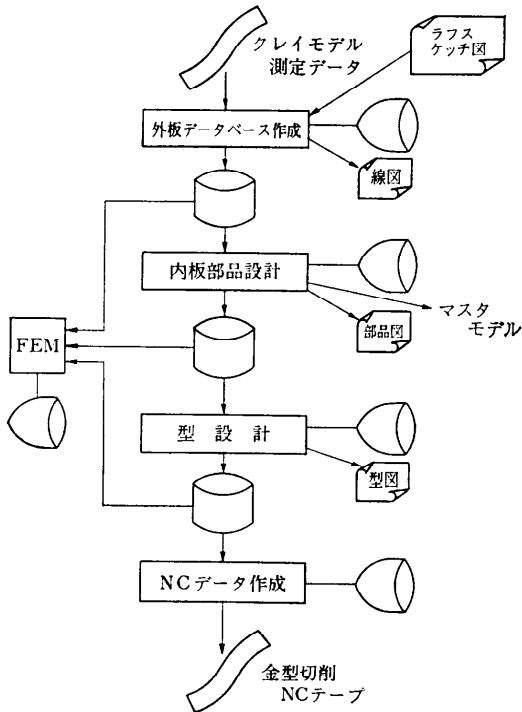


図-8 車体開発工程

て、ドア、ルーフなどの部品化を行う。外板システムが、すべて自由曲線と自由曲面で処理するのに対して、内板システムでは、主として解析的な図形処理が行われる。また、各社の標準による製図機能が重視されるために、2次元処理だけとか3次元ワイヤフレームにとどめることもある。

型設計システムは、要求機能の違いから、一般にプレス成形する製品の形状に関係する部分のための製品部設計システムと、金型の鋳物構造のための構造部設計システムとに分けられることが多い。

前者では、プレス成形の絞り、曲げ、切断などの工程設計や、各工程でのダイフェース面の設計を行う。ここでは、金型固有の曲面創成機能やプレス方向、成形性などの検討をする機能が必要とされる。このため、外板、内板部品の形状の参照だけでなく、これらに対して、自由に断面計算などの操作が必要となる。

後者では、標準部品の利用、編集設計、製図機能、および加工情報の指定機能などが重視される。

NCデータ作成システムでは、マスターモデルやプレス金型の加工手順を計画し、加工方法をパートプログラミングしてNCテープを出力する。製品部に関しては、複合自由曲面の切削計算やパネルのスプリング

バック処理が必要となる。また、構造部に関しては、加工手順や加工条件の自動決定などが重要な処理である。

FEMは、車体の内・外板で決まる車体の構造解析、プレス成形時の大変形解析などを行う。FEMプロセッサとしては、NASTRAN、MARC、ARGUSなどの標準的なソフトウェアが利用されることが多い。

以上の例でわかるように、サブシステムの結合は、データベースを介して行われている。各サブシステムは、前工程のデータベースを自工程のデータベースに取込んで、自工程に必要な処理をほどして情報を追加しているのが現状である。このような結合システムでは、サブシステムごとにデータベースが分散されているため、ひとたび設計変更が発生すると、その整合性を保つのは大変困難なことになるなど、まだ解決すべき問題が多い。

5. 結合 CAD/CAM システムの課題

CAD/CAMの結合を図るためには、今後解決すべき技術的課題が山積していると思われる。

結合の要点は、円滑な情報伝達と情報の充実であるという観点で、以下にいくつかの課題を述べる。

5.1 情報の互換性の向上

既存のCAD/CAMシステムを結合する場合、各システムは、設計や生産の対象となる物をシステム内にモデルとして構築しているが、このモデルを両システムで、いかに円滑に参照できるかが重要な問題である。モデルは、主として、形状情報からなるが、両システムで形状を表現する方法が異なると、参照のたびにデータ交換をする必要があり、円滑な情報伝達は期待できなくなる。しかし、各々独立に開発されたシステム間では、このような問題は良く見られることである。モデルの表現が異なるシステム間での情報交換のインタフェースとして、ANSIが提唱しているIGES (Initial Graphics Exchange Specification) は注目に値する。しかし、IGESは、モデルを構成する図形要素の表現の標準に重点がおかれており、図形要素間の関係やデータの属性の表現については、未だ不十分なところもある。CADにおいて、形状だけでなく材質や加工法などCAMに必要な情報が、いろいろと定義されている場合が多い。これらの情報を、いかに正確にCAMへ伝達して、CAMにおける無駄な再定義という作業を省き、機能をより高めるかが重要である。そのためにも、IGESを発展させた高度な標

準インタフェースを設定することが課題と考える。また、Coons, Bézier, B-Spline など種々の形状表現方法がある中で、それらがすべて3次式で表現されていれば相互に変換可能であるが、最近のように高次表現も現われてくると、その間の変換または近似の技術の確立も課題である。

5.2 情報の充実

CAD で構築されるモデルには、CAM に有効な情報が含まれていることは前述したが、モデルが製品形状そのものでは CAM に有効ではない場合も多い。鋼板のプレス成形や樹脂の成形などで、CAM に必要なモデルは、生産技術を折り込んだスプリングバックによる変形や、樹脂の冷却硬化のための変形などを考慮したものである。NC パートプログラミングにおいて、このような変形を、製品モデルをもとにあらためて定義するのでは、有効な結合がなされとはいえない。CAD の情報つまりモデルを正確に CAM へ伝達するためには、CAD のモデルを充実させる必要がある。前述した変形の解析は、一つの CAD システムで処理をしていないのが現状である。評価・解析のための処理は、コンピュータ負荷が大きいため別に処理されている。CAM に有効な情報を CAD で充実させるには、これらの解析を CAD システムの中で処理可能になるような、アルゴリズムや実現手段の検討が今後の課題である。ハードウェアの進歩も十分期待できることから、CAD が CAE を包含することも近い将来に実現可能と思われる。

5.3 情報の一元化

CAD から CAM への情報において、重要でしかも難問なのは、設計変更の情報である。CAD および CAM システムにおけるモデルは、それぞれのシステムで効率よく取り扱えるように、各々のシステムに最適な表現が、データベースに構築される。モデルが、物理的に異なる場所に存在する場合も多い。このような場合、設計変更という事態に効率的に対処するのは、大変面倒なことである。物理的に異なる場所に存在する情報でも、両システムでまったく同じモデルが復元できれば、情報は一元化されたことになり、設計変更への対処も比較的容易に実現できる。しかし、前述したように、現状ではモデルのデータ表現と、モデルを構築するアルゴリズムとが異なる場合が多いので、まず、情報の一元化を図ることから始めなくてはならない。また一元化するためには、工程間におけるデータの変化に柔軟に対処できるデータベースマネジメント

システムの開発が必要で、最終的には、エンジニアリングデータベースの構築が課題になると考える。

5.4 情報の精度向上

CAD と CAM 間で伝達される情報つまりモデルをより完全にするための技術として、ソリッドモデリングがある。一般に、設計や生産の対象は立体であることから、ワイヤフレームやサーフェスモデルで表現すると、あいまいなモデリングをすることになる場合もある。ソリッドモデリングでは、モデルを構築する際に、自然とそのあいまいさを排除することができ、より完全な立体モデルを構築することが可能で有効な手段である。しかし、ソリッドモデリングは、機能面および計算時間ともに現状では実用段階に達しているとはいえない。現状のソリッドモデリング・システムでは、基本立体の集合演算によりモデルを構築するのが大半である。これでは設計者が、実際の物に対応するモデルを創成するのは困難である。今後は、基本立体の局部変更や、自由曲面の取り扱いなどの図形処理の充実と処理効率の向上が望まれる。また、図面で物を考えるという伝統から、立体で考えるという設計者の意識の変革の可能性の検討も重要である。

5.5 CAM と FMS との結合

生産の分野では、NC やロボットなどを中心に FA (Factory Automation) が進んできているが、FA としての総合生産システム実現のためには、CAM から生産の場への直接的な情報伝達が必要である。その情報とは、NC の場合を例にとると、NC 工作機械による加工の段取りに必要な使用工具、加工順序、加工時間などである。これらの情報は、従来の NC テープにはない情報で、今後いかに CAM システムに取り入れて FMS との結合を図るかが課題である。

6. む す び

CAD と CAM の統合を有効なものにするためにも、統合化の要素技術であるエンジニアリングデータベース、ソリッドモデリング、FMS などの技術的発展が望まれる。また、FA を指向する時、CAD と CAM との結合だけではなく、生産管理システムとの結合も重要な課題であると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 穂坂 衛: CAD/CAM における情報の役割, 情報処理, Vol. 24, No. 1 (1983).
- 2) 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 (1983).

- 3) 沖野教郎: 自動設計の方法論, 養賢堂 (1983).
- 4) 竹原章夫他: 自動車車体製作における CAD/CAM, 情報処理, Vol. 24, No. 1 (1983).
- 5) 大原正志: トヨタにおける CAD/CAM とグラフィックスの利用, グラフィックスと CAD シンポジウム論文集, 情報処理学会 (昭和 58 年 12 月).
- 6) 近藤幹夫他: データー一元化方式による車体開発及び型治工具準備システム, 日産技報, Vol. 16 (1980).
- 7) 情報処理振興事業会・技術センタ: 3次元図形処理と形状モデリング技術の調査 (1983).
- 8) Requicha, A. A. G.: Representation for Rigid Solid; Theory, Method and Systems, Computing Surveys, Vol. 12, No. 4 (1980).
- 9) Braid, I. C.: New Directions in Geometric Modelling, Proc. Geometric Modeling Project Mtg., CAM-I (Mar. 1978).
- 10) Warn, D. R.: Lighting Controls for Synthetic Images, Computer Graphics, ACM/SIGGRAPH, Vol. 17, No. 3 (July 1983).
- 11) 柳生孝昭: CAD のための data metamodel, グラフィックスと CAD シンポジウム論文集, 情報処理学会 (昭和 58 年 12 月).
- 12) 中塚久世: IGES, PIXEL No. 10, 11, 12, 図形処理情報センター (1983).
- 13) National Bureau of Standards: Initial Graphics Exchange Specification; IGES, Ver. 1.0, (Jan. 1980).
- 14) SIGGRAPH-ACM: Computer Graphics, Vol. 13, No. 3 (Aug. 1979).
- 15) ISO TC 97/SC 5/WG 2 N: Graphical Kernel System; GKS, Ver. 7.0, Jan. (1982).
- 16) ANSI X 3 H 31: Programmer's Hierarchical Interactive Graphics Standard; PHIGS (Mar. 1983).

(昭和 58 年 12 月 28 日受付)