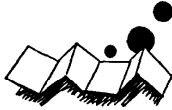


解説

金型設計・生産における CAD/CAM†



上西博文^{††} 菊池純男^{††} 矢島章夫^{††}
津田順司^{†††} 長田紀夫^{††††}

1. 緒言

従来の NC 加工には、小型計算機を利用した二次元加工システムや、個別製品対応の専用プログラムなどが主に使われてきた。しかしこの種のシステムでは、①適用範囲が限られている、②曲面を複雑に組み合わせた三次元形状が扱えない、③効果が NC 加工だけに限定される、などの問題があり十分な効果をあげるには至らなかった。一方 10 数年前に始まった新しい動きは、デザインから加工までの全工程に計算機を利用し、工程短縮をはかるトータルシステムの構想である。このシステムは従来各部門で開発されていた個々のシステムを統合し、さらに発展させたもので、今日言われている CAD/CAM 一貫システムである。形状を計算機内部に表現するモデリング技術、複雑な形状を加工する NC 加工処理技術なども飛躍的に発達し、国内においても 1970 年代半ばには、トータルシステムとして実用段階に入っている。この種のシステムの特徴は、

- ① 各部門が共通利用できるよう、形状データはデータベースシステムで一元管理する。
- ② 各種の製品に対応できるよう、汎用的な図形入出力機能・処理機能を備えている。
- ③ 応答性を良くするため、グラフィックディスプレイを利用した対話型システムの構成をとっている。などの点である。

こういった動向の中で、当社でも CAD/CAM 一貫システムを目指して、MDM (Modeling System for Design and Manufacturing) という三次元図形処理シ

ステムを開発してきたので、以下、実施例のひとつとして紹介する。開発に着手したのは昭和 46 年で、当初は家電製品を主な対象として考えていた。このため自由曲面を含む形状を扱えることが、ひとつの特徴になっている。開発の第一期 (昭 46~49) には、主に自由曲面の創成を中心とした立体モデリング技術と陰線消去・断面図作成などの表示技術の開発を行い、さらに第二期 (昭 50~52) には、NC テープ作成機能を中心とした CAM の技術を開発した。実際に生産工程に組み入れられるようになったのは、昭和 51 年頃からである。最初の適用対象が家電製品の中で形状的に最も難しいと言われるクリーナ (電気掃除機) だったので、その後は比較的スムーズに適用範囲を拡大することができた。昭和 55 年からはフィレット (曲面交差部を円弧でつなぐ曲面) 自動創成機能などの開発も行い、より簡便なシステムを目指して現在に至っている。今回の報告では、金型設計・生産において重要な役割を果す形状創成機能と NC 加工処理機能を中心とした技術について説明する。

2. 金型形状部の設計

デザイン部門が担当する製品形状部と型設計部門が担当する型構造部分では、システムに要求される機能が異なるので、これを分けて説明する。

2.1 製品形状部の設計

この部分の形状的な特徴は、曲面形状が多く使われるという点である。一見、箱のように見える TV キャビネットなども、完全な平面はへこんで見えるため、実際には湾曲した面を使うことが多い。したがってこういった部分を対象とする図形処理システムには、自由曲面を扱う機能が必須である。ところで自由曲面を処理する上で、何が問題となるであろうか。この点について特に注意を払ってきた点をいくつか述べる。

① 自由曲面の入力

自由曲面の入力法は模型を測定する方法が一般的で

† CAD/CAM for Die Design and Production by Hirofumi JOHNISHI, Sumio KIKUCHI, Akio YAJIMA (Central Research Laboratory, Hitachi Ltd), Junji TSUDA (System Development Laboratory, Hitachi Ltd), Norio OSADA (Consumer Product Research Center, Hitachi Ltd).

†† (株)日立製作所中央研究所

††† (株)日立製作所システム開発研究所

†††† (株)日立製作所家電研究所

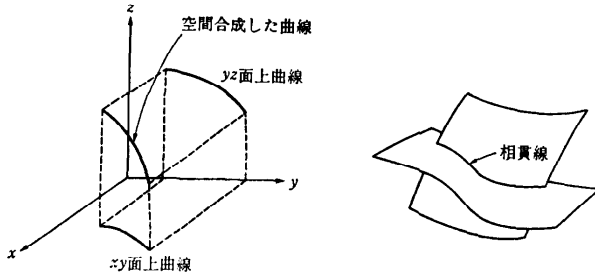


図-1 空間曲線の定義方法

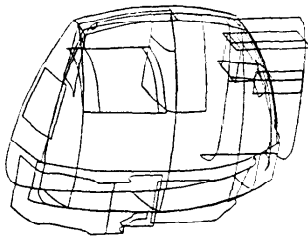


図-2 クリーナの曲線モデル

あり、Coons や Bézier の曲面補間法^{1),2)}もこの方法に依拠したものである。しかし家電製品のように開発サイクルの短いものについては、模型を作る手間をかけていたのでは、CAD の効果がなくなってしまう。したがって、模型に比べて情報量の少ないスケッチ図、デザイン図から直ちに入力できる必要がある。これを実現するためには、少ない曲線から広い曲面を創成でき、かつデザイナーの意図に応じて自由に曲面イメージを変えられるような曲面補間法が必要である。

④ 演算の信頼性

モデリングの過程では、交点計算や相貫線計算などが頻繁に使われる。これらの計算では非線型連立方程式を解く必要があり、不安定な収束計算に頼らざるを得ない。したがって信頼性を確保するため、初期値の設定法などについては細心の注意を払わなければならない。

⑤ 幾何モデルの精度

プリミティブのような単純形状だけを扱うシステムにおいては、精度保証は容易である。しかし自由曲面を扱うシステムでは、自由曲面間の相貫線を求め、それをもとに再度面を張るといったことが頻繁に行われるため、精度保証は必ずしも容易ではない。一方 CAM に結合するためには、かなりの精度が必

要である。特に輪郭線や曲面接続部などの部分では大切である。これについては、例えばプラスチック射出成型用金型の場合、次のような基準を設定している。実際の加工では、カッタのたわみ、摩耗などに対して適切な補正を施せば、 $\pm 10 \mu$ 程度の精度を確保できることがわかっている。したがって幾何モデルの精度は、一桁下の $\pm 1 \mu$ 程度を目標とする。

以上、自由曲面を扱う際に注意しなければならない点を述べた。つぎに形状を定義してゆくプロセスについて説明する。手順は原則として点から曲線、曲線から曲面、曲面から立体というように進むから、この順に説明する(点の定義は省略)。

(1) 曲線モデルの定義

立体の骨格となる特徴線をスケッチ図、デザイン図からひろって定義する。MDM で扱える曲線は直線、折線、円、円弧、楕円弧、スプライン、三角関数曲線などである。定義の方法は、平面曲線の場合には通常の製図システムと同様で、単に深さ(高さ)を余分に指示するだけのことである。空間曲線については、平行でない二平面上で定義した曲線を空間的に合成したり、また二曲面の相貫線を求める方法が良く使われる(図-1)。図-2 はこのようにして作ったクリーナの曲線モデルである。

(2) 曲面モデルの定義

製品イメージを決定する主要面は、曲線モデルをもとに定義する。Coons の方法なども使われるが、最も有効な方法は、導線 (Guide Line; GL と略す) に沿って特徴線 (Character Line; CL と略す) を変形移動させて補間する方法である。図-3 は補間の典型的なタイプ、すなわち CL の変形移動法の典型的なタイプを示したものである。GL がもっと複雑な場合には、これらの変形移動法をいくつか組み合わせて使う。この方法のメリットは、変形移動法の種類を増せば種々のタイプの面が扱えるようになること、デザイン意図が明確な面は広範囲を一気に補間できることなどである。但し、一般には隣接面との滑らかさが保証されないので注意が必要である(図-4)。滑らかにするためには、エッジができた部分に沿って共通接平面を定義し、両側の曲面を拘束する方法が有効である。この際拘束方法は、エッジの近傍にのみ作用するローカルなものは曲面イメージを壊す結果になるから、曲面全体に平均的に作用するものを考えなければならない

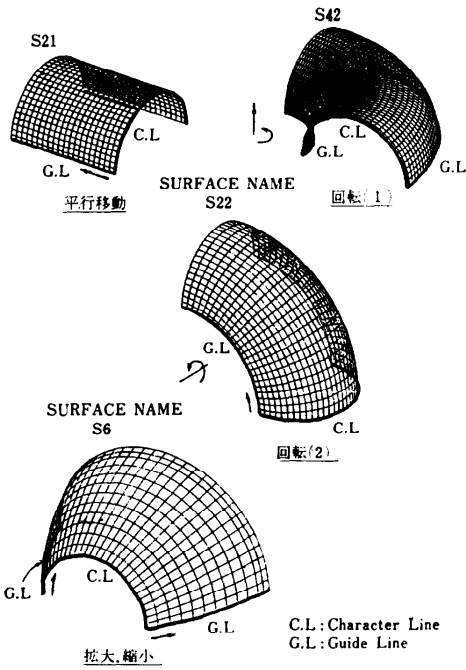


図-3 補間のタイプ

G.L.に沿って C.L.を変形移動させて曲面を創成する

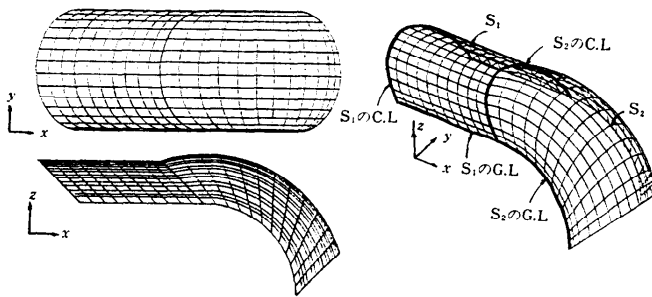
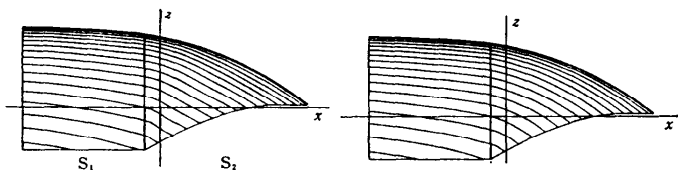


図-4 隣りの面と滑らかにならない例



(a) ローカルな拘束方法
; 曲面にうねりが発生する

(b) 曲面全体に平均的に作用する
拘束方法

図-5 二曲面を滑らかに接続する処理 (実製品の一部, 断面図)

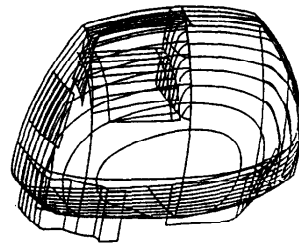


図-6 クリーナの曲面モデル (断面表示)

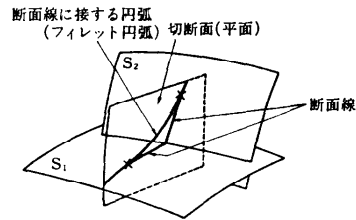


図-7 フィレット曲面の創成方式

二曲面を平面で切った断面線に接する円弧を求め、これを並べてフィレットとする。

(図-5). 図-6 はこのような方法で創成したクリーナの曲面モデルを断面で表示したものである。

以上の方法は、曲線モデルに面を張りつける方法であるが、この他に曲面から直接、新しい曲面を創成するような方法もある。例えば二曲面を何となく滑らかに接続するというような曲面である。この中で頻繁に使われ、かつデザインイメージが明確なフィレット曲面の創成法について簡単に説明する。処理方式は図-7に示すように、二曲面を平面で切ったときの断面線を計算し、これに接する円弧を求めて順次並べてゆく方法である(詳細は参考文献3)参照)。処理上、特に気をつけなければならない点は、次の二点である。

- 原曲面とフィレット曲面間に段差が生じてはならない。
- 原曲面とフィレットが接触する曲線がうねってはならない。

この点を満足するためには、原曲面が平滑であることは当然として、さらに十分な計算精度を保証することが必要となる。MDMでは、断面

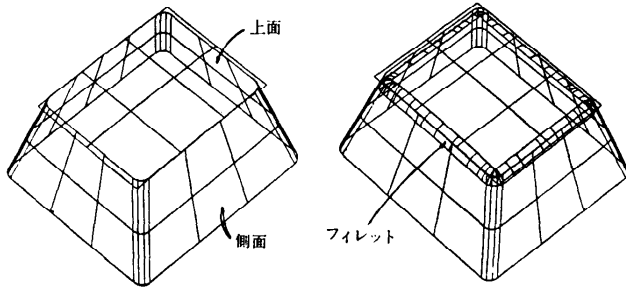


図-8 フィレット曲面
TV キャビネットの一部（側面，上面）に一定Rのフィレットを創成した。可変Rのフィレットも可能である。

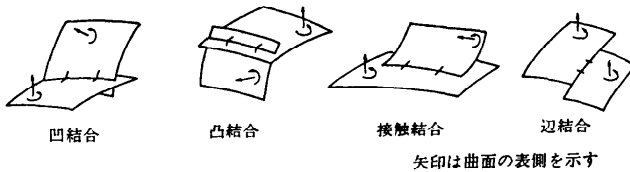


図-9 結合のタイプ

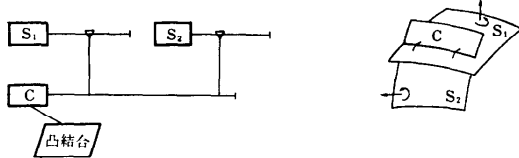


図-10 結合関係の記憶方式

線などの誤差（節点だけではなく任意の点でもすべて $\pm 1\mu$ 以下に抑えることで，上記の問題を解決した。図-8にフィレット曲面の実例を示す。

(3) 立体モデルの定義

(2)で述べた曲面モデルをCAMのデータとして渡してもよいが，より効率のよい処理を行うためには，曲面間の結合情報が幾何モデルに表現されていることが必要である。結合情報とは，二曲面がどの曲線を介して結合しているかという情報と，結合のタイプ(図-9)に関する情報から構成される。計算機内部における記憶方式は，一般に境界表現法 (Boundary representation)⁴⁾と呼ばれている方法と同様である。すなわち図-10のように，二曲面からその共有曲線に双方向ポインタを張った形式で表わす。したがってこの関係をたどれば，複数の曲面で構成した立体の表面をグローバルに把握することができる。例えば全体として閉曲面になっているか否かということも容易に判定できる。

以上 MDM の形状定義機能について述べてきた。現状のレベルは，自由曲面を含むいわゆる立体モデルを構成できる段階にある。

2.2 金型構造部の設計

製品形状部が決定されれば，次は金型構造部の設計（型設計と呼ばれる）が行われる。図-11に型設計の工程と主な業務内容を示す。製品形状部を除けば，形状的には比較的単純なものが多い。このため現状は製図を目的とした二次元図形処理システムが主に使われている。しかし最近急速に型設計部門にも三次元図形処理システムを導入しようという動きが高まりつつある。この理由としては，第1に意匠設計・型加工の部門でかなりCAD/CAMの技術が蓄積されつつあること，第2に二次元システムでは干渉チェックなども十分に行えないといったことが挙げられる。この部門で使われるシステム形態は，図形処理システムに有限要素法解析などの技術計算シミュレータを結合したものになり，適用業務としては次のものがある。

(1) レイアウト設計

- ・ 立体形状の分割・切断機能による型分割方式の検討。
- ・ 断面計算，干渉チェック機能による部品の配置設計，可動チェック，冷却パイプの位置決定など。

(2) 強度解析

金型の強度計算による最適設計。

(3) 熱伝導解析

射出成形時の熱伝導計算による金型冷却構造の

工 程	業 務 内 容
製品図検討組立図作成	型方式の決定
	型構造の決定
	冷却方式の決定
	組立図設計
キャビティ・コア設計	キャビティ・コア分割
	ゲート・ランナ設計
	冷却部設計
	機構部設計
ダイセット部設計	プレート，機構部品設計・製図

図-11 型設計工程と主な業務内容

決定。

(4) 流動解析

射出成形時の樹脂の凝固過程を含めた流動計算によるゲート、ランナ設計。

3. 金型の NC 加工

加工に必要な NC テープは、計算機内部に記憶されている形状モデルに加工条件（カッタ径、送り速度、加工精度、使用制御装置など）をつけ加え、計算機によって自動的に生成する。加工方法は大きく、曲面を加工する、曲面の交わり（稜線）を加工する、輪郭を加工する、の三種に分けることができる。いずれも重要な問題は、カッタ干渉をいかに回避するかということである。以下、三種類の加工法について説明する。

3.1 曲面加工

曲面加工の場合、カッタ干渉は図-12に示すように、凹エッジの部分やカッタ径より小さな凹 R 部で発生する。この現象を回避するためには、ごく単純な形状（平面、円筒など）の場合を除いては、膨大な計算量が必要である。したがって計算機による自動的、半自動的な処理に頼るのが普通である。処理の説明に入る前にまず断っておかなければならないことは、すべての干渉の問題が十分な精度（ 1μ 程度）と実用的な処理時間で解けるわけではない点である。すなわち図-12(b)のようばケースは、カッタの Z 値（高さ）を比較する方法、らいしかないし、また図-13(b)のカッタを使う場合には、曲面との多点接触の問題になるため解決は極めて困難である。したがって本報告では、確実に精度よく解けるケースに限って説明することにする。すなわちカッタはボールエンドミル、干渉のタイプは図-12(a)と仮定する。

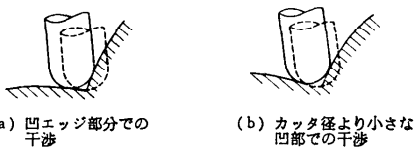


図-12 カッタ干渉の例、点線の位置までカッタを動かすと干渉を起す

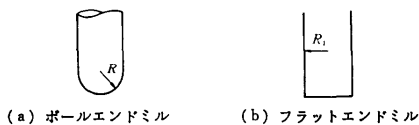


図-13 カッタの形状

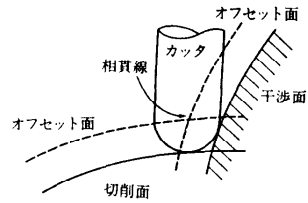


図-14 カッタ干渉回避処理

(1) 曲面モデルに基づく加工処理

まず曲面間に接続関係のない曲面モデルに基づいた処理方式について述べる。曲面内部にエッジがあれば曲面を分割して考えればよいから、カッタ干渉の問題は滑らかな曲面が凹で交わる場合のみを考えればよい。削る曲面を切削面、これと凹で交わる曲面を干渉面と呼ぶことにする。最初に最も単純な干渉面が一個の場合を考える。削る側は干渉面の表側と仮定すれば、次の手順で処理することができる（図-14）。

- i) 切削面、干渉面ともカッタ径分だけオフセットする。
- ii) オフセット曲面間の相貫線⁵⁾を求める。
- iii) 相貫線のどちら側が切削可能域かを定める。
- iv) 切削面全域をおおうカッタパスを発生させ、これを ii) の相貫線で切断し、切削可能域にある部分のみを選ぶ。
- v) iv) の結果に基づきカッタローケーションデータを作る。

以上が干渉面一個の場合の処理である。つぎに干渉面が複数個存在する場合を考える。この場合、図-15に示すように切削可能域が一意に定まらないケースがある。したがって干渉面の表側の和領域を削るのか、積領域を削るのかという指示が必要である。このため次のような集合演算式を入力して指示をする。

- ・ 図-15(a)の場合； $S_1 \text{ AND } S_2$
- ・ 図-15(b)の場合； $S_1 \text{ OR } S_2$

もっと複雑な場合には、図-16のように指示する。そしてこの演算式を満たすように切削区間を選ぶ処理を前述の iv) で行えばよい。以上が処理方法の概要で

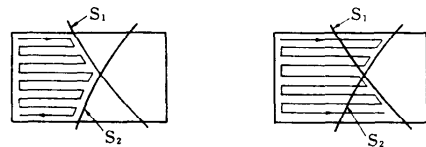


図-15 切削可能域が一番に定まらない例

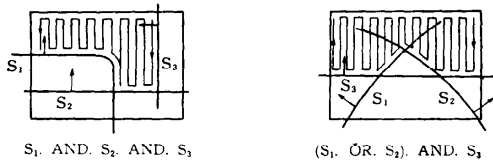


図-16 複雑な集合演算式

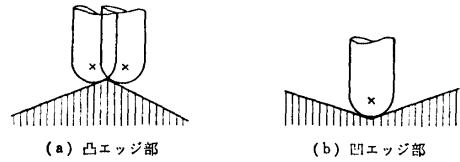


図-19 稜線加工

ある。この方法によって、干渉が発生する一歩手前(誤差 $\pm 1\mu$ 以下)までカッタをコントロールすることが可能である。

(2) 立体モデルに基づく加工

雌型や複雑に凹凸のある形状においては、干渉面が多数存在することが多いので、(1)で説明した集合演算式を入力するのは厄介である。そこで曲面間の結合関係が定義された立体モデルをもとに加工する。立体モデルには曲面間の結合状態(凸結合、凹結合、滑らかな結合など)が記述されているから、前述の集合演算式を指示する必要はない。さらに共有曲線や頂点のデータを参照すれば、オフセット時に凸稜線、凸頂点に対して円筒状面、球面を生成できるから、より完全な干渉処理が可能になる(図-17)。図-18は実際に立体モデルに基づいて加工した例である。この例ではフ

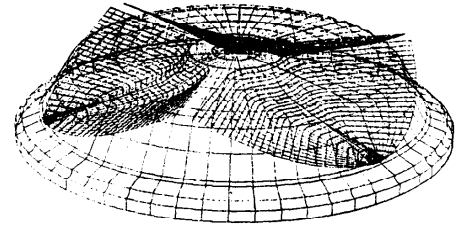


図-20 電気洗濯機のパルセータ(透視図)

ィレット曲面と他の曲面が接触状態にあるという情報と共有曲線(接触線)データをもとに、フィレットに対する干渉を回避している。

3.2 稜線加工

稜線加工とは、曲面のエッジ部分に沿った加工である(図-19)。本来フラットエンドミルで加工するのがよいわけであるが、カッタ干渉の問題が難しいので、現在は小さな径のボールエンドミルで加工している。処理方式は、図-19から明らかなように、凸エッジの場合には曲面の境界に沿って、また凹エッジの場合には二曲面の相貫線に沿って削ればよい。他の曲面との干渉を避ける方法は、3.1の場合と全く同様である。

3.3 輪郭加工

輪郭加工は二次元的な加工であるため、カッタ干渉などの問題も比較的簡単に解決できる。处理的には、輪郭線をカッタ径分だけオフセットし、自分自身と交わる交点を求めて、干渉の発生する部分を切り捨てればよい。これらの処理には、CPU時間、メモリともさほど必要としないので、小型計算機によるNCテープ自動作成装置が広く使われている。我々のところでも、従来、二次元加工には上記のもの、三次元加工にはMDMというふうに使われてきた。ただし、三次元形状モデルを計算機内部に作り出すものについては、直接NCテープを出力した方が効率が良い。このため、MDMでも輪郭加工など二次元的加工機能をサポートしている。したがってユーザは、対象形状に応じて両者を使い分けられる。

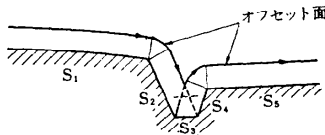


図-17 立体モデルによる干渉処理

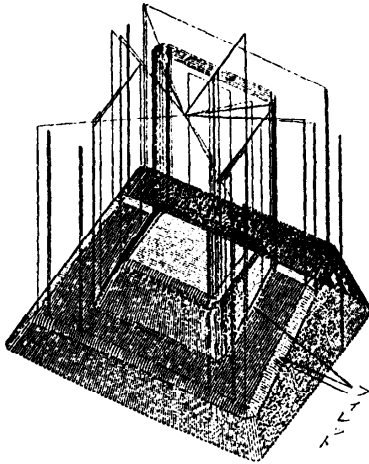


図-18 フィレットに対する干渉回避

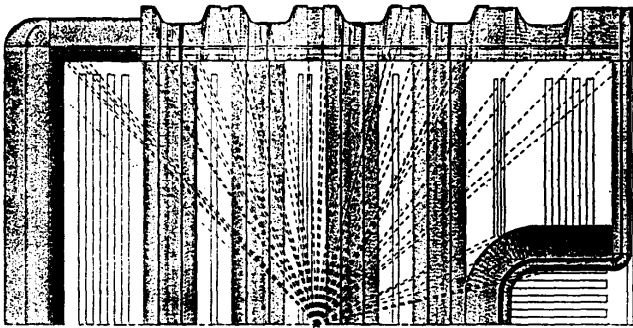


図-21 冷蔵庫内箱のカッタ軌跡

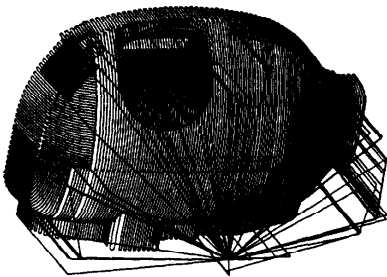


図-22 クリーナのカッタ軌跡

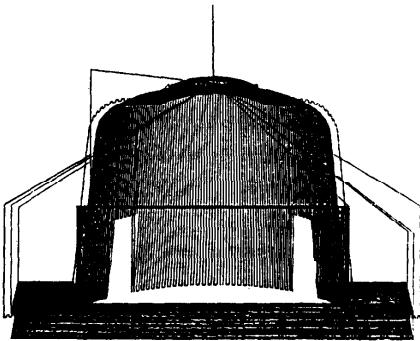


図-23 鋳物部品のカッタ軌跡

4. 具体例

MDM の適用例を 図-20～図-25 に示す。いずれも昭和50年以降実施したものである。図-20～図-23は、グラフィックディスプレイ、またはXYプロッタへの出力図、図-24、図-25は、MDMで作成したNCテープによって実際に加工を行っている写真である。

5. 結 言

以上、CAD/CAMの実施例として当社のMDMシ

ステムを紹介してきた。このシステムは、昭和51年頃から実製品を対象に稼動しており、現在では完全に道具として使われるところまで成長している。この種のシステムについて、現在、一般的に言えることは、

① 自由曲面も含めて、形状入力を能率よく実行できなければならない。

② 細部形状まで精度よくモデル化できる機能が必要である。

③ 十分な効果を得るためには、モデリング機能、表示機能以外に、NC加工処理機能、技術計算シミュレーション機能が必要である。

といった点である。また今後は、計算機の性能向上に応じて、カラー・陰影表示、立体演算機能なども実用可能な状況になるので、一層広範囲にCAD/CAMシ

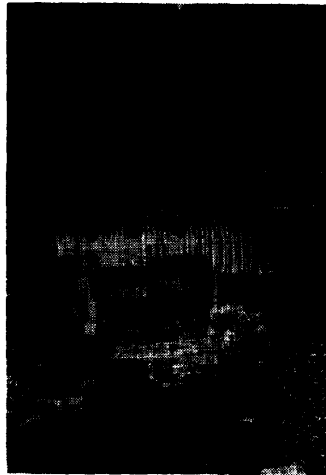


図-24 クリーナを加工しているところ

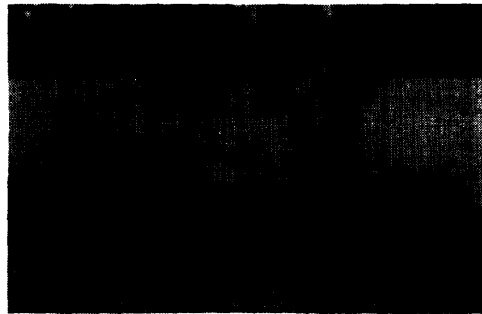


図-25 TVキャビネットを加工しているところ

システムが適用されてゆくものと思われる。

最後に、MDMを開発する上でご討論、ご協力いただいた日立中央研究所の堀越部長、高橋主任研究員をはじめ、本社の仲田陸男氏、生産技術研究所の毛利峻治氏、多賀工場の林正志氏、横浜工場の北島昭生氏に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Coons, S.A.: Surface for Computer-Aided Design of Space Form, MIT Project MAC

TR-41 (1967).

- 2) Bezier, P.E.: Numerical Control-Mathematics and Applications, John Wiley and Sons, London, (1972).
- 3) 津田他3名: 三次元図形処理システム MDM-I の開発, 情報処理学会, コンピュータグラフィックス研究会資料5 (1982).
- 4) 沖野教郎: 自動設計の方法論, 養賢堂 (1982).
- 5) 上西, 津田: 曲面間相貫曲線の高速計算法, 電子通信学会, pp. 5-315 (1981).

(昭和57年10月12日受付)