

3次元図形処理システムM&M-Iの開発

津田 順司

上西 博文

菊池 純男

(日立システム開発研究所)

(日立中央研究所)

(同左)

I. 序

近年、計算機を用いた3次元CAD/CAMシステムの開発が盛んに行われている。これらのシステムの狙いは、デザインあるいは設計から型加工までのデータを一元化することにより、主として製品開発プロセスの短縮、デザインの質的向上、加工精度の向上を図ることにある。扱う形状は機械部品などの単純形状から一般家電製品や自動車のボディなどの主に外形状が自由曲面から構成される意匠形状まで広範囲に及ぶのが一般的である。しかしながら、数多くのシステムのうちでも自由曲面を扱うものは以外に少なく、またほとんどのシステムが実用レベルでCAMと結びついていないのが実情である。

筆者らは、昭和46年ごろから自由曲面をも扱う対象とする、汎用3次元図形処理システムM&M-I (Modeling System for Design and Manufacturing) の開発に着手した。本システムは計算機内部に対象形状の正確な3次元幾何モデルを構築することにより、これをもとにした各種設計支援、アプリケーションを目的としている。社内においては、すでに各種のモールド金型の作成に適用され効果をあげている。

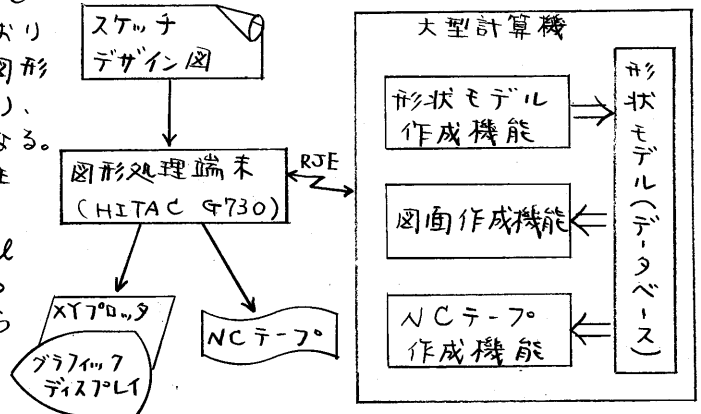
本論文では、M&M-Iのシステム構成、主要機能および各機能と実現する上での処理マルゴリズムについて報告する。

II. システム構成

図1に本システムの構成を示す。

主要機能は大型計算機(HITAC Mシリーズ)上で実現されており、単独でも使用可能であるが、図形処理端末と接続することにより、より応答性の良いシステムとなる。

本システムが実現している主要機能は形状モデル作成機能、図面作成機能、NC (Numerical Control) テーフ作成機能の3つに大別できる。以下、これらの機能の概要について述べる。



(1) 形状モデル作成機能

対象形状を計算機に入力し、計算機内部に対象形状の正確な3次元幾何モデルを作成する。

形状入力のもととなるものとしては、デザイナーや設計者が作成したスケッチ、デザイン図から設計図面などの図面情報を用いている。また、寸法が明確であればラフスケッチでも十分である。入力手段は形状定義機能が率良くできるように本シ

RJE : Remote Job Entry

(図1. システム構成)

システム専用に開発した形状記述言語を用いており、クレイ(粘土)モデルなどの物理的なモデルと一切使わない点に特徴がある。

主な形状記述、定義機能をあげる。

- ・曲線の記述と定義(解析曲線、自由曲線、相貫曲線およびこれらの結合曲線)
- ・周囲曲線と補面タイプの指定による曲面の記述と定義
- ・形状記述と容易にできるための補助機能(補助点、補助線、座標系の宣言、座標変換など)
- ・形状操作機能(移動、回転、コピー、ミラーなど)
- ・形状定義手続きのマクロ定義機能
- ・パラメトリック処理機能

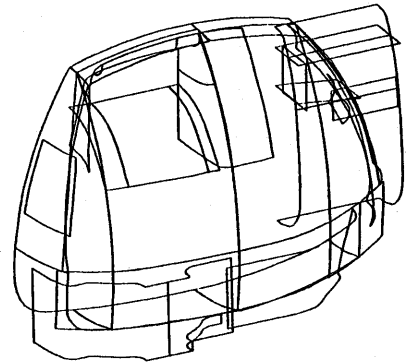
などである。3次元形状を定義する場合、形状記述言語を用いて各種図面上に描かれている特徴線を入力する。表面形状を決定するには、入力された特徴線で4周を囲まれた領域に対し4周囲曲線と補面のタイプの指定をすることにより面を補面創成する。本システムでは、いくつかの典型的な補面タイプを用意しており、形状に応じてこれらと任意に選択することにより意図する形状が自由に創成可能である。ここで用いている補面法は、入力する特徴線ができるだけ少なくすむように大面積を補面でき、また隣接面と滑らかに接続させたい場合は指定によりこれを保証することができるもので独自に開発したものである。

さらに、2曲面間を滑らかに接続するためのフィレット曲面も簡単な指定だけで、半径が一定または可変のフィレットを自動的に創成する機能も備えている。

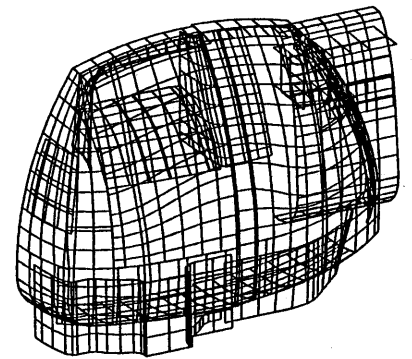
(2) 図面作成機能

計算機内部に作成された、3次元形状モデルを2次元図形に変換する機能を透視図、三面図、断面図の出力が可能である。出力装置としては分散型図形処理システム HITAC G730、あるいはXYプロッタを用いている。三面図は自動製図に、透視図、断面図は主に形状チェックに利用している。

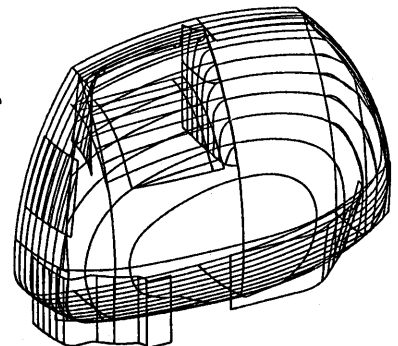
図2は電気掃除機(クリーナ)の曲線モデルを、図3はこの曲線モデルに面を張り、曲面をメッシュで表現した面モデルを、ヒモに透視図として表示した例である。また、図4はクリーナの連続断面図の出力例である。



(図2. クリーナの曲線モデル)

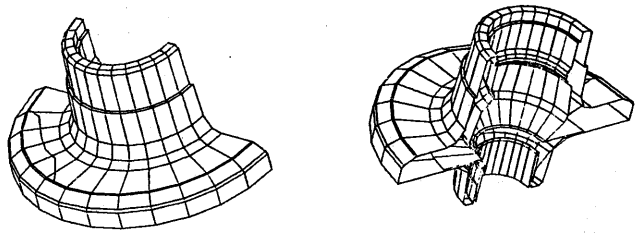


(図3. クリーナの面モデル)



(図4. クリーナの断面図)

また、図5は鋳造部品の面モデルをメッシュ表現し、陰線消去を施した例である。



(図5. 鋳造部品の面モデル(陰線消去))

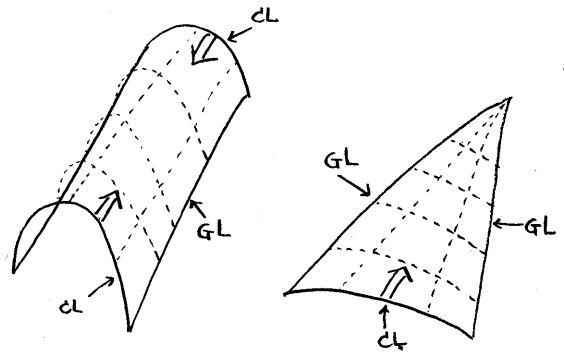
(3) NCテーパー自動作成機能

本機能は計算機内部モデルとシミュレートすることにより確認用モデル、放電加工用電極、成形用金型などをNC工作機械で加工するためのNCテーパーを自動的に作成する機能である。NC機械が加工する場合、NC機のカットが切削面以外の他の面を削り込んでしまう、カット干渉が最大の問題となる。そのためカットが他の面を壊さないようにカットの動きをコントロールする必要がある。しかし、自由曲面形状が複雑に組み合わされている場合には非常に煩わしい計算が必要になる。本システムでは独自の干渉処理アルゴリズムを開発し、この問題を解決した。その結果、ユーザーは対象形状の計算機内部モデルの他に、加工条件としてカット送り速度、カット径、切削精度などの簡単な指定をするだけでNCテーパーを自動的に作成できる。

以上が本システムの概要である。以下、とくに技術的に重要なポイントと占める曲面創成法、フィレット曲面創成法、自動カット干渉処理方式について詳細に報告する。

III. 曲面創成法

MBM-Iにおける形状入力法は、模型を測定するのではなく、図面、スケッチに描かれた特徴線を入力し、これをもとに曲面を自動創成する方法が基本となっている。この方法の難しい点は、図面の形状情報が模型などに比べてはるかに少ないため、大面積な曲率変化の激しい曲面を補面創成できる技術が必要とするためである。すなわち、一般に行なわれている双二次式による方法では不十分である。そこで筆者らは、図6に示すように導線(Guide Line、以下GLと略す。)に沿って特徴線(Character Line、以下CLと略す。)を動かして曲面を創り出す方法を発展させてきた。基本的な形状は、図6に示すように四辺形状もしくは三辺形状である。多辺形状も考え得るが、これは曲面の切断(部分化)の問題であると考えられるし、また基本形状を増やすと相貫処理アルゴリズムなどが組み合わせの数だけ必要になるという欠点があるため採用していない。

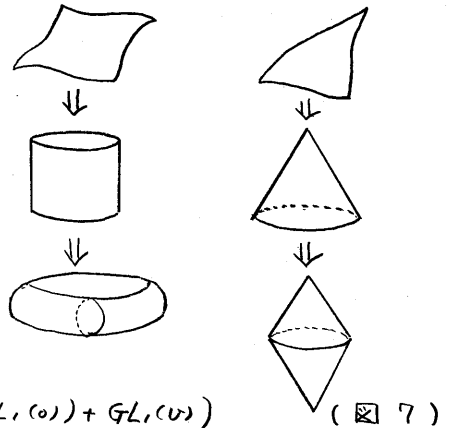


(図6. 基本形状)

この2種だけでも図7に示すように様々な形状が存在するので一般の工業製品を表現するには十分である。

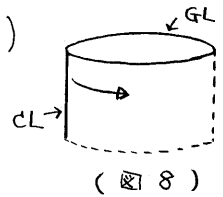
また、より単純な形状、例えば円筒面などはGL, CL各一本で創成することも可能である。(図8参照) 但し、これは汎用的なものではないので、以下GL, CL各二本として考えることにする。

MCM-Iの曲面補足の基本式は次式のように単純な形式を採用している。(図9参照)

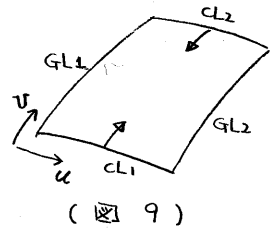


$$S(u, v) = (1 - \varphi(v)) (A_1(v)(CL_1(u) - CL_1(0)) + GL_1(v)) + \varphi(v) (A_2(v)(CL_2(u) - CL_2(0)) + GL_2(v))$$

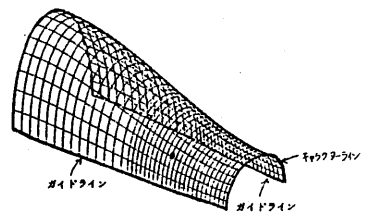
ここで、 A_1, A_2 は u -independent な 3×3 マトリクス
 S, CL_i, GL_i はいずれもベクトル値関数
 $\varphi(v)$ はブレンド関数



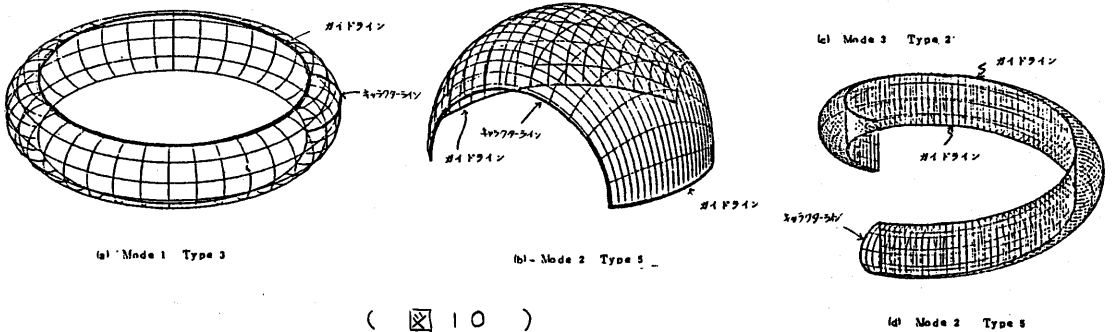
この式の特徴は、 CL_i に作用する変形操作が u -independent な線型変換のみであるため、 CL_1, CL_2 の形が保存されることにある。すなわち、曲面内部にうねりが生じることはあり得ないという有利な性質をもっている。 $A_1(u), A_2(u)$ としては、隣接面との滑らかさを考慮しない単独面の場合には次のものを基本としている。



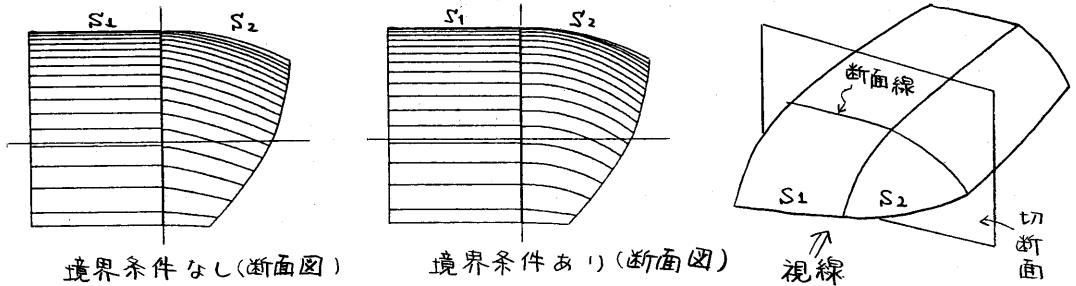
- ① GL_1, GL_2 の対応点を結ぶベクトルの回転に伴う回転マトリクス
- ② 同上のベクトル長に伴う相似変換
- ③ GL_1, GL_2 の接ベクトル回転に伴う回転マトリクス



このようにして得た例を図10に示す。



(図 10)



(図 11)

さらに隣接面との滑らかさを保証する場合には、 GL_1 、 GL_2 上に接平面の境界条件を与え、これを満足させるように $A_1(u)$ 、 $A_2(v)$ を決定する。(図 11 参照) 重要な点は、このような境界条件を与えても $A_1(u)$ 、 $A_2(v)$ は線型変換で十分だという点である。すなわち、 CL_1 、 CL_2 の形が保証される点が必要である。以上、MIM-I の曲面補間法について述べた。

IV. フィレット曲面創成法

2 曲面間と滑らかに接続するためのフィレット曲面はデザイン上、安全対策上、製品加工上要求される形状で、一般家電製品や自動車のボディなどの意匠形状には必ず含まれる。フィレットは、フィレットとこれを付加する曲面(以下、原曲面と呼ぶ)との間に段差ができないこと、および接触部がうねらないことが重要である。ところが、自由曲面形状に対してフィレットを付加する場合、これらの点を保証するためには信頼性の高い、高精度の数値計算技術が要求されるため図形処理分野における難題の一つに考えられている。

筆者らは、フィレット曲面を高速かつ高精度に計算するアルゴリズムを考案し、フィレット曲面創成機能を開発し実用化した。本システムで用いている方式は断面形状接続方式すなわち、2 原曲面間に指定半径をもつ円板ゲージをあてた時にできる、ゲージの円弧をフィレット曲面の断面形状と考え、これを順次接続することによりフィレット曲面を創成する方式である。

以下、処理アルゴリズムを順を追って示す。

(1) 原曲面間の相貫曲線計算

まず、フィレット曲面を付加する 2 原曲面間の相貫線を求める。一般に自由曲面形状の 2 曲面間の相貫線を求める技術は、3次元図形処理における最も基本的かつ重要な技術であり高精度に、しかも確実に高速に求めることが要求される。そこで、MIM-I で用いている相貫線計算アルゴリズムの概要を述べる。

STEP. 1 干渉チェックによる交線のマクロな検出

2 曲面をいくつか分割し、これを単純形状で覆い単純形状間の干渉チェックを行う。次に干渉のあった部分領域について細分化し、同様なことを繰り返す。これにより交線の存在領域を十分狭い範囲に限定していくことが出来る。分割曲面を覆う単純形状としては最初の被覆は球で、2 度目は降は平行六面体を用いる。

STEP. 2 交線の近似

STEP. 1 で互いに干渉のあった領域の組について、その各々を三角形

2個で近似し、その間の交線を折線を求める。いくつかの分割曲面について得られた折線について端点が一致するものを順次結合し、近似折線を作成する。

STEP. 3 Newton法による高精度検出

STEP. 2で得られた近似折線の節点と初期値とし、Newton法が精度が $10^{-4}mm$ 以下に達するまで収束演算を行う。この収束演算を各節点について行い、得られた点列データから接ベクトルを計算し曲線データを作成する。

(2) ファイレット切断面作成

円板ゲージに相当する、原曲面を指定方向に切断するような平面を作成する。切断面を作成する位置は、(1)で求めた相貫線上の点を曲率に応じてサンプリングし決定する。切断方向は、とくに指定がない場合には相貫線に垂直とする。

(3) 断面曲線計算

(2)で作成した切断面と原曲面との交線を計算する。処理アルゴリズムは(1)と同様な手法を用いている。

(4) ファイレット円弧端点計算

(3)で求めた断面曲線と切断面上で各々指定ファイレット半径だけオフセットし、このオフセット曲線の交点を計算する。この交点に対応するオフセット前の曲線上の点が、円板ゲージが原曲面と接するファイレット円弧の端点位置となる。

オフセット前、後の断面曲線の3次元ユークリッド空間表現を $C(t)$ 、 $C_m(t)$ 、 $C_f(t)$ の法線方向の単位ベクトルを $N(t)$ とするとオフセット式は

$$C_m(t) = C(t) + R_f \cdot N(t)$$

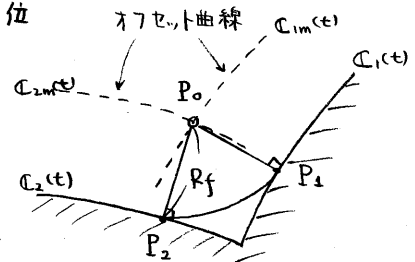
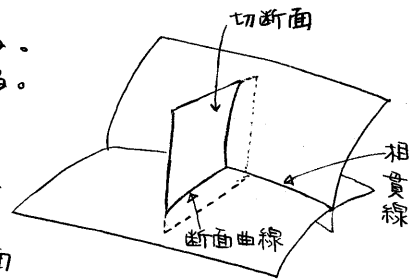
ここで R_f はファイレット半径である。この R_f をすべての切断面について一定にするか、あるいは可変にするかにより一定あるいは可変のファイレットが創成できる。(図12参照)

(5) ファイレット円弧曲線データ作成

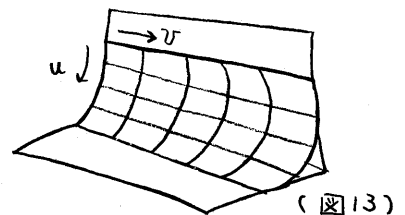
(4)で求めた、ファイレット円弧の中心 P_0 、端点 P_1 、 P_2 から円弧 $\widehat{P_1P_2}$ と曲線データで表現する。円弧上の点は P_0 を中心とし、半径 R_f で P_1 または P_2 とある角度だけ回転することにより容易に求められる。

(6) ファイレット曲面データ作成

(5)で求めたファイレット円弧曲線データを並列的に接続することにより曲面データを作成する。ファイレット円弧方向、すなわら u 方向は解析的に節点の位置座標、接ベクトルは決まる。円弧端点方向(v 方向)は対応する各円弧上の節点が点列として与えられているだけであるから、これらから各節点における接ベクトルを決定しなければならない。この場合にとくに問題となる



(図12)



(図13)

のはフィレットが原曲面と接触する部分である。この部分の U 方向接ベクトルの決め方により原曲面とフィレットとの間に段差が生じる。この結果、フィレット曲面をNC加工した場合に削り残しや原曲面への削り込み現象が生じることになる。そこで、この接ベクトルを次のように決める。

いま、円弧端点のうちで隣り合った3点を P_1, P_2, P_3 とする。この3点は原曲面上の点である。このとき、 P_2 における単位接ベクトルを次のように定める。

$$\text{単位ベクトル} : \quad \vec{t} = (N * K) * N \quad (*: \text{ベクトル積})$$

$$\text{ここで} \quad K = \frac{\vec{R}P_3}{|\vec{R}P_3|}, \quad N = \frac{\frac{\partial S}{\partial u_2} * \frac{\partial S}{\partial v_2}}{\left| \frac{\partial S}{\partial u_2} * \frac{\partial S}{\partial v_2} \right|}$$

(u_2, v_2)は点 P_2 の原曲面パラメータ表現

接ベクトルの大きさは、隣り合った2点間の距離で与える。

以上、述べた処理アルゴリズムを用いることにより2曲面の名称、フィレット半径、凹あるいは凸形状の区別などの簡単な指定をするだけで自動的に一定または可変のフィレット曲面を創成できる機能を実現した。

半径3cm、長さ10cmのフィレット曲面を創成する場合の性能は以下の通り。

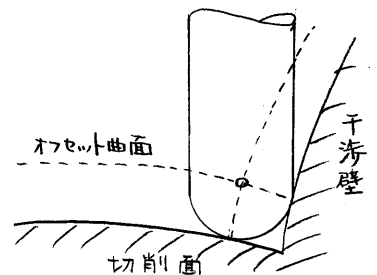
処理速度 (CPU 時間) : HITAC M200H で約20秒
 メモリ容量 : 約600Kバイト
 精度 : 原曲面とフィレットとの段差 10^{-3} mm 以下

V. 自動干渉処理方式

通常、3次元形状はいくつかの曲面が組み合わさって構成されている。従ってこのような形状をNC機械で加工する場合、カッタ干渉を回避する技術が必要不可欠となる。原理的にはNC機のカッタが切削面以外の他の面(干渉壁と呼ぶ)に接触したらカッタを停止させることにより解決できる。

MCM-I で用いている方式を以下述べる。(図14参照)
 いま、カッタを先端が球状とした、ボールエンドミルに限定して考えた場合、次の手順により解決できる。

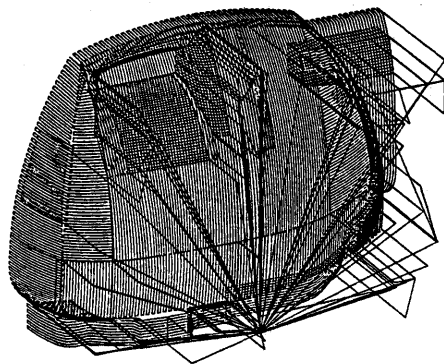
- (1) 切削面と干渉壁とをカッタ半径分だけ各々曲面の法線方向へオフセットし、オフセット曲面周の相貫線を求める。
- (2) オフセットした切削面上に指定された加工精度に応じたピッチ中でカッタ径路を作成する。このカッタ径路と(1)で求めた相貫線との交点を求める。この交点位置は、カッタが切削面以外の他の面と接触した時のカッタの中心位置である。



(図14)

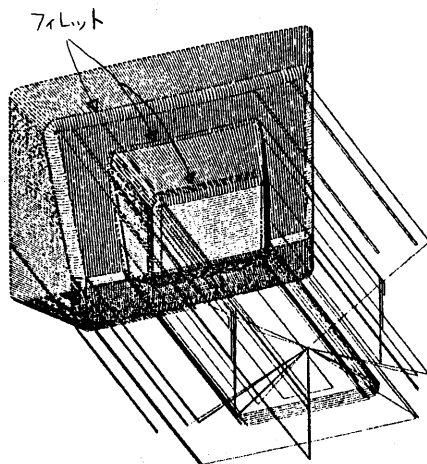
- (3) (2)で求めた交点によって分割された
 カッタ径路について、どの部分が切
 削区画であるかを判定し、カッタ軌
 跡を計算する。切削区画の判定は
 曲面の表裏を利用することにより容
 易に行える。

以上が、処理アルゴリズムの概略であるが、
 技術的なポイントは曲面の相貫線および曲
 線の交点をいかに高速かつ高精度に計算す
 るかという点にある。



電気掃除機のNCカッタパス軌跡

本システムのNCテープ自動作成機能に
 より電気掃除機およびテレビバックカバー
 (フィレット含む)の形状モデルをNC加
 エシミュレートした場合のカッタパス軌跡
 を図15に示す。作成したNCテープで
 正しく加工可能か否かは、このカッタパス
 軌跡をグラフィックディスプレイ上で様々
 な角度からみてチェックできるため試切削
 の必要はほとんどない。



テレビバックカバーのNCカッタ軌跡

(図15)

Ⅵ. 結言

デザインから設計、型加工までのデー
 タ一元化を狙いとした、CAD/CAM-貫シ
 ステムM&M-Iを開発し実用化した。
 本論文では、M&M-Iのシステム構成な
 らびに本システムを開発するにあたり技術
 的に重要なポイントを占めた、曲面創成法、
 フィレット曲面創成法、NC加工用のテー
 プを自動作成する際の自動カッタ干渉処理方式について報告した。

本システムの主な特徴をまとめると

- (1) 物理的モデルを一切使わず、図面情報のみを用いて直接計算機に形状を能率
 良く定義できる。
- (2) 単純な形状から複雑な自由曲面形状、そして一定または可変のフィレットま
 で扱える。
- (3) 計算機内部に定義した形状モデルをシミュレートし、NC加工用のNCテー
 プを自動的に作成できる。
- (4) 各種図面出力が可能である。
 をあげることができる。

M&M-Iは、社内では昭和51年ごろから電気掃除機、テレビキャビネット、
 電気洗濯機などの家電製品をはじめの各種のモールド金型に適用され、多大の効果を

とあげている。

[謝 辞]

最後に、MDM-I を研究開発し実用化する上で御討論、御協力頂いた、日立中央研究所の堀越部長、高橋主任研究員をはじめ、家電研究所の長田紀夫氏、本社の中田隆男氏、多賀工場の林正志氏、横浜工場の北島昭生氏に感謝致します。

[参考文献]

- (1) Yoshimura, S. and Tsuda, J. ; " A computer Animation Technique of 3-D objects with curved surfaces. " Proceedings of UAIIE, (1971)
- (2) 上西, 津田 ; " 型加工システムにおける干渉壁処理 ", 電気学会, p1703, (昭54)
- (3) Faux, I. D. and Pratt, M. J. ; " Computational Geometry for Design and Manufacturing ", Ellis Horwood, chichester, England (1979)
- (4) 上西, 津田 ; " 曲面間相貫曲線の高速計算法 ", 電子通信学会, 5-315, (昭56)