

# ロボット動作計画と形状モデル

## A Study on Robot Path Planning from a Solid Model

伊藤 祐二 (小野田セメント、理研研究生)  
相馬 嵩 広澤 正徳 (理研)

Y. Itoh\* M. Idesawa\*\* and T. Soma\*\*

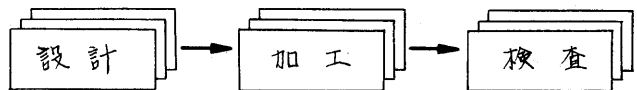
\* Research & Development Center, Onoda Cement CO., LTD.

1-7, 1-Chome, Toyosu, Koto-ku, Tokyo 135, Japan

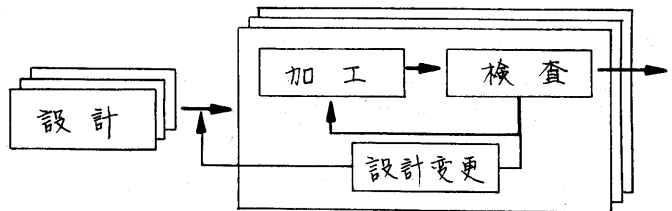
\*\* Information Science Laboratory, Riken: The Institute of Physical and Chemical Research

CAD/CAM technologies have been developed and begin to penetrate rapidly into industries. However, at present, there are many problems should be solved so that CAD/CAM technologies can play their proper roles in the total processes. As an effort to improve above circumstances, a trial system which aims a CAE and generates operation path of robot from a solid model built in CAD process, etc. has been examined.

1.はじめに 近年、設計業務を極力自動化し、また生産での工期短縮と省力化を狙ったCAD/CAM技術が次々と開発され、産業界への導入もさかんになってきた。しかし現状では、設計図面作成・管理のためのCAD、そしてNCデータ作成のためのCAMが主体であり、CADからCAMの一貫した情報の流れをとらえたシステムとしては、まだ十分な役割を演じていない。このような情勢の中で、真に設計から製造・加工・検査までを統合する概念としてCAE(Computer Aided Engineering)の考え方が、さかん<sup>1)</sup>に叫ばれるようになってきた。CAEの中ではエンジニアリングデータベースが中心となり、その中でも形状モデリングが重要な位置を示めている。形状モデリングでは、CADを中心として、ワイヤフレームモデル、サーフェスモデル、ソリッドモデルと順次開発、充実されてきている。しかし、CAM側でこれらのモデルを中心とした展開がなされているかという点、特殊用途を除くと一般化されているとはいえない。現状での検査を含む設計・加工での工程例では、図1(a)に示すような様式が一般的である。すなわち、設計工程・加工工程・検査工程がそれぞれ独立して存在し、各工程がバッチで実行される。この様式には、二つの問題点が含まれている。一つは、加工に不具合が生じた場合、検査工程でそれが発見された時点では、大量の不良品が発生して



(a) 現在の一般的 CAD/CAM



(b) 今後予想される CAD/CAM

図1. 検査を含む設計・加工工程例

しまっていること、二つ目の問題として、今後はますます多品種少量生産が進んだ時、バッチ方式のメリットがなくなることである。そこで今後は、図1(b)に示すような生産物の一つ一つに対して、設計変更まで含むようなダイナミックな生産方式に変わってくると思われる。

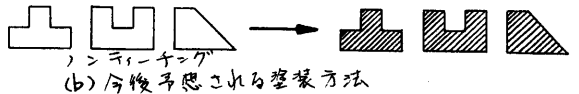
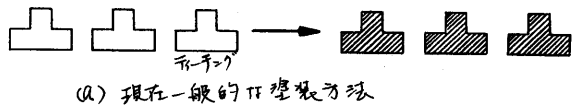


図2. ロボットを使った塗装例

また、現状でのロボットを使った塗装例では、図2(a)に示すようなティーチング作業を含んだある程度の中量生産が主体であるが、将来は図2(b)に示すようなノンティーチングでの多品種少量生産が主体になるとと思われる。

今取りあげたような例は、今後のCAMにおいて、形状モデリングの果たす役割は小さくないことを予想させる。CAEが狙う統合CAD/CAMでの自動化を一気に実現するには、解決すべき問題が多くて今の段階では不可能であるが、将来の布石として、その実現に一步一步近づくことが重要であると思われる。またそのための形状モデリングの果たす役割も徐々に増えてくると思われる。このような観点から、形状モデル及びCAMでの形状モデルより自動生成するロボット動作計画についての考察を行なった。

## 2. 形状モデルでの要件

現在、CADを中心にさかんに開発されているワイヤフレームモデル、サーフェスモデル、ソリッドモデルは、いずれも形状モデルである。形状モデルは、CADの中で重要な位置を占めているが、CAEの立場から見ると各種解析の結果が形状であり、そして重要な事は、機能によるより重視される形状と、それ程重視しなくてよい形状に分けられることである。このことが加工・検査での形状の取扱いに差を生じさせる。一般に統合CAD/CAMシステムでのモデリングにおいては、形状モデルの他に構造モデルの重要性が叫ばれている<sup>2)</sup>。構造モデルは、部品単位に機能展開をしたモデルと思われるが、設計の概念や知識工学とも関連し、かなり奥が深いと思われる。ここでは、ロボットの動作計画を考える上で、最低限必要な構造モデル上の要因を形状モデル上に展開することを考察する。

ロボットの動作計画を考える上では、実体のあるソリッドモデルが必要である。先に報告した立体モデリングシステム<sup>3)</sup>は、図3に示すような基本立体、またその位置・姿勢をセットして基本立体同士、または基本立体とすでに作成された立体との演算(和・差・各種)を繰り返して、目的の立体を構成していくもので、一般

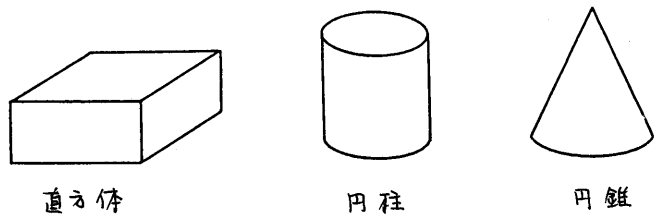


図3. 基本立体

にCSG (Constructive Solid Geometry)と呼ばれている。またこの場合、面分(構成面)の集合として表現する方法も採用して、これは一般に、B-REP (Boundary Representation)と呼ばれている。CSG情報は、きわめて正確な形状を表わしており、この情報を使えば、精度の良い加工・検査が可能であるが、面上の個々の点座標を求めようとすると、面の方程式より導いてくる必要がある。一方のB-REPの方は境界線ループで構成される面分の集合であるから、許容誤差内で面に関するループが形成されていれば、特に頂点等の検査は、頂点座標が境界線ループの構成要素であることから、そのままの頂点座標を使用できる。この両者の特徴を生かして、高精度全面加工・検査ではCSG情報を、また近似面での加工・検査で許されるものは、B-REP情報で対応することができる。一般

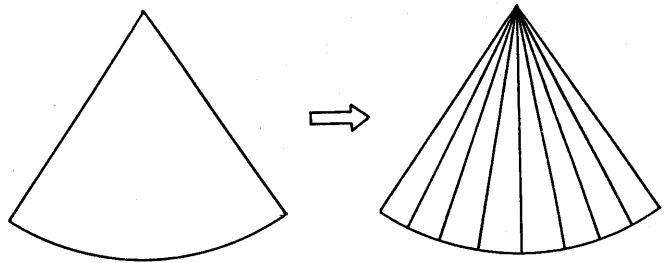


図4. 円錐でのCSGからB-REPへの変換

には後者の例が多いと思われるので、ここでは、後者の検討を行おう。B-REPの面は曲面については平面で近似することから、当然誤差を生じる。ここでは基本立体での円錐を取り上げる。CSGで定義された円錐は、図4に示すようにB-REP表現に変換するためには曲面をいくつかの平面に均等に数等分することになる。円錐の側面の近似された面の一つを図5(a)のように表示すると、BCの中点であるD点において最大の誤差が生ずる。そこで、D点における誤差を許容範囲に収めるために、側面を何等分するかを決めることにすれば、この円錐から形成された形状については、B-REPの表現のみで加工・検査を行うことができる。また面の機能の重要性に応じて、例えば図5(b)に示すように、側面の長さを一定にして、 $a_1 \cdot a_2 \cdot b_1 \cdot b_2$ を形成したり、図5(c)のようにある面積Sに

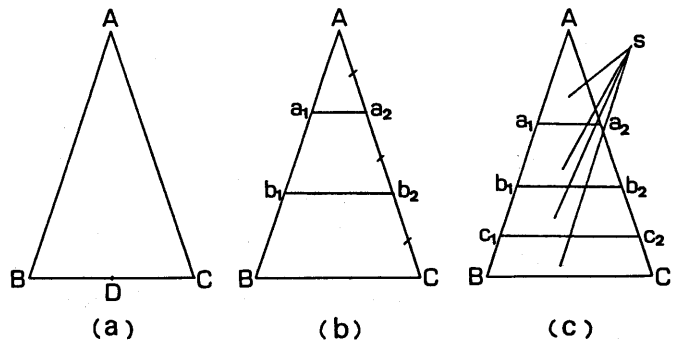


図5. 円錐での近似された側面の一つ

に合わせるようにABC内を分割して後に述べるインプロセスシステムに備えることができる。他の基本形状も同様の事が言える。このように誤差を押し分割することで、個々の面要素に対して加工・検査を行えば、小面積の加工に続いて即その部分の検査を行おういわゆるインプロセス方式による加工・検査が可能となる。そして加工中の不具合にもスピーディに対応できる。図5(b)および(c)での各面素の頂点のみを加工・検査のパラメタとすることで、全体としてもかなりスピーディなシステムの構成が可能となる。また通常は、機能的に重視される形状

は、ある基本形状の組み合わせで構成されているので、設計段階で基本形状毎に以上のような対応を施せば、重要な形状はきめの細かい加工・検査を行ない、そうでない所は割とラフな扱いをすることが可能になる。以上のことは、基本形状の表現を式(1)から式(2)へ拡張することで可能になる。

$$\nabla = \left[ \begin{array}{c} \left( \begin{array}{c} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{array} \right) \left( \begin{array}{c} S \\ R \\ C \end{array} \right) \left( \begin{array}{c} P_0 \\ \theta \\ \phi \end{array} \right) \end{array} \right] \quad (1) \quad \left[ \begin{array}{l} \text{但し } P_1, P_2, P_3 \text{ は大きさ, } S \text{ は形状} \\ C \text{ は立体の従属, } R \text{ は空か実か} \\ P_0 \text{ は立体の位置, } \theta, \phi \text{ は回転角} \end{array} \right]$$

$$\nabla = \left[ \begin{array}{c} \left( \begin{array}{c} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{array} \right) \left( \begin{array}{c} S \\ R \\ C \end{array} \right) \left( \begin{array}{c} Q_1 \\ Q_2 \\ O \end{array} \right) \left( \begin{array}{c} P_0 \\ \theta \\ \phi \end{array} \right) \end{array} \right] \quad (2) \quad \left[ \begin{array}{l} \text{但し } Q_1 \text{ は最大許容誤差} \\ Q_2 \text{ は面分割方式} \\ \text{他は式(1)に同じ} \end{array} \right]$$

また、B-REPで決まる面ループ毎の作業を考える時、その面ループ内でその形状の果たすべき機能が決まるのであれば、面ループ毎にその機能を定義しておくことで、形状検査に続いて機能検査を行なうことも可能である。形状モデルの構成は図6のように表わせる。

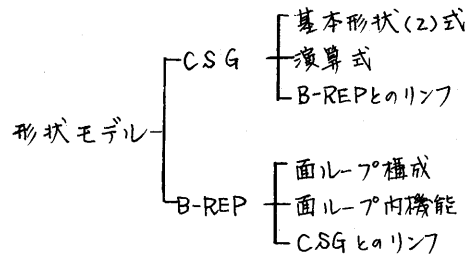


図6. 形状モデルの構成

### 3. インプロセスシステムでのロボット動作計画

と加工・検査が不即不難の関係になり、対象物の一フーフに対して設計変更も含むようなダイナミックな動きをするシステムをインプロセスシステムと定義すると、その概要は図7のように示される。最初に、(a)の段階では2.に述べた方法で対象物の形状モデルを作成する。次に(b)の段階に至る前に、対象物の認定およびその位置と姿勢を確定しておく必要がある。これは工程側で確定させるか、又は先に報告した立体モデルに基づくロボット教示で示した、ロボット側で環境モデルを利用して予備観測・大略軌計画によって対象物の認定およびその位置と姿勢を確定させる方法をとる。(b)の過程では、形状モデルの情報よりロボットの動作経路を導き出す。これはティーチング作業を自動化するもので、これについては4.で典型的な例について詳しく述べる。(c)以降の作業については、B-REPでの各構成面毎にこれに続く作業を行なうと、きわめて柔軟なインプロセスシステムとなる。(c)では、構成面情報に基づく加工作業を行なうことになる。また(e)の過程から加工の追加指示が伝来場合には、ここで修正加工作業を行なう。この場合、透射等のプロセスを持つれば、不足形状にも対応できることになる。(d)では加工された対象物の計測を行なうが、この場合(b)で求めた動作経路に従って計測を行なう。もし計測中に、プローブが対象物に衝突してしまう等の不測の事態が予想される場合には、測定誤差は増えるが、プローブを対象物から離すべ

く計測計画の変更を行ない計測を再開する。(e)では計測結果に基づき計測モデルを作成する。そして、(a)での対象物モデルと計測モデルとの差をとることで差の形状モデルを求めることができる。差がある時はそれを修正すべく差の形状モデルより追加の加工・計測計画を作成し、(c)に戻ることにする。また、差が小さく一致した時は、(f)にその構成面に対して機能の設定がある場合には、機能検査を行なうことになる。その場合目標の機能に達しない時には、あらかじめ形状の変化に対する機能の変化の傾向を設定してあれば、機能が目標に達するべく形状モデルの改良を逐々に行ない、(b)からの作業を繰り返すことになる。しかし、一般には一つの構成面のみ

で成立する機能よりも、構成面集団の基で求められる機能の方が多いと思われるので、この方式による機能検査は、かなり範囲の限られたものとなる。

このようなインプロセスシステムは、形状検査一般に採用できるが、特に検査の要求の高い加工におけるバリ取り作業にもきわめて有効となる。バリの除去は他の工程への影響をなくす上でも、インプロセスで発生と同時に削除してしまいう必要がある。またバリの発生は、形状が大きく変わる所(角・稜線・穴)での発生が多いので、これらの周囲の検査が重要である。B-R EPでの境界線ループから成る構成面は、この要求にもきわめてうまく適合できる。すなわち図8にも示すように、面より垂直に一定の距離を保ちながら、境界線ループをリングパターン投影による距離センサで計ると、角・稜線・穴周辺のバリ検査及びその削除が可能となる。またこの場合センサの認識誤差は、センサの位置、センサの

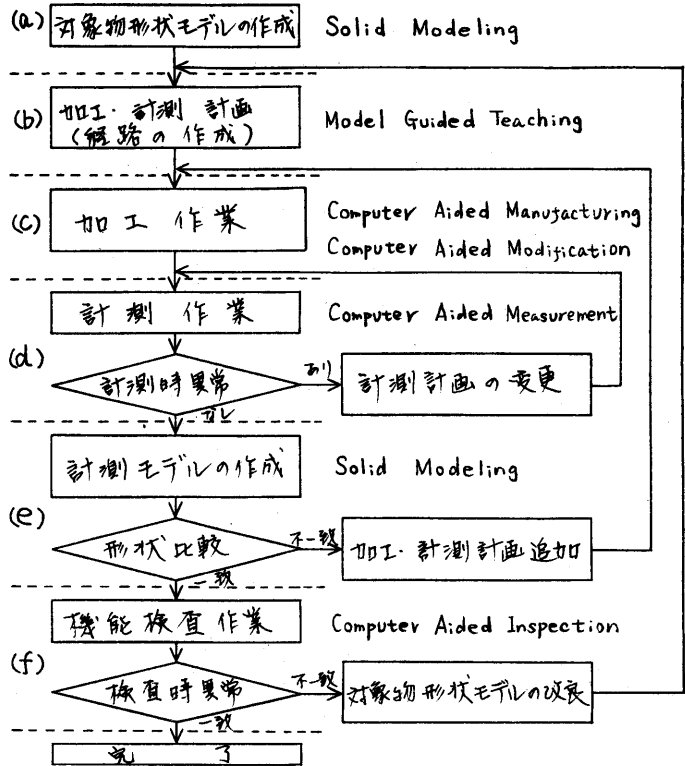


図7. インプロセスシステムの概要

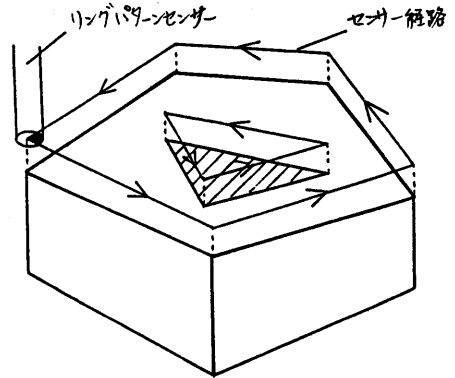


図8. バリ検査及び削除の経路

方向、センサと対象物間の距離の三種類の要因を持ち、その中でもセンサの方向が最も大きな影響を持つので、上記の方法はその意味でもすぐれていると言える。またインプロセス方式で加工が可能になるものとして、図9に示す静電偏向電極がある。静電偏向電極は、電極の形状がその特性を左右する。一様な電界を得るためには理論的形狀に一致するようにワイヤー放電加工にて電極を製作することが重要であるが、実際は機械内部の残留応力等の種々の誤差を避けることが不可能なことからその計測モデルより特性を推定し、形状モデルの変更を含めたインプロセスシステムを構成し、最適電極を製作する。

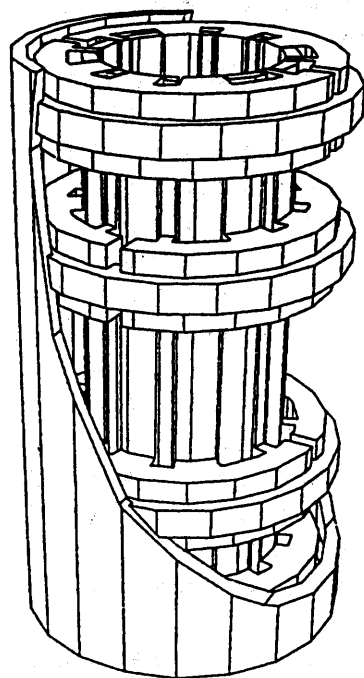


図9. 静電偏向電極モデル

#### 4. 経路に対するロボット動作計画

3.に述べたインプロセスシステムの中で、図7の(a) (b)のみの作業を考える。(b)の加工・計測計画を塗装計画に変更すれば、塗装での動作計画を考えることができるので、ここでは塗装の動作計画を念頭において考察する。

一般に、ロボットを使用する塗装における動作計画決定要因は、図10のように考えられる。実際にはこれらの要因が複合して作用しているため、塗装の最適動作を決定するのは、かなり難しいと言える。特に形状が複雑なものになるとロボットは、長年の経験を積んだ人間にかかわらず、レールある範囲の塗装では、形状の問題以外はパラメタとして解決して、ある程度満足すべき解を得ることが可能である。実際にティーチングにより塗装を行ったりするケースでは、そのように考えることができる。そこで形状のみに着目して、それに対する動作計画の自動化を考えたとくと、その他の要因は、その計画に対する変更とみることができる。例えば、ロボットガンの塗装分布特性により、ロボットガンの動きが変化したたり疎にたり、たりすると考えることができる。ここでは、凸凹面体での形状に対する動作計画について考察を行おう。一般に塗装はそのガウス分布特性を考慮して、対象面に垂直に一定の距離離れた面上を、ロボットガンの先端が移動することで塗装を行おう。そのような面をここでは走査面と定義する。図11で面ABC Dより垂直にhの距離の面上に面A' B' C' Dを移して、各辺より面上で垂直に距離だけ拡大した面A' B' C' Dが走査面とした時、A点の座標値よりA'点の座標値を求めたことを考える。A点、A'点でのベクトルをそれぞれIP<sub>0</sub>、IP またはDA,

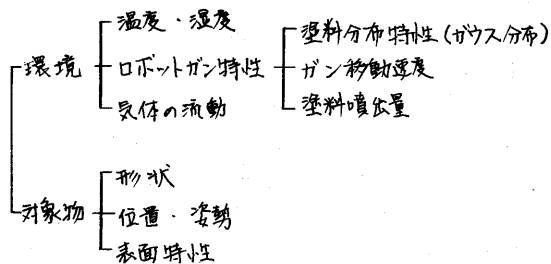


図10. 塗装ロボットの動作計画決定要因

ABの単位ベクトルをそれぞれ $\hat{u}_{01}$ ,  $\hat{u}_{02}$ 、そして面ABCDの単位ベクトルを $\hat{n}$ と  
おくと、IPは式(3)で表わせる。

$$IP = IP_0 + (\hat{u}_{01} - \hat{u}_{02}) d (\hat{u}_{02} \cdot (\hat{n} \times \hat{u}_{01})) + h \hat{n} \quad (3)$$

他のB, C, D各点も同様にして求め走査面A'B'C'D'を決定することができる。同様にして、凸多面体の全マの面の走査面を決定できる。図12には走査面での動作計画の例を示す。この場合、対象面ABCDEFを均一に塗装するためには、ロボットガンの先端が走査面A'B'C'D'E'F'上を一定の方向性を持って動くことが必要になる。そこでまず最大長さの辺A'B'を見つけ、Z軸をA'B'に平行にすればガウス分布として必要付間隔をとった格子をXY平面上に発生させる。そして各格子での交点(以降格子点と呼ぶ)が走査面内にあるかどうかの判断を行い、走査面内の格子点のみを対象に、A'点に近い格子点よりB'に向かって格子点を結んで行き、Z軸方向の格子点がないた所でZ軸方向へ進み今度はB'からA'の方向へ進むという方法を繰り返して、走査面内での動作計画を決定できる。これらの情報は、全マ形状情報のみから構成でき、あとは塗装の他のパラメタとの関連をうまく扱えば、ノンテーチングでの塗装が可能となる。図13にはこの方法に基づいて行われたシュミレーション結果例を示す。図13(a)に示される平面で近似された球の形状モデルに対し、図13(b)に示すロボット動作経路を求めることができた。

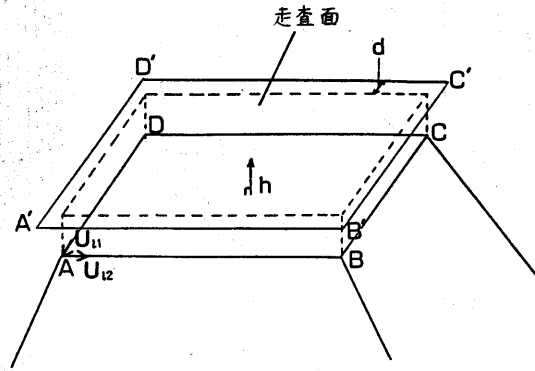
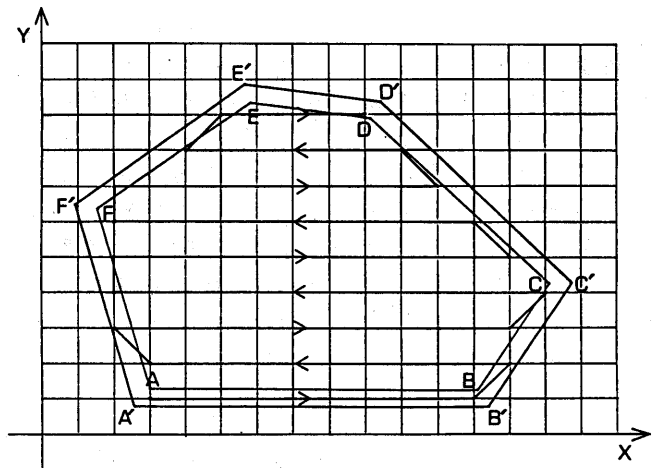
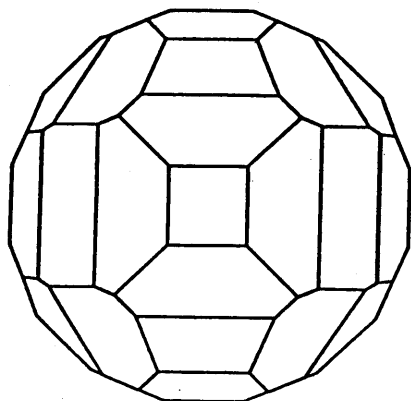


図11 塗装走査面

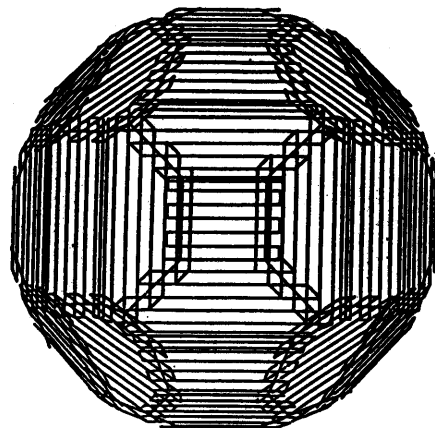


( A,B,C,D,E,F : 対象面 )  
( A',B',C',D',E',F' : 走査面 )

図12. 走査面での動作計画



(a) 平面で近似された球の形状モデル



(b) 球の形状モデルに対するロボット動作経路

図13. 球の形状モデルに対するロボット動作計画シミュレーション

5. おわりに 本報においては、形状モデルを使ってCAM側での特にロボットを意識した動作計画について考察を行った。ロボット作業の自動化には、さまざまな要因を考慮する必要があるが、著者はその中の形状モデルの果たす役割が少くないと感じている。幸いにも、センサー技術、ロボット制御技術にしても格段の進歩を遂げている昨今であるから、これからはこのような技術との融合が重要になると思われる。また近い将来には、ティーチングによりロボット作業を行っている分野以外、例えば精密コーティング工程や精密加工など、ティーチングで対応できない分野にも積極的に対応する必要がある。より柔軟なロボットシステムを実現していく上でも、この分野の研究がさらに進められることを期待したい。

- (文献)
- 1) 日経メカニカル特集「機械の性能を測るCAE」, P59-71 (1984.9)
  - 2) 神野, 自動設計の方法論, 産経堂, (1982, 5, 30)
  - 3) 伊藤, 出澤, 立体モデルとロボット動作計画の一考察, 情報処理学会グラフィックスとCAD研究会(1984.11.6)
  - 4) 木下, 出澤, リングビーム投影による距離センサー, 理研シンポジウム, 第6回「非接触計測と画像処理」(1985.9.20)
  - 5) 辻利, 数田, 森光, マニピュレータ用超音波センサーを用いた形状認識の精度について, 第24回SICE学術講演会(1985.7.25)
  - 6) T. Soma, M. Idesawa, E. Goto, and T. Sasaki, A computer-aided evaluation system for sectored-type multipole electrostatic deflectors, Journal of vacume science & technology, 3-1, 177 (1985, 1-2)