

立体モデルとロボット動作教示の一考察

伊藤祐二 (小野田セメント)

出澤正徳 (理 研)

1. はじめに

我々人間は、3次元の環境の中で、極めて柔軟に活動できる。これは、人間が対象物や環境の状態を認識し、それに適応して行動できる能力を有するためである。特に、視覚と触覚などによる3次元の認識能力が、重要な役割を果たしている。一方、常に環境と対象物のすべての情報を取り入れながら判断しているとは考えにくい。むしろ、環境と対象物の大まかなモデルを頭の中に構成、保持し、それを視覚と触覚からの情報によって補い、確認しながら行動していると解釈する方がもっとも正しい。

さて、ロボットの場合について考えてみよう。現在、実用化されているロボットの大部分は、あらかじめ教示された定形的な動作を繰り返すものが大部分である。これらのロボットに動作を教示することは、必ずしも容易ではない。特に、ロボットの活躍が最も期待されている多品種少量生産の分野では、動作教示を如何にして簡単化するかが、一つの大きな課題となっている。

もし、対象物および環境の立体モデル、作業に関する知識、ロボット制御の知識などから、ロボットの大きな動作計画を自動的に作成し、それに基づいて、対象物や環境の状態を観測し、ロボットの動作を確定して作業を実行できるようなシステムを構築できれば、その効果は絶大であろう。

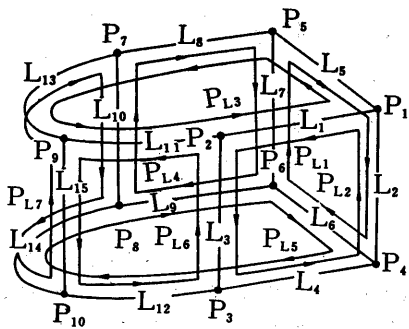
本報では、以上のような観点より、対象物と立体のモデルからロボットに動作教示するシステムの実現を目指し、その準備として、立体のモデル化とそれに基づいたロボットの動作教示について考察し、ロボット動作教示システムに対する期待と計画について報告し、御批判、御教示をお願いしたい。

2. 立体のモデル化と処理手法

CAD/CAMに関する開発研究は、ある種の企業では、これに成功するか否かが企業の死命を決するなどとも言われ、やや過熱気味とも思える程に盛んに行なわれている^{1,2)}。これは、初期の概念設計から、詳細設計、製造工程、生産管理、販売、補修に至るまで、工業生産全体を統合した、総合的なシステムとして機能するようになった時に、大きな効果を発揮できるようになるであろう。現在のところは、まだ、ごく初期の段階にあるものと考えられる。本題のロボット教示も、このような総合システムの、一つとして考えたのが本筋であろう。製品を設計し、記述してゆく場合、その形状の情報が必要である。この形状情報の記述、すなわち立体モデリングの概念は、CAD/CAMシステムにおいて、極めて重要であり、多くの立体モデリングシステムの開発が試みられている。しかし、まだ、実用的に十分に活用されるまでには至っていないようである。

本題のロボット動作教示においては、対象物や環境の立体モデルを計算機内部に構成することが必要とされる。現在のところ、入手できる適当な立体モデリングシステムがなかったため、自製のシステムを開発し、それを使用することにした。

この立体モデリングシステムでは、図1に示すように立体を、基本的には、立体内部の空間と立体外部の空間との境界をなしている面分(構成面)の集合とし



$\{P_1 \dots P_8\}$; 頂点 } P_{XYZ} 特徴点 (頂点)
 $\{P_9, P_{10}\}$; 副頂点 }
 $\{L_1 \dots L_{14}\}$; 稜線 } L_{XYZ} 稜線
 $\{L_{15}\}$; 副稜線 }
 $\{P_{L1} \dots P_{L7}\}$; S_{XYZ} 構成面

頂点		線番号
P_{XYZ}		L_{GXYZ}
1	(x_1, y_1, z_1)	
2	(x_2, y_2, z_2)	1
3	(x_3, y_3, z_3)	2
4	(x_4, y_4, z_4)	
5	(x_5, y_5, z_5)	
6	(x_6, y_6, z_6)	
7	(x_7, y_7, z_7)	1
8	(x_8, y_8, z_8)	2
9	(x_9, y_9, z_9)	1
10	(x_{10}, y_{10}, z_{10})	2

面		面の性質*
S_{XYZ}		
1	1,2,3,4	1
2	4,6,5,1	1
3	1,5,7,9,2	1
4	5,6,8,7	1
5	4,3,10,8,6	1
6	3,2,9,10	2
7	7,8,10,9	2

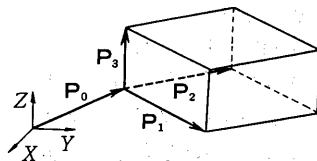
線		
L_{XYZ}		
	頂点番号	線の性質**
1	2, 9, 7	2
2	8, 10, 3	2

曲面		
C_{XYZ}		面の性質
	面番号	
1	6, 7	2

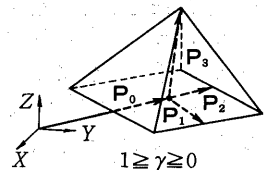
* ; 1: 平面, 2: 円筒面
 ** ; 1: 直線, 2: 円弧

図1. 構成面の集合による立体の表現法

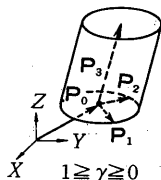
て表現している³⁾。最近では境界表現 (B-rep: Boundary Representation) と呼ばれている立体表現法と同一の表現法である。基本立体の組合せとして立体を表現する方法³⁾も合せて採用している。最近では, CSG (Constructive Solid Geometry) 表現と呼ばれているものと同じの表現法である。基本立体には, 直方体, 角柱, 円筒, 球などがあり, 図2に示すように, 数式的拘束条件といくつかのパラメタ (形状コード, 形状ベクトル, 位置ベクトル, 姿勢を示すパラメタ, 立体間の従属関係を示すパラメタなど) で構成される。この表現法から, 構成面の集合による表現法の変換は, 極めて容易である。また, 線分, 面分の定義と, これらの拘束, 回転などによる新たな立体の生成も可能であり, この機能も付加した計画である。これらの立体間の集合演算も実行することにより, 複雑な形状の立体モデルの生成が可能である。これらの演算処理は, 基本的には, 構成面の集合として表現された立体間で実行される。既に生成された複合立体間あるいは複合立体と基本立体間, 基本立体同士でもこれらの演算が可能である。元の基本立体およびこれらの演算の情報 (CSG 表現) も, 境界表現法 (構



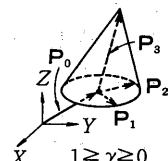
1 $\geq \alpha, \beta, \gamma \geq 0$
(a) 平行六面体



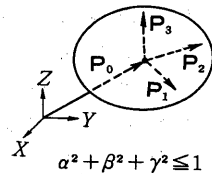
1 $\geq \gamma \geq 0$
1 - $\gamma \geq \alpha, \beta \geq \gamma - 1$
(b) 四角錐



1 $\geq \gamma \geq 0$
 $\alpha^2 + \beta^2 \leq 1$
(c) 楕円柱



1 $\geq \gamma \geq 0$
 $\alpha^2 + \beta^2 \leq (1 - \gamma)^2$
(d) 楕円錐



$\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2 \leq 1$
(e) 楕円体

$$V = P_0 + \alpha P_1 + \beta P_2 + \gamma P_3$$

図2. 基本立体の数式表現の例

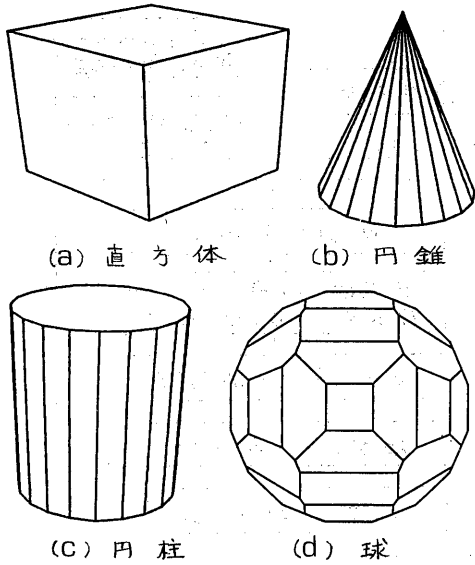


図3. 境界表現法により表示された基本立体の例

成面の集合)による立体に関連づけ、合せて登録することになれば、さらに高度な判断と処理に際して利用できるようになる。高度な判断と処理とは、たとえば、面の性質による加工法やロボット制御法の選択などである。

図3は、境界表現法によって表示された基本立体の例である。現在のところ、曲面は、小さな面分(構成面)に分割され、平面として扱われているが、CSG表現の情報を利用し、数式的に正確な曲面として処理することは容易である。図4に、基本立体(円錐)間の基本演算(和、差、積)の結果の一例を示した。このような基本演算を組合せることにより、複雑な立体の創成が可能である。図5に基本演算の組合せにより生成された複合立体の一例を示した。さらに、回転や移動軌跡としての立体創成機能と構成面の局所的操作なども付加し、より柔軟なシステムとしてゆく計画である。これら、立体間の基本演算等、立体創成、処理過程の具体的手法の詳細は、紙面の都合上割愛せざるを得ないが、その基本概念は、図6に示す通りである。

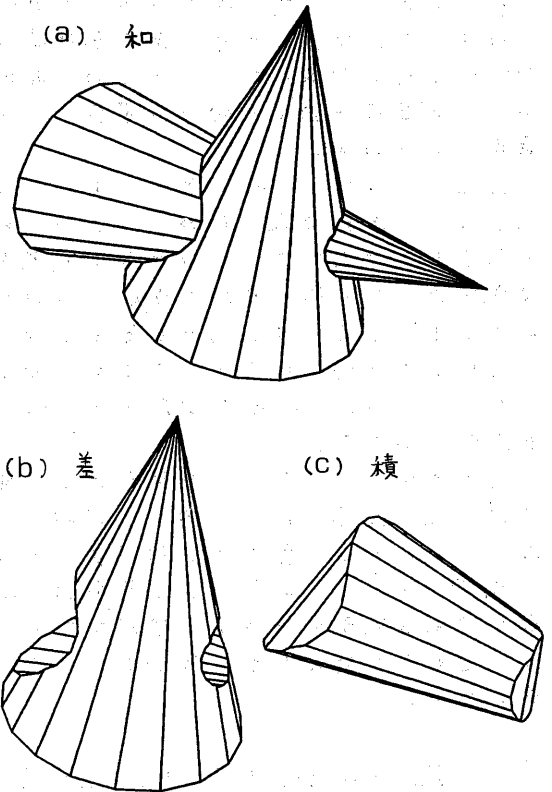


図4. 立体の基本演算の例

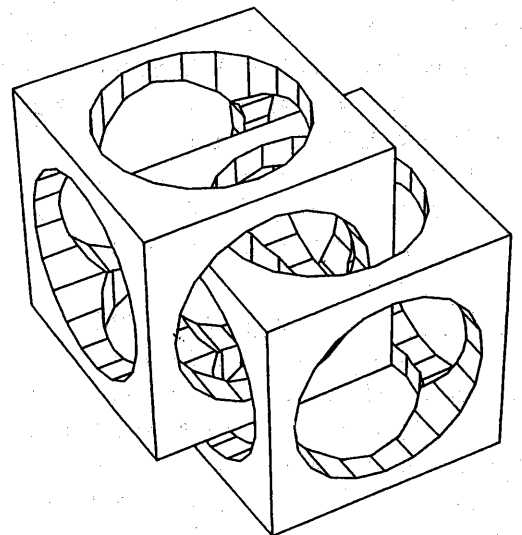


図5. 基本立体の演算の組合せによる複合立体の構成例

なお、図3、図4、図5に示した立体の表示には、以前に製作した多面体表示プログラム^(4,5)を使用した。そのため、曲面は、小さな構成面(平面)の集合として表示されている。

以上のように、この立体モデリングシステムは、本題の最終目標であるロボット教示システムの開発における、対象物や環境などの立体モデルの構成に有効である。もちろん、対象物の立体モデルとしては、将来的にはCADシステムから出力された立体モデルを使用することも実際的であろう。

以上の他、立体モデルの照合法、干渉の検出法、立体に関する種々の特性(体積、重心など)の算出法³⁾、作用具等の特性模擬手法など、ロボット動作教示に必要とされる効率的な手法を検討中であり、これらの機能も順次付加してゆく計画である。

3. ロボット動作教示についての検討

工業上使用されているロボットの大多数は、プレイバック制御方式のものである。動作教示に多くの時間を要する、誤差や個体差に対する適応力に欠けたなど、多くの改善すべき点がある⁶⁾。このため、多種小量生産過程など、ロボット活用が最も期待されている分野への適用が困難となっている。ここでは、開発を計画しているロボット動作教示システムの内容を紹介し、形状検査ロボット、塗装ロボットの場合について考察する。

3-1. ロボット動作教示の概念

ロボットの制御を、人間の行なっている動作を模倣することが、必ずしも得策とは言えないが、対象物や環境に関する大まかな情報と、それらの立体モデルから、少しあいまいな目標動作を自動的に作成し、それに基づき、観測予備動作をし、より精密に情報を取得しなかる動作を確定してゆくことも

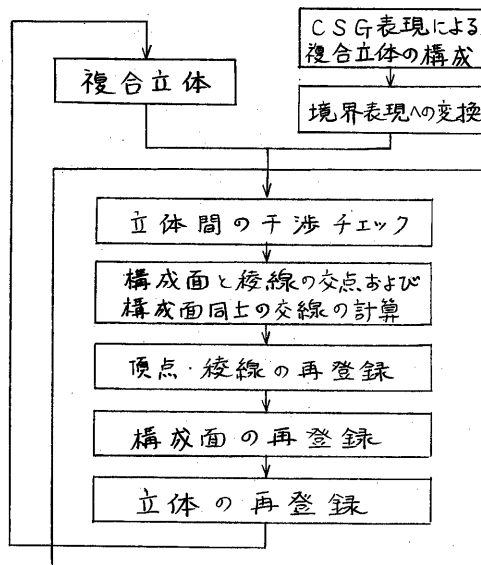


図6. 立体の集合演算処理の概念

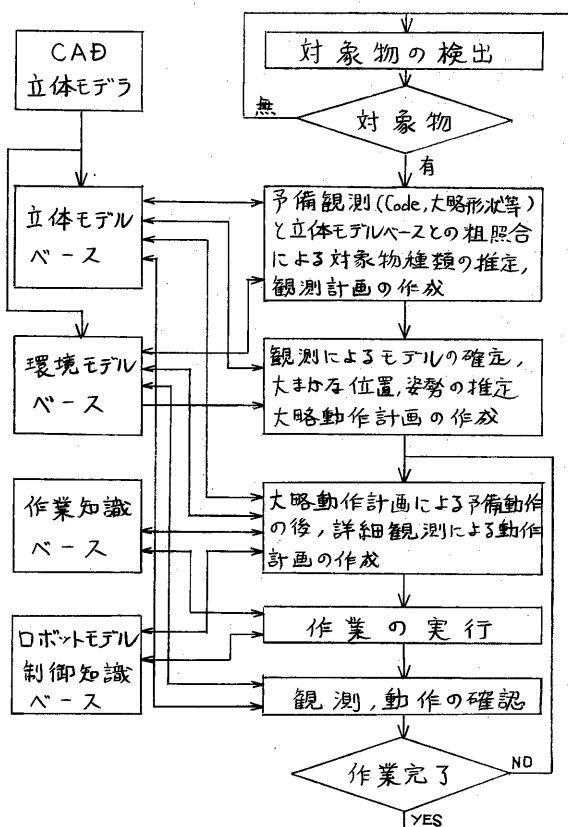


図7. 立体モデルに基づくロボット教示の概念

一つの方法であらう。図7に、このような考えに基づくロボット動作教示の概念図を示した。まず、作業領域に対象物が存在するか否かを調べる。もし対象物が検出されたら、対象物に付された符号を読み取りとか、粗視観測で大略の形状を推定し、対象物の立体モデルとの相照合により、対象物の種類を推定し、観測計画を作成する。観測計画に基づき、推定されたモデルに応じた観測を行ない、対象物のモデルを確定し、環境モデル内における大まかな位置と姿勢を推定して、モデルに応じた大略動作計画を作成する。さらにロボットと作業工具と対象物あるいは環境物体との干渉状態などの検査も行なう。大略動作計画に基づいて予備動作を行ない、対象物に対するロボット、作業工具などとの相対関係をより精密に観測し、作業計画を確定する。これに基づき作業を実行する。作業完了後、動作確認の観測を行ない、次の動作へと移行し、作業完了まで繰返す。

このような方式によるロボット動作教示は、たとえば、寸法検査ロボット、バリ取りロボット、溶接ロボット、塗装ロボットなどにおける動作教示、制御の自動化に有効であらう。

3-2. 形状検査ロボットについての考察

寸法と形状の検査は、工業上極めて基本的で重要である。水車やタービン翼など、最近では、各種プラスチック成形品などにおいても、全数検査が必要とされるものが少なくない。このような分野において、対象物の形状モデルに基づいた計測計画の自動作成、計測結果による対象物のモデルの構成と理想モデルとの照合による形状検査の自動化は有効であらう。また、構成された対象物のモデルからその特性の推定、さらには、どの部分もどの程度修正すべきかの修正計画の作成、これにより期待できる特性改善の程度の推定なども可能となるであらう。

以上のような考えに基づく形状検査ロボットの一つの概念図を図8に示した。計測領域に対象物が現れれば、粗視観測により、対象物に対応したモデルが推定される。これに基づく予備観測により、モデルの確定、位置、姿勢が推定され、大略の計測計画が作成される。この大略計画に従って、対象物表面上も光触針などにより走査し、対象表面の位置を検出し、計測計画を修正しつつ、寸法の計測を実行し、その計測値より対象物のモデルを構成してゆく。対象物の位置、姿勢の検出は寸法計測用のプローブとしては、新しく考案された小型距離検出法（RORS: Riken Optical Range Sensing Method）による光触針が有効であらう。このような形状検査ロボットは、対象物を観測するのみで、作用を及ぼしたり、反作用を受けなかったため、その実現は比較的容易であるものと考えられる。

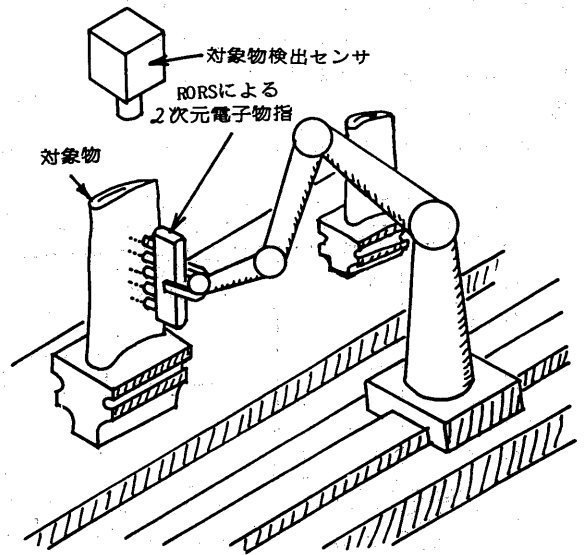


図8. 形状検査ロボットの概念

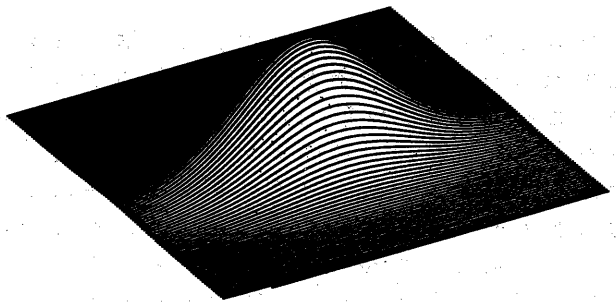
3-3. 塗装ロボットについての考察

塗装ロボットは作業者の衛生上の問題（溶剤や作業姿勢など）などのため、

早くから実用化が進められてきた。塗装ロボットでは、前述の形状検査ロボットとは異なり、対象物に付着させる塗料の量（塗膜厚さ）の制御が重要である。しかし、対象物からの反作用がないという点ではこの実現は比較的容易な部類に属する。ただし、周辺設備と対象物など、ロボットの干渉と連続移動対象物への追従など多くの課題が存在するが、ここでは、下一阶段として、塗膜厚さの制御の考え方、周辺設備のモデル化などを中心に、大まかな考察を試みた。

塗膜厚さの制御には、塗装銃から噴出する塗料の空間的かつ時間的分布が重要である。図9に塗装銃の特性とそれによる塗装面への噴射状態の模擬の一方法を示した。同図(a)に示すような噴射特性を持った塗装銃が同図(b)に示すように IP_{gp} の位置に単位ペフトル U_{zg} 、 U_{xg} 、 U_{yg} で示される姿勢で配置されている時、塗装面上の点 P （法線ベクトルが n_p ）に達する単位時間当りの塗料の量 g_p は、図中の式で示される。対象物上の塗膜厚さは、 g_p を塗装作業時間中について積分したものと存する。

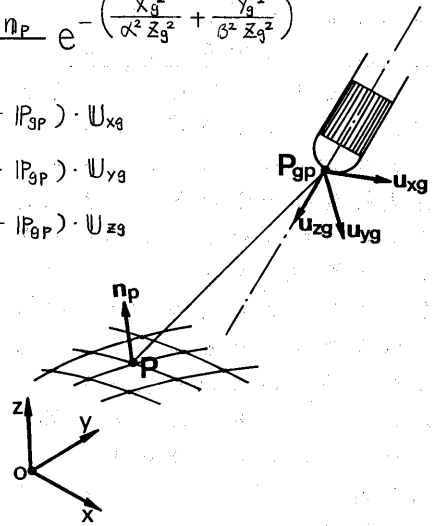
図10は、実際に使用されている



(a) 噴出塗料の分布シュミレーション

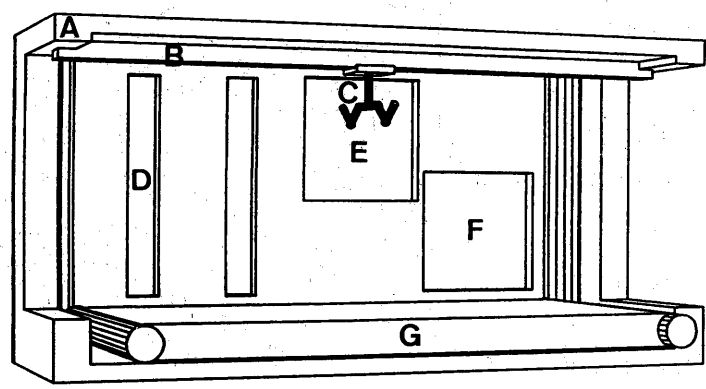
$$g_p = \frac{\alpha U_{zg} \cdot n_p}{z_g^2} e^{-\left(\frac{X_g^2}{\alpha^2 z_g^2} + \frac{Y_g^2}{\beta^2 z_g^2}\right)}$$

$$\begin{cases} X_g = (IP - IP_{gp}) \cdot U_{xg} \\ Y_g = (IP - IP_{gp}) \cdot U_{yg} \\ Z_g = (IP - IP_{gp}) \cdot U_{zg} \end{cases}$$



(b) 塗装銃と塗料面との関係

図9. 塗装銃の特性



- A: 塗装ブース
- B: ワークコンベア
- C: ワークハンガー
- D: 吸引ダクト用窓
- E: 塗装ロボット用窓 (上部塗装用)
- F: 塗装ロボット用窓 (下部塗装用)
- G: 塗料回収用ベルトコンベア

図10. 環境モデルの例 (塗装ブース)

ものとはほぼ同様の構成の塗装ブースのモデルの内側を示したものである。対象物は、ワークハンガー(C)に下げられ、ワークコンベア(B)によって左側から右側へと移動される。このブース内を移動している間に、窓(E, F)から、塗装ロボットにより、塗装作業が実行され右側へと出てゆく。

塗装ロボットの動作計画作成には、上述のような塗装銃の特性と、対象物と周辺装置との干渉などを考慮し、塗装面上の塗膜厚さの分布と塗料損失量、さらには作業速度などを推定し、評価することから、

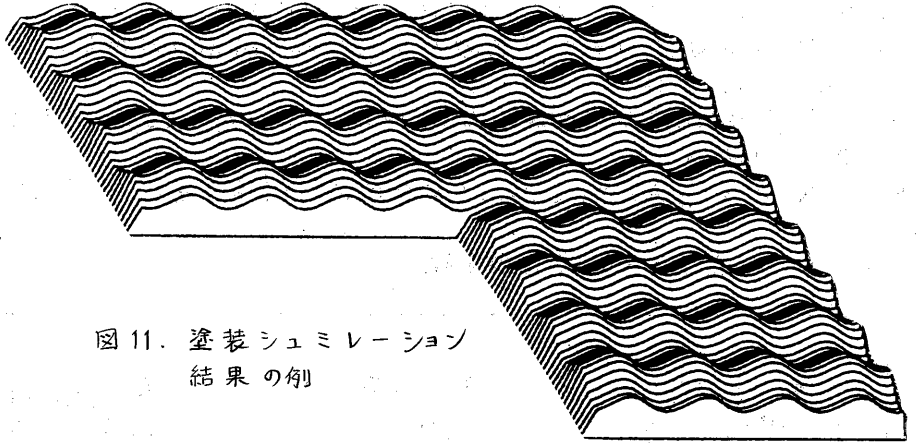


図11. 塗装シュミレーション結果の例

必要とされる。この場合、第1次近似として、塗装銃の制御面を、対象物のモデルの塗装すべき構成面の法線方向の一定の距離となる面上に設定し、対象物および環境のモデルと、塗装銃およびロボットが干渉しないような制御軌跡で所望の塗膜厚が得られるような制御軌跡および速度となるよう修正してゆくことも一案であろう⁹⁾。図11に、この考えに基づいて、平面上に塗装した場合の塗膜分布の結果の一例を示した。

以上は、ロボット、対象物、環境などとの間の幾何学的な条件についてのみ議論してきたが、実際には、ロボットの運動学的な性質をも考慮する必要がある。

4. むすび

本報においては、対象物および環境のモデルから、ロボットの動作計画を自動的に生成するためのシステムの実現を念頭におき、立体モデルの構成法と、ロボット動作教示について検討した。このようなシステムを実現するためには、単に幾何学的な形状処理手法のみでなく、環境と作業上の知識、ロボットの動特性と制御に関する知識、種々の作用具の特性に関する知識などの取扱いの方法の開発が必要とされる。さらには、ロボット用の観測あるいは計測用センサの開発も必要とされる。対象物と環境の立体モデルから、動作計画を自動的に作成し、ある程度自律的に判断し、行動、作業の行なえるロボットシステムの開発を試みることは、これが、広い分野に亘る技術を包含しているという点で、多くの新しい刺激を与えてくれ興味深い。著者は、ロボットに関して全くの素人であり、素人的な発想で考察を始めたところである。御批判、御教示をお願いしたい。

(文 献)

- 1) 佐田, 木村, 立体モデルを自由に扱う GEOMAP-III, 日経メカニカル, 1984, 8, 13, 73
- 2) 3次元図形処理と形状モデリング技術の調査, 情報処理振興事業協会, 技術センター, 57技-009, (1983, 2)

- 3) 出澤, 図形処理に関する研究, 東京大学生産技術研究所報告, 23巻4号, (1974)
- 4) 出澤, 三面図から立体形成のシステムとグラフィックディスプレイ, グラフィックディスプレイ報告書, 情報処理学会プログラミングシンポジウム委員会, (昭45)8, P66
- 5) 出澤, 三面図から立体形成のためのシステム, 機械学会論文集, 38巻310号 (昭47.6), P1276
- 6) 特集「マニピレータのメカニズムと制御」, 日本ロボット学会誌, 第1巻第2号, (1983-7)
- 7) 出澤, 距離検出のための一方法, 理研シンポジウム, 第4回「非接触計測と画像処理」, P23 (1983. 3. 16)
- 8) 出澤, 光触針用光学的距離検出法, 理研シンポジウム, 第5回「非接触計測と画像処理」, P13 (1984. 9. 28)
- 9) 伊藤, 出澤, 立体モデルとロボット動作教示の一考察, 同上, P22 (1984. 9. 28)

(参 考) 立体モデル集合演算例

