環境モデルを用いたロボット作業の オフラインプログラミングシステムの試作*

平岡弘之** 田口 靖*** 榎本昌之† 木村文彦†† 佐田登志夫†††

Development of Off-line Programming System of Robot Operations
Based on Environment Models

Hiroyuki HIRAOKA, Yasushi TAGUCHI, Masayuki ENOMOTO,
Fumihiko KIMURA and Toshio SATA

A model-based off-line programming system of the robot operations is developed for industrial use. Environment modelling system based on the solid modelling system GEOMAP-III, is developed as a tool for maintaining the information of the working environment of the robot, such as robot itself, parts to be assembled, obstacles, etc., and other necessary information for the robotic tasks. A high-level assembly description language which describes assembly process in terms of the operations on the parts to be assembled instead of motion of the robot itself, is designed. By utilizing the information of the environment model, the system generates information of the robot motion from this high-level description, simulating the changes in the environment. Feasibility checks of the generated robot motion, detection of collisions between the robot and obstacles, calculation of necessary grasping force, are performed in the process and the results are displayed to the operator for easy debugging of the program. Preparation for sensory interactive robot motion in the run-time system, is also considered. As examples, some assembly operations are programmed by the system with high-level language.

Key words : off-line robot programming system, solid modelling, world model, robot simulation, robot language

1. は じ め に

1.1 ロボットのオフラインプログラミング

ロボットの普及に従い、どのようにしてロボット作業を教示するか、ということが問題になってきている。従来のティーチングプレイバックによる作業教示法は、時間がかかるばかりでなく、作業のわずかな変更に対しても対応が容易でない。ロボットのオフラインプログラミングシステムは、ロボットの運動を記述す

る言語入力に基づいてロボット動作のデータを生成できるので、そうした問題点を解決する有効な手段として研究されている¹⁾。

ロボットのプログラミング言語は様々なものが開発されているが、ロボット動作に直接対応した動作レベルの言語はプログラミングが繁雑で手間がかかるため、より高度の言語の開発が望まれてきた。言語の高級化に伴い、ロボットの作業を記述するプログラム部分は簡潔なものになってきつつある²⁾が、ロボットの作業環境についてはその簡潔な表現法と強力な管理手法の開発が遅れており、このことがオフラインプログラミングシステムの実用化の一つの障害になっているとも考えられる。

そこで、近年開発が進んでいるCADシステム、特に幾何モデリングシステムを利用して、ロボットのプログラミングでの環境の扱いを容易にする方法が試みられている³⁾。本論文では、CAD/CAMシステムの構築が容易にできるよう設計された立体形状モデリングシステムGEOMAP-III⁴⁾を用いてモデルベースのオフ

* 原稿受付 昭和60年11月15日、昭和58年度精機学会秋季大会学術講演会（昭和58年10月14日）、昭和59年度精機学会春季大会学術講演会（昭和59年3月27日）および昭和60年度精機学会秋季大会学術講演会（昭和60年10月14日）にて発表

** 正 会 員 東京大学生産技術研究所（東京都港区六本木7-22-1）

*** 正 会 員 日本アイ・ビー・エム（株）（東京都新宿区西新宿2-6-1、新宿住友ビル）

† 正 会 員 日本電気（株）（川崎市幸区塚越3-484）

†† 正 会 員 東京大学工学部（東京都文京区本郷7-3-1）

††† 正 会 員 東京大学工学部（現、理化学研究所；和光市広沢2-1）

Fig. 1 Configuration of off-line robot system and its data processing

ラインプログラミングシステムを試作したので、その機能と処理について報告する。

1.2 ロボットシステムの全体構成

本研究では、ロボットを動作させるシステムをオフラインのプログラミングシステムとオンラインでロボットを制御するランタイムシステムに分けるのが実用的であると考えた。環境モデルを、オフラインシステムで高度の言語処理を可能にするために利用するばかりでなく、ランタイムシステムでセンサ情報の処理を容易にする目的でも用いることを考えている。このために、オフラインシステムは、ロボットの動作コマンドと共に、ランタイムシステムで用いる簡単なモデル（ランタイムモデルと呼ぶ）をも生成する。

2. オフラインシステムの構成

2.1 処理の流れと構成

本研究のロボット作業プログラミングシステムの処理の流れとシステム概要を図1に示す。オペレータは、以下の順に処理を進める。

- (1) 組立対象部品、ロボット、作業環境に関する形状モデルを形状モデリングシステム GEOMAP-III を用いて生成する。
- (2) 部品に関して、初期状態と最終状態における位置や部品間関係を入力する。ロボットに関しては

リンク番号やリンク間の拘束関係を指定する。

- (3) 作業手順を作業記述ロボット言語を用いて入力する。ロボット言語の各コマンドごとに、衝突チェックや安定性チェックをシステムが行うので、その結果をディスプレイ上で確認する。

ロボットや作業環境についての定義は、一度行えば、再び行う必要はない。また、(1)、(2)の入力については、設計・生産の統合化⁵⁾が進めば、そのほとんどが必要になると考えられる。

2.2 環境モデルの構造

ロボット、作業対象部品を含めた作業環境を計算機内にモデル化したものを環境モデルと呼ぶ。図2に示すように、環境モデルは次の4項目の情報を有する。

- a) 形状情報： 3次元空間内の物体の幾何情報および位相情報（面、稜線、頂点等）である。
- b) 位置情報： 作業が行われる前の部品群の位置、姿勢（初期状態）と、すべての作業が行われた後の部品群の位置、姿勢（完成状態）に関する情報である。一つの部品を複数回移動するときには、移動するごとにシステムが初期状態の位置情報を更新する。
- c) 接続情報： 2つの部品間、リンク間に存在する各種の対偶関係を扱う。対偶は、平面、軸、穴等の要素（以下、形状要素と呼ぶ）の間の関係記

Fig. 2 Structure of environment model

述であり、本システムでは、平面对偶、軸穴対偶、ねじ対偶、固定の4種を定義できる。形状要素は、形状モデルには明白には表現されていないが、形状情報をもとにシステムが自動的に定義する。

- d) 技術情報： 部品、リンク及び形状要素に固有の数値データである。部品には、物体の重心、重量、体積、比重、仮想包絡球の中心及び半径、把握に関する情報が、ハンドには、実現可能な把握幅や把握深さに関するデータが与えられている。センサに固有の情報としては、センサの種類とそ

れに応じた各種のパラメータが、形状要素に固有の情報としては、表面の種類、表面粗さ、ねじの呼び径、組付精度等がある。

2.3 作業記述ロボット言語

本研究における作業記述ロボット言語は、組立作業を主な対象としており、対象部品への操作を指示するだけでロボットの動きを生成する、いわゆる対象物レベルのロボット言語である。表1にその仕様を示す。組立作業命令は、実際の自動車、電気製品の組立作業における作業パターンの調査から、位置合わせ命令と

Table 1 Keywords of assembly description language

<u>Assembly Commands</u>	<u>Qualifiers</u>
PLACE object SLIDE object INSERT object SCREW object PUSH object REMOVE object LOOSEN object	<u>Temporal Positioning</u> FINAL_POSITION Ex. PLACE part FINAL_POSITION (AT 0,0,100) CONTACT facel, face2 ALIGN hole1, pin2 FIT facel, face2 FROM PRESENT facel, distance FROM FINAL facel, distance AROUND hole1, angle ON object AT vector TO vector
	<u>Intermediate Points for Grasping</u> VIA_APPROACH Ex. PLACE part VIA_APPROACH (100,200,500) <u>Intermediate Points for Positioning</u> VIA_ACCESS Ex. PUSH part VIA_ACCESS (300,200,-100)
	<u>Grasping Position and Orientation</u> GRASP Ex. PLACE part GRASP facel,face2 (FROM PARALLEL face3) APPROACH Ex. PLACE part APPROACH (PARALLEL facel) PARALLEL facel ANTIPARALLEL facel FROM ABOVE FROM BELOW FROM PARALLEL facel FROM ANTIPARALLEL facel FROM ALIGNED facel FROM ABOVE FROM BELOW DEPTH HAND DEEP DEPTH HAND MEDIUM DEPTH HAND THIN DEPTH HAND depth DEPTH facel, depth APART FROM facel APART FROM facel IN FINAL CORRECT
<u>Operation for Sensory Interaction</u>	<u>Positioning Direction of Part ACCESS</u> Ex. PLACE part ACCESS (FROM_BELOW) (Same qualifiers with APPROACH)
<u>Control of Program Flow</u>	
GO TO label DO_label OBJECT (object1 object2 ...) DO_label EDGE (edgel edge2 ...) END	

して PLACE (部品を持ち上げて移動), SLIDE (部品をずらす), ROTATE (ある軸のまわりに回転), 穴・軸のはめ合わせ命令として INSERT (部品の挿入), SCREW (ねじ締め), PUSH (圧入), 分離命令として REMOVE (部品を抜き去る), LOOSEN (ねじをゆるめる), の 8 種を定義した。各々の作業命令は、対象部品名と修飾子とを付けて用いる。修飾子には、一時的な組付位置を指示する FINAL-POSITION, 把握の接近方向を指示する APPROACH, 部品の組付方向を指示する ACCESS, 把握までの途中経由点を指示する VIA-APPROACH, 部品の位置決めまでの途中経由点を指示する VIA-ACCESS, 把握位置と姿勢を指示する GRASP がある。修飾子が指定されない場合には、システムが適当な値を与える。把握に関する修飾は、一度記述すればその情報は環境モデルに加えられ、以後システムはその値を使用する。

センサ情報を用いる作業のために、ランタイムシステムの機能に応じて、GET-POSITION (視覚センサを用いて部品の位置の補正を行う) と、バリ取り作業用の TRACE (力と位置の制御を用いて稜線をなぞる) の 2 つの命令を用意した。

制御命令としては、DO 文、GO-TO 文等がある。

3. 環境モデルを用いた ロボット動作の生成

作業命令が与えられると、システムは逐次、各命令を解釈し、環境モデルの初期状態を更新していく。本システムは、作業実行時にセンサからの情報に従って環境情報を管理するためのランタイムモデルと、ランタイムモデルの情報を参照する形式の動作レベル言語である中間コードとを出力し、ランタイムシステムに引き渡す⁶⁾⁷⁾。図 3 に組立作業命令とその結果生成された中間コードの例を示す。

以下に、環境モデルの処理によるロボット動作の生成をその手順に従って説

```

PLACE  OBJ1
VIA_APPROACH(300 300 0);
VIA_ACCESS(0 200 0);
GRASP F316,F318;

```

a) Assembly description

```

1:      speed:          0100
2:      move:           5:VIA1
3:      move:           6:OBJ1_POS1
4:      speed:          0030:
5:      dmove:          7:OBJ1_REL1
6:      close:          20.0 2:OBJ1:
7:      speed:          0050:
8:      move:           6:OBJ1_POS1
9:      speed:          0070:
10:     move:           8:VIA2
11:     move:           9:OBJ2_POS1
12:     speed:          0030:
13:     dmove:          10:OBJ2_REL1
14:     open:
15:     speed:          0050:
16:     move:           9:OBJ2_POS1
17:     end:

```

b) Generated intermediate codes

c) Generated motion : Run-time model includes underlined positional information

Fig. 3 Assembly description and its corresponding intermediate codes

明する。

- (1) 部品の移動先位置算出：修飾子 FINAL-POSITION による指定がなければ部品の最終状態の位置を移動先の位置とする。FINAL-POSITION は、面・面対偶(CONTACT: 重ね合わせ, FIT: 同一平面上に連続するような位置関

係), 軸・穴対偶(ALIGN: 中心軸が一致する位置関係) 等の付属語を組み合わせで移動先位置を指定する。

- (2) 部品の安定性チェック：移動先での部品の安定性をチェックする。まず、接触面の傾きから部品が滑り落ちないかを調べ、次に部品の重心を

重力方向に投影し接触面内に入ることを確かめる。

- (3) 部品の把握位置算出： 把握位置とは、ハンドの把握中心点に対応する、把握される部品側の点である。言語で記述されない場合には、環境モデルの中のハンド固有のデータを用いて把握の深さを決定し、その把握深さにおいて把握できる場所の中央を把握位置とする。付属語 APART-FROM を記述すれば、特定の面に触れないようにハンドの位置を設定することもできる。
- (4) マニピュレータの軌道生成： マニピュレータの軌道は、(a) アプローチ点までの経由点(複数指定可)、(b) 部品へのアプローチ点、(c) 部品の把握点、(d) アクセス点までの経由点(複数指定可)、(e) 組付位置へのアクセス点、(f) 組付位置点、(g) アクセス点、を順次直線で結んで生成する。ここで、アプローチ点-把握点間距離およびアクセス点-組付位置点間の距離は、ハンドに固有のデータと、ユーザの与えるパラメータにより決定する。
- (5) ロボットの動作実現チェック： 生成されたマニピュレータの軌道上のいくつかのサンプル点において動作の実現チェックを行う。サンプル点は、指定されたパラメータの値を越えない間隔で、各直線軌道を等分割する点群である。各サンプル点ではハンドの位置、姿勢から各関節の変位を算出する。この解を一般的に求めることは難しいので、本システムでは異なる構造のロボットごとに別の算出ルーチンを用意する手法をとっている。算出された変位と、環境モデルのリンクに関する技術情報を照合し、動作の実現をチェックする。
- (6) 衝突チェック： ロボットの作業空間内での物体を、(a) ロボット本体、(b) マニピュレータ、(c) 把握部品、(d) 把握していない部品及び周辺環境、に分類し、干渉の発生する可能性の大きい(a)-(d)、(b)-(d)、(c)-(d)の組合せについて、衝突チェックを行う。まず各対象物の包絡体を用いて粗い干渉チェックを行い、そこで干渉が検出されたとき、実際の形状モデル間の干渉計算を行う。形状モデルによる干渉計算は実行時間で数十 min 以上かかる場合もあるのに対し、包絡体による粗い干渉チェックは数 ms で終わる。包絡体は、環境モデルの要素である PART を生成するときにシステムが自動的に生成する。
- (7) 把握力チェック： 把握対象物をハンドの中で安定させて保持するのに必要な静力学的な力を

Fig. 4 Parts to be assembled

```

PLACE OBJ2
  FINAL(CONTACT F287,F228;
  FIT F276,F243;
  FIT F271,F242);
  GRASP F271,F277;

INSERT OBJ3
  FINAL(ON OBJ2);
  GRASP F265,F269
  (APART FROM F277 IN FINAL);

SLIDE OBJ2
  GRASP F279,F281;

PLACE OBJ4
  GRASP F318,F316
  (APART FROM F271 IN FINAL);

END
  
```

Fig. 5 Assembly program by assembly description language

算出する。ハンドに必要な力は、こじ開けに対する力とすべりに対する力に分類できる。こじ開けに対する力は、力の釣合いより比較的簡単に算出できる。すべりに対する力は、解析的に求めるのは困難なので、ハンドと部品との接触面を細かく分割し、すべりの回転運動の中心を設定し、その回転中心を収束計算によって求める。

4. 実験

本システムを VAX 11/780 上にインプリメントし実験を行った。図 4 に実験に用いた組立部品群のモデルを示す。これらの部品の情報と、初期状態と完成状態の情報、および図 5 に示す組立作業プログラムから

Fig. 6 Display of the simulated results

ロボットの動作を生成した。図 6 にそのシミュレーション結果を示す。

5. 結 論

環境モデルを利用することで、高いレベルの組立作業記述からロボット動作を生成するオフラインプログラミングシステムを開発した。環境モデルの利用により、ロボット動作のプログラミングが簡潔かつ容易に行えることが確かめられた。今後の課題は、オフラインシステムでのセンサ情報の扱い、より高いレベルの作業記述言語の開発、動力学などまで考慮する動作実現チェック機能の拡充などである。

参 考 文 献

- 1) T. Lozano-Perez: Robot Programming, Proc. IEEE, 71, 7, (1983) 821.
- 2) 小笠原 司, 井上博允: 知能ロボット・プログラミングシステム COSMOS, 日本ロボット学会誌, 2, 6 (1984) 507.
- 3) 長谷川 勉: 環境教示と環境モデル, 日本ロボット学会誌, 2, 6 (1984) 599.
- 4) F. Kimura: GEOMAP-III: Designing Solids with Free-form Surfaces, IEEE CG & A, 5, 3, (1984) 58.
- 5) F. Kimura, T. Sata and M. Hosaka: Integration of Design and Manufacturing Activities Based on Object Modeling, Advances in CAD/CAM, North-Holland, Amsterdam, (1983) 375.
- 6) H. Hiraoka, K. Shimada, Y. Taguchi, K. Kondo, S. Yoshida, T. Yokoyama, F. Kimura and T. Sata: Utilization of Environment Models for a Sensory Equipped Industrial Robot, Proc. 15th ISIR, 1, (1984) 113.
- 7) 嶋田憲司, 平岡弘之, 田口 靖, 木村文彦, 佐田登志夫: 環境モデルとセンサ情報にもとづくロボットシステム (第 1 報, 第 2 報), 昭和 60 年度精機学会秋季大会学術講演会講演論文集 (1985) 651, 653.
- 8) T. Sata, F. Kimura and A. Amano: Robot Simulation System as a Task Programming Tool, Proc. 11th ISIR, (1981) 595.