仮想環境での作業から作業内容を複数段階の抽象度 で学習するための一手法*

館 野 寿 丈^{*1}, 井 越 昌 紀^{*1}

A Method for Learning Tasks at some Levels of Abstraction from Human Tasks in a Virtual Environment

Toshitake TATENO and Masanori IGOSHI

We report a method for teaching tasks based on human tasks in a virtual environment and making a database which is used for cases similar to the recorded environment. In order to describe the work environment, a method for representing configurational relationships is proposed. The representation method uses the qualitative states between two primitives. Since the representation is based on primitives, it can be combined with a parts connectivity graph, which can be used to analyze a machine from the topological point of view and represent the structure of a machine hierarchically. The tasks are hierarchically recorded as production rules using these representation methods, and when the structure of the work environment at any level agrees with the data, a new action can be created. Some learning case studies show that the method can be used to create new actions if the orientations and shapes of work objects are different from those in the teaching environment.

Key Words: Robot, Learning, Knowledge Engineering, Virtual Environment, Configuration Space, Parts Connectivity Graph

1. 緒言

ロボットに作業動作を教え込ませるロボット教示は、ロボットコマンドの入力が難しく、簡単な入力方法が求められる。このような背景から、人の挙動を観察し、そこから計算機によって作業を認識させる教示方法が提案されている。池内ら⁽¹⁾は作業環境を写すカメラ画像から、また高橋ら⁽²⁾は計算機に基づく仮想環境での仮想部品群の位置関係の推移から、作業手順を認識させる方法を提案している。しかしこれらの研究は、Pick and Place動作などのあらかじめ決められた動作内容を持ち、この動作内容の組合わせとして作業の手順を教示するものであり、どのように動いたり力を加えるべきかという動作内容自身を教示するものではなかった。新たな動作内容の教示の研究として、小方ら⁽³⁾は仮想環境での対象物の動きをもとに、動作対象物の運動経路を教示する手法を提案している。だが、移動させる部品単体を作業対象物の単位としていたため、複数の部品群を作業対象物として見る手段を持たなかった。人は作業を、物体形状に対する単純な動作を単位

Fig.1 Robot teaching system

とした認知と共に、複数の物体に対する単純な動作の組み合わせをグループ化し、グループを単位とした階層的な認知をしている。そこで本論文では、仮想環境での人の対話的作業から、異なるレベルのグループ単位で動作内容を認識して記録することで、記録に基づいた複数段階での抽象表現による作業指示を可能にする。このように作業例からその内容を一般化し、再利用性が高いルールとして記録することは、知識工学における知識の獲得に相当し、一種の学習と言える。

本研究での作業指示システム全体は図1に示すようになる。但し、本論文では実動するロボットについて言及せず、動作指令によって正しく作業できるロボットがあることを前提としている。本研究での特徴は、作業環境のモデル（環境モデルと呼ぶ）である仮想環

* 原稿受付 1996年3月21日。

^{*1} 正員、東京都立大学工学部 (〒192-03 八王子市南大沢1-1)。

境の定性的な表現と、仮想環境で行われた指示を局所化および階層化して抽出するところにある。環境モデルの表現は、部品の構造および空間的な位置関係をC-Space⁽⁶⁾の概念を応用して、相対的かつ定性的な表現で定義している。局所化操作は、環境モデル全体から対象とする作業に関連する部分を抽出することであり、定性的運動シミュレーション⁽⁴⁾⁽⁹⁾を利用した計算機による説明⁽³⁾機能を利用している。階層化操作は、機械構造を階層的に表現する接続グラフ⁽⁶⁾を用いて、作業を体積素レベル、部品レベルといった形に構造化する。階層表現された作業記述は、異なる抽象度による作業ルールデータベースとして蓄積され、のちに異なる環境での動作生成に利用される。

2. 作業の表現

2.1 機械構造表現 人への作業指示は作業対象を抽象表現した形でされることが多いが、その抽象度は時によって異なる。たとえば、“タイヤを取り外す”という抽象度の高い表現は、“ねじを外す”などという具体的な複数の作業の組み合わせで示すこともできる。こういった作業の抽象表現による作業教示を可能にするには、機械構造を階層化して表現した情報を持つことが必要である。機械を機能の観点から階層構造化した研究に接続グラフ⁽⁶⁾がある。接続グラフとは形態を要素として点で示し、形態要素間の接触や隣接などの相互関係を枝で結んだグラフである。面素を要素とし、その隣接関係を枝としたグラフが面素接続グラフである。体積素は隣接関係にある面素の集まりからなる基本的な形状を持った立体であり、この体積素を要素とし、接続関係を枝としたグラフが体積素接続グラフである。同様に、部品を要素とし、部品どうしの接触を枝としたグラフを部品接続グラフ、固定されている部品群からなる固定複合体を要素とし、相互運動を枝としたグラフを固定複合体グラフと呼ばれる。このとき面素が集まって体積素を作り、体積素が部品、部品が固定複合体、固定複合体が単純な機械（ユニット）を作るという階層性を有しており、下位のグラフが上位のグラフの点となるという一貫した性質を持っている。

このグラフの持つ特性は図2に示すように、上位のグラフでの要素となる領域が、一つ下位の複数の領域を完全に包含しているという意味を持つことを示している。本研究ではこの階層的な領域区分の性質を利用する。作業に関連する環境モデルをこの領域区分を単位にすることで、階層的な環境モデルを定義でき、つまりは作業を異なる抽象度で表現できることになる。

Fig.2 Machine structure

2.2 配置関係の表現 上記の接続グラフは機械を位相的に表現する概念なので、面どうしの接続関係のみを記述するため、面どうしの位置関係を表現していない。そこで、本研究ではこの接続グラフに位置関係表現を加えることで、部品の構造を位相的と位置的に各階層で表現できるようにする。

本研究では、動作内容は対象物の相対的な位置関係によって決まり、対象物の大きさの多少の違いにはあまり影響を受けないことを考慮し、考慮対象の2つの対象物を参照体と比較体として、これらの相対位置を定性的な値で表現する。これを配置関係と呼ぶ。

部品群の配置関係を表現する方法にC-Space⁽⁶⁾がある。この方法は移動する部品である運動部品(moving object)の、動かない部品の集まりである環境部品(obstacle)に対する位置を、相対座標である配位空間(C-Space)上の点として表現する。Donald⁽⁷⁾は、形状が凸多面体である場合、配位空間を式(1)の組み合わせから生ずる半空間(C-function)の集合によって統一的に表現する方法を示し、この表現方法を用いて運動部品の経路探索を行っている。

$$C\text{-functions}(A,B)=(\text{faces}(A)\times\text{vertices}(B))\cup(\text{vertices}(A)\times\text{faces}(B))\cup(\text{edges}(A)\times\text{edges}(B)). \quad (1)$$

where

A is a convex polyhedron on the moving object

B is a convex obstacle polyhedron

また小方ら⁽⁸⁾は、運動部品がこの半空間の上下どちら側に位置するかで運動部品の定性的位置を表現できる特性を利用し、仮想環境で移動された部品の経路を記述してロボットへの経路教示内容とした。

本研究でも、同様に環境モデルを定性的に表現するが、作業の対象物である運動部品と動かされない物体である環境部品として区別せず、存在する物体を構成する全ての体積素間の関係で表現しておき、前述した機械の構造を基準に選択した領域での関係表現を、環

境モデルとして利用する。体積素は、機械の形状的な意味でも機械のモデルを構成する基礎的なモデルであり、集合演算により、部品や固定複合体の形状を構成できる。

2.3 作業の階層表現 作業は作業前後での部品どうしの配置関係で記録するが、ここで機械を構成する形態の各階層での機械の部分を単位に表現した配置関係を、各階層での環境モデルと呼ぶことにする。作業の記録にはこの環境モデルに加え、特殊な運動や力の大きさなどの記述を併記することができるが、本論文では作業記録の基礎表現となる環境モデルを用いた作業表現に関してのみ述べる。

ここでの作業は分解作業を対象とし、組み立てられた機械の各形態層の接続グラフと部品の形状モデルがあらかじめ作られているとすると、作業はつぎのように記録される。まず仮想環境での作業から3.1項で示す方法によってその作業に関連する面及び稜線が選ばれる。これらを局所化された面素と呼ぶことにする。その局所化された面素の全ての組み合わせの配置関係によるグラフを面素レベルの局所環境モデルとする。体積素レベルの環境モデルは選ばれた面を含む体積素を構成する全ての面素関係を持った記述となる。同様に部品レベル、固定複合体レベルでも選ばれた面を含む部品、固定複合体を構成するすべてのレベルの形態間での局所環境モデルが記述される。この局所環境モデルはそれぞれ固有の識別子がつけられ、作業前の環境モデルと作業後の環境モデルとしての識別子を持つことによって一つの作業スキーマとして記録される。このように記された記録はデータベースとして保存され、作業前の環境に等しい状態であることが見つければ、別の環境であっても記録されている動作によって作業後の環境に等しくさせる可能性があることを示す。

ある機械の部分であるすべての面素に $f_1, f_2, \dots, f_j$ 、体積素 $v_1, v_2, \dots, v_k$ 、部品 $p_1, p_2, \dots, p_l$ 、固定複合体すべてに $c_1, c_2, \dots, c_m$ という識別番号をつけるとする。ここで面素とは一つの面を構成する面分及び稜線であり、体積素は面素、部品は体積素、固定複合体は部品を要素とする集合族とする。すなわち面素、体積素、部品、固定複合体は、これらを構成する面分と稜線の集合である。

局所化された面素の集合を $F=\{f_i\}$ とすると、面素レベルの環境モデルは式(2)の関係で示される。

$$\text{config-f}(F) = (\text{faces}(F) \times \text{faces}(F)) \cup (\text{edges}(F) \times \text{faces}(F)) \quad (2)$$

ここで、 $\text{faces}()$, $\text{edges}()$ は引数の集合を構成するそれぞれの面分と稜線を表す。

この局所化された面素の集合 F の要素を少なくとも一つ含む体積素すべての集合を、局所化された体積素の集合 V とすると、式(3)で定義し、

$$V = \{v_i \mid F \cap v_i \neq \emptyset\} \quad (3)$$

体積素レベルの環境モデルは式(4)の関係からなる。

$$\text{config-v}(V) = \text{config-f}(V) \times \text{config-f}(V) \quad (4)$$

同様に局所化された部品、固定複合体の集合 P, C は、式(5),(6)で示され、部品レベル、固定複合体レベルの環境モデルは、式(7),(8)の関係からなる。

$$P = \{p_i \mid F \cap p_i \neq \emptyset\} \quad (5)$$

$$C = \{c_i \mid F \cap c_i \neq \emptyset\} \quad (6)$$

$$\text{config-p}(P) = \text{config-v}(P) \times \text{config-v}(P) \quad (7)$$

$$\text{config-c}(C) = \text{config-p}(C) \times \text{config-p}(C) \quad (8)$$

上の式からも分かるように、形態のレベルが高いほど、環境モデルの定義域が広がっていく。このため記録容量や、データベースとして利用するときの探索空間の問題から、常に全ての階層の記述をすることが良いとは限らない。必要に応じた階層での記述を選んで、データベースに残すことが必要だが、逆にこのことは容量を限度として記述を選択できることを示している。

3. 作業の抽出

3.1 作業の局所化 ここでは、仮想環境での作業から、作業に関係する機械の部分としての面素を抽出する方法を示す。ある作業に関わる機械の部分は、対象機械全体に比較して狭いものであるが、その範囲は単に作業が行われている点からの距離的な関係から求められるものでなく、作業内容によって注目範囲は異なる。我々は、この注目範囲を捉えるために、力の因果関係を定性的に導くことで捉えることとする。本論文での定性的運動シミュレーション⁹⁾は、運動方向を x, y, z 軸に平行にとり、ある方向に運動の可能性が問われたとき、動くか動かないかいずれかの情報を結果として返すものである。面素が動くか動かないかは力が加えられた面素に接触している他の面素によって決定される。すなわち接触している面素が可動であれば、判断対象となっている面素も可動であると考え、判

断は接触している面素に次々に伝播し、結局、絶対固定があれば不動であり、接触する面素が元の面素以外に無くなったとき可動として判定され、すべての接触している面素での判断が済んだところで、最終的な判断が下される。この伝播に関わった面素がその作業に必要であった面素であるとする。この可動判別処理は再帰関数によって実現される。この関数は体積素単位に可動判別するが、体積素間の干渉判別は式(2)にある関係調べることで行われるので、最終的には面素単位の力伝播の経路を求めることができる。判別対象の体積素 V_i が方向 S に対して可動かを判別する関数 $R(V_i, S)$ は、次の式からなるアルゴリズムによる。

```

R(Vi, S)                                     (9)
  If Vi ∈ FixedParts then FALSE              ①
  P(Vi) ← P(Vi) + δ S                       ②
  If Interfere(Vi) = ∅ then SUCCESS           ③
  If ∀ j, Vj ∈ Interfere(Vi), R(Vj, S) is SUCCESS ④
    then SUCCESS
  If ∃ S', S' ≠ S, R(Vi, S') is SUCCESS      ⑤
    then SUCCESS
  FALSE                                       ⑥
End
    
```

ここで $P(A)$ は体積素 A の位置、FixedPartsは絶対的に固定とされている体積素の集合、Interfere(A)は体積素 A と干渉状態にあるか、 A と結合した関係にある体積素の集合を示す。各ステップは次の内容を示している。

- ①判別対象の体積素が固定とされていれば運動不可。
- ②判別対象の体積素が期待される運動方向へ微小単位移動することを仮定する。
- ③他の体積素との干渉もしくは結合がなければ可動。
- ④干渉もしくは結合している他の体積素がすべて可動であると判別されるとき、判別対象の体積素は可動。
- ⑤異なる方向への運動を伴うことで、判別対象の体積素が可動になる方向が存在すれば、その運動を仮定した上で、判別対象の体積素は可動。
- ⑥上の条件をいずれも満たさなければ不動。

以上の推論において運動の伝播に関わった面素は、その作業に関係する面素として抽出される。この伝播の操作を説明と呼ぶ。Forbus⁽⁹⁾らは定性的シミュレーションを用いて挙動を説明するSelf-explanationを提案している。本研究での操作は力の伝播という観点から、定性推論によって作業を説明し、この作業に関係する部分の抽出を行ったことになる。

3.2 ルールとしての作業記述 作業は、データベースとして有効な形でのルールとして記録される。ルールは2種類あり、一つは環境モデルの静的な状態

Fig. 3 Flow for generation of task and environment rules

を表現していて、その作業記録が適用できるか否かを判断するためのルールであり、もう一つは環境モデルの変化を表現していて、その作業によってどのような運動が生ずるかを示している。前者を環境ルールと呼び、後者をタスクルールと呼ぶことにする。

ルール生成のフローチャートを図3に示す。まず、仮想環境の形状モデルデータに基づいた配置関係を記録する。この段階ではすべての面素間の関係が配列の形で記録されている。仮想作業を行い、配置関係が変化したなら、変化後のすべての面素間の関係を記録する。この操作を作業終了の信号が入力されるまで、繰り返す。次に局所化によって領域を選択した後、これらの記録から実体名を除き、形態間の関係性のみをルールとして記録する。環境ルールは対象とする形態の継続関係と配置関係で表現し、タスクルールは環境ルールでの初期の環境ルール、継続関係、終了時の環境ルールが作業名によって関係づけられて記録される。

4. ケーススタディ

4.1 代表的な体積素間の配置関係 機械形状のモデルとなる体積素として何を選ぶかは任意性があるが、次の理由から直方体と円柱（両端面と円筒面からなる）を採用し、これらの配置関係を定義する。

- 1) 機械部品の形状が直方体と円柱から生成できる場合が多い。
- 2) 軸対象の形状であるので、座標軸の異なる向きから見ても同一視し易い。
- 3) 機械部品の分解組立作業に回転対偶からなる部品

を動かす作業が多く含まれるので、円柱の多面体近似では不十分である。

つまり式(1)のように一般的な形状の配置関係を表現するのではなく、体積素を単位に配置関係を表現する。こうすることで、素形状の種類は限定されるが、式(1)で表現されなかった円筒面を含むことが可能になる。また、2つの体積素間の配置関係はそれぞれの体積素のもつ全ての面どうしの関係から成り、同様に2つの部品、固定複合体間の配置関係はそれぞれの部品、固定複合体を構成する全ての体積素、部品どうしの関係によって定義できる。すなわち配置関係を体積素形状を単位として表現することで、部品接続グラフと融合でき、機械を構成するそれぞれの形態について階層別に配置関係を定義できるようになる。

直方体と直方体、円柱と円柱、円柱と直方体の配置関係は、それぞれの持つ面の相対位置関係によって次のように定義する。ただし、本論文では、体積素の中心軸はx,y,z軸いずれかに平行であると限定する。

(1) 直方体と直方体

本論文での直方体のすべての面は、x,y,zのいずれかの軸に垂直であるので、直方体どうしの接触は、平面のすり合わせの接触に限られ、平面間の関係を定義することで、体積素間の関係を定義できる。参照体の全ての面と、比較体の全ての面との関係によって体積素間の関係が表現できる。平面と平面の関係はそれらの持っている法線ベクトルと平行な法線ベクトルを持つ平面に対してのみ配置関係を表現する。ある参照体の一つの面である参照面に対する比較体の一つの面である比較面の配置関係の定義として、参照面の法線ベクトルの向きに比較面が存在する場合は正、反対向きの方向に存在する場合には負、面が重なった状態では0の関係であるとする。概念的には図4のようになる。ただし、実体側から外向きを正とした法線ベクトルをあらかじめ用意しておく。

図5に示すように、参照面の法線ベクトルを v 、平面上の点を示す位置ベクトルを A 、比較面上の中心点を示す位置ベクトルを B とすると、関係式 F_s によって配置関係 R を表現し、式(10)とする。

$$F_s = \langle v, B-A \rangle \quad (10)$$

$$\text{If } F_s < 0 \text{ Then } R = '-'$$

$$\text{If } F_s = 0 \text{ Then } R = '0'$$

$$\text{otherwise } R = '+'$$

ただし、 $\langle \rangle$ は内積を示し、 $'$ は配置関係を表すシンボルを示す。

Fig. 4 Representation of configuration between faces

Fig.5 Relation between two cuboids

Fig. 6 Relation between two cylinders located in non-parallel axis

Fig. 7 Relation between two parallel cylinders

(2) 円柱と円柱

円柱を定義することで、円柱を構成する円筒面を利用した運動伝達機構や回転案内などを含む対偶機構を表現できる。これらの対偶は円柱の中心軸が平行な時であるので、この関係の時のみ、2つの物体をそのまま円柱とみなし、それ以外の関係である場合は、図6のように円柱を包含する直方体と直方体の関係として簡易化して扱う。

また円柱の中心軸が平行である場合、円柱は端面の円と側面の円筒面から成るが、端面の円は図7(b)のよ

うに包含する正方形平面として扱い、式(10)を利用して端面どうしの関係を導く。2つの円柱の2つの円筒面間の配置関係は、中心軸間の距離とそれぞれの円筒面の半径の関係から導く。本論文では円柱の中心軸が平行である場合の端面と円筒面の関係は考慮しない。

円筒面どうしが接触するのは、外接もしくは内接のいずれかであり、これらの接触関係から見たときに正、0もしくは負のいずれであるかが判断できればよい。円筒面の法線ベクトルは、平面の法線ベクトルと異なり、方向が変化するので、円筒面どうしの関係は、平面どうしの関係と異なる定義が必要になる。

図7(a)に示すように、参照体の円筒面の中心位置ベクトルをA、円筒半径を r_a 、比較体の円筒面の中心位置ベクトルをB、円筒半径を r_b 、参照体の中心軸から比較体の中心軸への距離を最短にとる方位を向いた単位ベクトルを v とし、次のように外接、内接の関係式 F_o, F_i を定義する。

In case of cylinders

$$F_o = (r_a + r_b)(\langle v, B - A \rangle - |r_a + r_b|) \quad (11)$$

If $F_o < 0$ Then $R_o = '-'$

If $F_o = 0$ Then $R_o = '0'$

otherwise $R_o = '+'$

$$F_i = (r_a - r_b)(\langle v, B - A \rangle - |r_a - r_b|) \quad (12)$$

If $F_i < 0$ Then $R_i = '-'$

If $F_i = 0$ Then $R_i = '0'$

otherwise $R_i = '+'$

ここで、円柱が中実体の場合を正の半径を持つものとし、その逆を半径が負とする。

(3) 直方体と円柱

直方体と円柱の関係を定義することで、円柱の直方体に対する転がり対偶や、円柱を直方体の角を利用して安定させる機構を表現できることになる。前者の位置関係は、実の直方体と円柱を包含する直方体の接触した位置関係に等しい。しかし、後者の関係では、直方体の稜線と、円柱の円筒面の接触となり、この関係の定義が必要となる。そこで、直方体と円柱の配置関係は、実の直方体と図8(b)のように円柱を包含する仮定した直方体の関係、及び円柱の中心軸に平行な全ての稜線と円筒面の関係で定義する。但し、稜線と円筒面の関係は必ず稜線側を参照体とする。また、稜線と円柱の端面の関係は考慮しない。

ここでは参照体上の一つの稜線と、比較体の円筒面の関係を定義する。図8(a)に示すように稜線の中点の

Fig.8 Relation between an edge and a cylinder

位置ベクトルをA、円柱の中心位置ベクトルをB、稜線から円筒面の中心軸を向く単位ベクトルを v 、円筒半径を r とすると、稜線と円筒面の関係 F_e は次のように示される。

$$F_e = r(\langle v, B - A \rangle - |r|) \quad (13)$$

If $F_e < 0$ Then $R_e = '-'$

If $F_e = 0$ Then $R_e = '0'$

otherwise $R_e = '+'$

ここでも、円柱が中実体の場合を正の半径を持つものとし、その逆を半径が負とする。

以上で直方体と直方体、円柱と円柱、直方体と円柱の関係に関わるすべての組み合わせの2つの面もしくは稜線と面の関係を定義できることになる。これらの関係の集合が、体積素間関係となり、またその集合が部品間関係、固定複合体間関係となる。

4. 2 作業記述例 簡単な3次元モデル p_1, p_2 を図9のように2次元で考えるとする。まず面素の接続関係の記述から次のようにprolog記述による接続関係データの登録をする。例えば、 $cuboid(v_1, f_1)$ は面素 f_1 が、直方体の体積素 v_1 に属していることを示し、 $part(p_1, v_1)$ は体積素 v_1 が部品 p_1 に属していることを示す。

Fig.9 An example of parts in two dimension

ハンドリングをするための仮想の工具をピンの上面に接触させると仮想の接着関係が生ずるようになってい。作業例として図10のように、はめ込まれているピンを垂直に引き抜く動作と、水平に移動させる動作

ピンを垂直に引き抜く動作と、水平に移動させる動作がされると、工具を装着している面を初めとして可動判別がされ、絶対固定の記されている面まで力の伝播が繰り返される。この例では図10の伝播を通じて作業に関係する面の集合が求められる。

Fig.10 Parts and work example in two dimension

環境表現である配置状態の表現は、局所化された面素は法線ベクトルの平行な面素の集合となることが多いので、面素レベルでの環境モデルはまとめて、図11のように記される。ここで例えば $m(F3, F7, \text{Axis})$ は図11に示した $f3$ を参照面とした $f7$ との配置関係から生じた記述であり、 m は $'$ 、 z は 0 、 p は $+$ の関係を示している。 $m(F7, F3, \text{Axis})$ の関係は $m(F3, F7, \text{Axis})$ の関係と同じなので省略している。また、 $F3, F7, \text{Axis}$ はいずれも変数であり、他の面素や、軸方向を代入して評価することができるルールとしての記述である。つまり代入された面群の配置関係が記述に等しければ単一視(Unification)が成功する。体積素、部品レベルでの環境表現も図12、図13のように対象部分の構造を記録することで、環境ルールの記述となる。

仮想作業によって $p1$ がとりはずされると、この作業に関する面素、体積素、部品レベルの作業表現は、各レベルでの環境モデルの変化によって表される。ここで作業名としてhazusuという作業名をつけるとすると、部品レベルの作業は図14に示すようなタスクルールとして記録が自動的にされる。

図14の節①と節④は作業の始まりと終わりにつけられ、主要な動作は節②や節③に示すような環境の変化として記録される。節②は図9の部品が初期状態(rel-part1)から引き上げられた状態(rel-part2)へ変化し、節③は引き上げられた状態(rel-part2)から移動後の状態(rel-part3)を示している。このように記述しておくことで、部品名と作業名が与えられれば、以前に行った作業と同様の作業を、現在の機械の構造から判断し、動作生成することが可能になる。

Fig. 11 Representation of face level relations.

Fig.12 Representation of volume level relations.

Fig.13 Representation of part level relations.

Fig. 14 Representation of a work model on part level.

Fig.15 Teaching Examples

4. 2 指示例 作業教示実験として3次元のモデルとして図15(a)の形状を生成し、ピンを抜いて移動する作業を教示し、このデータによって図15(b),(c)で環境で同じ動作を生成させた。図15(b)は部品的大小及び設置方向が異なっているが、ピンを手前に引き右に移動させる作業を実行できた。図15(c)はp2の部品についたてが付属する場合である。体積素レベルでは動作生成できるが、ピンがついたてに干渉する恐れがある。しかし部品レベルでは、部品の構造が異なるので、記録された動作は当てはまらない。もし、ついたてを含んだ環境で教示が行われていれば、正しい動作が生成される。このことは、レベルの高い階層で記録された作業ほど、異なる環境での作業に当てはめる条件が厳しくなるが、正しい作業をする動作を生成できる可能性が高くなることを示している。このように同じ作業内容を階層別に複数の動作手段を持つことは、求められた作業に対して実行可能性の高い順に生成する上でも有効であることがわかる。

5. 結言

(1) 接続グラフでの機械の位相表現と、配位空間を利用した配置関係表現によって、機械部分の構造と配置関係を、階層的にかつ定性的に表現する方法を提案した。

(2) 作業を、作業対象部分の配置関係の変化として定義し、作業対象部分の構造に依存した階層別に表現する方法を提案した。

(3) 定性推論を用いて、作業に関連する作業対象を力の連鎖の観点から抽出する方法を提案した。

(4) 仮想環境での作業の記録から、作業内容をルールとして生成するための方法を示した。

(5) 提案した方法を用いて、仮想環境での作業の記録に基づいて異なる環境で新たな動作を生成できるシステムを構築し、ケーススタディによって実用性を示した。

このシステムの利点は従来手入力によって作られてきたプロダクションルールを幾何的情報と仮想作業から生成できることにある。そのためこのシステムをCADと結合させることが今後の課題である。

参 考 文 献

- (1) Ikeuchi, K., Suehiro, T., *IEEE Trans. Robot. & Auto.*, 10-3, (1994), 368-385.
- (2) Takahashi, T., Ogata, H., *Proc. of IEEE*, (1992), 1083-1088.
- (3) Forbus, K., Falkenhainer, B., *Proc. of AAAI*, (1990), 380-387.
- (4) 劉, ほか2名, 機論, C-62(1995), 2159-2166.
- (5) 吉川・北嶋, 精密機械, 45-9(1979), 71-78.
- (6) Lozano-Perez, T., *IEEE Trans. Comp.*, 32-2, (1983), 108-120.
- (7) Donald, B.R., *Artificial Intelligence*, 31, (1987), 295-353.
- (8) 小方・高橋, 日本ロボット学誌, 11-3, (1993), 142-150.
- (9) 館野・井越, 精工学誌, 62-8, (1996), 1182-1186.