

## 5 状態遷移方式における事例教示

### 5.1 はじめに

第4章では行動選択方式で作業を行なうロボットに対して教示事例から移動操作作業のルールを作成する手法を検討し、その有効性を確認した。本章では状態遷移方式を用いたロボットに関して同様の検討を行なう。

第5.2節では状態遷移方式におけるルール作成法の概要を説明し、第5.3節では教示事例からルール作成を行なう上での課題を述べる。

第5.4節では状態遷移方式を用いた場合の教示モジュールのシステム構成を説明する。第5.5節では教示モジュールにおいて仮想現実感を用いた教示インタフェースを用いることを検討し、実験系を組んでその効果を確認する。

第5.6節では教示モジュールで教示されたデータから実行ルールを作成する方法を検討し、シミュレーションによってその有効性を検証する。

第5.7節では未整備環境の不確定性を考慮した場合に、データを対応付けることで、異なる環境の間で事例教示データを活用する方法を述べる。

第 5.8 節では本章で検討した手法を統合し、事例教示を行なった場合の、状態遷移方式による移動操作作業を実現する手順を示す。

第 5.9 節では第 5.8 節の方法に基づいて、状態遷移方式で操作を行なうロボットが未整備環境で有効に作業を行なえることを実験により確認する。

## 5.2 状態遷移方式における事例教示

第 4 章では行動選択方式で作業を行なう移動ロボットに対して作業のルールを作成する方法について検討した。ここでは状態遷移方式でマニピュレータを動作させた場合について同様の検討を行なう。

状態遷移方式の場合も行動選択方式と同様に事例教示からルールの作成をめざす。状態を検出して操作を決定する点も行動選択方式と共通なので、ルールの条件部において状態を記述するための拘束という概念を持ち、状態プリミティブや拘束空間の概念も用いることが可能である。ただし、ルールの実行部の内容は、どの行動を選択するかではなく、どのような新たな拘束条件を満たす状態に遷移するかという記述になる。

遷移を実現するコマンドとしては、産業用マニピュレータで一般的に用いられている MOVE\_LINE および MOVE\_JOINT コマンドを主に考える。

MOVE\_LINE コマンドとはマニピュレータの手先を現在の位置・姿勢から目標の位置・姿勢まで直線的に移動させる操作である。姿勢も現在の姿勢から目標の姿勢まで同じ割合で回転させることで操作する。MOVE\_JOINT コマンドはマニピュレータの現在の姿勢から目標の姿勢まで同じ割合で関節を動かすことによって移動する操作である。マニピュレータが MOVE\_LINE コマンドで移動する軌跡は同じ姿勢表現を使用している手先の位置・姿勢で表現した状態空間ではほぼ直線とみなせる。これを便宜的に手先の状態空間と呼ぶ。また、マニピュレータが MOVE\_JOINT コマンドで移動する軌跡は関節角空間でほぼ直線とみなせる。したがって、MOVE\_LINE, MOVE\_JOINT

コマンドを用いる場合はそれぞれ手先の状態空間、関節角空間で考えると都合がよい。

### 5.3 状態遷移方式におけるルール作成の課題

状態遷移方式における事例教示で得られる情報は、ある状態プリミティブからどの状態プリミティブに遷移するかである。行動選択方式の方法を踏襲するならば、これらの状態プリミティブから無効な拘束を削除することで、効率的にルールを作成する。

しかし、状態遷移方式においてルールを作成するのに、行動選択方式の方法を踏襲するといくつかの不都合が生じる。

行動選択方式の場合には、事例教示によって状態プリミティブに対して行動が割り当てられる。そして、同じ状態に属するであろう近傍の状態プリミティブには同じ行動が割り当てられることを利用して無効な拘束を削除し、ルールを作成した。

状態遷移方式の場合、この考え方にならうならば、同じ状態に属するであろう近傍の状態プリミティブからは、同じ状態に遷移すると考えられる。しかし、状態は事例教示を行なったときには未知であり、遷移先は状態プリミティブの形でしか得られないため、同様の方法をとることは困難である。そこで、状態遷移方式を用いる場合はルールを作成するのに別の方法を考える必要がある。

ここでは、まず事例教示の方法を述べた後、その課題への対処法を検討する。

### 5.4 教示モジュールの構成

本節では状態遷移方式において事例教示を行なうための教示モジュールの構成を述べる。

教示モジュールは、基本的には行動選択方式の場合と同様に、センサ部、モデリング部、教示インタフェース部、遷移記録部、エフェクタ部、および環境データベース、マナーデータベースから構成される (Fig. 5.1)。

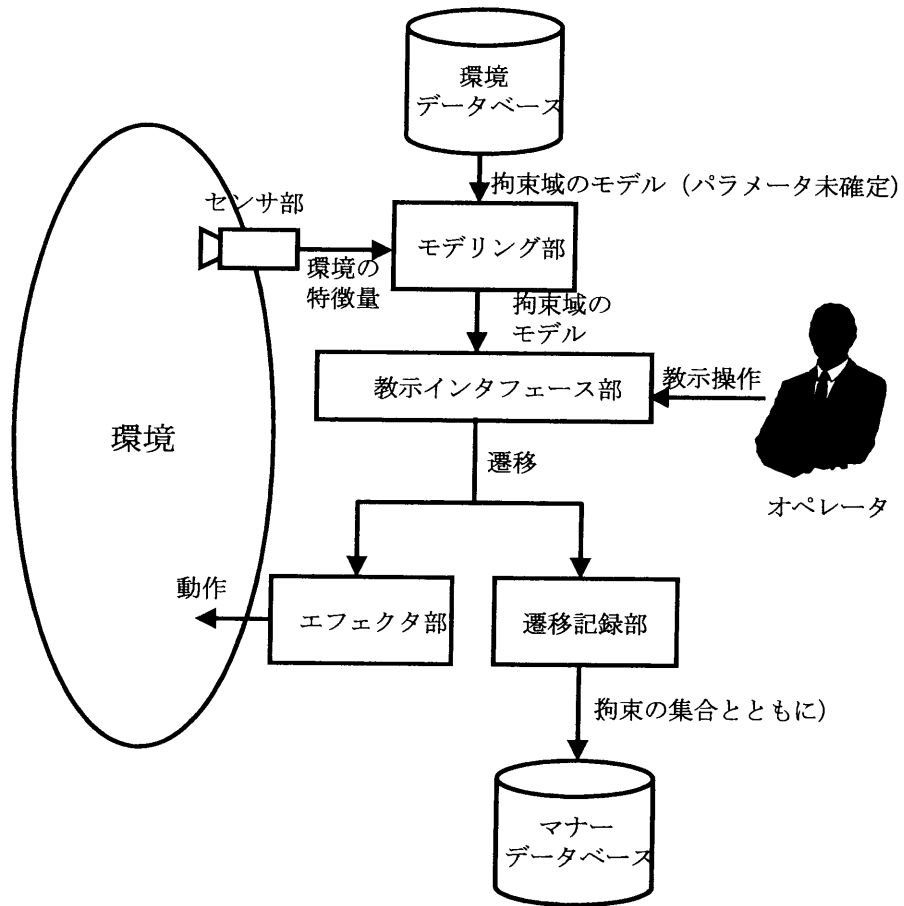


図 5.1: 教示モジュールの構成

センサ部は環境の特徴量を観測し、ベクトルとして出力する。モデリング部はセンサ部から入力された特徴量ベクトルから、現在ロボットが属している拘束域を判定し、環境データベースのデータからローカルな環境のモデリングを行なう。この手順は第3.2.3節で述べたとおりである。

オペレータは環境におけるロボットの状況を観察しながら、教示インタフェース部を通じてそのときロボットが実行すべき遷移を教示する。ただし、オペレータの教示方法は、行動選択方式のときのような行動リストから選択する方式とは異なる。オペレータが次に遷移すべき状態を教示するのが最も直接的な方法だが、一般にオペレータにとって状態は直感的な認識が困難なので、オペレータが状態を意識せずに教示動作を行い、その教示動作からある状態から次に遷移する状態を検出するような間接的な方法を考える必要がある。

オペレータの教示した遷移は遷移記録部とエフェクタ部に出力される。行動記録部は教示インタフェースからオペレータの教示した遷移を受け取り、その遷移元と遷移先の状態プリミティブのペアをマナーとみなして、マナーデータベースに蓄積していく。エフェクタ部はオペレータの教示操作に基づいてロボットを動作させる。

## 5.5 仮想現実感を用いた教示インタフェース

### 5.5.1 仮想現実感を用いた教示インタフェースの特徴

本節では、オペレータが状態を意識せずに教示動作を行い、その教示動作からある状態から次に遷移する状態を検出するような教示インタフェースについて検討する。

第4章ではロボットを実環境で直接操作することで実例教示を行なった。一方、実例教示を実環境で行わず、仮想現実感を用いた方式も考えられる。

仮想現実感 (virtual reality) は、計算機に記述された仮想的な世界に対して画像、力覚、音声などを利用したインタフェースを介してインタラクションを行なうもので

ある。

従来、仮想現実感の利用形態は専ら計算機内に閉じた世界を扱う [35] か、テレロボティクスのようにオペレータが時間差をおかずに直接外界とやりとりするタイプ [56][32] のいずれかであった。ここで用いる仮想現実感を用いた教示インタフェースはオペレータが計算機内の世界とやりとりした上で、それを外界に適用する方式であり、従来の利用形態とは異なる。

教示インタフェースに仮想現実感を用いることにはいくつかのメリットが存在する。

- 計算機内に環境モデルが直接作成され、教示もその環境モデル上に直接なされるので、センサを通じて環境を取得するときのモデル化誤差やオペレータの動作の誤認識によるノイズなしにデータが取得可能である。
- 実環境での操作がないので、実際に部品を用意する必要がなく、プロトタイプ作成の工程が省略可能である。
- 現場で教示作業を行う必要がない。したがって、工場の生産ラインで作業するマニピュレータ等への適用を前提とした場合には、現場の作業が中断されることがなく、マニピュレータの効率的な運用が可能というメリットが生じる。

そこで、ここでは仮想現実感教示インタフェースにより事例教示を行なう方法を検討する。

### 5.5.2 仮想現実感教示インタフェースの構成

本研究で製作した仮想現実感教示インタフェースの構成を述べる。

この仮想現実感教示インタフェースは head-mounted display (HMD)、手形状入力装置、および仮想環境の表示や教示データの取得などの情報処理を行なう計算機か

ら構成される (Fig. 5.2)。

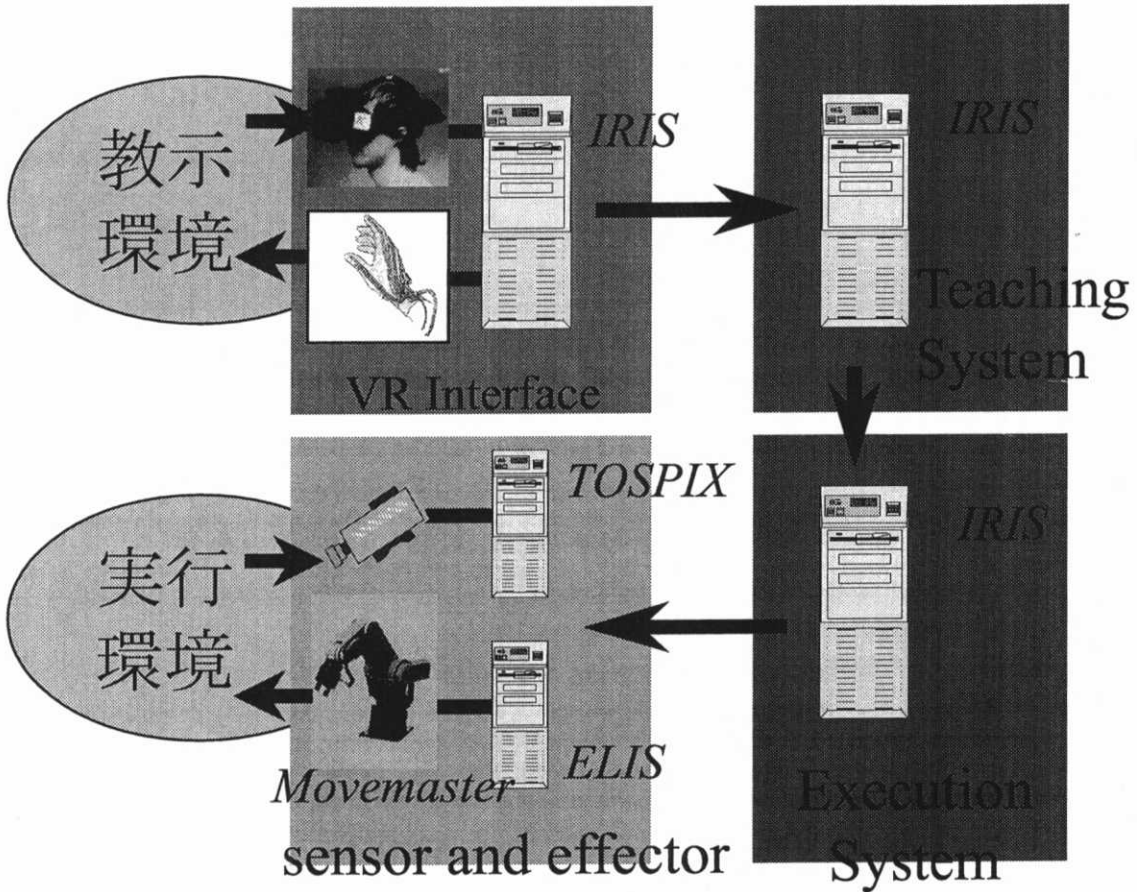


図 5.2: 仮想現実感を利用した教示インターフェースの構成

オペレータは頭部に装着した HMD によって計算機内に作成された仮想環境の様子を両眼立体視で見ることができる。また、手形状入力装置を用いて、その仮想環境に存在する物体をつかんで動かすなどの操作を行なうことができる。

### 5.5.3 仮想現実感教示インタフェースによるオペレータ操作の認識

オペレータが移動操作をどのように行なっているか知るには、教示によってオペレータがどの部品をつかんでどのように動かし、どの場所で離れたか知る必要がある。本インタフェースでは、このような操作をオペレータの手の形状と位置、および環境物体や操作物体の位置をもとに認識する。

手の形状が同じ場合でも、操作物体をつかむ動作と空中で手を握る動作のように異なる目的の動作が存在する (Fig. 5.3)。また、一旦操作物体をつかんでも、もとの場所に戻すような無効な動作も存在する。そのため、オペレータの操作を解釈するには、手形状の識別の他に、操作物体や環境物体の位置・姿勢や、物体間の位置関係など作業環境を考慮する必要がある。

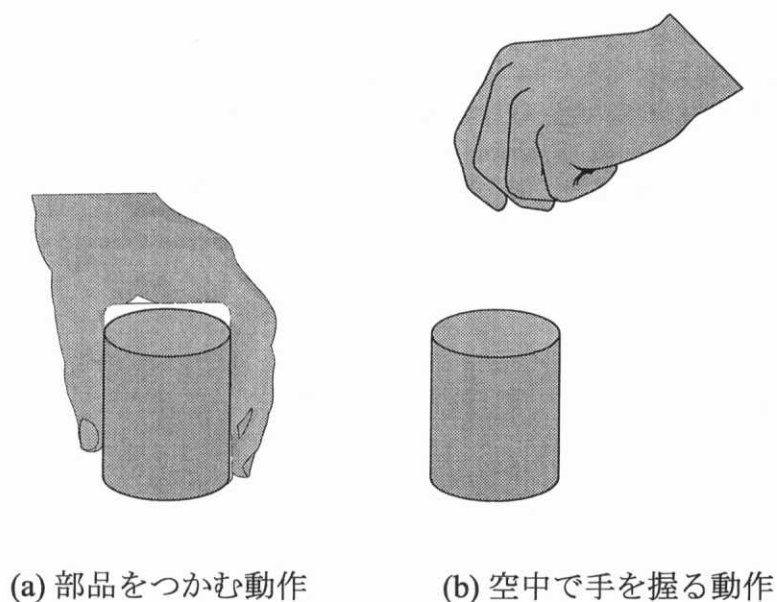


図 5.3: 手の形状が同じだが動作の異なる例

ここでは作業に応じて定義した有限オートマトンで受理された手形状を、有効な操作として解釈した (Fig. 5.4)。



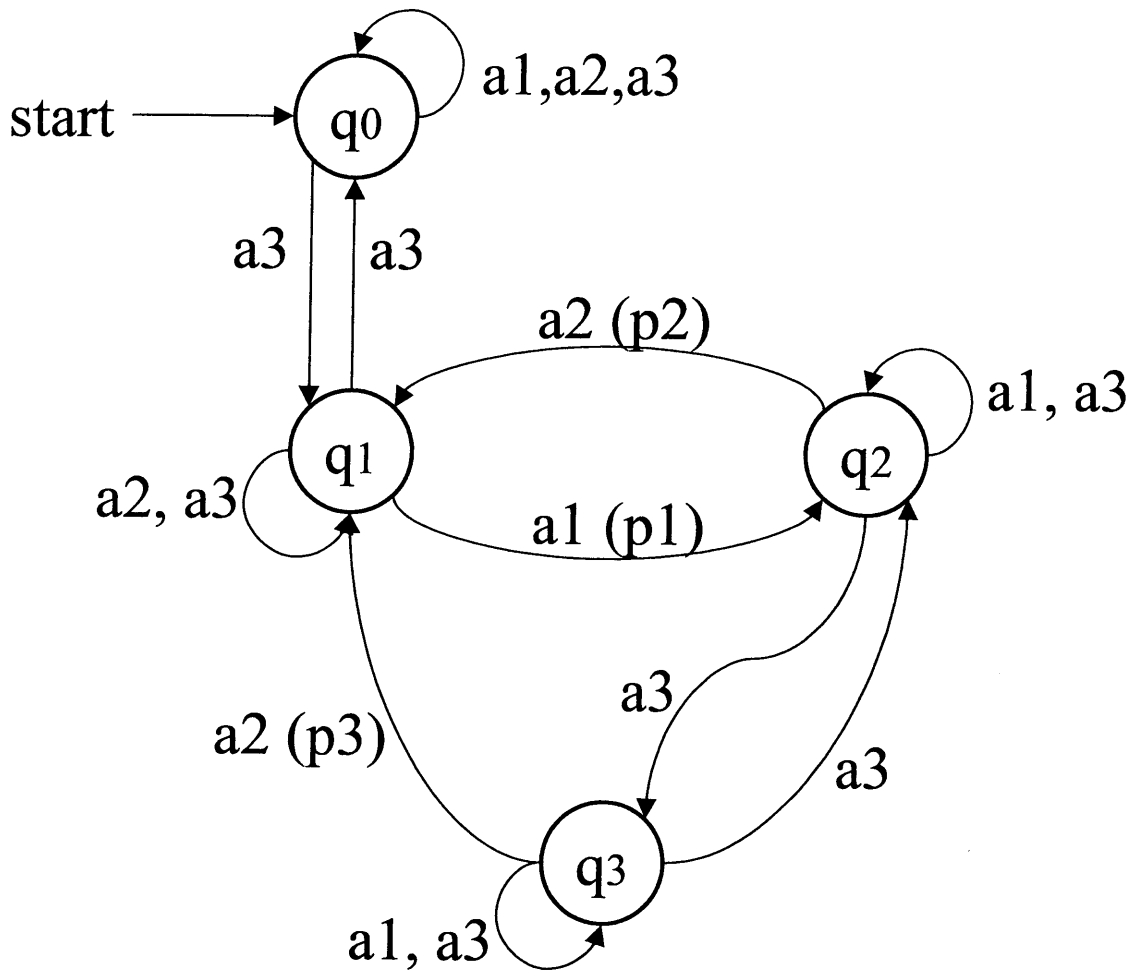


図 5.4: 操作解釈に用いたオートマトン

オートマトンは状態  $Q$ 、事象  $\Sigma$ 、状態遷移規則  $\delta$ 、初期状態  $q_0$  および最終状態  $F$  で記述される。ここでいう状態は状態空間におけるロボットの状態とは異なる概念である。状態  $Q$  としては

- $q_0$ : オープンスペースで操作物体を把持していない状態
- $q_1$ : 環境物体の近傍で操作物体を把持していない状態
- $q_2$ : オープンスペースで操作物体を把持している状態
- $q_3$ : 環境物体の近傍で操作物体を把持している状態

の4つを定義している (Fig. 5.5)。環境物体の近傍にあるか否かは手形状入力装置から得られる手の位置と、仮想空間における環境物体の位置を比較することで判別できる。

また、事象  $\Sigma$  としては

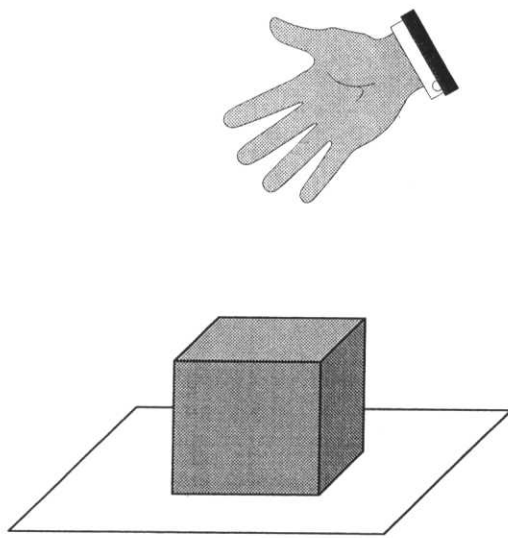
- $a_1$ : 手を握る
- $a_2$ : 手を開く
- $a_3$ : 手を移動する

の3つを定義している (Fig. 5.6)。これらの事象が発生すると、規則  $\delta$  によって、オートマトンは新たな状態へと遷移する。これらの事象は手形状入力装置から得られる指関節の曲げ角度や位置の変化によって検出される。

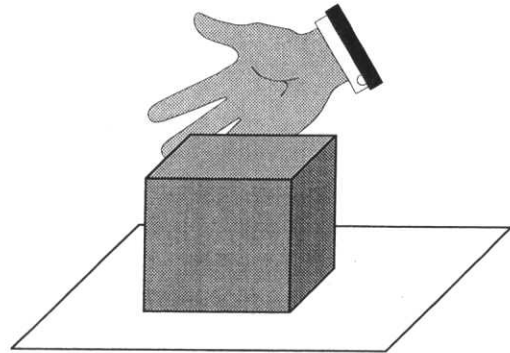
オートマトンによって解釈される操作は以下の3通りである (Fig. 5.7)。

$p_1$  操作物体を PICK した

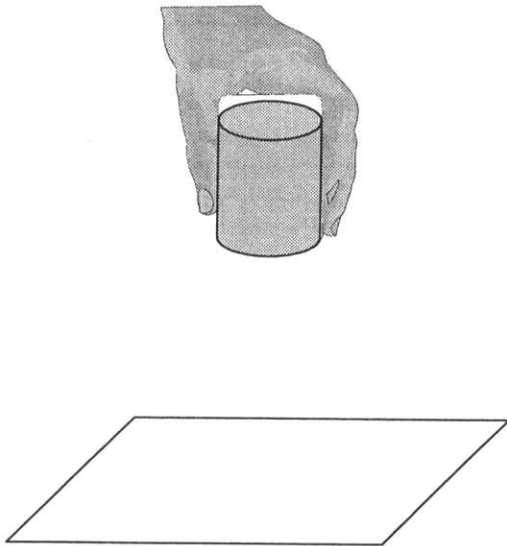
$p_2$  操作物体をテーブル上に PLACE した



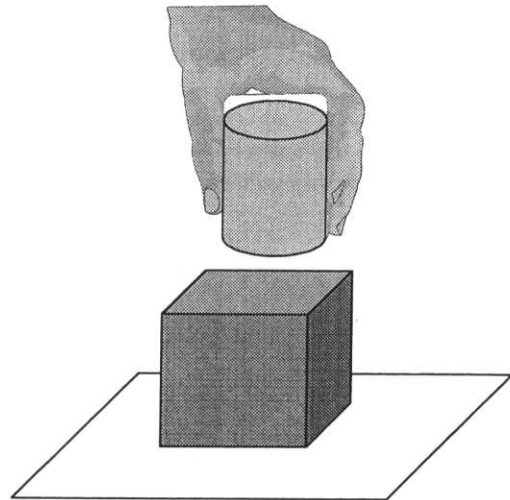
(a)  $q_0$ : grasp no object  
in open space



(b)  $q_1$ : grasp no object  
near another object

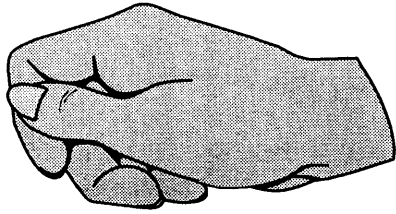


(c)  $q_2$ : grasp an object  
in open space

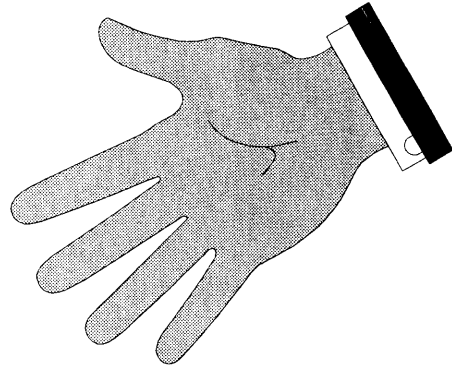


(d)  $q_3$ : grasp an object  
near another object

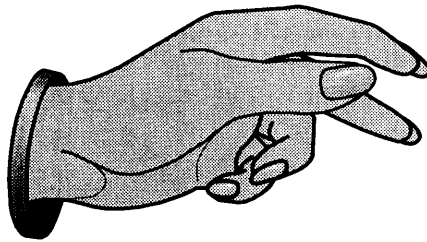
図 5.5: オートマトンに対して定義した状態



(a) a1: close hand

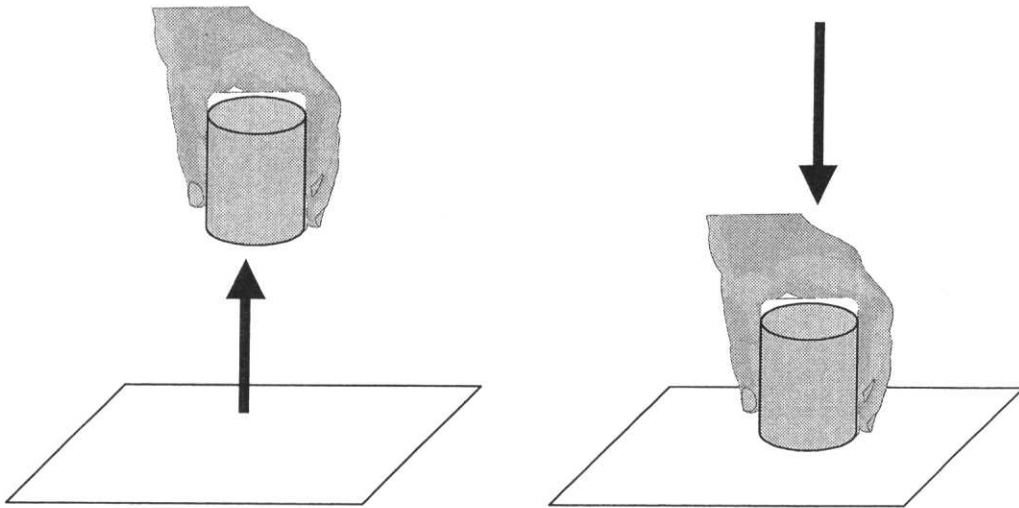


(b) a2: open hand



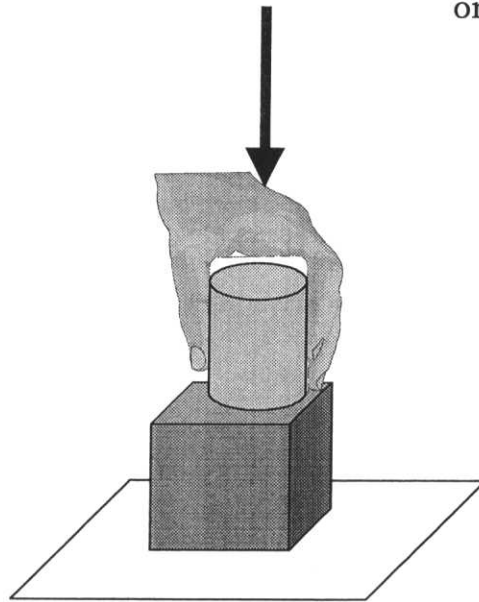
(c) a3: move hand

図 5.6: オートマトンに対して定義した事象



(a) p1: PICK an object

(b) p2: PLACE an object  
on the table



(c) p3: PLACE an object  
on another object

図 5.7: オートマトンによって解釈される操作

$p_3$  操作物体を別の部品（ワーク）の上に PLACE した

$p_1$  から  $p_2$  または  $p_3$  の間の操作が本研究の対象である移動操作として認識される。

#### 5.5.4 仮想現実感教示インタフェースによる事例教示

前節で述べた方法でオートマトンによりオペレータの動作から移動操作の部分を切り出すことができる。移動操作部分が切り出されたら、それらの点列からマナーデータベースに蓄積するマナーを抽出する必要がある。行動選択方式の場合は、マナーは状態プリミティブとそのときに選択された行動のペアであった。状態選択方式の場合には、マナーは状態プリミティブとそこから遷移を行なった先の状態プリミティブのペアとなる。

本節ではマナー抽出の手順を説明する。

まず、移動操作の経由した状態プリミティブを求める。状態プリミティブはローカルにモデリングされた環境の中で、移動操作に影響する可能性のあるすべての拘束により表現されているので、それらの符号を求めることにより状態プリミティブを確定できる。すなわち、状態プリミティブを表す連立不等式

$$\begin{cases} s_1 f_1(\mathbf{q}) > 0 \\ s_2 f_2(\mathbf{q}) > 0 \\ \vdots \\ s_n f_n(\mathbf{q}) > 0 \end{cases} \quad (5.1)$$

に得られた点列の座標  $\mathbf{q}$  を順次代入し、符号  $s_{ij}$  を求める。これによって、移動操作の経由した状態プリミティブの順番がわかり、遷移を知ることができる。

このようにして抽出された遷移はマナーデータベースに蓄積され、移動操作作業のルール作成に用いられる。

#### 5.5.5 実験システムの概要

上述の構成の仮想現実感教示システムを試作し、オペレータが作業の動作を教示し、そこから状態プリミティブの遷移手順を取得するまでの実験を行なった。実験系を Fig. 5.8に示す。

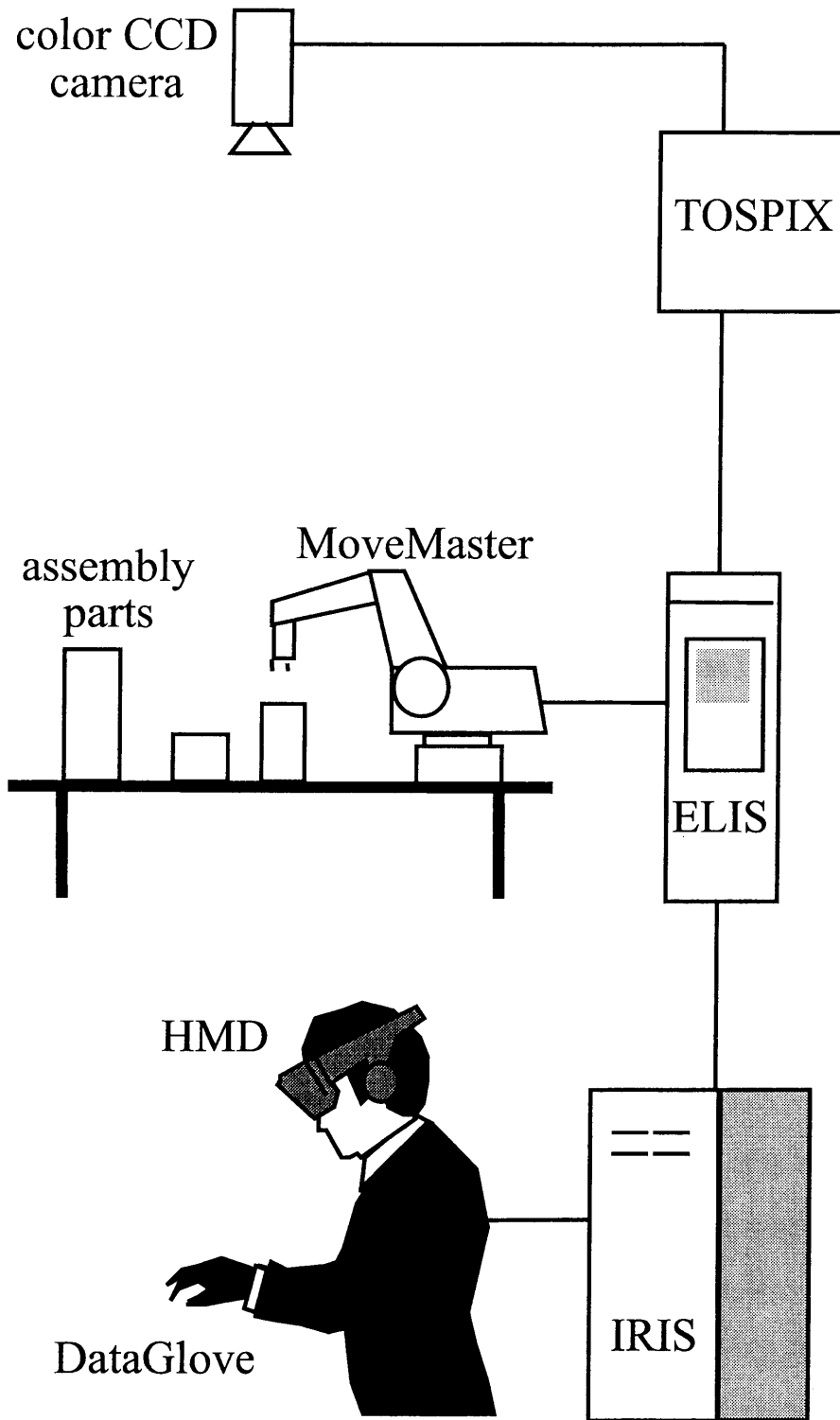


図 5.8: 仮想現実感教示システムの実験系



仮想現実感教示インタフェースとしては、手形状入力装置に VPL 社のデータグローブを用いた (Fig. 5.9)。データグローブには手の位置と姿勢を検出するための 3 次元センサと、指関節の曲げ角度を検出する光ファイバを利用したセンサがついており、手の形状を取得できるようになっている。

また、HMD には VPL 社のアイフォンを用いた (Fig. 5.10)。アイフォンは教示者の頭の位置と視線の方向を検出するための 3 次元センサがついている。また、左右の目に対して独立した 2 個の液晶ディスプレイがついており視差のある画像を提示することで教示者が環境を立体視できる仕組みになっている。

オペレータの視点は HMD の位置と姿勢によって認識される。これらの情報をもとに、グラフィックス・ワークステーション IRIS によって描画されている仮想教示環境は逐次更新され、HMD にステレオ映像として投影される。一連の教示動作はファイルに記録され、経由した点の状態プリミティブが、そこから遷移した先の状態プリミティブとペアの形で保存される。

状態プリミティブのペアが適切に取得されていることを確認するために、事例教示で得られたデータに基づいて実環境で作業する簡単な実行モジュールも同時に作成した。ここでは、事例教示で得られた状態プリミティブから状態プリミティブへの遷移ルールをそのまま移動操作作業のルールとして利用している。

教示された作業をマニピュレータが実行するときには、作業を行なう実環境は上部に設置したカラー CCD カメラによって 2 次元画像として取得される。画像処理装置 TOSPIX は CCD カメラから画像を受け取ると、色情報をたよりに部品を検出し、各々について重心と長短軸を計算することで特徴量である位置・姿勢を求める。TOSPIX で抽出された情報はワークステーション ELIS を経由して IRIS に転送される。IRIS はその情報から環境モデルを構築する。状態空間においてロボットが現在存在している状態プリミティブが算出され、マナーデータベースから、以前の事例教示において

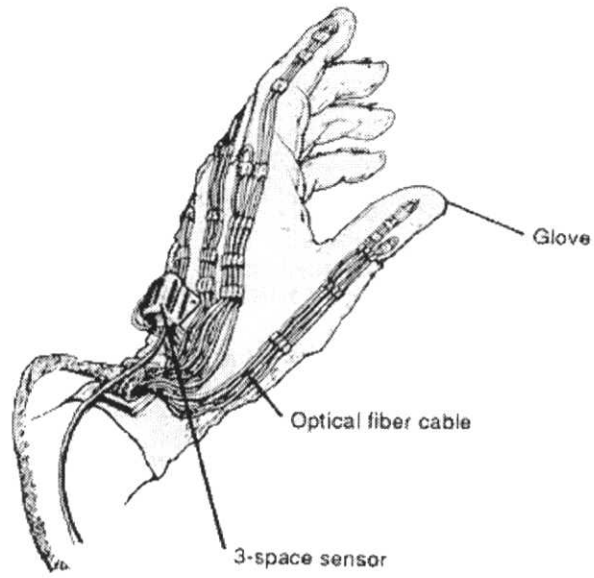


図 5.9: データグローブの外観 [66]

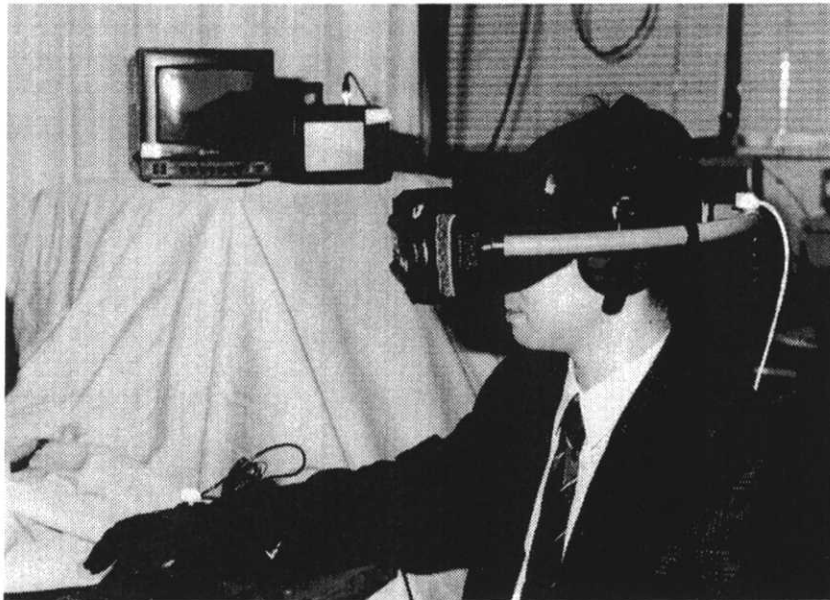


図 5.10: アイフォンの外観

そこから遷移した先の状態プリミティブが検索される。遷移先の状態プリミティブに属する点を1点求め、その位置に移動する内容の動作が動作コマンドに変換され、ELISを介してマニピュレータ (MoveMaster) に送出される。

#### 5.5.6 評価実験

以上のシステムを用いて、積木の組立の事例教示実験を行なった。実験では3種類4個の積木を用意した。作業を行なう実環境では、それらの積木は大きい積木2個 = (赤、緑)、直方体の積木1個 = (黄)、小さい積木1個 = (青)として、色で区別されている。また、教示を行なう仮想環境では各積木は、それらに付与されたID番号によって区別される。仮想環境の積木のID番号と実環境の物体の色とはあらかじめ次のように対応させる。

ID0 = 青 ID1 = 緑 ID2 = 赤 ID3 = 黄

まず、オペレータは環境モデラで教示環境に4個の積木を適当に設置する。積木の設置はメニューから部品を選択し、置く場所を指定して行なう (Fig. 5.11)。メニューの部品の寸法データはあらかじめ登録されているが、作業環境で使用する積木の寸法とは無関係に定義されている。オペレータの判断で、作業を教示するのに適当と思われる積木が選択される。Fig. 5.12-(a) は本実験のためにオペレータによって作成された教示環境の3次元空間表示である。

次に、オペレータは教示モジュールで作業を教示する。本実験で教示した作業はID1(緑)とID2(赤)の積木の上にID0(青)の積木を設置し(作業1)、その上にID3(黄)の積木を乗せてアーチを作る(作業2)ものである。Fig. 5.12-(b), (c) はそれぞれ作業1、2の教示動作の軌跡である。

教示軌跡から IRIS 上に記述されたプログラムで状態プリミティブの列への変換が行われる。作業1では動作を表す115個の点列から19個の状態プリミティブから

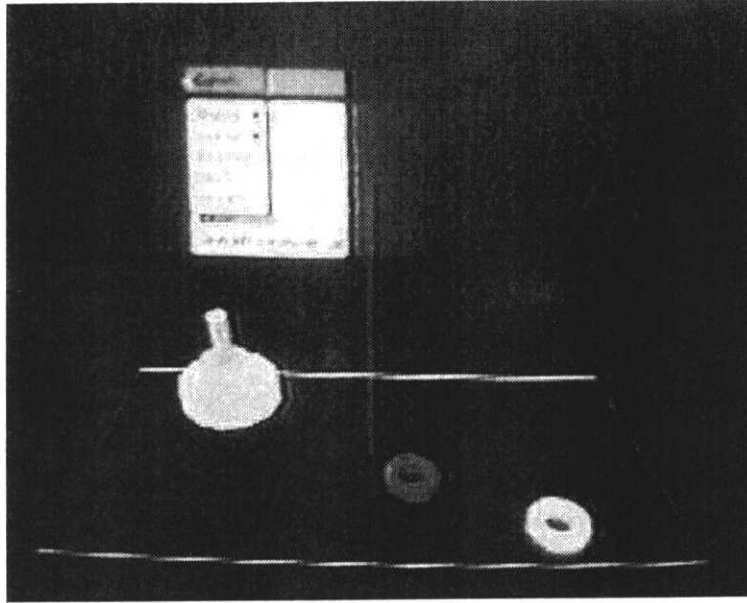
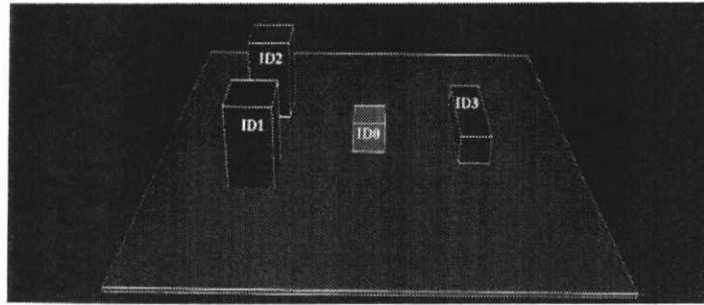


図 5.11: 教示環境の設定例

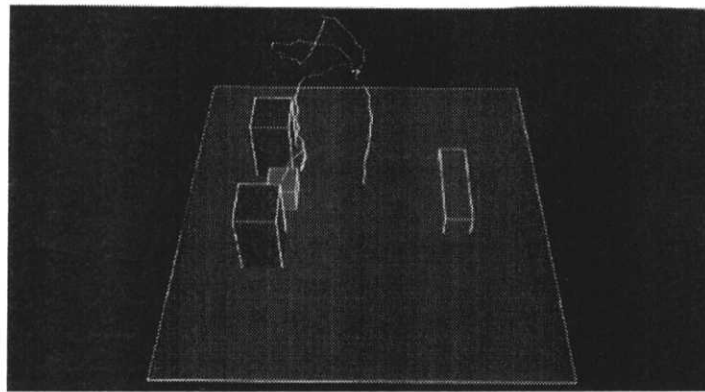
なる列が生成した。また、作業 2 では 143 個の点列から 21 個の状態プリミティブからなる列が生成した。オペレータの教示動作にゆらぎが存在するため、点列が同じ状態プリミティブを複数回通過する場合がある。ここでは同じ状態プリミティブを複数回通過して、そこから異なる状態プリミティブに遷移をした場合には後者の遷移を優先することにした。こうして、間の状態プリミティブを削除することで、ロボットが無駄な動作を省略できるうえ、無限に同じ動作を繰り返すことを防げる。これによってもとの教示動作から実現される作業動作は Fig. 5.13 のようになる。

次に、作業を行う実環境を設定し、センサによって環境の特徴量を取得する。まず、積木がオペレータの手で作業台の上に置かれる (Fig. 5.14)。積木の様子は天井に設置されたカラー CCD カメラによって取得され、IRIS 上に実環境に対応した仮想空間が作成される (Fig. 5.15-(a))。

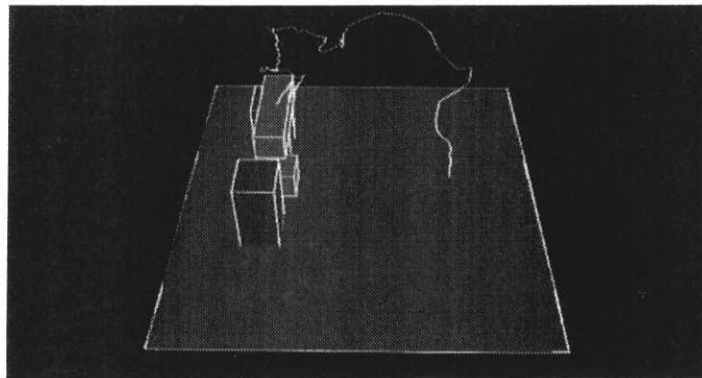
これに対して、教示動作から得られた状態プリミティブの列に従って、作業動作



(a)

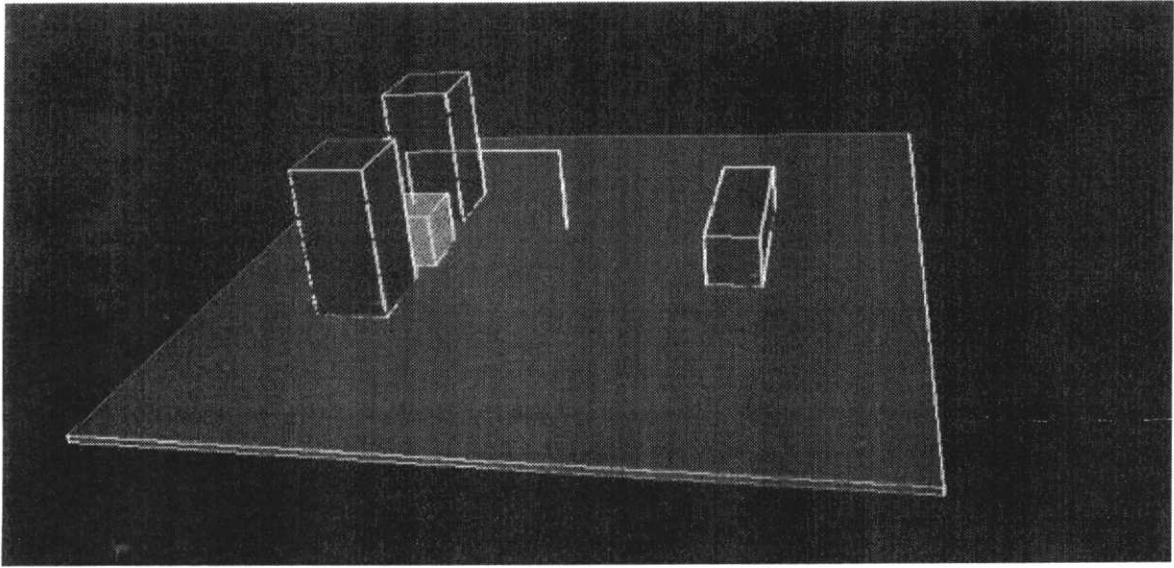


(b)

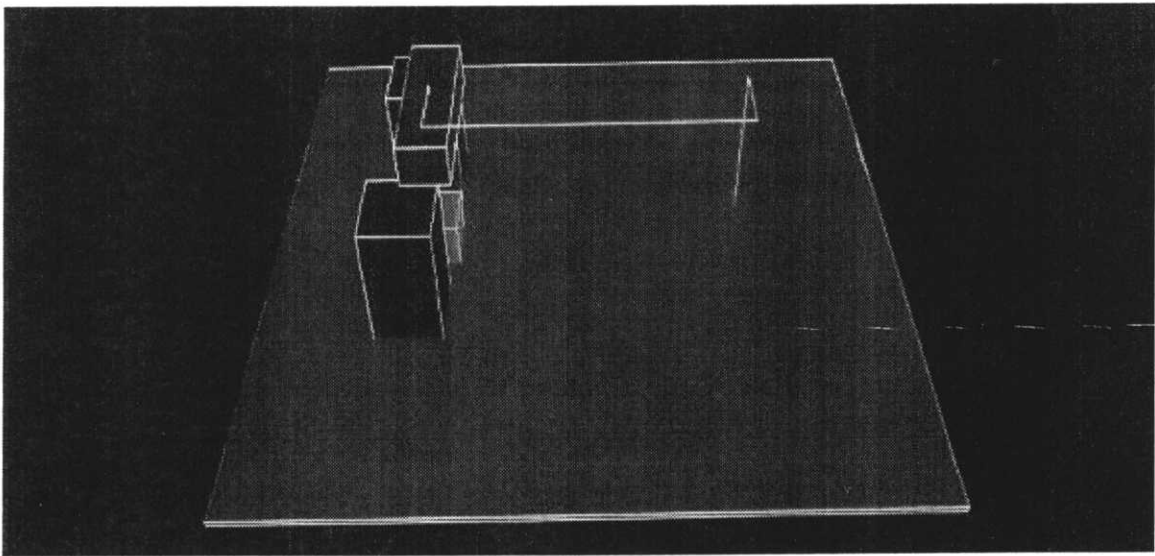


(c)

図 5.12: 環境モデルと教示動作の軌跡



(a)



(b)

図 5.13: 教示された状態プリミティブの列に従って実現される動作

を生成した結果を計算機の画面上に表示したのが Fig. 5.15-(b), (c) である。生成した作業動作のデータはマニピュレータに送出され、実行される。その様子を Fig. 5.16に示す。

このように、本システムによってオペレータの教示動作から状態プリミティブの遷移手順を取得し、教示を行なった仮想環境と類似した実環境で、同等の作業を再現することに成功した。これによって本手法によって事例教示が適切になされていることが確認できた。

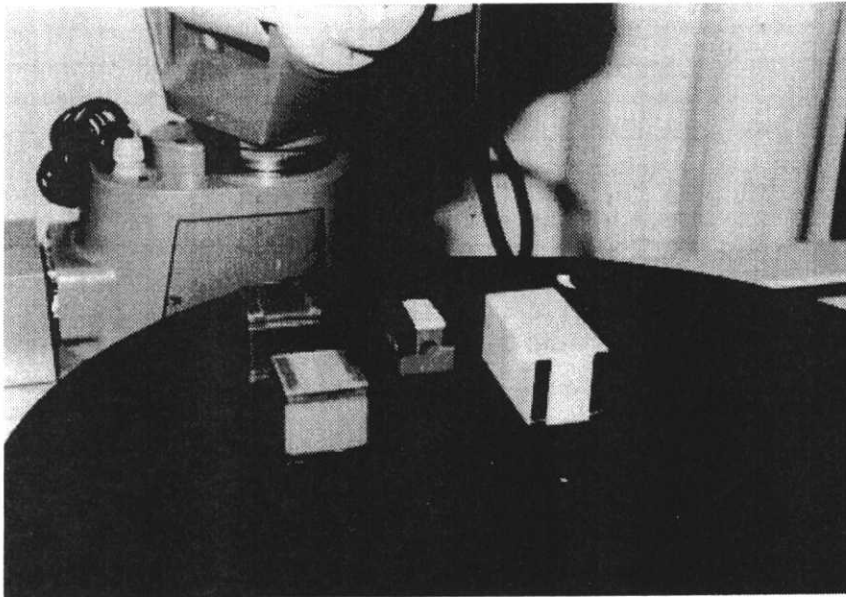
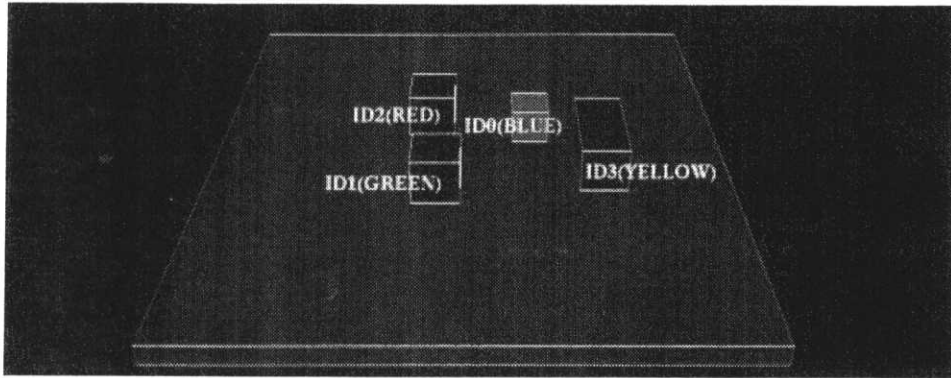
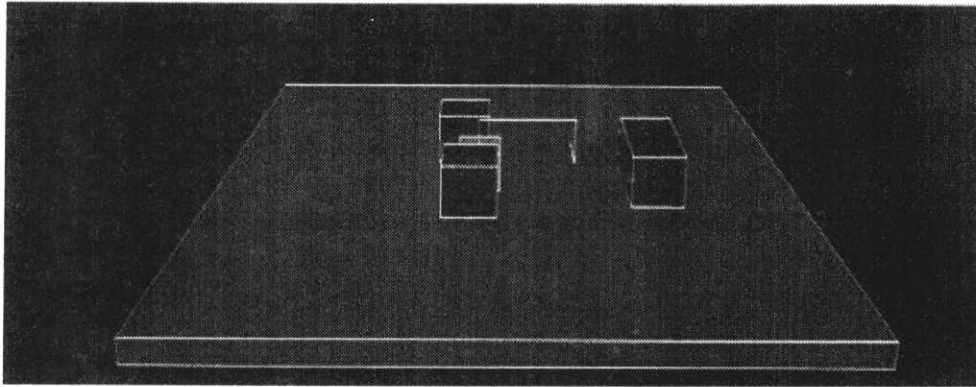


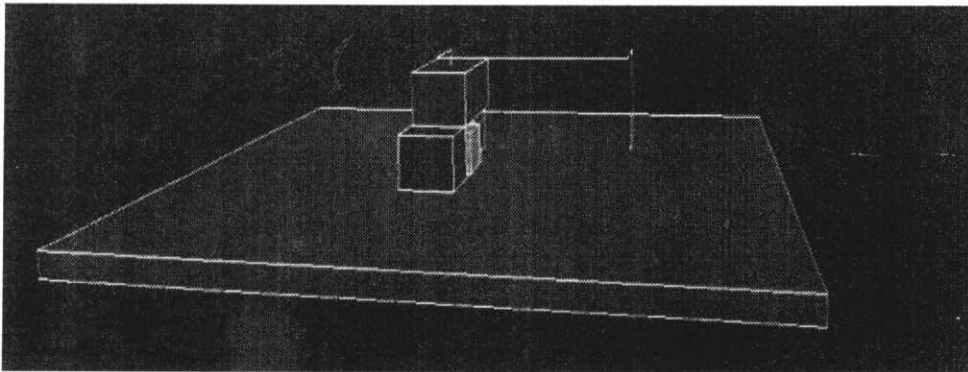
図 5.14: 作業を行なった実環境



(a)



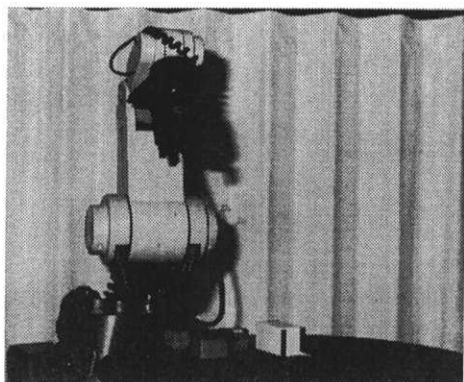
(b)



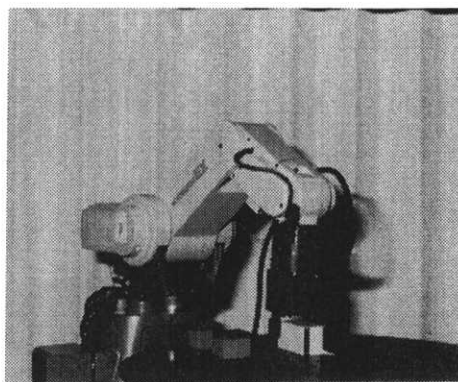
(c)

図 5.15: 実環境に対応した仮想空間

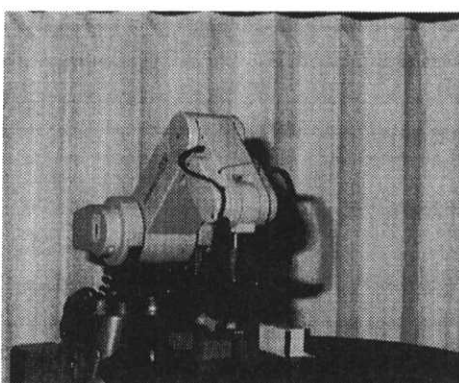




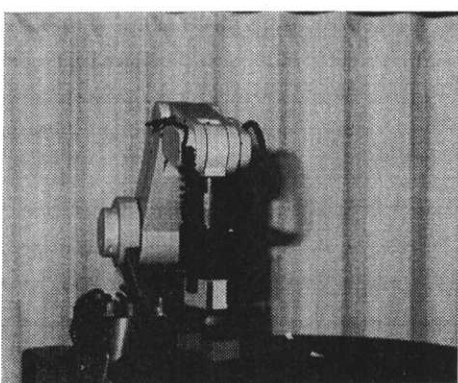
(a)



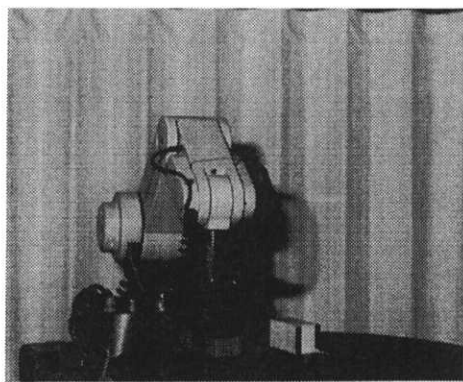
(d)



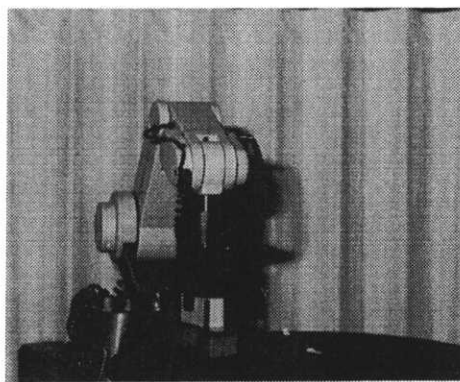
(b)



(e)



(c)



(f)

図 5.16: マニピュレータによる作業の様子

## 5.6 ルールの作成

本節では事例教示から得られたデータを用いてルールを作成する方式を検討する。

第4章でも述べたように、ルールの条件部で状態プリミティブをそのまま判定条件に使用することは、十分な作業を可能にするまでの教示量を極端に増大させる。そこで、教示の結果を有効に利用するために、何らかの形で、ルールの適用範囲を周辺に拡大する必要がある。行動選択方式の場合は、無効な拘束を排除することでルールの適用範囲を拡大した。しかし、状態遷移方式の場合にはその方法をそのまま適用することができないので、別の方法で適用範囲の拡大を検討する。

ルールの適用可能範囲を広げる方法として使用できるには以下の条件を満たす必要がある。

1. 高次元にも適用可能なこと。
2. 作成したルールがマニピュレータコマンドで実現可能な動作を出力すること。

MOVE\_LINE, MOVE\_JOINT を用いることを想定する場合には、手先の状態空間または関節角空間で直線的な動作を生成できること。

項目2に関して、可視多角形の利用を考える。

可視多角形とは以下のような図形をいう。障害物の存在する環境  $P$  において、 $P$  の自由空間（障害物の内部でない領域）を  $F$  とする。 $F$  に1点  $q$  が与えられているとき、 $F$  に属する点  $v$  に対して線分  $qv$  上のすべての点が  $F$  に属するとき、 $v$  は  $q$  から「見える」という。点  $q$  から見えるすべての点から構成される多角形を可視多角形という [6]。また、このとき点  $q$  を可視多角形の代表点と呼ぶ。可視多角形の例を Fig. 5.17 に示す。

可視多角形を利用すると、ある点に直線的な動作で移動可能な空間の範囲を表現できるので都合がよい。また、この定義は2次元だけでなく高次元にも容易に拡張で

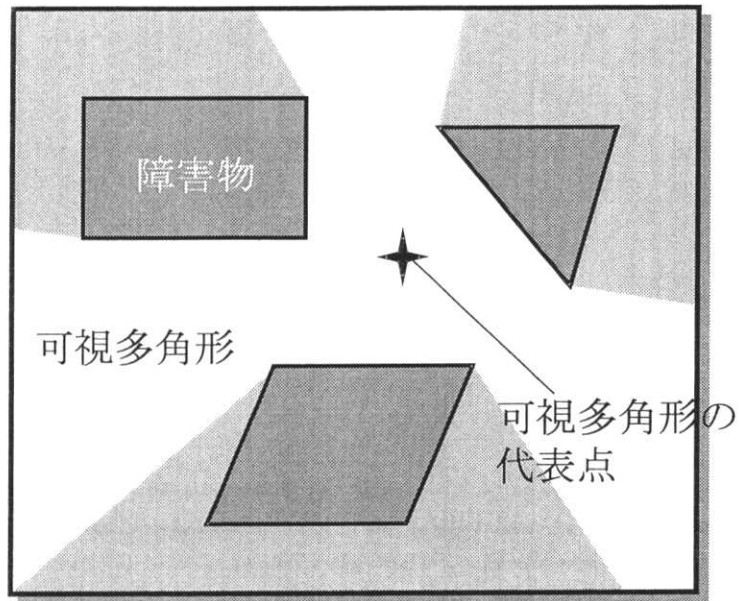


図 5.17: 可視多角形の例

きる概念なので、マニピュレータで作業を行なうときの手先の状態空間や関節角空間で使用可能である。

可視多角形の具体的な形状を求める方法は、2次元の多角形環境では Lee のアルゴリズム [26] などが知られているが一般には困難である。しかし、空間上の点  $p$  が可視多角形  $V$  に含まれることの判別は高次元でも近似的に行なえる。すなわち、 $V$  の代表点  $q$  と  $p$  を両端点とする線分が障害物と交差するかチェックを行なえばよい。これを行なうには、線分  $pq$  上にチェックを行なう点を十分密にとり、それらの点がすべて障害物の外部なら、点  $p$  は  $V$  に含まれると近似的に判定される。動作をより慎重に行なう必要がある場合には、障害物の周囲にマージンをとることで対処する。

教示された点  $q$  を代表点とする可視多角形  $V$  に属する点をルールの適用範囲とすれば、以下のようなルールで移動操作を実現できる。

条件部：現在位置は可視多角形  $V$  の内部である

実行部：MOVE\_TO( $q$ ) と MOVE\_TO( $r$ ) を実行

ただし、 $r$  は  $q$  から遷移する先の状態プリミティブに属する点である。また、MOVE\_TO は空間を直線的に移動する操作で、手先の状態空間か関節角空間の場合にそれぞれ MOVE\_LINE または MOVE\_JOINT のいずれかとなる。

### 5.6.1 可視多角形を利用したルールによる移動操作

本節ではマニピュレータに事例教示を行ない、上述の方法で作成されたルールを用いて、移動操作作業を行なわせることを試みる。

具体的には3次元空間において6自由度マニピュレータに対する事例教示をシミュレータで実施し、そこから得られたデータに基づいてルールの作成を行なう。マニピュレータの使用動作コマンドは MOVE\_JOINT とし、6次元の関節角空間で考える。本シミュレーションで用いたマニピュレータは Fig. 5.18 に示す機構をしている。また、本実験を行なう環境の様子と目標状態におけるマニピュレータの姿勢を Fig. 5.19 に示す。環境物体は球で、またマニピュレータは線分で構成されるが、これはプログラムにおいてマニピュレータや環境物体の形状記述および交差チェックの簡略化を目的としている。マニピュレータや環境物体がより複雑な形状になった場合は、形状データの記述方法と、交差チェックのルーチンを書き換えればよく、この簡略化が本方式の確認を妨げるものではない。

IRIS Indigo2 ワークステーション上にて C 言語を用いてプログラムを作成した。オペレータは作業環境の表示された画面を見ながら、適当にマニピュレータの初期状態を設定し、そこからマニピュレータの関節角度をスライダを用いて入力し、経由する教示点を順次指定することで目標状態に至る移動操作の事例を教示する。事例教示は十分な回数行なう。

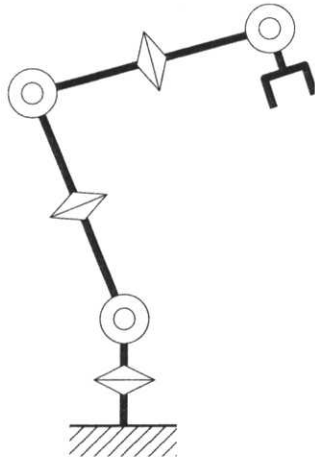


図 5.18: マニピュレータの構造

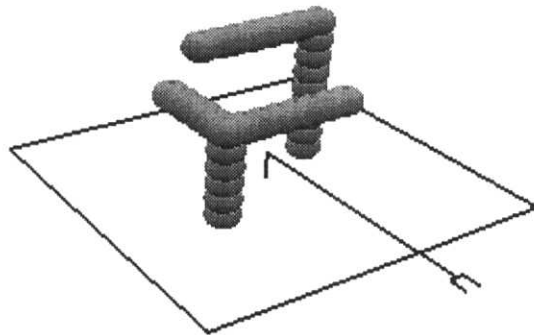


図 5.19: マニピュレータの目標状態

本シミュレーションで、オペレータの与えた事例教示の例を Fig. 5.20に示す。

教示された事例は、教示点と、そこから遷移した次の教示点とのペアの形でマナーデータベースに記録していく。教示点は状態プリミティブに変換してから記録するのが正式だが、本実験では環境の変動は想定せず、可視多角形を利用して作成したルールが有効にはたらくか検証することが主目的であり、上述のような簡便な方法をとった。

事例教示を終えると、次に、マナーデータベースに蓄積されたこれらの教示事例を利用することで、適当な初期状態から同じ目標状態に至る移動操作作業が実行可能になるか検証する。

シミュレータ上でマニピュレータに適当な初期状態を与え、そこからマニピュレータに目標状態までルールを用いて移動操作を行なわせた結果が Fig. 5.21である。与えられた初期状態がルールの条件部に記述されているいずれかの可視多角形の内部に存在する場合、

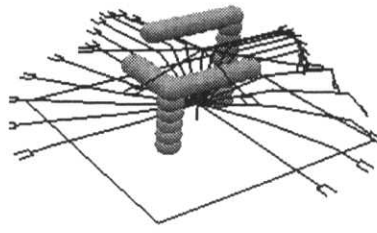
ルールによってマニピュレータが適切に目標状態まで環境物体との衝突を回避しながら移動操作する様子がわかる。

このように、6自由度マニピュレータに対して事例教示と、可視多角形を用いて適切な移動操作作業用のルールを構成できることが確認された。

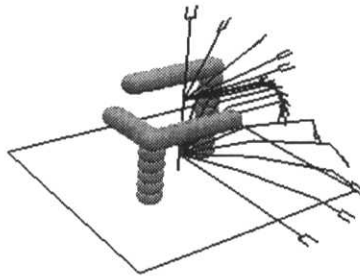
## 5.7 状態プリミティブの対応付け

作業を行なう環境が教示を行った環境と異なる場合、教示点を可視多角形の代表点として用いるためには、作業を行なう環境において、教示点を適切な位置に移してやる必要がある。

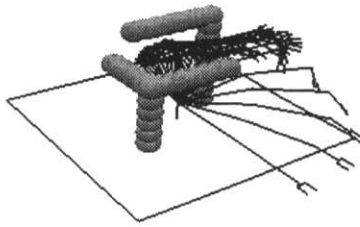
このために、ここでは教示点の属する状態プリミティブを求め、作業環境において対応する状態プリミティブを探し、対応する状態プリミティブ内に属する点を求めて新たな教示点とする方式を検討する。



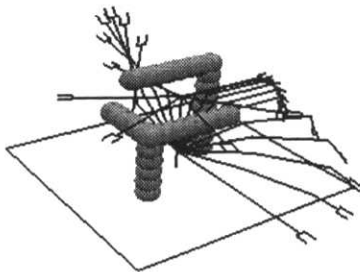
(a)



(b)

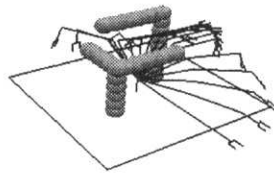


(c)

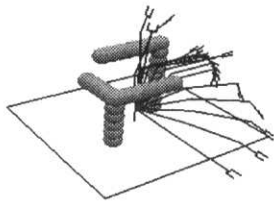


(d)

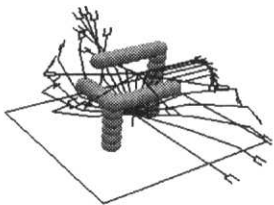
図 5.20: 作業の教示例



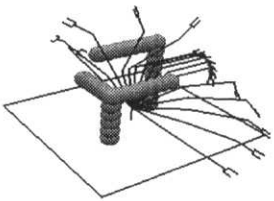
(a)



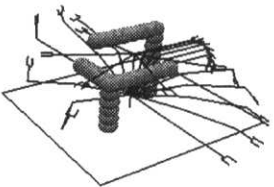
(b)



(c)



(d)



(e)

図 5.21: 作業の実行例



状態プリミティブは拘束の連立不等式で記述される。また、拘束はセンサによって検出された特徴量の関数である。したがって、教示環境と作業環境との間の状態プリミティブの対応付けは、拘束の環境パラメータを置き換えて、新しい連立不等式を作ることで可能である。例えば、教示環境において検出された特徴量が  $\theta$  であり、状態プリミティブ  $S$  が連立不等式

$$\begin{cases} s_1 f_1(\mathbf{q}; \theta) > 0 \\ s_2 f_2(\mathbf{q}; \theta) > 0 \\ \vdots \\ s_n f_n(\mathbf{q}; \theta) > 0 \end{cases}$$

で表されたとする。ここでは拘束が特徴量の関数であることを明示するために  $f_i(\mathbf{q}; \theta)$  と記述している。

作業環境において検出された特徴量が  $\theta'$  である場合は、作業環境において  $S$  と対応する状態プリミティブの満たす連立不等式は

$$\begin{cases} s_1 f_1(\mathbf{q}'; \theta') > 0 \\ s_2 f_2(\mathbf{q}'; \theta') > 0 \\ \vdots \\ s_n f_n(\mathbf{q}'; \theta') > 0 \end{cases}$$

となる。

教示点  $\mathbf{q}$  に対応する点は、この連立不等式を満たすような点  $\mathbf{q}'$  である。一般には拘束を表す式は非線形なので、この連立不等式を制約付き非線型最適化アルゴリズムやSUMT(Sequential Unconstrained Minimization Technique)の手法を利用して収束演算により解く必要がある [33]。

一方、2つの環境間の拘束の関係が共通の姿勢変換と拘束間で独立な並進移動によって表現可能であり、ロボットの状態が手先の状態空間において記述される場合は、より簡単な解法が存在する。これは物体の穴や突起が物体に対して平行移動した場合や大きさが変化した場合、対象となっている拘束域を有する環境物体の位置・姿勢が変動した場合などに見られる関係であり、適用頻度が高い。

具体的な解法は以下のとおりである。共通の姿勢変換を  $R$  とし、点  $\mathbf{q} = (x, y, z, \alpha, \beta)$  とする。姿勢変換が共通なので、点  $\mathbf{q}$  に  $R$  を適用することで点  $\mathbf{q}'$  の姿勢成分  $(\alpha', \beta', \gamma')$  が確定する。姿勢成分が確定すると、 $\mathbf{q}'$  の残りの成分に関しては拘束  $s_i f_i(\mathbf{q}'; \theta')$  は線形となる。これから  $\mathbf{q}'$  の残りの成分を求めるために、以下の方法を用いる。まず、

$$\begin{cases} s_1 f_1(\mathbf{q}; \theta) = b_1 \\ s_2 f_2(\mathbf{q}; \theta) = b_2 \\ \vdots \\ s_n f_n(\mathbf{q}; \theta) = b_n \end{cases}$$

とおき、 $b_i$  の値を求める。そして、

$$\begin{cases} s_1 f_1(\mathbf{q}'; \theta') = b_1 \\ s_2 f_2(\mathbf{q}'; \theta') = b_2 \\ \vdots \\ s_n f_n(\mathbf{q}'; \theta') = b_n \end{cases}$$

なる連立一次方程式を作り、これから  $\mathbf{q}'$  の並進成分  $(x', y', z')$  の値を求める。こうすると、拘束の変化が共通の姿勢変換と共通の並進移動で表される場合には、求められた教示点  $\mathbf{q}'$  はロボット手先の環境物体に対する相対位置が  $\mathbf{q}$  のときと同じになるので、都合がよい。

ところで、ここで求める  $\mathbf{q}'$  の成分は通常  $(x, y, z)$  の3個であるが、拘束の数は3個とは限らないので、普通の連立一次方程式としては解けない。そこで、この解を求めるのに特異値分解を利用する [49]。特異値分解を利用すると、拘束が3より少ない場合は特殊解が得られる。拘束がちょうど3の場合には通常の連立一次方程式と同じ解が得られる。拘束が3より多い場合には最小二乗解が得られる。このように、特異値分解を用いることで、物体に対して相対的な位置関係の近い点を求めることができる。

このように求められた  $\mathbf{q}'$  の値から、マニピュレータの遷移する点が求められる。拘束の記述が関節角空間でなされている場合は、 $\mathbf{q}'$  そのものがマニピュレータの姿勢

を表す。手先の状態空間の場合は、更に逆キネマティクスを解くことで、マニピュレータの姿勢が導かれる [61]。

事例教示からルールを作成する観点からは、ロボットの自由度が6より大きい場合は関節角空間よりも手先の状態空間の方が次元数が小さいので、操作物体の状態空間で教示を行なった方が有利である。一方、ロボットの自由度が6より小さい場合は逆の理由で関節角空間で行なった方がよいといえる。

以上のように作業を実行する環境が教示を行なった環境と異なる場合でも教示点に対応する点を求めることができる。しかし、それが対応点として妥当性なのかチェックする必要がある。チェックすべき項目は以下の通りである。

- 対応点においてマニピュレータが環境物体と干渉しない姿勢をとることが可能か。

これは拘束の記述が手先の状態空間で行なわれている場合にチェックする必要がある。

- 遷移する過程で障害物と衝突しないか。

これは遷移元の対応点が遷移先の対応点を中心とする可視多角形の内部に含まれるかチェックすることで行なえる。

ルールに含まれる教示点に対して、対応点が求まらなかったり、妥当性がなかったりする場合には、その作業環境では適用できないルールと判断して、除外する。

## 5.8 状態遷移方式のアルゴリズム

第5.5節では、仮想現実感教示インタフェースを用いて、オペレータの移動操作部分を切り出し、遷移を行なった状態プリミティブを抽出する方法を議論した。第5.6節では可視多角形を用いて移動操作作業に用いるルールを選択する方法を検討した。ま

た、第5.7節では、作業を行なう環境が教示を行った環境と異なる場合に教示点を適切な位置に移す方法を検討した。

本節では、これらの手法を統合して、事例教示を行なった場合の、状態遷移方式による移動操作作業を実現する手順を示す。

手順には教示モジュールで実行される部分と、実行モジュールで実行される部分とがある。状態遷移方式の場合には分析モジュールは存在しない。

#### [教示モジュールにおける手順]

**Step 1** 教示点  $\mathbf{p}_1$  と次の教示点  $\mathbf{p}_2$  を取得する。それらの C-space における位置  $\mathbf{q}_1$ ,  $\mathbf{q}_2$  を計算する。

**Step 2** 同時に周囲の環境特徴量  $\theta$  を取得する。それに基づいて、点  $\mathbf{q}_1$ ,  $\mathbf{q}_2$  が属する拘束域をそれぞれ列挙する。おのおのの属する拘束域は単数とは限らない。

**Step 3** 列挙された拘束域からローカルな環境モデルを作成する。

**Step 4** 列挙された拘束域の拘束すべてに対して、点  $\mathbf{q}_1$ ,  $\mathbf{q}_2$  が

$$\begin{cases} s_1 f_1(\mathbf{q}_i; \theta) > 0 \\ s_2 f_2(\mathbf{q}_i; \theta) > 0 \\ \vdots \\ s_n f_n(\mathbf{q}_i; \theta) > 0 \end{cases}$$

を満たすような符号  $s_1 \sim s_n$  をそれぞれ求める。

**Step 5** マナーデータベースに

- $\mathbf{q}_1$  から  $\mathbf{q}_2$  への遷移
- $\mathbf{q}_1$ ,  $\mathbf{q}_2$  おのおのの属する拘束域のリスト
- $\mathbf{q}_1$ ,  $\mathbf{q}_2$  おのおのの符号  $s_1 \sim s_n$

をルールとして記録する。

[実行モジュールにおける手順]

**Step 6** 現在の点  $\mathbf{p}_3$  を取得する。その C-space における位置  $\mathbf{q}_3$  を計算する。

**Step 7** 同時に周囲の環境特徴量  $\theta'$  を取得する。それに基づいて、C-space においてローカルな環境モデルを作成する。

**Step 8** マナーデータベースから、作成したローカル環境に属するルールを検索し、列挙する。

**Step 9** 列挙されたルールの点  $\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2$  に対応する特徴点を計算する。すなわち、

$$\begin{cases} s_1 f_1(\mathbf{q}'_i; \theta') > 0 \\ s_2 f_2(\mathbf{q}'_i; \theta') > 0 \\ \vdots \\ s_n f_n(\mathbf{q}'_i; \theta') > 0 \end{cases}$$

を満たす  $\mathbf{q}'_1, \mathbf{q}'_2$  をそれぞれ求める。

**Step 10** 求められた  $\mathbf{q}'_1, \mathbf{q}'_2$  に対して妥当性を検証する。すなわち、 $\mathbf{q}'_1$  または  $\mathbf{q}'_2$  が C-obstacle と干渉するもの、および、 $\mathbf{q}'_1$  から  $\mathbf{q}'_2$  への移動軌跡が C-obstacle と干渉するものを除外する。

**Step 11**  $\mathbf{q}_3$  を代表点とする可視多角形に属する  $\mathbf{q}'_1$  を探す。最初に見つかったものを採用して実行する。すなわち、 $\text{MOVE\_TO}(\mathbf{q}'_1), \text{MOVE\_TO}(\mathbf{q}'_2)$  を実行する。

## 5.9 実験

本節では、第 5.8 節の方法に基づいて、状態遷移方式による移動操作作業を異なる環境で同様に実現可能か、シミュレーションによって検証する。

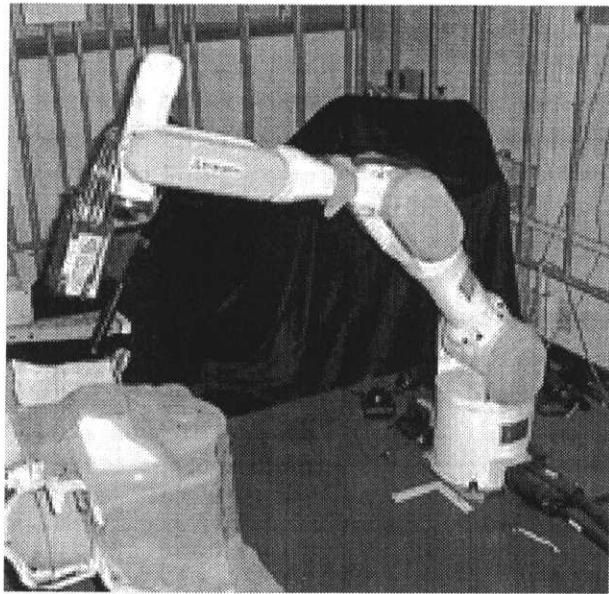


図 5.22: 実験で想定するマニピュレータ

本実験ではマニピュレータとして7自由度を有する三菱重工 PA10 を想定する (Fig. 5.22)。

物体のモデリングを行なう環境モデラには市販の形状モデラの編集機能を利用した。形状ファイルの記述には市販の形状モデラで一般的に入出力がサポートされている Wavefront 社の obj 形式を用いた。

モデリングと同時に、拘束域に関連した定義も行なう。拘束域  $C\text{Area}(\theta_{ij}, \mathbf{q})$  が影響範囲となる占有領域  $\text{Shape}_{ij}(\theta_{ij})$  は操作物体の部分形状と環境物体の部分形状によって記述されるが、これらの部分形状をここではサブパーツと呼ぶ。これらのサブパーツを操作物体と環境物体上に指定するために、ここでは obj 形式の group 属性を用いた。

また、特徴量によって物体を変形できるように、特徴量を引数とする変形行列を定義し、教示モジュールや実行モジュールのプログラムに埋め込んだ。それらのプログラムでは、教示環境や作業環境で物体の特徴量を設定するときに、オペレータがスピナー（ボタンの押下によって数値が増減するコントロール）で値を指定できるようになっている。実際の作業ではこの特徴量は未知であり、マニピュレータがセンサを通じて取得する。

教示モジュール、および実行モジュールは C++ 言語で作成し、画面表示には OpenGL、インタフェースには GLUI ライブラリを利用している [45][69]。実験はクロック数 160 MHz の CPU を搭載した PC を用いて行なった。

本実験で教示する作業は PA10 型のマニピュレータ  $M$  が L 字型の操作物体  $A$  を操作してコの字型環境物体  $B$  から引き抜いて、2 穴環境物体  $C$  の片方の穴に挿入するものである。Fig. 5.23 は作業を達成した状態を示した図である。生産ラインを有する工場のように整備されていない作業現場において多品種少量生産の組立作業を行なうような場面を想定しており、物体の位置・姿勢や形状が作業の度に異なると想定し

ている。

Fig. 5.24に操作物体 *A* のサブパーツを示す。

Fig. 5.25は環境物体 *B* の制御パネルである。制御パネルは物体 *A*, *C* にも用意されている。この制御パネルの機能は以下の通りである。

- **Position/Orientation**

スピナーによって物体の位置・姿勢を指定する。

- **inner/outer**

現在の拘束域の関するサブパーツを指定する。inner と outer はそれぞれモデルで group 名の形でサブパーツに付けられた便宜的な名前である。

- **modifier**

スピナーによって物体の特徴量を指定する。

環境物体 *B* のサブパーツを指定した状態を Fig. 5.26に示す。濃い色のついている部分がサブパーツである。Fig. 5.26 (a) はサブパーツを指定していない状態である。また、Fig. 5.27に特徴量を変化させた時の環境物体 *B* の形状の例を示す。同様に、環境物体 *C* のサブパーツを指定した状態を Fig. 5.28に示す。また、Fig. 5.29に右穴に関する特徴量を指定した時の環境物体 *C* の形状の例を示す。

オペレータは、まずスピナーで物体の特徴量や位置・姿勢を指定することで教示環境の設定を行ない、次に事例教示を行なう。本実験では、マニピュレータの自由度よりも操作物体の状態空間の自由度のほうが小さいので、事例教示は手先の状態空間において行なう。

事例教示時には、教示点の属する拘束域の判定が必要となる。しかし、拘束域に関わる操作物体と環境物体の部分が、どの位置関係にあれば操作に影響があり拘束域とみなせるかは一概に言えず、拘束域をあらかじめ定義しておくことは困難である。



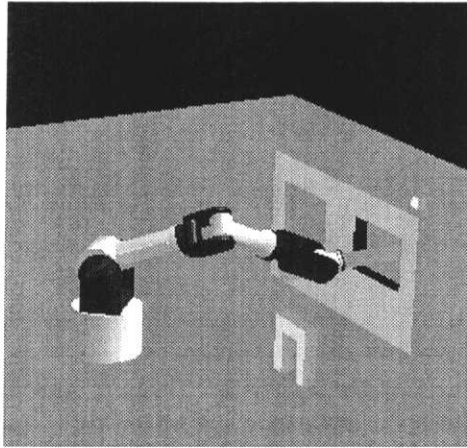


図 5.23: 目標状態におけるマニピュレータの姿勢

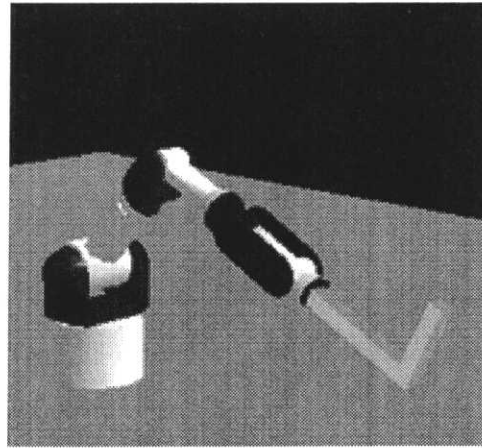
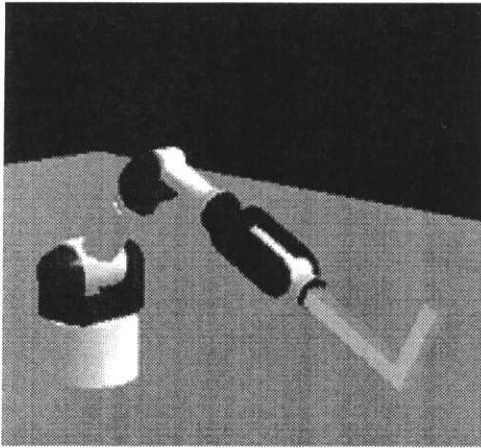


図 5.24: L 字型操作物体 A のサブパーツ

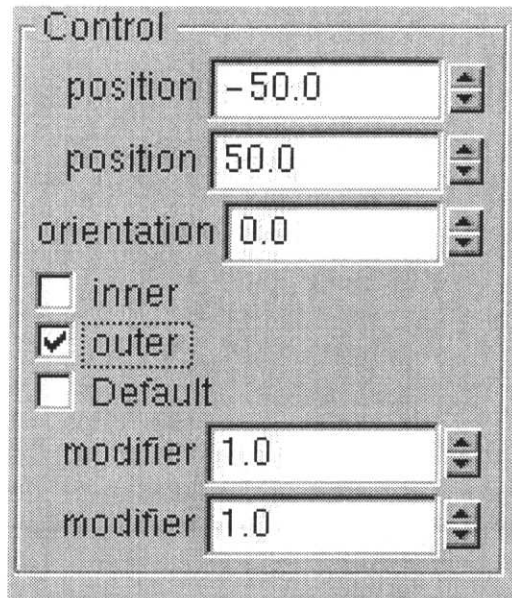


図 5.25: コの字型環境物体  $B$  用の制御パネル

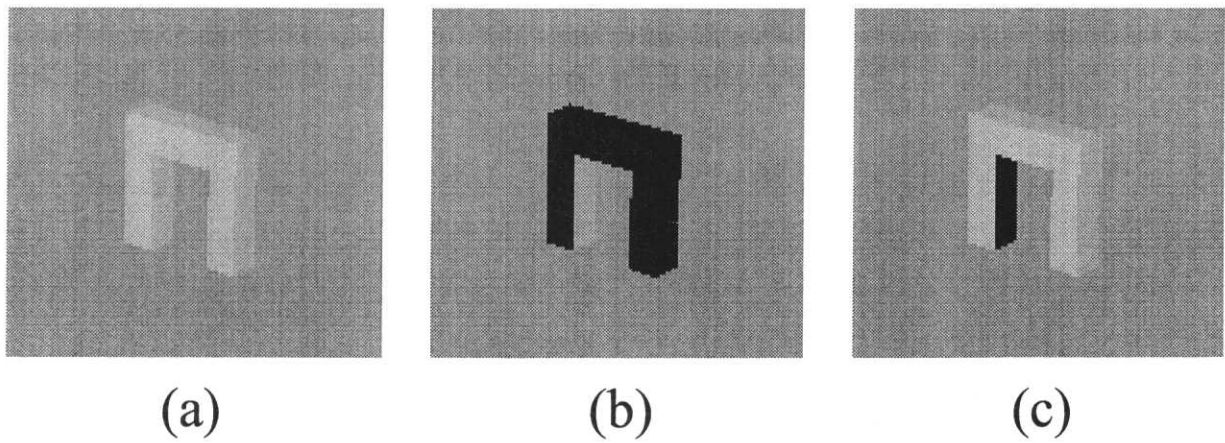


図 5.26: コの字型環境物体  $B$  のサブパーツ

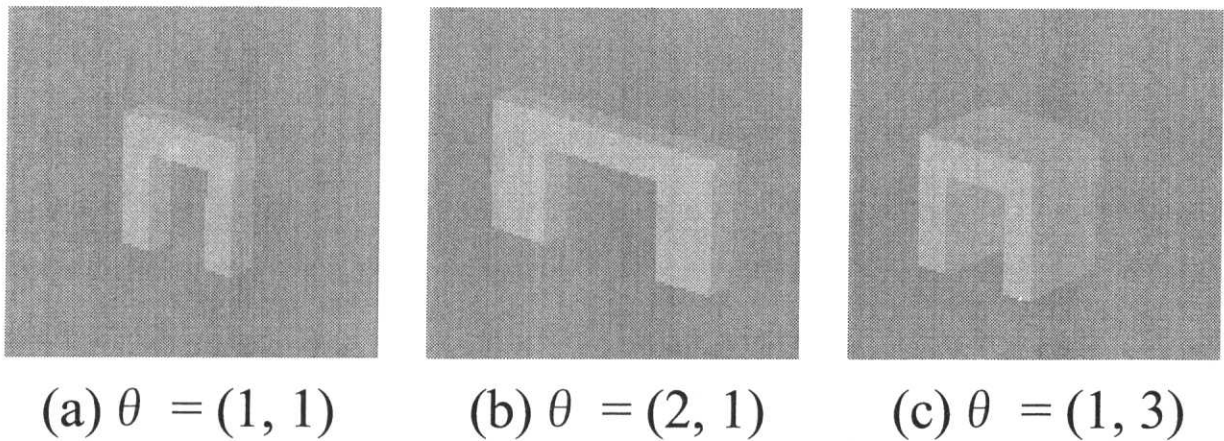
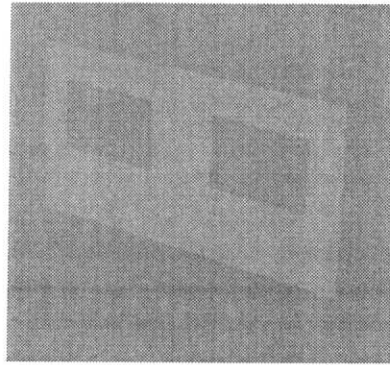


図 5.27: コの字型環境物体  $B$  の形状パラメータ

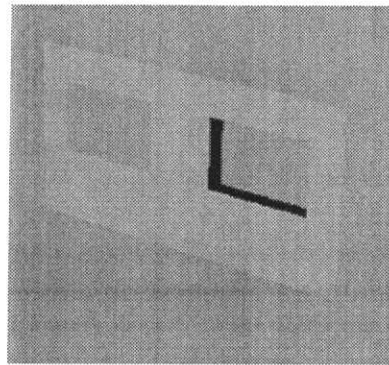
そこで、ここではオペレータが事例教示を行なうと同時に操作物体サブパーツがどの環境物体サブパーツから影響を受けているか指定することで、拘束域を与える。影響を与える環境物体サブパーツは、操作物体サブパーツ毎に別々に指定する。

Fig. 5.30は教示に関連した制御パネルである。Aはマニピュレータの関節角度を表示したパネルである。値を入力したり、右端のスピナーを押下して連続的に値を増減することによってマニピュレータを操作できる。また、Bはマニピュレータのフランジの位置・姿勢に関する制御パネルである。スピナーの押下によってマニピュレータのフランジの位置・姿勢を操作できる。AとBは互いに連動している。オペレータはこれらを用いてマニピュレータを教示したい姿勢に導き、CのTeachボタンを押下することで、教示点を順次登録していく。

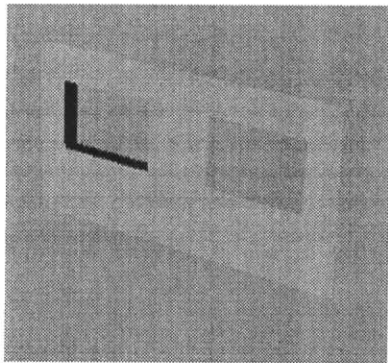
それに先立って、その教示点に関連する拘束域の指定も行なう。操作物体AのサブパーツはFig. 5.24に示した2種類のものがある。Fig. 5.30のCはそれらのサブパー



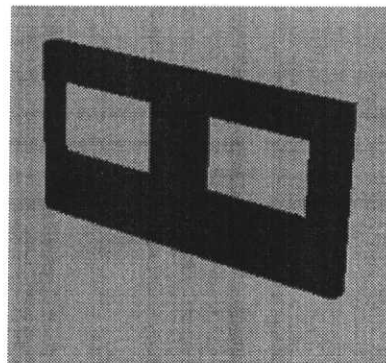
(a)



(b)

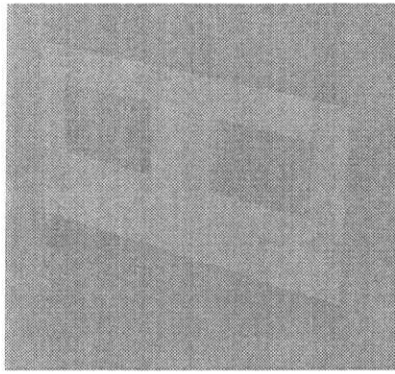


(c)

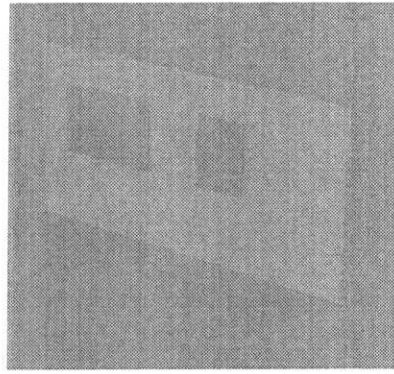


(d)

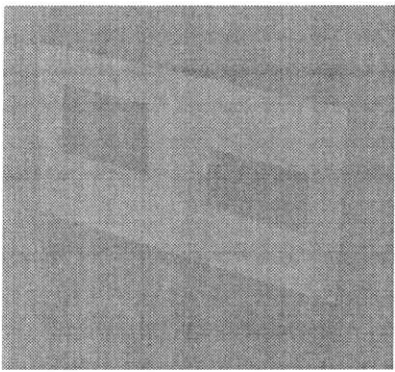
図 5.28: 2 穴環境物体  $C$  のサブパーツ



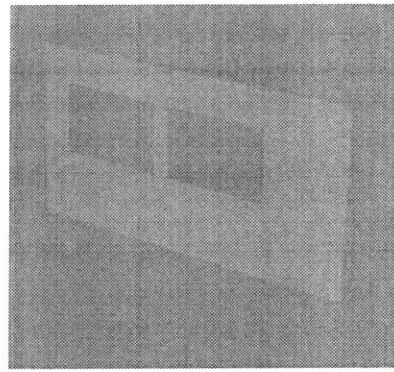
(a)  $\theta = (1,1,0,0)$



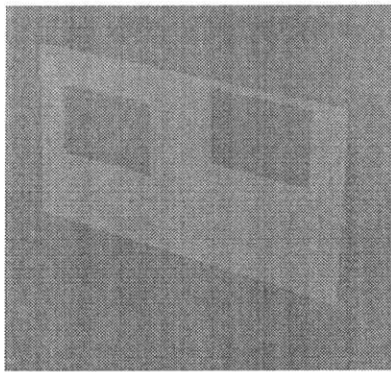
(b)  $\theta = (0.5,1,0,0)$



(c)  $\theta = (1,0.8,0,0)$



(d)  $\theta = (1,1,10,0)$



(e)  $\theta = (1,1,0,8)$

図 5.29: 2 穴環境物体  $C$  の形状パラメータ (右穴のみ)

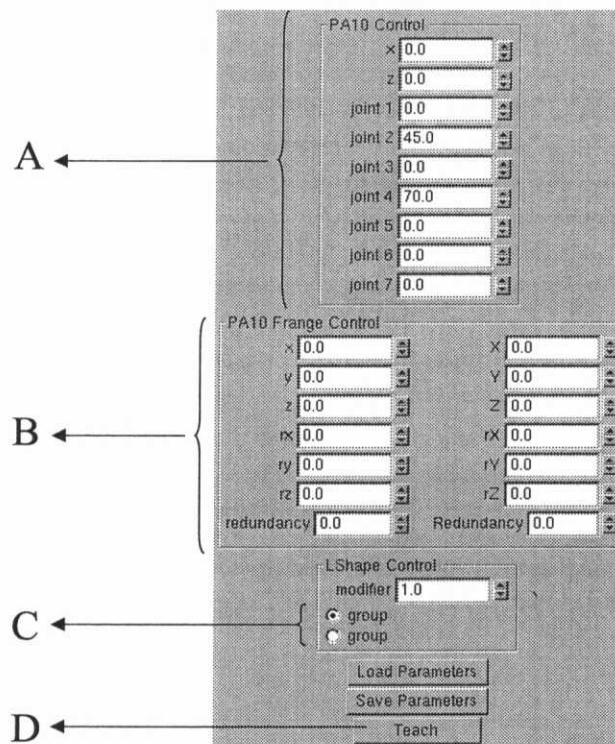


図 5.30: 教示用制御パネル

ツを指定するラジオボタンになっており、ボタンを切り替えることによってそれぞれに影響する環境物体のサブパーツを表示できる。各操作物体サブパーツに影響を与える環境物体サブパーツの指定は、対象とする操作物体サブパーツのボタンを ON にした状態で、例えば物体 B の場合は Fig. 5.25 の inner/outer チェックボックスをチェックする。サブパーツの指定は複数行なうことも可能である。

これらの指定を行なうことで教示点毎にローカルな環境モデルを作成できる。特徴量  $\theta$  は環境設定時に指定した値を用いることができるので、これらから拘束を確定し、拘束の符号を求めることができ、マナーデータベースに記録すべきすべてのデータが得られる。

Fig. 5.1 に示した教示モジュールを本システムにあてはめた場合の構成を Fig. 5.31 に示す。

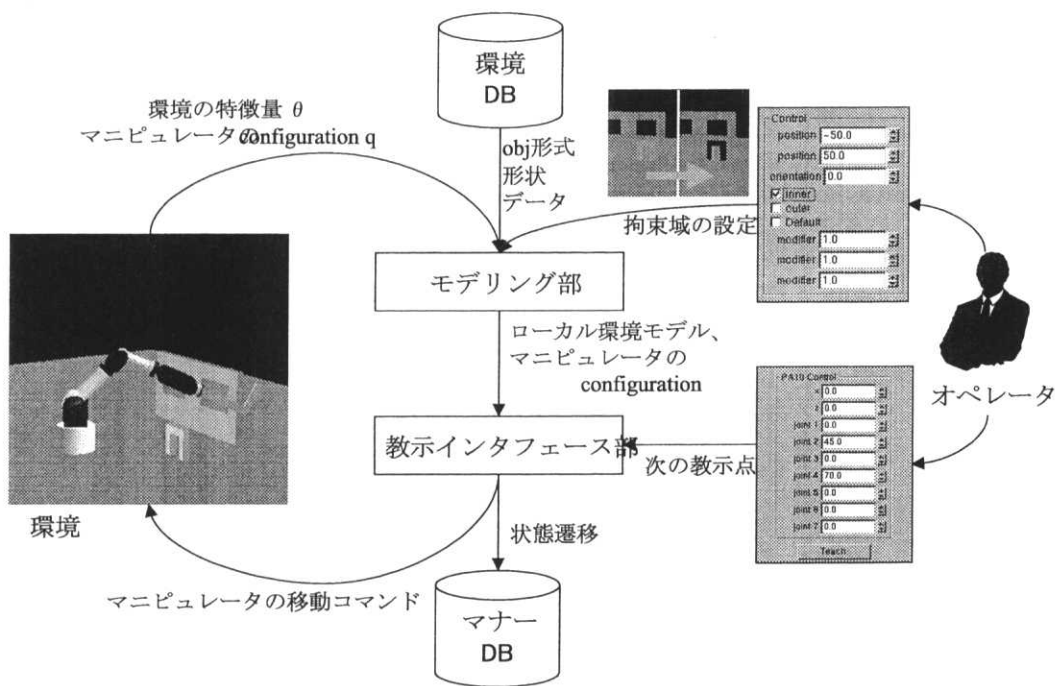


図 5.31: シミュレーションの教示モジュールの対応

作業を実行させる場合は、環境物体の特徴量とマニピュレータの初期姿勢を設定し、作業実行ボタンを押すと、システムはマナーデータベースを参照しながら作業を実行する。

環境物体の位置や形状が異なると、操作物体と環境物体の間の幾何条件が変化したり、マニピュレータの機構的制約から作業の方法が変化する。そこで、マニピュレータは環境に応じて適切なルールを選択して作業を行なう必要がある。

ここでは Fig. 5.32 (ケース 1) と Fig. 5.33 (ケース 2) に示すような 2 つの異なった事例について教示を行ない、それを複合したような事例を作業として実行させ、適切なルールを選択して作業を行なうか確かめる実験を行なった。

2 つのケースについてはそれぞれ、特徴量を少しずつ変えた環境でそれぞれ 5 回ずつ事例教示した。

課題として与えた環境に対してマニピュレータが移動操作作業を実行している様子を Fig. 5.34 に示す。前半の (a) から (c) にかけてはケース 1 に類似した環境であるが、マニピュレータはケース 1 の時に類似した動作を行なっていることから、そのケースに対応した動作を行なっていることが推測できる。一方、(f) から (g) ではケース 2 に類似した環境であり、マニピュレータもケース 2 に対応した動作を行なっている様子を見ることができる。

上の実験における教示の効果を見るために、C-space において教示が行なわれる様子を分析した。

Fig. 5.35 はマニピュレータがコの字型環境物体  $B$  から L 字型操作物体  $A$  を抜く作業を行なう場合の C-space に関して、いくつかの 2 次元断面を描画したものである。世界座標系の座標軸を Fig. 5.35 のようにとり、マニピュレータの根元を原点にとる。 $A$  の屈曲部を C-space 作成時の代表点とし、点  $(-50, 6, 25, 0, 0, 0)$  を原点として (姿勢は Euler 角)、 $z$  方向に 25 から 75 まで移動を行い、 $x$  軸を中心に 0 degree から 90 de-



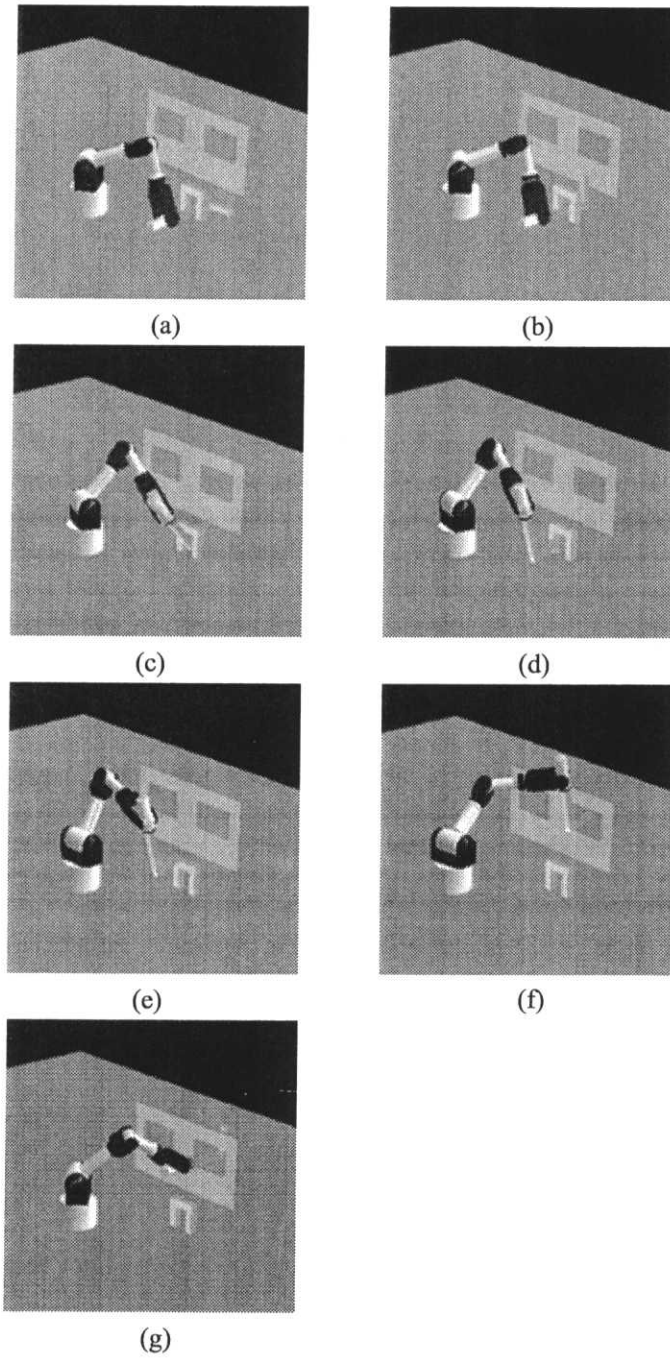


図 5.32: ケース 1 の教示事例

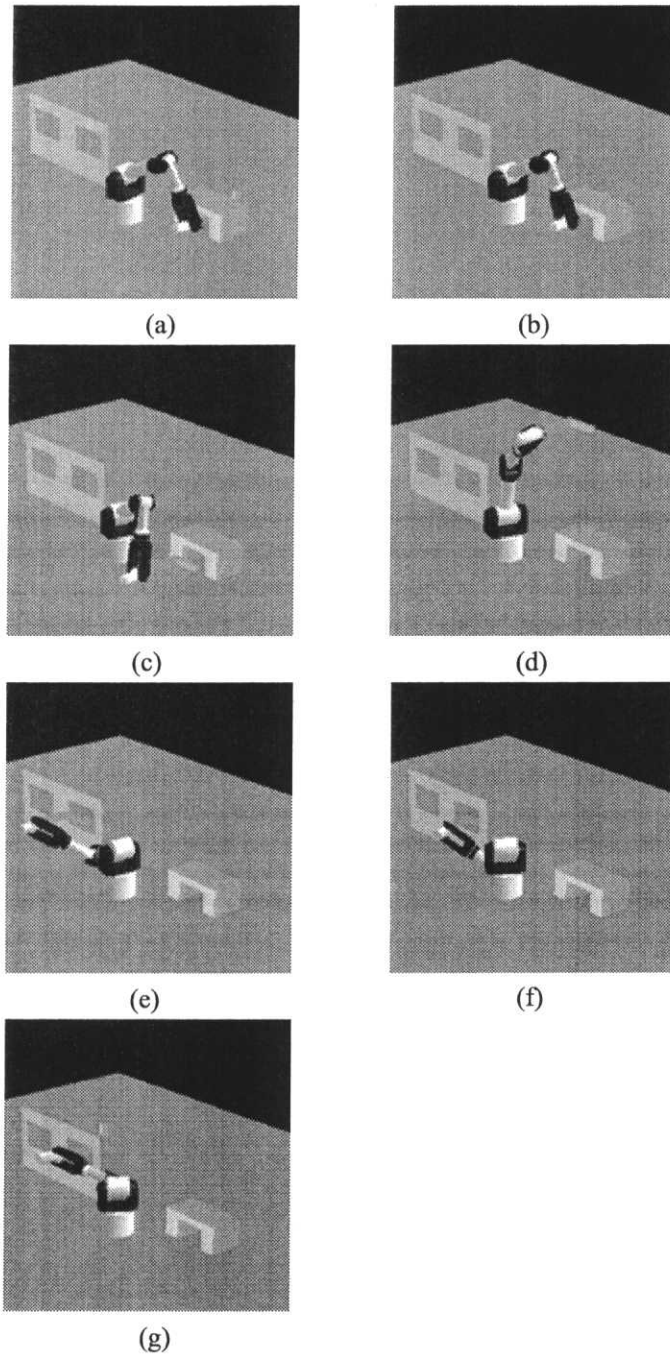


図 5.33: ケース 2 の教示事例

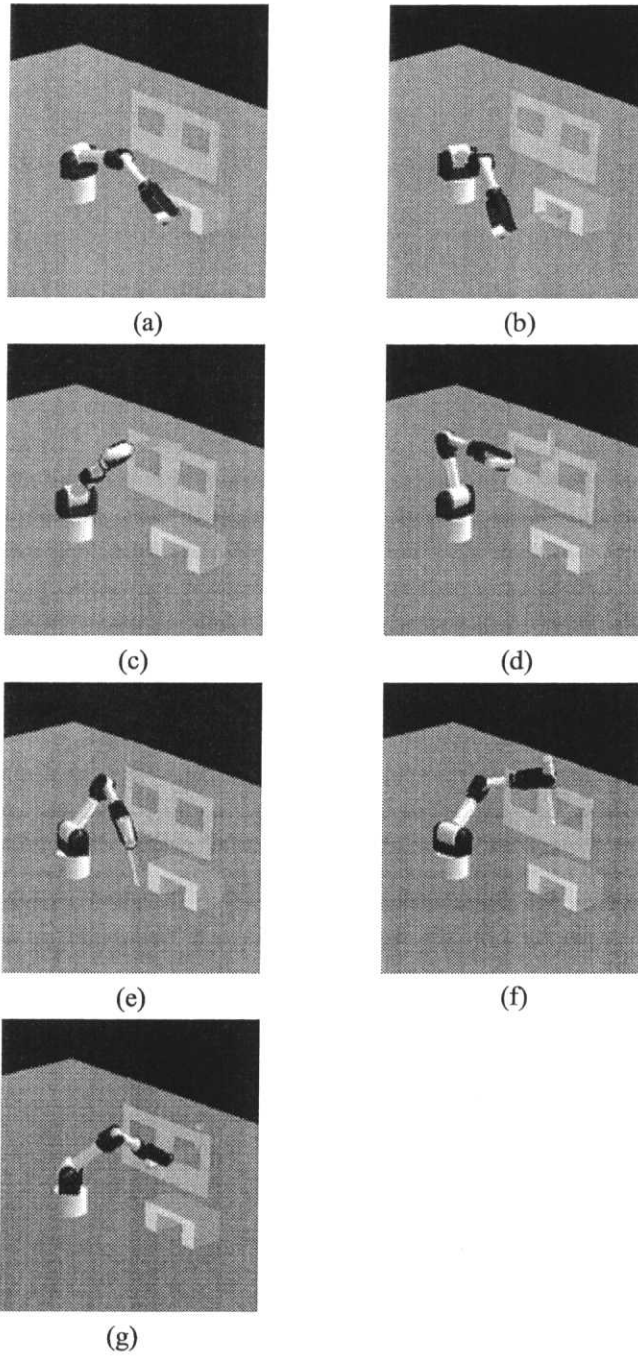


図 5.34: 教示事例を用いた作業実行の様子

gree まで回転させた場合の C-space の断面が Fig. 5.35(a) に示した図である。プロット時の  $z$  方向のステップは 1、 $x$  回転軸方向のステップは 1.5 degree である。図における点 A, B, C はマニピュレータがそれぞれ (b), (c), (d) に示された姿勢をとった場合の C-space 上の点を表している。 $z$  方向への移動と  $x$  軸回りの回転のみで操作を行った場合に、(b) から (c) への移動は可能だが、(d) から (b) や (c) への移動はできないことが、(a) の図からも判断できる。

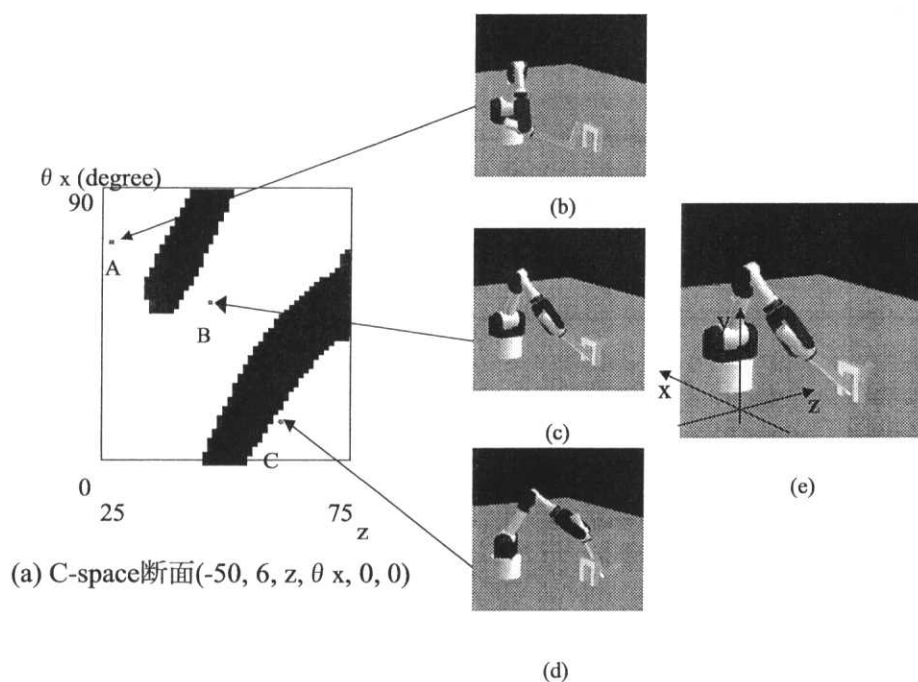


図 5.35: C-space 断面とマニピュレータの姿勢

Fig. 5.36は  $B$  の中心を、 $y$  方向に貫く軸回りに  $\phi = 0$  degree から 30 degree まで回転させた場合の Fig. 5.35の C-space 断面の変化である。また、Fig. 5.37は  $B$  の 2 番目の変形パラメータを  $\theta_2=0$  から 6 まで変化させた場合の Fig. 5.35の C-space 断面の変化である。いずれもパラメータを変化させるにつれて、2つの C-obstacle の間の通路が塞がり、 $A$  を  $x$  軸方向に回転させて  $B$  から抜く作業ができなくなっていく様

子が見られる。したがって、 $A$ を $B$ から抜く場合にも、 $z - \theta_x$ 平面の移動以外の、さまざまな作業パターンを教示しておく必要があることが判る。

Fig. 5.38は Fig. 5.35(a) の C-space 断面において、その中心付近に教示点を設定した場合の可視多角形を表したものである。白色の領域が可視多角形を表し、中間色はそれ以外の領域を表す。もう1個の教示点がこの白色の領域内に存在すれば、マニピュレータはそれらの教示点の間を1つの動作命令によって移動することができる。

この作業に対していくつかの作業パターンの教示を行ない、教示の進んでいく様子を観察した。ここでは、さまざまな作業パターンが設定できるように、 $B$ に対して Fig. 5.27で示した形状パラメータ  $\theta_0, \theta_1$  に加えて、Fig. 5.39に示す変形を行なう新たなパラメータ  $\theta_2$  を設けることにする。 $\theta_0, \theta_1, \theta_2$  のデフォルト値は1である。

これに対して、 $B$ から $A$ を抜く作業の教示を目的に、Fig. 5.40, Fig. 5.41, Fig. 5.42, Fig. 5.43に示す4つの作業パターンを教示した。ここで、(a)と(b)はそれぞれ1番目と2番目の教示点であり、マニピュレータはその間を軌跡がC-space上で直線となる1動作命令で移動する。Fig. 5.44の(a)から(d)はpattern 1の作業を1度教示し、変形パラメータ  $\theta_0, \theta_1, \theta_2$  を変化させた(教示点もそれに伴って移動する)場合にその教示点間の移動の可否をさまざまなパラメータ空間断面においてプロットしたものである。白色の部分は移動が可能と判定された部分であり、黒色の部分は移動が不可能と判定された部分である。(a)は $\theta_2 = 1$ として、 $\theta_0, \theta_1$ をそれぞれ0.5から2.5まで変化させた場合のプロットである。(b)は $\theta_1 = 1$ として、 $\theta_0, \theta_2$ をそれぞれ0.5から2.5まで変化させた場合のプロットである。(c)は $\theta_0 = 1$ として、 $\theta_1, \theta_2$ をそれぞれ0.5から2.5まで変化させた場合のプロットである。(d)は $\theta_0, \theta_1$ をそれぞれ0.5から2.5まで変化させ、 $\theta_2$ も $\theta_1$ と等しくなるように変化させた場合のプロットである。キャプションの数字は移動が可能と判定された割合を表す。例えば(b)の1215/2500は判定を行なった2500点中1215点で移動可能と判定されたことを示す。

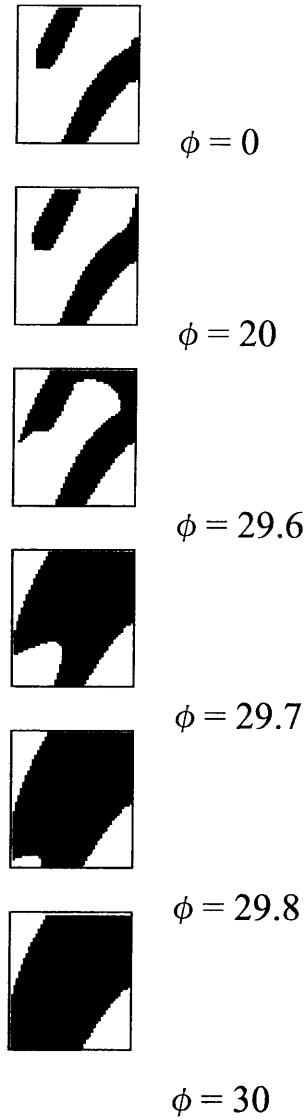


図 5.36:  $B$  を  $y$  軸中心に回転させた場合の  $C$ -space 断面変化

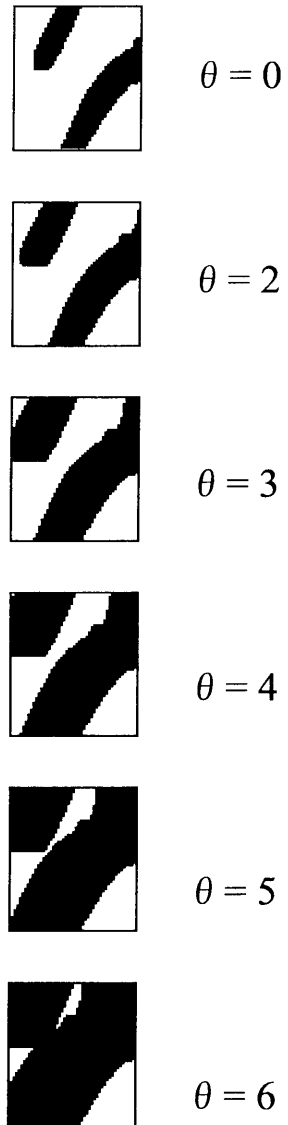


図 5.37:  $B$  の第 2 変形 parameter を変化させた場合の C-space 断面変化

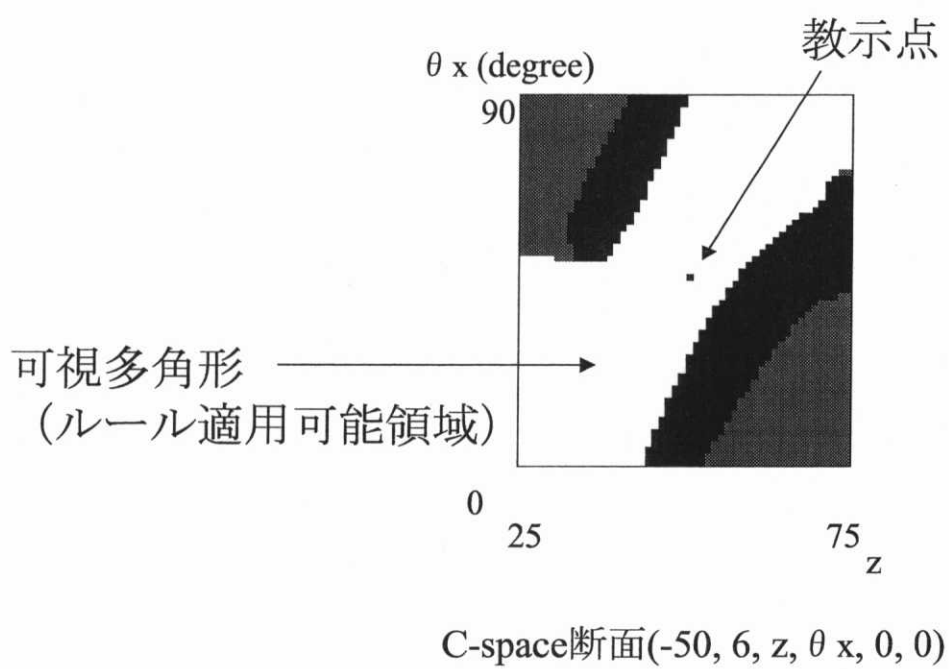
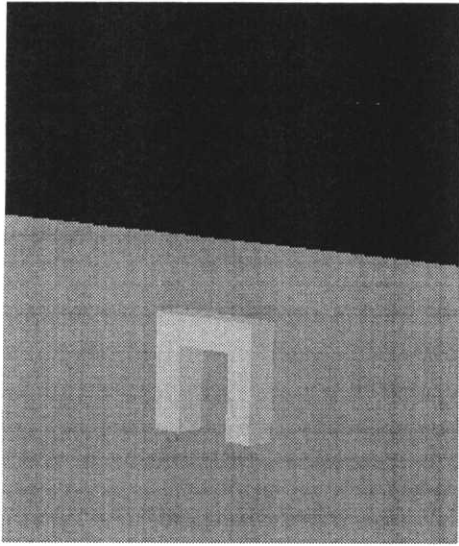
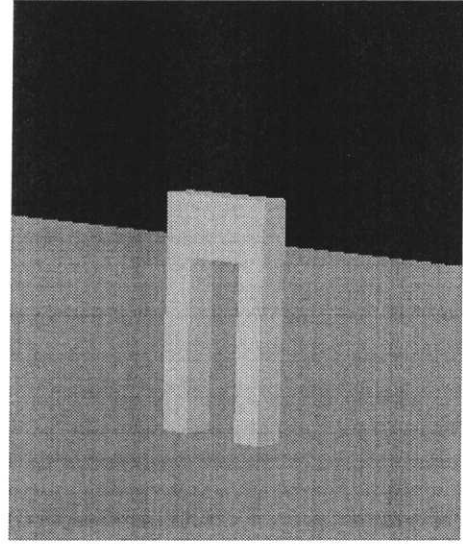


図 5.38: C-space 断面における可視多角形の形状





(a)



(b)

図 5.39:  $B$  に追加した変形パターン

(e) から (p) は pattern 2 から pattern 4 に関して同様のプロットを行なったものである。

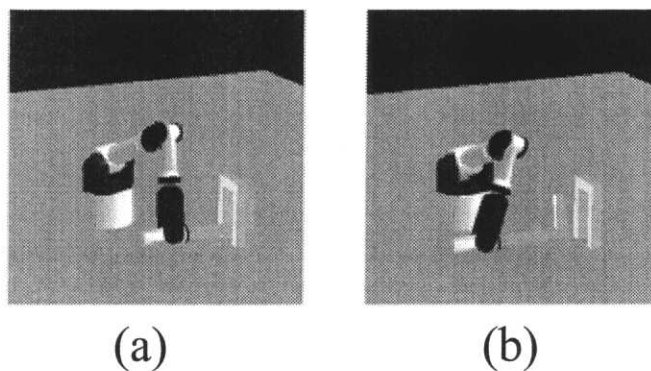


図 5.40: マニピュレータに対する作業の教示パターン 1

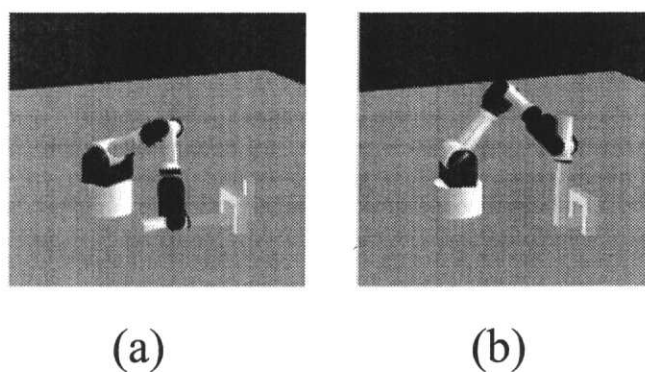
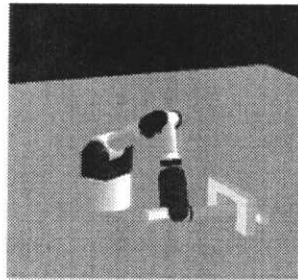


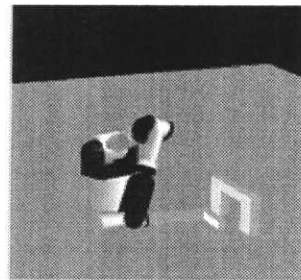
図 5.41: マニピュレータに対する作業の教示パターン 2

(q) から (t) はこれらの 4 パターンを教示した場合にマニピュレータが  $B$  から  $A$  を抜く作業の可否をプロットしたものである。作業可能な領域は各パターンの作業可能領域の和と等しく、 $B$  をさまざまに変形させた場合にも適用可能な領域が、1 パターンを教示したのみの場合と比較して、広がっていることが確認された。

次に、同じパターンの作業を特徴量を少しずつ変化させて教示することの効果

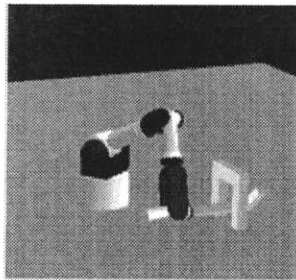


(a)

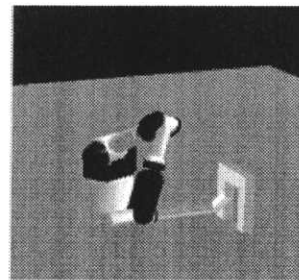


(b)

図 5.42: マニピュレータに対する作業の教示パターン 3



(a)



(b)

図 5.43: マニピュレータに対する作業の教示パターン 4

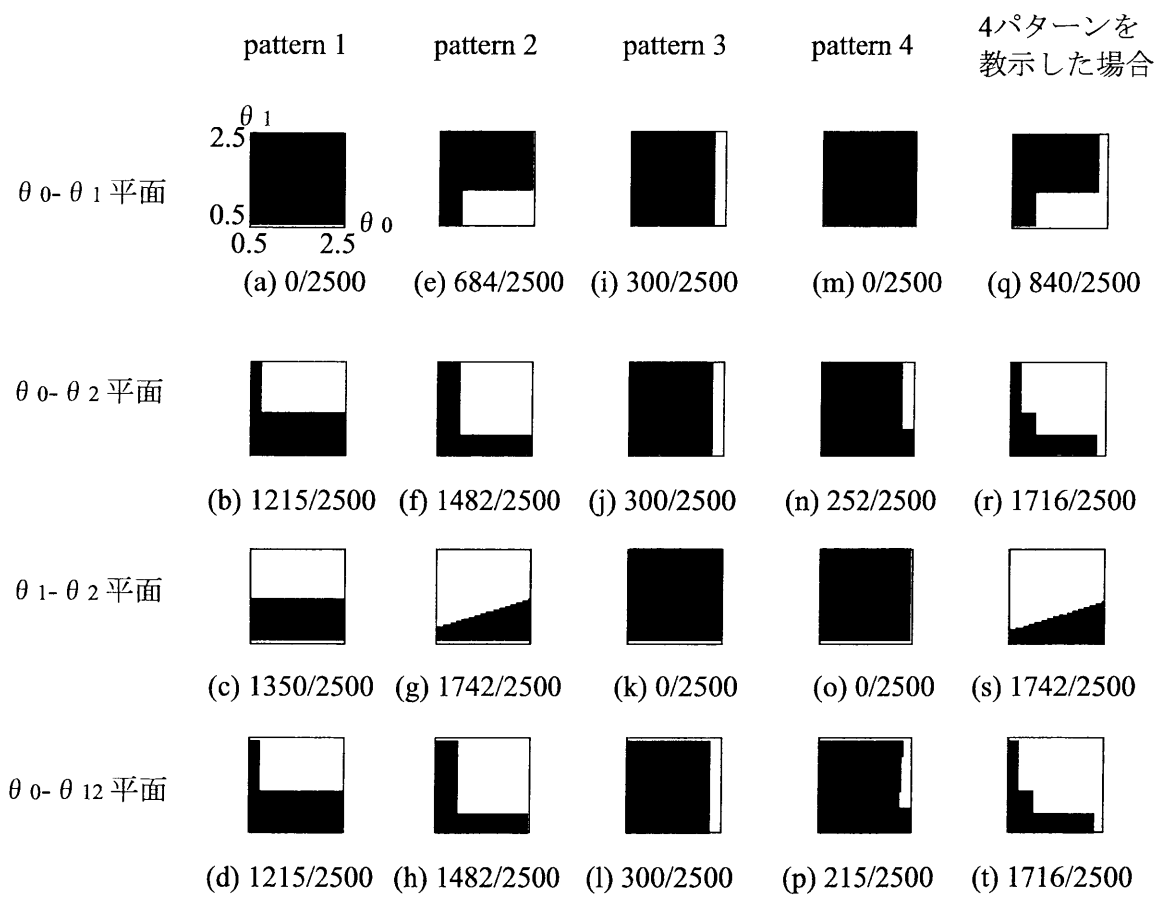


図 5.44: 各パターン動作による教示点間移動の可否


調べる。Fig. 5.45は pattern 4 の作業を教示したときの作業の可否の移り変わりをプロットしたものである。(a)は Fig. 5.44(n)と同じ図であり、(b), (c), (d), (e)はそれに、特徴量を少し変化させた環境に対する、同じパターンでの作業の教示を1つずつ順次追加していったときの図である。 $\theta_0 - \theta_2$  平面上の対象範囲に限って言えば、5回教示を行なうことによって、1回教示を行なった場合の1.5倍の領域でこのパターンでの作業実行が可能になっている。したがって、少しずつ特徴量の異なる環境において同じパターンの教示を繰り返し行なうことによって、ローカルな部分での作業実現能力が高められることが確認された。

このように、互いに異なるパターンを教示することと、同様のパターンを何回か教示することを組み合わせることで、マニピュレータが効果的に作業を実現できることがわかった。


このように、この実験を通じて

- 事例教示によってある状態プリミティブから遷移を行なう状態プリミティブが適切に取得できていること、
- 可視多角形を利用することで適切な移動操作作業用ルールが作成できること、
- 作業を行なう環境が教示を行なった環境と異なる場合でも、教示点を適切な位置に移動できること、
- 拘束域を設定することで、ローカルなセンサ情報で移動操作作業を実現できること

を総合的に確認した。




(a) 252/2500




(b) 320/2500



(c) 320/2500



(d) 376/2500



(e) 376/2500

図 5.45: パターン類似動作の教示による教示点間移動の可否の変化

## 5.10 おわりに

本章では、状態遷移方式を用いて作業を行なうロボットが教示された事例を利用して移動操作作業を行なう方法について検討を行なった。

第 5.2 節では状態遷移方式を用いた場合のルール作成法の概要を述べた。この場合、ルールの条件部は、行動選択方式の場合と同様、拘束条件のテストによって記述されるが。一方、実行部は出力が遷移先の次の状態となる点で異なる。マニピュレータが遷移を実現するコマンドとして、産業用マニピュレータにおいて一般的な MOVE\_LINE, MOVE\_JOINT の 2 種類を検討することにした。

第 5.3 節では、状態遷移方式において教示事例からルールを作成する場合に、行動選択方式のようにパターン認識の手法が適用できず、新たな手法が必要なことを指摘した。

第 5.4 節では、状態遷移方式を用いた場合の教示モジュールの構成を、行動選択方式を用いた場合のそれとの違いを中心に説明した。第 5.5 節は、教示モジュールにおいて仮想現実感教示インタフェースを用いることを検討した。仮想現実感技術を用いることの利点を述べ、オペレータの動作から移動操作部分を切り出す方法、そこから遷移を行なった状態プリミティブの列を抽出する方法を説明した。また、実際に実験系を組み、仮想現実感教示インタフェースを用いることで事例教示が可能なことを確認した。

第 5.6 節では、教示モジュールで事例教示されたデータからルールを作成するのに可視多角形を用いる方法を検討した。シミュレーションを行ない、マニピュレータが有効に移動操作作業を実行可能なことを確認した。

第 5.7 節では異なる環境の間で事例教示データを活用するために、状態プリミティブを対応付ける方法を述べ、新たな状態プリミティブで遷移に必要な目標点を算出する方法を検討した。

第 5.8 節では本章で検討した手法を統合し、事例教示を行なった場合の、状態遷移方式による移動操作作業を実現する手順を示した。

第 5.9 節では、シミュレーションを用いて、

状態遷移方式で操作を行なうロボットが未整備環境で有効に作業を行なえるか確認した。モデリングや拘束域の定義方法の実際について述べ、事例教示を行ない、実行時にはマニピュレータが状況に応じて適切なサンプルを選択し作業を行なえることを実証した。



## 6 結論

本論文は自動組立、多品種少量生産、サービス産業などの用途において、ロボットにあわせて整備されていないような環境で、移動操作作業を実行できるようなロボットの実現手法について論じたものである。

未整備環境でロボットを動作させるには、環境の状況をセンサによって知覚し、どのような操作を行なうべきか判断するためのルールが必要になる。そのようなルールの作成をめざして、さまざまな研究が行なわれてきた。ここではそれらを、そのルールの適用の深さと作成方法の2点に着目してプランニング方式、リアクティブ方式、行動学習方式の3種類に分類した。

プランニング方式は環境全体のモデルをあらかじめ作成し、その中でルールを何段階も適用することで操作の結果を将来にわたって予測した上で操作を決定し、実行する。作業を達成するために最適と推定される操作を行なうので、効率的な作業が可能であり、人間の負担も少ない長所がある。一方で、環境の変動に対する即応性に乏しく、環境情報を取得するコストも大きい。

リアクティブ方式は、それとは対照的に、設計者の用意したルールの中から、得

られた環境情報に適合したものを検索し、将来の予測までは行わずに、それを直接実行する。この方式は環境の変動に即応でき、環境情報取得コストも小さい。しかし、ルールを作成する設計者の負担が大きく、また作業を達成するのに効率的なルールを作成するのが困難という欠点を有する。

行動学習方式は、ルールをロボットが自ら試行錯誤によって獲得することで、設計者の負担を削減する方式である。しかし、試行錯誤を行なうロボットの消耗の問題や、大規模な作業に適用するには実用的でないという問題を抱える。

このように、これらの方式はいずれも万能ではなく、作業の性質によって使い分ける必要がある。本論文で対象とする、未整備環境における移動操作作業は、環境情報はプランニング方式ほど完全には得られないが、リアクティブ方式で想定するよりも豊富に得られる性質を持つ。また、環境変動に関してはプランニング方式のように完全に静的とは仮定できないが、リアクティブ方式や行動学習方式ほど動的な場合を想定する必要はないという中間的な性質を持つ。本論文では、このような性質を活用しつつロボットの消耗やルール作成の負担を抑えながら、プランニング方式ほどではなくとも、リアクティブ方式よりも効率的な作業実行能力をもった方式の構築を目指した。

そのために、本論文ではそのような作業に関する知識を持った人間の作業を観察、分析し、同じ状況で同じ操作を行なうようなルールを何らかの方法で作成することで達成できると考え、その実現方法を検討した。以下に、本研究で得られた成果を要約する。

第1章では本研究の背景と目的について述べた。第2章では未整備環境でロボットが作業を実行していく方式に関する研究の現状と課題について解説し、本論文の研究方針を明らかにした。

第3章では、本研究の対象とする作業条件を明確にするために、移動操作作業の定

義、未整備環境のモデル化を行なった。また、センサ情報から操作を決定する過程をルール選択の形に定式化し、ルールの条件部と実行部の表現を行なうことで作業を記述できると考えた。実行部の出力の形態によってルール記述の方式が状態遷移方式と行動選択方式に分類できるとした。また、ロボットの動作方式にはマニピュレータで一般的な位置指令方式と、移動ロボットで一般的な速度指令方式があることを指摘し、位置指令方式のロボットには状態遷移方式が、速度指令方式のものには行動選択方式のルール記述が適していることを述べた。

以下の2つの章では行動選択方式と、状態遷移方式に対して事例教示からルールを作成する方法を検討した。

第4章では、行動選択方式のルール記述を行なう場合に移動操作作業の実行ルールを事例教示から作成する方法を検討した。モデルに由来する幾何的拘束により条件部を記述し、事例教示によって収集したデータの中から、選択した行動の共通性に着目することで、移動操作に影響を与える有効な拘束と、そうでない拘束とを区別することを考え、これを行なうために、パターン認識の手法を利用することにした。まず、シミュレーションを行いパターン認識を用いることの有効性を確認した。具体的にはセル環境に最近傍法を適用して以下の結果を得た。

- 移動操作の教示データに対してパターン認識手法を用い、有効な作業実行ルールが生成可能なことを確認した。
- ルール生成過程の観察から、ルール生成が不適切な部分でも適切なルールが生成されている部分の近傍であれば、デフォルトルールの適用により作業達成が可能なことが判った。
- パターン認識手法を用いて教示事例からルールを生成する手法は、Q学習によるルール生成と比較してかなり効率的という結果が得られた。実験においては

教示事例を用いる方が学習よりも2桁程度ロボットの試行量が少なくて済むという結果がえられた。

- 人間が選択的に例題を与えて教示する方式は、ランダムに例題を与えた場合に比べて効率的なルール生成が可能なが判った。これによって、生成したルールが正解に対して多少誤差を有する場合でも、作業実行が可能となる。

次に、パターン認識の主要な手法である最近傍法、ニューラル・ネットワーク、決定木の特徴を比較して検討した。その結果、

- 本研究の対象とする作業のように、あらかじめ拘束がモデリングされているが、有効でない拘束が多いという性質の作業に対しては決定木が有効である

ということを見出した。その後、移動ロボットを用いた実験を行ない、事例教示に対して決定木を適用し有用なルールの抽出可能性を確認した。その結果、

- 実験において、GO\_THROUGH, PARK という2種類の作業について教示を行い、決定木を用いて有効なルールが生成可能なことを確かめた。これによってルール抽出に対する決定木適用の有効性を確認した。
- 決定木の枝刈りを行なうことで、教示データに存在するノイズを除去し、有効なルールの生成を確認した。これによって、人間が不正な教示を行なった場合でも、その影響を受けないでルール生成する見通しを得た。

第5章では、状態遷移方式のルール記述を行なう場合に移動操作作業の実行ルールを事例教示から作成する方法を検討した。状態遷移方式の場合は、選択した遷移の共通性を見出すことが困難なため、収集した遷移を直接ルールとして利用する方式を検討した。実行時に利用可能な遷移を見出すために、可視多角形を用いることを提案した。また、教示を行なった環境と作業を行なう環境の間で、検出した特徴量が異なり、

相違が存在すると判断される場合に、拘束の対応を利用して遷移を対応させる手法を提案した。さらに、事例教示に対して仮想現実感技術を利用するメリットを述べ、仮想現実感教示インタフェースを用いて事例教示を実現した。また、それらを踏まえて7自由度マニピュレータを用いたシミュレーションを行ない、状態遷移方式においても事例教示から移動操作作業を実現できることを確認した。具体的には、

- さまざまなパターンの作業を教示した状態で、作業の実行を行なわせた場合に、可視多角形を用いた提案手法によって適切なパターンを選択して作業を遂行できることを確認した。これは状態遷移方式においても、教示によって適切なルールが生成することを示すものである。
- 互いに異なるパターンの教示と、同様のパターンの繰り返し教示を併用することで、C-space上で作業遂行可能な領域を拡大できることを確認した。すなわち、適切な教示を繰り返すことで、ルールは改善できることを示している。

以上のように、本研究では以下の技術を検討し、成果を収めた。

1. 未整備環境で作業を実行する手段を得る方法として、

- プランニング方式よりも環境情報取得コストが低く、環境即応性が高く、
- リアクティブ方式よりも作業効率がよく、人間の負担が軽く、
- 行動学習方式よりもロボットの負担が軽く、大規模な問題に適用可能な方式として、

人間の事例教示から作業実行ルールを作成する方法を提案し、移動操作作業に対してその有効性を確認した。

2. 行動選択方式で動作するロボットの場合は、事例教示によって収集したデータ

の中から、選択した行動の共通性に着目して決定木を生成することで、有用なルールを抽出する方法を提案し、その有効性を確認した。

3. 状態遷移方式で動作するロボットの場合は、可視多角形を利用して、事例教示された遷移を直接ルールとして利用する方法を提案した。また、事例教示した環境と作業を実行する環境の間に相違がある場合には、それらの環境の拘束間の対応を利用して遷移を対応付ける方法を提案した。シミュレーションを行ない手法の有効性を確認した。

本研究では、これらの技術を検討することにより、ロボットの使用を前提として整備されていない環境において、ロボットがさまざまな作業を実行する基本である移動操作作業を行なうための新たな手法を提案し、その実現可能性を明らかにした。本研究の成果を利用することによって、自動組立、多品種少量生産、サービス業などの広範な分野においてロボットが使用できるようになれば幸いである。

## 謝辞

本研究は、旧NTTヒューマンインタフェース研究所、NTTサイバースペース研究所、NTTサイバーソリューション研究所において行った研究の成果をまとめたものである。

本研究をまとめるにあたり、東京大学大学院工学系研究科新井民夫教授にはロボット全般に関する深い知見をもって、厳しく的確なご指導、ご教示を賜った。深く感謝するとともに厚く御礼申し上げます。有益なご批判とご指導をいただいた東京大学大学院工学系研究科木村文彦教授、同大学生産技術研究所池内克史教授、同大学大学院工学系研究科高増潔助教授、同大学大学院新領域創成科学研究科佐々木健助教授に心から感謝いたします。また、数々のご助力を賜った同大学大学院工学系研究科太田順助教授に深謝いたします。

本研究の遂行にあたり、元ヒューマンインタフェース研究所高橋友一主幹研究員（現中部大学教授）には研究に対する熱意と鋭い先見をもってご指導をいただき、実環境におけるロボットの作業記述と教示に関する研究を進めることができた。元ヒューマンインタフェース研究所水川真グループリーダー（現芝浦工業大学教授）にはご指導をいただいたことにより産業用ロボットの現状やセンシングを考慮した作業設計について深く洞察することができた。元ヒューマンインタフェース研究所木暮賢司部長（現サイバースペース研究所所長）には数々のご配慮をいただくとともに論文を書く心構えについてご教示いただいた。サイバーソリューション研究所柿崎隆夫プロジェクトマネージャ、同研究所辻本雅彦プロジェクトマネージャには本論文の執筆にあたり、格段のご配慮をいただいた。サイバーソリューション研究所奥平雅士グループリーダー、同研究所高橋時市郎グループリーダー、同研究所柳原義正主任研究員、同研究所永津昭人主任研究員をはじめとする研究所の先輩、同僚諸氏には常日頃ご鞭撻とご助力を賜った。ここに記して感謝いたします。

## 参考文献

- [1] P. Adriaans and D. Zantinge, "Data Mining," Addison Wesley Longman Ltd., 1996.
- [2] 甘利「神経回路網モデルとコネクショニズム」東京大学出版会, 1989.
- [3] 安西「認識と学習」岩波講座ソフトウェア科学 16, 岩波書店, 1989.
- [4] R.C. Arkin, "Integrating Behavioral, Perceptual, and World Knowledge in Reactive Navigation," in *Designing Autonomous Agents: Theory and Practice from Biology to Engineering and Back*, pp. 105-122, MIT/Elsevier, 1990.
- [5] 浅田, 野田, 俵積田, 細田「視覚に基づく強化学習によるロボットの行動獲得」日本ロボット学会誌, vol. 13, no. 1, pp. 68-74, 1995.
- [6] 浅野「計算幾何学」朝倉書店, 1990.
- [7] J. Barraquand and J.-C. Latombe, "A Monte-Carlo Algorithm for Path Planning With Many Degrees of Freedom," IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1712-1717, 1990.
- [8] O. Brock and O. Khatib, "High-Speed Navigation Using the Global Dynamic Window Approach," IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 341-346, 1999.
- [9] R. A. Brooks, "A Layered Intelligent Control System for a Mobile Robot", IEEE Journal Robotics and Automation, vol. RA-2, April, pp. 14-23, 1986.
- [10] R. A. Brooks, "Intelligence without Reason," Proc. IJCAI, pp. 569-595, 1991.



- [11] J.F. Canny, "The Complexity of Robot Motion Planning," MIT Press, 1988.
- [12] J.H. Connell, "A Behavior-Based Arm Controller," IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol. 5, no. 6, pp. 784-791, 1989.
- [13] J. Connell and S. Mahadevan, "Rapid Task Learning for Real Robot," in *Robot Learning*, Kluwer Academic Publishers, 1993.
- [14] B. Chazelle, "Approximation and Decomposition of Shapes," Algorithmic and Geometric Aspects of Robotics, Lawrence Erlbaum Associates, pp. 145-185, 1987.
- [15] B.V. Dasarathy, "Nearest Neighbor (NN) Norms: NN Pattern Classification Techniques," IEEE Computer Society Press, 1991.
- [16] B. Donald, "A Search Algorithm for Motion Planning with Six Degrees of Freedom," Artificial Intelligence 31, pp. 295-353, 1987.
- [17] 藤江「医療福祉へのロボット技術の展開」システム／制御／情報, vol. 42, no. 4, pp. 195-202, 1988.
- [18] 福村, 谷「力学系に基づく自律移動ロボットの行動学習」日本ロボット学会誌, vol. 13, no. 1, pp. 75-81, 1995.
- [19] M.K. Habib and H. Asama, "Efficient Method to Generate Collision Free Paths for Autonomous Mobile Robot Based on New Free Space Structuring Approach," Proceedings of IEEE/RSJ IROS'91, vol. 2, pp. 563-567, 1991.
- [20] T. Hamada, K. Kamejima and I. Takeuchi, "Image Based Operation: A Human-Robot Interaction Architecture for Intelligent Manufacturing," Proc. of IECON,

pp. 556-561, 1989.

- [21] P. Hart, N. Nilsson and B. Raphael, "A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths," *IEEE Trans. on Systems, Science and Cybernetics*, SSC-4 (2), pp. 100-107, 1968.
- [22] J.E. Hopcroft, D.A. Joseph and S.H. Whitesides, "Movement Problems for 2-Dimensional Linkages," *SIAM Journal on Computing*, vol. 13, no. 3, pp.610-629, 1984.
- [23] K. Ikeuchi, T. Suehiro, P. Tanguy and M. Wheeler, "Assembly Plan from Observation," *The Robotic Institute Annual Research Review*, Carnegie Melon Univ., pp. 37-53, 1990.
- [24] 石井, 上田, 前田, 村瀬 「パターン認識」 オーム社, 1998.
- [25] 石川 「ファジィ制御を用いた自律移動ロボットの誘導方式の検討」 *日本ロボット学会誌*, vol. 9, no. 2, pp. 149-161, 1991.
- [26] B. Joe and R.B. Simpson, "Correction to Lee's visibility polygon algorithm," *BIT*, vol. 27, pp. 458-473, 1987.
- [27] D.A. Joseph and W.H. Plantiga, "On the Complexity of Reachability and Motion Planning Questions," *Proceedings of the First ACM Symposium on Computational Geometry*, pp.62-66, 1985.
- [28] L. Kaelbling, "An Adaptive Mobile Robot," *Proceedings of the 1st European Conference on Artificial Life*, pp. 41-47, 1991.

- [29] K. Kanatani, "Geometric Computation for Machine Vision," Oxford University Press, 1993.
- [30] S.B. Kang and K. Ikeuchi, "Toward Automatic Robot Instruction from Perception Mapping Human Grasps to Manipulator Grasps," IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol. 13, no. 1, 1997.
- [31] ケルマンシヤヒ 「ニューラルネットワークの設計と応用」 昭晃堂, 1999.
- [32] W.S. Kim and A.K. Bejczy, "Graphic Displays for Operator Aid in Telemanipulation," IEEE Int. Conf. on Systems, Man, and Cybernetics, pp. 1059-1067, 1991.
- [33] 今野, 山下 「非線形計画法」 日科技連, 1978.
- [34] J.R. Koza, "Evolution of Subsumption Using Genetic Programming," Proc. ECAL-91, pp.110-119, 1991.
- [35] M.W. Krueger, "Artificial Reality II," Addison Wesley, 1990.
- [36] Y. Kuniyoshi, M. Inaba and H. Inoue, "Seeing, Understanding and Doing Human Task," IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 2-9, 1992.
- [37] Y. Kuniyoshi, M. Inaba and H. Inoue, "Learning by Watching: Extracting Reusable Task Knowledge from Visual Observation of Human Performance," IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol. 10, no. 6, pp. 799-822, 1994.
- [38] T. Lozano-Pérez, "Spatial Planning: A Configuration Space Approach," IEEE Trans. on Computers, vol. 32, no. 2, pp. 108-120, 1983.

- [39] V.J. Lumelsky and A.A. Stepanov, "Dynamic Path Planning for a Mobile Automaton with Limited Information on the Environment," *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 31, no. 11, pp.1058-1063, 1986.
- [40] P. Maes, "Situated Agents Can Have Goals," in *Designing Autonomous Agents: Theory and Practice from Biology to Engineering and Back*, pp. 49-70, MIT/Elsevier, 1990.
- [41] S. Mahadevan and J. Connell, "Automatic Programming of Behavior-Based Robots Using Reinforcement Learning" *Artificial Intelligence*, vol. 55, Nos. 2-3, pp. 311-365, 1992.
- [42] D. Michie, D. Spiegelhalter and C. Taylor, "Machine Learning, Neural and Statistical Classification," Prentice Hall, 1994.
- [43] 森下, 宮野編「発見科学とデータマイニング」共立出版, 2000.
- [44] S. Mujtaba and R. Goldman, (金山, 坪内訳)「ロボット言語 AL」総研出版, 1984.
- [45] J. Neider, T. Davis and M. Woo, "OpenGL Programming Guide," Addison-Wesley Publishers, 1993.
- [46] N. Nilsson, "A Mobile Automation: An Application of Artificial Intelligence Techniques," *Proceedings of IJCAI*, pp. 509-520, 1969.
- [47] S. Murthy, S. Kasif and S. Salzberg, "A System for Induction of Oblique Decision Tree," *J. of Artificial Intelligence Research* 3, pp. 1-32, 1994.

- [48] 大川, 薦田 「知識獲得技術の最新動向とその製造分野における応用」 システム／制御／情報, vol. 37, no. 9, pp. 524-530, 1993.
- [49] W.H. Press, S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling, and B.P.Flannery, "Numerical Recipes in C," Cambridge University Press, 1988.
- [50] J.R. Quinlan, "C 4.5: Programs for Machine Learning," Morgan Kaufmann, 1993.
- [51] J.H. Reif, "Complexity of the Mover's Problem and Generalizations," Proc. IEEE Symposium on Foundations of Computer Science, 1979.
- [52] J. McClelland, D. Rumelhart and the PDP Research Group, "Parallel Distributed Processing," MIT Press, 1986.
- [53] 斎藤 「線型代数入門」 東京大学出版会, 1989.
- [54] 佐藤 「ロボットによる行動の生成と理解」 日本ロボット学会誌, vol. 11, no. 8, pp. 1106-1110, 1993.
- [55] H. A. Simon, "The Sciences of the Artificial," MIT Press (2nd edition), pp.23-26, 1969.
- [56] S. Tachi, H. Arai and T. Maeda, "Tele-Existence Simulator with Artificial Reality," IEEE Int. Workshop on Intelligent Robots and Systems, pp. 719-724, 1988.
- [57] 東京大学教養学部統計学教室編 「統計学入門」 東京大学出版会, 1991.
- [58] 内山, 森田, 沢崎 他 「動き追跡処理システム『トラッキングビジョン』」 日本ロボット学会誌, vol. 16, no. 1, pp. 52-53, 1998.

- [59] K. Ward and A. Zelinsky, "Acquiring Mobile Robot Behaviors by Learning Trajectory Velocities with Multiple FAM Matrices," Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 668-673, 1998.
- [60] 山村, 宮崎, 小林「エージェントの学習」人工知能学会誌, vol. 10, no. 5, pp.683-689, 1995.
- [61] 吉川「ロボット制御基礎論」コロナ社, 1988.
- [62] 矢野経済研究所「1999年版 次世代型パーソナルロボット市場」矢野経済研究所, 1999.
- [63] 「特集：大規模データベースからの知識獲得」人工知能学会誌, vol. 12, no. 4, 1997.
- [64] 「特集：人間共存型ロボット」日本ロボット学会誌, vol. 16, no. 3, 1998.
- [65] 「ロボットが家族になる日」週刊読売, 9/19, pp. 34-40, 1999.
- [66] "Dataglove Model 2 Operation Manual," VPL Research Inc., 1989.
- [67] 「アルメガ GV 取扱説明書（ティーチング編）」（株）ダイヘン
- [68] "Workspace 3+ User Guide Manual," Robot Simulations Ltd., 1995.
- [69] "GLUI User Interface Library," <http://www.cs.unc.edu/rademach/glui/>

## 本論文に関する著者の業績

### 論文

1. 小方博之、高橋友一：「幾何情報に基づく作業記述法を用いて異なる作業環境で  
教示内容を実行するロボットシステム」、日本ロボット学会誌, vol.11, no.3, pp.444-  
452 (1993.4)
2. 小方博之、高橋友一：「Robotic Assembly Operation Teaching using Virtual  
Environment」、IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol.10,  
no.3, pp.391-399 (1994.6)
3. 小方博之、高橋友一：「教示資産の活用と作業意図反映のための経路生成法」、  
日本ロボット学会誌, vol.13, no.1, pp.100-106 (1995.1)
4. 小方博之、高橋友一：「線形拘束条件下の物体の挙動の分類」、日本ロボット  
学会誌, vol.14, no.3, pp.72-77 (1996.4)
5. 小方博之、高橋友一：「Path Planning Based on Task Knowledge and User's  
Intention」、Journal of Robotics and Mechatronics, vol.8, no.1, pp.25-32 (1996.2)

### 国際会議

1. 小方博之、高橋友一：「A Geometric Approach to Task Understanding for  
Robotic Assembly Operations」、IEEE International Conference on Robotics  
and Automation (ICRA'93), pp.58-64 (1993.5)
2. 小方博之、高橋友一：「An Approach to Task Understanding and Playback  
Toward Complex Environments」、IEEE International Workshop on Robot  
and Human Communication (ROMAN'93), pp.314-319 (1993.11)

3. 小方博之、高橋友一：「A Geometric Approach to Task Understanding and Playback – Compact and Robust Task Description for Complex Environments」、IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'94), pp.848-854 (1994.5)
4. 小方博之、水川真：「Path Planning by Analogy」、IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'97), pp.1436-1441 (1997.4)
5. 小方博之、津田雅之、水川真：「Teaching 6-DOF Tasks for Robot Operating Assembly in the Same Category」、8th International Conference on Advanced Robotics (ICAR'97), pp.693-698 (1997.7)

#### 全国大会・講演会等

1. 小方博之、高橋友一：「組立物体の状態記述に関する研究(第1報)」、第9回日本ロボット学会学術講演会, pp.937-938 (1991.11)
2. 小方博之、高橋友一：「組立物体の状態記述に関する研究(第2報)」、第2回ロボットシンポジウム, pp.133-138 (1992.5)
3. 小方博之、高橋友一：「幾何情報による異環境での組立作業再現」、ロボティクス・メカトロニクス講演会, pp.1086-1089 (1993.7)
4. 小方博之、高橋友一：「バーチャルリアリティによる実演教示と教示資産の類似環境への適用の検討」、ロボティクス・メカトロニクス講演会, vol.B, pp.1019-1022 (1994.6)
5. 小方博之、津田雅之、高橋友一：「マルチエージェントアセンブリシステムのための教示理解」、ロボティクス・メカトロニクス講演会, vol.A, pp.520-523 (1995.6)



6. 小方博之、津田雅之、水川真：「類型作業実行システムの研究」、ロボティクス・メカトロニクス講演会, vol.A, pp.367-368 (1996.6)
7. 小方博之、水川真：「アナロジーを用いた経路生成」、第14回日本ロボット学会学術講演会, no.1, pp.75-76 (1996.11)
8. 小方博之、水川真：「アナロジーを用いた作業計画」、ロボティクス・メカトロニクス講演会, vol.B, pp.717-718 (1997.6)
9. 小方博之、津田雅之、水川真：「類型環境における経路計画」、第3回ロボティクスシンポジア, pp.5-10 (1998.5)
10. 小方博之、津田雅之、水川真：「類型環境の教示データを用いた経路計画法」、ロボティクス・メカトロニクス講演会, CD-ROM 収録 (1998.6)
11. 小方博之、津田雅之、水川真：「アナロジーを用いた行動生成（環境特徴の抽出による作業類型性の評価）」、第16回日本ロボット学会学術講演会, pp.339-340 (1998.9)
12. 小方博之、津田雅之、水川真：「教示と仮説によるロボットの行動学習の効率化」、ロボティクス・メカトロニクス講演会, CD-ROM 収録 (1999.6)

## 著者の業績（本論文関連外）

### 解説記事

1. 平岩明、小方博之：「デスクトップロボティクスのお教室 –ICC ワークショップ “ロボットを作る” から」、日本ロボット学会誌, vol.13, no.2, 掲載予定 (2000.3)

### 論文

1. 高橋友一、小方博之：「人の動きによる動作手順の教示と動作列の再構成法」、人工知能学会誌, vol.8, no.4, pp.448-455 (1993.7)
2. 小方博之、新井民夫、太田順：「時変環境でユーザ仕様を考慮した移動ロボットの軌道計画法」、日本ロボット学会誌, vol.12, no.6, pp.905-910 (1994.9)
3. 津田雅之、小方博之、南條義人：「実演教示による多角形ワーク組立のための局所的な接触状態遷移モデル群の生成」、日本ロボット学会誌, vol.18, no.4, pp.83-92 (2000.5)
4. 津田雅之、高橋友一、小方博之：「実演教示による組立作業モデルの生成」、日本ロボット学会誌, vol.18, no.4, pp.73-82 (2000.5)
5. 上地 正昭、小方 博之、中村 幸博、水川 真：「コンポーネントアーキテクチャを適用したロボット作業教示システム」、日本ロボット学会誌, 掲載予定 (2000)

### 国際会議

1. 高橋友一、小方博之：「Robotic Assembly Operation Based on Task-Level Teaching in Virtual Reality」、IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'92), pp.1083-1088 (1992.5)

2. 高橋友一、小方博之、武藤伸洋：「Method for Analyzing Human Assembly Operations for Use in Automatically Generating Robot Commands」、IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'93), pp.695-700 (1993.5)
3. 津田雅之、小方博之、成瀬正：「Performing a 6-D.O.F Robotic Assembly Task by using a Chain of 3-D.O.F C-spaces」、IEEE 5th International Conference on Emerging Technology and Factory Automation, vol.1, pp.199-204 (1996.11)
4. 金丸直義、小方博之、片山幸久、遠藤公誉、津田雅之、水川真：「Using Task Blocks for Robotic Assembly System」、3rd Asian Conference on Robotics and its Application (ACRA'97), pp.91-96 (1997.10)
5. 津田雅之、小方博之、南条義人：「Programming groups of local models from human demonstration to create a model for robotic assembly」、IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'98), CD-ROM 収録 (1998.5)
6. 津田雅之、高橋友一、小方博之：「Creating an assembly-task model by human demonstration」、IEEE International Conference on System Man and Cybernetics, vol. 4, pp. 1007-1013, (1999).
7. 上地正昭、小方博之、中村幸博、水川真：「A Component Architecture for Customizing Robot-Teaching Systems」、IROS'99, CD-ROM 収録 (1999).

#### 全国大会・講演会等

1. 高橋友一、小方博之：「人工現実感を用いたロボット教示インタフェースの検

- 討」、人工知能学会 ヒューマンインタフェースと認知モデル研究会, SIG-HICG-9102, pp.1-8 (1991.10)
2. 高橋友一、小方博之：「仮想現実感を用いたロボット教示システム」、ロボティクス・メカトロニクス講演会, vol.A, pp.899-902 (1992.6)
  3. 高橋友一、小方博之：「人の組立動作からのスキル解析」、人工知能学会 ヒューマンインタフェースと認知モデル研究会, SIG-HICG-9301, pp.33-38 (1993.5)
  4. 高橋友一、小方博之：「動作認識のキッカケ」、ロボットメカトロニクスシンポジア (1996.5)
  5. 津田雅之、小方博之、成瀬正：「動作空間分離による 3 次元接触状態遷移の計画」、第 14 回日本ロボット学会学術講演会, no.2, pp.525-526 (1996.11)
  6. 金丸直義、小方博之、片山幸久、遠藤公誉、津田雅之、水川真：「機能ブロックの組み合わせによる組立作業システム構成法」、第 14 回日本ロボット学会学術講演会, no.3, pp.835-836 (1996.11)
  7. 金丸直義、小方博之、片山幸久、遠藤公誉、津田雅之、水川真：「作業要素モジュール構造をもつ組立作業システム」、ロボティクス・メカトロニクス講演会, vol.B, pp.631-632 (1997.6)
  8. 津田雅之、小方博之：「組立作業を指向したロボット動作計画のための教示データ解析」、ロボティクス・メカトロニクス講演会, vol.B, pp.627-630 (1997.6)
  9. 小方博之、津田雅之、水川真：「実作業動作の自由度に着目したクラス化と認識」、第 15 回日本ロボット学会学術講演会, no.2, pp.409-410 (1997.9)

10. 水川真、金山和則、中村幸博、小方博之：「産業用ロボットのための作業設計・管理システムの開発（第3報）」、第15回日本ロボット学会学術講演会, no.3, pp.1031-1032 (1997.9)
11. 津田雅之、小方博之、南条義人：「実演教示を利用した局所モデルに基づくロボットプログラミング」、第15回日本ロボット学会学術講演会, no.3, pp.1029-1030 (1997.9)
12. 水川真、金山和則、中村幸博、小方博之：「産業用ロボットのための作業設計・管理システムの開発（第4報） - 汎用ツール操作作業設計システムの構築 -」、第3回ロボティクスシンポジウム, pp.11-16(1998.5)
13. 上地正昭、小方博之、水川真、中村幸博：「産業用ロボットのための作業設計／管理システムの開発（第5報）」、ロボティクス・メカトロニクス講演会, CD-ROM 収録 (1998.6)
14. 津田雅之、小方博之、南条義人：「局所モデル群を用いた接触状態遷移法の検討 - 実演教示による局所モデル群の構成と計画・実行システムの実装 -」、ロボティクス・メカトロニクス講演会, CD-ROM 収録 (1998.6)
15. 小方博之、稲村渡、津田雅之、水川真：「市販ロボットシミュレータを用いた経路計画環境の構築」、第16回日本ロボット学会学術講演会、 pp.291-292 (1998.9)
16. 中村 幸博、小方 博之、柳原 義正、手塚 博久、上地 正昭、水川 真：「マルチモーダル情報共有型教示支援システムの開発（システム概要）」第16回日本ロボット学会学術講演会、 pp.1405-1406 (1998.9)
17. 中村 幸博、小方 博之、柳原 義正、水川 真：「マルチモーダル情報共有型教示支援システムの開発（教示ペンダントのシステム構成と動作 / センシング条件

- を考慮した操作) 」第16回日本ロボット学会学術講演会、 pp.1409-1410 (1998.9)
18. 小方 博之、中村 幸博、柳原 義正、水川 真：「マルチモーダル情報共有型教示支援システムの開発（センサログ情報を用いた修正教示）」、第16回日本ロボット学会学術講演会、 pp.1411-1412 (1998.9)
  19. 遠藤 公誉、小方 博之、津田 雅之：「ロボット作業における情報共有のための通信プロトコル」、第16回日本ロボット学会学術講演会、 pp.1403-1404 (1998.9)
  20. 上地 正昭、小方 博之、水川 真、中村 幸博：「産業用ロボットのための作業設計／管理システムの開発（第6報） - 教示システム構築用ツールコンポーネントの構成案 -」、第16回日本ロボット学会学術講演会、 pp.1417-1418 (1998.9)
  21. 上地 正昭、小方 博之、水川 真、中村 幸博：「コンポーネントアーキテクチャを用いた作業教示システム」第4回ロボティクス・シンポジア, pp. 7-13, (1999.3)
  22. 中村 幸博、小方博之、上地 正昭、柳原 義正、水川真：「ネットワーク型作業設計教示システム」、ロボティクス・メカトロニクス講演会, CD-ROM 収録 (1999.6)
  23. 津田 雅之、高橋 友一、小方 博之：「実演教示による3次元組立のための作業モデルの生成」、ロボティクス・メカトロニクス講演会, CD-ROM 収録 (1999.6)
  24. 上地 正昭、小方博之、中村 幸博、水川真：「コンポーネントアーキテクチャを用いた作業教示システム」、ロボティクス・メカトロニクス講演会, CD-ROM 収録 (1999.6)