

ロボットへの作業環境の教示

—— 実作業環境モデル生成システム ——

長谷川 勉
(電子技術総合研究所)

1. まえがき

ロボットに作業を実行させるためには、作業動作の記述と作業環境の記述とが必要である。ここでは、ロボットに与えられた実際の作業環境から、必要な位置データを得て、インタラクティブに環境幾何モデルを構成するシステムについて述べる。

現在、多数の産業用ロボットが実際に使用されているが、それらは自らの行なっている作業の意味や周囲の環境を理解してはいない。人があらかじめ、ロボットのために周囲の整備を行ない、ロボットは其中で指定されたシーケンス通りの動きを繰り返しているにすぎない。そのため、作業の変更は容易でなく、周囲の構造的状況変化に対応することはできず、センサも極めて単純で局所的使用法だけが可能である。

ロボットを人に使い易いものにするには、環境と作業動作とを理解させることが必要である。その意味で、ロボット制御用の高水準言語の必要が認識され、最近になって、その開発も盛んになってきた¹⁾。高水準言語を用いれば、作業動作を簡潔に記述でき、人の意図を容易にロボットに伝えることができよう。しかし、三次元に広がった現実の作業環境を言語で記述することは極めてむずかしい。作業環境から必要な位置データを得ることも、またそれらを用いて環境を記述することも容易であるというえ、完成した記述を読んでも、それが正しく環境を表現しているかどうかを知ること困難だからである。

一方、計算機を用いた人工の視覚の現状では、一般的な作業環境の幾何モデルの自動生成は無理である。また作業という立場から見た対象物の特徴は幾何学的形態の特徴と必ずしも一致しないという問題も残っている。

筆者らは、人との円滑なコミュニケーションのもとに、教示にもとづいて、環境モデルを構築するシステムを開発した。このシステムでは、人の操作により、作業環境から任意の点の三次元位置データを得ることができ、本稿では、こうして得られた点の三次元位置データから、構造を持った環境モデルを構築するためのソフトウェアシステムについて述べる。

2 システムデザイン

2.1 対象作業環境、モデルの水準と質

はじめに、本システムで取り扱う作業環境について述べる。ロボットはその目的によりいろいろな大きさのものがあ、その行なう作業もさまざまであるが、ここでは、人が素手や簡単な小型工器具を用いて移動せずに行なえるような作業を考える。したがって作業環境としては、人が片手でも扱える程度の大きさの部品や工器具の置かれている100cm四方程度の作業台である。

環境内の各作業対象を記述する幾何学モデルには、二つの水準が考えられる。オ一は、作業対象の形態まで可能な限り忠実に記述するモデルである。オニは、

作業対象を、その代表点に直交座標系を置くことにより位置と姿勢のみで記述するモデルであり、作業環境全体はこの座標軸の空間的分布状態により記述される。例えば、20cm角程度の大よその板状部品の形態は記述するとしても、他の部品との結合のためにあけられた直径0.3cmの穴まで形の記述をしなくてもよい場合は多い。このような穴については、その位置と開口の方向を示す姿勢がわかれば作業はできる。作業対象物全体の忠実な形態記述は望ましいが、データ入力や誤差などの点で困難な場合も多く、本システムでは上記の2つの水準のモデルを併用している。

構築された環境モデルに含まれる数値データの精度は非常に重要ではあるが、決定的な要因ではない。なぜならばマニピュレータ自身に動作誤差があるため、高水準言語で書かれた作業プログラムが、環境モデルをもとにコンパイルされたとしても、その実行時には接触センサや近接センサ、あるいは力センサや視覚などのフィードバックが必要であり、モデルの誤差もそれでカバーされるからである。また必要ならば、このプログラムの実行結果にもとづいて、モデルが修正されるであろう。それゆえ、環境モデルは大局的に見て正確で、矛盾があるければよい。たとえば、単一物体は、それが複雑な形を持っていても、空間的なギャップがあつたり、2つ以上に分離した物体であるようにモデリングされてはいけな

2.2 モデルの可視化と実環境との対応

ロボットの作業環境は現実存在している三次元の広がりを持つ、大世界である。人とシステムとのインタラクティブなプロセスによって、環境から必要なデータを得て、環境モデルとして構築することを可能にするためには、計算機内部に生成された、あるいは生成途中のモデルを人に容易に理解できるような形式で外部表現すること、さらに、モデルと現実の対象物との対応づけを容易にして、モデルと実環境との間に差異があるならば、それが明確になるように外部表現することが必要である。個々の対象物の形だけでなく、それらが現実には置かれている位置や姿勢も正しく記述されたモデルでなければならぬからである。これによって、人は、実環境がどの程度までモデリングされたか、モデルに誤りがあるかどうか、誤りがあるとすればモデルもどのように修正すればよいか判断でき、また修正操作の結果も明確になるので正しいモデル構築が可能になる。

本システムでは、このモデルの可視化と実環境との対応づけの機能を、筆者らが開発したスーパーインポーズディスプレイによって実現している。

2.3 モデルを構成するデータへのアクセスと操作

現実の三次元作業空間内の点の位置データをもとに、環境内の対象物の幾何モデルを生成するプロセスの各段階では、測定数値誤差や人の誤りにもとづく誤データの発生、あるいはデジタル処理にともなう数値誤差の発生などがおこりうる。そこで、システム操作者のために、計算機内部のデータに対し多様なレベルからのアクセス手段とその操作手段を用意しておくことが有効であり、特に、システムの開発段階では重要である。これにより、システムの機能の不充分な点をおぎない、人の知識を容易にデータ構造内に移すことができる。このシステムでは以下のようにして、データへのアクセスおよび操作を実現している。

(1) システムモジュールの分割

システム全体を3つの大モジュールに分割した。それらは、位置データ入力、構造記述モデルの生成、および詳細モデル生成の各モジュールである。通常は、人と構造記述モデル生成モジュールとの対話、および各モジュール間の通信によりモデルが構築されるが、必要な場合は、人が直接各モジュールと通信をして、データへの操作を行えるようにした。

(2) データ構造に合わせたエディタの開発

幾何データに対して、その意味と考慮したシンボリックな操作や数値的操作、あるいは、データの構造を変える操作などを可能にするコマンドを用意した。

(3) インタープリタ LISP によるインプリメント

構造記述生成部分をインタープリタ LISP でインプリメントした。これにより必要ならばいつでもインタープリタのレベルに戻って、システム関数を実行し、それまでに生成されたモデルのどの部分のデータでも読むことができ、書き換えることもできる。いわば、文字レベルでのデータエディタの機能を持つことになる。

2.4 モデル生成プロセス

このシステムで実現されるモデル生成プロセスの流れの概略を図1に示す。まず人は実際の環境を映しているスーパインポーズディスプレイを見て、そこに何があるかを知る。対象物をいくつかの部分に分けて考えて、それぞれ形、大きさ、位置、姿勢を決定するために必要な点の位置データをレーザポインタで入力する。これはトラックボールを操作してレーザビームの偏向角を制御することにより所要の点にレーザ光を当てるだけでよい。次いで、その部分形状がいかなるものであるかをコマンドによりシステムに教示する。システムはモデルを生成し、その線画をスーパインポーズディスプレイ上に実際の環境に重ねて表示する。人はこれを見て、モデルに対し必要な修正操作を行なう。各部分のモデルが生成されたのち、それら各部分のような構造で結合されているかを教示することにより、対象物のモデルが完成する。

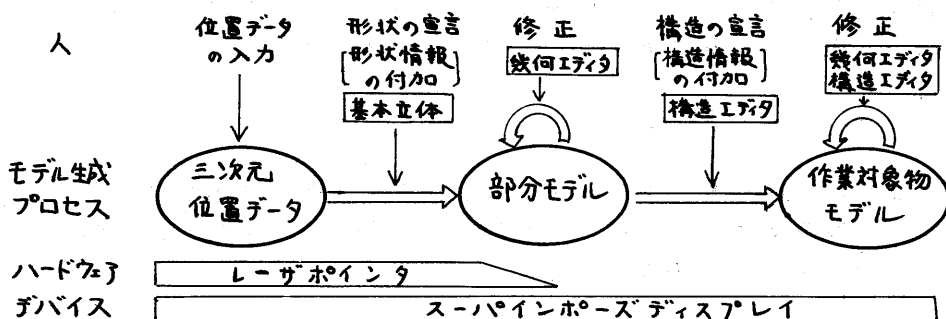


図1 モデル生成プロセス

3. ハードウェアシステムの概略

3.1 構成

ハードウェアの構成を図2に示す。詳細は別論文³⁾を参照されたい。ハードウェアによって実現されている機能は、レーザポインタ、スーパインポーズディスプレイ、カーソルなどである。各ハードウェアのインターフェースや三次元位置測量、線画表示変換などはPDP11/34上のプログラムで行われる。構造記述モデルの生成などは上位の計算機MELCOM-COSMO 700Sで行われる。

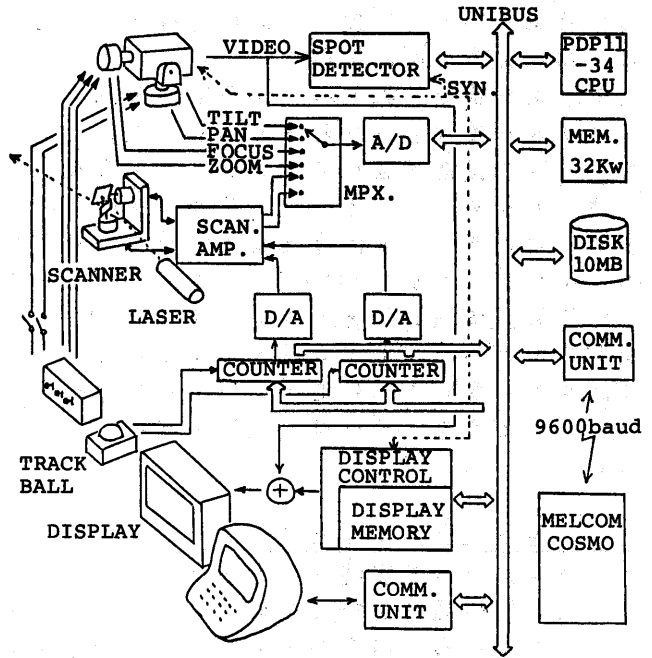


図2 ハードウェア構成

3.2 レーザポインタ

作業環境内にある作業対象物上の任意の点の位置データを入力するためのものである。人の操作によって任意の点に当てられて生じたレーザ光のスポットをテレビカメラで検出し、レーザ光の方向角とカメラ撮像面上でのスポット検出位置とから、三角測量の原理にもとづいて、その三次元位置をシステムが計算する。

3.3 スーパインポーズディスプレイ

実際の作業環境をモニタしているTV画面に重ねて線画の形で任意の情報を書き込むことができるようにしたものである。その時の作業環境を映しているTVカメラの視野の方向と画角とを計算に入れて、計算機内部モデルの線画を生成し、それを実作業環境のモニタ画面に重ねて表示する。実際の映像と線画の重なりの様子からモデルの良否を一目で知ることができる。

4. ソフトウェアシステム

図3に全体の構成を示す。一重の横長のダイヤがそれぞれソフトウェア要素を示す。モデル構成を行なうのは、部分立体生成部、幾何エディタ、構造エディタおよびグラフィックスである。

4.1 基本立体および部分立体の生成

このシステムでは、物体は体積モデルで表現される。システムにはいくつかの基本立体が用意しており、それらから生成される適当な部分立体が組み合わせられ複雑な実物体のモデルが構成される。レーザポインタにより位置計測された特徴点のデータは、これらの部分立体を作るのに用いられる。どの基本立体を用い、

それきどのように組み合わせるかを決定するのはユーザの責任である。基本立体の対称性を利用すると、各々の部分立体は少数の特徴点で構成でき、これによりポインティング操作の労力が軽減される。図4に基本立体の例を示す。BRは直方体、CYは円柱である。GYは2次元立体であり、FRは体積を持たない座標軸モデルで、小さな特徴を表現したり、複雑な物体をその把握位置やその他の作業点で代表したりするのに用いる。

各基本立体から部分立体を生成するためのコマンドが用意されている。BRは対象物体上の同一平面上に2点の4頂点をポインティングすることにより生成される。CYも4点のポインティングでよい。内2点は上面の直径の両端に、もう2点を同じ上面の他の点にポインティングして、CYの姿勢と上面の位置が決定する。最後の1点と下面の周囲の任意の点にポインティングして高さが決定する。GYは一方の底面の全ての頂点のポインティングと他方の底面の周囲の任意の1点のポインティングで生成される。FRは3点のポインティングが必要である。1点と原点に、他の1点をz軸上の点に、最後の1点はxy平面上の任意の1点にポインティングする。

各部分立体を構成する幾何要素のうち、いくつかのものは幾何エディティングの過程で参照されるので、名称がつけられている。たとえば、CY、BR、GYの上面にはUF、部分立体に固定された座標系のz軸のまわりを反時計方向に数えて、n番目の側面にはFn、また座標系のx軸とy軸で決定される平面はXYという名称がつけられている。

基本立体からつくられた部分立体が組み合わせられて複雑な形を持つ物体のモデルが構築されるが、このときの立体間の組み合わせ演算には、和、差、積がある。

4.3 データ構造

作業環境を記述するデータ構造は2つのレベルから構成されている。

1. 構造モデル
2. 詳細モデル

構造モデルには、対象物の形態が部分立体を単位として記述されているほか、作業という観点から見て、ロボットと人にとって必要な情報が含まれる。対象物の

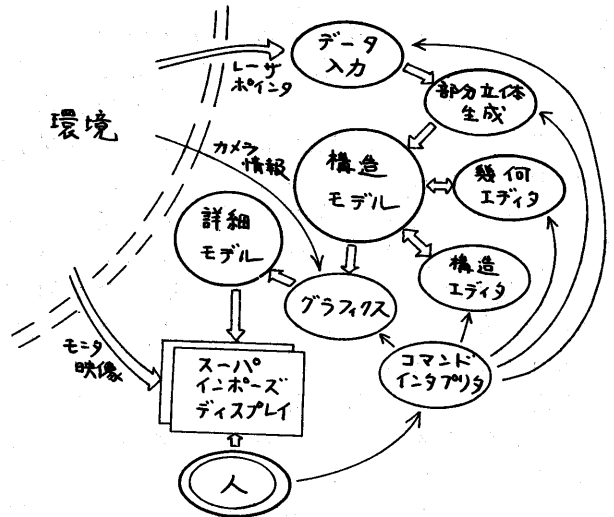


図3 ソフトウェア構成

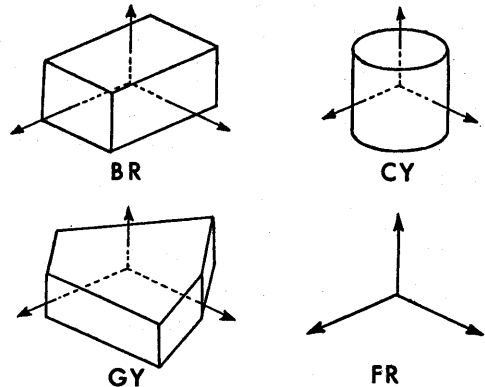


図4 基本立体

詳細な幾何学的形態の記述、すなわち全ての頂点、辺、面は詳細モデルの中に記述されるが、これは構造モデルをもとにグラフィックスモジュールが自動的に生成する。したがってこのシステムでは、構造モデルをいかにしてインタラクティブに構成するかが問題であり、ここでは構造モデルについて述べる。

構造モデルは主パーツ名リスト、副パーツ名リスト、および木構造を持つパーツモデルからなっている。1つの木構造全体で、単一の部品をあらわす。木の各節には、1つのデータセルが対応し、これが1つの基本立体で表現できる部分形態を表現している。また全ての節には名称がつけられ、木の根の名称がその部品全体の名称として主パーツ名リストに記され、根以外の全ての節の名称は副パーツ名リストに記される。

構造モデルを生成するプログラムはLISPで書かれていて、データセルの情報は部分立体の名称のアトムの一列に記述されている。以下に記述されている属性名とその内容を記す。

VOL.: 体積。実物体は+、穴は-、座標フレームによる近似は0となる。

FOR.: 形態。部分立体を生成する元となる基本立体名で表わされる。

DIM.: 部分立体の大きさを示す寸法のリスト

FRA.: 部分立体に固定された座標系

AFXT.: 部分立体が属している親物体の名称と相互の接続関係

AFXB.: 部分立体に属する子物体の名称や相互の接続関係のリスト

図5に木構造データの一例とセルの記述例を示す。セルはその表現する部分立体が実物体で、直方体の形状を持ち、そのため、横、高さの寸法が a, b, c 、その重心の位置が (P_x, P_y, P_z) で、そこに固定された直交座標系の x, y, z 軸がそれぞれ $(X_x, X_y, X_z), (Y_x, Y_y, Y_z), (Z_x, Z_y, Z_z)$ であることを示している。また、この部分立体が $Ubody$ に体積和をとる形で固定されており、またこの部分立体には、 $Lbody1$ と $Lbody2$ とが体積和、 $Lbody3$ が体積差をとる形で固定されている。接続関係リスト中のTは、その結合が相互の動きを許さないことを示す。したがって、たとえば $Lbody3$ を動かせば、Tで結合された全てが動く。このモデルによって個々の部品単位の幾何モデルを構成できる。

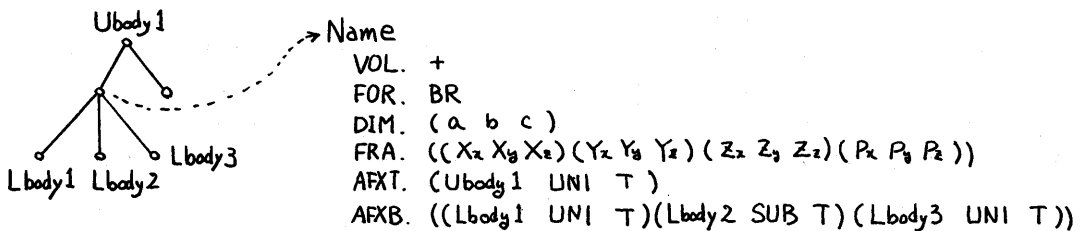


図5 木構造とデータセル

4.4 幾何エディタ

幾何エディタは、生成途中のモデルの部分立体について幾何学的修正を可能にするもので、コマンドの集合である。

現実の複雑な作業対象物のモデルを、レーザーポインタで得られるデータだけで構成するのは困難である。これは以下の理由による。

- 1) 物がけや、穴の中などレーザースポットが当たらない部分がある。
- 2) レーザスポットの三角測量誤差がある。
- 3) ポインティング誤差がある。基本立体を実物体にあてはめて部分立体の生成を行なう際に、頂点やエッジへのポインティングが必要であるが、レーザービームには太さがあり、その中心を厳密に正しく頂点やエッジに当てることはできない。

レーザースポットが当たらない点については、他の測定点をもとに人が教えてやる必要がある。また2)3)の理由により、基本立体から生成された2つの隣接した部分立体が互いに傾いたり、ギャップを生じてしまうことがしばしばある。このため原物体が連続した単一物体であっても、部分モデルを合成して一つにできなくなってしまう。さらに人がシステムと対話する過程で、誤った理解をしたり、入力ミスとすることもあろう。このためデータの修正が必要となる。このほか、対象物が同じ姿勢、形態で位置だけが異なるような部分に分解できるときでも、それぞれについて、同じようなポインティング操作をしなければならぬというのは不都合であろう。そこで生成されたモデルのデータをコマンドにより、容易に操作し修正できるようにした。これが幾何エディタである。この幾何エディタによる修正プロセスの主眼は、モデルを構成する個々の数値データの精度の向上よりも、むしろ全体として矛盾のない幾何モデルを作ることにある。極めてわずかの数値誤差でも、たとえば平行なはずのものが計算機内部ではそうでないよう表現されてしまうし、一様な連続物体にギャップがあるように表現されてしまう。これらを解消することが矛盾の解消である。修正の過程ではスーパーインポーズディスプレイが重要な役割を果たす。人はモデルの操作、修正の結果を直ちにスーパーインポーズディスプレイで見ることができ、自らのコマンドの妥当性を判断しつつ、内部モデルの線画と実環境モニタ映像とが正しく重なるまでモデルを操作することができるわけで、このディスプレイなしではエディタを使うことは不可能である。

幾何モデル編集の過程では、モデルの修正量として数値データを直接与えるよりも、他の立体モデルとの空間的幾何学関係を指定する方が、はるかに人に理解しやすく有効な場合が多い。そこで、このエディタには、位置と姿勢については例えば、モデルAをモデルBと同一平面上に置くコマンド(ONTO)や、モデルCのframe X軸をモデルDのframe Y軸と平行になるようにするコマンド(ALIGN)、あるいはモデルEをモデルFの任意に指定した表面上に置くコマンド(LOCATE)などが用意されている。また大きさについては、モデルGの任意の寸法(例えば高さ)とモデルHの任意の寸法(円柱の直径など)と等しくするコマンド(EQUATE)や、モデルIの大きさをそのframeのうちの直交軸方向にそれぞれ(j長 l)倍するコマンド(MAGNIFY)がある。形についても、2次元立体の形を変えるため、n番目の頂点を(x y z)だけ移動したり(GYPTR)、m番目の頂点として(Px Py Pz)を加えること(GYPAD)がで

LOCATE	obj1		ON	face-n	OF	obj2	
ALIGN	obj1	axis1	TO	obj2	axis2		
ONTO	obj1		TO	obj2	plane-x		
FSET	obj1		TO	obj2			
RSET	obj1		TO	obj2			
PSET	obj1		TO	obj2			
TRNS	obj1		BY	obj2	(x y z)		
ROTATE	obj1		BY	obj2	(a b c)		
EXTN	obj1		BY	dir	length		
MAGNIFY	obj1		BY	(j k l)			
EQUATE	r	OF	obj1	TO	h	OF	obj2
GYPTR	pn	OF	gyl	BY	(x y z)		
GYPAD	(x y z)		TO	gyl	AS	n-th	POINT
COPY	obj1	obj2					

図6 Iデータコマンド

きるようになっている。コマンドは以下のように整理でき、実際の入力形式は図6のようになっている。

(1) 位置、姿勢の修正

(a) 絶対的修正 (修正量を数値で与えるもの)

位置 TRNS
姿勢 ROTATE

(b) 相対的修正 (他のモデルとの関連を与えるもの)

位置 LOCATE, ONTO, FSET, PSET
姿勢 ALIGN, FSET, RSET

(2) 大きさ、形の修正

(a) 円柱、直方体 EXTN, MAGNIFY, EQUATE

(b) 2次元立体 EXTN, MAGNIFY, EQUATE, GYPTR, GYPAD

(3) コピー生成 COPY

4.4 構造エディタ

構造エディタは生成された部分立体を木構造をもつ構造モデルに組み立て、その結合枝に結合状態を示す情報を付与するためのコマンドの集合である。

データセルに含まれる情報のうち、AFXT. および AFXB. に記述される接続関係リストの内容の操作を行って木構造を構成あるいは分解するとともに、構造変化に伴って必要となる主パーツ名リスト、副パーツ名リストの保守を行う。

接続関係リストは3つの要素からなるリストである。第一要素は、結合される相手の部分立体名、第二要素は結合状態、第三要素は結合強度を示す。結合状態には、UNI, SUB, FIT, FIX などがある。それぞれ立体間の和、差、面による接触、およびそれ以外の結合を示す。結合強度には、TとLがある。Tは強い結合(Tight)とあらわし、この結合による構造の構成要素と幾何学的に操作すると、Tで結合された全要素が動く。Lは弱い結合(Loose)を表わし、この結合による構成要素の動きは他に影響を与えない。たとえばモデルの構造を組み立てた後、その一部だけを修正したいことがあるが、そのとき結合は保存したまま、結合の強さをLとして、その部分に幾何学的修正を行う。その後、結合をTとすることにより、所要のモデルが得られる。図7にコマンドを示す。

```
AFFIX obj1 TO obj2 BY UNI IN T
UNFIX obj1
TIGHT obj1
LOOSE obj1
```

図7. エディタコマンド

4.5 グラフィックス

構造モデルとともに詳細モデルを生成する。この詳細モデル内では、立体を構成する全ての面、辺、頂点が記述されている。曲面は多面体で近似される。さらに、実環境をモニタしているTVカメラの視野の方向と画角とから、そのカメラで生ずるモデルの線画を生成する。隠線処理を行い、天線画の生成も可能である。この線画がスーパーインポーズディスプレイに表示される。グラフィックスモジュールとして GEOMAP を使用しており、この詳細は別論文を参照されたい。

5 モデリングの例

写真1, 2, 3は環境モデリングの例を示す。対象物は木工用万力、そのハンドルおよびハンドルクランプである。

写真1は、万力の前面中心部にBRをもとにした部分立体を生成し、幾何修正をおこなったものである。

写真2では、両端に円柱、万力軸に円柱を生成し、幾何修正後、合成している。

写真3は、ほぼ完成したモデルである。2つのボルトと、ハンドル把握部をFRAMEのみで近似している。万力軸とハンドル取り付け穴、クランプについてはFRAMEの表示も行っている。

6 むすび

ロボットの作業環境という実世界の幾何モデルをインタラクティブに生成するシステムについて述べた。レーザポイントとスーパーインポーズディスプレイとの組み合わせ、およびモデル生成のためのソフトウェアシステムによって、人に負担の少ない、ロボットに対する環境教示が可能になる。今後はモデルを拡張して、複雑な組み立て構造や、機械工学的スペックの記述なども含むロボット作業用データベース構成システムに発展させたいと考えている。

謝辞

本研究を御指導いただいた東京大学工学部機械工学科、井上博允助教授、GEOMAPを提供して下さった東京大学工学部精密機械工学科、木村文彦助教授に感謝する。

参考文献

- 1) S. Mujtaba and R. Grodman : AL User's Manual, MEMO AIM-323 Stanford University (1979)
- 2) D.D. Grossman and R.H. Taylor : Interactive Generation of Objects Models with a Manipulator, IEEE Trans. SMC-8, 667/679, (1978)
- 3) 長谷川 : ロボットの作業環境のモデリングとモニタリング, 計測自動制御学会論文集, 17-5, 589/595 (1981)
- 4) 橋坂, 木村 : 機械設計自動化のための幾何モデル生成処理システム, 日本機械学会論文集, 44-378, 661/667 (1978)

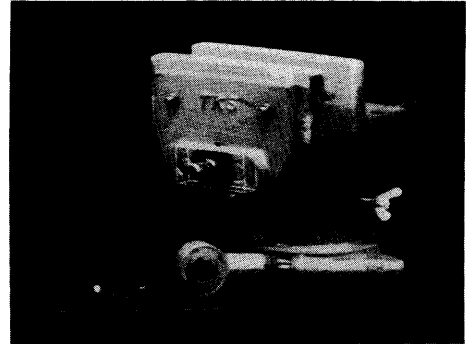


写真 1

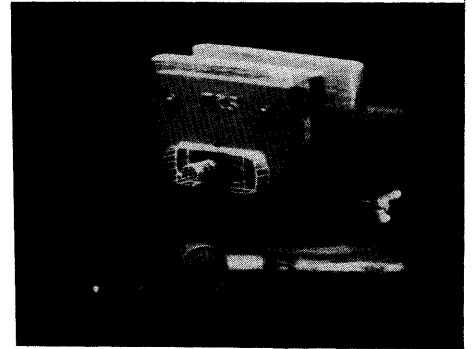


写真 2

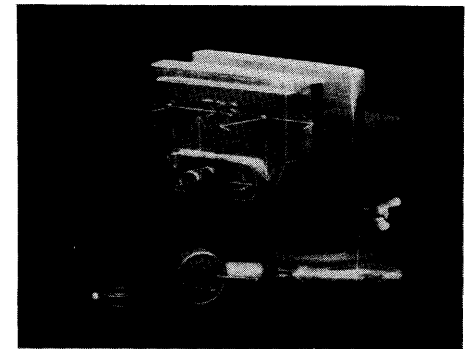


写真 3