

# 環境モデルと作業スキルの統合による ロボット作業システム

長谷川 勉\* 末広 尚士\* 高瀬 國克\*

## An Integrated Robot System with a Geometric Environment Model and Manipulation Skills

Tsutomu HASEGAWA Takashi SUEHIRO Kunikatsu TAKASE

This paper describes a model-based robot system. This system was developed to replace and improve upon the conventional robot control scheme of teaching-by-showing and replay. The key concept of this system consists of the combination of manipulation skills with an environment model. The model provides the geometric structure and physical properties of the objects in the environment. An interactive geometric modeling system has been developed to generate accurate model through a good man-machine interface. The manipulation skills enable reliable task execution in the presence of unavoidable errors and uncertainties. Using the ETA-3 direct-drive manipulator, skills are implemented within the hybrid (position/velocity/torque) control scheme and are incorporated with sensing procedures to detect the state to be achieved. disassembly of a valve has been successfully achieved by using this system.

**Key Words :** Environment model, Manipulation skill, Model-based system, Uncertainty

### 1. はじめに

現在広く使用されている産業用ロボットは、直接的な動作教示方式を基礎としている。実際の作業環境でマニピュレータの位置や軌道を人間が入念に教示し、これを再生することで作業の実現をはかる。センサを導入したり、言語によって動作記述するとしても、それらによる動作を試行し、人間がその妥当性を判断し、作業対象と周辺機器の配置やマニピュレータの動きを調整するプロセスが必要である<sup>1)</sup>。この教示の手間は膨大で、時間もかかる。したがって、作業や環境の変化に即応できず、ロボットの適用範囲は工場など整備された環境での定型繰り返し作業にとどまっていた。

一方、原子力発電所内作業のように、これまで人間が実行するしかなかった非整備環境での機器の分解、組立、保守等を実行しうるロボット作業システムのニーズが高

まってきている<sup>2)</sup>。このような作業では、いつでもどこで何をするかを事前を知ることができず、ロボットを配置して置くこともできない。このため、従来の動作教示とその再生の組合せは適用できず、新たな技術的枠組みが必要である。この新しい枠組みとして、本論文では、作業環境を記述する環境モデルと、対象に適応しながら作業を実行する作業スキルとの統合の概念を提案し、これを実現した作業システムについて述べる。これは、ロボットに動作を記憶させる代わりに作業環境をモデルの形で理解させておき、作業手順が与えられたらその環境モデルに基づいて実際の動作軌道を生成し作業を実行させるものである。この方法では、作業現場での作業対象物の配置とは独立に種々の作業技能をスキルとして蓄積しておくことができ、実際にシステムが配置された段階で、その環境モデルを作り、対象への操作をスキルの組合せとして記述してやれば、即座に作業が実行できるようになる。

本論文では、まず第2章でモデルに基づく作業システ

原稿受付 1990年6月7日

\* 電子技術総合研究所

ムを実現するうえでの問題点を分析し、本システムでとったアプローチの概略について述べる。第3章では環境指示システムについて、第4章では作業スキルについて述べた後、第5章では、環境モデルとスキルを用いた作業実験例について述べる。第6章は、結論である。

## 2. 環境モデルと作業スキルの統合による作業実行

ロボットに動作の直接指示をせず、環境モデルに基づいて作業を実行させようという考え方は、きわめて自然である。それにもかかわらず、これまで実現されていなかったのは、以下に述べる2つの大きな理由によると考えられる。

まず第1に、実環境の作業対象物の形状と位置姿勢とを精度よく記述するモデルがなかった。積木の世界でない現実の作業対象について精度のよいモデルが必要である。これを得るためには、計算機内部での3次元形状の表現、種々の制約がある実環境での3次元計測、計測誤差、位置と姿勢の決定法など、多くの問題が残されていた。

第2は、作業実行系の問題である。環境モデルのデータに基づいて対象を操作するためには、繰り返し位置精度でなく、絶対位置精度のよいマニピュレータが必要である。また、モデルにしろマニピュレータの動作にしろ、どんなに精度をよくしたとしても誤差をゼロとすることは不可能であるから、誤差があることを前提に環境に適応して作業を実行できるシステム構成が必要になる。位置と力の混成制御が必然であり、目標位置の系列のかわりに、達成すべき状態の系列として作業を記述しなければ

ならない。この作業記述を人間にとって自然で簡潔なものとするとともに、与えられた状態系列を1つずつ確実に達成する機能が必要である。しかし、このような機能を実現するための道筋が明かではなかった。力制御に関する研究も少なくないが、現実作業を実行させるためには未解決の問題が多かった<sup>4,5)</sup>。

これらの問題に対し、筆者らは、正確な環境モデルの効率的な生成法を開発し、高精度マニピュレータと組合せたりえて、モデル生成系と作業実行系との正確な校正を行った。さらにそれでも残る誤差を位置と力の混成制御で吸収しつつ目標状態を達成するスキルを開発し、モデルに基づく作業実行を可能にした。ロボットが実行すべき作業例として、人間が通常のレンチのみを用いて行うことのできる小型バルブの分解を取りあげた。統合されたシステムの全体構成を Fig.1 に示す。実現した具体的な機能は以下のとおりである。

環境モデルの構築には指示による方法を用い、現実の複雑な環境に対応できるようにした。レーザポインタによる概略位置の指示と、システムによる精度の自動改善とにより、指示における人間の負担の軽減と高精度モデルの生成との両立が可能になった。作業環境内の部品が1mm程度の位置精度でモデル化されている。しかも、環境指示にあたって操作者は作業環境にはいる必要がなく、安全な遠隔から全ての指示を可能にしている。

また作業実行系については、ダイレクトドライブマニピュレータ ETA-3 を用い、モデル生成系との校正により、相互の誤差は1mm程度に抑えた。さらに、物体間

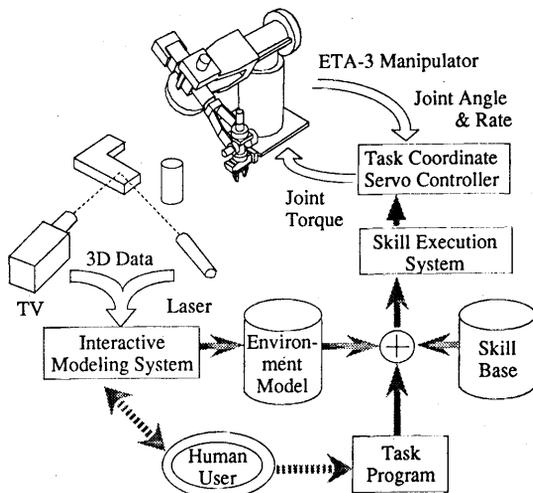


Fig. 1 System structure

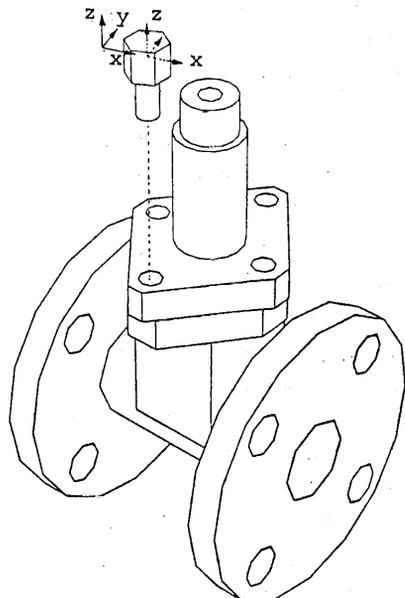


Fig. 2 Valve parts

の接触、面合わせ、挿入を達成する動作について位置と力の混成制御と目標達成検出機能とを組み合わせることでそれぞれスキルとして実現した。作業はスキルの組合せとして容易にプログラムできる。

モデルとスキルの統合の意義は、汎用のロボットシステムとしての完結性にある。ピックアンドプレイスに代表される大域動作も、はめ合いに代表される微細動作も実行できる。環境モデルは、作業環境の幾何学的空間構造と作業対象物の重量などの物理特性を記述しており、ロボットの動作制御に必要な情報を供給する。スキルは環境モデルの誤差や接触時の摩擦などがあっても確実に動作目的を達成する。スキルの有効な空間範囲は局所的であるが、確実に動作できる位置までは環境モデルのデータに基づいて制御される。

### 3. 環境モデル

#### 3.1 モデルの構造

環境を記述するモデルは、幾何記述と物理記述からなる。幾何記述には、作業対象物の幾何形状、位置姿勢を表現するための基準座標フレーム、対象物に対する作業操作を記述するための作業座標フレームが含まれている。物理記述には、重量、重心位置などの物理的属性が記述されている。

モデルの例として、小型バルブ部品と固定用ボルトを Fig. 2 に示す。幾何形状は B-reps により多面体として記述されている。円柱の側面などの 2 次曲面を近似している面には、その面が近似面であることを示すマークと、その面の本来の属性（円柱の場合は半径と軸方向）を知るためのポイントがつけられている。また、複雑な形状を近似している面にはそのことを示すマークがつけられている。

形状情報によりモデルを可視化でき、環境モデルの生成、あるいはプログラムの生成と検証においてマンマシンインタフェースに用いられる。また、障害物回避動作の計画、把握動作計画、センサの配置計画やモデルに基づく認識にも使用されるものである。

作業座標フレームには、接近用フレーム、把握用フレーム、操作記述用フレームなどがあり、その物体の位置と姿勢を記述する基準フレームに関し相対的に記述されている。接近用フレームは対象物にハンドやハンドが把握している物体を接近させるとき、そのとるべき位置と姿勢の目標値であり、これ以降の動作は後述するスキル動作となる。把握用フレームはその物体を把握するためのハンドの位置と姿勢を表す。操作記述フレームはスキル動作としてハンドまたはハンドが把握している物体の動きを記述するためのものである。個々の物体モデルに

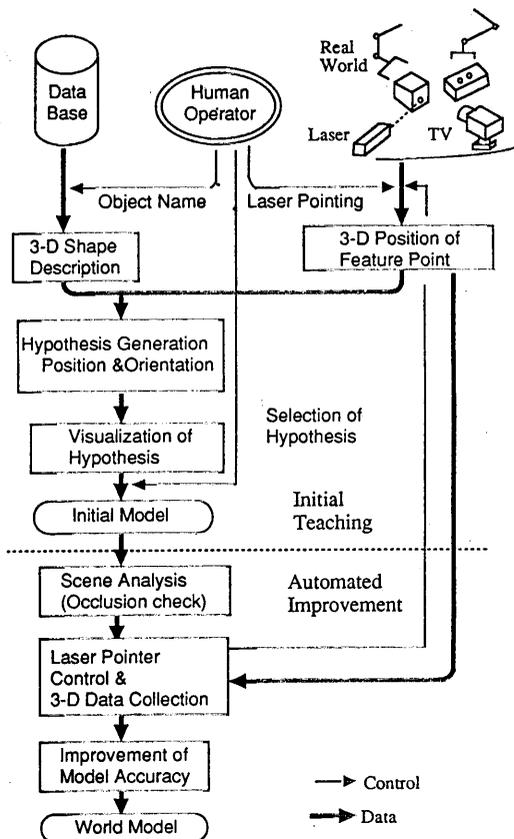


Fig. 3 Modeling Process

はその操作に必要な全てのフレームがつけられているが、Fig. 2 には、ボルトにレンチが接近するときのフレーム（左）と、レンチをはめ合わせるための目標位置を示すフレーム（右）だけを表示している。

作業座標フレームは作業動作を表現するための便宜的で二次的なものであり、物理的な実体ではないため、単独で直接的に観測することも計測することもできない。しかし、物体上での相対的な位置は決まっているので、物体の表面から複数の点の 3 次元位置を測定し、形状情報と対応をとることにより物体の位置と姿勢をあらゆる基準座標フレームが定まり、作業座標フレームが得られる。

作業対象物の重量や重心に関する情報は、把握運搬動作時のマニピュレータのサーボ系の安定化と動作高速化に用いられるとともに、力制御、特にスキルによる目標達成の判定などにも必要である。

#### 3.2 環境教示

ここでは環境モデルは教示により生成する方法をとっている。個々の作業対象物毎の形状と付随した作業座標フレームの分布の様子はあらかじめデータベースに格納

されている。したがって作業対象物の作業現場での実際の位置と姿勢が決定すれば、付随した作業座標の実際の空間配置もすべて決定される。教示労力の軽減と精度の高い環境記述の生成とを実現するため、操作者が概略の位置姿勢を教示し、システムが自動的に追加データの計測入力を行いモデルの精度を改善する方法を開発した<sup>6,7)</sup>。

環境教示系は、3次元位置計測入力部、幾何形状データベース、モデル生成部から構成されている。3次元位置計測部は、レーザとTVカメラを用いた三角測量法により、作業環境内の任意の点にレーザを当てその位置を平均測定誤差0.9mmで測定できる。本システムで実現されたモデル生成プロセスをFig.3に示し、以下に生成手順を説明する。

(1) 教示操作者はTVカメラのモニタ映像により環境内の物体を認識し、その名称をシステムに教示入力する。システムはこれにより、データベースから対象物の形状情報を引き出す。

(2) 操作者はレーザポインタを操作し、物体上の少数の特徴点にレーザスポットを当てる。例えば、観測可能な面の1つのエッジの両端の2頂点と、そのエッジに隣接する2つのエッジ上に任意の点を教示する。システムは特徴点の3次元位置を求め、形状モデルとの対応づけを行う。特徴点の数を最低限に抑えているため、位置と姿勢に関して複数の仮説が得られる。

(3) システムは複数の仮説を順次、スーパーインポーズディスプレイに表示する。操作者は、画面上で、物体

の映像とモデルの線画の重なり具合をみて、正しい位置姿勢を選ぶ。

(4) システムは教示された物体の形状、位置、姿勢をもとに、レーザポインタを制御し、可能な限り多数の点の位置を計測して、精度よく位置と姿勢を計算する。観測可能な表面から多数の点の位置を計測して、対象物の位置と姿勢を決定しており、1mm程度の精度が得られている。

生成された幾何モデルに基づいて作業実行するためには、環境教示系と作業実行系との間の幾何学的な相互関係を校正することが必要になる。マニピュレータ先端に基準点を設定し、その位置と姿勢を種々変えながら環境教示系で測定した基準点位置データと作業実行系でみた位置データとから、反復修正により相互関係を求めている。

## 4. 作業スキル

### 4.1 スキルの概念

マニピュレータが作業を行うための動作は、特定の意味を持つ動作に分解することができる。対象作業を分析して、このような動作単位を抽出し、類似の作業に適用可能な汎用性のある動作として実現する。このような動作をスキルと呼び、「MOVE」などの移動命令とならぶマニピュレータの制御の階層の1つとして位置づけた。スキルレベル制御の階層は、サーボレベル制御とタスクレベル制御の間に位置するものである。スキルレベルでは、コンプライアンス調整、力制御、軌道生成などサー

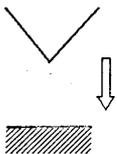


Fig. 4 Move-to-touch 1

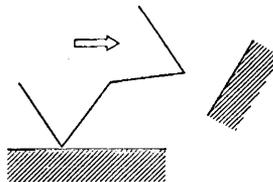


Fig. 5 Move-to-touch 2

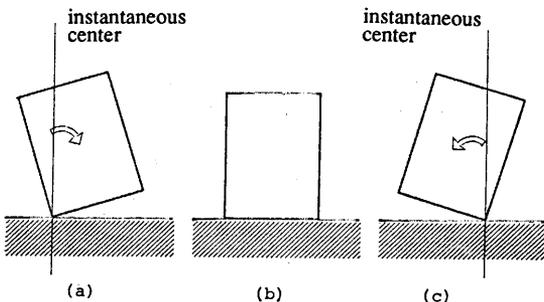
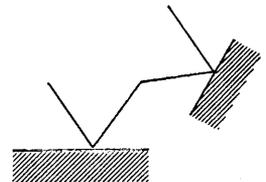


Fig. 6 Rotate-to-level

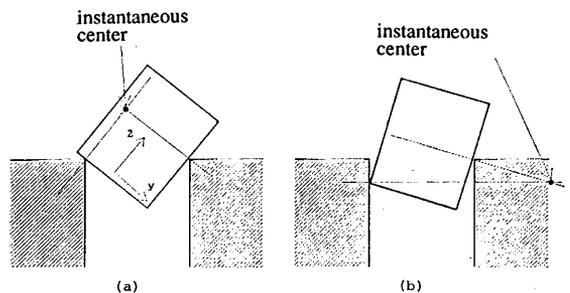


Fig. 7 Rotate-to-insert

ボレベルのパラメータを直接操作して動作を実現する。タスクレベルでは、サーボレベルの制御を意識することなく、スキル動作を組み合わせることで作業プログラムを記述することができる。システムは、環境モデルから必要なデータを得て作業を実行する。

スキルが特に必要なのは、分解や組立など作業対象物同士を接触させながら相互の拘束状態を変化させる作業である。作業に応じて、適切な制御座標系を設定し、その軸毎に、力制御、位置制御、および速度制御の割り振りを行い、フィードバックゲインなどのパラメータを決定しなければならないからである。文献8でこれらの作業動作を分析し、組立状態の分類を行い、それらの状態を達成するのに必要な動作をスキルとして抽出した。本システムでは抽出したスキルのうち、最も重要と思われる「突き当て」、「辺合わせ」、「はめ合い」の3つを実現している。典型的な組立状態のほとんどがこれら3つのスキルの組合せで達成できる。

#### 4.2 スキルプリミティブ

本システムでは、スキルの実現にダイレクトドライブマニピュレータ ETA-3 を用いている。力制御が容易で、各関節にはガタがなく、その関節軸に直結したエンコーダにより精度の高い位置検出ができる。マニピュレータ先端のハンドの絶対位置精度は校正後の実測で約 0.4 mm、力制御精度は約 100 g である。また、作業座標サーボシステム<sup>9)</sup>が実装されている。これは、各関節毎にサーボの目標値やパラメータを決めるのではなく、ハンドまたは把握中の物体に直交座標系を仮想的に固定し、この動きを任意に設定した制御座標フレームで記述してサーボをかけるというものである。

以下では、実現されているスキル、「突き当て」、「辺合わせ」、「はめ合い」の概要について述べる。各スキルには、目標状態を達成したか否かの判定機能を含めることにより、ロバストな作業機能を実現している。

##### (1) 突き当て

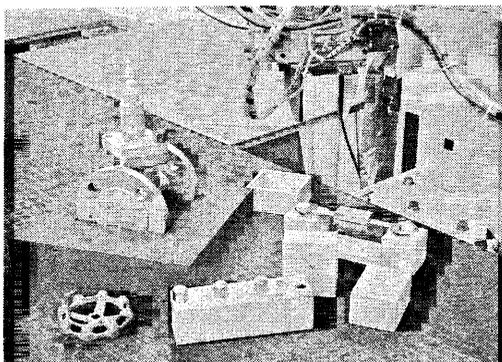


Fig. 8 Experiment Environment

突き当て動作は、新たな接触が生じるまで一定方向に作業対象物を移動させる動作と定義する。自由な空間から一定方向に移動して接触させる (Fig. 4) だけでなく、接触を維持したまま滑らせて新たな接触状態をつくる (Fig. 5) ことも含まれる。接触時の衝撃力は主に接触直前の速度で決まるので、突き当てに必要な移動動作は速度制御で実現する。実際の接触からその検出までの時間遅れの間に過大な力が生じないようにするためには、速度フィードバックゲインを適当な値に抑えればよい。速度指令値と実際の速度の差は系の内部の抵抗力と外部の抵抗力の和を表すが、系の内部の抵抗力は一つの動作の間はほぼ一定と見なせるので、この変化を監視することにより接触を検出できる。

##### (2) 辺合わせ

対象物の1つの面を他の物体の面に合わせることを目的として、Fig. 6 に示すように直線に辺を合わせる動作である。直方体の底面合わせの場合は、この動作を互いに垂直な辺の方向に2度繰り返せばよい。辺が合ったという目標状態の検出は、サーボ周期で読み込まれる各関節角度からハンドの位置を求め、その運動の瞬間中心の変化の観測に基づいておこなう。この検出法は、①マニピュレータ自身の動作を観測するだけでよく、余分な外付けセンサが不要である。②位置データの観測だけでよいため押し付け力、接触面との摩擦力などの影響の無い安定な検出が可能である。③運動中心のステップ状の変化に着目すればよく、しきい値の設定も容易であるなどの特徴を有し、安定確実な検出ができる。

##### (3) はめ合い

はめ合いは Fig. 7 に示す挿入作業の最終動作として用いられる。環境記述の誤差を考慮して、ピンを傾け、穴の中心から少しずれた位置からアプローチする。そこからz方向に突き当て動作を行いピンの底面を穴の縁に接触させ、さらにy方向に突き当て動作を行い側面をもう一方の縁に接触させた状態が Fig. 7a である。これを

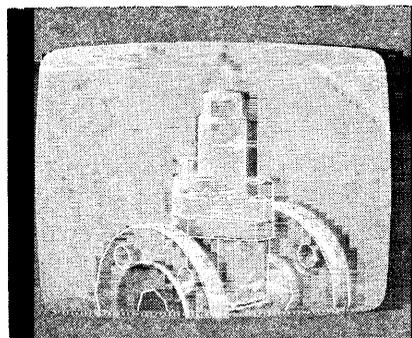


Fig. 9 Model of a valve superimposed on the TV image

```
(defun apply-wrench ()
  (move-base)
  (pick_up_w 'wrench)
  (move (position-of 'via-point))
  (move (wrench-approach-position-of 'bolt1))
  (touch 'x 2.0 0.5 0.1)
  (press 'x 3.0)
  (press 'y 0.0 1.0)
  (unix:sleep 1)
  (insert 'z 'y -0.05 -50.0 1.0)
  (twist 'z 0.0 0.5)
  (tilt 'z -1)
  (tilt 'z 1)
  (unix:sleep 2)
  (comp-pos 1.0)
  (comp-ori 1.0)
  (tilt 'z 60)
  (move (m* (read_frm) (trans-x -50)))
  (replace 'wrench)
  (move-base))
```

Fig. 10 Program for unfastening a blot with a wrench

接触を維持しながら徐々に起こしていけば Fig. 7 b のようにはめ合いが達成できる。はめ合い状態の検出にも瞬間回転中心の変化を用いることができる。

### 5. 作業実験

#### 5.1 作業プログラミングと実行

本システムの有効性を示すため、小型バルブの分解実

験を行った。実行手順は、まず環境内の物体の配置を教示し、つぎにレンチを用いてボルトをはずし、最後に上部カバーを外して内部のダイヤフラムを外すというものである。実験作業環境を Fig. 8 に示す。

まず、各物体毎に環境教示を行う。レンチについては、その台の位置と姿勢からレンチの位置と姿勢が求められるようになっている。Fig. 9 は作業対象のバルブの教示結果をモニタ上にスーパインポーズ表示したものである。

レンチを用いたボルト外しは、スキルによる作業実行の典型的な例である。環境モデル内のボルトのモデルには作業座標系として、位置や回転軸方向が記述されている。一方、ボルトの頭部の固定角度は正確に記述してはいない。このような小さな作業対象にまで、精密なモデルを作るのは煩雑である。しかも、この部分は六角形の回転対称形状を持ち、占有空間も小さいため、その固定角の値は作業プログラムの構造を変えるようなものでもない。むしろ、マニピュレータの側で、必要な最小限の情報のみで作業できるようにすべきである。実際、本システムではスキルの導入によって、ボルト位置と回転軸方向が与えられたら、あとは手探りでボルトにレンチをはめることができた。ボルトの幅は 16.8 mm、レンチの幅は 17.2 mm でクリアランスは 0.4 mm である。この作業プログラムを Fig. 10 に示す。プログラミングには ETAlisp<sup>(11)</sup> を用いている。動作手順の概略は以下の通り

- ①
- ②
- ③
- ④
- ⑤
- ⑥
- ⑦
- ⑧
- ⑨
- ⑩
- ⑪
- ⑫
- ⑬
- ⑭
- ⑮
- ⑯
- ⑰
- ⑱
- ⑲

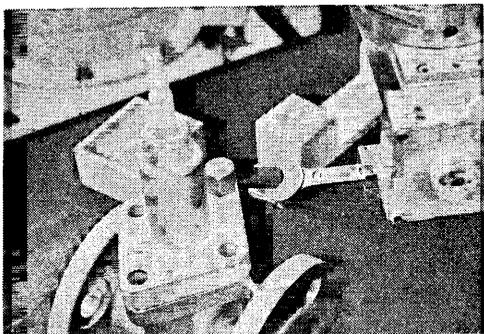


Fig. 11 Wrench approaching bolt

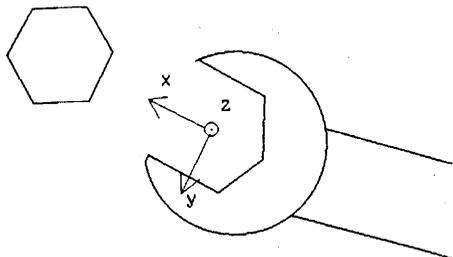


Fig. 12 Task coordinate system

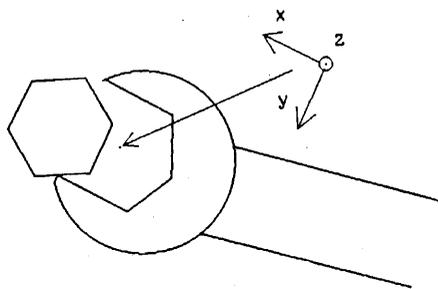


Fig. 13 Wrench touching bolt

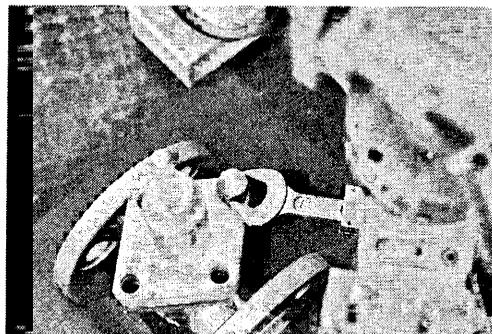


Fig. 14 Stable touch

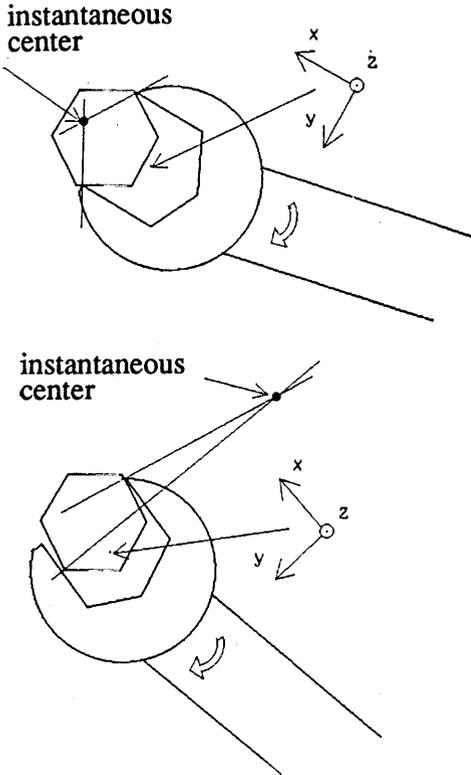


Fig. 15 Change of instantaneous center

で、カッコ内の①から⑱は作業プログラムの文番号である。

(1) 手先を動作開始位置に移動したのち(①), レンチを把握し(②), 経由点を通して(③), ボルト頭部近傍のレンチ接近点に位置ぎめ制御する(④, Fig. 11). ここまでの動作は環境モデルのデータに基づいて制御される. レンチを把持した時点で, 作業座標サーボの座標軸は Fig. 12 に示すようレンチ先端の開口部中央にとられ, ハンドとの相対関係が固定される. 以後はこの作業座標フレームの動きが記述され, その記述された動きを実現するようにマニピュレータが制御される.

(2) 「突き当て」スキルによりレンチを一定速度制御で接近させてボルトに接触させる(⑤, Fig. 13).

touch 文の各パラメータは, 動作方向を作業座標系の  $x$  軸方向, 突き当て速度は  $2.0 \text{ mm/s}$ , 接触検出しきい値(速度指令値と実際の速度の差の変化分)を  $0.5 \text{ mm/s}$ , 速度制御の積分ゲインを  $0.1$  に設定する.

(3) レンチを安定に押し当てた状態にする. まず  $x$  軸を力制御モードにして  $3 \text{ N}$  でレンチをボルトに押し付ける(⑥). 位置, 速度のフィードバックゲインは  $0$  である. つぎに  $y$  軸方向を力  $0$  の力制御モードにする(⑦). 速度フィードバックゲインは通常の値で残し, 位置フィ

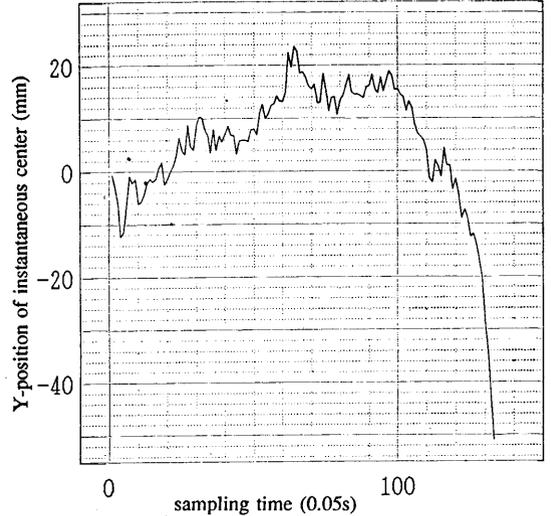


Fig. 16 Computed position of instantaneous center

ードバックゲインは  $0$  とする. そのまま状態が安定するよう  $1$  秒待つ(⑧, Fig. 14).

(4) レンチを回転し, はめ合い動作を行う(⑨). insert 文の各パラメータは, 作業座標系の  $z$  軸を回転軸,  $y$  軸を回転中心の変化を監視する方向, 回転速度を  $-0.05 \text{ rad/s}$ , はめ合い検出しきい値(瞬間回転中心の  $y$  軸方向の位置変化)を  $-50 \text{ mm}$ ,  $x$  軸方向の押し付け力を正方向の既定値に設定する. はめ合い状態の達成前後における瞬間回転中心位置を Fig. 15 に, また実測による瞬間回転中心位置の変化の様子を Fig. 16 に示す. 縦軸は回転中心位置の作業座標系  $y$  軸成分, 横軸は動作開始後のサンプル番号で, 約  $20 \text{ Hz}$  でサンプリングしている.

(5) はめ合いを確実にするため, 習い動作によりレンチを押し込む(Fig. 17). まず  $z$  軸回りの回転をトルク  $0$  の力制御とし, 速度フィードバックゲインを通常の半分の値にする(⑩).  $z$  軸回りに  $-1$  度(⑪), つぎに  $1$  度回転する(⑫). 状態が安定するまで  $2$  秒待つ(⑬).

(6) レンチを回転させてボルトを緩める. まず, 並進運動をすべて位置制御モードにする(⑭). 回転運動をすべて位置制御モードにする(⑮). つぎに,  $z$  軸回りに  $60$  度回転させて, ボルトを緩める(⑯). レンチをボルトから外し(⑰), 初期位置に戻す(⑱). 作業開始位置に戻る(⑲).

このうち, ボルトを手先でつかみ回転してはせず. 最後に, バルブ上部カバーならびに内部の弁を取り外しが実行された.

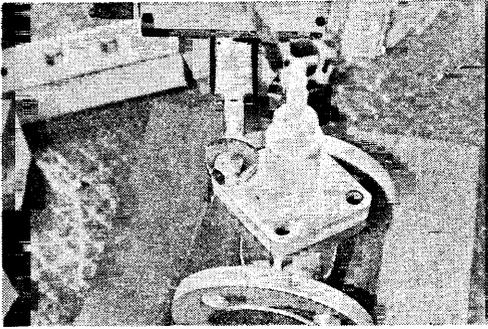


Fig. 17 Wrench seated on bolt

## 5.2 考察

環境モデルと作業スキルに基づく統合システムの実現のためには、これまでに開発してきた個別要素の研究だけでなく、新たな問題解決が必要であった。また、統合によって作業システムとしての機能が拡張できることも明らかになった。上記実験をふまえて主要なものを列挙する。

### 1) 作業に必要な精度の確保

レンチによるボルト緩め動作において、システムが対応できる誤差については以下のように考察できる。レンチ頭部をボルトにつき当てた段階で、上方からみて六角形のボルトの2つの頂点がレンチの開口部内に入っていれば、レンチを押し当てながら回転して行くことによりはめ合いを達成できる。最悪のケースは、六角形ボルトの1つの辺の法線方向からレンチが接近した場合で、このときレンチの左の爪の先端が Fig. 18 に示す位置よりも左でボルトに接触しなければならない。この条件でボルト中心位置とレンチの爪間中心位置との許容誤差  $e$  を計算すると約 3.8 mm となる。これは作業システムの誤差の範囲内であり、実行に十分な精度が得られていることがわかる。

### 2) 環境モデルを前提にした作業スキルの実現

スキルは局所的な制御戦略であり、実行時に作業を達成できる位置までは環境モデルからのデータで位置制御できることを前提にしている。スキルの実現にあたって、動作は対象物の作業座標系で相対的に記述し、実環境での配置に依存しないプログラム形式とした。これによりプログラム生成が容易になり、スキルの蓄積と再利用も可能になっている。

### 3) モデル生成の簡易化

対象が小さくてモデル化が困難なものについては、それが接触している他物体のデータを用いた既定値による概略モデルでもよい。スキルが実行時に誤差を吸収できるからである。実験ではボルトの回転軸回りの固定角が既定値である。このように統合によりモデル生成そのも

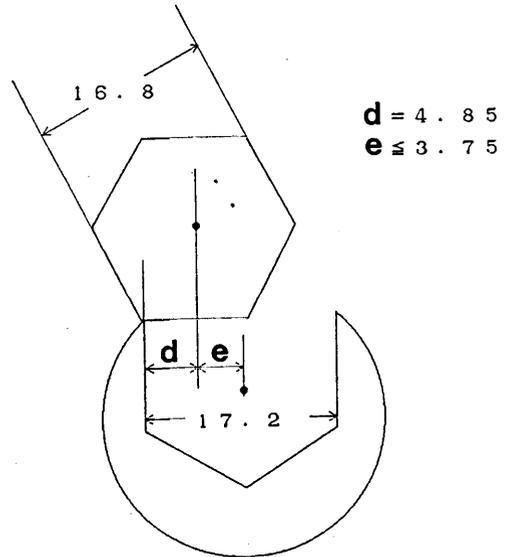


Fig. 18 Error limit in wrench touching

のも容易になっている。

## 6. むすび

本論文では、作業動作の直接教示とその再生に代わる新しいロボット制御の技術的枠組みとして、作業環境を記述する環境モデルとハイブリッド制御機能に基づく作業スキルとの統合の概念を提案し、これに基づいて開発したマニピュレーションシステムについて述べた。本研究により、

1) 従来きわめて困難であったハイブリッド制御による作業のプログラミングがモデルとスキルの統合により容易になること、および

2) 局所的戦略であるスキルがうまく実行できる位置までは、環境モデルのデータにより位置制御され、さらに実行時の誤差や不確定事象が作業スキルにより吸収されて、確実に作業できることを実例を示して明らかにした。

本システムを核として発展させることにより、現場でのチューニングが不用で、安全な遠隔において、モデル生成から作業実行までの一貫した操作が可能となる見通しを得た<sup>12)</sup>。使いやすい作業システムとするために、今後さらに、グラフィックシミュレータによるプログラム動作の可視化機能の追加や、モデルに基づくプログラム修正の自動化機能などの組込みを考えている。

最後に、本研究の機会を与えてくださった弓場知能システム部長、種々御討論いただいたロボットグループの諸氏に感謝致します。

## 参 考 文 献

- 1) S. Mujtaca and R. Goldman: AL User's Manual, Stanford AI Lab., Memo AIM-323, 1979
- 2) 築山俊史:「極限作業ロボット」プロジェクトの現状, 計測と制御, 27-7, pp. 497-500, 1988
- 3) 白井, 井上: 知能ロボット研究の展望—モデルベースト・ロボティックス—, 日本ロボット学会誌, 5-6, pp. 462-469, 1987
- 4) D. E. Whitney: Historical Perspective and State of the Art in Robot Force Control, Int. Journ. of Robotics Research, 3-1, pp. 3-14, 1987
- 5) 浅田, 出海: 作業者の動作計測によるハイブリッド制御のための作業教示とプログラム生成, 日本ロボット学会誌, 5-6, pp. 452-469, 1987
- 6) 長谷川 勉: ロボットのための作業環境入力システム, 電気学会論文誌, Vol.107-c, No.4, pp. 666-672, 1987
- 7) 長谷川, 亀山: 概略教示と自動精度改善によるロボット作業環境の幾何モデリング, 計測自動制御学会論文集, 25-12, pp. 1371-1378, 1989
- 8) 末広, 高瀬: スキルに基づくマニピュレーションシステム, 日本ロボット学会誌, Vol.8, No.5, pp. 551-562, 1990
- 9) 末広, 高瀬: 直接計算方式による作業座標サーボに基づくマニピュレーションシステム, 日本ロボット学会誌, Vol.3, No.2, pp. 11-21, 1984
- 10) 末広, 高瀬: 接触運動の表現と制御およびその組立作業への応用, 日本ロボット学会誌, Vol.6, No.6, pp. 31-38, 1988
- 11) T. Ogasawara and T. Matsui: ETALisp Reference Manual, ETL Research Memorandum, RM-87-08 E, 1986
- 12) T. Hasegawa et al.: An Integrated Tele-Robotics System with a Geometric Environment Model and Manipulation Skills, Proc. IEEE Workshop IROS '90, Tsuchiura, 1990