

解説



ロボティクス†

辻 三 郎††

新しい情報科学の発展の場としてロボティクス (robotics) が盛んに研究されるようになったのは、1960年代の後半であった¹⁾。そこでは、多くの制約条件を持つコンピュータや人工知能の研究を一步進めて、より自由に環境に働きかける機械、人間に近い知能を持つ機械として、**知能ロボット (intelligent robot)**の研究が行われた。本稿では、ロボティクスの基本課題について考えた後に、これらの知能ロボット研究の発展の道すじ、さらに知能ロボット技法の応用分野を新しいオートメーションの姿に重点をおいて述べてみよう。

1. ロボティクス

ロボットに人間に近い機能を与えるには、どういった課題が必要であろうか。まず思いつくことは、ヒトに似たハードウェア構成のシステムを作ることである。知能ロボットの研究では、**図-1**に示すようにTVカメラの目、人間の手に似た多関節マニピュレータ、自由に移動するための車、そして脳の役割りをするコンピュータを一体化したシステムが作成される。ロボットをヒトに近づけるためには、これらのハードウェアの性能向上も重要であるが、それよりも人間なみの知能を機械に与えることが、より重要で本質的問題と考えられている。

われわれは、ロボットを単なる自動機械とは考えていない。従来の自動機械は、ごく限られた定型的な仕事を繰返し実行するに過ぎない。それに対してロボットは、人間がコトバで与える多様な仕事を、いろいろの環境のもとで独力で行うことが要求される。情報処理の立場からみて、そのために解決すべき課題としては、次のものがある。

(1) 問題解決

人間から与えられた仕事を実行する計画を、ロボッ

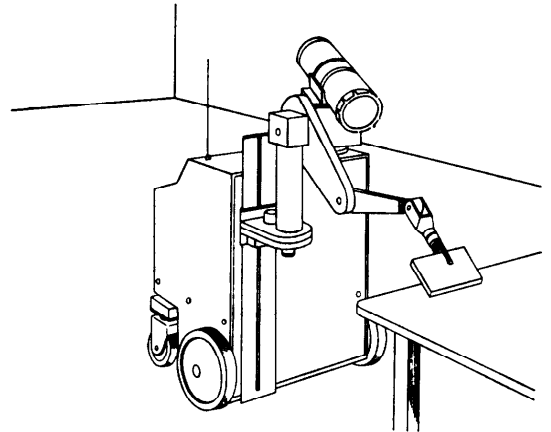


図-1 提案されている知能ロボット

トが独力で発見する。

(2) 環境の理解

周囲の状況を、目・耳・触覚などの感覚情報で知り、そのモデルを作成する。

(3) 知識の表現

ロボットの働く環境の状態や法則、自分の経験などの知識を記憶し、自由に活用する。

(4) 自然言語処理

英語や日本語のような自然言語の意味を理解し、ヒトと情報を交換する。

(5) 行 動

手や足などの運動器官を使って作業をする。

これらは独立した課題でなく、互いに密接な関連を持っている (**図-2** 参照)。そしてロボットは、これらが有機的な連なりを持ちながら、作業を実行するところに特徴がある。たとえば、与えられた仕事に対して、まだ環境のモデルの情報が不十分であると、必要な情報を観測する計画を自分で作り、それに従って見やすい位置に移動したり、邪魔な物を取り除いたりして情報収集をすることができる。この意味で、ロボットは能動的な知能システムとして、研究の関心をよせられた¹⁾。

† Robotics by Saburo TSUJI (Faculty of Engineering Science, Osaka University).

†† 大阪大学基礎工学部

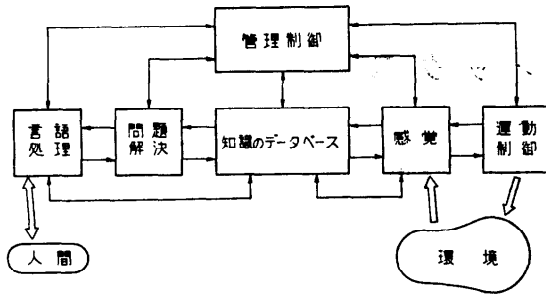


図-2 知能ロボットのソフトウェア構成

しかしながら、上に述べた課題はどれをとっても人工知能の本質の問題であり、なかなか解決できるものではない。したがって、それらを組合せたシステムの問題点を掘り下げることは、ロボットの世界を非常に単純化した積木の世界 (blocks world) でも困難であった。初期の知能ロボットのプロジェクトでは、目と手を持つロボット (hand eye system)^{2)~4)} や移動ロボット (mobile automaton)⁵⁾ の実験が行われたが、視覚情報に基づく手の制御、あるいは移動しながら観測した外界モデルを作り簡単な作業を計画することなどが、総合されたロボティックスの色合いの強いもので、それよりも三次元世界を認識するコンピュータ・ビジョンや多関節マニピュレータの制御技術に多くの人の関心は集まった。

1970年代では、ロボティックスの研究は個々の分野に分化した。問題解決などは、例題は積木の世界での作業をとりあげても、人工知能の一分野として研究されている^{6),7)}。また視覚は、アメリカの DARPA (Defence Advanced Research Agency) の画像理解 (Image Understanding System) プロジェクト⁸⁾ やわが国の PIPS プロジェクト⁹⁾ の一環として研究された。一方、手の研究は作業世界のモデルを利用しながら各種のセンサ出力を処理し、巧妙に手を制御する方式、各種のマニピュレータやセンサが研究された。

ロボティックスの開発は、今まで述べてきた研究指向のロボットだけでなく、実用面からのアプローチがむしろ盛んである。すなわち、工場での簡単な繰返し作業を労働者に代って行う産業用ロボット (industrial robot) が、1960年代の終りから急速に実用化され普及した¹⁰⁾。これらの多くは、1本の腕と記憶装置を持つ簡単なロボットで、プログラムされた手順に従って作業を繰返す。また放射能、深海、宇宙空間などの悪環境で人に代って探査したり作業をするロボット (テ

レオペレータ (teleoperator)¹²⁾ や、身体の不自由な人の補助手段としてのロボット技術¹³⁾ も重視されている。

特に最近注目されることは、知能ロボットの基礎研究で得られた経験や知識を利用し、さらにコンピュータ技術やシステム技法を総合した新しいロボティックスの流れである (図-3 参照)¹⁴⁾。初期の知能ロボットはテーブル上に置かれた積木を目で認識し、手でそれらを積み重ねていたに過ぎないが、新しいオートメーションの研究ではロボットはベルトコンベア上を流れてくる機械部品を見

分け、多種の製品を組立て、製品の傷の目視検査を行う“働く機械”を目指している。これらは通常の産業用ロボットに比べて、はるかに高度の情報処理を行っているが、最近の LSI 技術の目覚ましい進歩が研究のインパクトとなっている。またテレオペレータも知能を付加することにより性能が著しく向上し、しかも人との情報交換が容易になるので、知能ロボット技術の発展の場として期待されている。

2. 新しいオートメーション

現在まで多くの人々が生産工程において各種の作業に従事してきた。そのうち部品加工は、数値制御の加工機械の発達とともに、コンピュータを利用したオートメーションが進み、また設計作業にも CAD の導入が常識的になってきた。

しかしながら、より多くの労働力を必要とする組立や検査¹⁵⁾の自動化にコンピュータ技術を利用することは遅れている。たとえば組立工程には、自動組立機械が開発・利用されてきた。しかし、これは一定の製品を長期間にわたって大量に生産する少種多量生産には有効であるが、いろいろの型式の製品を少量ずつ生産する多種少量生産には不向きである。そこで高い付加価値の製品を生産する要求が強くなるにつれて、製品の多様性に適応する自動化システムが研究された。これらは、プログラマブル・オートメーション (programmable automation) またはフレキシブル・オートメーションと呼ばれている^{16)~18)}。

2.1 産業ロボットの問題点

前章で述べた産業用ロボットは、作業プログラムを変更することにより種々の仕事ができるので、多種少量生産の組立工程に利用できそうである。しかし、その多くは器用な作業をするようにハードウェア的に設計されてなく、しかもプレイバック (play back) 制御と

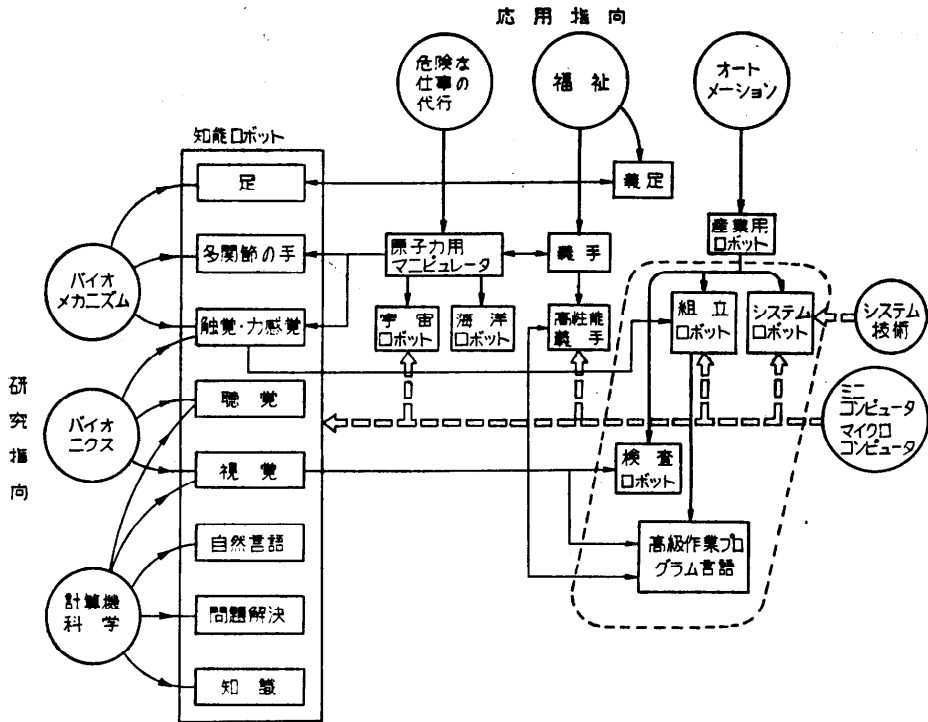


図-3 ロボット研究の結びつき

呼ばれるきわめて簡単な（換言すると知能レベルの低い）制御方式を用いている。これは図-4に示すようにあらかじめ記憶した軌道の座標をメモリから読出し、それに一致するように腕の各軸を動かすもので、以下に述べる理由で組立のような複雑な作業はできない。

(1) センサ情報による手の制御

人間の手のように、接触感覚で物の位置を発見したり、指にかかる力を検出して制御系にフィードバックしないと、器用な機械の手は実現できない。

(2) 視覚

単に部品を運ぶといった簡単な作業でも、それらの部品が一定の場所に、一定の角度で置かれてないと作業は失敗する。これは人間のような視覚を持っていないため、種類の異なる部品を見分けたり、部品の取り付け位置を見つけることもできない。

(3) 作業プログラム

プレイバック制御の作業プログラムは、軌道座標の座標の集合と開閉動作の指示といったデータの形式で与えられており、環境に応じて作業内容を変えることができない。複雑な組立作業の内容を記述することは不可能に近い。

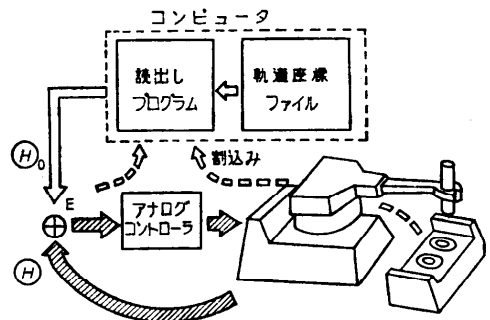


図-4 プレイバック型ロボットの計算機制御

以上は組立についての問題点であるが、検査の自動化の必要性も強い。部品や製品の目視検査は自動化がおこなわれていたが、検査員の疲労、不良品の見のがしなどの理由から機械化が望まれており、コンピュータビジョンの最も有効な分野と考えられている¹⁹⁾。

これらの問題点を解決するため、知能ロボット研究で得られた知識を基礎にして、オートメーションに用いるコンピュータビジョン、多関節の機械の手のソフトウェアサーボ、ロボット用言語、ハンドアイシステムによる組立作業などのロボティクスの分野が盛ん

に研究された。

2.2 産業用視覚システム

知能ロボットの視覚は、TV カメラから送られる画像をコンピュータが解析し、それを意味を持つ記述に変換する。たとえば室内シーンを解析して、“この室内には椅子と机があり、壁には絵がかかっている”というようにコンピュータ内で解釈する。しかし、このような一般的視覚システムは、実時間処理、低価格、高信頼性を要求される産業用視覚システムには、そのままの形では利用できない。

ロボットの作業する世界が限られていると、当然視覚も簡単なものでも十分能力が発揮できる。生産工程では、機械の目が見やすいように環境を設定できるので実用的な視覚システムが開発された。ここでは紙数の関係で、技術的な面は文献^{20), 21)}にゆずるが、最近のLSI 技術を利用した画像プロセッサ²²⁾、特に画像理解システムのプロジェクトで開発されているワンチップの画像プロセッサ²³⁾の発展とともに、今後急速に性能の向上と普及化が期待されることを強調したい。

3. 腕のソフトウェアサーボ

本章では、最近発展したロボットの手のソフトウェアサーボ (software servoing)²⁴⁾を展望する。人間の手と同様にロボットの手も力、接触、すべり感覚など各種センサ¹⁰⁾からの信号をフィードバックすることにより、プレイバック制御に比べてはるかに柔軟性に富み、しかも高性能になることが実証された¹⁴⁻¹⁷⁾。

以下に述べる方式は一步進んで、作業データベースに記述された作業内容に適合するように腕の各部の制御モードを自動的に変更し、多種多様の仕事を同一のアームで実行することを目指している。また使用するアームが人間の腕のように多関節の構造をしているので、作業をするための各関節の軌道の算定、複雑な非線形の動特性の補償計算をする必要がある。そこで、従来のアナログ方式のサーボから脱却して、高次のソフトウェアサーボ方式が研究された。

3.1 手の構造

産業用ロボットの腕は、かなりの重量物を取扱えるように設計され、その構造も単純なものが多い。たとえば自動車の点溶接に数多く用いられているユニマート (Unimate) は、戦車の砲台のような形をしていて、砲身が腕に相当し、手先は極座標に従って動かすように設計されている。また手先が円筒座標型のロボットも数多く製作されている¹⁰⁾。

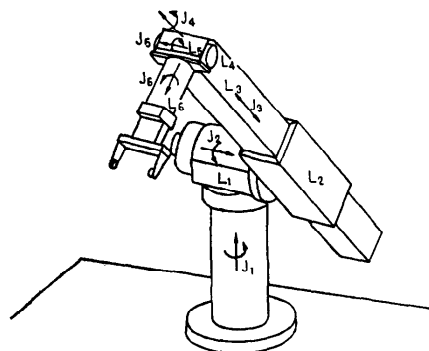


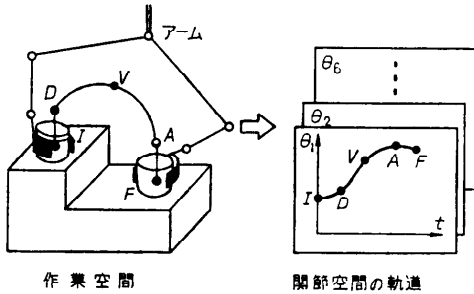
図-5 スタンフォードアーム²⁵⁾

知能ロボットの研究には、より人間の腕に似ている多関節型の電動アームが用いられている。図-5は、その一例のスタンフォードアームである²⁵⁾。これを改良してMIT アーム (図-1) が作られたが、さらに組立作業の解析から組立用ロボットとして多関節電動アーム PUMA が開発された²⁶⁾。

このような多関節型の腕では、どの関節をどれだけ動かすと手先がどの位置にくるか、その角度はどのようになるかを知るのは容易でない。そのためコンピュータによって、各関節の回転角や移動量から手先の状態を計算する。手が3次元空間内で自由に作業するには6自由度 (XYZ 方向の平行移動と各軸まわりの回転) が必要で、図-5の J_1, J_2, \dots, J_6 のように関節ごとに座標軸のベクトルを設定し、その間の変換行列の積として手先ベクトルを算出する。ハンド・アイ・ロボットが作業するには、TV カメラ、手、作業台、作業対象ごとに設定された座標系で作業を記述するのが便利である。高級ロボット言語では、ユーザがこれらの座標変換にわずらわされず作業プログラムを作成するように考慮されている。

3.2 腕の軌道制御

多関節の腕が作業をするには、まず各関節をどのように動かしたら目的が達成できるかという計画を作る必要がある。図-6に示すように、物体を持った手を始点 I から終点 F まで動かす場合、腕の6個の関節をそれぞれ独立に動かして目標点に到達するのが一番簡単であるが、これでは始点や終点の近傍でテーブルと衝突する危険がある。これを防止するため、始点と終点の近くに経由点 D と A を設定し、手が必ずそれらを通るようにする。すなわち、手の軌道を $IDVAF$ を通る滑らかな曲線とし、それに対する各関節の変位 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_6$ を計算し、図-6に示す6枚の軌道曲線を作



作業空間 関節空間の軌道

図-6 目標軌道の計画

成し、それを目標値にしてサーボ系を動かす。

また多関節の腕の動特性は、腕の姿勢により慣性モーメントが変り、遠心力、コリオリ力、ジャイロ効果が影響し、また関節間にも干渉のある複雑な振舞いを示す。そこで制御コンピュータが、各種の補償入力を計算して上述の目標値に加えることにより、常に一定の良好な応答が得られた²⁷⁾。

多くの障害物があるために、図-6のように直観的に安全な軌道を発見できない作業空間に対しても、衝突しない腕の動きを算出する手法も研究されている²⁸⁾。

3.3 作業空間

ロボットに多種多様の仕事をさせるには、あらかじめそれぞれの作業の内容を作業データベースに登録しておく、それに基づいて腕の各部をどのように制御すべきか決定すればよい。ここで重要なことは、多くの作業が独自の構造を持っている点である。大仕事を例にとると、のこぎり作業は直線的、かんは平面状、ドリルは円運動をし、それぞれ少数の主運動成分に分解できる。したがって、ある作業には直角座標型の腕を、またほかの作業には円筒座標型や極座標型の腕を使用すると仮想して、作業内容を記述するのが便利である。これらの仮想アームの動作と一致するように多関節アームを制御すれば、目的を達することができる。

のこぎり作業を例にとると、図-7に示すように直交座標型の構造が適する。そこで座標軸 h_1, h_2, h_3 を考え、各軸に仮想のサーボ系を想定する。この h_1, h_2, h_3 と姿勢を表わす変数 h_4, h_5, h_6 で表わされる座標系 H に対して、作業の拘束条件を記述する。今の場合、 h_1 はのこぎりを引く時は強く、押す時は軽く、 h_2 は一定位置、 h_3 は引く時はやや力を加え、押す時は力を抜く。このような作業パターンに対して、仮想アームの動特性が純慣性系として力 F を算出する。実際のアームに対しては図-8に示すように、 F から各関節のトルクに変換し、さらに現実の関節の変位 θ と速度 $\dot{\theta}$ か

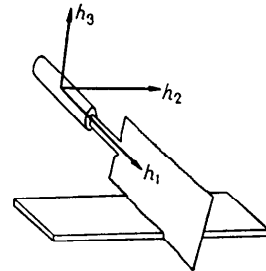


図-7 作業空間に設定した仮想座標系²⁹⁾

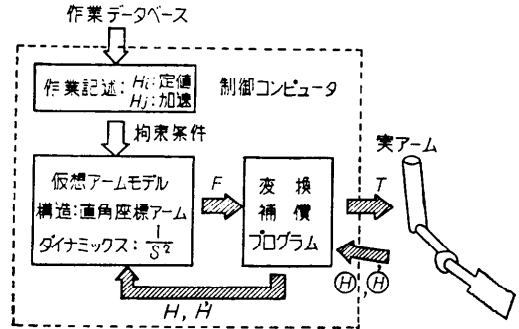


図-8 作業空間のソフトウェアサーボ

ら補償力を計算して加えることにより、理想的な仮想アームと同じ作業ができる。

この考え方は、2本の腕を持つロボットが板をのこぎりで切り、針を打って箱を組立てる実験によって検証された²⁴⁾。本方式の問題点は、変換や補償の計算量がぼう大のことで、そのため時間のかかる係数計算はオフラインで行ってファイルを作り、実験ではミニコンピュータが補間しながら腕の制御量を算出した。これを実時間処理するには、LSIを用いた専用制御コンピュータが必要である。

4. ロボット言語

4.1 作業のプログラミング

ロボットに作業を教える時、プレイバック型ロボットでは操作員がジョイ・スティックでロボットを操縦し実際に作業をさせて、アームの軌道の座標をメモリに格納する方式がとられた。また PUMA などのマイクロコンピュータ制御の産業用ロボットでは、簡単な言語を用いて対話的に制御指令文を順次タイプライタから与え、それをロボットで実行してテストする方式が採用されている。

一方、1970年代の後半から組立作業を想定した高級言語の研究が盛んになった。その代表的なものは、ス

スタンフォード大学の AL²⁹⁾, IBM の AUTOPASS, MIT の LAMA, パデュー大学の PAL²⁵⁾ である。それらの特徴として、

- (1) 作業環境のモデルの利用
- (2) 作業内容を作業対象の操作について記述
- (3) プログラミングの簡易化

(4) 問題解決などの高度の AI の手法を用いないがあげられる。これらの言語の開発が主として人工知能の研究グループによってなされたことを考えると、特に最後の項には疑念を持つかも知れない。この理由として、現在までの問題解決プログラムの能力がきわめて低く、組立作業のような複雑な仕事を行うには不十分であること、組立作業では必ずしも目標指向型(goal-oriented) の記述が必要でないことがあげられる。次節に、代表的な言語として AL を説明する。

4.2 AL

AL は、スタンフォード大学の知能ロボットの組立作業を記述するために開発された言語で、同大学にプログラマブルオートメーションの研修にきた人も、短期間で使いこなすことができる。

使用するハードウェアは、2台のスタンフォードアーム (BLUE と YELLOW と名づけられている)、TV カメラ、PDP 10/KL 10 と PDP 11/45 の2台のコンピュータである。AL コンパイラは PDP 10 で、その結果を利用してランタイムシステムは PDP 11 上で実行する。

AL は、ALGOL 形式のプログラム言語であるが、組立作業の記述に便利なデータ構造や機能を持っている。以下は、図-9 に示すようにテーブル上に柱 (beam)、L型金具 (bracket)、ボルト (bolt) が置かれていて、

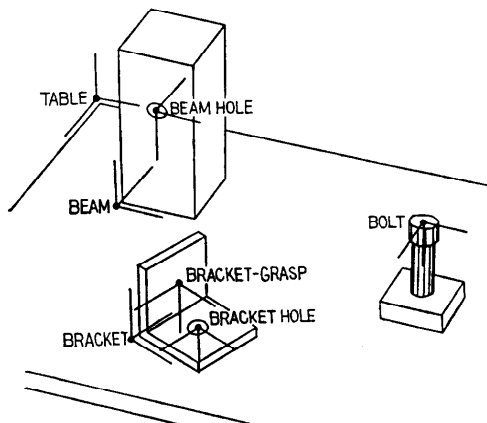


図-9 簡単な作業環境²⁹⁾

柱とL型金具の穴を合わせ、そこにボルトを差込む作業を考える。

AL のプログラムは、作業世界の記述と作業内容の記述に大別される。組立作業は数多くの部品を扱うが、その作業はそれぞれの部品、さらに部品上の特定の場所について記される。図-9 の例であると、金具自体やその穴、それをつかむ場所などの位置・姿勢が必要となる。AL では、これらに対して FRAME と呼ぶ座標系に設け、その値を一度設定すると、AL システムが厄介な座標変換の面倒をみてくれる。BRACKET-HOLE は BRACKET に付属しているの、BRACKET が動けば自動的にその座標軸の位置を更新する。2本のアームにも FRAME が設けられており、各関節の角度からそれらの FRAME のパラメータを更新する。AL の作業世界は木構造で記述され、作業が行われるたびに自動的に更新される。

アームの制御は、3.2で述べた軌道計算方式を用いているが、センサからの情報をたえず監視し、その値により制御の流れを変えることができる。また作業内容には、アームの動きについて記述するのではなく、作業対象について書下せばよいので容易にプログラムできる。以下は、AL による作業ステップの記述例である。

```
MOVE bracket-hole TO beam-hole+VECTOR (0, 0, -3) WITH-RESPECT-TO beam-hole
beam-hole から -3cm 下に bracket-hole がくるように (bracket-grasp をつかんでいる手を) 動かせ。
ON FORCE (Z WITH-RESPECT-TO beam-hole)
5*OZ DO STOP YELLOW
beam-hole の FRAME の Z 軸方向の力が 5 オンス以上になったらアーム YELLOW を停止させよ。
```

図-9 の作業世界の記述、作業の指定が 30 ステップ余りでプログラムできる。また AL では、ユーザがよく用いる動作をマクロとして登録でき、それを用いて複雑な組立動作が記述できる。さらに、2本のアームの同時作業の機能も備えられている。

5. 組立システム

5.1 ハンドアイシステム

目と手を組合せたロボットによる組立作業の研究は、すでに多く発表されている^{3), 4), 16), 17)}。図-10 は日立中央研究所で研究されたシステム³⁰⁾で、2本の腕と8個の目を備え、掃除機の組立をする。ここで興味深い手法は、複数個のカメラを用いたビジュアルフィードバック (visual feedback) である。図-10 に示すよ

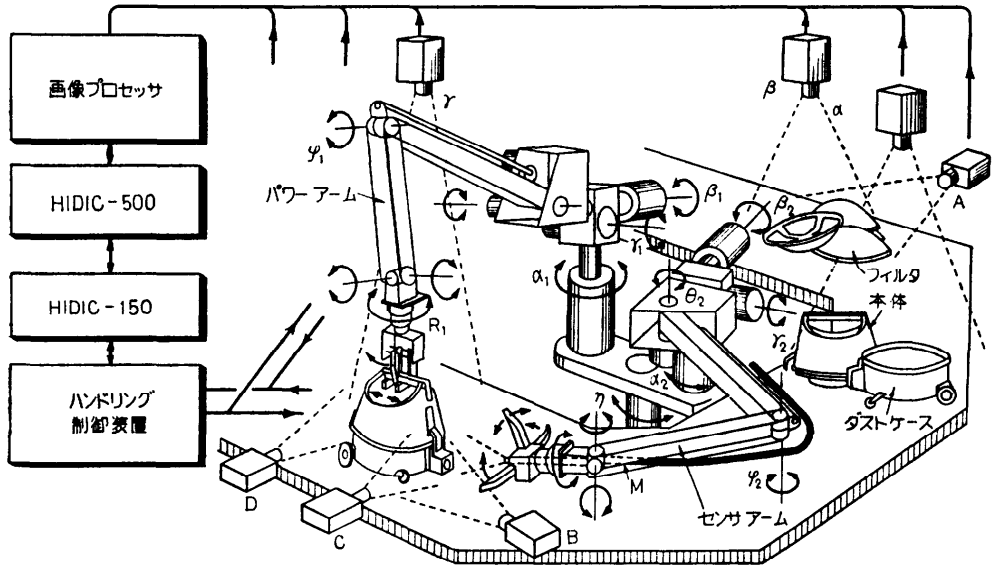


図-10 ハンドアイロボットによる掃除機の組立¹¹⁾

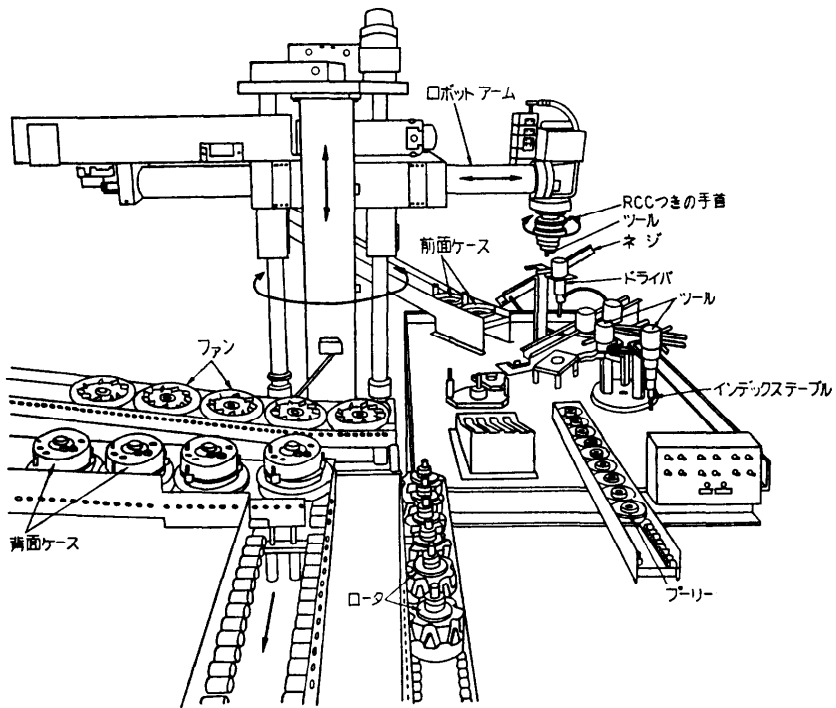


図-11 RCC 装備のロボットによるモータの組立¹¹⁾

うに本体をダストケースに挿入する時には、3個のカメラ（水平方向のB,Dと垂直方向の γ ）が用いられる。まずBとDのカメラで水平方向の誤差が測定され

て、アームの位置が修正される。水平方向の誤差がなくなると垂直方向のカメラ γ で回転角の誤差を測定し手首にフィードバックして正しく挿入動作を遂行す

る。このように3次元物体を、複数個のカメラとアームの協同作業で見やすい状態で観測するのは、ロボティックスの特徴を生かすひとつの典型的な例と言える。

5.2 実用化システム

Draper 研究所では、組立作業の作業分析、はめあい作業における力学的解析を行い、実用的速度（センサ・フィードバックより高速）で部品のはめあい作業を行う機構 RCC (Remote Center Compliance) を考案した¹⁵⁾。RCC は、バネのたわみ機構を利用して部品と穴の間の位置と角度の誤差をそれぞれ独立に修正する。図-11 は、4自由度のロボットに RCC を取付け、モータの組立を行う実験を示す。この方式を発展させた小型モータの組立ラインも研究されている¹⁷⁾。

6. むすび

最近のロボティックスの発展を、新しいオートメーションの関連技術を中心に解説した。今後は LSI 技術の発展とともに、実用化システムでもより高度の情報処理が行われると予測される。またロボティックスの基礎研究分野では、今までに蓄積した人工知能の経験を足場にして、次の発展が期待される。

参考文献

- 1) 辻 三郎: ロボットの情報処理, 情報処理, Vol. 11, No. 8, pp. 467-475 (1970).
- 2) Feldman, J. A. et al.: The Stanford Hand-Eye Project, Proc. 1st Int. Joint Conf. Artificial Intelligence, pp. 521-526 (1969).
- 3) ETL-MKI 特集, 電総研彙報, Vol. 35, No. 3 (1971).
- 4) Ejiri, M. et al.: A Prototype Intelligent Robot That Assembles Objects from Plan Drawing, IEEE Trans. Comput., Vol. C-21, No. 2, pp. 161-172 (1972).
- 5) Nilsson, N. J.: A Mobile Automaton, Proc. 1st Int. Joint Conf. Artificial Intelligence, pp. 509-520 (1969).
- 6) Fikes, R. E. and Nilsson, N. J.: STRIPS, A New Approach to the Application of Theorem Proving to Problem Solving, Artificial Intelligence, Vol. 2, pp. 189-208 (1971).
- 7) Sussman, G. J.: Computer Model of Skill Acquisition, Elsevier (1975).
- 8) 白井良明: 画像理解, 情報処理, Vol. 21, No. 6, pp. 626-632 (1980).
- 9) Nishino, H.: PIPS (Pattern Information Processing System) Project-Background and Outline, Proc. 4th Int. Joint Conf. Pattern Recognition, pp. 1152-1161 (1978).
- 10) 小特集 産業用ロボット, 電気学会雑誌, Vol. 100, No. 8, pp. 481-506 (1980).
- 11) 特集 生物的な機械を目指して, 計測と制御, Vol. 18, No. 1(1979).
- 12) 大塚 清: 危険作業の無人化と遠隔操縦ロボット, 文献11, pp. 107-112 (1979).
- 13) 土屋和夫: 義肢の最近の進歩, 文献11, pp. 78-85 (1979).
- 14) 辻 三郎: ロボット新技術, 電気学会雑誌, Vol. 94, No. 9, pp. 771-778 (1974).
- 15) Nevins, N. J. and Whitney, D. E.: Computer-Controlled Assembly, Scientific American, Vol. 238, No. 2, pp. 62-74 (1978).
- 16) Rosen, C. A. and Nitzan, D.: Use of Sensors in Programmable Automation, Computer, Vol. 10, No. 12, pp. 12-23.
- 17) Dodd, G. G. and Rossel, L. (Ed): Computer Vision and Sensor-Based Robots, Plenum Press (1979).
- 18) 後藤達生: フレキシブルオートメーションと産業用ロボット, 文献10, pp. 486-489 (1980).
- 19) Tsuji, S. et al.: Future Directions of Industrial Applications, Proc. 4th Int. Joint Conf. Pattern Recognition, pp. 1144-1149 (1978).
- 20) Kruger, R. P. (Ed): Imaging Applications for Automated Industrial Inspection and Industry, Proc. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, Vol. 182 (1979).
- 21) Machine Perception for Industrial Applications, Computer, Vol. 13, No. 5, pp. 7-63 (1980).
- 22) 木戸出正継: 画像処理用ハードウェア, 情報処理, Vol. 21, No. 6, pp. 620-625 (1980).
- 23) Nudd, G. R. et al.: Development of Custom-Designed Integrated Circuits for Image Understanding, Proc. Image Understanding Workshop, pp. 1-9 (Nov. 1979).
- 24) 井上博允: ソフトウェアサーボによるロボットの制御, 日本機械学会誌, Vol. 81, No. 713, pp. 105-111 (1978).
- 25) Paul, R. L. and Nof, S. Y.: Human and Robot Performance, 文献16, pp. 23-50 (1979).
- 26) Beecher, R. C.: PUMA: Programmable University Machine for Assembly, 文献16, pp. 141-152 (1979).
- 27) Paul, R.: Modeling, Trajectory Calculation and Servoing of Computer Controlled Arm, Stanford Univ. AI Memo., AIM-177 (1972).
- 28) Lozano-Perez, T. and Weseley, M. A.: An Algorithm for Planning Collision-Free Paths Among Polyhedral Obstacles, Comm. ACM, Vol. 22, No. 10, pp. 560-570 (1979).
- 29) Finkel, R. et al.: AL, A Programming System for Automation, Stanford Univ. AI MEMO., AIM-243 (1974).
- 30) Takeyasu, K. et al.: An Approach to the Integrated Intelligent Robot with Multiple Sensory Feedback, Proc. 7th Int. Symp. Industrial Robot, pp. 523-530 (1977).

(昭和55年8月13日受付)