

SCARA ロボットの開発*

牧野 洋** 村田 誠** 古屋 信幸**

Key words: assembly robot, flexible automation, robot development, insertion, selective compliance, position correction, virtual cam curve control, motion control, SCARA.

1. 緒 言

SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm) は、山梨大学工学部精密工学科の著者らの研究室で開発された組立用のロボットである。このロボットの開発は1978年4月に設置された「SCARA ロボット研究会」という名の研究コンソーシアムの援助のもとに行われ、3か年の間に一応の水準のロボットを完成することができたので、その後、この開発に参画した各社から工業化モデルが市販され、通称「スカラ型」と呼ばれる一つのファミリーを形成するに至っている。このロボットの持つ数々の特徴がユーザの要求に合致したため、スカラ型に対する需要は急速に伸び、初年度における生産台数は総量で400台を超えようとしている。

以下に、SCARA ロボットの開発の経過と、このロボットの特征につき述べる。

2. 開発に至る経過

従来の自動組立機械は専用機として開発され、大量生産品に適用されてその効果を発揮してきた。それに対して、多種少量生産品の場合には、これを経済的に有効に自動化しうる適切な手段がなく、いかにしたら多種少量生産の自動組立を実現しうるかは、精機学会自動組立専門委員会の十数年間にわたる討議の一つの中心議題であった。また世界の自動組立研究者の大きな課題ともなっている¹⁾。

その解決策の一つとして、自動組立機械の標準化、BBS化などが考えられるが、その程度の融通性 (Flexibility) では不十分であると著者らの一人は考えるようになり、1975年にNCを用いたアセンブリセンタ²⁾を提唱し、ハードなハードウェアとソフトなソフトウェアを持った機械だけが多種少量生産の自動化にとって有効である³⁾とし、当時開発を指向されていた知能ロボットのようなフラフラな機械は生産向きではないと述べたが、この考えは必ずしも理解されなかった (今でも理解されていない)。

そこで、著者らは実験機を作ることにし、レゴのミニカーを組立てる試作機⁴⁾⁵⁾ (図1)を作った。この機械はNCで駆動されるX-Yテーブルの上に2本の組付けツールをのせ、固定ジグの上で部品を組立てるものである。組立速度は1個当たり30sと、きわめて遅かったが、システムとしての有効性は立証された。

この時に実験を通じて得られた知見が二つある。

その第一は分解能についてである。ツールの位置決め誤差は、はめ合わせるべき2部品の位置合わせ誤差のうちのほんの一部にしか過ぎず、分解能0.01mmのNCによって、位置ずれ0.5mmを許容できるレゴを組立てようという試みは度々失敗した。分解能の細かいことは機械のスピードを遅くすることにしか役に立たないことが分かったのである。

その第二は剛性についてである。X-Yテーブルからオーバハングされた組付けツールは容易に傾き、X-Yテーブルの剛性が高いという迷信を吹き飛ばした。

これらの反省に基づいて、次に著者らは位置ずれの修正、いわゆる「はめあいの適応制御」の実験に移った。ひずみゲージを付けたリストセンサを作り、軸に面取りを付け、穴側部品をX-Yテーブルの上のせて、センサ出力をフィードバックしてX-Yテーブルを動かし、位置ずれを修正した。

この実験は成功し、1mm程度のずれを0.1s程度で修正することができたが、しかし、位置ずれの量が小さければ、このようなアクティブフィードバックを行わな

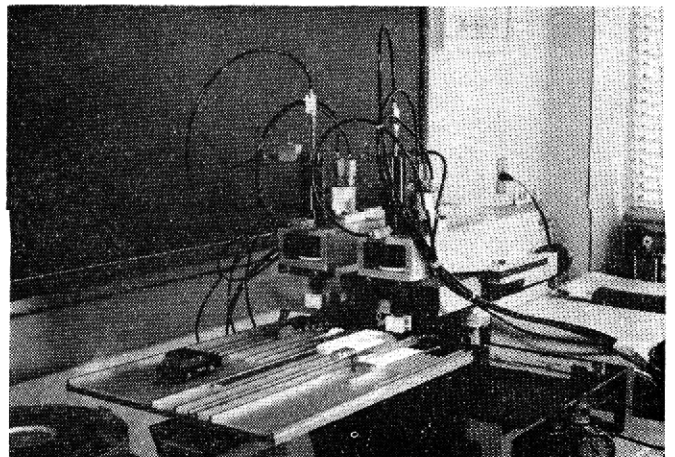


図1 試作アセンブリセンタによるレゴの組立

* 原稿受付 昭和56年12月18日。昭和56年度(第1回)精機学会技術賞受賞業績。

** 正会員 山梨大学工学部(甲府市武田4-3-11)

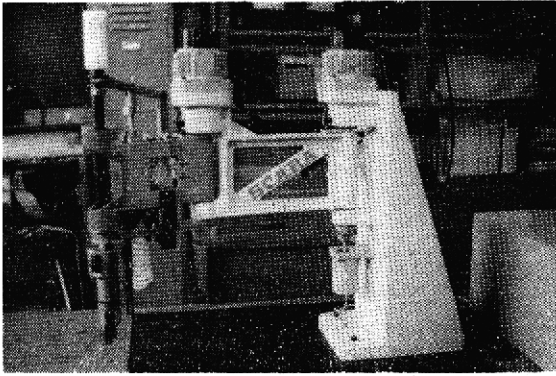


図2 SCARA 試作1号機

くても、ツールのコンプライアンスだけではめあいができること、かと言って、ツールを柔らかくすると軸の傾きが大きくなり、つまり(Jamming)を起こしてうまく入らないこと、がわかった。

横方向には軽く動くが、軸の倒れに対しては剛性が高い——そういう「選択的なコンプライアンス」を持った構造が考えられないものだろうか。こうして、ある時、屏風形構造のSCARAの基本構想ができたのである。

3. SCARA ロボット研究会

著者らの一人がSCARAの基本構想設計図を描いたのは1978年の1月である。当時出始めたマイクロコンピュータ(日本電気製のTK-80)でコントロールすることにし、試作費を概算してみると約500万円である。これは大学の乏しい予算ではやりくりがつかず、科研費は当てにならない。かといって気前よくスポンサーになってくれそうな会社もない。そこで、苦肉の策として思いついたのが「SCARA ロボット研究会」の設置である。そういう名の会を作り、1社から少しずつ大学に寄附して頂いて、数社集まれば何とかロボットができると考えた。この研究会は産学協同のお手本のように言われているが、実状はそんなに立派なものではなかったのである。

研究会は同年の4月に発足し、秋までに5社が参画した。そのうちの1社によって製作図面が作られ、製作されて、10月には試作1号機(図2)が完成した。1号機はダイナミックな特性にやや難点があったが、実用化の可能性を誇示するには十分であった。

1980年5月には新設計による試作2号機(図3)が完成した。これはねじ締め用として設計されたものであるが、1号機の問題点は改善され、配線の終わったその日から素晴らしいスピードで動き始めた。これを見て研究会のメンバーも増え始め、1981年3月に会を終了した時点では13社に達していた。

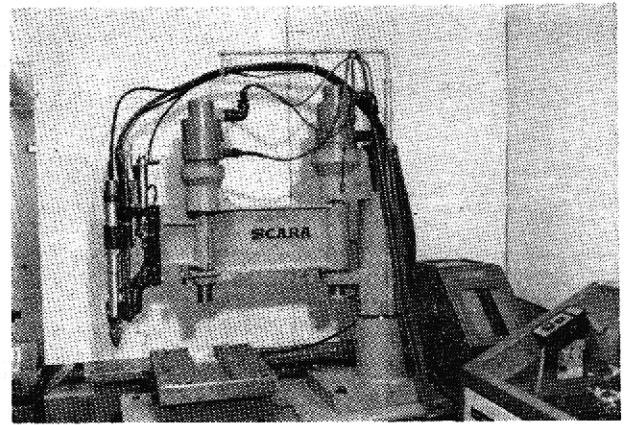


図3 SCARA 試作2号機

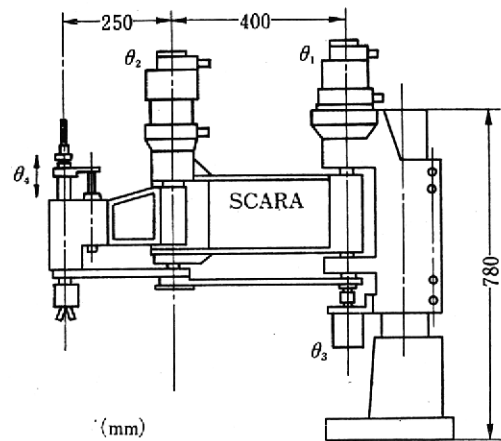


図4 SCARA 2号機の構造と寸法

4. SCARA ロボットの構造

SCARA ロボット(7)~(10)は、図4に示すように、基本的には平面多関節形の4自由度のロボットである。

図において、 θ_1 はDCサーボモータであり、ハーモニックドライブ減速機を通じて第1アームを回転させる。その先にDCサーボモータ θ_2 が取り付けられており、これによって第2アームを回転させる。第2アームの先に工具軸が取り付けられている。構造的な特徴としては、 θ_1 軸、 θ_2 軸、工具軸の3者が平行になっていることである。

θ_3 はパルスモータであり、タイミングベルトを通じて工具軸に回転を与える。この部分の構造は製図器のようになっており、 θ_3 にパルス入力を与えないときには、工具端の位置にかかわらず工具の姿勢(向き)は保持される。

θ_4 は工具軸の上下動であるが、これはエアシリンダによって駆動される。ストロークは約50mmである。

図5にはSCARAの作業域を示す。第2アームの長さを a 、第1アームの長さを b としたとき、 $a \times b$ の長方形の作業域をとり、これを標準作業域と称している。標準作業域の中ではコンプライアンスや分解能の値を保証す

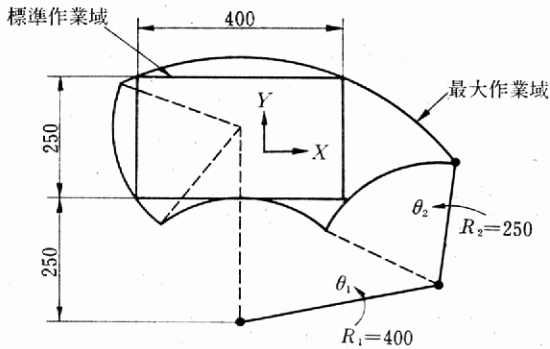
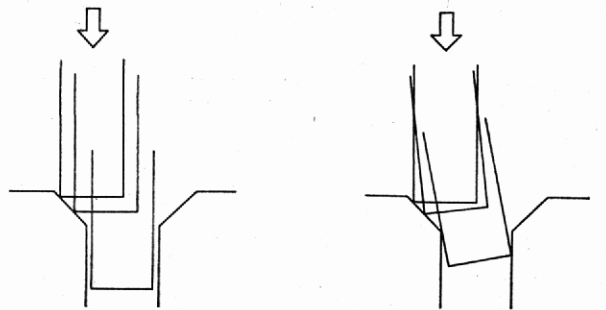


図5 SCARA 2号機の作業域



(a) 横ずれコンプライアンス (b) 軸倒れコンプライアンス

図6 選択的コンプライアンスの効果

ることができる。

このことは、逆に言えば、 $a \times b$ の大きさの作業域が必要なとき、アームの長さを $a \times b$ に設計すればよいということである。なお、 a と b との比は黄金分割¹¹⁾ 1:1.6とっている。

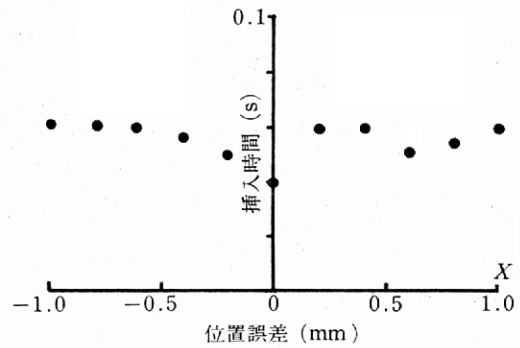
図では最大作業域は標準作業域をカバーする最小の扇形として描いてある。このとき第1アームおよび第2アームの振り角は 80° 以下である。振り角を大きくすることによって最大作業域をもっと大きくできることは言うまでもない。

5. SCARA ロボットの特徴

5.1 選択的コンプライアンス

SCARAの名称の由来である選択的コンプライアンス (Selective compliance)¹²⁾とは、方向によって選択的にコンプライアンス(スティフネスの逆数、変位/力)が異なることを意味している。通常、「肘を曲げた」状態において、 x 方向および y 方向のコンプライアンスは大きく、 z 方向(工具軸方向)のコンプライアンスは小さい。モーメントに対しても、 z まわりのコンプライアンスは大きく(このことは角軸装入の場合に役立つ)、 x まわり、 y まわりのコンプライアンスは小さい。

このことによる効果を図示したのが図6である。同図(a)のように、軸が穴の面取り部に当たったとする(面取りがあるとす)。このとき横ずれコンプライアンスが大きければ、軸を押し込めば自然に位置誤差は修正され



穴径: 20 mm, 面取り: 1 mm \times 45°, クリアランス: 0.01 mm, 挿入深さ: 20 mm

図7 位置誤差と挿入深さの関係

て軸は穴に入る。しかしこのとき、もし軸倒れコンプライアンスが大きいと、同図(b)のように、穴の浅い位置での2点接触が起こってつまり(Jamming)を生ずるのであろう。SCARAは横ずれコンプライアンスが大きく、軸倒れコンプライアンスが小さいので、つまりのない修正はめあいが可能となるのである。

図7は装入実験の結果の一例を図示したものである。軸径 $\phi 20$ mm, すきま0.01 mmの条件で、面取寸法以下の位置ずれを故意に与えて修正はめあい時間を測定した。修正はめあいは必ず成功し、これに要する時間は0.06 s以下であった。

研究室での実験、およびその後の商用機による製造現場での経験を通じて明らかになったことは、選択的コンプライアンス構造によって面取寸法以内の位置ずれを確実に修正できるということである。このことによって、組立作業の成功率を格段に高めることができた。

世界的な傾向として、はめあいの適応制御は、能動フィードバック方式から、こうした受動コンプライアンス方式へと変わりつつある¹³⁾¹⁴⁾。位置ずれの量があまり大きくないならば、後者の方が有利である。

コンプライアンスを用いたものとしてはドレイバ研究所で開発されたRCC (Remote Center Compliance)¹⁵⁾が有名である。RCCとSCARA方式を比較すると次のような違いがある。

- i) RCCは軸の傾きの修正ができるが、SCARAはできない(しかし、実際の作業では初期角度ずれはそんなに大きくはないと考えられる)。
- ii) RCCはリストコンプライアンスであり、その設計はワークの寸法や重量に左右される。これに対してSCARAはアーム構造自体がコンプライアンスの性質を持つのであって、ワークや工具に左右されない。
- iii) SCARAでは、工具軸を交換してもコンプライアンスの性質が保持される。このことは工具交換を

行ったときに有利である。

iv) SCARA は工具軸の倒れがないので、圧入などの作業(しめしろのある作業)を行うことができる。

なお、水平方向コンプライアンスの値は、電動機のトルク特性、減速機の損失、サーボアンプの特性、2本のアームのなす角度などによって左右される。当初は位置決め終了後に電動機の電流を減少させるなどの方法によってコンプライアンスを調節することを考えていたが、実用上はその必要はなさそうである。

5.2 アームの運動制御

研究室モデルの SCARA においては、仮想カム曲線によるアームの運動制御¹⁶⁾を行っている。

SCARA の設計に当たっては、第一目標を人間並みの早さに置くことにした。これは最大速度で1 m/s、最大加速度で1 G (=9.8 m/s²)である。この範囲内で人間並みのなめらかな運動特性を与えれば、人間並みのスピードで仕事ができるはずである(現在、開発は第2段階に入っており、SCARA のスピードは人間を追い抜きつつある)。

長い腕の先に重い物をつけ、一定の距離をなるべく短い時間内に送り、しかも、オーバシュートも残留振動もないようにするにはどうしたらよいか——これはカム曲線の問題である。運動の始端から終端までを、あたかもカムで動かすように、完全に制御すればよい。それには、サーボモータの回転速度を、あらかじめ定められた加減速特性(カム曲線)に従って変化させればよい。

図8に SCARA 2号機のシステム構成を示す。マイクロコンピュータはプロセッサに Z 80 (2.1 MHz) を用いたものであり、これにいくつかの周辺機器が付属している。

θ_1, θ_2 の回転を与える DC モータは安川電機製のプリントモータであり、このモータのドライバとして「サーボバック」と「ポジションバック」が同社から供給されている。サーボバックは速度制御ユニット、ポジションバックは D-A 変換器である。モータにはタコジェネレータとパルスエンコーダが付属している。

これらのドライバと DC モータを連結したものをマイコン側から見ると、あたかもパルスモータのようになっている。すなわち、モータの回転角変位は入力として与えたパルス列のパルス数に比例し、回転角速度はパルス列の周波数に比例する。

これを利用して、図9のようなカム曲線に従ってアームを振ることを考える。その実際の方法は図10に示した「S テーブル法」によっている。すなわち、変位曲線(S 曲線)をデジタル化し、“0”, “1” の信号に直す。図の場合には 000100110111... というビット列ができるであろう。これを8ビットずつに区切ってメモリーに格

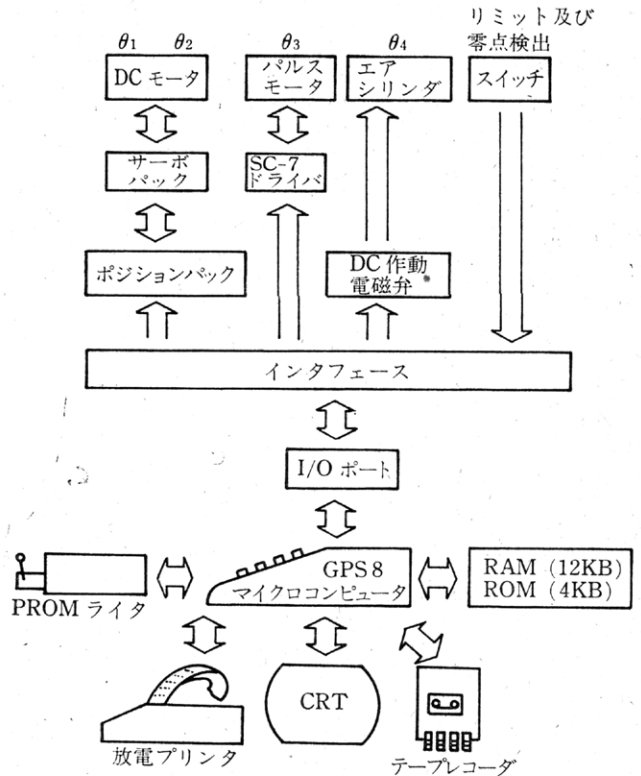


図8 SCARA の制御システム

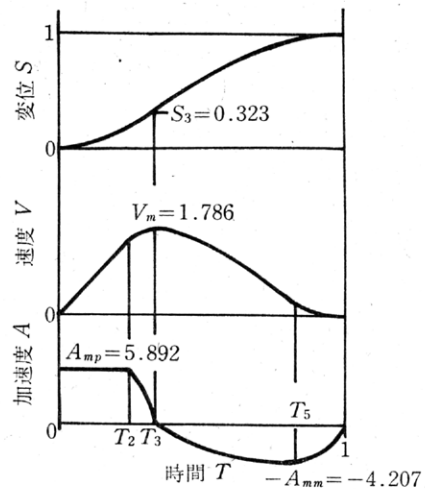


図9 NC 2 曲線

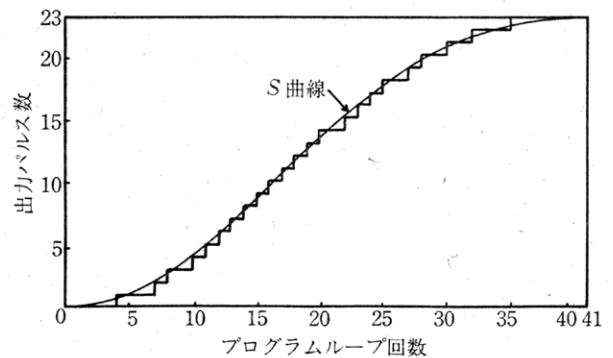


図10 S テーブル法

納しておき、これを順次に取り出して、シフトしながら

読めばビット列を再現できる。ある演算時間ごとにこのビットを読んで、これが“1”ならばポジションパックにパルスを送り、“0”ならば送らないようにすれば、全体としてS曲線の変化に従った速度を与えることができる。

Sテーブルをたった1組ですますことができるようにするため、ある限界ストローク（例えば900パルス）を定め、これよりストロークの大きい場合には加速と減速の間に等速区間を入れ、小さい場合には速度曲線の山が比例的に低くなるようにして制御している。更に、 θ_1 の回転角と、 θ_2 の回転角との間で、ソフトウェアによるDDA (Digital Differential Analyzer) を用いて、直線補間を行っている。

こうしたことの結果、アームの運動はきわめてなめらかになっており、オーバーシュートや残留振動はほとんど見られない。機械剛性の高いことと相まって、きわめて良好な運動特性が得られている。

運動曲線（仮想カム曲線）として現在用いられているのは図9に示したNC2曲線である。これは減速時間を加速時間の2倍にとった曲線であり、NC用として著者らが開発したものである。この曲線の値の計算は著者らが先に開発したユニバーサルカム曲線¹⁷⁾のプログラムによっている。

5.3 その他の特徴

SCARA はz軸方向の剛性が高いため、大きな推力を与えることができる。z軸駆動用としてボア径 $\phi 25$ ないし30mmのエアシリンダを用いるとすると、30kgf程度の推力は十分に得ることができ、したがって、軽い圧入やかしめ、ねじ締めなどの仕事を行うことができる。また、保持可能な重量も30kgfと、他の組立用ロボットに比べれば格段に大きい。

SCARA は多関節形なので、直角座標形や円筒座標形のロボットに比べて作業域が広い。また、据付部をコンパクトにできるので、ライン化する場合に有利である。

マイクロコンピュータでコントロールされているので、作業プログラムのソフトウェアを瞬時に切り換えることができる。ティーチングプレイバック方式の採用によって段取替えは容易である。必要ならばセンサからの情報に基づいてロボットを制御したり、何台かのロボットを集中管理したりすることもできる。

しかし、何と言っても、最大の特徴は価格の安いことであろう。構造がシンプルであるために作りやすく、性能を出しやすい。同一の仕事を行わせた場合、他のロボットよりもSCARAの方がたいてい早く、しかも安い。仮にスピードが2倍で価格が半分とすれば、価格性能比は4倍違うことになる。

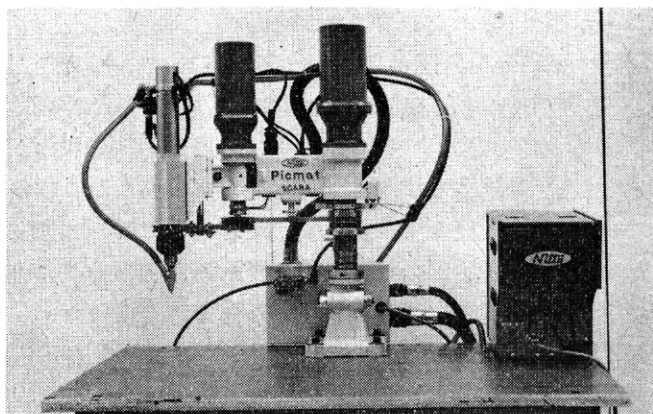


図11 ねじ締めヘッドをつけた Picmat-SCARA (日東精工)

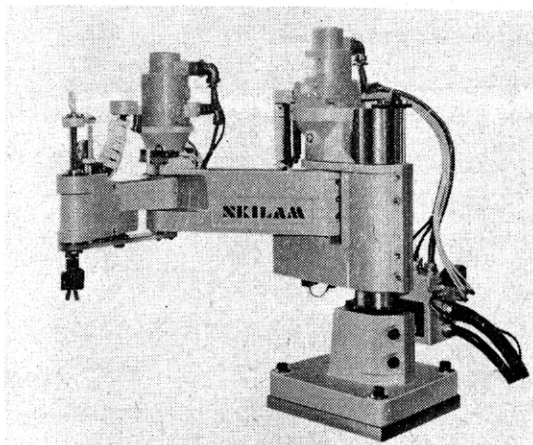


図12 SKILAM (三協精機)

6. 商用化モデルと応用例

SCARA の開発は前述のように共同研究組織で行われたため、研究会終了後、各社から製品化された。これには各社ごとに商品名がそれぞれつけられているが、以下にそのうちの主なものを紹介する。

6.1 日東精工の Picmat-SCARA (図11)

同社は小ねじのメーカーであると同時にねじ締め機のメーカーでもあり、古くから各種の自動組立機械を製作してきた。

ねじ締め作業はSCARAの特性にきわめて適した作業であり、有効にロボット化することができる。同社ではR1(第1アームの長さ)×R2(第2アームの長さ)が、それぞれ630×400mm、400×250mm、250×160mmの3種類を市販しており、主として電機産業においてねじ締め作業を中心に導入され始めている。1981年3月の発売開始から12月までの間に、少なくとも100台以上のロボットを出荷したと思われる。

6.2 三協精機の SKILAM (図12)

三協精機のSKILAMは、カム曲線コントロールを含めて、研究室モデルをもっとも忠実に再現したものであって、その運動特性は抜群に良い。1981年10月に晴海

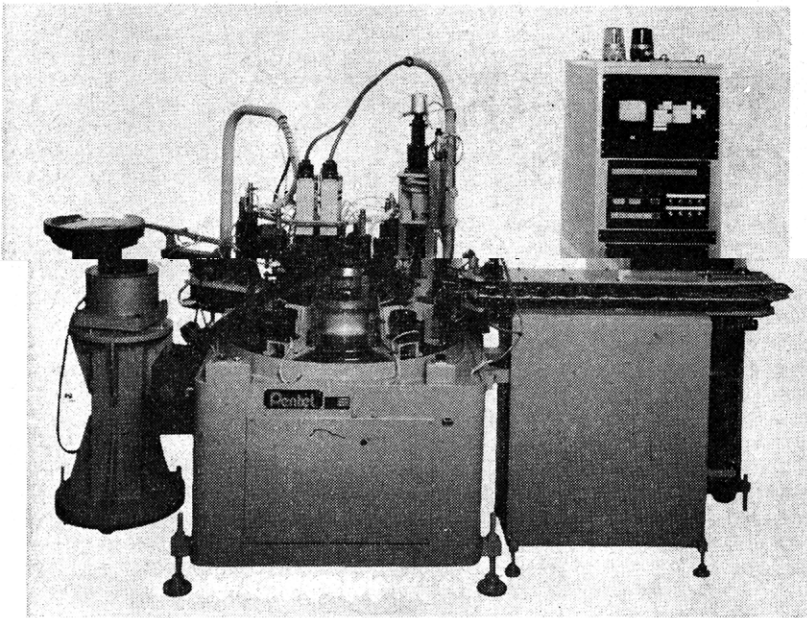


図 13 PUAH ロボットによる戻り止めゴムの挿入(べんてる)

で開催されたロボット展では、そのスピードが多くの参加者の注目を集めた。

同社のロボットは、つまみ装入 (Pick-and-place) の作業を中心に各業種で広く採用され始めている。4月の発売開始から12月までの間に約200台が販売されたと思われる。

6.3 べんてるのPUAH

べんてるは始め社内設備用にロボットを開発したが、これが成功したので外部にも市販することになった。

この設備(図13)はシャープペンシルの先端部に戻り止めのゴムを装入する機械であり、ロボットは、シート状に多数個成形された戻り止めゴムを1個ずつ引きちぎって供給する目的に用いられている。この機械は1980年の11月に稼動に入り、以後1年間以上の間、サイクルタイム2sで24時間昼夜運転という驚異的な実績を持っている。

6.4 日本電気のタイプBロボット

日本電気はA, B, Cと3種類のロボットを開発したが、そのうちタイプBがスカラ型である。同社はこのロボットを用いて音声認識のデモンストレーションを行い好評を博した。

6.5 ヤマハ発動機のCAME

ヤマハ発動機ではCAMEと呼ばれるロボットを自社開発し、オートバイ部品の組立工程に使用している¹⁸⁾。主な用途はボルト・ナットの締付けであるが、同社ではその他にもいろいろな応用を開発している。同社の取組みはもっとも早く、すでに2年以上の実績を持ち、この間80台以上のCAMEロボットを社内に導入している。

6.6 平田機工のARM-BASE

平田機工はSCARA研究会のメンバーではないが、ラ

イセンスを得てスカラ型の開発を行った。制御装置をビルドブロック化しており、要求に応じてさまざまな機能を満足できるようになっている。

7. 結 言

SCARAはまだ誕生したばかりであるが、すでに産業界で活躍を始めている。2,3年後にはこれを多数台並べた大規模なラインが出現するものと期待される。

このロボットの開発にご協力をいただいたSCARA研究会のメンバーの方々、そして、寝食を忘れてソフトウェアの開発や実験に従事していただいた牧野研究室の卒業生および在学生の諸君に深く御礼申し上げます。

文 献

- 1) 牧野 洋: はん用自動組立機械に関する研究開発の動向, 日本機械学会誌, **81**, 721 (1978) 1237.
- 2) 牧野 洋: NCアセンブリセンタ, 精密機械, **41**, 3 (1975) 250.
- 3) 牧野 洋: 自動組立とエレメント開発, 精密機械, **40**, 10 (1974) 803.
- 4) 牧野 洋, 植松 司: NCアセンブリセンタの試作研究, 精機学会自動組立専門委員会第26回研究発表会資料(1973.7.12) 9.
- 5) H. Makino: An Experimental Approach to NC Assembly Center, Proc. ICPE, Tokyo, (1974) 486.
- 6) テクノサイエンス研究会: 技術開発連合の時代, 中央公論経営問題秋季特大号, **20**, 5 (1981) 110.
- 7) 牧野 洋ほか: SCARAロボットの開発研究, 精機学会自動組立専門委員会第47回研究発表会資料(1980.5.30) 13.
- 8) H. Makino and N. Furuya: Selective Compliance Assembly Robot Arm, Proc. 1st ICAA, Brighton, (1980) 77.
- 9) H. Makino et al.: Research and Development of the SCARA Robot, Proc. 4th ICPE, Tokyo, (1980) 885.
- 10) 牧野 洋: SCARAロボットの開発, 昭和56年度精機学会春季大会シンポジウム資料(1981) 13.
- 11) 牧野 洋: 自動化こぼれ話(12), 黄金分割, メカトロニクス(1981.2) 4.
- 12) 古屋信幸, 牧野 洋: 選択的コンプライアンス構造をもつ組立用ロボットの開発研究(第1報), 精密機械, **46**, 12 (1980) 1525.
- 13) S. H. Drake et al.: High Speed Robot Assembly of Precision Parts Using Compliance Instead of Sensory Feedback, Proc. 7th ISIR, Tokyo, (1977) 87.
- 14) 牧野 洋: 第1回組立自動化国際会議に参加して, 精密機械, **46**, 8 (1980) 929.
- 15) D. E. Whitney and J. L. Nevins: What Is the RCC and What Can It Do, Proc. 9th ISIR, Washington, (1979) 135.
- 16) H. Makino and N. Furuya: Motion Control of a Jointed Arm Robot Utilizing a Microcomputer, Proc. 11th ISIR, Tokyo, (1981) 405.
- 17) 牧野 洋: ユニバーサルカム曲線とその応用, 山梨大学工学部研究報告, **28** (1977) 48.
- 18) ロボットによる二輪車エンジン組立ライン, 省力と自動化, **12**, 6 (1981) 77.