SCARA ロボットの設計思想

牧 野 洋*
Hiroshi MAKINO

Key Words: Design Engineering, Design Philosophy, Mechanism, Robot, SCARA, Automatic Assembly

1. 緒 言

スカラロボットは筆者が開発したロボットであるが、それまでの他のロボットがおおむね ① 器用である, ② 遅い, ③ 柔らかいというイメージを持つのに対して, スカラロボットは, ① がっちりしている, ② 早い, ③ 正確であるというイメージを持つ。

どうしてそのようなロボットができたのかと言えば, それはその根本にある設計思想が従来のものとは異なっていたからである。ここではその思想について説明し, それを実現するための設計の筋道について述べることにする。この筋道は筆者にとっては一本道の思考過程と, それを裏付けるための実験の繰返しであり, 決して単なる思い付きでこのような形にしたというものではなかったのである。

2. スカラ以前の思考過程

多種少量生産における自動組立をいかなる機械装置によって効果的に行うかということは長年にわたっての大きな課題であった。

当初, はん用化の方向と高速化の方向とはまったく相反するように思われた⁽¹⁾。はん用性をねらえばねらうほど高速性が失われ, したがって生産工程に導入することができないというジレンマに陥っていた。

しかし, そのはん用性 (versatility) という言葉で要求されているものの内容を分析してみると, 器用さ (dexterity) と融通性 (flexibility) の二つに分けられることがわかった。前者は動作の

自由度が多くいろいろな作業に対応できること, 後者はモデルチェンジに対応して速やかに作業プログラムを変更できることをいう。そうして, 仕事の性質によっては, たとえ多種少量生産と言えども, 器用さは必要でなく融通性のみが要求される場合があり, そのとき高生産性 (productivity) は失われてはならない。この両者の性質を合わせ持った「PF マシン⁽²⁾」を作れば, これは多種少量生産の実現のために要求されていた空白をかなりの程度に埋めることができるであろうと思われた。

他の分野に学ぶならば, それはロボットではなくて NC (数値制御) である。マシニングセンタにならって NC アセンブリセンタ⁽³⁾を作るならば, それは必ずや多種少量生産の自動組立にとって有効なものとなりうるに違いない。こうして, NC アセンブリセンタの試作機による実験が始まった。

3. はめあい問題

組立作業の本質ははめあいにある。大なり小なりのクリアランスを持つ二つの部品の相対位置決めを行うことがすなわち組立なのであり, したがって, 軸穴挿入問題 (peg-and-hole problem) は組立の実験として重要な意義を持つ。

すでに日立製作所は力フィードバック方式によるはめあいロボット⁽⁴⁾を完成させており, Draper 研究所の Whitney 教授らはコンプライアンスの有用性に気づき, RCC⁽⁵⁾ と呼ばれる装置を完成させようとしていた。

しかし筆者は別の解決法を考えていた。それが「選択的柔軟性 (selective compliance)」と後に名付けた方法である。

* 正員, 山梨大学工学部 (〒400 甲府市武田 4-3-11)。

4. 選択的柔軟性

図1に選択的コンプライアンスの効果を示す。軸と穴の位置がずれ、軸が穴の面取部に当たったとする。このとき、軸部品を保持しているロボットのコンプライアンスには二通りのものがあり、それぞれの効果は異なっている。まず横ずれコンプライアンスであるが、この存在によって位置ずれは修正され、はめあいが可能になる。これに対し軸倒れコンプライアンスが存在すると軸は傾き、クリアランスの小さい場合には穴の浅い位置で二点接触が起こり、その結果、こじれによってそれ以上の挿入ができなくなる。したがって、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ような機構が望ましく、これを選択的柔軟性と名付ける。

このような性質は**びょうぶ**（弾力性）な構造をとることによって実現できる。扉は上下方向に対する剛性が高く、横方向には変形しやすい（コンプライアンスが大きい）のである。二次元の位置決めを行うために扉の板の数を2枚とし、2枚の板がほぼ直

図1 選択的コンプライアンスの効果

図2 SCARA ロボットの構造と2号機の寸法

角に近いような状態で使用すれば水平二方向へのコンプライアンスを保証できる。

こうして SCARA, すなわち, Selective Compliance Assembly Robot Arm (選択的柔軟性を持った組立用のロボットの手) が誕生することになった。

このロボットの開発は「SCARA 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たが、その開発の経過などは他の文献(6)にゆずり、ここではこのロボットの設計の過程について述べることにしたい。

5. SCARA の自由度構成

図2に SCARA ロボットの構造を示す。 θ_1 で示した「肩の」モータによりアーム1を揺動させ、その先に取り付けられた「肘の」モータ θ_2 によりアーム2を揺動させる。この2軸により工具点の平面的な位置決めを行う。別のモータ θ_3 は1:1のタイミングベルト2本を通じて工具軸を回転させるようになっており、角軸挿入の場合などにおける部品の姿勢決めを行う。この部分の機構はちょうど製図器のようになっており、 θ_3 に入力を与えられないときには姿勢保持の役割を果たす。

別に工具軸の上下 θ_4 があり、この駆動にはエアシリンダを用いている。ボア径 $\phi 25$ のシリンダを用いるとき、 6 kgf/cm^2 程度の通常のエア圧で 25 kgf 程度の推力を得ることができる。

以上述べたごとく、SCARA は4自由度のロボットであるが、これは平面位置決め形ロボット(2 1/2 空間作動形ロボット)として十分な自由度を持っている。

すなわち、ロボットは通常6自由度を必要とすると言われるが、これは空間的なハンドリングを想定するからなのであって、その場合には位置決め3、姿勢決めの自由度3の合計6を必要とするのである。しかし、平面的なハンドリングでは位置決め2、姿勢決めの自由度1の合計3で十分なのであり、SCARA の場合は、これに、装入動作のための自由度1(位置決め平面に直交する方向)を加えているのである。積み重ね構造を持った組立品の場合にはこのようなロボットで十分に組立を行うことができ、実際のラインで検討した結果でも70~80%はこの動作で十分であるとの結論を得ている。

スカラ形は通常「水平多関節形」と呼ばれているが、これは「平面多関節形」と呼ぶほうが正確であると思われる。その意味は平面的な位置決めを2自由度の多関節形座標系によって行うということである。

表1には平面位置決めロボットの3形式を示した。表において l は直動, θ は回転関節を示し、添字はロボットのベースに近い側から順番に打っている。「装入」というのは精機学会自動組立専門委員会で制定した用語⁽⁷⁾であって、挿入、はめ合わせ、のせなどの作業を総称している言葉である。

SCARA ロボットは単なるハンドリング (= 位置決め+姿勢決め) だけを行うのではなく、「装入」という仕事を行うように設計されたものである。そのため、機械全体の構造は十分に装入力に耐えうるようになっているのであり、これがこのロボットに力強さ、たくましさという印象を与えるもととなっていると思われる。

多くの人はこの装入軸を位置決め軸の一つであるかのように誤解しており、したがってサーボコントロールが必要だと考えている。そうではないのであって、装入軸の場合には位置制御よりもむしろ装入力制御の方が重要なのである。だからエアシリンダを用いているのである。

6. 作業域とアーム長さの決定

2 関節形ロボットのアーム長さを R_1 mm および R_2 mm とするとき、作業域として $R_1 \times R_2$ mm² の長方形の面積を十分カバーすることがで

表 1 平面位置決めロボットの分類

形 式	自由度	位置決め	姿勢決め	装 入
平面直角座標形	4	l_1 l_2	θ_3	l_4
平面極座標形	4	θ_1 l_2	θ_3	l_4
平面多関節形	4	θ_1 θ_2	θ_3	l_4

図 3 SCARA ロボットの作業域

き、これを標準作業域と呼ぶことにする(図3)。これから逆にロボットのアーム長さを決定することができる。すなわち、 $R_1 \times R_2$ の作業域が必要なとき、アーム長を R_1, R_2 とすればよい。SCARA 試作2号機の場合、M3~M5のねじ締めを主な目的として設計されたが、このようなねじを使用する製品はテレビ、カセットレコーダ、カーラジオなど電気製品に多く、ワークの大きさは 300×300 mm² 以内にほぼ入る。したがって $R_1=300, R_2=300$ とすればよいが、ここで、機械の構造上 $R_1 > R_2$ にしたかったので、 $R_1:R_2=1.6:1$ の比を取り、 $R_1=400, R_2=250$ とした。1:1.6の比は黄金分割⁽⁸⁾ $1:1.612\dots$ にきわめて近く、標準数 $R5$ はこの比となっている。

作ってみての結果から判断すると、この比を採用するときアームのバランスはきわめて良く、ふところも広いので機械の据付けが容易であるという利点がある。

7. アームの運動制御

コンベヤ上をパレットが流れ、そのパレットの大きさが標準作業域に等しいと仮定する。コンベヤの外側(両側のいずれか片方または両方)に部品供給装置があり、その端点(装入待機位置)は標準作業域の外側ではあるが最大作業域の内部に入っていると看做する。ロボットはここから部品をつまみ上げてパレット上のワークに装入する。図4はそのような作業配置の実例を示している⁽⁹⁾。

さて、上述のようなつまみ装入 (pick-and-

図 4 SCARA ロボットによるプリント基板組立ラインの構成

place) 作業を例にとると、ロボットの片道のストロークは 200~300 mm は必要である。一方供給部品の重さは一般には 0.5 kgf 以下であろうが、中には重いものもある。ロボットの腕の先に付く作業工具は軽いものでも 3 kgf、中には 10 kgf に達するものもある。アームはアルミ鋳物を用いるなどしてなるべく軽く作るが、それでも先端の集中質量に換算して 2~3 kgf になることは避けられない。

以上をまとめて言うと、重いものを長いアームの先に付けて、長い距離を振りまわし、しかもこの動作を片道 0.5 s というような短い時間の間にやりたいということである。そうやって動かして、残留振動やオーバーシュートが出ないようにするにはどうしたら良いか。

これはカム曲線の問題である。運動の始点から終点までの間にアームにどのような(角)速度・(角)加速度を与えるべきかという問題なのである。筆者はもともとカム機構を研究しており、いくつかのカム曲線⁽¹⁰⁾を設計した経験を持っているので、この目的に沿う曲線の望ましい形についてはほぼ想像がつく。こうして設計したのが NC1, NC2 の両曲線である(図5参照)。両曲線は T_3 の値が異なるだけで、形としては同じである。実験の結果 NC2 曲線の方が良かったので、以後 NC2 を標準として採用することにした。

NC2 曲線はトラペクトイド⁽¹¹⁾系の曲線であって、加速域に対して減速域を長く(NC2 の場合は2倍に)とりながら、最大速度 V_m や正の最大加速度 A_{mp} の値があまり大きくならないように工夫されている。始点を除いて加速度は連続であ

り、その変化率(躍動)の値も小さい。通常の NC に用いられている台形速度、三角速度曲線は加速度が不連続であり、高速において振動を生ずる原因となる。カム屋が30年も前に放棄した曲線を制御屋はなぜいまだに使っているのか。

なお、NC2 曲線における立上がり部分の加速度の不連続は「蹴り出し」効果をねらったものであり、これがサーボ機構に対する入力であって、出力が必ずしもこれに追随しないことを考慮している。

さて、このようなカム曲線による運動を与えるのに、ストロークやタイミングが一定であればカムを用いれば良いのであるが、フレキシビリティを要するロボットにおいてはカムそのものは使用できない。そこで、DC サーボモータを用い、そのモータの回転数を図の速度曲線に従って変化させることにした。

マイクロコンピュータが出現したおかげでこのようなことが比較的容易にできるようになった。カム曲線をデータとしてマイコンに記憶しておき、それにもとづいて加減速制御されたパルスを作って、ディジタルサーボ機構に送り込んでやればよいのである。マイコンとしては試作1号機(53年10月完成)では8080、2号機(55年5月完成)ではZ80を用いたCPUを使用した。

制御システムの概略を図6に示す。アーム回転を与える θ_1, θ_2 のモータにはプリントモータを用

図5 NC1, NC2 曲線

図6 SCARA ロボットの制御システム

い、サーボ系としてメーカから供給されている「サーボパック」(速度制御ユニット)および「ポジションパック」(D-A 変換ユニット)をそのまま利用した。ポジションパックにパルス列を入力すると、モータの回転角はパルス数に、回転角速度はパルス列の周波数に比例するように制御できる。これを利用して、図7に示すSテーブル法でパルス列を作って制御する。図7は41ループ回数の間に23パルスを出力する場合を示しており、NC2 曲線のS 曲線(変位曲線)をディジタル化し、これを0,1のビット列に直してメモリに記憶している。これをSテーブルと言っている。

実際にはこのSテーブルは出力900パルスに対して作っており(これをクリティカルパルスと言っている)、ストロークがこれより大きいときには間に等速部を入れ、小さいときにはDDA(Digital Differential Analyzer)によって比例的に下げて制御する(図8)。 θ_1 と θ_2 の間でもPTP制御でありながらDDAによる補間を行っているので、なめらかな動きを得ている。

実際のアームの動きを測定した一例を図9に示す。加速度波形にはやや振動が見られるが、速度波形(タコゼネ出力による)はNC2によく追従しており、変位波形(非接触変位計による)にはオーバーシュートや残留振動が観察されない。

8. ロボットのスピードの設計

一般に自動機械などで速度仕様を定める基準と

図7 Sテーブル法

図8 レンジストロークとスモールストローク

して表2の三つの基準を設定している。SCARA ロボットの場合、当初は人間並みのスピードで設計した。人間並みのスピードで人間並みのなめらかなカム曲線を用いれば、人間並みのふんわりとした動きを実現でき、柔らかいアームで重い物を動かしても残留振動は起こらないはずなのである。この考えは実証されたが、コンプライアンスの値が当初予想したよりも小さかったためさらにスピードを上げることができ、現在では表の機械並みの数値に近づくつつある。

いくつかの曲線について、与えられた速度限界および加速度限界のもとで、ある距離を送るのにどれだけの時間を要するかを示したものが図10である。その基礎式を下記に示す。

速度基準

$$t_h = \frac{h \cdot V_m}{v_m} \dots\dots\dots (1)$$

加速度基準

$$t_h = \sqrt{\frac{h \cdot A_m}{a_m}} \dots\dots\dots (2)$$

ただし、

t_h : 搬送時間 s, h : 搬送距離 mm, v_m : 最大速度 mm/s, V_m : カム曲線の無次元最大速度, a_m : 最大加速度 mm/s², A_m : カム曲線の無次元最大加速度

図を見ると、1g, 1m/s の人間並みのスピードのもとで、NC2 曲線(場合によって等速部付き、図8参照)を用いた場合、200mmを0.35s, 300

表2 速度限界基準

	(1g=9.8m/s ²)	
	最大加速度 a_m g	最大速度 v_m m/s
人間並み	1	1
機械並み	3	2
高速機械並み	8	3

図9 運動特性の一例(θ_2 軸単独動作, 320パルス)

mm を 0.45 s で送ることができることが分かる。これは最短時間解を与える台形速度曲線 (図示 TV) よりもごくわずかに長いだけである。

このことから、たいていの組立作業は、人間並みのなめらかな動きを用いても、往復で 0.7~0.9 s, これに工具の上下とチャックの開閉を加えてもサイクルタイム 2~3 s で達成できることが分かるであろう。事実この数値は現時点におけるスカラ形ロボットの平均的な数値となっている。

BB : Bang-Bang, 三角速度波形, 一定加減速
CV : Constant Velocity, 一定速度
TV : Trapezoidal Velocity, 台形速度
NC1 : NC1 曲線
NC2 : NC2 曲線
NC2 w. CV : 等速部付き NC2 曲線

図 10 各種の曲線における送り距離と送り時間の関係

図 11 SCARA ロボット (2号機にねじ締め工具を付けたところ)

9. 分解能の問題

NC 工作機械の場合にはツールの精度とその運動の精度がワークの精度を左右し、したがって分解能が 0.01 mm からミクロンオーダーへと進んできたのであるが、組立機械の場合にはワークが先に出来ており、これにツールを合わせるのであるから、そんなに高い位置決め精度は必要でなく、せいぜい 0.2 mm もあれば十分なのである。その代わり、コンプライアンスの効果がなければならぬ。

分解能を 0.01 mm として、最高速度を 1 m/s とすると最大周波数 100 kHz のパルスを出さなければならない。これを 0.1 mm にすれば 10 kHz でよく、一つのパルスを出してから次のパルスを出すまでに 100 μ s の「考える時間」が与えられて、ソフトウェアによるカム曲線制御などが可能になるのである。

10. 結 言

こうして出来た SCARA ロボットの外観を図 11 に示す。このロボットはその後数社から製品化され、組立用ロボットの主流となりつつある。推定の数字であるが 56 年までに約 500 台、57 年には約 2000 台が作られ稼動していると思われる。

(原稿受付 昭和 57 年 11 月 15 日)

文 献

- (1) 牧野, 機習教 (第 538 回), (昭 57-6), 29.
- (2) 牧野, 機誌, 81-721 (昭 53), 1237.
- (3) 牧野, 精密機械, 41-3 (昭 50), 250.
- (4) Goto, T., ほか 2 名, *Proc. 4th ISIR*, Tokyo, (1974) 209.
- (5) Whitney, D.E. and Nevins, J.L., *Proc. 9th ISIR*, Washington, (1979), 135.
- (6) 牧野・ほか 2 名, 精密機械, 48-3 (昭 57), 378.
- (7) 精機学会自動組立専門委員会, 精密機械, 39-4 (昭 48), 413.
- (8) 柳, 黄金分割, (昭 40), 美術出版社.
- (9) 仲野, 精機学会自動組立専門委員会研究例会講演前刷集 82-5 (昭 57), 1.
- (10) 牧野, 自動機械機構学, (昭 51), 日刊工業新聞社.
- (11) 牧野, 山梨大学工学部研究報告, 20 (昭 44), 41.