

# 産業用ロボット技術発展の系統化調査

A History of Japanese Industrial Robotics

1

楠田 喜宏 Yoshihiro Kusuda

## ■ 要旨

今回の「ロボット」の発展過程の系統化調査では「産業用ロボット」（工場の中で使用されている製造業用ロボット）に限定して調査、分析を行っている。産業用ロボットは米国で誕生したが、本格的な発達には日本で達成された。本報告は

- 日本が世界一のロボット大国として発展してきた要因を分析している。
- その発展の足跡を明らかにする中で歴史的意義のある資料の保存に資するため所在を特定している。

また、この発展の系統化分析を通じて

- 今後の日本のロボット産業・技術の方向のための提言を行っている。

まず、日本の産業用ロボットの発展を可能にした根底には、日本独自の文化、社会、経済環境の存在があったことを述べている。

産業・技術の系統化に当たっては、単純なハードウェア論理のエレクトロニクス、原始的な機械構造に規制され殆ど応用分野を見出せなかった初期の産業用ロボットが、マイクロプロセッサの導入、電気サーボ技術の発展により高度の機能を獲得し、幅広い動作自由度を実現していった結果、広範な応用範囲を見出して現在に至った過程を分析している。ここで確立されたロボット工学という新技術分野によって人間と機械が共生する新しい社会を実現する基盤が作り上げられていることを述べている。

その過程に於いて決定的な影響をあたえたものにマイクロエレクトロニクス革命があるとし、今後の発展のためにはその本質を再認識すべきことを強調している。

## ■ Abstract

This paper reports how Japanese industrial robots (specifically robots used in manufacturing environment) were born and grown up.

Indeed the concept of industrial robots was created in U.S., but the evolution into industrial products in the real world was accomplished in Japan. The author attributes Japanese success to smooth acceptance of the concept of robots by Japanese society which stems from cultural, mental and social heritage of the nation.

It keeps track of the history of Japanese industrial robots, describing how a primitive “programmable article transfer” device has transformed into a highly sophisticated automaton by introducing new technologies like microelectronics, servo-drives, motion controls, modern control theory, sensor technology, human-machine interface, information technology and others.

It emphasizes that the advent of microelectronics is above all the key issue of the process.

It provides a list of milestone products in the history identifying where and how the legacy achievements are preserved now.

Finally it offers a suggestion for the future direction of Japanese robotics.



## ■ Profile

**楠田 喜宏** Yoshihiro Kusuda

国立科学博物館産業技術史資料情報センター主任調査員

昭和31年3月 東京大学工学部電気工学科卒業  
昭和31年3月 (株)安川電機製作所(現(株)安川電機)入社。  
以後、産業オートメーション、メカトロニクス、ロボット工学分野の研究、開発、販売に従事。同社、メカトロ技術部長、取締役ロボット事業本部長、同技術本部長、(株)安川商事代表取締役社長を歴任  
平成4年5月 1992年度JIRA賞(International Symposium on Industrial Robot 最優秀論文賞)受賞  
平成9年3月 同社顧問退任  
平成9年3月 国際コンサルタント事務所「楠田インターナショナル」代表に就任  
現在 同事務所代表、雑誌“Industrial Robot”(英国) Japan Associate Editorなどロボット工学、メカトロニクス、産業オートメーション分野のコンサルタント活動に従事している。

著書 「産業用ロボット導入実践ガイド」日刊工業新聞社 1999  
「自動化システム心得ノート」日刊工業新聞社 1988  
「マイコン再入門」日刊工業新聞社 1979 ほか

## ■ Contents

1.はじめに .....	3
2.産業用ロボットの生い立ち .....	4
3.産業用ロボットの現状 .....	8
4.日本のロボット産業・技術の発展過程 .....	16
5.産業用ロボットの発展の系統化考察 .....	32
6.産業用ロボットと明日の日本経済 .....	40
7.後書き .....	45
登録候補一覧 .....	46



# 1 | はじめに

独立行政法人科学博物館産業技術史資料情報センターでは、日本の産業技術の発展過程における重要な資料を調査し産業技術の発展過程を体系化する活動を行っている。その調査分野のひとつとして「ロボット」を取り上げている。すでにロボット技術についての調査研究を日本ロボット工業会に依頼し、その結果を「国産ロボット技術発達の様式化に関する調査」<sup>1</sup>として刊行した（平成15年）。今回の報告は、その調査結果をもとに

- 日本が世界一のロボット大国として発展してきた要因を分析する
- その発展の足跡を明らかにする中で歴史的意義のある資料の所在を特定し今後のための保存に資することを目的とした。

「ロボット」と一口に言ってもその範囲はきわめて多様である。今回の調査では、「産業用ロボット」（工

場の中で使用されている製造業用ロボット）に限定して調査、体系化を行った。産業用ロボットはロボットの中で他に先駆けて発展し、すでに歴史的評価も定まってきた反面、過去の重要な資料が風化、廃棄されつつある現状を踏まえてのことである。既存の産業機械、工作機械技術、その制御技術を援用して誕生した「プログラム可能な搬送機械」<sup>2</sup>が、用途を広げていくとともに新技術を開発していった現在のロボット産業、ロボット工学という新分野を切り開いた。現在自律ロボット、人間型ロボットなど新しいロボットの新局面が目の前に開けようとしているが、ここで必要とされる基盤技術は産業用ロボットの発展の中で確立されたものである。

本報告の中に今後のロボット産業・技術の方向に対するなにがしかの示唆が見出せれば幸せである。

1 「国産ロボット技術発達の様式化に関する調査」 独立行政法人国立博物館、2003

2 産業用ロボットに関する最初の特許US Patent 2,988,237, 1961 では「Programmable Article Transfer」（プログラム可能な搬送機械）という呼称を使っている。



## 2 | 産業用ロボットの生い立ち

### 2.1 人間のロボット観

「ロボット」という言葉は、過去に「人造人間」という別の用語もあったように「人間のそっくりさん」を意味していた。人類は造物主にすこしでも近づきたいという憧れからか「人間のそっくりさん」を造り上げたいという願望を持ち続けていたことは色々な文芸作品、機械仕掛けの人形などからも明らかである(写真2.1、2.2、2.3)。



写真2.1 リラダン「未来のイブ」に登場する美女ロボット

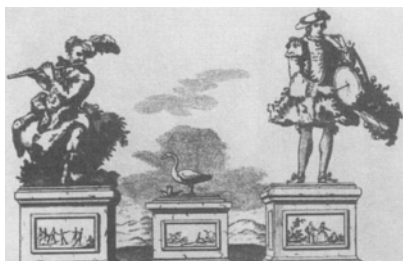


写真2.2 ヴォーカンソン制作の自動人形



写真2.3 からくり茶運び人形

「ロボット」という言葉が初めて使われたのは、1920年にチェコの作家カール・チャペックが戯曲「R.U.R. ロッサム・ユニバーサル・ロボット会社」<sup>1</sup>が始まりである。チャペックはこの作品の中に登場する人工生物を「ロボット」と呼んだ。

この作品にも見られるように、それまでのロボットを取り扱った文芸作品の殆どが人間が創造した怪物が人間に反乱して悲劇的な結末を迎えるのは、人間が造物主に対して抱く原罪感に起因するという論者もある。ロボットというものは人間の対極にある異物として受け止められていた感がある。

このような潮流に反してロボット史に大きな記念碑的足跡を残したのはアメリカのSF作家アイザック・アシモフである。アシモフは1950年にロボットを主人公とする一連の連作「I, Robot (私はロボット)」<sup>2</sup>を発表した。この中でアシモフはそれまでの「ロボットは怪物」というイメージから離れて「人間に役に立つ機械」という概念を明確に打ち出した。ここに登場するロボットの行動は「ロボット三原則」<sup>3</sup>：

1. 人間に害を与えない
2. 人間の命令に従う
3. 自らの存在を守る

に従うものと規定したのである。これはその後の人間のロボット観に大きな影響を与えた。「ロボットの父」アメリカのエンゲルバーグ博士が産業用ロボットを開発しようと考えたのは、コロンビア大学の学生だった時に「I, Robot」を読んで、人間に役に立つロボットを作ろうと思ったことによるという<sup>4</sup>。

### 2.2 産業用ロボットの誕生

「ロボット」が人間の実世界に出現したのはアメリカで1962年にAMF社が「パーサトラン」、ユニメーション社が「ユニメート」という商品名の産業用ロボットを発表したことによる。「産業用ロボット」というものは、人間の作業そのものを機械に置き換えるという今までにない発想の機械であった。しかし産業用ロボットは「人間のそっくりさん」とは少し違う。人間の形はしていない。人間の手、腕の動きを模倣する一

1 「Rossum's Universal Robots」 Karel Capek, Doubleday, Page & Co., 1923

2 「I, Robot」 Isaac Asimov, Doubleday & Co. Inc., N.Y., 1950

3 「I, Robot」 Isaac Asimov, Doubleday & Co. Inc., N.Y., 1950

4 「Robotics in Practice」, J. F. Engelberger, Amacom, 1980 xv.



本の腕を持ち、この腕を使って工場の中で人間に代わって色々な作業をしてくれる道具であった。産業用ロボット誕生以前の機械は旋盤とかクレーンといった機械に見られるように、すべて特定の作業を目的として造り上げられた物だった。これに対し産業用ロボットは、変更することができる作業プログラムと色々な道具（ドライバ、つかみ機構、溶接トーチ…）を使ってさまざまな作業に対応できるいわば「多能工」という全く新しい概念の機械だったのである。

「ロボット」＝「人間のそっくりさん」と思っていた当時の人々にとって、「こんなものがロボットか？」という反応があったようだ。ユニメーション社を創業したエンゲルバー博士によると、1955年フォード社への提案の中で既にindustrial robotという言葉を使用した<sup>5</sup>とのことであるが、アメリカでは労働組合を刺激したくないという経営側の思惑もあったのか「ロボット」という用語は敬遠され、「プログラム可能な搬送機械」(programmable article transfer)<sup>6</sup>とか「汎用搬送機械」(universal transfer device)とかいう妙な名前で呼ばれ、なかなか「ロボット」とは認知してもらえなかったようである。一般社会には1962年にアメリカン・メタル・マーケット誌にindustrial robotとして紹介されたのが最初<sup>7</sup>とのことであるが一般に定着したのはようやく1967年頃とのことである。

当時の産業用ロボットは機能が貧弱、価格も高価でなかなか導入を正当化できる用途が見つからなかった。ダイキャスト作業は熱い溶融金属を取り扱う高温環境の中の危険な作業である。1961年にGM社のダイキャスト機械に対してワーク（作業対象物）のアンローディング用に初めて使用された<sup>8</sup>（写真2.4）（現在、スミソニアン博物館で展示されている）が普及は一向に進まなかった。労働機会を奪われるのではないかと

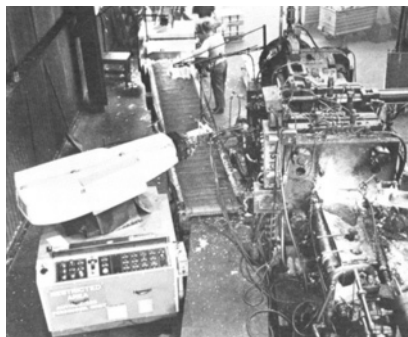


写真2.4 ダイキャスト機械に使われたユニメート

いう労働者の反発もさることながら、西欧社会に潜む「ロボットは怪物」という本能的恐怖感もひとつの原因だとする論者も少なくない。アメリカでは産業用ロボットの普及は遅々として進まなかったのである。

このとき日本に一大転機が訪れた。1966年、エンゲルバー博士が来日して産業用ロボットのセミナーを開いたところ、200人を越える企業の経営者が押し寄せた。エンゲルバー博士はアメリカでの経験から参加者はせいぜい10人くらいだろうと思っていたところあまりの盛況に仰天したという。また、セミナーの最後の質疑応答に質問が出なかったら格好が悪いという配慮からあらかじめサクラの質問を用意しておいたのだが、セミナー終了後も延々と2時間あまり質疑が続いたという。たちまち日本に「産業用ロボット」ブームが巻き起こった。

## 2.3 日本社会とロボット

1960年代当時は、年率10%と言う成長率で日本の高度成長が始まった時代であった。将来、労働力、特に若年労働力が不足することは必至と考えられていた。当時の日本の工業技術はアメリカの先進技術を模倣し追従することが殆ど全てであった。アメリカの先進技術である蠱惑的な「ロボット」という言葉に自動化、無人化への夢を託して我を忘れて舞い上がってしまった日本の経営者の反応も理解できないわけではない。たちまち、ロボットを新規事業分野として検討しようとする企業が我も我もと出現した。ひところは200社にあまる企業がなにがしかのロボットを試作していたというが当時の技術の実態から多くはワークの供給、取り出し程度の専用機に近い原始的なものであった。本格的な産業用ロボットは1968年に川崎重工業がユニメーション社より産業用ロボット「ユメニート」の技術を導入し国産化を行ったことに始まる。1970年には第一回産業用ロボット展が東京で開催された。これを契機に1971年に産業用ロボット懇談会（会員企業35社）が組織され、これが発展して1972年に世界に先駆けて日本産業用ロボット工業会（会員企業44社）の設立に至った。

実用化のきっかけとなったのは1973年、川崎重工が日産自動車、トヨタ自動車のスポット溶接ラインにユメニートを納入したことである。これを契機として自動車工業への産業用ロボットの導入が始まった。

5 Engelberger氏の楠田へのEメール

6 US Patent 2,988,237, 1961「Programmable Article Transfer」

7 「American Metal Market」February 2, 1960

8 「Application of Robots in Die Casting」, J. F. Engelberger, Technical Paper//35, Society of Die Casting Engineers, 1964



〈スポット溶接への導入〉

スポット溶接は鋼材の溶接点に溶接ガンの電極をあてがい電流を流して加熱し溶接するもので自動車のボディ、鉄道車両、家電機器などの製造に利用されている。すでに自動車産業では一部で専用機による自動溶接が行われていたが専用機では溶接部所へのアクセスが困難な作業があり、労働者がポータブル手動溶接機で作業せざるを得なかった。これは重いスポット溶接ガンを車体の決められた箇所にあてがい溶接するという単純繰り返し作業の重労働であった。また、専用スポット溶接機では自動車のモデルチェンジの度に溶接機を更新しなければならなかった。これらの問題を克服する手段としてスポット溶接用に産業用ロボットが適用された。すでに専用機による自動溶接の経験があったことも産業用ロボットの導入に有利に作用した。1970年、米国GM社のオハイオ州ローズタウン工場に24台のユニメートが自動車ボディのスポット溶接に導入された。1972年、シカゴで開催された第2回国際産業用ロボットシンポジウムに日本ロボット工業会より派遣された技術調査団がこの機会にGM社ローズタウン工場を見学、この知見が日本に産業用ロボットの本格的導入を促すきっかけとなった。

産業用ロボットを産業として確立するためには機械技術、エレクトロニクス、コンピュータ、ソフトウェア、サーボ、センサ、利用技術…といった色々な技術分野が工業レベルで存在し、それらを総合できる環境が必要である。日本にはもともと総合工業国としての土壌があったこと、政府の戦後の技術保護政策によりそれぞれの関連技術がかなりのレベルにまで発達していたこと、機電一体化促進法にみられるように機械と電気が一体化した新しい産業の可能性に対する社会の理解があったなどの恵まれた環境があった。特に、工作機械制御のNC技術が開花していてこれを産業用ロボットに転用できたことが大きな要因であった。

日本のロボット・ブームを支えたもう一つの要因は、ユーザが早くロボットを受け入れたことである。アメリカの労働組合は職能別の単能工労働者から成り立っている。アーク溶接ロボットが導入されるとアーク溶接工が職を失う。溶接工労働組合は当然ロボット導入に全組織を挙げて反対運動を始める。日本の企業別労働組合の反応は全く違う。終身雇用制度があるためにロボットによる失業問題の心配はない。アーク溶接ロボットが導入されてみても実は人間の参画を不要にするものではなく、アーク溶接ロボットを使いこなして良好な溶接品質を確保する大事な課題は依然として人間に残されている。危険、きつい、汚い3K労働は不要となりより人間的な作業に集中できるようになる。ロボット導入は大歓迎なのである。

手塚治虫の「鉄腕アトム」によって日本人の心の中にはロボットに対する親近感が刷りこまれていたことも大きいとする指摘もある。昔から日本の職人は道具を擬人化して自分の分身のように慈しむ文化を育んできた。事実、工場に設置された産業用ロボットに、現場作業者たちは百恵ちゃんとか聖子ちゃんとか名前をつけて大事に扱ったというエピソードもある<sup>9</sup>。このような日本社会の情緒が産業用ロボットの導入の潤滑剤となったのは確かであると思われる。

産業用ロボット単体を現場に持ちこむだけでは何の仕事もできない。利用技術、生産技術、現場技術の裏づけがあって初めてロボットを生産活動の中で活用することができる。また、ロボットを実際に使用してみるといろいろな不具合や欠陥が発見されたが、日本のユーザはメーカーと互いに切磋琢磨して問題点を解決して行った。この間、日本の現場の労働者、技術者の改善活動もロボット利用技術の確立に大きな貢献を与えた。

その後、油圧、空気圧駆動から電気式サーボモータへの転換、マイクロプロセッサの導入による飛躍的な機能の向上、多関節型という新しいロボット構造の登場、信頼性の向上などという産業用ロボットの発展により産業用ロボットはますますその適用可能性を拡大していった。

当初は、人間の、いわゆる3K作業や単調な労働の代替だけに適用されるに留まっていたが、やがてロボットにしかできない高速、高精度、大重量、極限環境などの用途にも対応する技術も開発されていった。

その結果、日本は世界一のロボット生産国、ロボット使用国となった。現在、世界で年間約10万台が生産されているうちの70%の7万台を日本が生産し、また世界の総稼働台数72万台の約60%、41万台が日本国内で使用されている文字通りの産業用ロボット大国となっている。日本の産業用ロボットはその優れた品質、性能と使いやすさによって世界中に輸出されている。アメリカが産業用ロボットの生みの親なら、日本が育ての親と言って過言でない。現在では世界の自動車工業、電子工業の多くの製造ラインは、日本の産業用ロボット無しでは成り立たないほどになっているのである。これを可能にしたのは、上記のような日本独特の恵まれた環境があったことを忘れてはならないと思う。

この産業用ロボットで発達してきた技術を活用して製造業（工場）以外の場面にもロボットを実現する可

9 「日本のロボット」通産企画調査会、昭和57年、104ページ



能性が生まれてきた。産業用ロボットの概念が広く一般社会に広がっていくにつれて、従来の「人間のそっくりさん」一辺倒だったロボット観が一変してきた。「生き物のような動き・働きをする機械」という「ロボット」像が定着し、逆に「人間型ロボット」（写真2.5）という一昔前には想像もできない用語が登場するようになった。現在、非製造業用ロボット、サービスロボット、人間型ロボット、2足歩行ロボット、エンターテインメントロボットといった新しいロボットの話題が社会を賑わしているが、これらは全て産業用ロボット技術の発展の上に築かれたものなのである。

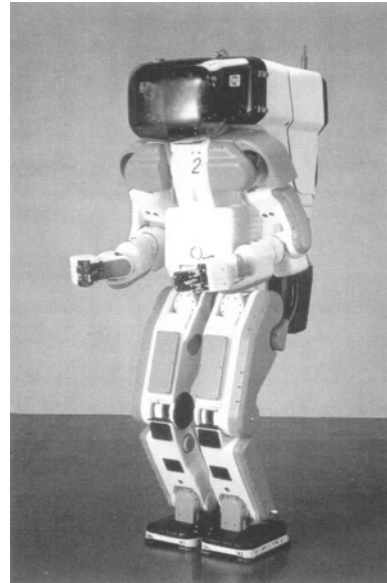


写真2.5 人間型ロボット



# 3 | 産業用ロボットの現状

産業用ロボットはロボット本体とロボット制御装置から成り立っている。

## 3.1 産業用ロボット

### (1) 形態

まず産業用ロボット本体のいろいろな形態を見てみよう。図3.1に示すようにいろいろな形態のロボットがある。いずれもロボットの胴体にあたる部分から伸びている腕がいろいろな動きをするようになっている。

3次元の空間では作業をする腕の先端の位置を指定する為には、縦、横、高さの3つの座標要素を与えなければならない。そのため、3次元空間での一般的な動作を実現するためには独立に動く3つの動作要素が必要になる。

図3.1aは直交座標型と呼ばれる構成でX,Y,Z方向に動く3つの腕によって動作位置を決めるようになっている。図3.1b 円筒座標型、図3.1cは極座標型と呼ばれる構成である。これらのロボットの構造は、人間が直感的に空間位置を理解できる座標系に対応していてロボットの動作を記述する座標情報をそのままロボットの腕の動作制御に利用することができる。初期の産業用ロボットは殆どこのような形態のものばかりだった。現在では、図3.1d の多関節型と呼ばれる構成が主流と

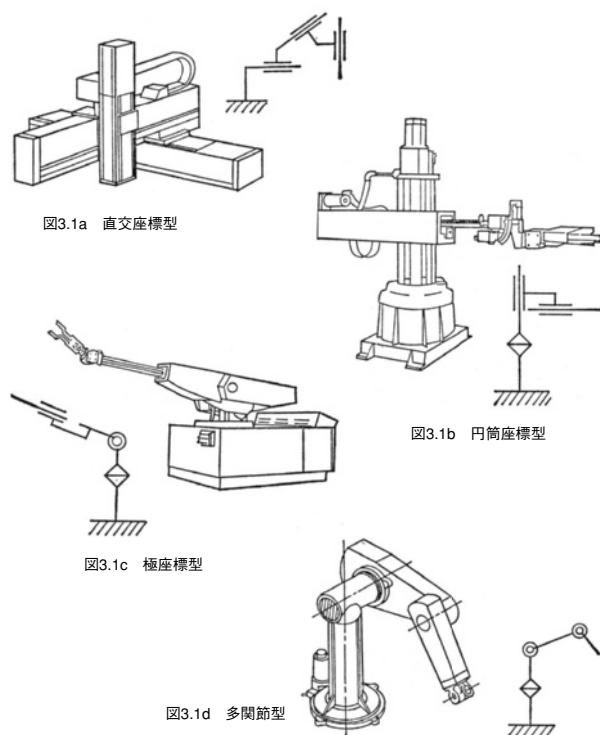


図3.1 産業用ロボットの形態

なっている。多関節型のロボットは人間の腕と同様に関節部で折れ曲がる構造を持っているので占有空間が小さくて済み、作業対象に対する回りこみ性もよく、いろいろな動作への適応性に優れている利点があるからである。その反面、人間が認識している空間座標位置を腕の関節座標へ変換する為（またその逆の変換）の複雑な演算が必要となる。しかもこれをロボットの動作中にリアルタイムに実行しなければならない。低価格、高機能のマイクロプロセッサの出現によって始めてこの構造が実用できるようになり、現在、産業用ロボットの形態の主流となっている。多関節型は更に垂直多関節型、水平多関節型に区別される（図3.2）。

#### ① 垂直多関節型（図3.2a）

3次元空間で作業位置を指定するためには3つの座標成分を必要とする。さらに腕の先端に取り付けられる工具の姿勢まで指定する必要がある時はさらに傾きを指定するための座標成分が必要となる。図3.2aのロボットは6軸垂直多関節型ロボットと呼ばれるもので、胴体の回転軸、関節の回転軸など合計6軸の動作によってこれを実現している。この回転動作は電気サーボモータによって駆動される。ロボットの動作プログラムは普通人間が直感的に理解できるX,Y,Z座標の形で作られるのでこれを6個の独立したサーボモータをどのように回転させて実現したらよいのか、複雑な計算を実行しなければならない。マイクロプロセッサが産業用に実用化されたことによってこの垂直多関節型ロボットが実現できたのである。

#### ② 水平多関節型（図3.2b）

物の移載、電子部品のプリント基板への挿入といった作業では、3次元空間での複雑な曲線動作経路を辿る必要はなく、まずX,Y座標で指定される場所へ移動した後、上下方向（Z方向）へ動作することで良いという簡単な動作で十分である。このような作業には構造が簡単な水平多関節型ロボットが使われている。水平多関節型の一つにスカラ（SCARA）型と呼ばれる形式があり組立ロボットで多用されている（第4.3章参照）。

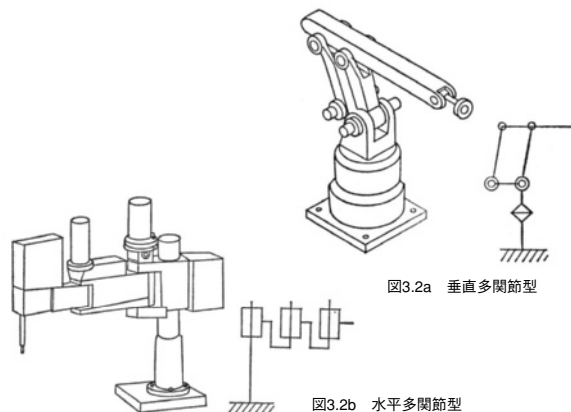


図3.2 多関節型のいろいろ



## (2) ロボットの容量

産業用ロボットは数百グラム程度の小さな電子部品を取り扱うものから数百キロの重量物を運搬する大型のものまでいろいろな大きさのものがある（写真3.1）。定格状態で搬送できる質量を定格可搬質量と呼びロボットの容量をあらわす指標として使う。

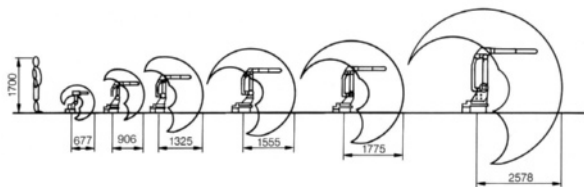


写真3.1 産業用ロボットの大きさのいろいろ

## (3) 汎用ロボットと専用ロボット

汎用ロボットというのは、用途とは無関係に上に述べた構造で一般的な動作を実現するものである。その手先の先端に目的に応じたツール（“工具”または“エンドエフェクタ”という呼び方もある）を取り付けると特定の作業を実行する。

同じような形をしているようでも初めから特定の目的のために設計、製作される専用ロボットもある。例えば塗装ロボットは防爆構造、塗料の飛沫対策、掃除の簡便さなどを考慮して初めから塗装専用の物として作られている。

## 3.2 ロボット・コントローラ(制御装置)

ロボット・コントローラは、ロボットの動作を規定する作業プログラムを記憶し、作業を行うための演算を実行し、各動作軸を駆動するサーボモータを制御する。ロボット・コントローラの例を写真3.2に示す。演算・制御はコントローラに搭載されているマイクロプロセッサによって行われる。

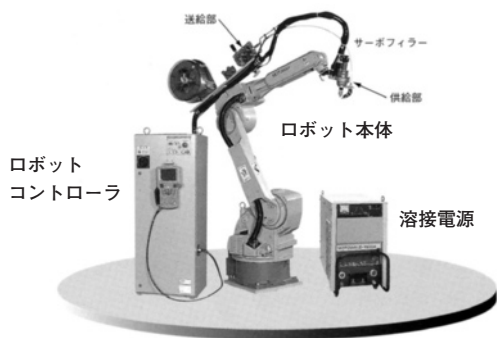


写真3.2 アーク溶接ロボットシステムの中の産業用ロボットコントローラ

## (1) 制御の種類

工作機械・産業機械と同じように産業用ロボットの動作制御には、作業対象によってPTP（point-to-point 点から点）制御とCP（continuous path 連続経路）制御の区別がある（図3.3）。

### ① PTP制御（図3.3a）

産業用ロボットに取り付けたツールの先端を図のA点から次のB点へ移動させる場合、目的地B点へ正しく到着さえすればその間どのような経路で行こうが関係ないという作業がある。例えば、スポット溶接、物の移載、電子部品の挿入といった作業である。このように単にある座標の点から次の座標の点へと制御する方法をpoint to point（点から点）制御と呼び、PTP制御と略称している。

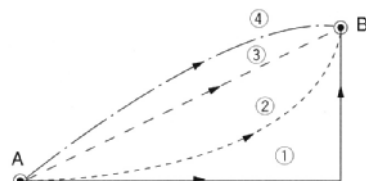


図3.3a PTP制御の軌跡

①～④のいずれの経路でもかまわない



図3.3b CP制御の軌跡（直線指定）

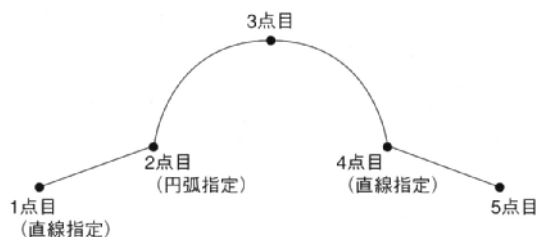


図3.3c 直線と円弧のティーチング例

図3.3 PTP制御とCP制御

### ② CP制御（図3.3b、図3.3c）

産業用ロボットに取り付けたツールの先端が移動する経路（一般的には3次元の曲線）を指定してその通りに動かして行く制御である。例えば、アーク溶接作業は溶接する経路に沿って溶接トーチを連続的に移動させながら溶接して行くことで行われる。continuous path（連続経路）制御と呼びCP制御と略称している。経路のプログラミングは必要とされる経路を、2つの座標点の間を直線と円弧でつないで近似することで行われる。



## (2) 作業プログラムの作成

次の三つの方法が実用されている。

### ① オフライン・プログラミング

別置のコンピュータで作業プログラムを作成し、ロボット制御装置にインプットする方法である。例えば、スポット溶接の対象となる部品がCAD (computer aided design コンピュータによる設計法) で設計される場合など、CADのデータを利用して作業プログラムをコンピュータで生成する。

### ② ティーチング・プレイバック

まずロボット制御装置に付属しているティーチング・ペンダント (写真3.3) という付属器具を使ってロボットを手動運転する。要求されている経路上に次々に適当な2点とこの間を補間する線の種類 (直線・円弧) を指定すると作業プログラムが自動的に作成される。アーク溶接など現物合わせ的なプログラミングが必要な用途に利用される実用的なプログラミング技法である。

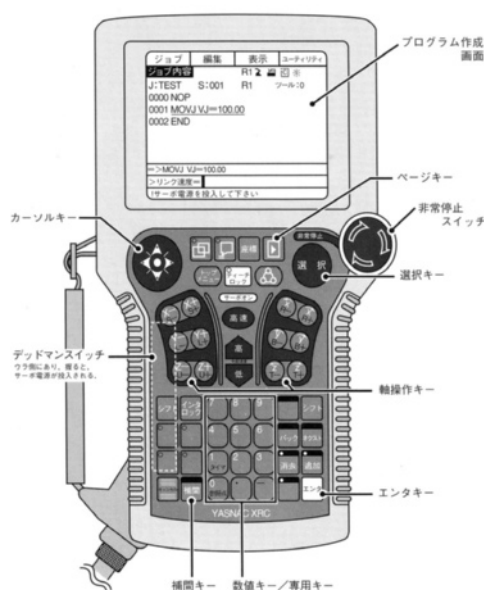


写真3.3 ティーチング・ペンダント

### ③ 直接教示

人間がロボットの先端を手で導いてその動作経路をコントローラに記憶させる方法である。塗装ロボットなどで利用されている。

## (3) 駆動軸の制御

ロボットの動作は、ロボットの先端の座標を指定している作業プログラムを、コントローラによってロボットの各軸を駆動するサーボモータの動作プログラムに変換し、サーボモータによって各駆動軸を動かすことによって制御される。

### ① サーボモータ

ロボットの動作軸を駆動するサーボモータとしてはACサーボモータが使われる。産業用ロボットの発展過程では油圧、空気圧、DCサーボモータなどが利用されていたことがあるが、小型化が可能、構造が単純で悪環境でも信頼性が高いなどのメリットがあり、ACサーボモータ制御に必要なパワートランジスタなどの半導体製品やサーボ制御技術が進歩した90年代からロボット用に広く使われるようになった。

〈サーボモータ〉

一昔前までは、モータと言うと「動力」を発生させるのが目的の機械と理解されていた。1960年頃からオートメーションの発展に伴って位置・速度・力の制御、瞬時発進・停止といった「運動」を実現することが目的の新しいモータが登場してきた。この主人の命令通りに働く新しいモータにラテン語のservus (英語の slave: 奴隷) をあててサーボモータと名づけた。初期のサーボモータは寸法が大きく、力も不足していたので、工作機械の刃物送りやコンピュータ周辺機器の駆動用の一部に用いられるに留まり産業用ロボットのような比較的大容量の用途に対しては油圧、空気圧の駆動源が主流だった。磁性材料の進歩などによるサーボモータの小型化、大容量化技術の発展によりエレクトロニクスとの親和性の良い電気式のサーボモータも一部に使用されるようになった。モータには交流を電源とするACモータ (家庭用のモータなど) と直流を電源とするDCモータの区別がある。ACモータは一定の速度で回転するだけで動作を制御することができない。サーボモータはまず電圧を変えることで速度を制御できるDCモータによって実現された。DCモータは原理上、回転する整流子とこれに接触している固定のブラシという構造によって、回転角位置によってモータを駆動する電流を機械的に切り替えるようになっている。この回転によって磨耗するブラシの存在が保守上大きな問題となっていた。回転部分と固定部分の間にこのような接触部分をもたないACモータ構造で保守性を改善することが切望されていた。整流子とブラシに代わって、回転位置を検出するセンサ、回転位置によって電流を切り替えるエレクトロニクス、パワートランジスタの開発などによって回転接触部分の無いサーボモータが開発された。これをACサーボモータと呼んでいる。DCモータのブラシを排除したモータという見方からブラシレスDCサーボモータという呼び方をする事もある。

ロボットの動作を制御するためには動作位置を検出してコントローラへフィードバックしなければならないが、3次元空間における動作位置を直接検出する良い方法が無い。ACサーボモータの制御にはモータのシャフトに直結されている回転角を検出するエンコーダ (回転角検出器) が使用されているので、これを流用して検出された回転角を積算して間接的にロボットの動作位置としている。

〈インクレメンタル・エンコーダとアブソリュート・エンコーダ〉

初期のロボットではモータの回転検出器としてインクレメンタル (変位積算) 方式のエンコーダが使われていた。モータのシャフトに直結して回転するエンコーダから微小角度ごとにパルスが発生させ、このパルスを現在値カウンタで積算してモータの回転角度を求める方式である。ロボッ



トの電源を落とすと現在値カウンタに積算されているモータの現在位置が消えてしまうので、再スタート時にはロボットを一度基準点へ移動させ現在値カウンタの値とロボットの基準動作姿勢を合せる原点復帰動作が必要であった。現在では殆どのロボットが常に絶対位置を保持しているアブソリュート（絶対位置検出）方式のエンコーダを使っている。回転位置を直接検出する方式もあるが、原理的には上記のインCREMENTAL方式だがカウンタの電源にバッテリーを使用しロボットの電源喪失時でもカウンタの回転角積算値が保持されるようにしている方式も使われている。

## ② ACサーボモータの駆動

ACサーボモータ制御のためには複雑な演算が必要であり、これにもマイクロプロセッサが使用されている。マイクロプロセッサはその演算結果をパワーランジスタなどのパワー増幅部に送り、ACサーボモータを駆動する。ACサーボモータ制御に使用されるマイクロプロセッサを活用して従来のアナログ実現することができなかった動作の高速化、軌道はずれや振動の防止などの問題を改善できるようになった。

## 3.3 産業用ロボットの応用分野

### (1) 用途に応じたツール・周辺機器

図3.4に示したように汎用的に作られた産業用ロボットの手に専用のツールを取付け、更に必要とされる周辺機器を附加して特定用途用のシステムが完成する。実際に使われる用途に対応したツールと周辺機器の種類を、表3.1に示す。

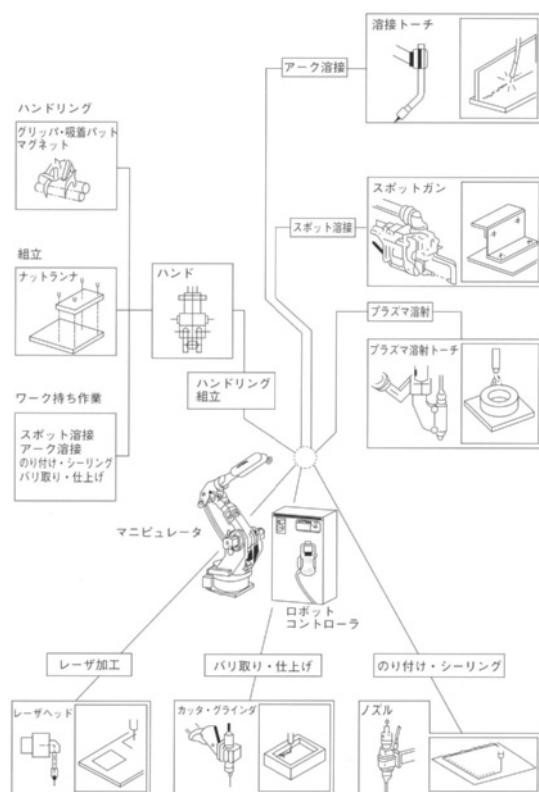


図3.4 いろいろな用途への対応

表3.1 ツールと周辺機器

適用用途	対象ツール、機能	周辺装置
アーク溶接	溶接トーチ、溶接電源、ワイヤ送給装置、ガス機器	ポジショナー、スライドテーブル、溶接治具、クランプ装置、排煙装置
スポット溶接	スポットガン、スポット電源、タイマ装置、チップドレッサー	溶接治具、ポジショナー、コンベヤ、クランプ装置
マシン間ハンドリング	ロボットハンド（ダブル、シングル）	ワークフィーダ、コンベヤ、ストッカ、シュート、クランプ装置
パレタイズ	ロボットハンド（つかみ方式、バキューム方式）	ワーク供給コンベヤ、パレット、パレットコンベヤ、パレットマガジン
のり付け、シーリング	シーリングガン、定量吐出装置、圧送ポンプ	ポジショナー、スライドテーブル、コンベヤ
切断作業	ガス切断機、プラズマ切断機、ウォータージェット切断機、YAGレーザー切断機	ポジショナー、治具、遮光板
プレス間ハンドリング	ロボットハンド（つかみ方式、バキューム方式）	デスタッカー、コンベヤ
ダイカスト	ロボットハンド（ダブル、シングル）、離形剤塗布	コンベヤ、パレット

### (2) 用途と作業の分類

産業用ロボットは対象作業に応じて

- 「工具持ち作業」か「ワーク持ち作業」か
- 「連続運動作業」か「停止時作業」か

の二つの作業形態に分類することができる（表3.2）。

表3.2 工具持ち作業とワーク持ち作業

	1. 移動動作中に作業する	2. 移動後停止して作業する
A. ツール持ち	<b>[A1] アーク溶接型</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>機械的切断</li> <li>研磨・バリ取り</li> <li>切断（ガス、レーザー、ウォータージェット）</li> <li>アーク溶接</li> <li>ガス溶接</li> <li>レーザー溶接</li> <li>塗装</li> <li>組立（はんだ付け、シーリング、のり付け）</li> </ul>	<b>[A2] スポット溶接型</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>スポット溶接</li> <li>組立（一般組立、ボンディング、ネジ締め）</li> <li>測定、検査、試験</li> </ul>
B. ワーク持ち（ハンド）	<b>[B1] ワーク持ち作業型</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>アーク溶接</li> <li>バリ取り</li> <li>切断</li> </ul>	<b>[B2] ハンドリング型</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>鑄造（鉄鉄、ダイカスト）</li> <li>鍛造</li> <li>樹脂成形加工</li> <li>機械加工（ローディング、アンローディング）</li> <li>熱処理</li> <li>入出荷（パレタイズ、デパレタイズ）</li> <li>プレス</li> <li>一般ハンドリング</li> </ul>

### ①「工具持ち作業」か「ワーク持ち作業」か

「工具持ち」とは対象作業に対応した工具を持って作業をする形態である。例えばアーク溶接の場合なら、産業用ロボットが溶接用トーチを持って、静止しているワークを溶接していく。対象ワークの大きさや形が変わっても基本的には同じロボットで対応できる（ワークとは、加工機械や組立て機械が対象とする半製品、素材、部品を言う）。



「ワーク持ち」とはロボットの先端に取付けたハンドでワークを把持して作業する形態である。例えば、産業用ロボットがワークを把持して溶接機にワークをあてがって溶接していく。対象とするワークの重量や材質によってそれを持つハンドはその都度設計、製作されるのが普通である。対象ワーク+ハンドの大きさや重量、使用目的に合わせてサイズや構造の異なった色々なロボットが選ばれる。

## ②「連続運動作業」か「停止時作業」か

「連続運動作業」とは、アーク溶接のように、ロボットが移動しながら作業を行う形態で当然CP（連続経路）制御を利用する。これに使われる産業用ロボットの移動軌跡精度の良さ、移動速度精度（一定さあるいは滑らかさ）の良さができ上がりの製品品質に直接影響する重要な要素となる。

「停止時作業」は、スポット溶接のように、ロボットが目標点に移動したのち停止した状態で作業するもので、PTP（点から点）制御が利用される。途中の制御経路は基本的には問題にならない。目標点へ素早く移動し振動せずに停止し、すぐに作業開始ができてその結果サイクルタイムが短縮できることが重要である。

## (3) 産業用ロボットの適用例

用途によってどのような産業用ロボットが使い分けられているかを具体例で示す。

### ① 垂直多関節型アーク溶接ロボット

70年代後半に製品化され自動車工業を主体とする薄板溶接作業に使用されている。

アーク溶接では：

- 連続運動作業である。
- 溶融金属が溶接部に附着しやすいように溶接トーチの作業姿勢は基本的には下向きとなるが、ワークの形状に応じてトーチの狙い角度が自由に取れるように5軸以上の自由度が必要となる。
- 設置面積が小さい割には動作領域が大きく取れる垂直多関節型が好適である。
- 溶接トーチを持つだけならロボットの可搬質量は6kgあれば充分である。

というような条件があり、可搬質量10kg程度の6軸の垂直多関節型ロボットがCP制御で使用されている。良好な溶接品質を確保するためにはトーチの姿勢、溶接速度などのノウハウに基づいたロボットの作業プログラムを設定しなければならない。作業にも理解できる易しい操作性が要求される。ロボット単体の動作領域を越える大きなワークを溶接するとき

にはロボットを台車に乗せて走行させる（溶接作業だけでなく溶接前後の搬送まで兼用しようとするワーク持ち作業が利用されることもあるが、この場合はワークの重量によってもっと大きな容量のロボットが使われる）。

### ② ハンドリングロボット

物の取り出し、取りつけ、積み込みなどを行う作業をハンドリングと呼んでいる。ハンドリング作業は、典型的な停止時作業であり、用途、対象物の重量、大きさに応じていろいろなロボットが使い分けられている（表3.3）。

表3.3 ハンドリング用ロボットのいろいろ

自由度	軸構成	使われかた	主な用途
2軸	直交	専 用	電子・組立て、半導体（チップ、ウェハー）
3軸	直交・スカラ	専 用	電子・組立て、半導体
4軸	水平多関節	汎 用	パレタイズ、プレス間
5軸	垂直多関節	汎 用	プレス間
6軸	垂直多関節	汎 用	自動車関連

パレットからの物の取り出し、パレットへの積み込みには構造が簡単な水平多関節型ロボットが使われる（図3.6）。自動車、金属加工、プレスなどの業種における工程間の移載のハンドリングは、作業姿勢が自由な垂直多関節型ロボットも使われる。ロボット単体の動作領域で足りない場合は走行装置によって移動する。搬送するワーク、これを把持するハンドの重量に応じて、可搬質量1～400kg程度の範囲のいろいろなロボットがPTP制御で使用されている。

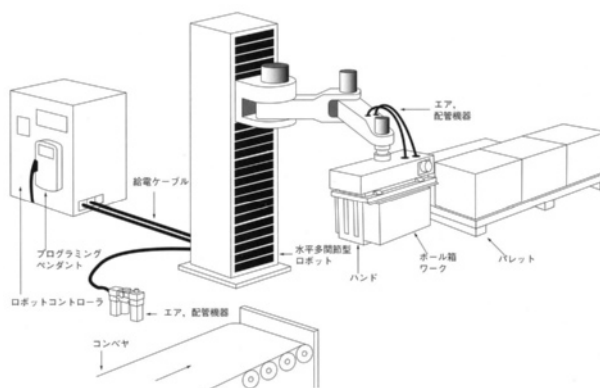


図3.6 パレタイジングへの適用例

電子製品の部品組立・ハンドリングでは、ロットサイズが大きい、高速作業、作業の確実性の要求が強い、周辺機器の構成が比較的複雑、コスト条件が厳しいなどの特質がある。作業の位置・方向を限定して低価格の3～4軸ロボットを使うことが多かった。最近では小型・高速・安価な6軸ロボットが利用でき



るようになったので、周辺機器に金をかけるより6軸ロボットを使う方が設備全体が簡単になりトータルコスト的に有利となるケースも増えてきている。

#### (4) システム化技術

産業用ロボットを使って作業を自動化するためには

- ① ワークの搬入、搬出
- ② ワークを固定するための治具
- ③ 安全対策、環境対策
- ④ 関連機器
- ⑤ 全体の動作を制御するPLC（プログラマブル・ロジック・コントローラ）

などの周辺機器をシステム化しなければならない。アーク溶接用にシステム化した例を図3.5に示す。

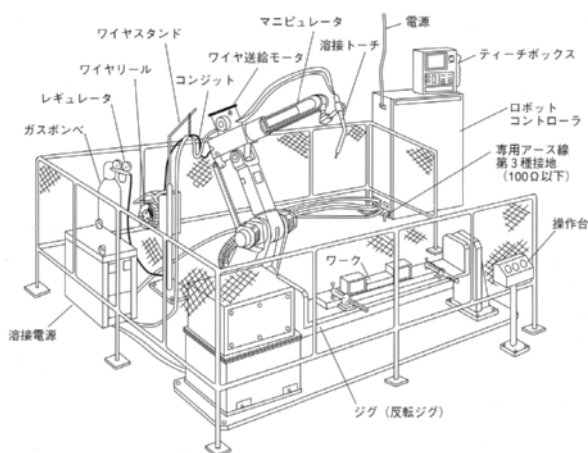


図3.5 アーク溶接への適用例

#### 〈PLC〉

あらかじめ定められた論理条件、順序によってシステムを進行させていく制御がシーケンス制御で、オートメーションを支える重要な実用技術である。一昔前は、制御用リレー、これを半導体化した無接点リレーなどによるハードウェア論理素子で作り上げられていたが現在ではマイクロプロセッサのソフトウェア論理を利用したPLC（プログラマブル・ロジック・コントローラ）が広く使用されるようになった。中身は高度のエレクトロニクス、コンピュータ技術が適用されているが、使用者は従来の制御用リレーを使ったシーケンス制御装置の感覚でシステムを設計したり、動作をチェックしたりできるように工夫されている。

### 3.4 日本のロボット産業の現状

#### (1) 産業規模

日本のロボット産業は1980年代の高度成長期の活発な設備投資と極端なまでの労働力不足感に支えられ、ロボット元年と言われる1980年以降の10年間で急成長を遂げ5000億円の産業を形成するに至った。1990年代に入るとバブル経済の崩壊、国内設備投資の後退から

生産額の減少、伸び悩みが続いたが、その後海外の市場拡大、IT産業関連の需要に支えられ2000年には6400億円に達している（図3.7）。これは、全世界のロボット生産の約7割を占めている。また、国際ロボット連盟発表の稼働台数データによると、1998年末で全世界72万台に対して日本国内の稼働台数は41万台であり約6割を占めている。以下、アメリカ・ドイツ・ロシア・イタリア・韓国はそれぞれ7万台・5万台・3万台・2万台・2万台と続いている（図3.8）。日本は、生産、使用の両面で世界を大きくリードしているロボット大国なのである。

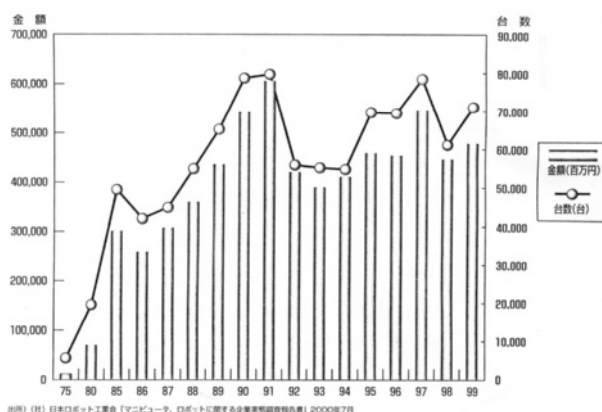


図3.7 日本産業用ロボット生産額の推移

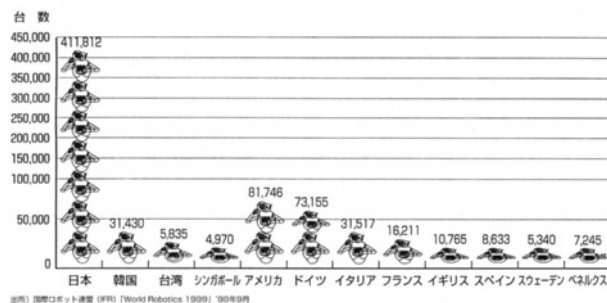


図3.8 世界の国別稼働台数

#### (2) 産業用ロボットの市場

産業用ロボットの需要産業別の出荷額の推移を図3.9に示している。

電子・電気機械器具製造業がトップで1999年で約24%を占めている。組み立て用のSCARA型ロボットの普及に始まり、現在のIT革命を代表する携帯電話、パソコンなどの情報通信機器や軽薄短小・高機能化の一途を辿るAV機器などのための電子部品実装機の伸張によるものである。

当初の最大市場であった自動車産業は1980年よりその座を電子・電気機械器具製造業に譲り1999年には9%に後退している。これは日本の自動車産業の国内設備投資がストップし新規設備投資は海外生産の増強



に向かったことによる。

海外向け輸出は1980年頃までは出荷額全体の数%程度に留まっていたが1984年には20%台に達し、バブル経済崩壊後は米国の旺盛な設備投資、世界の製造工場としての役割を増してきているアジア地域向けの輸出が急増し1999年には全体の53%に達している。

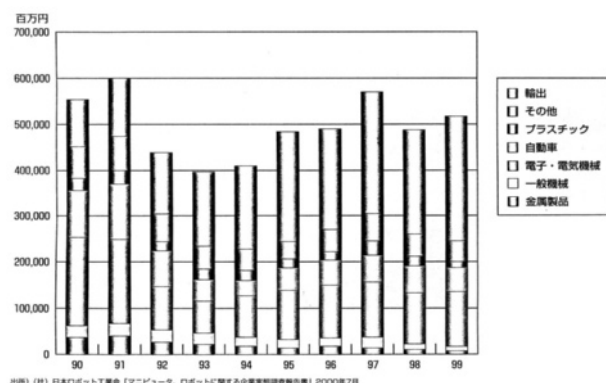


図3.9 需要産業分野別出荷額の推移

また、主要用途別の出荷の推移が表3.4である。用途別に平成14年度の出荷額をみると組立が41%（35%が電子部品実装）、溶接が25%（スポット溶接15%、アーク溶接10%）、クリーンルーム作業10%、プラスチック成型6%、マテリアルハンドリング6%、塗装3%などとなっている。溶接、組み立て・ハンドリング、機械加工が依然として主要用途となっているが、1998年より半導体、精密IT機器関連の新しい需要が出現していることによってクリーンルーム市場が急増している。

〈インサーティング、マウンティングと部品実装機〉

インサーティングというのはプリント基板に電子部品を挿入する作業、マウンティングというのはチップ部品を装着する作業のことである。3.1で説明したような腕を持った普通の構造の産業用ロボットのほかに部品実装機と呼ばれる専用の機械（後出図4.9）も使用されている。日本ロボット工業会の統計数値には、部品実装機を産業用ロボットに含めてカウントしているが、部品実装機を産業用ロボットから区別している統計もあるので注意がいる（今まで説明した腕形のロボットを特に「産業用マニピュレーティングロボット」と称して部品実装機と区別することもある）。

表3.4 用途別出荷額の推移

上段（ ）内は台数、下段は金額（単位：百万円）															
	樹脂成形	アーク溶接	スポット溶接	塗 装	機械加工	一般組立	インサーティング	マウンティング	ボンディング	その他組立	入 出 荷	測定・検査	クリーンルーム	そ の 他	合 計
1990	(16,480)	(9,563)	(5,378)	(962)	(6,680)	(18,076)	(1,784)	(6,209)	(1,852)	(3,039)	(1,098)	(620)	(－)	(8,370)	(80,101)
	35,527	56,461	44,844	9,106	50,609	39,265	45,788	140,517	24,601	15,538	12,888	13,239	－	65,516	553,899
1991	(15,430)	(9,722)	(5,949)	(1,057)	(6,927)	(13,267)	(1,781)	(5,522)	(2,239)	(4,810)	(1,270)	(1,015)	(－)	(9,965)	(78,954)
	36,316	59,408	56,323	12,941	52,113	36,844	45,747	139,640	26,932	20,307	16,340	17,238	－	77,838	597,987
1992	(11,256)	(7,065)	(5,147)	(743)	(5,147)	(9,172)	(1,192)	(3,511)	(1,610)	(2,900)	(1,325)	(978)	(－)	(6,497)	(56,543)
	27,975	43,717	47,296	7,153	34,367	28,369	27,726	96,751	20,839	12,138	17,613	14,281	－	50,506	428,731
1993	(9,208)	(5,963)	(4,356)	(507)	(3,170)	(11,336)	(1,097)	(4,550)	(2,449)	(2,702)	(1,557)	(688)	(－)	(8,094)	(55,677)
	22,010	32,478	36,876	4,863	22,146	29,958	14,982	111,527	31,472	9,093	14,019	14,609	－	53,194	397,227
1994	(10,395)	(5,600)	(4,354)	(441)	(4,088)	(10,214)	(748)	(6,118)	(2,348)	(2,081)	(1,253)	(778)	(－)	(6,273)	(54,691)
	23,022	26,003	29,985	5,070	22,204	23,903	13,844	155,480	29,264	11,336	12,236	10,847	－	42,877	406,071
1995	(11,625)	(7,456)	(5,947)	(450)	(4,563)	(8,962)	(1,505)	(10,840)	(3,164)	(3,174)	(1,856)	(937)	(－)	(8,614)	(69,093)
	25,984	31,696	32,860	5,846	22,287	26,973	17,167	200,618	34,262	12,389	12,838	11,325	－	45,143	479,388
1996	(11,174)	(7,780)	(6,991)	(764)	(4,197)	(10,038)	(817)	(11,679)	(2,465)	(2,362)	(1,497)	(1,107)	(－)	(9,980)	(70,851)
	28,357	33,003	35,810	7,853	21,375	30,501	11,048	198,122	29,363	7,536	13,632	12,979	－	52,392	481,971
1997	(13,576)	(9,333)	(8,228)	(848)	(5,547)	(12,277)	(482)	(11,901)	(2,925)	(1,710)	(1,660)	(1,141)	(－)	(10,230)	(79,858)
	35,442	37,780	39,015	6,645	28,157	36,753	11,458	252,244	33,617	6,082	16,464	13,571	－	51,379	568,607
1998	(10,700)	(8,012)	(6,351)	(590)	(4,005)	(9,910)	(374)	(7,818)	(2,370)	(1,476)	(1,402)	(543)	(－)	(9,644)	(63,195)
	31,960	32,331	38,056	6,757	22,749	36,496	9,944	198,503	28,533	12,896	9,727	－	49,339	482,757	
1999	(12,642)	(7,792)	(8,048)	(516)	(3,796)	(9,014)	(321)	(9,012)	(3,298)	(2,788)	(1,313)	(562)	(3,381)	(8,912)	(71,395)
	35,555	27,656	39,226	4,421	20,689	26,640	6,689	229,863	39,103	11,001	11,175	10,777	13,090	56,656	521,540
2000	(16,880)	(8,539)	(8,709)	(567)	(4,243)	(11,105)	(276)	(13,545)	(4,865)	(2,869)	(1,362)	(748)	(6,982)	(9,878)	(90,568)
	33,188	30,700	38,702	4,073	18,646	26,764	6,891	303,007	57,226	4,749	10,211	11,948	40,247	53,929	640,281
2001	(6,310)	(7,855)	(9,105)	(533)	(4,168)	(6,435)	(172)	(5,601)	(1,166)	(1,952)	(1,379)	(227)	(5,497)	(8,424)	(58,824)
	24,563	29,244	42,334	3,108	21,818	24,239	4,200	117,200	21,778	5,447	10,674	9,780	36,170	51,941	402,496

出所：日本ロボット工業会「マニピュレータ、ロボットに関する企業実態調査報告書」



### (3) 日本経済へのインパクト

表3.5は、産業用ロボットによって創出された付加価値額を、自動車産業、電機産業、その他の製造業について、産業連関表等の基礎統計に基づいて試算したものである。これによると製造業全体の付加価値額120兆円に対して産業用ロボットの付加価値額は4.1兆円であり、全体の3.4%を占めている。

表3.5 産業用ロボットが創出した付加価値の試算(1997年)

	自動車産業	電機産業	その他の製造業	製造業全体
A. 生産額(10 億円)	39,520	56,045	234,605	330,170
B. 雇用手当(10 億円)	5,501	10,479	43,004	58,984
C. 付加価値額(10 億円)	9,545	20,271	91,547	121,363
D. ロボットがもたらす付加価値額(10 億円)	865	1,762	1,478	4,105
E. (D / C × 100)	9.1%	8.7%	1.6%	3.4%
F. 対 GDP 比	0.17%	0.35%	0.28%	0.8%

(財)日本システム開発研究所試算

ロボット産業それ自体はまだ高々数千億円/年程度にしか過ぎないが、日本の基幹産業である自動車産業、電子機器産業は産業用ロボットの存在無しには成立し得ない状況となっていて、単なるロボット単体の生産額数値をはるかに超える影響があることがわかる。



# 4 | 日本のロボット産業・技術の発展過程

## 4.1 揺籃期(1970年代初頭以前)

### (1) 時代の背景

1962年にアメリカで商品化された産業用ロボットが日本に紹介されたのは1960年代の中頃である。その頃の日本は、1964年の東京オリンピックを契機として、首都高速道路が建設され東京の景観は一変、東海道新幹線が東京-新大阪間に開通、1970年には大阪万博の開催とようやく戦後に別れを告げ、年率10%の高度成長が始まった時代であった。若年労働者不足が顕在化し無人化、省力化に対する関心が高まってきた。

産業社会では、鉄鋼業が世界に先立って4000立方メートル超級の巨大高炉を相次いで建設、自動車工業は近づくモータリゼーションの時代を迎えて新規投資を開始した頃であった。

当時の科学・技術の状況も新しい時代を迎えていた。

- ① 工作機用NCが日本でもひとつのビジネスとして確立された。技術的には依然としてアメリカの先端技術に比べてまだ10年の遅れがあるとされていたが、底辺層の工作機には十分なレベルに到達し、低価格のNC工作機の輸出が細々と始まっていた。
- ② サーボ技術の分野ではまだ油圧サーボが主流であり、次の時代に多用されるDCサーボモータはやっと工作機械の送り用に導入され始めた程度だった。NC工作機も電気油圧式パルスモータが使用されていた。
- ③ トランジスタからICへの転換がようやく始まった。ミニコンピュータの誕生もこの頃であった。
- ④ 産業オートメーションの分野では、一頃の化学プロセスのオートメーションを推進してきた制御理論の発展が限界に近づいたことが感じられていた。ますます高度の理論を求める現代制御理論の研究もあるが、反対に、従来顧みられていなかったシーケンス制御という実学にも関心がよせられるようになった。化学プロセスのオートメーションに代わってメカニカル・オートメーション、個別部品製造工業のオートメーションへの関心が高まってきた。

#### 〈シーケンス制御〉

日本における制御工学は初期は化学プロセス産業における温度、流量といった量の計測、フィードバック制御を主体として発展してきた。1960年代になって連続量の制御でなくものの「あり」「なし」「動け」「止まれ」……といった離散信号による制御の存在が意識されるようになった。これはそれまでの「量」対象の古典的な制御理論に行

き詰まりが感じられてきたこと、化学プロセスのオートメーションに代わってメカニカルオートメーションの分野が新しく立ち上がったことによる。このような離散情報に基づく制御は、予め定められた論理関係、順序によって制御を自動的に進めて行くことからシーケンス制御と名づけられている。オートメーションを支える基幹技術である。

- ⑤ シーケンス制御の分野にもエレクトロニクス技術を導入した無接点リレーが使用されるようになった。またこの分野にコンピュータ技術を導入したコンピュータ・コントローラが適用されDNC (direct numerical control: コンピュータ直接制御)、FMS (flexible manufacturing system:フレキシブル生産システム)といった新しい概念が現れた。

これ等の先端技術に関しては、依然として先進国アメリカの模倣、導入が主体だった時代といえる。

### (2) ロボット産業技術

産業用ロボット事業に関心を抱いた川崎航空機(後に川崎重工の一部)は、1966年ユニメーション社の創始者「ロボットの父」エンゲルバー博士を招き産業用ロボットの講演会を開催した。これを契機に日本の産業用ロボットブームが巻き起こった。1962年に開発された米国AMF社の「バーサトラン」(写真4.1)は油圧サーボ機構・円筒座標系、PTP・CP制御・5自由度・定格可搬質量2kgといった性能のものであった。日本には改良モデルE-302(PTP制御)E-401(CP制御)が1967年ごろ数十台輸入された、が評価用が大部分であって実用に供されたものは少ない(バーサトランその後大同特殊鋼、村田機械によって国産化された)。



写真4.1 輸入販売されたバーサトラン



本格的な産業用ロボットは1968年に川崎重工業がユニメーション社より技術を導入し「ユニメート」(写真4.2)(油圧サーボ機構、極座標系、PTP制御、自由度6、定格可搬質量30kg)の国産化<sup>1</sup>を行ったことに始まるが当初は評価用に購入されたに留まった(実際の生産設備に本格的に導入されたのはやっと1973年である)。

高価な当時の産業用ロボットの代わりに単純な電気式の「指」「手」「腕」が開発され販売されていた。富士電機の「電動ハンド」(1968)、東芝の「ワークハンド」(1968)、安川電機の「モートフィンガー」、「モートハンド」(写真4.3)、「モートアーム」(1968)などがそれぞれである。いずれもロボットというよりは一次元の運動を行う電気式シリンダ的なもので、アクチュエータは誘導電動機、シーケンス制御によってオンオフ動作の作業をする原始的なものであった。この「手」をガントリー上に走行させ「腕」を上下して作業する形態でシステム化して販売する試みも行われたが、システムとりまとめ業務が煩雑にすぎ採算に合わず、やがて市場から撤退せざるを得ない運命となった。

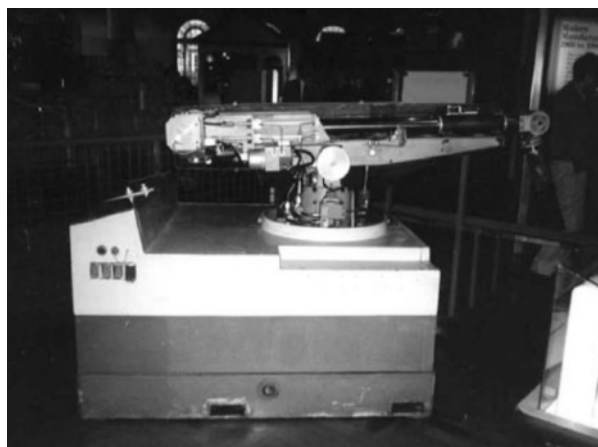


写真4.2 川崎重工のユニメート

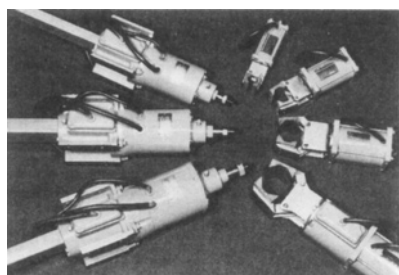


写真4.3 モートハンド

会田鉄工の「オートハンド」<sup>2</sup> (写真4.4)(円筒座標系、空気圧作動 可変シーケンス制御 定格質量3kg、6kg 自由度4)は簡単なものではあったが、危険作業

である金属プレス機械のローディング、アンローディングに導入され産業用ロボット揺籃期のベストセラーとなった(1968)。

#### 〈シーケンス制御ロボット〉

日本の産業用ロボットは、それまでの自動人形に利用されていたような機械的なストップ、カム機構を使用して一定の動作を繰り返すだけの専用機的な固定シーケンス制御ロボットから始まった。やがて同じようなオン・オフ動作に基づくものではあるが、ピンボードや回転ドラムの設定を変えることによってある程度動作を変更することができると可変シーケンス制御ロボットも登場した。1970年代にマイクロプロセッサが産業用ロボットの制御に導入されてからこの形式のものは消えていくが、産業用ロボットの初期に「ロボット」という概念を産業界に認識させる功績があった。



写真4.4 オートハンド

当時、試作された先駆的な産業用ロボットとしては次のようなものがある。

- 石川島「コンスラーム」<sup>3</sup> (写真4.5)(円筒座標系 油圧サーボ) (1967)

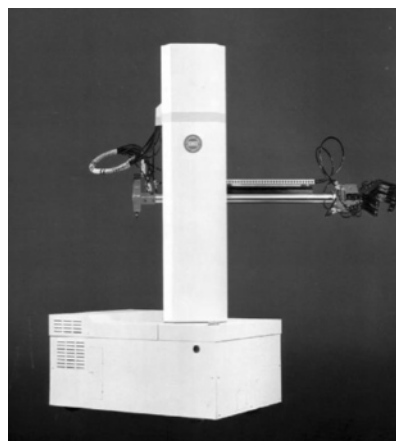


写真4.5 コンスラーム

- スター精機 K-500 (横置き円筒座標系 空気圧作動 固定シーケンス制御 自由度2) (1968) プラスティクス成型機の成型品取り出しに使用された。

1 「川崎ユニメート」10周年のあゆみ、日本産業用ロボット工業会、pp97 (1982)

2 「アイダエンジニアリング」10周年のあゆみ、日本産業用ロボット工業会、pp90 (1982)

3 「石川島播磨重工業」10周年のあゆみ、日本産業用ロボット工業会、pp91 (1982)



- 不二越「ユニマン」UM1000（写真4.6）（円筒座標系 油圧サーボ機構）（1969）
- 東京計器「マトバック」（写真4.7）IRA-50<sup>4</sup>（円筒座標系 空気圧）リタブ社と提携（1970）はパレタイジングを用途とした最初の試みと思われる。  
また旧来の自動機械を汎用化したものとしては次のものがある。
- クログネクレーン「ロボクレーン」（1970）はクレーン自動化の走りであり
- 元田電子「オート・ワイマン」（電動）は人間の作業に追従して重量物搬送を介助するもので助力機械の先駆者といえる。（1970）（写真4.8）



写真4.6 ユニマンUM1000



写真4.7 マトバックIRA-50



写真4.8 オート・ワイマン

- 松下電器産業は、従来のプリント基板への部品挿入機を発展させプログラムに従って複数の部品の中から任意の部品を取り出して自動挿入する電子部品挿入機パナサートA（写真4.9）

を開発した。現在、広義の産業用ロボットに含まれている部品実装機のメカトロ化に踏み出した1号機である。



写真4.9 パナサートA

### （3）揺籃期のまとめ

#### ① ロボット産業

社会的に自動化に対する認識が高まってきたものの、未だ現実に実現する段階にはまだ未だの時代であった。情緒的にロボットブームが巻き上がったものの殆どが試作、評価して可能性を探っている段階に過ぎず、製品としては未だ極めて原始的なものであった。

ロボットの性能が十分でなく、またそれを補完する周辺技術も未開発であり、単純作業しか実現できなかった。パーサートランは東京貿易が830万円で販売したが、当時は大卒初任給2万円のころであり、単純作業の置き換えにはあまりにも高価すぎたと思われる。性能を限定して低価格を狙った原始的なものもあったが、実用になったのは危険作業である金属プレスワークのローディング、アンローディングに留まった。実用化のきっかけは次の発展期（1970年代）を待たねばならない。

#### ② ロボット技術

ユニメート、パーサートランを模倣した円筒座標系、極座標系のほか簡単なものでは直角座標系など人間が直感的に理解できる座標系をそのままロボットの座標系とするものばかりであった。

初期のロボットには応答が速く大きな力が出せること、動力源を外部に置けるのでロボットの機械部を小型化できることなどの理由で油圧、空気圧駆動方式が採用されていた。当時の電気サーボモータは力が不足、重量も重くロボットのような可動機械にはとても使えるものではなかった。

4 「東京計器」10周年のあゆみ、日本産業用ロボット工業会、pp46-49（1982）



CP制御には経路情報を磁気テープにアナログ信号の形で記憶、経路情報を再生して座標軸を制御する工作機用NC装置の初期に用いられていた手法が転用されていた。PTP制御のものは可変シーケンス制御でも作業点の記憶にポテンシオメータ、磁気ドラムなどを利用する原始的なものであった。

## 4.2 勃興期(1970年代前半)

### (1) 時代の背景

いわゆる「いざなぎ景気」の時代で、日本のGNPが世界第2位となり、「日本列島改造論」などが発表され引き続き日本経済の発展が期待された時期であった。オートメーションへの期待が高まり「無人化省力」という新しい言葉が登場した。メカトロニクスという新しい用語が商標登録<sup>5</sup>されたのもこの頃である。しかしやがて次のオイルショック不況の時代へと突入していく。

IC、LSIが産業用エレクトロニクスにも利用されるようになった。1972年にアメリカで電卓の演算回路の汎用化を目的にマイクロプロセッサ4004の発明が行われたが未だ産業界への適用には至らなかった時代である。

ミニコンピュータの機械加工への適用が進みDNC(コンピュータ直接数値制御)が実現される、FMSの概念が発表されるなどコンピュー技術のメカニカルオートメーションへの進出が始まった。

1972年には通産省の主導により無人化製造を指向するMUM(Methodology for Unmanned Manufacturing)プロジェクトが始まり自動化への関心が高まっていった。プログラマブルロジック・コントローラ(PLC)が商品化された(1970)が一般への普及はまだまだった。

またDCサーボモータの性能向上の動きが高まり工作機械の一部に採用されるようになった。

### (2) ロボット産業技術

1970年に安川電機は「無人化省力展」と銘打って展示会を開催、その中で「サイクロプス」(ギリシャ神話に登場する一つ目の怪物の名)と称する視覚センサ付ロボットでコンベヤー上に流れるビール瓶を認識しハンドリングするシステムを展示した<sup>6</sup>(写真4.10)試作ベースのものであったが知能ロボットによる産業用ハンドリングの先駆的実験であろう。

1971年に産業用ロボット懇談会(会員企業35社)が組織され、これが発展して1973年に世界に先駆けて日

本産業用ロボット工業会(会員企業44社)の設立に至り日本のロボット産業がスタートした。

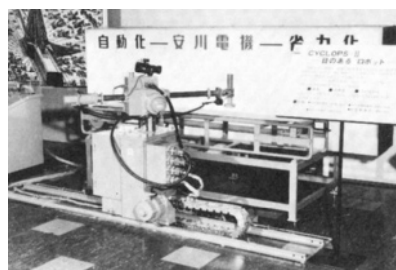


写真4.10 サイクロプス

この頃の注目すべき製品としては、川崎重工が国産化したユニメートが代表的な存在である。

その他、ヤスキ産業 RBHシリーズ 円筒座標系 可変シーケンスPTP制御(1972)(低価格化を狙った簡単なもの)不二越「ユニマン」、UM2000(円筒座標系 油圧サーボ機構)(1972)、UM3000(極座標系 油圧サーボ)、UM4000(直角座標系 油圧サーボ機構)(1972)などがあげられる。特にアーク溶接ロボット ユニマンUM4000<sup>7</sup>直角座標系 5自由度 油圧作動 サーボCP制御)はアーク溶接の普及に貢献があった。

川崎重工は、色々な用途に産業用ロボットの適用を試みている。同社の明石工場に適用した工作機械の自動運転システム<sup>8</sup>(1971)は、機械加工の自動化に産業用ロボットを適用した最初の試みである。なかなか大きな市場を見出せぬまま苦闘が続いていた中で1973年、ユニメートが日産自動車追浜工場のブルーバードのボディのスポット溶接、トヨタ自動車堤工場のカローラのボディのスポット溶接に相次いで導入された。これが日本の自動車工業へ大量に使用されるきっかけとなった(写真4.11)。



写真4.11 トヨタ自動車のスポット溶接ライン

5 商標登録946594号「メカトロニクス」昭和47年。権利者安川電機はその後権利を放棄し一般に使用されるようになった。

6 「安川電機75年史」安川電機、pp129. 1900

7 「アーク溶接用ロボットユニマン4000シリーズについて」ロボット、vol.4、日本産業用ロボット工業会、pp64-67 (1973)

8 矢田「工作機械の自動運転システムへの導入」ロボット、2号、(1972) .pp31



神戸製鋼所がノルウェーのトラルファ社が開発した塗装用ロボットを30台ノックダウン生産（1973）、ついで塗装ロボットKTR-3000CRCとして国産化した<sup>9</sup>（写真4.12）。日本の塗装ロボットの嚆矢である。垂直多関節系油圧作動 自由度5, 6で、塗装作業を人間がロボットの手を取り直接動作させたものを反復するという直接教示を採用した。NC工作機の初期に使われた技法の転用である。



写真4.12 塗装ロボットKTR3000CRC

#### 〈塗装ロボット〉

吹きつけ塗装工程は、毒性のある有機溶剤を含んだ塗料が周囲に飛散する環境問題がある、飛散した塗料は引火しやすく火災の危険性がある、熟練作業が必要といった問題点があり、無人化への要求が高かった。産業用ロボットの導入が成立した理由である。

新明和のアーク溶接ロボット ローベルPW50<sup>10</sup>（1972）は3自由度直交座標系油圧駆動 サーボ・CP制御の本体にワークを把持する機構（ポジショナー）の姿勢制御の3軸を加え、溶接姿勢が常に下向きとなることを実現したもので専用機的色彩が濃い、厚板溶接に48台が使用された。次の時代に立ち上がるロボットによるアーク溶接普及の先駆者である（写真4.13）。

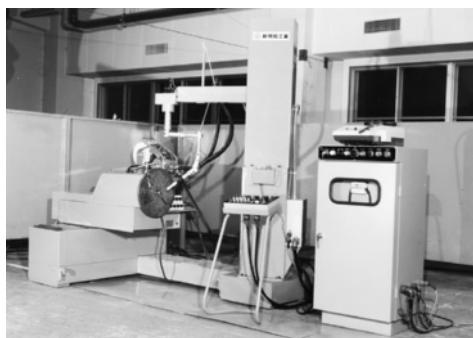


写真4.13 ローベルPW50

#### 〈アーク溶接〉

アーク溶接は、アーク放電による発熱を利用して鋼板を溶接経路に沿って連続的に溶接するもので自動車、家電、一般機械、造船などの分野で広く利用されている。高温作

業、アーク放電によって発生する紫外線、有害ガスの発生などの悪環境下の作業であり、また溶接工の熟練度によって溶接品質が左右される。これを自動化する産業用ロボットとしては、CP制御のもので軌跡精度が良く速度の一定性が要求される。更に、溶接トーチの姿勢、速度、溶接電圧の設定など溶接条件を作業者が容易に設定できるなどの機能が要求される。

この頃からFMSの実現を目指して機械加工の無人化セルを作ろうとするシステム化の動きが出てきた。ロボットによって工作機へのワークのローディング、アンローディングを行うものである。

川崎重工西神戸工場の油圧装置部品の機械加工セル（1973）（写真4.14）はロボットを取り囲むように機械を配置、ワークを機械から機械へと渡り歩く形のセルを実現した。



写真4.14 油圧装置部品の機械加工セル

### （3）勃興期のまとめ

#### ① 産業

全般的には、ようやく無人化、省力、省人といった概念が一般社会に浸透し始めた。これに伴って危険作業、重作業を対象に産業用ロボットの実用化が始まった。

ロボット産業初期の主要市場であるスポット溶接が立ち上がった。日産、トヨタの導入に引き続き自動車各社の導入が始まった。川崎重工のほかにも不二越その他の参入もあった。

アーク溶接への適用もスタートしたが、大手の自動車メーカ、建機メーカの採用に留まった。本格的に一般市場への普及が始まるのは現在の電動垂直多関節系へ移行して取り扱い性、保守性が改善された次の1980年代となる。

新しい用途として塗装への適用が始まった。機械加工システムの無人化など将来のFA化への芽生えも見られた。試作・評価を中心に産業用ロボット事業

9 「スプレー塗装作業へのロボット適用」 ロボット、vol.9、日本産業用ロボット工業会、pp31-35（1975）

10 「新明和」10周年のあゆみ、日本産業用ロボット工業会、pp106（1982）



の可能性を模索していた揺籃期を越えて、実用のための性能の安定性、信頼性が向上しユーザの導入が容易となってきた。揺籃期の研究開発から実用化へとロボット産業がようやく芽生えた時代といえよう。

## ② ロボット技術

未だ、マイクロプロセッサ導入以前のハードウェア論理主体、工作機NC技術の流用というレベルから脱却できていないが、ようやくスポット溶接、アーク溶接、塗装、機械加工といった用途別の利用技術が芽生えてきた。

ユニメート、パーサトランを模倣した円筒座標系、極座標系のほか簡単なものでは直角座標系などが利用されていた。これ等が現在の多関節座標系へ移行し、回り込み性の改善、保守性の向上が実現するには次の1980年代となる。

駆動は殆どが油圧サーボが主流であった。まだ電気サーボモータは力が不足、重量も重くロボットのような運動する機械には不向きだった。NCメカファナックでも電気油圧サーボを使用していた時代であった。

CP制御のものは、各座標軸の経路情報を磁気テープにアナログ信号の形で記憶、経路情報を再生して座標軸を制御するNC装置の初期に用いられていた手法を転用するものであった。

## 4.3 停滞期(1970年代後半)

### (1) 時代の背景

オイルショック不況のため、産業用ロボットの売れ行きは停滞し、産業用ロボット事業から撤退する企業も出て来た。ロボット産業の苦闘が続く。しかし物価高騰、賃金上昇に耐え国際競争力を強化するため生産性向上の必要性は必至であり、この時期に次の発展のための努力を続けた企業もあった。この努力が次の発展期に開花することになる。

工作機の電気制御化（DCモータによる主軸の可変速運転、送りのDCサーボモータ化）が進んだこと、減速機ハーモニックドライブが登場するなど他分野の新しい技術がロボットに大きなインパクトを与えた。

1977年から1979年にかけて、アメリカと日本の間に、両国の半導体品質の比較論争が巻き起こった。アメリカの大手ユーザがフィールドデータで日本の半導体の信頼性がアメリカを大きく凌駕していることを立証して決着した。この事件が「日本製品の品質は世界一」という認識が全世界に広まって行くきっかけとなった。

### (2) ロボット産業技術

この時期にアーク溶接ロボットの新しい動きが始まった。

●日立 ミスターアロス<sup>11</sup> (Arc Welding Robot with Sensor) (写真4.15) (サーボ、CP制御、直角座標系) (1975) は非接触式センサによってワーク精度、設定誤差などを検出、修正しトーチ先端位置を動かさずにトーチ姿勢を変更するなどの機能を盛り込み知能化アーク溶接の先駆けとなった。



写真4.15 ミスターアロス

一方、産業用ロボットの実用化が次第に進展するにつれ、油圧ロボットのメンテナンスが煩雑なことが問題化してきた。これを改善して市場参入を図ろうとする電気メカによるロボット電動化への挑戦が始まった。

#### 〈産業用ロボットの電動化〉

初期のロボットでは応答が速く大きな力が出せる、動力源を外部に置けるという利点がありロボットの機械部を小型化できる油圧、空気圧駆動方式が採用された。しかしロボットの実用化が進んで、高速で複雑に動く性能、高い信頼性、保守の容易さの重要性が高まるにつれて、パワー伝達の配管系統からの油・エアー漏れの欠点がクローズアップされるようになってきた。電動モータは自重が重く、大きなパワーが出ないので大型ロボットには無理だが、ケーブル一本で簡単にパワー供給ができる利点がある。まず小型ロボットへの採用が始まった。需要が高まるにつれてモータ自身の小型軽量化・高信頼性が急速に進められたので、それを使っての電動ロボット化がさらに進んだ。この時代（70年代後半～）のアーク溶接ロボットの電動化に始まり、後のスポット溶接ロボット（80年代前半～）、塗装ロボット（80年代後半～）と電動化が進展していく。

アーク溶接ロボットの電動化の動きの中から産業用ロボットの新しい構造、多関節構造が出現した。1974年スウェーデンのASEA社は、電気式サーボモータ、マイクロプロセッサ制御を使用して世界最初の平行リンク型垂直多関節構造のロボットIRB-6(写真4.16)を発表した。安川電機は電動式アーク溶接用ロボットMotoman-

11 「日立アーク溶接ロボットミスターアロス」ロボット、vol.9,日本産業用ロボット工業会、,pp77-83 (1975)



W(写真4.17)(サーボ・CP制御 円筒座標系 自由度 5)(1974)を試作して電動化に挑戦していたがこの新技術に感銘し、IRB-6をお手本に製作したのがMotoman L-10<sup>12</sup>(写真4.18)(サーボ・CP制御 電動 垂直多関節座標系 自由度5)(1975)である。マイクロプロセッサ8080を使用しロボットコントローラのマイクロプロセッサ化



写真4.16 IRB-6

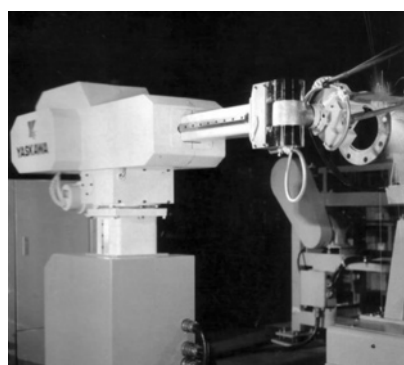


写真4.17 Motoman-W



写真4.18 Motoman-L10

の先鞭をつけた。産業用ロボット事業には後発の安川電機は、この新しいロボット構造と電気サーボの高制御性を発揮できる用途として複雑で連続的に作業するアーク溶接に着目した。特に自動車部品のアーク溶接市場をターゲットとした。電動化がもたらした取り扱いの容易さにより、いわゆる3チャン企業(父チャン、兄チャン、母チャンに代表される家内工業)に売り込むことに成功したのである。外国製品の模倣というお手本に及ばないものがよくあるがL-10は本家をしのぐ機能、信頼性を実現したとして好評を博し、2年間に2000台を販売するベストセラーとなった。日本におけるアーク溶接ロボット、垂直多関節構造ロボットの原点となった。当時自動車工業にとってオイルショックを克服するための省エネルギーの実現が急務であった。軽量化を実現するため、薄板構造とし連続溶接によって強度を確保する構造の比重が高まってきた。この時代の流れにマッチしたことも成功要因のひとつである。

#### 〈平行リンク型電動垂直多関節ロボットの出現〉

1974年に開発されたスウェーデンのASEA社のIRB-6はマイクロプロセッサ制御・電動垂直多関節座標系ロボットというそれ以後の産業用ロボットの主流となる形式を世界に先駆けて開発した歴史的製品である。電気式サーボモータは保守が楽、精密な制御ができるなどの利点が認識されながらも、油圧に比べて力がない重量が重いという欠点があった。これはロボットの可動部に搭載される駆動機構としては致命的な欠陥である。ASEA社のアイデアは重量が重い電気式サーボモータは極力動きの小さい根元部の近くに配置し、バンタグラフ機構の平行リンクによって腕、手などを動かそうというものであった(図4.1)。平行リンクと関節の組み合わせによる多関節構造の動きは人間にとって直感的にわかりやすいものではない。人間が認識できる円筒座標、極座標、直角座標を各関節の回転位置との対応をつけてやらねばならない。人間が認識できる直角座標系から多関節座標系への変換、逆変換を、当時まだ産業界への本格的な導入には到ってなかったマイクロプロセッサに着目、マイクロプロセッサでリアルタイムに演算することで解決しようとしたものである。発表当時はロボット学会、産業界の評価は冷淡であり、かのエンゲルバーガ博士でさえ「こんな複雑なものは使い物にならない」という評価だったとのことである。日本の安川電機は「油圧に代わる電気サーボ」をスローガンにDCサーボモータを世界に先駆けて開発、推進してきたメーカーである。モートアーム、モートハンド、モートフィンガーをガントリーに搭載し走行させるシステムで、移動部に設置された大きな重量の電気サーボモータの欠点を痛感していたので早速この構造に着目、これを模倣することとした。普通、物まねは本物に及ばないのが通例であるがこのMotomanL-10はお手本のしるぐ極めて高性能、高信頼性のものとなった。これから、産業用ロボットの駆動は電気式サーボモータ、構造は多関節型へと移行が始まる。

実は、1973年にアメリカのシンシナティミラクロン社が人間には理解しにくい多関節座標系をコンピュータの支

12 「アーク溶接用ロボットモートマンL-10について」、ロボット、vol.19、日本産業用ロボット工業会、(1978)



援により人間が理解できる直角座標系でプログラムする基本特許<sup>13</sup>を出願していたのだが、これは当時まだ高価だったミニコンピュータを使用するもので経済的にはとても成立するものとは思えず日本は殆どその重要性に気がついてなかった。後年、日本のロボットメーカはシンシナティミラクロン社に特許侵害を訴えられ多額の特許使用料を払わされる羽目となる。

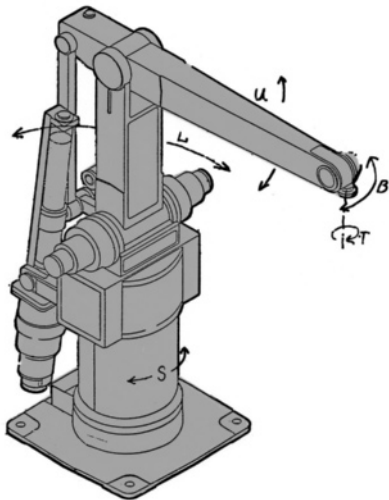


図4.1 平行リンク機構

この時代にNC装置のトップメーカであるファナックが機械加工の更なる高度化への対応、工作機用NC技術のロボットへの展開を目指して産業用ロボット事業に参入した。1975年、本社（日野）工場では2台のユニメートを天井走行させ7台の工作機に対してワークのローディング、アンローディングを行い機械加工のシステム化の先鞭をつけた（写真4.19）。さらに開発を進め FANUC ROBOT MODEL 1<sup>14</sup>（写真4.20）（電動サーボ、PTP制御 円筒座標系 5自由度 1台の工作機に1台のロボット）（1977）、FANUC ROBOT MODEL 2（電動サーボ・PTP御 円筒座標系 自由度5）（1978）FANUC ROBOT MODEL 0<sup>15</sup>（工作機に取り付け型）（写真4.21）（1979）などの一連の機械加工自



写真4.19 富士通ファナック本社工場の機械加工システム



写真4.20 FANUC ROBOT-MODEL 1



写真4.21 FANUC ROBOT-MODEL 0

動化システムロボットを開発した。機械加工部門のロボット化の先駆的製品である。

三菱重工・岩田塗装機の塗装ロボット<sup>16</sup>（写真4.22）（サーボ・CP制御 油圧 垂直多関節系 6軸 ワイヤメモリー）（1975）も開発された。



写真4.22 三菱・岩田塗装ロボット

13 United States Patent 3909600, 3920972 (1975)

14 稲葉「FANUC ROBOT-Model 1による機械加工自動化システム」ロボット、vol.17、日本産業用ロボット工業会、pp54-59 (1977)

15 稲葉他「産業用ロボットによる自動化工作機械 FANUC ROBOT-Model 0」ロボット、vol.25、日本産業用ロボット工業会、pp21-26 (1979)

16 田島「塗装ロボットの開発と適用例」ロボット、vol.17、日本産業用ロボット工業会、pp22-27 (1977)



### (3) 停滞期のまとめ

#### ① 産業

第1次、第2次にわたるオイルショック不況のため、産業用ロボットの売れ行きは停滞し産業用ロボット事業から撤退する企業が相次いだ。例えば、一時、世界的にも注目を集めていた専門ロボットメーカー大日機工が倒産するなどロボット産業の苦闘が続く。しかしこの時期に次の発展のための開発を続けた企業もあり、この努力が次の発展期に開花することになる。

#### ② ロボット技術

非サーボ・CP制御の原始的なロボットはもはや汎用商品としては成立しなくなった。それまでの円筒座標系・極座標系から垂直多関節系への移行が始まった。特にアーク溶接や塗装の場合、回り込み性が良いという使い勝手性の向上が評価され、ほとんどが垂直多関節系へ移行した。

駆動源としては依然として油圧が主流、空気圧も使用されているという状況ではあったが、CP制御のロボットから電動（DCサーボモータ）への移行が始まった。可撓式小型遊星歯車機構ハーモニックドライブ<sup>17</sup>の出現によってDCサーボモータへの移行がさらに加速された。

位置検出に使用されていたポテンシオメータは、断線した場合暴走事故が発生する危険性が認識され使用されなくなり、インクリメンタルエンコーダにほぼ統一された。

セッサのソフトウェア論理に置き換わりメカトロ製品の姿は一変した。いわゆるマイクロプロセッサ革命である。低価格・超小型・高機能のマイクロプロセッサによって従来にない高機能をもった新商品が経済的に実現されるようになった。

アメリカの自動車工業を中心に工場内総合通信ネットワークMAPの提唱があった。日本はまたしても過剰に反応し振り回された感があるが、やがて起こる生産ラインのネットワーク化の端緒となったのは確かである。

### (2) ロボット産業技術

マイクロプロセッサの導入により高機能化された産業用ロボットは時代の生産力増強、生産性向上、省人化を実現する武器として大きな発展を遂げた。

不二越は油圧スポット溶接ロボットの使いづらさを解消しようという意図で、電動の大型ロボット「ユニマン」UM8600（写真4.23）（電動サーボ・CP制御 平行リンク型垂直多関節系 自由度6 定格可搬質量50kg）を開発した（1981）。モートマンL-10と同じく、ようやく普及し始めたマイクロプロセッサを使用し、垂直多関節系のロボットを直角座標系の感覚で使用することを実現し教示作業を大幅にしやすくした。その後のスポット溶接ロボットの典型となりスポット溶接ロボットの普及に大きな貢献を行った。アーク溶接のモートマンL-10とスポット溶接のUM8600により、殆どのメーカーが、電動多関節化に追随しロボット構造が一変した。

## 4.4 高度成長期(1980年代)

### (1) 時代の背景

1980年代になって日本は高度成長時代に突入する。今まで急成長を続けてきた日本の自動車工業は1980年日本の自動車生産台数で世界一となった。ジャパン・アズ・ナンバー・ワンという評価を受け日本の製造業は世界一という認識が定着した。今後も右肩上がりの成長が永久に続くという幻想に溺れた時代だった。高度成長を可能にするための労働者確保に狂奔し海外よりの労働者輸入が急増した。それとともに、無人化、省力の要求が高まった。当時、4直3交代の職場で一人分の労力を省くための、省人化投資として4500万円が認められていたほどであった。自動車工業、電子組立工業ではロボットをベースにした生産ラインが常識となった。

マイクロプロセッサが産業エレクトロニクスの世界に導入され、従来のハードウェア論理はマイクロプロ



写真4.23 ユニマンUM8600

典型的な労働集約型作業と考えられていた組立分野へも産業用ロボットが進出するようになった。川崎重工は技術提携先のユニメーション社が開発した組立用ロボットPUMA PH560を国産化しKAWASAKI PUMA PH560<sup>18</sup>（写真4.24）（1981）（サーボ・PTP・CP制御 電動 垂直多関節系 自由度6）を販売した。人間の肩、上腕・肘・手首までの寸法と同一のロボット

17 伊藤「産業用ロボット駆動系としてのハーモニックドライブ」 ロボット、vol.16、日本産業用ロボット工業会、pp54-59（1977）

18 窪田「川崎ユニメートPUMAシリーズ」、ロボット、vol.33、日本産業用ロボット工業会、pp37-43（1973）



を作れば手作業がロボットで置き換えられるという新しい発想によるものだった。しかし、日本で組み立て用に使用したユーザから「剛性不足で使用に耐えない」と評価され、これが後述のSCARAロボット開発の端緒となった。



写真4.24 KAWASAKI PUMA PH560

山梨大学の牧野洋教授は画期的な組み立て用「SCARA」ロボット<sup>19</sup>（写真4.25）を発明（1980）、有志の企業からなるスカラ研究会で実用化を推進した。

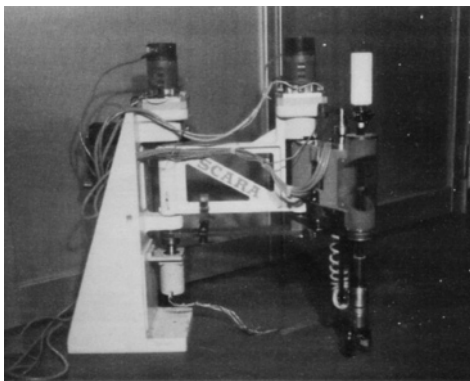


写真4.25 SCARAロボット

SCARAロボット（電動 水平多関節系 自由度4）は組立作業に不可欠な選択的コンプライアンス（鉛直方向へは大きな力で作用するが、前後左右の水平方向には柔軟性を持つ機能。テーパのある穴なら少しずれても自力で挿入できる）特性をロボット構造の中に本質的に内蔵している。1981年には三協精機製SCARAロボットSKILLAM<sup>20</sup>がアメリカIBMへ大量に供給されSCARAが全世界に普及する端緒となった。その後全世界の小型組立ロボットの定番となった。あまりにもSCARAという名前が有名となったため、広く水平多関節ロボットの呼び名として誤用されるほどになっている。

〈SCARAロボット〉<sup>21</sup>

水平多関節型のうちで図4.2のような形のスカラ型と呼ばれるロボットの形態がある。

自動組立では穴のなかに組立部品を挿入する作業が基本である。組立作業では、少しくらい位置がずれていても縦方向の力で挿入できる横方向の柔軟性（コンプライアンス）が要求される。コンプライアンスを実現するために米国MITのドレーバ研究所などをはじめいろいろな試みが行われていた。牧野教授は水平方向のコンプライアンス、上下方向の剛性という課題を、図4.2のような単純な屏風型腕構造で実現した。

屏風のように折れ曲がる腕を持っていて、X-Y平面の上の位置決め力に逆らう外力が働くと位置がずれ得る構成となっている。この特徴は組み立て作業の自動化に非常に有用で、挿込孔にテーパ（勾配）をつけておくと、位置決めがずれたり、孔の精度が十分でなかった場合でも部品を押し込んで行く事ができる。X-Y方向には柔らかくZ方向には固いという方向選択性のある剛性をもっているのがスカラ（SCARA: Selective Compliance Assembly Robot Arm）型という名前がつけられている。時計のような機械部品の組み立て、電子部品のプリント基板へのなどに使われ、実用されている産業用ロボットの一つの代表的存在となっている。

水平方向の位置決め制御はDCサーボモータで行い、牧野教授のカム曲線理論による高速位置決めをマイクロプロセッサ8080の演算で実現した。

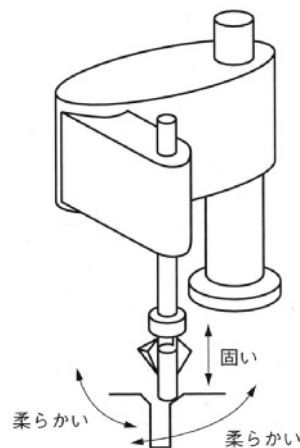


図4.2 SCARAロボットの構造

たちまちSCARAロボットが生産ラインに導入されパイオニア大森工場プリント基板実装ライン<sup>22</sup>（1981）を始めとして、東芝名古屋工場扇風機組立ライン、松下電器彦根工場電気カミソリ組立システム、東北沖電気ドットプリンタ組立ライン、日立東海工場VTRメカニズム組立ライン、東芝深谷工場プリント基板異型部品実装ライン（いずれも1982）などに適用された。セイコー電子工業は自社開発の小形組立用ロボットを使って世界最初のウォッチ外装部品の自動組立システム

19 牧野「SCARAロボットの開発」精密機械、垂8巻、3号、(1982)、pp92-97

20 藤村他「組み立て用多関節ロボットSKILLAM」ロボット、vol.32、日本産業用ロボット工業会、pp33-40 (1981)

21 牧野「SCARAロボットの設計思想」日本機械学会誌、80巻、773号、(1983) pp45-50

22 「SCARAによる異型部品実装」精密学会自動組立専門委員会研究例会資料、32-5号 (1982) pp1-6



ム（1985）、ムーブメント自動組立システム（1988）年を完成した。

自動車の最終組立ラインなどの大型組立にもロボットの適用が行われた。三菱自動車水島工場では乗用車の最終艤装ラインのタイヤ、ランプ、窓ガラス、ガソリンタンク、シートなどの組み付けを垂直多関節型ロボットで自動化した<sup>23</sup>（1988）。また他の大手自動車メーカーでも多かれ少なかれ組立の自動化に挑戦した。

三菱電機は「ムーブマスター RV-M1」（写真4.26）（1987）（パルスモータ駆動、オープンループ制御、電動垂直多関節系、自由度4）という小型ロボットを開発し教育市場という新しい市場を開拓した。パソコンのプリンタ・ポートに接続して動かす教育用ロボット、ないし玩具ロボットとして34万5千円という低価格で販売された。低価格の魅力で生産用にも使用された例があるが、パルスモータの脱調トラブルの問題があり、程なくDCモータに切り替わった。その後、簡易な製造用の小型ロボットとしても多用されるようになり小型産業用ロボットの先駆者となりロボットの大衆化に貢献した。

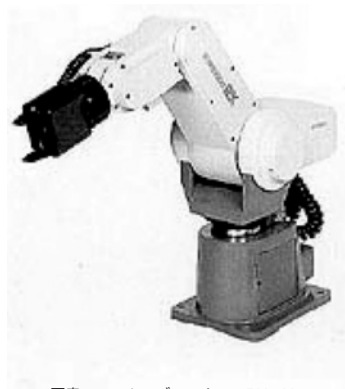


写真4.26 ムーブマスター RV-M1

物流部門の省力化にも産業用ロボットが進出するようになった<sup>24</sup>。不二輸送機は品物をパレットに移載する作業の省力に着目し、AC-1（写真4.27）というパレタイジング専用ロボットを開発した（1982）（円筒座標系 電動サーボ PTP制御）。パレタイジング用として一般販売用に作られた最初のものと思われる。ついで三機工業もパレタイジング・ロボット「SD-1」を開発（円筒座標系 電動サーボ PTP制御）（1983）した。その後、ロボットメーカー、物流機器メーカーがこの分野に参入し新しく物流分野市場が開けるきっかけとなった。



写真4.27 AC-1

この時期に家電、半導体産業の躍進と共に新しい市場が開け始めた。川崎重工はクリーン環境の産業用ロボット<sup>25</sup>としてロボットPシリーズ<sup>26</sup>を開発した（1983）。パソコン市場、半導体市場の急成長によりハードディスク製造、半導体ウエーファ搬送をクリーン環境で実現するクリーンロボットが登場した。半導体ウエーファの歩留まり向上のためウエーファの寸法が6インチ、8インチ、12インチと増大の一途を辿り人間労働によるハンドリングが困難となってきた。また、演算速度の高速化のためチップ上の回路の線幅が細密の一途を辿り、製造過程に微小な塵の存在が問題となりクリーンな環境で無人で製造することが必要となってきた。塵あるいは揮発成分でクリーンな環境を汚染することのないロボットが求められるようになった。ローツェは1986年、塵の発生を防止する駆動軸の磁性流体シール、塵の附着を防止するセラミックフィンガーなどの技術によるクリーンロボットPR302（写真4.28）を開発した。国産のクリーンロボットの先駆的商品である。

またテレビ用ブラウン管の大型化に伴いブラウン管ハンドリング用ロボットが三機工業によって開発された（1977）<sup>27</sup>。半導体のボンディングにロボット技術が適用されるようになったのもこの頃である<sup>28</sup>。

更に新世代の半導体ではさらに高度なクリーン環境として真空環境で製造することが求められるようになった。安川電機は真空ロボットを開発した。真空環境でも使用できるための熱伝達方式その他の技術が必要となった。磨耗するブラシを持たないACサーボモータが実用化されたことも大きな助けとなった。

23 Nakamura et al 「NedCar's "final assembly" line with automatic islands for four car types」 Assembly Automation, Vol.18, Nr.2, 1998は三菱自動車水島製作所のロボット化された組立ラインをそのまま三菱/ボルボのオランダ合併企業に踏襲したものである。

24 池田「パレタイザ、デパレタイザの現状、使用例と将来展望」ロボット、日本ロボット工業会、75号、pp27-32（1990）

25 「クリーンルームロボット」特集、ロボット、日本ロボット工業会、63号、pp28-33（1988）

26 加納「クリーンロボットと適用例」ロボット、日本ロボット工業会、63号、pp28-33（1988）

27 古賀「ブラウン管ハンドリング用ロボットシステム」ロボット、日本ロボット工業会、19号、pp53（1978）

28 丹下他「自動ボンディングシステム」ロボット、日本ロボット工業会、13号、pp59-64（1976）



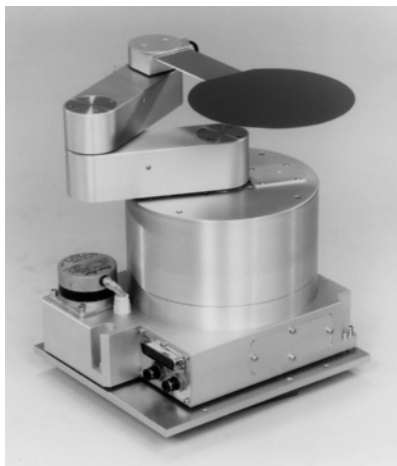


写真4.28 クリーンロボット

1980年代中ごろから、半導体の大容量化、微細構造化に対応するため産業用ロボットの適用が始まった。製造工程など清潔な環境で使用するのが目的で、動作時に出る塵を極力抑えたクリーンルーム用ロボットが開発された。AVH0.5-R5/I (写真4.29) さらに、真空環境で動作するロボットも開発された。セイコーエプソン Sシリーズなどがそうである。



写真4.29 セルキャリアアーエース AVH0.5-R5/I

新しい応用としてバリ取りが試みられた。ヤマハは A-1 (1987) (円筒座標系 CP・サーボ制御 自由度6 電動) をプラスチック成型品のバリ取り用に、豊田工機は RA6-5X70 (1988) (垂直多関節CP・サーボ制御 自由度6 電動) を鋳物のバリ取り用に適用した。バリ取りにはロボット自体の剛性、バリ取り力制御など簡単でない問題があり未だ大きな発展には至っていない<sup>29</sup>。

1991年安川電機は、「ロボットがロボットを作る工

場」とのスローガンのもとに産業用ロボットの専用工場「モートマンセンター」(写真4.30) を建設した<sup>30</sup>。ロボットをCIMの概念によるロボット生産に適用した世界最初の試みであった。視覚センサ付知能ロボットによってロボットの組立を実現した。



写真4.30 モートマンセンタに於けるロボットによるロボットの組み立て

電気駆動の場合、サーボモータの回転数そのままでは産業用ロボットには速すぎるので、減速の手段が必要である。回転運動を直線運動に変換する必要もあり減速機のほかボールねじが採用されることもあった。1980年代後半になって小型・高減速比の特殊構造減速機帝人製機のRV減速機、住友重機のサイクロコンバータ、ハーモニックドライブシステムのハーモニックドライブが開発され、産業用ロボットの高性能化に貢献した。こうして多くのロボットメーカーが、ボールねじ構造から減速機とリンク機構、あるいは減速機単独へと移行していった。超低速回転の電動機を使って減速機やリンク機構なしにロボットを駆動するDD (ダイレクトドライブ) を採用するロボットも現れたがエネルギー効率が悪く発熱、熱変形の問題がある、停電時の保持ができない、超多極電動機であるため機械加工コストが高くなるなどの理由で一般には普及しなかった。減速機の潤滑材による汚染の問題を嫌うクリーンロボット以外には実用されていない。

ブリヂストンは「ソフトアーム」(後に「ラバチュエータ」)(1985) (空気圧サーボ制御 繰り返し精度 $\pm 2\text{mm}$ 程度) と呼ばれるゴムを使ったフレキシブルな構造のアクチュエータを開発した。空気圧作動する柔軟なアクチュエータで、防爆環境での使用にも耐えるものであるが製造業用への普及は進まなかったようである。

### (3) 高度成長期のまとめ

40年のロボットの歴史の中での最大の変化のひとつとして「電動ロボット化」、すなわちロボットを動かす動力源が油圧や空気圧から電動モータへ置き換わっ

29 「研磨バリ取りロボット」特集、ロボット、日本ロボット工業会、55号、pp28-33 (1987)

30 Kusuda et al 「A Computer Integrated Manufacturing System for Industrial Robot Production」 Proceedings of the 22nd International Symposium for Industrial Robots, (1991)



たことが挙げられる。単なる駆動源の電氣化に留まらず制御部も電動モータと親和性の高いエレクトロニクス技術が主体になり、産業用ロボットは完全にメカトロニクス製品となった。

1980年からロボット産業は急激な立ち上がりを始める。1980年が日本の「ロボット元年」と呼ばれる所以である。自動車工業では、スポット溶接、アーク溶接、塗装などはロボットで行われるのが常識となった。組立、艤装といった作業にもロボットが進出した。一方、電子組立作業、小型機械部品組立作業にもロボットが進出した。現在の主力市場である自動車工業、電子組立産業はこの時代に確立された。

スポット溶接、アーク溶接、小型組立、電子部品組立、塗装、物流……といった産業用ロボット産業の主要用途もこの時代に確立された。高度成長の波に乗ってロボットメーカは繁忙を極めた。垂直多関節型、SCARA型により産業用ロボットの形態が一変する変革はあったが、高度成長期の旺盛なロボット需要に応えるための既存技術の横展開、マイクロエレクトロニクス化への対応に追われ、ロボットの知能化、高度利用などに対する画期的に新しい分野の開拓には手が回らなかった感はある。これが次のバブル崩壊期に影を投げかける結果となったと思われる。

低価格・高性能のマイクロプロセッサによって産業用ロボットの機能は飛躍的に高度化されていった。この機能はソフトウェアによって実現される。ソフトウェア開発費が巨大化していった産業用ロボット事業の収益性に大きく影響するようになった。固定費であるソフトウェア開発費をどのようにして回収していけるか、従来と異なった事業運営、市場政策が必要となってきた。

産業用ロボットの形態はマイクロプロセッサ制御、DCサーボモータ駆動の垂直多関節系、または水平多関節系にほぼ統一された。インクリメンタルエンコーダをバッテリーでバックアップする方式が定着した。電源を落とした場合でも最終位置を保存し、再通電でその姿勢・位置から動作させることができるので原点復帰の手間が要らなくなった。動力伝達機構はボールねじから遊星歯車式減速機へ移行した。初期のハーモニックドライブに加えて、1980年代終わり頃からRV減速機（帝人製機）が出現、産業用ロボットの高精度化、高剛性化に貢献した。

## 4.5 バブル崩壊後(1990年代前半以後)

### (1) 時代の背景

バブル経済の崩壊とともに製造業を取り巻く環境は

一変した。国内の新規設備投資は停滞した。高度成長時代のやみくもな自動化への反省が高まった。今までの量の拡大、無人化を目指す自動化ではなく、人間の生きがいを実現する生産システムが注目を集めるようになった。行き過ぎた自動化への反省から、人間を活用する新しい生産形式の模索が始まっている。

製造設備の中国を始めとする発展途上国への移転が始まり産業の空洞化の危機が指摘されるようになった。

一方、パソコン、インターネットが普及し、社会の情報化が一挙に加速している。これを反映して新しい産業も立ち上がっている。半導体の高密度化・大容量化が進展しロボットによる組立、ハンドリングのニーズが高まった。またIT関連電子機の需要が高まり自動化機器の新しい市場となっている。

関連技術としては、ACサーボモータの革新、現代制御理論の活用、パソコン関連技術の進展、ITの発展など新しい局面を迎えている。

産業用ロボットの発展過程で開発された技術を転用して非製造業用ロボット、サービスロボット、人間型ロボット、2足歩行ロボットといった新しい話題が社会を賑わすようになっている。

### (2) ロボット産業技術

今まで、国内の自動車産業、電子組立産業を主力市場として発展してきたロボット産業に大きな転機が訪れた。

この時代、国内の設備投資は減少したが、救いとなったのは海外輸出である。日本が先行していた自動車産業、電子組立産業へのロボット応用が海外諸国に認識されるようになり、日本に遅れてロボットの導入が立ち上がってきた。特に東南アジア諸国の新規分野の投資では最新のFA技術が求められロボットの輸出が急増した。ロボット出荷量の半分が海外輸出で占められるようになった。日本で調達され、海外の新設工場で使用される物を含めると海外稼働分の方が国内分より多くなったと思われる。

一方、ロボットメーカは縮小した国内市場のパイを獲得するために競争力強化のコストダウンと地道な性能、品質の向上に注力せざるを得なかった。また、生き残りのため、不得意分野からは撤退し、得意分野に特化しようとする動きが顕著となった。ロボット本体、コントローラなどすべてを自社生産するのは止め、他社からOEM供給してもらう、他社と共同開発する。システムインテグレーションに注力するなどの新しい政策を打ち出す企業が増えている。

コストダウンのため材料、部品の調達、生産方式の



改善などあらゆる努力がなされたが、特に設計ではロボットの軽量化、小型化によるコストダウンが大きく寄与した。一つは、超小型軽量のACサーボモータの出現によるロボットの小型化である。安川電機はACサーボモータの重量を従来の1/3に削減した画期的なシグマモータ<sup>31・32</sup>を開発した（写真4.31）。アクチュエータが小型軽量となった結果、これを関節部分に設置することも可能となり平行リンクを廃止した関節埋め込み（リンクレス）型多関節構造（写真4.32）が可能となった。



写真4.31 シグマモータ



写真4.32 関節埋め込み（リンクレス）型構造

#### 〈ACサーボモータの革命〉

1992年、安川電機はACサーボモータの重量を従来の1/3程度に軽量化する画期的な新技術を開発し、シグマモータとして製品化した。三菱電機、松下電器、山洋電気などが続いた。もともとコンピュータ周辺機器用に開発されたモータの新方式であったが、工作機、産業機器に対する高性能化にも適用されるようになった。特にロボットでは駆動源の力／質量比が飛躍的に改善された結果、本体を軽量化できる、平行リンクを廃して関節にモータを直接埋め込むことを可能にするなど、ロボット構造の変革をもたらした。

ACサーボモータは、特に磁性材料の高性能化によって小型化が進んできたが、従来の方式の延長では殆ど限界に近づいていた。これを解決したのがモータの原始的な巻線方式である集中巻への回帰である。モータが発明された当時

モータの巻線は図（図4.3）のようにスロットという溝にぐるぐる電線を巻きつける方式が採用されていた。しかしこの巻線で発生する回転磁界は理想的な正弦波の変化とはならず、回転はギクシャクしたものとなる。そこで分布巻と言う巻線方式が発明された。磁極形状、溝構造などをカットアンドトライ式に経験的に改善して行ってスムーズな回転が得られるようになった。これがモータの常識となり集中巻はごく小型のおもちゃ用のモータに残っているに留まっていた。分布巻は上記のような利点があるものの渡り線のために直接磁界発生に役に立たない電線部分が多く、集中巻に比べて発生できる磁束密度ははるかに低い。集中巻を採用することが強力な磁界を発生することができる可能性があることに着目したのである。コギング対策として、磁極の形状、極数の組み合わせなどコンピュータのシミュレーションによって実機を作ることなく確認することができるようになったことが大きく貢献した。

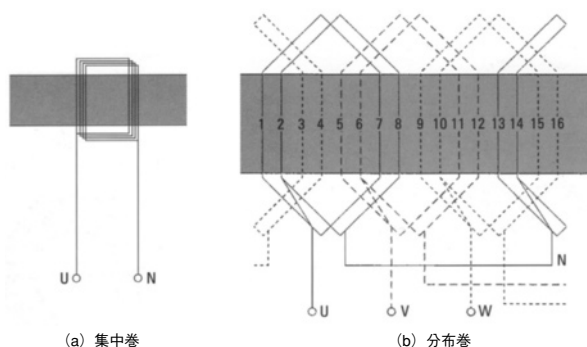


図4.3 モータの巻線形式

一方、ロボットの機構部を軽量化しようとするすると剛性が低下して振動が発生する問題がある。この振動を現代制御理論で解決することができた。

#### 〈現代制御理論〉

1960年頃より制御工学の分野に現代制御理論という新しい理論が出現した。それまでのいわゆる古典制御理論は、入力と出力の関係を伝達関数という表現で記述する。この理論は、例えば、PID制御のパラメータをどのように選べばよいかを試行錯誤的に求める場合などには有用な実用的な方法で現在も多用されている。現代制御理論では、制御系の内部状態をあらわす状態変数という概念を導入して制御システムの状態を微分方程式で厳密に記述する。最適システムを設計することができる、多入力多出力のシステムにも適用できるなどの可能性を示すものであったが、あまりにも複雑すぎて、当初は、理論倒れで実用性がないというという批判もあった。その後、マイクロプロセッサの登場によりコンピュータの演算能力が経済的に利用できるようになったこと、産業用ロボットに代表されるメカトロ機器という適用対象が大きく開けたことから実用上にも大きな効果をあげるようになった。

ロボットの構造体で異常な振動が発生するとサーボモータの電流も大きく変動する。電流の変化を検出。現代制御理論のオブザーバの手法で処理し電源周波数を変えて振動を抑制する方法が一般的である。この技術もほぼ同じ時期

31 Kusuda 「New generation servomotors」, Assembly Automation vol.19.Nr.3, 1999, pp190-199

32 「新世代のACサーボモータ」日経メカニカル、1994、3-21号 pp36-38



に多くのメーカーで行われ先行メーカーを特定できない。産業用ロボットの高機能化、低価格化に貢献する一方、産業用ロボットが現代制御理論の実用化に大きく寄与しているともいえる。

テレビの大型化、ITブームによって液晶パネル、プラズマディスプレイパネルの需要が急増しているのに呼応してガラス原板がますます大型化している。100-200kg程度の重量のガラス原板をハンドリングするためにガラスのたわみを補正する機能などを持った水平多関節型の特種ロボットが実用され産業用ロボットの新たな用途の地位を確立した（写真4.33）。



写真4.33 ガラス原板ハンドリングロボット

コントローラ、ロボット制御技術でも競争力を高める努力が続けられた。

ダイヘンは1991年に、複数台のロボットを同期協調制御する方法「シンクロモーション」を開発した。アーク溶接の溶融部は溶融金属が重力の影響を受けるので溶接姿勢によって溶接品質が左右される。ワークをロボットで把持し、もう一つ別のロボットに溶接トーチを持たせ、溶接線の傾きが一定となるよう2台のロボットを協調運転することにより安定した高品質の溶接が達成される。作業プログラムを手動教示する時にも協調させて手動運転する技法も開発された。この技術を利用して複数台の溶接ロボットを同期協調運転できるようになった（写真4.34）。

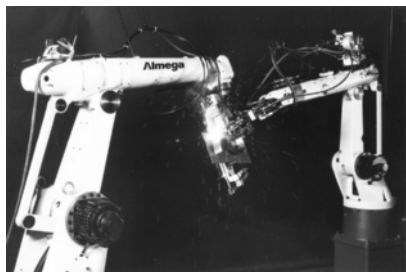


写真4.34 同期協調運転

産業用ロボットの世界では視覚センサ、力覚センサなどを使って作業プログラムを自動的に修正するものを知能ロボットに分類している。ロボットの知能化の

試みは昔から行われていたが、商品として一般化する段階にはいたっていなかった。1995年ファナックは双腕知能ロボットシステム（写真4.35）を自社の小型ロボット組立に実用化した。手首に3次元ビジョンセンサと力センサを搭載する各6軸の2本の腕が、モータ、減速機、ベアリング等を組み立てるもので、双腕知能ロボットを組立作業に適用した最初の試みである。ファナックは2001年この技術を発展させた知能ロボットの商品化を行い「FANUC ROBOT R-2000iA」（写真4.36）をはじめとする知能ロボット「iシリーズ」として販売を開始した。知能ロボットの一般化への先駆的試みである。



写真4.35 双腕知能ロボット

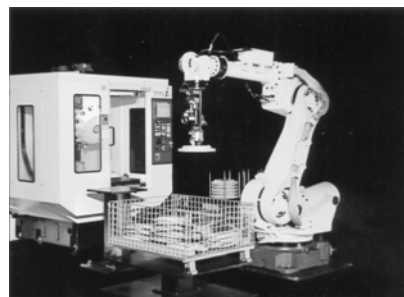


写真4.36 FANUC ROBOT R-2000iA

電動産業用ロボットの大型化が更に進展し可搬質量700kgのものまで登場した。また垂直多関節型ロボットの欠点として、直列に関節をつないでいく構造であるため腕の剛性が乏しいことがあげられる。複数の軸を並列に動作させるパラレルリンクという構造<sup>33</sup>（図4.4）がフライトシミュレータや工作機主軸に適用されたことに触発され、高速動作、高剛性が必要とされる用途に対してパラレルメカニズム型産業用ロボットがスウェーデンで開発された。日立精機がスイスのデモレ社のパラレルメカニズムロボットDELTAを輸入販売し高速の食品小物ハンドリングに適用した（図4.4）（1995）。またファナックがパラレルメカニズム形スポット溶接ロボットを試作したがまだ普及には程遠い現状である。

33 「パラレルメカニズム」特集 日本ロボット学会誌vol.10, Nr.6, 1992



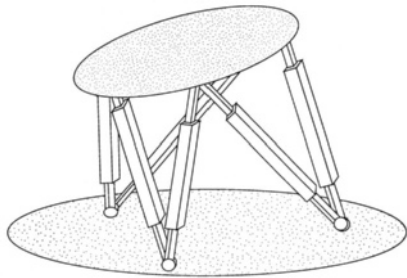


図4.4 パラレルリンク型ロボット

1998年、デンソー安城製作所は移動ロボットを使って生産量の変動に自律的に対応する量変動システム<sup>34</sup> (写真4.37)を自動車用スタート組立ラインに適用した。

政府プロジェクトとしてマイクロマシンの開発が始まり<sup>35</sup>、その一環としてマイクロファクトリーと呼ばれる超小型の製造設備が開発されているがまだその実用化はまだである。

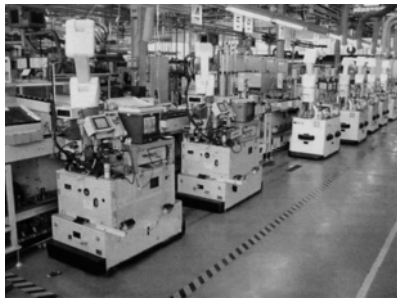


写真4.37 量変動対応型生産システム

この時代はパソコンが一般社会に普及した時代である。アメリカのGMの提唱によって、工作機制御用のパソコンNCという概念がスタートした。最初の触れ込みは市販の低価格・高処理能力の汎用PCでサーボモータ制御機能までまかない従来のNCをそっくり置き換えようという意気込みだった。ロボットもこの影響を受けてパソコン・ロボット・コントローラが検討されている。しかし、工業用のコントローラとしてはパソコンの信頼性、リアルタイムの制御性などまだ改善の余地が残されていることが明らかとなり一時の勢いはないようである。しかし、パソコンの低価格と高い情報処理能力は極めて魅力的であり、産業用高信頼性のパソコンの使用、リアルタイムOSの採用、必要に応じてサーボコントローラボードを援用するなど今後パソコンを今一層活用する方向に進むことは必至と思われる。

1980年代にGM社によって提唱された工場内通信ネットワークMAP (Manufacturing Automation Protocol) は実用化には失敗したが、工場内の通信機

能に対する関心を高めた功績は大きい。工場内の通信ネットワークに関してはアメリカ、日本、ヨーロッパで色々な方式が提案されていて、各ロボットメーカーでもその対応に迫られている。そのなかで日本ロボット工業会はORiN<sup>36</sup> (オンライン: Open Robot Interface) という方式を提案しているがこれはロボットだけに留まらず工作機、PLCなどあらゆる制御機器を統一的に処理できるものでこの標準化が進めば貢献するところ多大なものがあるだろう。

### (3) バブル崩壊後のまとめ

バブル崩壊後は、激減した国内需要に対応するため従来製品の競争力強化のためコストダウン、機能アップの懸命な努力が行われこれが日本ロボット産業の体質強化に大きく寄与した。国内市場に代わる海外への輸出が大きく伸びたのにはこれが大きく貢献したと思われる。しかしその一方で、従来のような安易な取り組みでは事業を継続できないとして、ロボット事業からの撤退、自社製造の断念・他社からのOEM供給への切り替え、システム事業への特化、過去のライバル企業との連携・共同事業などの生き残りのための努力が行われた。

半導体産業、液晶・プラズマディスプレイパネル、携帯電話などIT分野の新しい需要に対応して新しい用途が開けたが基本的には従来の利用技術の転用・展開によるものでロボット産業の画期的な新局面が拓けたわけではない。つぎの時代に向けての飛躍のために模索を行っていた時代なのかもしれない。

特記すべき変化としては、新世代ACサーボモータの採用、リンクレス関節埋め込み構造の普及、マイクロプロセッサの活用による制御性の向上、現代制御理論の適用、コストの大幅な低下、ITに対する対応などがあげられる。知能ロボットの商品化、マイクロマシン対応のマニピュレータ、パラレルメカニズムの試用などの新局面技術は今後の評価にまたねばならない。

34 花井、土屋他 市場の不確実性に順応する生産システム(APS)の開発:自動車用スタートラインへの適用、精密工学会誌、Vol. 65 Num. 8 pp.1085-1091 (1999.08)

35 「マイクロマシン技術」特集 日本ロボット学会誌vol. 19, Nr. 3, 2001

36 「製造システムのオープン化の動向とOriNの開発事例」ロボット、vol.155、日本ロボット工業会、pp1-40 (2003)



# 5 | 産業用ロボットの発展の系統化考察

## 5.1 産業用ロボット技術の発展系統まとめ

産業用ロボット技術は、制御技術、エレクトロニクス、ソフトウェア、駆動源、利用技術などの発展が互いに関連しあって発展してきた。

初期においては、当時実用されていた産業機械、工作機械の既成機械技術、制御技術を転用する形で産業用ロボット技術が形成されていった。電気式駆動は実用化されておらず、油空圧を動力とし当時のNC工作機の制御技術を転用した極座標系、円筒座標系の原始的なロボットから出発した。当初は価格も高くなかなか適当な用途を見出せなかったが、ダイキャスト機械のアンローディング、スポット溶接、塗装といった危険作業、重作業、悪環境用途に対して適用が始まった。

保守性、制御性の悪い油空圧駆動に代わって、DCサーボモータのロボットへの適用が模索されるようになった。性能、特にパワー/重量比の改善が進んできたDCサーボモータがNC工作機に採用されるようになるにともない、電気系産業用ロボットメーカーによって産業用ロボット駆動の電氣化が始まった。

ミニコンピュータの援用などコンピュータ技術を応用する新しい試みも始まったが経済性の面から一部への適用に留まり、制御装置はハードウェア論理によるエレクトロニクスによって構成されるのが主流であった。

1970年代にマイクロプロセッサが登場し、ハードウェア論理に代わってソフトウェアによって機能が実現されるようになると制御の形態は一変した。より高度の機能が実現できる可能性が生まれ産業用ロボットの機能は飛躍的に向上し、制御は複雑、高度化の一途を辿るようになった。

マイクロプロセッサの登場により、その演算機能を利用してDCサーボモータを活用する新しい多関節座標系ロボット構造が出現し、産業用ロボットの新時代がもたらされた。当初はツール持ちアーク溶接という可搬質量数キログラム程度の小型ロボットに適用されるに留まっていたが、大容量のDCサーボモータが開発され、スポット溶接、重量物ハンドリングといった大容量の産業用ロボットにも電気式多関節座標系ロボット構造が適用されるようになった。多関節構造によ

り、より複雑な運動、作業対象に対するより自由なアクセスが可能となり、産業用ロボットの適用可能分野が広がった。その結果、電動多関節形のロボット構造が主流に取って代わり、従来の極座標・円筒座標系、油空圧系のロボットは単純な低辺市場で残るだけとなった。この間の駆動系、座標系の変遷を図5.1<sup>1</sup>、5.2<sup>2</sup>に示している。

日本では高度成長時代を迎え、労働力不足問題が顕在化し産業用ロボットによる自動化のニーズが異常なまでに高まった。スポット溶接、アーク溶接、組立、切断、ハンドリングといった新しい用途が広がっていくとともに機能の高度化、取り扱い性、保守性への要求がますます高まっていった。

山梨大学の牧野教授は組立作業の自動化に不可欠である嵌め合いのコンプライアンスの問題を解決する新構造によるSCARAロボットを発明し組立のロボット化の新時代を切り開いた。SCARAロボットは小型組立の定番となり今日に至っている。

DCサーボモータによって産業用ロボットのメンテナンス性は飛躍的に改善されたが、依然として消耗部品であるブラシの存在が保守のネックとなっていた。ACサーボモータ(ブラシレスDCサーボモータ)が登場し、産業用ロボットに適用されこの問題も解決された。

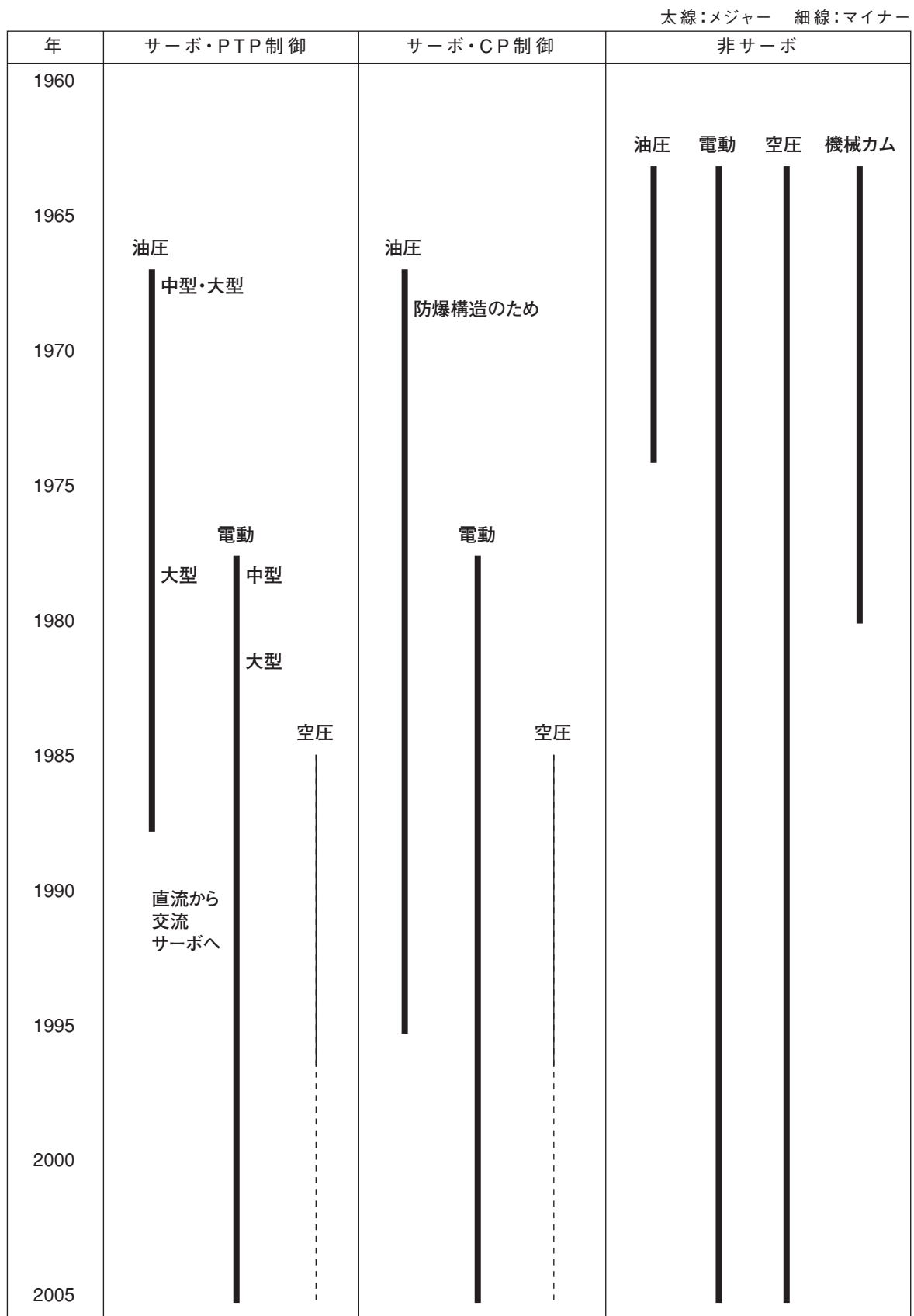
これを、さらに発展させたのが超小型軽量のACサーボモータの出現である。ACサーボモータの重量を一挙に従来の1/3に削減する画期的な技術開発が行われた。この小型軽量アクチュエータを関節部分に設置することも可能となり平行リンクを廃止した関節埋め込み(リンクレス)型多関節構造が使われるようになった。産業用ロボットの軽量化、低価格化に大きく寄与した。

ロボットコントローラにマイクロプロセッサが採用されたことによってロボットの情報処理能力は高まり、操作者とのインターフェースの改善、性能の向上、高機能化、記憶容量増大など産業用ロボットの機能は飛躍的に向上していった。マイクロプロセッサが8ビット、16ビット、32ビット、64ビットと発展し、メモリーも磁気メモリーから低価格の大容量半導体メモリーに転換していくにつれ、産業用ロボットの制御能力、情報処理機能はますます強力になっていった。

1 社団法人日本ロボット工業会「国産ロボット技術発達の系統化に関する調査」 国立科学博物館「技術の系統化調査報告」 Vol.3 2003、付表1.6

2 社団法人日本ロボット工業会「国産ロボット技術発達の系統化に関する調査」 国立科学博物館「技術の系統化調査報告」 Vol.3 2003、付表1.5

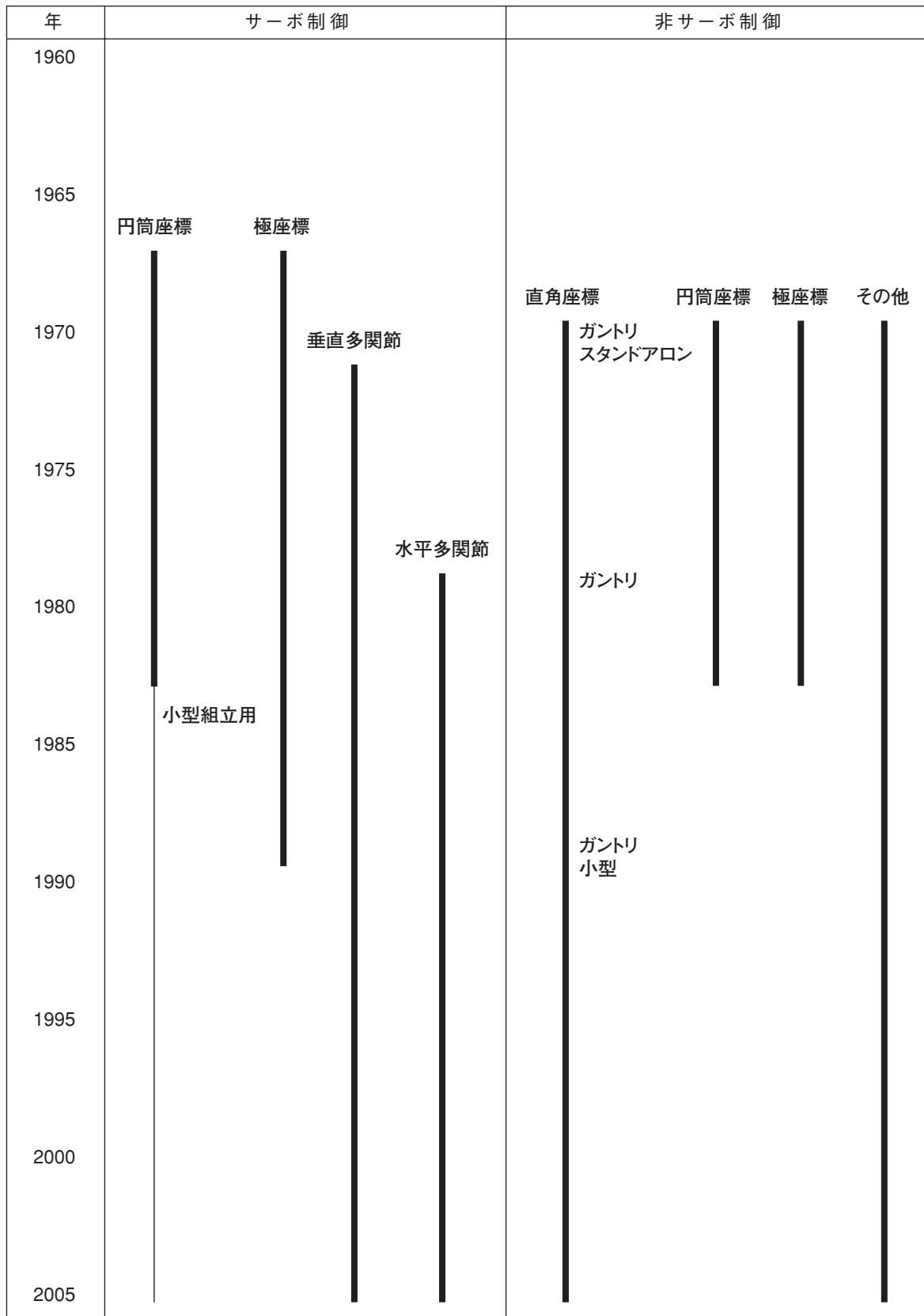




出典：国立科学博物館 技術の系統化調査報告 Vol3 2003「国産ロボット技術発達の系統化に関する調査」

図5.1 駆動系の変遷





出典：国立科学博物館 技術の系統化調査報告 Vol.3 2003「国産ロボット技術発達の系統化に関する調査」

図5.2 座標系の変遷



マイクロプロセッサによって、従来、理論の世界だけに存在していた現代制御理論が産業用ロボットの現実世界に適用されるようになった。高速・高精度の動作軌跡制御、スポット溶接ロボットの高速位置決め制御、衝突検出などの従来実現されていなかった機能が実現されるようになった。ロボットは、動作速度を上げコストを下げるための軽量化が大きな課題である。しかし単純に軽量構造とただけではそのまま剛性の低下という新しい問題を引き起こす。ここで、剛性の低いロボットから高性能を引き出すために現代制御理論による制振制御が実現されコストダウンに大きく寄与する新局面への展開も行われた。バブル崩壊後産業用ロボットの需要の急落に伴ってメーカは激しい価格競争に直面したがマイクロプロセッサによる制振制御は重量の軽量化によるコストダウンに大きな効果を発揮した。

ACサーボモータが実用化されたのも低価格のマイクロプロセッサ出現のおかげである。ACサーボモータには制御のための複雑な演算が必要とされる。これにはサーボモータ制御専用の別のマイクロプロセッサが使われるが、この存在を活用してサーボ性能の向上に現代制御理論が適用されるようになり産業用ロボットの運動機能は更に向上していった。

産業用ロボットの制御が従来のハード論理に代わって低価格のマイクロプロセッサと大容量半導体メモリで実現されるようになると、ロボットの機能を実現するためのソフトウェア規模はますます増大の一途を辿り、産業ロボット事業の収益構造は一変した。ソフトウェア開発のための開発固定費の負担が大きくなり、開発費を回収できない小メーカの脱落が始まり、業界の再編成が進んでいった。

バブル経済の終焉と共に産業用ロボットは新しい局面を迎えた。一時の行きすぎた無人化に対する反省から、一時、ロボットを使わない人間中心の生産がこれからの方向とする極端な揺り戻しさえあったが、闇雲な自動化ではなく本当に人間に役に立つロボット化が求められるようになっている。

一方、IT社会、IT技術の急激な進展により産業用ロボットにも新しい動きが始まった。半導体製造、IT機器関連の新しい市場が拓けている。パソコン利用、インターネット環境への適合、ネットワーキング、オープン化といった流れによって産業用ロボット技術も変貌しようとしている。

また、近年、ようやく非製造業ロボットが社会の注目を集めるようになってきた。産業用ロボットによって実用化された技術基盤の上に非製造業ロボットに不

可欠な自律性技術が確立されると、これが産業用ロボットにフィードバックされ、ロボットの新しい時代が到来することが期待されている。

## 5.2 産業用ロボット応用の発展過程

産業用ロボットの機能が向上するとともに新しい用途への適用が始まり、ここで生じた新しい問題を解決するために新しい技術が開発されていった。センサ、パターン認識、制御技術、CADプログラミング、シミュレーション、通信技術といった関連技術の発展により産業用ロボットの適用範囲が広がっていった。産業用ロボットの利用技術、用途別の発展過程を見てみる。

### (1) スポット溶接

100kg程度のスポット溶接ガンを溶接点から次の溶接点へ短時間に（30－50mmを0.4ミリ秒以下）高い精度（ $\pm 0.25\text{mm}$ ）で移動する能力が生産性と溶接品質に影響する。当初は油圧駆動の極座標型の産業用ロボットで実現されていたが、大型DCサーボモータの開発による電動化によって保守性が向上した。マイクロプロセッサによる演算機能の活用による垂直多関節構造が採用され回りこみ性が向上し、これが現在の主流となっている。

自動車製造のメインラインであるボディ（フロア、サイドパネル、ルーフ……）のスポット溶接に当初から導入されたことにより、信頼性に対する要求が極めて高く、ユーザとメーカは苦勞しながらも信頼性の向上を実現していった。

短距離を高速に移動するための高い加減速度を実現するために腕の軽量化、低慣性、高剛性の構造、減速機構の採用によって対応していった。腕の軽量化、高剛性化という相矛盾する要求に対してフィードフォワード制御、オブザーバといった現代制御理論が適用され効果を発揮している。

産業用ロボットによって大重量の溶接ガンを把持できるようになったので、溶接ガンに変圧器を搭載し、大電圧小電流の配線ケーブルで電力が供給できるようになった。さらに従来の機械式の溶接点に電極を打ち付ける機械式ガンに代わってサーボモータによって加圧するサーボガンが開発され騒音、打痕の低減が実現された。

作業プログラミングは自動車設計のCADデータから自動的に生成するオフラインプログラミングの技術が開発された。

産業用ロボットによるスポット溶接によって溶接点



位置、溶接条件が一定、作業者を重労働から解放した。自動車工業では1ラインに100数十台のスポット溶接ロボットが使用されるほどになっている。設置スペース削減のためのスポット溶接専用の特殊構造が開発されている。

## (2) アーク溶接

溶接トーチを持って、対象ワークを定められた溶接軌跡に沿って連続的に溶接する用途である。軌跡精度と速度の一定性が溶接品質に影響する。溶接トーチの姿勢を自由に設定できることも必要である。サーボモータ、マイクロプロセッサによる垂直多関節構造によって複雑な形状の溶接が可能となりアーク溶接のロボット化が進展した。10kg程度の可搬質量の6軸垂直多関節ロボットが採用されている。対象ワークに応じて溶接条件が設定できるようロボットの操作性も重要である。そのため作業プログラムは、現場で作業者が手でアーク溶接ロボットを動作させ、その時の動作をアーク溶接ロボットが再現するティーチングプレイバック方式が採用されている。ワークの精度もまちまち、溶接ひずみの存在、といった問題があるので開始端を自動検出しアークセンサを用いて予めティーチングされた経路を修正する手法が開発されている。このような特質があるためアーク溶接に特化した周辺技術が開発されている。

ワーク持ちとして溶接姿勢の変更と前後のハンドリングを共用する使い方もある。また、1台のロボットでワークを把持、もう1台のロボットが溶接トーチを持ちお互いに最適姿勢関係を保ちながら協調溶接を行うことにより複雑な形状の溶接も可能になっている。

さらに、溶接ワーク、寸法などを設定すれば溶接データベースから最適の溶接条件を検索して自動的に溶接するエキスパートシステム化も開発されている。

## (3) 切断

ガス、ウォータージェット、プラズマ、レーザー光の発生源を産業用ロボットに持たせて切断するもので、ワークの材質、厚さ、形状、仕上がり精度、加工時間などから切断手段が選ばれる。比較的小量の生産で3次元的に複雑な切り口が可能であることが産業用ロボットを使用するメリットである。プレス加工を行った後に余分な縁部分を切り落とすことにも利用される。

## (4) ローディング、アンローディング

金属プレス機械、ダイカスト機械、プラスチック成型機などへの一定のワークのローディング、アンロ

ーディングは危険、単調な作業である。ロボットの動作としては原始的なシーケンス制御ロボットでも対応できるもので産業用ロボットの初期から適用された。種々の形状のワークを工作機械にローディング、アンローディングすることはFMS、機械加工システムの無人化に必須の条件であり、コンピュータによるワークの追跡、IDタグや視覚センサによるワークの認識などと連携するシステムが開発されている。

## (5) 糊付け・シーリング

自動車の窓ガラスの縁に沿って接着剤を塗布しボデイに取り付ける作業を産業用ロボットが行っている。3次元の空間の自由曲線経路に対して高速の一定線速度で一定量の接着剤を供給しなければならない。とくに窓ガラスのコーナ部分で進行方向を切り替える際の経路の精度も問題となる。これにも現代制御理論が適用されて効果をあげている。

## (6) ハンドリング

電動式産業用ロボットの大型化が実現するにつれて人間ではハンドリングできない重量物のハンドリングが産業用ロボットによって行われるようになった。液晶パネル、プラズマディスプレイパネル用の大型ガラス原板のハンドリングなどその例である。ガラスのたわみを補正する機能などを持った水平多関節型の特殊ロボットが実用され産業用ロボットの新用途の地位を確立した。また一般の重量物ハンドリングのために現在可搬質量700kg程度の垂直多関節型のものまで実現されるようになった。

パレットなどにバラ積みされている小物部品の形状、姿勢を認識して1個だけを取り出す作業は永く産業用ロボットの課題であった。ようやく視覚センサの高速化により実現されるようになってきている。

## (7) 加工

研磨、バリ取り、サンドブラスト、包丁研ぎなどが実用化された例があるが実際に産業用ロボットによって直接加工を行っている例は少ない。力センサ、視覚センサ、ファジー制御、機械的コンプライアンス、産業用ロボットの剛性などの問題があり従来積極的に取り組まれていなかった分野である。今後の自動化の課題である。

## (8) 塗装

悪環境から作業者を解放する用途として塗装ロボットが初期から開発された。塗装むらを作らないために



はスムーズな動きのCP制御が必要である。またライン化した塗装設備ではワークが搬送コンベアで流れてくるのでワークの移動に同期して塗装作業をするなどの特殊動作がある。発火性の溶剤に対する防爆の配慮、清掃の便といった実際上の対策が必要である。最近ではIT機器の急成長に伴い携帯電話など小型の塗装の用途も拡大している。

### (9) 組み立て

対象が広範にわたり対象に応じて色々なロボットが開発されている。

小型組立にはSCARAが開発された。機械的コンプライアンスを本質的に内蔵するSCARA構造によって小型組立の定番となった。

半導体のワイヤーボンディング作業には精度が良い直角座標型のものが多用されている。

自動車の最終組立ラインは、シート、ガソリタンク、ランプ……などを取り付けるもので大型の垂直多関節ロボットが利用される。

部品実装機は形状的には直交座標型の専用機的なものであるが人間には達成できない高速、高精度の電子部品装着を実現するもので、現在のIT時代を支える不可欠の存在である。

### (10) 入出荷

輸送パレットに箱物を積みつけ、あるいは取り出す作業には水平多関節型が適用されることが多い。パソコン技術を援用して箱物の寸法をインプットするとパレット上の最適の積みつけパターンを生成してそれに従って積みつけ作業を行うようになっている。

### (11) クリーン環境

ハードディスクなど精密機械、ますます超細密化の一途を辿る半導体の製造には人手によらない無人化によってクリーンな環境を実現しなければならなくなった。周囲環境を汚染することのない生産設備が必要となった。磨耗部分がないACサーボモータの出現、揮発性成分のない潤滑材などを採用したクリーン環境用ロボットが新しいロボットの市場を開いている。

## 5.3 発展系統図

以上の発展過程を系統的にまとめたのが図5.3、5.4である。

## 5.4 ロボット工学の確立とRT(Robot Technology)への発展

以上のように、初期の産業用ロボット技術は産業機械、工作機械技術を転用、その延長の上に始まった。マイクロプロセッサの登場、電気式駆動の採用により新しい多関節構造など産業用ロボット自体の構造の大変革がもたらされた。多関節構造によって動作の自由度は拡大しいろいろな用途に適用されるようになった。用途が多様化するにともなって新しく産業用ロボット向きの利用技術、周辺技術が開発され、ロボット工学としての独自の工学部門が確立されるに至った。

製造業の自動化のために発展してきた産業用ロボットの要素技術であるメカニズム、駆動技術、制御技術、センシング技術、通信技術、マンマシンインタフェース技術などは、従来の分野を越えて非製造業用のロボット分野へ、更には産業応用を超えて広く一般社会分野へも大きなインパクトを与えている。現在話題を集めている人間型ロボット、エンターテインメントロボットもこの産業用ロボットにおいて確立された技術の延長線上に開発されているのである。

日本ロボット工業会は、これまでの狭義のロボット概念から脱却し、「ロボット技術を活用した、実世界に働きかける機能を持つ知能化システム」を広い意味でのロボットとしてとらえ、その技術の総称を「RT-Robot Technology」と呼ぶことにし、その視点からRT産業戦略を構築することを提案している<sup>3</sup>。

産業用ロボット技術の発展過程をまとめるにあたり、産業用ロボットで確立されたロボット工学、さらにその発展形であるRTがもたらしている可能性をあらためて認識しなければならないと思う。

3 「平成12年度 21世紀におけるロボット社会創造のための技術戦略調査報告書」日本機械工業連合会、日本ロボット工業会（2001）



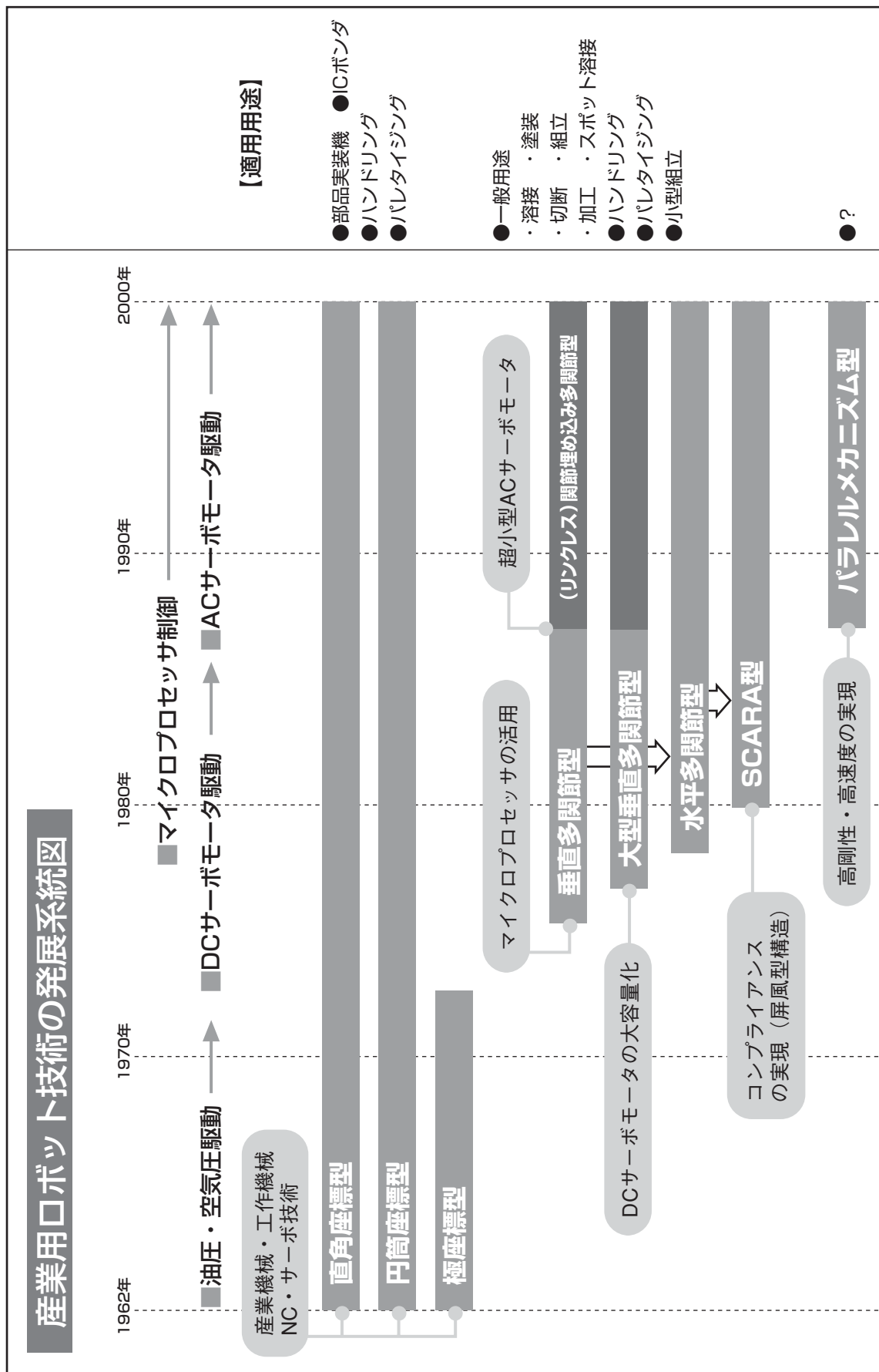
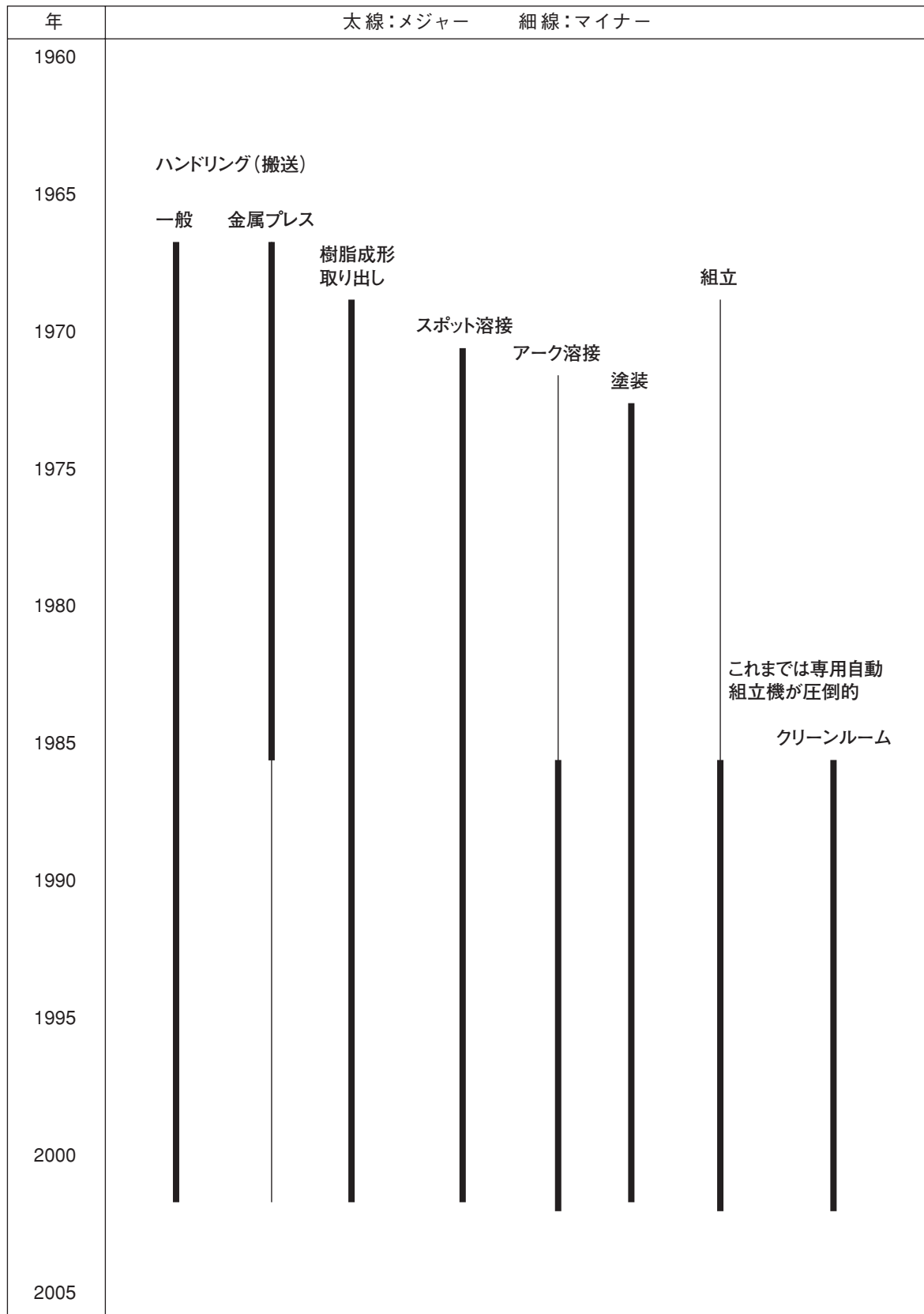


図5.3 産業用ロボットの発展系統図





出典：国立科学博物館 技術の系統化調査報告 Vol.3 2003「国産ロボット技術発達の系統化に関する調査」

図5.4 産業用ロボット応用の発展系統図



# 6 | 産業用ロボットと明日の日本経済

以上、日本の産業用ロボット技術発展過程の系統的分析を試みた。この分析から日本産業用ロボットの将来のために何を読み取るべきであろうか？

日本が世界一の産業用ロボット大国に発展したきっかけにはロボットに対する日本人独特の親近感、労使関係、ロボットを実現するための技術インフラストラクチャという恵まれた初期条件、環境が存在していた。しかし何といっても導入当時日本が高度成長期に入り自動化、省人化の膨大なニーズが巻き起こっていたことが決定的な要因である。バブル崩壊後の変化の時代に当たって日本の産業用ロボットは今までの延長線上に優位性を保ちつづけることができるかどうかは定かでない。日本のロボット産業を取り巻く環境を今一度考え直してみる必要があると考える。

## 6.1 産業用ロボットの現実

世界の産業用ロボットの70%は日本で生産されている。総使用台数の60%は日本国内で使用されている。日本は現在、群を抜いた産業用ロボット超大国なのであることは間違いない。これを支えているロボット工学の分野でも、人間型ロボットという先端技術で世界のトップを走っている。21世紀は、工場の中で活躍していた従来の製造業分野だけでなく建設、農業、防災、災害対策、福祉、医療、宇宙、海洋開発……はてはエンターテインメントなどあらゆる人間の活動にロボットが共存する時代になる。ロボット大国日本はこれからも世界をリードし続け、ロボット産業、ロボット技術が日本の経済を再生させるだろう。こういった調子の良い話がマスメディアを賑わしている。先の見通しが不透明の日本経済の中で私たちに未来への夢を与えてくれる話題なのであるが現実はそう生易しいものではない。

現在、自動車工業、電子工業がロボットなしでは成立しなくなっているのは事実だが、製造業の中で産業用ロボットが活躍しているのはほんの一握りの局面だけなのである。アーク溶接作業は典型的な3K労働で産業用ロボットの最大応用分野のひとつとなっているが、全アーク溶接機のうちアーク溶接ロボットが使われているのは僅か1割に満たないのである。また、今まで設置されている産業用ロボットの85%は大企業(300人以上の事業所)で使われていて、300人未満の

事業所には15%しか使われていない。ところで大企業に従事している労働者は総工場労働者全体の20%に過ぎず、残り80%の労働者は中小事業所で働いている。人間労働者に対するロボットの比率を大企業と中小企業で比べてみると、 $85/20 : 15/80 = 22.7 : 1$  なんと中小企業では大企業の1/20のロボット密度であることに驚くばかりなのである<sup>1</sup>。このような現状となっているのは何故なのだろうか？

バブル経済当時は、CIM、FA、無人化、ロボット化、コンピュータ化といったキーワードに代表されるオートメーションが日本製造業の方向であると信じられていたように思われる。あまりにも急激な生産規模の拡大に労働力市場が対応できなかったこともあって、労働力不足の恐怖感が蔓延していった。常に右肩上がりの成長が持続するという思い込みがあって、増収、人件費アップを前提とした大規模な自動化投資、無人化計画がつぎつぎに行われていった。短期間にはとてもペイしないような自動化投資、無人化計画がまかりとおっていたのである。産業用ロボットも、この自動化の前提条件が整備されている大企業の大規模工場の計画に対応して開発されていった。バブル経済が崩壊して低成長時代になると、オートメーションを取り囲む環境は全く様変わりとなった。生産量アップ、効率アップ、無人化といった狙いの重装備の自動化投資は過去のものとなった。コストダウン・合理化を実現するためには従来の「無人化することが良いことだ」という思い込みを捨てて、人間を適材適所に使っていく人間と機械の共生システムこそ本当のオートメーションの姿であるという潮流が主流となってきている<sup>2</sup>。しかしこの新しいパラダイムの中で使われる産業用ロボットについてはまだ解答を見出せていない。依然として従来路線の延長上に製品の改良を続け、従来技術を水平展開できる新用途を見出す努力を続けているのが現状だと思われる。新しい時代の要求に応えるためにはどのような発想の転換が必要なのであろうか<sup>3</sup>？

## 6.2 メカトロニクスの経済学

### (1) マイクロエレクトロニクス革命

誕生した当時の「プログラム可能な搬送機械」から現在の産業用ロボットというメカトロ製品に発展した

1 楠田「「オートメーション産業のこれから(1)」ロボット、Vol.130、1999、日本ロボット工業会、54-55ページ

2 例えば 田村他「これからの人が主役の組立ライン造り」、TOYOTA Technical Review, Vol.43, Nr. 32、1993

3 白水「新高齢化社会対話」日本機械学会誌、Vol.96、1993年、5月、86-90ページ



過程で最大のインパクトとなったのはマイクロプロセッサの登場にあったことは系統化分析で明らかである。この本質はどこにあったのか考えてみよう。

メカトロニクスという言葉はメカニズムとエレクトロニクスの二つの言葉から合成されたもので、機械と電子技術が一体となった新しい技術分野、産業分野を意味していることは言うまでもない。ところで、この機械と電子技術の融合という概念は古く昭和30年代ころから機電一体というスローガンで叫ばれていたことから見ても決して新しい概念ではない。これがメカトロニクスという言葉でこと新しく叫ばれるようになったのはなんといってもマイクロプロセッサの誕生、マイクロエレクトロニクス革命の到来によるものである。

普通世の中の商品というものは大量に製造されるものは機能が小規模なものであり、機能が複雑になり高度になればなるほど需要量は減ってくる（図6.1）。ねじやナットのような単純な機械要素の需要量とそれ等を組み合わせて作りあげられた例えばマシニングセンタの需要量を考えても当然のことである。この理屈か

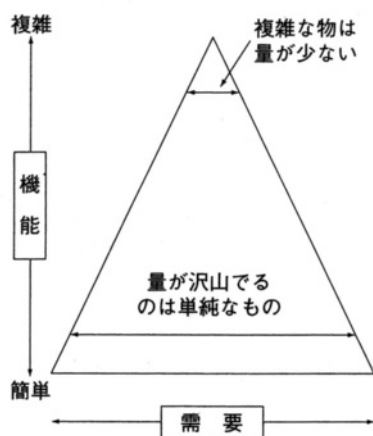


図6.1 機能の複雑さと需要量

ら言うと、コンピュータのような複雑、かつ大規模な商品に大量の需要があるのは不思議ということになる。しかし、これは言うまでもなくコンピュータの基本原則であるストアードプログラム方式のおかげである。コンピュータがどんな用途に使われようとも、その目的のための物として規定しているのはプログラム、ソフトウェアであり、ハードウェアは最終用途とは無関係に量産できる全くの標準品なのである。

マイクロプロセッサは半導体のLSI（大規模集積）技術で生産される。LSI生産のためには巨額の初期投資（固定費）が必要であるが一度生産が始まるとマイクロプロセッサ1個あたりのコスト（変動費）は微々たる物にすぎない。マイクロプロセッサが出現した当時は数十万円もしたチップが、需要量が増えればコス

トが下がる、下がれば新しい需要が創造される、これによってまたコストが下がる……という良循環によっていま人類は一昔前では想像もできないような安いコストで情報処理を実現することができるようになった（図6.2）。これは固定費事業であるLSI生産と大規模・複雑なものでありながら汎用性を失わないコンピュータの本質との絶妙の組み合わせで可能になった事実なのである。コンピュータ以外の全ての人工物はこのような性質を持っていないことを認識する必要がある。

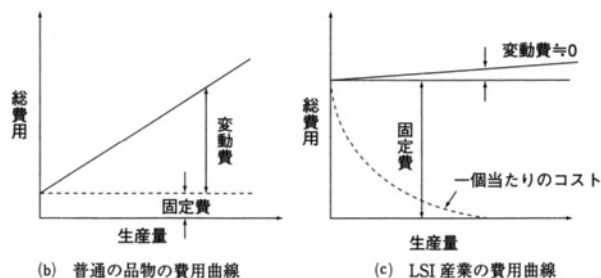


図6.2 コスト曲線

ところでコンピュータを特定の目的に振り向けるためのソフトウェア、プログラムの製造コストも開発に必要とされる固定費だけである。一度開発されたプログラムを何台、何百台、何万台の商品に適用しようとも総費用は変わらない。ソフトウェアの方も全くの固定費産業なのである。一度開発されたソフトウェアが数多くの商品に適用されるようになると商品1個あたりの開発費の割りかけは僅かなものにしかない。一昔前の企業の情報処理は、高価なメインフレームに見合ったその企業専用のソフトウェアを構築することで行われていた。現在は世の中に普及している多数のパソコンを対象とすると信じられないくらい低価格の汎用ソフトが利用できるようになったのもその例である。

このマイクロプロセッサとソフトウェアのコスト特性によって私たちは一昔前には考えることもできなかった低価格・高機能の新商品を享受できるようになった。これがメカトロニクスと従来の機電一体とを決定的に区別する本質なのである。時計、ワープロ、パソコン、カーナビ……といった製品などその典型的なものである。メカトロニクス事業の成功は量販できる商品を創造してマイクロエレクトロニクス革命の恩恵を引き出すことができるかどうか依存しているのである。

## (2) 産業用ロボットにおけるソフトウェアコスト

産業用ロボットを考えてみよう。

一昔前は千数百万円の値段で販売されていた産業用ロボットが現在では3～4百万円で手に入るという劇的な価格低下が見られている。その反面、ここに使用されてい



る技術はますます大規模、複雑、高機能の物となっている。「産業用ロボット事業は儲からない」という声の影にはこの事業環境の変化があることは間違いない。ロボット全体の価格が高く、機能も簡単、小規模の物であった頃は、ソフトウェア開発固定費は大きな問題にはならなかった。現在のように産業用ロボットの需要が鈍化し競争が激化するとともに単価は下がる一方であるのに反し、ますます大規模、高機能なロボットが要求されるようになると、ようやくソフトウェア開発費をどのように回収していったら良いかというメカトロニクスの経済学の原点に関する問題が顕在化して来た。

ロボットシステムのソフトウェア体系の開発に20億円かかったとしよう。500台／月を生産している会社が製品寿命5年間で開発費を回収しようとする1台あたり約7万円弱で回収すれば良いことになる（便宜上、金利は無視）。30台／月を生産している小メーカでは1台あたりの割りかけは110万円強となる。たかだか3-4百万円の価格の製品でこれだけの開発費の負担の差があれば利益が大きく変るのはあたりまえなのである。

### （3）産業用ロボット事業成功・失敗の要因

歴史を振り返ってみると、1980年（ロボット元年）からロボット産業が急速に立ち上がり始める。これは産業技術へのマイクロエレクトロニクスの導入が始まった時点と符合している。マイクロエレクトロニクス革命によって産業用ロボットの機能・使い勝手が飛躍的に向上し、市場は一挙に開花していった。その反面、機能高度化のためソフトウェア開発コストは必然的に増大し始める。しかもこの費用は固定費であって量の拡大を図らねば回収できない。産業用ロボット事業を成功させるためには、一度開発した技術を繰り返し大量の商品に適用して販売量を拡大する体制が必要である。ことによると企業の事業構造まで影響を及ぼすことになるかもしれない。当時の産業用ロボットメーカがこの本質をどこまで認識していたかは疑問である。日本にはアメリカのような産業用ロボット専業ベンチャーは例外的にしか存在せず、ほとんどは既存の機械メーカ、大手ユーザー、電気メーカが従来の自社機械製品・自社設備の合理化の手段として副業的にロボット事業に参入した。量の拡大のための基本的な戦略の見直しを行わなくても、高度成長時代はそこそこの成長が達成できたし、他の収益部門の利益によって「将来事業」の不採算性はマスクされていた。しかしバブル崩壊後の厳しい経済環境の中でたちまち収益性に厳しい批判を浴びるようになった。優れた技術を持った多くの企業が不採算の産業用ロボット事業から撤退せ

ざるを得なかったのである。

現在生き残っている産業用ロボットメーカは、当初の市場、用途に対して築きあげたソフトウェアプラットフォームを従来まったく経験のない新分野へも転用して量の拡大に成功していった例ばかりである。例えば、工作機用NC装置のメーカ（機械メーカではない）であったファナックは、当初は工作機の高度自動化の目的で産業用ロボット事業に参入したが、やがてそのソフトウェアプラットフォームを活用して未経験の熔接、熔接、組立、ハンドリングといった新しい市場、用途に挑戦し、エレクトロニクスメーカからメカトロニクスメーカへと事業構造を変質させていった。安川電機はサーボモータ・エレクトロニクス応用製品というスタンスから産業用ロボットに参入したが、当初成功を収めた薄板アーク熔接に留まらずハンドリング、スポット熔接、組立、塗装、さらには真空、クリーン環境といった機械事業に進出して行った例もそうである。川崎重工、不二越といった機械系メーカでも従来の機械事業とはまったく異なる新しい市場分野に産業用ロボット事業を拡大していった。自社設備用の自製ロボットとして世界最大の1万数千台という実績を収めたデンソーでも自社生産用に留まらず外販のために産業用ロボット部門を別会社として更なる量の拡大に努力している。産業用ロボット市場で生き延びるために他社のロボット部門を吸収して量の拡大をはかる動き、逆にロボット本体は他ロボットメーカから供給を受けるなどの動きもある。これらの現象は、「マイクロエレクトロニクスの経済学」の本質がもたらす必然的な帰結なのである。

従来の量拡大路線と別の動きも始まっている。汎用のソフトウェアプラットフォームの活用によってソフトウェア開発固定費を下げるロボットソフトウェアのオープン化の努力である。汎用ロボット用リアルタイムO/S、マンマシンインタフェース、生産システムとの結合、ネットワーキング、パソコンコントローラ、ロボットソフトウェアなど基幹ソフトウェアのオープン化、共通化によってソフトウェア開発コストを削減できる可能性が見えている。

今後の産業用ロボット事業の成功、失敗はこの「メカトロニクスの経済学」の本質を再認識して、量の拡大によってソフトウェアコスト負担を低下させること、オープン化によってソフトウェア開発費自体を削減させること、この両アプローチをどのように認識していくかにかかっていると考える。



## 6.3 産業用ロボットと日本製造業の再生

### (1) 今後の日本ロボット産業の方向

一方、上記の商品ロボットを実現するロボット技術とは別の発展方向がある。軍用・宇宙用などの巨大プロジェクトの分野である。巨大プロジェクトを成立させるために必要なロボットの開発には金に糸目をつけず巨額の資金が投入される。ロボット自体のコストそのものは問題にされない。アメリカなどはここで育てたロボット技術を民生分野に転換してロボット産業の巻き返しをする可能性がある。しかしこれは日本には参入できない分野である。やはり日本は大量に販売できる汎用商品ロボットの実現に向けて精進せざるを得ない。

現在、マスメディアは2足歩行ロボット、人間型ロボットが話題を賑わしている。これが日本再生の鍵であると極論する向きもある。これは日本人が持っているロボットに対する親近感から、「人間のそっくりさん」に対する人気が高いことによる。冷静に考えると、機械を人間型に作ることが目的と成り得るはずがない。技術の目的は人間にとって役に立つ機械を作ることである。人間に役に立つ機械という見地からは2足歩行すら問題である。移動することが目的ならば車輪の方が良いのかもしれない。3点支持で平面が決定されることを考えると3足以上の多足歩行のほうが自然な解決であろう。2足歩行が「人間のそっくりさん」を実現する一つの大事な仕事であるのは間違いないがそもそも「人間のそっくりさん」を作ることがどこまで意味があるのかという問題があると思われる。

日本人の「ロボット好き」は日本のロボット産業の発展に大きく貢献した。しかし、この「ロボット好き」が嵩じて「人間のそっくりさん」を実現するのが今後のロボット工学、ロボット産業の方向であるとするのであれば大きな過ちを犯すことになる。

ロボット産業技術の歴史を振り返ってその本質を系統化するに当たって今後の日本のロボット産業技術発展のためにはメカトロニクスのコスト特性を踏まえた事業の取り組み、研究開発のあり方に対する反省が必要であることを強調するものである。

### (2) 産業用ロボットの責務

視点を変えてみて日本の製造業が直面している問題点を考えてみよう。

国内総生産（GDP）を総人口Nで割った  
 $GDP/N$

を豊かさの指標としてみよう。この式は労働人口nを使って

$$GDP/N = (GDP/n) (n/N)$$

と変形できる。ここで  $GDP/n$  は労働人口一人当たりの国内総生産、つまり生産性、 $n/N$  は総人口に対する労働人口比率ということになる。

この式の増分 $\Delta$ を考えると

$$\Delta (GDP/n) = \Delta (GDP/n) + \Delta (n/N)$$

つまり、私たちの豊かさの増加（減少）率は、生産性の増加（減少）率と、労働人口比率の増加（減少）率の和となる。労働人口が今後激減することは人口統計推移から明らかであり、このマイナス分をカバーする以上の生産性向上を達成しなければ日本社会の豊かさは崩壊して行くことは明らかだろう。

nの減少を食い止めるひとつの方策は女子労働力、高齢者労働力を活用することである<sup>4</sup>。筋力の劣る女性労働者、高齢労働者を助ける軽労化のための助力ロボットがまず必要となる。

更にこれを発展させて、判断は人間が引き受け、人間の判断を音声、力覚、身振りなどでロボットに伝え重作業はロボットが行うという人間・ロボットが共生する生産システムを開発することなど極めてチャレンジングな研究テーマではないだろうか。

女性、高齢者が就労できる社会環境を整備しなければならないのは当然である。そのひとつに在宅介護の問題がある。日本の福祉政策は高齢化社会の到来を前にして、従来の老人ホーム、老人病院といった福祉施設の充実から、介護保険法を公布して在宅介護へと180度ハンドルを逆に切り替えた。しかしこれによって発生する膨大な在宅介護労働力をどう調達するかという問題には何の解答も見出していない。現在行われている福祉ロボット開発は食事介助ロボット、歩行介助ロボット、入浴介助ロボット……といった従来の福祉施設用ロボットであり、個人の住宅で使用できるものではない。女性の介護労働を軽減し、就労を可能にする在宅介護ロボットを開発する必要がある。

一方、 $GDP/n$ を確保ないし増大させなければならないが、生産性を向上させればそのまま国内総生産を増大させることができた高度成長時代とは全く事情が変わっていることに注意しなければならない。低賃金の労働を武器とする開発途上国に対抗できないとして製造

4 白水「新高齢化社会対話」日本機械学会誌、Vol.96、1993年、5月、86～90ページ



が海外に流出し続けている。国内総生産を確保するには製造業の国際競争力を回復するための生産性向上を今までにもまして推進する必要がある。

考えてみると、世界中で日本ほど知的レベルが高く経済力のある購買層が狭い地域に密集している市場はない。これからますます多様化する個別ニーズに応えるためには最終市場に近いところで開発・生産するのが望ましいのは当然である。従来の大ロット生産を前提とした大企業向けロボットでなく多種多様な生産を自動化するロボットをベースとする生産システムを実現することはこの問題の解決となるだろう。

過去において工場設備を夜間・休日に無人運転することに関心が寄せられていた時代があった<sup>5</sup>（特にバブル時代の労働力逼迫時代）。無人運転を行った場合、万一、故障・事故が発生してもそれに気がつかず、不良品が継続して製造、あるいは生産がストップしたままになってしまう恐れがあるため実用になっている例が少ない。現在、IT時代に入ってLAN、Eメール、インターネット、携帯電話、ポケットベルなどの通信手段が発達してきた。ひとつひとつの機械の自動化に着目する以外に工場内の機械群の集中モニターを行うことにより上記の欠陥を補うことができる可能性がある。

また、従来のような工場設備の中に固定設置されたロボットでなく工場内を人間のように自律的に動き廻り生産活動を行うロボットを開発したい。中小企業で

も使いこなせるために使いこなせるユーザフレンドリーなロボットも望まれる。

新しいロボット産業の可能性も大きい。先に述べた在宅介護ロボットなどその典型的なものだ。2025年には介護を必要とする人口は530万人に達する。仮にこの1割、50万人が介護ロボット（300万円で実現できると思う）を利用したとすると1兆5000億円の新市場が形成されるのである。

### (3) 日本の再生とロボット産業

以上述べた日本の問題点：

- 先進国としての今後の産業はどうあらねばならないか
- 世界で最も早く近づいている高齢化社会にいかに対処しなければならないか

は、実は近未来に全世界において共通する問題点である。まず、日本において顕在化したニーズを先取りする産業を作り上げることこそ日本再生の道ではないだろうか？ここに今後の日本のロボット産業、これを支えるロボット技術の責務があると思う。

人間型ロボット、エンターテインメントロボットの夢を描くのは楽しいことだが、日本の再生のためにロボット工学・ロボット産業が果たすべき課題は目の前にある。世界に先駆けてこの新しい時代のニーズにチャレンジすることこそロボット大国日本の使命だと思うのである。

5 稲葉他「CNC工作機と産業用ロボットによる機械加工の無人運転の考え方」ロボット、Vol.130、1999、日本ロボット工業会、64-69ページ（1980）



## 7 | 後書き

以上、産業用ロボット技術の変化を解明していく過程で、社会・経済の変化との相互関係、他分野の技術変化との相互関係、さらには開発した技術者の経験や受け入れた市場の個性との関係について<sup>1</sup>筆者の能力の許す範囲で考察を行った。ロボット専門家だけのものではなく「大学工学部卒業程度の素養がある」一般の読者にも理解できるものという前提にどこまで答えられたか疑わしい点がある。かえって突っ込みが不足したところもあると思われるが、それは「国産ロボット技術発達の系統化に関する調査」（独立行政法人国立科学博物館刊）その他の優れた技術解説書をご参照願いたい。

系統化足跡を辿って愕然としたのはマイルストーンの記念物が殆ど保存されていないことであった。企業で使われている産業用ロボットは大体10年くらいで償却されるとたちまち廃棄されてしまう。一方、研究機

関で研究・開発されたロボットは開発終了後には解体され部品は他の新しい研究用に転用され、本来の姿は消えうせてしまう。今回の調査は産業用ロボットに限定したのだが、すでに多くのマイルストーン的事実が誕生している非製造業用ロボット、これから新しく立ち上がろうとしているサービスロボットも同じような運命になるのではないかと心配になる。何といても日本は今まで世界をリードして来たロボット大国である。今後もフロントランナーであり続けることが期待されている。日本のロボットの産業技術の足跡を残すことは世界のロボット産業、ロボット工学に対する日本の責務だと思う。産業ロボットに留まらず非製造業用ロボット、サービスロボットの産業技術史の調査体制を固める必要があるのではないだろうか。

歴史を振り返ってみて今後の方向への何がしかの示唆ともなれば幸せである。

<sup>1</sup> 「系統化研究による技術変化の解明」寺西大三郎、「国立科学博物館 技術の系統化調査報告」5-6ページ、2002



番号	名 称	資料形態	所 在 地	製 作 者	製作年	分 類	コ メ ン ト
1	ロボクレーン			クロガネクレーン	1964	ハンドリング	クレーンの自動化の嚆矢
2	バーサタラン			AMF社	1967	ロボット本体	本格的ロボットの輸入1号
3	コンスラム			石川島	1967	ハンドリング	国産ロボットの草分け
4	モートハンド			安川電機	1968	アクチュエータ	簡易型直交座標ロボットを可能とした
5	電動ハンド			富士電機	1968	アクチュエータ	簡易型直交座標ロボットを可能とした
6	ワークハンド			東芝	1968	アクチュエータ	簡易型直交座標ロボットを可能とした
7	オートハンド			会田鉄工所	1968	ハンドリング	金属プレス作業のハンドリングに大量採用
8	HIVIP Mk.1	実物	日立製作所機械試験所(土浦市)	日立	1968	組み立て	コンピュータ制御の知能化ロボットの試作
9	バナサートA	実物	バナサートファクトリーソリューションズ(甲府市)	日立	1968	組み立て	部品実装機の高度化の走り
10	プラスチック成型品取り出しロボット			スター精機	1968	ハンドリング	プラスチック成型機のハンドリングに大量採用
11	ユニマンUM-1000			不二越	1969	ハンドリング	国産ハンドリングロボットの草分けのひとつ
12	ユニメート2000	実物	不二越(富山市)	川崎重工	1969	ロボット本体	国産化ロボットの1号(油圧)
13	オートワイマン			元田電子	1970	その他	助力機械の草分け
14	マトバックK-50			東京計器	1970	ハンドリング	パレタイジングを実験
15	サイクロプス			安川電機	1970	ハンドリング	視覚ロボットによるコンベアピッキングの試作
16	ハーモニックドライブCS-Z	実物	ハーモニック・ドライブ・システムズ(東京都品川区)	ハーモニックドライブ	1970	構成部品	ロボットに採用始まる
17	ミニコン内蔵ロボット			石川島	1971	ロボット本体	ミニコンの採用
18	工作機械自動運転システム			川崎重工	1971	システム	機械加工への適用の草分け
19	RBHシリーズ			ヤスホ産業	1972	ハンドリング	初期のロボットの一つ
20	ユニマンUM-2000			不二越	1972	ハンドリング	初期のロボットの一つ
21	ユニマンUM-3000			不二越	1972	ハンドリング	初期のロボットの一つ
22	ローベル			新明和工業	1972	アーケ溶接	ロボット・アーケ溶接の普及先駆者
23	ユニマンUM-4000			不二越	1972	アーケ溶接	ロボット・アーケ溶接の普及先駆者
24	トラルファ			神戸製鋼	1973	塗装	塗装ロボットの草分け
25	自動車ボワイトボデイ溶接ライン			日産自動車追浜工場	1973	システム	本格的ロボットシステムの草分け
26	自動車ボワイトボデイ溶接ライン	実物	産業技術記念館(名古屋市)	トヨタ堤工場	1973	システム	本格的ロボットシステムの草分け
27	オートバイ部品の機械加工セル			川崎重工	1973	システム	コンプライアンス機構による鏡面仕上げ
28	ユニメート2360	実物	産業技術記念館(名古屋市)	川崎重工	1973	ロボット本体	国産ロボットの1号(油圧)
29	自動タッピング装置			大同特殊鋼	1974	その他	金属熱処理への適用1号
30	Motoman W			安川電機	1974	アーケ溶接	電動アーケ溶接ロボットの1号機
31	電動機シャフト加工システム			富士電機	1974	システム	シャフト加工の1号
32	RBI			ASEA	1974	ロボット本体	電動多関節形ロボットの1号
33	天井走行ロボットシステム	実物	ファナック本社工場(山梨県忍野村)	ファナック	1975	システム	ユニメートを天井走行させロード・アンロード
34	岩田塗装ロボット			岩田塗装機	1975	塗装	塗装ロボットの草分け
35	ミスターアロス			日立	1975	アーケ溶接	センサ付きロボットの草分け
36	FANUC ROBOT M1			ファナック	1975	ロボット本体	油圧に代わる電動ロボットの草分け
37	パワートランジスタのボンディング			沖電気	1975	ロボット本体	半導体の組立の草分け
38	塗装ロボット			神戸製鋼	1976	塗装	国産塗装ロボットの1号
39	ユニメート3030			川崎重工	1976	入出荷	パレタイジング・ロボットの草分け
40	Motoman L10	実物	安川電機モートマンセンター(北九州市)	安川電機	1977	アーケ溶接	国産の電動多関節形ロボットの1号
41	FANUC ROBOT MODEL-1			ファナック	1977	ハンドリング	機械加工への適用の草分け
42	FANUC ROBOT MODEL-2	実物	ファナック本社工場(山梨県忍野村)	ファナック	1978	ハンドリング	機械加工への適用の草分け



番号	名 称	資料形態	所 在 地	製 作 者	製 作 年	分 類	コ メ ン ト
43	ブラウン管ハンドリングロボット			三機工業	1978	ハンドリング	大型家電製品のハンドリングの草分け
44	自動車トランスミッションの組立			日産自動車吉原工場	1978	システム	自動車組み立ての草分け
45	FANUC ROBOT MODEL-0	実物	ファナック本社工場(山梨県忍野村)	ファナック	1979	ハンドリング	NC工作機組み込まれたワーク搬入・搬出
46	SCARAROBOT	実物	富士通ものづくり推進本部(川崎市)	不二越	1980	組み立て	SCARAROBOT試作1号機
47	UNIMAN8601	実物	不二越(富山市)	不二越	1980	組み立て	電動多関節スロット溶接ロボットを本格普及
48	トランサー-RHP200T			東芝精機	1980	ハンドリング	プレス機械のローディングの草分け
49	ユニマン8600	実物	産業技術記念館(名古屋)	不二越	1980	ハンドリング	大型電動ハンドリングロボットの草分け
50	SCARAROBOT	実物	富士通ものづくり推進本部(川崎市)	SCARA開発協同組合	1981	組み立て	組み立てロボットの草分け
51	PUMA PH560			川崎重工	1981	組み立て	本格的組み立てロボットの輸入販売
52	SKILAM			三協精機	1981	組み立て	SCARAROBOT試作1号機ロボットをIBMへ供給
53	プリント基板実装ライン			ハイオニア大森工場	1981	システム	SCARAROBOT実用システム第1号
54	FANUC ROBOT S MODEL2	実物	ファナック本社工場(山梨県忍野村)	ファナック	1982	アーケ溶接	アーケ溶接ロボットにACサーボを採用
55	FABOT M6-250 II	実物	富士通ものづくり推進本部(川崎市)	富士通	1982	組み立て	2腕協調ロボットによる組み立て
56	富士エース AC-1			不二輸送機	1982	入出荷	パレットジャック・ロボットの普及に貢献
57	SD-1			三機工業	1983	入出荷	物流分野への草分け
58	Pシリーズ			川崎重工	1983	クリーン	クリーン応用の草分け
59	車両組立の自動化			日産産間工場	1983	システム	自動車組み立ての草分け
60	アーケ溶接システム	実物	日立建機土木工場(土浦市)	新明和工業	1985	アーケ溶接	現在も残っている厚板溶接の初期システム
61	塗装ロボット			神戸製鋼	1985	塗装	電動塗装ロボットの草分け
62	ハラスマスタ			蝶理コンコ	1985	ハンドリング	増力機械の草分け(輸入品)
63	ウオッチ外装部品組立ライン			セイコー電子	1985	組み立て	ウオッチ組立の草分け
64	AWHL5-R5/1			神鋼電機	1985	クリーンルーム	クリーンルームロボットの草分け
65	自動車ウインドガラスの接着			スズキ	1985	のり付け	自動車ウインドガラスの接着の草分け
66	ラバチュエータ			プリヂストン	1985	アクチュエータ	柔軟なハンド
67	クリーンロボットRR302	実物	ウシオ電機横浜事業所(横浜)	ローエ	1986	クリーンルーム	クリーンロボットの普及に貢献
68	RV減速機 RV-135	実物	ディー・エス・コーポレーション津工場(津市)	帝人製機	1986	構成部品	産業用ロボットに標準採用されるようになった嚙矢
69	高速チップブレース FCP-III	実物	富士機械第1精技部(知立市)	富士機械	1987	組み立て	タレットタイプ・チップブレースの普及に貢献
70	ムーブマスタ			三菱電機	1987	教育	教育用ロボットの草分け
71	ウオッチムーブメント組立ライン	実物	盛岡セイコー工業(岩手県岩手郡巻石町)	セイコー電子	1988	組み立て	世界最初のウオッチムーブメントの自動組立ライン
72	RA6-5X70			豊田工場	1988	バリ取り	バリ取りロボットの先駆者
73	Sシリーズ			セイコーエプソン	1989	クリーンルーム	真空ハンドリングロボット草分け
74	モートマンセンタ	実物	安川電機モートマンセンタ(北九州市)	安川電機	1990	システム	ロボットによるロボット生産のCIM
75	シグマモータ	実物	安川電機東京工場	安川電機	1990	構成部品	新世代ACサーボモータの草分け
76	シンクロモーション	実物	ダイヘン溶接メカトロカンパニー(摂津市)	ダイヘン	1991	アーケ溶接	ワーク持ち、トーチ持ちロボットによる同期協調溶接
77	真空ロボット VH3A	実物	安川電機ロボット工場(行橋市)	安川電機	1992	クリーンルーム	真空環境のロボット第1号
78	パラレルメカニズム			日立精機	1995	ロボット本体	パラレルメカニズムの輸入販売
79	双腕腕能ロボット	実物	ファナック本社工場(山梨県忍野村)	ファナック	1995	組み立て	2本腕ロボットが視覚センサによりロボットを組み立て
80	ガラス基板ハンドリングロボット	実物	安川電機モートマンセンタ(北九州市)	安川電機	1997	ハンドリング	液晶ガラス基板ハンドリングロボットの普及に貢献
81	両変動対応システム	実物	デンソー安城製作所(安城市)	デンソー	1998	システム	移動ロボットにより量変動に対応する生産システム
82	ORIN			日本ロボット工業会	1998	通信	オープンネットワークインターフェースの提唱
83	FANUC ROBOT I-21シリーズ	実物	ファナック本社工場(山梨県忍野村)	ファナック	1999	組み立て	商品化された知能ロボットの1号



## 国立科学博物館 技術の系統化調査報告 第4集

---

平成16(2004)年3月29日

- 編集 独立行政法人 国立科学博物館  
産業技術史資料情報センター  
(担当：コーディネイト 永田 宇征、エディット 久保田稔男)
- 発行 独立行政法人 国立科学博物館  
〒110-8718 東京都台東区上野公園 7-20  
TEL：03-3822-0111
- デザイン・印刷 株式会社ジェイ・スパーク