

サービスロボット技術発展の系統化調査

A History of Japanese Service Robotics

1

楠田 喜宏 Yoshihiro Kusuda

■ 要旨

2004年度に行った「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、分析を行った。今回の調査は産業用ロボット以外の一般用途に使われている「サービスロボット」を対象としている。

ロボット技術はまず産業用ロボットを対象として発達したが、その発展に伴い、現在、産業用以外の一般分野への可能性が現実のものとなってきた。「21世紀はロボットの世紀」という声があるのもこの「サービスロボット」の分野に対する期待からである。

本報告は、まず、現在に至る人間とロボットのふれあいの歴史を概括し、文芸作品、工芸品として存在していたロボットがオートメーション技術、メカトロニクス技術、知能化技術の発展に伴い、いよいよ人間と共存する存在にまで発展してきた過程を述べ、その背後には、ロボットという自動機械に対する人間の特別な思い入れが存在していることを明らかにしている。特に日本においては、江戸時代のからくり人形、大正時代から昭和初期にかけての第1次ロボットブームにみられるようにロボットに対する親近感が存在していたこと、産業用ロボット事業が日本で世界に先駆けて開花したのは日本社会のロボットに対する親近感によることを述べている。

次いで、サービスロボットが今後のロボットの発展を牽引すると考えられている背景、産業用ロボットが先行して発達した理由、サービスロボットでは産業用ロボットでは実現されていない高度の自律性が要求される背景を説明し、将来「人間と共生するロボット」の実現のためにはさらなる努力が必要であることを明らかにしている。

その最たるものは「非構造化環境」に対処するための技術である。産業用ロボットがまず先行して成立したのは自動化に好都合な「構造的環境」が存在したからであった。ここで実現された技術によってようやく「非構造的環境」への対処への足がかりが出来てきたのであるが、サービスロボットの実現のためには更に高度のロボット工学の知見が必要である。これに関連して、2足歩行などの移動技術、工場外的环境に対する耐環境技術、環境認識のためのセンシング技術、自律的に行動するための知能化技術などの現状を述べている。

サービスロボットは、まず、原子力、宇宙・深海開発の必要性から人間が働くことの出来ない「極限環境」の中で働くロボットとして出現した。完全な自律性のあるロボットを待たず、放射線環境、深海、宇宙空間、極小空間にたいして遠隔操縦をベースとしたマニピュレータ型ロボットが実用されている。

次いで、人間にとって不快な作業を代行するサービスロボットが建設、土木、エネルギー、環境保全、防災などの公共分野、社会インフラ整備の分野で発展してきた過程を分析している。

ここで確立された技術が、より人間生活に密着した農業、林業、酪農・畜産、水産、医療、福祉といった産業分野へ発展しつつある状況を考察している。

20世紀末、ホンダのASIMO、ソニーのAIBOが人間の身の回りで使われる新しい可能性を示した。これに触発されて、人間型ロボット、動物型ロボット、これの応用であるエンターテインメントロボット、癒しロボット、家庭用ロボット、教育への応用など人間の生活に密着したロボットへの発展が始まっている姿を明らかにしている。

このような現状を踏まえて、上記各応用分野に開発されて来た技術を横断的に考察し、サービスロボット技術の発展過程の系統的分析を試みている。

サービスロボット分野には、今まで大きな研究開発の努力がなされてきたが本当に実用化、普及が進展している例は多くない。その原因は、これまでの研究開発には、サービスロボットの実現に必要な膨大な量のソフトウェアの開発固定費をどのように回収するかという事業戦略からの視点がほとんど見られず単なる技術的好奇心、話題性から研究開発が行われてきたことによることを論証している。

しかも、すべての新技術を自前で開発するというアプローチで行われてきたためすでに開発された成果を他のプロジェクトで再利用することは事実上不可能であった。従来の個別努力の延長ではなく、サービスロボットの今後の発展のためには、技術のオープン化、モジュラー化を実現する方向に研究開発の方向を大転換しなければならないことを強調し、今後の方向に対する具体化提案をおこなっている。

最後に、「ロボット技術史年表」「資料一覧表」「サービスロボット発展系統図」を付録として添付している。

■ Abstract

Last year, the National Science Museum published “A History of Japanese Industrial Robots”, which described how these robots were first developed and then improved. Subsequent to that, this paper reports where Japanese “service robots” (specifically used by the general public outside the manufacturing environment) stand in terms of technology and business.

Although the mass media have enthusiastically been talking about service robotics as if they are about to immediately affect our daily lives, the reality is not yet there. In an attempt to reveal the real story, we will review where service robotics now stands and provide insights into how we can make improvements to make its use widespread.

Japan has an edge in exploring the world of robots in business. Indeed, the concept of industrial robots was created in U.S., but the evolution into industrial products in real business was accomplished by Japan. The author attributes Japan’s success to its smooth acceptance of the concept of robots by society, which stems from the cultural, mental, and social heritage of the nation. That is why humanoid robots are flourishing throughout Japan unlike other countries. The report keeps track of the history of service robotics to identify the secret behind Japan’s success in this area.

Service robots developed and used in four areas are reviewed. These are used in 1) non-human-accessible environments (nuclear facilities, deep ocean projects, space exploitation, and micro- and nano-space), 2) the public sector (construction, energy generation, hazard prevention, and environmental protection), 3) general industries (agriculture, forestry, dairy farming, fishing, and medical treatment), and 4) human life (humanoids, entertainment, home robots, and educational tools).

It gives an account on what makes service robots different from industrial robots and emphasizes that a new approach is needed to establish a new, viable service robot business.

One big issue is how to cope with the “non-structured environment” in which service robots should work. This is a critical difference from industrial robots working in a “structured environment”, which makes it easy to introduce automation. We need more advanced science and technology for this “un-structured” solution, notably in the area of artificial intelligence.

Another issue is how service robots can be developed to be viable products in the real world market. We clarify why although much time, effort, and money were expended in service-robot exploitation in the past and many research papers were written, no sizable service-robot market was created. The causes lie in the fact that all the components used in developing them were introduced independently. Although similar (or even identical) design problems were addressed by many of the different projects, it is virtually impossible to reuse technologies that have been developed elsewhere. Clearly as experience grows in robotic research, the development community may be able to reuse some aspects of the work that has already been carried out. It should be emphasized that “open” and “modular” approaches to robotics are above all the key issues in the process. We should not duplicate previous efforts and re-invent known solutions so that the wide and growing range of service applications can be adequately supported to allow specific solution issues to become much simpler and easier.

The report also provides suggestions on specific open and modular approaches to guide the future direction of Japanese service robotics.

A list of milestone products is included to identify where and how legacy achievements have been preserved.

■ 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 「産業用ロボット技術発展の系統化調査」
技術の系統化調査報告 4, 国立科学博物館, 2004
「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.まえがき	3
2.ロボットと人間	4
3.サービスロボットの登場	12
4.極限環境における応用	15
5.公共・社会インフラ整備への発展	24
6.生活関連産業への発展	32
7.人間生活の豊かさを求めて	38
8.サービスロボット技術発達の系統化分析	44
9.サービスロボットの今後の発展	58
10.あとがき	65
付録	66

1 | まえがき

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。その調査分野の一つとして「ロボット」を取り上げている。まず、日本ロボット工業会に調査を委嘱し、「国産ロボット技術発展の系統化に関する調査」¹ 報告書を刊行した。さらに詳しい分析を行うべく、現在、産業として確立されている「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、体系化を行い「産業用ロボット技術発展の系統化調査」² として刊行した。産業用ロボットはロボットの中で他に先駆けて発展し、既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。

現在、工場の中で働く産業用ロボットだけでなく、一般社会で使われるロボットを総称する「サービスロボット」という新しい局面が目の前に開けようとしている。この分野においても既に先駆的な技術開発、

実際応用が始まっている。2足歩行ロボット、人間型ロボット、エンターテインメントロボットという身近な話題に一般大衆の興味、好奇心、期待が集まっているが、サービスロボットはそれだけに留まるものではない。将来の人間社会の姿を大きく変えるまでに発展するだろうと予測されている。

この現在、サービスロボットの現状を正しく理解し、将来の発展方向を考えることは意義あるものと考えた。

今回の調査報告では上記2報告書の成果を踏まえて

- ・ サービスロボットが登場してきた文化的、社会的、科学技術的背景を明らかにする
- ・ 既に始まっているサービスロボットの産業・技術発展の足跡を明らかにする。
- ・ その中における歴史的意義のある資料の所在を特定し今後の保存に資することを目的とした。

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 日本ロボット工業会「国産ロボット技術発展の系統化に関する調査」報告書、技術の系統化調査-3、独立行政法人国立科学博物館、2003、pp47-104

² 楠田「産業用ロボット技術発展の系統化調査」、技術の系統化調査-4、独立行政法人国立科学博物館、2004、pp1-47

2 | ロボットと人間¹

「ロボット」とは、過去に「人造人間」という別の用語もあったようにもともと「人間のそっくりさん」を意味していた。「ロボット」という言葉は、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(R.U.R.: Rossum's Universal Robots)」の中で使ったのが始まりである²。チャペックはこの作品の中に登場する人工生物³を「ロボット」と呼んだ。しかしチャペック以前にも、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、人工の「人間もどき」を作りたいという願望を持ち続けていたことはいろいろな伝承、文芸作品、工芸作品の歴史を見ても明らかである。

2.1 機械人形

紀元前8世紀にホメロスは「イーリアス」の中で人間の少女にそっくりの黄金製の人造人間を描いている。また紀元250年ころユダヤ教のラビ（神官）が泥を使って「ゴーレム」と呼ばれる人造人間を作ったという言い伝えも残っている。レオナルド・ダ・ヴィンチは1495年に自動人形を設計している。甲冑を着けた騎士で、座ったり、腕や首を動かしたり、口を開くことが出来た。1656年、オランダのホイヘンスが振り子時計を発明して以来、時計は精密機械として発展をとげるようになり、この時計技術を応用して精巧な自動人形が製作されるようになった。1780年ころ「トルコ人の自動人形」が大評判となった。チェス盤が設けられている台に固定されているトルコ人の格好をした自動人形が人間のチェス指しを次々に破っていったのである⁴。そのころからいろいろな自動人形が製作されているが最も有名なものにフランス人の紡績機械エンジニアのジャック・ド・ヴォーカンソンが1738年に製作し大評判となった、フルート吹き人形、太鼓たた

き人形、機械仕掛けのアヒルがある（写真2.1）。特にアヒル人形は当時のものとは信じられないくらい複雑な機械で1000個以上の機械部品がアヒルとそれを支える台に搭載されていて、本物のアヒルのように鳴いたり水浴をしたりして動き、餌をついばみ、排泄までするというものであった。1773年、スイスのピエールとアンリ・ルイ・ジャケドロス親子は字を書いたり、絵を描いたり、音楽を演奏したりする3対の自動人形を製作した（写真2.2）。1893年には、ジョージ・モアが「蒸気人間」を製作した。蒸気機関を動力として歩行したと伝えられている（写真2.3）。

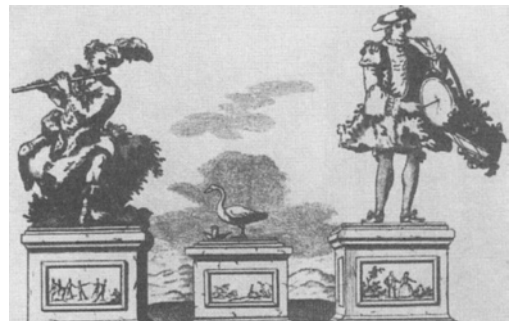


写真2.1 ヴォーカンソンの自動人形



写真2.2 ジャケドロス親子の自動人形

- 1 この章全体にわたって、井上「日本ロボット創世記」、NTT出版、1993
シリル・フィエヴェ「ロボットの世紀」、白水社、2003、
ジョン・クルート「SF大百科事典」、グラフィック社、1993
を参考にしていく。
- 2 Karel Capek「Rossum's Universal Robots」Doubleday, Page & Co., 1923
カレル・チャペック「ロボット (R.U.R.)」岩波文庫、1989
- 3 「R.U.R.のロボット」は、海中の蛋白質を合成して作った人工生物で、自動機械ではない。
- 4 これはやがてチェスの達人が中に隠れていて人形を操っていたというインチキが発覚してしまうのだが、隠れていた人間は駒を置く場所を指定するだけで人形が正確に駒を置くことができたという精巧なものではあった。

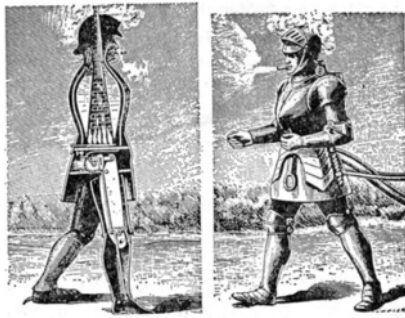


写真2.3 ジョージ・モアの「蒸気人間」

2.2 文芸作品

このような自動人形の発達に並行して、「人間もどき」に関するいろいろな文芸作品が発表されている。1818年にはメアリ・シェリーの「フランケンシュタイン⁵」、1831年には人造人間ホルムズクが登場するゲーテの「ファウスト」、1870年には自動人形コッペリアのホフマン作「コッペリア」、1883年にはコロデイの「ピノキオ」が続いている。1886年にはフランスの文豪リラダンは「残酷物語」の中の一編「未来のイブ」で美女人造人間「アタリ」(写真2.4)をその構造まで詳細に述べている⁶。



写真2.4 「未来のイブ」の「アタリ」

ヨーロッパの自動人形と頃を同じくして日本でも、殆ど芸術の世界に昇華していたともいえる精密な「からくり人形」が製作されていた。1730年に多賀谷環中仙が「機訓蒙鏡草(からくりくんもうかがみぐさ)」の中でいろいろの自動人形の仕掛けを説明している。また1796年には細川頼直は「機功図彙」のなかで「茶運び人形」(写真2.5)、鯉が滝登りして竜に化するという「竜門滝」、台の上の人形が後ろ向きに空中転回して何段も宙返りする「五段返し」などの9種のからくり人形を図解している。



写真2.5 「茶運び人形」

20世紀に入って科学技術の発展によって新しい可能性が生まれてくるとともにロボットに対する期待も新しい段階に入った。新しい芸術表現として映画が登場すると、1910年に最初の「フランケンシュタイン」映画が製作されたあと1920年の「巨人ゴーレム」が製作された。1920年に前述のチャペックの「R.U.R.」が発表されたころから映画にも新しいロボット像が出現して来た。1926年にドイツのフリッツ・ランク製作の名作「メトロポリス」では独裁工業化社会のなかで人間の心を与えられた女性の人造人間「マリア」が労働者を指揮して独裁者にたいして革命を行う姿が描かれている。1931年に上映された「フランケンシュタイン」は不気味な表現主義スタイルの映像、怪物を演じたボリス・カーロフの演技で大ヒットし、その後もフランケンシュタイン物が再三リメイクされるきっかけとなった(写真2.6)。後世、産業用ロボットが当初、欧米に根付かなかった背景の一つに、フランケンシュタインの怪物、「R.U.R.」のロボットなどがロボットに対する暗いイメージを欧米社会に定着させたこともあるという意見もあるほどである。



写真2.6 「フランケンシュタイン」

⁵ フランケンシュタインというのは怪物の名前ではない。怪物を創造した科学者に名前である。「フランケンシュタインの怪物」という言い方が正しく「怪物フランケンシュタイン」ではない。

⁶ リラダン「残酷物語」、岩波文庫、1783

2.3 ロボットの前身

1927年ようやく現代のロボットの原型ともいえる機械が米国で誕生した。ウエスティングハウス社の「テレヴォックス」という機械である⁷（写真2.7）。電話によって音を送ることによって遠隔地の電灯を点滅させたり、扇風機や掃除機を作動させたり止めたり出来るものであった。ジャーナリズムは「科学、“電気人間”を作る」という見出しでセンセーショナルに報道した。もともと「テレヴォックス」は人間の形をしていなかったが、次第に人間の形に近いものに改造されていった。一般人のロボットに対する期待を高めていった。さらに1928年、英国で「エリック」という人間型ロボット（写真2.8）が発表され衝撃が走った⁸。構造的には「テレヴォックス」より簡単なものだったが電気モーターによって駆動され、立ち上がって左右を見渡し、腕を肩の回りまで上げ下げし、無線で送られてくる人間の声をあたかも自身でしゃべっているように見せかけているロボットであった。1940年代に入ると、英国のW・グレイ・ウォルター博士は世界最初の自律型動物ロボットを開発した。亀の形をした「エルジー」と「エルマ」は三つの車輪で移動し、光と接触に対するセンサーによって障害物を回避しながら光源に向かって走行できるものであった⁹。このあたりから現代のロボット技術の曙光が見え出している。

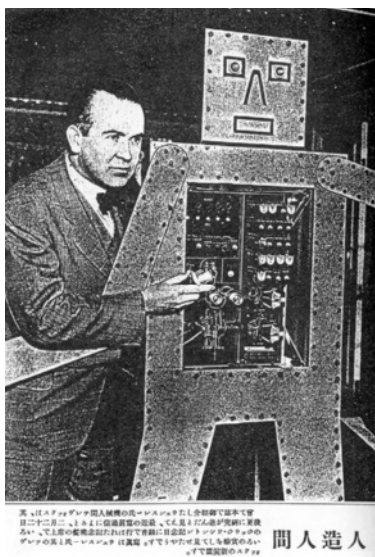


写真2.7 「テレヴォックス」

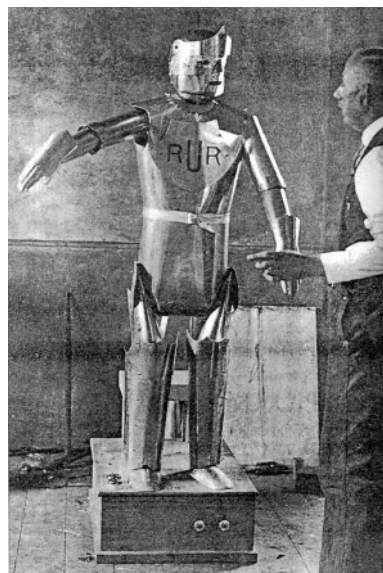


写真2.8 「エリック」

2.4 SFのロボット

文芸作品の面では科学技術の新局面を迎えてSF（science fiction：空想科学小説）という新しいジャンルが生まれた。1926年に創刊されたSF専門雑誌「アメージング」によってこの新しい文学ジャンルが始まった。「R.U.R.」や「フランケンシュタイン」に見られるように、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の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1940年にロボットを主人公とする一連の連作シリーズの執筆を始めた。ここに登場するロボットの行動は「ロボティクスの三原則」¹⁰：

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。この連作は1950年に単行本「I, Robot

⁷ 井上「日本ロボット創世記」NTT出版、1993、pp59-65

⁸ 井上「日本ロボット創世記」NTT出版、1993、pp94-100

⁹ <http://www.plazaeearth.com/usr/gasper/walter.htm>

¹⁰ 「I, Robot」Isaac Asimov, Doubleday & Co, Inc., N.Y. 1950
アシモフ「われはロボット」ハヤカワ文庫、1963

(私はロボット)」¹¹ (写真2.9) として刊行され、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¹²。

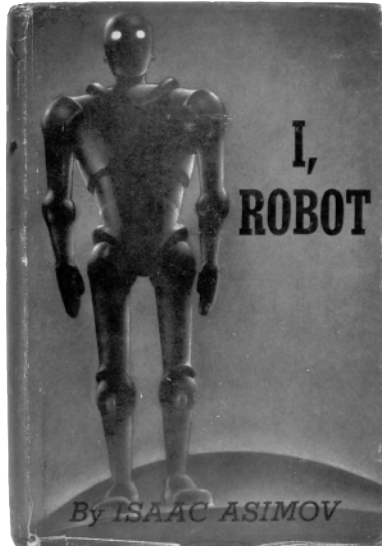


写真2.9 「I, Robot (私はロボット)」

2.5 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1962年に米国でエンゲルバー博士 (写真2.10) が創立したユニメーション社が「ユニメート」、AMF社が「パーサトラン」という商品名の機械を「産業用ロボット」と銘打って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。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、変更することが出来る作業プログラムと色々な道具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。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。「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である。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)¹³という妙な名前と呼ばれ、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¹⁴のが最初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。

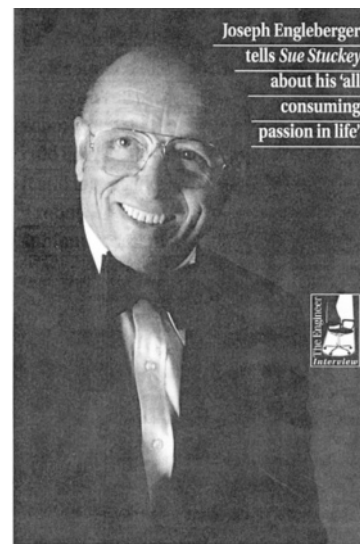


写真2.10 エンゲルバー博士

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。金属鑄造のダイキャスト作業は熱い熔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加工物の取り出し用に初めて使用された (写真2.11) 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。このとき一大転機が日本で始まった。

¹¹ 左記脚注8. に同じ

¹² 「Robot in Practice」 J.F.Engelberger, Amacom, 1980, xv

¹³ US Patent 2,988,237, 1961 「Programmable Article Transfer」

¹⁴ 「American Metal Market」 February 2, 1960

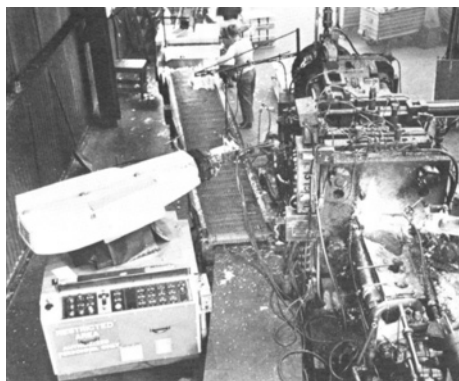


写真2.11 産業用ロボット商品第1号機

2.6 日本の第1次ロボットブーム¹⁵

もともと日本でロボットという概念が生まれたのは欧米と比べてさほど遅れてはいない。「R.U.R.」に触発されたものと想像されるが、チャベックの「R.U.R.」に遅れること1年の1921年に粹道長人が「人間製造会社」という新作落語を発表している。ついで1923年に鈴木善太郎によって「R.U.R.」が「カベックの戯曲労働者製造会社」として紹介された。その中でロボットという用語が解説されているのが「ロボット」という用語が日本に紹介された最初である。ついで1923年、戯曲「R.U.R.」は宇賀伊津緒によって「人造人間」と訳されて刊行され1924年に築地小劇場で上演された。このころから「ロボット」、あるいは「人造人間」という用語が定着していった。1927年、1928年に「テレヴォックス」「エリック」のニュースが海外から報道され日本でもロボットに対する関心が高まっていた。日本では1928年、昭和天皇の即位を記念する「御大礼記念京都博覧会」に大阪毎日新聞社が西村真琴博士の人造人間「学天則」(写真2.12)を出品した。「学天則」は電気モータを動力とするがこれは圧縮空気を作るためのもので、動作は圧縮空気によって行うという世界に類を見ないロボットだった。空気の膨圧力によりゴムで出来ている皮膚を滑らかに動かし顔面、眼球、頸、胴、上肢、指、息遣いなどを豊かに表現することに成功し大評判となった。このような時代背景の中、1929年にフリッツ・ランクの傑作映画「メトロポリス」が上映され、その中の美しい「マリア」ロボットに観客は魅了された。多くの小説、漫画、新聞記事が現れ日本の第1次ロボットブームが巻き起こったの

である。デパートの宣伝にロボット人形が使われたり、更には国会の演説の中にロボットという言葉が出現¹⁶したり、まさに現代のロボットブームを思わせるほどである。しかしこのロボットブームは1931年ころを頂点として冷え込んでいく。過度のロボットへの期待と現実のロボットとの乖離がようやく認識されるようになった。「現代機械文明で必要とされているのは人間が持たない力、人間にはない動作スピード、人間にはない敏感さ、人間にはない緻密さ」などであり「…何を苦しんで今更単に人形的の外形の小函の内に仕組まれたといふだけでロボットを偶像化する必要があろうか」という醒めた見方¹⁷も現れ、以後、ロボットは社会の表面から次第に影を潜めていく。勿論、戦時下、そのような能天気な話題など適切でなかった時代の背景もあったのだろう。しかし、この時期に日本社会にロボット、人造人間に対する憧れが植え付けられたのは見逃せない事実だと思われる。



写真2.12 「学天則」

戦後、大きなターニングポイントが訪れた。手塚治虫のコミック「鉄腕アトム」(写真2.13)の登場である。1951年に「アトム大使」として始まった「鉄腕アトム」シリーズ¹⁸は少年雑誌、テレビ、映画となって日本の子供を魅了していった。人間を助ける正義のロボット、ロボットは人間の友達という思いを日本人の心の中に刷り込んでいったのである。

¹⁵ この節全般にわたり、井上「日本ロボット創世記」NTT出版、1993、pp20-22を引用している。

¹⁶ 鳩山一郎議員が「内閣はロボット内閣」と非難した。「官報」昭和6年1月23日

¹⁷ 「昭和7年朝日年鑑」「科学知識」欄、「人造人間」、1932、朝日新聞社

¹⁸ 手塚治虫「鉄腕アトム」光文社 カッパコミックス、1964-1966 ほか



写真2.13 「鉄腕アトム」

2.7 ロボットブーム起こる

1966年、エンゲルバーガ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、700人を越える企業の経営者が押し寄せた。エンゲルバーガ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。当時は、年率10%とい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。また、当時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。一頃は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。しかしその影には、第1次ロボットブームや「鉄腕アトム」によって日本人の心の中にロボットに対する親近感が刷りこまれていたことが大きかったと思われる。1972年、ユニメーション社の産業用ロボット「ユニメート」が自動車工場のスポット溶接ラインに導入されたのをきっかけに普及が始まった。

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ている。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¹⁹。このような「ロボット好き」の日本社会の情緒が産業用ロボットの導入の潤滑材となったのは確かであろう。このようにして始まった日本の産業用ロボットは、日本が保有するメカトロニクス技術、利用技術、生産技術、現場技術の総合成果として発展し、今や日本は世界一の産業用ロボット大国として自他共に許すにいたっている。

産業用ロボットは「人間のそっくりさん」ではない。多くは一本の腕だけで、足はなく工場内に設置、固定されている。目も、口も、耳もない(写真2.14)「プログラム可能なハンドリング機械」といった性格のものに過ぎない。しかしこの「産業用ロボット」という姿が世の中に受け入れられるようになると「ロボット」の概念は「人造人間」から大きく変質した。むしろ「生物のイメージを思わせる機械」とでも行った方が良いのかもしれない。「人間型ロボット」という昔には想像もできなかったような用語も使われるようになった。

「鉄腕アトム」以後、「鉄人28号」(1956-)、「エイトマン」(1963-)、「マジンガーZ」(1972-)、「ゲッターロボ」(1973-)、「ロボット刑事K」(1976-)、「ドラえもん」(1970-)といったロボット・コミックは日本人の心にロボットに対する親密感を植え付けている。



写真2.14 産業用ロボット

2.8 現実のものとなったロボット

産業用ロボット技術がますます発展し、特に1970年代後半にマイクロセッサが制御に導入され機能の高度化が始まると、今まで空想の世界の産物であったロボットが現実の世界に近づいていることが予感された。SF小説、映画、SFアートでもさらに高度化したロボットを題材とするものが創作され社会のロボットに対する期待をかきたてていった。特に、1977年から始ま

¹⁹ 「日本のロボット」通産企画調査会、昭和57年、104ページ

るSF長編映画「スターウォーズ」で活躍する、「C-3PO」「R2D2」(写真2.15)、1984年の「ターミネータ」の殺人アンドロイド、1987年の「ロボコップ」のサイボーグ警察官(写真2.16)などのロボットは一般大衆にもロボットを身近な存在として理解することに貢献していった。

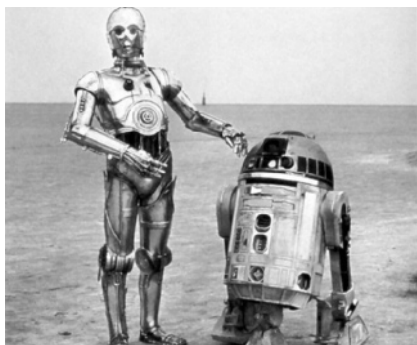


写真2.15 「スターウォーズ」のC-3POとR2D2



写真2.16 「ロボコップ」のサイボーグ警察官

＜ヒューマノイド、アンドロイド、サイボーグ＞

ヒューマノイドとはもともとSFの世界では異星人が人間に取り付いた怪物のイメージで使われていた用語である。故加藤一郎教授が人間型ロボットの研究を推進するにあたってヒューマノイドと言う言葉を当てたことから始まって広く人間型ロボットのこととして転用されるようになった。

アンドロイドは人間型ロボットのうちリラダンのアダリールとかスターウォーズのC3POのように機械人形イメージの強いものに使われることが多い。

サイボーグとは人間の臓器を機械に移植したもの、あるいは人間の機能の非常に多くの部分を機械で置き換えた改造人間のことである。ロボコップがその代表例である。

工場内で使用されることが目的の産業用ロボット発展の影に、工場以外の一般分野で人間の労働に代わる自動機械の研究も始まっていた。特に、宇宙開発、深海探検、原子力発電といった人間が生存できない極限環境での巨大プロジェクトを遂行するためには作業の無人化が絶対に必要である。完全に人間の機能を置き換える自律ロボットは望むべくもないので、人間が遠隔操作する「マニピュレータ」と呼ばれる形式の一種のロボットが実用されるようになった。また高度成長

時代に恐怖された労働力不足感からいわゆる3K（危険・きつい・汚い）作業の代替を行うロボットが試作された。建設、土木、消防、救助、清掃などのロボットが開発、試作されるようになった。さらには、長年の夢、昔ながらの「人造人間」を実現しようとする研究も行われるようになった。いよいよ「人間のそっくりさん」実現の可能性が膨らんできたのである。早稲田大学のヒューマノイド計画がその代表的なものである。1985年のつくば万博では早稲田大学のエレクトーン弾きロボットが楽譜を読みオーケストラと共演して話題となった(写真2.17)。早稲田大学は2000年世界最初の「ヒューマノイド研究所」を設立するに至った。



写真2.17 エレクトーン弾きロボット

2.9 ヒューマノイドブーム勃発 人間とロボットの共生社会へ

このような社会情勢の中、1997年、ホンダはかねてよりモビリティ（運動性・移動性）の追求を目指して研究していた2足歩行ロボット「P2」を発表した。その動きの良さからついにヒューマノイドロボットが実現されたものとして一般社会にセンセーションを引き起こした。さらにこれは「ASIMO」(写真2.18)として商品化されヒューマノイドブームを引き起こすきっかけとなった。1999年にはソニーが自律型の犬型ロボット「AIBO」(写真2.19)を商品化し、ロボットを始

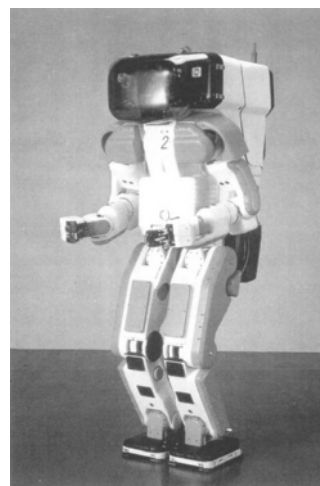


写真2.18 「ASIMO」

めて商品として人間の生活の中に取り込んだ事業化を行ったものとして大評判となった。「ASIMO」「AIBO」に触発され、多くの企業、研究機関、大学がヒューマノイド研究に参入しいろいろな自律型ロボットの開発が社会の話題を賑わしている（写真2.20）。

時あたかも2004年は「鉄腕アトム」が誕生すると設定された年である。2005年愛知万博では数十台のロボット（写真2.21）が会場を賑わすと宣伝されている。マスメディアは「鉄腕アトム」の夢の実現は近いと一般大衆の関心を煽り立てている。現実はその簡単なものとは思えないが、従来の工場の中で使われている産業用ロボットから、宇宙、海洋、原子力、農業、水産業、建設、土木、医療、福祉、防災、公共、さらにはエンターテインメント、家庭といった広い一般社会の中で使われるロボットへと発展が始まることが予想される。ロボットと人間が共生する未来への期待がますます高まってきているのである。



写真2.19 「AIBO」



写真2.20 ヒューマノイド・ロボット「HRP-2」



写真2.21 愛知万博のロボット

3 | サービスロボットの登場

3.1 サービスロボット

人間はいろいろな人工物を創りだし、社会の構造、人間の生活を作り変えてきた。蒸気エンジンに始まる産業革命、電気応用、通信、エレクトロニクス、半導体、コンピュータ、インターネットなど数限りないほどである。20世紀の後半になって産業用ロボットが登場した。産業用ロボットは工場の中で人間の筋肉労働に置き換わる機械として出現した。工場の中で、溶接、重量物の運搬、組み立て、塗装、のり付けといった作業に活躍している。今や自動車工業、電子工業は産業用ロボットなしでは成り立たないほどになっている。

産業用ロボットは、人間に似せることを目的とするよりも人間の労働を置き換えることを目的としているため必ずしも「人間のそっくりさん」の形はしていない。(写真3.1) その多くは、腕は1本、脚は持たず工場の中に固定されていて、目や口の機能も持たないものが普通である。しかし、産業用ロボットの発展の過程で実現されて行った技術は、工場以外での新しい可能性を明らかに示すものだった。人間が生存することが出来ない放射線環境、宇宙空間、深海などにおける作業へのロボットを適用が進んでいった。さらに、人間にとって不快、ないし危険な環境での作業への適用も始まった。その一方、コンピュータ科学の発展とともに、人工知能を実現しようという研究も続けられていた。この両方の努力の総合発展形としてそれまで人間の夢であった「人間のそっくりさん」を実現する



写真3.1 産業用ロボット

可能性が単なる人類の夢ではなくなってきたのである。既に、人間型ロボット、人間のように2足で歩くロボット(写真3.2)などが作られているほかに動物の形のロボット、人体の中に入り込むロボット、今までまったく想像も出来なかった形のロボットも登場してきた。

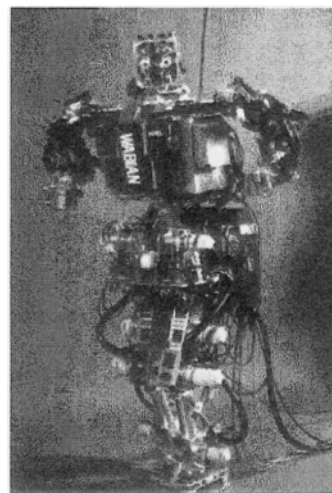


写真3.2 人間型ロボット

これらのロボットは、作業をし、自律的に動き回り、見たり、聞いたり、話したりしながら人間社会の中で人間と一緒に働くものだ。宇宙開発、海洋探索、土木・建設、農業、水産、防災、医療、福祉、家庭、・・・にいたる幅広い分野で「人間とロボットが共生する社会」を作り出そうとしている。今までの産業用ロボットは製造業の工場内だけで働くものだった。この範疇を越えて広く一般社会で人間と共存して働く新しいロボットのことを「サービスロボット」と呼ぶことにしよう。21世紀はまさに「人間とロボットの世紀」と主張する人たちがいるが、この主役はサービスロボットなのである。

3.2 サービスロボットへの期待

日本機械工業連合会と日本ロボット工業会は経済産業省の委託により、平成13年5月、「21世紀におけるロボット社会創造のための技術戦略報告書」¹を編纂、発表した。この中で、これからのロボット産業は急成長し2025年には約8兆円の規模に達すると予測している。従来の主力市場であった製造業分野以外の伸びが著し

¹ 「21世紀におけるロボット社会創造のための技術戦略報告書」日本機械工業連合会・日本ロボット工業会、平成13年5月

い。今後の発展の方向はサービスロボットにあるとしている。

表3.3 サービスロボットの市場予測
(21世紀におけるロボット社会創造のための技術戦略報告書)より)

	2010年	2025年
製造業分野	8,500億円	1.4兆円
バイオ産業分野	900億円	3,600億円
公共分野	2,900億円	9,900億円
医療福祉分野	2,600億円	1.1兆円
生活分野	1.5兆円	4.1兆円
計	2兆9,900億円	7兆9,500億円

これははまだ現在の自動車産業（1999年で40兆円）には及びもつかないが、造船業（1999年で3兆4000億円）、家庭電化製品（同4兆円）を抜き、コンピュータ（同9兆円）に迫る基幹産業に成長すると予測している。この予測の信憑性はさておき人間の生活の中で共生するサービスロボットにかけられている期待の大きさがわかる。

3.3 サービスロボット実現の問題点 -非構造的環境にどう対処するか-

このように大きな期待がかけられているサービスロボットだが、いまだに現実のものにはなっていない。どこに問題点があるのだろうか？

ロボットはまず工場の中で人間の作業を置き換える産業用ロボットとして実用された。これは現代の工場は産業用ロボットの出現以前から自動化に都合の良い環境が出来上がっていたからである。サービスロボットの場合はそうはいかない。例として、農産物を栽培している農場（サービスロボットの活躍分野と）自動車用部品を機械加工している機械工場（産業用ロボットの活躍分野）とを考えてみよう。

農場で生産される作物は例えば同じトマトでも、形、大きさ、熟れ具合、固さなど一つ一つまちまちである。これに対し、自動車部品の方はあらかじめ設計されたとおりの形状、寸法、精度、材質が保たれている。

トマトはトマトの木のいろいろな場所にランダムに生っている。機械工場では、加工の対象物である材料は例えばパレットと呼ばれる台の上の定位置に取り付けられていて、そのパレットが工作機械に運ばれてくる。トマトの実を収穫するには、人間がトマトを摘み取るのに都合の良い位置に自分で近づかなければならない。さらにトマトと人間との立体的な位置関係を把握しトマトの形、大きさ、向き、固さなどを認識してどのように摘んだら良いかを判断して収穫する。機械

加工の場合はずっと簡単だ。加工の対象物は自動的に機械の前の定まった位置に運ばれてくる。対象物の寸法、形状、精度、材質などはあらかじめ判っている。何の判断も必要とせずただちにあらかじめ準備されているプログラムによって加工を進めればよい。

この機械工場のように自動化が容易に実現できるように特別に作り上げられている環境を「構造的環境：structured environment」と呼ぶことがある。この対極にある（特にそのような特別な配慮なしに）自然に存在している環境を「非構造的環境 non-structured environment」と呼んでいる。ロボットが産業用ロボットの形で大量生産の製造工場にまず導入された背景には、そこにロボットの導入を可能にしている「構造的環境」が存在していたからだったのである。一般の「非構造的環境」でロボットを利用するためには産業用ロボットが解決していない新しい課題を克服しなければならない。この「非構造的環境」に対する対応能力がサービスロボット実現のための最大の課題なのである。これが自ら考え、認識し、判断する「自律性」と呼ばれる性質なのである。

この「非構造的環境」にどのように対処するかが一般のロボット工学発展のためには避けることの出来ない最大の課題なのである。産業用ロボットが発展するにつれ工場外への適用も始まってきた。残念ながらまだこの「非構造的環境」にたいする一般的な方法論は見出せていないのが現状である。現在実現あるいは研究開発されているサービスロボットは、完全な自律性はまだまだはるか未来の夢であるので、

- ・人間の判断を援用する（原子炉の点検ロボットでは人間がテレビカメラの映像を見ながらロボットに動作指令を与えている。）
- ・構造的環境を利用する（ビルの清掃ロボットではビルの地図情報をもとに移動する。）
- ・構造環境を作ってやる（農作業ロボットではレールを設置してその上を走行する。）

などの工夫をこらして実用に漕ぎつけているといった程度のものである。サービスロボットの発展のためには、おそらく、現状をはるかに超えるさらに高度の人工知能の開発が必要なのであろう。

3.4 産業用ロボットとの違い

この非構造的環境に対応するための自律性が最大の課題であるが、特定のサービスロボットを実現するにはさらに産業用ロボットには見られなかったいろいろな問題が発生する。

- ① 環境対策 人間が生きていけない、あるいは留まることが困難な環境で働くことはロボットの重要な役割である。このような環境はロボットにとっても問題が生じることが多い。原子力発電所の放射線環境ではロボット自身も放射線によって素材が劣化しないことが必要である。宇宙開発では真空の雰囲気、無重力の環境で動作するロボットが必要になる。海洋探索では深海の大きな水圧に耐えなければならない。
 - ② 安全性 産業用ロボットの場合は、「安全柵」によって人間と隔離することが法律で定められている。広く一般の社会で人間と共生しなければならないロボットとしては、本質的に、人間に危害、災害を与えることがないように作られなければならない。
 - ③ 取り扱いの容易性 技術者、技能者によって使用される産業用ロボットと異なり、サービスロボットは一般大衆でも用意に操作できる「ユーザフレンドリー性」が要求される。
 - ④ 手、足の動作 産業用ロボットは1箇所固定して取り付けられ、工具が取り付けられている1本の腕が作業をする程度のものが大部分である。サービスロボットは、自分自身で動きまわり、2本の腕を関連付けて動作させ、指によっていろいろな対象物をつかんだりする機能が必要とされることがある。
 - ⑤ 人とのコミュニケーション 産業用ロボットは人のいない製造現場であらかじめ決められた動作をそれこそ「ロボットのように」黙々と繰り返すだけでよかった。人と共生して働くサービスロボットでは常に人間と情報を交換しながら働くことが必要とされる場面が多い。
- などなどの問題がある これについては次章以降で考えていく。

4 極限環境における応用¹

原子力発電所では、燃料や施設から人体に危害を与える放射線が放射されている。宇宙開発では空気が存在していない宇宙空間での作業が要求される。深海探索では水圧に耐え、空気の補給を受けながら作業しなければならない。このような人間にとって生存不可能な厳しい環境を「極限環境」と呼ぶ。この極限環境で人間に代って作業をしてくれる自動機械は早期から切望されていた。特に、原子力、宇宙、海洋などの大開発プロジェクトの要求でさまざまなサービスロボットが開発され実用されてきた。

4.1 原子力

原子力発電の全ライフサイクルにわたって、人体に危害を与える放射線の存在によって人間が近づけない、あるいは人間に危険な環境が存在する。人間が存在できない環境で作業を行うためにはマニピュレーション機能、移動機能を持つロボットを、人間が安全な場所から遠隔操作するのが現実的である。

この分野のロボットには、

- ① 耐放射線性 場合によっては、さらに耐高温性、耐腐食ガス性も要求される。
- ② 移動機能
- ③ 遠隔マニピュレーション機能
- ④ センシング機能 感覚フィードバックが必要とされる場合もある。

現状では、保守点検分野への適用がほとんどであるが、稼働作業の一部を受け持つもの、原子炉解体作業ロボット、原子力発電所防災ロボットなどの開発も行われている。

(1) 原子力発電運転への適用²

原子力発電におけるロボット化のニーズとして従来

から

- ・作業の省力化、熟練作業員不足の解消を狙った作業効率・作業品質の向上
- ・作業員の放射線被曝の低減
- ・定期検査期間の短縮 運転効率の向上
- ・プラント運転監視

が指摘されていた。

過去の主要な研究開発として次のロボットが挙げられる。

- ・1972年 三菱重工 蒸気発生器伝熱管検査用 蒸気発生器を懸垂歩行する空気圧5軸ロボット 渦電流探傷装置を電熱管端部に案内自動探傷するもの。自重12.5kg 可搬質量15kg³
- ・1984年 石川島播磨重工 原子炉容器定期検査用ロボット 検査対象部に設置されているレールやラックに装着され、移動しながら超音波プローブによって探傷する。電気・空気圧 自重18kg 最大速度25mm/s 検査箇所に応じたいろいろなロボット⁴
- ・1985年 東芝 CRD（制御棒駆動機構）交換用ロボット 10種の駆動部でCRD取り付けボルト8本の同時着脱などの複雑な動作を実現 ボルト締め付け時のトルク制御、誤動作防止機能を実現⁵。電気・空気圧 自重10トン 可搬200kg
- ・1985年 東芝 モノレール軌道を走行し原子力発電所内施設の視覚による点検・監視を行うロボット 3次元物体認識機能を持ち異常の自動検出ができる⁶。4103 7.2m/分で移動し施設内の広い範囲を点検
- ・1985年 三菱重工業 原子力格納容器内軽作業ロボットを試作 脚車輪機構を使って階段の昇降、配管の乗り越えが可能。計故障ならプラントを停止せず対処することを目指した⁷。4105 自重420kg 可搬20kg
- ・1986年 東芝／日本原燃サービス 原子力プラン

1 「極限作業ロボット」特集、ロボット、Vol.62、1988

「極限作業ロボット」特集、ロボット、Vol.80、1991

2 「原子力発電所におけるロボット化」特集、ロボットVol.23、1979

篠原「原子力用遠隔ロボット技術の研究開発課題」ロボット、Vol.71、1989、pp77-81

「原子力発電所におけるロボット技術のニーズ」東京電力・原子力技術部資料

3 「蒸気発生器全自動ECT探傷システム」、産業用ロボット導入便覧、日本産業用ロボット工業会、pp186-187、1992

4 「原子力発電所のISI検査用ロボット」、産業用ロボット導入便覧、日本産業用ロボット工業会、pp174-175、1992

5 「CRD（制御棒駆動機構）自動交換システム」、産業用ロボット導入便覧、日本産業用ロボット工業会、pp196-197、1992

6 「モノレール走行による原子力発電所内施設の点検・監視」、産業用ロボット導入便覧、日本産業用ロボット工業会、pp168-169、1992

7 「原子力格納容器内軽作業ロボット」、産業用ロボット導入便覧、日本産業用ロボット工業会、pp162-163、1992

ト保守用電動式マニピュレータ 7自由度の双腕マスタースレーブ遠隔操作マニピュレータ バイラテラル制御 重力補償 グリップの交換可能⁸。

- ・1988年 富士電機／日本原子力発電 原子炉検査用大型多関節マニピュレータ 全長14m 10関節 狭隘部にも進入可能 先端部を交換して保守点検を行う⁹ (写真4.1)。

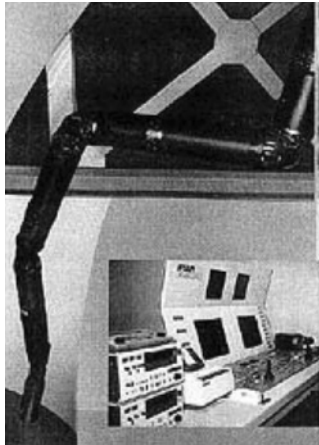


写真4.1 富士電機／日本原子力発電
原子炉検査用マニピュレータ

- ・1990年 三菱重工業 ISI用の狭隘部点検システム 車輪で20mm/sで250mm－350mmの狭隘部を走行する。200度Cの高温に耐え、溶接線を自動追尾し目視検査、電磁超音波探傷¹⁰を行う。
- ・1992年 三菱重工業 原子炉容器内の水中を移動して超音波探傷する。先端に検査プローブを有する7軸アームを搭載した水中航行台車、レーザ光による3次元計測で台車位置を同定する位置評定装置からなる。自重300kg¹¹。
- ・1997年 石川島播磨重工 AIRIS21 原子炉容器探傷ロボット¹² (写真4.2)。

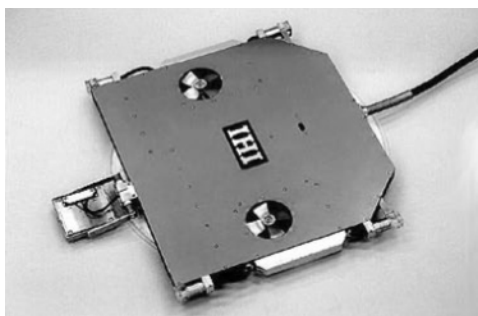


写真4.2 石川島播磨重工 AIRIS21

最近の新しい開発の事例を見てみる。

① 原子炉压力容器スタッドテンショナー

従来作業者の手作業あるいは手動操作によって行われていた原子炉压力容器の点検・保守作業の一部、(スタッドボルトの緩め・締め付け、ナットの取り外し・取り付けを自動化し作業人員の削減、作業時間の短縮、被曝線量の低減を狙いとする。

作業者が目視で大まかな位置に位置決めすると、スタッドボルトの位置決め芯出し、スタッドボルトの緩め・締め付け、ナットの取り外し・取り付けが自動的に行われる。さらに上蓋を移動し保管することも可能となっている。人間の視覚による手動運転に、既知の原子炉構造ジェオメトリーを利用するスタッドボルトの取り付け・取り外しの自動化を援用するものでロボットというより専用機に近いものではあるが作業人員を約1/4、作業時間を約2/3、被曝線量の低減の効果を挙げている。

② 制御棒 (CRD：Control Rod Drive) 取り扱い装置

原子炉制御棒駆動機構CRDを定期的に交換する必要があるが約200本のCRDは高放射線レベルにあり環境は狭い。本装置はCRD交換作業の省力化、作業時間の短縮を狙いとしている。格納容器内に設置されているカメラからの映像を遠隔制御室に送り遠隔操作員の指示によりコンピュータ制御の遠隔運転により、8本のボルトを同時に締め付け・緩めを行う。締め付けトルクの管理も行う。操作員と作業員の2名で作業が可能となり1/2－2/5の省力化、被曝線量 約1/5の効果が得られている。

③ 自動ISI (供用期間中の検査：In Service Inspection) 装置

原子炉压力容器は原子炉の起動、停止等に伴って発生応力の変化が生じる。溶接部は残留応力があること、応力集中も否定できないことから、母材部に比べて傷が発生する可能性が潜在的に高い。そのため定期点検では特に原子力压力容器、配管の溶接部の欠陥を探傷する必要がある。従来作業員によって行われていた探傷作業を自動化して作業員の被曝線量を低減し更に探傷の信頼性の向上を狙った。胴体用、下鏡用、胴・ノズル用、配管用の各装置があり人手によって装着する。探傷子はあらかじめ設置されている軌道上をプログラ

⁸ 日本工業新聞 1997.10.3.

⁹ 日経産業新聞 1988.4.12.

¹⁰ 「ISI用狭隘2壁間点検システム」、産業用ロボット導入便覧、日本産業用ロボット工業会、pp184-184、1992

¹¹ 「原子炉容器超音波探傷装置」、産業用ロボット導入便覧、日本産業用ロボット工業会、pp188-189、1992

¹² 日本工業新聞、1997.10.3.

ム自動走行し、検査データを送信し、データをリアルタイムに収録する。作業者の被曝線量の低減、溶接部の検査データ解析が可能となった。

④ 自動燃料交換機

約4.5mの長さの燃料を遠隔制御室からワンマン操作により自動交換する。操作位置精度の向上、燃料誤挿入の防止、他設備との衝突防止、交換のスピード化、誤操作防止などを目的とするさまざまな安全制御機能を有している。作業時間 約1/2、作業人員 1/3、被曝線量 約1/5の効果が得られている。

⑤ 格納容器内遠隔監視装置

格納容器内の異常検出を自動化し異常事象の早期発見を狙うもので、格納容器内に固定ITV、走行レールを設置しITVカメラ、赤外線カメラ、マイクロフォンを走行させ死角のない監視を行い、画像・音声・温度分布データの比較により状態変化を自動認識する監視ロボットである。

さらに最近の新しい開発として従来アクセス困難かつ複雑な作業として自動化が遅れていた作業の遠隔自動化が実現されている。

⑥ 水中移動ロボット

水中の炉内構造物、圧力容器溶接部等を確認するため、CCDカラーカメラを搭載し水中を遊泳して点検を行うロボットが開発されている。日立製、東芝製の水中点検ロボットなどがその例である。

(2) バックエンド（後処理）技術

最近、高放射能レベル廃棄物の処理、老朽設備の廃止措置などの後工程への対応が新しい問題として浮き上がっている。

① 核燃料再処理

2004年 日本原子燃料で建設中、2005年より稼動予定の核燃料再処理施設は、使用済み核燃料をせん断、溶解、固体ガラス化、ケース溶接、保管といった作業を、コンクリートで遮蔽された施設の中で稼動に入ったら40年間人間が作業できない締め切り環境で運転しなければならない。遠隔操作される自動クレーンに吊り下げられたパワーマニピュレータで重量物の保守作業を行い、軽量、複雑な対象物は自動クレーンで、固定設置されている双腕マニピュレータまで搬送し保守作業を行う。2次元のカメラで遠隔操縦するが、触覚インターフェースの追加が予定されている。

② 原子炉解体

使用済みとなった原子力発電装置（原子力圧力、容器、ボロンシールド、チャージボット、黒鉛ブロックなど）を廃棄する場合、残留放射能を有する施設を遠隔運転により安全に解体破棄しなければならない。これに必要な解体技術がNUPEC、勝田工学試験所において開発された。

③ 原子力発電所防災ロボット

2001年東海村原子燃料事故に触発され急遽、原子力施設防災ロボットが製造科学技術センターのまとめで開発された。製造科学技術センター／三菱重工／東芝／日立／サイバンネテックス 原子力防災システムを試作した（写真4.3）。作業監視ロボット、小型軽作業ロボット、作業ロボット、重量物運搬用ロボット、耐高放射性対応ロボット 階段昇降・ドア開閉・災害状況把握・弁操作・機材搬送¹³などである。遠隔操作で原子力関連施設屋内を移動し、災害情報を収集し支援作業を行う。情報遠隔収集ロボットは 無線・有線の遠隔操作により階段、段差、堰、平地を走行しドア開閉、弁開閉。配管穿孔／切断し情報収集をおこなうものでRESQ-A（車輪による移動 本体50kg 初期情報の収集用）、ERSQ-B（形状可変中折れ型クローラ 本体540kg 詳細情報収集用）、RESQ-C形状可変中折れ型クローラ（本体650kg 試料等情報収集用）の3種が試作された。



写真4.3 東芝 原子力防災システムの作業監視ロボット

4.2 海洋ロボット¹⁴

海洋の分野では

- ・海洋学、固体地球物理学、生物学などに関する科学的調査
- ・海底石油資源、漁業資源の開発
- ・さらには軍事、港湾土木、海底ケーブル、レジャーなどへのロボットの適用が求められている。

¹³ 「原子力防災支援システムの開発」日本ロボット学会誌、No.6、pp717-721、2001

¹⁴ 浦「海中に求められるロボット」日本ロボット学会誌、Vol.22、No6、pp692-696、2004

このために使用される海中ロボットとしては次のような技術が必要となる。

- ① 耐圧技術 海中の水圧（深度が10m増えるにつれて環境圧力が1気圧増加する）に耐える構造でなくてはならない。
- ② 通信技術 水中では電磁波の減衰が大きいため無線通信は実用的でない。音響通信は伝播速度が遅く（1,500m/s）、伝播密度も小さいので、陸上ロボットのような遠隔操縦は困難である。ロボットにケーブル（umbilical cable）を取り付け海上の母船や陸上と有線通信する有索機では、ロボットからのリアルタイムの情報の確保と遠隔操縦を行うケーブルによって拘束されているため広い海域をカバーすることができないし、また複雑な形状、地形の環境での作業は困難である。一方、無索機はケーブルがないため自由な運動が可能であるが、周囲環境の自動認識が困難、高度の自律性を持たせる為の技術困難性がある。
- ③ 位置同定技術 水中ではGPSは使えない。慣性航法はドリフト問題がありこれだけに頼ることはできない。現実にはトランスポンダを使用することが多いが広域を活動する場合は困難である。

<トランスポンダー>

船舶や航空機が発信するレーダ電波に反応して自動的に応答電波を発信し位置を知らせる装置。救命いかだなどに装着されて遭難時の救助に役立てられている。

- ④ 水中移動技術 水圧に耐え、水流に拮抗して運動しなければならない。
- ⑤ 動力源技術 作業領域が狭い場合はケーブルで動力を供給できるが広がると長時の動作を可能とする小型の高効率エネルギー源が必要である。
- ⑥ センシング技術 水中の視界は一般に悪く、海中環境のセンシングも難しい。

(1) 海中ロボットの分類

海中ロボットを分類すると

- ① 自航式有索無人潜水機ROV
(Remotely Operated Vehicle)
重作業ROV
海底走行型ROV
魚群探知 放牧ロボット

海洋構造物依存型ROV

カメラロボ

- ② 無索無人潜水機UUV
(Unmanned Untethered Vehicle)
準自律型海中ロボット
- ③ 自律型海中ロボットAUV
(Autonomous Underwater Vehicle)
となる。

(2) 有索無人潜水機ROV

光通信の発展により海底通信ケーブルの需要が増え、ケーブルを海底に敷設するための有索機が開発されている。1981年海底ケーブル搜索点検を目的にKDDにより「MARCAS」が開発された¹⁵。200mまで潜航できた。

1984年にはTV撮影だけを目的とした単機能のカメラロボ「RTV100」が三井造船により商品化された。30kgという軽量でTVカメラで観察が行えるもので操作はジョイスティックによる。水力発電所のダムや水路の点検から始まり種々の分野に適用された¹⁶。

港湾建設や浚渫工事などの特殊用途の遠隔操縦装置も例は少ないが利用されている。

1985-89年にかけて港湾建設に伴う水中調査作業ように運輸省港湾技術研究所において「アクアロボ」が開発された¹⁷。深度50m程度までの海底の凹凸面や傾斜地でも作業できるよう6脚による歩行を行うもので、超音波距離計と水中テレビで海底の捨石の状況確認や、水中構造物の破損状態の調査観察を行った。

1987年に、「MARCAS」の発展型「MARCAS2500」が三菱重工業とKDDによって開発された¹⁸（写真4.4）。当時世界最深の2500mまで潜水し、海底の土質調査、



写真4.4 「MARCAS2500」

¹⁵ 海中ロボット、(社)国際海洋科学技術協会、pp49-50、1993

¹⁶ 海中ロボット、(社)国際海洋科学技術協会、pp50-51、1993

¹⁷ 海中ロボット、(社)国際海洋科学技術協会、pp75-77、1993

¹⁸ 産業用ロボット導入便覧、日本産業用ロボット工業会、pp292-293、1992

磁気センサによる海底ケーブルの探査、ウオータージェットによる海底ケーブルの掘り出し、2本のマニピュレータによる海底ケーブルの保守作業を行う。水上部も含めてコンパクトなシステムにまとめ数百トン規模の船舶に搭載可能な経済性を実現した。

1987年には三井造船と海洋科学技術センターにより3300mまで潜水できる「ドルフィン3K」が開発された¹⁹（写真4.5）。2本のマニピュレータを持ち海洋調査のほか2000m級の有人潜水艇救難の作業もこなす。

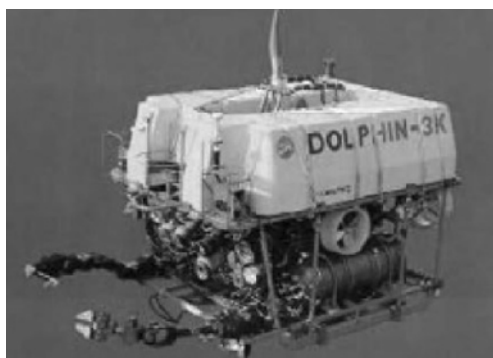


写真4.5 「ドルフィン3K」

1993年には三井造船と海洋科学技術センターにより世界最深の11000mに潜航できる無人潜水艇「かいこう」が開発された²⁰（写真4.6）。大深度まで潜行可能な大型の重作業ロボットはランチャーと呼ばれる中継機を介して支援船と結ばれることにより大深度に置ける移動性を向上した。ランチャー/ROVと支援船の間はランチャー/ROVとを空中で吊り上げることで強度を持った一次ケーブルで繋がれる所定の深さに達すると、ROVをランチャーから分離し、ランチャー内部のケーブルドラムに巻かれた二次ケーブルを繰り出してROVを展開する。各種海洋調査のほかに6500m級の有人潜水艇「しんかい6500」の救難作業も



写真4.6 「かいこう」

対象としている。しかし「かいこう」は2003年の296回目の潜行の回収作業中二次ケーブルが切断し、行方不明となってしまった。深海における水中技術がいかに困難であるかを物語っている。

(3) 自律型海中ロボットAUV

ROVはケーブルで拘束されているため、広い海をカバーすることができない、また複雑な形状の構造物内での作業は困難である。一方、無索機はケーブルがないため自由な運動が可能であるが、周囲環境の自動認識が困難、高度の自律性を持たせるための幅広い研究開発が必要であるという困難性がある。

日本の本格的なAUVを表4.1に示す。海中を一定深度、あるいは海底からの一定高度で航行して海水や海底形状を観測する航行型AUVは比較的簡単なためいろいろな開発が行われている。

1992年にはKDDにより海底ケーブル敷設・保守支援用として「Aqua Explore 1000」が開発された²¹。1000m

表4.1 日本のAUV

名前	開発組織	建造台数	種類	目的	建造	質量(kg)	コンピュータ	OS	設計深度(m)
ツインバーガー	東大生研	2	高機能	R&D	1992	118	NS GXM, 200MHz (Pentium互換)	RTLinux3.0	50
アールワン・ロボット	東大生研/三井造船	1	航行型	実用	1995	4,000	MC68040, 25MHz (2xPEP-9000 VM40)	Vx-Works Tornado 2	400
アクアエクスプローラ II	KDD研	2	航行型	実用	1997	260	MC68060	Vx-Works Tornado 2	500
トライドッグ	東大生研	1	高機能	R&D	1999	174	3xPentium MMX, 233MHz	Windows NT	100
淡探	東大生研/琵琶湖研/建設省/三井造船	4	高機能	実用	2000	180	MC68060, 50MHz (PEP-VM62)	Vx-Works Tornado 2	110
アクアエクスプローラ2000	Kマリン/KDDI研	2	航行型	実用	2000	300	486DX66 (2xPCM-3346)	Vx-Works Tornado 2	2,000
うらしま	JAMSTEC/三菱重工業	1	航行型	R&D	2000	7,500	MC68060, MC68040	Vx-Works Tornado 2	3,500
マリンバード	川崎重工業	1	航行型	R&D	2001	1,300	MPC750 PowerPC, 233MHz	Vx-Works Tornado 2	100
r2D4	東大生研/三井造船	1	航行型	実用	2003	1,690	PowerPC, 233MHz PC104	Vx-Works Tornado 2	4,000

¹⁹ 海中ロボット、(社)国際海洋科学技術協会、pp53-55、1993

²⁰ 海中ロボット、(社)国際海洋科学技術協会、pp55-57、1993

²¹ 海中ロボット、(社)国際海洋科学技術協会、pp100-101、1993

までの海洋で海洋調査、海底ケーブルの埋設状況調査、海底ケーブルの敷設・保守作業の支援を目的とし、TVカメラや各種の計測装置を搭載し、無策式で水中での移動性を従来のものに比べて大幅に改善した。

1997年にはKDDにより「Aqua Explore 1000」の実用機として「Aqua Explore II」が開発された²²（写真4.7）完全な自律行動は実現できていないが、1999年には台湾海峡で合計400kmにわたる海底ケーブルの調査を行うなど実績を上げている。

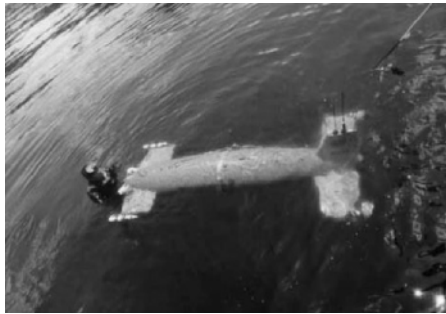


写真4.7 「Aqua Explore II」

陸上のロボットのようにテレビカメラの映像を基に認識し判断を行うAUVは、(1) 水中画像は特徴が少なく自動認識が困難、(2) 照明のためのエネルギーが必要、などの理由で世界的にも研究開発の実績は少ない。東京大学生産技術研究所のテストベッドロボット「Twin Burgerツインバーガー」²³（1992年）シリーズから発展した「Tri-Dogトライドッグ」（1997年）や琵琶湖湖水調査専用の「淡深」（2000年）は数少ない例である。

東京大学生産技術研究所と三井造船が1995年に共同開発した「アールワン・ロボット」²⁴は2000年10月に伊東市沖の手石海丘の全自動観測に成功し改定の火口の音響写真を撮影した²⁵。航行型AUVは、慣性航法装置、深度計、高度計、前方探査ソナーなどのデータを基にして自律航行を行い、長距離長時間航行を行うように開発されている。

「アールワン・ロボット」は、エネルギー源を閉鎖式ディーゼルエンジン（CCDE：Closed Cycle Diesel Engine System）からの電力としている点に特徴がある。全長8m、空中重量4トン、最大潜水深度400m、24時間潜航することができ100kmの航続距離を持つ（写真4.8）。その後継機「r2D4」は2003年7月に完成し、

2003年12月の間で駿河湾、佐渡沖、沖縄黒島海丘で11回の潜航観測を実施し実用機としての有用性を実証した（写真4.9）。「アールワン・ロボット」と同じく緯度、経度、深度で規定された航路点（way point）を順次巡り、その間、サイドスキャンソナーやインターフェロメトリソナーなどを用いて海面や海底近傍の広域観測を行う。その途中で特異な観測値を得たときには、航路計画を変更しその地点近傍のより詳細な観測ができる構成としている。

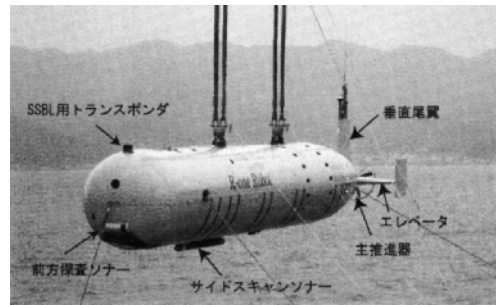


写真4.8 アールワン・ロボット



写真4.9 r2D4

図および表に示されるように「アールワン・ロボット」の全体構成には大きな変更を加えないで、同等以上の運動性能、潜航性能、観測性能を実現した。

主な特徴としては小型軽量（全長4m 空中重量4トン 支援船を特定しない）、自己完結型（トランスポンダ装置などの支援は不必要）、高精度位置測定が可能（INSとドップラーソナー）、観測経路のダイナミックな変更、主エネルギー源としてLiイオン二次電池の採用が挙げられる。

海中人工物や熱水噴出海域など規定された狭い範囲の観測をAUVで行うためには、特定の範囲の領域にとどまり外界のより詳細な認識とそれに基づいた高度な判断と行動決定を行い6自由度程度のマニピュレーション制御を行うことが求められる。対象物の認識は

²² 浦「自律型海中ロボット」、日本ロボット学会誌、Vol.18, No.7, pp933-936、2000

²³ Fujii et al.「Development of a Versatile Test-Bed “Twin-Burger” toward Realization of Intelligent Behaviors of Autonomous Underwater Vehicles” Proc.OCEANS93, Vol.1, pp186-192, 1993

²⁴ 浦「海中に求められるロボット」、日本ロボット学会誌、Vol.22, No.6, pp694-695、2004

²⁵ 浦ほか「航行型海中ロボット「アールワン・ロボット」による手石海丘観測」、海洋調査技術、Vol.13, No.1, pp11-25、2001

一般には音響による計測データによって行われるが現時点では解像度が悪く雑音も多く「高知能型AUV」に十分なものではない。対象物に接近した場合はビデオ画像を取得してこれに基づいて行動を計画するシステムが考えられる。写真4.10はこのような目的のために1999年に製作された「トライドッグ1号」である。NiCd電池をエネルギー源とし6基のプロペラスラストで運動を制御する。頭部のアクリルドームにはパン・チルト装置を持ったテレビカメラがあり、これで前方の観察を行うまた、3本の平行レーザービームを出し、その反射点を認識することにより、対象物までの距離と傾きの測定を行うことができる。また別途、2自由度のマニピュレータを取り付けることが可能である。



写真4.10 トライドッグ1号

2000年には海洋科学技術センターにより氷海の下を自律航行する「うらしま」が開発された²⁶（写真4.11）。3500mまで潜行し2002年に100kmを越える潜行に成功している。燃料電池を動力源にして300kmの航続距離を目指している。



写真4.11 「うらしま」

2001年には川崎重工により「マリンパード」が開発されている。

4.3 宇宙

人間が生存できない低温、真空環境の下で物体のハ

ンドリングを行う宇宙ロボットには

- ① 小型軽量化 ロボットの打ち上げ能力の制限から徹底した軽量化が必要
- ② 耐環境性 真空、低温、宇宙線、打ち上げ時の振動に耐えること
- ③ 反動対策 宇宙ではロボットは地上のように踏ん張ることができない。反動でロボット自体が動くことへの対策が要る
- ④ 通信遅れ 地上との距離が非常に大きいため通信遅れによって制御系が不安定となる。この対策が必要

などがあげられる。

宇宙環境でのロボットは、移動体の研究は盛んに行われているが宇宙空間で作動した例は少ない。実用化されているのはマニピュレータのみである。1997年にスペースシャトルでマニピュレータ飛行実証試験が行われたのが最初で、技術試験衛星ETS-VIIに国産マニピュレータを搭載して実験を行った。今後は国際宇宙ステーションの日本宇宙実験モジュールに搭載する親子型マニピュレータが計画されている（写真4.12）。

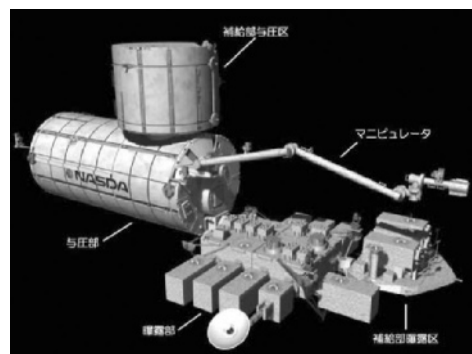


写真4.12 日本宇宙実験モジュール用親子型マニピュレータ

1997年宇宙開発事業団と東芝は技術試験衛星ETS-VIIに搭載するマニピュレータを開発した（写真4.13）。約2mの長さの6自由度の関節型アームで最大430kgの負荷を操作できる。打ち上げ後宇宙空間で種々の実験

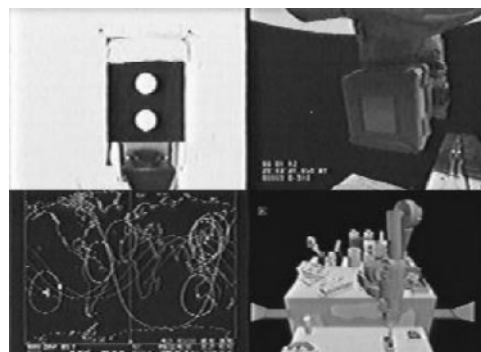


写真4.13 ETS-VIIに搭載するマニピュレータ

²⁶ 「自律型海中ロボット」、日本ロボット学会誌、Vol.18, No7, pp31-34、2000

を行った²⁷。1997年に通産省が高機能ハンドシステムを開発した。3指を持ち、多くのセンサを装備した小型の精密作業ロボットである。技術試験衛星ETS-VIIに搭載して打ち上げられ、1998年に実験が行われ機能が実証された²⁸。

4.4 マイクロ環境²⁹

1980年代の後半になると半導体プロセスでは線幅がナノオーダー領域に突入し始め、微細加工という新しい技術が出現するようになった。この流れを背景にアメリカのMEMS (Micro Electro Mechanical System)、ヨーロッパのMST (Micro System Technology) という技術領域が生まれた。いずれも半導体プロセスを利用して機械的な動きを実現しようとするものであった。これに対して日本で「マイクロマシン」という概念が生まれた。これは、機械の微小化が目的であり、その製作技術として半導体プロセスも視野に入れるがこれのみを主要技術とは考えず、微小機械をシステム化しうなれば「マイクロメカトロニクス」と呼ぶべき概念であった。通商産業省工業技術院は産業技術研究開発制度の中で「マイクロマシン技術の研究開発」プロジェクトを設定し、1992年度から10年間予算総額250億円の研究開発を実施した。工業技術院の機械技術研究所、電子技術総合研究所、計量研究所の3つの国立研究所と、NEDO (新エネルギー・産業技術総合開発機構) から (財)マイクロマシンセンターを通じて委託を受けた国内22企業、2団体と海外2団体が研究開発に参加した。初めの5年間はマイクロマシンを実現するために必要な機能デバイスの開発、次の5年間はシステム化するための問題点を探ることに重点が置かれた。システム化の対象としては

- ① 発電施設の検査システム
 - ② マイクロファクトリー
 - ③ 医療応用システム
- である。

(1) 発電施設の検査システム

火力発電所の蒸気発生設備の細いパイプとタービン翼列の検査を対象とされた。パイプの検査はパイプの

内面と外壁の検査の2方式に分かれる。

- ① 内面検査システムはワイヤレスで移動可能なシステムで、外部から赤外線および超短波を利用してエネルギーと情報の伝送を行う (写真4.14)。検査ユニットはエネルギー・情報の受発信システム、視覚装置、移動機構を外径9.5mmの本体に収容している³⁰。

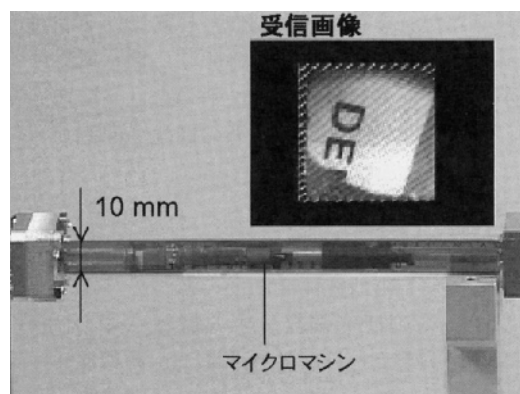


写真4.14 内面検査システム

- ② 外壁検査システムは、多数の小型ユニットが独立に移動できるとともに相互に連結することで機能を発揮できる構成 (写真4.15) となっている³¹。

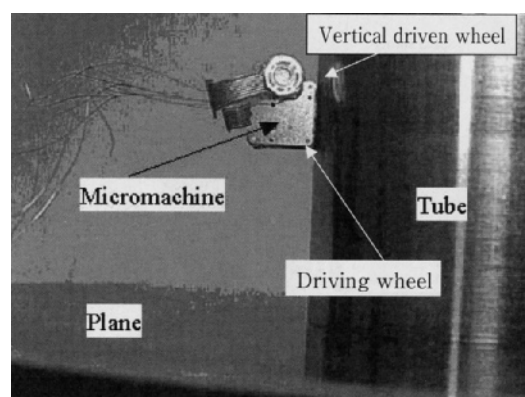


写真4.15 外壁検査システム（単独）

- ③ タービンプレード列の検査システム

直径8mmのフレキシブルな蛇状の本体の先端にレーザ溶接装置備え検査だけでなく補修機能も持たせている³² (写真4.16)。

(2) マイクロファクトリー

マイクロファクトリーは微小機械、微小要素を製造するためのデスクトップ型工場とも言うべき製造シス

27 特集 ETS-VIIにおける宇宙ロボット実験、日本ロボット学会誌、Vol.17、No8、1999

28 特集 ETS-VIIにおける宇宙ロボット実験、日本ロボット学会誌、Vol.17、No8、1999

29 特集「マイクロマシン」、ロボット、日本ロボット工業会、Vol. 145、2002

30 川原「ワイヤレスマイクロマシンの研究開発」、ロボット、日本ロボット工業会、Vol.145、pp34-38、2002

31 武田ほか「細管群外部検査システム」、ロボット、日本ロボット工業会、Vol.145、pp39-43、2002

32 矢田「マイクロマシンプロジェクト研究開発の概要」、ロボット、日本ロボット工業会、Vol.145、pp32-33、2002



写真4.16 タービンブレード列検査ロボット

テムである。ここで使われる組み立てユニットとして各関節に小型、高トルクの多層型超音波モータを搭載したマイクロロボットが開発された³³。

(3) 医療への応用

脳血管診断・治療マイクロカテーテルへの適用を想定したマイクロレーザーカテーテルおよびマイクロ触覚センサカテーテルのマイクロ化などの研究開発が行われた。

³³ 古田「マイクロ加工・組み立て用試作システムの研究開発」、ロボット、日本ロボット工業会、Vol.145、pp44-48、2002

5 | 公共・社会インフラ整備への発展

日本は1980年台に入って高度成長時代に突入すると、将来若年労働力の不足は必至との見通しから極端なまでの労働力不足の恐怖感におびえるようになった。事実、いわゆる3K（危険、きつい、汚い）作業に対する労働力の確保が難しくなった。特に屋外に置ける過酷な労働である建設、土木、エネルギー、防災といった公共・社会インフラ整備の分野では外国人労働力への依存が高まったが、同時に機械化・自動化への要請がますます高まった。建設、土木、エネルギー、環境保全、防災などの公共分野、社会インフラ整備の分野で人間にとって不快な作業を代行するロボットの開発が試行錯誤されてきた。バブル崩壊後、一時のような極端なニーズは後退したものの、長期的な労働力不足は必至であり、今までに行われた様々な試みは今後必ず有用なものとなると考える。

5.1 建設¹

わが国に建設ロボットが登場したのは1980年初頭でまさに「ロボット普及元年」とほぼ時期を同じくする。当時、建設業界は、建設労働者の不足とともに技能者の高齢化によって今後生じるであろう技能伝承の問題に対する危機感とから、施工の合理化、生産性の向上に向けた各種の自動化、ロボット化への取り組みを始めていた。

建設ロボット、建設自動化システムは生産工場用ロボット、システムに比べて

- ① 作業条件が厳しい
- ② 作業現場がその都度変わる
- ③ 取り扱う資材の寸法が大きく重量が重たい
- ④ 一品仕様のものが多い

という困難性がある。その結果、技術的困難度が高く、研究開発費もかさむという問題がある。

鉄骨構造の建物に耐火被覆材料を吹き付ける作業は粉塵が発生する中で行う悪環境作業である。1982年清水建設／神戸製鋼所は耐火被覆材料のロックウールを鉄骨に吹き付けるPTP制御の「鉄骨耐火材被覆ロボット」を開発し（写真5.1）世界最初の建設ロボットとして注目を浴びた。1984年には大林組／マックグレゴア

鉄骨玉掛け外し作業を無線で遠隔操作する「オートクランプ」を開発した。1985年に清水建設／イーグルクランプが「マイティシャックル・エース」を開発した。

鉄筋工事では1984年に鹿島建設／日立建機が原子力発電所建設における鉄筋配筋作業をPTP制御によるブレイバックタイプの「自動配筋ロボット」を開発した。一本の鉄筋は長尺（12m）かつ重量は100kgを越える。鉄筋作業の省力化に貢献した。



写真5.1 「鉄骨耐火材被覆ロボット」

コンクリート工事では1983年に竹中工務店／極東開発工業がビル建設における配筋後のコンクリート打設を遠隔操作で行う「コンクリートディストリビュータ」（写真5.2）、1985年に大林組／三菱重工業がプレーシングクレーンを開発した。また1984年に鹿島建設／カジマメカトロエンジニアリングは、コンクリートの打設後、床を人がコテで表面を平滑に仕上げる作業をジャイロコンパス、走行距離センサによる自律航法装置を利用して行う「コンクリート床直仕上げロボット」（写真5.3）を開発した。



写真5.2 「コンクリートディストリビュータ」

¹ 「ロボット導入便覧」日本ロボット工業会 1997
「建設作業のロボット化」工業調査会 1999.6.10
「建築の技術 施工」5つ記号 彰国社 1988、no.271



写真5.3 「コンクリート床直仕上げロボット」

仕上げ工事では1987年に清水建設が天井ボードの取り付け作業用に、ボードの供給、リストアップ、位置決めをシーケンス制御によって行う「天井ボード貼ロボット」(写真5.4)を開発した。1989年には東急建設／東都電機工業がこの作業をサーボ制御によってさらにねじ締めまでの一連の作業を自動化した「内装工事ロボット」(写真5.5)を開発した。1998年コマツは中小企業事業団の委託を受け「パーソナル内装施工ロボット」を開発した²。



写真5.4 「天井ボード貼りロボット」



写真5.5 「内装工事ロボット」

吹付・塗装工事では1986年に大成建設が従来ゴンドラに乗って人手で実施していた地上200mの高層ビルの塗装工事を完全自動化した「超高層ビル外壁塗装システム」を、1986年に清水建設が高層住宅の廊下やバ

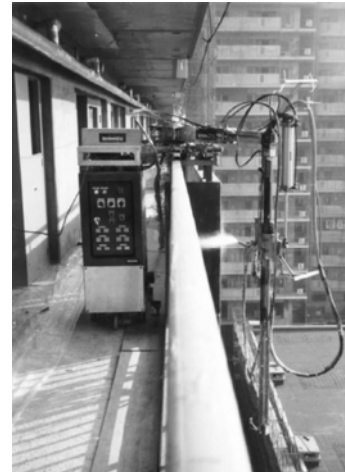


写真5.6 「外壁塗装ロボット」

ルコニーの外壁と層を自動化した「外壁塗装ロボット」(写真5.6)を開発した。

保守点検検査分野では、1984年に鹿島建設／カジマメカトロエンジニアリングが壁面仕上げ層のタイルの剥離診断を屋上パラペットからの吊下げ方式による「タイル剥離検知ロボット」(写真5.7)、同じく1984年に竹中工務店が壁面に吸着して横行、旋回、抗体も出来る「外壁タイル検査システム」(写真5.8)を開発した。

半導体や医薬品の製造室内であるクリーンルームの完成時には施設をユーザーに引き渡すに当たって厳格



写真5.7 「タイル剥離検知ロボット」



写真5.8 「外壁タイル検査システム」

² 「パーソナル内装施工ロボット」、日本ロボット学会誌、Vol.16, No.3, pp309-310、1998

な環境テスト（塵埃リーク、塵埃、温度、湿度、気流分布）が求められる。1986年大林組がこの施設環境の測定作業に知能移動ロボット「栗室」を開発し（写真5.9）その自動化を行った。



写真5.9 「栗室」

建築現場をひとつの自動化向上とするビル自動施工システムとしては、1989年に大林組が「ABCS」システムを開発、1990年には竹中工務店、大成建設、清水建設などの各社もさまざまなタイプの自動施工システムの開発を行っている。

5.2 土木

トンネル工事では、シールド工事におけるトンネル1次覆工であるセグメントをリング状に組み立てると作業して、1985年に石川島播磨重工業が「セグメント自動組み立てロボット」（写真5.10）を開発した。また1986年大林組／神戸製鋼所はコンクリート吹きつけ用にプレイバックタイプの「コンクリート吹き付けロボット」（写真5.11）を開発、吹き付け作業のノズルを一定の角度、距離に保ちながらコンクリートの付着効率を高める効果を上げた。鹿島建設／東洋工業は東



写真5.10 「セグメント自動組み立てロボット」



写真5.11 「コンクリート吹き付けロボット」

京電力の地下発電所今市発電所の建設に「自動削孔ロボットジャンボ」を使用した。施工場所にドリルの先端を当て、どの方向にどれだけの穴を掘るかコンピュータにプログラムをインプットすれば全自動で岩盤への削孔作業が行われるものである³。

橋梁作業では、1986年川崎重工業はあらかじめ作成されたNCデータ指令により橋梁の塗装工事を行う「橋梁塗装ロボット」（写真5.12）を開発した。

海岸／海洋の作業では、1979年小松製作所が本州四国連絡橋のための海底調査用に8脚歩行式の「8脚歩行式海底調査ロボット」（写真5.13）を開発し、大水深、急潮流、凹凸のある自然条件の下で海底地盤を観察、調査した。1985年に小松製作所が海底に着座し、防波堤建設のための捨石ならし作業を海上から遠隔操作で



写真5.12 「橋梁塗装ロボット」

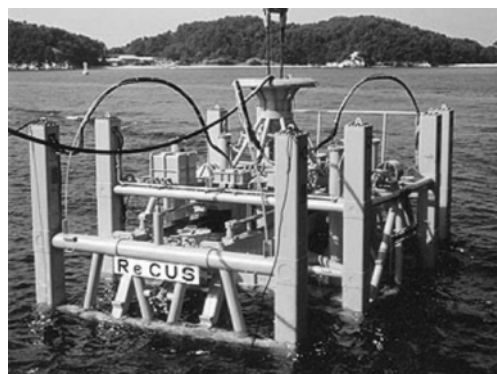


写真5.13 「8脚歩行式海底調査ロボット」

3 「日本のロボット」、通産企画調査会、1982、pp93-95、



写真5.14 「水中捨石ならし機」

行う8脚歩行式の「水中捨石ならし機」(写真5.14)を開発した。

その後、石川島播磨重工「煙突点検清掃ロボット」1991年、小松製作所「道床交換作業車GT240」1991年、小松製作所「自走式破碎機ガラパゴスBR60」1992年、小松製作所「自走式木材破碎機リフォレBR200T」1992年、鉄大林組「筋被覆組み立て装置」1997年、小松製作所「自走式土質改良機リテラBZ40」1997年、東芝「配管作業ロボット」1997年、大林組「建設用アルミ足場板自動洗浄装置」1997年などの開発が行われた。

フジタは1997年「無人ブルドーザ運転ロボット ロボQ」を開発した。(写真5.15)これは市販のブルドーザなどの建設機械を無線遠隔運転するものであるが、常時は解体して6個のスーツケースに格納、災害発生時にはスーツケースを手持ちし建設機械の操縦席に組み込み、遠隔運転をするというものである⁴。実際に別府市の河川災害の復旧工事で活躍した。



写真5.15 「無人ブルドーザ運転ロボット ロボQ」

5.3 エネルギー

電力、ガス、石油などのエネルギー分野では、特に点検、保守へのロボットの適用が検討されている。点検・保守作業は危険を伴うことが多く、点検作業中は作業を中断しなければならないことも多い。ロボットの導入によって、これらの問題を解決するだけでなく、点検内容の高度化、点検時間の短縮、点検機械の増加などによる経済効果を期待している。

(1) 電力

電力分野では、労働集約型の点検保守作業の省力化への挑戦が行われている。

東京電力は1985年、発電所取水路に付着した貝藻類を除去する「貝藻類除去ロボット」を開発した。従来は、長期間プラントを停止させて人手で取水路の点検清掃を行っていたが、プラントを稼働させながらの作業が可能となり大きなコストダウンの効果が得られた⁵。1988年関西電力/川崎重工は発電所操業を止めず取水路の長距離全周壁面清掃を可能にする「発電所水路清掃ロボット」を開発した(写真5.16)。カメラによる目視検査、超音波センサによる路面凹凸の計測と清掃が可能で、挿入部から1km以上の距離で作業が出来る。複数のスラストで三次元移動を行い壁面に押し付けながら車輪走行する。取水路の側面や天井面も清掃できる⁶。1998年神戸メカトロニクスは水路側面の貝類を除去しながら走行するコンパクトな「取水路除貝ロボット」を商品化した(写真5.17)。2基のスラストで壁面に吸着し、走行しながら貝類の除去を行う⁷。1988年関西電力は発電所の水圧管の点検ロボット「KPMAS-87」を開発した。管径0.5m-2.0mの水圧鉄管に対してテレビによる目視検査、電磁波による塗装皮膜厚測定、内面研磨、清掃、塗装の作業を行う。鉄管の上部から挿入しウインチで引き上げながら遠隔制御する⁸。1988年、中部電力は「地中送電用洞道監視ロボット」を開発した。従来の作業員による点検作業では、換気、ガスのチェック、高温多湿環境対策、災害時の危険性などの問題があった。天井に設置されたレール上を走行し、カラー画像、自己位置、温度、湿度、ガス、音、超音波のセンサを備えている⁹。

4 茶山ほか「遠隔操作ロボット (ロボQ)」、日本ロボット学会誌、21巻1号、2003、pp59-60

5 日刊工業新聞 1985.3.15

6 川重技報

7 <http://www.kansai.ne.jp/kmc/annai.htm>

8 日刊工業新聞、1988.5.10

9 日刊工業新聞、1988.2.3

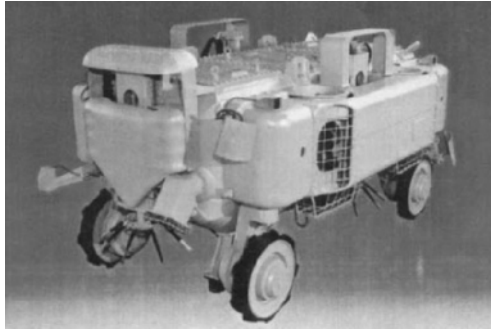


写真5.16 「発電所水路清掃ロボット」



写真5.17 「取水路除貝ロボット」

中国電力／日立造船は1998年に火力発電所の「複水器細管清掃点検ロボット」を開発した。自走式で4本のアームを持ち、アームを複水器細管の開口部より挿入し、水圧ブラシで清掃するとともに探傷子で傷の検査も行う。従来7-8人で行っていた作業を操作員1名に削減できた¹⁰。

1988年、安川電機/九州電力は「配電線工事ロボット」を開発した(写真5.18)。従来、配電線工事は災害防止のため停電させて作業を行っていたが、ロボット化により無停電で作業が行えるようになった。双腕多関節ロボットを遠隔操縦とプレイバックを併用して制御している。本システムが各電力会社の同種ロボットのさきがけとなった¹¹。

1995年、関西電力／日立造船は火力発電所の煙突点検清掃ロボットを開発した。ロボットは煙突内に吊り下げられウインチで昇降する。目視検査のほか、打音測定装置、凹凸センサで煙突内面の劣化状況を測定する。また、清掃ブラシで煤払い作業も行う。地上150メートルの高所作業を自動化した安全面の貢献は大きい¹²。



写真5.18 「配電線工事ロボット」

(2) ガス・水道

1988年三菱重工／大阪ガスは円筒ガスタンク底板溶接部の探傷システムを開発した。タンク底板の溶接線に沿って走行し渦電流を利用して溶接欠陥を探索する。画像処理、記録を実時間で処理し作業効率を改善した¹³。

1990年、東京ガス／日立は「ガスホルダー自動検査ロボット」を開発した。ガスホルダーの外面に多数の脚で真空吸着し、吸着脚を切り替えて移動を行い超音波により溶接部の欠陥を探傷する¹⁴。

1993年、東京ガス／日立は都市ガス製造プラントの運転監視ロボットを開発した。プラント周辺にモノレール式のガイドレールを設置し赤外線カメラ、ガス検知器、マイクロフォンを搭載したロボットが以上を見地する。従来人間が3交代で24時間巡回監視していたが、このロボットにより15人程度の省人効果が得られた¹⁵。

1999年、クボタ・東京大学生産技術研究所は上下水道を断水することなく通水状態のままで管内の状況を調査できる管内調査ロボットを開発した。通水状態で管内の観察調査が行えることで効率的な管路の更新、維持管理が行えるようになった¹⁶。

(3) その他

1987年にオートマックスが石油タンク・スラッジ除去ロボットを開発した。作業者に代わって稼働中の石油タンクに投入されたロボットがタンク内部を自律的に移動しスラッジを攪拌し再溶解させる。作業の安全

¹⁰ 日刊工業新聞、1998.7.17

¹¹ 日刊工業新聞、1998.3.24

¹² 日刊工業新聞、1995.12.12

¹³ 電波新聞、1988.11.15

¹⁴ 「球形ガスホルダーの検査ロボット」、日本ロボット学会誌、Vol.10.no.5, pp43-45、1992

¹⁵ 日本工業新聞、1993.1.25

¹⁶ ロボット、日本ロボット工業会、132号、pp47-50、2000

化、時間の短縮、費用削減以外に油分回収率の向上が得られた¹⁷⁾。

5.4 公共福祉

公共福祉分野で人間の社会活動を支援する清掃ロボット、搬送ロボット、警備ロボットなどの事業化が始まっている。

清掃ロボットは主にビルメンテナンスの分野で使われていて、ビルの床面清掃や窓拭きの作業を行う。床面清掃には駅や空港などの広い場所での移動式のものが、ビルの窓拭きには屋上から吊り下げられたゴンドラが移動するものが使われている。病院内などの清掃では作業員による汚染や作業員の感染を避けるメリットもある。またその他、電力、交通、公共などさまざまな分野でいろいろな清掃ロボットが開発されている。高所作業や悪環境などの3K作業が多くロボット化への要求は高い。これらは、電力設備、石油タンク、航空機、プールなどそれぞれの対象に合わせた専用機的なものが多い。

ビルの清掃用ロボットではオートマックス／エレクトロラックスが1990年に開発した「床面清掃ロボット」AXV-01（写真5.19）と東芝／三井不動産が1986年に開発した「床面清掃ロボット」AS-100（写真5.20）が第1号である。AXV-01はジャイロセンサーで位置を認識しながら車輪走行し、回転ブラシとバキュームクリーナーで床面の掃除を行う。毎時900㎡の能率で連続5時間移動可能である。パンパセンサ、超音波センサ、階段センサなどの安全対策を取っている¹⁸⁾。実用清掃ロボットとしては富士重工が開発した「ロボハイター」がある（写真5.21）。



写真5.19 「床面清掃ロボット」AXV-01



写真5.20 「床面清掃ロボット」AS-100



写真5.21 「ロボハイター」

三菱電機が開発した「自動窓拭きシステム」は屋上をビルの外周に沿って移動するルーフカー、2本のワイヤロープで吊り下げられ、ビルの外壁に沿って設けられたガードレールに昇降車輪をかみ合わせて下降しながら清掃する清掃ユニットから構成されている。1992年、富士重工／JR東日本ビルテックが車両清掃ロボットを開発した。ジャイロと各種センサーを内蔵し、車輪で自律走行し毎時1110平方メートルを清掃する¹⁹⁾。実用化された清掃ロボットの第1号である。

病院内の施設で食器、カルテ、薬、検体などの搬送を自動化する「HelpMate」を安川電機が米国HelpMate社とのライセンス契約で生産、販売した（写真5.22）。車輪走行型知能ロボットで、あらかじめ病院内の地図情報を記憶し目的地が指示されるとロボットが目的地までの走行経路を自律的に決定し、走行中に人間、車椅子などの障害物に遭遇しても自動的に回避または一旦停止しながらエレベータに乗り移るなどして走行する。同様のものとしては、2004の年松下電工HOSPI²⁰⁾（写真5.23）等がある。

17 産業用ロボット導入便覧、日本産業用ロボット工業会、p270-271、1992

18 産業用ロボット導入便覧、日本産業用ロボット工業会、p254-255、1992

19 日本工業新聞、1992、7.16

20 酒井ほか「病院内自律搬送ロボットHOSPIの開発」、ロボット、日本ロボット工業会、Vol.157、pp30-35、2004



写真5.22 HelpMate



写真5.23 HOSPI

警備ロボットとしては2002年総合警備保障が本格的な自律移動型の「ガードロボ」を開発し試験運用を行った。このロボットはセンサによって障害物を探知、人体検出センサによる侵入者検出、充電装置との自動ドッキング機能を有しエレベータを利用した移動が可能である。インターフォン機能、火災検知器、漏水検知器など犯罪以外の以上も検出できる。高さ1.58m、幅0.6m、重量130kgと廊下、ドア、エレベータに人間と同



写真5.24 「ガードロボ」

様に進入可能な筐体にまとめられている (写真5.24)。

2005年の愛知万博では多数の案内ロボットが実際に使用され一般大衆の人気を集めた。

5.5 防災

地震、土砂崩壊、火山噴火、火災などの災害発生時の人命救助、災害復旧は人手による作業は危険を伴うことが多く、無人化が強く要求される。この目的のために使用されるロボットとしては：

1. 耐環境性（高温、粉塵）
2. 頑健性（厳しい稼働条件でも故障しない）

3. 移動能力（不整地の移動が必要）
 4. 通信能力（まったくの自律運転は考えられず人間による安全な場所からの遠隔運転）
- などが要求される。

1986年に東京消防庁／いすゞ自動車が無人放水車「レインボー5」を開発した（写真5.25）。クローラーで走行し、ケーブルによる有線および無線で遠隔運転するものである。爆発や高温の危険から消防隊員を守り、放水作業を行う。化学工場の火災などに使用され実績を上げた²¹。



写真5.25 「レインボー 5」

1990年、東京消防庁は救難用水中探索ロボット「ウオーターサーチ」を開発した（写真5.26）。全長1m、重量38kgの小型ROV（遠隔操縦潜水船）で水中救難現場で救助隊員に代わってテレビカメラによって水中探索をする。1993年の北海道南西沖地震の際、津波にさらわれた被害者の捜索を行った²²。

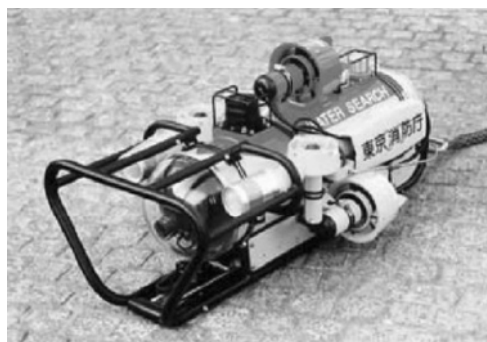


写真5.26 「ウオーターサーチ」

また1993年には東京消防庁／石川島播磨重工により高層ビルの消火活動支援ロボット「レスキュークライマー」が開発された（写真5.27）。人間が容易に近づけないビルの火災現場に壁を伝って接近し救助可能な人の有無を確認する。また窓ガラスに穴を開けて放水することもできる²³。

1993年、東京消防庁／アイチコーポレーションが災

²¹ 東京消防庁ウェブサイト www2.newweb.ne.jp/wc/ebara71/a/h/rescue.htm

²² 東京消防庁ウェブサイト www2.newweb.ne.jp/wc/ebara71/a/h/rescue.htm

²³ 日経産業新聞 1993.2.3



写真5.27 「レスキュークライマ」

害被災者救出ロボット「ロボキュー」を開発した（写真5.28）。クローラ走行車両にマスタースレーブ型のマニピュレータ2台を搭載し、被災者を把持し救出する。マイクとスピーカ、酸素供給器、自衛用水噴霧装置などを備えている²⁴。



写真5.28 「ロボキュー」

1995年、東京消防庁は小型の無人消火装置「ジェットファイター」を開発した（写真5.29）。外形が小さく、ケーブルトンネルや地下街に進入して放水する²⁵。

1997年、東京消防庁／三菱重工業は建物内に進入して放水する消火ロボットを開発した（写真5.30）。800℃で3分間、400℃で30分以上の耐熱能力があり、毎分400L以上の放水能力がある。クローラで35度の階段の昇降ができ立体視用のテレビカメラが装備されている²⁶。



写真5.29 「ジェットファイター」



写真5.30 「消火ロボット」

2001年、フジタは国土交通省九州土木事務所と協業して建設作業車操縦ロボットを開発した（「5.2 土木」参照）。商用の一般建設機械を人間に代わって運転するものである。このロボットは常時は6つのコンポーネントに分解されスーツケースの中に保管されているが災害発生時にはそのまま搬送しブルドーザ、バックホーなどの建設機械の運転席に組み付ければ人間作業者が遠隔運転できるようになるものである²⁷。

2002年、文部科学省は「大都市大震災軽減化特別プロジェクト」を発足した。この重点テーマの一つがレスキューロボットであって、無人ヘリコプタ、瓦礫の中にも進入できる蛇型ロボット、被災者救出ロボット、事故状況センシングなどの開発が始まっている²⁸。

2003年、千葉大学/富士重工は地雷除去ロボットを開発した。

24 危険作業用ロボット：日本ロボット学会誌 Vol.18 No7 2000

25 東京消防庁ウェブサイト www2.newweb.ne.jp/wc/ebara71/a/h/rescue.htm

26 危険作業用ロボット：日本ロボット学会誌 Vol.18 No7 2000

27 茶山ほか「遠隔操作ロボット（ロボQ）」、日本ロボット学会誌、21巻1号、2003、pp59-60

28 大都市大震災軽減化特別プロジェクト：日本ロボット学会誌 Vol.22 No5 2004

6 | 生活関連産業への発展

現在、ロボットが実用されているのは主として機械製造業のように工業製品を生産している産業分野である。このような産業の製造現場には構造的環境が存在していることによる。サービスロボットの可能性が膨らむに連れて、農業、林業、水産業、医療といった人間の生活に密着した分野への適用が検討されるようになった。生物、人間を扱うこのような産業では当然のことながら構造的環境は存在しない。この困難性のためにまだ本格的な実用化にはいたっていないが未来を予感させるさまざまな試みが行われている。

6.1 農業¹

農業の自動化が切望されているのに、ロボットの応用は進んでいない。まず、対象物の形状、寸法、性状はまちまちであり、これをハンドリングするためのマニピュレータを開発するのに大きな問題があること、動作環境は原則として屋外の非構造的環境でありこれに対処する工夫が必要であることという困難性によるものである。

(1) 整地作業

整地作業を行う地磁気方位センサ、慣性航行装置を利用した「耕運ロボット」²が生物系特定産業技術研究推進機構（生研機構）によって開発され企業化が計られている。北海道大学³でもマシンビジョン、GPS、光ファイバジャイロを組み合わせた「耕運ロボット」を開発した。

(2) 収穫作業⁴

果実や野菜等の収穫作業のロボット化は日本が最も進んだ分野で「いちご・きゅうり・トマト」のほかに「りんご・桃・ぶどう・みかん」などに関する研究が行われている。岡山大学が開発した「いちご収穫ロボ

ット」はマニピュレータ、エンドエフェクタ、センサ、移動機構から構成されていて、収穫エンドエフェクタは2層構造の吸引ヘッド、開閉部、フィンガ、モータ、ソレノイド、フォトインタラプタ、カッタ等から構成されている。

収穫ロボットで取り扱う作物は傷つきやすく、形状、位置、色、熟度などが一定でないため作物を認識して適切な作業を行う必要がある。ビデオカメラ、三次元視覚センサなどで作物を認識する研究が行われている。島根大学⁵はミニトマトの収穫を自動化するために畝間に設けられたレール上を走行する車両にロボットを搭載し、3次元レーザー視覚センサによって赤く熟した果実のみを4自由度のマニピュレータ、吸引式エンドエフェクタで収穫する。対象物の操作と収穫作業は車両を停止したまま行い収穫を終えると一定距離先に進み次の操作を行う。吸引式エンドエフェクタはフレキシブルホースを使用し左右に85度曲がる構造となっており正面以外にも左右から茎、葉などの障害物をさけながら摘果出来るようになっている。同じような原理でトマト収穫ロボットも開発された。3次元レーザー視覚センサによってレタスの結球部の位置、大きさを認識し結球部が十分に大きくなったレタスだけを選択収穫する。畝を跨ぐ走行部に直交座標マニピュレータ、収穫エンドエフェクタ、視覚センサーを搭載したものである。キュウリ収穫ロボットの場合は、色が緑で茎葉との区別が付き難い。適当な光学フィルタを使って果実のみを認識している。

重量野菜・果実の収穫は農業人口の高齢化により機械化、効率化が望まれている。京都大学は「スイカ収穫ロボット」を開発した⁶（1997年）。人が車両に搭乗して車両に装備された5軸のマニピュレータ、真空パッド式の収穫用ハンドを操縦するもので日本の栽培環境に適した軽量化を実現した。その他、重量野菜の収穫能率と作業への負担の軽減を図り「キャベツ・白

1 伊藤「農業用ロボットの現状と展望について」ロボット、vol.51, pp29-36, 1986

土井「農業のロボット化」ロボット、vol.51, pp37-46, 1986

谷脇「農用ロボットの開発の現状」ロボット、vol.51, pp47-51, 1986, pp52-61, 1986

奥山（久保田）「農業用ロボットの展望」ロボット、vol.51,

2 松尾ほか「耕運ロボット」ロボットの開発」第16回日本ロボット学会学術講演会予稿集、pp221-222、1998

3 石井「車両制御のためのマシンビジョンの応用」日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'99講演論文、pp2AI-03-031 (1)-(2)、1999

4 川村「果実収穫用ロボット」ロボット、vol.51, pp62-69, 1986

5 藤浦「三次元視覚センサを用いた農作業ロボット」ロボット、vol.117, pp32-38, 1997

6 梅田ほか「スイカ収穫ロボット」ロボット、vol.117, pp20-25, 1997

菜・レタス」などの収穫ロボットの開発が進められている。

(3) 栽培作業

日本の稲作農業は機械化一環体系が確立されさらに効率化が追求されているが、野菜作は農業生産額の1/4を占めているにも拘らず、その種類の多様性のために機械化が遅れている。1986年農水省は、農業機械の開発改良を目指して特別認可法人「生物系特定産業技術研究推進機構」（生研機構）を設立した。「野菜苗接ぎ木ロボット」「育苗ロボット」「薬剤散布ロボット」「施肥ロボット」「除草ロボット」などさまざまなロボットが開発されている。

野菜や果物の栽培において、苗の接ぎ木は連作障害の回避、低温生育促進のための有効な方法として普及しており全国で約6億本の接ぎ木苗が生産されている。生研機構は1990年より果菜類接ぎ木装置の開発を行った。伊関農機⁷は1993年にキュウリ用「接ぎ木ロボット」を開発した。引き続きキュウリ、スイカ、メロンなどのウリ科用（1994）ナス科（1995）の接ぎ木ロボットの販売を開始した。別々の苗木から台木と穂木を1本ずつ人手で所定位置に供給すると自動的にそれぞれの苗の軸を切断し、切断面を合わせ、クリップで留めてコンベア上に排出するものである。人で作業での接ぎ木効率は80-100本/時であるのに対し、ロボットでは650-700本/時の接ぎ木を育苗トレイへの植え込みまで含めて4人で行えるので一人当たり140-180本/時の効率となり年間20万本以上の苗を生産する場合には採算に乗るという試算がある。ヤンマー農機は、樹脂製のトレイ上に整列配置されている数百のセルと呼ばれる小部屋に苗を播種する「セル成型苗」を核とした機械化、自動化を進めている⁸。「ヤンマー自動接ぎ木ロボットAG1000」はナス科のトマト、ナスを対象に穂木、台木の接ぎ木を行うものである。人は穂木と台木をトレイごとコンベア上に置くだけで接ぎ木を全自動で行うもので1200本/時の能率を上げている。またこの「セル成型苗」を一定の段階に達した後ビニール製ポットに植え替える作業を自動化する「ヤンマー鉢上げロボットPT6000」を開発した。一般に花の発芽率は必ずしも高くなく、セルトレイには多くの欠株が存在する。光電式センサによって欠株や苗の良否を判定し良苗だけを鉢上げするようにしている。

また、「野菜工場」といった自動化のアプローチに対するロボットの適用も検討されている⁹。

(4) その他

ヤマハ発動機は1997年に無人ヘリコプタを使った薬剤散布用ロボット「産業用無人ヘリコプタ エアロボット ヤマハRMX」を開発した（写真6.1）。農業なら24kgまで搭載でき、1時間に3ヘクタールの散布が可能である。



写真6.1 産業用無人ヘリコプタ エアロボット

飼料生産作業に対応した「草地用農作業ロボット」が草地試験所、東京大学で研究されている。

農業用車両の自律移動のための「通信システム」が北海道大学や北海道工業試験所などで研究されている。

6.2 林業

林業における作業は作業者にとって危険な作業が多い。また山林を移動するのは容易でないこと、林業従事者の高齢化が進んでいることなどによりその機械化が強く望まれている。しかし、林業は農業以上に自然に依存しているため、農業以上の非構造的環境への対応が必要である。不整地上の移動も必要となる。作業は木材の伐採・搬出と育林（枝打ち、下草刈り）に分類される。前者は、樹木を伐採しながら作業を進めるため、大型の機械が比較的容易に樹木に接近可能であることから機械化が進んでいる。伐採、枝はらい、測尺、玉切りなどを行うハーベスタ、プロセッサ、ワイヤを展開し伐採した木材をワイヤに懸垂して搬出するタワーヤード、伐採した木材を積載あるいは牽引して搬出するフォーワーダといった機械が建設機械をベースに開発され実用されている。

育林（枝打ち、下草刈り）においては、木に取り付

7 安蔵「果菜苗生産用接ぎ木ロボット」ロボット、vol.117, pp14-19, 1997

8 山田「接ぎ木ロボットと鉢上げロボット」ロボット、vol.135, pp25-30, 2000

9 高辻（日立）「野菜工場と自動化ロボット」、vol.51, pp70, 1986

き枝打ちを自動的に行うロボットとして「ツリーモンキー」が古くから開発され実用化されている（写真6.3）。現在ではさらに、林地内を移動する作業の自動化が要求されているが日本の育林密度が非常に高いこと、大型機械が走行すると林地が荒れてしまうことなどから、人手に頼っているのが実状である。このロボット化を目指してイワフジ工業では全幅1.3m、全長2.5m、重量1.2tと小型で段軸駆動による不整地走行能力を持たせた下草刈り機械を試作している。実験により、斜度20-30の育林地において、0.7m/sの速度で連続した下草刈りが可能であることが示されている。本機は現在無線によりオペレータが遠隔操作する形態をとっているが、姿勢維持制御などは搭載されたコンピュータおよびセンサにより自律化されており、データキャリアシステムとの統合による自律走行の実現が考察されている。さらに、林野の火災が発生した場合の対策にロボットを活用する研究も行われている¹⁰。

6.3 酪農・畜産

搾乳作業は酪農労働の50%を占める労働集約的作業である。乳牛は搾乳すればするほど大量のミルクを分泌する性質があるが労働量の点から一日2回程度の搾乳しか行えていない。この自動化によって酪農業の生産性を改善する可能性が注目された。

「搾乳ロボット」が生研機構などで開発され、乳牛が自ら搾乳を行う場所へ移動して来るフリーストール方式が実用化されている（写真6.2）。クボタもフリーストール方式による搾乳ロボットを開発（1997年）農水省試験所その他へ納入した。超音波センサにより乳頭位置を検出、搾乳カップを装着する機構を中心に搾



写真6.2 「搾乳ロボット」

乳ボックス、管理コンピュータなどから構成される自動化システムである。IDタグにより乳牛個体の認識を行い、超音波センサで乳牛の動きに追従して搾乳カップを装着するものであった¹¹。しかし一般酪農家への展開ははかばかしくなくクボタは事業化を断念した。

畜産加工の分野では、前川製作所は1994年、鶏の骨付き腿肉を脱骨する鶏脱骨ロボット「トリダス」を開発した（写真6.3）。人手処理の4倍、900本/時の処理を行っている。

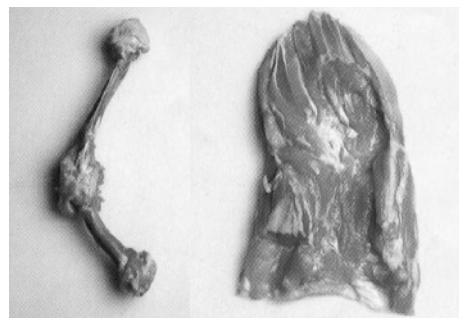


写真6.3 鶏脱骨ロボット「トリダス」

6.4 水産

水産業関連では「カツオ釣りロボット」「イカ釣りロボット」が古くから試作され商品化されている。釣竿を上下に振るだけの簡単なものであるがカツオ、イカが巧みに船上まで釣り上げられている（写真6.4）。「冷凍マグロ自動加工システム」¹²のような後処理の自動化も行われるようになった。



写真6.4 「カツオ釣りロボット」

6.5 医療

医療分野におけるロボット工学の適用は1990年代に始まる内視鏡下外科手術の普及によるところが大きい

¹⁰ 小林「林野火災対策ロボットシステムの概要報告」ロボット、vol.50、pp58-64、1986

¹¹ 林「自動搾乳システム」ロボット、vol.117、pp26-31、1997

¹² 「冷凍マグロ自動加工システム」ロボット、vol.107、pp94-97、1995

い。従来は外科医が被手術者の胸腹部を切開して手術を行っていた。内視鏡下外科手術は切開手術に代わり人体に5mmから10mm程度の手術機器挿入用の小穴を数箇所穿孔し、ここから内視鏡と細い手術器具を挿入し、内視鏡からの術部画像を頼りに体外から外科手術の操作を行うものである。患者に負担のかからない「低侵襲医療」として患者の負担、医療経済に大きなメリットがあるものとして急速に普及するようになった。しかし従来の外科手術は胸腹部を切開、解放し外科医の五感をフルに活用した手術が可能であったのに対し、内視鏡下外科手術ではディスプレイの画像だけを頼りに「遠隔」手術を行わねばならない。患者にとっては「低侵襲」であっても手術者にとっては極めて大きな負担が強いられる。この手術の操作性を改善するために画像処理技術、マニピュレーション技術などロボット工学技術の適用が望まれたのである。

内視鏡下外科手術においては手術者が真に見たい部位の画像を得るために、熟練した内視鏡操作者との間の絶妙なチームワークが必要となる。手術者が直接、マニピュレーションをコントロールできるような音声指示、ないしは特殊操作器具の開発が望まれる。

さらに進んだロボットによる自動手術は、手術中における人体の変移などに自律的に対応することが難しく実用的でない。内視鏡下外科手術のようなマニピュレータ応用が現実的な方法として実用されている。

わが国医療ロボットは欧米に比べ立ち遅れている。ZEUS、DaVinci、Robodocといった外国製の手術支援ロボットが導入されロボットによる医療の研究用に使われているに留まっている。Robodocのマニピュレータに三協精機のロボットが使用されている程度であった。しかしNEDO（新エネルギー・産業総合開発機構）の医療福祉プロジェクトで日立製作所／東京女子医大などが開発した内視鏡下手術支援ロボットMTLP-1が商品化され2002年7月に受注を開始した（写真6.5）。



写真6.5 内視鏡下手術支援ロボットMTLP-1

また、広義の医療ロボットとしては、日本が優位にある内視鏡の分野でオリンパス光学が体内に投入されて

移動しながら患部の観察、投薬などを行う無線伝送の内視鏡カプセルを開発している（写真6.6）。



写真6.6 無線伝送の内視鏡カプセル

6.6 福祉

福祉分野はロボットの出現以前からいろいろな試みが行われていた。欧米では1940年代から生体の電気信号（筋電）で動作する義肢や装具の研究が行われている。ドイツでは1950年代に義手が実用化されている。ロボット工学の発展に伴いその高度化、さらには一般リハビリ機器への発展が期待された。

高齢社会の到来を前に障害者だけでなく動作不自由者一般への適用がのぞまれ、身体不自由者の介助支援ロボットが強く望まれるようになっている。

(1) 義肢

日本では1960年代の後半から活発におこなわれるようになり、筋電制御動力義手の開発が早稲田大学で、また当時深刻な社会問題となったサリドマイド児の支援機器としての動力装具、脊髄損傷者の機能補助のための動力装具が開発されたが実用には繋がらなかった。唯一早稲田大学が開発を進めてきた前腕筋電義手がリハビリテーションセンタの協力の下に数々のフィールドテストを実施し開発より約13年を経て1978年に今仙電機（現在今仙技研）からWIMEハンドの名称で商品化され現在に至っている（写真6.7）。義肢の研究以外では、福祉分野で研究開発は数多く行われてきたがロボット産業に貢献した例は少なくロボット研究開発の成果の商品化は1980年代後半以降になる。

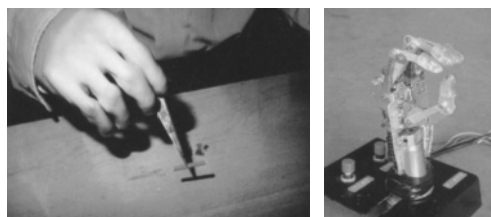


写真6.7 WIMEハンド

(2) リハビリテーション

1980年代後半になるとリハビリテーション分野にいくつかの実用品が出現した。1988年川崎重工業はロボット技術を活用した運動機能評価・訓練装置REHAMATEを開発市販した（写真6.8）。ロボットの腕のようなアーム機構に人の腕、あるいは脚を固定しそのアームの拘束状態を種々のプログラムによって可変にするものである。訓練者、リハビリ患者の四肢をいろいろな負荷状態で拘束して運動を行わせると同時に、その運動状況を計測することが出来る。川崎重工業はさらに1990年に（株）アシックスと共同により改善したシステムMYORETを開発市販した（写真6.9）。病院やスポーツ事務に納入されている。日立製作所は1995年ころ歩行訓練機を開発商品化した。ロボットアーム状の構造体が下肢に障害ある患者の体を支えた状態で患者はトレッドミルの上に立ち前方に映し出されたディスプレイの映像を見ながら歩行訓練を行うものでありリハビリテーションセンタに導入されている（写真6.10）。



写真6.8 REHAMATE



写真6.9 MYORET

安川電機は1988年療法士の作業を支援するリハビリ装置「TEMS」を商品化した。患者の関節部に装着し、その関節部に療法士が加える動作を記憶しその動作を



写真6.10 歩行訓練機

再生し繰り返すもので関節の制御にはインピーダンス制御が導入され療法士の力加減を考慮した動作が実現されている（写真6.11）。



写真6.11 リハビリ装置「TEMS」

(3) その他

介護装置としては日本ロジックマシーンが2002年に患者搬送支援装置（レジーナ）を商品化している（写真6.12）。



写真6.12 患者搬送支援装置（レジーナ）

安川電機／富士通は1997年、「高齢者・障害者用食事搬送自動ロボットシステム」¹³を開発した。またセコムは脊髄損傷者など障害者支援のため2001年食事支

¹³ 「高齢者・障害者用食事搬送自動ロボットシステム」、日本ロボット学会誌、Vol.18、No8、pp317-320、1998

援ロボット「マイスプーン」を商品化した（写真6.13）。

筑波大学山海研究室は、人体の足・腕に装着して力を補助する増力ロボット「ロボットスーツ」を開発、事業化を図っている（写真6.14）。



写真6.13 「マイスプーン」



写真6.14 「ロボットスーツ」

7 | 人間生活の豊かさを求めて

「人間とロボットの共生」というキャッチフレーズが唱えられている。人間の生活の営みに直接関与するロボットへの期待が高まっている、高齢化社会を迎えて衣食住、健康維持、心の安定などにロボットが果たす役割も期待されている。

家庭、民生分野へのロボット応用に対する関心はホンダのヒューマノイドロボットASIMO（写真7.1）の出現が口火となり急速に盛り上がった。ASIMOの歩行の動きの良さはまさに空前のものであり、人間型ロボットに対する関心が急激に立ち上がったのである。ASIMOに続きソニーが犬型のロボットAIBOを商品化し本格的にエンターテインメント事業に投入したことに触発されて、多くの企業が人間型ロボット、エンターテインメントロボット、癒しロボット、家庭ロボットといった新しい市場に参入を図るようになった。この新しい動きをまずこの新しいブームを引き起こした人型ロボットの研究開発から振り返ってみる。

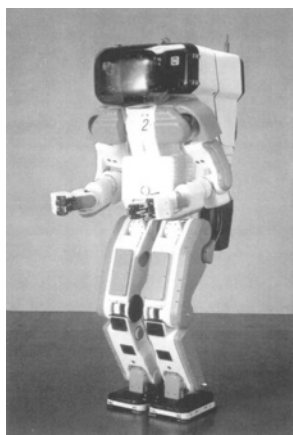


写真7.1 ASIMO

7.1 人型ロボットの発展

人型ロボットのルーツは江戸時代のからくり人形にある。1970年に開催された大阪万博でプログラムで動く実際の人間（女優）を模倣したリアルな人形が展示された。その後も、テーマパークの自動人形、自然博物館展示用の動く恐竜などが製作されているが、この自動人形の流れの発展形といえる。

このような自動機械人形を超えた人型ロボットへの挑戦は早稲田大学の加藤一郎教授に始まる。加藤教授は楽譜を認識してエレクトーンを弾く人間型ロボットWABOT-2を開発、1985年のつくば万博で早稲田大学、住友電工、ヤマハグループが政府館に展示した。

万博の開会式ではNHK交響楽団と共演して注目された（写真7.2）。加藤教授は1992年にヒューマノイド研究プロジェクトを開始した。1996年の早稲田大学2足歩行ロボットWABIANなどがその研究成果の一つである。早稲田大学は2000年、世界に先駆けてヒューマノイド研究所を設立、人間型ロボットの研究をテーマとした世界ただ一つの研究機関となっている。



写真7.2 エレクトーンを弾く人間型ロボット

ホンダはオートバイ、自動車という移動機械のメーカという立場から「モビリティ（移動性、運動性）の追求」という社是にのっとり研究の対象として選択したのが2足歩行機械であった。これは必ずしも、人型ロボットそのものを指向したものではなく、歩行機械の結果として人間型ロボットの形態をとったと言うのが正しい見方であると思われるが、1996年に第1号のP-1に続くP-3（1997）は発表するやその歩行動作のスムーズさから一般社会の大きな反響を呼び、人間型ロボットに対する夢を膨らませた。ホンダはその後ASIMOと名前を付け開発を進め、歩行ロボットの最先端を歩き続けている。イベント用にASIMOのリリース事業開を行うに至っている。

このASIMOのブームに触発されて、多くの研究機関、企業が歩行ロボットの開発に参入した。ソニーは犬型ロボットAIBO（7.2節）でエンターテインメント市場に参入し大きな話題を投げかけたが、やがて同じ技術線上に人型ロボットSDR3X、4X（写真7.3）を開発した。AIBOと同じように基本ソフトウェアをユーザに解放、ユーザが機能を追加、改良できるようにした。いわゆる「オープン化」（8.4.2節参照）を実現する最初の試みとして注目された。科学振興事業団は北野ヒューマノイドプロジェクトとしての研究用的人型ロボットPINO（写真7.4）を完成した。これはヒューマノイド研究用の標準研究開発プラットフォームとして使用されることを狙い、内容を一般に開放し「ロボット工学のLINUX」を実現しようとするものであった。



写真7.3 SDR4X

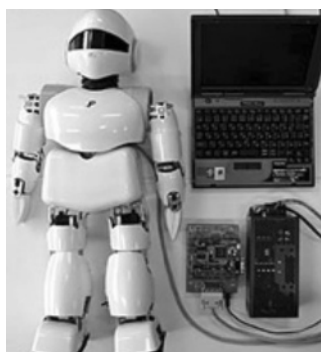


写真7.4 PINO

1998年、通商産業省はNEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）のプロジェクトとして5年間で20億円の費用を投入する「人間協調・共存型ロボットシステム」を発足させた。これは「ヒューマノイド開発プロジェクト」という別名で呼ばれたように明らかに人間型ロボットの開発を指向したものであった。産業技術総合研究所を主体に民間企業が参加しHRP-2が開発された（写真7.5）。人間労働者と人型ロボットが協調して作業を行うなど新しい試みが行われた（写真7.6）。HRP-2の成果は川田工業によって市販が行われているが研究用に購入されているにとどまっている。



写真7.5 HRP-2



1



2



3



4

写真7.6 人間労働者と人型ロボットの協調作業

このような方向の人型歩行ロボットとしては、（財）大阪市都市型産業振興センターの2足歩行ロボット、ロボスの2足歩行ロボットの研究用プラットフォーム、富士通オートメーションのなど多くの試みがある。

ATR（国際電気通信基礎技術研究所）の川人博士は川人プロジェクトとして人間の脳のメカニズムをロボットの動作を利用して探求しようとするアプローチからヒューマノイドに取り組み、沖縄の民俗舞踊をロボットに見せるだけでロボットが動作を模倣するシステムを開発した（写真7.7）。またATRでは人間の心理的コミュニケーションを研究する為ROBOVIEを開発した。これは三菱重工が「わかまる」として市販している（写真7.8）。

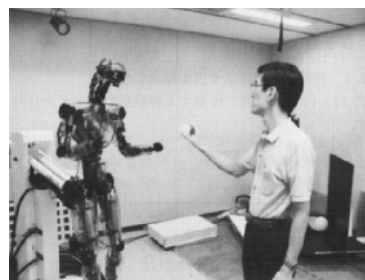


写真7.7 人の動作を真似するロボット

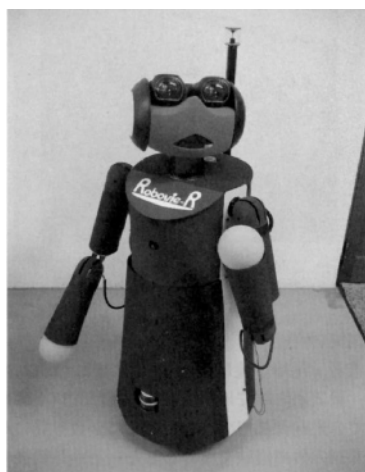


写真7.8 「わかまる」

7.2 エンターテインメント

エンターテインメント分野へのロボットのルーツは江戸時代に開発されたからくり人形に求めることが出来る。その後いろいろな機械式の自動人形が製作されている。1970年代には、富谷隆一がメカニカルと呼ばれるカムやリンク機構を巧みに組み合わせた生物的な運動をする様々な移動機構を試作し発表した。その興味深い動作から人々の関心と呼び学研が教育用キットとして発売した。ホビー、教育機器用ロボット商品の先駆けである。またこのようなリンク、カム機構を用いて水陸を移動する機構は1970年代の後半に東海大学海洋科学博物館などで、フタヒレイルカ、オオソコバサミ、ヒトデフミアシ、フタヒレウミバシリ、ミツフシウナギ、ヒカリフナムシといった名称のものが展示用に製作された（写真7.9）。

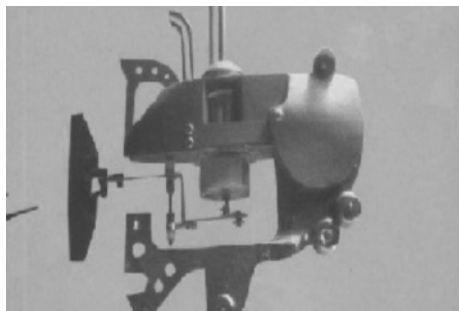


写真7.9 魚ロボット

その後、ロボット工学の発展に伴い、エレクトロニクス、コンピュータ技術を援用する新しい可能性が生まれてきた。ソニーは2000年、犬型ロボットAIBOを発表、世界最初の商品としてのエンターテインメント事業に進出、大きな話題となった（写真7.10）。ソニーのAIBOは類似品に比べて高価ではあったが、4脚歩行、情動生成モデル、音声認識、視覚認識、感覚制御機能を持つロボットの先端機能を搭載した知能移動ロボットといえる存在であった。AIBOの反響により多くの玩具メーカーが類似品を発売した。単なる自動動物人形程度のものから本格的なロボット人形にいたるまで色々な価格レベル、機能レベルのものが市場に投入されている。タカラのヒューマノイド型玩具ロボット「Dream Force 01」はラジコン JAVA対応携帯電話ができ、ロボットの操縦や画像による遠距離間コミュニケーション、上位機種ではロボット同士のバトル、

競技も行うというものであった。イワヤのペットロボット愛犬こころ、セガトイズの人型のコミュニケーションロボット「ファミリーロボットシリーズ」、ATR人型対話ロボット「RoboVie」、家族の顔を10種類まで識別でき会話するビジネスデザイン研究所のロボット、テック・エキスパーツの研究開発機関向けのロボット、NECシステムテクノロジーのロボット用基本ソフトウェアと開発ツール、学習研究社のからくり人形の復元組立キット、ロボット開発実証実験特区として「ロボットと出会う街」を目指す福岡市の取り組みなどいろいろな取り組みがなされているが産業としての有意性が明らかとなるのはこれからであろう。



写真7.10 AIBO

1995年にはロボットによるサッカーの競技コンテスト「ロボカップ」（写真7.11）第1回大会が名古屋で開催されその後毎年国際規模で競技が行われている。



写真7.11 ロボカップ

2003年おもちゃメーカーのバンダイの「ワンダーボーグ」という虫型ロボットはサブサンプリングアーキテクチャ¹に基づくロボットでセンサーによって駆動される単純なルールの集合でプログラムを記述するもので最新の人工理論をおもちゃの世界に適用したものである。「松下エアホッケーロボット2000」は東大石川教授の高速ビジョンチップを応用して従来になかった高速動作を実現するものだった。セイコーエプソンの世界最小の超小型ロボット「ムッシュ」を発表した。

このようなエンターテインメント領域のロボットの

¹ 米国MITのBrooksは知能は単一の大きなプログラムの流れで記述されるのではなく、センサによって反応する多数の簡単な複数のルールによって記述できると主張し、人工知能に新しい世界を開いた。この理論によるアーキテクチャをサブサンプリングアーキテクチャと呼びいくつかの企業が実際に商品に採用している。

関心が高まったことにより、2000年に九十九電機が東京秋葉原電気街に日本最初のロボット専門店を開業し、また世界最初のエンターテインメントロボットの博覧会ROBODEX（写真7.12）が始まった。トヨタ自動車がトランペットを吹くロボットを発表するなどエンターテインメント分野へのいろいろな試みが続いている。



写真7.12 ROBODEX

日本ロボット工業会（JARA）ではかねてより「エンターテインメント・フォーラム」というグループを組織し、エンターテインメント・ロボットの発展を目指し組織の枠を超えた技術者間の相互啓蒙の場を提供している。そのワーキング・グループとして「ロボット・リンク・コンソーシアム」という組織（事務局はJARA）を持っている。イワヤ、タカラ、トミー、松下、ダイヘン、富士通大分ソフトウェアラボラトリ、富士通研究所、日本ロボット工業会、エンターテインメント・ロボットに関心ある個人などが集まり共同で複数のエンターテインメント・ロボットを相互に接続するRoboLinkの検討と仕様策定に関する活動が行われている。おもちゃのロボット同士をパソコンを介して相互接続するものでUSBバス対応の通信モジュール基板をおもちゃとキーボードに取りつけて中央パソコンと統一の通信プロトコルで通信出来るようにしたものである。国際ロボット展2001ではRoboLink参加のいろいろな企業のおもちゃ人形がキーボードの音に反応して「演奏」するおもちゃダンスチームは観衆の人気を呼んでいた。現状のレベルは、ある特定の人形が音階の特定の周波数に反応して動く程度のものであるが、将来はRoboLinkのロゴが付いているおもちゃ同士は相互に通信しあって協調作業も可能となるよう発展させたいとのことである。「ロボット・リンク・コンソーシアム」では複数のエンターテインメント・ロボットを相互に接続するための検討と仕様策定に関する活動を紹介していた。さらに新しいワーキンググループ「ロボットライフ分科会」が「ロボット同士がつながる」「人とロボットのコミュニケーション作法」とこれを実現するためのプロトコルのドラフト

を紹介した。「自動車車のワイパーは単なる1軸の往復運動にすぎないが、人形が手を振るとそこに人間と機械の間に“さよなら”という感情がかもしだされる」という若い人々の熱気ある主張に共感を抱く向きがあった。エンターテインメント・ロボットという人間と機械との間に作られる新しい感性の世界がこれから開けていくのだろう。RoboLinkが指向している通信方式の標準化の努力は今後のロボットのコミュニケーション、言語、OS、サポートツールの標準化、オープン化に示唆するところが大きいと思う。また、群ロボットによる協調作業などはエンターテインメント分野の方が先行するのかもしれない。

7.3 癒しロボット

一方、1990年以降になると高齢化社会のニーズに応えるために人間共存型ロボットが注目され、ひとり暮らしの高齢者の孤独を癒すため、あるいは生活を豊かにする新しい個人用のエンターテインメント機器としてのロボット技術の適用が検討されるようになった。リモートブレインアプローチを提唱し知的ソフトウェアで動く小型ロボットの開発を推進した東大の稲葉氏らの研究に始まった。産業技術総合研究所は動物型ロボットの癒し効果に着目、高齢者の臨床実験なども実施しメンタルコミットメントロボットと称するアザラシ型ロボット「パロ」を開発した（写真7.13）。2002年3月にギネスブックに世界一癒し効果のあるロボットとして登録され話題を呼んだ。このロボットは移動機能はないが体表面に分布する触覚センサを持ち、人が触るとそれに応じて首などを動かして人との心の通いを実現するロボットである。1997年オムロンはこの技術を使用してネコ型ロボットを商品化した（写真7.14）が発売後半年ほどで発売を中止している。2005年「パロ」はベンチャーによって市販が開始された。養護施設や自閉症児の治療への応用を目指している。



写真7.13 「パロ」

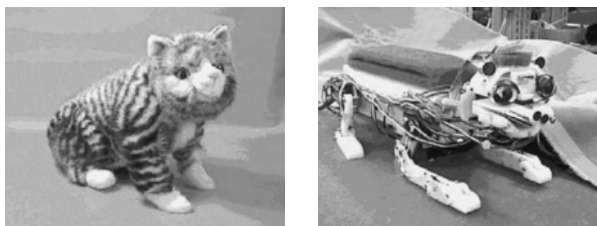


写真7.14 ネコ型ロボット

7.4 教育

ロボットは、メカニクス、エレクトロニクス、コンピュータ、ソフトウェア、制御工学、計測技術などの総合技術である。ばらばらに教育されているこれらの技術を総合してある一つの目的を持ったロボットを創造することは学生にとって、単に興味ある学習テーマであるにとどまらず、知識の総合化、体系化を促し、あわせて想像力を涵養する教育効果がある。このような見地からロボットコンテストと称するいろいろな競技が始められている。

1980年第1回マイクロマウス大会が実施された。マイクロマウスは、迷路を探索して出発点から出口にいたる経路を最短時間で到達することを競う自律走行ロボットの競技である（写真7.15）。迷路は1区画の大きさは18cm 16x16区画の碁盤目パターン上に設定され、まず探索走行を行って迷路の地図情報を認識し、これに基づいて自律的に走行計画を立てる。この走路計画に基づいて時間の無駄なくゴールに到達する高速走行を行ってタイムを競い合う競技である。探索のアルゴリズム、走行技術、走行アクチュエータ、センサーなどに工夫が凝らされている。



写真7.15 マイクロマウス

1988年、森正弘東京工業大学名誉教授の主唱によりNHKが主催して「アイデア対決・ロボットコンテスト」が始まった。高等専門学校を対象として、毎年新

しい競技課題を与えて競いあうコンテストであるが、単に競技の勝者を表彰するにとどまらずもっとも優れたアイデア、技術のロボットに「ロボコン大賞」という最高位の賞を与えている（写真7.16）。以後毎年11月に東京で開催され学生のアアイデア、技術力の日本一を決定している。NHKテレビでも放映され世間のロボットに対する関心を高めている。ついで1990年には、6カ国の学生が国際混成チームを組み2週間でアイデアを練り上げロボットを競い合う国際大会が始まった。若いエンジニアが言葉や文化の壁を乗り越えて一つの目的のために国際協力を行うコンテストに広がった。さらに、大学大会も始まりこれには国内の大学だけではなく、中国、インドネシア、タイ、アメリカの大学も参加するようになっている。



写真7.16 「アイデア対決・ロボットコンテスト」

さらに高度なコンテストとして1994年にRoboCup²が始まった。RoboCupは完全に自律的な複数のロボットのサッカー競技である。自律性のレベルに応じていくつかのカテゴリーが設けられているが、最高の目的は（中央制御でない）分散化された知能の複数のロボットがボール、プレーヤを認識し協調動作のよってゴールをあげるものであり、2050年には人間のワールドカップ・チャンピオンに打ち勝つサッカープレーヤロボットを作り出すと期待している。

上記ロボコンに触発されているいろいろな「ロボコン」が実施されている。中学校でも青森県八戸私立第3中学校をはじめとしてロボコンを生徒の人間形成に役立てている学校が増えている。登校拒否をしていた子供がロボコンの授業では始業前から列を成して待っているなど「青少年の目に輝きが戻ってきている」との効果も報じられている。

そのほかにも「知能ロボットコンテスト」ロボット競技実行委員会、日本ロボット学会 最先端ロボットコンクール」ロボット競技実行委員会、日本ロボット学会 ロボットグランプリ」日本機械学会などが例年開催されている。

² <http://www.robocup.or.jp/RoboCup>

またこのほかにいろいろなロボット・コンテストが、競技参加者の技能技術の習得という教育効果以外に、大きなイベントの併設プログラムとしても人気を集めている。

7.5 その他

案内、掃除、対話など人間とオフィス、家庭で共生するロボットに対する関心が高まっている。2005年愛

知万博では数十台の案内ロボットが活躍している。これを契機に一般オフィス、家庭への適用が検討されるようになるであろう。すでに、松下電器は部屋の掃除を自律的に行う掃除ロボットを開発した。NECのパーソナルロボット「R-100」は視覚聴覚を持ちさまざまな家電機器を操作するインターフェースを持つものである。高齢化社会の到来を前に、家事ロボット、高齢者介護ロボットへの関心が高まっているが、これからの発展が期待されている。

8 サービスロボット技術発達の系統化分析

ロボット技術は、

- ・近世西欧の機械人形、日本のからくり人形に代表される工芸品としての自動人形の技術
- ・第2次大戦ころから始まるオートメーション技術
- ・機械とエレクトロニクスが融合・一体化したメカトロニクス技術

などによって発展を遂げてきた。さらに

- ・機械の知能化技術

の発展により、今まで工場内に限定して使われている産業用ロボットからさらに一般社会で活動するサービスロボットを可能にするまでに進化してきた。ロボット技術の発展の経過を眺め、系統化分析を試みる。

8.1 サービスロボット技術の源流

(1) オートメーションの進展

第3章「ロボットと人間」で述べたように、生物そっくりの動作を繰り返す自動人形の技術は、古くは近世西欧の機械人形、江戸時代のからくり人形に見られるように殆ど芸術の領域に達していたとも言える精巧なものであった。これには時計産業の発達に伴う精密機械技術が大きく貢献した。現代でも、ディズニールンドの小鳥のショー、博物館の動く動物模型などはこの遺産を受け継ぐものである。このような工芸品レベルの技術が現代の工学的製品の技術に進化した背景にはなんといっても第2次大戦中に誕生しその後大きな発展を遂げたオートメーション技術がある。

第2次大戦中に、レーダによる自動追尾などを実現するサーボメカニズム¹の技術が誕生した。その理論的背景を明らかにするためにフィードバック制御理論が研究され古典自動制御理論として開花した。またノーバート・ウイナーは「サイバネティクス」²を提唱し通信という概念で機械と生体をカバーする領域が存在することを示した。

一般社会でも、この自動化による新しい未来社会が夢想され「オートメーション」という新しい言葉が生まれ³産業界でもいろいろな機械の自動化への取り組みが始まった。当時出現した新しいオートメーション機器の代表的存在はNC（numerical control：数値制御）工作機である。1950年代に米国のMIT（マサチューセッツ工科大学）でフライス盤の自動化が行われた。熟練工が手動で運転した場合の操作量を磁気テープに記録し、磁気テープを再生してフライス盤をいわゆる「ティーチング・プレイバック」という方法によって無人運転するものであった。やがて、機械加工図面から、工具の経路をデジタル量としてパンチテープに入力しパンチテープによって自動運転する技術が開発された。これは1960年代となってコンピュータによる設計の自動化によって機械加工情報まで同時に作り上げるCAD／CAMの一環として生産過程の自動化・コンピュータ化に貢献した。初期の産業用ロボットはこのNC工作機で実現された機械自動制御技術を母体として誕生したものである。油圧駆動、シーケンス制御⁴という原始的なものに過ぎず、これが現在の高度に発達したメカトロ製品に変貌するにはまた次の時代を待たねばならない。

<シーケンス制御ロボット>

初期の産業用ロボットには、それまでの自動人形に利用されていた機械的なストップ、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能的なもの、固定シーケンス制御ロボットも含まれている。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出来るものを可変シーケンス制御ロボットと呼んでいる。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」という概念を一般社会に認識させるのに貢献した。

その後、エレクトロニクス技術⁵、デジタル技術の発達、駆動の電氣化、コンピュータ・ミニコンピュータ、マイクロエレクトロニクス⁶/LSI（large scale

1 サーボとはギリシャ語のServus（奴隷）による。人間に代わって動作する自動機構をサーボメカニズムと呼んだ

2 ノーバート・ウイナー「サイバネティクス：動物と機械における制御と通信」、岩波書店、1961

3 1955年の「サンデー毎日」は米国で「オートメーション」という言葉が登場していることを伝えている。

4 オン、オフの論理信号により、あらかじめ定められている順序、条件に従って動作が進行していく制御。

5 1947年ショックレイらが発明したトランジスタは、従来の真空管に比べてエネルギー消費が劇的に改善され、長寿命、小型、高速、といった利点がありエレクトロニクスの実用化に大きく貢献した。半導体工学・産業を開く端緒となった。

6 1960年ころトランジスタなどの単体を集積して回路全体を半導体のチップに集積する集積回路が登場し電子機器の小型化が進んだ。

integration 大規模集積) 技術、マイクロプロセッサ⁷、サーボモータ、パワーエレクトロニクス、ソフトウェア、現代制御理論などのなどの新技術が次々に導入され、自動機械制御の技術が確立されていった。

<サーボモータ>

一昔前まではモータというと「動力」を発生するだけの機械と理解されていた。オートメーションの発展に伴って1960年ころから位置・速度・力の制御、瞬時発進・停止といった「運動」を実現することを目的とした新しいモータが出現した。このモータをサーボモータと呼んでいる。モータには直流を電源とするDCモータと交流を電源とするACモータの区別がある。ACモータは電源の周波数で決まる一定の速度で回転するだけで制御が出来ない。サーボモータはまず電圧を変えることで制御できるDCモータで実現された。1950年代の終わりに安川電機がミナーシアモータ、カップモータ、フランスのSEA社がプリントモータという機械的慣性を小さくした直流サーボモータを開発、電気式アクチュエータがサーボメカニズムに採用されるきっかけとなった。

(2) ロボットのメカトロ化

日本では機電一体化という概念で新しい産業の可能性が模索されていたが、高度成長期を迎えて省力、省人、無人化システムといった新しい産業オートメーションの必要性が認識されるようになった。1967年、アメリカの先端技術産業用ロボットの存在を知った日本にロボット熱が巻き上がる。日本によって産業用ロボットの実用化の努力が始まった。これに伴い新しい産業用ロボットの新技术が開発されていった。以後の産業用ロボットの発展は日本の貢献によるといって過言でない。日本が有する総合工業力、技術力が貢献した典型的な事例である。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である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ーカー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。しかしロボットの实用化が進んで、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、パワー伝達用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、それを使つ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。

初期の産業用ロボットは産業機械を自動化した程度のレベルにしか過ぎなかったが、1974年スウェーデンのASEA社は、平行リンク機構、マイクロコンピュータ制御、DCサーボモータの絶妙の組み合わせにより全電気式垂直多関節型というその後の標準形になる新方式を発表した。発表当時の世間の評価必ずしも高いものではなかったが、サーボモータメーカーである日本の安川電機はこの着想に感銘し、これにならって1977年に日本最初の全電気式垂直多関節ロボットを開発した。これをアーク溶接に適用し大ヒット商品となり、産業用ロボットの市場が開ける端緒となった。

<平行リンク型電動垂直多関節ロボットの出現>

電気式サーボモータは、油圧駆動に比べて保守が楽、精密な制御が出来るなどの利点が認識されながらも、力が出ない、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。1974年に開発されたスウェーデンのASEA社のIRB-6はこの欠陥を克服する「マイクロプロセッサ制御・全電気式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。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、パ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8.1)。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。人間が認識できる直角座標系(X,Y,Z座標の)から各関節回転角への変換、またその逆変換を、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コンピュータに着目、マイクロコンピュータでリアルタイムに演算することで解決したものである。発表当時はロボット学会、産業界の評価は冷淡であり、かのエンゲルバーグ博士でさえ「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



図8.1 平行リンク構造

⁷ 1970年代になって日本の嶋正利、米国のテッド・ホフ、フェデリコ・ファジン等によってマイクロプロセッサ4004が発明され、エレクトロニクス製品の大革命となった。

ーボモーターを世界に先駆けて開発、推進してきたメーカーである。自動化機械にサーボモーターを搭載し走行させるシステムで、移動部に設置された重量が大きい電気サーボモーター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はお手本をしのぐ極めて高性能、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ー、構造は多関節型へと移行が始まる。

これをきっかけに産業用ロボットは電気駆動、マイクロプロセッサ制御に置き換わり、機械技術とエレクトロニクス技術が融合した新しい「メカトロニクス」製品に変貌した。工場環境でしか使われない油圧、空気圧駆動に代わり、電気駆動が実現されたことによりロボットが使われる環境が広がっていった。マイクロプロセッサで実現されるソフトウェア論理が従来のハードウェア論理に置き換わり、ロボットの機能がますます高度化されるようになった。ロボット産業の立ち上がりはこの電動式ロボット、マイクロプロセッサ制御によって新しい世代へと突入して行った。産業用ロボットの世界では1980年をロボット元年と呼んでいる。ロボット産業の立ち上がりはこの技術革新によって始まった。

サイリスタ、パワートランジスタといった大電力用のエレクトロニクス素子が開発され、いわゆるパワーエレクトロニクスが進展し家庭電器にもインバータ駆動が使われる時代となった。ここで出現したACサーボモーターがDCサーボモーターに代わって使用されるようになりロボットの保守性が飛躍的に向上した。

<ACサーボモーター>

DCモーターは原理上、回転する整流子とこれに接触している固定のブラシによって、回転角位置によってモーターを駆動する電流を機械的に切り替える構造となっている。この回転によって磨耗するブラシ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機械的接触部分を持たないACモーター構造で保守性を向上させたモーターが求められていた。整流子とブラシに代わって、回転位置を検出するセンサ、電流を切り替えるパワートランジスタによって回転接触部のないサーボモーターが開発された。これをACサーボモーターと呼んでいる。DCモーターのブラシ部分を除いたモーターという見方からブラシレスDCサーボモーターと呼ぶこともある。電源は直流なのだからこちらの方が理論的には正しい呼び方だろう。

1992年、安川電機はACサーボモーターの重量を従来の1/3程度に軽量化する画期的な新技術を開発し、「シグマモーター」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ーの新方式であったが、工作

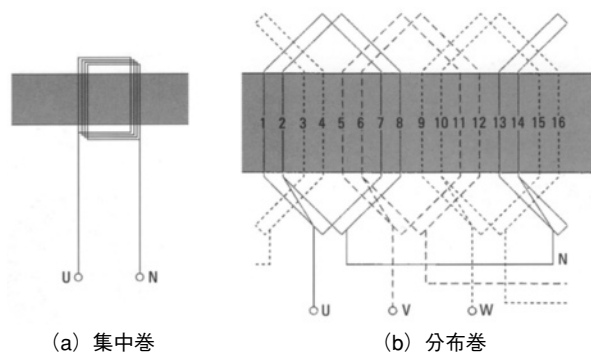


図8.2 モーターの巻線形式

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ーを直接埋め込むことも可能にするなど、ロボット構造の変革をもたらした。

<ACサーボモーターの革命>

ACサーボモーターは、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ーの原始的な巻線方式である集中巻への回帰である。モーターの巻線は図(図8.2)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騒音発生のもととなる。そこで分布巻と言う巻線方式が発明されその他の技法などの併用によってカットアンドトライ式に経験的にスムーズな回転が得られるようになった。これがモーターの常識となり集中巻はごく小型のおもちゃ用のモーター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い。集中巻に比べて発生できる磁界密度ははるかに低い。集中巻を採用することによって強力な磁界を発生することが出来る可能性があることに着目したのである。不均一回転、騒音の対策は、磁極の形状、極数の組み合わせなどを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実現の背景にある。

産業用ロボットは工場の中で、溶接、ハンドリング、組み立て、加工、塗装、糊つけといった用途に活躍しているが、1本の腕を持ち工場の中に固定設置されているロボットがあらかじめプログラムされた動作を繰り返し再現するという使われかたが大部分である。これは工場という構造的環境で使用される産業用ロボットでは自律性がなくとも十分役に立つ用途が多いことによるものである。しかし、産業用ロボットの適用分野が拡大するにつれ知能化の努力も始まっている。

視覚センサを利用してランダムに配置されている部品を取り上げたり、力センサーによってグラインダ加工などの仕上げを行う⁸例、視覚センサーによって機械部

8 神野「タスク指向のロボット言語を有する力制御仕上げロボットの開発」、日本ロボット学会誌、第14巻8号、pp1178-1185、1996

品の組み立てを行ったりする⁹知能化の試みが始まった。

組み立て分野では1本の手で加工対象部品を持ちもう1本の手で加工作業をするということが要求される場合がある。このために2台のロボットの腕が関連して動作する「協調運転」が実用されている。さらには双腕組み立てロボットも開発されている¹⁰。

また最新の制御理論、「現代制御理論」がマイクロプロセッサに搭載されて産業用ロボットの高性能化、小型化、コストダウンに貢献している。

今後、産業用ロボットの知能化とサービスロボットの自律化の技術が互いに影響しあって発展していくことが期待される。

<現代制御理論>

1960年ころから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。この手法は、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有用な実用的な方法で現在でも多用されている。現代制御理論では制御系の内部状態を表す状態変数という概念を導入し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、メカトロ機器の発展により適用対象が大きく開けたことにより実用上にも大きな効果を挙げるようになった。

現在、サービスロボットが現実のものとなって来た背景には、産業用ロボット技術が実現した

- ① ロボットの電動化
 - ② マイクロプロセッサ制御の実用化
 - ③ コストダウン
 - ④ 知能化への挑戦
- によるところが大きい。

その反面、産業用ロボットでは実現されていない

- ① 自律性 知能化
- ② 一般環境で使用するための環境性
- ③ 移動
- ④ 人間とのコミュニケーション

といった新しい課題に対する挑戦が待ち受けていることを認識しなければならない。

(3) 人工知能のあけぼの

産業用ロボットの開発が始まったころ、サイバネティックスに関心のある学者によって人工知能の研究が始まった。コンピュータ、テレビカメラ、触覚センサなどを使って知覚と推論を統合する人工物を作り上げるというものである。1956年、米国のジョン・マッカーシーが人工知能（AI: artificial intelligence）という言葉を作りマーヴィン・ミンスキーと共にマサチューセッツ工科大学にAI研究所を設立した。1969-71年、人工知能の研究者チャールズ・ローゼンは「シェーキ」と呼ばれるロボットを作った。大きなブロックが散在している部屋を歩き回ることが出来た。1970年から80年代前半にかけて米国を中心に人工知能研究が全盛となった。人工知能用語 LISP、人工知能研究用コンピュータ、オブジェクト指向プログラムの提唱などコンピュータ科学をベースにした人工知能研究が活発に行われた。しかし80年代半ばから、このような記号処理だけでは限界であるという批判が現れ人工知能研究のブームは鎮静化する。90年代半ばに、MITのブルックスは、サブサンクションアーキテクチャという理論を提唱し大きな反響を生んだ。「知能というものは中央にある巨大な1個の頭脳により集中制御されるものではない。生物は、センサーに反応する単純なルールが数多く並列に存在し、そのセンサに反応することによって、あたかも知能があるように行動する」というものである。これは行動型AIとも名づけられこの理論に基づくロボットが試作されるにいたった¹¹。今後、サービスロボットの発展ためには人工知能、自律性の分野における更なるブレイクスルーが必要であると思われる。

日本でも、これまでの知能ロボットの研究は

- ① 知能を切り離して考察するだけで、ロボットが身体を持って環境と相互作用することの意味についての考察が足りなかった
- ② ロボットが環境と相互作用しながらその機能を発達していく過程を軽視していた

という反省が生まれ、このような問題に対し、認知科学、発達心理、神経科学などの人間、動物に潜む原理を探索する分野から多くのヒントを得ようとする認知ロボティクスという新しい分野の研究が行われるようになった。

⁹ T.Goto et al. 「Control Algorithm for Precision Insert Operate Robot」, IEEE Transaction on System, Man and Cybernetics, SMC-10, No.1, pp19-25, 1980

¹⁰ S.Sakakibara et al 「An Innovative Automatic Assembly System Where a Two-armed Intelligent Robot Builds Mini Robots」, 27th International Symposium on Industrial Robots, pp.937-942, 1996

¹¹ 日本のおもちゃメーカ「バンダイ」はサブサンクションアーキテクチャによるロボットを販売している。

8.2 基本技術発展の系統化分析¹²

構造的環境を対象とする産業用ロボットと異なり非構造的環境を対象とするサービスロボットでは新しい技術を発展させてきた。以下その発展過程を系統的に眺めてみる。

(1) 耐環境性と自律性

1. 耐環境性と自律性による分類

現在、サービスロボットはすでに確立されている産業用ロボットの技術を足がかりとし、更に新しい方向に発展しようとしている。産業用ロボット技術とサービスロボット技術の違いは第1義的には、耐環境性と自律性にある。図8.3は、耐環境性を横軸に、自律性を縦軸にとって今後のロボットの発展方向を示す発展系統図である。

横軸の使用環境として、

- ① 工場環境 現在の産業用ロボットが使用されている環境
を真中に据え、右側に、
- ② 不快・危険環境 原子力、海中作業、危険作業など人間にとって好ましくない環境
- ③ 生存不能環境 宇宙空間、真空空間、極小空間など人間が存在できない極限環境
を、左側に

④ 人間居住環境 屋内、家庭内など人間が生活している環境

⑤ 自然環境 屋外の自然に存在している環境を配置している。

縦軸の自律性として

- ① 第一世代 あらかじめプログラムされた動作を繰り返す
- ② 第二世代 センサの信号に応じてプログラムされた動作を変更、修正する
- ③ 第三世代 環境の変化に応じて自律的に自分自身の動作を変更する

の階層に分類している。

現在実用されているのは工場環境で使われている第一世代のロボット技術である（図中ハッチして示されている領域）。ロボットはこれを出発点として次の発展を目指している。

2. 第一世代技術の耐環境性展開

「あらかじめプログラムされた動作を繰り返す」程度の第一世代技術でも、

- ① 屋外、放射線、高熱、低温、粉塵、真空、クリーン、水中、超小型化などの特殊環境への対策
- ② 例えば移動にはレールを使う、対象物を限定するなどの非構造的環境に対する対策
によって十分実用になる新しい用途を創造することができている。
・真空環境、クリーン環境で使われる半導体製造用の

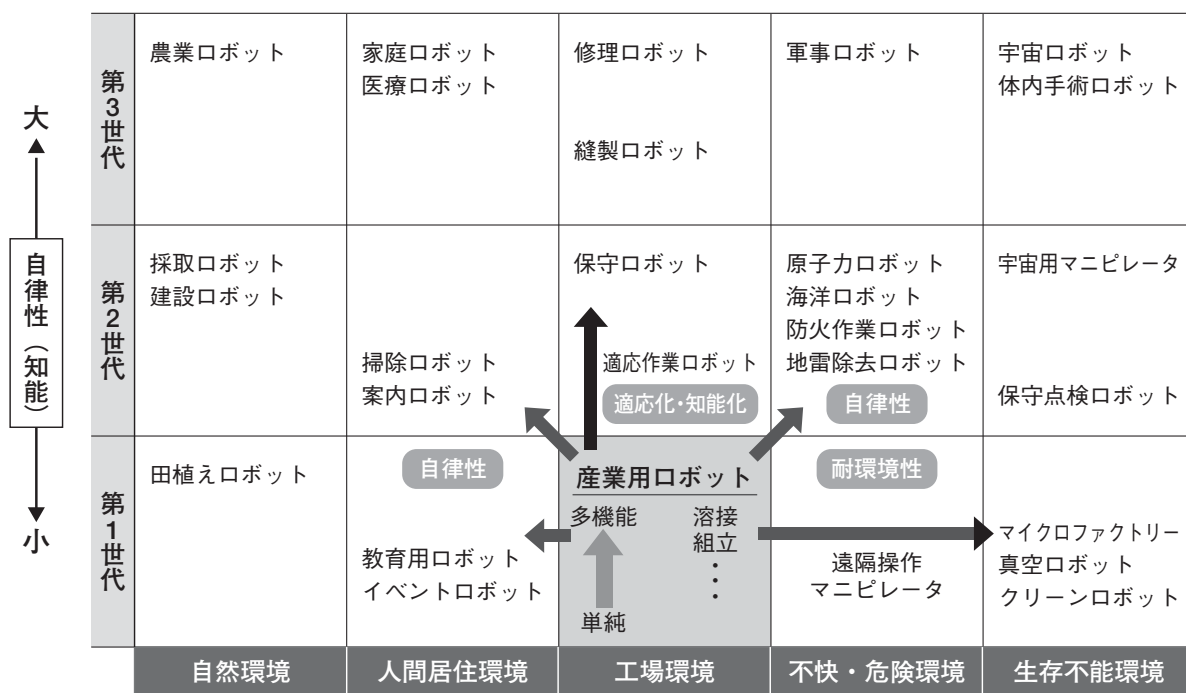


図8.3 技術の相關図

¹² 楠田「産業用ロボット技術発展の系統化調査」、技術の系統化調査報告、Vol.4、2004なども参照されたい。

真空ロボット、クリーンロボット

- ・人間居住環境においては イベントロボット、寿司ロボット
- ・自然環境においては田植えロボット

などがこの例である。

3. 第2世代への展開

産業用ロボットでは、センサー技術を利用してあらかじめプログラムされている動作を修正ないしは変更するものが試行されている。さらにこれに加えて、学習機能、適応機能、熟練工のノウハウを組み込んだエキスパートシステムなどの開発が行われている。

非構造的環境に対するサービスロボットの分野では、多かれ少なかれ自律性が必要とされるが、完全な自律性を有する第三世代の実現を目指す前に、ある程度の非構造的環境対策、ないしは実現機能を限定することにより、第二世代技術を実用に供することが現実的な方向である

① 人間の判断、介助を援用する

- ・不快危険環境での原子力ロボット、海洋ロボット、地雷除去ロボット、点検監視ロボット
- ・生存不能環境での宇宙用マニピュレータ

② 存在している環境の構造性を利用する

- ・人間居住環境での掃除ロボット、案内ロボット
- ・自然環境での建設ロボット

③ 環境に構造性を付加する

- ・農産物収穫ロボット

などの工夫に加えて必要とされる耐環境対策をおこなって用途を拡大していくのが当面の実用化の方向である。

人間に代わって非構造的環境での作業を行う「夢のロボット」に一般社会の期待がかかっているが、その第3世代への挑戦に向けてはまだまだ多くの努力を必要とするのが実情である。

(2) 移動技術

産業用ロボットは工場内に固定して設置されている。作業対象物はロボットの前に自動的に搬送されてくる、あるいは人手によって位置きめされるといった使い方がほとんどである。サービスロボットではロボットの

方から対象物に能動的にアクセスしなければならない。

このための移動技術としては車輪、クローラ¹³などが一般的であるが、人間との共生を強く意識する場面では2足歩行が注目されている。1980年ころから既に2足歩行系の力学と制御に関する研究¹⁴が行われた。階段の昇降、進行方向へ倒れ掛かる不安定状態を利用しての高速歩行、地面と接触していない時間帯を持つ走行、能動的な制御でなく重力、慣性などを利用する受動歩行などの開発が行われていた。歩行には移動に当たって常に重心の投影が足の面積上にある安定的な「静歩行」と、歩行速度を上げるためそれにとらわれない「動歩行」の区別がある。1983年に動的2足歩行¹⁵の研究が発表されていた。1996年にホンダが発表したP-1に続くP-3（1997）は今までに見られないスムーズな歩行動作を実現し、ヒューマノイドに対する一般社会の期待を掻き立てた。これに触発されてさまざまな歩行ロボットが開発されている。また人間の管理下でない環境状態（惑星探検、災害救助など）での極端な不整地走行では多足歩行、形状を状況に応じて変化させるクローラ¹⁶も研究されている。

水中の移動は、プロペラ、水流ジェットなど従来の水中移動技術が流用されている。空中の移動もプロペラ、ジェットなど従来技術をどのようにロボットに適用するかが開発の重点となっている。ロボットを支持する足場がない宇宙空間のでは動作の反力がロボット自体に加わるので全く別の考慮が必要とされている。

(3) マニピュレーション技術

産業用ロボットは、目的とする作業に応じて腕の先端に溶接ガン、溶接トーチ、塗料スプレイガン、ねじ締めドライバといった工具を取り付けて作業を行う。これに対して不特定な形状の対象物を取り扱うサービスロボットでは人間の指に相当するマニピュレーション技術が必要とされる。

1964年、指の機能の工学的研究が始まった¹⁷。1970年には、計算機で制御されるマニピュレータに反力の感覚を与えることにより組立作業のような微妙な力の調節を実行させることが示された¹⁸。1974年には既

13 いわゆる「キャタピラー」のことである。「キャタピラー」というのは商品名で学術用語としては使われない。

14 F.Miyazaki et al「A Control Theoretic Study on Dynamical Biped Locomotion」, ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol.102, pp233-239, 1980

15 古荘「動的2足歩行ロボットの制御」、日本ロボット学会誌、第1巻、第3号、pp182-190、1983

16 岩本ほか「形状可変形クローラ走行車の制御」

17 山下「機械で操作される人工の指とそのマテリアルズハンドリングへの応用」、計測と制御、第3巻、第6号、pp429-439、1964

18 井上「人工の手の計算機制御」、日本機械学会誌、第73巻、第618号、pp946-954、1970

に双腕で大きな対象物を運ぶ双腕協調の研究がなされた¹⁹。1985年には産業用ロボットのような剛性の高い腕とは違うフレキシブルな腕を使った場合の位置決め制御の振動抑制法の研究が発表された²⁰。1988年には、モータ、エンコーダ、ギアを30mm角に納めた小型指関節アクチュエータが開発され、接続金具によりにより自由に多指ハンドを構成する可能性が示された²¹。マニピュレーションの応用技術としては

(1) 不定形の対象物のマニピュレーション

形状がバラバラでないが一定の形を保っている固形対象物のマニピュレーションにはいろいろな指が開発されている。経済性と操作性を考慮して三本指の指を利用するものが多いが、2本、4本、5本など指も提案されている。

(2) 軟らかい対象物のハンドリング

① 機械的摩擦力によるグripper

対象物をフィンガーの摩擦力を利用して保持するので魚や鶏に対してはクランピング型のグripperが利用される。

② ピン型グripper

ピンを対象物に刺し込んで把持するもの。食品に対しては損傷を与えることがあるので一般的には不適当である。

③ 吸着グripper

真空や接着材を利用するものも含んでいる。吸着カップを利用するグripperは食品を保持するのに広く使用されている。

④ その他

ノズルで水蒸気を吹き付け急速冷凍して附着させるグripper、静電吸着グripper、高速気流による附着を利用するグripper¹⁾、触覚センサによって吸着力を測定し作業中に生じる変形にも対応するグripper、ハンドリング力に対する対象物の変形のモデル化、触覚センサ、光学エンコーダによって滑りを計測し把持力を連続的に制御するなどの新技術もある。具体例として、羊肉処理用の洗浄可能なマニピュレータ、空気圧ラバーグripperを備えた鶏肉パッケージング用マニピュレータ、魚の首刎ねようのロボットシステム、人間の作業をミニマムにし24時間作業を可能にする乳絞り用マニピュレータなどが実用されている。

3. 農産物のハンドリング

アスパラガスの収穫は収穫対象の選別、傷つき易い

対象という難点を克服すべく、例えば、光ファイバによる長さセンサ、フレキシブルなディスクグripper、特殊ナイフを利用する収穫用ロボットの例、接触圧を検出できるダイアフラム型のグripperをファジー論理で制御する例などがある。グリーンハウスのような小規模農業でもトマト、ミニトマト、胡瓜、葡萄の摘果用特殊グripperがあるが、大規模農業用のものとしては運転者が収穫ロボットを果樹に対し位置決めし、レーザーテレメータによってジョイスティックでグripperを制御、カッターで切断し、吸着カップによって摘果する事例もある。マッシュルームのようなデリケートな農産物収穫のマニピュレータ、スイカ、南瓜、キャベツ、レタスなどの重量農産物ハンドリングマニピュレータなども試作されている。

4. 食品パッケージング用マニピュレータ

いろいろな対象物、表面の不均一性に対してブローアによって吸着力を増強するグripper、人間の2倍の速度でピッキングをする高速のパラレルメカニズムロボット（日立精機）、農産物のデパレタイジングロボットなどいろいろな試みが行われてきた。

5. マイクロ・ナノ・ハンドリング技術

1980年代半ば以降、マイクロマシン・プロジェクトのために、ミリメートルサイズの小さなマシンやロボットの研究開発が行われ、あわせて半導体技術を利用して微小なアクチュエータやセンサを製作するMEMS (Micro Electro Mechanical Sysrem) 技術が進展した。1990年代にはマイクロマシンをキーワードに微小なアクチュエータ、センサなどのマイクロコンポネントなどが試作された。今後のサービスロボットの重要な方向であり、更なる発展が期待されている。

(4) センシング技術

非構造環境に対処するためには非構造環境を認識するセンシング技術が不可欠である。

① 環境認識

サービスロボットが利用される環境は一般に「非構造的環境」である。人間と同じような環境認識能力は近い将来の範囲では実現できそうにない。現在のところ

- ・人間の視覚による認識に頼りロボットを（遠隔）操縦する
- ・建物などあらかじめ存在している構造的環境の情報（地図、建物の図面など）を基本にし、GPS、ラン

¹⁹ E.Nakano「Cooperational Control of the Anthropomorphous Manipulator “MELARM”」, Proc.4th International Symposium on Industrial Robots, PP51-260, 1974

²⁰ 福田「フレキシブルロボットアームの制御」、日本機械学会論文集（C編）、第51巻、第46号、pp979-984, 1985

²¹ 梅津「アームと多指ハンドのインピーダンス制御」安川電機、Vol.158、No.3, pp183-188, 1994

ドマーク、距離測定、移動距離計算などの方法で環境とロボットの位置関係を認識する

・ レール、誘導線などの構造的環境を作ってやりこれに上記の技法を使う

などが行われている。

② 対象物認識

対象物を認識するためには、2次元視覚センサ、3次元視覚センサなどが実現されている。画像処理の速度が十分でないため応用範囲が制限されていたが、高速ビジョン用チップの開発²²などにより新しい応用分野が開くこと画期待されている。変わったところでは人工触覚による手探りパターン認識の研究もある²³。

③ 作業認識

前述の対象認識のためのビジョンセンサー以外に、作業遂行のためのさまざまなセンサも開発されてきた。もっとも大きな成果は「ハプティックインターフェース」と呼ばれる技術で、対象物と操作側とが双方向に感覚情報（力、触覚など）を伝達して、あたかも人間が実際に作業しているのと同じ感覚で作業できるようにするものである。特に極限環境で人間の介助によって作業を進めるシステムでは不可欠のものとして実用されている。

(5) ヒューマンインターフェース

人間とロボットが共生する社会では、言葉、表情、など人間の感性による情報インターフェースが望まれる。音声の両方向コミュニケーション、表情によるロボット内部状態の表現、さらには人間とロボットとの共同作業で人間の力に追従して協業するロボットなどの新しいインターフェースも開発されている。今後、人間行動理解技術、シミュレーション技術、ヴァーチャルリアリティ技術などの進歩によって更なる進展が期待される。

8.3 サービスロボット発展の系統化分析

(1) メカトロニクスのインパクト

ロボット技術は、さまざまな科学・技術の分野の総合技術である。単独の「ロボット技術」というものは存在せず常にさまざまな科学技術が相互に関係しあって進化してきた。図8.4はサービスロボットの各適用分野と科学技術、ロボット要素技術との相互関連を時

系列的に示している。

しかしその中で最大のインパクトは何といてもマイクロプロセッサの適用である。1980年から産業用ロボット産業が急速に立ち上がるのでこの年をロボット元年といっている。この原動力となったのが電気駆動とマイクロプロセッサによるロボットのメカトロ化にあることは既に考察した。この頃をきっかけにサービスロボットの実応用も始まっている。それまでハードウェア論理によって制御されていたロボットでは高機能は望むべくもないし、コンピュータ、あるいはミニコンピュータによって制御されていたロボットは経済的に実用できるものではなかった。これは1970年後半から制御技術への適用が始まったマイクロプロセッサによって高機能が低コストで得られるようになったことが決定的な影響をあたえたのである。

(2) 遠隔操縦ロボット発展の系統化分析

サービスロボットの分野でもっとも早く実現されたのは遠隔操縦に関する用途である。産業用ロボットの誕生以前から、遠隔操縦の研究が行われていた。原子力開発、宇宙探索、深海探検といった巨大プロジェクトの分野は人間が存在することが出来ない、ないしは非常に困難な環境である。完全に自律して人間に代行できるロボットの開発を待つことは出来ず、近距離の場合は安全な場所からの人間の目視によって、遠距離の場合はテレビカメラの映像を頼りにロボットを遠隔操縦する実用的なアプローチを採用せざるを得なかった。やがて視覚だけでは不完全で、操作の力覚を操作者が感じ取れるバイラテラル・サーボと呼ばれるサーボ技術が開発され操作性が改善された。1973年工業技術院機械技術研究所（現産業技術総合研究所）は力感覚を持つ双腕協調遠隔制御ロボットを開発した。さらに触覚なども含めて対象物と操作者の感覚を一致させるハプティック・インターフェースという技術分野が開花していった。宇宙空間を自由運動している宇宙ロボットでは腕が動作するとその動作反力で位置・姿勢が変動してしまう。1991年、第2の腕を動作補償用に利用することにより安定した動作画実現できる研究が発表された²⁴。人間が操縦するマスターロボット、これと同じ動作をする遠隔場所のスレーブロボットの組み合わせをマスター・スレーブ・マニピュレータと呼ん

²² 石川ほか「デジタルビジョンチップとその応用」、電子情報通信学会論文誌C、Vol. J84-C、No.6、pp451-461、2001

²³ 木下ほか開発した。「人工触覚によるパターン認識」、計測自動制御学会論文集、第7巻1号、pp25-30、1971

²⁴ 吉田ほか「宇宙ロボットの多腕協調制御」、日本ロボット学会誌、第9巻6号、pp718-726、1991

でいる。異なった構造のマスターロボットとスレーブロボットを協調させる技術も開発されている²⁵。また、宇宙空間のような超遠隔距離の遠隔運転の問題も研究されている²⁶。

このような遠隔操縦技術は、やがて人間では持ち運べない重量物をハンドリングする建設・土木ロボット、人間が立ちいれない災害救助ロボット、医療ロボットなどに水平展開されている。

1995年から「Rキューブ」(Real time Remote Robotics: 実時間遠隔制御ロボット)と呼ばれる開発が東京大学で始まっている²⁷。遠隔操縦の域からさらに発展して、人間が存在できない空間で実際に作業しているのは遠隔操縦されているロボットであるが、操縦する人間は実際に自分自身が現場で作業しているかのような感覚で仕事を実行できるバーチャルな環境を実現するものである。このためには、バーチャルリアリティ、遠隔センシングとのさらなる協業が必要となる。これが実現されれば、極限環境への一大ブレイクスルーとなるであろう。また1998年、通商産業省が発足させたNEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構)の5年計画プロジェクト「人間協調・共存型ロボットシステム」ではヒューマノイドロボットHRPを遠隔制御する遠隔制御コックピットを開発、一般の利用に開放している。今後自律型ロボット技術との協業により新しい展開が期待されている。

図8.5は、遠隔操縦ロボット発展の系統図である。

(3) 自律ロボット発展の系統化分析

コンピュータの登場により人類は「考える機械」としての人工頭脳への期待が高まった。サイバネティクス研究者を中心に人工知能の研究が高まったのは1970-80年ころである。SRI(Stanford Research Institute)が開発した「シェイキー」に触発され日本でも自律ロボットへの関心が高まっていった。1970年、工業技術院電気試験所は「人工知能ロボットMk-1」を開発した。油圧式ではあったが視覚と双腕を使ってコンピュータの指示により簡単な組み立てを行うものであった。また同年、安川電機はビジョン装置を用い

てコンベヤー上のピンをハンドリングする「サイクロプス」を発表するなどこのあたりから自律ロボットの曙光が見え始めている。

1973年早稲田大学は、2足ロボットWABOT-1を開発、自律歩行のさきがけとなった。1985年のWABOT-2は楽譜を読んでピアノを演奏するという画期的なロボットであった。

一方、産業用ロボットの実用面では、機械式固定シーケンス制御、電気式固定シーケンス制御、機械式可変シーケンス制御と発展してきたが、エレクトロニクスによる可変プログラム制御によって自律ロボットへの足がかりが得られた。視覚、力覚、触覚、聴覚といった感覚機能を代行するセンサー技術の導入によって、センシング情報によって動作プログラムを修正し変更することが可能となってきた。さらに作業の学習、変化する環境への適応制御、エキスパートシステムによる人間の英知の導入などのレベルアップが行われた。バリ取りの力制御、視覚と力制御による組み立て、などの応用が拓け、産業用ロボットの分野で「知能ロボット」と呼ばれる一分野を形成している。

2000年おもちゃメーカーのバンダイはサブサンプシジョンアーキテクチャを用いたおもちゃロボットを販売した。またアブライドロボティクス社はサブサンプシジョンアーキテクチャを用いた一連のサービスロボットを販売している²⁸。1996年から始まった5年計画の科学技術振興事業団の創造科学技術振興事業(ERATO)の1プロジェクトである川人学習動態脳プロジェクト²⁹はヒューマノイドロボットを中心としてヒト脳の機能を感じ覚・運動の変換を基本として解明しようとするものである。

最終的に人間のように行動によって知能を獲得していく真の自律化の実現にはまだ遠い道のりがあるが、

- ① 行動型AI、認知ロボティクスといった人工知能理論
- ② センシング技術
- ③ 移動技術
- ④ マニピュレーション技術
- ⑤ 実用化技術

の総合により更なる発展が期待されている。

図8.6は自律ロボット発展の系統図である。

²⁵ 新井ほか「異構造マニピュレータ間におけるバイラテラルマスタスレイブ制御」、日本ロボット学会誌、第4巻、第5号

²⁶ M.Mitsuishi et al「A User-friendly Manufacturing System for "Hype Environment"」, Proceedings of 1992 International Conference on Robotics and Automation, pp25-31, Nice, 1992

²⁷ 館ほか「VRとロボティクス」バイオメカニクス学会誌、Vol.25, No.2, pp62-65, 2001

²⁸ 楠田「海外文献紹介：新AI理論とロボット」、ロボット、日本ロボット工業会

²⁹ 川人「川人学習動態脳プロジェクト」、日本ロボット学会誌、第18巻、第8号、pp1074-1080
「特集 川人学習動態脳プロジェクト」、日本ロボット学会誌、第19巻、第5号

8.4 今後の発展方向

(1) これから必要とされる新技術

今後サービスロボット発展のために開発しなければならない技術はなんだろうか。

「21世紀におけるロボット社会創造のための技術戦略報告書」³⁰はサービスロボットの今後の重点ニーズ分野として

- ① バイオ産業分野 自動分析技術 自動合成装置 バイオ工場
- ② 公共分野 災害発生の観測・予測 災害の発生防止 災害発生時の対処
- ③ 医療・福祉分野 予防 診断 治療 リハビリテーション 医療施設の省力化・インテリジェント化 医学教育

- ④ 生活分野 教育 健康

を挙げ、これに必要とされる新技術として

- ・ ロボットを構成する基本的で重要な機能である環境情報の獲得、および判断能力の代表であるロボットビジョン

- ・ 移動技術

- ・ 物体操作能力であるマニピュレーション

が重要であるとし、そこに

- ・ コンピュータネットワーク
- ・ 人間指向のインターフェース
- ・ マイクロナノスケールのハンドリング

のシーズが活用されていくものと予測している。この方向にあるものとして

- ① ネットワーク利用遠隔・分散システム構築・運用技術
 - ・ リモートメンテナンス、遠隔医療
 - ・ レスキュー、人道的地雷処理等
 - ・ リモートブレイン形ファクトリー
- ② ナノハンドリング技術
 - ・ 細胞操作の自動化と大量処理化
 - ・ マイクロ医療ツール
 - ・ マイクロ電子組み立て
- ③ 感性インターフェース・人間行動理解技術・シミュレーション技術・ヴァーチャルリアリティ
 - ・ インテリジェントルーム
 - ・ 遠隔操作が可能な物理エージェント
- ④ ロボットヴィジョン
 - ・ レジスターレス・スーパーマーケット
 - ・ 災害復旧支援システムへの応用

⑤ 移動技術

- ・ 人間が管理していない領域での」移動技術

⑥ アドヴァンストマニピュレーション

- ・ 柔軟物のハンドリング
- ・ 高技能マニピュレーション
- ・ 超高速マニピュレーション
- ・ 精密マニピュレーション

を挙げている。

しかし、今までも多くの新技術が研究開発されてきたにも関わらずサービスロボットが産業として確立していない現状を考える時、現在不足している技術をただ羅列するだけでは問題の解決には程遠いと思う。今後のロボット産業の発展のためには過去の技術開発に対する根本的な反省が必要と考える。

(2) オープン化とモジュール化の発展過程

今まで見てきたようにさまざまな研究開発が行われてきた。しかしいまだにサービスロボットが産業として確立されていないのが実情である。この大きな原因は、よく似た（時にはまったく同じ！）研究テーマがいろいろな研究機関、産業界の研究開発プロジェクトで取り上げられているが、別のところで開発された技術を再利用することは行われていない。全てを一から始めるという研究開発体制で行われている。産業用ロボットにおいてはこのような経験が積まれるにつれ、企業の中で既に開発された技術を再利用することが行われるようになった。しかしこの「インハウスモジュール化」は他の企業で利用することはできない。これからのロボット産業の発展が従来の産業用ロボット分野よりもはるかに広範で多岐にわたるサービスロボット分野にあるとすると、この問題の解決なしには多くを望むことはできないだろう。パソコンの世界ではパソコンの機能の根幹部分であるOSはウインドウズ、マックOS、あるいはリナックスといった形で一般に開放されている。パソコンメーカはこれをベースにして独自のパソコンを作り上げることが出来る。またユーザーも同じOSのパソコンであればメーカが違っても同じような感覚で使いこなすことが出来ている。この「オープン」な環境がサービスロボットにも必要なのである。このような認識の下に、ロボット技術のオープン化、モジュール化の努力がようやく始まっている。

ソニーはペットロボットAIBOのソフトウェアを公開してユーザーが自身で新しい機能を追加したり、動作を変更したり出来る体制を作り、ユーザーはファンクラ

³⁰ 「21世紀におけるロボット社会創造のための技術戦略報告書」日本機械工業連合会、日本ロボット工業会、2001

ブを作りソフトウェアを交換する社会を実現している。ソニーはさらにヒューマノイドロボットSDRに採用しているオープンSDRというOSをインターネット上でユーザに開放して、ユーザが独自の機能を追加できるようにしている。ヒューマノイドロボットの研究プラットフォームであるPINOではオープンPINOというOSを開放している。

また、エンターテインメントロボットの世界ではいろいろなメーカーがRobolinkコンソーシアムというグループを作り、異なったメーカーのおもちゃのロボット同士が通信しあって活動するためのネットワーク、通信手段の標準化も開発を進めている。

日本ロボット工業会では産業用ロボットに対してはORiN (オンラインOpen Robot Interface for the Network) というソフトウェア環境を提唱している。いろいろなメーカーが独自に開発したロボットでもORiNとのインターフェースモジュールだけ開発すればパソコン他のロボット、自動化機器との通信が可能になるオープンな環境である。さらに、ロボット技術のオープン化を提唱し³¹、2002年度より始まった「ロボット機能発現ために必要な要素技術開発」の中で「RTミドルウェアの基本機能実現に関する研究を開始した³²。

これからもこのような努力がさらに強化されロボット技術、ロボット産業の発展に貢献していくと思われる。

³¹ 「21世紀におけるロボット社会創造のための技術戦略報告書」(社)日本機械工業連合会、(社)日本ロボット工業会、要1、2001

³² 特集 「RTミドルウェアプロジェクトとRTオープン化の開発事例」、ロボット、Vol.153、2003、日本ロボット工業会

図8.4 サービスロボットの各適用分野と科学技術、ロボット要素技術との相互関連

		年代	1940	1960	1970	1980	1990	2000
時代			自動機械人形	オートメーション		メカトロニクス		知能化機械
科学・技術	理論		フィードバック制御 サイバネティクス	シーケンス制御 現代制御理論		AI	新AI理論	
	エレクトロニクス		トランジスタ	IC	LSI			
	コンピュータ		●ENIAC ●フォンノイマンの提案		●4ビットマイクロプロセッサ ●8ビットマイクロプロセッサ ●16ビットマイクロプロセッサ		32ビットマイクロプロセッサ	
	制御							
	機器		サーボメカニズム NC DCサーボモータ	PLC	CNC	ACサーボモータ	マルチメディア	インターネット
ロボットの適用	産業用ロボット			●産業用ロボット誕生	●自動車スポット溶接の導入 ●国産ロボット始まる	●SCARAロボット ●電気式垂直多関節型 ●ACサーボ化始まる	更なるコストダウン	
	極限環境 原子力 海洋、宇宙 マイクロ			遠隔操作マニピュレータ	●原子力発電所 電気発生器電熱官点検ロボ	●海中ケーブル点検ロボ	●原子力防災ロボ ●「うらしま」 ●試験衛星マニピュレータ	
	社会・公共 建設・土木 公共・防災					●建設ロボ1号 鉄骨耐火被覆ロボ ●天井ボード貼付ロボ ●セグメント組立ロボ ●ガスタンク点検ロボ ●配電工事ロボ	●ブルドーザ無人運転ロボ ●地雷除去ロボ	
	一般産業 農業・林業 食品					●発電所海藻類除去ロボ ●果実収穫ロボ ●接き木ロボ	●搾乳ロボ ●農業散布無人ヘリコプタ	
	生活支援 医療 福祉				●筋電義手WIMEハンド	●研究用海外医療ロボット導入 ●リハビリロボ	●手術支援ロボ	
	人間共存 人間型 エンターテインメント 教育				●万博展示自動人形	●楽譜を読みとり ピアノを弾くロボ 人間形ロボの研究始まる	●ホンダP2 ●癒しロボ 人間形ロボットのブーム ●万博ロボ	
ロボットの機能	本体		機械人形 (含 遠隔操作ロボット)	●産業用ロボット誕生	●多関節型			●人間型ロボット ●動物型
	移動		車輪・クローラ		●「人工の足」 2足・4足歩行理論	静歩行・動歩行理論		
	マニピュレーション		●リモートマニピュレータ ●マスタスレーブマニピュレータ ●「人工の指」	●電動アーム・ハンド・フィンガー		●ETLハンド ●ピアノを弾く指		
	感覚			●力覚フィードバック ●視覚ロボット		●音声認識 ●音声応答		●高速ビジョンチップ
	環境対応			●耐放射線マニピュレータ		耐水圧技術	耐真空技術 マイクロ化技術	●マイクロロボ
	知能		固定シーケンス	プログラム制御	●マイクロプロセッサ誕生		●知能化ロボ	自律型ロボット ●新AI理論
	コミュニケーション							●群ロボ ●感性インタフェース

図8.5 遠隔操縦ロボットの発展系統

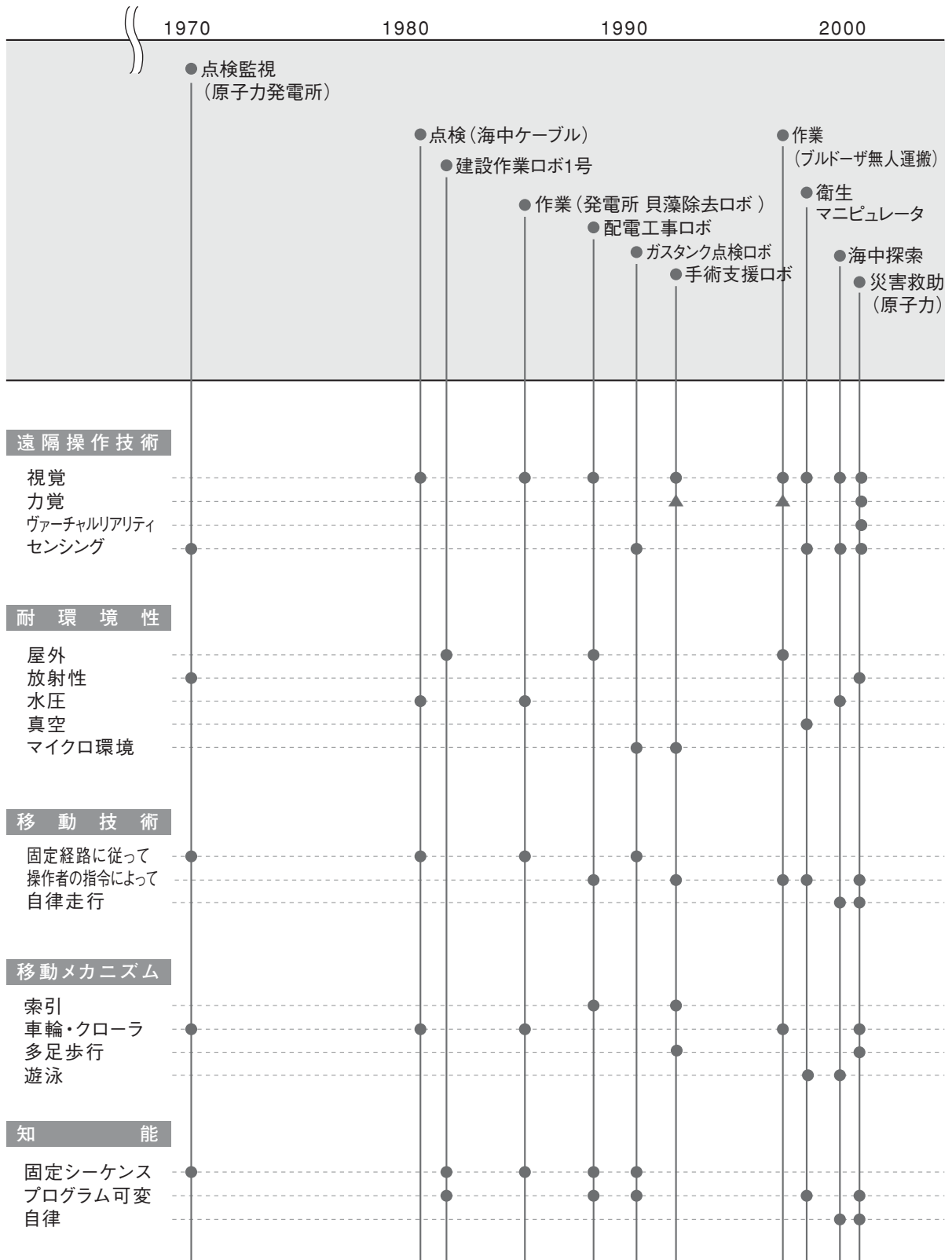
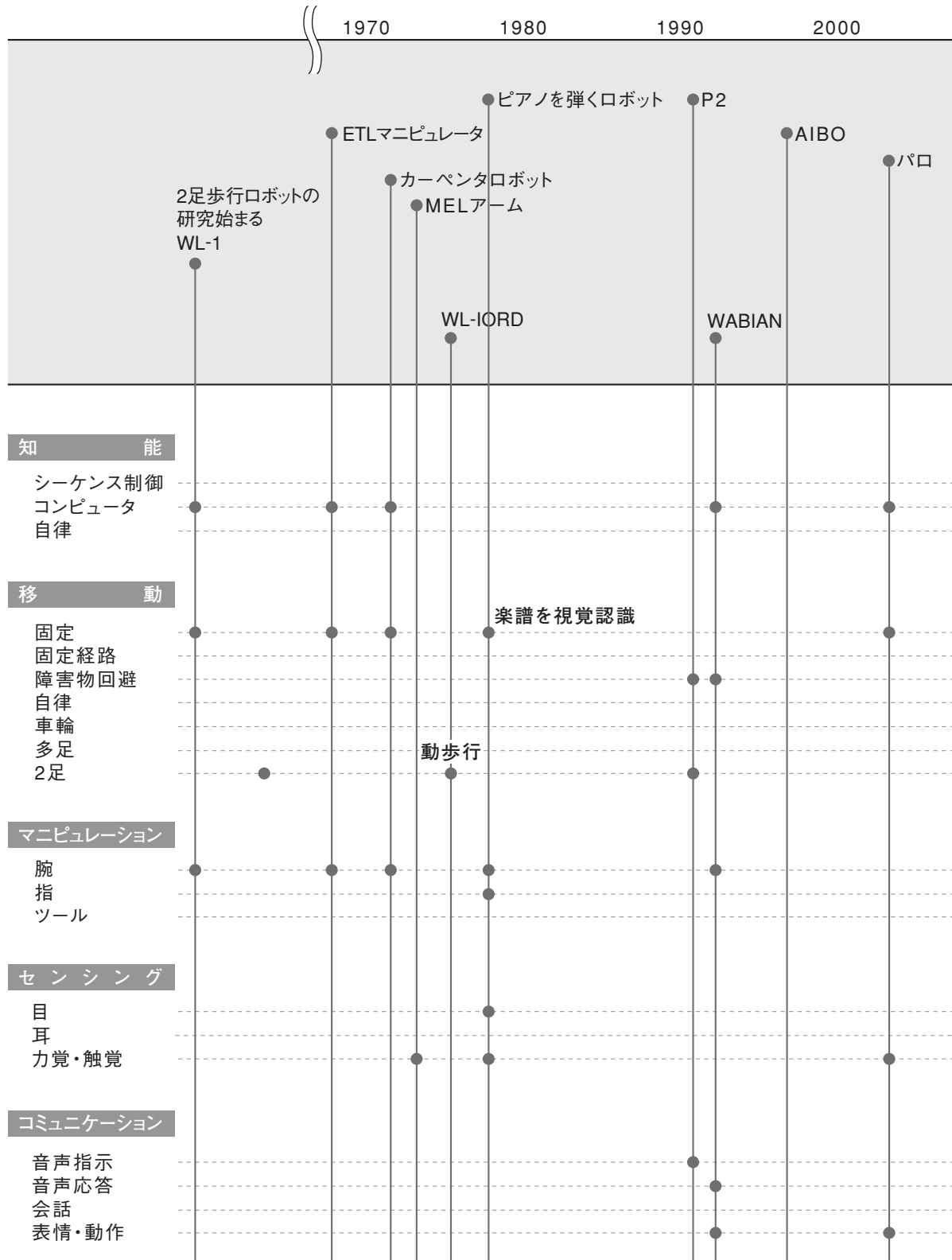


図8.6 自律ロボットの発展系統



9 サービスロボットの今後の発展

「世界の産業用ロボットの70パーセントは日本で生産されている。総使用台数の60パーセント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の生易しいものではない。

ロボット産業の停滞が憂われるようになって久しい。ロボット工学の研究者たちは次々に新しい研究成果を発表するがこれが実用に供されロボット産業の発展に貢献したという例は見当たらない。産業界は依然として1960年代、1970年代の技術を踏襲するにとどまっている。「ロボットを新しい応用分野へ適用しようとする企業意欲は依然として存在し、ロボット技術が従来にも増して社会的関心を集める分野であるにもかかわらず、現在のロボット産業界には70年代及び80年代初頭のようなロボット研究に対する熱気が感じられない。特に、今日、エンターテインメントロボットやヒューマノイドロボットなどが社会的ブームとなっている反面、かつての教示再生型ロボットがしめたような市場展開を見るまでにいたっていないなど、ロボット技術に対する閉塞感が産業界に存在する。」とする指摘もある¹。

ここまで日本のサービスロボットの発展過程を眺めて来た。サービスロボットへの関心は強くいろいろな研究、開発がなされてきた。しかしいまだにサービスロボットが産業として確立するには程遠い状況である。何が問題なのだろうか？サービスロボットの将来のために過去から何を読み取るべきであろうか？

9.1 産業用ロボットの歴史に学ぶ

単なる自動機械人形から現在のロボットというメカトロ製品に発展した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。(以下の9.1 (1) は筆者が「産業用ロボット技術発達の系統化調査」の一部であるが²、重要な本質に関するものなのであえて再録する。)

(1) メカトロニクスの経済学

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何とい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9.1)。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工作機の需要量を考えても当然のことである。この理屈から言うと、

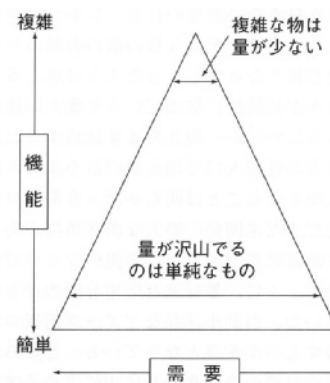


図9.1 機能の複雑さと需要量

¹ 「21世紀におけるロボット社会創造のための技術戦略報告書」(社)日本機械工業連合会、(社)日本ロボット工業会、要1、2001

² 楠田「産業用ロボット技術発達の系統化調査」、国立科学博物館、pp41-42、2004

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）は微々たるものにすぎない。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、下があ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や人類は一昔前では想像も出来ないような安いコストで情報処理を実現することが出来るようになった（図9.2）。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。

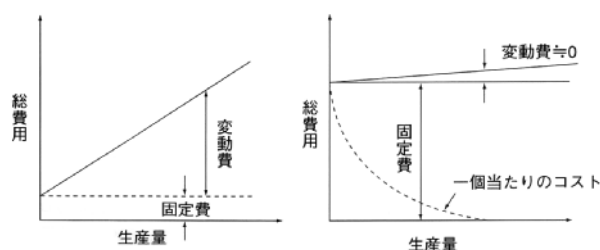


図9.2 コスト曲線

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出来なかった

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出来るかどうか依存しているのである。

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の問題はまだ大きくは顕在化していなかった。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が大きな問題になってきている。

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ーでは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。

歴史を振り返ってみると、この本質的なロボットの収益特性を無視して話題性があり一見魅力的なロボット産業にただ情動的に参入した企業の数々の失敗例を見る。

- ・商品としての量をどのようにして確保するのか、その販売体制を構築することなく参入して失敗した例、
- ・せっかく優秀な技術を持ちながら限定された特殊市場を対象としたため開発コストを回収できず撤退を余儀なくされた例、
- ・外販を考えず社内用だけのためにロボットを製造したがコスト負担に耐えられず自社開発を断念した大手ユーザーの例

などなど枚挙に暇がない。ロボット事業を発展させるためには一度開発された商品を大量に販売することを可能にする総合的な事業構造への取り組みが必要であることを物語っている。サービスロボットの開発もこ

の事業体制の構築を可能にするものでなければならぬ。単に話題性だけがある技術というものはロボット産業の発展とは無縁のものである。大学、研究機関が研究開発されたロボットが産業に発展しないのは事業規模、事業戦略という視点がないからである。

9.2 サービスロボット産業を実現するには

サービスロボットは産業用ロボットよりはるかに高度の自律性が要求される。これを実現するソフトウェアはさらに高度のものが必要となる。この開発には巨額の開発投資が必要とされることは想像に難くない。この開発投資を回収しさらに収益をあげていくための事業規模が実現できるかどうかは鍵である。

- ・数が出ないロボットの場合、価格は高いものにならないを得ないが、この値段でも十分価値がある用途であるのか？
- ・ソフトウェア開発費を無視できるほど大量に販売できる事業規模なのか？
- ・ソフトウェアの開発を画期的に効率化できる方法はないか？

という見地からの検討が必要である。

いままでいろいろなサービスロボットの研究開発が行われてきた。多くの場合、技術的好奇心、話題性、なんとなくこれからの先端技術への足がかり… いろいろな理由から研究開発が正当化され、最終的に事業として成立するかどうかの意識はかなり希薄だったのではなかったろうか。写真はある建設会社が開発した建設ロボットのシリーズであるがその後 実用にされていないのが実情である (写真9.1)。産業用ロボットの場合、1970年代の終わりにころマイクロプロセッサが制御に導入され始めたころが重要な転機だったと思われる。マイクロプロセッサの活用により産業用ロボットは一気に機能の高度化が始まる。これに伴って巨大化するソフトウェア開発費をどのようにして回収するかが大問題となってきたのに気がつかず、依然として従来のハードウェア論理時代の事業スタンスを取り続けたメーカーはやがてロボット事業から撤退せざるを得なかった。それまで自社の機械の高度化、自社設備の合理化といった限られた範囲にロボット技術を適用していたユーザ企業がロボット事業を維持できなくなったのは言うまでもない。現在残っている産業用ロボットメーカーは、エレクトロニクス制御装置メーカーだったファナック、制御用モーターメーカーであった安川電機など特定の用途にとらわれることなく、一度開発した制御プラットフォームをいろいろな用途に適用して事

業規模を拡大していった企業である。今後のサービスロボットの発展の方向を考えるにあたり、産業用ロボット事業化失敗の歴史に学ばなければならない。



写真9.1 建設ロボットの開発例

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。今後必要とされるロボットの高度の自律性はこのようなお金に糸目をつけない巨大プロジェクトのなかから生まれる可能性も否定できない。しかしこれは日本には無縁の分野である。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すべきであろう。

9.3 話題性より必要性

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。しかし、冷静に考えてみると、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ろう。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。

これから日本に押し寄せる高齢化、少子化の対策として、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、個人の住宅で利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。

「ロボットの父」エンゲルバーガー博士は高齢者在宅介護ロボットを実現しようと考え、在宅介護の省力化に最も関心があるはずの日本に事業化パートナーを求めてきた。博士のロボットは決してSFで夢見られているようなロボットではない。

- ・音声指示・応答
- ・物の取り出し・輸送・収納（“冷蔵庫からミルクを持って来い”）
- ・歩行補助
- ・簡単な調理（バーコードでレトルト食品を認識して電子レンジで加熱）
- ・定型的な環境の掃除
- ・家電機器の操作
- ・生体データの計測・伝送
- ・非常時の通報・避難ガイド

などを行う多目的自動機械である³（図9.3）。入浴介助、散髪などはしない。車椅子程度の大きさの双腕・センサ付・車輪による移動の自動機械で出来る範囲の仕事をする。

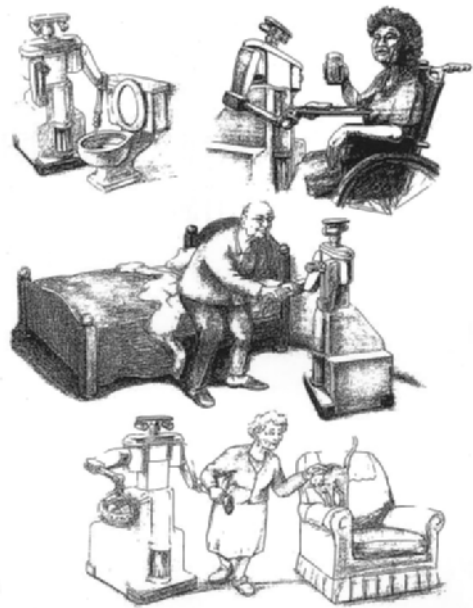


図9.3 エンゲルバーガー博士の高齢者介護ロボット

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300万円の介護ロボットを利用したとすると1兆5000億円の新市場が形成される。このような大きな市場を対象とする商品ロボットは十分可能性があると思われる。

ところが現在上記の在宅介護ロボットの具体化を検討しようという企業が現れていない。日本のロボット研究・開発が「人間のそっくりさん」の実現という情緒的動機に流れて、本当に「人間に役に立つロボット」、事業として成立するロボットに関心が不足している事実を物語るものではないだろうか。

9.4 ロボット工学のオープン化 モジュール化

サービスロボット産業を成立させるために必要なもう一つの観点がある。ソフトウェアの開発コストを画期的に低減する可能性があるオープン化、モジュール化の方向である。

サービスロボットの対象分野はきわめて多岐にわたる。しかも、ここで必要とされる技術は非構造的環境に対応する自律性という産業用ロボットでは実現されてない高度の技術である。これを実現するには大きな開発費、労力、時間を必要とすることは想像に難くない。現在までのサービスロボットの研究は特定用途のサービスロボットの実現を目的としていた。ここで必要とされる基幹技術は最終目的を達成するためのサブテーマとして開発され、開発成果はすべて研究者の「閉じた」世界に存在するにとどまっていた。他の研究

³ J.F.Engelberger A Gauntlet thrown to Elder Care Robot, Industrial Robot, Vol.24, Nr.3, 1997, pp202-206

者が利用することはおろか、これをそのまま実用に供するべく産業界に移転しようとしても共通基盤が存在しないため、実用化のためにはさらなる製品化開発が必要とされている。サービスロボットの実現のためには、ロボット技術の共通プラットフォームを策定しこの「オープン」なプラットフォームに乗る形でコンポーネントを研究開発し、一度開発されたコンポーネント(モジュール)が以後の研究開発、製品化に再び利用できるようなしなければならないと考える。多岐にわたるサービスロボットの技術を1社、1個人でまかなうことは不可能である。ロボット産業は将来の社会のニーズに応じて変化しつづけるなければならない。これを達成する中心課題はオープン化、モジュラー化である。

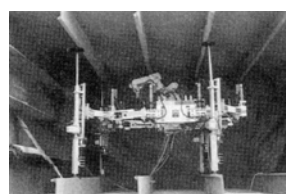
日本ロボット工業会、日本機械工業連合会は経済産業省の委託により「21世紀におけるロボット社会創造のための技術戦略報告書」を策定した。この中これからのRT(RobotTechnology)の発展のためには技術、要素製品のオープン化、モジュラー化が不可欠であると指摘している⁴。日本では、2002年度より始まった「ロボット機能発現ために必要な要素技術開発」の中で「RTミドルウェアの基本機能実現に関する研究」としてソフトウェアのモジュラー化、オープン化の研究を開始した⁵。

欧州連合(EU)は1998年よりサービスロボット、オープン化、モジュラー化のための具体的な行動を始めている。

＜EUのオープン化、モジュラー化計画＞

EUのCLAWAR(Climbing And Walking Robot)プロジェクトは移動歩行ロボットの開発という名前を持っているが、主な目的は、どのようにしてロボットのモジュラー化を達成、「プラグ・アンド・プレイ」の要素技術を公開してサービスロボットの大市场を実現するということである⁶。研究者と産業界と協力してコンポーネントレベルでの標準化と共通のツールを開発しようとしている。これは、システム全体をサブシステム(ハードウェアとソフトウェア)に分割しこれらのサブシステム(コンポーネントまたはモジュール)が他のサブシステムとインターフェースする姿を明らかにする“グループアプローチ”を採用した⁷。このコンセプトを第2図に示す。エネルギー、通信のためのデータベース、機械的連結、アナログ/デジタル信号、モジュール、環境との相互作用などの観点から成り立っている。CLAWARではロボットの応用分野にどのような基準が関係しているを調査してきた。この応用分野というのは①製造業 ②教育・エンターテインメント ③保守・点検・建設 ④危険環境 ⑤福祉と生命科学・医療 ⑥交通運搬 ⑦安全・監視 ⑧研究 ⑨家内応用 ⑩介助器具としてい

る。CLAWARプロジェクトいろいろな研究開発プロジェクトを体系化し、ひとつひとつの成果を他のプロジェクトで再利用できるようにすることを目指してスターとした。このようなアプローチ従来は不可能と考えられていた。しかしプロジェクトの活動過程で、これは間違いであり、モジュールの開発に注力し共通のアプローチを持つことにより実現可能であることが明確に示されたとしている。CLAWARに参加しているメンバが関係している50の研究開発プロジェクトを体系化に使用した。そのいくつかを写真9.2に示す(写真9.2)。これによってモジュラー化の手法が実際に適用できることを検証できたとしている。



Rower: Shipbuilding



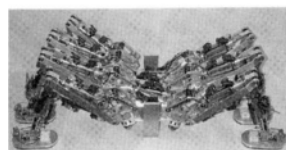
NESTOR: Hospitals



Helsinki's WorkPartner



F-IPA's RACCOON



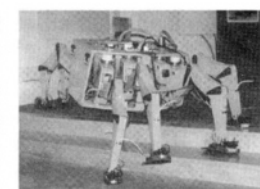
Portsmouth's Robug 4



ROBTANK: tanks



ROBOVOLC: Volcanoes



Portsmouth's Robug 3

写真9.2 EUのオープン化、モジュラー化計画検討例

統一化されたオープンな環境が成立しているといろいろなモジュラー化された機能が簡単に利用できるようになる。この要素モジュール自体もオープン化されていて開発者以外にも自由に流通されることが望まれている。ところでパソコンなどで実現されているソフトウェアのモジュラー化とロボットに必要なモジュラー化の本質的な違いがあることを認識しなければならない。コンピュ

⁴ 「21世紀におけるロボット社会想像のための技術戦略報告書」日本ロボット工業会、日本機械工業連合会、2001

⁵ 特集「RTミドルウェアプロジェクトとRTオープン化の開発事例」、ロボット、Vol.153、2003、日本ロボット工業会

⁶ Virk et al「The CLAWAR project on mobile robotics」Industrial Robot, Vol.31, Nr.2, 2004, pp130-138

⁷ Virk,G.S. "CLAWAR modularity ;the guiding principle", in Muscado,G. and Longo,D.(Eds), Proc.6th Int.Conf. on Climbing and Walking Robots (CLAWAR 2003) 2003, pp1025-31.

ータの場合は、処理を要求されると、処理を実行してその結果を返信するという受動的な処理でよかった。ロボットに必要な処理は他の機能モジュールと連携し、あるいは働きかける能動的な機能が要求される。この点新しい技術課題を克服していかなければならないのは確かである。しかしこれはサービスロボット事業の確立のためには避けて通れる問題ではない。

単にソフトウェアのモジュール化、オープン化にとどまらず、ハードウェア、使用環境の整備までを包含する具体的な行動を始めなければならない。CLAWARを範としてわが国も早急に オープン化、モジュラー化の実現に向けて行動を開始しなければならないと考える。

9.5 一つの提案

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。

日本のロボット工学、ロボット産業が進むべき道は

- ① 市場のニーズに応える大規模市場向き商品ロボットを実現すること
- ② 技術のモジュラー化、ソフトウェアのオープン化によって開発コストを削減し、多様なニーズに対応できるようにすること

である。

現在のロボット工学、ロボット産業の停滞を脱する一つの提案を行いたい。

提案。

「高齢者在宅介護ロボットを商品化する。その開発過程でコンポーネントのモジュラー化、ソフトウェアのオープン化を実施する。」

(1) 背景

- ① 厚生労働省は、従来の老人ホーム重視の高齢者対策では日本の福祉財政は破綻するとの認識に立ち、介護保険法を施行し、老人ホームによる介護から在宅介護へと福祉行政の180度の路線変更を行った。しかしこれによって当然発生する膨大な在宅介護労働量をどのようにして調達するかについての明確な対策は示されていない。家族への負担はますます大きくなっている。高齢者福祉問題の対策の一つとして、高齢者の在宅介護を省力化する「在宅介護ロボット」を実現する。

- ② 日本経済の安定的成長のためには労働力の確保が不可欠である。女性労働力の活用を妨げる大きな要因となっている在宅介護の問題を低減する。また、高齢者の機能劣化を防ぎ高齢労働力の活用に資する。

- ① 2025年に予想されている要介護老人530万人の10%が介護ロボットを利用したとすると（単価300万円を想定）。1.6兆円の市場規模がある。
- ② 現在一部で検討されている単機能の介護ロボットは老人ホーム、病院などに有用なものであって、日本社会が直面している在宅介護の問題の解決にはならない。
- ③ 在宅介護ロボットは多目的機械である。オープン化、モジュラー化の具体例となる。
- ④ 下記想定機能は既に産業用ロボット技術で確立されており新規の大研究開発の必要はない。

(2) 機能

（第1段階では、現在の技術で実現可能な機能を具備して介護の省力化、労働量の削減を実現する「多目的介護機械」を目指す。夢のホームロボットへは技術のモジュラー化によって発展する余地を残す）

- ① 音声による指示、音声による動作の援助指示。
- ② 物の取り出し、戻し（飲み物、食べ物、本、新聞、薬、ゲーム……）双腕が必要。視覚センサーで物を認識する。新しい仕事、ややこしい仕事は音声で動作を援助。
- ③ 車輪による移動。階段の上り下りは第2段階で。車椅子で高齢者が動作している環境を当面の対象とする。
- ④ 歩行補助。
- ⑤ 簡単な食事の調理。レトルト食品をバーコードで認識、電子レンジで加熱。
- ⑥ アミューズメント、保安、通信、照明などの電気器具のオンオフ。
- ⑦ 掃除。トイレ、台所、その他定型的な部屋の清掃。
- ⑧ 健康データのモニター、送信
- ⑨ 緊急時の対応。家事、侵入者などの異常時の避難、通報。
- ⑩ 対話。

入浴介助、散発、衣服着せ替えなどは対象外とする。人間介護者を完全に排除することは考えない。

(3) 適用する技術

- ① 各機能のモジュラー化 オープン化
 - ・環境認識モジュール
 - ・位置認識モジュール
 - ・移動モジュール
 - ・マニピュレーションモジュール
 - ・電源モジュール
 - ・コミュニケーションモジュール……
- ② リアルタイム分散オブジェクト技術の適用
- ③ デファクト標準を目指してオープン化の基本プラットフォームフォームの確立

(4) 実現のために

- ① 産官学の協力の必要性が叫ばれて久しいが一向に実現しない。国家的問題である高齢者在宅介護のテーマに結集する。
- ② 市場規模を無視した開発は何にもならない。膨大な潜在市場の高齢者介護事業に挑戦するのだという確信を持つ。
- ③ 興味本位の開発ではサービスロボットの発展はない。本プロジェクトでオープン化、モジュール化を達成するという認識を持つ。
- ④ オープン化の基本構想を確立する。
- ⑤ 各機能モジュールを分担する企業、研究機関のコンソーシアムを作る。
- ⑥ 高齢者在宅介護は国家的問題であるという認識に関係各官庁の合意を取り付ける。施策の実現（国家プロジェクト、介護保険の適用…）

(5) 付記

この在宅介護ロボットの一つ一つの動作は決して目新しいものではなく現在の技術水準で十分実現可能なものであり、しかもサービスロボット全体に共通に必要とされる基本機能なのである。すでに何らかの応用で実現されている機能でしかない。問題は、このような先人の努力が後々の人々が再利用できる形になっていないことである。サービスロボットを実現するためには今までのような二重の研究、今までに解決されてしまっていることの再発明といったアプローチを止め、一度どこかで実現された技術が再利用できるようにしなければならない。研究者も話題性のみある特定最終目的のロボットを実現することよりもっとこのような基本コンポーネントの研究開発に目をむけるようにならなければいけない。ソフトウェア、ハードウェアのオープン化、モジュラー化が不可欠である。

例えば、サービスロボットの移動に関して言えば、ソフトウェア群として

- ① 建物の地図を記憶する
- ② 自分の移動位置をリアルタイムに認識する
- ③ 現在位置から目的地まで走行を指令する
- ④ 障害物を認識して走行を修正する
- ⑤ 車輪、多足による移動

ハードウェアとして

- ① 車輪
- ② クローラ
- ⑤ 多足

などが要素モジュールとして標準化されていて、一般にオープンに開放されていることが臨まれる。このようなモジュール化、オープン化が実現されていると、在宅介護ロボットを実現すに当たって、既にモジュール化、オープン化されている技術の中から自分が必要とするモジュール（足モジュール、手モジュール、認識モジュール…、関連ソフトウェア）を実装し、どうしても新しく開発しなければならないソフトウェア、ハードウェアだけに専念すればよいことになるのである。

10 | あとがき

以上、サービスロボット技術の変化を解明していく過程で、社会・経済・文化の変化との相互関係、他分野の技術変化との相互関係、さらには受け入れた市場の個性との関係について 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ご寛恕願いたい。

昨年の産業用ロボットの系統化調査を行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。産業用ロボットのみならず、すでに多くのマイルストーン的事実が誕生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。何といっ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。米国では「ロボットの殿堂」(Robot Hall of Fame)があり、産業用ロボット、エンターテインメントロボットを問わず収集が始められている。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、サービスロボットの産業技術遺産を保存する重要性を前にも増して痛感したしだいである。

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。

付録 資料1 ロボット技術史年表

年代	ロボットの実モデル	ロボットの概念	文化・社会
1600年	1680 トルコ人の自動人形		1655 ホイヘンス振り子時計発明
1700年	1730 「機訓蒙鑑草」 1738 ヴォーカンソンの自動人形 1773 ジャケドロスの自動人形 1775 若井信親「盃運び人形」 1796 「機功図鑑」		1774 杉田玄白「解体新書」 1776 アメリカ独立宣言 1781 ワットの蒸気機関 1789-94 フランス革命
1800年		1818 シェリー「フランケンシュタイン」 1831 ゲーテ「ファウスト」 1870 ホフマン「コッペリア」 1883 コロディ「ピノキオ」 1886 「未来のイブ」	1811-12 ラッダイツ運動 1868 明治維新 1877 エディソン蓄音機発明 1879 エディソン電球発明
1910年			1914-18 第1次世界大戦 1915 アインシュタイン一般相対性理論
1920年	1927 「テレウオックス」 1928 「学天則」	1920 チャベック「R.U.R.」 1924 築地小劇場「R.U.R.」公演 1927 ラング「メトロポリス」 1931 映画「フランケンシュタイン」 1938 新話「人造人間」	1929 世界恐慌
1940年	1945 エルマー「エルジー」 1947 アルゴンヌ研「リモートマニピュレータ」 1948 マスターズスレーブマニピュレータ		1939-45 第2次世界大戦 1945 フォン・ノイマンの提案 1946 ENIAC
1950年	1954 デボル 産業用ロボットの特許 1959 東大人工の指	1950 アシモフ「私はロボット」 1951 手塚治虫「鉄腕アトム」	1957 「スプートニク」打ち上げ
1960年	1961 MITマニピュレータ「MH-1」 1962 産業用ロボット登場 1962 ユニメーション パーサトラン 1966 SRI「シェイキー」 1968 簡易型ロボット 1968 安川「モートアーム」「モートハンド」 「モートフィンガー」 1969 早大「人工の足」	1962 「鉄腕アトム」TV放映始まる 1967 エンゲルバーガ博士の講演	1964 東海道新幹線開通 東京オリンピック 1969 「アポロ11号」月面着陸
1970年	1970 川重「ユニメート」国産化 1970 電総研「ETL」ロボット 1970 安川 視覚ロボット「サイクロプス」 1970 日立「ハンドアイロボット」 1972 自動車工場スロット溶接へ大量導入 1973 早大「WABOT」 1973 神鋼 塗装ロボット 1974 ASEA 電動垂直多関節ロボット 1977 安川「モートマンL-10」	1977 「スターウォーズ」	1971 マイクロプロセッサ4004 1972 日本ロボット産業用ロボット工業会設立
1980年	1980 不二越 大型電動ロボット 1981 SCARAロボット商品化 1985 ピアノを弾くWABIAN 早大ヒューマノイド研究所設立		1980 自動車生産台数世界一に 日本の「ロボット元年」 1982 日本ロボット学会設立 1985 つくば科学万博 このころから労働力不足不安感高まる 1987 国際ロボット連盟設立 1989 ベルリンの壁崩壊
1990年	1990 小型ACサーボモータの発明 マイクロマシンプロジェクト始まる 1996 ホンダ 2足歩行ロボットP2 人間共存型ロボットプロジェクト始まる 1999 ソニー「AIBO」 ROBOCUP始まる ROBODEX始まる	人間型ロボットのブーム始まる ペットロボットの普及始まる	1992 バブル崩壊 1997 クローン羊 コンピュータがチェスチャンピオンを破る
2000年～			2001 9.11事件 2005 愛知万博

製作年	名称	資料形態	所在地	製作者	分類	コメント
1700	からくり人形	実物	国立科学博物館		エンターテインメント	からくり人形のさががけ
1700	弓引き童子	実物	豊田産業技術館	田中久重	エンターテインメント	からくり人形のさががけ
	反がえり人形	実物	豊田産業技術館		エンターテインメント	からくり人形のさががけ
1775	杯運び人形	実物	兵庫県立歴史博物館		エンターテインメント	からくり人形のさががけ
1928	学天即			西村真琴	イベント	表情を表す自動人形
1970	人工知能ロボットETL-Mk1	実物	産業技術総合研究所	産業技術総合研究所	研究	垂直多関節型のさががけ(油圧)
1972	蒸気発生器伝熱管検査用			三菱重工	原子力	原子力へのロボット適用大1号
1973	WABOT 1			早稲田大学	研究	2足歩行ロボットの先駆者
1973	カーペンタロボット	実物	産業技術総合研究所	産業技術総合研究所	研究	双腕協調制御の第1号
1973	メルアーム	実物	産業技術総合研究所	産業技術総合研究所	研究	力覚を持った双腕ロボットの遠隔制御
1980	マイクログマウス			(コンテスト参加者)	教育	ロボット競技のさががけ
1981	MARGAS			KDD	海洋	海中探査のさががけ
1982	鉄骨耐火材被覆ロボット			清水建設/神戸製鋼	建設	建設ロボットの1号
1984	自動配筋ロボット			大林組	建設	建設ロボットのさががけ
1984	RTV100			三井造船	エネルギー	水中ロボットの商品化第1号
1985	セグメント自動組み立て			石川島	建設	建設ロボットのさががけ
1985	貝藻類除去ロボット			東京電力	電力	電力分野へのさががけ
1985	WABOT 2			早稲田大学	研究	楽譜を読んでピアノを演奏
1985	CRD交換ロボット			東芝	原子力	原子力用遠隔縦横ロボットのさががけ
1986	農業ロボット			生研機構	農業	農業分野へのさががけ
1986	AS-100			東芝	公共	清掃ロボットのさががけ
1987	天井ボード貼りロボット			清水建設/神戸製鋼	建設	建設作業ロボットのさががけ
1987	ロボQ			フジタ	土木	ブルドーザーの無人運転を実用化
1988	配電線工事ロボット	実物	(九州電力で使用中)	安川電機	電力	配電線無停電工事の実用化
1988	ガスタンク探傷システム			三菱重工	エネルギー	エネルギー分野へのさががけ
1988	REHAMATE			川崎重工	福祉	リハビリへの適用1号
1988	TEMS	実物		安川電機	福祉	療法士の動作を再現
1988	ロボゴン			(コンテスト参加学校)	教育	教育用コンテストのさががけ
1991	HelpMate	実物		安川電機	福祉	自律走行ロボットの商品化
1992	Aqu Explorer 100			KDD	海洋	自律型海中探査ロボットのさががけ
1993	かいこう			三井造船	海洋	世界最深度11000m潜航
1994	トリダス			前川製作所	食品	食品加工のさががけ
1994	多指ハンド	実物	安川電機	安川電機	研究	実用化多指ハンド商品
1995	歩行訓練機			日立	福祉	リハビリロボット商品化のさががけ
1995	ロボカップ			(コンテスト参加者)	エンターテインメント	分散化知能ロボットによる競技を創造

製作年	名称	資料形態	所在地	製作者	分類	コメント
1996	P-1			ホンダ	研究	ヒューマノイドロボットASIMOのさががけ
1996	WABIAN			早稲田大学	研究	進化したヒューマノイドロボット
1997	P-3			ホンダ	研究	ヒューマノイドロボットASIMOのさががけ
1997	ヤマハRMX			ヤマハ	農業	無人飛行機のはしり
1997	搾乳ロボット			クボタ	酪農	酪農への応用のさががけ
1997	衛星ETS-Ⅶ用マニピュレータ			東芝	宇宙	宇宙空間用マニピュレータのさががけ
1999	人間の真似をするロボット	実物	ATR	ATR	研究	人間の知能へのアプローチ
1999	ロボハイター	実物		富士重工	公共	実用清掃ロボットのさががけ
2000	AIBO	実物		ソニー	エンターテインメント	エンターテインメント事業を拓く
2000	ヒューマノイド研究所	実物	早稲田大学	早稲田大学	研究	世界最初のヒューマノイド研究所
2000	ASIMO			ホンダ	研究・イベント	ヒューマノイドブームを引き起こす
2000	SDR			ソニー	エンターテインメント	ヒューマノイドロボットの商品化
2000	高速ビジョンチップ	実物		東京大学	研究	ビジョンの高速化による実用の確立
2001	原子力防災システム			製造科学技術センタほか	原子力	原子力災害復旧のさががけ
2002	MTLP-1	実物		日立	医療	日本の医療ロボット商品化第1号
2002	番竜			テムザック	家庭	留守番ロボットの1号
2002	HRP-2	実物	産業技術総合研究所	産業技術総合研究所その他	研究	国家プロジェクトの成果
2002	ガードロボ			総合警備保障	公共	警備ロボットのさががけ
2003	地雷除去ロボット			千葉大学/富士重工	防災	防災ロボットのさががけ
2004	HOSPI			松下電工	癒し	案内警備ロボットの商品化
2004	メンタルコミットロボット	実物	産業技術総合研究所	産業技術総合研究所	研究	癒しロボット世界1とギネスブックに登録
2005	ロボットスーツ	実物	サイバーダイン	サイバーダイン	福祉	個人向け助力ロボット商品第1号
2005	核燃料再処理施設	実物	日本原燃		原子力	保守も含めた完全無人化施設の実現

国立科学博物館 技術の系統化調査報告 第5集

平成17(2005)年3月31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