

知能ロボット技術

高瀬國克* 電子技術総合研究所

要旨

知能ロボット技術は今後人々の生活を助けるという観点から、また新しい産業を興すという観点からその発展が期待されている。知能ロボット研究の原点に電子技術総合研究所の ETL-Robot MkI 開発プロジェクトがある。その成果は公開実験の形で公表されマスコミをはじめ世間の大きな注目を浴びた。この成功により研究所におけるロボット研究は認知されその後の発展をもたらした。成果は民間企業にも波及し、マイコンの普及も手伝ってメカトロ全盛のきっかけを作った。

プロジェクト成功のかげには地の利（電気試験所というコンピュータのメッカに所属）、時の運（当時はロボット産業の勃興前夜）、人の輪（ロボット好き研究者が結集）があった。それに加えこれらの状況を判断しプロジェクトを立ち上げ、とりまとめたリーダー達の存在が大きい。

1. はじめに

知能ロボットは我が国の将来にとって極めて重要な技術とみなされている。新産業構築の観点から、また高福祉社会における生活支援の観点からその発展が期待されている。電子技術総合研究所（以下・電総研）（電気試験所時代も含む）および産業技術総合研究所（以下・産総研）は、知能ロボット技術に関し、その草創期から一貫して我が国のみならず世界の先導役であり続けている。1970年前後にこの流れを作り、その後の発展を促してきた挑戦的なプロジェクトがあった。本稿ではそのプロジェクトーETL-Robot MkI 研究開発プロジェクトーを中心に概説する。

2. 知能ロボット技術の発展の推移

A) 海外における知能ロボットの研究

知能ロボットの実現にはコンピュータの利用が欠かせない。そのため知能ロボットの研究はコンピュータが小型化・高性能化し、研究グループ単位で使えるようになった1960年代に始まった。MIT(Masachusetts Institute of Technology)では、Minskyらがロボットの手、コンピュータビジョンなどのセンサ、人工知能などを統合した知能ロボットプロジェクトを実施した³⁾。Ernstは先駆的にコンピュータで操作される機械ハンドを開発し¹⁾、RobertsはTV画像情報をコンピュータ処理し3次元物体認識を行った²⁾。SRI(Stanford Research Institute)では環境を認識し「四角い箱を探し出しそれを押して隣の部屋に運ぶ」といった作業のできる移動ロボットを開発した⁴⁾。これは物体の認識や移動動作の制御にとどまらず、作業の問題解析と計画を行う人工知能を含むものであった。これらの動きに触発され世界中でロボットの研究開発が始まった。

B) 我が国のロボット研究ことはじめ

我が国におけるロボット研究は、工場でのマテリアルズ・ハンドリングや義手・義足の研究からスタートした。前者では東京大生研の森研究室で人工の指の研究が先駆的に行われた⁹⁾。後者では早稲田大加藤研究室が筋電信号で操作される義手の研究を行った¹⁰⁾。これらの研究が行われた1960年代前半、コンピュータはセンターにおける計算のバッチ処理が主流でオンライン処理に利用できる状況になかった。そのため機器の制御・操作は専用回路やシーケンス・コントローラでなされた。因みに同時期に米国で開発・販売された工業用ロボット（現在の産業用ロボット）もコンピュータは使用していなかった。東京大藤井研究室がマニピュレータ（人工の手）のコンピュータ制御・操作の研究を初めに行った¹¹⁾。上のA), B) 項の詳細は文献¹²⁾を参照されたい。

C) 電気試験所(~1970)―電総研(1970)の知能ロボット研究

1960年代後半、電気試験所制御部ではロボットを部の主要テーマにすることを決定、その準備を開始した。当時のメンバーを次に示す。

上滝至孝（リーダ、部長、後に住友重機械システム研究所長）

佐藤孝平（自動制御研究室長、後に電総研所長）

長田正（専門人工知能、後に九州大学教授）

土屋誠治（専門モーター制御、後に電総研システム制御研究室長）

岡本憲治（専門ロボット設計機構学、後に住友重機械システム研究所）

白川洋充（専門制御理論、後に立命館大教授）

柿倉正義（専門センサ工学、後に東京電機大教授）

池田尚志（専門スケジューリング、後に岐阜大教授）

岡田徳治（専門ロボット設計、後に新潟大教授）

制御部のメンバーは主としてマニピュレータ（ロボットの腕・手）、触覚センサ、動作計画の専門家であり、コンピュータビジョンの研究者は電子計算機部に所属していた。そのメンバーは次の通り。

辻三郎（システム研究室長、後に大阪大教授）

白井良明（専門三次元情報処理、後に大阪大教授）

谷内田正彦（専門線画抽出、後に大阪大教授）

諏訪基（専門画像処理、後に電総研次長）

ロボット研究の旗揚げプロジェクトとして、以上2つのグループで研究しているマニピュレータ（ハンド）とコンピュータ・ビジョン（アイ）を統合するハンド・アイ・システムの開発プロジェクトを立ち上げ、1970年度に完成、披露することを研究所に対しコミットした。

ロボット研究の加速と上のプロジェクトをスムーズに成功させるため、1970年4月に次の新人を採用している。

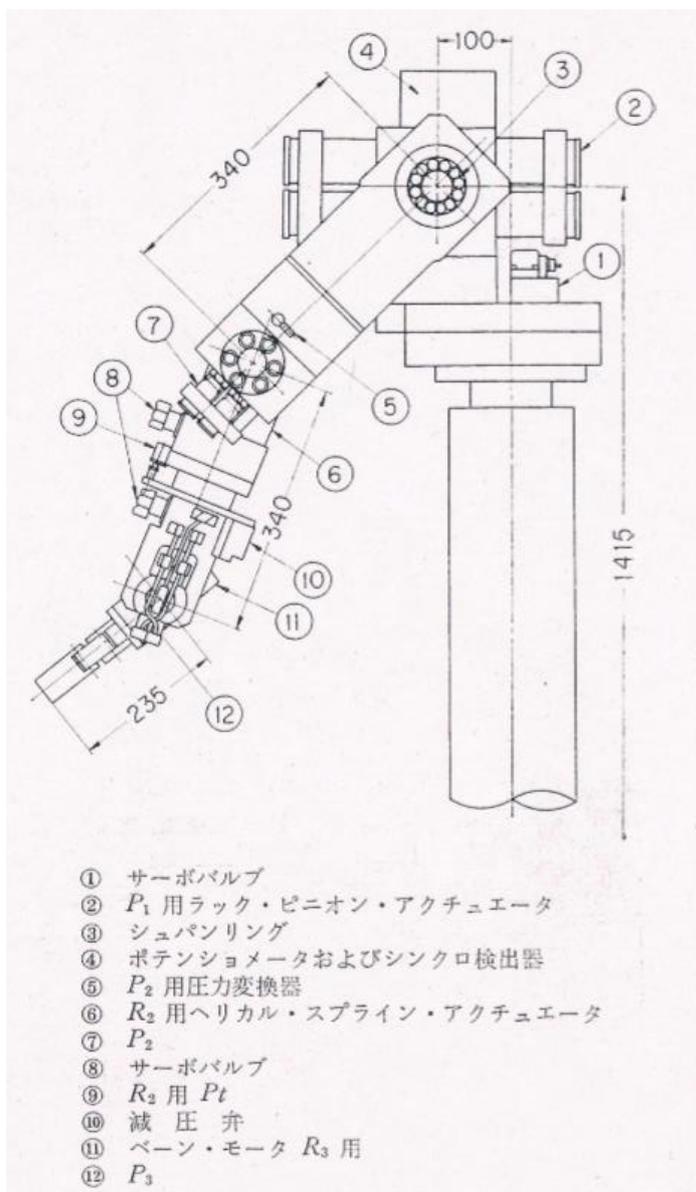
井上博允（専門ロボットシステム、後に東京大教授）

石井優（専門ロボット制御、後に福岡工業大教授）

大島正毅（専門ロボット視覚、後に海洋大教授）

高瀬國克（筆者）

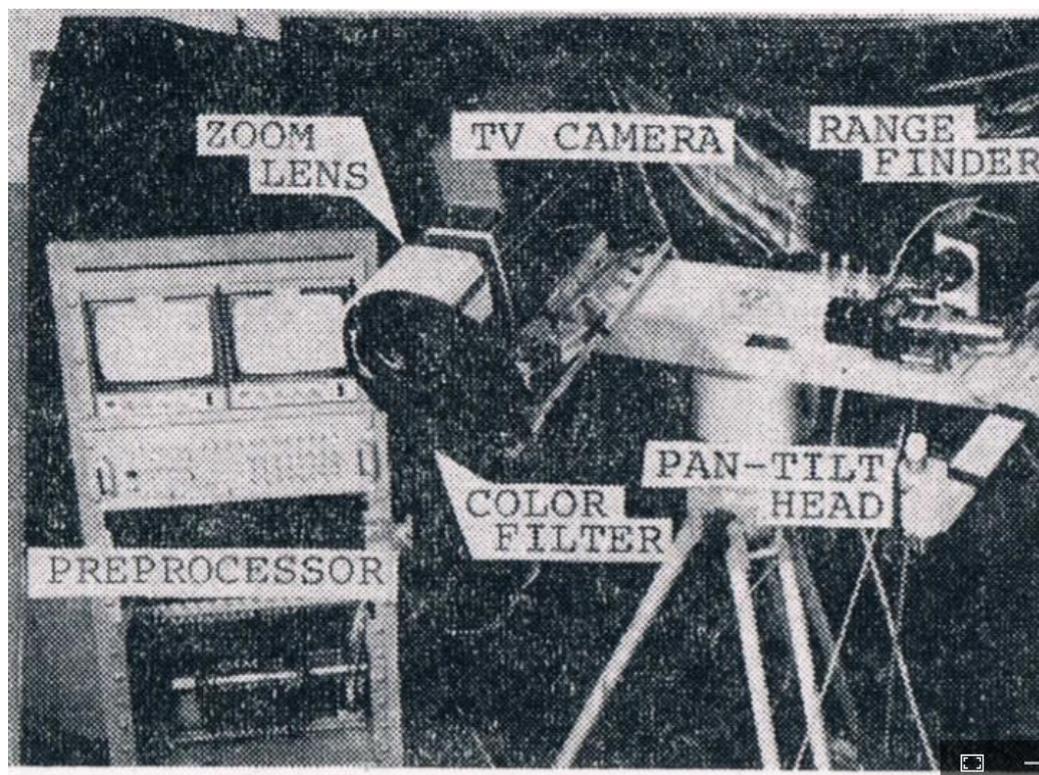
1970年10月にハンド・アイ・システムが完成した。マニピュレータは当時最新技術であった油圧駆動による、本邦初の多関節型（伸縮要素を含まない、人間の腕のように回転関節のみからなる機構）であった。作業環境においてロボット動作は直交座標で指示されるが、その時の手先の位置姿勢に対応する関節角度を算出する変換式(Inverse Kinematics)を具備するものであった。図1にマニピュレータの設計図を示す。



支柱上に肩部を配し、肘部、手首の順に回転型関節とリンクが直列に連なる構成になっている。手首部⑫の先にグリップが装着されており物体を把持することができる。各関節は油圧サーボで制御され、配管は外部に出さず躯体内を通した画期的デザインであった。

図1 油圧式多関節マニピュレータ（参考文献5）より引用）

コンピュータ・ビジョンは対象物体の形や距離を認識でき、色も扱うことができるものであった。具体的には、直方体、プリズム体などの形を認識し、同時にそれらの寸法や置かれた位置姿勢を計測することができた。図2に当時インダストリアル・アイ1号機と称された視覚情報入力装置を示す。



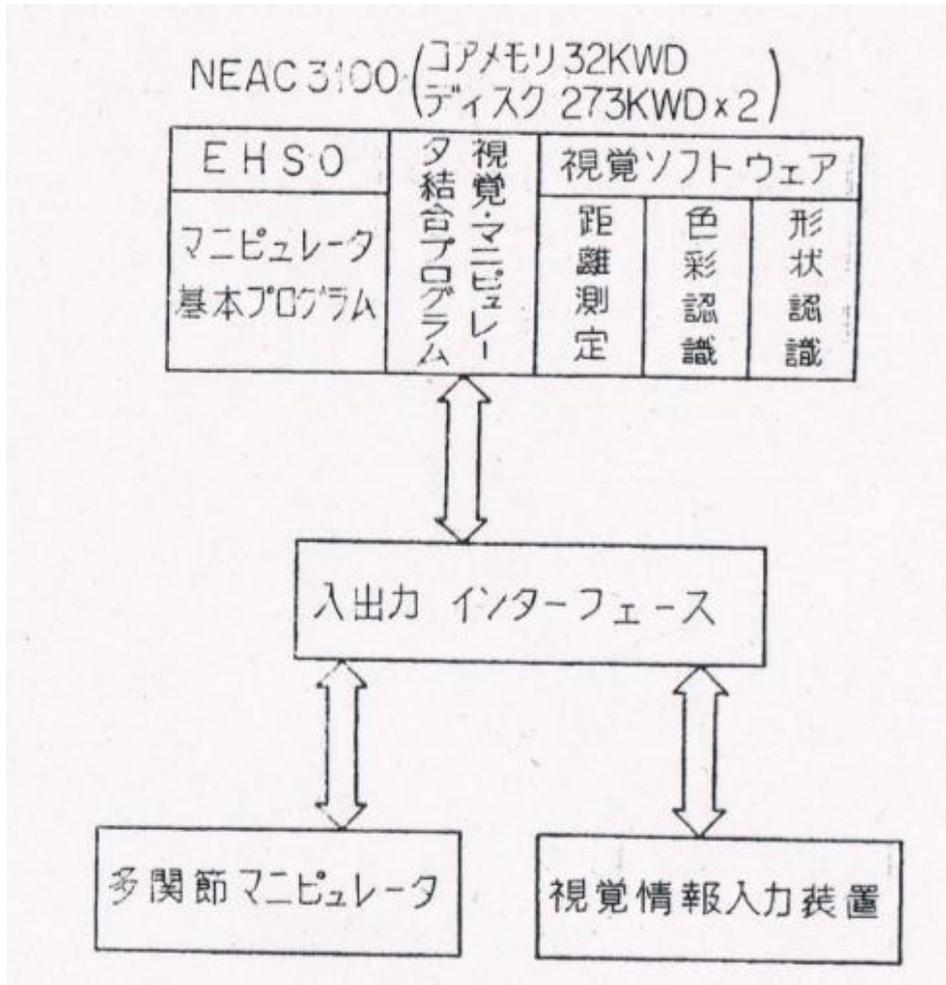
ビジコン撮像管を用いたTVカメラのビデオ信号をプリプロセッサで前処理してコンピュータに入力している。カラーフィルタやレンジファインダが色情報や距離情報を取得するために付加されている。

図2 視覚情報入力装置 (参考文献5) より引用)

ハンド・アイ・システムによるパフォーマンスは次のようなものであった。

- ・机の上に置かれた物体を認識し、それらを掴んで、形状に応じて割り当てられた場所に置く。(仕分け作業)
- ・直方体を認識し把持し、それを別の場所においてある、ぴったり収まる箱(枞)の中に入れる。この際精度が要求されるので、動作の途中に直方体と箱の位置関係を何度も確認し動作を修正しながら目標に至る。(挿入作業)

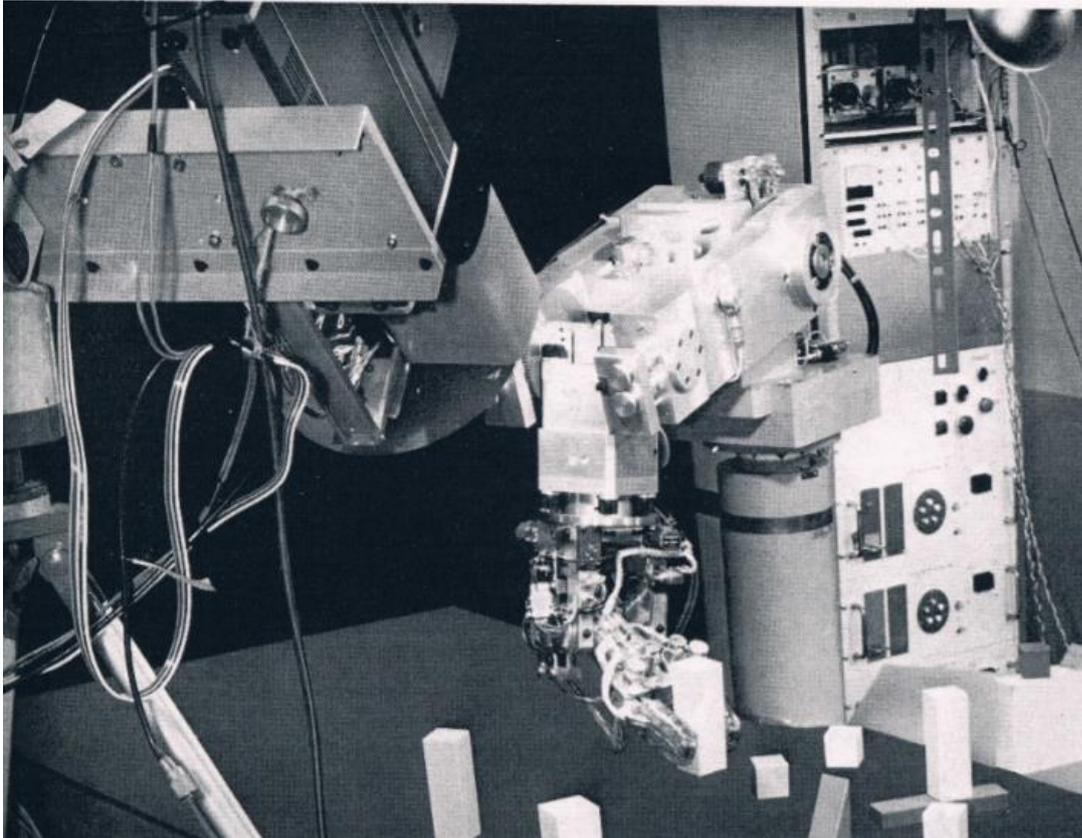
2番目のパフォーマンスに含まれるビジュアル・フィードバックと呼ばれる技術は世界に先駆けて実現された。図3に我が国初となるハンド・アイ・システム(ETL-ROBOT MkI)のシステム構成を示す。



ハードウェアはコンピュータ、入出力インターフェース、多関節マニピュレータ、および、視覚情報入力装置から構成されている。ソフトウェアはマニピュレータの制御・管理プログラム、視覚ソフトウェア、および、それらの結合プログラムから構成されている。この中でコンピュータ以外はすべて手作りされた創意性の高いものであった。コンピュータの性能は現状より桁違いに低いものであり、実時間制御のためインターフェースの設計には多くの工夫を要した。

図3 ハンド・アイ・システムの構成 (参考文献5) より引用)

図4にハンドアイシステムの写真を示す。



写真右手後方にあるのが多関節マニピュレータとそのインタフェース、左手前に見えるのが視覚情報入力装置である。多数の積み木が置かれているのが作業卓で、眼でその状況を認識し手で種々の作業を行うことができる。

図4 ハンド・アイ・システムによる作業風景（参考文献5）より引用）

これらの研究成果は、1970年10月14日、ETL Robot Mk-Iとして公開実験の形で発表され、マスコミはじめ世間の注目を浴びた。奇しくも翌日には、日立製作所中央研究所が、図面の読み取り、積み木パーツの認識、積み上げ手順の生成、積み木の積み上げを行うことのできる知能ロボットを発表した。これらが我が国における知能ロボット研究開発の嚆矢とされている。

以上の詳細やエピソードなどについては文献^{5,6)}を参照されたい。

D) ETL Robot Mk-I以降の電総研と産総研における知能ロボット研究

本稿の主目的はETL Robot Mk-I開発の状況や意義を紹介することにあるが、その成功により作られた知能ロボット研究の流れがその後どうなったかについて触れておきたい。

産総研の研究分野の一つとして知能ロボットは定着し、システム制御研究室、情報制御研究室、視覚システム研究室が置かれ、マニピュレーション技術、移動技術、遠隔操作技術、センサ技術、ロボット知能などの基礎的・基盤的研究が継続的に行われるようになった。結

果、ロボット学（ロボティクス）の創造を促し、日本ロボット学会などの創立に大きく貢献した。

一方、知能ロボットの産業技術への波及は、産業用ロボットの知的制御の形で進んだ。すなわち、従来の単純固定コントローラをコンピュータ化し、多種多様なセンサの活用、プログラムによる円滑な動作制御を可能にし、ロボットによる自動組立、各種溶接、塗装などが実現された。この傾向はマイコンの出現でさらに加速され、ロボットの形にとらわれない産業機械に対しても波及し、いわゆるメカトロ技術が発展することになる。1980年代の我が国電子機械製品の圧倒的競争力はこのメカトロ技術に負うところが大きい。

1970年以降、産業界の技術も向上し、産業用ロボットの応用技術やメカトロ技術の研究開発は産業界が主導的に行うようになった。電総研のロボット研究グループでは、先進的基礎研究のほかに、産業界単独では手掛けることが困難な次世代のシステム技術の研究開発に積極的に関与するようになった。通商産業省（現経済産業省）、工業技術院、各研究機関、企業研究所が協力して企画推進する大型工業技術研究開発制度（通称・大型プロジェクト制度）の下で次の研究開発プロジェクトに参画した。

- ・大型プロジェクト「極限作業ロボットの研究開発」（1983~1990）

電総研、機械技術研究所（以下・機技研）及び極限作業ロボット技術研究組合に所属する企業が協力して推進した。原子力・海洋・防災の現場におけるロボットの活用を目指して、その機構、制御、システム構築の研究開発がなされた。電総研の研究テーマは「高技能マニピュレーション技術」「視覚情報技術」「自律制御技術」「知的遠隔制御技術」「システム化技術」であり、プロジェクト終結にあたってそれぞれが開発システムの公開実験を行い注目された。

一方、技術研究組合は原子力・海洋・防災に対応するロボットの開発を行い、プロトタイプのパブリック実験がなされ広く関心を集めた。このプロジェクトにより企業における先進ロボット技術の飛躍的向上と人材の育成がなされたことも大きな成果であった。

以上の詳細は文献^{13),14)}を参照されたい。

この後も、マイクロマシン技術研究開発プロジェクト(1991~2000)、IMS(Intelligent Manufacturing System)(1991~2004)プログラム等に参画し、産業界のニーズを踏まえた研究開発を推進した。

2001年1月6日、工業技術院傘下の研究所が統合再編され国立研究開発法人産業技術総合研究所（以下・産総研）が発足した。産総研と機技研のロボット研究グループが合流し、産総研知能システム部門となった。産総研となった後の主な研究を次に掲げる。

- ・人間協調・共存型ロボットシステム研究開発
- ・ヒューマノイドに関する研究

以上の研究は2足双腕を有する人間型ロボットの研究で、本田技研工業と並びこの分野をリードしている。成果をオープン化することで、他グループ、特に海外への影響力は最も高い。

- ・次世代ロボット実用化プロジェクト
- ・次世代ロボット知能化技術開発プロジェクト

以上の研究は次の世代の知能ロボットの実用化を進めるために、機能要素をモジュール化し拡張性や移植性の高いものを目指すことを目指している。ソフトウェアモジュールを複数組み合わせることでロボットシステムを構築するためのソフトウェアプラットフォームであるRTミドルウェア(RTM)を提唱し、実際に使えるOpenRTM-aistを実装し普及を図っている。

- ・生活支援ロボット実用化プロジェクト

工場内にとどまっているロボットの本格導入を、人間の生活環境まで広げることに挑戦するプロジェクトである。最大ネックの一つである安全性に関して、産総研が基本構成を提案した国際安全規格ISO13482（パーソナルケアロボットの安全要求事項）が2014年2月に制定された。これにより、生活支援ロボットの開発を円滑に進める基盤ができたと言える。

- ・ロボット介護機器・導入事業

早期の改善が求められている介護機器のロボット化、自動化を促進する事業である。産総研はこれまでの経験を活かし、機器製造業者と機器を利用する施設をコーディネートし安全安心な介護機器を実現するためのスキーム作りを行っている。企画設計段階での評価、試作品に対する機能や安全性の評価を行うことにより事業の速やかな展開を支援している。

3. 知能ロボット実現のキーとなった主要なポイント

A) コンピュータの有効利用

知能ロボットの実現にコンピュータの専用的利用が不可欠である。早期に予算を手当てしオンライン制御のためのコンピュータ環境を整備したことがプロジェクト成功につながった。

B) 多様な人材の集積

知能ロボット実現には、機械、電気電子、制御、コンピュータなど多くの領域の専門知識が必要となる。それらをカバーする所内の人材と新人を集めたことが大きい。

C) 世界と競争するワクワク感

知能ロボット研究の先進国、特に米国でも、まだ十分にやっていないテーマに挑戦し出し抜くというワクワク感が開発を加速させた。

D) 社会に期待されることの高揚感

知能ロボットは技術のメインストリームとして大きく発展し、社会からも期待されるであろうという予感が研究者を本気にさせ100%力を出させた。

4. 考察

長期間第一線にあって、世界最高レベルの知能ロボットの研究を継続して行っている機関は少ない。この体制はぜひとも大事に維持したいものである。

1980年代ころまで国立研究所である産総研の主な役割は、新技術の芽を育て産業界に引き渡すことにあるとされた。知能ロボットにおいても、1970年代に行われた基礎的研究の成果が学会やメディアを通したり、直接技術指導することで産業界に流れ製品化までにつながった。以後、この技術開発モデルは十分に機能しなくなり、基礎的研究成果が製品化に結び付くことが少なくなった。そこで産総研では、先端的、基礎的な研究を進めるだけではなく、大学等の基礎研究の成果を企業による製品開発に結びつけるために必要な、集積化・システム化技術、大量生産技術、安全性評価技術等の研究（橋渡し研究）を重点的に実施することになった。知能ロボット分野でも標準ソフトウェアプラットフォーム作りや国際安全規格の制定などに尽力し高い評価を得ている。これら「橋渡し研究」の重要性は論を俟たないが、ロボット研究の醍醐味は新しいロボットを開発しユーザに喜んで使ってもらうことである。そのため今後もユーザイメージを強く意識したロボット創りに励んでほしい。

5. まとめ

知能ロボット研究の原点となり、その後の発展の礎となった ETL Robot Mk-I 開発プロジェクトについて紹介し、その後の研究の流れについて述べた。プロジェクトの成功のかけには地の利（電気試験所というコンピュータのメッカに所属）、時の運（当時はロボット産業の勃興前夜）、人の輪（ロボット好き研究者が結集）があった。なによりもこれらの状況を判断しプロジェクトを立ち上げ、とりまとめたリーダ達の貢献が大きかったと思われる。

6. 謝辞

産総研知能システム部門関係各位に感謝します。

本稿執筆の機会を与えていただいた編集グループ各位に謝意を表します。

7. 参考文献

- 1)Ernst,H.A: MH-1 A Computer-Operated Mechanical Hand, AFIPS, 21, pp.39-71(1962)
- 2)Roberts, L.G: Machine Perception of Three-Dimensional Solids, Optical and Electro-Optical Information Processing(Tippel J.T. et al. ed.), MIT Press, pp.159-197, (1965)
- 3)Minsky,M.L.:An Autonomous Manipulator System, Proj. Report III, Project MAC (July 1965~July 1966) MIT.
- 4)Rosen, C.A. & Nilsson, N.J.:An Intelligent Automaton, IEEE Convention record, 15, Pt.9, pp.50-55(1967)
- 5)電総研ロボット Mk-1 特集号、電総研彙報、Vol.35 No.3 (1971)
- 6)長田正：ロボットは人間になれるか、PHP新書(2005)
- 7)極限作業ロボット特集号、電総研彙報、Vol.55 No.4(1991)
- 8)山本欣一、柿倉正義編著：極限作業ロボット、工業調査会(1992)
- 9)山下忠：機械で操作される人口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、3-6、pp. 429-439 (1964)

10) Kato, I. et. al.:Electro-Pneumatically Controlled Hand Prosthesis Using Pattern Recognition of Myo-Electric Signal, Digest of 7th ICMBE, 26-6 (1967)

11)井上博允：人工の手の計算機制御、日本機械学会誌、73-618,pp. 946-954 (1970)

12)計測と制御（ロボット特集）、7-12 (1968)

13)特集：極限作業ロボット、電総研彙報、Vol.55 No.4(1991)

14)山本欣一、柿倉正義編著：極限作業ロボット、工業調査会(1992)

15) ビデオファイル ETL-ROBOT MkI.mpg

8. 著者略歴

1970年 電気試験所入所、6月電子技術総合研究所に改称、
制御部システム制御研究室配属
電総研ロボット Mk-1 のハンド研究に従事

1971年～トルク制御ロボットマニピュレータの研究に従事

1983年～1990年極限作業ロボットプロジェクトの立ち上げと研究開発に従事

1991年～同研究所知能システム部長、マイクロマシン技術等研究開発管理

1994年 電気通信大学教授に就任

*現在、電気通信大学名誉教授

受理日：2016年4月8日