

解説

知的ロボットの未来を探る*

浅間 一**

1. はじめに

ロボット技術は、日本が世界に誇る技術の一つである。日本は、いまだにロボットの生産台数、保有台数ともに世界一である。日本ではロボット研究者が多く、学会活動も活発である。最近では、ヒューマノイド・ロボットやペットロボットなども登場し、ロボット関連のイベントも多くなり、マスコミでも取り上げられる機会が増えた。しかし、知的ロボット研究開発が活発である一方で、ロボット研究とロボット産業の乖離という問題も指摘されている。本解説では、これまでの知的ロボットに関する動向を見ながら、私なりの知的ロボットの将来展望を述べたい。

2. 知的ロボット技術開発の経緯

カレル・チャペックの戯曲にロボットが登場してからすでに80年経つが、これまでロボット開発は常にイメージ先行型であった。優れたアニメやCGやSFを駆使したSFが、未来を描く中でロボットのイメージを提供してきた。日本でロボット研究が盛んなのも、日本のアニメにおいてロボットが理想的な機械（正義の味方）として描かれたことが少なからずきっかけとなっている。事実、ロボット研究者の多くはそれを目標に努力してきたし、ロボット技術に期待を寄せている人も多い。

ロボット研究は、1960年代に入って人工知能の一課題として活発化したが、その頃は物理的な機械システムであるロボットを動作させる技術が未成熟で、満足な動作を実現することができず、その後、機構、制御、センシング、プランニングといった要素技術ごとに分化して議論が行われるようになった。最近では、ITの発展（プロセッサをはじめとする半導体素子の高速化、大容量化、低価格化、ネットワークの普及など）、アクチュエータをはじめとする機械

要素の改善、エネルギー源としてのバッテリーの性能向上、MEMSを応用した小型センサや高速画像処理技術の開発、機構学や制御理論の進歩とそれに伴う制御技術の発展、プランニングをはじめとするロボットの知能に関するアルゴリズムの進歩など、すべての技術要素の発達によってようやく高度な知的システムとしてロボットを構築し、動作させることが可能になってきた。ヒューマノイド・ロボットやサッカー・ロボットはまさにその最たるものだ。

一方実用面では、産業用ロボット元年と呼ばれた1980年以来、産業用ロボットはもちろんのこと、建設、原子力、宇宙などの分野での作業用ロボットが開発され、最近では外科手術ロボットが製品化され、いくつかの病院に導入されるようになった。ペットロボットが大流行し、おもちゃ業界にも一つのセンセーションが巻き起こった。さらに、エンターテイメント・ロボット、アミューズメント・ロボット、メンタルケア・ロボット（ロボットセラピー）、パーソナル・ロボット、警備ロボットなどの実用ロボットも次々に開発されつつある。ロボット産業自体ここ10年、5000億円で頭打ちになっており、こういった実用ロボットもどの程度の市場規模を期待できるかは極めて予測しにくい。2015年に日本の人口の1/4が65歳以上となることを考えれば、高齢化社会を前提とした医療・福祉分野におけるロボットの市場は確実に存在するし、サービスロボットや、教育用ロボット・研究用ツールとしてのロボットなど含め、様々なビジネスチャンスがあると私は考えている。

3. 知的ロボット開発におけるパラダイム・シフト

産業用ロボットは、製造業を中心に、効率や生産性向上のための多自由度機械として、省力化・コストダウンを主目的として導入されてきた。ティーチング・プレイバックによる繰り返し動作で済むような作業に産業用ロボットが導入しつくされると、今度はロボットの知能化や制御の高度化によって用途を広げようという気運が高まった。しかし、その技術開発・実用化は予想以上に困難であることが次第に明らかになり、高度な技術開発に要する時間とコ

*平成14年4月24日 原稿受付

**理化学研究所 工学基盤研究部 技術開発促進室
(所在地 〒351-0198 埼玉県和光市広沢2-1)

スト、使い勝手などの問題から、ハイテク過ぎるロボット技術開発戦略は次第に見直されるようになった。

知的ロボットの産業用としてのニーズが低下する一方で、ロボットでないと不可能な作業に対するニーズは逆にますます高くなっている。例えば、手術用ロボットは、手術の際の医師の手の震えを抑えたり、人間の目と手では困難な細かい手術を正確に行ったりするのに非常に有効である。また、原子力をはじめとして、人間が行うには困難な環境での作業に関しても、ロボットに対するニーズは依然として高い。特に最近では、レスキューや地雷除去といった作業を行うロボット技術開発の動きが活発化している。こういった技術ニーズの変化は、まさにロボティクスにおけるパラダイムシフトに依るものだと考えられる。ロボットは、人間の生活をより豊かに、便利にするための生産技術の一部としての役割を担ってきた。しかし現在では、人間が人工環境の中で、人工環境が生み出す環境問題、事故、災害、犯罪、病気などの様々な社会問題（いわゆる現代の邪悪²⁾）に対処するための技術として知的ロボットが求められるようになり、人間の生活を守るための技術へと変化してきたと考えることができる。

では、このような社会支援を行うロボットにはいかなる機能が必要だろうか。また、それを実現するためにはどのような技術開発を行うべきだろうか。そして、その開発を進めるための知能ロボットの基礎的・基盤的研究としてどのような議論が必要だろうか。

4. サイエンスとしての知能ロボット研究

知能ロボット研究には大きく二つの流れがあると考えられる。その一つは、サイエンティフィックな知能ロボット研究であり、その研究主題は人間の（あるいは広く生物の）知的機能を明らかにすることである。脳研究の一部として行われているロボット関連研究や、ヒューマノイド研究にはその傾向が強い。現在のロボット技術では、予めわかっている限定された環境で、決まった動作しか行わせることができない。人間は初めて出会う環境でも問題なく動けるが、この人間が何気なく行っている動作をロボットにさせることは非常に難しい。

この適応的行動機能を実現する一つのキーワードが身体性である。身体を持たない、脳だけの生物は存在しない。すなわち、身体が存在が脳の形成に本質的であることは間違いない。生物は、身体感覚機構を通して環境を知覚、認識し、身体の運動機構を使って環境への働きかけを行うので、身体は脳と

環境とのインタフェースと考えることができる。すなわち、収集できる情報、行動の指令など、すべて身体の物理的特性に依存しており、それが知の形成に重要となる拘束条件を与えている。

もう一つのキーワードが実時間性である。生物が環境に適応して行動すると言っても、多様な時定数の目的が混在する。敵から逃れるための適応行動、食物を獲得するだけの適応行動、季節の変化に対する適応行動、自分の加齢に伴う身体機能の変化に対する適応行動など、個体は学習しながら様々な時定数で適応する。さらには環境の変化に適応するための世代を超えた進化も、広く生物の持つ適応機能と捕らえることができる。これらの行動はすべて目的に応じた時間拘束があり、実時間性が適応にとって重要な要素であることがわかる。

このような適応的機能を実現する新しい概念として、創発システムに関する研究が行われた²⁾³⁾。これは、多数のモジュールやサブシステムから構成されるシステムにおいて、それらの局所的インタラクションの結果としてマクロな構造、機能、挙動が創出されるという概念である。自律分散システムの自己組織化に近い概念だが、マクロな構造、機能、挙動が形成されると、それが局所的なインタラクションに何らかの影響や制限を与えるという点が特徴的である。

また、最近では、「移動知」という考え方が議論され始めている。我々は、動物には知性を感じるが、植物には感じない。移動することによって多様でかつ動的な環境とのインタラクションが生じるが、それが知を獲得するのに非常に重要ではないかという仮説である。このインタラクションを通して、経験が蓄積される。人間は何らかの内部モデル（心理学的に言えばメンタルモデル）を持ち、ある状況である目的行動を達成するために、このモデルに基づく行動原理によって行動を、あるいは行動のための拘束条件を生成すると考えられる。生物は、環境との多様で動的なインタラクションを通して得られた経験から、行動原理のための内部モデルを形成する。すなわち、経験を、自分の行動生成に利用するための一般則に変換しているのである。私は、これこそ生物の知を特徴付けるアダクション（仮説形成）であると考えている。

5. 工学研究と知的ロボットの实用化

知能ロボット研究のもう一つの流れが、工学研究としての知能ロボット研究であり、その研究主題は、人間に役立つ多自由度知能機械をいかに実現するかというシステム・シンセシスである。アクチュエー

タ、センサをはじめとする要素技術開発も重要であるが、求められる知的動作機能に対し、それを実現するためにどのような要素をいかに使い統合し、メカニズムとして構成し、どのようなアルゴリズムで情報を処理し、いかなる制御手法でロボットを動作させるか、というシステム設計・開発が主要な研究課題となる。工学研究としては、実現する機能や使用環境に応じて、いかにロボットシステムを構成するかを体系的に論じることが求められる。しかしその一方で、個々の用途によって環境やロボットに要求される機能が異なり、利用する技術も常に進化するので、開発するシステムごとにある程度アドホックに設計・開発を行うことも必要となる。

また、実際に役立つものとして完成させるには、実用化の検討も必要となる。一般に研究者は、優れたオリジナルな技術が完成すれば、実用化できると思い込みがちだが、これは勘違いである。どんなに素晴らしい技術を開発したとしても、またそれが社会にニーズに基づくものであっても、それが人に使われるようになるかどうかは別問題なのである。

別報⁴⁾でも述べているように、ロボットを実用化するにはいくつかのプロセスがある。論文を書くためには一度動けばよいが(研究開発と呼ぶ)、様々な環境変動、外乱・ノイズ、不確定要因が生じても安定して確実に動くようにするための技術開発が必要である(実用化と呼ぶ)。次に、信頼性、耐久性、メンテナンス性など、製品ライフサイクルを考慮した設計、ユーザの使いやすさを考慮した設計、PLなどの検討が必要である(製品化と呼ぶ)。さらに、営利目的である企業が事業として行うための、マーケット調査、価格設定、コスト低減、さらには営業・販売・サポートまでも考慮した製品設計とビジネスモデルが必要になる(商品化と呼ぶ)。研究者は、研究開発だけ行えばよいという考え方もあるが、役に立つものとして責任を持って作り上げるという意味では、実用化、さらには製品化あたりまで関わるべきかも知れない。もちろん、一般的に後のプロセスほど研究者は苦手で、商品化、市場予測となると企業でないと難しい。だからこそ産学連携が重要となる。

実際の技術開発では、ある用途を目標として必要となる機能を実現するために開発したロボット要素技術が、別の用途に適用されるケースも多い。そういう点では、ロボット技術は、様々な波及効果を期待できる技術であると言ってよい。ロボット技術に携わった技術者なら、他のメカトロ機器や情報処理システムの開発も手がけることができるので、つぶしがきくと言われている。ただし、ロボット技術に

携わる研究者の実用化に対する動機を高め、実用化研究を推進するには、実用化技術開発にも研究価値を認めるような、学会等での社会的評価も見直すべきであろう。

6. 社会支援ロボットに必要な技術

ロボットによる社会支援を考えたとき、ロボットに求められる性能は、これまでの産業用ロボットの精度や可搬重量といったものではない。動作環境は一般環境でかつオープンであり、動的に変化するので、このような予測できない状況でも安定して動作することが重要な機能となる。

我々のグループは、宇都宮大学、東洋大学と合同でUTTORI Unitedチームとして、RoboCup(ロボットでサッカーを行う競技会) 中型機リーグに参加している(図1)。このリーグのルールでは、遠隔操作は許されておらず、ロボットは完全自律で動作しなければならない。参加した経験によると、ロボットを安定に動作させることは非常に難しい。照明条件、電波のノイズ、観客や対戦チームのロボット(動きも含む)など予測できない環境要因が非常に多く、またプレイするにしたがいバッテリー消費、劣化、故障など自己の状態も変化する。もちろんプログラムのバグなどの問題もあり、なかなか開発者の意図どおりに動作しないし、その原因を突き止めることも容易ではない。

一般に、ある程度想定できる状況では、いわゆる作りこみが有効である。すなわち、いかなる状況でいかなる動作をするかというプログラムを作ればよい。しかし、想定が困難になったり、想定される場合の数(状態数)が大きくなるに連れ、プログラムをコーディングすることは困難になる。状態数の爆発に対応したり、予測できない状況で動作できるようにする方法として注目されているのが、強化学習



図1 RoboCupでサッカーをしている自律型移動ロボットの様子

等によりロボットが行動を自ら適応的に獲得する手法である。ロボットは、環境要因に対してだけでなく、タスク（人間から与えられることも多い）に対して、他のロボットに対して、さらには自己の状態に対して適応的に動作することが求められる。様々な未知要因が存在する環境でも、ロボットを環境に適応させ、安定して確実に動作させる技術はまだ研究段階である。しかし、これはまさに社会支援ロボットにとって必要な機能であり、それを実現する技術が確立すれば、大きなブレークスルーとなる。

適応的動作と並んで、社会支援ロボットに必要なもう一つの重要な機能が協調動作である。社会支援では、単体のロボットでは達成できない作業が多く存在する。レスキューや地雷除去では、ある場所（点）のみならず、領域（面）に対して作業を行う必要があり、複数のロボットによる協調作業をある程度前提としなければならない。

環境やタスクの多様化に対応できるような柔軟性を持ち、耐故障性や信頼性に優れ、作業効率が高く、拡張性のあるシステムにするためには、自律分散化が有効である。分散化された複数の自律ロボットを協調させる技術については、これまで十年以上議論されてきた⁹⁾。本年、RoboCupに併せて第6回自律分散型ロボットシステムに関する国際会議(DARS 2002)¹⁰⁾が開催されるが、学際性が広がり、学習に関する論文数も増加した。理論研究より実用研究が多くなり、応用に関する議論も活発化しており、ようやく自律分散型ロボットシステム技術は成熟期に入ってきたと言えよう。知的ロボット技術開発の方向性もまさにここに象徴されている。

7. おわりに

知的ロボットの研究や技術開発のこれまでの動向について解説しながら、今後のロボット研究の方向性、応用や実用化に向けての将来展望などについて述べてきた。

近年、ロボット技術は、要素技術よりシステム化技術に比重が移ってきた。もはやロボット技術は、単体の知能機械としてだけでなく、複数のロボットやモジュール、さらにはロボットが動作する環境まで含めた技術となりつつある。我々は、ロボット自体の知能化だけでなく、ロボットと環境との協調（インタラクション）を考え、ロボットが動作する環境自体を情報化・知能化する技術として、知的データキャリア（IDC: Intelligent Data Carrier）の開発も行ってきた。IDCは、CPU、メモリ、局所的無線通信ユニットなどを備えた小型デバイスであり、これを環境に埋め込むことによって、環境自体に情

報管理/処理機能やロボットとのコミュニケーション機能を持たせることが可能となる¹¹⁾。

ロボット技術の将来像に関しては、ロボットが工場、オフィス、家庭、災害現場など、様々な環境で動き回って活躍するというより、家電製品がもはや電機製品からプロセッサが内蔵された電子機器になったり、コンピュータのユビキタス化（どこにもあるような遍在化）が進んだように、ロボット技術も身近なあらゆるものに組み込まれ、いわばインフラ的技術となるという方が、技術的観点からいえば現実的だ。いずれにせよ、ロボット技術は、環境と調和し、人間と調和する技術でなければならない。今後、人工物、人間（社会）、環境が調和して共に生存するための工学を確立していく必要があり、私はそれを共存工学と呼んでいる。ロボット技術は、まさに共存工学の重要な一つの柱である。

最後になるが、私は、将来の日本の経済復興には、日本独自の技術を持ちつづけることが重要であり、日本が優位性を保っているロボット技術こそ重点的に開発を推進すべき技術だと考えている。昨今のロボット人気で、大学でのロボット研究志望者が増えているそうだが、ロボット技術を確実な技術基盤とするためにも、研究者・技術者の育成が不可欠である。ロボフェスタ、RoboCupをはじめとする様々な競技会なども各地で頻繁に開催されるようになったが、人材育成と技術振興という点からも、高く評価したい。

参考文献

- 1) 吉川弘之：“テクノグローブ”，工業調査会，(1993)。
- 2) 計測自動制御学会：“特集：創発システム”，計測と制御，vol. 35, No. 7 (1996)。
- 3) 計測自動制御学会：“特集：創発システム研究の新たな展開”，計測と制御，vol. 38, No. 10 (1999)。
- 4) 浅間 一：“ロボティクス研究と実用化”，ロボット，No. 144, pp. 80-81 (2002)。
- 5) 浅間 一：“複数の移動ロボットによる協調行動と群知能”，計測と制御，vol. 31, No. 11, pp. 1155-1161 (1992)。
- 6) H. Asama, T. Arai, T. Fukuda, T. Hasegawa Eds.: “Distributed Autonomous Robotic Systems 5”, Springer-Verlag, Tokyo (2002)。
- 7) 藤井輝夫，浅間 一，倉林大輔，嘉悦早人，遠藤 勲：“知的データキャリアによる群ロボットの機能創発”，日本ロボット学会誌，vol. 17, no. 6, pp. 848-854 (1999)。

(著者紹介は378頁)

日本フルードパワーシステム学会誌

フルードパワーシステム

日本フルードパワーシステム学会論文集

特集「IT時代のロボット技術」

