知能化技術とロボット新産業創出の取り組み

浅田 稔*

Robot Intelligence and Its Industrialization

Minoru ASADA*

*大阪大学大学院工学研究科（〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1）

*Graduate School of Engineering, Osaka University (2-1 Yamadaoka, Suita-shi, Osaka 565-0871)

1. はじめに

近年のロボットテクノロジーの進展は目覚しく、ROBODEXやロボカップ¹⁾の世界大会などでは、多くの知能ロボットの動きが紹介されている。しかしながら、今日明日にでもわれわれの日常生活に入ってきて、ロボットとの共生・協働が始まるかと言えば、まだその域に至ってないことは、明白である。本稿では、この課題について、かなり異なる視点からの議論を試みる。1つは、ロボットの設計論の立場から、現在のロボット設計論に欠けていると思われる視点を指摘し、その可能性の1つとして、筆者らが唱えている「認知発達ロボティクス」²⁾を説明する。そして、その研究事例として共同注意の発達の学習を紹介する。これらの基礎研究も含め、ロボットテクノロジー（以下、RT）研究開発一般に、マーケットが明確に見えていないこともあり、多様な業種の統合が高速かつ効果的になされなければならない。そのための公開実験場が必要であり、その場が社会的認知を促す場ともなる。これが2つ目の産業化の視点であり、関連する関西での動きを紹介する。

2. 認知発達ロボティクスとは？

認知発達ロボティクス²⁾とは、従来、設計者が明示的にロボットの行動を規定してきたことに対し、環境との相互作用からロボットが自ら行動を学習し、それらを発達させていく過程に内包される抽象化、シンボル化を実現するためのロボット設計論である。認知ロボティクスの焦点は、自律エージェントが環境との相互作用を通して、世界をどのように表現し行動を獲得していくかといった、ロボットの認知発達過程にある。特に、環境因子として他のエージェントの行動が自分の行動をどのように規定していくかという過程の中に、ロボットが「自我」を見出していく道筋が解釈できるのではないかという期待がある。このように環境との相互作用をベースとして、その時間的发展に焦点をあて、環境の設計問題を主に扱う研究分野が認知発達ロボティクスである。その基本的な考え方は、問題自体に

対する理解の過程をロボット自身が、環境との相互作用を通じて経験することにより、さまざまな状況に対応可能なメカニズムを構成論的アプローチによって構築することである。

従来のロボット設計論では、物理的身体の意味を明示的に議論してこなかった。行動規範型ロボティクスの勃興以来、「身体性」の意味が再認識されている。身体性の本質は、物理的実体として限られた処理能力の範囲で、エージェントの多様な感覚情報と多自由度の運動能力の密な統合（[1] 不可分性）に基づき、タスクや環境の複雑さに適応するために学習（[2] 相互作用可能性）およびその経時的発展を可能（[3] 発達可能性）にすることである。この意味では、時間的发展、すなわち発達の結果が、知的行動であることを期待するが、保証はない。つまり内部構造をいくら作り込んでも、よい方向に変化（発達）すべき環境が与えられないかぎり、知能が発現するとはいえない。この意味で外部環境の設計は重要である。このことは、上記の3点が陽にはロボットの内部構造に関する要件を述べているように見えながら、同時に提示されるべき外部環境の条件を陰に示していることに注意しなければいけない。特に、知的行動を人のレベルまで求めるなら、人以外の動物にも可能な連合学習から、人特有のシンボル生成／利用の記号学習、すなわち言語獲得にいたる過程（言語創発）が、ロボットの内部構造と外部環境の多様かつ制約的相互作用のなかに見出されなければならない。

國吉³⁾も指摘するように、従来のロボティクスでは、ヒトと共生するロボットのコミュニケーション技術として、トップダウン的に言語構造を与えたがために、言語創発過程が内包されず、それゆえ、表層的な言語コミュニケーションに留まり、限られたコンテキストでの定型的な応答しかできない。認知発達ロボティクスでは、言語創発に至る過程そのものを人工的に構成することで、ヒトの認知発達過程の理解とともに新たなロボット設計論を目指すが、その基盤は脆弱であり、基本問題が目白押しである。中でも、模倣学習は、認知発達過程のさまざまな局面で重要な

役割を果たしていると考えられる⁴⁾。以下では、コミュニケーション発達のための第1ステップとして共同注意の発達の学習の研究例を紹介し⁵⁾、今後の方向性を示す。

3. 共同注意の発達の学習

発達の認知科学の分野では、子供の注意・記憶能力の発達と養育者の適応的な反応が、子供の最初の言語学習を助けていることはよく知られている^{6)~8)}。このことは、学習者の内部機構と環境側からの学習促進機構の両方が必要であることを示唆する。このような機構を必要とするタスクとして共同注意があげられる。共同注意は、コミュニケーションの始まりであり、言語理解や読心などの社会的能力の獲得に関連する基本能力だからである⁹⁾。一方、工学的応用としてロボットとヒトの間のコミュニケーションを実現する試みもなされている^{10)~12)}。しかしながら、発達の認知科学からの示唆は考慮されていない。そこで、ここでは、学習者側と養育者側の双方が発達機構をもつ場合の共同注意の発達の学習の例を紹介する。

共同注意は、学習者が養育者の視線から、養育者が何に注意を向けているかを発見する過程とみなせる。この過程の中で、学習者側の注意を向けるために、養育者が意図的に学習者の目の前で注意を向けるべき対象を動かして見せてやることで、注意を向ける動作を引き出していると考えられる。そこで、ロボットを使った共同注意発達学習の最初のステップとして、養育者の視線を観測し、その視線方向に対象がある状況で、学習者がそちらの方向に視線を向けたときに報酬（養育者の微笑みに相当？）を与えることで、視線を向ける行動学習を行った。基本的なアーキテクチャをFig. 1に示す。学習者側は、左右のカメラからの画像を入力する層、網膜層、視覚皮質層、出力（視線を向ける首振りモータコマンド）層からなる。これらは視覚発達を模擬している。これに対し、環境側は与える報酬の状態のサイズを学習者の学習段階に応じて変化させる（狭め

る）機構をもつ。

Fig. 2に学習初期(a)と後期(b)におけるロボット側の発達（左）と環境側の発達（右）の様子を示す。ロボット側は、光学系の発達により、最初ぼけた画像が入力されるが、次第に鮮明化していく過程を示す。環境側は、視線を向ける方向に関する分解能を最初は粗くすることでやさしいタスクとし、ロボット側の学習段階に応じて、細かくしていく過程を示す。Fig. 3に実験の様子を示す。今回の実験の結果では、環境側の発達が学習の加速を促し、ロボット側の発達がパフォーマンスの向上につながった。また、学習者側が注意の意図をもって視線変更しているのではなく、養育者の視線に対する反射的な行動を学習したに過ぎない。しかし、意図の発生メカニズムを恣意的に付加するのではなく、このネットワークの延長上に、そのような機能が創発されるアーキテクチャが望まれる。

Fig. 2 Robot (left) and environmental (right) development at the early and late stages of learning

Fig. 3 Experiment of joint attention

Fig. 1 Developmental learning architecture for joint attention

認知発達ロボティクスの中心課題である模倣学習では、身体表現をさまざまなモダリティの関係から求める研究¹³⁾、音声模倣におけるオウム返し学習¹⁴⁾、教示なしの共同注意発達¹⁵⁾などの基礎的な研究が行われており、今後の進展が望まれる。

4. ロボット産業の創出^{*1}

4.1 日本はRT世界一？

日本はロボットの稼働台数で世界のトップに立つ「ロボット大国」だが、技術のレベルで圧倒的な優位にあるかというと、必ずしもそうではない。技術的にはアジア各国がキャッチアップしてくるし、コスト的にもこうした国々は日本より安い労働力で生産できるから、日本がこれからも世界の中で優位を保つのは容易ではない。来るべき次世代ロボットの時代に向け、ロボット産業を競争力ある基幹産業に育てるためには、ロボットにどのような付加価値をつけるか、その智恵やアイデアがカギを握る。その点、欧米人がロボットに恐怖心を抱きがちなのに対し、日本人は鉄腕アトムに対する親愛の情に見られるように、ロボットに対し高い親和性をもっている。これは大きな強みといえる。

4.2 共生・協働は次世代ロボットのテーマ

次世代ロボットは工場などで使われる従来のロボットと違い、人間の生活の中に入ってくる。そうしたロボットの設計には、いかに効率のいい機械を安く作るかという従来の考え方ではなく、いかにうまく人間とコミュニケーションが図れるようにするかという考え方がより重要である。しかも、生活にロボットを取り入れることへの抵抗感がそれほど大きくないことを考えれば、日本は世界に先駆けて本格的にロボットを社会に導入する国になる可能性が高い。そこから未開拓の市場が育っていく期待ももてる。ただし先駆者には相応の責任があるので、それを自覚して開発と導入を進めなければならない。

人間社会にロボットを入れる過程では、ロボットによる事故やロボットを悪用した犯罪が起きる可能性がある。しかしその事実を隠してはだめだ。それはロボットのせいではなく使う人間側の問題であって、導入を考える国や社会が「悪用されるからロボットを入れるのはやめよう」という結論を出すのか、「悪用される可能性があることを覚悟の上で、弊害を最小にとどめるための枠組みを準備する」方を選ぶのかの判断材料を提供することは義務であろう。そうした情報発信はロボットに対する社会的認知を高めるであろうし、日本がもつロボット技術は一体どんな意味があるかを理解してもらうのに役立つはずである。

次世代ロボットは必然的に設計・開発された社会の文化や思想を背負って生まれてくる。したがって、ロボットを

市場に出す場合、これまでの工業製品のように「日本製の商品は人気があるが、日本人の顔は見えない」という状況はありえないと考えている。日本人はロボットにどのような価値をもたせ、どのような使い方を提案するのかという思想をきちんと世界に伝えることは、実用化にあたって避けて通れない。ロボットは結果的に、日本人とは何者かを世界に知らしめるメディアになるであろう。それを現実のものとするためにも、産官学の連携のもとで実用的なアプリケーション開発に取り組む実験都市のような取り組みができないかと考えている。

4.3 公共ロボットと中小企業支援

次世代ロボットは今すぐ商売として成り立つほどの市場はまだないので、まずは公共性の高い分野で公的資金を投入して実験的な取り組みを進める。その一方で民間サイドでパーソナルな用途のアプリケーション開発も進める。そして立ちふさがる技術課題の解決にあらゆる角度からチャレンジするといった枠組みがあれば研究開発は格段に進む。ロボット開発にはさまざまな要素技術が含まれ、あらゆる業種が関係する、特定の企業一社で完結するようなものではない、関西にはロボット技術のシーズをもつ企業や大学・研究機関が多数あるので、叡智を結集する仕組みとして、拠点づくりをするのに適した地域と考えられる。

自社の技術がロボットのシーズになると気づいていない企業もあるかもしれない。ロボットの範囲はとても広く、一般にイメージされるような、人や動物の形をした「目に見えるロボット」もあれば、体内で薬を運ぶのに使われる極小のナノマシーンや、義肢・義足などのリハビリマシーンもある。部屋や建物がヒトの暮らしを助ける場合もありロボティックルームなどと呼ばれている (Fig. 4 参照)。ITS (高度道路交通システム) も人の動きを感知してコントロールするシステムという意味で、1つの巨大なロボットだ。ロボット産業はそれだけ広がりをもつ産業といえる。

4.4 ロボシティは次世代RTの拠点

これまでの議論をまとめると、まずは将来と世界を見据えたグランドプランが必要である。長期的な展望の中に短期的な計画を位置づけ、それに応じた予算措置をとる。官が枠組みを作り、産と学がそれに対応し活性化する構造を作ることが大切だ。取り組みを進めるなかから具体的な商品がいろいろ出てくればよい。高額のものからおもちゃに

Fig. 4 Image of robotic room

脚注 ※1：本章は、インタビュー記事¹⁰⁾を元に再編したものである。

近いものまでいろいろ出てきて、利用者のフィードバックを受けて改良を進めるための公開実験場としてロボシティを提案したい。先にも触れたように、RTは多種多様な企業体からなるが、それらが協力して、標準化の実験を行うことができ、それを一般市民も含めた公開の場で、フィードバックすることで迅速な改良製品化が可能になると同時に、そのこと自体が、社会的認知を上げ、結果として、デファクトスタンダードを生み出す可能性が高い。これらがポジティブフィードバックして世界中から研究者、企業家、デザイナー、アーティストが集積する。それがロボシティ構想である。現在、筆者は、大阪市RT研究会、関西経済連合会「次世代ロボット研究会」で委員を務め、ロボシティの実現に努力している。ロボットは日本が世界に誇れる夢の1つであり、そのことを全世界にメッセージにして伝えていきたいと願っている。

(2003.6.29-受理)

文 献

- 1) 北野宏明, 浅田 稔: “「ワールドカップ」ロボットの挑戦”, 日経サイエンス, Vol. **28**, pp. 74-82, 1998
- 2) M. Asada, K. F. MacDorman, H. Ishiguro and Y. Kuniyoshi: “Cognitive Developmental Robotics as a New Paradigm for the Design of Humanoid Robots”, Robotics and Autonomous System, Vol. **37**, pp. 185-193, 2001
- 3) 國吉康夫: “ロボットの知能—創発実体主義の挑戦—”, 計測と制御, Vol. **42**, No. 6, pp. 497-503, 2003
- 4) 浅田 稔: “模倣発達の構成論的展開”, 数理科学, Vol. **40**, No. 9, pp. 61-69, 2002. 9
- 5) 長井志江, 浅田 稔, 細田 耕: “ロボットと養育者の相互作用に基づく発達の学習モデルによる共同注意の獲得”, 人工知能学会誌, Vol. **18**, No. 2, pp. 122-130, 2003
- 6) J. Elman 他 (著), 乾 敏郎, 今井むつみ, 山下博志 (訳): “認知発達と生得性—心はどこから来るのか—”, 共立出版, 1998
- 7) E. L. Newport: “Maturation Constraints on Language Learning”, Cognitive Science, pp. 11-28, 1990
- 8) M. H. Johnson: “Developmental Cognitive Neuroscience”, Blackwell Publisher Inc., USA, 1997
- 9) C. Moore and P. J. Dunham (Ed.): “Joint Attention: Its Origins and Role in Development”, Lawrence Erlbaum Associates, 1995
- 10) B. Scassellati: “Theory of Mind for a Humanoid Robot”, Proc. of the 1st IEEE/RSJ International Conference on Humanoid Robots, pp. CD-ROM, 2000
- 11) H. Kozima and H. Yano: “A Robot that Learns to Communicate with Human Caregivers”, Proceedings of the First International Workshop on Epigenetic Robotics, 2001
- 12) M. Imai, T. Ono and H. Ishiguro: “Physical Relation and Expression: Joint Attention for Human Robot Interaction”, Proceedings of 10th IEEE International Workshop on Robot and Human Communication, 2001
- 13) Y. Yoshikawa, H. Kawanishi, M. Asada and K. Hosoda: “Body Scheme Acquisition by Cross Map Learning among Tactile, Image, and Proprioceptive Spaces”, Second International Workshop on Epigenetic Robotics: Modeling Cognitive Development in Robotic Systems, pp. 181-184, 2002
- 14) Y. Yoshikawa, J. Koga, K. Hosoda and M. Asada: “Primary Vowel Imitation between Agents with Different Articulation Parameters by Parrot-like Teaching”, Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems 2003 (IROS '03), 2003
- 15) Y. Nagai, K. Hosoda and M. Asada: “Joint Attention Emerges through Bootstrap Learning”, Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems 2003 (IROS '03), 2003
- 16) 浅田 稔: インタビュー “次世代ロボットは日本が世界に誇れる夢”, 経済人, Vol. **57**, No. 5, pp. 4-5, 2003. 5

用語解説

自律エージェント: 物理的な存在である自律エージェントとしてのロボットとソフトウェアの世界で存在する仮想エージェントの両方を指し、ともに自らの判断で行動する。

モダリティ: 様相や様式のことをさすが、ここでは感覚モダリティの意味で使っている。視覚、聴覚、触覚、力覚などがその例である。

浅田 稔 (あさだ みのる)
昭和28年生まれ。昭和57年、大阪大学基礎工学部制御工学科卒業。現在、大阪大学大学院工学研究科教授。知能ロボットの研究に従事。