展 望**ロボティクスからみた学習とロボットについて**

Learning and Robots from the Viewpoint of Robotics

有 本 卓* *東京大学工学部

Suguru Arimoto* *Faculty of Engineering, University of Tokyo

1. はじめに

人は経験から学ぶ。この経験から学ぶ能力は機械（ロボット）の中に具現できるだろうか。このテーマをここではもう少し精密に論じてみたい。つまり、ロボットにとって学習できる事柄を少しでも明確にしておきたいからである。ロボットは人間と対比してあまりにも違い過ぎるので、この方向の議論は無意味であると頭から決めつけられても仕方がないかもしれないが、少し先を読み進めていただければ幸いである。第2~4章では、人間の学習に関して三つの側面が考えられ得ることを説明するとともに、学習においてなくてはならない教師の役割を議論する。第5章からはロボティクスからみた学習の意味を議論する。

2. 人間の脳

人間の脳は、哺乳類の中で、そして類人猿と比較しても、際立って発達している。脳は全体が一樣に発達したのではなく、進化の歴史を背負って、古い脳の上に新しい機能をもった脳が発達し、付け加わったように見えると言われる。つまり、脳の発達は、進化の上で古い性質ほど胎児期の早い段階で現れる、という生物学の原理に則している。この人間の脳は、また、学習を受け入れ、育み、高度の機能をもつに至る能力を秘めている。特に人間が人類として進化し出し、そして発達した新しい脳の大部分はこの学習能力に捧げられている。もっと具体的に言えば、生まれた瞬間から個々が経験する外部世界との相互作用の様々を“学習”と呼ぶ広い意味の記憶の形式で脳内に受容し、これらを記憶として固定し、はぐくみ、洗練させる。こうして成長の過程で新たに加わった記憶の様々が人間としての高度な生物機能そのものとなり、これが“知”の源泉となっているのであろう。赤ん坊が大人になるまで経験し、五感を通して取り入れ、洗練せしめる能力、これこそが他の類人猿の何よりも優る人類の“知”をもたらし源泉なのであろう。

3. 教師のない学習はあり得るか

人間の脳の生まれてから徐々に発達していく各段階と学習機能は密接に関係している。このことは心理学の世界でよく知られている。脳のニューロンの回路が形成され、複雑性が増すある決まった段階と言葉の発達は合致していなければならない。類人猿にも次のような事例が報告されている。アフリカのチンパンジーの集団では、大人のかかりが適当な石を見繕って“くるみ”を割り、果実を取り出せる。子供のチンパンジーはこの動作そのものを真似るが、この行為はなかなか成功しない。そして、石を持って割る行為をある年齢の頃に集中して何回も経験しないと、くるみ割りを成功させる技術は身につかない。つまり、ある年齢を経てから後で石を使い出しても、くるみ割りは成功しないことが観察されている。ある行為がうまくできるようになることは、ニューロン群の発達過程とマッチしていなければならない。経験して取り込まれる情報がニューロンネットの複雑な形成（あるいは記憶能力の生成段階）期に合致することにより、固定され、機能として発現可能になると考えられるのである。

チンパンジーでも、人間でも、学習は親や家族との接触のプロセスで始まる。まず母親が教師であり、やがて家族が教師になる。ここに、学習における教師の役割の重要性を議論しておかねばならない。そのために、数学基礎論における一つの定理を竹内外史氏の言葉を借りて引用しよう [1]。

「どのように巧いプログラムを作っても、教師を仮定しないプログラムの学習能力は殆どゼロに近い」。

竹内外史氏はさらに、この定理から「人間の脳の形成のプログラムは教師の存在を仮定して作られていると確信できる」と述べている。筆者なりに解釈すれば、成長の過程で得た情報を組み入れ、より深く実世界に対応した高度の機能を自己修得できるまでに発達した人間の脳の新しい進化は、教師の存在を仮定して作られている、とみなされるのである。竹内外史氏は、「教師の存在を仮定したプログラムは、長い哺乳類の進化にその基盤をおくものだと思います」と述べる。

原稿受付 1994年11月8日

キーワード: Learning, Learning with Teachers, Community Learning, Evolution, Memory

*〒113 東京都文京区本郷 7-3-1

*Bunkyo-ku, Tokyo

4. 教師はどうして作られるか

前章までに、人間一個人が生まれて成長する過程で見る学習能力と、遺伝子に取り込まれた脳の進化の役割を議論した。ここで学習には“コミュニティ学習”と呼ぶもう一つの側面があることに注意しよう。哺乳類の種の多くは群れを作って行動している。人間はコミュニティを作って生活する。赤ん坊の学習のための教師となる母親はコミュニティの一員でもある。ここでまた一つの例を引こう。日本猿の群れの中の一匹の猿が芋を洗って食べたことが、群れの中に広がり、この習慣が群れの中に固定したことが報告されている。これは典型的な“コミュニティ学習”の例である。ある一つの行為が偶然にせよ起こったとき、これを真似た個々がその行為のもたらす何らかの影響（快適性や満足感）によって習慣化し、コミュニティの中に固定される。恐らく、人の道具作りの能力の発達には、狩猟に生きねばならなかった人類のコミュニティの中で固定し、育てられた学習の集積から来たとはいえない。石器から土器へ、そして火を使いこなす技術もコミュニティで育てられ、こうしてコミュニティ学習が積み重なって文化が生まれたのであろう[2]。

5. ロボティクスにおける学習とは

人間の学習について、三つの側面を説明した。生物進化によって取り込んだ学習能力を秘めた遺伝子（その具現物としての脳）、個人の成長過程で行う学習、そしてコミュニティ学習である。残念ながら、ロボットを対象に学習機能を考えるとき、これらの中で第二の側面しか議論し得ない。つまり、1台のロボットが与えられたとき、それが何をどこまで学習できるかを考えることは問題として意味があるが、ロボット群にコミュニティ学習や進化を考えると意義ある結果は期待できそうもないからである。しかし、進化そのものについては別の見方もできる。発達したニューロン回路網と膨大な記憶容量に相当するハードウェアは、マイクロエレクトロニクスの技術の進歩によって、1台のロボットにかなりの規模で賦与できると考えてもよい時代に入ったのである。動物や人間とは形式は異なり、経験の組み入れ方も違うが、1台のロボットが作業目標に向かって行動するとき、ロボットが対象物や環境と相互作用して得る膨大な情報を取り込むことは少なくとも可能になり出した。もちろん、センサ技術の発達も寄与している。こうして、ロボットの学習についての議論は、自己修得し、深化できるだけのセンサ群と記憶容量をもった1台のロボットが人間の与えた教師からどのように学習すべきか、という問題に当面は焦点をさぼるのが合理的であろう。進化で得た人間の脳に対応すべく、周辺技術の進歩で得た計算や記憶の能力、センシングの能力をハードウェアシステムとし

てロボットに実装する。後は、人間が作業目的を伝え、何らかの目標や規範（すなわち、教師つき）を示して行動を起させ、取り込んだ膨大なセンシング情報を整理統合し、目標あるいは規範と照合しながら、作業目的に向かって徐々にそして確実に学習を進める。これがロボットに機能させることのできる学習の実現可能な姿ではなからうか。自律移動ロボットでは、環境の知識を取り込み、地図にし、また、自分の置かれた状況を読み取ることがこの学習の枠内で考えられよう。その技術にセンサ融合は基本であり、知識ベースやデータベースの構造化は考えねばならない課題である。物体や環境の認識に関する学習も課題になるが、この方がもっと困難な問題かもしれない。他方、ロボットの腕や手の運動の学習は具体的にはどのような姿になるのだろう。

6. ロボティクスにおける“教師”とは

部品挿入や物体把持などの作業目的が与えられたとき、これをスムーズに行えるよう機械のアームとハンドに学習させるための規範は人間が与えねばならない。人間がスムーズにコップを把持できるのはすでに学習したからである。また、人間の学習ですら教師が必要であり、教師はコミュニティで生まれ、育てられることを指摘した。ロボットの学習に基本的な規範（教師）は人間が作らなければならないが、これはロボットにとっては算定でき、照合できるものでなければならない。そこで規範をロボットが理解できるように与える問題は、目的がスムーズに完遂できることを簡単に記述できる表現形式にあることが理解されよう。スムーズに滑らかに作業が進むことが数式的あるいは数量的に表現できれば、後は、行動を繰り返すうちにこの数式規範のもとに必ず改善できる方向に進むことのできる行動アルゴリズムを見つければよい。この最も単純化した問題の素過程として繰り返し学習制御がある[3][4]。筆者は、個々の作業の目標や規範をロボットが理解できる表現形式でうまく導出することがロボティクスの重要な研究課題となり得ると考えている。コミュニティ学習に期待するのは、あまりにも時間がかかりすぎて、無理な注文となることが多いであろう。しかし、作業目的がある限定された環境内の技術的課題であるならば、スムーズに作業がすることの意味は力学的あるいは数式的に表し得ることかもしれない。あるいは、言語によって手続き的に表現できてもよい。例えば、ある作業については費やすエネルギーが最小になることがスムーズな作業の規範となり得るかもしれない。あるいは対象との相互作用を機械的なインピーダンスに表現できるなら、これも規範の中に組み入れられよう。そのとき、このような規範を最適にする方向で学習が進むように制御入力を改良し得るアルゴリズムが問題となろう。前に指摘したように、ロボットの腕やハンドが対象

物と相互作用して行う作業について、その物理的相互作用に関する性質を我々はまだ解明し得ていない[2]。この相互作用は幾何学的拘束のもとにある複雑な微分方程式で記述できるが、この複雑さの中に秘められた物理法則を我々は未だ完全には理解し得ていない。恐らく、コミュニティ学習を経ずに、ロボットの学習の規範（教師）を見つけることこそがロボティクスの主要テーマとなるようにも思えるのである。そして、ここに技量の力学的理解が必要不可欠になるのである[2]。そして、力学原理に基づいたロボットの作業記述やタスクプランニングの研究こそが、まさに、この意味で重要になるのである。

最後に、作業目的が達成したかどうか簡単に判定できるケースでは、“try and error”が有効な学習手段となり得ることを述べよう。つまり、ある作業について1台の機械が何度も試行し、少しずつ修正して満足できるまで繰り返し、コミュニティ学習を自動的に修得させようというのである。そのとき、成功したときのセンシング情報とアクチュエータ入力情報をデータベースにして貯え、洗練し、構造化することによって、学習結果を知識に転換することができる[5][6]。複雑な作業目的もこのようにいくつかの素過程の組み合わせとして分解できるなら、この方法がさらに拡張して使えるかもしれない。コミュニティ学習においても、誰や彼のいろいろな偶発的な試みの何かが良い結果をもたらす、これが洗練されてコミュニティに定着し、世代を越えて継承されたのであろう。この知識ベースの洗練と深化および継承の問題についてはロボティクスの世界では未だ研究課題として取り上げられていないが、いつかは詳細な研究が試みられるようになるだろう。

7. お わ り に

人間は“mobility”の動物である。ギリシャ時代のアリス

トテレスに代表されるペリパトス学派にもすでに見られるように、動くことが知の創造につながるという考え方があがあるが、これこそが“ロボティクス”の出発点であり、維持神話であろう。人の手作業の精妙さを解き明かすテーマを科学技術として把え、ここから新しい知的パラダイムを創造することによって、我々は初めて人間のインテリジェンスに迫ることができる、と確信している。

参 考 文 献

- [1] 竹内外史：“数学の真理について”，学術会報，vol.1994-IV，no.805，pp.81-85，1994.
- [2] 有本卓：“機械システムの知能化 I：ロボティクスの維持神話”，日本ロボット学会誌，vol.12，no.1，pp.77-83，1994.
- [3] S. Arimoto, S. Kawamura and F. Miyazaki: “Bettering operation of robots by learning,” J. of Robotic Systems, vol.1, no.2, pp.123-140, 1984.
- [4] 有本卓：“運動の学習と適応：数理科学的枠組み”，応用数理，vol.4，no.2，pp.108-124，1994.
- [5] H. Suzuki and S. Arimoto: “Visual control of autonomous mobile robot based on self-organizing model for pattern learning,” J. of Robotic Systems, vol.5, no.5, pp.453-470, 1988.
- [6] D.S. Ahn, H.S. Cho, K. Ide, F. Miyazaki and S. Arimoto: “Learning task strategies in robotic assembly systems,” Robotica, vol.10, no.4, pp.409-418, 1992.

有本 卓 (Suguru Arimoto)

1936年8月3日生。1959年京都大学理学部卒業。沖電気工業KK，東京大学工学部助手，講師を経て1968年大阪大学基礎工学部助教授，1973年同教授，1988年東京大学工学部教授となり現在に至る。工学博士。ロボティクス，制御理論，信号処理，情報理論の研究に従事。日本機械学会，情報処理学会，計測自動制御学会などの会員。IEEEのFellow会員。（日本ロボット学会正会員）