解説

人工知能におけるロボットの役割

Role of Robots in Artificial Intelligence

松原 仁* *電子技術総合研究所
Hitoshi Matsubara* *Electrotechnical Laboratory

1. はじめに

知能にとって行動は本質的であるという考え方は、人工知能でもはや共通の了解になりつつある[1]。しかし、行動しさえすればよいかといえば、もちろんそうではない。煙草の自動販売機は環境にうまく適応して行動するが、人工知能が目指しているのは煙草の自動販売機ではない。本稿では、ロボットを通じて（行動する）知能を探究することの意味について考えてみたい。例として人工知能で難問とされるフレーム問題を取り上げ、ロボットを通じていかにフレーム問題へアプローチできるのかを論じる。

2. 人工知能におけるロボット

人工知能には「困ったときのロボット頼み」という言い方がある。研究が行き詰まってしまったときはとりあえずロボットに頼ろう、という意味である。人工知能も常に行き詰まっているわけではない[†]ので、いつもロボットに頼ってばかりでもない。人工知能には40年ほどの歴史があるが、10数年おきにロボットに頼る時期が巡ってきており、現在が偶然その時期に当たっているのである。人間の知能に様々な側面が存在することに対応した形で、人工知能には問題解決、知識表現、機械学習、自然言語理解、画像理解など様々な研究分野が存在する。それぞれの分野はどれもそれなりに重要で、なおかつ難しい。人工知能が順調な時期は、それぞれの分野において深く掘り下げる方向で研究が進められる。順調なうちはそれがいい方向へ向かうが、徐々に手段が目的化して変な方向へ向かってしまう。最初 は人工的に知能を構成するという大きな目標のために始められた研究分野であったはずなのに、研究分野の完成度を上げることが目的になってしまうのである。そのまま放っておくとその研究分野は死滅に向かってしまう^{††}ので、本来の目的を取り戻すために、そのときの要素技術を結集し

たトータルシステムを作ってみようとする。そのトータルシステムがロボットなのである[2][3]。

トータルシステムであるロボットを作って動かしてみると、当然ながら期待したような知能ロボット^{†††}にはなっていない。そこで何が足りないのかを分析して要素技術に分解し、それに対応する分野の研究を深く掘り下げることになる。これまではこういう形で人工知能全体が進展してきたし、これからもしばらくは同じ形で進展していくことが期待される。

ロボット研究ではシミュレータよりも実機が尊ばれる傾向が強い。シミュレータでは状況設定を人間が与えるので、無意識のうちにうまく動くように状況を設定してしまいがちである。「シミュレータはうまく動き過ぎる危険を常にはらんでいる」という言い方がされる。シミュレータで動いたとしても、それが実機でそのまま動くとは限らない。実機は仮想ではなく現実の環境が対象なのでシミュレータとは難しさのレベルが異なる。それはその通りである。しかし、人工知能にとってはほとんどの場合シミュレータでも十分である。それは、ロボットが人工知能の成功を確認する道具ではなく、失敗を確認する道具だからである。失敗とは、期待したような知能ロボットにはなっていないという意味である。人工知能にとってロボットのシミュレータ[4][5]は非常に有効である。

3. フレーム問題

フレーム問題とは、限定された情報処理能力しかないシステムがその能力をはるかに上回る複雑性を持つ情報をどのように扱うかという問題である[6]~[8]。かつて「フレーム問題」は形式論理で知識をいかに効率的に記述するかという（ロボットには直接関係なさそうな）狭い意味に

原稿受付 1996年3月6日

キーワード: Artificial Intelligence, Frame Problem, Behavior-based Intelligence, Bodeliness

*〒305 茨城県つくば市梅園 1-1-4

*Umezono, Tsukuba-shi, Ibaraki

[†]その一方で人工知能は行き詰まっていると主張する人は常に存在する。

^{††}その分野の研究者に「いまのままでは何かおかしい」という危機意識がないと本当に死滅してしまう。筆者の意見では、知識表現の非単調論理という分野は死滅への道を進んでいると思う。

^{†††}日本の人工知能研究者にとっての知能ロボットのイメージは鉄腕アトムである。

解釈されていたが、実は知能全般に関する一般的な問題であることがあきらかになった。人間がフレーム問題に直面する例として「この置き方は誰?」という遊びを考えよう。

この置き方は誰?: 出題者と解答者、および他の参加者が何人かいるとする。出題者はまず、(例えば) 鉛筆をいろいろな方向に向けて置いては、「この置き方は溝口さんを指している」とか、「この置き方は稲葉さんを指している」とか言いながら、解答者の前で何度か例を示してみせる。溝口さんや稲葉さんはその場にいる参加者である[†]。次に、出題者は、鉛筆をある方向に向けて置き、「では、この置き方は誰を指しているか?」と聞く。解答者はこれに答えなければならない。

このゲームの規則を知らない解答者は、どの置き方が誰を指しているのか分からず、しばらくからかわれ続ける。その状態を、フレーム問題が解けずに苦しんでいる、と表現する。実は、鉛筆の方向は誰を指しているかにはまったく関係がなく、指されているのは、鉛筆を置いてから最初に声を出した人なのである。このゲームに関係する情報は、参加者の手の動きや声など、解答者が直接感覚できる範囲の中に限られている。それでもなお、その範囲内に膨大な情報があり、しかもどの情報が特に重要かが分からないため、しらみつぶしの探索を強いられるのである。

人工知能ではしばしばこのフレーム問題に頭を悩ませられる。高水準ロボット言語[9]のプログラミングもよい例である。ロボットハンドによってテーブル上の積木を操作することをタスクとして想定する。問題解決のプログラムによって目標とする状態を達成するための手順を生成できたとしても、ロボットが常に正確に積木を並べられるとは限らない。ときには運んでいる途中で積木を落すこともある。そのような事故が生じたら、回復のための方策を考えなければならない。しかし事故の影響がどこまで及ぶか限定しにくい(何も支障がないかもしれないし、すでに並べ終わった積木の列を崩しているかもしれないし、テーブルまで破壊しているかもしれない) ために、回復をどうすればよいかを指定するのが非常に難しいのである。これは人工知能におけるフレーム問題の典型例である。

4. フレーム問題の解決不能性

人間もロボット(コンピュータ)もその情報処理能力は有限なので、その能力を越えた情報の量に対してはうまく対応することができない。その意味で、人間にもロボットにもフレーム問題を(完全に) 解くことはできないのである。フレーム問題に悩むということは行動の中断を意味す

[†] 実在の人間とは無関係である。

^{††} 人工知能の用語で常に成り立つとは限らないがおおむねうまく働く経験則のこと。

るので、しばしばフレーム問題に悩んでいては生存に差し支える。人間はふだんフレーム問題に悩んでいるように見えない。それは、人間は膨大な情報に枠を囲み、その枠の中の情報だけを参照しているからである。そうしていれば情報処理能力の範囲内で対応できるので、フレーム問題に直面しなくて済む。このことを筆者は「フレーム問題の現実的な解決」[8]と名付けている。

車の運転の例を考えよう。初心者では当然であるが運転が下手である。彼らにとって、運転中に注目しなければならない情報の量が膨大過ぎて処理能力を越えているからである。運転中にはいつてくる膨大な情報の中のどの部分が運転に関係しているかがうまくつかめなくてパニックに陥る。例えば、歩行者の服の色とか、横を走っている車から聞こえてくるカーステレオの音色とか、ふつうは運転とは関係ないということがただちには分からないのである。さらに判断を難しくしているのは、歩行者の服の色が常に運転に無関係というわけではないということである。警察官の制服の色の存在は運転に大いに影響を与える。経験を積んで運転に熟達すると、運転に必要な情報だけに枠を囲うことによって、上手に運転することができる(フレーム問題を現実的に解決することができる)。

運転の熟達者もフレーム問題を完全に解決できているわけではないので死角が存在する。例えば、熟達者は視界の横から出てくる物体には敏感に反応できるが、視界の上から落ちてくる物体には鈍感な反応しかできない。上から(雨以外の) 物体が落ちてくる可能性は少ない(したがって経験がない)ので、囲った枠の外に存在しているためである。

5. 人間にとっての情報の枠

人間はふつう有限の大きさの枠を情報に対して囲っている。ほとんどの情報処理はその枠の中の情報を参照することによって済むようになっていく。フレーム問題の現実的な解決のための枠を構成しているのがいわゆるヒューリスティックス^{††}の集まりである。多くの人間が持っていると思われるヒューリスティックスには例えば以下のようなものがある[10][11]。

- 結果には原因がある(因果律)。

ある事象が存在すれば、それには原因が存在し、またそれによる結果が存在する、と思うこと。すなわち事象 A が存在すれば事象 B と C が存在し、B の結果が A で A の結果が C である、と思うこと。

- ものごとは時間的にほぼ連続的に推移する。

ある時刻の世界とその一瞬後の世界はあまり劇的には変化しない、と思うこと。

- ものごとは空間的にほぼ連続的に推移する。

ある場所の世界とそのすぐそばの世界はあまり劇的に

は変化しない、と思うこと。

- 自分の及ぼす影響は、数え上げられる範囲まで、すなわちほぼ自分の身の周りの範囲までに限定される。
自分が世界に対してできることは、手を動かしたり足を動かしたり声を出したりといったことなので、その影響がふつうはそうは広くない、と思うこと。また手・足・口の数に限られているので、できることはそうは多くない、と思うこと。
- 自分に対する影響は、数え上げられる範囲から、すなわちほぼ自分の身の周りからに限定される。
一つ前の逆である。

人間は、あるものは先天的に、多くは後天的にこれらのヒューリスティックスを身につけている。前述の「この置き方は誰？」の遊びは、ふつうの人間が「目にはいつてくる情報のみに注目すればよい」というヒューリスティックスを採用しがちな傾向を逆手にとったものである。人間が、これらの多くのヒューリスティックスを行動することによって獲得しているのは明らかである。例えば、一步動いてみて（原因に相当する）、それによって世界がどう変わるか（結果に相当する）という対応関係を学ぶことでヒューリスティックスとしているのである。人間が目で見えて認識できる範囲や手を伸ばして届く範囲は物理的に限られている。このような物理的な制約によって、人間が参照できる情報が制約されている（枠で囲われている）のである。

6. 情報の枠の相対性

本稿を書いている最中に、チェスの（人間の）世界チャンピオンである Kasparov がコンピュータの（実質）チャンピオンである Deep Blue に正式ルールで初めて敗れるという事件があった[†]。Deep Blue はチェスのための専用ハードウェア（チェスマシンと呼ばれる）を用いて 1 秒間に 2 億手以上を読むことができる。Deep Blue はそのコンピュータパワーを生かして力任せで指し手を決める。原則としてすべての可能な手をできる限り深く全探索するのである^{††}。人間のチャンピオンは全探索などはしない。局面を一目見れば見込みの高い候補手がただちにいくつか思いつくので、あとはそれらの手だけに絞って善し悪しを検討するのである。人間のチェスの専門家はチェスを覚えてから強くなるための訓練を通じ、見込みの低い手は考えないという思考体系が身につけてしまっている。その思考体系は多くの場合に効率的である。チャンピオンぐらになれば、一目で思いついた手がほとんどの場合に正解（最善手）になっている。フレーム問題の文脈からすれば、チャンピオンは情報に対して適切な枠を囲ってフレーム問題を

現実的に解決していることになる。しかし、たまには見込みの低い手が最善手の場合もある（こういうのを「盲点」と称する）。全探索をしていれば盲点は存在しないので、Deep Blue は筋の悪い最善手を選ぶことができる。

このようにタスクによっては、コンピュータの情報処理能力が上がれば、情報に対して枠を囲むことなく、力任せで全情報を処理した方が問題解決の結果がよくなることがある。枠を囲うべきかどうか、囲うとしてどれくらいの枠を囲うべきかは、問題の難しさと問題を解く主体（人間あるいはコンピュータ）の情報処理能力とに依存する相対的なものである。

7. フレーム問題に悩まないロボットは

人工知能はフレーム問題にまったく悩まないコンピュータを作ろうとしているのではない。フレーム問題に悩まないシステムを作ることは簡単である。例えば、煙草の自動販売機はフレーム問題にまったく悩まない。煙草の自動販売機は、ある重さのある材質の金属（お金）が投入されてある部分（ボタン）に圧力がかかる（人間が押す）とある部分を開ける（煙草を下に落す）という単純なシステムである。単純ではありながら、「人間に煙草を売る」というかなり知的なタスクをこなすことができる。これがフレーム問題に悩まないのは、「人間に煙草を売る」という特化したタスクのみを対象としているからである。

人工知能の研究が目指しているのは、そしておそらくロボットの研究が目指しているのは、煙草の自動販売機ではない。あるタスクに特化した機械ではなく、なんらかの意味で汎用性を備えた機械を作ろうとしているのである。Deep Blue はチェスに特化した機械であるが、Kasparov はチェスに非常に適応しているとはいえ汎用の人間である。人間は、様々なタスクに対応できる汎用性を得ている代償として、ときにフレーム問題に悩むのである。ロボットも、もし汎用性を得ることができたとすれば、その代償にときにフレーム問題に悩むことになる。

従来の人工知能（Good Old-Fashioned AI）がもっぱら環境から独立した知能を考えていたのに対し、環境との相互作用こそが知能の本質であるという考え方が最近になって様々なところから出てきている [1]。Brooks の「行動に基づく知能（behavior-based intelligence）」[12] はその一つである。この考え方自体は正しい。すなわち、認知主体（人間もしくはロボット）が独立してそれだけで知的なのではなく、認知主体がその環境に適応している様子が知的なのである。最近のロボット研究の多くはこの考え方に基づいていると思われる。ロボット学習 [13] の方式として強化学習の人氣が高いのも、この方式がいかに環境との相互作用の上に成り立っているように見えるためであろう。強化学習では環境の状態と状態に依存して得られる報酬を入

[†]6 回戦の第 1 局に負けただけで、最終的には人間の方が勝ち越した。

^{††}もちろん $\alpha - \beta$ などの枝刈りはしている。

力し、将来にわたって得られる報酬を最大にするような行動を選択するための学習を行う。この方式の特徴は、明示的な教師なしで学習ができることと、学習が少しずつインクリメンタルに進行することである。

強化学習の持つ二つの特徴は確かにロボット学習にとって魅力的であろう。機械学習の従来の方式の多くは、学習がうまくいくようにあらかじめ仕込みがしてあるという「わざとらしさ」が感じられる。それに対し強化学習は「わざとらしさ」が感じられない。しかし無から有が生じるはずはないので、その意味で強化学習にも当然学習がうまくいくための仕込みがある。従来の方式に比べて「わざとらしさ」が目にとまりにくく過ぎない。「わざとらしさ」を目にとまりにくくしたために、そのぶんだけ学習に要する時間が長くなるようになっている。強化学習も長所と短所を合わせ持つ機械学習方式の一つなのである。環境との相互作用の重視は、よく注意をしていないと、「わざとらしさ」に正面から立ち向かわずに「わざとらしさ」を隠すことになりかねない。「環境との相互作用を考えればフレーム問題は生じない」という主張が環境重視派からなされることがあるが、一見目にとまりにくくなるだけで、フレーム問題自体はなんら解決されていないのである。

人工知能が目指すのはあくまで人間のような知能である。煙草の自動販売機がいかにも環境に適応しようともそれは目指すものではない。従来の人工知能 (GOF AI) 研究は「月に行くのが目標だと言って、木に登って目標に近付いたと称している」と酷評された。環境との相互作用の重視も行き過ぎになると、「人間のようなロボットが目標だと言って、ゴキブリのようなロボットを作って目標に近付いたと称している」という酷評にさらされることになる。

8. おわりに

本稿では人工知能におけるロボットの役割についてフレーム問題を中心に考察した。人間がフレーム問題を現実的に解決できるのは、人間が体を持って行動する認知主体のためである。人工的な知能がフレーム問題を現実的に解決するためには、それが体を持って行動し、行動を通じてさまざまなヒューリスティックスを身につける必要がある。その過程

を検証することがロボットの役割である。人工知能はフレーム問題に悩まないロボットを作ろうとしているのでは決してない。フレーム問題に人間並に悩むロボットを作ろうとしているのである。

参考文献

- [1] 松原仁: “AI マップー辻三郎先生の記事へのコメント”, 人工知能学会誌, vol.8, no.5, pp.543-550, 1993.
- [2] H. Inoue: “Building a bridge between AI and robotics,” Proc. of IJCAI-85, pp.1231-1237, 1985.
- [3] H. Inoue: “Vision based robot behavior: tools and testbeds for real world AI research,” Proc. of IJCAI-93, pp.767-773, 1993.
- [4] 松原仁, 開一夫, 本村陽一, 國吉康夫: “マルチエージェントにおける学習への実験的アプローチ”, 日本ソフトウェア科学会第4回マルチ・エージェントと協調計算ワークショップ, 1994.
- [5] 松原仁, 野田五十樹, 開一夫: “サッカーにおけるチームプレイの学習に向けて—シュートすべきか/パスをすべきか—”, 人工知能学会第9回並列人工知能研究会, 1996.
- [6] 松原仁, 橋田浩一: “情報の部分性とフレーム問題の解決不能性”, 人工知能学会誌, vol.4, no.6, pp.695-703, 1989.
- [7] 松原仁: フレーム問題をどうとらえるか, 日本認知科学会編「認知科学の発展」, vol.2, pp.155-187, 講談社サイエンティフィク, 1990.
- [8] 橋田浩一, 松原仁: 知能の設計原理に関する試論—部分性・散層・フレーム問題—, 日本認知科学会編「認知科学の発展」, vol.7, 講談社サイエンティフィク, 1994.
- [9] 松原仁, 岡野彰, 井上博允: “作業目標レベルのロボット言語の設計と試作”, 日本ロボット学会誌, vol.3, no.3, pp.220-228, 1985.
- [10] 松原仁, 橋田浩一: フレーム問題の疑似解決のためのヒューリスティックスとしての因果律, 日本認知科学会編「認知科学の発展」, vol.6, 講談社サイエンティフィク, 1993.
- [11] 中島秀之, 松原仁, 大澤一郎: “因果関係によるフレーム問題へのアプローチ”, 人工知能学会誌, vol.8, no.5, pp.83-91, 1993.
- [12] R.A. Brooks: “Intelligence without representation,” AI Journal, vol.47, pp.139-159, 1991.
- [13] 開一夫, 松原仁: “機械学習からみたロボット学習—能動的学習機構に向けて—”, 日本ロボット学会誌, vol.13, no.1, pp.5-10, 1995.

松原 仁 (Hitoshi Matsubara)

1959年2月6日生。1981年東京大学理学部情報科学科卒業。1986年同大学院情報工学専攻博士課程修了。工学博士。同年電子技術総合研究所に入所。現在推論研究室ならびに協調アーキテクチャ計画室所属。協調学習、知識表現、コンピュータ将棋などに興味を持つ。日本認知科学会、人工知能学会、ソフトウェア科学会などの会員。
(日本ロボット学会正会員)