講座

機械システムの知能化 I : ロボティクスの維持神話

To Make Mechanical Systems More Intelligent I: A Sustaining Myth 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

ロボット研究の成果を結集し、ロボット工学の確立を目指して、日本ロボット学会が設立されたが、昨年11月の学会総会では10周年を祝った。ロボット関連の最大の国際会議である“Robotics and Automation”に関するIEEE国際会議も、1993年5月、Atlanta市で第10回の大会を終えた。ロボティクス（ロボット学と関連技術の総称）を学問の対象として取り組み出してから、今年は第二の“decade”に入る。

1980年代の初め、日本では確かにロボットのブームがあったが、その頃すぐにも“知能ロボット”が誕生するかのようマスコミははやした。しかし、この10年は、知能ロボットを創る前に、むしろ研究すべき幾多の課題があることに気づいた期間であったと言えるのではなからうか。一足飛びに知能ロボットを創る夢は、他方では、人間の“心”をコンピュータで実現したいとする人工知能の夢と対比できる。能天気なコンピュータ科学者と同様に、知能ロボットがすぐにでもできるとはやしたロボット技術者も能天気ではあった。

ロボット研究の夢は、具体的に表すとすると、単純でかつ明解であり、日本では「鉄腕アトム」が好個例となる。しかし、学会を維持し、研究費を獲得し、21世紀に掲げる科学技術上の主要研究プロジェクトとしてロボティクスを標榜するには、科学技術の他分野の専門家集団に我々の研究の主要性をアピールできる根拠となる教典、あるいは、維持神話が必要である。“知能ロボット”を単なる夢とせず、これを科学技術の新たな枠組みとして捉えることが可能であることを我々は示さねばならない。

この講義では、まず、ロボティクスと人工知能をめぐる哲学的論争をふり取りながら、ロボティクス研究者の依り拠とすべき維持神話の問題を論じてみたい。第2回は維持神話として掲げる“手先技量の力学的理解”へ向けて、ロ

ボットのサーボ系のあり方と、運動制御の基本問題を論講する。第3回以降は手先技量の獲得のための適応と学習の力学的展開を解説し、これから研究すべき新たな課題は最終回の講義の中でまとめる。

2. 人間機械論とロボット

“ロボット”という名前も概念も無く、ロボット産業も無かったが、17世紀に活躍した哲学者デカルトは人間に似た自動機械を既に想定し、深い考察を行っている。1637年オランダで出版された著書「方法序説」[1]において、人間や動物の生命現象が物理的かつ機械論的な法則の下に説明できることを論じながら、自動機械と人間の異なる本質にも迫っている。まず、“各動物の体内にある骨、筋肉、神経、動脈、静脈、その他のすべての部分から成る大きな集合に比べるなら、実にあまりにもわずかな材料しか使わずに、いかに種々雑多な自動体(automates)を、あるいは動く機械を、人間の技能は作り出し得るか——”[1]、と述べながら、我々の身体に似ており、人間の動作をでき得る限り模倣した機械が作り得たとしても、それが人間にはなり得ないことも指摘している。すなわち、これらの機械が人間とは異なることを確実に知る判定法が2つあり、1つは言葉を使って意志を伝え合えるかどうかの判定法であるという。ある種の言葉を発する機械は案出できても、場面や出会いに応じる一切の意味に対して適切に回答できる言葉を安排できる機械はあり得ない、と。そして、“第2に、かかる機械は、私どものいかなる者とも同等に、あるいはそれ以上に多くの事を遂行するとしたところで、このものにはどうしても免れ難い欠陥がある。何が欠陥かと言えば、かかる機械は自覚によって動くのではなく、単にその器官の装置に従って動くだけだからである。けだし理性はいかなる種類の出来事であろうとこれは応じうる万能の道具である。これに反して、それらの器官はといえば、個々の動作に対して個々別々の装置を必要とする。それ故に、理性が私どもを動かすような調子に、ただ1つの機械のうちに、私どもの全生涯のあらゆる場合に応じて、これをうごかすに足るだけの種々の装置を施すということは、恐らく不可能なことである。”[1]。

他方、デカルトは“我思う、故に我あり”を哲学の第一

原稿受付 1993年11月29日

キーワード: Robotics, Artificial Intelligence, Sustaining Myth of Robotics, Biological Evolution, Skill Aquirement

*〒113 東京都文京区本郷 7-3-1

*Bunkyo-ku, Tokyo

原理として出発し、この世界の物理的実体のほかに、何らの身体を持たない精神（心的実体）が仮想できることを推論し、しかし、そうだからといって“我”が身体的実体であることも否定できないと主張する。こうして、人間の技能が自動機械(automates)を創り出し得ることを知る人には、神の手に造られ、驚嘆すべき運動を内に秘めたこの人間の身体を1つの機械として眺められ得るとし、かかる人々には不思議に思われるものは絶無である、と述べるのである。ここから、デカルトは心臓の働きを論じ、同時代に書かれたハーヴェイ(W. Harvey)の血液循環を取り上げながら、果ては精神と肉体を結ぶものとして心臓で作られる「精気」を想定し、これが脳に直接昇り、脳から筋肉に運ばれ、人体の各部を動かす力を与える、と説明した。

世界を「物理実体」と「心的実体」に分けるデカルトの考え方は二元論と呼ばれ、あらゆる生命現象が物理的に説明できるとする考え方を「人間機械論」と呼ぶ。ここには、17世紀の機械技術と科学の水準が色濃く反映している。当時、既にゼンマイと歯車、脱進機を使った精巧な時計が作られ、これらの技術は自動人形(オートマトン)に応用され、いろいろな精密機械が生み出されていた。他方、生理学はやっと血液循環が発見された段階であり、生物進化の考え方は無く、神経細胞も見つかっていなかった。デカルトの時代では、精神と身体を結ぶ生理学的知識が全く無かったのであり、デカルトがある誤謬を犯したとしても、二元論がその後の物理科学の発展の精神的基礎を担っていたことは疑いようがないのである。今や生物学は遺伝の分子機構を明らかにし、筋肉の収縮を分子レベルで説明できる域にまで達しているが、この解明の過程は、結局は、物理的実体を合理的な論理(理性)で説かんとしたデカルトに代表される合理主義的哲学の成功とみることができる。

生理学の発展はハーヴェイの血液循環の発見(1628年)に始まり、カハール(S. Cajal)による神経細胞(ニューロン)の発見を経て、神経生理学の誕生につながる長い道程があり、この延長線上に現代の脳の研究がある。他方、工学の世界では、第二次世界大戦後に作られた電子計算機がたちまち時代の寵児となり、コンピュータと呼ぶ精巧かつ万能的な道具の能力を次々と拡大させ、コンピュータサイエンスと呼ぶ新たな概念を発展させた。ここに至って、デカルトが説明を避け、神が造ったとした心的実体を科学として迫ろうとした科学技術者が出て来たのである。

四半世紀前、サイモン(H. Simon)[2]は、“20年以内に機械は人のできる仕事は何でもやることができるだろう”，と予測し、約20年前ミンスキー(M. Minsky)[3]は、“一世代以内に「人工知能」を創造する問題は本質的に解決するだろう”と述べた。

3. 人工知能批判

今振り返れば、この2つの予測は見事に外れている。し

かし、1980年前後は人工知能の研究は未だ絶頂期にあった。知識表現の道具と知識処理に適した高級プログラム言語が創られ、推論エンジンを働かせれば、「心」までシミュレートできると説かれて、信じた人達も多かった。日本ロボット工業会が名づけた“ロボット普及”元年の頃が真にそうであった。

ロボットのコントローラはマイクロプロセッサの発達でいくらかでも能力の向上が見られそうであった。知識ベースを取入れ、推論させれば、ロボットはすぐにでも高知能化できると錯覚したのである。特に、アメリカではロボティクスを人工知能の応用か、あるいは人工知能の研究成果の格好のテストベッドとしか見なかった傾向が強く、ロボットに課すべき知的作業は人工知能によって簡単に実現できると錯覚したのである。

1980年代の初め、人工知能とロボットが真にブームであった頃、人工知能批判がカリフォルニア大学バークレー校の2人の教授から挙がった。ドレイファス(H. Dreyfus)とサール(J. Searle)である。ドレイファス[4]は「常識の知識」(commonsense knowledge)あるいは「日常の物理学」(everyday physics)の定式化の困難を指摘し、これらには自然科学の伝統的な諸分野に見られる合理主義的論理体系があり得ないのではないかと、ときえ主張した。サール[5]は、人間が内容ある思考を行うことができるのは、脳の生物学的性質による、と主張し、形式的な計算しかできないコンピュータが心を持つことは不可能であると指摘した。もう少し、この2つの主張を敷衍してみよう。

ドレイファスは、常識的知識の問題が記号処理的AIのすべての進歩を阻止し続けている、と主張した。常識の背景はむしろ、技能ないし熟練と識別能力の組合せや、常識的理解の集積したものであり、それはむしろノウハウ(know-how)であろう、とした。ここにノウハウは手続き的ルールを意味せず、むしろ沢山の特殊例の中で何をなすべきかを知ることの意味するのだ、と。“例えば、常識的物理学は、事実とルールの集合を使って詳細に説明しようとするとは極度に難しくなる。説明しようと試みると、見出した事実とルールを理解するためにもっと常識が必要になるか、あるいは、子供の心にはとてもあり得ないような複雑な公式を作り出すかのどちらである”[4]と述べ、また、“理論物理学をやるのはまた、定式化できないかもしれないような背景となる技量を必要とする。しかし、そのドメイン(理論物理学)そのものは、これらの背景的技量を参照することのない抽象的法則によって記述されうる。AI研究者は誤解して、常識的物理学もまた抽象的原理の集合として表現しうると違いないと結論している。しかし、それはただ、常識的物理学の理論を見出す問題が解けないのは、そのドメインが理論的構造を持たない故なのかもしれない”([4], アンダーラインは筆者が引く)。

サールの論調は異なる。まず、“デジタルコンピュー

タは考えられるか”という疑問を提示しつつ、“そもそも、コンピュータが考えられるとか、コンピュータが感情や情動を持ち得るとか、コンピュータがその他のことをすべてできるなどということを真面目に考える人が現れたのはなぜなのであろうか”[5]。形式的な記述が可能なプロセスは確かにコンピュータによってシミュレートできる。竜巻の生成と発達や火事のコンピュータシミュレーションもできる。しかし、誰もこのシミュレーションによって竜巻が起こって自分が吹き飛ばされ、あるいは建物が焼き尽くされると考える人はいない。にもかかわらず、心のプロセスのコンピュータシミュレーションが実際の心的過程を持つと本気で考える人がいることに驚きあきれる、とサールは言う。そして、自分の論拠が次の4つの命題（公理）から帰結すると主張する。

1. 脳が心の原因である。
2. 統語論は意味論を生むには不十分である。
3. コンピュータのプログラムはその形式的な構造すなわち統語論的構造のみによって完全に定義される。
4. 心は、心的な内容、すなわち、意味論的内容を持つ。

そして、これらの公理から、いくつかの結論が引き出せるとする。その一つだけをここでは引用しておこう[5]。

結論1 いかなるプログラムもそれだけでは、1つのシステムに心を与えるには不十分である。要するに、プログラムは心ではいいし、また、それだけでは心を持つには十分ではない。

サールの議論を展開するのはこれくらいにして、最後に、サールの創作した一つの比喩を紹介しておこう[5]。ここに精巧な腕時計があるが、その時計ばかりか、周辺の沢山の時計についても、それらがどのようにつくられ、どのように時を正確に刻むか、誰も知らなかった場面を想定する。そして、時計の動きを理解するためには、時計を壊すしかなかったとしよう。ここで、一群の研究者が、「機能的に等価で、同程度に正確に時を刻む機械を設計できたならば、そのとき、時計の動き方が理解できる」と主張したとする。そして、砂時計を作り、「時計の動き方がこれでわかった」というか、あるいは、「この砂時計をその腕時計と同程度に正確にすることができたならば、我々は時計の動き方を理解できたことになるだろう」と言うとする。この比喩の中の“時計”を“脳”に、“砂時計”を“コンピュータ”で置き換え、更に“時を刻むこと”を“知能という概念”に置き換えてみたとき、1980年代初頭の頃の人工知能と認知科学の合唱が浮かび上がってくるという。

4. 記号処理仮説対ニューラルネットワーク

ドレイファスの舌鋒は記号処理仮説に基づく人工知能に対して鋭く、1980年代の中頃、一端は死んでいたパーセプトロンに新しい衣を着せて生き返らせたコネクショニ

スト達(ニューラルネットワークの研究者群)には鈍いように見える。しかし、ドレイファスも、ニューラルネットで日常の“知”のどれだけがとらえられるか、と疑問符を呈示している。ニューラルネットは設計者によるつくりつけの“知”であり、有ると主張している汎化能力でさえ、設計者のやり方次第になっているのではないかと、論じる。他方、サールの「心的プロセスは脳の生物学的性質から来る」という主張はコネクショニスト達に味方したかのように見える。実際、ノイマン方式に基づくコンピュータのあり方を否定し、人間の脳のアーキテクチャをお手本にして知能を実現するニューラルネットの方法論は、サールの公理1~4に少なくとも矛盾しないかのように見える。しかし、サールの砂時計の比喩についてはどうであろう。ニューラルネットは砂時計でないと主張し続けられるだろうか。もしそれが砂時計とすれば、精度を高めさえすれば(ニューラルネットのサイズを大規模にしさえすれば)、時計(脳)を理解し、実現できたことになるのだろうか。

ドレイファスは、ニューラルネットワークに人間のような一般化の能力や常識の“知”を実現するには、そのサイズやアーキテクチャ、及び初期結線の構成を人間の脳と同じにしなければならないだろう、と結論している。サールの砂時計の比喩から結論するならば、人間の“知”を理解するには、時計を壊してそれぞれの部品とそれらの機能、及び互いの連携を徹底的に調べつくす(神経生理学の推進)ことしかないことになる。

こうして、人工知能やニューラルネットの研究者のみか、ロボティクスの研究を標榜する我々も、2人によって徹底的に批判され、急流におぼれ、立つ瀬はなくなってしまったのであろうか。筆者が本講義で最初に論じてみたかったのは、二人の論点に対する反駁である。少なくともロボティクスについては、その依って立つことのできる“瀬”があり得ること、すなわち、ロボティクスと呼ぶ科学ドメインの維持神話があり得ることを主張しておきたいのである。そのために、人間のもつ“知”がどのようなものであれ、生物進化の過程で獲得されたものであることに言及しておかねばならないが、その前にドレイファスの言う知的な振舞いにおける身体の役割[6]に言及しておかねばならない。ドレイファスはある論文[4]では日常の物理学(everyday physics)と常識の知識(common sense knowledge)を明確には区別していないが、デカルトでさえ想定していた人間の運動系の知的振舞いの機械による実現(everyday physics)の困難さはサイモン自身も認め出していると指摘している。実際、サイモン[7]は中枢神経系の自動化(コンピュータによるシミュレーション)は、感覚系や運動系の自動化が実現するよりずっと以前に実現するだろうと述べている。別の言い方で、物理学や化学工学で行う計算や推論のプロセスを考える大学教授よりも、ブルドーザーの操縦を機械にやらせる方がもっと困難であると

も言っている。ドレイファスは、この点を把らえて、その中枢神経系が運動系に依存していたらどうであろうかと疑問を投げかける。“あるいは現象学的に言うならば、もし確定的、論理的で切り離された「高次の」形式をもつ知識が、大域的で入り組んだ「低次の」形式をもつ知識から必然的に派生し、それによって必然的に誘導されたらどうだろうか。これらの仮定が正しければ、人工知能と伝統（的合理主義）哲学を支える三つの前提に基づくサイモンの楽観論は根拠を失うことになるだろう” [6]、と。

5. 進化とインテリジェンス

人のインテリジェンスの高さは脳の進化から来る。脳の歴史は約6億年前の“ホヤ”の神経系に遡る。ホヤの幼虫にはわずか300個だが神経細胞が見られる[8]。約2億年前、魚から爬虫類が分かれ、哺乳類は1億4千万年前に分かれはしたが、約6千500万年前の地球激変までは恐竜の時代であった。恐竜が滅亡すると、哺乳類は次々と進化した。350万年前直立2足歩行したアウストラピラクス（猿人）が出現する。猿人は背が低く、脳容積も400~500cc位で、現在の類人猿に匹敵するが、足のすねの骨格は人間に近く、長い距離を歩き、走り出していたことが推察される。直立2足歩行によって手が解放されて自由を得、足や手の骨格ばかりでなく、口唇や咽喉周辺の骨格構造も急激な進化を見た。

人間が類人猿と異なる最大の特徴は、手先が器用になり得て、物や道具類を作り出したことと、声帯が発達し咽喉の諸器官を自由に動かして音声を作り出したことにある。アフリカの象牙海岸の近く、奥深いジャングルに住むチンパンジーの群れ（最近発見されたチンパンジーの群れだが、今迄のチンパンジーより知能が高いように見えるとのこと）の集団生活の様子が英国BBCによって撮影され、1993年夏にテレビで放映された。チンパンジーは明らかに石や木片を使って胡桃を割り、集団行動で互いに叫び声をあげて連絡をとりながら、他種の猿の狩りを行っていた。チンパンジーの群れには、道具を作り出し、音声を獲得する寸前の知的雰囲気のみがみだっていた。しかし、最初に道具を作り出したのは人類であり、約240万年前アウストラピテクスから分岐し、150年前まで主として東アフリカで生きていたホモハビリスが初めて石器を作ったと言われる[8]。ホモハビリスの脳容積は700ccであり、化石の分析によると右利き57%に対して左利き43%と推察され、ブローカ野（運動性言語野）を持つ左脳の機能が高まり出したことが窺える。ちなみに、チンパンジーの左利きと右利きの割合は半々である。1000ccの脳容積をもつ約150万年前のホモエレクトウスの時代には既に火を使ったといわれる。約20万年前に現れ6万年前に絶滅した古代型ホモサピエンス（ネアンデルタール人）は既に1500ccの脳容積を持ち、喉仏の軟骨は現在の我々と同じになり、亀甲形の

石器を使っていた。3万5千年前から現代に至る現代型ホモサピエンス（クロマニヨン人）は、3万年前、石窟に投げ槍をもつ人の図を彫り、芸術を生み出していた。

枝木をたたき切り、棒切れとして使えば高い梢の木の実をたたき落とせる。石を加工すれば、狩猟の道具となり、木片を加工し、肉を裂くことができる。火をおこし、制御するには道具を作った手があれば何でもなかったであろう。動物の骨も道具になり得たし、やがて皮をはぎ、繊維を編み出したに違いない。料理には容器を必要としたが、木器が作られたのは、化石として証左がないので判然としないが、料理を始めた時と同時であったろう。そして、人類は土器を作り、金属器の創造へと移行する。

さて、手先技量の発達及び音声言語獲得のプロセスは脳の進化と切っても切れない関係にある。そして、手先技量は人間のコミュニティの中で育まれ、狩猟と料理の文化の中から磨き込まれ、脳を刺激し、器用性を高めたのであろう。ここに手の形態的变化（親指が他の指と対向した）や形質の変化だけでなく、道具を作る行動や練習を通じて上手になる学習能力や、腕と手先が一体となって作業の場面に順応し、適応する能力そのものに進化があったに違いない。手は四足動物の前足からの進化であり、哺乳類の脚は魚の“ひれ”からの進化である。したがって、五本の指が協調して同時に動き、棒を握るのは自然である。樹に留まる鳥や樹上生活する猿が枝から枝につかまるときの手足の協調はむしろ運動の基本である。他方、人が親指と人差し指だけを使って物をつまむ動作は、その原型が猿同志の毛繕いに見られるが、つまむことの器用さは人間に進化した過程で獲得されたに違いない。指1本ずつを独立に動かし、操作できるのは脳の発達のおかげであり、逆に、物作りからこのように脳が進化したと言える。物造りは、どんな場面に何をどのように使うかを想定する創造力を養い、材料を選択し、加工の段取りを考える計画力と使い勝手を試し、比較して良し悪しを判断する理性を養い、脳の高次情報処理能力の獲得に大きく寄与したに違いない。

ところで、道具を作る動作は、身体全体と対象との力学的相互作用そのものである。特に、人の場合、両腕と両手が対象物と相互に力学的な役割を担って作用し合い、目標の物体を操作し、目的物が造られる。恐らく、石器を別の石で割る動作が原型であろうが、更に、梢の実をたたき、落とし、動物の肉を裂き、魚の身をはぐプロセスで手先技量は取り込まれていったに違いない。人間が音声言語を取り込んだプロセスも分析されている。チンパンジーも確かに言葉を理解する能力を持つが、音声で互いにコミュニケーションすることはできない。ジョージア州立大学言語研究センターで飼育されているボノボ（チンパンジーの一種だが別種ではないかと推察されるので、こう呼んでいるそうである）が、訓練によって数百の英単語を記憶し、理解していることが報告されている。しかし、このボノボでもしゃべ

ることは出来ない。人類は直立 2 足歩行をきっかけに、口腔・咽頭の形態のみならず呼吸法・そしゃく法の機能にも構造的変化が現れ、「発声動作」を獲得した[9]。鼻腔口腔一咽頭腔一咽頭と横に並んでいた気道は頭が胴に直立することによって鼻咽腔部分で直角に曲がるようになった。その結果、舌が後方に下がって逆 L 字型になり、舌が口腔一咽頭の遮断を行うようになり、軟口蓋と舌をわずかに動かすだけで呼吸を鼻にも口にも自由に導くことができるようになり、人間は音声を獲得したのである。ここには、音声のために新たに生まれた器官はなく、呼吸、そしゃく、嚥下のために器官をスムーズに動かすための中枢の機能向上が言語中枢の進化のインパクトとなったのである。

進化の基本単位は遺伝子である[10]。進化において個体の生存と繁殖を促進する遺伝子が次世代に広まる。このことは動物の行動や進化が基本的には遺伝子の利己性による[11]。遺伝子の中では常にいろいろな突然変異が分子レベルで起きており、大部分が中立的であっても[10]、それがある状態で生存と繁殖に役立つとき次世代に広がり、固定される。手先技量は生まれた赤ん坊のときから優れているわけではなく、赤ん坊から大人になる過程で、器用になり得るのであり、その可能性そのものが遺伝子に取り込まれ、後の世代に広がった。手先が器用になり得て優れた道具を造る性、美しい唄を聞かせ、愛をささやける性に異性はひきつけられ、遺伝子は広まり、進化を加速した。

さて、そのような手先が器用になり得る能力とは何であろうか。これはつまり、手先の形質と、それが対象物との相互作用のとき物理的に順応し、目的の作業がスムーズに運べる能力を幾多の行動を通じて学ぶ能力である。つまり、物理世界に順応できるのは赤ん坊のときからの行動を通じて得た知識（これを暗黙知と呼ぼう）であり、このような知識を貯え、統合し、動作を企図するとき無意識のうち腕と手を動かして、目的を達成する。目的を持ってする動作の源泉は記憶であるが、運動の記憶は、イメージや言語と異なって意識に昇らずに、動作の発現をもって記憶したものが正しく想起されたことが分かるのである。

手先の運動能力は、そのイメージが想起できにくいというだけで、ここに低級あるいは高級の区別はない。ただ、運動を司る脳の部分は脳幹、小脳、辺縁系を持つ哺乳類のほぼすべてに共通する古い脳に本質的であったが故に、哺乳類の長い進化で洗練され、こうして、手先の運動能力についても手先の器用さの源である知識は暗黙知として貯えられているのであろう。音声の獲得も口腔・咽頭の諸器官の協調運動の能力の発展から来ており、言葉の連なりの安排は意識しつつも、発声動作そのものは‘想起’として意識に昇ることはない。ここに、運動系が進化のプロセスで洗練され、統合が進み、意識の下に隠れ、こうして運動に見られる“知”の源泉が理解しにくいものとなったことが了解されるのである。

6. ロボティクスの維持神話

こうして生物進化のプロセスを想像してみると、人間を模倣する知能ロボットを創ろうとする企ては暴挙であるように思える。ドレイファスの言うように、日常の物理学は定式化が困難であるか、あるいは、それは本来定式化できないノウハウの問題であり、従って日常の作業をスムーズにこなすロボットは作り得ない、と断言できるのだろうか。

ここに約百年前、ライト兄弟が砂浜で原始的な試作品を飛行させた歴史的瞬間を思い起こしてみよう。空を飛ぶ夢は人は誰も抱いたが、そして、約百年前、それは暴挙と思われたが、我々は今や飛行機を手にし、あまつさえ、地球上の大気圏を飛び出すことさえ可能になった。最初の試作品は地上をわずか 1~2 m の高さで滑空したのであろうが、それが確かに飛行機への幕開けとなった。しかし、我々が現代の多種多様の飛行機を手にするためには、飛ぶことを理解する新しい学問分野「流体力学」と「空気力学」の詳細な展開が必要であった。そして、物体まわりの空気の流れを詳細に解析し、計算し、実験し、どんな形状が如何に飛行できるかの原理をつかまえ、今やっと理解できるようになったのである。このことから、様々な形態の鳥や昆虫が何故飛べるか、飛行の容易さ、難しさ、羽ばたきや助走の重要性、等々を理解し始め、このことを通じて鳥の進化のプロセスも分析できる側面も生まれたのである。“飛ばす”思いに広げた大空への夢[12]にかけ、恐竜時代に生きたテラノドン（翼手竜）の化石から、それが飛んだ姿を想像し、次々と模型を作ってその羽ばたきの飛行バランスに熱中する人がいるのである。紙より軽くて強い材料が出ると、薄い翼を工夫し、こうして室内プレーンの滞空時間は数十分を記録するようになり、昆虫の羽ばたきから樹木や草花の種子の空中遊泳をも真似たいとして、あらゆる工夫をこらして物を作り、実験を試みる人々もある。

ロボティクスは人工知能のテストベッドと考えてはならない。ロボティクスこそが人工知能を創るための基礎を築くことを論証してみたい。ロボティクスは幸いにサルやドレイファスの批判を免れる。我々には、現に、ロボットと称する精巧な機械が対象としてあり、人間ではないが、この対象をより精巧にし、莫大な記憶能力と高速計算の能力を持つコンピュータと合体させて、知的振舞いをさせることを企図している。これは人間を模倣するシミュレーションであるが、シミュレートできることにこそ目的がある。いかに精巧な飛ぶ機械であっても、それが鳥やコウモリ、トンボにはなり得ないように。しかし、サールの批判する砂時計についてはどう答えるか。ここに、ロボティクスが維持神話を必要とする理由がある。その維持神話をかかげてサールの突きつけた砂時計の問題とドレイファスの言う日常の物理学の定式化の問題に答えてみよう。

日常の物理学は果たして定式化できないのであろうか。

身体の知的振舞いや手先技量の問題は定式化できないのだろうか。砂時計から電子時計へと飛躍できるためには、この問題を突破しなければならない。飛行機の開発に飛ぶ原理を理解せんとした流体力学の発展が欠かせなかったように、われわれは「技量の力学原理」を解明し理解する筋道を作らねばならない。人間の手先技量は、明らかに、手先という形態をもつ物体と対象物や環境との物理的相互作用の気の遠くなるような繰り返して、遺伝子を通じて取り込まれた。ここに、作業が「うまくいく」というプロセスが取り込まれたとしたら、1つではない幾つかの何らかの力学的原理が働いているに違いない。我々は、諸々の試作品(ロボット)を作って動作させ、実世界(real world)で物理的にインタラクトすることによって、これらの原理を探ることができるのではないか。また、物理的相互作用の力学を作り、解析し、この中に順応や適応、学習の原理を見つけることができるのではなからうか。

ドレイファスの人工知能批判には一部が肯定できても、賛成できない面も大きい。人間の思考過程をコンピュータにもさせるようとする人工知能の夢は、日常の物理学以上に定式化が困難であろう。思考のある側面が手続き的なプロセスで記述され得たとき、コンピュータはそれをなぞることができようが、これを越えるためには、実世界とのインタラクションの中で自然の法則や、論理の美しさを感じとる磨きこまれた鋭敏なセンスをもたせねばならないだろう。ドレイファスの言うように、身体の振舞いは低次ではなく、そこには物理的インタラクションを通じて動作と振舞いが磨かれるプロセスがあり、ここに「うまく作れる」、「きれいにできる」、等々の簡にして要を得ること(Occam's razor のこと)のプロセスがあり、ここにこそ“知”の焦点がある。こうして、まずは感覚系と運動系について定式化があり得るかどうか、あるとしたら、どのようにアプローチすべきかを論じなければならない。視覚をはじめとする知覚系による認知と統合の“知”、環境との相互作用を受ける移動運動系の“知”も同じ問題を抱える。次節では、運動系についてのみ議論するが、精神的にはロボット感覚、自律移動ロボットにおける知能化も同じような観点があり得よう。

7. 技量の力学的理解に向けて

本講義では、ロボティクスの1つの維持神話として「技量の力学的理解」が考え得るとし、ドレイファスに反論して、これが定式化でき得ることを確信して、そのとっかかりを力学的に展開してみたい。そのためには、何が必要になるか。

第一に、飛行機と流体力学の関係で言えば、諸々の試作を試み、風洞実験を行い、果ては紙飛行機を作るとともに、あらゆる角度から Navier-Stokes 方程式を解析し、数値計算し、流れの表示に工夫をこらし、数値流体力学ま

で作り上げたことに思いをはせよう。そこで、まずはあらゆるロボットを気軽に作り、作業させ、相互作用させ、結果をコンピュータに取り込み、分析することが必要になろう。しかし、今やっと6軸力センサーが100万円以下になったとは言え未だ高価であり、DD ロボットは気軽な値段では実現できない。自由度が3~6のDD ロボットに力センサーを装着し、ワークステーションを介して対象物と相互作用させる実験が気軽に(安く)できるようにせねばならない。ロボティクスにも諸々の紙飛行機を作れる方策を考えてみないといけないかもしれない。

他方、現在の産業用ロボットを研究用に転用するのはどうだろうか。ここに産業用ロボットが自由自在に扱えないことの制約があることに気づく。サーボループは全く解放されていない。あまつさえ、現用のサーボ系は対象物との相互作用を全く考慮しなかったPID制御あるいは速度制御によっており、不自然でさえある。回転角(radian)の位置フィードバックの物理的意味を考え直す必要がある[13]。力と位置の従来のハイブリッド制御も根本的な誤りを犯していることも指摘されている[14]。人や動物は運動を起こすときトルク計算をやっているとは思えないが、これに代わり得る原理はあり得るか。子猫だって、毛玉に向う好奇心があれば、前足の技量を物理的相互作用のプロセスで磨き得る。子供のとき、手足をばたつかせ泳ぎ始めるプロセスには確かに力学が働いているが、実世界との物理的インタラクションで取り込める技量があり得ても、そこに物理的原理あるいは運動制御の原理が見出し得るか、等々のいくつかの課題が見えてくる。

第2に、コンピュータの能力は、恐らくデカルトが想像できなかったレベルにまで上っていることに注意したい。従って、第2の提案として、このコンピュータと精巧なメカニズムの融合を試みよう。数十メガビットのワーキングメモリーと数ギガバイトのディスク、数十MIPSの計算能力を想定するとき、適応と学習の様々のからくりが考えられよう。実世界との物理的インタラクションを通じて作業が「うまくいく」とは、素速く、簡単に、最小エネルギーで目標に近く、ものごとが成されることを意味しよう。ここから感覚の統合原理や運動制御の力学的原理が導けるのではないか。ネアンデルタール人は洞窟壁画を残したが、運動や作業の技量を磨くプロセスは好奇心と計画性、想像力、集中力、辛抱強さを育て、道具や作業を美しいとする感覚を養い、芸を感じ取り、かかる「芸」に志を向けた人類こそが脳を発達させ、文化を創造した。手の技量の力学的理解は、遺伝子が確かに取り込み得た物理的インタラクションのいくつかの原理的側面を、合理主義的哲学の伝統に基づいて明らかにし定式化することで進むのではないだろうか。日常の物理学には「オッカムのかみそり」の格言こそが定式化の道を与える。

8. ま と め

本講では、ロボティクスの維持神話の一つとして「技量の力学的理解」があり得ることを哲学と生物進化から論じた。ここで展開した議論は次のようにまとめられる。

(1) 機械のアーム、ハンド、指、ビークル、コンピュータ、プロセッサ、アクチュエータ、視覚や力覚のセンサー、等の人工物を構成要素とするシステムをロボティクスは研究対象とする。

(2) 実世界で何らかの目的を与えてこれらのシステムに作業させるが、実世界の諸物や環境との物理的相互作用に順応し、適応し、学習できる能力（これを“知”と呼ぶ）に関心を持つ。

(3) 人間はこのようなことができ、そのような“知”を持つ。これがロボティクス研究の動機づけを与える。鳥がうまく飛ぶように動機付けられて、エアロノーティクス(aeronautics)が誕生したように。しかし、これはあくまでも動機であり、真似る手本としなくてもいい。ジェット飛行機は鳥を手本とせず、単に飛ぶことの原理の追求の中から生まれ、技術を発展させ、今日のジェット機となった。ロボットの構成要素として、骨や筋肉、神経系やニューロン、等々を使うわけではないので、姿や形態及び“知”の形式について人間のそれらに似せる必要はない。

(4) 要は、人類の道具を作る“知”に魅せられ、動機づけられて、機械システムにも実世界の中で物事を“うまく”運び、目的の物を“うまく”作る能力、すなわち、相互作用がうまくできる原理を発見することである。これら原理は機械システムに機能できるものでなければならない。

(5) この“相互作用”の原理は、いくつか幅輻して一見複雑に現出しはするが、事物が“うまく”運ぶことを原理的に保証する物理的原理である。しかし、それがうまく働くことは合理的（数学的）に定式化あるいは推論されるべきであり、従って、実験とコンピュータシミュレーションに基づいて徹底的にテストできるはずである。

(6) この論点から、ロボティクスはサークルとドレイファスの AI 批判的にはならない。サークルに対しては、ロボティクスの目的はシミュレーションにあるのではなく、システムの構築にあると主張しよう。砂時計の比喻に対しては、砂時計から機械式、電子式へと物理原理の発見を通じて技術が深化したプロセスと同じ方法論でロボティクスも技術革新をめざすことを主張しよう。ドレイファスに対しては、“常識の物理学”は、相互作用がうまくいく物理的原理の発見を通じて、人間のそれとは形式が異なるかもしれないが、機械システムにも機能し得る諸原理の統合として定式化できる、と答えよう。流体力学と航空工学の発

展に基づいて、飛行機と呼ぶ機械システムに“飛ぶ”機能を統合させたように。最後に、人工知能が究極の目標とする人間の高度情報処理機能は、むしろ、ここでいう運動系や認識系の物理的相互作用の諸原理から必然的に派生され誘導されるものかもしれない、というドレイファスの言には耳を傾けたい。

参 考 文 献

- [1] R. Descartes: “Discours de la methode,” 1637. 引用は、落合（訳）：“方法叙説”，pp. 102-105, 創元社, 1939, によった。なお、小場瀬（訳）：“方法序説”，角川文庫, 1951, もある。
- [2] H. Simon: “The shape of automation for men and management,” p. 96, Harper and Row, New York, 1965.
- [3] M. Minsky: “Computation: finite and infinite machines,” p. 2, Prentice-Hall, New York, 1977.
- [4] H. L. Dreyfus and S. E. Dreyfus: “Making a mind versus modeling the brain: Artificial intelligence back at a branchpoint,” in S. R. Graubard (ed.): “The Artificial intelligence debate,” pp. 15-43, MIT Press, 1989. あるいは、有本・辰巳・塚本・生田・鈴木（訳）：“知能はコンピュータで実現できるか？”，pp. 16-46, 森北出版, 1992.
- [5] J. R. Searle: “Minds, brains and science: the 1984 Reith lectures,” BBC, London, 1984. 土屋（訳）：“心・脳・科学”，岩波書店, 1993.
- [6] H. L. Dreyfus: “What computers can't do: The limits of artificial intelligence (revised edition),” p. 401 and p. 404, Harper & Row, New York, 1979.
- [7] 文献[2]の p. 40.
- [8] NHK 取材班: “脳と心 1: 驚異の小宇宙・人体 II”, NHK 出版, 1993.
- [9] 松矢篤三: “「ことば」臓器の誕生”, 第 25 回大阪大学解放講座「生きる——物から心まで——」, 大阪大学, 1993.
- [10] 木村資生: “生物進化を考える”, 岩波新書 19, 岩波書店, 1988.
- [11] R. Dawkins: “The selfish gene,” (new edition), Oxford, 1989. 日高・岸・羽田・垂水（訳）：“利己的な遺伝子”, 紀伊國屋書店, 1991.
- [12] “模型飛行機に広げた大空への夢”, pp. 36-41, 毎日グラフ 1993 年 9 月 26 日号, 毎日新聞社, 1993.
- [13] S. Arimoto, T. Naniwa, V. Parra-Vega, and L. Whitcomb: “Learnability and adaptability in robot dynamics,” Proc. of 1993 IEEE/Nagoya Univ. WWW on Learning and Adaptive System, pp. 69-76, Oct. 22-23, Nagoya, 1993.
- [14] J. Duffy: “The fallacy of modern hybrid control theory that is based on “Orthogonal complements” of twist and wrench spaces,” J. of Robotic Systems, vol. 7, no. 2, pp. 139-144, 1990.

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, 情報理論などの研究に従事。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)