## (特集)

# 人工知能とは?(6)

- 認知発達ロボティクスによる知の設計-

## **What's AI? (6)**

-Design of Intelligence by Cognitive Developmental Robotics

浅田 稔 Minoru Asada 大阪大学大学院工学研究科

Grad. School of Eng., Osaka University

asada@ams.eng.osaka-u.ac.jp, www.er.ams.eng.osaka-u.ac.jp, www.jeap.jp

keywords: AI, CDR (cognitive developmental robotics), physical embodiment, social interaction

問い:人工知能とは何ですか?

答え:日本の社団法人の学会の名前である.

問題をはぐらかしている訳ではない。先日、北京で開 催された人工知能の国際会議である IJCAI の WS の招待 講演に呼ばれて,北京精華大学(WS やチュートリアル開 催場) と BICC(北京国際コンベンションセンター:メイン の会場) に赴いたが、人工知能学会の会員どころか、日本 人の姿をほとんど見かけなかった。これは、日本の人工 知能研究者が IJCAI をターゲットにしていないというこ となのだろうか?現状の IJCAI の研究領域には満足して いない筆者ではあるが、コミッティにも日本人がほとん どいないというのも寂しい限りである. コミッティの頁 で、知り合いの Sebastian Thrun\*1 や Bernhard Nebel\*2 は、DARPA チャレンジの優勝者であったり、ロボカップ 中型サイズで一時期常勝チームのリーダーであったりと 筆者が知る限り、ロボティクスでも活躍してきた研究者 である。というよりも、人工知能とロボットの研究の境 界がない. これは、ごく自然な考え方であり、映画「AI」 は、一般大衆が考えている人工知能のイメージそのもの と言える。ロボカップの実ロボットリーグの出場チーム は、欧米では計算機科学専攻が多いが、日本は少なく、機 械系が中心である. これは、欧米では、実世界の課題を 考える上で、ロボットが知能研究の優れたツールとして 認識され、設計、製作を通じて、問題の本質を捉えよう としているのに思えるのに対し、日本では、不幸にもロ ボティクスと人工知能、より広くは情報科学の両方をやっ ている研究者が少ない。これは、知能の問題を「人工」と いう立場から考える上で、システマティックな欠陥に映 る. この問題は、以降で様々な視点から触れる.

問い:人工知能とは何ですか?

答え:知能の定義が明確でないので、人工知能を明確に定 義できない。

問い:知能に関連したと思われる工学的な研究がすべて人工知能研究ですか?

答え:そうではない. あまりに広すぎる. 少なくとも, 知能に関する本質的な課題が何で, それを人工的にどう解くかが問題だ.

問い:知能に関する本質的な課題って何ですか?

答え:それが最も重要だ. その意味で, 自然知能を無視できない.

問い:自然知能ってなんですか?

答え:知能に対して、そのサブセットして人工知能が定義 されるなら、知能の全体集合から人工知能を差し引 いた物が自然知能と考えられる。

それは生物一般の知能から、ヒト(種として)、もしくは人間(社会的存在も考慮した一般的な存在として)特有の知能のあり方を含めて、それらすべてが研究対象である。本稿では特に、人間の知能について指すことが多い。そのため関連分野としては、脳神経科学、心理学、社会学などが含まれる。認知科学は計算モデルも含まれているが、人間自身の認知も対象であり、入るとみてもよい。

問い:人工知能は自然知能を無視したてきたんですか? 答え:歴史的には,人工知能研究は内外含めて,「人工知能」 という呼称を持ちながら,これまであまりに「自然

知能」に関する研究を扱ってこなかった.

「artificial intelligence (AI) という名称が生まれ、AI という研究分野が陽に形成されたのは 1956 年のダートマス大学 (ニューハンプシャー州) で開かれた研究集会からである。この研究集会を立案したのは当時 29 歳の J. McCarthy であり、その後の AI 研究の指導的役割を果たしてきた M. Minsky, H. Simon, A. Newell そして

<sup>\*1</sup> http://en.wikipedia.org/wiki/Sebastian\_Thrun 参照

<sup>\*2</sup> http://en.wikipedia.org/wiki/Bernhard\_Nebelpp 参照

Shannon らが参加した. そして,まだ数値計算が主体であったコンピュータの潜在的能力に着目し、『人間のように』\*3思考し知的能力を発揮させる研究について議論された.」[人工 05] ここで,曲者は「人間のように」である.これを人工的に実現する上で,人間自身に関する自然科学,人文科学の分野との連携は必須と考えられるが,当時は、「分野が異なる」という excuse で,双方が歩みよることは無かった.人工知能サイドからすれば,設計論に使えるような自然科学サイドの知見を見つけることが困難であったり、自然科学サイドからすれば,人工知能という新しい分野におつきあいする意味や余裕が無かったと想定される.

さらに悪いことには、双方とも、問題が細分化し、なおさらギャップが深まったように見えたことだ。1960年代後半から70年代初頭まで、スタンフォード研究所で開発された知能ロボット「Shakey\*4」は、汎用の知能を有する移動ロボットとして開発されたが、隣の部屋にある物体を発見するといった単純な人工環境でのタスクですら、実際の物理世界のさまざまな現象に対応することが困難であり、この後、プラニング、探索、コンピュータビジョン、運動制御などの個別の分野に分かれ、それぞれの分野で個別の問題を扱うようになってしまった。

生物学においても、20世紀に入って、細分化の傾向は、強くなり、それに従い、それらの境界も曖昧になってきたようである $^{*5}$ .

人工知能と自然知能のギャップは、現在でも、もちろん解消された訳ではないが、生物学が諸分野の曖昧な境界を内包せざるを得ないように、近年の科学技術の進展は、そのギャップを埋めつつあり、それにより、分野を超えた学際的 (multidisciplinary, interdisciplinary, transdisciplinary)な研究の推進が注目されつつある。

問い:自然知能と人工知能は別もんではないですか?

答え:いい質問だ. 少し長いけど, 東大國吉氏との共著の岩 波講座「ロボットインテリジェンス」[浅田 06] から の文章を引用しながら, そのポイントを指摘したい.

### 鳥か、飛行機か:生物の知能とロボットの知能

大方の意見?「ライト兄弟以前に,飛行機を実現しようとした多くの試みがあった.これらがことごとく失敗したのは,飛行の原理を考えることなく,鳥を真似た翼を作り,鳥を真似てはばたいて飛ぼうとしたからだ.今日のジェット機を見よ.工学は,およそ鳥とは似ても似つかない新たな機械を創造し,それが飛行機としての最適な設計となった.人工の知能を実現しようとするときに,

生物を真似るのでは、同じ間違いをすることになる」.

#### i. ライト兄弟は鳥を見た

- (1) 人々を飛行機の開発に駆り立てた「飛びたい」という思いは、鳥(あるいは昆虫など)の飛ぶ姿を見ることで発生.
- (2) 「飛行」という概念は最初は「生物の飛行」と同一であり、今もジェット機と鳥は本質的には同じ意味で「飛ぶ」.
- (3) 失敗した人々は、鳥の見かけにとらわれ、外形だけ鳥に似た翼を作り、はばたきにこだわるなど、表相的構成論に終始。
- (4) 世界初の動力飛行機を発明した Wilbur and Orville Wright (ライト兄弟) と、それに先立ち固定翼グライダーと揚力の原理を含む空気力学を創った Sir George Cayley (ケイリー卿) は、誰よりも徹底的に鳥の飛翔を観察し、分析し、見かけにとらわれず、鳥が飛行を生成し操る本質的な原理を抽出し、小型試作モデルを構築し、実験を繰り返して改良を続行 [Scott 99、秋本 03].
- (5) 上記の過程で、表相的には鳥と似ていないが、翼の断面形状や捻りによる操りなどの本質的な点では、鳥と同じ、これにより「飛行」の概念は、見かけ上の「鳥の飛行」から、根本的な原理に深化、抽象化、このアプローチは、知的行動の見かけをそのまま作ろうとするのでなく、知的行動発生の最も基本的な原理を見極め、それを実際の環境中に構築し、実験しながらスケールアップしていくことに対応する。

#### ii. 飛行機が鳥になるとき

生物の飛行原理の本質を突き詰めたことが、様々な境 界条件に対応して様々な飛行体に進化させることを可能 にした

#### ◆今日のジェット機:

- ○目的:大量の人や物を,遠方まで高速に安定して 運搬.
- ○境界条件:外乱の少ない高空. エネルギ源や機構 実現性が束縛.
- ○鳥と同じ飛行原理から出発しながら,全く異なる 目的と境界条件の下で進化.そのため,見かけ上 鳥とは大きく異なる存在.

#### • 鳥:

- ・巣からただちに飛び立ち、棲息環境付近の低空を 自在に飛び回り、滞空して餌を探し、発見すれば 急降下して捕らえ、巣に舞い降りる必要。
- ○全体の寸法重量を小さく保ち、エネルギ消費を最 小限にすることが重要\*6.
- ○鳥が,飛び立つまでに延々と滑走し,大量のエネル ギを浪費して一直線にしか飛べないとしたら,鳥 は絶滅.

<sup>\*3 『』</sup>は筆者

<sup>\*4</sup> http://www.ai.sri.com/shakey/

<sup>\*5</sup> http://ja.wikipedia.org/wiki/生物学

<sup>\*6</sup> この進化淘汰圧の結果,発声機構が進化したと言われている [Deacon 98]

人工知能とは(6) 977

鳥のように、マンションのベランダからさっと飛び上がり、ビルや電柱や他の飛翔体を避けつつ、オフィスの窓に舞い降りて出勤する。騒音や排気ガスもない。このような夢の飛行機は、外見上もかなり鳥に近いものになるかもしれない。

知能についても同じことが言えるのではなかろうか?

- ●我々にとって「知能」という概念は「生物の知能」と 一体で、いかなるロボットも、知能をもつなら、そ の根本原理は生物と共通。
- ●生物の知能を分析して、その本質的な原理を解明できれば、そこから様々な知能ロボットに進化.
- 人間の生活環境の中で、人間とやり取りしつつ、人間の仕事を肩代わりしたり助けたりする、という人間共存ロボット (human symbiotic robots) は、人間と似た知能を持つものに進化。
- 非人間的な条件下で働くロボットの知能は、見かけ 上人間とは異質のものに進化。しかし、知的に振舞 う限りは、根本的には生物と同じ知能の原理を共有。

この引用以外にも、本書は、知能に関する著者らの思いを真摯に語っているので、一読を勧めたい。一般向けには、「ロボットの思想」[浅田 10a] もある。

問い:それは、ロボットの話ではないですか? 答え:これを対岸のことと考えるべきではない。

ロボットインテリジェンスを共同執筆した國吉氏と浅田の見解は、もちろん、ロボットインテリジェンスにこそ、知能研究の本質があると信じている。だからと言って、すべての人工知能研究者がロボットを使って研究しなさいとは言っている訳ではない。もちろん、ロボカップで示されているように、ロボットを扱うことは、実世界の問題を肌で感じるうえでは、非常にいい体験になると確信しているので、強く推奨するものであるが、ここでの、ポイトンは以下である。

- (1) 従来の自然科学,人文科学が説明原理に基づき,記述するのに対し,我々は,設計原理に基づき,観察と知見を駆使して,本質と思えるものを捉えることにチャレンジしていること.
- (2) 設計原理に基づく理解は、そのまま構築に直結し、構築物による検証が可能であること.
- (3) 上記は、理解と構築が一方通行では無く、相互フィードバックを通じて、より高度な理解とより精緻な設計に深化、そして進化すること。

問い:従来の自然科学,人文科学にロボットが必要なんで すか?

答え:我々は必要と考えている。ロボットは象徴で、設計原理に基づく構成的なアプローチが重要だということだ。

学際的なアプローチが必要条件である。例えば、「意識」の問題などは、脳神経科学の分野では、10数年位前では、科学の対象と想定されず、扱うこと自体が問題視されていたが、近年では、機能イメージング技術の向上により、さまざまな生きた脳活動が観察され、多くの知見とともに、矛盾する結果もあり、新たな論争の種が出始めている。当然の事ながら、完全な理解からはほど遠く、1つの分野からの解析や理解だけでは、不十分であり、他の分野との連携など、学際的なアプローチが必要である。

知能に関連する意識,自由意志,記憶,自他認知,注意,記憶など,それぞれに個別の一部の状況における知見はあるものの,それらがどのようなメカニズムでどのように作用し、互いに結びつくかに関しては、多くの謎が残されている.

この様な状況では、従来手法の延長だけでは、ブレークスルーを得ることは困難である。そこで、構成的手法の登場である。設計原理を導入することで、説明原理だけでは、困難な動作原理やその発達過程に対して、仮説やモデルを構築し、実証実験を通じて、モデルを精緻化することで、新たな知見と同時に設計方式が明らかになると期待される[Has].

問い:ロボットインテリジェンスを実現するには,具体的には,どのようにすすめるのですか?

答え:相互に関連する2つの流れがある.

筆者らがここ 10 数年,主張している認知発達ロボティクス [Asada 09] から,その手法に関する記述を引用する [浅田 10b].

環境、身体、タスクが一体となって、認知発達するロボットの設計論を構成しなければならないが、物理上、二つに分けて説明する。一つは、身体を通じて行動するための環境表現を構築していくロボットの内部の情報処理の構造をどのように設計するか、もう一つは、そのように設計されたロボットが上手に学習や発達できるような環境、特に教示者をはじめとする他者の行動をどのように設計するか、である。両者が密に結合することで、相互の役割である学習・発達が可能である。

重要なポイントは、獲得すべき行動をロボットの脳に 直接書き込むのではなく、他者を含む環境を介して(社会 性)、ロボット自身が自らの身体を通じて(身体性)、情報 を取得し解釈していく能力(適応性)と、その過程をもつ ことである(自律性)。

認知発達ロボティクスのアプローチは、主に二つに分かれる。一つは、機構の仮説を立て、コンピュータシミュレーションや実際のロボットを使って、実験し、仮説検証と仮説の修正を繰り返すことである。もう一つは、上記の過程で環境の主役である人間側の行動や機構そのものをコンピュータシミュレーションや実際のロボットを



図1 認知発達マップ (文献 [Asada 09] の Fig. 3 を改編)

使って、調べることである。これらは互いに関連し、相 互フィードバックしうる。まとめると、

#### A:認知発達の計算モデルの構築

- (1) 仮説生成:既存分野からの知見を参考にした計算モデルや新たな仮説の提案
- (2) コンピュータシミュレーション:実機での実現が困難な過程の模擬(身体成長など)
- (3) 実エージェント (人間,動物,ロボット) によるモデル検証  $\rightarrow$  (1)  $^{\circ}$
- B:人間を知るための新たな手段やデータの提供  $\rightarrow$  結果の A へのフィードバックや A からの結果のフィードバックもあり.
  - (1) イメージングによる脳活動の計測
  - (2) ヒト,動物を対象とした検証実験
  - (3) 新たな計測手段の開発と利用(提供)
  - (4) 再現性のある(心理)実験対象の提供

仮説や計測対象などは、既存分野の知見を表層的に借りるのではなく、新たな解釈や、さらには修正を迫れる内容にすることが肝要である.

#### 問い:認知発達ロボティクスの最新の研究成果は何ですか?

## 答え:その試みは筆者の前プロジェクトで一部実現している.

図1に示すのは、筆者らが手がけた JST ERATO 浅田 共創知能システムプロジェクト\*7の全容である。共創の 意味は二重で、一つは、他者を含む環境との相互作用を 通じた知能の創発、二つ目は、単一の学問分野ではなく、 学際的な協働の意味を込めている 例を二つ示そう

• 胎児・新生児の発達シミュレーション: 胎児・新生児の発達シミュレーション [Kuniyoshi 06] は、だれも見たことがない、子宮内の胎児の感覚運動発達を、生理学の知見を基に、運動野と感覚野などからなる脳神経系、約 200 本の筋肉からなる筋骨格系、羊水を含む子宮内環境の三つの相互作用シミュレーションである。結果として、胎児期における身体マップや反射的な行動の学習による獲得の可能性が示され、既存の知見に新たな洞察を与えた。

脳のシミュレーションでは、Izhikevich ら [Izhikevich 08] が、100万本スパイクニューロン、5億のシナプス結合を駆使して、哺乳類脳の視床皮質システムの大規模な計算実験を行った。通常の脳の活動

らしきものが観察され、それがビルトインではなく、多数のニューロン間の相互作用として発生したと報告されている。但し、身体は無く、人工的な入力が与えられているだけであり、発生した活動の意味の解釈は困難である。当然のことながら、身体の発達が脳の発達の影響を与えることを想定すれば[Pfeifer 06]、身体からの入力が、脳の情報処理の構造を構築していく過程をシミュレートすべきであろう。その意味では、Kuniyoshi and Sangawa[Kuniyoshi 06]のシミュレーションがより本質的に映る。最近では、より精緻化された身体を使い、触覚の均一分布など、自然には存在しない胎児発達との比較も行われており「森裕 09」、構成的手法の醍醐味である。

親子間を想定した音声模倣:親子間を想定した音声 模倣実験では、養育者側の明示的・非明示的教示が学 習者の模倣発達を促すと考えられるが、それらの検 証は容易ではない. そこで, Ishihara et al.[Ishihara 09] は、知覚運動マグネットバイアスと自己鏡映バイ アスを養育者側の二つのバイアスとして想定し、そ れらがバランスよく作用することで、母音の学習が 効率的になることを示した。前者は、母音の連続的 な音声入力に対して, 知覚される母音が離散的にな る現象で、6ヶ月頃から母語の影響により明確になる と言われている [Kuhl 91]. 後者は, 学習者が自分の 真似をするという養育者側の思い込みが、学習者の 母音を養育者の母音に引き込むことを計算モデルと して示したもので、プラシーボ効果に類似しており、 被験者を対象とした心理実験で、その効果が実証さ れている [石原 11].

前者の胎児・新生児の発達シミュレーションでは、生理学・脳神経科学との融合が、後者の親子間を想定した音声模倣では、認知科学・発達心理との融合が図られている。このほかにも様々な融合研究がなされてきたが、これらの分野にインパクトを与え、パラダイムシフトを起こするには、まだ時間を要しそうである。

## 問い:パラダイムシフトとは、何を意味していますか? 答え:説明原理から設計原理による新たな科学の創出を指す.

先にも述べたように、従来の科学が観察と解析を中心とする説明原理に基づくのに対し、人工物の設計・製作・作動を通じて、従来仮説の検証、新たな知見の発見などが期待される。さらにより重要なことは、従来の科学手法が、神の視点からの解析に対し、設計原理では、環境の状況に遭遇するエージェントの視点を持ちうることで、新たな発見に繋がる可能性を秘めている。これが、パラダイムシフトだ。

## 問い:パラダイムシフトは可能ですか?

#### 答え:もちろん容易ではないが、道筋はある。

先にも述べたように、単一の科学規範では、理解が困 難か不足であり、学際的なアプローチをとることが、パ ラダイムシフトの必要条件である。では、「十分」にする 要件は何か?従来の科学規範の統合では、本当に不可能 かという議論である。逆に言えば、認知発達ロボティク スは、既存の科学規範と無縁か?もちろん、そうではな い. 既存の科学の成果は、地味で目立たない地道な努力 の結晶の積み重ねであり、あたり前と思えることを、正 確に論理をつめて実証していく作業の過程を含む、その 意味では, 既存の科学の限界を見極め, その上で, 認知 発達ロボティクスの構成的手法の持つ意味を高めなけれ ばならない、それに値するのは、相互作用の課題であろ う、ニューロンレベル、脳の領野レベル、個体レベルな どの各レベルで、対象や表象はことなるものの、コミュ ニケーションなどの複数の主体性を持ったエージェント 間の相互作用は、個体レベルでは、言語発達などの課題 を含み、相互作用の定式化が困難である。ニューロンレ ベルや脳の領野レベルでは、先に示した Kuniyoshi and Sangawa[Kuniyoshi 06] が一例であろう. 繰り返しにな るが.

- (1) 既存科学の知見を集積し(この意味では、既存のパラダイムの利用、分野の統合)、
- (2) それらに無矛盾な、もしくは、それらの間での矛盾や論争を解き明かす仮説もしくはモデルを構成し、
- (3) シミュレーションもしくは、実空間での実験を通して、これまでに無い事実の発見、もしくはミステリーの解を与える。

(1)の意味では、既存科学規範の否定ではなく内包を意味する.よって認知発達ロボティクスの研究者は、関連する発達心理や神経科学に関して、しっかり勉強する必要がある。(2)がアイデアの出しどころで、工学者の持っているセンスを遺憾なく発揮できるかである。すなわち、(1)での融合的意味合いをアイデアとして出せるかである。単一の既存科学の範囲内では想像だにできなかったことを創出できれば、たんなるブリッジ役から主役に躍り出ることが可能になる。(3)では、その結果が(1)の関連分野にインパクトを与えることができるかいなかがポイントである\*8。難しいのは、単一の科学もしくは技術規範の価値観で評価した場合、既知であるか、既存手法に劣ると見られることである。これを超えるためには、新たな価値観を創出しなければならない。これが、パラダイムシフトの最終条件である。

## 問い:パラダイムシフトの最終条件となる新たな価値観と は何ですか?

答え:既に一部答えてるが、これは読者自身が探して欲しい、

<sup>\*8</sup> これは, 論文 [浅田 04] に対する下條信輔氏 (カルテック) からの宿題 (コメント) であった.

これは、研究者として、何を究めるかを自身に問うことで、自ずと見えてくると期待したい.

問い:ロボット以外に同じようなアプローチが可能なのですか?

答え:環境との相互作用という意味では、様々な場合が考えられる。

ロボットが分かりやすい例,もしくは,筆者が自信を持って伝えられるという意味で,説明してきた。その理由は,繰り返しになるが,物理的身体が実世界の中での相互作用を通じて,入出力関係の構造化を可能にし,知覚・行動の意味で表象がグランドしている分かりやすい例だからだ。

ロボティクスでは、物理的身体が前提なので、身体性が含まれていると思われがちだが、その保証はない、むしろ、身体と環境の相互作用のダイナミクスを静的・固定的なモデルで押しつぶしている場合もある。逆に、拡張的な意味合いで、身体性を問うているのは、東大池上氏である。物理的な存在よりも、情報の発信可能性に重きをおいている\*9。そうすると、例えば、ネット環境は、情報が行き交い、マルチモダルな表象のダイナミクスがあり、十分、適応可能と考えている。例え、グランドさせているのが、ユーザーの人間だとしても、情報の構造化のダイナミクスは、興味ある研究対象だ。

問い:情報の構造化のダイナミクスは、最近はやりのビッグデータと関係しますか?

答え:無意識化の計算とビッグデータの取扱いとの間に類 似性があるのではないかというのが、筆者の暴論で ある.

ここでは、ビッグデータの象徴として、「猫を認識できる Google の巨大頭脳 $^{*10}$ 」とクイズ王にかった IBM のワトソン君 $^{*11}$ をネタに話を進めよう。

これまでの人工知能研究では、生物学的視点で見れば、設計者視点では、少なくとも意識レベルの処理を扱ってきたように思える。無意識下の計算は、明示的なロジックが見えるはずもなく、無視されがちだが、実は、無意識下の計算が大きな意味を持つことは、最近、デフォルトモードネットワーク [M. E. 10] の知見などで、明らかになりつつある。意識レベルで自分で意志決定しているつもりが、身体がそれより前に反応し、意識レベルの脳は、それに従っているだけというスキームは、自由意志の問題も含め、興味ある構図だ。この無意識化の計算と

\*9 池上氏とのパーソナルコミュニケーション

ビッグデータの取扱いとの間に類似性があるのではないかというのが、筆者の暴論である.

人の名前、楽曲のタイトルや歌手を思いだそうとする とき、意識的には、思い出すことを諦めて、他の活動を しているので、思い出せるまでの探索過程を意識するこ とは難しく、無意識下で探索しているように思える。チェ スマスターを破ったディープブルーの巨大な計算資源を 擁する探索手法は、見かけ上のアルゴリズムよりも、探 索過程が無意識下の計算に見えたりする。なので、人間 とは桁違いに異なる手法と言われることに違和感を若干 感じる。チェスマスターが意識レベルで自身の戦略過程 を語る時点で、それは、無意識下の計算に支援されてい るとしても、説明ができないだけではないかという可能 性を感じる. これは、組合せ数がチェスに比べて桁違い に大きい囲碁将棋などで、より顕著に感じる。パターン としての解析などがあり、意識的・明示的な探索よりも、 非明示的ゆえ無意識的な過程が内在されていると想定さ れる。ここらあたりの議論の詳細は、松原仁氏にお任せ して、筆者としては、デフォルトモードネットワークの エネルギー消費量が意識レベルの活動の20倍にも達す ることを考えると、あながち力尽くと思える処理過程を 人間自身が無意識下の計算として内包しているのではな いかと考えている.

まずは、「猫を認識できる Google の巨大頭脳」からとりかかろう。SIFT, HOG などの手作りの特徴量を用いず、特徴量を画素から統計的に学習する Deep Learning と呼ばれる手法で、低レベル特徴から高レベル特徴までの階層構造を有する。低レベルな特徴ほど、様々なタスクで共有可能で、Deep Belief Networks、Deep Bolzmann Machin, Deep Neural Networks などの手法がある。Le et al.,[Le 12] は、Super Vision と呼ばれる Deep Neural Network を使って、実験に成功した。Super Vision は、65 万ニューロン、6 千万個のパラメータを有し、ラベル無しの 1000万枚の画像を 16 コアのマシン 1000 台で約 3 日間学習した。回転・並進・スケール変換にも強く、普遍性があることが示されている。人の顔、ネコ、人体などで従来手法に比して、パフォーマンスが上がっている。

人間の視覚経路で言えば、物体認識なので、What stream の腹側経路が対応する [Purves 12]. 網膜から外側膝状体を経由して、V1,V2,V4、そして IT(下側頭回)、STS(上側頭溝)の経路において人の顔や物体認識の処理過程が構築されている。V1、V2 あたりでの低次画像特徴から、IT や STS における高次画像特徴の表象が階層構造を構成している。Deep Learning との共通性は、既に述べたように、階層構造を有し、階層が上がる毎に受容野が広くなり、選択性と普遍性が交互に現れる。また、階層が上がる毎に複雑な特徴へ反応するようになり、たとえば、おばあちゃんニューロンらしきものが表れる。そして、ニューロンが形状に対してスパースに反応する\*12.

<sup>\*10</sup> http://wired.jp/2012/07/06/google-recognizes-kittens/

<sup>\*11</sup> http://ja.wikipedia.org/wiki/ワトソン\_(コンピュータ)#cite\_note-

<sup>\*12</sup> http://www.slideshare.net/takmin/building-highlevelfeatures

このような類似性を考慮すると、大量データを力尽くで処理しているように見えながら、人間の視覚情報処理過程をある意味で再現しているとも言える。当然だが、低次の特徴抽出から高次のものに至ることを通常、我々は意識しておらず、ある意味で無意識下の計算過程である。但し、Le et al., も論文で述べているように、人間の実際の視覚野は、彼らが使ったニューロン数の 10<sup>6</sup> 倍であることを、注意しておかないといけない。

問い:このようなビッグデータの解析では、身体性はいらないのではないですか?

答え:いいや、非明示的に含まれている。さらには、計算結果を検証する身体が想定されていない。

例えば、YouTubeからのネコの様々な画像の場合、ウェブにあげる時点で、撮影者の撮像意図(良いポーズ)、身体的拘束(視点など)、重力の影響、環境の構造など、多くの拘束が含まれており、多量のデータを解析することで、その構造が浮き出てくる可能性は十分にある。その意味で、十分使えるツールと見なせる。しかしながら、例えば、顔画像の場合の顔の意味を理解はできない。そこまで望まないという御仁もおられようが、システムが顔の意味を解釈して欲しいと思うのは、高望みであろうか?実際、ウェブ上の討論でそのことが指摘されている\*13.

認知発達ロボティクスとしては、判別結果を行使する 身体が欲しいのである。そのことにより、システムが何 を識別したかの検証が可能になる。古い実験で申し訳な いが, Held and Hein[Held 63] は, 生後 2 週間の双子の 子猫を使った実験で、回転するゴンドラに一方の子猫を のせ、片方は自力で運動して、このゴンドラを回転させ、 周りの環境を縦縞の筒状態とした。このことで、視覚情 報は二匹の子猫で同一である.その後,ビジュアルクリ フと呼ばれる、透明ガラスで覆われた段差の歩行実験で、 自ら運動した子猫の方は、段差部分で深度の違いを知覚 し、段差の前で留まったのに対し、ゴンドラに乗った子 猫のほうは、段差を無視してガラス板の上を歩き続けた。 これは、視覚情報として奥行き情報に対する視差情報と 思しき表象は、獲得しても、その物理的な意味をグラン ド出来ないことを意味し、視点が仮に身体的拘束を受け ても、その意味を解釈する身体が同時に存在しないこと には、意味がないことを示唆している. これは、先に紹 介した Izhikevich らの研究と同じで、入力に対する構造 化能力は持ちながらも、それを検証する手段を持ち得な いことを意味する。その意味で、身体は必要だ。

問い:IBM のワトソンの場合は,シンボルが含まれる多量のテキストデータベースで,身体性は関係ありますか?

答え:現状のワトソンが、対応するかは別として、ネット 上の知識表現が生み出すダイナミクスは、情報を創 発する意味で、身体性の要件を満たす可能性がある。

チェスのディープブルーの後釜プロジェクトとして、IBM 本体に加え、8 つの大学の協力を得て、完成された質疑応答システムは、70GB に及ぶ事典や書籍のテキストデータを蓄え、事前に構文解析し、人手によって注釈づけられたデータを対象としていた\*<sup>14</sup>. 音声認識ではなく、テキストデータで質問を受け取り、質問に対する解答候補を高速に引き出し、適切な解答をだす.

多少のずるを差し引いても、そのパフォーマンスは、驚嘆に値する。個別のデータの実世界での意味の解釈はしないにしても、巨大な個々のデータの集積をうまく構造化したことは、価値がある。ここでのタグ付け、回答候補の選択、信頼度選択などは、既存の手法をシェイプアップしたに過ぎないが、ビッグデータを扱うことで、その価値が発揮されたとみなすべきであろう。

学習や発達の観点から、ワトソンプロジェクトが今後、どのように進展するかを見届けたい。その際、我々としては、結果として人間の知識獲得の過程のモデル化にどの程度迫っているかの解釈をしたい。先にも述べたように、この知的と思える行動の根源に知能としての共通性を見いだしたいからだ。というのも、人間とて、すべての事象を自らの経験で獲得しているわけでは無く、言語がもつ表現能力に依存しながら、知識を獲得している様を考えるとあながち、単なる力尽くとも思えない(もちろん、基となる知識に関しては、自身の体験に基づくものであろうが)。望むらくは、シンボルのダイナミクスが生み出す拘束がネット環境での知識ベース上で、あたかも身体的な拘束に対応することで、知識として表象を獲得し、それらからさらに新たな知識獲得へと進展する構造を見極めたい。

これまでのビッグデータに関する議論をまとめると,

- ●巨大なデータを扱う環境が整ってきたこと、
- 莫大な計算によるデータ処理は、人間の無意識下の 計算に相当するかもしれない。
- ●上記から、Deep learning もワトソンタイプも人間の 認知発達のモデル化のツールとして使える可能性が ある (これは先に述べた既存の分野や成果を取り込 むことの意味).
- これらのツールを使う動機をもつ主体は、現状、設計者であったり、ユーザーであるが、人工システムがこのような動機付けを持つ可能性を追求することが、知的人工システムの究極の目的としたい。

四つ目の項に関しては、賛否両論あろうかと思うが、ここは、研究者の興味として追及したいと考えている.

## 問い:そのためには、どんな研究テーマがありますか?

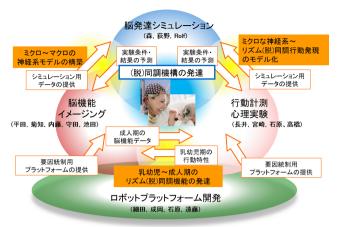


図2 神経ダイナミクスから社会的相互作用へ至る過程の理解と構築による構成的発達科学プロジェクトの概要

## 答え:かなり強引だが、人工システムが自己や他者の概念 を獲得する過程をモデル化するテーマを重要だ.

まずは、人間が自他認知をどのように獲得していくか という課題に対応するであろう、そのテーマは、筆者の 現在のプロジェクト「神経ダイナミクスから社会的相互 作用へ至る過程の理解と構築による構成的発達科学(科 学研究費補助金 特別推進研究 (平成 24 年度-平成 28 年度 研究代表者: 浅田稔))」で遂行中であり、赤ちゃんが外 界との相互作用を通じて、自己と非自己から、自己に似 た他者(養育者),自己と異なる存在の認知の発達過程を 説明可能な計算モデルの提唱とそのイメージングや心理・ 行動実験による検証を通じたモデル精緻化を目指してい る. この過程で、自他認知のキーとなるミラーニューロ ンシステム [ジャコモ・リゾラッティ 09] が構築・発達 していくと想定される [浅田 12]. 詳細はウェブ頁\*15に 譲るとして,全体の簡単な概要を図2に示す.計算モデ ル、イメージング、心理・行動実験、ロボットプラット フォームの各グループが密に結合して、自他認知の発達 原理の解明を目指している.

シンボルダイナミクスの過程は、本プロジェクトでは、 脳内のニューラルダイナミクスに対応させて考えたい.外 的物理世界からの信号が脳内に入り処理される過程にな ぞらえて、ネット上のさまざまなコンテキストが、ある 意味で互いに拘束しあい、ある種の構造を構築していく 過程と対応しないかと考えている。脳の領野で異なるシナプスやその結線の構造は、ある知識ドメインのセマン ティクスによる拘束に対応したりなどであるが、実際に 研究を進めているわけではないので、あとは、読者諸氏 に委ねたい。

本プロジェクトに強く関連するプロジェクトは,東大國 吉氏が率いる新学術研究「構成論的発達科学ー胎児から の発達原理の解明に基づく発達障害のシステム的理解ー



図3 構成論的発達科学-胎児からの発達原理の解明に基づく発達 障害のシステム的理解-プロジェクトの概要

(2012-2016)\*16」である。このプロジェクトの目玉の一つは、発達障害者の当事者研究 [綾屋 08, 綾屋 10] である。当事者が自身の内観を語ることで、外界からの観測による記述とは異なるものが得られ、それが設計のヒントになりうる。例えば、通常、我々が無意識的に処理し、抽象化された状態として感知する「おなかが空いた」(実際、そう指摘されるまで、そう思っていなかったが) 状態は、複数の下位レベルの状態の集合として知覚される。そのため、彼らは、意識的にそれらをかき集め、いま、自分がどのような状態であるかを推定する。この過程は、先に述べた無意識的過程に相当すると考えると、彼らの記述が、この過程をモデル化する際の示唆を与えてくれる。この二つのプロジェクトは、構成(論)的発達科学の構

この二つのプロジェクトは、構成(論)的発達科字の構築を目指しており、パラダイムシフトを起こしたいと考えているプロジェクトである。

## 問い:物理的身体は必然ではないといいつつ, 結局, 身体 性を前提としていますよね?

答え:ばれてしまったか?筆者らが自信を持っていえるためには、どうしてもそうなってしまう。言い訳だが、これに打ち勝つロジックを筆者らにぶつけて欲しい。

もちろん、素の身体を持たなくとも可能性は十分ある と思うが、通常の人間に比べて、人工システムはハンディ が大きいので、少しでもそのハンディをカバーするため には、人工システムにとって、実世界と相互作用しやす い身体が必要で、その身体を駆使することで、検証も容 易になるからだ。

結局、研究は自身で問題を発見し、追及し、究めないといけない。そのことが出来ていれば、恐れることはない。筆者は、ここで、ある意味で人工知能批判を展開してきたが、ロボティクスとて、対照的に同じ意味で批判対象になっている。分野の間の際から問題を見極める眼

<sup>\*15</sup> http://www.er.ams.eng.osaka-u.ac.jp/asadalab/tokusui/index.html

<sup>\*16</sup> http://devsci.isi.imi.i.u-tokyo.ac.jp

人工知能とは(6) 983

力を養って欲しい. それは, 既存の価値観におもねること無く, 自身で価値観を創造する力を養うことが必要だ. 最後は, 精神論になってしまったが, 若い研究者が自身のポテンシャルを引き出す努力を惜しまず, むしろその 過程を楽しむくらいになってほしい

#### 謝 辞

本稿の内容の一部は、國吉康夫氏(東大)、石黒浩氏(阪大)、細田耕氏(阪大)、乾敏郎氏(京大)のERATO時代のグループリーダ達とこれまで辛辣に議論を一緒に重ねてきた内容であり、彼らに感謝する。また、現在、進めている科研特推(24000012)の研究メンバーにも感謝する。

## ◇ 参 考 文 献 ◇

[ジャコモ・リゾラッティ 09] ジャコモ・リゾラッティ (著), コラド・シニガリア (著), 茂木健一郎 (監修), 柴田裕之 (翻訳): ミラーニューロン, 紀伊国屋書店 (2009)

[綾屋 08] 綾屋紗月,熊谷晋一郎:発達障害当事者研究-ゆっくりていねいにつながりたい,医学書院(2008)

[綾屋 10] 綾屋紗月, 熊谷晋一郎: つながりの作法-同じでもなく 違うでもなく, NHK 出版 (2010)

[秋本 03] 秋本 俊二:鳥と飛行機,http://allabout.co.jp/travel/airplane/closeup/CU20030805A/index.htm (2003)

[森裕 09] 森裕紀, 国吉康夫: 胎児・新生児の全身筋骨格・神経系 シミュレーションによる認知運動発達研究, 心理学評論, Vol. 52, No. 1, pp. 20–34 (2009)

[人工 05] 人工知能学会編:人工知能学事典, 共立出版 (2005)

[石原 11] 石原尚, 若狭みゆき, 吉川雄一郎, 浅田稔:乳児母音発達を誘導する自己鏡映的親行動の構成論的検討, 認知科学, Vol. 18, No. 1, pp. 100-113 (2011)

[浅田 04] 浅田稔:認知発達ロボティクスによる赤ちゃん学の試み, ベビーサイエンス, Vol. 4, pp. 2-27 (2004)

[浅田 06] 浅田稔, 國吉康夫: ロボットインテリジェンス, 岩波書店 (2006)

[浅田 10a] 浅田稔: ロボットという思想 -脳と知能の謎に挑む-, NHK ブックス (1158) (2010)

| 浅田 10b| | 浅田稔: 認知発達ロボティクスによるパラダイムシフトは可能か?, 日本ロボット学会誌, Vol. 28, No. 4, pp. 7–11 (2010)

[浅田 12] 浅田稔: 共創知能を超えて-認知発達ロボティクスよる 構成的発達科学の提唱-, 人工知能学会誌, Vol. 27, No. 1, pp. 2–9 (2012)

[Asada 09] Asada, M., Hosoda, K., Kuniyoshi, Y., Ishiguro, H., Inui, T., Yoshikawa, Y., Ogino, M., and Yoshida, C.: Cognitive developmental robotics: a survey, *IEEE Transactions on Autonomous Mental Development*, Vol. 1, No. 1, pp. 12–34 (2009)

[Deacon 98] Deacon, T. W.: The Symbolic Species: The co-evolution of language and the brain, W. W. Norton & Company, New York, London (1998)

[Has] http://www.kousakusha.com/ks/ks-t/ks-t-3-34.html

[Held 63] Held, R. and Hein, A.: "Movement-produced stimulation in the development of visually guided behaviors", *Journal of Comparative and Physiological Psychology*, Vol. 56:5, pp. 872–876 (1963)

[Ishihara 09] Ishihara, H., Yoshikawa, Y., Miura, K., and Asada, M.: How Caregiver's Anticipation Shapes Infant's Vowel Through Mutual Imitation, *IEEE Transactions on Autonomous Mental Development*, Vol. 1, No. 4, pp. 217–225 (2009)

[Izhikevich 08] Izhikevich, E. M. and Edelman, G. M.: Large-scale model of mammalian thalamocortical systems, *PNAS*, Vol. 105, No. 9, pp. 3593–3598 (2008)

[Kuhl 91] Kuhl, P. K.: Human adults and human infants show a "perceptual magnet effect" for the prototypes of speech categories, monkeys do not, *Perception & Psychophysics*, Vol. 50, pp. 93–107 (1991)
[Kuniyoshi 06] Kuniyoshi, Y. and Sangawa, S.: Early motor development.

opment from partially ordered neural-body dynamics: experiments with a. cortico-spinal-musculo-sleletal model, *Biol. Cybern*, Vol. 95, pp. 589–605 (2006)

[Le 12] Le, Q., Ranzato, M., Monga, R., Devin, M., Chen, K., Corrado, G., Dean, J., and Ng, A.: Building high-level features using large scale unsupervised learning, in *Proceeding of the 29th International Conference on Machine Learning*, pp. – (2012)

[M. E. 10] M. E. レイクル:浮かび上がる脳の陰の活動,日経サイエンス, Vol. 40, No. 6, pp. 34-41 (2010)

[Pfeifer 06] Pfeifer, R. and Bongard, J. C.: How the Body Shapes the Wav We Think: A New View of Intelligence, MIT press (2006)

[Purves 12] Purves, D., Augustine, G. A., Fitzpatrick, D., Hall, W. C., LaMantia, A.-S., McNamara, J. O., and White, L. E. eds.: Neuroscience, fifth edition, Sinauer Associates, Inc. (2012)

[Scott 99] Scott, P.: *The Pioneers of Flight*, Princeton University Press (1999)

〔担当委員: ××○○〕

2013年9月29日 受理

#### -著 者 紹 介

#### 浅田 稔(正会員)

1982 年大阪大学大学院基礎工学研究科後期課程修了. 1995 年大阪大学工学部教授. 1997 年大阪大学大学院工学研究科知能・機能側成工学専攻教授となり現在に至る. 1992 年, IEEE/RSJ IROS'92 Best Paper Award. 1996 年, 2009 年日本ロボット学会論文賞, 2001 年文部科学大臣賞・科学技術普及啓発功績者賞など, 多数受賞、博士(工学). 日本赤ちゃん学会(理事), ロボカップ日本委員会理事, RoboCup国際委員元プレジデント,