

## 展 望

## 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？

Is paradigm shift possible by Cognitive Developmental Robotics?

浅田 稔\* \*大阪大学大学院工学研究科

Minoru Asada\* \*Grad. School of Eng., Osaka University

## 1. はじめに

新たな科学の発見が、最先端技術の粋を集めた装置の恩恵に浴していることは疑いもない。脳科学における各種イメージング装置は、これまでの局所的か静的な計測に限られていた脳の活動の計測を動的かつ大局的な観測に広げ、そのことにより、新たなミステリーをも生み出している。創るという行為によって生み出された人工物が、自然を対象とした解析のための単なる支援道具から、新たな科学創出の手段にもなりうるだろうか？

仮に、ロボットと云う人工物が、新たな科学創出の手段になり得たならば、それは、ロボティクスが科学と工学の両面において、パラダイムシフトを起こしたことを意味する。構成や合成による自然現象の理解はすでにいわれているものの、パラダイムシフトを引き起こしているとはまでは言いがたく、既存科学分野の強力な支援に留まっている感がある。工学においても創る行為の結果が、日常生活における便利な道具だけではなく、新たな科学を創造する可能性はあるのだろうか？一つの可能性として、「構成的手法」が考えられる。構成的手法の持つ意味、意義としては橋本が以下のように述べている [1]~[3]。

「状況を構成してリアリティを創出する方法論で、生物に関して分かっていることおよび、仮説に基づきシステムを合成し、そのシステムを(作るだけではなく)実際に動かし、その動作を現実の現象と比較し、あるいは未知の事実を探ることで、生物的振る舞いに必要な条件を知ったり、仮説をテストするのである。(中略) 構成論的手法のさらなる利点は、従来の科学的手法が不得意とする主体性をもった対象へチャレンジできることである。もともと従来の科学的手法は、主体性をはぎ取った客観的存在としての対象を見いだすことで可能となる。一方、構成論的手法では、主体性をもった要素システム群とそれらの間の相互作用を構成

し、その全体のシステムを客観的对象として考察の対象とする。すなわち、主体性を客観性の中に埋め込むのである。」

本稿では、まず、認知発達ロボティクスが構成的手法としてもつ意味と価値を再認する。次に、パラダイムシフトはどのような意味で可能性があるかを検討し、その設計論の再構築を試みる。本展望の続編としての解説 [4] において、具体的な研究ターゲットを取り上げ議論する。個体内の発達から、個体間、すなわち社会的発達への質的变化を具現する基本原理の可能性について、近年、活発な議論が交わされている「ミラーニューロン [5]」を取り上げ、パラダイムシフトの可能性を議論する。

## 2. 構成的手法の意味するもの

構成的手法の価値は、既存の科学規範では解決不能か非常に困難な課題を対象として、仮説検証のサイクルを経て、これまでにない新たな理解を生み出すことである。進化計算はその代表例で、観測できない過去を仮想的に創りだし、そのなかで進化の過程をかいま見せてくれる。個体発生が系統発生の繰り返しならば、個体の発達過程の中に、進化のミステリーが隠されていると想定され、構成的手法が、そのミステリーを解き明かすことが可能かもしれない。しかしながら、理解の対象をどこに求めるかで分野も異なる。神経機構の発生過程を対象とするか、赤ちゃんや子供の認知発達過程を対象にするかは、大きな違いである。前者では、発生生物学の歴史があり、その規範の中で、ミステリーにアプローチしている。後者では、個体、それも人間の発達過程を外から観察する発達心理の分野が中心である。個体レベルで、どの時期を対象とするかで、既得の認知能力と、それを基に相互作用により発達が期待される能力の区別が必要である。

橋本のいう「主体性」が意味を持つのは、人間には限らないが、人間という個体を対象とすることで、その意味が鮮明になる。すなわち、赤ちゃんが養育者との様々なレベルでの相互作用を通じて、自己を確立していく過程は、コミュニケーションも含めて、発達心理、認知科学から社会学までも含む多くのミステリーを提供する。それ故に、構成的手法の出番が多くなる。既存の分野だけでは、解けな

原稿受付 2010年3月26日

キーワード: Cognitive Developmental Robotics, paradigm shift, Trans-disciplinary approach, self-other discrimination, Mirror neuron system

\*〒565-0872 大阪府吹田市山田丘2-1

\*2-1 Yamada-Oka, Suita, Osaka 565-0872, Japan

いミステリーへのアプローチが見いだせる可能性がある。特に赤ちゃんの認知発達に関しては、外からの観察に頼る発達心理、ミクロになりがちでfMRIなどのイメージングも難しい脳科学など、個別の規範ではアプローチが困難で、モデル検証が容易ではない。そこで、認知発達ロボティクスの登場である。

### 3. 構成的手法としての認知発達ロボティクス

認知発達ロボティクスとは、理解の対象となる人間の発達モデルを人工物の中に埋め込み、環境の中で作動させ、その挙動から、発達モデルの新たな理解を目指すものである。詳細は、文献 [6] [7] を参照されたい。

発達の諸様相は、埋め込みの内部発達メカニズムと、養育者が大きな要素となっている環境との相互作用の経緯ならびに結果と考えられ、当然のことながら相互に密に関連する。ただし、それらがどのような関係なのかは明らかでない。単一の機構による機能創発過程のさまざまな視点からの現象としてとらえるのか、複数の機構による相互作用としてとらえるのか？これは、どのレベルに焦点を合わせるかといった見方の違いだけなのか？この問題に対して、人工的なシステムを構築し、作動過程を通じて検証したり、新たな解釈を提供しようとするのが、構成的手法であり、特にヒトの認知発達に焦点を当てたのが「認知発達ロボティクス」である。

#### 3.1 認知発達ロボティクスの基本的な考え方

認知発達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。知的行動を人間のレベルで求めるので、人間以外の動物にも可能な連合学習から、人間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至る過程(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中に見いだされなければならない。

このようなヒトの認知に関する研究は、従来、認知科学、神経科学、心理学などの分野で扱われてきた。そこでは、説明原理による理解を目指しており、認知発達ロボティクスが志向する設計原理に基づくものではない。しかしながら、人間理解という共通基盤をもとに、工学的アプローチからは、「システム構成による仮説検証や新たな認知科学的仮説の生成」が、認知科学、神経科学、心理学などの分野に提案され、逆に、これらの分野から、「システム構成への仮説」が工学的アプローチに提案され、相互フィードバックによる認知発達モデルの構成と検証が可能である。それが認知発達ロボティクスのひとつの理想形である。

### 3.2 認知発達ロボティクスの設計論

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、2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やそれに関連するアプローチ<sup>†</sup>は、まだその事例が少ないが、その方向性は、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 → 1へ

#### B: 人間を知るための新たな手段やデータの提供 → 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。

## 4. 発達マップ

前節で示した発達の多様相を踏まえた発達マップを考える。大きく二つの様相が考えられる。はじめに、個体ベースの認知発達で主に初期、そして、個体間の相互作用による

<sup>†</sup>文献 [7] [8] や [www.jeap.org](http://www.jeap.org) 参照

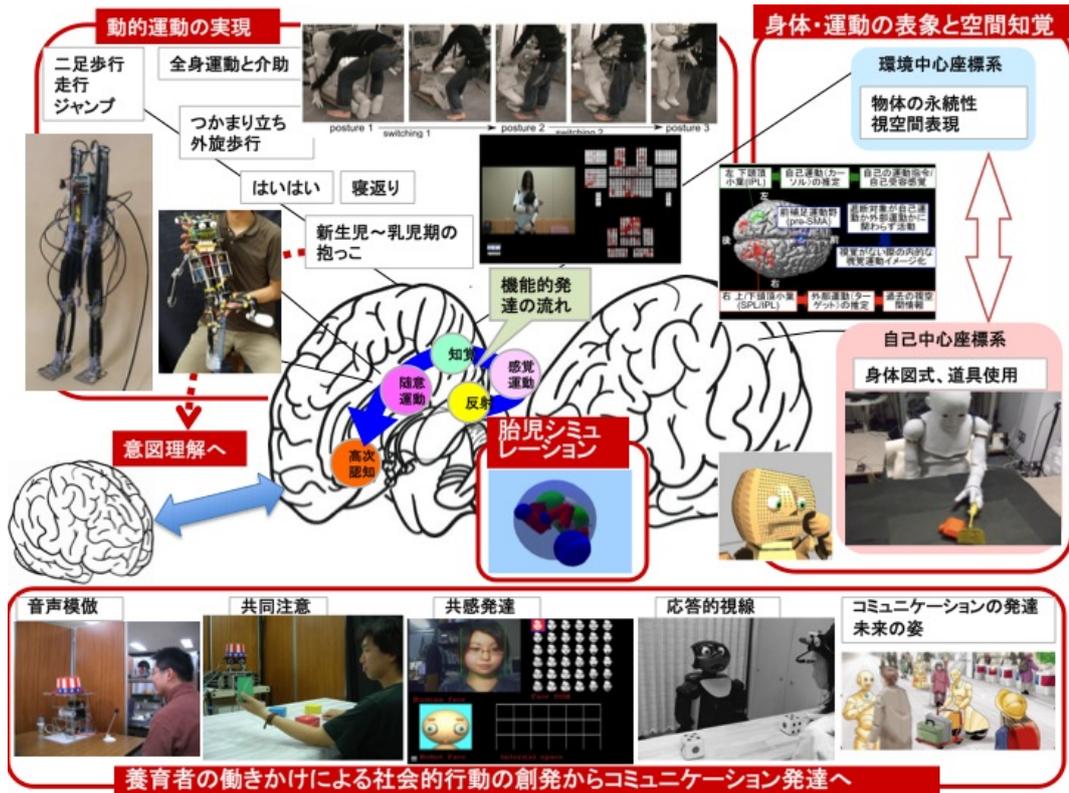


図1 認知発達マップ (文献[7]のFig. 3を改編)

る社会性の発達で主に後期である。脳科学/神経科学(内部メカニズム)は主に前者、認知科学/発達心理(行動観察)は主に後者と関係する。本来、認知発達としてシームレスであるが、理解の対象の表象レベルに大きなギャップがある。認知発達ロボティクスは、その溝を埋めるだけでなく、新たな分野の創出を狙う。以下では、まず発達マップの大まかな流れを示し、そのうち、認知発達ロボティクスのアプローチがパラダイムシフトを起こせるかについて議論する。

ヒトの脳脊髄系の概要と大まかな機能構成は、進化を反映した階層構造となっており、脊髄、脳幹、間脳、小脳、大脳辺縁系、大脳基底核、大脳新皮質からなる。浅田、國吉ら[6]は、これらが、行動のための知能の各階層に対応している。ここでは、非常にラフな提案として、この構造が個体としての時間的発展(発達)にも適用可能と考える。図1の中央に、これに対応する機能的流れとしての反射、感覚運動、知覚、随意運動、高次認知を示している。

個体内発達及び、個体と物体操作関連の発達過程において、可能な範囲で脳部位との対応を図1に示す。これに応じて、前頭前野内側部が社会脳発達に関連する[9]言われているが、脳部位の局在性よりも社会的行動創発にむけたポイントとして、環境因子としての養育者の働きかけ(scaffolding)に注目する。それらの例として、音声模倣[10][11]、共同注意[12][13]、共感発達[14]などを挙げられる。これら

に内在し、個体の発達とシームレスに繋がる個体間発達原理が何かを明らかにすることが、認知発達ロボティクスが起こすパラダイムシフトの可能性を大きくする。

### 5. パラダイムシフトは可能か？

構成的手法のメリットは、橋本[1]が言う、「従来の科学的的手法が不得意とする主体性をもった対象へチャレンジできることである。もともと従来の科学的的手法は、主体性をはぎ取った客観的存在としての対象を見いだすことで可能となる。」という点である。神の視点で、解析を主体としたアプローチは、ものに対する理解は可能でも、人間という生き物を対象とした時点で、二重の壁にぶつかる。一つは、生物をどのように理解するか？生物学は、最先端技術を駆使して、分子生物学など細分化し、理解の対象とレベルは多様化していく傾向にある。これは解析(切り刻むこと)を基本方針としている以上、宿命かもしれない<sup>†</sup>。二つ目は、ヒトという種、より学問的に広くは、人間という存在の理解である。これは、「ヒト」という種としての生物学的存在から、「人間<sup>††</sup>」という社会性を考慮した存在として、心理

<sup>†</sup>システムズバイオロジーは、生物をシステムとして理解することを目指しているので構成的手法の観点に近いと考えられる。また、日本の複雑系の研究者は、早くからシステムとしての生物の理解のためのアプローチを議論してきている。例えば、金子[15]

<sup>††</sup>昔は世間を意味したと言われており、社会的動物と言う意味で正

学, 認知科学, 社会学を巻き込む。ここに融合を必須とするパラダイムシフトの必要条件がある。つまり, 単一の科学規範では, 理解が困難か不足と感じられることである。

では, 「十分」にする要件は何か? 必要条件として, 異なる分野の融合としたが, 分野間で融合すべき表象のレベルに大きなギャップがあり, どのように融合するかに関して明確な解がある訳ではない。ここに, 構成的手法の入り込む余地がある。ただし, 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が, 複数の主体性を持ったエージェント間の相互作用であるコミュニケーションの定式化の課題を共有している<sup>†</sup>。個体レベルでは, 言語発達などが象徴的で, 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, Kuniyoshi and Sangawa [17] が胎児の感覚運動発達シミュレーションが典型例で, これまで, 誰も見ていない現象を再現した。繰り返すことになるが,

- (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かポイントである<sup>††</sup>。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。では, それは何か?

個体レベルの相互作用の発達過程を赤ちゃんと養育者の関係で見ると, キーワードとして, 新生児模倣, 共同注意,

音声模倣, いらないいばあ, 指差し, ごっこ遊び (遅延模倣), 言葉と動作の結びつきなど, 枚挙にいとまが無いが, 共通するのは, 身体表象, リズムとタイミング, マルチモダルの入出力 (視覚, 聴覚, 触覚, 体性感覚, 運動, 発声など), 自己と他者の概念, 社会性の獲得などである。これらを個別に表象するのではなく, 統一的かつ構成的に, 認知発達を説明かつ設計可能な形で提供できれば, 新しい価値観に繋がるのではと期待できる。これに関しては, 続編の解説 [4] にて議論を展開する。

## 6. おわりに

構成的手法がその効果を発揮するターゲット領域として, 人間の認知発達過程をとりあげ, ロボットという人工物を用いた認知発達モデル構築, およびその過程における人間の行動発現過程の理解を目指した認知発達ロボティクスの課題を示してきた。そして, 認知発達ロボティクスがパラダイムシフトを起こす要件として, 単一の科学規範ではなく, 脳科学, 心理学, 認知科学, 社会学などの融合, さらに具体的なターゲットとして, 相互作用の課題を指摘した。ミラーシステムによる物理的な相互作用から社会的相互作用への発達に関しては, 続編の解説を参照頂き, 更なる議論の梯になれば幸甚である。

**謝辞** 日頃, 忌憚なく議論していただいている JST 浅田プロジェクトグループリーダの乾敏郎教授 (京大), 國吉康夫教授 (東大), 石黒浩教授 (阪大), 細田耕准教授 (阪大), プロジェクト研究員, 参画している院生諸君に感謝する。

## 参考文献

- [1] <http://www.kousakusha.com/ks/ks-t/ks-t-3-34.html>.
- [2] Takashi Hashimoto, Takashi Sato, Masaya Nakatsuka, and Masanori Fujimoto. Evolutionary constructive approach for studying dynamic complex systems. In Giuseppe Petrone and Giuliano Cammarata, editors, *Recent Advances in Modelling and Simulation*, chapter 7. I-Tech Books, 2008.
- [3] 橋本敬. 構成的手法. 杉山公造ほか (編), ナレッジ・サイエンス. 知を再編する 64 のキーワード. 紀伊国屋書店, 2002.
- [4] 浅田稔. ミラーニューロンシステムが結ぶ身体性と社会性. 日本ロボット学会誌, Vol. 28, , 2010.
- [5] 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.
- [6] 浅田稔, 國吉康夫. ロボットインテリジェンス. 岩波書店, 2006.
- [7] Minoru Asada, Koh Hosoda, Yasuo Kuniyoshi, Hiroshi Ishiguro, Toshio Inui, Yuichiro Yoshikawa, Masaki Ogino, and Chisato Yoshida. Cognitive developmental robotics: a survey. *IEEE Transactions on Autonomous Mental Development*, Vol. 1, No. 1, pp. 12–34, 2009.
- [8] 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, Dec 2004.
- [9] D. M. Amodio and C. D. Frith. Meeting of minds: the medial frontal cortex and social cognition. *Nat. Rev. Neurosci.*, Vol. 7, pp. 268–277, 2006.
- [10] Yuichiro Yoshikawa, Minoru Asada, Koh Hosoda, and Junpei Koga. A constructivist approach to infants' vowel acquisition through mother-infant interaction. *Connection Science*, Vol. 15, No. 4, pp. 245–258, Dec 2003.

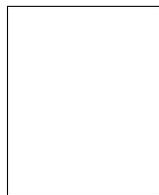
しいと用語であると象徴的に言える。

<sup>†</sup>関連研究として, 北大津田らの新学術領域研究がある [16]

<sup>††</sup>これは, 論文 [8] 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。

- [11] Ishihara Hisashi, Yuichiro Yoshikawa, Katsushi Miura, , and Minoru Asada. Caregiver's sensorimotor magnets guide infant's vowels through auto mirroring. In *The 7th International Conference on Development and Learning (ICDL'08)*, pp. CD-ROM, 2008.
- [12] Hidenobu Sumioka, Yuichiro Yoshikawa, and Minoru Asada. Causality detected by transfer entropy leads acquisition of joint attention. *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 20, No. 3, pp. 378-385, 2008.
- [13] Hidenobu Sumioka, Yuichiro Yoshikawa, and Minoru Asada. Development of joint attention related actions based on reproducing interaction causality. In *The 7th International Conference on Development and Learning (ICDL'08)*, pp. CD-ROM, 2008.
- [14] Ayako Watanabe, Masaki Ogino, and Minoru Asada. Mapping facial expression to internal states based on intuitive parenting. *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 19, No. 3, pp. 315-323, 2007.
- [15] 金子邦彦. 生命とは何か—複雑系生命論序説. 東京大学出版会, 2003.
- [16] <http://dynamic-brain.jp/index.html>.
- [17] Y. Kuniyoshi and S. Sangawa. Early motor development from partially ordered neural-body dynamics: experiments with a cortico-spinal-musculo-skeletal model. *Biol. Cybern.*, Vol. 95, pp. 589-605, 2006.

#### 浅田 稔 (Minoru Asada)



1982年大阪大学大学院基礎工学研究科後期課程修了。1989年大阪大学工学部助教授。1995年同教授。1997年大阪大学大学院工学研究科知能・機能創成工学専攻教授。工学博士(大阪大学)となり現在に至る。この間、1986年から1年間米国メリーランド大学客員研究員。

1989年、情報処理学会研究賞、1992年、IEEE/RSJ IROS'92 Best Paper Award、1996年日本ロボット学会論文賞、1997年人工知能学会研究奨励賞、1999年日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門貢献賞、2001年文部科学大臣賞・科学技術普及啓発功績者賞、2001年日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門賞：学術業績賞、2006年科学技術政策研究所 科学技術への顕著な貢献 in 2006 ナイスステップな研究者「イノベーション部門」、2007(財)大川情報通信基金大川出版賞、2008年2008グッドデザイン賞、2009年日本ロボット学会論文賞それぞれ受賞。博士(工学)。電子情報通信学会、情報処理学会、人工知能学会、日本機械学会(フェロー)、計測自動制御学会、システム制御情報学会、日本赤ちゃん学会(理事)、IEEE RAS, CS, SMC societiesなどの会員。NPO RoboCup 日本委員会理事、RoboCup 国際委員前プレジデント。