

# 身体・脳・心の理解と設計を目指す認知発達ロボティクス

浅田 稔\*

\*JST ERATO 浅田プロジェクト, 大阪大学大学院工学研究科  
大阪府吹田市山田丘 2-1

\*JST ERATO Asada Synergistic Intelligence Project, Graduate School of  
Engineering, Osaka University, Suita, Osaka, Japan

\*E-mail: asada@ams.eng.osaka-u.ac.jp

キーワード：認知発達ロボティクス (cognitive development robotics),  
発達モデル (developmental model), 構成的手法 (synthetic approach).  
JL 0001/09/4801-0011 ©2009 SICE

## 1. まえがき

前世紀における科学技術の進展は、人類史上非常に大きな飛躍を遂げ、われわれをとりまく知的人工物として具現化され、人間社会に貢献してきた。それは、おもに物の理に基づくものであり、その意味で、既存の科学技術規範の中で理解され、応用されてきた。今世紀は、脳の世紀とも称され、人間をはじめとする生物の理、特に人間という存在のミステリーに迫る試みが多くなされている。しかしながら、解析を中心とする説明原理に基づく従来の科学規範だけでは、解決困難な多くの課題が残されている。その1つとして、本特集号の「高次機能の学習と創発」があげられる。脳科学、心理学、AI、ロボティクス、認知科学、社会学などの多くの分野が関与するが、この問題の本質は、唯一無比の解が存在すると断言するには、現状は、あまりに乏しい知識とそれに基づく表層的な具現にとどまっていることである。その要因は、

1. ヒトの高次機能のメカニズムがよくわかっていない。そのため、人工的なシステムの構築が、設計者による表層的な機能の理解にとどまった上でなされている。
2. 1に内在する課題でもあるが、より重要な課題として、高次機能がどのようにして獲得されたかという学習発達過程がメカニズムの観点から明らかでない。
3. さらに、高次機能が低次機能からの発達で獲得されたとするならば、その前提となる低次機能について、現状の理解と実現で十分かという疑問。

これらに答える可能性は、本特集号で謳われている「個々の『高次機能』モジュールの実現を考えるのではなく、システムを全体として捉え、文脈とダイナミクスの概念を取り込んだ上でそれがいかに学習され、創発してくるのかを議論すること」であり、可能性の1つとして、構成的手法が考えられる。それは、説明原理ではなく設計原理に基づくことで、新たな視点が導入され、1つの分野に閉じた議論だけでなく、分野を超えた議論と実現が必須だからである。

低次から高次への機能発達は、本来シームレスであるが、これまでトータルなシステムとしての構築は、上記の課題から実現されていない。本稿では、構成的手法をもちいて発達の高次機能の実現を試みることで、人間の高次機能の新たな理解を生み出すことを目指す認知発達ロボティク

ス<sup>(注1)</sup>を再考し、その認知発達の基本原理の構築に向けた議論を展開する。最初に「身体性」について再考し、発達、特に乳幼児の発達の多様相を概観する。つぎに、認知発達設計の基本原理解求にむけて、発達モデル構想を紹介し、このモデルに準じた研究例を紹介することで、高次機能の理解と実現にむけた課題を解くカギを議論する。

## 2. 再考：身体性

身体性に関しては、すでいくつかの定義や議論がなされているが、浅田、國吉らは、「行動体と環境との相互作用を身体が規定すること、およびその内容。環境相互作用に構造を与え、認知や行動を形成する基盤となる。」と規定している<sup>1)</sup>。身体を感覚・運動・認知を支える物理的基盤と考えると、身体の物理的構造による拘束(形態)だけでなく、感覚器、運動器、認知の機能など、どのレベルまで生物学的な意味合いで、その内部構造を模擬するかは、議論のまとである。発達という時間軸を考慮すると、身体の変化、局所的には、疲れであったり、性能劣化が生じる。また、情報処理の観点からは、入力や処理可能なデータ量、および記憶容量の制限なども、発達を促す大きな要因と考えられる。ただし、どのように関わるかは、発達の過程やその構造が明らかではないので、当然自明ではない。また、設計の観点からの解釈としては、従来の物理的様相や機能的様相で身体やシステム全体を分断するのではなく、環境に対する振る舞いの単位でのまとまりとして身体やシステム全体を捉えることが重要である。以下では、身体と運動、脳と感覚器、心の課題について触れ、その意味を考えてみよう。

### 2.1 身体と運動

人間をはじめとする動物の運動を生成する身体の基本構造は、筋骨格系である。これは、従来のロボットではジョイント・リンク構造に相当するが、大きな違いは、アクチュエータとして、前者では筋肉が、後者ではおもに電磁モータが利用されている点である。電磁モータは、制御が容易であるなどの観点から、アクチュエータの代表であり、さまざまに利用されている。制御対象と制御手法を区別し、制御手法を駆使することで、さまざまな動きを実現可能であるが、大トルク低速起動・低トルク連続運転にむいた電磁

(注1) 文献<sup>1)</sup>の第7章参照

モータを用いる従来のロボット・アーキテクチャでは、トルク、速度ともに大きく変化する接触をふくむ、激しい運動は非常に困難である。これに対し、前者は、筋骨格系身体を効率的に利用して、跳躍・着地、打撃(パンチ、キック)、投擲(ピッチング、砲丸投げ)などの瞬発的な動作を実現可能である<sup>2)</sup>。また、筋骨格の構造としては、1つの関節に対し複数の筋肉が、また1つの筋肉が複数の関節にまたがって張り巡らされ、複雑な構造となっている<sup>3)</sup>。そのため個々の関節の個別の制御は難しく、身体全体として、環境と相互作用し、動きを生成する。一見、不都合に見えるが、逆に超多自由度ロボットにおける自由度拘束問題<sup>(注2)</sup>の解決策とも言える。

このような生物にならう筋骨格系の人工筋として、McKibben型空気圧アクチュエータが注目されている。新山、國吉<sup>2)</sup>、Hosoda, et al.<sup>5)</sup>は、跳躍ロボットを開発し、動的な運動を実現している。先の自由度の拘束では、Hosoda, et al.は、二関節筋構造(1つの筋が2つの関節にまたがって接続されている構造)の脚ロボットで、運動のコーディネーションが一関節筋のみの場合に比べ、容易であることを実験的に示している。これらは、制御が身体構造と密接に結びついていることを示している。すなわち、身体が環境との相互作用を通して、制御計算を担っているとも解釈できる<sup>6)</sup>。その極端な例が、受動歩行であろう。明示的な制御手法もアクチュエータもなしに、坂道で歩行を実現できる。これは、物理的身体のエネルギー消費(資源拘束や疲労)の観点からも重要である。

## 2.2 脳と感覚器

前節で身体運動の制御の観点からは、すでに脳における情報処理が含まれていた。脊髄反射系の運動から予測制御を含む高度な運動制御は、前頭前野(計画、予測)および大脳基底核と小脳(運動のコーディネーションと微調整)が絡む。脳の構造や機能はミステリーの固まりで、脳神経科学では、ややもすると微細な構造とその機能の解明に終始しがちで、身体を含む全体のシステムとしての理解がすすんでいない。

理解が進んでいると言われている末梢系でも、入力 of 感覚系と出力の運動系の研究は個別に行われていることが多い。しかしながら、たとえば、視覚情報の解釈には、運動情報が必須と思われる研究として、古くはHeld and Hein<sup>7)</sup>の研究がある。最近の知見では、8ヶ月の幼児で自己受容視覚に対する移動器(locomotor)経験の役割が研究されており、自身の肉体運動でなくても、自身が制御した移動経験により視覚の発達が促されると報告されている<sup>8)</sup>。さらに極端な例では、見えなくても把持したり、山道を歩くことができる「見えない視覚」という現象が報告されている<sup>9)</sup>。視覚は一般に、背側系の where 視覚と側頭系の what

視覚の2つの経路があり<sup>10)</sup>、それらが統合されて、通常の視覚が構成されている。しかし、なんらかの事故や障害により what 視覚経路が遮断されて、エッジや線が知覚される(初期視覚野の処理)にも関わらず、物全体が知覚されない(腹側系の処理がなされていない)。にもかかわらず、それまでの視覚運動経験から、頭頂系は生き残っており、断片的な視覚情報と結びついた運動が生成可能である。このように、感覚系と運動系は、さまざまな形で強く結びついている。

身体表象は、ボディスキーマ、ボディイメージと称されており、前者は、マルチモダルなセンサ情報が無意識に統合される神経マップで、後者は、身体とその機能の明示的な心的表象とされている<sup>11)</sup>。また、モーターイメージとも称され、運動と密接に関係する。ラマチャンドランの実験で有名な鼻が瞬時にして伸びる身体感覚など<sup>12)</sup>は、運動のタイミングによりいとも簡単に脳がだまされるかを示している。このように、感覚・知覚の発達には運動が深く関与している。

## 2.3 心の課題

心の課題は、構成的な立場で考えると、複数のエージェント間の相互作用のモデル化に他ならない。魚の群れ行動などと異なり、他者の同定を前提、もしくはその獲得過程を含んだ個体同士の相互作用である。環境と相互作用する身体そのものであるエコロジカルな自己から、対人的自己、概念的自己、時間的拡張自己へと変化すると考えられる<sup>13)</sup>。自己の表象の発達は、他者との関係性を抜きには語れない。この点が、脳部位への要素還元主義をメインとする現状の脳科学では、アプローチが困難と考えられる点である。まさしく、「<心>はからだの外にある」<sup>14)</sup>。個体間の相互作用の典型であるコミュニケーションをどうモデル化するかが、構成的手法の課題であるが、その始まりである乳幼児と養育者の関係が、個体の発達ともからみ、抱っこなどの物理的接触から共同注意、(音声)模倣、非言語コミュニケーションから言語コミュニケーションにいたる発達モデルの構築が肝要である。

## 3. 発達の多様相

### 3.1 胎児と新生児のさまざまな発達

近年、胎児の立体ソナー動画などに観察されるように、受精から数週間でさまざまな動きがあることが知られている<sup>(注3)</sup>。若干古いのが、図1にVries et al.<sup>15)</sup>のデータを示す。五感に関しては、触覚が受精後第7週(以下、同様)、味蕾も7週くらいから出現しており、12週には成人と同じ形態になるようである。聴覚、痛覚、瞬目などは23週、嗅覚は28週あたりには、組織的には完成しているが、子宮内では嗅覚は働かないといわれている。眼球運動は31週あた

<sup>(注2)</sup>「超多自由度の運動機構系に対して、どのように運動を構造化するか?」はBernsteinが指摘した運動発達の基本問題である<sup>4)</sup>

<sup>(注3)</sup><http://vision.ameba.jp/search/tag.do?tag=11404>などのサイトで閲覧できる。

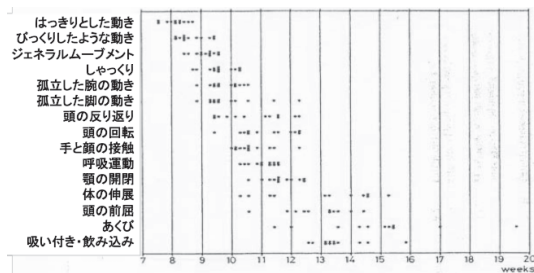


図1 胎児の動きの創発(文献<sup>15)</sup>のFig.1 改変)

りから始まると言われている<sup>16)</sup>。

誕生後、自分のボディスキーマの学習、把持できる物体の学習、道具の学習、内的シミュレーションの学習というように、徐々に発達していく<sup>17)</sup>。5ヶ月で自分の手をじっと見る(手の順・逆モデルの学習)、6ヶ月で抱いた人の顔をいじる(顔の視触覚情報の統合)、いろいろな角度からものを見る(3次元物体認識の学習)、7ヶ月で物を落として落ちた場所をのぞく(因果性・永続性の学習)、8ヶ月で物を打ち合わせ(物体の動力学的モデルの学習)、9ヶ月でたいこを叩く、コップを持って口にもって行く(道具使用の学習)、10ヶ月で動作模倣が始まる(見ることができない動きをまねる: オツムテンテンなど)、11ヶ月で微細握り、他者にものを渡す(動作認知と生成の発達: 協調・共同行為の起源)、12ヶ月で、ふり遊びが始まる(内的シミュレーションの起源)、そして、12ヶ月以降で他人の動きを見ながらまねる。

このように、人間の赤ちゃんは、その胎児期および出生後、目覚ましい勢いで認知発達過程を示す。0歳から1歳における初期認知発達では、イメージングが困難で、あまりよく理解されていないが、以下が示唆されている。

1. 乳児の脳の状態、すなわち構造と機能は成人の脳から引き出すことはできないし、すべきでもない<sup>18)~20)</sup>。
2. 脳の機能の発達部位と保守管理部位は同じではない。言語発達の初期においては、左脳より右脳の障害のダメージの方が大きい<sup>21)</sup>。
3. 外見のパフォーマンスが同じように見えても、それを實現する神経構造は異なるケースがある。マクロにみると皮質下から皮質への移動が全般に見られる。RJA (responding to joint attention)の脳活動部位は一般の注意の部位(左頭頂)と同じだが、IJA (the ability to initiate joint attention)は、前頭部を含み、言語に関連する部位に近い<sup>22), 23)</sup>。

### 3.2 発達の多様相

前節で示した発達の様相をいくつかの視点からまとめてみる。多様な側面(図2)を外から観測した場合、内部構造としてとらえた場合、それらの基盤となるもの、そして社会的構造の観点から切り出し、その背後にある構造を考えてみる(注4)。

(注4) 詳細は、文献<sup>1)</sup>の第7章を参照されたい。

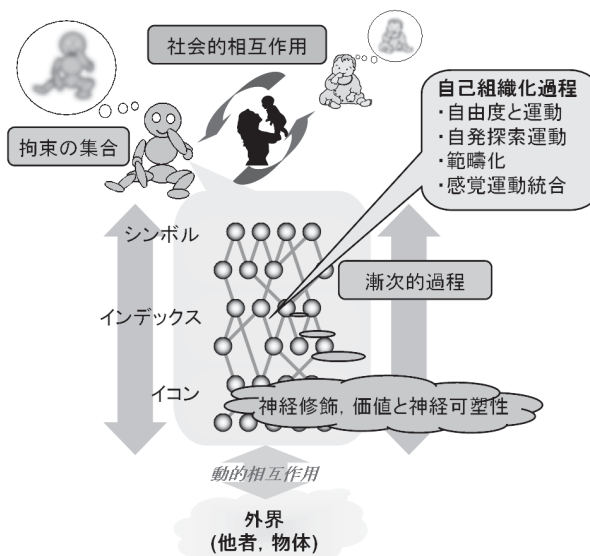


図2 発達の多様相

赤ちゃんの発達過程を外から観測した場合、中央制御ではなく、分散かつ自己組織化的で漸次的過程と見なせる。発達段階の後段の構造は、前段の不完全で効率の悪い構造と行動表現の上に構築され、これが通常の人工システムとの大きな違いである<sup>24)</sup>。また、乳幼児の生態学的な意味での拘束は、必ずしもハンディではなく、むしろ発達を促す。脳、身体、環境の間の共同作用もしくはパタン生成の固有の傾向は、各種「引き込み現象」を引き起こし、さらに、能動的探索により自己の身体表象、先に触れた自由度の拘束などによる運動パタン生成など自己組織化過程が見られる<sup>25), 26)</sup>。

このような環境に対する能動的な探索と操作の結果は、発達心理学においては、知覚範疇と概念形成であると考えられている。感覚やある種の知覚は運動とは無関係に処理されるが、知覚範疇は感覚系と運動系の相互作用に依存する。自己組織化過程において、ミクロな構造として各種の調整を行っている神経修飾物質があり、強化学習などにおける価値や神経可塑性と関連し、これらの相互作用についてメタ学習の計算モデルから予測する研究も行われている<sup>27)</sup>。

マクロスコピックには、養育者をはじめとする他者の関わりが、赤ちゃんの自律性/適応性/社会性を助長している。養育者による足場作り(scaffolding)は、認知的、社会的、技能的発達に重要な役割を果たす。また、乳幼児は養育者の反応に対する感受性期があり、養育者はこれに合わせて対応を調整する。

## 4. 発達モデル構想

前節で示した発達の多様相を踏まえた発達モデルを構想する。大きく2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もに初期、そして、個体間の相互作用に

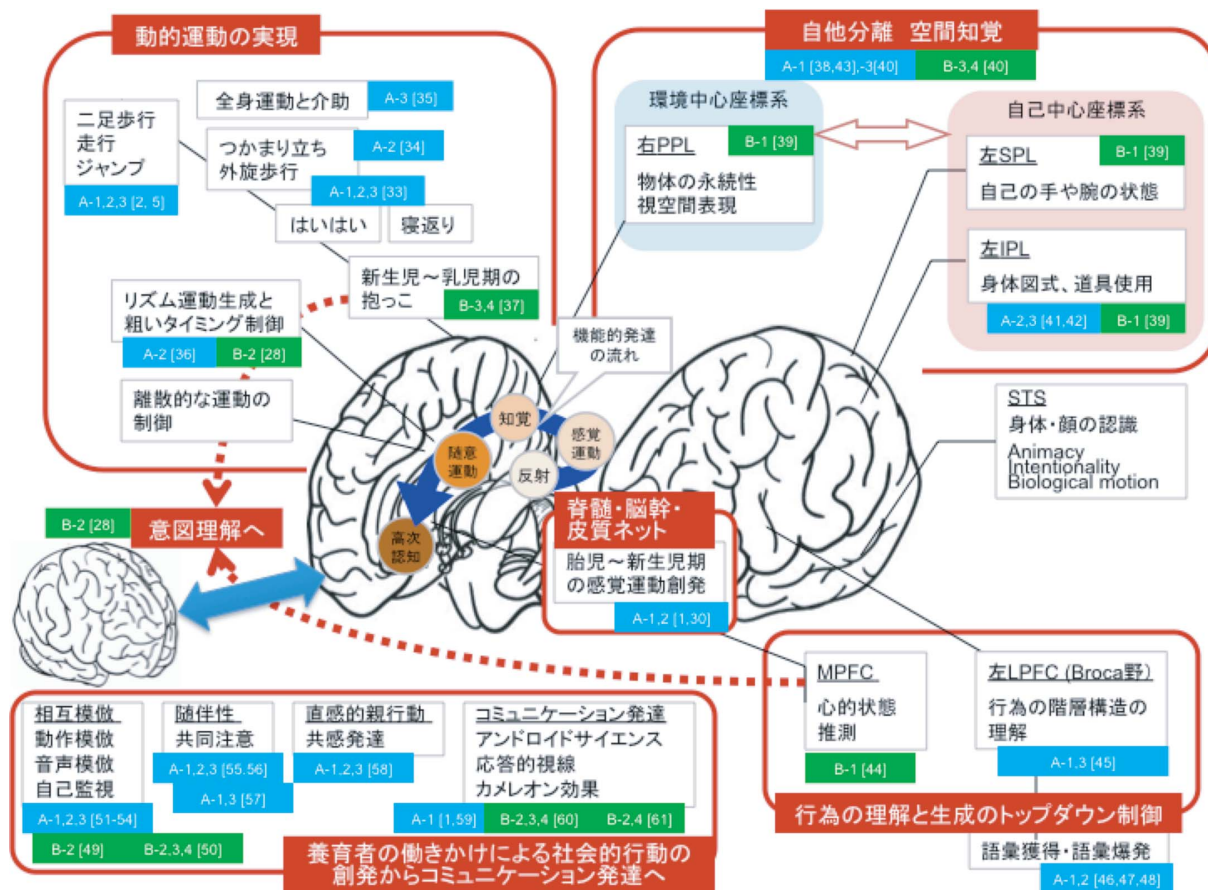


図3 認知発達モデル (文献<sup>28)</sup> を拡充改編

よる社会性の発達でもにも後期である。脳科学/神経科学 (内部メカニズム) はおもに前者, 認知科学/発達心理 (行動観察) はおもに後者と関係する。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, まず発達モデルの大きな流れを示し, そののち, 認知発達ロボティクスのアプローチと呼応する研究を提示し, 発達モデルの妥当性を検討する。

ヒトの脳脊髄系の概要と大きな機能構成は, 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<sup>1)</sup>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发展 (発達) にも適用可能と考える。図3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。

## 5. 認知発達ロボティクスのアプローチ

個体ベースの認知発達で, 計算論的には, 個体内の学習・発達メカニズムが焦点となり, 個体間の相互作用による社

会性の発達では, 他者を含む環境設計が課題となる。また, これまで, 認知発達ロボティクスでは, 認知発達の計算モデルの構築が主であったが, 人間自身の発達過程の理解を深める上で, 人間を知るための新たな手段の提供も考慮されるべきであろう。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

JST ERATO 浅田 共創知能システムプロジェクト<sup>(注5)</sup>で

(注5) <http://www.jeap.org> 参照

は、上記に従った各種の研究を実施している。図3に示された機能的流れの周囲に、それぞれのテーマと実施研究を示す。A、Bや数字は上記のアプローチを示す。以下では、紙面の都合上、代表的なものを示す。

### 5.1 脊髄・脳幹・皮質ネット

運動制御の初期のレベルは、脊髄と脳幹による反射と定型行動パタンの生成であろう。上位中枢を経由しない脊髄反射、延髄による身体各部を協調させた一定行動パタンの生成機能、上位中枢による脊髄がパターン化した運動の単位を利用した動作組み立て、大脳の頭頂連合野による感覚運動情報の統合、身体や空間の表現・認識、大脳の運動野による運動のさまざまなパタンのレパートリ表現や大脳基底核と連携したさまざまな運動パタンの切り替え、および組み合わせ実行などの機能に発展していく(書籍<sup>29)</sup>などに基づく)。

この時期における研究課題として、身体表象の獲得過程があげられる。身体表象獲得は、身体性に基づく認知発達に関わる最も基本的な問題である。ボディスキーマやボディイメージと呼ばれている身体表象がどのように獲得されるかは、大ミステリーである。なかでも、新生児模倣のミステリーが著名で、生得論と学習発達論の議論はつきない。後者に関しては、胎児の母胎内での動きの可視化により、少なくとも14、5週あたりから、顔や自身の身体への触運動が始まっており、これらの知見に基づく学習問題が扱われているが、胎児から新生児期の感覚運動創発の構成的アプローチとして、Kuniyoshi and Sangawa<sup>30)</sup>の研究がある。彼らは、人の身体、神経系の生理学的知見に基づく個々のモデルを組み合わせ、1つの赤ちゃんモデルとした。そして、このモデルを用い、母胎中の胎児の発達および、誕生後の行動をシミュレーションし、人の運動発達を理解を目指した(次節で詳細記述)。

### 5.2 動的運動の実現から意図理解へ

吉田ら<sup>28)</sup>は、社会的相互作用のための基本的認知機能を列挙した。特に、他者意図理解において、目標指向的運動のゴールを特定するような、身体運動に即したのものから、状況や文脈、社会的規範などを反映した高次のものであることを指摘し、前者が他者動作の認識過程と同様に、ミラーニューロンシステムを予測的にはたらかせることで実現され、後者は、他者の内部状態を推定するという高次の情報処理が求められる社会的認知機能の中心的機能であり、メンタライジング(mentalizing)または「心の理論」と言われている。この機能に深く関与するのは前頭前野内側面<sup>31)</sup>、他者の内的状態を推測する行為が含まれる多くの課題に関与する(図3中の機能的流れの高次認知周辺)。

吉田らは、これらの社会的相互作用を実現する基盤が、乳幼児期にすでに原型として存在し、それらが、社会的コンテキストの中で、自己の行為の調整手がかりのために、他者の行為や環境の変化の観察可能な時空間的特性への洞察

が発達的に先行し、次第に内部状態(他者の意図、変化をもたらすダイナミクス)の洞察(reflect)へと発達すると考えている(図3中の機能的流れの大きな矢印の方向)。

Schaal, et al.<sup>32)</sup>は、脳イメージングで、手首の屈伸運動をリズムカルに反復する場合と、屈曲運動と伸展運動を不定期に交互に行う場合とのそれぞれに関わる神経基盤を調べた。その結果、従来は、離散的な運動が組み合わされてリズムカルな運動が生成されると想定されていたが、実は離散的な運動こそが、リズムカルにくり返す運動の制御機構を利用し、この上に運動の時空間的プランニング機構を拡張することで、実現されていることを明らかにした。さらに、いずれの運動生成機構にも前頭前野内側面が含まれ、各運動の開始と終了を計画し、運動の複雑なタイミング生成を担うと考えられる(図3中の機能的流れの「離散的な運動の制御」がさす随意運動周辺)。

この過程の構成的アプローチとして、人工筋を用いた赤ちゃんロボットによるはいはい、寝返り行動の実現<sup>33)</sup>、外旋歩行仮説<sup>34)</sup>、二足歩行、走行や跳躍の実現<sup>2)</sup>、<sup>5)</sup>、全身運動と介助<sup>35)</sup>、リズム運動生成と粗いタイミング制御<sup>36)</sup>、さらには、新生児から乳児期の抱っこの定量的解析を可能にする触覚スーツの開発と適用実験<sup>37)</sup>などがあげられる。研究プラットフォームが多くあり、それらを用いた認知発達実験の成果が期待される。

### 5.3 自他分離から行為の理解と生成

個体と物体との相互作用による例として、乾ら<sup>38)</sup>は、認知機能の発達モデルを構築することを目的にその脳内メカニズムについて検討を行ってきた。彼らは到達把持運動の制御、運動予測、模倣および模写に関する脳内機構について検討してきた。心の能力の要件として、模倣と予測を挙げ、「物体の永続性(object permanence)」の脳内の内的なイメージ化能力の発達、指差し・模倣といった非言語コミュニケーション能力の発達、動作理解から言語への発達における重要性をイメージング技術により示した。到達把持運動を学習することによって3つの重要な機能が作られると主張している。まず、身体運動および身体と共に動く対象の運動予測機能、つぎに、このような予測機能を使って運動の視覚イメージ機能が発達(これにより、物体の永続性などの機能が創発)する。さらに、到達把持運動を通じて視覚、触覚を含む体性感覚および聴覚などの情報の統合と相互連想が作られる。これは将来、自己身体のイメージ化を行うにあたって重要となる。特に、身体イメージに関して、「自己中心座標系は、左頭頂葉にあり、一方環境中心座標系は右頭頂葉にある」ことを示した<sup>39)</sup>。これは空間知覚と自他分離と関係し、石黒は自身のコピーアンドロイド(ジェミノイドと呼ばれる)を構築することで、この課題を構成的にアプローチしようとしている<sup>40)</sup>。左脳に関連する構成的アプローチとして、Fuke, et al.<sup>41)</sup>は、直接観察できない顔の触覚分布を視覚と関節速度空間の関係を用いて自己

組織化するシミュレーションを示している。当初ランダムで一塊であった顔の触覚表象が、徐々に左右の眼、鼻、口などの特徴の識別と同時にそれらの相対的位置関係として獲得される。Hikita, et al.<sup>42)</sup> は、入来らのサル の道具使用における身体表象の拡張をコンピュータシミュレーションと実ロボットを使った実験で示した。視覚と体性感覚との統合を触覚をトリガーとして自己組織化することで、学習後、視覚注意による体性感覚の想起を実現した。

以上述べた機能を実現する脳内ネットワークの同定を基礎に、発達過程の神経基盤に関するモデル化が進められている<sup>43)</sup>。さらに他者動作の理解に関して、動作の中で動作対象に注目するとき、内側前頭前野が働くことがわかった<sup>38)</sup>。この部位は、他者の心的状態推定にも重要である<sup>44)</sup>。動作のゴールの理解は他者の意図理解につながっていくことを強く示唆している。これに関連する構成的アプローチとして、観察による行為認識と行為学習の相互フィードバックによる新たな行為の理解過程が簡単なサッカーゲームで示されている<sup>45)</sup>。ミラーシステムとブローカ野との関連から語彙獲得・語彙爆発に関連して、排他性原理に基づく語彙獲得<sup>46)</sup>、文法の学習<sup>47)</sup>、文章の理解の神経網計算過程<sup>48)</sup>などの研究がある。

#### 5.4 養育者の働きかけによる社会性行動の創発からコミュニケーション発達へ

これまでに個体内発達および、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3に示してきた。すでに述べてきたように前頭前野内側部が社会脳発達に関連するが、ここでは、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に注目する。それらの例として、模倣、共同注意、共感発達を挙げる。

社会的行動の典型例として、模倣行動があげられる。模倣行動をしないとされている自閉症児に対して、ある種の強化学習により改善されたケースが報告されており<sup>49)</sup>、模倣行動の創発を計算モデル化する上で参考となる。

生後2~3ヶ月頃から始まるクーイングは、乳児の発声練習と言われているが、この時期の養育者の働きかけ、とくに模倣が乳児の発声頻度を高めることや、乳児も養育者を模倣することで、相互に模倣することが観察されている。また、生後6ヶ月までは、乳児はあらゆる言語の母音を識別可能だが、6ヶ月を過ぎる頃には、母語のカテゴリーが構築され、離散的な識別(マグネット効果)を行うと言われている。また、聴覚フィードバックによる発話の自己モニタリングは、音声生成において重要な役割を果たしているが、それが遅延することで、吃音が発声することから、発話の自己モニタリングにおいては、自己音声の音響的特徴と調音動作の双方が用いられている可能性がある<sup>50)</sup>。そこで、最初に養育者がオウム返しすることで、母音のカテゴリーを獲得させる音声模倣ロボットの学習では、聴覚層と調音層

をへブ学習で連結させることで、話せることが聞くことに繋がること示した<sup>51)</sup>。つぎに視覚による口唇形状模倣を含めた学習の加速<sup>52)</sup>、そして、マグネット効果と相互模倣の期待効果によるバイアスを考慮した母音獲得<sup>53)</sup>(詳細後述)の構成的研究を行った。実際の養育者は、つねつね乳児の模倣をしているに限らないが、そのように仮定することで、模倣部分を検出し、その過程でより自然な母音を獲得する研究も行われている<sup>54)</sup>。

共同注視は、養育者と乳児が同じ対象に視線を合わせることで、コミュニケーションの始まりと言われているが、養育者の応答による自身の行動との因果性発見が視線合わせを導くことがシミュレーションで示されている<sup>55)</sup>。さらに、随性性の発見と適用の繰り返しによる新たな随伴性発見が共同注意に関連する行動の発現順序を規定することを示した研究もある<sup>56)</sup>。その際、養育者の応答レベルにより、期待される行動の発現が左右されるシミュレーション結果が示されている。先に触れた自閉症児の強化学習では、視線を合わせることで、報酬を与える経験を続けると、視線を合わせることで自体が手段から目的に遷移し、社会的行動が誘発したとされている。この過程で、視線による注意の領域が、顔全体から眼の部分に移行する過程を計算モデル化する試みも行われている<sup>57)</sup>。

ロボットが感情を持てるかという問いは、赤ちゃんがいかにして、感情を持つようになれるかという問いに答えることがヒントになる。快・不快などの単純な情動状態から、分化して、社会的情動状態を確立する過程で、養育者の直感的親行動が重要な役割を果たしていると言われている。親は、赤ちゃんの情動状態を察して、自然にコピーして赤ちゃんに呈示することで、赤ちゃんは自分の情動状態と同じ状態の親の顔を観測できる。このことにより、親の顔を見て、その情動状態を察することで、共感が可能になるシミュレーションが行われている<sup>58)</sup>。fMRI研究から、痛みを感じる脳部位として前帯状皮質(ACC)が挙げられ、同じ領域内で自身の痛みと他者の痛み観察に反応する部分にずれがあることが報告されている。共感ロボットでは、自身の状態と他者の状態表現する場所を共有させているので、自己と他者の微妙なずれをうまく表現する構造を引き出す必要がある。

コミュニケーションの発達過程において、人間的な容姿や動きが及ぼす影響を構成的に科学するアプローチをIshiguro and Asada<sup>59)</sup>は唱えている。その1つとして、視線は、コミュニケーションにおいて重要な役割を果たすが、応答的な注視の被注視感への影響が再現性のあるロボットを使って調べられている<sup>60)</sup>。また、コミュニケーション中に相手の行動を真似ることで、相手に好印象を与えられると言われているカメレオン効果が、アンドロイドを使った心理実験により示されている<sup>61)</sup>。ただし、これらの容姿や形態、および機能のバランスがどのようにコミュニケーションに発達

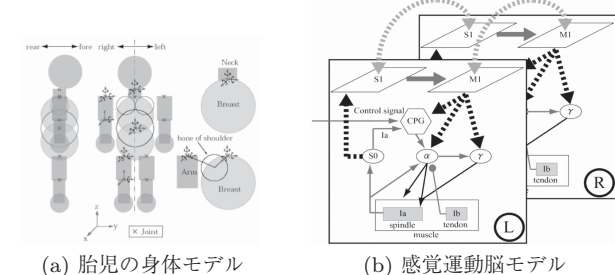
に寄与するかは、多くの課題が残されており、行動レベルから内部メカニズムまで踏み込んだ議論が今後必要であろう。

## 6. 個体内発達から個体間創発へ

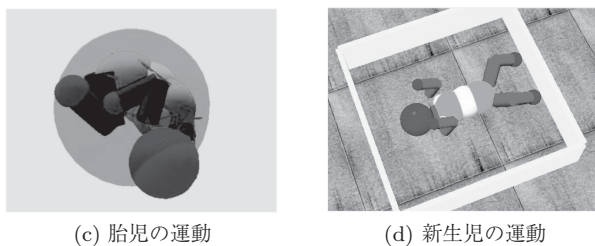
### 6.1 胎児の感覚運動マッピングシミュレーション

Kuniyoshi and Sangawa<sup>30)</sup> は、人の身体、神経系の生理学的知見に基づく個々のモデルを組み合わせ、1つの赤ちゃんモデルとした。そして、このモデルを用い、母胎中の胎児の発達および、誕生後の行動をシミュレーションし、人の運動発達の理解を目指した。図4(a)に新生児モデルを示す。簡素化のために身体を球や円筒で近似した19のセグメントを用いているが、通常のリボットのリンク/ジョイントモデルではなく、生理学や運動機能学(kinesiology)など知見を用いて、198の筋肉を張り巡らした。また、体性感覚と運動のマッピング学習のための脳構造として、図4(b)に示す脳のモデルを用いている。第一次感覚野、第一次運動野、CPG駆動による筋肉運動モデル、左右脳をむすぶ脳梁などが模擬されている。胎児モデルは、筋骨格系-脊髄-大脳皮質-一次体性感覚・運動野から構成される。これが子宮壁としての弾性膜、羊水を模擬した流体などから構成される体内環境中におかれる。脳神経系の大局的結線構造はヒトに準ずるが、詳細の決選はランダムないし全結合の配線を初期状態として、Hebb学習や自己組織化を通じて発達し、その結果、皮質上に、筋肉ユニット配置、より一般には、体性感覚・運動マップを獲得する。

計算モデルとして、脊髄脳幹系に内在する振動子のCPGを想定し、関節の周りに張られた複数の筋(1つの筋ユニットは筋紡錘と腱からなる)がそれぞれ、CPGによって駆動され、関節を動かし、リンクが作動する。これら全体は、カオス振動系を構成し、結合度によって、さまざまな振る舞



(a) 胎児の身体モデル (b) 感覚運動脳モデル



(c) 胎児の運動 (d) 新生児の運動

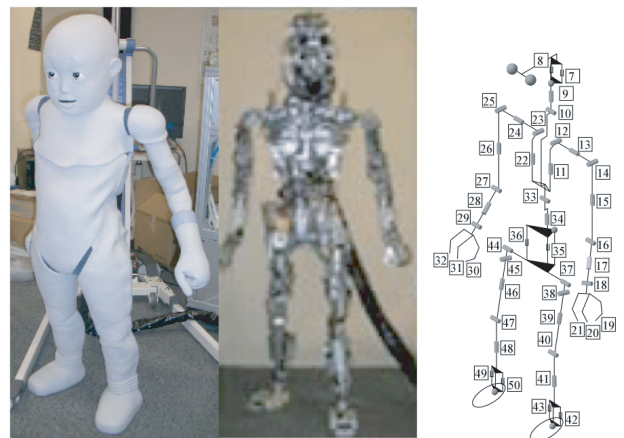
図4 胎児の感覚運動マップ学習

いを引き起こす。身体運動と環境の相互作用が物理的拘束として働き、平均化された入力がかオス振動系に加えられる。結果として、さまざまな全身運動パターンが創発される。胎児の環境として母胎内が羊水を含む柔らかな球体として模擬される(図4(c))。胎児の身体運動がこの球体環境に影響されて、たとえば脚部で蹴る行動をとると頸部が屈曲するなどの相互作用が生じる。さらに誕生後、母胎外の重力場での運動は、はいはいや寝返りに似た運動が創発されたと報告されている(図4(d))。

従来の振動系による運動生成(たとえば、文献<sup>62)</sup>など)と異なるのは、振動子間の結合が、身体環境物理系を經由して起こることにより、身体性を反映するという点である。まさに、「Body shapes brain」<sup>63)</sup>の典型例と言えよう。簡素化しているものの、これまで誰も試みていなかった母胎内発達のシミュレーションは、さらなる精緻化は言うまでもないが、構成的手法の力を存分に発揮している例と言える。今後の課題として、大脳感覚運動野、基底核、小脳の導入(運動パターンの記憶と再生、運動パターンの構造化、報酬系による運動の動機付けなど)、感覚(両眼、両耳、全身触覚分布など)の導入、身体部位の詳細化などがあげられる。

### 6.2 物理的相互作用から社会的相互作用へ

全身を使った物理的インタラクションでは、池本ら<sup>35)</sup>は、子供ヒューマノイドを人が起き上がらせる実験で、全身運動のグローバルパラメータを用いて、成功例と失敗例を識別した。図5(a)に、CB2の全身を示す。51個のエアーシリンダー型空気圧アクチュエータを内蔵し、柔らかな運動



(a) 子供ヒューマノイドCB2



(b) 引き起こし実験(成功例)

図5 子供ヒューマノイドCB2の引き起こし実験(成功例)

を実現できるが、逆に正確な制御は困難である。姿勢変化のノルムとして、ロボット側は各関節の時間的変化(速度に相当)、人間側は、モーションキャプチャを用いて、各関節の位置変化の空間をとる。人間側およびロボットの姿勢変化の時間遅れが連続的に変化し、次第に小さくなることが円滑な引き起こしインタラクションであると考え、時間間隔を変えて、それらの相互相関値をとる。図5(b)に熟練者による引き起こし結果を示す。失敗例では、相関値の高い部分が断続的となる。この研究では、行動パタンの解析が主であるが、人間側とロボット側の双方に他者の動きを予測したりモデル化することで、物理的な相互作用の原理構築が望まれる。

音声模倣は、音声による相互作用であり、模倣一般に言われているように、感覚器からの信号をそのまま模写し、行動するわけではなく、なんらかの知覚運動バイアスがかかると考えられる。Ishihara, et al.<sup>53)</sup>は、さらに相互作用がフィードバックを増幅し、バイアスをかける auto mirroring を提案し、シミュレーションによって、2つのバイアスの効果を示した。

前者の知覚運動バイアスは、つぎの事前実験から判明した。赤ちゃんロボットの母音の周辺に一樣にランダムに発生させた音に対して、単純な模倣を被験者(お母さん役)に依頼しても、模倣音声は、被験者自身の母音の周りに集中することが明らかになった。すなわち人は、無意識のうちに他者(ロボット)の模倣音声を自身の音声に引き込んでいることがわかった。これは、知覚範疇によるマグネット効果により、連続的に変化している音を離散的な音カテゴリ(この場合、自身の各母音のいずれか)として聞こうとすることで、これに加え、発声する場合も、範疇化されたモータコマンドに加えて、発声器官そのものがバイアスをかけて発声することで、その効果が増幅される。これを知覚運動バイアスと呼ぶ。さらに、相互模倣の過程で、曖昧な音声も、予測により、期待する音声に聞こえると仮定し、これを auto mirroring バイアスと呼んだ。

実験では、お母さんロボットと赤ちゃんロボットが相互に模倣する。フォルマント空間の図6にその結果を示す。赤の分布が赤ちゃんの模倣音声であり、5つの黒点は、赤ちゃんロボットの5つの母音の位置を示す。当然のことながら、赤ちゃんは、事前にはそのことは知らない。青の分布はお母さんの模倣音声である。図(a)は、両方のバイアスが存在し、相互模倣を通じて、互いに正しい母音位置に収束している様子を示す。(b)では、auto mirroring バイアスのみが作用し、正しい方向に移行としているが、収束していない。(c)では、知覚運動バイアスにより収束しているものの、正しい位置ではない。(d)は2つのバイアスがともない状態で、ばらけた音を互いに適当に真似し合っている。今後、実際の人間による相互模倣を通じた検証、モデルパラメータの精緻化、神経科学的基盤の考慮などが課

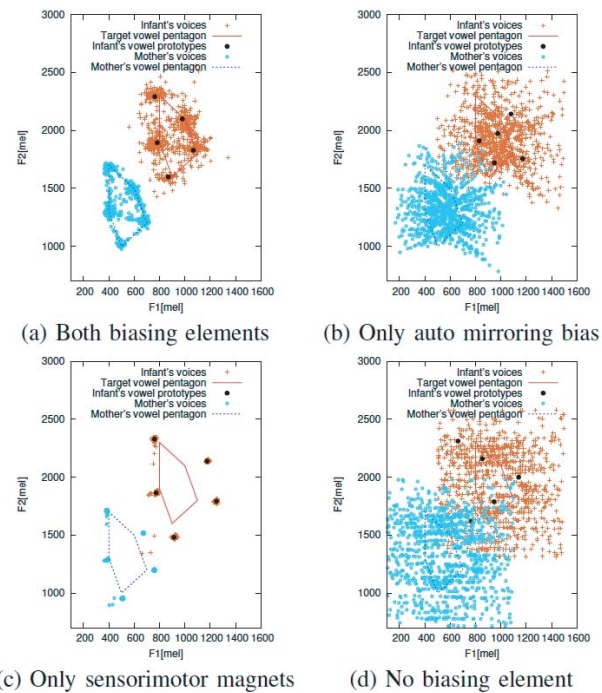


図6 2つのバイアスの効果

題である。

## 7. おわりに

認知発達の様相を概観し、発達モデルの構想を示した。それを実現すべくいくつかのアプローチを示した。図3に示したマップでは、実ロボットや実際の赤ちゃんなどでの実現や検証が困難な課題に対するコンピュータシミュレーションと実際のロボットの構築による発達計算モデルの検証、ならびに新たな理解のための手段としてのロボット実験、さらには、通常のイメージングや発達障害のモデル化の駆使など、多彩なアプローチを統合している。

個体内発達の原理として紹介した胎児シミュレーションでは、脳・身体・環境の相互作用により、その経過や結果が脳の発達に反映される。このレベルでは、感覚運動写像がメインとなっている。片や、個体間の発達では、自他分離から社会的行動を獲得するうえで、養育者という能動的環境因子が強く関わることを音声模倣の例で示した。オウム返し模倣では、養育者ではなく、自身の声を聞かせることで、母音が獲得される可能性があるが、その場合、多くの自由度の中から、ロボット自身のハード的な拘束のみに依存したカテゴリーが構築され、養育者と共有可能なカテゴリーとなる保証がない。ハード的な拘束のもとで、養育者が感覚運動写像にバイアスをかけることで、自由度選択の余地が減り、さらにこれが、全体の発達方向にもバイアスをかけ、ポジティブフィードバックがかかると考えられる。



共同注意では養育者の応答的行動が、また共感発達では直感的親行動が、さらには、他の個体間行動としてのいないないばあ、指差し、ごっこ遊び(遅延模倣)、言葉と動作の結びつきなどにおいても、養育者という他者の働きかけが認知発達のトリガーとなっている。個々の働きかけの内容に関わらず、赤ちゃん側で発達すべき内容は、他者という明示的な表象をどのように獲得するかである。これは、ミラーシステムの学習原理を解明することにより解決でき、最終的には言語コミュニケーションに至る個体間相互作用発達の設計原理に近づけるのではないかと考えている。また、現在、ウィリアムズ症候群の研究も進めており、こういった発達障害の研究からの示唆を得つつ、認知発達の原理解明に資することを目的に研究を進めている。この過程の中で、構成的手法がきわめて有効であり、さらにはその意味が深まり、新しい価値の創出につながるものと確信している。このことにより、始めて認知発達ロボティクスがパラダイムシフトを起こすことになると言えるであろう<sup>64)</sup>。

謝辞：本稿を作成するにあたり、日頃から討論を通じて、貴重なご意見をいただいている、JST 浅田プロジェクトグループリーダーの乾敏郎教授(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)、吉田千里研究員をはじめとするプロジェクト研究員、参画している院生諸君に感謝する。(2008年10月31日受付)

#### 参 考 文 献

- 1) 浅田稔, 國吉康夫: ロボットインテリジェンス, 岩波書店 (2006)
- 2) 新山, 國吉: ニューマテック人工筋骨格系によるダイナミック・ロボットの開発, ロボティクス・メカトロニクス講演会 07 予稿集 (ROBOMECH2007), 1A1/F03 (2007)
- 3) Donald A. Neumann 著/嶋田智明・平田総一郎監訳: 筋骨格系のキネシオロジー, 医歯薬出版 (2005)
- 4) Olaf Sporns and Gerald M. Edelman: Solving bernstein's problem: A proposal for the development of coordinated movement by selection, *Child Dev.*, 960/981 (1993)
- 5) Koh Hosoda, Hitoshi Takayama and Takashi Takuma: Bouncing monopod with bio-mimetic muscular-skeleton system, In *Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems 2008 (IROS '08)* (2008)
- 6) Rolf Pfeifer, Fumiya Iida and Gabriel Gómez: Morphological computation for adaptive behavior and cognition, In *International Congress Series*, 1291, 22/29 (2006)
- 7) R. Held and A. Hein: Movement-produced stimulation in the development of visually guided behaviors, *Journal of Comparative and Physiological Psychology*, 56:5, 872/876 (1963)
- 8) I. Uchiyama, D. I. Anderson, J. J. Campos, D. Witherington, C. B. Frankel, L. Lejeune and M. Barbu-Roth: Locomotor experience affects self and emotion, *Developmental Psychology*, 44, 1225/1231 (2008)
- 9) メルヴィン・グッデイル & デイヴィッド・ミルナー 著/鈴木光太郎, 工藤信雄訳: 『もうひとつの視覚』〈見えない視覚〉はどのように発見されたか, 新曜社 (2008)
- 10) M. Mishkin and LG. Ungerleider: Object vision and spatial vision: two cortical pathways, *Trends Neuroscience*, 6, 414/417 (1983)
- 11) Maxim I. Stamenov: *Body Image and Body Schema*, chapter Body schema, body image, and mirror neurons, 22/43, John Benjamins Publishing Company (2005)
- 12) V.S. ラマチャンドラン, サンドラ・ブレイクスリー著/山下篤子訳: 脳の中の幽霊, 角川書店, 東京 (1999)
- 13) 板倉昭二: 「私」はいつ生まれるか, ちくま新書 (2006)
- 14) 河野哲也: 〈心〉はからだの外にある, NHK ブックス (1053) (2006)
- 15) J. I. P. de Vries, G. H. A. Visser and H. F. R. Prechtl: Fetal motility in the first half of pregnancy, *Clinics in developmental medicine*, 94, 46/64 (1984)
- 16) 小西行郎監修: 子どもの心の発達がわかる本 不思議な「心」のメカニズムが一目でわかる, 講談社 (2007)
- 17) 乾, 永井, 小川: 共創知能機構, 第 25 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 CD-ROM (2007)
- 18) S. J. Paterson, J. H. Brown, M. K. Gsodl, M. H. Johnson and A. Karmiloff-Smith: Cognitive modularity and genetic disorders, *Science*, 286, 2355/2358 (1999)
- 19) A. Karmiloff-Smith: Development itself is the key to understanding developmental disorders, *Trends in Cognitive Science*, 389/398 (1998)
- 20) J. Elman, E. A. Bates, M. Johnson, A. Karmiloff-Smith, D. Parisi and K. Plunkett: *Rethinking Innateness: A Connectionist Perspective on Development*, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts 02142, USA (1996)
- 21) E. Bates: *The Changing Nervous System: Neurobehavioral Consequences of Early Brain Disorders*, chapter Plasticity, localization and language development, 214/253, Oxford University Press (1997)
- 22) M. I. Posner and S. E. Petersen: The attention system of the human brain, *Annual Review of Neuroscience*, 25/42 (1990)
- 23) Sarah J. Paterson, Sabine Heim, Jennifer Thomas Friedman, Naseem Choudhury and April A. Benasich: Development of structure and function in the infant brain: Implications for cognition, language and social behaviour (2006)
- 24) Max Lungarella, Giorgio Metta, Rolf Pfeifer and Giulio Sandini: Developmental robotics: a survey, *Connection Science*, 15-4, 151/190 (2003)
- 25) Philippe Rochat: Self-perception and action in infancy, *Experimental Brain Research*, 102/109 (1998)
- 26) Philippe Rochat and Tricia Striano: Perceived self in infancy, *Infant Behavior and Development*, 513/530 (2000)
- 27) Kenji Doya: Metalearning and neuromodulation, *Neural Networks*, 495/506 (2002)
- 28) 吉田, 石黒, 浅田: 社会的認知機能の発達: 協調的運動制御からコミュニケーションへ, 第 25 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 CD-ROM (2007)
- 29) 丹治順: 脳と運動: アクションを実行させる脳, 共立出版 (1999)
- 30) Y. Kuniyoshi and S. Sangawa: Early motor development from, partially ordered neural-body dynamics: experiments with a, cortico-spinal-musculo-skeletal model, *Biol. Cybern.*, 95, 589/605 (2006)
- 31) D. M. Amodio and C. D. Frith: Meeting of minds: the medial frontal cortex and social cognition, *Nat. Rev. Neurosci.*, 7, 268/277 (2006)
- 32) S. Schaal, R. Osu D. Sternad and M. Kawato: Rhythmic arm movement is not discrete, *Nat. Neurosci.*, 7-10, 1137/1144 (2004)
- 33) 成岡健一, 新山龍馬, 細田耕, 國吉康夫: 筋骨格赤ちゃんロボットの開発, 第 26 回日本ロボット学会学術講演会 (2008)
- 34) 細田耕: 股関節外旋と歩行創発, 日本赤ちゃん学会 第 8 回学術集会 (2008)
- 35) 池本周平, 港隆史, 石黒浩: 物理的接触を伴う動作指示による

- 技能習得過程の解析, 第 13 回ロボティクスシンポジウム予稿集, 99/104 (2008)
- 36) 金城海途, 國吉康夫: 神経系モデルによる複数周期運動の創発と獲得, 第 26 回日本ロボット学会学術講演会 (2008)
- 37) 保坂紗智子, 吉田千里, 國吉康夫, 浅田稔: 触覚センサスーツを用いた母子インタラクションの計測, 日本赤ちゃん学会 第 8 回学術集会 (2008)
- 38) 乾敏郎, 永井知代子, 小川健二, 竹村尚大: 共創知能機構, 第 26 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 (2008)
- 39) K. Ogawa and T. Inui: Lateralization of the posterior parietal cortex for internal monitoring of self-versus externally generated movements, *Journal of Cognitive Neuroscience*, **19**, 1827/1835 (2007)
- 40) 石黒浩: ロボットにおける自他分離, 日本赤ちゃん学会 第 8 回学術集会 (2008)
- 41) Fuke Sawa, Masaki Ogino and Minoru Asada: Body image constructed from motor and tactile images with visual information, *International Journal of Humanoid Robotics*, **4**, 347/364 (2007)
- 42) Mai Hikita, Sawa Fuke, Masaki Ogino, Takashi Minato and Minoru Asada: Visual attention by saliency leads cross-modal body representation, In *The 7th International Conference on Development and Learning (ICDL'08)*, p. to appear (2008)
- 43) 乾敏郎: イメージ生成とイメージ障害の認知脳理論, 現代思想, **35**-6, 233/245, 5 (2007)
- 44) 横井隆, 竹村尚大, 小川健二, 乾敏郎: 視点取得と情報抑制に基づく他者の心的状態推測の神経基盤, 電子情報通信学会技術報告, NC2007-41, 45/50 (2007)
- 45) Yasutake Takahashi, Yoshihiro Tamura and Minoru Asada: Mutual development of behavior acquisition and recognition based on value system, In *Proceedings of the 10th international conference on simulation of adaptive behavior (SAB08)*, 291/300 (2008)
- 46) 菊地匡晃, 荻野正樹, 浅田稔: 顕著性に基づくロボットの能動的語彙獲得, 日本ロボット学会誌, **26**-3, 45/54 (2008)
- 47) P. F. Dominey, M. Hoen and T. Inui: A neurolinguistic model of grammatical construction processing, *Journal of Cognitive Neuroscience*, 1/20 (2006)
- 48) P. F. Dominey, T. Inui and M. Hoen: Neural network processing of natural language: towards a unified model of corticostriatal function in learning sentence comprehension and non-linguistic sequencing, *Brain and Language* (2008)
- 49) 江口博美, 安原昭博, 堀あいこ, 乾敏郎: 自閉症児の模倣獲得と脳波異常の関係, 第 19 回日本発達心理学会 (2008)
- 50) 田口明裕, 笹岡貴史, 乾敏郎: 遅延聴覚フィードバックを用いた発話の自己モニタリング機構の検討, 第 5 回日本認知心理学会 (2007)
- 51) Yuichiro Yoshikawa, Minoru Asada, Koh Hosoda and Junpei Koga: A constructivist approach to infants' vowel acquisition through mother-infant interaction, *Connection Science*, **15**-4, 245/258, Dec. (2003)
- 52) Katsushi Miura, Minoru Asada, Koh Hosoda and Yuichiro Yoshikawa: Vowel acquisition based on visual and auditory mutual imitation in mother-infant interaction, In *The 5th International Conference on Development and Learning (ICDL'06)* (2006)
- 53) 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)* CD-ROM (2008)
- 54) Katsushi Miura, Yuichiro Yoshikawa and Minoru Asada: Realizing being imitated: vowel mapping with clearer articulation, In *The 7th International Conference on Development and Learning (ICDL'08)* CD-ROM (2008)
- 55) Hidenobu Sumioka, Yuichiro Yoshikawa and Minoru Asada: Causality detected by transfer entropy leads acquisition of joint attention. *Journal of Robotics and Mechatronics* (2008)
- 56) 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)* CD-ROM (2008)
- 57) Masaki Ogino, Ayako Watanabe and Minoru Asada: Detection and categorization of facial image through the interaction with caregiver, In *The 7th International Conference on Development and Learning (ICDL'08)* CD-ROM (2008)
- 58) Ayako Watanabe, Masaki Ogino and Minoru Asada: Mapping facial expression to internal states based on intuitive parenting, *Journal of Robotics and Mechatronics*, **19**-3, 315/323 (2007)
- 59) Hiroshi Ishiguro and Minoru Asada: Humanoid and android science, August (2006)
- 60) 吉川雄一郎, 篠沢一彦, 石黒浩, 萩田紀博, 宮本孝典: 応答的注視ロボットによる被注視感の呈示, 情報処理学会論文誌, **48**-3, 1284/1293 (2007)
- 61) Michihiro Shimada, Kazunori Yamauchi, Takashi Minato, Hiroshi Ishiguro and Shyoji Itakura: Studying the influence of the chameleon effect on humans using an android, In *Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems 2008 (IROS '08)* (2008)
- 62) Ryoji Suzuki, Ikuko Katsuno and Keiichi Matano: Dynamics of "neuron ring"- computer simulation of central nervous system of starfish -, *Biological Cybernetics*, **8**, 39/45 (1970)
- 63) 國吉康夫: 赤ちゃんロボットは心を獲得できるか—構成論的科学的の試み—, 日本赤ちゃん学会 第 8 回学術集会 (2008)
- 64) 浅田稔: 認知発達ロボティクスはパラダイムシフトを起こせるか?, 第 26 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 CD-ROM (2008)

[著者紹介]

あさだ 浅田 だ 田 みのる 稔 君 (正会員)



1953年10月1日生。82年大阪大学大学院基礎工学研究科後期課程修了。95年大阪大学教授。97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)。05年からJST ERATO 浅田共創知能プロジェクト総括。知能ロボットの研究に従事。ロボカップ国際委員会元プレジデント(02~08), 現理事。2005年からIEEE Fellow。