

解説

ミラーニューロンシステムが結ぶ身体性と社会性

From Physical Interaction to Social One: Mirror system connects them

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

認知発達ロボティクス [1] は、構成的手法を用いて、人間の認知発達の新たな理解を目指し、その過程を通じて、新たな価値の創出によるパラダイムシフトを企む。その可能性について、展望 [2] において議論の口火を切った。本解説では、具体的な研究ターゲットとして、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 [3]」を取り上げ、パラダイムシフトの可能性を議論する。まず、身体性について再考し、次にミラーニューロンシステムと社会性発達基盤について議論する。そして、認知発達ロボティクスによる社会性発達モデルの構想を示し、その方向性を明らかにする。

2. 再考：身体性

身体性に関しては、すでに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 [4]。身体を感覚・運動・認知を支える物理的基盤と考え、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。以下では、現状と課題について探る。

2.1 脳神経系

構成的手法として、これまで扱って来た身体は、脳神経-感覚器-筋骨格-体表面系の一部であり、消化器系(バッテリーに対応か?)や循環器系(パワーラインやセンサハーネスに対応か?)、呼吸器系(音声模倣で一部呼吸のみ扱っている)は、明には含まれていない。よって、随意神経系である体性神経系と対照される自律神経系もないに等しい。あ

えて表現すれば、バッテリー電源の安定化やCPUの放熱などが対応するかもしれない。脳神経系に限れば、Kuniyoshi and Sangawa [5] のように運動野と感覚野のみのごく一部を扱っているか、他の脳部位を想定していても、明確な対応付けが困難な場合が多い。さらに発達の視点も考慮に入れると、対応問題が難しくなる。すなわち、

- (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 [6]~[8]。
- (2) 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 [9]。このことは、最終的な言語野と呼ばれる部分が、最初から中心的な役割を果たしているのではなく、発達の初期段階では、異なる部位が関わっていると考えられる。
- (3) 共同注意や言語の発達に見られるように、巨視的には、機能の神経機構が皮質下から皮質へ、脊椎、脳幹から前頭前野へと移行していると見受けられる [10] [11]。

などが指摘されている。認知発達ロボティクスとしては、個体発達をメインにした森、國吉ら [12] のボトムアップ的なアプローチで、最小実装から初めて、徐々に機能と構造を複雑化するアプローチに加え、他者を含めた環境、特に、養育者との相互作用を主体としたモデル化に準じた脳神経系の設計原理が必要で、ミラーニューロンシステムがキーとなる。

2.2 筋骨格系

筋骨格系は、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、後者では主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、様々に利用されている。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、様々な動きを実現可能であるが、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 [13]。また、筋骨格の構造としては、一つの関節

原稿受付 2010年3月26日

キーワード: Cognitive Developmental Robotics, 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

に対し複数の筋肉が、また一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 [14]. 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[†]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 [13], Hosoda et al. [16] は、跳躍ロボットを開発し、動的な運動を実現している。先の自由度の拘束に関して、この二つのグループは、二関節筋構造 (一つの筋が二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 [17]. 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、物理的の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。

身体性を大きな特徴とする認知発達ロボティクスでは、発達モデルで述べた運動学習から脳の高次機能学習へのシームレスな発達が理想であり、その観点から、アクチュエータとして、電磁モータではなく、人工筋のような動的な運動が生成可能なものが望まれる。しかしながら、それが脳の高次機能学習にどのような影響を与えるかについては、定かではない。ヒトレベルの脳の高次機能獲得を目指すとき、ヒト以外の種でも可能な運動学習に利用されている筋骨格系がどのような過程で、ヒト特有の認知能力を獲得可能にするかである。

一つの仮説は、ヒトの場合、養育者という社会的環境がヒト特有の能力を引き出し、ヒト以外の場合、別の能力として適応したという見方である。傍証に値するか分らないが、幼い頃から親からの虐待として長期間社会的環境から隔離された子どもや孤児の例が挙げられる。彼らは、運動発達障害に加え、高次脳機能にも障害があると報告されている [18]. 逆に、「ヒトと話すサル：カンジ」[19] だろう。当初、母親のマタタに言語教育施していながら、マタタは修得せず、幼子であったカンジが間接的に言語能力を獲得したかのごとく振る舞っている例である。ただ、人工筋による筋骨格系の必然性がどこまであるかは、明確ではない。この点については、関連研究者からの意見を伺いたい。

2.3 体表面

皮膚感覚は、その重要性の認識はありつつも、技術的な

実現の限界から、人間型ロボットに、これまであまり採用されてこなかった (文献 [1] の Table III 参照). しかし、最近では、認知発達研究の研究プラットフォームとして JST ERATO 浅田プロジェクトで開発された CB2 [20] では、触覚センサとして約 200 個の PVDF 素子がシリコンの柔らかい皮膚の下に装着されている。また、Ohmura et al. [21] は、柔軟かつ切り貼り可能な触覚センサを開発し、ヒューマノイドの全身に 1800 個を超える触覚として実装している。また、全身ではないが、Takamuku et al. [22] は、プラスチックの骨格にゴム手袋を装着し、PVDF 素子とひずみゲージをシリコンと一緒に注入したバイオニックハンドを開発し、指や掌の触覚と把持運動を利用して、数種の物体を識別している。センサ素子は校正されておらず、自己組織化を目指している。ヒトと比べセンサ素子は圧倒的に少ないが、受容器の種類として類似の構造を取っており、ヒトの把持スキルの学習発達研究への拡張が期待されている。

体表面の皮膚感覚は、体性感覚と密接に結びつき、ボディスキーマやボディイメージなどの身体表象を獲得する上で非常に根源的かつ重要な感覚である [18]. 高次脳機能がこのような基本的な知覚の上に構成されることを考えれば、認知発達ロボティクスとしては、何らかの形で実装していることが望ましい。メカノレセプターとしての構造化に加え、痛みとしての感覚は、生物の場合、個体の生命維持に必須であるが、その社会的意味としての共感、将来、人間と共生するロボットにも望まれる。その際、明示的にプログラムされた物理的インパクトへの応答ではなく、共感としての情動表現が可能であれば、より深いコミュニケーションが可能と考えられる。これは、以下のミラーニューロンシステムとも深く関連する。

3. ミラーニューロンシステムと社会性発達基盤

サルの腹側運動前野 F5 で発見されたミラーニューロン [23] は、ヒトの場合に対応する部位がブローカ野の近くでもあったが故に、言語能力に至る道筋での重要な役割を果たしていると推察された [24]. その後の様々な研究から、多くの事柄が明らかになりつつある [3] [25].

- (1) 観察した他者の運動と同じ運動をサル自身が実行したときに発火する。
- (2) ゴールが明示されれば、途中経過は見なくても反応する。物体を対象とする動作、すなわち「他動詞」的動作でないと反応しない。
- (3) 動作に伴う音にも反応する。自ら、その行為をする時も反応し、他者の動作理解に関与しているとみなせる。
- (4) 他者の道具使用の観察にも応答するものがあるが、自身の行動再現はゴールが同じであれば、その実現方法は異なる場合もある。
- (5) サルの口によるコミュニケーション動作に反応するも

[†]「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 [15]

のもある。

- (6) 腹側運動前野のみならず、解剖学的に結合している下頭頂葉の PFG 野 (体性感覚と視覚刺激に反応するニューロン活動) にも存在する。
- (7) PFG 野のミラーニューロンは動作実行者の意図により異なる反応を示す。
- (8) 側頭葉の上側頭溝 (STS) の周辺領域では、他者の行為に反応する視覚性ニューロンが知られている。但し、運動に関連した活動はないのでミラーニューロンとは呼ばれていない。他者の視線により反応が異なり、共同注意との関連を示唆する。
- (9) 腹側運動前野 F5, 下頭頂葉の PFG 野, 上側頭溝 (STS) の周辺領域は解剖学的な結合が認められており、ミラーニューロンシステムと呼ばれている。
- (10) 背側運動前野においても、到達運動に関わるミラーニューロンが記録されている。

最大の焦点は、他者の動作プログラムを自身の脳内で再現すること、すなわち、他者の内部状態を自己の内部状態としてシミュレーションできることとされている [26]。これは、自他弁別、他者の行為認識、共同注意、模倣、心の理論、共感などと関連すると考えられる。村田 [25] は、これらに基づき、以下のように考えている。

- 自己や他者の身体をそれぞれ認識するシステムがどこかで共有、
- 自己身体認知のステップとして、遠心性コピー[†]と感覚フィードバックの一致が運動主体感を構成し (実際、彼らのグループで頭頂葉のニューロンが遠心性コピーと感覚フィードバックの情報の統合に関わることを発見している)、ずれた場合には、その運動主体感が構成されず、他者の身体と認知、
- ミラーニューロンは元々、自他に関わらず、動作そのものを視覚的にコード化し、運動実行中に感覚フィードバックとして働いていたが、発達・進化の過程で、運動情報と統合され、現在のミラーニューロンを構成、
- ミラーニューロンは、他者の動作認識とともに、自己の身体や他者の身体の認識に関与、
- 遠心性コピーと感覚フィードバックを照合する頭頂葉が、一致 (自己という意識) かズレ (他者と言う意識) のいずれを検出しているのか不明 (ヒトの研究では、右の頭頂葉はズレを検出しているらしい)。

嶋田 [27] も、ほぼ同様の立場だが、「外在性身体情報 (主

に視覚に由来)」と「内在性身体情報 (感覚や運動指令 (遠心性コピー) に由来)」とう表現を用い、ミラーニューロンの活動について、以下のようなモデルを提案している。「視覚野において、外在性身体が同定され、内在性身体との整合性がチェックされるが、このとき、自他弁別のようにその差異が意識されるのではなく、その差異を解消するように内在性身体が調整され、その結果として運動野や感覚野の活動が起こる。この外在性身体から内在性身体への処理流れは、運動が常に視覚フィードバックを元に修正されていることを考えれば十分可能である。」そして、自他弁別とミラーニューロンシステムの共通点として、外在性及び内在性の身体に関する諸感覚 (視覚, 触覚, 聴覚, 体性感覚, 運動指令) の統合プロセスであるとしている。

このような「自己と他者の内部状態の共有と弁別」の過程は、運動経験だけに限られないと容易に察せられる。他者が触られると、自身が触られている感覚 (体性感覚野や頭頂連合野が活性) や、快/不快なおいを嗅いでいる他者を観察した際の反応 (情動系の回路が反応)、他者の痛みの知覚などが挙げられ、共感の元となっていると考えられる。自己と他者の経験が脳内の共通する部位で表現されているということは、他人の経験を自分の経験のように処理するメカニズムと解釈でき、このような「鏡のような」脳の特性が、感情を含めた他者の内部状態を共有・理解する能力の神経的基盤の一つではないかと考えられている [28]。

このようにミラーニューロンシステムは、自己と他者の共通性と差異に基づいた、自己や他者への気づきを駆動し、社会的な行動の学習・発達に寄与していると見なせるが、ミラーニューロンシステム自体が、どこまで生得的で、どれくらい学習可能かは定かではない。サルのみラーニューロンシステムの場合、対象が明示された他動詞的な動作にしか反応しないのに対し、ヒトの場合、自動詞的な動作、つまり目的を持たない行動に対しても反応するミラーニューロンシステムが存在すること [3] をどのように解釈できるだろうか？

仮説として、サルの場合、ヒトに比べて、個体の生存のための圧力が大きいので、ゴール指向の運動が個別に確立して早く駆動可能である。それに対し、ヒトの場合、養育者の庇護をうけるので、その圧力が小さく、ゴール指向のみならず、目的を持たない要素運動的なものにも反応することで、学習による構造化や組織化による汎用性が高まる余裕があり、結果として、より社会的な行動や認知能力へ拡張されたと考えられる。先に述べたように、「自他弁別のようにその差異が意識されるのではなく、その差異を解消するように内在性身体が調整され、その結果として運動野や感覚野の活動が起こる。」[27] ならば、このような行為の連続が模倣やコミュニケーションに繋がると考えられる。サルの場合には、生存の圧力が大きいため、「自己と他者の差

[†]運動制御においては運動の指令が運動野に送られるだけでなく、その信号のコピーが感覚野にかえってくると考えられている。このコピーは、中枢神経から末梢系に送られるので、遠心性コピーと呼ばれ、感覚フィードバックの予測に使われると考えられる。また、こうした信号は運動の主体の感覚に必要である。求心性コピーは、逆に末梢系から中枢神経系に送られる信号で感覚系の信号が相当

異を埋めていく」動機付けが低く、模倣にまで至らないと考えられる。事実、サルは模倣しないとされている。

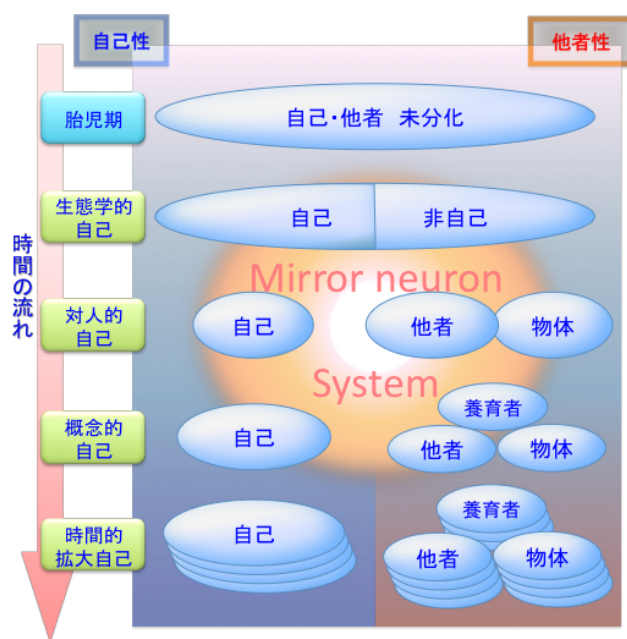


図1 社会性の初期発達

4. 認知発達ロボティクスによる社会性発達モデル

胎児から始まり、子どもに成長するまでの発達過程を、構成的アプローチによる社会性発達の観点からモデル化することを試みる。議論の基本的な考えは、以下である。

- (1) 進化的過程まで踏み込まず、個体発生のレベルで議論するので、事前埋め込みは想定するが、なるべく最小に押しとどめ、可能な限り個体の学習発達過程での説明及び設計を試みる。身体の構造、特に脳部位や感覚器、筋骨格系の配置、それらの結線構造を基本埋め込みとし、それら以外の事前埋め込みは、社会性発達モデルの各段階で議論する。
- (2) 自己他者認知のレベルに従って、社会性の軸を構成する。すなわち、自己とは異なる対象と感知されるが、それが自分と類似した他者として明確には認知されない非明示的な他者（環境を含む）から、自分と類似した明示的な他者の存在認知への変化を発達の基軸とする。
- (3) 非明示的な他者から明示的な他者認知の過程でミラーニューロンシステムの役割を明示し、その構築と利用の可能性を議論する。
- (4) 学習法としてヘブ学習及び自己組織化マッピングを基本的に想定する。事実、これまでの構成的手法の多くは、これらの学習法を利用している。

図1に、ミラーニューロンシステムを背景とした自己と他者の確立過程を模擬した。自己他者が未分化な状態から

始まり、Neisser [29] に従った分け方をしているが、明確な境界があるわけではなく、連続であると同時に、モダリティや発達する認知能力により一様に発達するわけでもない。むしろ非一様であり、発達段階でどのように相互作用しあうかが興味ある点である。明確な自己や他者の表象があるというよりも、相互作用の動的な状況のなかで、それらに対応する状態が創発される構造が望まれる。

4.1 自己と他者が未分化な状態

近年、4次元超音波撮像などの可視化技術の進展により、胎児の様々な行動及び能力が明らかになりつつある（例えば、文献[30]の第五章など）。ただし、この時期は、自己他者未分化状態と考えられ、母胎内羊水環境で、母親の身体の内外からの刺激としての音や光などが非明示的な他者として作用する。

胎児の感覚の始まりとして、触覚は受精後約10週から、また視覚は18から22週の間くらいからと言われている[31]。身体表象が身体のクロスモダルな表現だとすると、視覚によって他者の身体を知覚する前から、自身の身体表象が触覚などの体性感覚と運動の学習からある程度獲得されると仮定しても不思議ではない。この時期は、視覚、聴覚が作動しつつも、発声や四肢の運動との明確な結びつきが薄く、それぞれが未分化、未発達な状態にあると仮定できる。ただし、次節でも述べるように、口唇周辺や手の触覚分布の高密度である点や、体内での身体の姿勢の拘束から、吸い付きなどの口唇と手の協調運動（手を口唇に近づけると口が開くなど[32]）が学習されているとみなせ、ミラーニューロンシステムの基盤として、個体の運動のライブラリーが獲得され始めていると見なせる。

Kuniyoshi and Sangawa [5]の研究では、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、一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。学習の結果、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。この学習により母胎内では、当初ランダムであった運動が徐々に秩序化してくること、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おり、まさに、“Body shapes brain” [33]の典型例と言える。彼らのアプローチは、個体発達の構成的手法の基本原則と考えられる。最近では、これを起点として、脳や身体、環境のシミュレーション粒度を高め、社会的行動発生原理をも含むことを狙っている[12]。そのためには、ミラーニューロンシステムのような構造が創発することが期待されるが、埋め込みとしての内的構造の基盤に加え、環境の外的構造の要件が明示されなければならない。

4.2 自己と非自己の区別の始まり

新生児期の最大のミステリーは新生児模倣 [34] であろう。明和は、比較認知発達科学の立場から、個体発生的な観点、進化史の観点から議論している [32]。呉 [35] は、重度障害児観察 (随意運動がほとんどなく、大脳皮質が解剖学的にも機能的にもほとんど残存していない重度の脳性麻痺障害者で、新生児模倣と同様の口の模倣が観られる) から、新生児模倣の神経基盤はおもに皮質下にあるのではないかと推論している。これは、手や口唇部分の触覚分布密度も高いことも含めて、口唇周辺の運動がかなり生得的と言わざるをえないことをしめしているのであろうか？皮質下での学習の可能性は、連合学習が可能なこと[†]からも十分伺える。

認知発達ロボティクスの観点からは、大胆な仮説であるが、その要因を二つあげる。一つは、身体構造の物理的拘束である。胎内の窮屈な状況では、両手を抱えているケースが伸ばしている場合よりも多く、口などの顔の近くにくる可能性が高いこと、また、その場合の運動経路にあまり自由度がないと察せられること。これは、先にも述べたように、関節構造だけでなく、筋の張り方により、可能な自由度が既に拘束されていることを意味する。もう一つの仮説は、情報量を増大するための探索などの能動的な行動原理である。すなわち、口唇部は触覚密度が非常に高いと仮定すると、他を触るよりも、多くの情報量が入ってくる可能性がある。また、口腔内という、身体表面と異なる意味合いをもつ部分に対する探索行動としても、胎児にとって興味ある対象と考えられる [36]。

胎児期や新生児期は、ミラーシステムに必要な自己感覚運動写像、特に口唇周辺の手の稚拙な運動が獲得されると考えられる。まだ他者の概念はなく、エコロジカルな自己と非自己の区別がなされ始める時期と考えられる。その基本として、自己の身体認知課題がある。随伴性規範に基づく自己身体弁別は、宮崎、開 [37] が、乳幼児を対象として、時間遅れに対する認知感度について考察している。計算論的には、Asada et al. [38] が、状態次数推定の方式を提案し、次数 1 で観測と運動の直接相関がとれ、静止環境か自己身体もしくは、自己身体と同期した動きをする物体、すなわち道具などを切り出すことが可能である。次数 2 以上は、その他に属され、他者や他者の操作する物体などが含まれる。但し、自己と類似した他者という明確な表象はない。

4.3 明示的な他者の存在を感じる時

生後の一年は、未熟ではあるが、視覚による外界認知、特に自己身体である手を見つめるハンドリガードや母親の顔をいじる視触覚融合、物体を把持し、色んな角度から眺めたり、落としたりして、3次元物体認識や物体の運動の因

果性などの学習が行なわれる。これらを通じ、エコロジカルな自己と非自己の区別が確立される。さらに、こののち、対人的自己や明示的な他者、三項関係などの理解能力が確立されると考えると、基本課題として、自他弁別、他者行動認識が挙げられ、ミラーニューロンシステムが作動するために必要な機能である。

自己と他者が似た存在であるという認知は、他者の内部状態を推定する上で、前提となる条件と社会学では考えられてきたようである。実藤は [39]、先行研究を踏まえ、「ヒトに備わった自他の類似性理解を通して、乳児は他者の中に自己を置いてその動きをたどることが可能となり、... それは、他者の身体や行動の中に自己との類似性を見いだすことができるだけでなく、ある行動にとまって生起する他者の心の動きにも自己との類似性を見いだすことができるようになることを意味する。」と議論している。すなわち、自他の類似性理解は他者の要求や意図、感情の理解といった後続する社会的認知発達の一側面を支える基盤と仮定される [40]。

構成的手法の観点から、類似性理解の基礎として、顔のようなパターンに対する好みを前提とし、自身の顔の部位の配置、視覚による他者観測時における顔パターンの検出及び顔部位対応の課題が挙げられる。新生児模倣に対する学習可能性として、Fuke et al. [41] は、視野内で腕を動かし、運動中の関節角速度と手先位置変化量の間を関係づける写像をニューラルネットによって学習し、その結果を用いて視野外でも腕の関節角度を通して手先位置を推測するモデルを提案した。また、接触運動中の各種センサ入力値に発生する不連続性をもとに、顔表面からパーツを構成する特徴的な触覚センサ情報を抽出するモデルを提案した。さらに抽出した顔の情報を、他者の顔の視覚情報から抽出される特徴的な視覚情報と対応関係をとることにより、顔の模倣の基盤となるモデルを提案した。顔という非常に重要なコミュニケーションインターフェース部位の類似性理解を起点として、他の身体部位の類似性理解、さらには、行動の類似性理解にも繋がると考えられる。

そこで、次の課題の「他者行動認識」だが、その前提として、座標変換の課題がある。同一行動の主体の差異 (自己運動か他者運動) による観察の見かけの違いの吸収である。頭頂葉で自己座標系と他者座標系の変換が行なわれているようだ [42] が、発達の観点から、生得的と考えるよりも生後の学習の結果として変換プログラムが構築されたと思いたい。とすれば、いかにして可能か？サルの場合のゴール指向の他動詞的動作であれば、強化学習のスキームで報酬獲得による価値の等価性 [43] により、同一行動の異なる視点からの観察による見かけの違いばかりでなく、実現方法が異なる行動でも等価とみなすことで、結果として、座標変換が可能と考えられる。ただし、これは、サルの場

[†]www.tmd.ac.jp/med/phy1/ptext/high3.html

合に対応し、ヒトの場合は、より一般的なスキームが必要かもしれない。例えば、物体操作など学習や発達を通じて、半ばゴール指向、半ば視触覚融合の連続的表象構築により、結果として座標変換が可能かもしれない。その際には、並行する他の認知機能の発達との兼ね合い(独立か、相互促進か、干渉か)も、構成的手法の観点から興味深い課題である。

4.4 養育者という他者と自己との相互作用

乳児期とオーバーラップするが、この時期は、養育者という、より明確な役割をもつ他者の概念が確立されると同時に、それは自身に対する概念的自己も確立されるであろう。この時期の代表的課題として、共同注意、模倣、共感などが挙げられる。

これまでの共同注意を実現するロボット研究(例えば、[44][45]など)では、主に視線制御のみを扱っており、「共同注意は、他者の視線を追従した先にある他者の注意の対象に、自ら注意を向けることを必要条件としている[46].」にあてはまるとは、言い難い。何らかの形で自他弁別や他者行動の認識が可能であれば、共同注意の基本行動としての視線制御から、他者の注意対象を推察しながら、視線を合わせる合目的行動としての共同注意(この場合、共同注視)への発達[47]が可能になると考えられる。この過程で、他者の注意が、自己の中で表象され、自己の注意との共有、嶋田[27]の言葉を借りれば、他者の注意を自己の注意としてすりあわせることで、注意が共有される。これは、まさしく、ミラーニューロンシステムの働きと見なせる。なぜなら、3で述べたように、例えば、他者の背中を誰かが触ったのを自分が見たときに、自分では観測できない触られ行動を感じるように、視覚的に対応可能な自他のアクション間のみならず、直接観測できなくても、内部状態として抽象化した知覚の対応を取ることミラーニューロンシステムによって可能であると考えられるからである。このような過程を得ることで、自ら他者の注意を喚起する視線行動する社会的参照などの社会的行動が獲得されるであろう。

模倣に関しては、先に述べた座標変換が明示的か非明示的に関わらず、可能であれば、模倣行動の生成に関しては、問題が少ない。音声知覚の場合の座標変換は、音韻的な違いにも関わらず、自己と他者の間でシンボルとして等価と見なせるようになるかが課題である。構成的手法としては、養育者がゴール指向の情報を明示的か非明示的に関わらず大きなバイアス与えていることを仮定した研究がなされている[48]。これらは、模倣したり、されたりすることが、コミュニケーションの頻度を増し、学習を加速する。

前節で類似性理解の出発点の部位として顔の重要性を指摘したが、より積極的には、顔認知から顔表情表出の課題がある。コミュニケーションにおいて、他者の顔表情や視線を識別し、それに応じて行動することは極めて重要であ

るので、構成的手法にとって、顔の設計や構築のハードルは高いが、越えなければいけない課題である。

Watanabe et al. [49]は、直感的親行動にもとづき共感ロボットを構築した。明示的、ときには非明示的に、親が子どもの立場に立って、自身の、すなわち子の内部状態に対応する顔表情を表出させることで、子が親の顔表情の意味する内部状態が推し量れるという仮説に基づいている。但し、この研究はこの部分に焦点を当てたので、内部状態空間において、他者と自己の区別がない。先の議論を考慮すると、概念的自己の確立として、他者もしくは他者性として、似ているが、完全同一ではない存在の認知があり、そこに自己とは異なる差異が存在する。この過程で、先にも述べたように、差異を埋めて行く行為の連続が、模倣やコミュニケーションに繋がると考えられる。

4.5 自己概念の社会的発達とミラーシステム

これまで、自己概念の社会的発達とミラーシステムの関係を構成的手法の観点から眺め、認知発達ロボティクスの研究例を交えて、その課題を示してきた。さきに述べたように、時期や認知機能に応じて、個別に表象するのではなく、統一かつ構成的に、認知発達を説明かつ設計可能な形で提供できなければ、新しい価値観に繋がらない。すなわち、図1に示した自己概念の発達が、個別の表象ではなく、統一的な構造の発展なり創発の帰結として生じることが期待される。ただし、一朝一夕には、非常に困難なので、この問題意識を背景に、課題を切り出さざるを得ない。その際、想定する月齢の時点での想定される認知能力、学習発達させるべき認知機能を明確にし、それらの関係(独立か、相互促進か、干渉か)を明らかにすることの積み重ねで、おぼろげながら全体像をポップアップできれば、結果として新しい価値の創造が期待できる。

言語や心の理論課題が、認知発達ロボティクスとしては、シンボリックな意味でゴールになる。これまで述べてきた自己と他者の概念確立の発達過程を経て、モダリティに依存しない模倣能力により、動作によるコミュニケーションから音声コミュニケーションへの発展[50]が期待される。そのためには、研究用プラットフォームの開発も重要である。まだ扱えるには、時間を要する課題として、記憶の問題がある。時間の概念獲得には、身体が朽ちて行く様を実感することが、ロボットにも必要であろうし、悲しみなどの情動状態も根源的な意味合いで身体に帰着する。そのための身体設計が必要である。

5. 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、主に社会的行動獲得の観点から示してきた。特に、ミラーシステムの潜在能力を想定した、他者認知、模倣、言語などの基本課題を認知発達ロボティクスの観点からの見直しを試みた。ミラーシステムに過渡の期待をかけることは禁物 [51] で、該当分野での精緻な解析を見守るだけでなく、構成的手法のパラダイムを駆使して、モデル提案も積極的に行なっていくべきであろう。その際、健常児のみならず、発達の障害児の症例は、モデル構成の参考になるだろう。

多賀は解説「発達と創発 [52]」で、「脳および行動の発達過程での変化をより詳しく明らかにしていくとともに、分化によって発展するシステム論を構築しなければならない」と述べ、最後に西田幾多郎の言を引用している。「意識は決して.. 単一なる精神的要素の結合により成ったものではなく,.. 初生児の意識の如きは.. 混沌たる統一であろう。この中より多様な種々の意識状態が分化発展し来るのである... いかにか精彩に分化しても、何処までもその根本的な体系の形を失うことはない。我々の直接なる具体的意識はいつでもこの形において、現れるものである。」

認知発達ロボティクスは、このような意識のありようを支える基盤としての構造を設計できれば、既存科学にはない価値を創造できるであろう。議論が始めに戻ってしまったが、本稿で結論がでるべくもなく、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)、研究員の荻野正樹氏 (現、阪大)、吉田千里氏、吉川雄一郎氏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。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 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, , 2010.
- [3] 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.
- [4] 浅田稔, 國吉康夫. ロボットインテリジェンス. 岩波書店, 2006.
- [5] 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.
- [6] S. J. Paterson, J. H. Brown, M. K. Gsodl, M. H. Johnson, and A. Karmiloff-Smith. Cognitive modularity and genetic disorders. *Science*, Vol. 286, pp. 2355–2358, 1999.
- [7] A. Karmiloff-Smith. Development itself is the key to understanding developmental disorders. *Trends in Cognitive Science*, pp. 389–398, 1998.
- [8] 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.
- [9] E. Bates. Plasticity, localization and language development. In S. H. Broman and J. M. Fletcher, editors, *The Changing Nervous System: Neurobehavioral Consequences of Early Brain Disorders*, pp. 214–253. Oxford University Press, 1997.
- [10] M. I. Posner and S. E. Petersen. The attention system of the human brain. *Annual Review of Neuroscience*, pp. 25–42, 1990.
- [11] 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.
- [12] 森裕紀, 國吉康夫. 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.
- [13] 新山, 國吉. ニューマティ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 (ROBOMECC2007), pp. 1A1-F03, 2007.
- [14] 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.
- [15] Olaf Sporns and Gerald M. Edelman. Solving bernstein's problem: A proposal for the development of coordinated movement by selection. *Child Dev.*, pp. 960–981, 1993.
- [16] 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.
- [17] Rolf Pfeifer, Fumiya Iida, and Gabriel Gómez. Morphological computation for adaptive behavior and cognition. In *International Congress Series*, Vol. 1291, pp. 22–29, 2006.
- [18] サンドラ プレイクスリー (著), マシュー プレイクスリー (著), 小松 淳子 (翻訳). 脳の中の身体地図—ボディ・マップのおかげで、たいていのことがうまくいくわけ. インターシフト, 2009.
- [19] スー. サベージ. ランバウ, ロジャー. ルーウィン著, 石館康平訳. 「ヒトと話すサル: カンジ」. 講談社, 1997.
- [20] T. Minato, Y. Yoshikawa, T. Noda, S. Ikemoto, H. Ishiguro, and M. Asada. Cb²: A child robot with biomimetic body for cognitive developmental robotics. In *Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Humanoid Robots*, pp. CD-ROM, 2007.
- [21] Yoshiyuki Ohmura, Yasuo Kuniyoshi, and Akihiko Nagakubo. Conformable and scalable tactile sensor skin for curved surfaces. In *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1348–1353, 2006.
- [22] Shinya Takamuku, Atsushi Fukuda, and Koh Hosoda. Repetitive grasping with anthropomorphic skin-covered hand enables robust haptic recognition. In *Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems 2008 (IROS '08)*, p. ThAT13.5, 2008.
- [23] Rizzolatti G., Camarda R., Fogassi M., Gentilucci M., Luppino G., and Matelli M. Functional organization of inferior area 6 in the macaque monkey: II. area f5 and the control of distal movements. *Exp. Brain Res.*, Vol. 71, pp. 491–507, 1988.
- [24] G. Rizzolatti and M. A. Arbib. Language within our grasp. *Trends Neuroscience*, Vol. 21, pp. 188–194, 1998.
- [25] 村田哲. 脳の中にある身体. 開一夫, 長谷川寿一 (編), ソーシャルブレインズ 自己と他者を認知する脳, pp. 79–108. 東京大学出版会, 2009.
- [26] Vittorio Gallese and Alvin Goldman. Mirror neurons and the simulation theory of mind-reading. *Trends in Cognitive Science*, pp. 493–501, 1998.
- [27] 嶋田総一郎. 自己と他者を区別する脳のメカニズム. 開一夫, 長谷川寿一 (編), ソーシャルブレインズ 自己と他者を認知する脳, pp. 59–78. 東京大学出版会, 2009.
- [28] 福島宏器. 他人の損失は自分の損失?—共感の神経的基盤を探る. 開

- 一夫, 長谷川寿一 (編), ソーシャルブレインズ 自己と他者を認知する脳, pp. 191–216. 東京大学出版会, 2009.
- [29] Ulric Neisser (Editor). *The Perceived Self: Ecological and Interpersonal Sources of Self Knowledge*. Cambridge University Press, 1993.
- [30] 明和政子. 心が芽ばえるとき. NTT 出版, 2006.
- [31] <http://www.birthpsychology.com/lifebefore/fetalsense.html>.
- [32] 明和政子. 身体マッピング能力の起源を探る. ベビーサイエンス, Vol. 8, pp. 2–13, Dec 2008.
- [33] 國吉康夫. 赤ちゃんロボットは心を獲得できるか—構成論的科学的試み—. 日本赤ちゃん学会 第 8 回学術集会, 2008.
- [34] Andrew N. Meltzoff and M. Keith Moore. Imitation of facial and manual gestures by human neonates. *Science*, pp. 74–78, 1977.
- [35] 呉東進. 重度障害児に見られる口の模倣行動から考える. ベビーサイエンス, Vol. 8, pp. 17–18, Dec 2008.
- [36] 浅田稔. 浅田共創知能システムプロジェクト, Jan 2009.
- [37] 宮崎美智子, 開一夫. 自己像認知の発達. 開一夫, 長谷川寿一 (編), ソーシャルブレインズ 自己と他者を認知する脳, pp. 39–56. 東京大学出版会, 2009.
- [38] Minoru Asada, Eiji Uchibe, and Koh Hosoda. Cooperative behavior acquisition for mobile robots in dynamically changing real worlds via vision-based reinforcement learning and development. *Artificial Intelligence*, Vol. 110, pp. 275–292, 1999.
- [39] 実藤和佳子. 他者の中に自己をみる—自他の類似性理解が拓く初期発達の可能性—. 心理学評論, Vol. 52, No. 1, pp. 99–110, 2009.
- [40] Andrew N. Meltzoff. The ‘like me’ framework for recognizing and becoming an intentional agent. *Acta Psychologica*, pp. 26–43, 2007.
- [41] Fuke Sawa, Masaki Ogino, and Minoru Asada. Body image constructed from motor and tactile images with visual information. *International Journal of Humanoid Robotics*, Vol. 4, pp. 347–364, 2007.
- [42] K. Ogawa and T. Inui. Lateralization of the posterior parietal cortex for internal monitoring of self-versus externally generated movements. *Journal of Cognitive Neuroscience*, Vol. 19, pp. 1827–1835, 2007.
- [43] 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)*, pp. 291–300, 2008.
- [44] Yukie Nagai, Minoru Asada, and Koh Hosoda. Learning for joint attention helped by functional development. *Advanced Robotics*, Vol. 20, No. 10, pp. 1165–1181, 2006.
- [45] Yukie Nagai, Koh Hosoda, Akio Morita, and Minoru Asada. A constructive model for the development of joint attention. *Connection Science*, Vol. 15, No. 4, pp. 211–229, 2003.
- [46] N. J. Emery, E. N. Lorincz, D. I. Perrett, and M. W. Oram. Gaze following and joint attention in rhesus monkeys (*macaca mulatta*). *Journal of Comparative Psychology*, Vol. 111, pp. 286–293, 1997.
- [47] G. E. Butterworth and N. L. M. Jarrett. What minds have in common is space: Spatial mechanisms serving joint visual attention in infancy. *British Journal of Developmental Psychology*, Vol. 9, pp. 55–72, 1991.
- [48] 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.
- [49] 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.
- [50] Michael A. Arbib. The mirror system hypothesis on the linkage of action and languages. In Michael A. Arbib, editor, *Action to Language Via the Mirror Neuron System*, pp. 3–47. Cambridge University Press, 2006.
- [51] Gregory Hickok. Eight problems for the mirror neuron theory of action understanding in monkeys and humans. *Journal of Cognitive Neuroscience*, Vol. 21, pp. 1229–1243, 2009.
- [52] 多賀殿太郎. 発達と創発. 計測と制御, Vol. 48, No. 1, pp. 47–52, 2009.

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.