

認知発達の原因を探る： 感覚・運動情報の予測学習に基づく 計算論的モデル

長井 志江 大阪大学大学院工学研究科

連絡先：〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1 E-mail：yukie@ams.eng.osaka-u.ac.jp

要旨

人間の多様な認知機能は、どのようなメカニズムに基づいて発達するのであろうか。長年、多くの研究者がこの課題に取り組んできたが、いまだにその解は得られていない。これに対して新たな示唆を与えるのが、計算論的モデルを設計することで発達メカニズムを探る、構成的アプローチである。本稿では、認知発達の原理として「感覚・運動情報の予測学習」に基づく理論を紹介し、多様な認知機能がこの原理に基づいて獲得されることを、計算論的モデルの構築とロボットを用いた実験によって証明する。また、本理論を発展させることで、自閉スペクトラム症などの発達障害の発生要因も説明しうることを示す。

1. はじめに

認知発達の原理の解明は、赤ちゃん学において最も重要でかつ困難な課題の一つである。従来から、認知心理実験による行動解析や、神経科学実験による脳活動計測を通して、乳幼児期だけではなく、新生児期、さらには胎児期からの赤ちゃんの発達が詳細に研究されてきた。これらの解析的アプローチに対して、異なる側面から認知発達の原理に光をあてるのが、構成的手法と呼ばれる計算論的アプローチである^[1-3]。特に、ロボットという身体性を備えた主体をプラットフォームとして、計算論的発達モデルの検証実験を行うことで、認知心理学・神経科学研究で提案された仮説の多角的検証と、神経・身体・環境という異なるダイナミクスの相互作用としての認知発達を研究することが可能となる。

本稿では、計算論的視点から認知発達の原理の解明に向けて取り組んだ研究を紹介する。著者は、乳幼児の認知発達の基盤に「感覚・運動情報の予測学習」があると提

唱してきた^[4]。以降の節では、まず感覚・運動情報の予測学習に基づく発達の理論を説明し、その後、本理論に基づいたロボットの認知発達モデルを紹介する。自他認知の発達と物体操作能力の学習、そして、利他的行動の創発を例に、ロボットが感覚・運動情報の予測学習という共通のメカニズムを基に、いかに多様な認知機能を獲得しうるかを説明する。さらに、本理論を拡張することで、自閉スペクトラム症などの発達障害が、感覚・運動情報の非定型な予測学習として説明しうることも示す。

2. 感覚・運動情報の予測学習に基づく認知発達

2.1 多様な認知機能の発達とそこに内在する連続性

乳幼児の認知発達は、いかにして起こるのか？そして、そこにはどのような原理が存在するのか？これらの問いに答えるためには、まず、発達が連続的な現象であることを認識しなければならない。

乳幼児は生後数年の間に、自己の認知や物体操作、他者とのコミュニケーションなど、さまざまな認知機能を獲得する。これらの能力は、一見、独立したもののように見えるが、実は、そこには共通の発達原理が存在すると考えられる。ここで、乳幼児の発達を木の成長にたとえて説明したいと思う。木は成長するに従って徐々に枝分かれし、その先に無数の葉をつけ、やがて魅力的な実をつける。ここで見られる葉や実は、一見、それぞれが独立した物体であるかのように見えるが、それらはすべて一本の木から成長したものであり、共通の種をもつ。乳幼児の認知発達もこれと同じ仕組みである。乳幼児が獲得する認知機能は木の葉や実に相当し、種は乳幼児の生得的機能に相当する。種が環境から日の光や水といった栄養を受けることで成長し、多くの葉と実をもつと

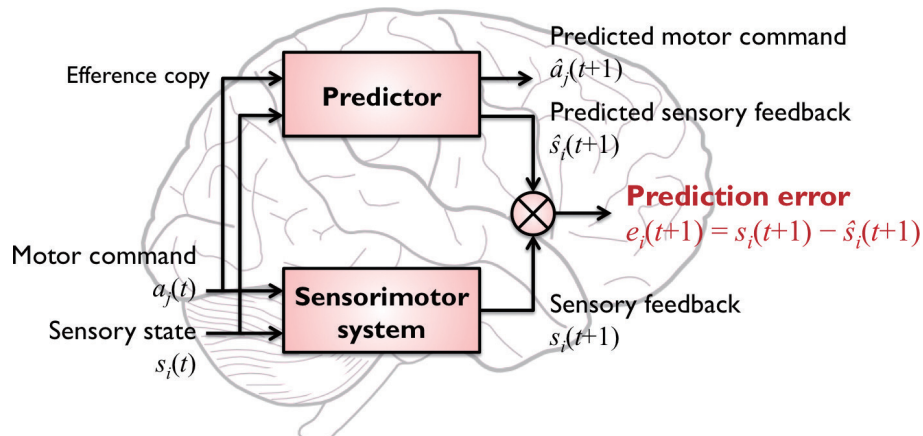


図1 脳の予測学習モデル。人間は運動指令をもとに感覚・運動器を通して得られた実際の感覚フィードバック $s_i(t+1)$ と、遠心性コピーをもとに予測器で計算した感覚フィードバック $\hat{s}_i(t+1)$ との間の誤差(予測誤差) $e_i(t+1)$ を最小化することで、感覚・運動情報の予測学習を行う^[4]より引用)。

同様に、限られた生得的能力をもって生まれる乳幼児も、環境や他者との相互作用を通して多様な認知機能を獲得する。物体操作や他者とのコミュニケーションなど、一見、無関係に思える認知機能も、それが発現している感覚・運動様式が異なるだけで、その背後には共通の発達原理が存在している。つまり、認知発達の連続性を考慮した上で、発達の「種」を探ることが、乳幼児の認知発達の原理の解明につながると期待できる。

2.2 感覚・運動情報の予測学習と認知発達

著者はこの発達の種として、人間の脳がもつ予測学習の機能に注目し、乳幼児の「感覚・運動情報の予測学習」が、認知発達の基盤であると提唱してきた^[4]。予測学習とは、現時刻・空間の信号から、将来や未知の空間の信号を推定できるように、その対応関係を学習することである。人間が目標指向の運動を生成したり、環境に応じて適切な行動を決定することができるのは、この予測学習のおかげであると考えられている^[5,6]。

図1に予測学習の概念的モデルを示す。本モデルは、大きく分けて二つのモジュールから成る。一つは感覚・運動器(図下部)で、現在(時刻 t)の感覚信号 $s_i(t)$ と脳で生成された運動指令 $a_j(t)$ をもとに実際に身体を動かし、環境との相互作用の結果として得られる感覚信号 $s_i(t+1)$ を脳にフィードバックする役割をもつ。もう一つは予測器(図上部)で、運動指令 $a_j(t)$ の遠心性コピーと現在の感覚信号 $s_i(t)$ から、次時刻 $t+1$ の感覚信号 $\hat{s}_i(t+1)$ と運動指令 $\hat{a}_j(t+1)$ を予測する役割をになう。そして、これら二つのモジュールから出力された実際の感覚信号と予測した感覚信号の差として予測誤差 $e_i(t+1)$ を計算し、人間はこれを最小化するように自己の内部モデルを学習する。

$$e_i(t+1) = s_i(t+1) - \hat{s}_i(t+1) \quad (1)$$

では、この予測学習の能力が、実際に乳幼児の認知発達とどのように関係しているのでしょうか。著者は、感覚・運動情報の予測学習にはおもに二通りの方法があり、それを基盤として多様な認知機能が創発すると考えている。図2にその二通りの方法と、乳幼児が発現する認知的行動との関係を示す。まず一つ目の方法は、予測器を更新することによって予測誤差を最小化する方法である(図2(a)参照)。これはおもに、発達初期に重要な役割をになうと考えられる。生後まもない乳幼児は感覚・運動経験が乏しく、未熟な予測器を持って生まれる。そして、身体バブリングなどの探索行動を通して、自己の身体や環境からの感覚信号を獲得し、その信号とそれを生成した運動との対応関係を学習することで予測器を精緻化する。この過程で最初に発現するのが、自他認知の能力である。乳幼児は全ての感覚信号に対して予測学習を行うと、予測誤差がゼロに収束する信号群と、そうでない信号群に大別されることに気づく。これが、自己と他者(非自己)に対応している。自己の身体は、ある感覚信号と運動指令に対して毎回、同じ感覚信号をフィードバックするため、感覚と運動の関係は予測誤差ゼロとなる。これに対して、他者や物体などの非自己は、感覚と運動の対応関係をいくら更新したとしても、自己では予測し得ない他者の内的な状態(意図や信念など)や文脈の影響を受けるため、多少の予測誤差を残してしまう。このように、予測学習の結果として残る予測誤差を規範に、感覚信号をクラスタリングすることで、自他認知が可能になると考えられる。ただし、ここでは低次の自他認知を対象としており、高次の概念的な自他認知はより複雑な過程で起こることに注意されたい。

では、発達の後期に見られる、自己と他者の社会的な関わりについてはどうでしょうか。これには、予測器によって推定された運動指令の実行による、予測学習がお

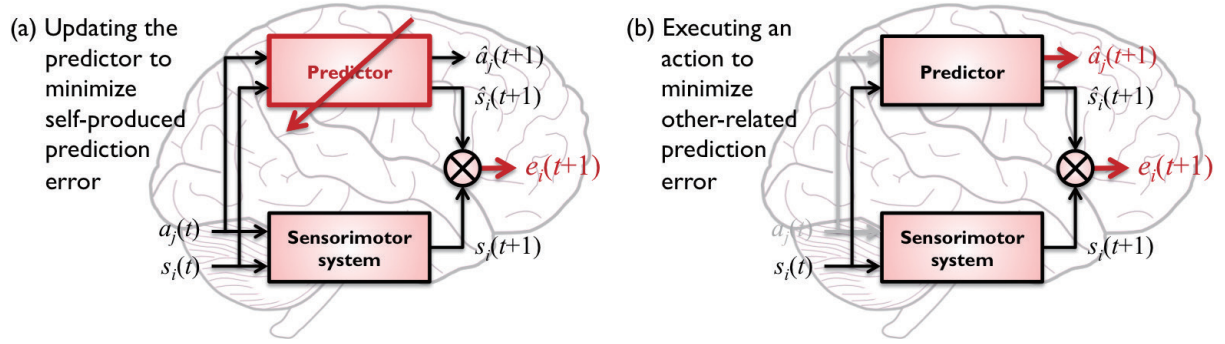


図2 感覚・運動情報の予測学習に基づく乳幼児の認知発達。乳幼児は感覚・運動経験を通して(a)予測器を更新し、さらに(b)予測器が生成した運動指令を実行することで、予測誤差を最小化する。この過程を通して、自己認知や物体操作、利他的行動などの認知機能を獲得する⁽¹⁴⁾より引用)。

もに参与していると考えている(図2(b)参照)。上で述べたように、予測器をいくら精緻化したとしても、他者の行動を完全に予測することは困難である。そこには、他者の内的状態の影響であったり、文脈の影響が残る。では、乳幼児はこの予測誤差を、どのように解消しているのだろうか。そこには、乳幼児自身の予測運動の生成が関係しているのではないかと考えられる。たとえば、利他的行動を例にとってみると、14ヵ月頃の乳幼児は、他者が動作目標を達成できない様子を見ると、自主的にそれを助けることが知られている^[9,10]。このとき、乳幼児には必ずしも報酬や社会的信号が与えられないが、他者の代わりに動作を遂行しようとする動機が見られる。著者は、ここに予測誤差の最小化規範に基づく予測運動の生成が関係しているのではないかと考えている。つまり、乳幼児は他者の運動を観察したときに、それがどのような結果をもたらすのか、常に自己の内部モデルをもとに予測している。その過程で、もし他者が何らかの理由により運動の目標を達成できなかったとすると、乳幼児は観察した状態と予測した状態との間に予測誤差を検出する。これが引き金となり、乳幼児は予測器が推定した運動を自己の運動として生成することで、生じた予測誤差を最小化するのではないかと考えられる。言い換えれば、乳幼児の初期の利他的行動には、他者を援助しようとする意図はまだないが、予測誤差の最小化をきっかけに生じた行動が、その後、環境や他者からのさまざまな社会的報酬を得ることで、真に社会的な認知機能へと発展していくという仮説である。

3. 計算論的認知発達モデルとロボットによる検証

本節では、前節で述べた理論に基づき構築した、認知発達の計算論的モデルを紹介する。感覚・運動情報の予測学習という共通のメカニズムを基に、ロボットが自己認知や物体操作、利他的行動などの認知機能をいかにして獲得するかを実験により示す。

3.1 自己認知の発達とミラーニューロンの創発

まずは、認知発達の基礎とも言える、自他の認知能力について考える。乳幼児は自己と他者の境界があいまいな状態で生まれ、他者を含む環境との相互作用を通して、徐々に自他を識別するようになると言われている^[11]。Piaget が定義した反射期や第一次循環反応期の乳児は、まだ自己を認識できておらず、この時期に観察される指吸いやハンドリガード(自分の手をじっと見つめること)は、自己を探索している過程であると捉えることができる^[12,14]。

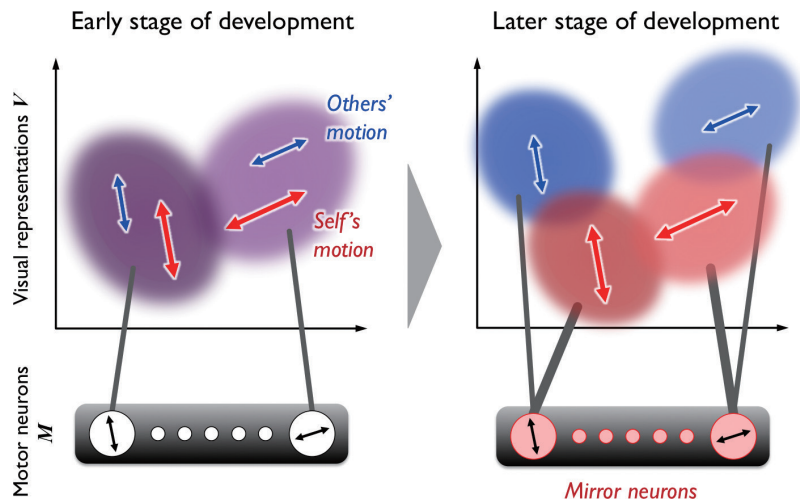
発達心理学者は乳幼児がいつ、どのような信号に基づいて自己を認知するようになるのかを探るため、さまざまな行動実験を提案した。Bahrick and Watson^[11]は乳児の目の前に2台のディスプレイを置き、一方にはその乳児の脚をリアルタイムで撮影した映像を表示し、他方には同一の乳児の脚ではあるがリアルタイムではない映像か、他の乳児の脚を映した映像を表示して、選好注視法により乳児がどちらをより好んで見るかを調べた。リアルタイムの映像は、乳児の身体運動に対して視覚が随

伴的に応答するのに対して、非リアルタイムの映像や他の乳児の映像は、運動と視覚との間に随伴性が存在しない。つまり、乳児が二つの映像のどちらかに選好性を示すか否かで、自己の運動に対する視覚的応答を予測できているかどうかを調べることができる。3ヵ月児と5ヵ月児を対象に実験を行った結果、3ヵ月児では随伴的／非随伴的映像に対して選好性を示さない(どちらも好んで長く見る)のに対して、5ヵ月児は非随伴的な映像を有意に長く見ることが明らかになった。これは、乳児が5ヵ月頃になって初めて、運動と感覚の随伴性に気付けるようになったことを示しており、随伴性が自己認知の一つの指標になっていることを示唆している。また、Rochat and Mogan^[15]は感覚信号の空間的特徴に注目し、乳幼児が自己の身体をどのような空間座標に基づいて認識しているのかを調べた。前述の実験^[11]が随伴性という時間的特徴に注目していたのに対して、本実験はそれとは異なる側面(空間的特徴)を調べていることになる。実験設定はBahrick and Watson^[11]の実験に類似しているが、2台のディスプレイに表示する映像は、一方が乳児自身の脚を自己視点から撮影したもの、他方がその映像を他者視点に変換したもの、もしくは左右反転したもの、上下反転したものであった。自己視点映像では、自分で自分の脚を見ているときのように、足先が映像の上部、大腿部が映像の下部に表示されるのに対して、他者視点映像ではそれが上下反転し、さらに左右反転も加わった状態になる。時間的特徴はいずれもリアルタイムの映像なので、条件は同じである。このような設定で3ヵ月から5ヵ月の乳児を対象に選好注視法で実験を行った結果、どの月齢の乳児も左右反転が加わった映像(他者視点映像も含む)を有意に長く観察し、また、そのときの身体運動も増幅させることが確認された。この結果は、乳児の自己身体の知覚に、空間的な左右性が関与していることを示している。さらにRochat and Striano^[16]はこれらの実験を発展させ、乳児がいつ頃から自己と他者(単なる非自己ではない)を識別するようになるのか、そしてどのような信号を手がかりに他者を認識するのかを調べた。彼らは乳児を椅子に座らせ、目の前に1台のディスプレイを置き、一つの条件では乳児自身のリアルタイムの映像を表示し、もう一つの条件では乳児の動きをリアルタイムで模倣する他者(成人の実験者)の映像を表示して、乳児の反応を調べた。3分間の実験の中で乳児の微笑みや発声、注意を引こうとする社会的行動がどのくらい表出されたかを測ったところ、4ヵ月児は自己の映像が表示されているときよりも、他者が表示されているときにより多くの社会的行動を表出し、9ヵ月児ではその傾向がさらに強まることが分かった。この実験では、他者は乳児の動きを模倣しているが、完全に随伴的に振る

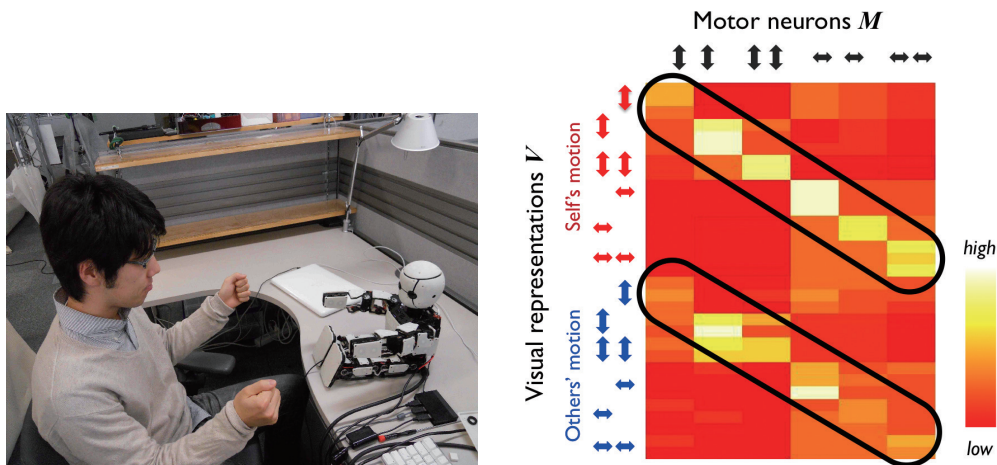
舞うことはできず、動きの遅れや空間的なずれ、また見た目の違い(乳児と成人)を含んでいる。乳児はそのわずかな時間的・空間的随伴性の差を検出し、それによって自己と他者を識別していたと推測される。

著者らはこれらの行動実験で得られた知見を検証し、さらに、感覚・運動情報の予測学習を基盤にそのメカニズムを説明するため、自他認知の計算論的発達モデルを提案した^[17,18]。ここでの仮説とは、生後まもない乳幼児は感覚・運動能力が未熟なため、自己と他者が未分化な状態にあるが、身体バブリングを通じた感覚・運動情報の予測学習により、徐々に自己と他者を予測誤差の大きさに基づいて識別するようになるというものである。図3(a)に本仮説を検証する計算論的モデルを、(b)にそれをロボットに実装して実験を行った様子と、実験の結果を示す。提案したモデルは、視覚表象(図3(a)上段)と運動表象(下段)の二つの層からなり、左が発達初期の状態を右が発達後期の状態を示している。ロボットはこのモデルをもとに、まず運動表象層にある運動ニューロンからランダムに一つを発火させ、それに対応した運動を生成する。実験では、腕を上下／左右に動かす運動を用意している。そして運動実行中に自分の腕の動きを視覚上で観察しながら、ロボットは検出したオプティカルフローを自動でクラスタリングし(図中の楕円)、そのクラスタと発火した運動ニューロンとの関係をヘップ則で学習する(視覚表象と運動表象間の結合)。ここで重要なのは、発達初期では自己と他者の動きが同一のクラスタとして認識され、発達とともに徐々に分化していくという点である。図3(b)に示すように、人(他者)はロボット(自己)と対面した状態で、養育者と乳幼児の関係と同様に、ロボットに対してある程度(完全ではない)随伴的に応答する。すると、発達初期ではロボットの感覚が未熟なため、ロボットは自己の動きと他者の動きの時間的・空間的ずれを検出することができず、両方を同一視したクラスタを形成してしまう(図3(a)左参照)。そして、このクラスタは同時に発火していた運動ニューロンと結合されるので、自己と他者の区別ができない状態を生み出してしまう。一方、発達が進み感覚が精緻化すると、他者の動きに内在する時間的・空間的ずれが検出できるようになり、自己と他者の動きが別々のクラスタとして認識され(図3(a)右参照)、運動ニューロンとの結合にも違いを生じる。常に随伴的な関係にある自己の動きのみが運動ニューロンとの結合を強化し、他者の動きは発達初期に獲得した結合だけを残すようになる。この結合強度が感覚・運動情報の予測性に対応しており、ロボットは結合強度の違いによって自己と他者を識別することができる。

ここまでするまでが自他認知の発達であるが、本モデルにはもう一つの興味深い特徴が存在する。それは自他認知の発



(a) 自己認知の計算論的発達モデル(左: 発達初期、右: 発達後期)。ロボットは運動表象(下段)と視覚表象(上段)の対応関係を、ヘップ則により学習する。発達初期は感覚・運動が未熟なため、自他が未分化の状態にあるが、発達にともないそれらが精緻化し、自他の運動に内在する時間的・空間的随伴性の違いが検出されるようになると、徐々に自他を識別するようになる。またこの過程で、未分化であった自他に起因して、運動表象にミラーニューロンの機能を獲得する。



(b) 人とロボットのインタラクション実験(左)と、実験により獲得されたミラーニューロン(右)。ロボットは運動ニューロンと自己運動の視覚表象の対応関係だけでなく、それに対応した他者運動の視覚表象との対応関係も獲得する。

図3 自己認知の発達とミラーニューロンの創発^(17,18)より引用)

達過程で創発する、ミラーニューロンである。ミラーニューロンとは、他者の運動をまるで自己の運動であるかのように認識するニューロンで、運動野に存在しながら、自己の運動を生成するときだけではなく、それと同じ他者の運動を観察しているときにも発火することが知られている^[19-21]。著者らが提案したモデルを見てみると、学習の結果、獲得された感覚・運動のマップ(図3(b)右参照)では、個々の運動ニューロンが視覚表象層の自己の動きだけではなく、それと等価な他者の動きとも結びついていることが確認できる。ミラーニューロンの発達の起源としては、これまでおもに二つの仮説が考えられてきた。一つは Meltzoff and Moore^[22, 23]による active intermodal mapping 説で、そもそも自己と他者にはモダリティを超えた等価性があり、それを検出する機能が生得的に備わっていることによって、自己と他者の対応

関係を知ることができるというものである。もう一つは Hayes et al.^[24, 25]による associative sequence learning 説で、自己と他者の等価性を仮定せずとも、社会的環境において他者からの随伴的な応答を利用することで、自己と他者の関係を学習によって獲得することができるというものである。著者らのモデルは、これらの二つの仮説の融合であると思えることができる。感覚と運動の関係をヘップ則で学習しているという点で associative sequence learning 説を基盤とするが、active intermodal mapping 説で仮定する自己と他者の等価性を積極的に利用することで(特に、感覚・運動機能の発達を想定することで、発達初期に自他の等価性を顕在化させている)、ミラーニューロンの獲得を実現している。以上のように、感覚・運動情報の予測学習という共通の原理に基づき、自己認知の発達とミラーニューロンの創発が統

一的なメカニズムで説明できたことは特筆すべき点である。

3.2 物体操作能力の発達における目標指向性の発現

では次に、外界へ向けられる動作として、物体操作能力の発達について考える。乳幼児は自己を認知できるようになると、身体を意図的に動かすことを学び、やがて物体を操作する能力を獲得する。Piaget が定義する協応化した第二次循環反応期に見られるように、乳幼児は興味深い感覚を引き起こす運動を発見すると、それを繰り返すことで、自己の感覚・運動パターンとして獲得する^[12-14]。

Carpenter et al.^[26]は、この時期の乳幼児の物体操作の様子を詳細に観察し、乳幼児の物体操作能力には目標指向性があることを発見した。目標指向性とは、動作を構成する要素を、「目標」とそれをどう達成するかという「手段」に分けて考えたときに、目標をより重要視するという性質である。彼らは、12ヵ月から18ヵ月の幼児に、おもちゃを持ってそれを箱の中へ入れるという動作を呈示し、幼児がその動作をどのように模倣するのかを調べた。このとき、環境中には箱(目標)が2個置かれ、おもちゃを箱へ動かす手の動き(手段)にも2種類あった。すると、ほとんどの幼児は、実験者と同じ箱へおもちゃを入れることはできたが、おもちゃを動かす手の動きを真似ることはできなかった。この結果は、箱の位置や手の動きを変えた場合でも同じであり、つまり、幼児は目標を再現することはできたが、手段の再現はできなかった(もしくは、しなかった)ことを示している。Bekkering et al.^[27]や Gleissner et al.^[28]は、3歳から5歳の子供に自分の耳を手で触るという動作を呈示し、それが正しく模倣できるかどうかを調べた。左右それぞれの手で同側の耳を触る条件や、反対の耳を触る条件、また両手を使ってそれぞれの同側、もしくは反対の耳を触る条件など、全部で6通りの動作を呈示した。その結果、子供は実験者と同じ側の耳を触ることはできたが、使用する手は実験者の呈示動作に関係なく、耳と同側の手を使う傾向があることが分かった。つまり、この実験でもどちらの耳を触るかという目標を達成することはできたが、どちらの手を使ってそれを達成するかという手段を再現することができなかったことを示している。では、なぜ乳幼児はそのような目標指向性を示すのであろうか。成人であれば、目標と手段の両方を再現できることは明らかであり、このような不連続な発達のダイナミクスを生成する仕組みは解明されていない。

著者らは、さまざまな物体操作能力が感覚・運動情報の予測学習を通して獲得され、その過程で、上記のような不連続な発達の変化も起きるのではないかと考えた。

特に、動作の目標と手段に内在する予測誤差の大きさの違いが、乳幼児期の目標指向性を生み出すという仮説を立て、それを計算論的モデルによって検証した^[29]。図4(a)にシミュレーション実験を行った環境設定と(左図)、提案した計算論的モデルを示す(右図)。ここでは、Carpenter et al.^[26]の実験を参考に、2リンクの腕型ロボットが、初期位置から目標位置までさまざまな軌道を通して手先を動かすという動作を設定した。つまり、最終位置に到達することが動作の「目標」に相当し、手先の軌道が動作の「手段」に相当する。著者らは、このような設定のもとロボットに感覚・運動情報の予測学習をさせると、目標と手段に対して異なる速度で誤差の最小化が進むという仮説を立てた(ロボットは目標と手段を明に区別していないことに注意されたい)。目標とは初期姿勢と目標姿勢との差で、大きな時定数をもった変化であり、それ故、大きな予測誤差を生じる。これに対して、手段は目標姿勢へ向かう個々の軌道であり、小さな時定数をもつため、相対的に小さな予測誤差を生じる。この相対的な予測誤差の大きさの違いが、学習の速度に影響を与えるという仮説である。つまり、相対的に予測誤差の大きい目標に関して、誤差の最小化が先に行われ、それが収束すると、手段に関する予測誤差が相対的に大きく見えるため、それについての誤差最小化が進むという仕組みである。ロボット自身は感覚・運動情報の予測学習に基づき、連続的な学習をしているだけであるが、学習対象の動作に内在する予測誤差の相対的な差が、不連続な発達の変化を生み出すと考えられる。

本仮説を検証するため、予測学習モデルとしてパラメトリックバイアス付きリカレントニューラルネットワーク^[30](図4(a)右参照)を用いて実験を行った。リカレントニューラルネットワークは、時系列信号を予測学習することのできるニューラルネットワークであり、それにパラメトリックバイアス(以下、PB)を加えることで、複数の時系列信号を学習することができる。さらに、学習後のPB値を解析することで、複数の時系列信号がどのような関係をもってネットワークに記憶されたかを確認することができる。著者らは図4(a)左の実験設定で6種類の動作(二つの目標(A, B)と三つの手先軌道(0, 1, 2)の組み合わせ)を定義し、ロボットにPB付きリカレントニューラルネットワークを用いてその動作を学習させた。図4(b)に発達中期(左)と発達後期(右)の学習結果を示す。それぞれ、上段がPB値を解析した結果を、下段がニューラルネットワークで生成された運動を示している。まず、発達中期を見ると、6種類の動作に対応する6個のPB値が、大きく二つのグループに分かれていることが確認できる。右上に位置するのが、目標Aに向かう三つの動作、左下に位置するのが目標Bに向か

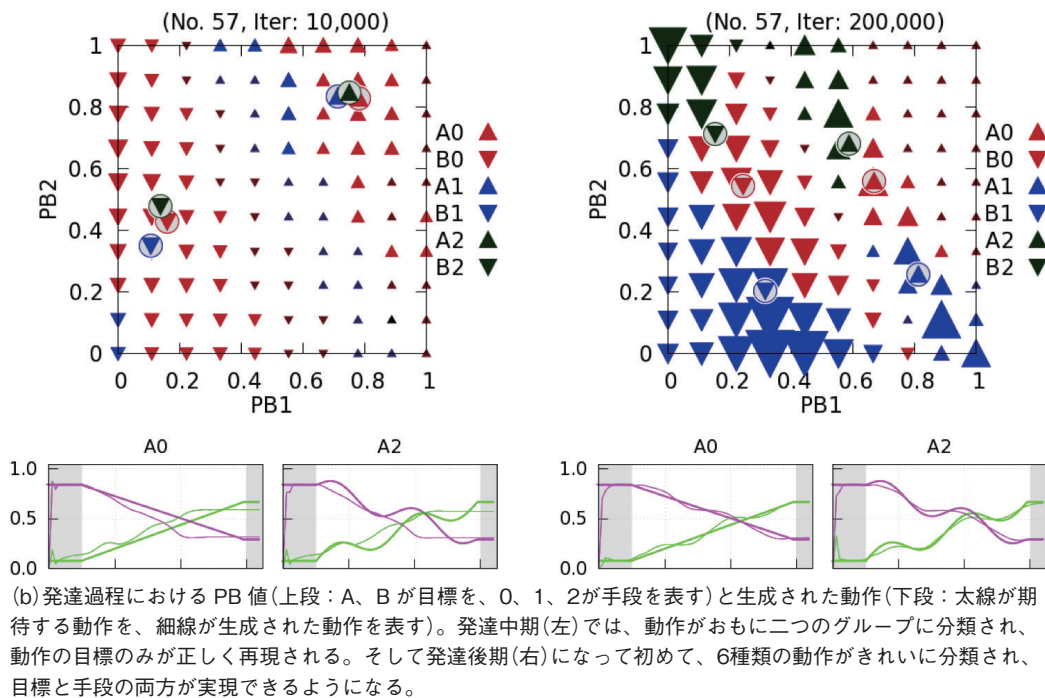
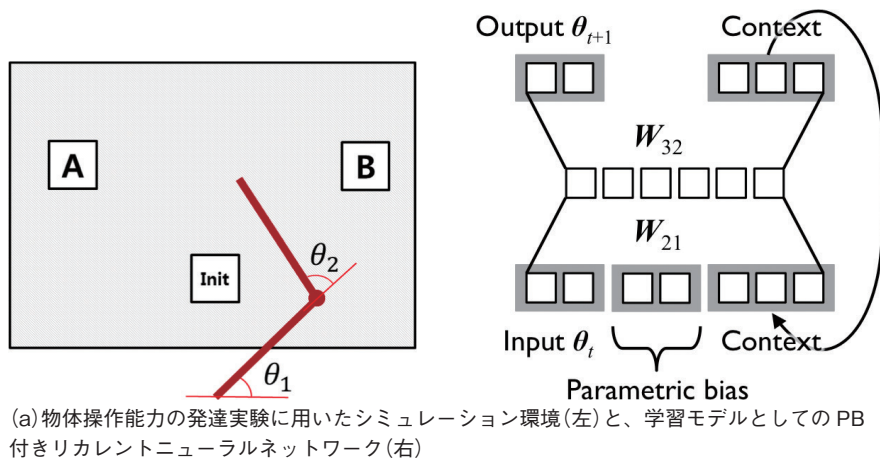


図4 物体操作能力の発達における目標指向性の発現^[29]より引用)

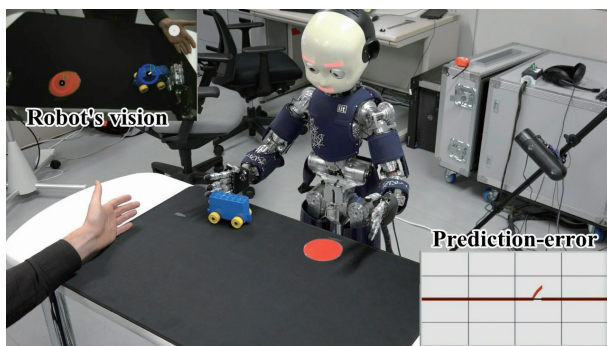
う三つの動作である。そして運動出力の結果は、目標位置には到達しているが、それに至る手段はまだ再現できておらず、最も効率的な直線的な運動が生成されていることが分かる。これはまさに、乳幼児の行動実験^[26,28]で観察された、動作の目標指向性である。そして学習を続けると、図4(b)右に示すようにロボットは正確な動作を獲得し、目標も手段も達成できるようになる。このときのPB値は、6種類の動作をきれいに識別しており、さらに、動作間の類似性をPB値の幾何学的な位置関係として表現していることが分かる。以上のように、複雑で不連続に見える発達のダイナミクスも、感覚・運動情報の予測学習という単一のメカニズムから生成することが可能であり、予測学習が認知発達の原理として妥当であることを示唆している。

3.3 利他的行動の創発

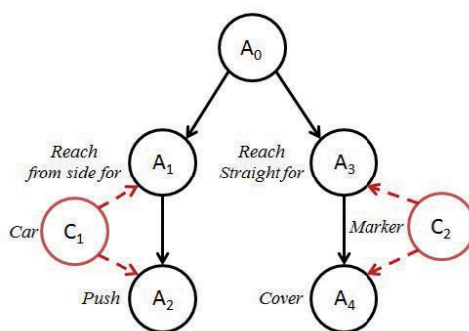
三つ目の例として、社会的行動の一種である利他的行

動の創発について考える。発達心理学研究によると、乳幼児は14ヶ月頃からすでに、自発的な利他的行動を示すことが知られている^[9,10,31]。たとえば、実験者が物を床に落とすと、それを拾って実験者に渡したり、実験者が両手に本を抱え、本棚の扉を開けられずに困っていると、実験者の代わりに扉を開けるといった行動が観察されている。ここで注目すべき点は、乳幼児が実験者から手助けを求めるような社会的信号(視線や発話)や、利他的行動に対しての報酬を受けているわけではないのに、自発的に実験者を助けようとする点である。

著者らは、自己の予測器を利用した他者運動の予測と、他者起因の予測誤差を引き金とした運動の生成が、利他的行動の創発につながると考え、計算論的モデルを提案した^[32]。図5(a)にロボットを使った実験の様子を、(b)に感覚・運動の確率遷移モデルで表現したロボットの内部モデルを示す。ロボットはあらかじめ、環境に置かれた二つの物体(青い車、赤いマーク)に対するアフォード



(a) ロボットによる利他的行動の創発実験。ロボットは他者運動に起因する予測誤差をトリガとして、予測器で推定された運動指令を実行することで、予測誤差を最小化する。この運動が結果として、利他的行動と認識される。



(b) 感覚・運動の確率遷移モデルとして表現されたロボットの予測器

図5 利他的行動の創発^[32]より引用)

ンスを、感覚・運動情報の予測学習を通して予測器に獲得する。たとえば、青い車に対しては、それを押すことで車を前進させ、赤いマーカに関しては、手をマーカの上に置くことで、マーカを隠すことができる。本実験で用いた予測器では、感覚信号(図5(b)の C_i)と運動指令(A_j)の確率遷移として、このアフォーダンスを表現している。そして、この内部モデルをもとに、他者とのインタラクションの中で感覚と運動の予測を行う。図5(a)では、実験者が手を伸ばして青い車を押そうとしているが、車が遠いためなかなか動作目標を達成することができない。するとロボットは、動作観察中の予測誤差をリアルタイムで計算し(図5(a)右下参照)、それが一定の閾値を越えたところで、予測器が推定した運動を生成して、予測誤差を最小化しようとする。先述した通り、ロボットには予測誤差を最小化する動機しか存在しないが、それによって生成された運動が結果的に他者の動作目標を達成することになり、利他的行動が創発するという仕組みである。本実験より、社会的行動の原初も自己認知や物体操作と共通の基盤で発達しうることが証明され、感覚・運動情報の予測学習が発達の原理として妥当であることが示された。

4. 非定型な予測学習と自閉スペクトラム症

ここまでは、生後3歳頃までに見られる乳幼児の認知発達が、感覚・運動情報の予測学習によって説明できることを示してきた。いわば、定型発達児の発達をなぞってきたことになる。では、自閉スペクトラム症(ASD: autism spectrum disorder)などの発達障害は、同じ原理でどのように説明できるのだろうか。感覚・運動情報の予測学習理論が真に発達原理に対応しているとしたら、発達障害も本理論におけるパラメータ変動として説明できると期待される。

ASDは従来、社会的能力の障害と考えられ、アイコンタクトや共同注意能力の欠如、心の理論の問題、そして常同行動といった症状に特徴づけられてきた^[33]。その診断も、幼児が社会的能力を獲得する3歳頃になって初めて可能となり、幼児によって症状の程度やパターンも異なることが知られている。一方で、近年の認知心理学研究や神経科学研究、そして当事者研究によって、その原因が感覚・運動情報のまとめあげの困難さにあることが指摘されている^[34-37]。ここで当事者研究とは、発達障害をもつ当事者が、自己の中で起こる感覚・運動情報の処理過程を内省することで、自分が環境をどのように知覚し行動決定をしているのか、そしてそれがどのような形で社会性の困難さに結びついているのかを研究する分野である。近年ではASD当事者による手記も数多く出版され^[36-39]、従来の第三人称視点での障害の捉え方を劇的に変えうるものとして、大きな注目を集めている。一般に人間は感覚・運動に関する信号を時空間的に統合することで環境を認識し、行動決定を行っているが、彼らの提案する説では、ASDは情報統合能力が弱いことによって定型発達者とは異なる形で環境を認識し、その結果、定型発達者との間にコミュニケーションの問題を生じると考えられている。

著者は当事者研究者である綾屋と熊谷^[36]と協働で、上記の説を計算論的視点から定式化することを試みている^[4]。図6にモデルの概念図を示す。本モデルは、感覚・運動情報の予測学習に基づく認知発達を基盤に、ASDがもつ予測誤差への非定型な感度(もしくは、非定型な許容誤差)が、定型発達者との間で内部モデルの相違を生み、その結果、コミュニケーションの障害を引き起こすという仮説に基づいている。図中、黒丸で示した多数の点が環境からの感覚・運動信号を、直線がそれを認識している内部予測モデルを表現している。ここでは簡単化のため、線形回帰モデルを適用したと考える。まず、左図に示す定型発達者は、予測モデルを生成する際にあ

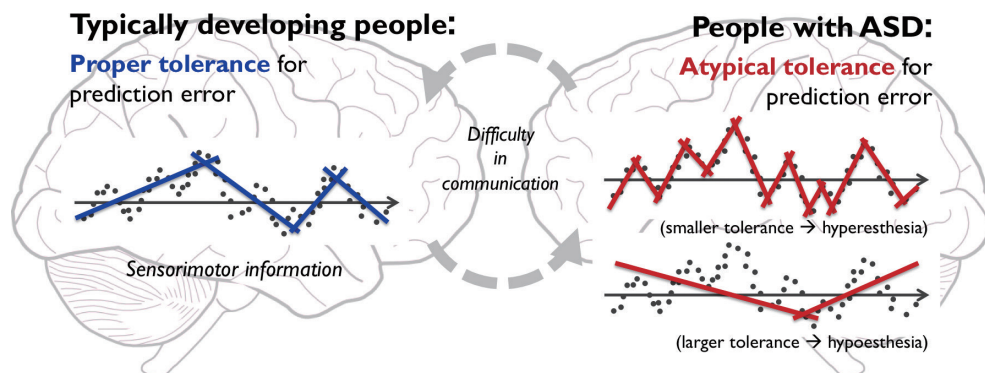


図6 感覚・運動情報の非定型な予測学習に基づく ASD のモデル。予測学習における予測誤差への特異な感受性が、ASD と定型発達者との間で内部モデルに相違を生じ、その結果として両者間のコミュニケーションに問題が生じる^[41]より引用)。

る程度の予測誤差を許容することで、環境の変化に対して頑健なモデルを獲得する。図中、感覚・運動信号に対して、モデルが完全にはフィットしていないことに注意されたい。このように、いくらかの許容誤差を持つことで、モデルに汎化性が生まれ、過去の経験に基づいて適切にモデルを運用したり、新規の環境に対しても柔軟に対応することが可能となる。これに対して、右図に示す ASD は、感覚・運動情報を予測学習する際の許容誤差が小さい(右上)、もしくは大きい(右下)ために、定型発達者とは異なる内部モデルを獲得する。右上の例では環境の変化に敏感になりすぎ、新たな環境に適応することができず、感覚過敏といった症状を生じると考えられる。反対に右下の例では、環境の変化に鈍感で、環境に応じて適切なモデルを適用することができず、感覚鈍麻といった症状を生むと推測される。本仮説は、このような内部モデルの相違が、結果的に定型発達者と ASD との間にコミュニケーションの問題を生じ、それが ASD の社会性の問題として認知されることを提案している。

著者らは、ASD の感覚・運動情報の非定型な予測学習が感覚過敏・鈍麻や社会性の問題にどのような影響を与えるのか探るため、ASD の特異な知覚の発達過程をニューラルネットワークを用いてモデル化する研究^[40]や、ASD の特異な知覚を定量的に評価し、それをヘッドマウントディスプレイ型知覚体験システムで再現する研究^[41, 42]を行っている。このような計算論的アプローチを通して、定型発達だけではなく、発達障害の発生原理も統一的に説明することで、感覚・運動情報の予測学習に基づく認知発達原理の妥当性を高めたいと考えている。

5. おわりに

本稿では、乳幼児の認知発達の原因として、感覚・運動情報の予測学習に基づく理論を提案した。乳幼児が生後獲得する認知機能は多様であり、それらは一見、独立したもののように見えるが、実は、そこには共通した

メカニズムが内在する。本稿では、自他認知と物体操作、そして利他的行動の発達を例に、著者らが提案した予測学習に基づく計算論的モデルを紹介し、それを実装したロボットが乳幼児と同様の発達過程を再現することを示した。また、そのモデルのパラメータ変動として、社会的能力の障害と呼ばれる ASD の発生原理が説明することも指摘した。一つの共通した原理で、乳幼児の複雑な発達ダイナミクスを説明できたことは、特筆すべき点である。

一方で、ここで示した認知機能はあくまでも発達初期に現れるものであり、より高次の認知機能の発達については今後の課題である。特に、自他の認知を感覚信号レベルを超えて、心的表像も含めて実現することや、予測誤差の最小化といういわば利己的な動機を、真に利他的な動機へと発展させることは、今後、取り組むべき課題である。感覚・運動情報の予測学習理論をより精緻化し、さらに拡張することで、上記の課題に取り組みたいと考えている。

謝辞

本研究は科学研究費補助金新学術領域研究「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—」(研究課題番号: 24119001、24119003)、特別推進研究「神経ダイナミクスから社会的相互作用に至る過程の理解と構築による構成的発達科学」(研究課題番号: 24000012)、および若手研究(A)「発達の制約を利用した自他認知からの心の理論の獲得: 構成的手法による研究」(研究課題番号: 25700027)の助成を受けた。

参考文献

- [1] Minoru Asada, Koh Hosoda, Yasuo Kuniyoshi, Hiroshi Ishiguro, Toshio Inui, Yuichiro Yoshikawa, Masaki Ogino & Chisato Yoshida. : Cognitive De-

- velopmental Robotics: A Survey. *IEEE Transactions on Autonomous Mental Development*, Vol. 1, No. 1, pp. 12-34, 2009.
- [2] Max Lungarella, Giorgio Metta, Rolf Pfeifer & Giulio Sandini. : Developmental robotics: a survey. *Connection Science*, Vol. 15, No. 4, pp. 151-190, 2003.
- [3] Angelo Cangelosi & Matthew Schlesinger. : *Developmental Robotics*. The MIT Press, 2015.
- [4] Yukie Nagai & Minoru Asada. : Predictive Learning of Sensorimotor Information as a Key for Cognitive Development. In *Proc. of the IROS 2015 Workshop on Sensorimotor Contingencies for Robotics*, 2015.
- [5] Karl Friston, James Kilner & Lee Harrison. : A free energy principle for the brain. *Journal of Physiology Paris*, Vol. 100, No. 1-3, pp. 70-87, 2006.
- [6] Rajesh P. N. Rao & Dana H. Ballard. : Predictive coding in the visual cortex: a functional interpretation of some extra-classical receptive-field effects. *Nature Neuroscience*, Vol. 2, No. 1, pp. 79-87, 1999.
- [7] Daniel M. Wolpert, Zoubin Ghahramani & Michael I. Jordan. : An internal model for sensorimotor integration. *Science*, Vol. 269, No. 5232, pp. 1880-1882, 1995.
- [8] Sarah-J. Blakemore, Chris D. Frith & Daniel M. Wolpert. : Spatio-temporal prediction modulates the perception of self-produced stimuli. *Journal of Cognitive Neuroscience*, Vol. 11, No. 5, pp.551-559, 1999.
- [9] Felix Warneken, Frances Chen & Michael Tomasello. : Cooperative Activities in Young Children and Chimpanzees. *Child development*, Vol. 77, No. 3, pp. 640-663, 2006.
- [10] Felix Warneken & Michael Tomasello. : The roots of human altruism. *British Journal of Psychology*, Vol. 100, pp. 455-471, 2009.
- [11] Lorraine E. Bahrick & John S. Watson. : Detection of Intermodal Proprioceptive-Visual Contingency as a Potential Basis of Self-Perception in Infancy. *Developmental Psychology*, Vol. 21, No. 6, pp.963-973, 1985.
- [12] Jean Piaget. : *The origins of intelligence in children*. International Universities Press, 1952.
- [13] George Butterworth & Margaret Harris. : *Principles of Developmental Psychology*. Lawrence Erlbaum Associates, 1994.
- [14] J. Gavin Bremner. : *Infancy*. Blackwell Publishing, 1994.
- [15] Philippe Rochat & Rachel Morgan. : Spatial Determinants in the Perception of Self-Produced Leg Movements by 3- to 5-Month-Old Infants. *Developmental Psychology*, Vol. 31, pp. 626-636, 1995.
- [16] Philippe Rochat & Tricia Striano. : Who's in the mirror? Self-other discrimination in specular images by four- and nine-month-old infants. *Child Development*, Vol. 73, No. 1, pp. 35-46, 2002.
- [17] Yukie Nagai, Yuji Kawai & Minoru Asada. : Emergence of Mirror Neuron System : Immature vision leads to self-other correspondence. In *Proc. of the 1st Joint IEEE International Conference on Development and Learning and on Epigenetic Robotics*, 2011.
- [18] Yuji Kawai, Yukie Nagai & Minoru Asada. : Perceptual Development Triggered by its Self-Organization in Cognitive Learning. In *Proc. of the 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 5159-5164, 2012.
- [19] V. Gallese, L. Fadiga, L. Fogassi & G. Rizzolatti. : Action recognition in the premotor cortex. *Brain: a journal of neurology*, Vol. 119, pp. 593-609, 1996.
- [20] Giacomo Rizzolatti, Luciano Fadiga, Vittorio Gallese & Leonardo Fogassi. : Premotor cortex and the recognition of motor actions. *Cognitive Brain Research*, Vol. 3, No. 2, pp. 131-141, 1996.
- [21] Giacomo Rizzolatti, Leonardo Fogassi & Vittorio Gallese. : Neurophysiological mechanisms underlying the understanding and imitation of action. *Nature Reviews Neuroscience*, Vol. 2, pp. 661-670, 2001.
- [22] Andrew N. Meltzoff & M. Keith Moore. : Imitation in Newborn Infants: Exploring the Range of Gestures Imitated and the Underlying Mechanisms. *Developmental Psychology*, Vol. 25, No. 6, pp.954-962, 1989.
- [23] Andrew N. Meltzoff & M. Keith Moore. : Explaining facial imitation: a theoretical model. *Early Development and Parenting*, Vol. 6, No. 34, pp. 179-192, 1997.
- [24] Caroline Catmur, Vincent Walsh & Cecilia Heyes. : Associative sequence learning: the role of experience in the development of imitation and the mirror system. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, Vol. 364,

- No. 1528, pp. 2369-2380, 2009.
- [25] Cecilia Heyes. : Where do mirror neurons come from? *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, Vol. 34, No. 4, pp. 575-583, 2010.
- [26] Malinda Carpenter, Josep Call & Michael Tomasello. : Twelve- and 18-month-olds copy actions in terms of goals. *Developmental Science*, Vol. 8, No. 1, pp. F13-20, 2005.
- [27] Harold Bekkering, Andreas Wohlschlagel & Merideth Gattis. : Imitation of Gestures in Children is Goal-directed. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology A*, Vol. 53, No. 1, pp. 153-164, 2000.
- [28] Brigitte Gleissner, Andrew N Meltzoff & Harold Bekkering. : Children's coding of human action : cognitive factors influencing imitation in 3-year-olds. *Developmental Science*, Vol. 3, No. 4, pp.405-414, 2000.
- [29] Jun-Cheol Park, Dae-Shik Kim & Yukie Nagai. : Developmental dynamics of RNNPB: New insight about infant action development. *Lecture Notes in Computer Science (SAB 2014)*, Vol. 8575, pp.144-153, 2014.
- [30] Jun Tani & Masato Ito. : Self-organization of behavioral primitives as multiple attractor dynamics : A robot experiment. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, Vol. 33, No. 4, pp. 481-488, 2003.
- [31] Markus Paulus. : The Emergence of Prosocial Behavior : Why Do Infants and Toddlers Help, Comfort, and Share? *Child Development Perspectives*, Vol. 8, No. 2, pp. 77-81, 2014.
- [32] Jimmy Baraglia, Yukie Nagai & Minoru Asada. : Prediction Error Minimization for Emergence of Altruistic Behavior. In *Proc. of the 4th IEEE International Conference on Development and Learning and on Epigenetic Robotics*, pp. 273-278, 2014.
- [33] Simon Baron-Cohen. : *Mindblindness*. MIT Press, 1995.
- [34] Uta Frith & Francesca Happé. : Autism : beyond "theory of mind". *Cognition*, Vol. 50, pp. 115-132, 1994.
- [35] Francesca Happé & Uta Frith. : The Weak Coherence Account : Detail-focused Cognitive Style in Autism Spectrum Disorders. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, Vol. 36, No. 1, pp.5-25, 2006.
- [36] 綾屋紗月, 熊谷晋一郎. : 発達障害当事者研究—ゆっくりしていねいにつながりたい. 医学書院, 2008.
- [37] 綾屋紗月, 河野哲也, 向谷地生良—Necco 当事者研究会—石原孝二, 池田喬, 熊谷晋一郎. 当事者研究の研究. 医学書院, 2013.
- [38] Temple Grandin & Richard Panek. *The Autistic Brain: Thinking Across the Spectrum*. Mariner-Books, 2014.
- [39] Arthur Fleischmann & Carly Fleischmann. : *Carly's Voice: Breaking Through Autism*. Touchstone, 2012.
- [40] Yukie Nagai, Takakazu Moriwaki & Minoru Asada. : Influence of Excitation/Inhibition Imbalance on Local Processing Bias in Autism Spectrum Disorder. In *Proc. of the 37th Annual Meeting of the Cognitive Science Society*, 2015.
- [41] Shibo Qin, Yukie Nagai, Shinichiro Kumagaya, Satsuki Ayaya & Minoru Asada. : Autism Simulator Employing Augmented Reality : A Prototype. In *Proc. of the 4th IEEE International Conference on Development and Learning and on Epigenetic Robotics*, pp. 123-124, 2014.
- [42] 長井志江, 秦世博, 熊谷晋一郎, 綾屋紗月, 浅田稔. : 自閉スペクトラム症の特異な視覚とその発生過程の計算論的解明: 知覚体験シミュレータへの応用. 日本認知科学会第32回大会発表論文集, pp. 32-40, 2015.