

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 5 月 31 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2013～2015

課題番号：25700027

研究課題名(和文) 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

研究課題名(英文) Development of theory of mind from self-other cognition facilitated by maturational constraints: A constructive approach

研究代表者

長井 志江 (Nagai, Yukie)

大阪大学・工学研究科・特任准教授

研究者番号：30571632

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、自他認知から心の理論に至る社会的認知機能の発達メカニズムを、構成的アプローチから探求した。多様な認知機能の発達を統一的に説明する原理として、感覚・運動信号の予測学習に基づく理論を提案し、神経回路モデルや確率モデルを用いた計算論的モデルの構築と、ロボットを用いた実験によりその有効性を確認した。自己の経験を通じた予測器の獲得とそれを適用した他者との相互作用により、運動生成と理解の共発達、予測誤差最小化に基づく利他的行動の創発、そして空間的予測学習に基づく情動認識・生成機能の獲得が再現されることを示した。これらの成果は、人間の認知発達原理の解明に重要な示唆を与えている。

研究成果の概要(英文)：This study has investigated the underlying mechanism for social cognitive development. Inspired by neuroscience and cognitive science studies, we have suggested sensorimotor predictive learning as a principle for cognitive development and constructed computational models using neural networks and probabilistic models to verify the principle. Our experiments using robots demonstrated how predictive learning leads to development of various types of cognitive functions. For example, our robots improved the ability to recognize others' actions based on the ability to produce own actions, generated helping behaviors through the minimization of prediction error, and acquired the ability to recognize and generate emotions through multimodal predictive learning. These results yield new insights into underlying mechanisms for human cognitive development.

研究分野：認知発達ロボティクス

キーワード：認知発達ロボティクス 予測学習 自他認知 心の理論 神経回路モデル 確率モデル

## 1. 研究開始当初の背景

社会的発達障害の一種である自閉症は、近年の診断技術の進歩と診断基準の多様化によって、その患者数を飛躍的に増加させている。しかし、その発生原因の約半数ははまだ明らかにされておらず(図1参照)、適切な治療法や援助が提供できていないのが現状である(Weintraub, Nature 2011)。その自閉症患者が失っているとされる代表的な機能に「心の理論」がある。心の理論とは、他者に知識や信念、欲求などの内部状態の存在を認め、それを推論する能力のことである(Baron-Cohen, 1997)。他者が自己とは似ているが異なる心的状態をもつ存在であると理解することで、人は他者の行動からその背後にある目的や意図を推測し、協調や競合といった社会的相互作用を実現することができる。人がこのような認知能力を生後いかにして獲得しているのか、その発達メカニズムを解明することは、自閉症の発生原因を探求することにもつながり非常に意義深い。

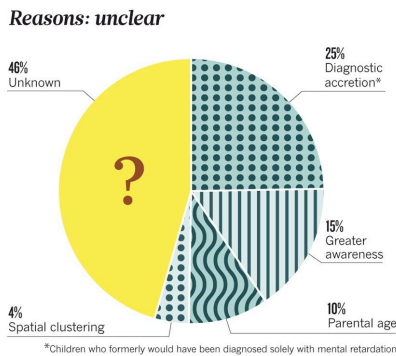


図1: 自閉症の発生原因の約半数は不明(Weintraub, Nature 2011)

心の理論の発達メカニズムを探る一助として、当事者研究が挙げられる(綾屋&熊谷, 2008)。当事者研究とは、アスペルガー症候群などの高機能自閉症患者らが、自らの感覚運動体験を言語化し、それを他者と共有することで、社会的発達障害の共通理解を得ようとするものである。これまで、他者理解能力の欠如と一言でまとめられていた問題が、具体的にどのような認知機能の変容によって生じているのかを、内部観測という独自の視点から明らかにすることが期待されている。その当事者研究で近年、注目されている理論に「情報のまとめあげ困難説」がある。人が自己や環境を認識するためには、様々な感覚・運動情報を意味のあるまとまりに統合し、そこにラベルを与えるという作業が必要であるが、発達障害者はこの情報統合の過程が健常者と異なるために、他者とのコミュニケーションがうまくいかないとする説である。例えば、他者の顔は輪郭や目・口・鼻などの顔特徴に対応したエッジ、そして肌色の色彩、触れたときの温かみや質感などの情報がすべて統合されることによって初めて認識さ

れるが、発達障害者は個々の低次特徴に注意が向いてしまい、それが誰の顔であるかという高次の概念を理解するのが難しい。また、喜びや悲しみといった自己の感情についても、心拍や内分泌系の変化と、感覚・運動情報との統合が必要であるが、これにも時間と労力を要する。つまり、社会的な発達障害者の根本的な問題は、他者の内部状態の理解にあるのではなく、自己の心的状態、つまり、感覚や運動情報のまとめあげの困難さに起因すると考えられている。

## 2. 研究の目的

本研究では、情報のまとめあげ困難説に基づき、心の理論の発達メカニズムを構成的に理解することを目的とする。特に、成長にともなう感覚・運動・記憶の段階的な精緻化(発達の制約)が、自己の感覚・運動情報のまとめあげにいかに関与するのか、また、それによって形成された自己の心的状態をリフレックスとして、他者の内部状態をいかにして発見・推論するのかを、ロボットモデルを構築することにより解明する。

### (1) 自己の心的状態の形成における発達の制約の役割

人は未熟な感覚・運動・記憶能力をもって生まれ、それが生後数年をかけて成人と同等までに精緻化することが知られている(Bremner, 1994)。申請者はこれまで、視覚機能の発達の制約が視覚入力の構造化を促し、共同注意の学習を促進すること(Nagai et al., 2006)、また、視覚の時空間解像度の未熟さが自己と他者の類似性を強調し、ミラーニューロンシステムに相当する自他の対応関係を獲得できることを示した(Nagai et al., 2011)。このように、一見ネガティブに思える感覚機能の未熟さが、高次の認知機能の発達に貢献することは、構成的アプローチによる比較実験によって初めて明らかになる。本研究では、感覚の発達だけではなく、運動や記憶能力の発達にも注目し、コミュニケーションの基盤となる自己の意図や感情がいかにより形成されるのかを、計算論的モデルの構築とロボットによる検証を通して理解する。例えば、恐れといった感情が、記憶能力の発達によって過去の経験の参照からいかにより発生するのか、また、妬みといった第二次感情が、感覚機能の精緻化による第一次感情の分化としてどのように獲得されるのかなどを、発達心理学の知見と照らし合わせながら調べる。

### (2) 他者の内部状態の発見における発達の制約の役割

他者の内部状態は自己のそれと構造上は似ているが(例えば、基本6感情の共通性)、現在どのような状態にいるかはその人の経験に依存する。これまで、他者の行動からそ

の内部状態を推測するモデルはいくつか提案されてきた (Nakano et al., 2011) が、その全ては、他者の心的構造を設計者があらかじめ定義し、それに情報を当てはめるだけのものであった。しかし、人が他者の内部状態を理解する際には、まず自己の心的状態の理解が必要であり、それをリファレンスとして初めて自己と他者の対応関係が獲得されると考えられる。また、他者が自己とは異なる内部状態を持つことは、他者と行動を共有し、そこに一度、自己の心的状態を当てはめてみることで初めて気付くことができる (自己の心的モデルでは他者の行動が説明できないことに気付く)。そこで、感覚・運動・記憶能力の発達が他者の内部状態への気付きにどのように影響するのかを、計算論的モデルの構築とロボットによる検証を通して理解する。発達初期の機能の未熟さがいかにして自他混同を生むのか、そして自他混同期に獲得された自己と他者の類似性が、感覚や記憶の精緻化によっていつどのようにずれを生じ、自己と他者の別々のモデルへと変化していくのかを調べる。

### (3) 心の理論の獲得における環境変動の影響

人の認知発達を構成的に研究することの利点は、モデルに環境変動を与えたときの挙動を比較することで、その発達の核となる要因を探ることができることにある。感覚・運動・記憶の発達に変動を与えた際に、心の理論の獲得にどのような影響が出るのか、これまで他者理解能力の欠如とまとめられてきた発達障害が、感覚や運動、記憶などの基本認知機能の問題に帰着できるのかを、モデルの構築と検証を通して解明する。

## 3. 研究の方法

まず最初に、自己の心的状態の形成に注目し、感覚・運動・記憶の発達の制約が高次の情報のまとめあげに与える影響を調べる。計算論的モデルには、入出力の時空間パターンを階層的に表現することのできる Multiple Timescale Recurrent Neural Network (MTRNN) (Yamashita & Tani, 2008) を応用する。MTRNN は複数のリカレントニューラルネットワークを階層的につなげ、それぞれに異なる時定数を与えることで、低次のネットワークでは時空間的に局所な入出力パターンを表現し、高次のネットワークではより大局的なパターンを表現することができる。しかし、ネットワーク自身には入出力情報を分節化する能力はなく、設計者が学習すべき情報を段階的に与える必要がある。

本研究では、発達の制約を利用することで、モデル自身が適切な情報の分節を発見し、階層的な情報表現を獲得できることを目指す。例えば、感覚・運動情報を段階的に精緻化させることで、発達初期では入出力の大局的なパターンを学習し、発達後期では時空間的に

局所なパターンを獲得することが期待できる。また、記憶の発達としてネットワークの時定数を徐々に異なるものに変化させることで、時空間的に解像度の異なる情報がネットワークの各層に適切に表現されると考えられる。このモデルを用いて、ロボットが階層的な目標をもった運動を獲得したり (例えば、物を A から B に移動させるという行為は、手を A に伸ばす、物を掴む、手を B に移動させる、物を離す、という複数の動作によって構成される)、感情を発達の分化させる (快—不快から第一次基本 6 感情、第二次感情への発達) ことが可能かを検証する。

次に、共同注意による他者との環境共有経験を通して、他者の内部状態への気付き、そして、それを推論するための学習モデルを構築する。発達初期はロボットは自己と他者を区別することができないため、自己の内部モデル (MTRNN) に基づいて他者の行為や感情を理解しようとする。しかし、他者の内部状態は自己とは異なることから、ネットワークに予測誤差が生じると予想される。そこで、この予測誤差を利用してネットワークの学習係数を変更したり、新たにネットワークを追加することで、ロボットが自己と他者の内部状態に対応したモデルを獲得することを目指す。

そして最後に、上記で開発したモデルに環境変動を与えることで、自己の心的状態の形成や他者の内部状態の理解にどのような障害が生じるかを調べる。当事者研究者らが提案している情報のまとめあげ困難説には、二つの要因があると考えられている (Happe & Frith, 2006)。一つは、情報を統合する高次ネットワークの機能が健常者に比べて弱いという説、もう一つは、低次ネットワークの処理が健常者に比べて鋭敏すぎるという説である。しかし、行動学的研究からこれらの二つの説の妥当性は指摘されているが、詳細は明らかになっていない。本研究では、ネットワークの感度をパラメータで変更し、それぞれの説を再現することで、発達障害のどのような現象が各モデルで説明できるかを検証する。そして、仮説の検証と再定義の過程を繰り返すことで、約半数が不明とされている社会的発達障害の発生原因を解明することを目指す。

## 4. 研究成果

自他認知から心の理論に至る社会的認知機能の発達メカニズムを、以下の 4 つの構成的アプローチから明らかにした。

### (1) 感覚・運動信号の予測学習に基づく社会的認知機能の発達原理

自他認知から心の理論を含む社会的認知機能の発達を包括的に説明する原理として、感覚・運動信号の予測学習に基づく理論を提案した (図 2 参照) (Nagai & Asada, 2015; 長

井, 2015, 2016). 予測学習とは, 自己の運動によって生じる感覚信号と, 運動指令の遠心性コピーから予測される感覚信号の誤差を最小化するように, 自己の内部モデル(予測器)を更新したり, 運動を生成することである. 予測学習を時空間に適用することで, 多様な認知機能が創発することを以下の三実験により実証した.

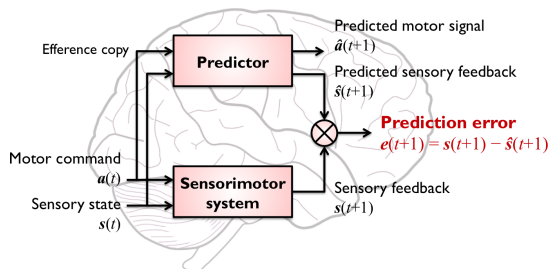


図 2: 感覚・運動信号の予測学習モデル

(2) 感覚・運動信号の予測学習を通じた自己運動の発達とそれに基づく他者運動の認識

目標指向運動の発達と他者運動の目標理解の発達の同期が, 感覚・運動信号の予測学習によって説明できることを, 深層型神経回路モデルを用いて検証した(図 3 参照)(Copete et al., 2014; Baraglia et al., 2015). 自己の運動経験を通して獲得した予測器を用いて他者運動を予測することで, 感覚信号からそれと対応した運動指令が想起され, それが予測を強化することをロボット実験により示した.

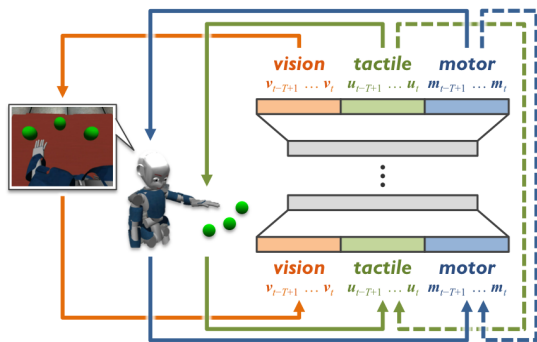


図 3: 感覚・運動信号の予測学習を通じた自己運動の発達とそれに基づく他者運動の認識

(3) 感覚・運動信号の予測誤差最小化規範に基づく利他的行動の創発

援助などの利他的行動が予測誤差の最小化規範に基づいて創発することを, 確率モデルを用いて検証した(図 4 参照)(Baraglia et al., 2014, 2016, in press). 自己の運動経験を通して獲得した予測器を用いて他者運動を予測し, 他者が運動に失敗したときの予測誤差をトリガとして予測器が推定した運動を生成することで, 結果として利他的行動が生じることをロボット実験で証明した.

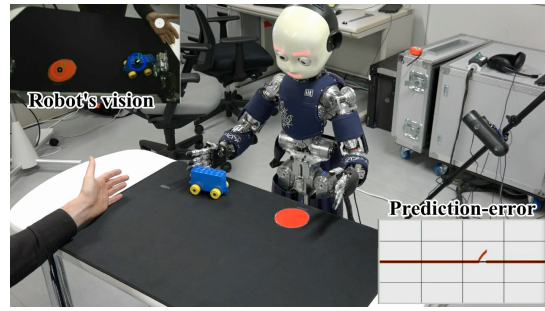


図 4: 感覚・運動信号の予測誤差最小化規範に基づく利他的行動の創発

(4) 感覚・運動信号の空間的予測学習に基づく情動認識と生成

複数感覚信号の空間的予測学習を通して, 他者情動の認識と自己情動の表出の能力が, 同時に発達することを提案した(図 5 参照)(Horii et al., 2013). 他者との相互作用を通して知覚される視覚・聴覚・触覚信号を, 階層型確率的神経回路モデルを用いて学習することで, 情動に対応した空間が上位層に形成されることをシミュレーション実験で示した.

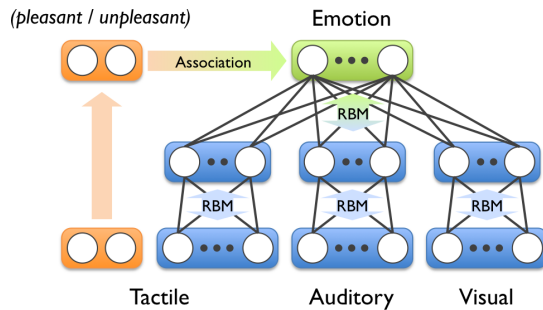


図 5: 感覚・運動信号の空間的予測学習に基づく情動認識・生成モデル

以上の成果は, 自他認知から心の理論に至る多様な社会的認知機能が, 感覚・運動信号の予測学習という共通原理に基づいて発達しうることを構成的に示しており, 人間の認知発達原理の解明を目指した発達心理学研究や認知神経科学研究に重要な示唆を与えている.

5. 主な発表論文等

(研究代表者, 研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件)

1. Jimmy Baraglia, Yukie Nagai, and Minoru Asada, "Emergence of Altruistic Behavior through the Minimization of Prediction Error," IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems, in press. 【査読有】
2. 長井志江, "認知発達の原理を探る: 感覚・運動情報の予測学習に基づく計算論的モデル," ベビーサイエンス, vol. 15, p.

22-32, 2016年3月. 【査読有】  
<http://www.crn.or.jp/LABO/BABY/LEARNED/>

3. Emre Ugur, Yukie Nagai, Erol Sahin, and Erhan Oztop, "Staged Development of Robot Skills: Behavior Formation, Affordance Learning and Imitation with Motionese," *IEEE Transactions on Autonomous Mental Development*, vol. 7, no. 2, pp. 119-139, June 2015. 【査読有】  
DOI:10.1109/TAMD.2015.2426192
4. 長井志江, "認知発達ロボティクスから探る「感性」の発達 -人と感性を共有するロボットを目指して-, " *感性工学*, vol. 13, no. 4, pp. 195-199, 2015年12月. 【査読無】  
[http://www.jske.org/mubh3dqlr-127/#\\_127](http://www.jske.org/mubh3dqlr-127/#_127)

[学会発表] (計 95 件)

1. Jimmy Baraglia, Maya Cakmak, Yukie Nagai, Rajesh Rao, and Minoru Asada, "Initiative in Robot Assistance during Collaborative Task Execution," in *Proceedings of the 11th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, pp. 67-74, Christchurch, New Zealand, March 7-10, 2016.
2. Yukie Nagai and Minoru Asada, "Predictive Learning of Sensorimotor Information as a Key for Cognitive Development," in *Proceedings of the IROS 2015 Workshop on Sensorimotor Contingencies for Robotics*, Hamburg, Germany, October 2, 2015.
3. Jimmy Baraglia, Jorge L. Copete, Yukie Nagai, and Minoru Asada, "Motor Experience Alters Action Perception Through Predictive Learning of Sensorimotor Information," in *Proceedings of the 5th IEEE International Conference on Development and Learning and on Epigenetic Robotics*, pp. 63-69, Providence, USA, August 13-16, 2015.
4. Jimmy Baraglia, Yukie Nagai, and Minoru Asada, "Prediction Error Minimization for Emergence of Altruistic Behavior," in *Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Development and Learning and on Epigenetic Robotics*, pp. 273-278, Genoa, Italy, October 13-16, 2014.
5. Jorge L. Copete, Yukie Nagai, and Minoru Asada, "Development of goal-directed gaze shift based on predictive learning," in *Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Development and Learning and on Epigenetic Robotics*, pp. 334-339, Genoa, Italy, October 13-16, 2014.
6. Jun-Cheol Park, Dae-Shik Kim, and Yukie Nagai, "Developmental Dynamics of RNNPB: New Insight about Infant Action Development," in *Proceedings of the 13th*

*International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*, pp. 144-153, Castellon, Spain, July 22-26, 2014.

7. Emre Ugur, Yukie Nagai, and Erhan Oztop, "Affordance based imitation bootstrapping with motionese," in *Proceedings of the International Workshop on Developmental Social Robotics*, pp. 9-14, Tokyo, Japan, November 7, 2013.
8. Takato Horii, Yukie Nagai, and Minoru Asada, "Touch and Emotion: Modeling of developmental differentiation of emotion lead by tactile dominance," in *Proceedings of the 3rd IEEE International Conference on Development and Learning and on Epigenetic Robotics*, Osaka, Japan, August 18-22, 2013.
9. Jimmy Baraglia, Yukie Nagai, and Minoru Asada, "Action Understanding using an Adaptive Liquid State Machine based on Environmental Ambiguity," in *Proceedings of the 3rd IEEE International Conference on Development and Learning and on Epigenetic Robotics*, Osaka, Japan, August 18-22, 2013.

[図書] (計 3 件)

1. Yukie Nagai, "Mechanism for Cognitive Development," *Cognitive Neuroscience Robotics: A: Synthetic Approaches to Human Understanding*, M. Kasaki, H. Ishiguro, M. Asada, M. Osaka, and T. Fujikado (Eds.), Springer, in press.
2. 長井志江, "感覚・運動情報の予測学習に基づく社会的認知機能の発達," *ロボットと共生する社会脳: 神経社会ロボット学*, 荻阪直行 (編), 新曜社, pp. 211-242, 2015年12月.

[その他]

1. ホームページ  
<http://cnr.ams.eng.osaka-u.ac.jp/~yukie/index.html>
  2. TBS テレビ「未来の起源」, 2016年5月15日.
  3. 日経産業新聞「阪大、赤ちゃんの成長ぶり「自他認知」ロボで再現」, 2016年2月3日.
  6. 研究組織
- (1) 研究代表者  
長井 志江 (NAGAI, Yukie)  
大阪大学・大学院工学研究科・特任准教授  
研究者番号: 30571632