

予測性を評価した選好性に基づく母子間相互模倣創発モデル

港隆史 デール トーマス 吉川雄一郎 石黒浩 (JST, ERATO)

A Model to Explain the Emergence of Mutual Imitation in Infant-Caregiver Interaction based on Predictability Preference

*Takashi Minato, Dale Thomas, Yuichiro Yoshikawa, Hiroshi Ishiguro (JST, ERATO)

Abstract— We have studied a mechanism of a development of imitation capabilities by simulating infant-caregiver interaction. This paper proposes a model to acquire a body mapping (a mapping from body motions in observation to motor commands) which is necessary for imitation through mutual imitation in infant-caregiver interaction while discriminating self-motion from other's motion. The simulation results show that the development of imitation capabilities depends on a predictability preference. The paper suggests, based on the result, that the predictability preference is one of factors which govern infant development.

Key Words: Infant development, Imitation, Predictability preference, Body mapping

1. はじめに

人間と自然なコミュニケーションが可能な知的システムを構築するためには、人間の知的な振る舞いや他者とのコミュニケーション能力、さらにそれらの発達メカニズムを知ることが大きな手がかりとなると期待される。人間が他者の状態を知り、他者と円滑なコミュニケーションを行う能力を獲得するためには、模倣能力が重要な役割を果たしている。しかし、模倣に必要な身体マッピング、すなわち、観測した他者の身体運動と自身の身体運動指令を適切に対応づける能力の神経学的メカニズムや発達プロセスは未だ解明されていない ([1] など)。これまでも乳幼児の行為の観察実験を通して模倣能力発達メカニズムを明らかにするための研究が数多く行われているが、直接観測できない内部のメカニズムを観察結果から説明することは難しい。この問題に対しては、発達モデルをロボットや仮想空間にシミュレートされたエージェントを用いて検証する認知発達ロボティクスと呼ばれるアプローチが有望である [2]。

このようなアプローチからの従来研究として、Oztop and Arbib [3] は視点に依存しない hand state という特徴を導入して、把持運動に関する身体マッピングを感覚運動経験を通して獲得するモデルを提案している。しかしこのモデルが把持運動以外の様々な身体運動に関して適用可能かどうかは不明である。身体マッピング獲得のための別の手がかりは、他者が身体運動を模倣して見せてくれることである。事実、乳幼児と養育者の相互作用において養育者の方が高い頻度で模倣を行う場面があることが報告されている ([4] など)。Yokoya et al.[5] は、他者からの模倣を手がかりとして身体マッピングを獲得するモデルを提案している。これらの研究では、最初に自己に関する身体マッピング (自己モデル)、すなわち観測した自身の身体運動と身体運動指令の対応を先に獲得し、それに基づいて他者に関する身体マッピング (他者モデル) を獲得することを仮定している。しかし乳幼児の周囲の環境には誕生直後から他者が存在しており、身体マッピングが不完全な

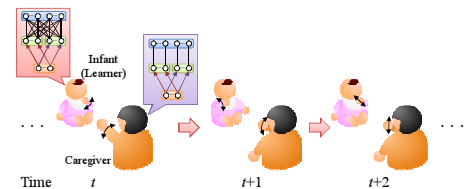


Fig.1 Model of mutual imitation in infant-caregiver interaction.

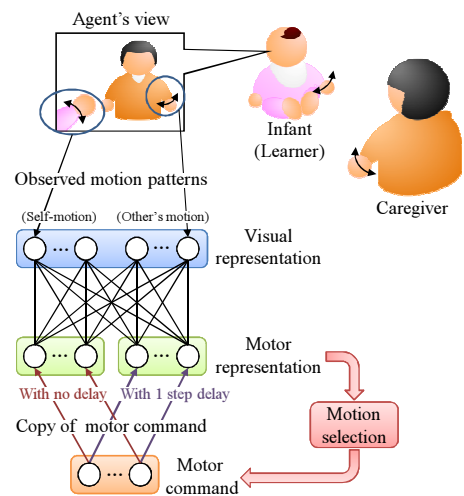


Fig.2 Model of body mapping.

状態では、観測した身体の自他の区別ができていないことを考慮する必要があると考えられる。このような状況では、乳幼児はどのようにして自他の区別と模倣能力を同時に学習するのか、あるいは、最初に自己モデルを獲得しそれに基づいて他者モデルを獲得するのであれば、そのような発達過程をもたらすメカニズムは何かという疑問が生じる。

そこで本報告では、自他の区別と身体マッピングが不完全な乳幼児が養育者との身体運動の模倣相互作用を通して、模倣に必要な身体マッピングを獲得するためのモデルを提案する。提案モデルでは、予測性に基

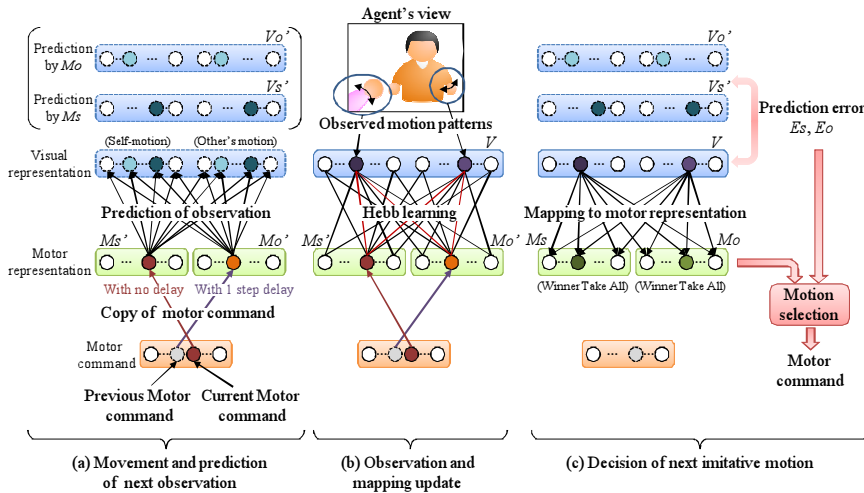


Fig.3 Moiton decision process.

づいた自己/他者モデルへの選好性を導入する．そしてシミュレーション結果が予測性に基づく選好性に依存した定型/非定型模倣発達過程を表していることを示し、予測性に基づく選好性が模倣発達を支配する1つの要因になっていること議論する．

2. 相互模倣発達のためのモデル

模倣能力に必要な身体マッピングを学習する1つの手がかりは、正しい身体マッピングを持つ他者（養育者）が模倣して対応を提示してくれることである．そこで本研究では Fig.1 のような乳幼児（学習者）と養育者の相互作用を考える．この相互作用では、両者が同時に身体運動を提示し合う．学習者は、自身の運動指令とその運動に対して他者が見せる模倣運動を結びつけることにより身体マッピングを学習する．

ここで身体マッピングを Fig.2 のようなネットワークで表現する．簡単のために、両者の身体運動は知覚上および運動指令上で離散化されており、また両者は同じ運動レパートリを持つとする．観測した身体運動および身体運動指令は視覚表象層および運動表象層の1つのノードで表される．便宜上、視覚表象層の左側に観測した自己身体運動、右側に他者身体運動を表示しているが、自己像と他者像は区別されていない．観測した自己身体運動と自己の運動指令のマッピング（自己モデル）と、観測した他者身体運動と自己の運動指令のマッピング（他者モデル）を分けて表現可能にするために、運動表象層には運動指令の複製があるとする（1つの運動指令に対し、2つのノードがある）．養育者は正しい身体マッピングを常に保持しているのに対し、学習者は視覚表象層と運動表象層間がランダムに結合された状態から（Fig.1）、養育者との相互作用を通して身体マッピングを学習する．学習は運動指令とそれを実行した結果として得られる観測を結びつけるヘブ学習により行われる．両者は観測に対応する運動指令を実行する（学習者は学習中の身体マッピングを用いて観測に対応する運動指令を決定する）．このモデルで自他像を区別するためには、自己モデルと他者モデルを分離して表現しなければならない．そのための手がかりは、身体運動の観測の遅れである．自身の身

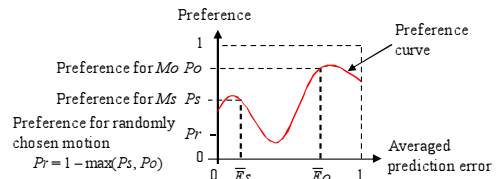


Fig.4 Decision of imitative motion based on predictability preference.

体運動は運動指令を実行した直後に観測されるが、他者が模倣してくれた場合に運動指令に対応する他者の身体運動は遅れて観測される．遅れの違いを利用するために、運動指令が運動表象にコピーされる際に、一方には時間遅れなしで、他方には1時刻分の時間遅れでコピーされる構造があるとする．便宜上、時間遅れなしでコピーされる部分の運動表象（Fig.2の運動表象の左側のグループ）を自己対応運動、時間遅れありでコピーされる部分の運動表象（同右側）を他者対応運動と呼ぶことにする．

両者は各時刻において、Fig.3 に示すように (a) 運動指令実行、(b) マッピング更新（学習者のみ）、(c) 運動選択の処理を行う．

- 現時刻と前時刻に実行した運動指令が運動表象にコピーされる (M'_s, M'_o)．身体マッピングの逆写像により、 M'_s, M'_o から別々に観測を予測する (V'_s, V'_o)．
- 観測した両者の運動 (V) と上述の運動表象との結合を更新する．更新には相互排他性を考慮したヘブ学習 [6] を用いる．
- 観測した身体運動に対応する運動を、身体マッピングの順写像により求め (M_s, M_o)、さらに V と V'_s, V'_o から予測誤差を求める (E_s, E_o)．予測誤差に基づいて運動を選択する．

このモデルでは、運動選択において2つの選択肢（自己対応運動と他者対応運動）がある．ここで両者は運動選択において予測誤差に基づいた選好性を持つと考える．Fig.4のように、予測誤差と選好度の関係を表す選好曲線に従って、平均予測誤差 $E_s, E_o \in [0, 1]$ から各

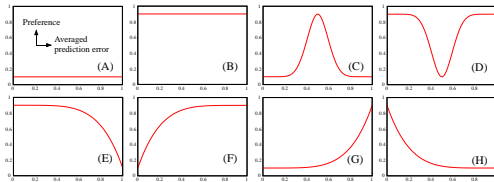


Fig.5 Test patterns of preference curve.

運動 M_s, M_o に対する選好度 ($P_s, P_o \in [0, 1]$) が決定される。選好度には、現在の予測誤差だけでなく過去数ステップの平均予測誤差が影響するとした。また両者は観測に対応する運動以外に、ランダムに選択した運動（ランダム運動）を実行できるとする。観測に対応する運動への選好度が低い場合に、ランダム運動への選好度 P_r が高くなると考え、 $P_r = 1 - \max(P_s, P_o)$ とした。両者は選好度の比率に基づいて確率的に運動 M_s, M_o あるいはランダム運動を選択する。

3. シミュレーション

学習者が身体マッピングを学習して模倣能力を獲得するためには、適切に養育者の模倣を誘発しなければならない。養育者が常に模倣すると、学習者は自身の身体運動と養育者の身体運動を区別することができなると考えられる。そこで、学習者・養育者ともに同じ選好曲線を有する条件で、選好曲線が模倣能力発達にどのような影響を及ぼすかをシミュレーションにより調べる。ここでは、Fig.5 に示した 8 パターンの選好曲線についてシミュレーションを行った。完全に選好が失われる状態を避けるために、選好曲線の値域は $[0.1, 0.9]$ とした。

シミュレーションでは両者は 30 パターンの身体運動を有するとした。マッピングの結合重みは $[0, 1]$ とし、学習者の重み初期値は $[0, 0.1]$ の乱数で与えた。養育者については、観測と運動指令の正しい対応の結合を 1.0、その他を 0.0 とし、重みは変化しないものとした。運動指令から観測を予測する際には、逆写像で計算した視覚表象層 (V'_s, V'_o) のノードの中で、閾値 (0.1) 以上の値を持つノードを予測したとする。予測誤差 E_s, E_o は、予測したノード数に対して実際には観測されなかったノード数の割合とした。選好度を決定する際の平均予測誤差は、過去 20 ステップの予測誤差の平均値とした。

各選好曲線に対する結果を Fig.6 に示す。1 回のシミュレーションは 10000 ステップで打ち切った。Fig.6 の各行のグラフは以下の結果を示している。

- (a) 学習者の自己モデルおよび他者モデルにおける誤結合の数の割合。ここでは、視覚表象層のあるノードから出ている結合の中で、最大重みを持つ結合が正しく対応する運動表象のノードと結合しており、かつ最大重みと 2 番目に大きい重みの差が閾値 (0.1) 以上のとき (結合の排他性の確認)、正しい結合が得られているとした。グラフ中のエラーバーは、同じ選好曲線で 20 回シミュレーションを行ったときの標準偏差を 250 ステップごとに示したものである (以下同様)。
- (b) 学習者の過去 20 ステップの運動選択において、自己対応運動 M_s 、他者対応運動 M_o 、ランダム運動

が選択された割合。

- (c) 養育者に対する上記 (b) の結果。
- (d) 過去 20 ステップ中に、学習者が M_s を実行したときの模倣成功率および M_o を選択したときの模倣成功率。
- (e) 学習者が獲得した身体マッピングの定性的性質を示したものの。

このシミュレーションでは、(C) か (G) の選好性を有する場合に、学習者が自己モデルと他者モデルが分離可能な正しい身体マッピングを学習した。(B),(D),(E),(F) の選好性では、観測した身体運動と運動指令の対応は正しく学習されているが、自己モデルと他者モデルが分離可能な形で学習されていない。(A),(H) の選好性では、観測した自己身体運動と運動指令の対応は正しく学習されているが、観測した他者身体運動と運動指令の結合が弱く (結合の排他性が不十分)、他者モデルが獲得されなかった。

いずれの選好性でも、グラフ (d) より開始後 300 ステップ程度で学習者は自己の身体運動の模倣が可能になることがわかる (グラフ (a) で誤結合割合が 0 にならない理由は、結合の排他性が不十分なためである)。これは、自己の運動指令に対して必ずその直後に対応する自己身体運動が観測されるためである。しかしその後の発達過程は選好性により変化する。

定型発達が出現する場合 (C) の選好性では、開始後約 300 ステップ間は自己対応運動の頻度が高く、他者対応運動の頻度が低い、やがて頻度は逆転する。(G) の選好性では、開始後約 300 ステップ間は自己対応運動および他者対応運動の両方の頻度が高いが、その後自己対応運動の頻度は減少する。これらは、最初に出現した自己模倣が自己モデルの獲得後に消滅し、その後、養育者との相互模倣が出現する現象を表している。自己模倣は Piaget の模倣発達段階の初期に見られる第二次循環反応 [7] に対応する行動とみなすことができる。従ってこの結果には、定型的な模倣発達段階の初期段階と後期段階が現れていると考えられる。この結果では自己模倣はすぐに抑制されるが、抑制されない場合には自己モデルと他者モデルの混同が生じると考えられる。また、養育者が同一の模倣運動を続けた場合にも、やはり学習者の自己モデルと他者モデルの混同が生じると考えられる。しかし養育者がランダム運動を頻繁に行っていることから、この結果ではそのような現象が生じていないことがわかる。これらは予測誤差が小さい運動 (結果が既知の運動) への低選好性に由来するものであり、この特性が定型発達過程に寄与していると考えられる。

選好性 (C) は、結果が予測できない運動 (結果に新奇性のある運動) や、結果が予測しやすい運動 (結果が既知の運動) に対して選好を示さない性質である。また選好性 (G) は、結果が新奇な運動に対してのみ選好を示す性質である。これらは人間の典型的な選好性と考えられる。特に、新奇性に対して選好度が逆 U 字曲線を描く (C) の特性は、人間の本質的な選好性を表していると考えられており、心理学的実験でもこのような特性が現れることが示されている ([8] など)。そして (C) の選好性を有する場合に、明示的に発達順序を

0.5

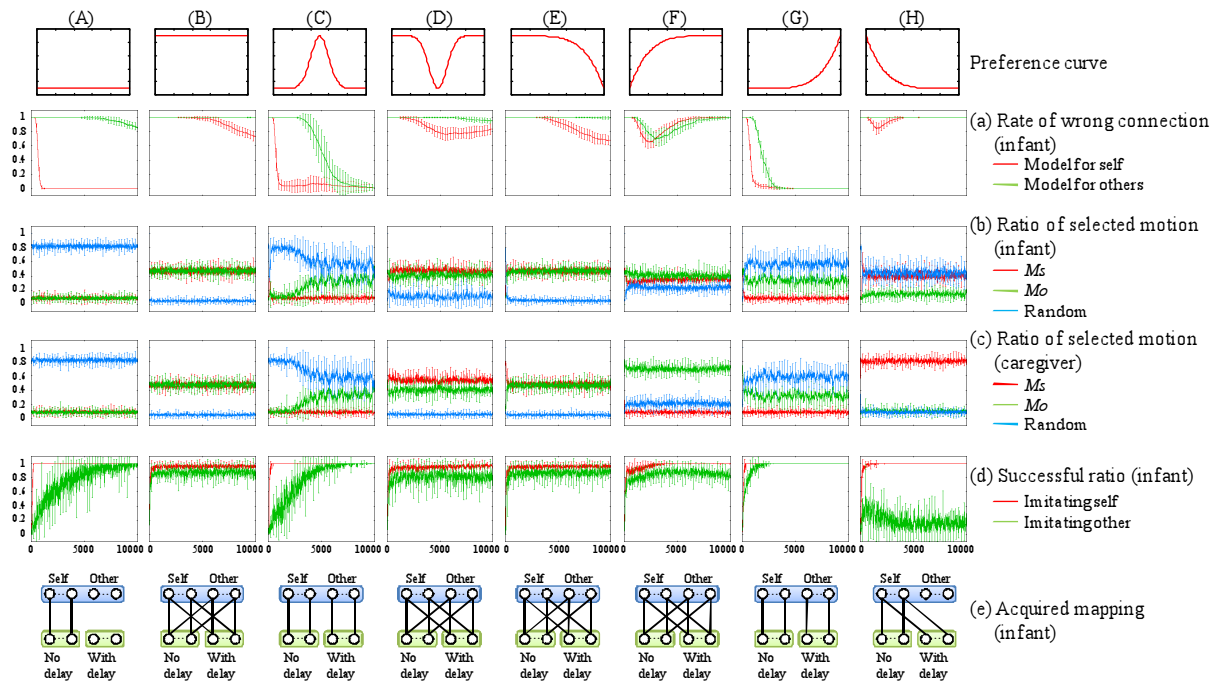


Fig.6 Simulation results.

モデルに組み込んでいないにもかかわらず自己模倣から他者との相互模倣への変遷過程が現れたことは、予測性を評価した選好性に基づく運動選択が模倣発達を説明づける1つの要因になっていることを示唆していると考えられる。

非定型発達が出現する場合 (B),(D),(E),(F) の選好性では両者ともランダム運動の頻度が低く、同一の運動を続ける傾向が観察された。そのため、学習者の自己・他者モデルの混同が生じたと考えられる。この現象は、選好曲線の広範囲に選好度が高い領域が存在していることに由来していると考えられる。(A),(H) の選好性では養育者が学習者を模倣する頻度が低く、そのために学習者の他者モデルが構築されなかったと考えられる。

これらの結果における、自己・他者モデルが混合したマッピングや他者モデルの欠落は、自閉症のような非定型発達現象を表していると見ることができる。自閉症児には、同一の対象に異常な興味を示し同じパターンを反復して熱中する傾向が観察されている [9]。この傾向は (C),(G) 以外の非典型的な選好性から説明できると考えられる。以上のことから、予測性に基づく選好性の異常性が非定型発達に関与していることが示唆される。

4. おわりに

本報告では、母子間模倣相互作用を通して模倣能力を獲得するメカニズムを調べるために、模倣に必要な身体マッピングを自他が区別されていない状態から学習するモデルを構築した。モデルの構造は神経解剖学的知見に基づくものではないが、自他の区別と身体マッピングを養育者からの模倣を手がかりに学習する問題には、運動指令に対応する観測の遅れの違いを利用した構造や自己模倣と他者模倣を切り替える構造が、なんらかの表現型で含まれていると考えられる。シミュ

レーション結果は、このような問題に対して予測性に基づく選好性が模倣発達を支配する要因になっていることを示唆するものと考えられる。

- [1] 明和政子. 身体マッピング能力の基盤を探る. ベビーサイエンス, Vol. 8, pp. 2–13, 2009.
- [2] M. Asada, K. Hosoda, Y. Kuniyoshi, H. Ishiguro, T. Inui, Y. Yoshikawa, M. Ogino, and C. Yoshida. Cognitive developmental robotics: a survey. *IEEE Transactions on Autonomous Mental Development*, Vol. 1, No. 1, pp. 12–34, 2009.
- [3] E. Oztop and M. A. Arbib. Schema design and implementation of the grasp-related mirror neuron system. *Biological Cybernetics*, Vol. 87, No. 2, pp. 116–140, 2002.
- [4] T. Kokkinaki and G. Kugiumutzakis. Basic aspects of vocal imitation in infant-parent interaction during the first 6 months. *Journal of reproductive and Infant Psychology*, Vol. 18, No. 3, pp. 173–187, 2000.
- [5] R. Yokoya, T. Ogata, J. Tani, K. Komatani, and H. G. Okuno. Discovery of other individuals by projecting a self-model through imitation. In *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1009–1014, 2007.
- [6] Y. Yoshikawa, K. Hosoda, and M. Asada. Unique association between self-occlusion and double touching towards binding vision and touch. *Neurocomputing*, Vol. 70, No. 13–15, pp. 2234–2244, 2007.
- [7] J. Piaget. *Play, Dreams, and imitation in childhood*. W. W. Norton, New York, 1945.
- [8] W. Sluckin, A. M. Colman, and D. J. Hargreaves. Liking words as a function of the experienced frequency of their occurrence. *British Journal of Psychology*, Vol. 71, No. 1, pp. 163–169, 1980.
- [9] American Psychiatric Association. *Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders, 4th ed.* Author, Washington, DC, 1994.