

## 予測性を評価した選好性に基づく模倣発達メカニズムの提案

港 隆 史<sup>\*1</sup> トーマス デール<sup>\*1</sup> 吉 川 雄一郎<sup>\*1</sup> 石 黒 浩<sup>\*1\*2</sup>A Model to Explain the Emergence of Imitation Development  
based on Predictability PreferenceTakashi Minato<sup>\*1</sup>, Dale Thomas<sup>\*1</sup>, Yuichiro Yoshikawa<sup>\*1</sup> and Hiroshi Ishiguro<sup>\*1\*2</sup>

Imitation is a very complicated function which requires a body mapping (a mapping from observed body motions to motor commands) that can discriminate between self motions and those of others. The developmental mechanism of this sophisticated capability, and the order in which the required abilities arise, is poorly understood. In this article, we present a mechanism for the development of imitation through a simulation of infant-caregiver interaction. A model was created to acquire a body mapping, which is necessary for successful mutual imitation in infant-caregiver interaction, while discriminating self-motion from the other's motion. The ability to predict motions and the time delay between performing a motion and observing any correlated motion provides clues to assist the development of the body mapping. The simulation results show that the development of imitation capabilities depends on a predictability preference (a function of how an agent decides regarding the options 'what to imitate,' given its ability to predict motions). In addition, the simulated infants in our system are able to develop the components of a healthy body mapping in order, that is, relating self motion first, followed by an understanding of others' motions. This order of development emerges spontaneously without the need of any explicit mechanism or any partitioning of interaction. These results suggest that this predictability preference is an important factor in infant development.

**Key Words:** Infant development, Imitation, Body mapping, Self-other distinction, Predictability preference

## 1. はじめに

模倣は乳幼児の発達、特に他者理解や他者とのコミュニケーション能力の発達において重要な機能である。例えばシミュレーション説 [1] は、人は観測した他者の行動をシミュレーションする、すなわち模倣することにより他者の内部状態を理解することを示唆している。Piaget [2] の発達理論によれば、乳幼児の模倣発達過程では、生後 4ヶ月まで (1-4ヶ月) に第一次循環反応が観察される。このとき乳幼児が同じ運動を反復するような運動が観察されるが、これは自己模倣と捉えることができる [3]。すなわち、自己運動の模倣を通して自己の身体に関する探索を行っていると考えられる。そして生後 4ヶ月以降 (4-8ヶ月) に養育者との模倣相互作用が観察されるようになる。このような発達過程は他の研究においても報告されている [4]。また、乳幼児

の自己認知能力は生後に発達すると考えられている [5] [6]。最近の研究では、胎児は自己受容感覚に基づいて自己身体を認識しているという報告もあるが [7]、他者との比較における対人的な自己に関する知識は乳幼児期に形成されると考えられる。従って、上記の模倣発達の初期過程では、乳幼児は自ら生成した運動と他者が生成した運動を観測上区別していない可能性がある。しかし、乳幼児の周囲の環境には誕生直後から他者 (養育者) が存在しており、乳幼児は自己運動だけでなく他者の運動も観測しているにもかかわらず、他者の模倣に先駆けて自己模倣をするようになる。このことから、自己模倣から他者模倣への発達過程において、自己と他者を区別する能力が獲得されていることが考えられる。この発達過程は他者理解の発達において本質的なものであると考えられるが、これまでの研究ではほとんどこのメカニズムに焦点が当てられていない。本論文ではこの生後 1-8ヶ月程度の間に見られる、自他の区別を伴う自己模倣から他者模倣への発達メカニズムに注目する。

身体運動の模倣を行うためには身体マッピング [7]、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との対応づけ (Fig.1) が必用である [8]。人の身体マッピングが生得的に備わっていると考える研究もあり [9]、実際に新生児がいくつかの

原稿受付

<sup>\*1</sup> 科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業 浅田共創知能システムプロジェクト

<sup>\*2</sup> 大阪大学大学院基礎工学研究科

<sup>\*1</sup> Asada Project, ERATO, JST

<sup>\*2</sup> Graduate School of Engineering Science, Osaka University

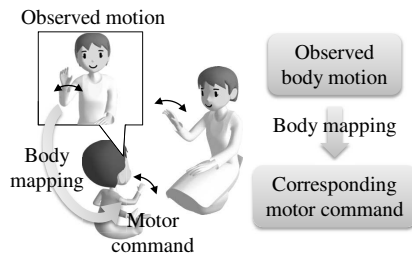


Fig. 1 Body mapping.

模倣をすることが報告されている。しかし、生得的に備わっていたとしてもそれは部分的あるいは一時的なものであり、生後に感覚運動経験を通して身体マッピングが構築されると考えられている [10]。この身体マッピングは自己に関するマッピングと他者に関するマッピングを含むと考えられる。前者は観測した自身の身体運動と自身の身体運動指令との対応づけ（本論文では自己モデルと呼ぶ）であり、後者は観測した他者の身体運動と自身の身体運動指令との対応づけ（本論文では他者モデルと呼ぶ）である。自己モデルおよび他者モデルはそれぞれ自己模倣、他者模倣に必用なマッピングであり、これらのモデルが未分化な状態から獲得される過程が、上述した模倣発達過程として現れると考えられる。

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 [11]。このアプローチによる従来研究として、Oztop and Arbib [12] は、自己運動の観測画像と他者運動の観測画像の間の変な画像特徴に基づいて把持運動に関する身体マッピングを獲得するモデルを提案している。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（特に発話相互作用）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 ([13]~[17])。養育者の模倣に注目した研究として、Ishihara et al. [18] は乳幼児が養育者との相互の発話模倣を通して母音を獲得するモデルを提案している。また、Yokoya et al. [19] は他者からの動作模倣に基づい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、他者（養育者）が自己（学習者）と区別して認識されることを仮定していたり、自己モデルを獲得する過程とそれに基づいて他者モデルを獲得する過程が分けて用意されていることを仮定している。しかし乳児は誕生直後から養育者と関わるため、他者がいない環境で自己モデルを獲得する状況と、他者との相互作用を通して他者モデルを獲得する状況が分けられて順番に与えられるとは限らない。乳児は観測した自己と他者の区別が未分化な状態で他者からの模倣に基づいて学習しなければならないと考え、乳児の模倣発達には、自他の区別と身体マッピングの同時学習を可能にし、そして自己モデルの獲得から他者モデルの獲得という過程をもたらすメカニズムが働いていると考えられる。

本論文では認知発達ロボティクスのアプローチからこのメカニズムを探究する。模倣発達は複雑な問題であるが、ここでは観測した運動と運動指令の対応（身体マッピング）問題および身体マッピング中の自己モデルと他者モデルの分離（自他分離）問題に問題を単純化し、上述した発達過程をもたらす本質的な要因を探る。そのために身体マッピングを表現する単純なモデルを構築し、乳児と養育者の相互作用を通して乳児が養育者からの模倣を手がかりに身体マッピングを学習するシミュレーションを行う。問題を単純化するために身体マッピングに基づく模倣運動のみを扱い、さらに両者のタスクは考えないものとする。他者モデルを獲得するためには養育者が乳児を模倣する必要があるが、模倣行動は自分が模倣されることによって誘発されると考えられるため [20]、乳児も養育者を模倣することによって、相互模倣に引き込むことが必要であると考えられる。最初、乳児は身体マッピングが未熟であるために適切に模倣することができないが、養育者との相互作用を通して適切な身体マッピングを構築しつつ、養育者と互いに模倣できるようになることが期待される。このように問題を単純化した場合、両者は行動決定において自己モデルに従った模倣か他者モデルに従った模倣を選択することになる。ここで乳児が随伴性に対して反応を示すという知見 [21] [22] から、乳児は自己の運動とそれに続く運動の観測の間関係が評価できると考える。そして乳児と養育者がともに模倣選択において、自己の運動から予測される観測と実際の観測との違いを評価すると考える。本論文では、この観測の予測性に基づいた模倣行動選択が模倣発達過程を決定づけるという仮説を立て、予測性に基づく選好性を用いた行動選択メカニズムを提案する。これは行動への選好性が予測性に依りて決定され、選好性に従って行動が選択されるメカニズムである。自己モデルに従った模倣は自己運動を模倣すること、他者モデルに従った模倣は他者運動を模倣することに対応する。本シミュレーションでは、乳児は養育者からの模倣を手がかりに他者モデルを学習すると仮定しているため、養育者が乳児を全く模倣しない場合、乳児は他者モデルを獲得できないと考えられる。また養育者と乳児が互いに同一の運動を模倣し続けると、同一の運動指令を観測している自己運動と他者運動の両方に同程度に対応づけることができってしまうため、乳児は自己モデルと他者モデルを区別できなくなると考えられる。従って両者の模倣の選択方針が模倣発達過程に影響すると考えられる。本論文では両者が人間にとって典型的な選好性を持つ場合に、自己模倣から他者模倣に遷移する定型発達過程を伴って乳児が正常な身体マッピングを獲得することを示す。また提案メカニズムの妥当性を向上させるためには、定型発達の出現を示すだけでなく、モデルに欠損がある場合に非定型発達が出現することを示すことが望まれる。そこで本論文では、乳児が非典型的な選好性を持つ場合の発達過程についてもシミュレーションを行う。そして、典型的/非典型的な選好性が、それぞれ定型発達/非定型発達をもたらすことをシミュレーションで示すことによって、予測性に基づく選好性が、自他を区別した身体マッピングを獲得する模倣発達過程を支配する要因の1つであることを示唆する。

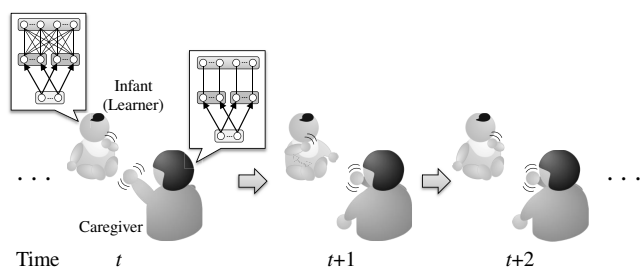


Fig. 2 Model of mutual imitation in infant-caregiver interaction.

## 2. 模倣発達のためのシミュレーションモデル

模倣発達過程における自己分離獲得の問題を扱うために、身体マッピングおよび養育者と乳児の相互作用を単純化したモデルを構築する。本論文では以下の仮定を置く。

- 両者の身体運動は空間的および時間的に離散化されている。乳幼児の発達において運動の分節化は重要な問題であり、模倣発達と並行して分節化も行われていると考えられる。ただし本モデルでは問題を扱いやすくするため、身体運動は知覚においても指令値においても離散化されていると仮定する。
- 両者は相同の身体運動を持つ。
- 両者は同じ構造の身体マッピングモデルおよび行動選択モデルを持つ。
- 両者は身体マッピングを用いて観測された身体運動を模倣する。模倣しない場合はランダムに選択した身体運動を行う。両者はタスクを持たない。

乳児と養育者の相互作用を Fig.2 のようにモデル化する。各時刻において両者は身体運動を実行すると同時に自身の身体運動および他者の身体運動を観測する。自己と他者の身体運動を同時に観測することを仮定しているため、体の前で手を振る運動のように自身でも観測可能な腕や脚のある運動パターンを1つの身体運動と想定する。身体マッピングの獲得問題を扱うため、模倣としての身体運動のみに注目し、それ以外の身体運動は「模倣ではない何らかの身体運動」として扱う。

- 養育者は正しい身体マッピングを持ち、それは相互作用により変化しない。一方、乳児は最初は正しい身体マッピングを持たず、観測される自身の身体運動と他者の身体運動を区別することができない。

乳児が観測した身体運動を模倣する場合は、学習中の身体マッピングを用いて観測した身体運動に対応する身体運動指令を見つけ出して実行する。

- 乳児の身体マッピングの学習に対して、模倣の成功/失敗を評価した報酬は与えられない。

学習中の乳児の身体マッピングは未熟であるため、乳児は自身の模倣の成功/失敗（観測した運動と正しく対応する身体運動指令を実行したか否か）を判断することができない。現実には乳幼児が模倣に成功した時に養育者が褒めることによって報酬を与える場面が見られるが、常に報酬

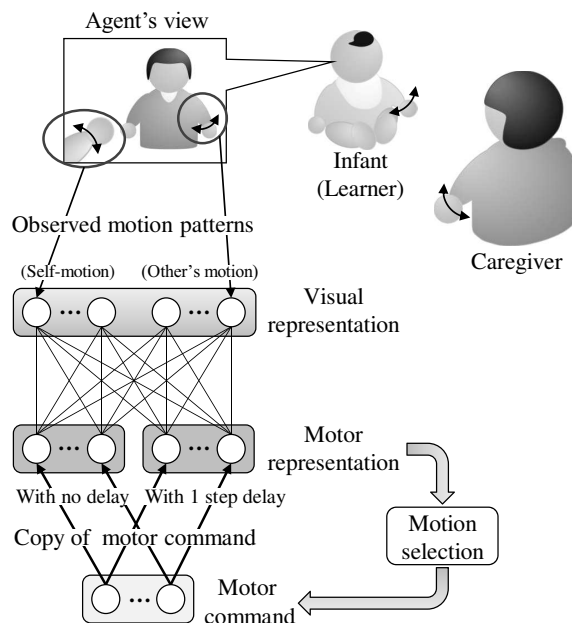


Fig. 3 Model of body mapping.

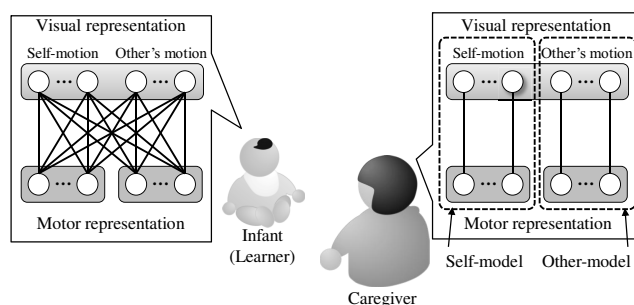


Fig. 4 Body mappings of infant and caregiver.

が与えられるとは限らない。ここでは極端な場合として、報酬が与えられない状況を想定する。乳児は常に自身の身体運動指令と、その指令を実行したと同時に観測された身体運動の対応づけを強化することにより身体マッピングを学習する。

- 両者は身体マッピングの逆写像を使って、自身の身体運動指令から、続いて観測される身体運動を予測することができる。

身体マッピングを Fig.3 で示すネットワークでモデル化する。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、乳児が身体マッピングを使う時にはそれらは区別されない。観測した自己身体運動と自己身体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身体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、運動表象層には身体運動指令の複製があるとする（1つの身体運動指令に対し、2つのノードがある）。

養育者は Fig.4 の右側に示すように、自己モデルと他者モデルが分離され、観測した身体運動と身体運動指令が正しく1対

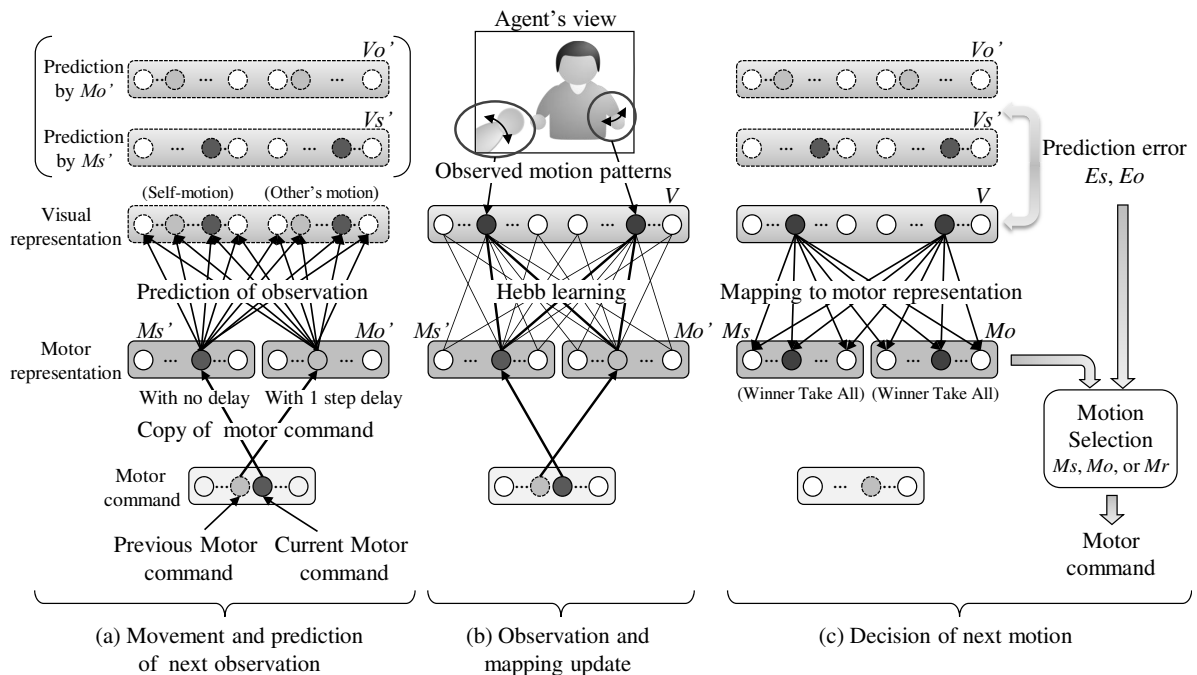


Fig. 5 Motion decision process.

1 に対応した身体マッピングを持っている。一方、学習開始段階では乳児の身体マッピングの視覚表象層と運動表象層は弱く全結合された状態になっている (Fig.4 の左側。)そして、養育者との相互作用を通して結合が更新される。ここでは、ある身体運動指令を実行したと同時に観測される身体運動とその身体運動指令の間の結合がヘブ則によって強化される。

乳児がこのモデルで自他を区別するためには、自己モデルと他者モデルが分離できるように身体マッピングを獲得しなければならない。そのための手がかりの1つは観測の遅れの違いである。ある身体運動指令に対応する自己身体運動はその指令を実行したと同時に観測される。一方、その指令に対応する他者身体運動は、他者が模倣した場合に1時刻遅れて観測される。この観測の遅れの違いを利用できるように、本モデルでは身体運動指令が運動表象層に2通りの方法でコピーされると仮定する。すなわち、Fig.3 に示すように身体運動指令が一方では時間遅れなしでコピーされ、他方では1時刻遅れてコピーされる。運動指令のコピーは、人間の生体システムにおける運動指令の遠心性コピーのモデルと考えることができる。そして時間遅れコピーは記憶保持のモデルと考えることができる。実際の模倣相互作用では遅れ時間は一定ではないが、本シミュレーションでは時間遅れを1時刻と単純化した。ただし本モデルでも、コピーされた運動指令がある程度の時間記憶されると考えると、一定でない時間遅れを扱うことはできる。便宜上、時間遅れなしでコピーされる運動表象部分 (Fig.3 の運動表象層の左側のグループ) を自己対応運動、時間遅れありでコピーされる運動表象部分 (同右側) を他者対応運動と呼ぶ。乳児は、観測した自己身体運動と自己対応運動指令、観測した他者身体運動と他者対応運動指令をそれぞれ結合することができれば、自己モデルと他者モデルを分離して獲得できる。

両者は各時刻において、Fig.5 に示すように (a) 運動指令実行と観測の予測、(b) マッピング更新 (乳児のみ)、(c) 次時刻に実行する運動選択の処理を行う。

- 前時刻で決定した身体運動指令を実行する。それと同時に現時刻と前時刻に実行した身体運動指令が運動表象層にコピーされる ( $M_s', M_o'$ )。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 ( $V_s', V_o'$ )。
- 観測した身体運動 ( $V$ ) と運動表象層にコピーされた身体運動指令との結合重みを更新する。更新には相互排他性を考慮したヘブ学習 [23] (後述) を用いる。
- 観測した身体運動に対応する身体運動指令を身体マッピングを用いて求める。視覚表象層のノードの値と結合重みの積の総和が運動表象層のノードの値として計算される。対応する身体運動指令は winner-take-all 戦略により自己対応運動の中および他者対応運動の中でそれぞれ1つずつ選ばれる ( $M_s, M_o$ )。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次時刻に実行する身体運動指令を選択する。

このモデルでは、Fig.5 (c) においてエージェントは観測した身体運動に対応する2つの身体運動指令 (自己対応運動指令  $M_s$  と他者対応運動指令  $M_o$ ) を想起する。エージェントは模倣時にどちらかを選択しなければならない。このとき、身体マッピングが正しく構築されていれば自己対応運動指令は自己模倣運動、他者対応運動指令は他者模倣運動となる。本論文では、エージェントは観測の予測性に基づいて運動選択を行うという仮説を立て、予測性に基づく選好性を用いた運動選択メカニズムを提案する。この選好性はエージェントが個体特性として持つものである。エージェントは Fig.5 (a) に示すように、身体運動指令を実行すると同時に、身体マッピングの逆写像を用いて観測

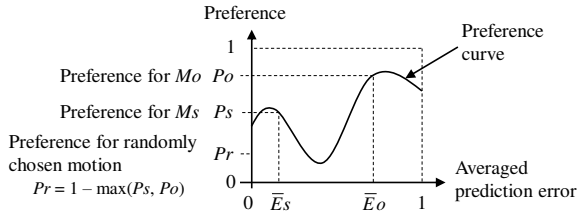


Fig. 6 Decision of motion based on predictability preference.

を予測する．このとき、現在の身体運動指令  $M'_s$  からの予測  $V'_s$  と、1 時刻前の身体運動指令  $M'_o$  からの予測  $V'_o$  の 2 通りの予測が得られる．そしてエージェントが身体運動を観測した時に、 $M'_s$  (= 自己対応運動指令) から予測した場合の予測誤差  $E_s$  および  $M'_o$  (= 他者対応運動指令) から予測した場合の予測誤差  $E_o$  が得られる．この予測誤差に基づいて、自己対応運動指令と他者対応運動指令に対する選好度 ( $P_s, P_o \in [0, 1]$ ) が決定される．選好度の決定には Fig.6 に示す選好曲線が使われる．本モデルでは、選好度は現在の予測誤差だけでなく過去数時刻分の平均予測誤差  $\bar{E}_s, \bar{E}_o \in [0, 1]$  から決定されるとした．またエージェントは模倣運動に加えて、ランダムに選択した身体運動指令  $M_r$  (ランダム運動) を選択できるとする．模倣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．エージェントは選好度の比率に比例した確率に従って、模倣運動  $M_s, M_o$  あるいはランダム運動  $M_r$  を選択する．身体マッピングが正しく構築されていれば、 $M'_s$  から自己身体運動が正しく予測される．また、他者が模倣している場合には、 $M'_o$  から他者身体運動が正しく予測される．エージェントの運動選択は他者の予測誤差に影響し、その結果、他者の自己模倣 / 他者模倣 / ランダム運動のバランスに影響する．このバランスが両者の相互作用、さらには乳児の模倣発達過程を決定づけると考えられる．

乳児の身体マッピングの結合重み更新には、相互排他性を考慮したヘブ学習 [23] を用いる．この学習則はあるノードから出ている結合の重みに排他的な偏りがあることを見つけると、それを強化して 1 対 1 対応の結合を作り出そうとする．視覚表象層のノード  $i$  と運動表象層のノード  $j$  の結合重みを  $w_{ij}$  とすると、重みの更新量は次式で表される．

$$\Delta w_{i^*j^*} = \eta ({}^p d_{i^*j^*} {}^p a_{i^*} \cdot {}^m d_{i^*j^*} {}^m a_{j^*} - w_{i^*j^*}). \quad (1)$$

上式は各層の最大の値をもつノード間の結合重みの更新式であり、 $\eta$  は更新率、 $i^*, j^*$  は視覚表象層、運動表象層において最大値を持つノード、 ${}^p a_{i^*}, {}^m a_{j^*} \in [0, 1]$  はノード  $i^*, j^*$  の値である．また、 ${}^p d_{ij}, {}^m d_{ij}$  は結合の排他性を反映した係数であり、次式で表される．

$${}^p d_{ij} = \exp\left(-\frac{\sum_{k, k \neq j} w_{ik}}{p\sigma^2}\right), \quad (2)$$

$${}^m d_{ij} = \exp\left(-\frac{\sum_{k, k \neq i} w_{kj}}{m\sigma^2}\right). \quad (3)$$

ここで  $p\sigma, m\sigma$  は結合の排他性を重みの更新量に反映させる度合いを制御するパラメータである．さらに、 $i^*, j^*$  間の結合以

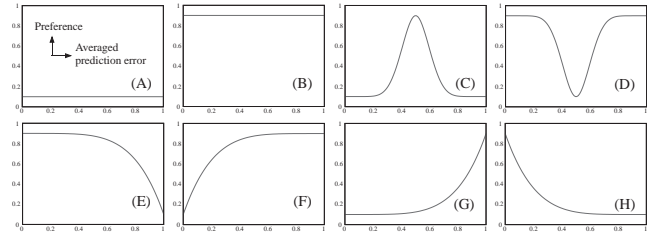


Fig. 7 Test patterns of preference curve.

外の結合の重み更新は次式に従って行う．

$$w_{ij^*}(t) = w_{ij^*}(t-1) - \eta_p(1 - {}^p d_{ij^*})\Delta w_{ij^*}, \quad (4)$$

$$w_{i^*j}(t) = w_{i^*j}(t-1) - \eta_m(1 - {}^m d_{i^*j})\Delta w_{i^*j}. \quad (5)$$

ここで、 $\eta_p, \eta_m$  は更新率である．2 層間の排他的な結合、すなわち 1 対 1 の結合が望まれている場合に、この学習則は学習を加速する．本論文のモデルでは、重み更新時に視覚表象層および運動表象層でそれぞれ 2 つのノードの値が最大値を持つため、4 通りの  $i^*, j^*$  の組み合わせについて上記の更新を行う．

### 3. 模倣発達シミュレーション

乳児が養育者との相互作用を通して身体マッピングを獲得し、正しく模倣できるようになるためには、養育者が乳児を模倣する必要がある．ただし養育者と乳児が互いに同一の運動を模倣し続けると、観測の時間遅れの違いによる区別のメカニズムが働かないため、乳児は自己モデルと他者モデルの区別が困難になると予想される．また養育者がほとんど模倣しなれば、乳児は運動指令と観測した他者運動との対応を正しく学習することが困難になると予想される．従って適切なバランスの模倣相互作用が発生する選好性を調べなければならない．本論文では、乳児と養育者が人間にとって典型的な選好性を持つ場合に乳児は正常な身体マッピングを獲得し、乳児が非典型的な選好性を持つ場合に正常でない身体マッピングを獲得すると予想する．

#### 3.1 シミュレーション設定

本シミュレーションでは、異なる形状の選好曲線が乳児の模倣発達過程にどのような影響を及ぼすかを調べる．ここでは、Fig.7 に示す定性的に性質の異なる 8 つの選好曲線を用意した．選好曲線における予測誤差 (Figs.6,7 の横軸) の大きさは、身体運動指令と続いて観測される身体運動の関係の新奇性の大きさを表していると考えられる．すなわち、エージェントにとって、予測が的中することは運動指令とそれに続く観測の関係が既知 (親近) であることを意味し、予測が外れることはその関係が未知 (新奇) であることを意味する．極端な状況 (例えばエージェントが常に自己模倣を行うなど) に陥ることを避けるため、選好曲線の値域は  $[0.1, 0.9]$  とした．各選好曲線は次のような意味を持つ．

- (A) *Nothing*: 予測誤差にかかわらず高頻度でランダム運動を選択する．
- (B) *Everything*: 予測誤差にかかわらず高頻度で模倣する．
- (C) *Comfort zone*: 高い新奇性と高い親近性以外を好む．
- (D) *Extremes*: 高い新奇性と高い親近性だけを好む．
- (E) *Novelty avoiding*: 高い新奇性以外を好む．

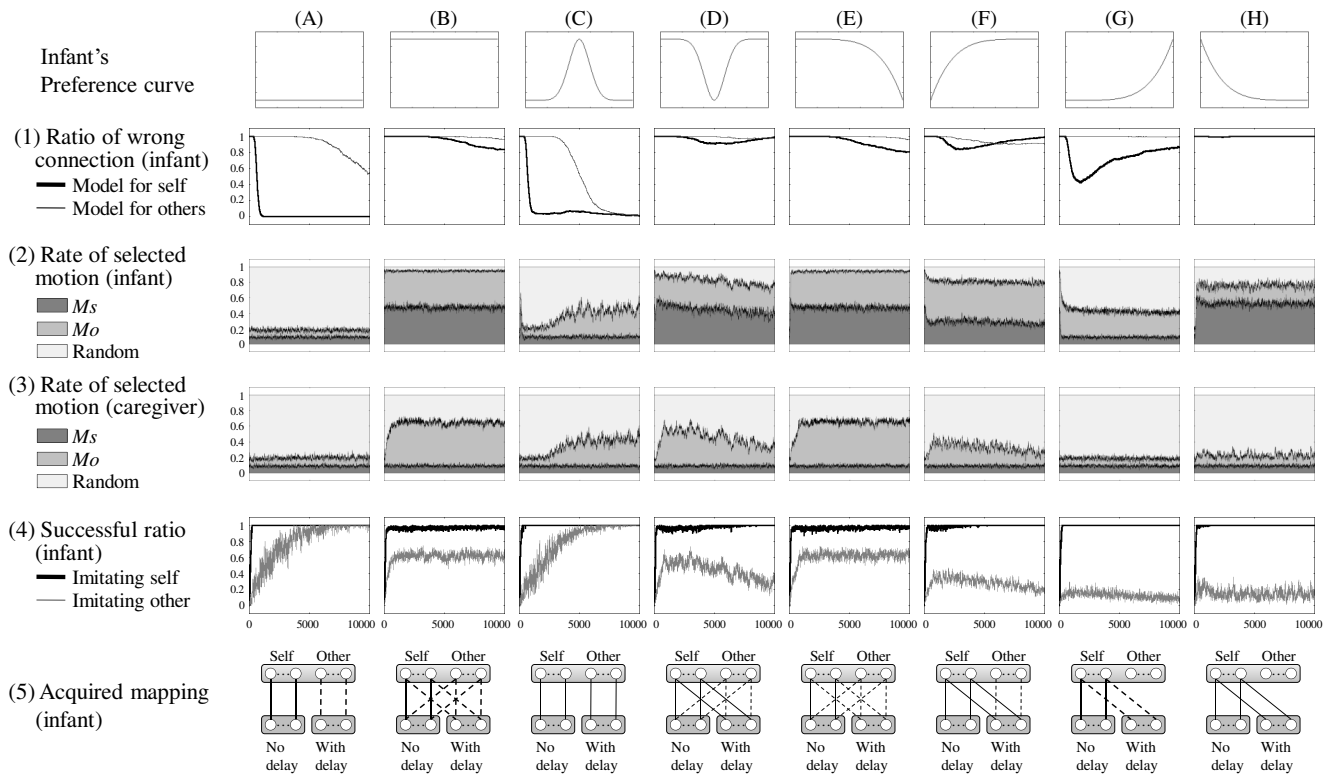


Fig. 8 Simulation results (caregiver uses preference curve (C)).

(F) *Familiarity avoiding*: 高い親近性以外を好む。

(G) *Novelty greedy*: 高い新奇性だけを好む。

(H) *Familiarity greedy*: 高い親近性だけを好む。

選好曲線 (C) は、適度な強さの刺激が高い快適度を生み出すことを示した Wundt 曲線 [24] を表していると考えられる。これは人間の本質的な特性と考えられている [25]。この選好曲線を持つエージェントは、次に観測される身体運動が全く予測できないような、あるいは完全に予測できるような身体運動指令を好まない。すなわち適度な新奇性を生み出す身体運動指令を好む。この選好曲線は新奇性（親近性の逆）と選好度との逆 U 字の関係を示している。Wundt 曲線に関連して、これまでに多くの研究において、人間の持つ特性として刺激の新奇性や曖昧性と、その刺激の快楽度や好みとの間の逆 U 字関係が議論されている [26] [27]。また、心理学実験によって実際に逆 U 字の関係が現れることも示されている [28] [29]。本シミュレーションでは、養育者は人間にとって典型的な選好性である選好曲線 (C)（以下では「選好性 (C)」などと記す）を持つと仮定し、乳児の選好曲線を 8 通りに変化させて発達過程の違いを調べた。

エージェントの身体運動パターンは  $N_a = 30$  とした。身体マッピングの結合重みの値は  $[0, 1]$  の範囲とし、乳児の結合重みの初期値は  $[0, 0.1]$  の範囲の乱数を与えた。養育者の身体マッピングは Fig.4 に示すように、正しい結合重みが 1.0、それ以外の重みが 0.0 で、その値は変化しない。エージェントが身体運動を観測した時、視覚表象層のそれらに対応するノードの値は 1.0、それ以外は 0.0 とした。同様に、身体運動指令が運動表象層にコピーされた時、それらに対応するノードの値は 1.0、それ以外

は 0.0 とした。エージェントが予測する時、身体運動指令から身体マッピングの逆写像で計算された視覚表象層のノードの中で、閾値 (0.1) 以上の値を持つノードが表す身体運動を予測したとする。エージェントは、ある身体運動が観測されると予測したが実際にはそれが観測されなかった場合に予測が外れたと判断すると仮定し、観測されると予測した身体運動の数に対して予測が外れた身体運動の数の割合を予測誤差  $E_s, E_o$  とした。平均予測誤差  $\bar{E}_s, \bar{E}_o$  は、直近の過去 20 時刻分の予測誤差の平均値とした。ヘブ学習におけるパラメータは実験的に、 $\eta = 0.05$ ,  $\eta_p = \eta_m = 0.5$ ,  $p\sigma = m\sigma = N_a^{\frac{1}{4}} \approx 2.34$  と決定した。

### 3.2 シミュレーション結果

選好性 (C) を持つ養育者に対して、乳児の選好曲線を 8 通り変化させたシミュレーション結果を Fig.8 に示す。1 回のシミュレーションは 10000 ステップで終了させた。Fig.8 は各乳児 - 養育者のペアに対して、乳児の身体マッピングの初期値をランダムに変化させて 20 試行した結果の平均値を示している。各列は選好性 (A)–(H) を持つ乳児に対する結果を示している。各行の結果の意味は以下の通りである。

(1) 乳児の身体マッピングの結合誤り率。

このグラフは、乳児の自己 / 他者モデルにおいて、誤った対応づけがなされている身体運動の数の割合を各時刻ごとに示したものである。横軸はシミュレーションの時間ステップであり、 $[0, 10000]$  の範囲を示している（以下のグラフでも同様）。正しい身体マッピングは、Fig.4 中の養育者の身体マッピングのように、観測した自己身体運動と自己対応運動指令が正しく 1 対 1 に対応し、かつ観測した他者

身体運動と他者対応運動指令が正しく 1 対 1 に対応しているものである。ただし、乳児の身体マッピングの結合重みは完全に 1.0 には収束しないため、以下のように正しい対応づけが行われているかどうかを判定した。すなわち、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層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 (0.5) 以上のとき、正しい結合が得られているとした。閾値による判定は、結合の排他性を確認するためである。

(2) 乳児の運動選択割合。

このグラフは、直近の過去 20 ステップにおいて乳児が自己対応運動指令  $M_s$ 、他者対応運動指令  $M_o$ 、ランダム運動指令  $M_r$  を選択した割合を各時刻ごとに示したものである (各割合の総和は常に 1.0 である)。

(3) 養育者の運動選択割合。

養育者に対する (2) の結果を示している。

(4) 乳児の模倣成功率。

このグラフは、直近の過去 20 ステップにおいて乳児が  $M_s$  と  $M_o$  を実行したときの模倣成功率を各時刻ごとに示したものである。

(5) 乳児が獲得した身体マッピング。

このネットワークは、乳児が獲得した身体マッピングにおいて、観測した身体運動と身体運動指令の意味的に正しい対応 (自己対応運動 / 他者対応運動の区別を問わない) の結合が強化されている割合を示したものである。観測した自己身体運動 / 他者身体運動と自己対応運動指令 / 他者対応運動指令の 4 つの組み合わせに対して、各組み合わせの中で意味的に正しい対応の結合重みが強化されている (重み 0.5 以上を持つ) 結合数の割合が 80% 以上である場合に実線で、その割合が 20% 以上 80% 未満である場合に波線で結合の性質を示した (20% 未満の場合は線が示されていない)。いずれの結果においても、意味的に正しくない対応の結合重みはほとんど強化されなかった。

本シミュレーションでは Fig.8 (5) から分かるように、選好性 (C) を持つ乳児のみが自己モデルと他者モデルが分離可能な正常な (養育者と相同な) 身体マッピングを獲得した。模倣成功率のグラフ (Fig.8 (4-C)) では、自己模倣と他者模倣の成功率が 1.0 に収束しており、乳児が正しく模倣できるようになったことが分かる。乳児が (B),(D),(E),(F) のいずれかの選好性を持つ場合、観測した身体運動と身体運動指令の意味的に正しい対応は獲得されているが、この身体マッピングでは観測した自己身体運動と他者身体運動を区別することができない。また、乳児が (A),(G),(H) のいずれかの選好性を持つ場合、観測した自己身体運動は意味的に正しく身体運動指令に対応づけられているが、観測した他者身体運動が身体運動指令に (部分的に) 対応づけられていない。すなわち、これらの乳児は正常な他者モデルを構築していない。

いずれの乳児も 300 ステップ程度でほぼ正しく自己模倣ができるようになることが、Fig.8 (4) のグラフから分かる (ただし結合の排他性が十分でない場合、自己モデルの結合誤り率が 0.0 にならない)。これは、身体運動指令を実行すると同時に、必ず

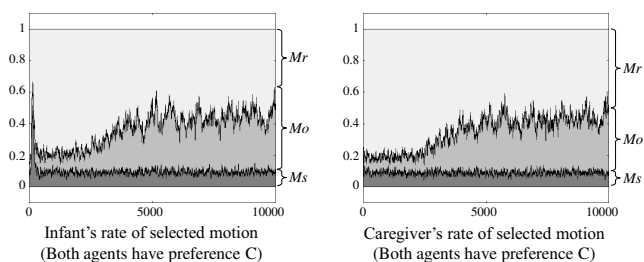


Fig. 9 The rates of selected motion for preferences (C) (same as those in Fig. 8).

対応する自己身体運動が観測されるためである。しかしながら、その後の発達過程は乳児の持つ選好性によって大きく変化する。定型発達が出現する場合

Fig.9 に Fig.8 (2-C) および (3-C) を拡大したグラフを示す。このグラフから、選好性 (C) を持つ乳児は、最初の約 300 ステップまでは頻繁に自己対応運動指令を選択するが、すぐにその選択割合が減少することが分かる。その後、両者の他者対応運動指令の選択割合が増加し、最終的に乳児は他者モデルを獲得する。この結果は、最初に自己模倣が頻繁に現れ、それが抑制された後に養育者との相互模倣が現れることを意味している。ここには自己模倣から他者模倣への遷移が現れており、この結果は乳児の自他分離の定型発達過程を表していると考えられる。

この結果では自己模倣が自己モデル獲得後に抑制されたが、もし自己模倣を頻繁に繰り返せば自己モデルと他者モデルが混同すると予想される。養育者が同一の模倣運動を繰り返した場合にも同様の結果が生じると考えられる。ここで Fig.9 を見ると、両者は相互模倣の頻度が増加し始める 4000 ステップ以降でも 50% 程度の割合でランダム運動を選択していることが分かる。このランダム運動が模倣運動の切り替えの役割を果たすため、両者は頻繁に同一の運動を繰り返すことにはならず、乳児の自己モデルと他者モデルの混同が生じないと考えられる。この現象は次の観測が完全に予測できるような運動指令をエージェントが好まない (高い親近性を好まない) ことに起因しており、この性質が定型発達に必需であることが分かる。また選好性 (C) を持つエージェントは、次の観測が全く予測できないような運動指令も好まない。この性質が定型発達に必需な理由は、他の選好性の結果を調べることにより分かる。

非定型発達 (発達障害) が出現する場合

乳児が (B),(D),(E),(F) のいずれかの選好性を持つ場合、Fig.8 (2) のグラフから乳児のランダム運動の選択割合が低いことが分かる。ランダム運動の選択割合が低いことは、乳児が運動を切り替えずに同一の運動を繰り返し続ける傾向があることを意味している。これに伴い養育者が同一の運動を模倣し続ける状況も増加する。乳児が同一の運動を繰り返すと、正しい対応以外にも、観測した自己身体運動と他者対応運動指令の対応が強化される。さらに養育者がその運動を模倣し続けると、正しい対応以外にも、観測した他者身体運動と自己対応運動指令の対応が強化される。このため、乳児は自己モデルと他者モデルを分離することに失敗する。この現象は、選好曲線が広い範囲にわたって高い選好度を示すことに起因している。

また乳児が (A),(G),(H) のいずれかの選好性を持つ場合、Fig.8 (3) のグラフから養育者が乳児を模倣する割合が低いことが分かる。そのため、乳児は他者モデルの獲得に失敗する。これらの乳児に対して養育者が模倣しなかった理由として以下のことが考えられる。

- 選好性 (A) を持つ乳児はランダム運動を好むため、養育者はその運動を全く予測できず、乳児を模倣しようとしなない。
- 選好性 (H) を持つ乳児は高い親近性を好むため、早くに獲得した自己モデルを使った自己模倣を繰り返すことになる。養育者はその運動を完全に予測できるため、乳児を模倣しようとしなない。
- 選好性 (G) を持つ乳児は高い新奇性を好むため、未熟な他者モデルを使った模倣を繰り返すことになる。養育者はその運動を予測できず、乳児を模倣しようとしなない。

乳児が正常な身体マッピングを獲得するためには、自身の振る舞いによって選好性 (C) を持つ養育者から適切なバランスの模倣運動を誘発する必要がある。そのためには、乳児も適度な予測誤差に選好を示す選好性 (C) を持つ必要があることが分かる。

### 3.3 シミュレーション結果のまとめ

以上の結果から、乳児の定型発達（自己模倣から他者模倣への遷移）の出現には以下の点が必要と考えられる。

- 自己模倣による自己モデルの獲得と、自己モデル獲得後の自己模倣の抑制。
- 自己模倣、他者模倣による養育者の模倣行動の誘発。
- 多様な運動の経験（1つの運動に固執しない）。

そしてこれらが1つでも欠如すると非定型発達が出現する。これらの要件はエージェントの予測性に基づく選好性に依存している。人間の典型的な選好性と考えられている逆U字曲線を持つ選好性は乳児の定型発達を、非典型的な選好性は非定型発達をもたらす。

本シミュレーションでは、発達順序の明示的な操作（学習対象の切り替えなど）なしに、乳児の自己模倣から他者模倣への発達過程を再現することができた。本シミュレーション結果から、予測性に基づく選好性が自他分離を伴う模倣能力の発達を支配する重要な要因の1つであることが示唆される。さらに、身体マッピングの異常が非典型的な選好性に由来することが示唆される。ただし、典型的/非典型的な選好性が発生するメカニズムについてはさらに調査が必要である。

### 3.4 シミュレーションモデルに関する考察

自分自身で観測できない身体運動に関する身体マッピング

本論文のモデルでは、エージェントが自身と他者の身体運動を観測できることを仮定しており、自身で観測できない身体運動（自身の頭の上に手を置くなど）に関する身体マッピングを扱わなかった。乳幼児の発達に関する知見では、自身で観測できない身体運動の模倣の獲得は、自身で観測できる身体運動の模倣より遅れることが報告されている [17]。他者モデルの学習が他者から模倣されることだけを手がかりにして行われるのであれば、自身の運動指令で生成される身体運動が自身で観測できるか否かにかかわらず他者モデルが獲得されるはずであるが、上述の知見はそれを否定していると考えられる。従って上述の発達過程を再現するためには、自身で観測できない身体運動の

マッピングと観測できる身体運動のマッピングの獲得が異なるメカニズムを持つモデルが必要である。本シミュレーション結果は、観測できる身体運動のマッピングの獲得までを示していると考えられる。

### 身体マッピングの学習則

本シミュレーションでは、身体マッピングの学習に対する外部からの報酬がない状況を想定した。乳幼児の発達に関する知見では、生後2ヶ月になると社会的な微笑が始まり、養育者と微笑み合う情動の共有が見られるようになることが知られている [3]。自他が未分化な状態であっても、このような情動の共有が報酬として働いて学習を促進することも考えられる。本シミュレーション結果は、最も学習時間がかかる状況であったと考えられる。学習を加速させるために、養育者と共有する快情動を報酬としたメカニズムを組み入れたモデルの構築が今後の検討課題である。

### 模倣における身体運動の注目点

乳幼児の発達過程では、物体操作を伴う他者動作の結果の模倣（例えば物体をある地点へ動かすという結果を模倣し、そのための手や腕の動かし方などを模倣しない）が、ジェスチャ模倣のような身体運動の形態的な模倣より先に獲得されることが知られている [30]。すなわち、対象の運動への注目点（結果か形態か）が発達に伴って変化することを表しているが、このことは模倣発達を促進する重要な役割を果たしていると考えられる。本シミュレーションでは、乳児は身体運動の形態的要因にだけ注目することを仮定していた。しかしながら、乳児の模倣発達メカニズムをより深く理解するためには、結果指向の模倣が容易に獲得され、それに基づいて動きそのものの模倣が獲得されるメカニズムとその意義をシミュレーションにより明らかにすることが望まれる。

### 選好曲線の発生メカニズム

本シミュレーションでは、予測誤差（すなわち新奇性）に基づく選好性に従った模倣行動選択を考えたが、エージェントが持つ選好曲線が発達過程において変化することはなかった。乳児の選好性を調べた研究では、乳児の選好性は短い時間の間に変化することが調べられている。具体的には、最初は親近なものへ選好を示すが、次第に飽き、新奇なものへと選好を変化させるという性質があることが知られている [31]。本シミュレーションは、短時間（1回の身体運動のやりとりにかかる時間のオーダー）で変化するはずの選好性を、時間平均的な選好性として扱っているのではないかと推測されるが、上記のような選好性のダイナミクスが発達にどのように影響するかを追調査することが望まれる。また上記の知見は、乳児が新奇性への選好と親近性への選好の両方を持っていることを示している。養育者も同様に両方の選好を有していると仮定して、このことから選好曲線の発生メカニズムを推測すると、新奇性への選好と親近性への選好が互いに抑制し合って、中程度の新奇性（親近性）への選好を示す逆U字曲線が発生するというメカニズムが考えられる。この推測を確かめるためのシミュレーションは今後の課題である。



Infant Care-giver	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	(F)	(G)	(H)
(A)	IIa	IIb	IIa	IIb	IIb	IIc	IIc	IIb
(B)	I	IIIe	IIIa	IIIc	IIIe	IIIa	I	IIIb
(C)	IIa	IIIe	I	IIIb	IIIe	IIIh	IIa	IIb
(D)	I	IIIe	IIIb	IIIc	IIIe	IIIb	I	IIIg
(E)	I	IIIe	IIIa	IIIc	IIIe	IIIa	I	IIIg
(F)	I	IIIe	IIIb	IIIc	IIIc	IIIa	I	IIIb
(G)	I	IIIe	I	IIIb	IIIb	IIIb	I	IIIf
(H)	I	IIIe	IIIb	IIIb	IIIe	IIIb	IIIg	IIb

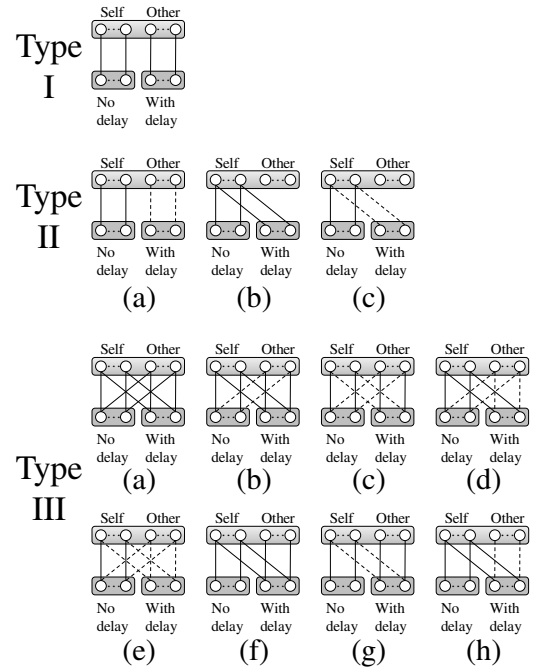


Fig. 10 Results from all possible combinations of preference curves.

#### 4. 養育者の選好性の影響

典型的な選好性を持つ養育者と乳児のシミュレーションに加えて、本論文では非典型的な選好性を持つ乳児に対して養育者も非典型的な選好性を有することによって、その乳児を定型発達に導くことができるかどうかを調べた。既存研究においても、どのような養育者の振る舞いが乳幼児の発達に影響し、乳幼児の能力発達に貢献するかということ計算機シミュレーションにより調べるといった試みがなされている [18] [32]。このような試みによって、実際の乳幼児の発達支援に有益な示唆を与えることが望まれる。

ここでは養育者が (C) 以外の選好性を持つように振る舞った場合に、乳児の発達がどのような影響を受けるか調べた。養育者の選好性と乳児の選好性の全ての組み合わせにおいてシミュレーションを行った結果を Fig.10 に示す。図中のネットワークの表示の意味は Fig.8 (5) と同じである。ここでは、乳児が獲得した身体マッピングを以下の 3 つのタイプに分けて示した。

- (I) *Self and Other*: 正常な身体マッピング。
- (II) *Self Only*: 観測した自己身体運動と身体運動指令の結合は獲得されているが、観測した他者身体運動と身体運動指令の結合が弱い、あるいは欠落している身体マッピング。養育者の模倣運動が誘発されなかった場合にこのようなマッピングが獲得される。
- (III) *Confusion*: 自他モデルが混同した身体マッピング。乳児が同一の運動を頻繁に繰り返す場合にこのようなマッピングが獲得される。

選好性 (A) を持つ乳児は、ほとんどの養育者に対して正常な身体マッピングを獲得することができた。この乳児はランダム運動を頻繁に選択し、ほとんど模倣を試みないにもかかわらず、

正常な身体マッピングを獲得した。これらの発達過程を調べると、選好性 (H) 以外の養育者は予測できない乳児のランダム運動を選択してそれを頻繁に模倣している、すなわち乳児が模倣しなくても養育者が模倣していることが分かった (選好性 (H) を持つ養育者は乳児と同様にランダム運動を頻繁に選択するが、乳児は低頻度の模倣を手がかりにゆっくりではあるが身体マッピングを獲得している)。ただし、自己模倣から他者模倣への遷移過程は観察されなかった。この結果は、乳児の振る舞いに関係なく養育者が乳児の種々の運動を頻繁に模倣すれば、乳児は構築中のマッピングを使う運動 (活用的振る舞い (exploitation)) をすることなく正常な身体マッピングを獲得できることを意味している。しかし、養育者が乳児の非相互作用運動を常に模倣し続けることは現実的ではないと考えられる。

また、選好性 (G) を持つ乳児も非典型的な選好性を持つ養育者との相互作用を通して正常な身体マッピングを獲得した。ただし、選好性 (C) を持つ養育者との相互作用では正常な身体マッピングを獲得できなかった。また、いずれにおいても自己模倣から他者模倣への遷移過程は観察されなかった。この結果は、新奇性のみを好む選好性を持つ乳児は、典型的な選好性を持つ養育者から適切な模倣運動を誘発できないが、非典型的な選好性を持つ養育者から誘発できることを意味している。乳児が (G) の選好性を持つ場合、養育者は選好性 (B),(D),(E),(F),(G) を持つように振る舞うことで、乳児を定型発達に導くことが示唆される。

この結果では、8 通りの養育者の中で、養育者が選好性 (C) を持つ場合にのみ、全てのパターンの発達過程が出現していることが分かる (Fig.10 の養育者 (C) の行)。このことは、逆 U 字の形状を持つ選好曲線が複雑な相互作用ダイナミクスを生み出すことを意味している。そしてすべての組み合わせの発達過程

を調べると、両者が選好性 (C) を持つ場合にのみ、乳児の自己模倣から両者の相互模倣への遷移が観察されることが分かった。典型的な選好性だけが実際の定型発達に見られる現象を再現するというこの結果は、本シミュレーション結果の説明能力をより向上させるものと考えられる。

## 5. お わ り に

本論文では、身体運動の模倣に必要な身体マッピングのモデルを構築し、模倣相互作用を実現するために予測性に基づく選好性を用いた行動選択メカニズムを提案した。そしてシミュレーションから、乳児と養育者が人間にとって典型的な選好性を持つ場合に乳児の定型発達過程が出現し、乳児が非典型的な選好性を持つ場合に正常でない身体マッピングが獲得されるという結果を得た。本シミュレーションでは既存研究と異なり、発達順序の明示的な操作（学習対象の切り替えなど）やエージェントのタスクなしに、自己模倣から他者との相互模倣へと遷移する乳児の発達過程を再現することができた。すなわち、提案メカニズムが模倣発達過程における質的变化の発生を内包したメカニズムであることを示せた。ただし、構築したモデルは脳の解剖学的知見に基づくものではない。この点について本論文では、人間の生体システムが、身体運動指令に対応する身体運動の観測遅れの違いを利用したり、観測から想起された模倣運動を抑制あるいは選択することに相当するを行っていると考えている。そして人間の生体システムは、本モデルに相当する構造を何らかの表現型で備えていると考えている。得られた結果は単純化したモデルが前提のものであり、結果の解釈もなお思惑的ではあるが、本シミュレーション結果から、予測性に基づく選好性が自他分離を伴う模倣能力の発達を支配する重要な要因の1つであること、そして身体マッピングの構造異常が非典型的な選好性に由来することが示唆された。本研究では、予測性を評価する構造が他者理解能力の発達メカニズムに本質的に関わっていると考えている。

今後の課題として、3.4 説でいくつか挙げたが、本シミュレーションの妥当性を明確にするために、提案したモデルや得られた結果と発達心理学的知見との整合性をより明確にすることが必要である。その1つの手段として、本シミュレーションを用いて乳児の非定型発達過程を定型発達過程に導くための方法を予想することが考えられる。提案した手法により、実際に定型発達に導くことができれば、本シミュレーションの妥当性を向上させると共に、発達障碍の支援活動に有益な情報をもたらすことができる。また、本モデル構築の際に導入した前提条件（特に運動の分節化の能力）について、それらの前提を撤廃したメカニズムを探究することが必要である。本論文では視覚と運動指令のマッピングにおける自他分離問題を考えたが、他の知覚様相においても自他区別の問題が存在している。特に触覚については、乳児は自身の身体に自分で触れたときの知覚と他者が触れたときの知覚を新生児期から区別していると考えられている [33]。このような触覚における自他分離が、身体マッピングの獲得の基礎になっていると考えられる。本研究においても、他の知覚様相と統合したモデルを構築することが望まれる。また、予測性に基づく選好性がどのようなメカニズムで発生するかを

明らかにすることも今後重要である。

## 参 考 文 献

- [1] Vittorio Gallese and Alvin Goldman. Mirror neurons and the simulation theory of mind-reading. *Trends in Cognitive Sciences*, Vol. 2, No. 12, pp. 493–501, 1998.
- [2] Jean Piaget. *The origins of intelligence in children*. International Universities Press, Inc., New York, 1952.
- [3] 大藪泰. 赤ちゃんの模倣行動の発達—形態から意図の模倣へ—. *バイオメカニズム学会誌*, Vol. 29, No. 1, pp. 3–8, 2005.
- [4] Susan S. Jones. Imitation in infancy – the development of mimicry. *Psychological Science*, Vol. 18, No. 7, pp. 593–599, 2007.
- [5] Ulric Neisser. Five kinds of self-knowledge. *Philosophical psychology*, Vol. 1, No. 1, pp. 35–29, 1988.
- [6] Philippe Rochat. Early development of the ecological self. In C. Dent-Read and P. Zukow-Goldring, editors, *Evolving explanations of development. Ecological approaches to organism-environment systems*, chapter 4, pp. 91–121. American Psychological Association, Washington, D.C, 1997.
- [7] 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.
- [8] 村田哲. 模倣の神経回路と自他の区別. *バイオメカニズム学会誌*, Vol. 29, No. 1, pp. 14–19, 2005.
- [9] Andrew N. Meltzoff and M. Keith Moore. Explaining facial imitation: A theoretical model. *Early Development and Parenting*, Vol. 6, No. 3–4, pp. 179–192, 1997.
- [10] Jean-Francois Lepage and Hugo Theoret. The mirror neuron system: grasping other's actions from birth? *Developmental Science*, Vol. 10, No. 5, pp. 513–523, 2007.
- [11] 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.
- [12] Erhan Oztop and Michael A. Arbib. Schema design and implementation of the grasp-related mirror neuron system. *Biological Cybernetics*, Vol. 87, No. 2, pp. 116–140, 2002.
- [13] S. J. Pawlby. Imitative interaction. In H. R. Schaffer, editor, *Studies in mother-infant interaction*, pp. 203–224. Academic Press, New York, 1977.
- [14] G. Moran, A. Krupka, A. Tutton, and D. Symons. Patterns of maternal and infant imitation during play. *Infant Behavior and Development*, pp. 477–491, 1987.
- [15] G. Kugiumutzakis. Intersubjective vocal imitation in early mother-infant interaction. In J. Nadel and L. Camaioni, editors, *New perspectives in early communicative development*, pp. 23–47. Routledge, London, 1993.
- [16] Theano Kokkinaki and Giannis 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.
- [17] Susan S. Jones. Infants learn to imitate by being imitated. In *Proceedings of the Fifth International Conference on Development and Learning*, 2006.
- [18] Hisashi Ishihara, Yuichiro Yoshikawa, and Minoru Asada. Caregiver's auto-mirroring and infant's articulatory development enable vowel sharing. In *Proceedings of the 9th International Conference on Epigenetic Robotics*, 2009.
- [19] Ryunosuke Yokoya, Tetsuya Ogata, Jun Tani, Kazunori Komatani, and Hiroshi 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.
- [20] 山本淳一, 楠本千枝子. 自閉症スペクトラム障害の発達と支援. *認知科学*, Vol. 14, No. 4, pp. 621–639, 2007.

- [21] John S. Watson. Smiling, cooing, and "the game". *Merrill-Palmer Quarterly*, Vol. 18, No. 4, pp. 323-339, 1972.
- [22] Tricia Striano, Anne Henning, and Daniel Stahl. Sensitivity to social contingencies between 1 and 3 months of age. *Developmental Science*, Vol. 8, No. 6, pp. 509-518, 2005.
- [23] Yuichiro Yoshikawa, Koh Hosoda, and Minoru Asada. Unique association between self-occlusion and double touching towards binding vision and touch. *Neurocomputing*, Vol. 70, No. 13-15, pp. 2234-2244, 2007.
- [24] Wilhelm M. Wundt. *Grundzüge der physiologischen Psychologie (Translation: Principles of physiological psychology)*. Wilhelm Engelmann, Leipzig, 1874.
- [25] Tibor Scitovsky. *The Joyless Economy: The Psychology of Human Satisfaction*. Oxford University Press, New York, 1992.
- [26] D. E. Berlyne. *Conflict, Arousal, and Curiosity*. McGraw-Hill, New York, 1960.
- [27] John P. Garske Hal R. Arkes. *Psychological theories of motivation*. Brooks/Cole, Monterey, California, 1982.
- [28] Wladyslaw Sluckin, Andrew M. Colman, and David 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.
- [29] K. H. Teigen. Intrinsic interest and the novelty-familiarity interaction. *Scandinavian Journal of Psychology*, Vol. 28, No. 3, pp. 199-210, 1987.
- [30] Ioana Goga and Aude Billard. Development of goal-directed imitation, object manipulation and language in humans and robots. In Michael A. Arbib, editor, *Action to Language via the Mirror Neuron System*, pp. 424-468. Cambridge University Press, Cambridge, Massachusetts, 2006.
- [31] Carmel Houston-Price and Satsuki Nakai. Distinguishing novelty and familiarity effects in infant preference procedures. *Infant and Child Development*, Vol. 13, No. 4, pp. 341-348, 2004.
- [32] Jochen Triesch, Christof Teuscher, Gedeon O. Deak, and Eric Carlson. Gaze following: why (not) learn it? *Developmental Science*, Vol. 9, No. 2, pp. 125-157, 2006.
- [33] Philippe Rochat and Rachel Morgan. Spatial determinants in the perception of self-produced leg movements in three- to five-month-old infants. *Developmental Psychology*, Vol. 31, No. 4, pp. 626-636, 1995.

sis on embodiment, physical simulation and morphogenesis.

吉川雄一郎 (Yuichiro YOSHIKAWA)

2005 年大阪大学大学院工学研究科知能・機能創成工学専攻修了。同年 ATR 知能ロボティクス研究所研究員。2006 年より JST ERATO 浅田共創知能システムプロジェクト研究員となり現在に至る。博士 (工学)。認知発達ロボティクスの研究に従事。  
(日本ロボット学会正会員)

石黒浩 (Hiroshi ISHIGURO)

1991 年大阪大学大学院基礎工学研究科物理系専攻修了。同年山梨大学工学部情報工学科助手, 1992 年大阪大学基礎工学部システム工学科助手。1994 年京都大学大学院工学研究科情報工学専攻助教授。この間, 1998 年より 1 年間カリフォルニア大学サンディエゴ校客員研究員。2000 年和歌山大学システム工学部情報通信システム学科助教授。2001 年より同大学教授。2002 年 10 月より大阪大学大学院工学研究科知能・機能創成工学専攻教授。1999 年より, ATR 知能映像研究所客員研究員。現在, 大阪大学大学院基礎工学研究科システム創成専攻教授。ATR 知能ロボティクス研究所コミュニケーションロボット研究室客員室長。工学博士。知能ロボット, アンドロイドロボット, センサネットワークの研究に興味を持つ。人工知能学会, 電子情報通信学会, IEEE, AAAI 各会員。  
(日本ロボット学会正会員)

港隆史 (Takashi MINATO)

2001 年 11 月大阪大学大学院工学研究科知能・機能創成工学専攻博士後期課程単位修得退学。同年 12 月科学技術振興事業団研究員。2002 年 9 月大阪大学大学院工学研究科知能・機能創成工学専攻助手。2006 年 6 月より JST ERATO 浅田共創知能システムプロジェクト研究員となり現在に至る。

博士 (工学)。人とロボットのコミュニケーションに関する研究に従事。  
(日本ロボット学会正会員)

トーマス デール (Dale THOMAS)

received a BSc in Cybernetics and Control Engineering from Reading University, UK, in 2000. From then until 2003 he worked as a researcher in Zürich, Switzerland, and in 2004 he received an MSc in Evolutionary and Adaptive Systems from Sussex University, UK.

After that he spent several years as a programmer in the computer games industry in Japan, before moving to Osaka University, in 2008, to work as a researcher for the Asada Project, ERATO, Japan Science and Technology Agency. His main research interests include: computer graphics, artificial intelligence and artificial life, with particular empha-