

## 乳幼児の視線：交互凝視行動の計算論的研究

金野 武司, 橋本 敬

It has been pointed out that gaze alternation by infants, which is the behavior of alternately gazing at a caregiver and at particular objects, is related to the process of the development of intentional agency. Intentional agency is defined as acting with a desired goal and means. In this paper, we adopt a theoretical hypothesis that the infants understand others' intentions based on intentional agency, and we consider how to construct a computational model of intentional agency. We designed a model of an infant agent which acquires gaze alternation through interaction with caregivers based on a reflex behavior and an emotional behavior. First, the agent learns the visual orientation of gazing at a target in the center of the visual field as the reflex behavior. Based on the visual orientation, the agent learns to gaze in the same direction as the caregiver's focus. The learning is implemented with an association module which is serially connected with the visual orientation module. In the model, the agent associates the caregiver's focus with an object, and orients the agent's eye to gaze at the object. This behavior uses visual orientation as a means to attain the agent's goal of gazing at the same object. The internal states composed of goals and means are considered to be intentional agency. Second, we add two emotional states, ease and anxiety, to relate an emotional behavior to the serial architecture acquiring intentional agency. The agent looks back at the caregiver when the agent comes to the anxiety state. The emotional behavior provides opportunities of interaction with caregivers to the infant agent. Finally, we discuss how intentional agency functions as a basis of understanding others' intentions. Through this discussion, we propose that a nested structure of intentional agency between self and other is a primitive mechanism of understanding others' intentions and shared intentionality.

Keywords: gaze alternation (交互凝視), intentional agency (意図的主体性), understanding others' intentions (他者の意図理解), shared intentionality (意図性の共有), constructive approach (構成論的アプローチ)

### 1. はじめに

ヒトが他者の意図を理解する能力は、社会的なコミュニケーションの形成に欠かせない。しかし、ヒト自身が他者の意図を理解していることを当たり前知っていても、実際にどのような内部状態によ

て他者の意図を理解しているのかを説明することは難しい。本論では、ヒトが他者の意図をどのように理解しているのかを明らかにする鍵として、乳幼児の発達過程に注目する。その中でも、視線によるコミュニケーション行動の1つである交互凝視 (gaze alternation) を取り上げ、乳幼児が他者の意図を理解するようになる過程を考える。

交互凝視は、親とおもちゃ (オブジェクト) の間を視線が行き来するという単純な行動として観察されるが、他者の意図を理解することによって社会的

Communicative eye gaze : computational study of infant's gaze alternation, by Takeshi KONNO and Takashi HASHIMOTO (School of Knowledge Science, Japan Advanced Institute of Science and Technology).

なコミュニケーション行動へと発展することが指摘されている(Tomasello, 1995)<sup>1)</sup>。交互凝視は、その行動的側面において、親の視線を受けてオブジェクトを見る共同注視(joint visual attention)と、オブジェクトを見た後に親を見る参照視(referential looking)の2つの側面を持っている。他者の意図を理解することで、これらの行動は共同注意(joint attention)や社会的参照(social referencing)といった行動に発展する。共同注視は親の見た方向に反射的に自分の視線を向ける行動から、親の見ようとするものを理解して特定のオブジェクトに視線を向ける行動へと発展する。参照視はオブジェクトを見て反射的に親を見る行動から、自分の見たオブジェクトに対する親の意図を参照しようとする行動へと発展する。また、この交互凝視は、親と体験を共有しようとするような情動的な行動としての側面を持つ(Tomasello, 1995; 岡本, 1982)。参照視においても、不安を感じて親を見る行動であるという指摘がある(小沢, 2005)。これらのことから、乳幼児は情動的な行動によって親とのコミュニケーションを繰り返す、その過程で他者の意図を理解していくのではないかと考えられる。

親とのコミュニケーションの中で乳幼児が他者の意図を理解するようになる仕組みに関して、Tomasello (2000)は、まず自らが意図的に振る舞うような状態を実現する意図的主体性(intentional agency)を形成し、これを鋳型にするのではないかと指摘している。この意図的主体性は、乳幼児が目的と手段を区別することで実現されると考えられている(Anscombe, 1957; Frye, 1991)<sup>2)</sup>。すなわち乳幼児は、達成しようとする目的に対して適切な行動(手段)を結び付けることによって、意図的な振る舞いを実現すると考えられる。ここで、その目的と手段は単独で機能するものではない。重要なのは、ある行動が目的と手段を内包した状態にあり、両者が適切な結合状態を持つことであると考えられる。そしてこの意図的主体性を鋳型にして他者の意図を

理解するということは、自分の中にある目的と手段が、他者の中にもあることに気付くことであると推測される。この仮説はもっともらしいと考えられるが、これを支持するには、意図的主体性が具体的にどのように形成され、機能するのかを明らかにする必要がある。

ところが、意図的主体性の形成過程を行動観察によって判断するのは容易なことではない。なぜなら、乳幼児の初期発達段階で観察される行動は、目的を持つことを仮定せずとも説明できてしまうことが多いからである。Piaget (1952)は、6ヶ月児がおもちゃに手を伸ばす最中におもちゃに掛けられる布を取り払えることを見出し、これを意図性の始まりであると指摘する。しかし、8,16,24ヶ月児を対象にしたFrye (1991)の実験では、8ヶ月児には手段と区別された目的があることは確認できず、16ヶ月児において、手段と区別された目的の存在が示唆される行動が観察されるようになり、24ヶ月児に至って、明確な目的と手段の区別が確認できると結論付けられている。行動観察において、6ヶ月児程度から目的のようなものを仮定することができそうではあっても、明確にいつから、そしてどのように目的が形成され始めるのかを言うことは難しい。

また、行動観察からヒトの内面を調査する手法として、fMRIやMEG、あるいはNIRSといった装置<sup>3)</sup>による脳活動の計測が注目されている(Pater-son, Heim, Friedman, Choudhury, & Benasich, 2006)。こういった手法は、2つの異なる行動に対して、同じ脳部位が活動するのか、それとも異なる脳部位が活動するのかを調べることによって、それぞれの行動とその機能の脳における局在性を明らかにすることができる(Saxe, Carey, & Kanwisher, 2004)。しかし、それぞれの部位がどのような機能を担うのかが明らかになっても、どのようなアーキテクチャやメカニズムによってその機能が実現されているのかを明らかにすることは難しい。

他方で、対象とする行動を直接調べることとは別に、人工物によってシステムを構築し、これを動かして、対象とする行動との類似性を比較する構成論的アプローチと呼ばれる手法がある(橋本, 2002)。Trieschら(Triesch, Teuscher, Deak, & Carlson, 2006)

1) 乳幼児は、視線以外にもジェスチャや音声によってコミュニケーションを行なう。その中で、本論が視線のコミュニケーションに注目するのは、視線を用いた行動が1歳前後という早い時期に反射的な行動から意図的な行動に発達することが知られているためである。本論は、視線だけが意図を介したコミュニケーションを担うと考えるものではない。

2) ただしこれは、乳幼児が目的と手段の区別を概念的に理解していることを意味するものではない。

3) fMRIはfunctional Magnetic Resonance Imaging (機能的磁気共鳴画像法装置)、MEGはMagnetoencephalography (脳磁界計測装置)、NIRSはNear InfraRed Spectroscopy (近赤外分光法装置)の略称。

は、視線によって互いの意図を共有するメカニズムの解明を目指し、共同注視の計算モデルをコンピュータシミュレーションを用いて研究している。また、長井ら(Nagai, Hosoda, Morita, & Asada, 2003)は、浅田らが提唱する認知発達ロボティクス(Asada, MacDorman, Ishiguro, & Kuniyoshi, 2001)に基づき、共同注視の獲得モデルを構築し、これをロボットに実装する研究を行なっている。しかし、これらの計算モデルは、Butterworthら(Butterworth & Jarrett, 1991)が提示する空間認知能力の発達過程<sup>4)</sup>に注目しており、内部に意図性が形成されることを前提とするようなモデル化は行なわれていない。どちらの計算モデルも、感覚-運動間を直接結び付けた学習システムによって構成されているため、注視対象を決める仕組みは、ヒトが他者の意図を推論する方法とは基本的に異なると考えられる(これにより発生する問題点を2.2.2節で述べる)。

コンピュータシミュレーションやロボットに計算モデルを実装することの利点の1つは、内部状態をメカニズムの観点から捉えることができる点にある。本論はこの利点に着目し、意図的主体性を内部状態として形成することを前提とした計算モデルを構築する。この計算モデルは、反射的な行動や情動的な行動を基盤にしながらかのコミュニケーションを繰り返す、その過程で意図的主体性を形成し、結果として交互凝視行動を表出する。この計算モデルの構築によって、意図的主体性を実現するアーキテクチャやメカニズムのモデル(仮説)を提示することが本論の目的である。

本論の構成は以下のとおりである。まず2章において意図的主体性が形成される過程として、親の視線がシグナルとして機能するようになる共同注視の計算モデルを構築する。また、同じアルゴリズムによって参照視の行動的側面が実現できることを示す。3章において情動が不安になることよって引き起こされる参照視の計算モデルを構築し、親とのコミュニケーション機会を得る情動的参照視が、意図的主体性を形成する計算モデルにどのように組み入れる

4) 共同注視は、親の視線の向く方向に自分の視線を向ける行動と定義される。Butterworthらは、6～18ヶ月の間に、この共同注視の能力が空間的な認知能力として、生態学的、幾何学的、空間表象的な段階を経ることを見出し出している。6～9ヶ月の生態学的な段階では、視野内の興味深い対象へ視点を向け、12ヶ月程度での幾何学的な段階では、視野内で親の見るものへ視点を向ける。そして18ヶ月程度で空間表象的な段階に至ると、自分の後方にあるものに視点を向けることができるようになる。

ことができるのかを検討する。4章において、意図的主体性を形成する計算モデルに基づいて、他者の意図を理解するようになるまでの発達過程がどのように捉えられるかを議論する。最後に、5章で本論の結論を述べる。

## 2. 意図的主体性の形成と共同注視

Corkumら(Corkum & Moore, 1995)は、親の視線に反応して親が見る方向に視線を向ける行動(共同注視)を条件付け学習によって獲得させることができることを指摘している。6～7ヶ月児はこの学習ができず、8～9ヶ月児でこの学習ができ、10～11ヶ月児になると、既に親の見る方向を自発的に見るようになっているので学習する必要がないことを、心理実験から明らかにしている。この実験から、乳幼児が共同注視を獲得する過程には、8～9ヶ月児に見られるような、条件付け的な学習が寄与する可能性が示唆されている。

本論で構築する計算モデルの乳幼児エージェント(以下、子エージェント)には、最初に共同注視を獲得するための足掛かりとなる行動として、視覚定位の能力を用意する。視覚定位は、視界の端に映る親やオブジェクトを視界の中央で捉える行動である。こういった周辺視に対する感受性は、Atkinsonら(Atkinson, Hood, Wattam-Bell, & Braddick, 1992)によって、出生後3ヶ月程度までに発達することが確かめられている<sup>5)</sup>。この視覚定位によって得る感覚情報を一定の規則に従って頻度分布に蓄積する形で共同注視の学習過程を構成する。

以下、子エージェントが置かれる環境状態と受け取る感覚情報を2.1節で説明し、子エージェントの学習モデルと学習過程をそれぞれ2.2, 2.3節に示す。

### 2.1 環境設定と子エージェントの取得情報

乳幼児が置かれる環境の座標系には、親と子のコミュニケーション場面全体を見渡す俯瞰座標と、子が見ている視界による主観座標の2つが考えられる。本研究では乳幼児の内部状態に焦点を当てるので主観座標だけを用いる。子エージェントは1[m]四方の

5) 視界の周辺刺激に対して反射的に反応する眼球運動は視運動性眼振と呼ばれる。乳幼児は3ヶ月程度までに、皮質下で行なう眼球運動から、皮質による制御組織を成長させることで、周辺刺激への感受性と選択性を向上させると言われている。6ヶ月程度からの発達過程を想定する本論では、皮質において制御される眼球および頭部の反射的な運動を想定することになる。

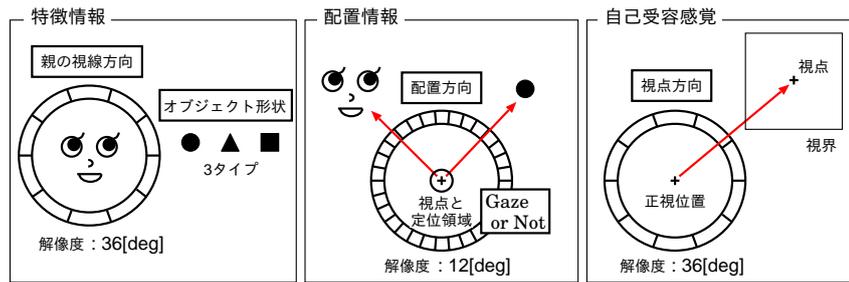


図1 子エージェントの感覚情報

視界を持ち、親やオブジェクトは、その視界に投影される。視界に投影される対象に興行きの情報は含まれず、また、子エージェントも興行に関する情報を再構成しないとす。視界の移動は頭部運動を想定し、視界は上下左右にのみ移動する。

子エージェントは、この視界から特徴情報と配置情報を受け取り、同時に自己受容感覚の情報を受け取る(図1)。特徴情報は、親の視線方向やオブジェクトの形状といった特徴を表わす情報で、配置情報は、その親やオブジェクトが視界内のどこに見えているかを表わす情報である。自己受容感覚は、正視位置からの視点方向により、自分が向いている方向を表わす情報である。これは、乳幼児が眼球や首の動きに応じて自分の筋肉の状態を知ることができることを想定した情報である。

## 2.2 子エージェントの学習モデル

### 2.2.1 視覚定位の学習モデル

交互凝視を条件付け学習によって獲得するとき、足掛かりとなる行動として用意するのが視覚定位である。本論のモデルでは、この視覚定位を強化学習によって実現する。強化学習は、受け取る感覚情報に対する行動(視点の移動)に価値を割り当てて、ある行動を起こしたときに得られる報酬によってその行動の価値を形成する学習の枠組みである。

長井ら(Nagai et al., 2003)は、この視覚定位を位置情報に基づくフィードバックゲイン制御によって実現する。感覚-運動間の入出力情報が予め決まっている場合には、位置情報に対するゲイン制御器として設計することができる。しかし、どのような入出力情報が意図的主体性の形成に寄与するのかは良く分からない状態にある。計算モデルの設計において、設計者が入出力情報(特に、受け取る感覚情報)を試行錯誤する場合には、強化学習によるモデ

ル化が適している。

視覚定位の機能を獲得する計算モデルを、選択器、評価器、学習器により構成し(図2)、強化学習の枠組みを実装する。以下に、各モジュールの計算モデルを示す。

選択器: 選択器は視点から一番遠い対象(親やオブジェクト)を選択し、その特徴情報(親の視線方向、オブジェクトの形状)と配置情報(視点からの配置方向と距離)を抽出する。これに自己受容感覚を併せた情報を、感覚情報( $s$ )として学習器に伝える。一度抽出した対象は注視するまで選択し続けるものとする。感覚情報に用意する情報の解像度を表1に示す。また、抽出される配置情報のうち距離情報( $d$ )が評価器に伝えられる。学習器に伝えられる感覚情報には状態識別の役割があり、評価器に伝えられる距離情報には行動を評価する役割がある。それぞれを1つの感覚情報としてまとめることもできるが、視覚定位と共同注視のそれぞれで、学習に必要とされる情報を明確にできるので、学習器に送られる情報と評価器に送られる情報を分けて表現する。

感覚情報は自分が置かれた状態を識別する役割を持つ。具体的には、特徴情報(10分割の親の視線方向と3種類のオブジェクト形状)、配置情報(30分割の配置方向と注視したか否かの距離情報)、自己受容感覚(10分割の視点方向)によってベクトルを構成し、それぞれの状態に一意に決まる番

表1 感覚情報の解像度

情報	内容	解像度
特徴情報	親の視線方向	36[deg]
	オブジェクト形状	3 types
配置情報	配置方向	12[deg]
	注視したか否か	{0,1}
自己受容感覚	視点方向	36[deg]

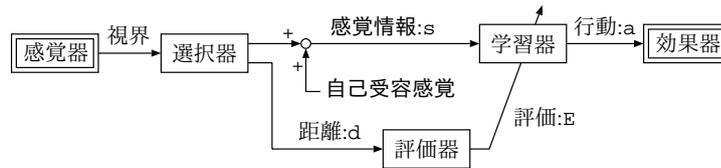


図2 視覚定位のシステムブロック図

号を割り当てる．よって，割り当てる番号の総数は，視界に何も映っていない状態を1つ足して，7801 ( $= (10 + 3) \times 30 \times 2 \times 10 + 1$ ) 状態になる．この識別状態に行動を結び付けて，意味を持たせるのが評価器と学習器の役割である．距離情報の解像度は5[mm]とする．

評価器：評価器は，視点と対象との距離が視界の移動によって縮まったかどうかを評価する．選択器から送られてくる距離 ( $d$ ) の変化を評価し，距離が縮まっていれば正の評価 (+1)，縮まっていなければ負の評価 (-1) を学習器に伝える．

$$E_t = \begin{cases} 1 & \text{if } d_t \leq d_{t-1}, \\ -1 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (1)$$

ここで， $t$ は離散時間である．

学習器：学習器は，親やオブジェクトを見たときの感覚情報 ( $s$ ) に対する視点の移動方向 ( $a$ ) に行動価値 ( $Q(s, a)$ ) を割り当てて，この行動価値を評価 ( $E_t$ ) に従って更新する．

ある時刻  $t$  での感覚情報 ( $s_t$ ) が学習器に伝えられるとき，学習器は，その感覚情報 ( $s_t$ ) に割り当てられた行動価値 ( $Q(s_t, a_t)$ ) から，視点の移動方向 ( $a_t$ ) を次式に従って確率的に選択する．

$$p(a_t | s_t) = \frac{e^{Q(s_t, a_t)/\tau}}{\sum_{a'=1}^{N_a} e^{Q_t(s_t, a')/\tau}}. \quad (2)$$

ここで， $\tau$ は温度係数， $N_a$ は視点移動方向の極座標での分割数である ( $N_a = 30$ )．選択された移動方向に従って，一時刻のうちに視点を5[mm]移動させる．

行動価値の更新には，リファレント報酬付きテーブル型Sarsa方式<sup>6)</sup>として知られる強化学習アルゴリズム(Sutton & Barto, 1998)を用いる．Sarsa方

式における行動価値の更新は次式に従う．

$$Q_{t+1}(s_t, a_t) = Q_t(s_t, a_t) + \alpha_Q \{r_t + \gamma Q_t(s_t, a_{t+1}) - Q_t(s_t, a_t)\}. \quad (3)$$

ここで  $\alpha_Q$  は学習率， $\gamma$  は割引率である ( $\alpha_Q = 0.1$ ， $\gamma = 1$ )． $r_t$  は評価器による評価 ( $E_t$ ) から次式で算出される．

$$r_t = E_t - \tilde{r}_t, \quad (4)$$

$$\tilde{r}_{t+1} = \tilde{r}_t + \alpha_r (r_t - \tilde{r}_t). \quad (5)$$

ここで， $\tilde{r}_t$  はリファレント報酬， $\alpha_r$  はステップサイズパラメータである ( $\alpha_r = 0.01$ )．

### 2.2.2 共同注視の学習モデル

学習によって獲得する視覚定位を足掛かりに，注視目標 (目的) として機能する内部状態を形成する過程を考える．このとき，感覚器と効果器の間をつなぐシステム回路の構成方法には，目的を形成する回路を視覚定位の回路と並列に用意する方法と，直列に用意する方法の2つがある．

長井ら(Nagai et al., 2003)は並列回路によって共同注視の計算モデルを構築する．しかし，感覚と運動を直接結び付けると，親が注視するオブジェクトの決定は親の視線方向の解像度に依存することになる．親の視線方向に複数のオブジェクトがあるような状況で，識別できる最高の解像度においても違いがない感覚情報を受け取った場合，並列的なシステム構成では親が何に注目しているのかを決めることができない．この問題は，Trieschら(Triesch et al., 2006)のモデルにおいても同様である．Trieschらのモデルでは，視覚定位のような足掛かりとなる行動を用意しないので並列か直列かという議論はできないが，感覚 (親の視線方向) と行動 (視点の移動) を強化学習によって直接結び付けて共同注視を学習するため，同じ問題を抱えることになる．

本論では，この問題を解像度の変更によって解決するのではなく，意図性を推論するような内部状態の形成によって解決することが，社会的コミュニケーションの発達を理解していくことにつながると

6) Sarsa方式は遅延報酬に対応できる．つまり，注視できたときにのみ報酬を得るようにしても，その報酬を得ることに寄与した全ての行動に報酬が還元されるアルゴリズムとなっている．ただし本論では，評価器において適切な報酬を逐次与える．これは，交互凝視の足掛かりとなる行動として，視覚定位の能力を確実に用意するためである．

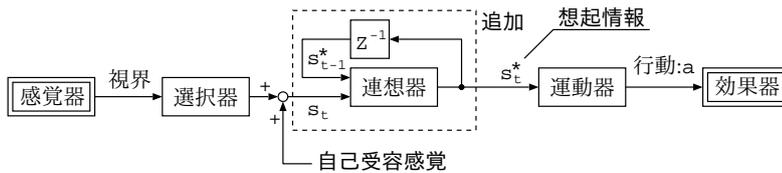


図3 共同注視（交互凝視）のシステムブロック図

考える．そこで共同注視の学習には，視覚定位に基づいて経験を蓄積する直列回路を用意し，視覚定位を手段として使うような内部状態を形成する計算モデルを構築する（図3）．このモデルでは，親の次にオブジェクトを見る体験を蓄積する．親を注視したときには，子エージェントは過去に見たオブジェクトの感覚情報を想起する．この想起情報を視覚定位（運動器）に入力すれば，視覚定位はその想起情報に従って，オブジェクトがあるだろう方向に視点を動かすことができる．このようにして，経験に基づいて想起した情報によって見るものを決め，親の視線の先にあるオブジェクトを見ることができるようになるのが，本論で構築する共同注視モデルの考え方である．以下でこの考え方を具体化する計算モデルを説明する．

抽出される感覚情報（ $s_t$ ）は連想器に入力され，連想器が出力する想起情報（ $s_t^*$ ）は運動器に伝えられる．また，想起情報は $z^{-1}$ によって一時刻前の想起情報（ $s_{t-1}^*$ ）として連想器の入力にフィードバックされる．想起情報が入力される運動器は，視覚定位の学習器と評価器を併せたもので，経験を蓄積する段階では視覚定位の学習は停止する．以下に連想器の計算モデルを示す．

連想器：連想器の出力である想起情報（ $s_t^*$ ）は次式によって決定される．

$$s_t^* = \begin{cases} s_t & \text{if cond.A,} \\ s_{t-1}^* & \text{if cond.B,} \\ s_t^+ & \text{if cond.C.} \end{cases} \quad (6)$$

ここで， $s_{t-1}^*$ は一時刻前の想起情報， $s_t^+$ は頻度分布（ $F$ ）に基づいて次式で確率的に決まる想起情報である．

$$p(s_t^+ | s_t) = \frac{F(s_t, s_t^+)}{\sum_{s'=1}^{N_c} F(s_t, s')}, \quad (7)$$

ここで， $N_c$ は感覚情報の状態総数であり（ $N_c = 7801$ ），関数 $F$ は，感覚情報（ $s_t$ ）が親やオブジェクトの間で変化したときの遷移頻度を蓄積する頻度分布である．ただし，全ての $s'$ に対して頻度が0

表2 想起情報の出力条件

cond.		$C(s_{t-1}^*)$					
		$\phi$	CGV	OBJ			
		$G(s_{t-1}^*)$					
$C(s_t)$	$\phi$						
		C	B	B	B		
	CGV	0	A	A	A	B	A
		1	A	A	C	B	A
OBJ	0	A	B	A	A	A	
	1	A	B	A	A	C	

なら $s_t^+ = s_t$ とする．頻度分布（ $F$ ）は次式で更新する．

$$F'(s_{t-1}, s_t) = F(s_{t-1}, s_t) + 1$$

if  $G(s_{t-1}) = 1,$

$$C(s_{t-1}) \neq C(s_t), C(s_t) \neq \phi \quad (8)$$

ここで， $F'$ は更新後の頻度分布である． $G(s)$ は感覚情報が注視状態か（ $G(s) = 1$ ）否か（ $G(s) = 0$ ）を識別する関数であり， $C(s)$ は，感覚情報が親（CGV）なのかオブジェクト（OBJ）なのか，それとも何も映っていない（ $\phi$ ）のかを識別する関数である．この $C(s)$ が識別するものをカテゴリと呼ぶと（8）式の条件は，感覚情報のカテゴリに変化が起きたときに，その状態間の遷移を頻度として蓄積することを意味する．

式（6）のそれぞれの条件（cond.A,B,C）は表2に従う．cond.Aは，感覚情報（ $s_t$ ）をそのまま想起情報（ $s_t^*$ ）に出力する条件である．表2が全てcond.Aなら，視覚定位とまったく同じシステムになる．cond.Bは一時刻前の想起情報（ $s_{t-1}^*$ ）と感覚情報（ $s_t$ ）が異なるカテゴリ<sup>7)</sup>で，かつ，その一時刻前の想起情報（ $s_{t-1}^*$ ）が注視状態ではない状態である．ただし，感覚情報（ $s_t$ ）が $\phi$ の場合には，一時刻前の想起情報（ $s_{t-1}^*$ ）が $\phi$ である場合を除いて，一時刻前の想起情報と感覚情報（ $s_t$ ）が異なるカテゴリである場合全てがcond.Bに該当する．すなわち，cond.Bは，想起した情報が対象を注視していない状態で，かつ，その想起情報と異なるカテゴリの対

7) ここで，カテゴリとは受け取る感覚情報が親またはオブジェクトのどちらであるかということである．

象が見えている状態である．例えば，注視状態ではないオブジェクトを想起しているとき，視界には親が映っているような状況がこれに相当する．cond.Cは一時刻前の想起情報 ( $s_{t-1}^*$ ) と感覚情報 ( $s_t$ ) が同じカテゴリで，親もしくはオブジェクトを注視している状態である．すなわち，想起した情報と同じカテゴリの対象が見えている状態で，かつ，それを注視している状態である．

### 2.3 子エージェントの学習過程

2.2.1節および2.2.2節で提示したモデルをコンピュータシミュレーションを用いて解析する．

#### 2.3.1 視覚定位の学習

視覚定位の学習モデル (2.2.1節) を用いる実験では，子エージェントが視界の端に表示される親やオブジェクトの注視行動を学習できるかどうかを確かめる．

実験の設定と手順：子エージェントの視界に親とオブジェクトを交互に表示する．親を注視した状態では，親を中心とした半径200[mm]の円周上のランダムな位置にオブジェクトを表示する．子エージェントはこのオブジェクトを注視するように視点を移動することを学習する．オブジェクトを注視した状態では，オブジェクトを中心とした半径200[mm]の円周上のランダムな位置に親を表示する．初期状態として，子エージェントの正視位置に親を表示する．

視点の移動速度は0.5[m/sec]である<sup>8)</sup>．式(2)の温度係数 ( $\tau$ ) は初期値を0.8とし，学習終了時に0.2となるように線形に減少させる．親やオブジェクトを注視できたとき (視界の中心から半径25[mm]の円内に収めることができたとき) を成功，注視できずに5[sec]が経過したときを失敗とする．

実験結果：図4は，親やオブジェクトの注視試行を50000回繰り返したときに得られる学習曲線である．図4は，試行回数が増えるほどに注視するまでに掛かる時間が短くなっている．学習の後半では全ての試行が0.4[sec]に近付いている．これは，200[mm]の距離を0.5[m/sec]で移動する際の最短時間である．この結果は，学習によって子エージェントが視界の端に映る親やオブジェクトを注視できるようになったことを意味している．

8) この速度は，1[m]の視界を端から端まで移動するのに2秒掛かる速度である．

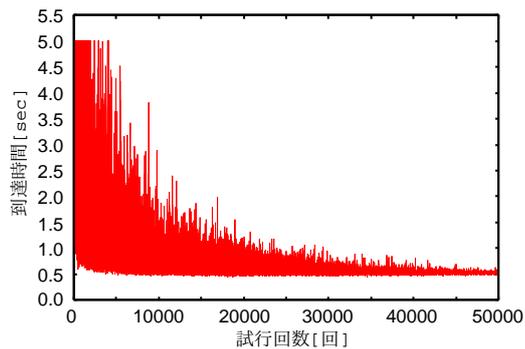


図4 試行毎の視点の移動時間の変化

#### 2.3.2 共同注視の学習

共同注視の学習モデル (2.2.2節のモデル) を用いる実験では，前節で学習した視覚定位によって親やオブジェクトを注視する体験を通じて，親の視線の先にあるオブジェクトを見る共同注視行動を学習できるかどうかを確かめる．

実験の設定と手順：視界の中で親とオブジェクトを交互に表示しながら，親の視線の先にオブジェクトが置かれている状況を体験するフェーズを設け，これをトレーニングフェーズとする．視界の外に配置されるオブジェクトの注視行動を確認するフェーズをトライアルフェーズとする．

トレーニングフェーズでは，自己受容感覚の正視位置に親を配置し，子エージェントの視点を親の位置に置く．親の視線方向 (極座標で10分割された方向のいずれか) をランダムに設定し，その視線方向の先にオブジェクトを配置する．オブジェクトは，親の配置を中心とする半径200[mm]の円弧上にランダムに配置する．この配置は子エージェントの視界内である．配置するオブジェクトの形状はランダムに決定する．ただし，子エージェントはカテゴリ識別関数 ( $C(s)$ ) において，異なる形状のオブジェクトを同じカテゴリ ( $OBJ$ ) として認識する．子エージェントは視覚定位によってオブジェクトを注視し，その後，再度親を注視する．子エージェントが親を再度注視するとき，親の視線方向をランダムに変更すると共に，オブジェクトを親の視線方向に移動させる (オブジェクトの配置方法は先述のとおり)．この操作において，子エージェントは親とオブジェクトの注視体験を頻度分布に蓄積する．

トライアルフェーズでは，トレーニングフェーズと同じく，親を自己受容感覚の正視位置に配置し，

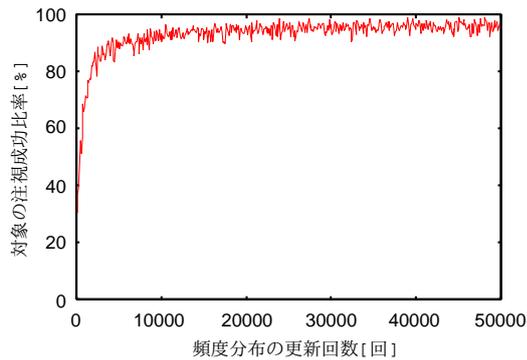


図5 頻度分布の更新回数に対する、視界外に配置されたオブジェクトや親の注視成功比率の推移

視線方向をランダムに設定する．その視線方向の先にオブジェクトを配置するとき、今度は視界の外への配置となるように、親を中心とする半径850[mm]の円弧上にランダムに配置する．この半径は、オブジェクトの配置が視界の外となるように設定すると同時に、親の視線方向の分解能が示す角度範囲 ( $360/10 = 36[deg]$ ) に視点が移動しても、一度も視界の中にオブジェクトが映らない状況が発生しないように設定するものである<sup>9)</sup>．トライアルフェーズでは、注視体験の頻度分布への蓄積は行なわない．

実験結果：トレーニングフェーズによる頻度分布への経験の蓄積が進むと、トライアルフェーズにおいて視界の外に配置されたオブジェクトや親を注視できる回数は図5のように上昇する．図5は、横軸がトレーニングフェーズでの試行回数、縦軸がトライアルフェーズでの1000回の試行に対する注視の成功比率である．また、図6はトレーニングフェーズにおいて50000回の試行を行なった後のトライアルフェーズにおいて、親の視線方向にオブジェクトを配置したときの、視点の移動軌道の一列である．

この結果から、トレーニングフェーズでの経験の蓄積によって、子エージェントは、視界の外に配置されたオブジェクトや親を注視できるようになることが確認できる．この結果は、子エージェントが親の向く先にオブジェクトがあることを体験することで、オブジェクトが直接視界に映っていないと、親の視線が向く方向に自分の視点を移動すること

9) 親の視線方向の分解能である $36[deg]$ の方向に視点を移動させるとき、 $0[deg]$ の方向に置かれたオブジェクトは、視界の対角線距離の0.84倍の距離に置かれたとき、一度も視界に入らない状態になる．

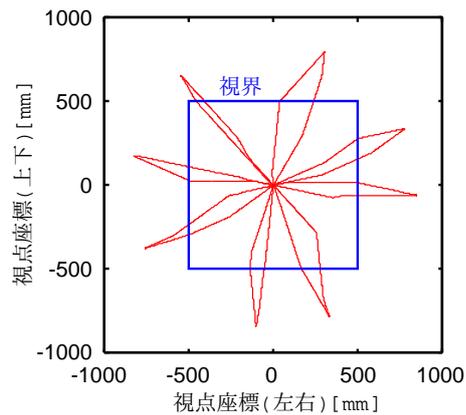


図6 視界外に配置されたオブジェクトへの視点の移動軌道

ができるようになることを意味している．同時に、オブジェクトを見たときに想起する親の情報によって、親のいる方向に自分の視点を移動することも意味している．行動的な側面だけを見れば、これらの行動は、共同注視と参照視を併せ持った交互凝視行動である．

図7は、親の注視からオブジェクトを想起する場合（共同注視）と、オブジェクトの注視から親を想起する場合（参照視）で、蓄積された経験に基づく想起情報の確率分布がどのような構造を持っているのかを確認したものである．具体的には、感覚情報 ( $s_t$ ) に含まれる親やオブジェクトの配置情報に対して、想起情報 ( $s_t^*$ ) に含まれる特徴情報（親の視線方向、オブジェクトの形状）、配置方向、自己受容感覚がどのような確率分布を持つのかを確認したものである．

親の注視からオブジェクトを想起する場合（上段）には、親の視線方向に対するオブジェクトの配置方向（上段左）が明確な構造を形成している．これは、親の視線方向の先に必ずオブジェクトが配置されている状況を頻度分布が取り込んだ結果である．親がどの方向に見えたかという情報（上段中央）や自己受容感覚（上段右）には、オブジェクトがどこに配置されているかを指し示す分布は形成されていない．

オブジェクトの注視から親を想起する場合（下段）には、自己受容感覚に対する親の配置方向（下段右）が、親のいる方向を指し示す情報を形成している．これは、自己受容感覚の正視位置に親がいる状況を

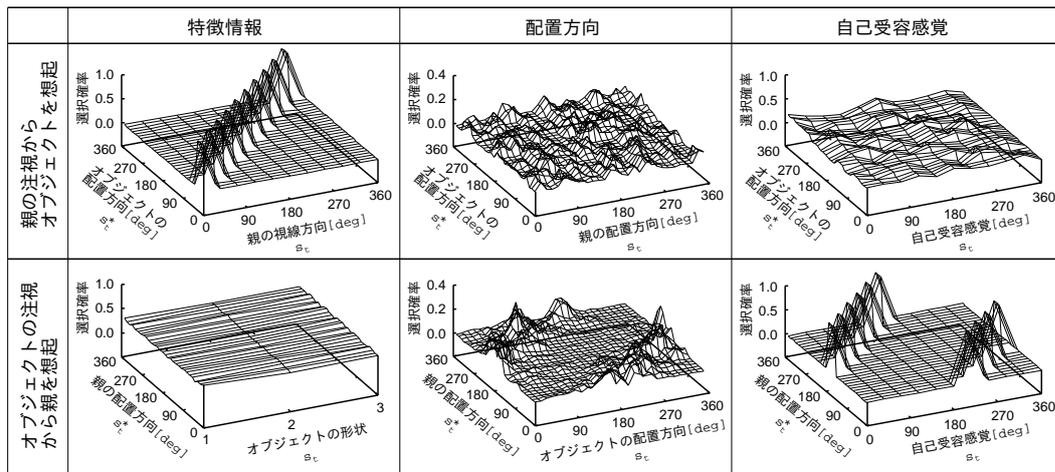


図7 対象を注視したときの感覚情報 ( $s_t$ ) から連想される想起情報 ( $s_t^*$ ) の確率分布

頻度分布が取り込んだ結果である。オブジェクトがどのような形状だったかという情報(下段左)では、確率分布は一様になっている。これは、オブジェクトの形状に親の位置を指し示す情報がないためである。オブジェクトがどの方向に見えたかという情報(下段中央)に関しては、環境内でオブジェクトの見えた方向の反対側に必ず親がいるようになっているので、その状況を取り込んだ分布になっている。しかし、図6のように、子エージェントは視点を親からオブジェクトへと常に直線的に移動させるわけではないので、この分布には、自己受容感覚(下段右)に見られるような鋭いピークは現われない<sup>10)</sup>。

2.4 獲得した交互凝視行動の動作機構

図8は、視界の外に配置されたオブジェクトと交互凝視を行なう際の子エージェントの視点の移動とその内部状態の一例を示したものである。オブジェクトの配置距離は、視点の移動中に視界に何も映らない状態( $\phi$ )を作り出すために、トレーニングフェーズで設定していた850[mm]から1270[mm]に変更している。

視点の動きと子エージェントの内部状態の推移を順に説明する。まず、左上の丸いオブジェクトから親のいる方向に視点移動する。この間は、感覚情報( $s_t$ )はオブジェクト(OBJ)かもしくは何も

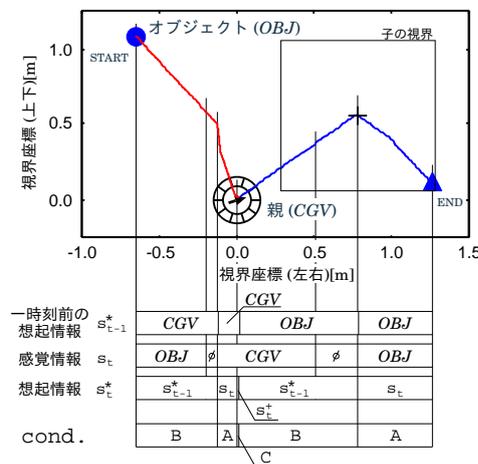


図8 視界の外に配置された親やオブジェクトとの交互凝視の行動過程と内部状態。

映っていない状態( $\phi$ )であり、一時刻前の想起情報( $s_{t-1}^*$ )は親(CGV)である。一時刻前の想起情報( $s_{t-1}^*$ )と感覚情報( $s_t$ )のカテゴリの不一致はcond.Bに該当するので、想起情報( $s_t^*$ )は一時刻前の想起情報( $s_{t-1}^*$ )になる。これにより、子エージェントは視界にオブジェクトを映しながら、親の方向に視点を移動することになる。次いで、視界に親が現われて、感覚情報( $s_t$ )が親になると、カテゴリの一致したcond.Aの状態になり、感覚情報( $s_t$ )がそのまま想起情報( $s_t^*$ )になる。これにより、その想起情報に応じた視点の移動方向の調節が起る。やがて子エージェントが親を注視すると、

10) 自己受容感覚ではなく、オブジェクトの配置方向を親の配置推定に用いた実験では、参照視において親を見失うケースが多くなることを確認している(金野・橋本, 2005)。

cond.Cによって想起情報は次に見るだろう感覚情報 ( $s_{t+1}$ ) として、視界には映っていない新たなオブジェクト ( $OBJ$ ) を想起する。注視状態での想起情報は、頻度分布に基づいて(7)式によって計算される。

次に視点は、想起したオブジェクトの情報を使って、視界に映っていないオブジェクト(図8右下の三角形のオブジェクト)の方向に移動する。ここで、子エージェントがオブジェクトの置かれた方向に視点を移動できるのは、親を注視した状態で、親の視線の先に置かれたオブジェクトを過去の体験から想起できるからである(図7上段左の情報)。視覚定位はこの想起情報に従って、オブジェクトがあるだろう方向に視点を移動させる。この間は、感覚情報 ( $s_t$ ) は親 ( $CGV$ ) かもしくは何も映っていない状態 ( $\phi$ ) であり、一時刻前の想起情報 ( $s_{t-1}^*$ ) はオブジェクト ( $OBJ$ ) である。このカテゴリが一致しない状態はcond.Bに該当するため、一時刻前の想起情報 ( $s_{t-1}^*$ ) が想起情報 ( $s_t^*$ ) になる。視界にオブジェクトが現われて感覚情報 ( $s_t$ ) がオブジェクトになると、カテゴリの一致したcond.Aの状態になり、想起情報 ( $s_t^*$ ) が感覚情報のオブジェクトになる。これによって、オブジェクトの置かれた方向へ視点の移動方向が調節され、やがてオブジェクトを注視する。このような内部状態の変更によって、子エージェントは視界の外に配置されたオブジェクトの注視を行なう。

## 2.5 意図的主体性の形成と機能

前節の説明から示されるように、想起情報 ( $s_t^*$ ) は、注視目標として働いている。親を注視している状態から始まる共同注視場面においては、想起情報はオブジェクトになる。この想起情報は、親の視線方向を向くとオブジェクトが見えたというそれまでの体験を通じて形成されたものである。視点を移動させている間、連想器はそれまでの想起と現在見えているもののカテゴリの違いを判断することで、親オブジェクトの連想状態を維持する。そして、その想起情報と同じカテゴリの情報を受け取ると(すなわち、注視目標が視界に入った状態になると)、連想器は想起情報を更新して視点の移動方向を調節し、注視目標を視界の中心で捉えようとする。つまり連想器は、体験に基づいて連想した注視目標を見ようとするという、子エージェントにとっての目的

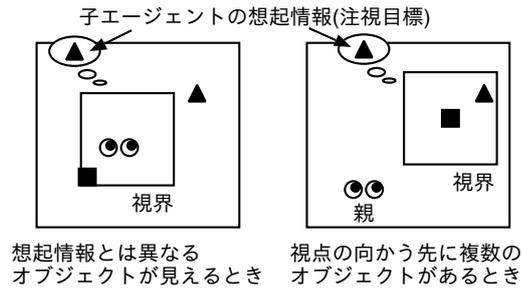


図9 想起情報 ( $s_t^*$ ) が持つ機能性

を形成する機能を持つと考えられる。

想起情報は、感覚情報の蓄積規則とカテゴリの識別による感覚情報の選択という2つの機構によって注視目標として機能する。感覚情報の頻度分布への蓄積規則(注視状態で一時刻前の感覚情報 ( $s_{t-1}$ ) と今の感覚情報 ( $s_t$ ) のカテゴリが変わるときの遷移頻度を蓄積する機構)が、一方では親の注視からその視線が向く先にあったオブジェクトを想起させ、他方ではオブジェクトの注視から自己受容感覚の正視位置にいる親を想起させる。そして、一時刻前の想起情報 ( $s_{t-1}^*$ ) と受け取る感覚情報 ( $s_t$ ) のカテゴリの異同に応じて連想器が出力する感覚情報を選択することによって、想起情報 ( $s_t^*$ ) は子エージェントの注視目標として機能するようになる。

この2つの機構に仮定している能力を変更してみると、注視目標としての機能性がよりはっきりと理解できるようになる。例えば、オブジェクトのカテゴリ判断に関して、オブジェクトの形状の違い( )を、それぞれ別のカテゴリであると判断すると仮定してみる。具体的には、表2および(8)式のカテゴリ判断 ( $C(s)$ ) で、オブジェクトの形状の違いを異なるカテゴリと判断するように設定する。ここで、想起情報( )と異なるオブジェクト( )が視界の中にあるとき、感覚情報として選択器が抽出しても、子エージェントは想起情報であることを注視目標にして、へ視点を移動させることができる(図9左)。また、親が向く視線の先に複数のオブジェクト( と )が配置されていても、子エージェントは想起情報である の注視を自律的に決定できる(図9右)。

このように、子エージェントは想起情報を注視目標にすることで、対象を自律的に注視できるようになる。またこのときには、既に獲得していた視覚定

位が、その注視目標の手段として適切に行使されている。我々はこうした目的と手段の結合状態が、萌芽的な意図的主体性を表出すると考えている。

3. 情動の不安化による参照視行動

これまでに構築した計算モデルでは、子エージェントはオブジェクトの注視から親を想起し、その想起に基づいて親を見るという参照視の行動的側面が実現できている。この行動は、やがて親の視線とは別のシグナル、例えば表情などのシグナルに気付く機会を子エージェントに与えることが考えられる。こういった気付きによって、子エージェントは親の表情を参照しようとする目的を形成し<sup>11)</sup>、社会的参照のようなコミュニケーション行動を獲得していくのではないかと考えられる。

ところが、本論で構築する子エージェントは、オブジェクトばかりを注視する体験を続けると、オブジェクトの注視の後にまた別のオブジェクトを見るようになり、オブジェクトに親を巻き込んだ行動を起こすことができなくなってしまう。なぜなら、子エージェントが参照視をするときには、オブジェクトの後に親を注視した過去の体験を想起することによって親を見ているからである。構築した計算モデルでは、全ての体験を頻度分布に蓄積しているので、体験した頻度に従って親やオブジェクトの想起頻度が決まるようになっている。

乳幼児は、オブジェクトに親を巻き込むコミュニケーション行動を自然に行なう。この行動は、親やオブジェクトをそれぞれに注視する体験から、親に関連する体験だけを選び取ることによって実現されるのだろうか。それとも、そもそも乳幼児にはオブジェクトの注視の後に親を注視する行動が備わっているのだろうか。認知発達心理学の知見は、後者の行動が乳幼児の初期発達段階に見られることを示唆している(岡本, 1982; Tomasello, 1995)。9~12ヶ月程度の乳幼児は、見知らぬおもちゃを見たときに親の顔を見ることがあり、この行動は、あたかもおもちゃへの対処方法を決めかねて、親の表情を参照しているように見える。しかし、乳幼児が意図的に親の表情を参照しようとしているかどうかを判定することは難しく、むしろ9~12ヶ月児が見せる参照視は、乳幼児に心理的な不安が起こること(情動の不安化)によって反射的に引き起こされているの

11) 親の表情を参照しようとする目的の形成が、親の表情が持つ役割への気付きそのものでもある。

表3 情動状態に対する想起情報の出力条件

不安状態での想起条件						安心状態での想起条件								
cond. (em = 0)						cond. (em = 1)								
C(s <sub>t-1</sub> <sup>*</sup> )						C(s <sub>t-1</sub> <sup>*</sup> )								
φ						φ								
CGV						CGV								
OBJ						OBJ								
C(s <sub>t</sub> )	φ	CGV	OBJ	G(s <sub>t</sub> )		D	D	D	D	C	B	B	B	B
				0	1	A	A	A	A	A	A	B	A	
	G(s <sub>t</sub> )	0	1	D	D	D	D	A	A	C	B	B	A	
		0	1	D	D	D	D	A	B	A	A	A	A	
G(s <sub>t</sub> )	0	1	D	D	D	D	A	B	A	A	A	C		
	0	1	D	D	D	D	A	B	A	A	C			

ではないかと指摘されている(小沢, 2005)<sup>12)</sup>。

乳幼児がオブジェクトの注視体験に親を巻き込むようなコミュニケーション機会を得る行動のメカニズムを考える。このとき、乳幼児には体験の中から親と関連するものだけを選び取っていくメカニズムとは別に、そもそも親を反射的に見ってしまうような行動とそのメカニズムを持っていることが考えられる。そこで本論では、オブジェクトの注視から反射的に親を見るような行動を実現するメカニズムが、これまでに構築した計算モデルにどのように組み入れられるのかを検討する。

以下、拡張する子エージェントの計算モデルを説明し(3.1節)、参照視行動の学習とその動作機構を示す(3.2節)。また、構築する計算モデルが表出する行動とその解析に基づいて、意図的主体性を形成するメカニズムの中に、情動が不安化することによって引き起こされる参照視行動のメカニズムがどのように組み込めるのかを議論する(3.3節)。

3.1 子エージェントのモデル拡張

連想器の想起情報を決定する(6)式にcond.Dを追加する。

$$s_t^* = \begin{cases} s_t & \text{if cond.A,} \\ s_{t-1}^* & \text{if cond.B,} \\ s_t^+ & \text{if cond.C,} \\ s_t^\# & \text{if cond.D.} \end{cases} \quad (9)$$

ここで、s<sub>t</sub><sup>#</sup>は最後に見た親の感覚情報であり、次式に従って保存される。

$$s_t^\# = \begin{cases} s_t & \text{if } C(s_t) = CGV, \\ s_{t-1}^\# & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (10)$$

cond.Dは表3に従う。表3は、左が不安状態、右が安心状態である。不安状態では、感覚情報(s<sub>t</sub>)が

12) 愛着システムの不安定化として言及されているが、本論で構築する計算モデルにおいては、不安になることで引き起こされる参照視に限定する。

親ではないときにcond.Dになる．これはつまり，親が見えていない状態では，連想器に保存している最後に見た親の情報 ( $s_t^\#$ ) を出力することを意味している．安心状態での出力条件は表2と同じである．

### 3.2 参照視行動とその動作機構

3.1節のように拡張したモデルをシミュレーションし，子エージェントが不安状態で親を見る参照視を起こすことができるかどうかを確かめる．

実験の設定と手順：親 (CGV) と2つのオブジェクト (OBJ1, OBJ2) を用意する．子エージェントは情動状態として不安状態 ( $em = 0$ ) と安心状態 ( $em = 1$ ) を持ち，OBJ1 を見て不安状態になり，親 (CGV) もしくはOBJ2を見て安心状態になると仮定する．

$$em_t = \begin{cases} 0 \text{ (不安)} & \text{if } G(s_t) = 1, \\ & C(s_t) = OBJ1, \\ 1 \text{ (安心)} & \text{if } G(s_t) = 1, C(s_t) = \\ & OBJ2 \text{ or } CGV, \\ em_{t-1} & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (11)$$

2.3.2節と同様に，親とオブジェクトを視界内で交互に表示し，トレーニングフェーズを実施する．ここで，自己受容感覚の正視位置，親の配置，オブジェクトの配置半径は2.3.2節と同じ設定にする．親の視線の先に表示するオブジェクトは，2種類 (OBJ1 もしくはOBJ2) のうちからどちらかをランダムに選ぶ．

実験結果：図10は，トライアルフェーズにおける子エージェントの視点の移動軌道と内部状態の一例である．このトライアルフェーズは，50000回のトレーニングフェーズを行なった後に実施したものである．また，親の視線方向には，子エージェントが想起したオブジェクトを配置した．図10は，OBJ1を見て不安状態になっているところからはじまる．式(11)によってOBJ1を注視した状態で不安になると，表3左のcond.Dに従って，連想器が出力する想起情報 ( $s_t^*$ ) が最後に見た親に関する感覚情報 ( $s_t^\#$ ) になる．親に関する感覚情報が運動器に入力されると，運動器は最後に見た親の方向へ視点を移動させる．親が視界に映ると感覚情報 ( $s_t$ ) は親になるので，その感覚情報が想起情報 ( $s_t^*$ ) として出力され，親のいる方向へ視点の移動方向が調節される．親を注視して情動状態が安心になることで，表

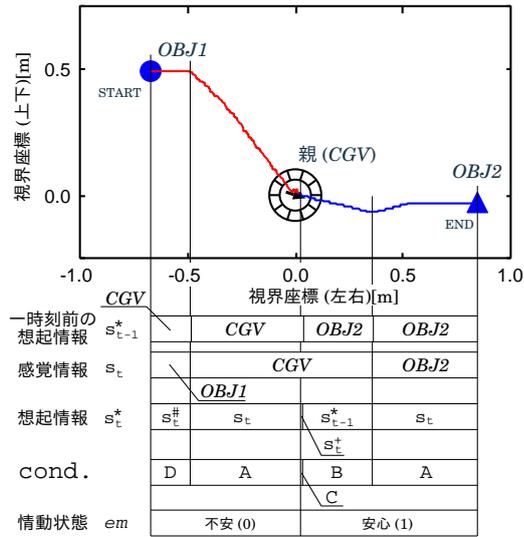


図10 情動状態を仮定したときの視界外への交互凝視行動とその内部状態

3右のcond.Cによって，親の次に見たオブジェクトの想起が起こり，想起情報 ( $s_t^*$ ) がオブジェクトになる．安心状態で想起されたオブジェクトに対する視点の移動行動と内部機構は，図8と同様である．

### 3.3 情動的参照視と意図的主体性のメカニズム

意図的主体性を形成するアルゴリズムに，情動的参照視のアルゴリズムがどのように組み入れられたのかを考える．情動的参照視は，オブジェクトを見て不安になったとき，感覚情報 ( $s_t$ ) が親ではない場合，最後に見た親の情報 (cond.Dの  $s_t^\#$ ) を使って親がいた方向へ視線を向ける．そして感覚情報が親になれば，その情報に従って親を見る．つまり，子エージェントは親かどうかを(12)式の順に判断し，親であった時点でその情報を想起情報 ( $s_t^*$ ) にする ((13)式)．

$$s_a = [s_t \succ s_t^\#], \quad (12)$$

$$s_t^* = s_a \quad \text{s.t.} \quad C(s_a) = CGV. \quad (13)$$

ここで， $\succ$ は感覚情報の判断順序を表わす．

一方，意図的主体性の形成過程は，連想器の条件テーブルがすべてcond.Aの状態から，その一部がcond.B (一時刻前に想起していた情報:  $s_{t-1}^*$ ) や cond.C (今の感覚情報から連想される情報:  $s_t^+$ ) に変化する過程として見る事ができる．なぜなら，条件テーブルが全てcond.Aの状態は感覚情報を運動器に素通しすることになるので，視覚定位を学習

表4 想起情報 ( $s_t^*$ ) とは異なるカテゴリの情報を出力する条件．安心状態での想起情報の出力条件 (表2および表3右) において, 想起情報とは異なるカテゴリの情報を出力する条件を丸で囲んだもの．

cond.		$C(s_{t-1}^*)$						
		$\phi$	CGV	OBJ				
$C(s_t)$	CGV	$G(s_t)$	$G(s_{t-1}^*)$					
			0	1	0	1		
			OBJ	A	A	A	A	A
				B	A	B	A	A
CGV	A	A	A	A	A			
	B	A	B	A	A			

した直後の状態とみなせるからである．感覚情報の頻度分布への蓄積によって連想情報 (cond.Cの $s_t^+$ ) が形成されると, 感覚情報 ( $s_t$ ) とは異なるカテゴリの情報を連想器が持つようになり, cond.BやCの選択肢が生まれる．

ここで情動的参照視は, cond.Aからcond.B,Cが生じる過程にcond.Dを割り込ませることで機能する．つまり, 一時刻前に想起していた情報 (cond.Bの $s_{t-1}^*$ ) や, 感覚情報から連想する情報 (cond.Cの $s_t^+$ ) に先んじて, 最後に見た親の情報 (cond.Dの $s_t^\#$ ) を選択することによって, 情動的参照視が実現する．このメカニズムによって, 子エージェントは情動の変化に基づいて即座に親を見ようとする．このとき, 情動の変化は不安に限る必要はない．何か楽しいオブジェクトを見たときにも同様のメカニズムが働くことで, 子エージェントは親とのインタラクション機会をより多く確保するようになるだろう．その行動は, あたかも子エージェントがオブジェクトを見た体験を共有しようとしているかのように見えるのではないかと考えられる．

引き続きcond.Aがcond.BやCに変わる過程を考える．安心状態 ( $em = 1$ ) での連想器の条件テーブル (表3右) は, 想起情報 ( $s_t^*$ ) と異なるカテゴリを出力する部分 (表4で丸で囲んだ部分) 以降, この部分をcond.Xとする) と, 一致するカテゴリを出力する部分に分かれる．異なるカテゴリの出力は, 想起情報 ( $s_t^*$ ) を3つの情報 (感覚情報:cond.Aの $s_t$ , 一時刻前の想起情報:cond.Bの $s_{t-1}^*$ , 感覚情報からの連想情報:cond.Cの $s_t^+$ ) と順に比較し, カテゴリが異なった時点で, その情報を想起情報 ( $s_t^*$ ) にするアルゴリズムとして記述できる ((14,15) 式) ．逆にcond.Xでないときには, カテゴリが一致する

ものを想起情報 ( $s_t^*$ ) にするアルゴリズムになる ((14,16) 式) ．

$$s_a = [s_t \succ s_{t-1}^* \succ s_t^+], \quad (14)$$

if cond.X

$$s_t^* = s_a \quad \text{s.t.} \quad C(s_a) \neq C(s_{t-1}^*), \quad (15)$$

otherwise

$$s_t^* = s_a \quad \text{s.t.} \quad C(s_a) = C(s_{t-1}^*). \quad (16)$$

異なるカテゴリを出力するcond.Xは, 想起情報を見ることに飽きている状態と解釈できる．cond.Xの条件を3つに分けて考える．

$$C(s_{t-1}^*) = C(s_t), G(s_{t-1}^*) = 1, G(s_t) = 1, \quad (17a)$$

$$C(s_{t-1}^*) \neq C(s_t), C(s_t) \neq \phi, G(s_{t-1}^*) = 1, \quad (17b)$$

$$C(s_{t-1}^*) = \phi. \quad (17c)$$

まず(17a)の条件では, 一時刻前の想起情報 ( $s_{t-1}^*$ ) と今受け取っている感覚情報 ( $s_t$ ) のカテゴリは一致していて, かつ両方が注視状態にある．このため, 子エージェントが想起情報を注視することに飽きていると考えることができる．次の(17b)の条件では, 一時刻前の想起情報 ( $s_{t-1}^*$ ) が注視状態でありながら, 今受け取っている感覚情報 ( $s_t$ ) が異なるカテゴリになっている．つまり, 一時刻前までは親もしくはオブジェクトを注視していたけれど, 今は視界に異なるカテゴリの対象 (オブジェクトもしくは親) が映っていることを意味している．よってこの状態は, 注視していたものに飽きていて, 新しく映ったものに注意を向ける状態と考えることができる．最後の(17c)の条件では, 一時刻前の想起情報 ( $s_{t-1}^*$ ) は何も映っていない状態 ( $\phi$ ) になっている．この状態は, 何も注視しない状態では, 何らかの対象を注視しようとする状態になると考えることができる．

以上の解釈により(14-16)式は, 想起情報に飽きているときには, その想起情報とは異なるカテゴリのものを選択し, 逆に飽きていないときにはその想起情報と同じカテゴリのものを選択し続けるアルゴリズムであると捉えることができる．子エージェントは, 連想器内で選択可能な情報に対して, 特定のカテゴリ情報を選択し続けることで, その情報を見ようとする状態を作り出す．

不安状態での情動的参照視と, 安心状態での交互凝視は, 感覚情報と想起情報の一致 / 不一致を判断するメカニズムを持つ点で共通性を持つ．ただし, 安心状態ではcond.A,B,Cの順に想起情報とのカテゴリの一致 / 不一致を判断するのに対して, 不安状

態では安心状態での判断順序にcond.Dを割り込ませて、cond.A,Dの順に親であるかどうかを判断する。ここでは、感覚情報の比較順序の変更と選択カテゴリの変更という2つのメカニズムがある。このメカニズムによって、意図的主体性を形成する過程で親とのコミュニケーション機会を確保する情動的参照視が実現できると考えられる。

#### 4. 議論

本論で構築した計算モデルをまとめる。2章では、反射的な行動に位置付けられる視覚定位を足掛かりにして、目的と手段から構成される意図的主体性を学習によって獲得する計算モデルを構築した。3章では、親とのインタラクション機会を提供する情動的参照視行動を、感覚情報の比較順序の変更と選択カテゴリの変更という2つのメカニズムによって実現した。これにより、視覚定位と情動的参照視を通じて親とのインタラクションを繰り返し、その過程で意図的主体性を形成する計算モデルを構築できたと考える。

本章では、まず、構築した計算モデルが持つ直列的な回路構成において、感覚情報に含まれる親やオブジェクトといったカテゴリを認識する能力を仮定することが、主体的な行動を表出することを論じる(4.1節)。次いで、形成する意図的主体性に、他者が持つであろう意図的主体性を取り込み、さらにその他者の意図的主体性の中に自分の意図的主体性が組み込まれていることに気付くことが、他者の意図を理解し、ひいては他者と意図を共有する状態を実現することを論じる(4.2節)。最後に、直列的な回路構成によって、意図的主体性を入れ子状に組み上げる過程を段階的に構築し得ることを論じる(4.3節)。

4.1 意図的主体性を実現する計算モデルの構造  
構築した計算モデルの最も重要な特徴は、目的として機能する連想器のモジュールを、既得能力である視覚定位モジュールに直列に接続し、目的と手段の結合状態を実現するところにある。これによって、子エージェントは視線の先に複数のオブジェクトが配置されるような状況でも、自律的に見るものを選めることができる。こういった方法で見る物の曖昧性を解決する方法は、長井ら(Nagai et al., 2003)やTrieschら(Triesch et al., 2006)のモデルの解決方法とは根本的に異なる。先行研究のように、親の視線

に関する感覚刺激と視点の運動方向を直接結び付ける方式では、注視目標の自律的な設定によって曖昧性を解決する方法を実現することが難しい。

これに対して、目的を生成する機能を担うモジュールを明示的に追加することは、主体的な行動の表出にどのような仮定が重要な役割を持つのかを明らかにする助けとなる。連想器を直列に追加することによって分かったのは、感覚情報に含まれる親やオブジェクトといったカテゴリを認識することの重要性である。カテゴリを認識することによって、形成される目的の機能性は1つの感覚状態が担うのではなく感覚状態の時系列が担うようになる。その時系列は、カテゴリを特定の規則で選ぶことによって生成される。つまり、カテゴリという識別階層を定義することによって、生成される感覚状態の時系列が目的として機能するようになり、既得能力の視覚定位が手段になる。これにより、目的と手段の機能単位を見い出すことができるようになる。

#### 4.2 意図的主体性に基づく他者の意図理解

前節では、直列的な回路構成が目的と手段という機能単位を表出することを論じた。本節では、その目的と手段が他者との間で入れ子構造を形成することによって、他者の意図を理解し、他者と意図を共有する状態を作り出すことを論じる。

Tomasello (2000)は(視線の)コミュニケーションにおいて、自分の持つ意図的主体性が他者にもあることに気付くこと、あるいは他者も自分のように意図的主体性を持つとみなすこと、これが他者の意図を理解することの始まりだと指摘する。一方Dennett (1987)は、志向システム(intentional system)が入れ子の構造を形成し、その次数を増やすことが、ヒトのコミュニケーションを特殊なものにするのだと指摘している。また金沢(1999)は、Dennettの指摘をチンパンジーの行動になぞらえたコミュニケーション階層の違いとして分かりやすく説明する<sup>13)</sup>。志向システムと意図的主体性の類似性に着目し、目的と手段の入れ子構造という観点から視線コミュニケーションの発達を見れば、他者の意図を理解する過程は、Dennettの志向システムにおける入れ子構

13) Dennett (1987)や金沢(1999)の説明は、チンパンジーが実際にどのレベルにあるのかを議論するものではなく、見かけ上同じ行動が観察される場合でも、どのような心理状態が論理的に有り得るのかを考察するものである。本論でも同じ立場から議論を進める。

造の次数の増加に対応付けて説明できる。以下、金沢の説明を用いてDennettの志向システムを簡単に説明し、そこに視線のコミュニケーションの発達過程と、他者の意図を理解する過程がどのように対応付けられるのかを示す。

金沢が説明に用いるチンパンジーの行動と、階層毎の心理状態を簡単に説明する。テーブルの上に箱が置かれており、その箱の中にはバナナが入っている。その箱を挟んで、実験者であるヒトと、被験者であるチンパンジーが対面して座っている。この状況において、チンパンジーが箱を見て手を伸ばす状況を考える。0次の志向システムにおいて、チンパンジーが箱に手を伸ばす行動は、「バナナ」を報酬にした「箱」という視覚刺激と「手を伸ばす」という行動の連合学習として説明される。1次の志向システムでは、チンパンジーは箱の中にバナナがあることを知っていて、「バナナが箱の中に入っている」と考えながら、箱に手を伸ばしバナナを取ろうとする。2次の志向システムでは、チンパンジーは実験者が箱の中のバナナを食べたいことを知った状態で箱に手を伸ばしバナナを取ろうとする。3次の志向システムでは、チンパンジーは、自分がバナナを食べたいと実験者が考えていることを知った状態で箱に手を伸ばしバナナを取ろうとする。

このコミュニケーション階層に本論で構築した計算モデルを当てはめると、視覚定位は0次の志向システムに、意図的主体性を形成する交互凝視は1次の志向システムにそれぞれ位置付けられる。0次の志向システムでは、チンパンジーは箱という刺激に対して、反射的に手を伸ばす行動を生成する。同じように、視覚定位行動において子エージェントは、親やオブジェクトの視覚刺激からそれらを注視する行動を反射的に生成する。これに対して、1次の志向システムでは、チンパンジーは箱の中に入っているバナナを取ろうとする内部状態を持つと考えられる。同様に子エージェントは、親を見てオブジェクトを想起することで内部に注視目標を形成し、その注視目標に従ってオブジェクトを注視するための適切な手段を行使する。このことから、意図的主体性を形成する交互凝視は、1次の志向システムに位置付けられると考えられる。

2次の志向システムにおいては、チンパンジーは実験者の信念を理解する。ここでは、信念をそのまま扱うのではなく、実験者について理解することを、

意図的主体性の特徴である目的と手段を用いて考える。2次の志向システムでは、チンパンジーは、実験者が箱の中にバナナがあることを知ったとき、実験者が箱に手を伸ばそうとする目的を持っているかどうかを知ることになる。つまりチンパンジーは、実験者がどういう目的を持っているのかを知った上で自分の目的を形成し、その目的に従った手段を実施することになる。他者の内部状態に目的があることを前提としてその目的を推論することに、2次の志向システムが持つ重要な特徴がある。

この2次の志向システムに、他者の意図を理解する構造が見い出せる。つまり、他者の目的を推論し、その推論に応じた目的を形成して自らの手段を適切に行使することで、他者の意図を理解する行動が実現されていくのではないかと考えられる。この構造を持つことにより、子エージェントは親の視線方向にあるだろうオブジェクトを想起するだけでなく、親がどのオブジェクトを自分に見せようとしているのかを知った上でオブジェクトを注視ようになる。社会的参照において子どもが親の表情を参照しようとしたとき、親の表情を応答的なシグナルとして受け取るだけでなく、親がどういう目的を持ってその表情をしているのかを推論することが、社会的なコミュニケーションを実現していくのではないかと考えられる。

3次の志向システムでは、チンパンジーは、自分がバナナを食べたいと実験者が考えていることを知っている状態になる。これを視線のコミュニケーションに当てはめて、ある1つのオブジェクトを自分と親が同時に注視している状況を考える。このとき、3次の志向システムは、自分がそのオブジェクトに注目していることを親が分かっていることを自分は知っているということに相当する。あるオブジェクトに親の注意を向けようとする目的を持っているとき、子は、オブジェクトと親を交互に見る交互凝視を手段として用いることが考えられる。3次の志向システムにおいて、子は、自分の交互凝視という手段を親が見ることで、親が自分の目的を理解し、自分の見るオブジェクトに注意を向けることを知った上で交互凝視する。ここに、他者と意図を共有する構造を見出すことができる。向き合う二人がこの状態にあることこそが、共同注意(joint attention)もしくはshared intentionality)の意味する状態であると考えられる。

#### 4.3 他者の意図を理解する計算モデルの構築

前節では、他者の意図の主体性を巻き込んで目的と手段の入れ子構造を構成することが、他者の意図を理解し、他者と意図を共有する状態を作り出すのではないかということ論じた。本節では、この入れ子構造の構築を検討する。

本論で構築する計算モデルの直列的な回路構成において、その入れ子構造は、既にある目的と手段を1つの手段にするような新たな目的形成モジュールを直列に接続することで実現できる。4.2節の議論から、上位の目的として機能するモジュールを段階的に追加することによって、他者の意図を理解する状態や他者と意図を共有する状態を順次構築していくことができるのではないかと考えられる。ここで、2次の入れ子によって他者の意図を理解する状態を実現するには、上位の目的形成モジュールが、自らの目的と手段のセット（意図の主体性）を基にして他者の目的を推論するようになる必要があると考えられる。このときにまた、新たなモジュールの構造やメカニズムを具体的に検討することで、他者の意図を理解する状態をメカニズム的に解明するための仮説を提示することができるのではないかと考えられる。

ただし、実際に乳幼児が他者の意図をどのように理解しているのかを解明するには、上述のような計算モデルの構築と共に、その計算モデルの機能性や妥当性を検証する必要がある<sup>14)</sup>。機能性の検証には、計算モデルを実装したロボットとヒトとのインタラクション実験を行ない、ヒトがそのロボットの行動に意図性を感じるかどうかを調査する方法が考えられる。これは、浅田ら(Asada et al., 2001)が提唱する認知発達ロボティクスアプローチである。また、妥当性の検証には、脳活動計測によって得られる知見との対応関係を検討していくことが考えられる。

脳活動計測において、視覚定位のような反射的な運動を担う領野とは別に、目的の形成を担う領野が明らかにされつつある(den Ouden, Frith, Frith, & Blakemore, 2005; Purves, Augustine, Fitzpatrick, Hall, & Lamantia, 2007, p.447,511)。この知見に本論の計算モデルを対応させると、それぞれの領野は直列的な回路構成によって目的と手段を担い、かつ2.5節や3.3節に示したようなメカニズム

<sup>14)</sup> これは、本論で構築した意図の主体性を形成する計算モデルにおいても同様である。

が働いている可能性を示唆することができる。さらに、他者の意図や信念の検知を担う領野には、自らの意図的な振る舞いを担う領野とは異なる領野が注目されている(Saxe et al., 2004; Jellema, Baker, Wicker, & Perrett, 2000)。こういった知見に対しても、入れ子構造を持つ計算モデルを構築する過程でその整合性を検討していくことにより、乳幼児が他者の意図を理解する能力を具体的に解明していくことができると考えられる。

また、計算モデルには、親やオブジェクトを識別できることや、馴化のような生理状態や不安のような情動状態を持つといったいくつかの前提条件がある。これらの前提条件は、乳幼児の生得的な能力と密接に関係している。計算モデルの妥当性を検証していくには、こういった生得的な能力との対応関係を基に、意図性を実現するアーキテクチャやメカニズムを検討していく必要がある。また、妥当性の検証という意味では、それらが物理的実装としてどのような脳神経回路によって実現されているのかを考えることが重要である。そのときには、構築する計算モデルが人工ニューラルネットワークによってどのように構成できるのかを検討することが、有効な研究手法の1つになると考えられる(Elman, Bates, Johnson, Karmiloff-Smith, Parisi, & Plunkett, 1998; Shultz, 2003)。

本論のように計算モデルを構築する手法は、観測の難しい意図性という対象を解明するための仮説を提供する。しかし、それだけで乳幼児が意図性を介したコミュニケーション能力を獲得する過程を解明できるわけではない。我々は、計算モデルを構築してテストするフェーズと、その機能性や妥当性を検証するフェーズが相補的な関係を築くことによって、意図性のような主観性を実現するメカニズムを客観的に解明していくことができるようになると考えている。

## 5. 結論

本論では、乳幼児の視線によるコミュニケーション行動である交互凝視に注目し、この行動の計算モデルの構築を通じて、ヒトが他者の意図をどのような仕組みによって理解するのかを検討した。

構築した子エージェントは、視覚定位によって反射的に視界に映る親やオブジェクトを注視する。また、オブジェクトを見て不安になるような情動要因

によって即時的に親を見ることで、親とのインタラクションを繰り返す。子エージェントはこれらの注視体験を蓄積し、内部に注視目標（目的）を形成する。この注視目標が視覚定位を手段として適切に行使用になることで、子エージェントは親やオブジェクトを主体的に交互凝視するようになる。

同時に子エージェントは、親の視線の先にあるオブジェクトを注視する体験を積むことで、親の視線方向にあるオブジェクトを見るという共同注視を学習する。このとき、子エージェントは親の注視から想起したオブジェクトを注視目標にするので、親の視線の先に複数のオブジェクトがあるときにも、注視目標に従って主体的に見るものを決めることができるようになる。

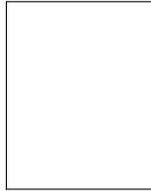
本論で構築する計算モデルの特徴は、目的を形成するモジュールが、視覚定位のモジュールへ入力を提供する直列的なシステム構成になっていることである。この構成において、子エージェントは既に獲得している視覚定位を足掛かりにして目的を形成する。そして目的が形成されたときには、視覚定位が手段として機能するようになる。我々は、こうして形成される目的と手段の結合状態が意図の主体性の原型になると考えている。

本論では、この意図の主体性を基礎に置いたとき、自分の意図の主体性と他者の意図の主体性が入れ子の構造を形成することが、他者の意図を理解し、さらには他者と意図を共有する内部状態を実現することを示唆した。このとき、直列的なシステム構成によって目的と手段の結合状態を作り出す本論の計算モデルの考え方が、その目的と手段のセットがまた別の目的の手段になるという入れ子構造の検討を可能にすると考えている。今後はこの入れ子構造を持った計算モデルを構築し、他者の意図を理解する状態を具体的に検討していく必要がある。

## 文 献

- Anscombe, G. (1957). *Intention*. London: Blackwell.
- Asada, M., MacDorman, K., Ishiguro, H., & Kuniyoshi, Y. (2001). Cognitive developmental robotics as a new paradigm for the design of humanoid robots. *Robotics and Autonomous Systems*, **37**, 185–193.
- Atkinson, J., Hood, B., Wattam-Bell, J., & Brad-dick, O. (1992). Changes in infants' ability to switch visual attention in the first three months of life. *Perception*, **21**, 643–653.
- Butterworth, G. & Jarrett, N. (1991). What minds have in common is space: Spatial mechanisms serving joint visual attention in infancy. *British Journal of Developmental Psychology*, **9**, 55–72.
- Corkum, V. & Moore, C. (1995). Development of joint visual attention in infants. In C. Moore & P. Dunham (Eds.), *Joint Attention: Its Origins and Role in Development*, 57–76. Lawrence Erlbaum. (大神 英裕 監訳(1999), 『ジョイント・アテンション』, ナカニシヤ出版.)
- den Ouden, H., Frith, U., Frith, C., & Blake-more, S. (2005). Thinking about intentions. *Neuroimage*, **28** (4), 787–796.
- Dennett, D. (1987). *The Intentional Stance*. MIT Press. (若島 正, 河田 学 訳(1996), 『「志向姿勢」の哲学』, 白揚社.)
- Elman, J., Bates, E., Johnson, M., Karmiloff-Smith, A., Parisi, D., & Plunkett, K. (1998). *Rethinking Innateness —A connectionist perspective on development—*. MIT Press. (乾敏郎, 山下 博志, 今井 むつみ 訳(1998), 『認知発達と生得性—心はどこから来るのか』, 共立出版.)
- Frye, D. (1991). The origins of intention in infancy. In D. Frye & C. Moore (Eds.), *Children's theories of mind*, 101–132. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- 橋本 敬 (2002). 構成論的アプローチ. 杉山 公造・永田 晃也・下嶋 篤(編), 『ナレッジサイエンス』, 132–135. 紀伊國屋書店.
- Jellema, T., Baker, C., Wicker, B., & Perrett, D. (2000). Neural representation for the perception of the intentionality of actions. *Brain and Cognition*, **44** (2), 280–302.
- 金沢 創 (1999). 『他者の心は存在するか —<他者>から<私>への進化論—』. 金子書房.
- 金野 武司・橋本 敬 (2005). 共同注視における意図理解の構成論的モデル. 『MPSシンポジウム2005「計算科学シンポジウム」講演論文集』, **2005** (11), 179–186.
- Nagai, Y., Hosoda, K., Morita, A., & Asada, M. (2003). A constructive model for the development of joint attention. *Connection Science*, **15** (4), 211–229.
- 岡本 夏木 (1982). 『子どもとことば』. 岩波書店.
- 小沢 哲史 (2005). 社会的情報収集行動の起源と発達. 遠藤 利彦(編), 『読む目・読まれる目』,

- 139–156. 東京大学出版会.
- Paterson, S., Heim, S., Friedman, J., Choudhury, N., & Benasich, A. (2006). Development of structure and function in the infant brain: Implications for cognition, language and social behaviour. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, **30** (8), 1087–1105.
- Piaget, J. (1952). *The Origins of Intelligence in Children*. New York: Norton.
- Purves, D., Augustine, G., Fitzpatrick, D., Hall, W., & Lamantia, A. (Eds.) (2007). *Neuroscience, Fourth Edition*. Sunderland, MA USA: Sinauer Associates, Inc.
- Saxe, R., Carey, S., & Kanwisher, N. (2004). Understanding other minds: Linking developmental psychology and functional neuroimaging. *Annual Reviews of Psychology*, **55**, 87–124.
- Shultz, T. (2003). *Computational Developmental Psychology*. A Bradford Book, MIT Press, Cambridge, MA.
- Sutton, R. & Barto, A. (1998). *Reinforcement Learning*. A Bradford Book, MIT Press, Cambridge, MA. (三上 貞芳, 皆川 雅章 共訳(2000), 『強化学習』, 森北出版.).
- Tomasello, M. (1995). Joint attention as social cognition. In C. Moore & P. Dunham (Eds.), *Joint Attention: Its Origins and Role in Development*, 103–130. Lawrence Erlbaum. (大神 英裕 監訳(1999), 『ジョイント・アテンション』, ナカニシヤ出版.).
- Tomasello, M. (2000). *The Cultural Origins of Human Cognition*. Harvard University Press, Cambridge.
- Triesch, J., Teuscher, C., Deak, G., & Carlson, E. (2006). Gaze following: why (not) learn it. *Developmental Science*, **9** (2), 125–147.  
(Received 25 Oct. 2007)  
(Accepted 29 Feb. 2008)



金野 武司 (学生会員)

1974年生。武蔵工業大学院大学でシステム制御工学を専攻し、工学修士を取得。その後、住友重機械工業にてモータ制御システムに関する研究開発に従事。現在は北陸先端大学知識科学研究科にて、ヒト乳幼児が見せるコミュニケーション行動に注目し、ヒトが他者の意図を理解する能力をメカニズムの観点から解明するための研究に従事している。日本認知科学会学生会員。



橋本 敬 (正会員)

1990年神戸大学理学部物理学科卒業。1996年東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻博士課程修了。博士(学術)。1996年理化学研究所脳科学総合研究センター基礎科学特別研究員。2000年エディンバラ大学理論・応用言語学科客員研究員。1999年北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科准教授、2007年比較制度研究所(VCASI)フェロー。現在に至る。複雑系、人工生命、進化言語学、進化経済学分野において、言語・認知・制度のダイナミクスに関する構成的研究に従事。著書「境界知のダイナミズム」(共著, 岩波書店)、「ナレッジサイエンス改訂増補版」(共編, 近代科学社)、「複雑さの数理」(共訳, 産業図書)など。進化学会, 人間行動進化学会, 進化経済学会, 認知言語学会, International Society for Artificial Life各会員。