

Title	乳幼児の視線：視覚的コミュニケーション行動における意図的主体性形成の構成論的研究
Author(s)	金野, 武司
Citation	
Issue Date	2008-06
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/4487
Rights	
Description	Supervisor:橋本 敬, 知識科学研究科, 博士

博 士 論 文

乳幼児の視線：視覚的コミュニケーション行動における意図的主体性形成の構成論的研究

指導教官 橋本 敬 准教授

北陸先端科学技術大学院大学
知識科学研究科知識システム基礎学専攻

金 野 武 司

2008 年 5 月 8 日

要旨

本論は、乳幼児が心的状態を形成し理解するようになる発達過程の解明を大きなテーマとするものである。このテーマに取り組むにあたり、本論では構成論的アプローチに基づく発達モデルを構築する。このモデルは、他者とのコミュニケーション行動を生成するための人工システムを抽象的なレベルの情報表現とアルゴリズムによって構成するものである。この取り組みを通じて、乳幼児が他者の心的状態を理解するようになる過程を、乳幼児が生成する行動の内部メカニズムの観点から解明することを目標とする。

具体的には、乳幼児の原形的なコミュニケーション行動として知られる共同注視 (Joint Visual Attention) に注目し、これを人工システムによって構築する。共同注視は、親の視線の向く方向に自らの視点を移動させる行動である。この行動は他者の見ようとするものを理解し、他者と注意を共有するようになることで共同注意 (Joint Attention もしくは Shared Intentionality) に発達することが知られている。この発達過程には、自ら対象を見ようとするという意味での意図的主体性を形成する過程があると言われている。そして乳幼児はこの意図的主体性を鋳型にして他者にも自分と同じような意図的主体性があることに気付くことで、他者の意図 (見ようとするもの) を理解し、やがては他者の心的状態を理解するようになっていくのではないかと指摘されている。本論が目的とするのは、他者の意図を理解する過程で最初に形成されると言われる意図的主体性が、どのようなメカニズムを持ったシステムによって構築できるのかを明らかにすることである。またそのシステムの構築を通じて、乳幼児がどのような能力によって意図的主体性を実現しているのかを議論する。

一方、本論と同じように乳幼児の視覚的コミュニケーション行動に注目し、人工システムによって共同注視の発達モデルを構築する先行研究がある。これらの研究では、自ら何らかのものを見ようとするような内部状態が形成されることを前提としたモデル化は行われていない。これらのモデルは共通して、親の視線 (刺激) と視点の移動 (運動) を直接結び付ける仕組みによって反射的な行動を学習するようになっている。ここには、共同注視を反射的な行動と捉えるのか、それとも意図的な行動と捉えるのかという問題がある。本論では、自ら何らかのものを見ようとするような内部状態を形成する発達モデルを構築し、それによって意図的主体性や、意図的主体性を鋳型にした他者の意図理解過程がどのような行動生成のメカニズムとその変化によって構成できるのかを検討する。

自ら何らかの物を見ようとするような内部状態を形成するために本論で構築する人工システム（子エージェント）は、反射的な行動を通じて親とのインタラクションを繰り返し、その過程で共同注視行動を獲得する。この過程で子エージェントは、まず視界の端に映るものを反射的に注視する視覚定位行動を学習する。この行動は、乳幼児が周辺刺激に対する鋭敏性を3ヶ月程度までに発達させるという知見に対応させたものである。次いで、この視覚定位行動を生成する運動モジュールに、新たな学習モジュールを直列に前置接続する。学習モジュールを直列に接続するのは、並列な接続では先行研究のモデルと同じように、追加する学習モジュールもまた反射的な行動を学習することになるからである。この学習モジュールが、視覚定位行動を通じて得る体験から親の視線方向とオブジェクトの間にある随伴的な規則性（親の視線方向にオブジェクトが見えるという規則性）を学習することで、子エージェントは自ら見ようとする内部状態を持った共同注視を獲得する。

この学習過程を実現するシステムの基本的なアイデアは、親の顔の注視から過去に見たオブジェクトの感覚情報を連想し、それを視覚定位モジュールに入力するというものである。ただし直列に接続する学習モジュールは、親の注視からオブジェクトを連想してその感覚情報を視覚定位モジュールに向けて出力するだけでは子エージェントの注視目標として機能しない。学習モジュールが親を注視して、そこからオブジェクトを連想したときには、学習モジュールはその連想した情報（オブジェクト）を視覚定位モジュールへの出力として維持する必要がある。そうしないと、見えている親を無視して、視界に映っていないオブジェクトの方向へ視点を移動できないからである。しかし逆に、連想したオブジェクトが視界に映ったら、学習モジュールの出力はその情報（見えているもの）に変更する必要がある。連想したオブジェクトの感覚情報をそのまま出力し続けると、見えてきたオブジェクトが素通りしてしまうからである。ここには3つの仕組みが必要とされている。それは、1. 親を注視したら連想したオブジェクトを出力する仕組み、2. 見えてきたオブジェクトが連想したものと同じかどうかを識別する仕組み、3. その識別に応じて、連想したものを出力し続けるのか、それとも見えているものを出力するのかを判断する仕組みの3つである。

この仕組みを実装したシステムをコンピュータシミュレーションでテストすると、子エージェントは親の視線からその視線の先にあるだろうオブジェクト（これは視界に映っていない）を連想し、その連想に基づいて自分の視点をオブジェクトに向けるようになることが確認できる。この学習モデルによって子エージェントは、親の視線の先に複数のオ

オブジェクトが配置される状況に対しても、形成する注視目標によって見るものを自律的に決定できるようになる。これが、親の視線に対して反射的に視点を動かす先行研究のモデルとの質的な違いである。この機能性は、連想したオブジェクトを注視目標（目的）にして、視覚定位を手段とすることで実現される。本論では、このような目的と手段の適切な結合状態を意図的主体性の原型と考える。

子エージェントの内部状態を注視目標として機能させる3つの仕組みは、それぞれ1. 馴化／脱馴化、2. カテゴリの識別、3. 記憶する情報へのアクセス時間の違いに関連すると考えられる。1つ目の仕組みが乳幼児の持つ馴化／脱馴化の能力に関連すると考えられるのは、親を注視したときに親とは別のものを見る状態が、親を見ることに馴れることによって実現されると解釈できるからである。2つ目の仕組みがカテゴリを識別する能力に関連すると考えられるのは、この仕組みが子エージェントの見るものに関して、例えば黄色いオブジェクトや丸いオブジェクトといった違いを見分ける行動を生起するからである。そして3つ目の仕組みが記憶する情報へのアクセス時間の違いに関連すると考えられるのは、次のような理由からである。構築したシステムを詳細に解析すると、3つ目の仕組みは学習モジュール内にある3つの情報（A. 今見えているもの、B. 学習モジュールが出力していたもの、C. 今見ているものから連想されるもの）を学習モジュールの出力とA. → B. → C. の順に比較して、カテゴリ（連想したオブジェクトかどうか）が一致した時点でそれを出力する仕組みになっていることが分かる。このとき、B. やC. の情報をワーキングメモリや短期記憶に相当する情報と捉えれば、そこには情報へのアクセス時間の違いが生じるのではないかと考えられる。これが3つ目の仕組みに、記憶する情報へのアクセス時間の違いが関連すると考える理由である。

以上のような議論から、本論では意図的主体性を形成するシステムが、手段を担う反射的な行動モジュールに目的を形成するモジュールを直列に前置接続することで実現できることを示す。また同時に、その目的を形成するモジュールの持つ3つの機構が、馴化／脱馴化の仕組み、カテゴリを識別する仕組み、そして情報へのアクセス時間の違いによって比較順序が決まる仕組みとして考えられることを示唆する。

この共同注視を学習する仕組みは、オブジェクトを見てから親を見る参照視行動を学習することができる。共同注視では親の視線がオブジェクトの位置を指し示すシグナルとなるように、オブジェクトを見てから親を見るときには、自分の筋肉の状態を伝える自己受容感覚が親のいる方向を指し示すシグナルとして機能する。これによって子エージェント

は、オブジェクトを見たときに連想する親の情報を注視目標にして親を見ようとするようになる。この行動はやがて、共同注視が共同注意に発達するように、親の表情を参照しようとするような社会的参照と呼ばれる行動に発達するのではないかと考えられる。

しかし、連想によって参照視を学習するシステムを構築して動かしてみると、オブジェクトの次に親を見る体験が不足するのではないかということに気付く。なぜなら、種類の違うオブジェクトを子エージェントに次々に見せると、子エージェントはオブジェクトから親を連想しなくなるからである。これは、子エージェントがオブジェクトの後に親を見る体験を蓄積することによって、オブジェクトから親への連想を実現しているからである。つまり参照視を学習するには、オブジェクトの後に親を見る体験が足りないか、あるいは体験の中から規則を抽出する仕組みが必要なのである。この問題は共同注視にも当てはまる。連想による共同注視を学習するには、親の次にオブジェクトを見て、なおかつ親の視線の先にあるオブジェクトを見る体験を蓄積する必要があるからである。

認知発達心理学では、9ヶ月程度の乳児の参照視行動は、親の表情を参照しようとするような意図的な行動として起こるのではなく、不安のような情動要因によって即時的に起こるのではないかとされている。構築したモデルにおいて、オブジェクトを見たときに即時的に親を見る行動は、学習モジュールが最後に見た親の情報を保存しておくことで実現できる。不安のような情動要因を用意して、オブジェクトを見て不安になることを仮定したとき、保存した親の情報を視覚定位モジュールに入力すれば子エージェントの視点は親のいた方向に動く。そして、視点を移動させた先で親が見えたなら、共同注視と同じ仕組みを使って見えている親の情報を視覚定位モジュールに入力すれば良い。この仕組みをモデルに追加してコンピュータシミュレーションでテストすると、子エージェントは安心状態でオブジェクトや親を注視する体験を蓄積する仕組みを働かせ、不安状態で最後に見た親の情報を出力する仕組みを働かせて、連想による参照視を学習するための規則的な体験を得ることが確認できる。この結果は、乳幼児の情動的な参照視がオブジェクトの後に親を見る経験を得るための基礎的な行動として機能していることを示唆する。

共同注視についても同じように考えると、認知発達心理学において特に眼球運動に関して指摘される反射的な共同注視も、親の次にオブジェクトを注視するための基礎的な行動として機能していることが推測される。このことから、確かに共同注視には反射的な行動の側面があるが、その行動は親の視線の先にあるオブジェクトを見ることで獲得するものではないと考えられる。またそのときには、反射的な共同注視を実現するメカニズムは視

覚定位と同じレベルに位置付けるべきである。この意味で本論は、先行研究のモデルが親の次にオブジェクトを見る体験を学習して反射的な共同注視を獲得することが間違いであることを指摘する。そしてこの考え方が、共同注視が6ヶ月程度の乳児から観察されるとする報告（反射的な運動）と、9～12ヶ月程度の期間に条件付け的な学習によって獲得されるとする報告の不整合を解決するのではないかと考える。加えて本論は、その条件付け的な学習において、乳幼児が意図的な行動を獲得していくことを主張する。

最後に本論は、構築した子エージェントが形成する目的と手段のセット（意図的主体性）を鋳型にして、親の見ようとしているものを理解する仕組み（他者の意図を理解する仕組み）を検討する。

親の見ようとしているものを理解するには、親の視線を見て、それがどのような意図を持った行動なのかを推論する必要がある。このとき、親の行動を自分の行動に照らして、自分が見ようとするだろうものを基に親の見ようとしているものを推論する仕組みを持つことが、本論が考える意図的主体性を鋳型にした他者の意図理解である。この仕組みを、他者が持つだろう目的と手段のセットに対して、その手段の部分に自分の目的と手段が入り込む構造として捉えると、親の見ようとするものを理解するための構造が見えてくる。つまり、親の視線から親の目的を推論し、その推論に基づいて自らの目的を形成して適切な手段を行使するという「親の目的→自分の目的と手段」の構造である。これはちょうど、親と子それぞれの目的と手段が入れ子になっている。

この入れ子構造がもう一段深さを増すと、親の視線から親が理解する自分の目的を推論し、さらにその自分の目的に対して親がどのような目的を持っているのかを推論し、その推論に基づいて自分の目的を決めて適切な手段を行使するという構造が実現できる。これはつまり、「親が理解する自分の目的→親の目的→自分の目的と手段」という構造である。この状態は、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とき、「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」という状態を実現する。この構造によって実現される状態が他者と見るものを共有した状態であり、この状態こそが共同注意が持つ重要な特徴であると考えられる。本論ではこのような議論を通じて、自分の意図的主体性と他者の意図的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、ひいては他者と意図を共有する状態を実現することを示唆する。

また、この入れ子構造の実現には、「親の目的→自分の目的と手段」という構造から推測されるように、目的と手段を形成する直列回路に対してさらに上位の目的（親の目的）

を形成する学習モジュールを直列に前置接続する回路構成が考えられる．ただし，上位の目的形成モジュールをどのように構築するかが大きな問題である．本論では，ここに非論理的な能力傾向を仮定することが，他者の意図を理解する状態を実現するための鍵を握っているのではないかとすることを論じる．

以上のように，本論は人工システムを作って動かすという構成論的アプローチを用いて，乳幼児が持つだろう意図性のような主観的な状態を実現するメカニズムを明らかにしようとする．そこでは，人工システムを単に作って動かすだけではなく，作ったものの持つ意味を検討し，そこでの問題点を明らかにすることでまた，そこから新たな仮説を提示することが重要である．本論は，こうした仮説の提示とテストのサイクルを循環させることで，客観的な理解の難しい乳幼児の主観性を本質的に理解しようとするものである．

目次

第1章	はじめに	1
1.1	コミュニケーション行動と他者の心的理解	2
1.1.1	認知発達心理学における心の理解と「心の理論」	3
1.1.2	心を理解する機能とその行動を生成するメカニズム	4
1.2	乳幼児が見せる言語獲得以前の社会的コミュニケーション行動	7
1.2.1	他者の意図を理解するようになる発達過程	8
1.3	意図的主体性を形成する内部メカニズムの解明手法	10
1.3.1	構成論的アプローチ	12
1.4	本論の目的	17
1.5	本論の構成	18
第2章	人工システムの構築によるコミュニケーション行動の理解	21
2.1	人工システムで構築する視線のコミュニケーション行動	21
2.2	学習による共同注視行動の獲得	23
2.2.1	Matsuda and Omori (2001) の学習モデル	24
2.2.2	Triesch et al. (2006) の学習モデル	26
2.2.3	Nagai et al. (2003) の学習モデル	27
2.3	先行研究の特徴に見られる共通性と問題点	28
2.4	構築する学習モデルの基礎要件	31
第3章	共同注視と意図的主体性の形成	35
3.1	環境設定と子エージェントの取得情報	37
3.2	視覚定位	38
3.2.1	視覚定位モデル	39
3.2.2	視覚定位の学習	42

3.3	共同注視	44
3.3.1	共同注視の学習モデル	45
3.3.2	共同注視の学習	50
3.4	自己受容感覚を持った視覚定位	56
3.4.1	自己受容感覚を持った視覚定位の学習	57
3.5	自己受容感覚を持った共同注視	58
3.6	連想器の学習規則	61
3.7	獲得した交互凝視行動の動作機構	63
3.8	意図的主体性を実現する機構とその機能	66
3.8.1	カテゴリーの識別	66
3.8.2	カテゴリーの識別に基づいて出力情報を変更する機構	70
3.8.3	親・オブジェクト間の感覚情報の遷移を頻度分布に蓄積する機構	71
第4章	情動的参照視と意図的主体性	75
4.1	情動的参照視を実現する機構	77
4.2	参照視行動とその動作機構	78
4.3	情動的参照視と意図的主体性のメカニズム	80
4.3.1	意図的主体性を実現するメカニズムの再検討	82
4.3.2	意図的主体性を形成する過程における情動的参照視や反射的視覚定位の位置付け	86
第5章	議論：意図的主体性に基づく他者の意図理解	91
5.1	意図的主体性を実現する学習モデルのメカニズム	91
5.1.1	カテゴリーを識別する仕組み	92
5.1.2	馴化／脱馴化の仕組み	93
5.1.3	情報を順序的に比較する仕組み	93
5.2	意図的主体性に基づく他者の意図理解	94
5.3	他者の意図を理解する発達モデルの構築方法の検討	98
5.4	モデルの発展と課題	101

第6章 結論 —まとめと課題—	105
6.1 本論の取り組みとその結論	105
6.1.1 意図的主体性を形成する学習モデルのメカニズム	105
6.1.2 他者の意図を理解する発達モデルのメカニズム	107
6.2 明らかになった研究課題	108
6.3 構成論的アプローチによる知見が持つ特徴とその意義	110
6.4 おわりに	111

目 次

1.1	他者の意図を理解することによって進展する視覚的コミュニケーション行動	9
2.1	子エージェントの感覚-運動系	23
2.2	Matsuda らのモデルで想定されるインタラクション環境 (Matsuda and Omori, 2001, Figure.1)	24
2.3	子エージェントの状態認識とその遷移 (Matsuda and Omori, 2001, Figure.2 を改変)	25
2.4	想定するインタラクション環境 (Triesch et al., 2006, Figure.1)	26
2.5	ブートストラップ学習を実現する感覚-運動系	28
2.6	親の視線特徴に違いがない状況	29
2.7	注視目標を持った状態での共同注視:	30
2.8	4~5ヶ月程度の乳児を対象にした Hood et al. (1998) の視覚実験 (Fig.1 より抜粋)	33
2.9	7ヶ月程度の乳児に提示された視覚刺激 (板倉, 2005, p.126, 図 6) より抜粋)	33
2.10	並列回路 (Nagai et al. (2003) のモデル) と直列回路	34
3.1	子エージェントの視界設定	37
3.2	視界から受け取る感覚情報	38
3.3	感覚-運動間を結ぶ視覚定位モデルの枠組み	38
3.4	視覚定位モデルのシステムブロック図	40
3.5	親とオブジェクトの配置設定	43
3.6	試行毎の視点の移動時間の変化 (上) と視点の移動軌道 (下)	44
3.7	共同注視を学習するシステムの基礎アイデア	45
3.8	共同注視のシステムブロック図	47
3.9	連想器のフローチャート	50

3.10	トレーニングフェーズにおける親とオブジェクトの配置設定（左）とトリアルフェーズにおける親とオブジェクトの配置設定（右）	51
3.11	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	52
3.12	視界外に配置されたオブジェクトへの視点の移動軌道：	53
3.13	親やオブジェクトを注視したときの感覚情報（ s_t ）から想起される連想情報（ s_t^+ ）の確率分布	54
3.14	親の注視に失敗する状況	55
3.15	子エージェントが受け取る感覚情報：自己受容感覚の追加	56
3.16	自己受容感覚を加えた視覚定位のシステムブロック図	56
3.17	親とオブジェクトの配置設定：	57
3.18	試行毎の視点の移動時間の変化（上）と視点の移動軌道（下）	58
3.19	自己受容感覚がある場合の共同注視・参照視の学習曲線：	59
3.20	自己受容感覚がある場合の連想情報の確率分布：	60
3.21	親の視線からオブジェクトを想起することで実現する共同注視（左）と、オブジェクトの注視から親を想起することで実現する参照視（右）	61
3.22	連想器のフローチャート（図 3.9 のフローチャート部分のみを再掲）	62
3.23	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	65
3.24	視界の外に複数のオブジェクトが配置された場合の視点の移動軌道とその内部状態	68
3.25	想起情報（ s_t^* ）が持つ機能性	69
3.26	共同注視体験の頻度に関する思考実験	72
4.1	参照視行動の出現：	76
4.2	情動的参照視を実現するシステムの基礎アイデア	77
4.3	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	80
4.4	連想器のシステム概念図：	84
4.5	連想による交互凝視を実現するメカニズム（直列的回路構成）と、乳幼児に観察されるコミュニケーション行動との対応関係	88
5.1	共同注視における親の目的（見ようとするもの）の理解：	96

5.2 交互凝視行動の手段的活用場面：	97
5.3 目的と手段の入れ子構造の段階的な深化	99

表 目 次

3.1	感覚情報の解像度	39
3.2	想起情報の出力条件	64
3.3	オブジェクトの形状を区別する場合の想起情報の出力条件	67
4.1	情動状態に対する想起情報の出力条件	79
4.2	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 :	83
5.1	志向システムのコミュニケーション階層	98

第1章 はじめに

人は社会の中で、心を通じて他者とコミュニケーションする。そこには、論理性や合理性だけがあるわけではない。友人に何か頼み事をするとき、逆に頼まれ事をされるとき、そこには合理的な損得勘定だけがあるわけではないからである。また、ビジネスの世界で商談を進めるとき、人は厳密なルールにしたがって合理性や効率性を追求しながらも、それだけで最終的な決断を下すことはないだろう。どんなに論理性や客観性を追求しようとしても、心の中には不可思議な非論理性が常にある。形成される人の社会が合理性や効率性を大きな特徴としていても、非合理的あるいは非論理的な側面を持つ「人の心」を正しく理解しなければ、社会の中に生きる「人という存在」を正しく知ることにはならないだろう。人は社会の中でどのような心を形成し、そして他者の中にどのような心を見い出しているのか。これを客観的に理解していくことが、人の形成する社会の本質を理解することにつながるのではないかと考えられる。

人の心とはどのようなものであり、その心を他者に見い出してコミュニケーションするとはどういうことなのだろうか。乳幼児の発達過程にその答えを見い出そうとする認知発達心理学は、乳幼児が見せる原型的なコミュニケーション行動の調査を通じて、乳幼児が心を獲得し、そして他者の心を理解していく過程を明らかにしようとしている。中でも視線に関するコミュニケーション行動の獲得過程は、乳幼児が他者の心的状態を理解するようになる萌芽的な過程として注目を集めている。しかし、視線によるコミュニケーション行動を通じて形成される心的状態の理解能力を客観的に解明することは難しい。なぜなら、心理実験による行動観察では、乳幼児の刺激-反応パターンから内面にあるメカニズムやその発達を知ることが難しいからである。

本論ではこういった難しさに対して、視線によるコミュニケーション行動を人工システムで構築するというアプローチで取り組む。この取り組みを通じて、乳幼児が他者の心的状態を理解するようになる過程を内部メカニズムの観点から解明することを目的とする。

本章ではこの目的がどのような背景から形成されるものであるのかを詳しく述べる。本

章は3つの節から構成する．まず1.1節では，認知発達心理学の分野で乳幼児が他者の心的状態をどのように理解すると考えられているのかを説明する．そして，乳幼児が心を理解するようになる過程を解明していくには，その機能性だけでなく，機能性を実現している行動の生成メカニズムを同時に調査する必要があることを述べる．またこれを実現するためには，乳幼児の発達過程を遡って，より反射的な行動に近い段階の発達過程を調査の対象にする必要があることを述べる．

これを受けて1.2節では，乳幼児が1歳前後に見せる視線のコミュニケーション行動に注目し，その発達過程で乳幼児がどのように他者の心的状態を理解するようになるかと考えられているのかを説明する．乳幼児はまず，自らが意図的に振る舞うようになるという意味での意図的主体性を形成し，これを鋳型にして他者の意図を理解するようになると言われる．乳幼児は他者の意図を理解する能力を獲得することで，やがて他者の心的状態を理解するようになると考えられている．1.2節では，これらの仮説を具体的に説明する．

1.3節では，心的状態を理解した行動がどのようなメカニズムによって生成されているのかを検討する方法として，人工システムを構築する構成論的アプローチの手法が適することを述べる．ここでは特に，行動を生成するメカニズムを行動観察や脳活動計測から推定することの難しさに触れて，それを解決する助けとなる方法として，人工システムを構築する手法が有効性を発揮すると考えられることを述べる．

1.4節で本論の目的を述べ，1.5節に本論の構成を示す．

1.1 コミュニケーション行動と他者の心的理解

人が心を持ち，他者に心を見い出すことは，社会に生きる我々にとっては当たり前のことである．しかし「心とはどのようなものですか？」と問われて，正確に答えられる人はいない．また，人のコミュニケーションに観察される言動から，人がどのような心を持って他者と接しているのかを明らかにすることも難しい．しかし，心は個々の言動が持つ機能性を集めてそれを概念化したものだと考えれば，言動の機能性を詳細に調査することによって心という概念を理解することができるのではないだろうか．この考え方を前提にして，観察される行動（言動）の分析から心を解明しようとするのが認知心理学である．さらに，乳幼児の発達過程を調査することによって心の形成過程を明らかにするところから心の理解に迫ろうとするのが認知発達心理学である．心は生まれながらに持つものではなく

成長過程で形成していくものだと考えれば、認知発達心理学が乳幼児の行動観察を通じて心というものをより良く理解しようとするのは極めて妥当なアプローチだと考えられる。

1.1.1 認知発達心理学における心の理解と「心の理論」

認知発達心理学では、乳幼児は他者の心を理解するようになる過程で、他者についての心の理論 (Theory of Mind) を持つようになると言われている。この心の理論という概念は、最初はヒト¹の乳幼児ではなく、チンパンジーが他者の心を理解するかどうかを調査した論文において提唱された (Premack and Woodruff, 1978)。この論文の中で Premack らは、チンパンジーが誤った知識を伝達する行動 (あざむき行動)²を見せることから、その行動の背後には他者の心を理解する能力があると考えた。そして心の理論を、ある個体が他者の行動から他者の目的・意図・知識・信念・疑念・推測・ふり・好みなどの内容が理解できることと定義した。

この心の理論の提唱は活発な哲学的論議を巻き起こしたが、中でも特に注目を集めたのが「誤った信念 (false belief)」の理解である。誤った信念という概念は、Wimmer and Perner (1983) らが実施したマキシのチョコレート課題によって明確化されている。この課題では、子どもに次のような状況を紙芝居で見せる。マキシという男の子が、部屋の中でチョコレートを棚の中にしまう。そしてマキシが部屋から出て行った後で別の誰かがそのチョコレートを冷蔵庫にしまい、やがてマキシが戻ってくる。ここで、「マキシはチョコレートを食べようとしています。さて、マキシはどこを探すでしょうか？」と子どもに問い掛けるのである。この紙芝居を見ている子どもはチョコレートが冷蔵庫にあることを知っている。しかし、物語中のマキシはチョコレートが戸棚に入っていると思い込んでいるはずである。ここでマキシの視点に立って、「マキシが探すのは戸棚である」と子どもが答えることができるかどうかを調査することがこの課題の要点である。マキシがチョコレートの所在について信じていることをマキシの信念とすると、このマキシのチョコレート課題は、マキシの持つ信念が自分の持つ信念と異なることを幼児が理解しているかどうかを評価することになる。

¹本論ではこれ以降、生物学的な表記に倣い、人をヒトと表記する。

²チンパンジーは自分が餌の在処を知っているが、自分より優位な地位のチンパンジーがそばを通るときには、餌がある場所から視線をそらしてそのチンパンジーが通り過ぎるのを待つ行動を見せる。

大人がこの話を聞いたとき，こんな当たり前のことを聞いて何が分かるのかと不思議に思うかもしれない．しかし，3歳以前の乳幼児はこの課題に正しく答えることができず，4歳頃になってから正しい答えを返すことができるようになるのである．また他者とのコミュニケーションに著しい困難性を示す自閉症の子どもは，例え言葉を流暢に扱うことができても，この課題を通過しにくいことが知られている (Baron-Cohen et al., 1985)．つまり，当たり前だと思っている能力は，発達過程において獲得されるものであり，他者とのコミュニケーションにおいて欠くことのできないものなのである．

Frith (1989) は，他者が考えていることを他者の視点で捉えられないことがどのようなコミュニケーション不全を引き起こすかを次のような事例を挙げて説明する．例えば，食卓で自閉症児である A 君と母親が向き合って食事をしているとする．このとき，母親からは手の届かない場所にある塩について，母親が「お塩とれる？」と訊く．このとき自閉症児は「とれるよ」とだけ答えるというのである (自分に塩を取る能力があることだけを答える)．この場面で母親が期待するのは，塩を取ってもらうことだろう．もし A 君が，母親の視点で「お塩とれる？」という言葉解釈することができるなら，塩を取る能力があることを聞いているのではないことはすぐに理解できるだろう．他者が考えていることを他者の視点で捉えることができなければ，我々のコミュニケーションは簡単に崩壊してしまう．この事例のように，自閉症児が他者とのコミュニケーションに深刻な困難性を示すことを知ると，他者が考えていることを他者の視点で捉える能力の重要性がよく理解できる．この意味で，他者の信念を理解する能力を獲得することは，心を理解する過程の重要なマイルストーンであると言える．

1.1.2 心を理解する機能とその行動を生成するメカニズム

マキシのチョコレート課題のような心理実験は，他者の信念を理解する能力がどのような機能性を持っているのかを明らかにしてくれる．なぜならその実験によって，幼児の発する言動が他者とのコミュニケーションにおいてどのような効用を持っているのかを明らかにできるからである．しかし，機能性を明らかにするだけでは不十分である．なぜなら，機能性が分かっても健常児はなぜその機能性を発揮する行動を起こすことができて，自閉症児はその行動を起こすことができないのかという疑問に答えることはできないか

らである．この疑問に答えるには，幼児がどのようなメカニズム³によってその行動を起こしているのかを明らかにする必要があるだろう．

心の理論の有無と自閉症児が見せる行動の関係を考えた Baron-Cohen (1995) は，心を読むシステムに関して4つのモジュールからなるメカニズムを提案している．その4つとは，

1. ID (Intentionality Detector：意図の検出器)
2. EDD (Eye-Direction Detector：視線の検出器)
3. SAM (Shared-Attention Mechanism：注意共有の仕組み)
4. ToMM (Theory of Mind Mechanism：心の理論の仕組み)

である．ID は他者の行為からその意図を検出し，EDD は他者の視線がどこを向いているのかを検出する．そしてID とEDD によって他者がどこに注意を向けているのかを知るようになる．ここにSAM が加わることによって他者と注意を共有するようになり，やがてToMM が加わることによって他者の信念を理解するようになる．乳幼児が他者の意図性に敏感であるという知見がID の存在を示唆しており，生まれながらにしてヒトの顔の向きや視線の方向に敏感であるという知見がEDD の妥当性を補強する．しかし，ここで説明される4つのモジュールは，他者の心を読むという能力を構成している機能を要素に分解したものであり，それぞれがまた機能のモジュールになっている．このため，それぞれの機能モジュールがどのような内部メカニズムによって構成され，またそれぞれがどのような相互関係を持つことで心を読むという機能を構成する行動を表出しているのかは分からない．

ある特定の能力が複数の機能モジュールから構成されているとき，特定の障害が発生する原因は，その中の1つの機能モジュールが欠損することによって起こると説明される．しかし，機能は行動によって決まるものであり，機能の不全は行動が持つ特徴から導かれるべきものである．行動が生成されるメカニズムを明らかにしなければ，機能性を持った行動が生成される理由や，機能性を損なう行動が生成される理由を明らかにすることはできない．機能性をより良く理解し，その機能が損なわれる理由を明らかにするために必要

³本論では，「メカニズム，機構，仕組み」という用語を全て同じ意味で用いる．また，本論でいずれかの語を用いる際には，乳幼児に内在する仕組みを想定する．

なのは、その機能を複数の機能に分解することではなく、その機能を実現している行動生成のメカニズムを明らかにすることである。発達段階で、いくつかの機能が段階的に形成されることが明らかにされる場合でも、それぞれの機能がこういった行動から構成されるものであるのかを明らかにすることが重要なのではないかと考えられる。

こういった考えから、行動の持つ機能性ではなくその行動を生成するシステムそのものを考えてみる。このとき、心の理論のような能力を実現する行動の生成システムを考えると、それはとても難しいということに気付かされる。他者の信念を理解する能力が持つ機能性を調べるときには、幼児の発する言葉が誤信念という概念の持つ機能性を表現する助けとなる。しかし、マキシのチョコレート課題で観察される幼児のコミュニケーション行動（幼児の言動）に対して、それを生成している内部メカニズムを明らかにしようとするときには、解明しようとする対象は言語を生成するメカニズムに相当することになる⁴。

このことから、幼児の持つ内部メカニズムを解明していくには、対象とするコミュニケーション行動をより簡単なものにする必要があると考えられる。このとき、調査の対象にすべきコミュニケーション行動を決める方法として、幼児の発達過程を遡ることが考えられる。なぜなら、他者の信念を理解する能力も発達過程における1つのマイルストーンであり、そのマイルストーンにたどり着くような発達過程を考えることができるはずだからである。他者の信念を理解するようになるまでの発達過程を描き、機能性とメカニズムを同時に検討していくことができるようなコミュニケーション行動から研究を始めることで、他者の信念を理解する能力をメカニズムの観点から解明していくことができるのではないかと考えられる。

⁴言語自体を生成するメカニズムを明らかにすることがどれだけ難しいかを理解するには、1960年代頃から人工知能分野で取り組まれてきた自然言語処理の研究を調べると良い。我々が使う言語（自然言語）を生成する仕組みが既に明らかならば、我々と自然に会話するコンピュータが出回っているはずである。具体的な研究が始まって40年近くが経過するが、そのような人工システムが世に出回る気配はない。この事実からも、その難しさを実感することができる。

1.2 乳幼児が見せる言語獲得以前の社会的コミュニケーション行動

乳幼児は他者の信念を理解しはじめる4歳頃までに、様々な社会的コミュニケーション行動を獲得することが知られている。特にその端緒として注目されるのが、視線を介したコミュニケーション行動である。中でも、最もよく取り上げられる行動に共同注意 (Joint Attention) がある。共同注意は、他者の見るものに自らの視点を向ける行動として知られている。この行動で重要なのは、他者と注意の焦点を共有することであると言われる (Tomasello, 1995)。なぜなら、他者がどのような対象や事物に焦点を当てているのかを知することは、社会的なコミュニケーション⁵の成立に欠かせないからである。

Scaife and Bruner (1975) は、この共同注意行動の基礎的な獲得が乳幼児において始まっていることを最初に指摘し、11ヶ月程度の乳児が、親の視線が向く方向に自らの視線を向けることが可能であることを見い出している⁶。また、Butterworth and Jarrett (1991) は、共同注視⁷ (Joint Visual Attention) を「親の視線の向く方向に自分の視線を向ける行動」と定義し、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い出している。6～9ヶ月の段階では、乳児は生態学的に特徴づけられる反射的な行動によって視野内の興味深い対象へ視点を向ける。次いで12ヶ月程度での幾何学的な段階では、視線の幾何学的な特徴を理解して、親の見るものへ視点を向ける。ただし、この段階では視野内にある対象に関する共同注視が成立するだけである。そして18ヶ月程度で空間表象的な段階に至ると、自分の視野外にある対象や、さらには自分の後方にあるものにも視点を向けることができるようになる。

この研究から示唆されるのは、生態学的な基礎を持つ反射的な行動を基にして、共同注視行動を獲得していく過程があるということである。Corkum and 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する段階があることを指摘している。統制された心理実験において、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

⁵本論では乳幼児がヒトという集団の中で生きていくために他者と適切な関わりを持つことに寄与するコミュニケーションを社会的コミュニケーションと呼ぶ。

⁶2ヶ月程度の乳児から親の向く方向に視線を動かす場合のあることが実験により確認されている。

⁷乳幼児が見せる原型的な視覚的共同注意をより高度な共同注意と区別するため、本論ではこれを共同注視と呼ぶ。

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。

また、乳幼児が条件付け的な学習をするときには情動的な要素が重要な意味を持つ。なぜなら、親の顔を見ることに何らかの動機付けがなければ、そもそも親（ヒト）に注意を向けることがないだろうからであり、その動機付けを行なう仕組みとして情動的要因を考えることができるからである。情動的な行動には、オブジェクトを見たときに不安を感じて親を見るような参照視や、自分が見たオブジェクトを親と共有しようとするかのようにして、親とオブジェクトの間で視線を行き来させる交互凝視などがある。このように、乳幼児の発達過程には反射的な行動や情動的な行動を通じて親（他者）とインタラクションを繰り返す過程がある。

1.2.1 他者の意図を理解するようになる発達過程

では、反射的な行動や情動的な行動を基礎にして、他者と注意を共有するようになる過程はどのように考えることができるだろうか。Tomasello (2000) は、まず自らが意図的に振る舞うような意図的主体性 (intentional agency) を形成し、これを鋳型にして他者の意図を理解するようになるのではないかと指摘している。そして乳幼児のコミュニケーション行動は、他者の意図を理解することによって質的な変化を起こすと言われている (図 1.1)。共同注視は、単に他者の見ている方向を見るだけではなく、他者が見ようとしているものを理解して、そこに自分の注意を向ける共同注意に発展する。また、オブジェクトを見たときに不安を感じて親を見る参照視も、単に親を見るだけの行動から、何らかの情報源として親の表情を参照して、親の意図を読み取ろうとする社会的参照 (Social Referencing) に発展する。さらに親とオブジェクトを交互に見る応答的な交互凝視行動も、他者の意図を知ることによって親の注意をオブジェクトに向けようとするような活用的な行動に発展する。いずれの変化も、1歳前後から2歳程度までに見られるものである。Tomasello (1995) は乳幼児がこの時期に他者の意図を理解する能力を獲得することが、他者の信念を理解する能力を獲得する基盤になると主張している。

このような発達過程があるとするならば、反射的な行動や情動的な行動から他者の信念を理解するようになる過程に向けた最初の一步は、まず自らが意図的な振る舞いをするよ

共同注視	▶	共同注意
情動的参照視	▶	社会的参照
応答的交互凝視	▶	活用的交互凝視

図 1.1: 他者の意図を理解することによって進展する視覚的コミュニケーション行動

うになることであろう。Tomasello の指摘する意図的主体性は、乳幼児が目的と手段を区別することで実現され则认为られている (Anscombe, 1957; Frye, 1991)⁸。例えば、布の上に乗ったコップがあるとき、コップを取るという目的に対しては、直接コップに手を伸ばすか、あるいは布を引っ張ってコップを引き寄せるかといった手段を考えることができる。ある 1 つの欲求を満たすとき、複数の手段を適切に使い分けることができれば、そこには何らかの目的が形成されていると判断できる (Frye, 1991)。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のである (Meltzoff, 1995)。このとき、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⁹。

この意図的主体性を共同注視行動の獲得過程にあてはめてみる。すると乳幼児の発達過程には、意図的主体性を持つことによって親の視線方向にある何らかのオブジェクトを主体的に見るようになる過程があるのではないかと考えられるようになる。またこれによって、親の視線方向に複数のオブジェクトが配置されていても、乳幼児は見るものを自律的に決めることができるのではないかと考えられる。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はないかと推測される。この考えを基にすると、乳幼児が他者の心的

⁸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。

⁹単に反射的な行動が自律的な振る舞いを実現しているだけでは、その行動に主体性を認めることは難しい。しかしそこに目的を持った状態があることで、乳幼児の行動に主体性を見出すことができるようになるのではないかと考えられる。ここで、意図的主体性の中の主体性という言葉は目的や意図の存在を暗に含んでいる。しかし本論では、1 歳前後の乳幼児が反射的な行動から意図のようなものを形成することこそが、主体性を形成していく過程の重要な特徴であると考えられる。この考え方を明確にする意味で本論は意図的主体性という言葉を用いる。

状態を理解するようになる発達過程は次のようにまとめられる．まず乳幼児は，生態学的に特徴づけられる生得的な行動として，反射的な行動や情動的な行動を基に親とのインタラクションを繰り返し，その過程で視線によるコミュニケーション行動を獲得していく¹⁰．このとき，乳幼児は意図的主体性を形成し，これを鋳型にして他者の意図を理解する．さらに，この他者の意図を理解することが，やがて他者の心的状態を理解することにつながっていく¹¹．

このような発達過程を描出すると，乳幼児が他者の心的状態を理解するようになる発達過程を解明する第一歩は，反射的な行動や情動的な行動から意図的主体性を形成する過程にあることになる．では，この過程に観察される行動の機能性やメカニズムはどのように理解することができるだろうか．

1.3 意図的主体性を形成する内部メカニズムの解明手法

前節では，反射的な行動や情動的な行動から意図的主体性を持った行動へと発達する過程を検討することが，他者の心的状態を理解するようになる発達過程を解明するための第一歩になるのではないかと考えた．

しかし，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

¹⁰乳幼児に観察されるコミュニケーション行動の媒体は視線だけではない．ジェスチャや音声，あるいは表情なども，他者とのインタラクションを可能にするコミュニケーション媒体として機能している．ジェスチャは指さしのようなコミュニケーション行動として，音声は言語的コミュニケーションへ発展する行動としてそれぞれ観察することができる．しかし，それぞれの媒体に見られる行動の発達段階には固有の特徴があり，行動の獲得時期にも違いがある．本論は，他者の意図を理解する発達過程を解明するための窓口として視線を介したコミュニケーション行動に注目するが，そこで検討されるメカニズム的知見が，他の媒体にそのまま適用できると考えるものではない．逆に，視線を介したコミュニケーション行動に注目した結果として明らかになるメカニズム的知見が，他の媒体においてはどのように機能し得るのかを検討していくことが重要であると考えられる．

¹¹このように，自らの心的状態を鋳型にして他者の心的状態を理解するという考え方は，Meltzoff (2007) が唱える like me 仮説と同じものであると考えられる．

児には手段と分離した目的があることは確認できず、16ヶ月児において分離した手段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分離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、観察される行動に明確な目的が形成されていることを言うことは難しい。これは視線のコミュニケーション行動においても同様である。共同注視行動を獲得しはじめる9ヶ月程度の段階では、乳幼児が親の視線によって反射的にその方向に視線を向けているのか、それともなんらかの注視目標を内部に持って親が見る方向に視線を向けているのかを特定することは難しい。

では、内面を直接計測したらどうだろうか。近年、ヒトの脳活動を非侵襲で直接計測する手法が相次いで開発され、認知心理学の分野でもそれらの手法を用いた実験が行なわれるようになっている (Paterson et al., 2006)。ヒトの脳活動を計測する手法として注目されるのは、主に fMRI や MEG、あるいは NIRS といった装置¹²を使った実験手法である。こういった装置を使った実験では、被験者には異なる2つの行動を実施してもらい、それぞれの脳活動を計測する。このとき、それぞれの行動で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。これによって、それぞれの行動が持っている機能が共通の部位によって担われているのか、それとも異なる部位によって担われているのかを明らかにすることができる (Saxe et al., 2004)。よって、異なる機能が同じ部位で担われているのか、それとも異なる部位で担われているのかを調べようとする場合には、それぞれの機能を持つと考えられる典型的な行動を被験者に実施してもらい、その脳活動を調べることになる。

脳活動計測を意図的主体性の調査に用いた場合にはどのようなことが明らかになるだろうか。反射的な行動と意図的な行動を実施してもらい、もし反射的に行動するときの脳の活動部位と、意図的に行動するときの脳の活動部位が異なれば、意図性を担っている脳部位は、反射的な行動を起こす脳部位とは異なることが明らかにできるはずである。事実、ヒトの脳はある行動が特定の領域によって担われるような局在性があることが知られており、反射的な低次機能を担う領域と、意図性のような高次機能を担う領域は異なることが

¹²fMRI 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。fMRI や MEG は被験者に静止することを要求するため、乳幼児への適用が難しい。これに対して、NIRS は多少の動きを許容できるため、乳幼児の脳活動計測に適した装置として注目されている。

明らかにされている (Atkinson et al., 1992) . しかしこういった調査で分かるのは、意図性を担う脳部位が反射的な行動を起こす部位とは異なるということだけである . これだけでは、どのようなメカニズムによって意図性を持った行動が生成されているのかを明らかにすることはできない .

この問題は、意図性を持つ機能を細分化することでは解決しない . Baron-Cohen (1995) が心を読むシステムを4つの機能モジュールで構成したことと同じように、それぞれの脳部位が特定の機能を担うこと、あるいは複数の部位の組合わせでその機能を持った行動が生成されることが分かって、それぞれの脳部位がどのようなメカニズムによってその行動を生成しているのかという問題は残り続ける . また、局在する脳部位のメカニズムを明らかにすることとは別に、それぞれの脳部位どうしがどのようなアーキテクチャによって連携するものであるのかを明らかにする必要がある . このように、脳活動計測によってある特定の機能を担う脳部位の局在性が明らかになっても、それぞれの部位が持つメカニズムとそれらをつなぐアーキテクチャを明らかにする必要性は依然として残り続ける .

1.3.1 構成論的アプローチ

行動を生成する脳のメカニズムやアーキテクチャを解明する方法の1つに構成論的アプローチ (Constructive Approach) がある (Kaneko and Tsuda, 1994) . 構成論的アプローチは、簡単に言えば「システムを作って動かすことにより理解しようという手法」である (橋本, 2002, p.132)¹³ . これをヒトの内部メカニズムの解明に用いると、構成論的アプローチはヒトの行動が持つ機能性を再現する人工システム¹⁴を構築し、その人工システムのメカニズムを基にして脳が持つメカニズムを推論する手法になる¹⁵ . 例えば、共同注視

¹³ 構成論的アプローチは、研究者によっては構成的アプローチと呼ばれることがある (金子・津田, 1996) . これは恐らく、理論として人工システムの作り方が確立されているわけではないことを意味してのことだと思われる . しかし構成論的アプローチは、「作ること」とそれによって「分かること」のサイクルを繰り返すことが重要であり、そこでは構成の方法自体を論じる必要がある (この必要性に関しては本文でも後述する) . 本論では、構成論的アプローチが単に作れば良いという手法ではないという意味を込めて、構成に「論」を付ける .

¹⁴ ここで言う人工システムは、ロボットのような実体を持った人工物だけではなく、コンピュータシミュレーションのような実体を持たないものも対象とする .

¹⁵ 構成論的アプローチは、その適用対象を脳のメカニズムの解明に限定するものではない . もともとは、分離不可能性を持った複雑な現象の解明を目指した「複雑系」という学問分野 (吉永, 1996) で提案されている手法である (金子・津田, 1996) . 生命現象の本質的な理解を目指した人工生命の分野で、この構成論的

行動が表出する意図的主体性という機能に着目したときには、その機能を再現するような行動を起こす人工システムを構築する。そして、構築した人工システムのメカニズムから、ヒトが行動を生成するときの内部メカニズムを推定するのである¹⁶。ただし、機能を再現する人工システムが起こす行動は、当然のことながら実際にヒトが起こす行動ではない。そのため、構築した人工システムのメカニズムをヒトの脳と直接比較することはできない。しかし、メカニズムを直接調べるのが難しい状況で、なおかつ意図性のような客観的理解の難しい概念を明らかにしようとする場合には、このような間接的な方法が有効性を持つことになると思われる。

人工システムにはいろいろな作り方がある。この作り方を考えるとき、Marr (1982) の主張する3つのレベルが参考になる。Marr (1982) は脳を情報処理装置として見たときに、その理解の仕方には3つのレベルがあると指摘している。その3つのレベルとは、1. 計算理論のレベル、2. 表現とアルゴリズムのレベル、3. ハードウェアによる実現のレベルである¹⁷。川人 (1996) は Marr の3つのレベルを次のように説明する。

- 1. の計算理論のレベルでは、「計算の目標は何か、何故それが適切なのか、そしてその実行可能な方略の論理は何なのか」が問われる。
- 2. の表現とアルゴリズムのレベルでは、「入力と出力の表現および入力を出力に変換するのに用いられるアルゴリズム」が決定される。
- 3. のハードウェアによる実現のレベルでは、「アルゴリズムと表現がどのようにして物理的に実現されるかについて詳細に理解する」。

この3つのレベルで人工システムの構築を考えると、その立場は下位のレベル(3. のレベル)に向かうほどに現実を忠実に再現することに主眼を置くものになり、逆に上位のレベ

アプローチに基づいた研究が行なわれたのが先駆けである (Langton, 1984; Ray, 1991)。

¹⁶ ここには基本的に、ヒトの内部メカニズムが行動を生成し、その行動が機能を表出するという流れがある。またそこには、ヒトの持つ意図や信念といった概念も、この流れによって形成されているものであるという主張が込められている。Tinbergen (1963) は、生物の行動を理解するには4つのなぜ(1. 機構、2. 発達、3. 機能、4. 進化)を問うことが重要だと指摘している。そして、ヒトが他者の心的状態を理解する能力もまた進化の産物であると考え、進化心理学の立場に重なる(長谷川・長谷川, 2000)。本論は、こういった立場からヒトの行動を理解していくことを支持するものである。

¹⁷ この3つのレベルは、もちろんそれぞれを明確に分離できるものではない。あくまでも脳を情報処理装置として見たときの、1つの見方を提供するものである。

ル(1.のレベル)に向かうほどに機能性を再現することに主眼を置くものになる。どちらの立場をとるかによって、構築する人工システムはまったく違ったものになる。

例として反射的な行動を再現する人工システムの構築を考えてみる。このとき、3.のレベルで現実を忠実に再現しようとするれば、それは対象とする反射行動がどのような脳神経細胞のネットワークによって実現されているのかを調査することになる。そのときには、解剖学や神経生理学で明らかにされている知見を基に人工システムを構築することになる。逆に1.のレベルでは、構築する人工システムは必ずしも物理的実体を持つものではなくなる。物理的実装としての具体物からは離れて、より抽象的な数理モデルを構築することになる。よって上位のレベルになるにしたがって、構築する人工システムは脳神経回路を忠実に再現しようとするものから、反射行動が持つ機能的特徴を再現するものへと変わっていくことになると考えられる¹⁸。

では、反射的な行動から意図的主体性を形成していく発達過程を人工システムの構築によって解明するには、どのレベルに着目するのが良いのだろうか。先ほども述べたように、人工システムが起こす行動は実際にヒトが行なう行動とは異なる。そのため、構成論的アプローチでは現実との接点を保ちながら人工システムを構築することが重要になる。しかしそれは、現実を忠実に再現すれば良いというものではない。なぜなら、現実を忠実に再現するという立場は、理解しようとするレベルによっては逆に調査対象の理解を妨げることがあるからである。例として、投げられたボールの軌道をモデル化することを考えてみる。もし野球のボールがヒトの手から放たれる場面を想定するなら、そのボールの軌道を記述する要素には、手から放り出される際の指の力の入れ具合いやボールの空気抵抗、風向きの変化やボールの回転状態など多くの要素が含まれる。しかし、放たれたボールがおおよそどのような放物線を描いて飛んでいくのかを明らかにするのであれば、ボールの体積や風の影響などを考える必要はないかもしれない。つまり、より一般的かつ普遍的な軌道のモデルを得ようとするならば、考慮すべき要素は少ないほど良いと考えられるのである。このように、ある現象を同じように説明する2つのモデルがあるなら、より単純な説明を行なうモデル(現象を記述する要素や前提条件が少ないモデル)を選ぶべきだ

¹⁸脳神経細胞のネットワークモデルは、現実を忠実に再現しようとするものから論理計算や関数近似を目的としたものまで様々なものがある。これらは人工ニューラルネットワークとして人工知能の分野で盛んに研究されている(川入, 1996)。また、これより上位のレベルに向かえば、構築する人工システムは神経細胞のネットワークを抽象化したモデルですらなくなり、計算を行なう数理モデルとしての特徴を強くしていくことになる。

とする考え方は、オッカムの剃刀として知られている (Poundstone, 1988) . 科学ではこれを事象の本質的な理解と捉えて、よりシンプルなモデルを構築しようとする .

ただし本論は、乳幼児に観察される行動を反射的なモデルとして構築するのが良いのか、それとも内部に意図性を形成することを仮定したモデルを構築するのが良いのかを判断しようとするものではない . 確かに、乳幼児が見せる原形的なコミュニケーション行動は反射的な行動として説明できることが多い . このため、その特定の行動を説明するモデルには反射的な行動モデルを用いるのがオッカムの剃刀の考え方に適うものであると考えられることがある¹⁹ . しかし本論は、内部に意図性が形成されることを前提としたモデルを構築する必要があるという立場を取る . これは、乳幼児が発達過程で見せる様々な社会的コミュニケーション行動を理解していくためには、説明対象とする行動とその発達過程の範囲を広げる必要があり、そのときには、乳幼児が見せるコミュニケーション行動は反射的な行動モデルでは説明できなくなると考えられるからである²⁰ .

この立場において、内部に意図的主体性を形成するモデルを具体的な物理的実装のレベルで構築するのが良いのか、それともより抽象的なレベルで構築するのが良いのかを考える . より単純なモデルを構築するというオッカムの剃刀の考え方に沿えば、取り組むべき人工システムはより抽象的な上位のレベルで構築することが望まれるだろう . しかし、現象の観察によって抽象的なモデルを構築しようとする場合には、通常は 3. のレベルで現象を忠実に記述するところからはじめる . それは、少数の現象から抽象的なモデルを構築するだけでは、その抽象的なモデルが他の多くの現象に当てはまるものかどうか分からないからである . だからこそ多くの現象を観察し、そこにある共通性から抽象的なモデルを構築するのである . またこれゆえに、3. のレベルの記述はなるべく詳細に、かつ現実を忠実に再現する必要が生じる . しかし、近年ではコンピュータシミュレーションやロボット技術の進展によって、抽象的なモデルに基づいたシステムを作り、それを動かすことができるようになった . つまり、人工システムの構築によって、どのような要素が現象の持つ機能性の表出に重要な役割を担っているのかを試行錯誤できるようになっているのである . 構成論的アプローチは、推論される仮説を抽象化モデルの構築によって検証しようとするところに大きな特徴がある . そして、その仮説の検証過程を通じてまた新たな仮説を

¹⁹ 行動主義的心理学ではこの立場が強調されることがある .

²⁰ この立場は、心というものの存在を前提にしてそのメカニズムを明らかにしていこうとする認知科学の立場に重なる .

提示し、それを検証するというサイクルを繰り返すことで、調査対象を理解する上で重要な役割を果たす要素が何であるのかを明らかにしようとする。また、抽象的なモデルを構築してそのレベルで重要な役割を担う要素を把握することで、その知見を基にして下のレベルの具体的な物理的実装を検討することができる。メカニズムを直接計測することが難しい対象を調査しようとするとき、人工システムを構築するという間接的な手法が有効性を発揮すると考える理由はここにある。つまり、行動観察から示唆される意図的主体性の機能性をメカニズムの観点から理解しようとするとき、物理的実装から離れて、より抽象的なレベルで人工システムを構築することによって、直接計測することが難しい乳幼児の内部メカニズムを検討していくことができるのではないかと考えられるのである。

本論では、この考えに基づいて抽象的なレベルの人工システムを構築する。このとき、構築する人工システムが実現しようとする機能は、行動観察の知見から指摘されている意図的主体性である。この意図的主体性は、共同注視において親の視線方向に自分の視点を向けるときに、複数のオブジェクトから自分の見るものを自律的に決めることができるという機能性を持つ。また、その機能性の実現には、内部に注視目標を持ち、その注視目標に従って自分の視点を適切に移動するような行動を親とのインタラクションを通じた学習によって獲得するというメカニズムが想定される。本論は、このメカニズムを2.のレベルで構築することに取り組む。これは、構築しようとするメカニズムをいきなり1.のレベルで構築しようとするのではなく、3.のレベルにある現実との接点を考慮しながら抽象的なメカニズムを検討するためである。脳活動計測から得られる脳機能の局在性²¹は3.のレベルに位置付けることができるので、2.のレベルで人工システムを構築し、意図的主体性を持った共同注視行動を学習するシステムの情報表現とアルゴリズムを検討することで、行動観察によって得られる機能性の知見(1.のレベル)と、脳活動計測によって得られる物理的実装の知見(3.のレベル)とを併せて、行動に関する内部メカニズムの理解を得ることができるのではないかと考えられる²²。

²¹ 厳密に言えばこれは、「ある特定の機能を持っている行動を起こしているときに活動する脳部位の局在性」のことだが、ここでは簡単のために「脳機能の局在性」と呼ぶ。

²² 3.のレベルには、神経生理学や解剖学に基づいて脳神経細胞を直接調べる方法がある。しかし、神経細胞のネットワークを抽象化したモデル(人工ニューラルネットワーク)が持つ機能は簡易的な記憶や関数近似に留まっている。これらの機能が局在化された脳部位の1つを表現することは十分に可能だと考えられるが、感覚-運動系において複数の部位が連動するモデルを検討する場合には、3.の物理的実装のレベルに脳神経細胞を位置付けるのは適切ではない。本論は1.のレベルに意図的主体性の持つ機能性を位置付け、3.のレベルに脳活動計測によって明らかになる脳機能の局在性を位置付ける。そして、その両者を橋渡し

本論は、意図的主体性という機能的概念を実現する人工システムを構築することによって、想定される内部メカニズムのモデル（仮説）を情報表現とアルゴリズムの観点から構成する。そして、このモデルを基に次の2点を問う。

- そのモデルが物理的実装のレベルとどのような接点を持つのか。
- そのモデルを基にして、次の発達ステップとしてどのようなモデルを考えることができるのか。

前者は脳活動計測によって明らかになるような脳機能の知見と比較することに相当し、後者は意図的主体性を鋳型にして他者の意図を理解するようになる過程を検討することに相当する。

1.4 本論の目的

本論では乳幼児が心的状態を形成し、理解するようになる発達過程の解明に取り組む。そして、その過程には論理的なメカニズムがあることを前提として、構成論的アプローチに基づく人工システムの構築を行なう。この人工システムの構築によって、心的状態を理解するようになる過程のメカニズムを、その情報表現とアルゴリズムの観点から解明することを目的とする。

この人工システムの構築においては、乳幼児が他者の心的状態を理解するようになる過程として、1. 意図的主体性の形成過程と、2. その意図的主体性を鋳型にした他者の意図理解過程があることを想定する。これは、他者の意図を理解することが、やがて他者の心的状態を理解する基盤になるという Tomasello (1995) の仮説を採用するものである。行動観察の知見として指摘される仮説を、抽象的なレベルで人工システムを構築することによって検証し、その物理的実装との接点を考察する。また、モデルの構築によって明らかになる知見からまた新たな仮説を提示し、これを検証するというサイクルを実施する。これによって、メカニズム的理解の難しい意図性のような主観的な概念の理解を深めることを目的とする。

するモデルとして、2. のレベルでの人工システムを構築する。意図的主体性を表出するメカニズムとして、その重要な要素が解明されていった先には、それぞれの要素がどのような物理的実装を持ち得るのかを検討する方法として、1. のレベルに特定の部位が持つ機能性を、3. のレベルに神経細胞をそれぞれ位置付けることができるようになると思われる。

1. 意図的主体性の形成過程に関する取り組み

乳幼児が見せる視線のコミュニケーション行動として共同注視の獲得過程に着目し、この行動の学習過程を人工システムで構築する。このとき、構築する人工システムは反射的な行動を基盤にして親とのインタラクションを繰り返し、その過程で自ら見ようとするもの（注視目標）を内部に形成する。そして、親の視線から自らの注視目標を内部に想起することにより、結果として、視線の先にある複数のオブジェクトにも自律的な解決を行なうことができるようになる。これを意図的主体性の持つ機能性と定義し、次の点を問う。

問い

親の視線という刺激から内部に注視目標を形成するための人工システムとして、そのアーキテクチャおよびそこでの情報表現と学習アルゴリズムはどのように構築可能か。

2. 他者の意図を理解する過程に関する取り組み

自ら見ようとするものを内部に形成するメカニズムに対応させて、他者の意図を理解することを、他者の見ようとするものを理解することと定義して次の点を問う。

問い

内部に注視目標を形成して意図的主体性を実現するメカニズムを鋳型にして、他者の意図を理解し、やがて他者の心的状態を理解するようになる発達過程はどのようなメカニズムを持った人工システムによって構築可能か。

本論は上記2点を問い、行動生成のメカニズムを「情報表現とアルゴリズム」のレベルで明らかにすることを目的とする。

1.5 本論の構成

本論は6章に分かれており、それぞれの章の内容は以下のようになっている。

2章では、先行研究をレビューして、本論が構築する人工システムの基礎要件を明らかにする。まず、視線のコミュニケーション行動を人工システムで構築する先行研究が、ど

のようなシステムによって構築されているのかを説明する．その後で，それらのモデルが持つ問題点を指摘し，本論が具体的に構築しようとするモデル（人工システム）の基礎要件を示す．

3章では，親の視線方向に自分の視点を移動するようになる共同注視を学習する過程で，意図的主体性として自ら見ようとする内部状態を形成する学習モデルを構築し，それをコンピュータシミュレーションでテストした結果を示す．また，同じアルゴリズムによって，オブジェクトを見てから親を見るという参照視の行動的側面が実現できることを示す．

4章では，反射的な行動とは別に，情動が不安になることによって引き起こされる参照視の行動モデルを構築する．ここでは親とのコミュニケーション機会を提供する情動的参照視や共有型の交互凝視が，意図的主体性を形成する学習モデルにどのように組み入れることができるのかを検討する．

5章では，意図的主体性を形成する学習モデルに基づいて，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なメカニズムとして理解できるようになるのかを示す．またそのメカニズムが，他者の心的状態を理解する能力に対してどのように位置付けられるのかを議論する．

最後に，6章で本論の結論と研究の展望を述べる．

第2章 人工システムの構築によるコミュニケーション行動の理解

前章では、反射的な行動から意図的主体性を形成する過程を理解することが、他者の心的状態を理解する能力の解明につながるのではないかと論じた。そしてこの仮説を検証するため、本論は抽象的なレベルで人工システムを構築し、意図的主体性という機能的概念を実現する行動がどのようなメカニズムによって生成されているのかを検討する。

本章は4つの節から構成される。まず2.1節において、人工システムで視線のコミュニケーション行動を実現する先行研究に触れて、2.2節で学習によって共同注視行動を獲得する3つのモデルを説明する。2.3節では、これらのモデルが持つ特徴にどのような共通性と問題点があるのかを述べる。ここでは特に、先行研究のモデルが感覚-運動間を直接つなげることによって、反射的な行動を獲得するモデルとなっていることを問題として指摘する。最後に2.4節で、この問題点に対してどのようなモデルを構築すべきだと考えられるのかを述べて、そのモデルの構築に必要と考えられる基礎要件をまとめる。

2.1 人工システムで構築する視線のコミュニケーション行動

近年、乳幼児に観察されるコミュニケーション行動に注目し、これを人工システムで構築する研究が相次いで報告されている (Breazeal and Scassellati, 2000; Imai et al., 2003; 小嶋, 2001; Kozima, 2002; Scassellati, 2002; Metta et al., 2001; Nagai et al., 2003; Jamone et al., 2006; Triesch et al., 2006)²³。そのほとんどは、乳幼児の発達過程に見られるコミュニケーション行動を参考にして、人工システムに社会性を獲得させようとするものだが、中には、乳幼児の発達過程を人工システムで構築することによってその発達過程を理解し

²³ここに挙げたのは、人工システムとして主にロボットを製作している研究である。

ようとするものがある．それぞれの研究の位置付けを簡単にまとめると次のようになる (Nagai, 2004) ．

- (a) ヒトと社会的なコミュニケーションを行なうロボットを構築する研究 (Breazeal and Scassellati, 2000; Imai et al., 2003)

ヒトと社会的なコミュニケーションを行なうことができるロボットの構築が主な目的とされている．このため，コミュニケーション行動は全て予め設計され実装される．

- (b) 乳幼児の発達過程に見られるコミュニケーション行動を人工システムで構築する研究 (小嶋, 2001; Kozima, 2002; Scassellati, 2002)

乳幼児の発達過程に見られるコミュニケーション行動に注目するが，その行動（例えば共同注視）によって，ロボットとヒトとの社会的なコミュニケーションがどのように成立するのかを問い掛けている．このため，(a) と同様に基本的に行動は予め設計され，発達過程としての人工システムの構築は行なわれない．

- (c) ロボットへの発達モデルの実装を通じて乳幼児の発達過程を理解しようとする研究 (Metta et al., 2001; Jamone et al., 2006; Nagai et al., 2003; Triesch et al., 2006)

乳幼児の発達過程を人工システムの構築によって理解しようとする研究である．本論が対象にするのはこの目的を持つ研究である．

視線のコミュニケーション行動である共同注視を学習によって獲得する人工システムの構築で先駆けとなったのは Matsuda and Omori (2001) の研究である．Matsuda らは，共同注視を強化学習によって獲得するモデルを構築し，これをコンピュータシミュレーションでテストする研究を行なっている．同じように，Triesch et al. (2006) も視線によって注意を共有するメカニズムの解明を目指したプロジェクトの中で，強化学習によって共同注視を獲得するモデルを構築し，これをコンピュータシミュレーションでテストする研究を行なっている．また，Nagai et al. (2003) は，浅田らが提唱する認知発達ロボティクス (Asada et al., 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．

次節では，これら3つの人工システムがどのような行動生成のメカニズムを持つのかを確認する．そして，それぞれのモデルが共同注視の獲得過程をどのように理解しようとするものであるのかを整理する．

2.2 学習による共同注視行動の獲得

Matsuda and Omori (2001) や Triesch et al. (2006) のモデルは、強化学習を用いて共同注視行動を獲得する。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仕組みである (Sutton and Barto, 1998)。この仕組みを使うと、共同注視は親の視線という刺激とその方向に視点を動かす行動の結び付きによって実現されることになる。

この仕組みによって共同注視を学習するときの基本的なメカニズムを説明する。図 2.1 のような入出力を持つ乳幼児エージェント（以下、子エージェント）を考える。子エージェントは外から観察すれば刺激-反応系であり、その内部は感覚-運動系である。刺激として与えるのは親の視線方向とオブジェクトの配置であり、これはそのまま子エージェントが受け取る感覚情報になる。子エージェントはこの感覚情報に自分の視点の運動方向を何らかの方法で結び付けて、自分の視点を移動させる。

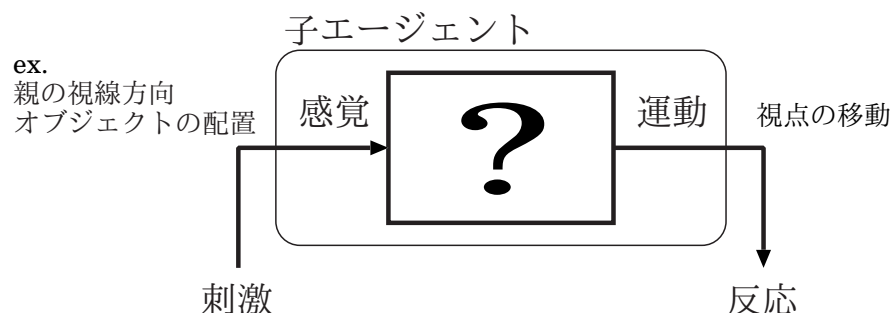


図 2.1: 子エージェントの感覚-運動系

この感覚-運動系を強化学習で構築する場合に問題になるのは、次の2点である。

1. どのような報酬を設定するか
2. その報酬を高めるために感覚と運動の対応関係をどのように修正するか

報酬の設定は、子エージェントが何らかの行動を行なった結果として受け取った刺激が自分の好むものであるとき、その行動を強化することを意味する。具体的には、例えば親の視線の先にあるオブジェクトを見ることができたとき、それを報酬として受け取る場合

には、その報酬に寄与したと判断される行動の価値を上げて、次回に同じ刺激を受け取ったとき、報酬が高かった行動を選択するようにシステム内部の行動関数を修正することになる。

この基本的な仕組みを踏まえて、Matsuda and Omori (2001)、Triesch et al. (2006)、Nagai et al. (2003) それぞれのモデルがどのようなメカニズムで共同注視を学習するのかを説明する。

2.2.1 Matsuda and Omori (2001) の学習モデル

Matsuda らのモデルで想定されるのは、図 2.2 のような状況である。子エージェントと親エージェントが正対している状況で、子エージェントの視界には親と複数のオブジェクトが映っている（図 2.2 左）。また、子エージェントが見えない位置には、左右におもちゃが置かれている（図 2.2 右）。ただし、このおもちゃは親が見た方向にのみ現われるように設定される。

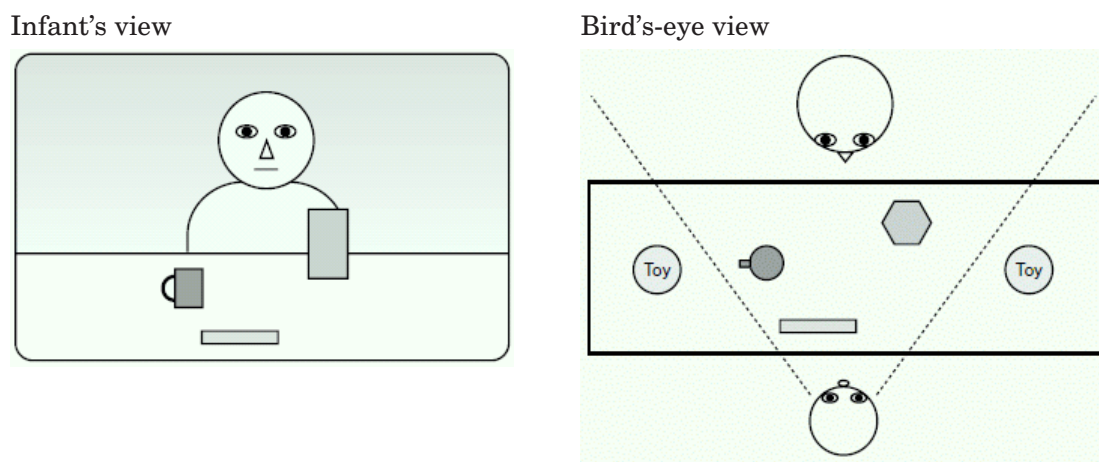


図 2.2: Matsuda らのモデルで想定されるインタラクション環境 (Matsuda and Omori, 2001, Figure.1)

この状況で子エージェントは、視界に映るオブジェクトを見ている状態 (S_1)、親を見ている状態 (S_2)、親の見ていない方向に視点を移動する状態 (S_{goal}) をそれぞれ認識する。これを状態遷移として図 2.3 のように書くと、共同注視は、 $S_1 \rightarrow S_2 \rightarrow S_{goal}$ をたどる行動

として定式化される．Matsuda らのモデルでは， S_2 から S_{goal} への遷移が起こったときにのみ報酬が与えられる．つまり， S_2 から S_{goal} への遷移が起こったときにのみ子エージェントは視界の外にあるおもちゃを見ることができて，嬉しさを感じられると仮定されている．

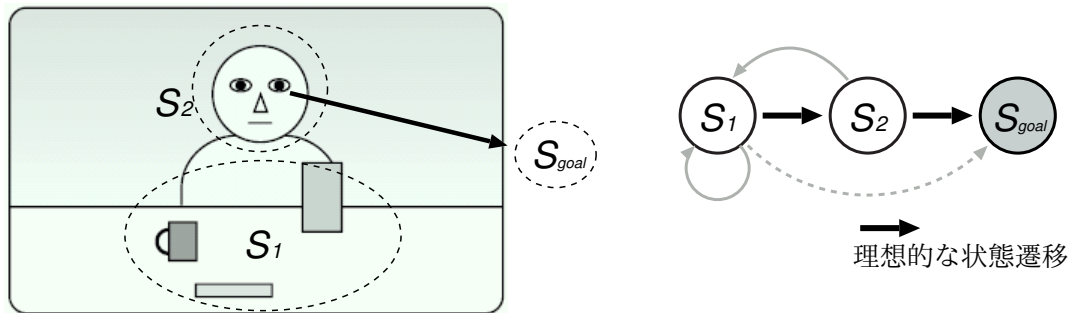


図 2.3: 子エージェントの状態認識とその遷移 (Matsuda and Omori, 2001, Figure.2 を改変)

右の状態遷移図における点線の遷移は著者が書き入れたものである．Matsuda らのモデルにおいては， S_1 と S_2 は初期段階で S_0 という一つの状態認識であることを仮定し，その S_0 から状態が分離する過程を考えることに焦点を当てている．最初から S_1, S_2 の状態が用意されたときには， S_1 から S_{goal} への経路を考えることができるため，この点線を書き入れた．

図 2.3 に定式化した共同注視の状態遷移は，強化学習において actor-critic と呼ばれる構造と，TD (temporal difference) 学習と呼ばれる学習方法を用いて獲得される (Sutton and Barto, 1998)．詳細を説明すると非常に込み入ってしまうので，ここでは考え方だけを説明する．学習システムには actor と呼ばれる運動学習器と critic と呼ばれる評価器が用意される．Matsuda らのモデルでは actor を人工ニューラルネットワークで実装する．ただし，この部分は入力される状態信号と行動を評価器によって修正できるものなら何でもよい²⁴．critic には TD 学習が用いられる．TD 学習は，報酬を得られた行動に対してその報酬に至るまでに選択された行動の全てに，その報酬を還元するアルゴリズムである．このため，親を注視している状態 (S_2) から親の視線方向に視点を移動させる状態

²⁴一般的には確率分布が使われることが多い．

(S_{goal}) になったときにしか報酬を得なくとも、オブジェクトを注視している状態 (S_1) から親を注視するに至った行動に報酬が還元されるようになる。こうして actor は、例えばコップを見ている状態から、次にもまたオブジェクトである積み木を見るよりは、親を見る方が報酬を得られることを学習することになるのである。

2.2.2 Triesch et al. (2006) の学習モデル

Triesch らのモデルでは図 2.4 のような状況が想定される。フィールドはグリッド（六法格子）に分割され、そこに親エージェント、子エージェント、オブジェクトが配置される。1つのグリッドには2つ以上のオブジェクトは配置されない。また、最初に配置した親エージェントと子エージェントは移動しない設定になっている。この環境の中で、子エージェントはグリッドを視点として、そこにいる親や置かれたオブジェクトを注視する。ここで子エージェントはある対象を注視し続けると、徐々に慣れることによって視点の移動が起こるようになっている。

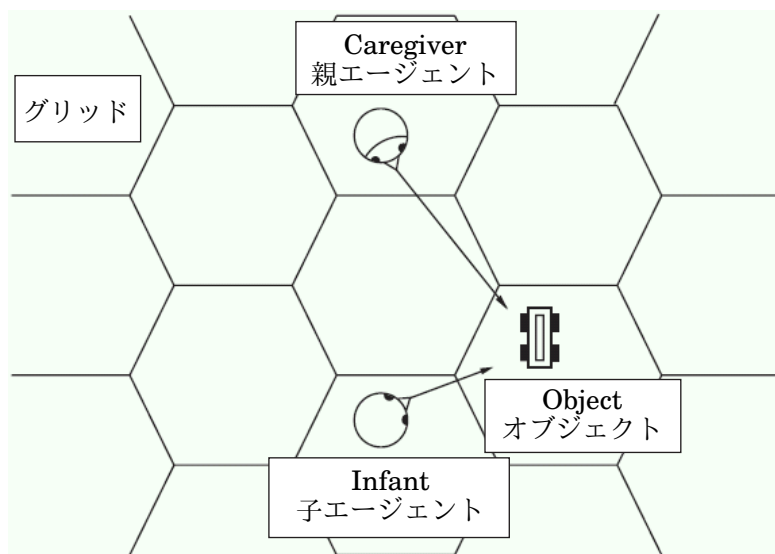


図 2.4: 想定するインタラクション環境 (Triesch et al., 2006, Figure.1)

報酬は親を見たとき、もしくはオブジェクトを見たときに与えられる。このとき、親はオブジェクトが置かれた方向に視線を向けていることが仮定されている。子エージェント

は、注視するグリッドにオブジェクトがあるのか、親がいるのか、それとも何も映っていないのかを知ることができる。また親を見たときには、親の視線方向も知ることができる。

Triesch らのモデルでは、TD 学習によって感覚-運動系が構成される。学習過程は次のように進行する。まず子エージェントは親のいる場所を注視するようになる。これは、親を見ることに報酬が設定された状態で親がいつでも同じ場所にいるという状況を体験するために、どこを見れば親がいるのかをすぐに学習できるからである。ただし、オブジェクトの方はランダムに場所が変わるので、特定の行動によってオブジェクトを見ることができるという状況ではない。しかし、親は必ずオブジェクトを見ているという状況があり、かつ子エージェントは親を見たときに親がどこを見ているかという情報を得ることができる。このとき、親を見た後にオブジェクトを見ることができた場合に、親を見ていたときの親の視線方向と、視点を移動させた行動の関係を強化すれば、子エージェントは親が見ている方向に対応する行動を学習することになる。つまり、何も置かれていないグリッドを見ているとき、闇雲に視点を動かしてもオブジェクトを見ることはできないが、親を見れば、親の視線が情報手掛かりになってオブジェクトを見つけられる確率が高くなるのである。こういった状況を学習することによって、子エージェントは共同注視を獲得するようになる。

2.2.3 Nagai et al. (2003) の学習モデル

Nagai らは、視野内に映る親やオブジェクトを注視する体験を通じて、親の視線から視野外のオブジェクトを注視できるようになる学習モデルを構築し、これをロボットに実装している。Nagai らは、ある行動を足掛かりにして別の行動を獲得する発達過程をブートストラップ学習と呼んでいる。この学習モデルでは、まず視野内に映るものを注視する視覚定位²⁵の行動が用意される。Nagai らはこれを生得的な行動に位置付け、フィードバックゲイン制御を用いて実現する（図 2.5：視覚定位）。また、視覚定位に並置される形で学習器が用意され、学習器の出力と視覚定位の出力は切替器によって切り替えられる（図 2.5：学習器と切替器）。

切替器は、最初のうちは視覚定位側だけが使われる。学習はヒトを注視したところ（ヒ

²⁵Nagai らのモデルでは視覚定位を視覚注視と呼ぶが、本論では視覚に関する定位行動を視覚定位と呼ぶ慣習に従った。これは音に関する定位行動を音源定位と呼ぶことに倣ったものである。

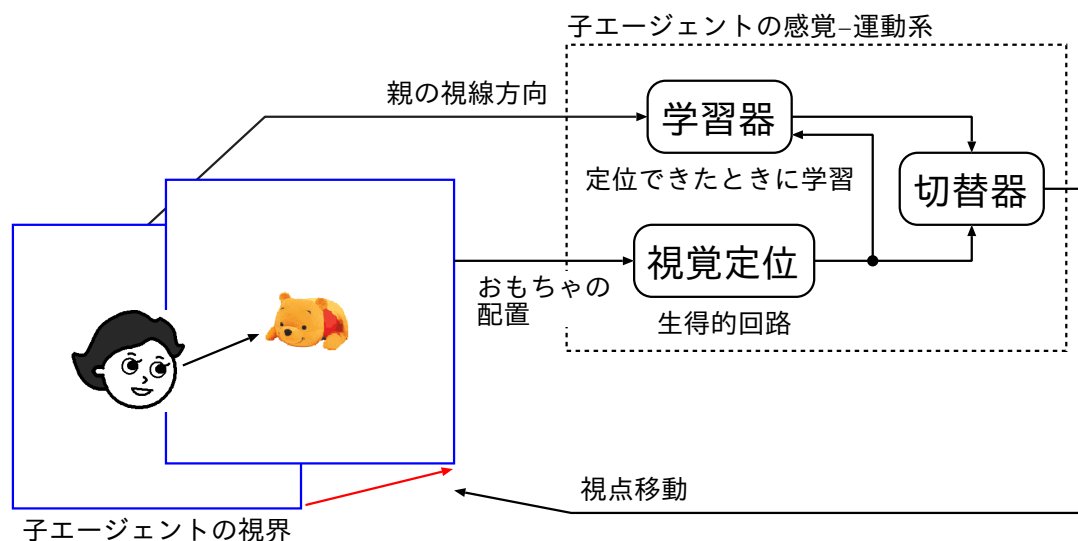


図 2.5: ブートストラップ学習を実現する感覚-運動系

トを視界の中央に捉えたところ)からはじめる。視界に現われたオブジェクトを注視することができたとき、学習器は親の視線特徴と視点の運動方向を学習する。具体的には、学習器は3層型の誤差逆伝播則を持った人工ニューラルネットワークによって構成される。視覚定位を通じて得た経験によって蓄積された入出力信号(親の視線特徴と視点の運動方向)を使い、誤差逆伝播法によって入出力信号の近似関数を学習する。学習器側の学習が進んできたら、切替器は徐々に視覚定位から学習器側に選択率をシフトさせていく。こうしてヒトの顔を見たとき、その視線方向に自分の視点を移動させることが可能になり、視界の外にあるオブジェクトを見つけることができるようになる。

2.3 先行研究の特徴に見られる共通性と問題点

3つのモデルでは共通して、共同注視の関係(親の視線と視点移動)を学習するための報酬が重要な意味を持つ。Matsudaらのモデルでは、親の顔を見て、その視線方向を見ることができたときに子エージェントが嬉しいと感じるように設定されている。親の視線を追従することに嬉しさを感じるというのは奇妙だが、Matsudaらのモデルでは親の視線の先に面白いおもちゃがあり、それを見ることができるということを仮定している。この考え方は、Trieschらのモデルでは親やオブジェクトを見ることができたときに嬉し

さを感じるという設定でシンプルに実装されている．それは，今見ているものが面白くなっているときには，闇雲に視点を動かすよりは親を見る方が面白いものを見つけやすいことを子エージェントが学習によって知ることになるという考え方である．また Nagai らのモデルでも，親の視線と，その次に見たオブジェクトを子エージェントが学習している．これは，オブジェクトを見ることができた状態を学習の報酬と考えることに他ならない．この意味で，学習に用いるアルゴリズムには強化学習と人工ニューラルネットワークという違いがあっても，実現しようとするメカニズムとその機能性は同じであることが分かる．つまり，親の次にオブジェクトを見ることができたとき，親の視線方向と自らの視点の移動方向を学習するという仕組みが同じなのである．ここには，親の視線の先にオブジェクトがあるという随伴的な経験を自己評価によって取り込む仕組みがある．

共同注視を学習によって獲得することを考えるときには上記の2点が基本的に必要とされるメカニズムだと考えられる．しかし，この2点のメカニズムさえ持っていれば，共同注視行動のモデルとして適切かと言えばそうではない．なぜなら，感覚-運動間を直接結び付けると，曖昧な状況が基本的に親の視線が持つ情報の解像度に依存して解決されるようになるからである．例えば，図 2.6 のように親の視線の先に複数のオブジェクト（▲と■）が置かれた状況を考える．すると先行研究のモデルは，親の視線が持つ情報量だけを頼りに自分の視点を移動させることになる．しかし，ヒトのコミュニケーションでは，同じ方向を見ていても見ている対象は違うという場合が考えられる（図 2.6：右）．

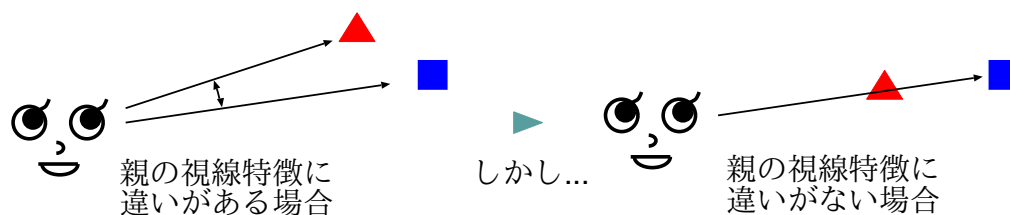


図 2.6: 親の視線特徴に違いがない状況

Triasch らは，Nagai らのモデルが同一視線にある複数のオブジェクトを特定することができないことを指摘して，これを解決するためにオブジェクトが配置されている距離情報を子エージェントに受け取らせるようなモデルを構築している (Jasso et al., 2005)．しかしこのモデルの構築は的外れである．なぜならそれは，▲と■を親が同じ視線方向で

見ているとき、近い距離には必ず▲があって、遠い距離には■があるという状況を想定することに他ならないからである。オブジェクトの配置が必ず決まった距離感を持っているという状況は考えにくい²⁶。

曖昧な状況として▲と■がほとんど同じ場所にある場合、ヒトは相手の視線を高い精度で見分けることによって曖昧性を区別するのではなく、相手の見ようとするもの（意図）を理解することによって曖昧性を解消するのではないかと考えられる。この「見ようとするもの」を知ることが、他者の意図を理解することの原初的な状態と考えられる。そして、1.2節で論じたように、他者の見ようとするものを理解するときには、乳幼児自身がその内部に形成する注視目標（目的）とそれに従った適切な視点運動（手段）のセット（目的と手段のセット）を推論に用いるのではないかと考えれば、最初に取り組むべきなのは注視目標を内部に形成する過程のメカニズムではないかと考えられるのである。これを共同注視にあてはめた場合、親の視線を受けて乳幼児は何らかの「見ようとするもの」を内部に形成し、その注視目標に従った注視を行なうのではないかと考えられる（図2.3）。

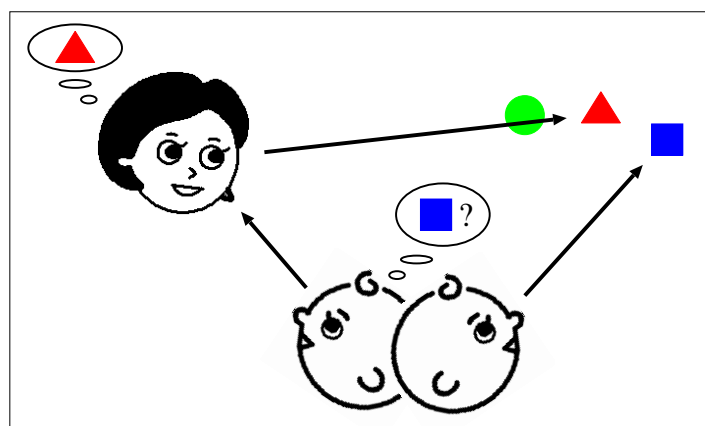


図 2.7: 注視目標を持った状態での共同注視：

親の顔を見たとき、乳幼児は何らかのオブジェクト（ここでは■）を想起し、それを見ようとする。従って、この段階では親のしているもの（ここでは▲）と、乳幼児が見ようとするものは異なる場合がある。

ただしここで注意すべきなのは、注視目標を持つだけの状態では図2.3に示すように親

²⁶ 壁掛け時計は遠くにあって、コップのようなものは近くにあるというような、ある程度の構造的規則性は環境に仮定できるのかもしれないが。

のしているものと一致しないオブジェクトを見ることが考えられることである。しかし本論が解明しようとしているのは、自らの見ようとするものを足掛かりにして他者の見ようとするものを理解するようになる過程のメカニズムである。注視目標を形成する過程は、他者の見ようとするものを理解するようになる過程の第1ステップに相当する（第2ステップ（形成した注視目標を足掛かりにして他者の見ようとするものを理解する過程）に関しては第5章で議論する）。次節では、この考えに基づいた人工システムがどのように構築できるのかを検討し、その基礎要件を整理する。

2.4 構築する学習モデルの基礎要件

共同注視の学習は、Nagai らが主張するように視覚定位のような反射的な行動を基盤にしてブートストラップ的に行なわれるのではないかと考えられる。これは第1章で論じた発達過程の知見からも支持できる考え方である。しかし Nagai らのモデルでは、視覚定位と共同注視の学習回路を並列に配置することによって、Triesch らのモデルと同じように親の視線方向と自分の視点の移動方向を直接結び付けることになっている。こういった並列的な構成では、追加される行動生成モジュールもまた反射的な行動になってしまう。共同注視が反射的な行動になることの問題点は前節に述べた通りである。

反射的な行動を基にして、より意識的な行動を生成するモジュールが形成されるとき、そのアーキテクチャには並列的な階層性を想定するのが一般的である²⁷。それは、意識的に行動する仕組みとは別に、特定の刺激に対して反射的に応答してしまう仕組みが併存していると考えられているからである。ヒトの眼球運動には多くの反射運動が備わっていることが知られており、その中でも視運動性眼振と呼ばれる運動（蘆田, 2004, p.1156）は、視界の周辺に提示される運動性の刺激に反射的に反応する運動として知られている²⁸。そしてこういった反射運動は、意識的に見ようとする行動とは別に無意識的に注意を向けてしまう行動として機能している²⁹。

²⁷ 並列的な回路構成を持つ Nagai らのモデルには、反射的な視覚定位モジュールと共同注視の学習モジュールが切替器によってどのように併存するのかが明らかではないという問題があるが、これは本論では扱わない。

²⁸ こういった周辺視に対する敏感性は乳児においては3ヶ月程度までに発達する運動であることが Atkinson et al. (1992) によって確認されている。

²⁹ こういった並列的なアーキテクチャの重要性を Brooks は Subsumption Architecture として主張して

また眼球の運動だけを考えた場合には、共同注視は反射的な行動としての側面を持つことが知られている (Hood et al., 1998; 板倉, 2005)。Hood et al. (1998) は4~5ヶ月程度の乳児を対象に、Posner (1980) の手掛かりパラダイムを用いた実験を実施している (図 2.8)。この実験では、まずコンピュータディスプレイの中央に注視点を置き、そこに左右どちらかを見ているヒトの顔を表示する。そして次の瞬間にヒトの顔を消した後で、左右どちらかに何らかのオブジェクト (probe) を表示する。この実験から、ヒトが見ている方向に現れるオブジェクトの方が、注視するまでに掛かる時間が数百ミリ秒のオーダーで短いという結果が得られている。また、オブジェクトが表示された方向とは逆の方を見てしまう頻度は、ヒトが見ている方向とは反対にオブジェクトが表示された場合の方が、そうではない場合に比べて2倍程度多いという結果も得られている。つまり、4~5ヶ月程度の乳児において、他者が見ている方向に視点を移動させる傾向を持つことが確認されているのである。さらに板倉 (2005) は、図 2.9 のような線画を視覚刺激として提示したときの視線の移動を計測している。この実験においても、7ヶ月程度の乳児が線画の目が寄っている方向に優位に注意を向けることが確認されている。成人においては、矢印のような刺激に対しても、その矢印の方向に注意のシフトが起こりやすくなることが知られている (Corbetta et al., 2002)³⁰。

こういった反射的な共同注視から他者の見ているものを推論する過程を考えれば、親の視線に対してとにかく反射的にその方向に視線を動かしてしまっ、視点を動かした先にある対象の中から親の見ているものを推論するという仕組みを考えることもできる。より身近な例としては、街中で群衆がどこか一方向を見ている状況に遭遇したときに、反射的に皆が見る方向を見てしまった後で、皆が見ているものを推論するというメカニズムを考えることもできる。

確かに、ヒトが注意を向けるときにはこのような仕組みに従うこともあるだろう。しかし本論では、共同注視は反射的な行動のままではないと考えている。なぜなら、7ヶ月程度までに獲得される眼球運動の共同注視に対しては視運動性眼振のような周辺刺激に対

いる (Brooks, 1986, 1992)。この主張に基づいて構築された並列回路の自律分散的なシステムは原始的な昆虫の歩行をうまく再現したが、より複雑な行動計画を必要とするシステムの構築には至っていない。直列的かつ中央集権的なシステムの批判から提案された並列的かつ自律分散的なシステムであったが、現在ではヒトの持つシステムはその中間にあるのではないかと考えられている。

³⁰ 感覚-運動間を直接結び付ける先行研究のモデルは、こういった反射的な共同注視を想定することになると考えられる。

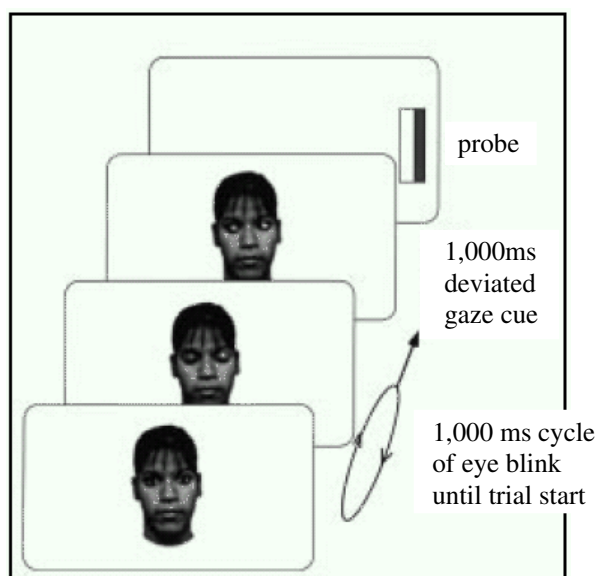


図 2.8: 4～5ヶ月程度の乳児を対象にした Hood et al. (1998) の視覚実験
(Fig.1 より抜粋)

する反射的な運動を想定しても，Butterworth and Jarrett (1991) や Corkum and Moore (1995) が8ヶ月程度から始まると報告する共同注視の学習過程においては，反射的な行動を基盤にして，内部に注視目標を形成する仕組みがあるのではないかと考えるからである．このときには，先ほどの例の中で皆がある方向に視線を向けているとき，ヒトの内部でその方向を見ようとする状態が生起されていることを想定することになる³¹．本論で問



図 2.9: 7ヶ月程度の乳児に提示された視覚刺激 ((板倉, 2005, p.126, 図 6) より抜粋)

³¹このとき，ヒトが「何があるのだろうか?」と思って推論を働かせて，その方向を見る／見ないを判断することが，ヒトの意図的主体性を表わすことになると考えている．

いたいのは、他者の見ているものの推論に使われる自分自身の目的と手段のセットがどのように形成されているのかということであり、逆にそれがどのように構築されていれば、他者の見ようとするものを推論する仕組みが実現できるのかということである。

このように考えると、より高次の行動を獲得していくいずれかの段階に、反射的な行動を生成する並列回路から直列的な回路構成を持つようになる過程があるのではないかと考えられる（図 2.10）。これはつまり、視覚定位のような反射的な行動生成回路に、共同注視を学習する回路を直列に前置接続することを考える必要があるのではないかということである。

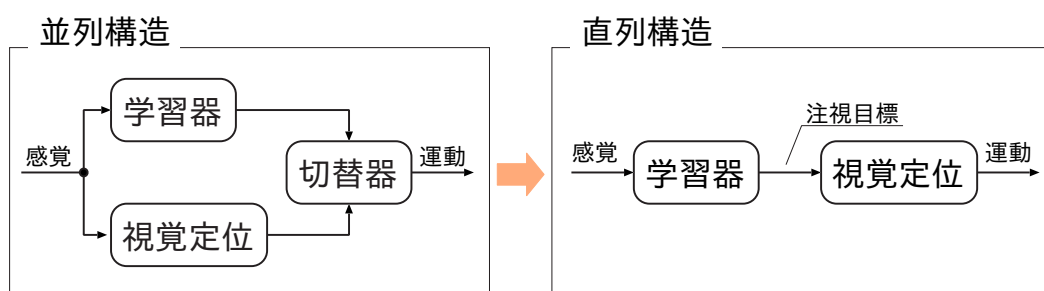


図 2.10: 並列回路（Nagai et al. (2003) のモデル）と直列回路

ただし、回路のアーキテクチャを並列から直列にすると、そこにはまた新たな問題が発生する。共同注視の学習には、先述したように2つの基礎要件がある。

- 親の視線方向と自らの視点の移動方向を学習するという仕組み
- 随伴的な経験を自己評価によって取り込む仕組み

追加する学習モジュールが、直列的な前置接続の回路構成でこの要件を満たすには、さらに2つの問題を解決しなければならない。

- 従来持っている反射的な行動を機能させたままで、共同注視を学習するモジュールを構成する必要がある。
- 視覚定位が持っている感覚と運動の情報表現をそのまま使用する必要がある。

次の第3章では、直列的な回路構成で共同注視行動を学習するモジュールがどのようなアルゴリズムで構築できるのかを検討する。

第3章 共同注視と意図的主体性の形成

第1章では、乳幼児が共同注視行動の獲得過程において意図的主体性を形成するのではないかということを論じ、これを人工システムの構築によって解明する方法が考えられることを述べた。これを受けて続く第2章では、人工システムで共同注視行動を構成する先行研究を挙げて、それらのモデルが親の視線（感覚）と視点の移動（運動）を学習器によって直接結び付ける構造を持つことに言及した。そしてこの構造には、視線の先に複数のオブジェクトが置かれたような曖昧な状況が、親の視線という感覚情報の解像度にのみ依存して解決されるという問題があることを指摘した。

本論では、この問題を解決する方法として、注視目標とその手段を直列的な回路構成によって実現することを提案する。構築する人工システム（子エージェント³²）は、視覚定位という反射的な行動を基盤にしながら親とのインタラクションを繰り返し、その経験を通じて内部に注視目標を形成するものになる。この人工システムが直列的な回路構成において共同注視行動を学習するシステムを構築するには、

- 親の視線方向と自らの視点の移動方向を学習する仕組みと、
- 随伴的な経験を自己評価によって取り込む仕組み

を持つと共に、

- 反射的な行動である視覚定位を機能させたままで、共同注視を学習するモジュールを構成し、
- 視覚定位が持っている感覚と運動の情報表現をそのまま使用する必要がある、

ということを前章の最後で指摘した。

³²第2章での表記に倣って、ここでも乳幼児の行動生成メカニズムについて構築するモデルを子エージェントと呼ぶ。

本章では、直列回路によって内部状態が目的として機能する学習モジュールが具体的にどのように構築できるのかを考える。そのため、本章では次の手順で共同注視を学習するモデルを構築し、その動作をコンピュータシミュレーションによって確認する。

1. 反射的な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り、視運動性眼振のような視界の周辺刺激に対する眼球の反射運動を想定するものである (Atkinson et al., 1992)。ただし、実際に構築する抽象モデル (子エージェント) においては、眼球運動と頭部運動を区別しない。また、この反射的な行動に7ヶ月程度までに発達すると言われる反射的な眼球の共同注視運動 (Hood et al., 1998; 板倉, 2005) を想定することもできるが、本論ではあくまでも反射的な行動を基盤にして内部に注視目標を形成することで共同注視を実現するモデルの構築を考える。このモデルでは、8ヶ月程度から始まると言われる共同注視の条件付け的な学習過程を想定する。

2. 視覚定位の能力が用意できたら、そこに直列的に学習回路を挿入する。

この直列的に挿入される回路が、既存の情報表現 (フォーマット) を用いながら、どのような学習アルゴリズムを持てば、親の視線方向に自分の視点を移動させる共同注視行動を実現できるのかを考える。

本章は8つの節から構成される。まず3.1節で、構築するモデル内の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説明する。次いで3.2節で、視覚定位をどのようなシステムとして用意するのかを述べる。これを基にして3.3節では、直列的に配置する学習モジュールがどのようなアルゴリズムによって注視目標として機能しつつ共同注視を学習できるのかを検討し、具体的なモデルを構築する。3.4, 3.5節では、感覚情報に自己受容感覚がある場合の視覚定位と共同注視の学習システムを構築する。この自己受容感覚がオブジェクトを注視してから親を見る参照視行動において、親を指し示すシグナルになることを示す。3.6節で、構築したシステムの学習規則を整理し、3.7節でその動作機構を解析する。最後に3.8節で意図的主体性を実現する機構とその機能を詳述し、システムが持つ機構が乳幼児にどのような能力を仮定することになっているのかを議論する。また、この議論から明らかになる問題点を整理し、次章での取り組みを述べる。

3.1 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（図 3.1）．子エージェントは1[m] 四方の視界を持ち，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奥行き情報は含まれず，また，子エージェントも奥行きに関する情報を再構成しない．視界の移動は頭部運動を想定し，視界は平面内を移動する．

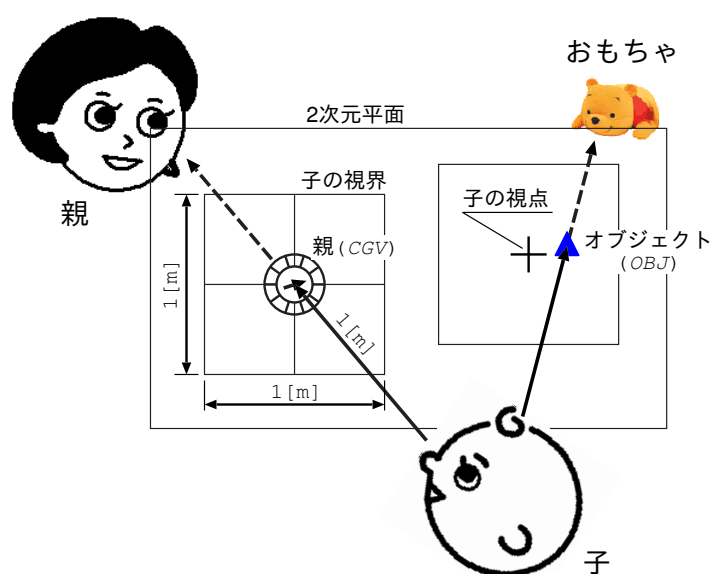


図 3.1: 子エージェントの視界設定

子エージェントがこの視界から受け取る感覚情報は離散状態で表現する．情報の種類には，親やオブジェクトの特徴情報と配置情報を用意する（図 3.2）．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のかを表わす情報である．次節ではこの感覚情報を使って，まず視覚定位を行なうモデルを構築する．

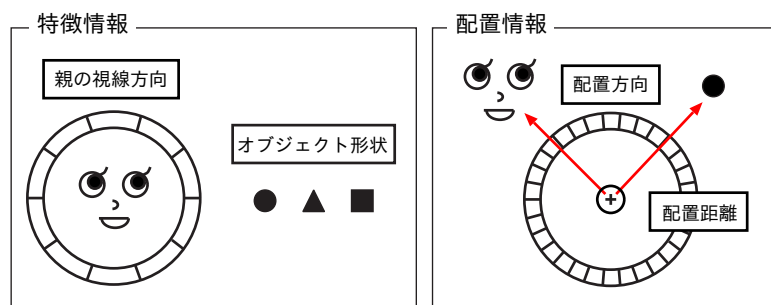


図 3.2: 視界から受け取る感覚情報

3.2 視覚定位

視覚定位は視界の端に映る親やオブジェクトを反射的に注視する行動である．子エージェントがこの視覚定位を起こすには，図 3.3 のような感覚-運動間を結ぶシステムを構築する必要がある．本節ではこのシステムがどのように構築できるのかを示す．ここで重要なことは，離散状態で用意された感覚と運動の情報フォーマットを使って，視界に映る親やオブジェクトを注視できるようなシステムを用意することである．ただし本章が問題にするのは，この視覚定位モジュールに直列に接続する学習モジュールがどのようなアルゴリズムを持てば共同注視を獲得できるのかということである．このため極端に言ってしまうと，視覚定位を実現するときの内部メカニズムはどのようなものでも構わない³³．

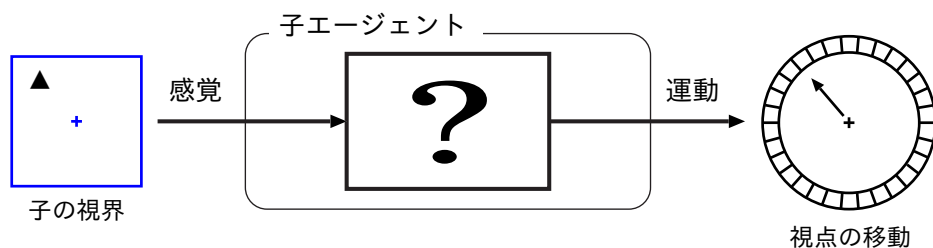


図 3.3: 感覚-運動間を結ぶ視覚定位モデルの枠組み

以下に視覚定位のモデルを示す．

³³視覚定位を実現する内部メカニズムに興味があれば，この節は読みとばしてしまっても構わない．

3.2.1 視覚定位モデル

感覚情報の解像度は表 3.1 のように設定する．特徴情報は円周を 10 分割した親の視線方向と 3 種類のオブジェクト形状から構成し，配置情報は 30 分割の配置方向と注視したか否かの 2 値情報で構成する．ここで特徴情報の表現形式は，親の視線とオブジェクトの形状を同一に扱うように設計する．つまり，親の視線方向とオブジェクトの形状には区別がなく，単純に 13 個の状態として表現される．これは，視覚刺激にはそれが親なのかオブジェクトなのかを明示的に示す情報が含まれないようにするためである³⁴．

表 3.1: 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}

感覚情報は特徴情報と配置情報をベクトルによって構成し，それぞれの状態に一意に決まる番号を割り当てる．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， $781 (= (10 + 3) \times 30 \times 2 + 1)$ 状態になる．また，運動方向（視点の移動方向）の解像度は円周を 30 分割した 12 度とする．

この感覚と運動の情報フォーマットに対して，視覚定位はどのように用意できるだろうか．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．この方法を使えば，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視覚定位を設計することができる．しかし本論のように，構築するモデルをコンピュータシミュレーションによって動かす場合には，感覚情報は予め決めずに試行錯誤することが考えられる．そのため，本論では視覚定位の実現に学習の仕組みを用意する．

この学習アルゴリズムには強化学習を用いる．強化学習は，受け取る感覚情報に基づいて選択した行動（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修正する仕組みを持った学習方法である．この強化学習

³⁴本論では，このような感覚情報を用意したときに，構築する子エージェントが共同注視を獲得するにはどのような能力を仮定する必要があるのかを検討する（3.3.1 節）．

は Matsuda and Omori (2001) や Triesch et al. (2006) のモデルにおいても使用されているが、本論は視覚定位の学習に強化学習を使用するのであって、共同注視の獲得に対して使用するのではない。

視覚定位を学習するモデルを図 3.4 のように選択器、評価器、運動学習器により構成し、強化学習の仕組みを実装する。以下に各モジュールを説明する。

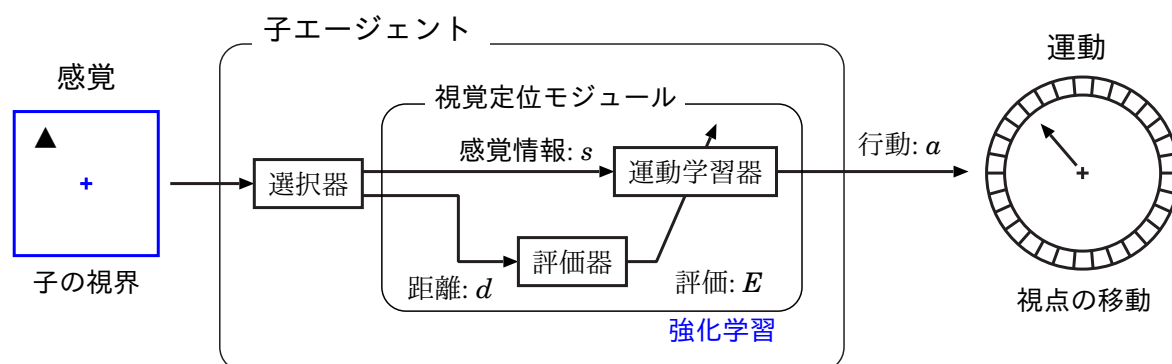


図 3.4: 視覚定位モデルのシステムブロック図

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。これを感覚情報（ s ）として運動学習器に伝える。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。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、この後で共同注視を学習するため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。学習器に送られる感覚情報の解像度は表 3.1 に示したとおりである。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) を運動学習器に伝える．

$$E_t = \begin{cases} 1 & \text{if } d_t \leq d_{t-1}, \\ -1 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (3.1)$$

ここで， t は離散時間で進行する．

運動学習器：

運動学習器は，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) が運動学習器に伝えられるとき，運動学習器は，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．

$$p(a_t | s_t) = \frac{e^{Q(s_t, a_t)/\tau}}{\sum_{a'=1}^{N_a} e^{Q(s_t, a')/\tau}}. \quad (3.2)$$

ここで， τ 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 方式として知られる強化学習アルゴリズム (Sutton and Barto, 1998) を用いる．Sarsa 方式は遅延報酬に対応できる．なぜなら，親やオブジェクトを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になっているからである．ただし，その場合には学習速度が遅くなり，学習の確実性も低下する．そのため本論では，共同注視を学習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確実に用意するために，評価器から適切な報酬を逐次得ることができることを仮定する．

Sarsa 方式における行動価値の更新は次式に従う．

$$Q_{t+1}(s_t, a_t) = Q_t(s_t, a_t) + \alpha_Q \{r_t + \gamma Q_t(s_{t+1}, a_{t+1}) - Q_t(s_t, a_t)\}. \quad (3.3)$$

ここで α_Q は学習率, γ は割引率である. r_t は評価器による評価 (E_t) から次式で算出される.

$$r_t = E_t - \tilde{r}_t, \quad (3.4)$$

$$\tilde{r}_{t+1} = \tilde{r}_t + \alpha_r(r_t - \tilde{r}_t). \quad (3.5)$$

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

3.2.2 視覚定位の学習

ここでは, 子エージェントが視覚定位行動 (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コンピュータシミュレーションによって確かめる.

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. このとき, 親の配置は特定の場所に固定する. また, オブジェクト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表示する (図 3.5). 最初, 子エージェントの視点は親を配置した場所にセットし, 表示されたオブジェクトに対する注視を試行させる.

制限時間 ($5[sec]$) までにオブジェクトを注視できなかったときには, その試行を失敗とする. このときには, 子エージェントの視点をオブジェクトのある場所に移動させて, 親に対する注視の試行に移行させる. またオブジェクトを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注視成功とする. そのときには, そのまま親に対する注視の試行に移行させる. 親の注視に関してもオブジェクトと同様に注視の成功と失敗を判断する. 親を注視する試行が終わって, 再度オブジェクトを注視する試行に移行する際には, オブジェクトをランダムに配置しなおす.

視点の移動速度は $0.5[m/sec]$ である³⁵. 式 (3.2) の温度係数 (τ) 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. また (3.3) 式の学習率と割引率はそれぞれ $\alpha_Q = 0.1$, $\gamma = 1$ に設定し (3.5) 式のステップサイズパラメータは $\alpha_r = 0.01$ とする. 学習率は価値 (Q) の変更速度を決め, 割引率は評価 (E) の影響度を決める. ま

³⁵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.

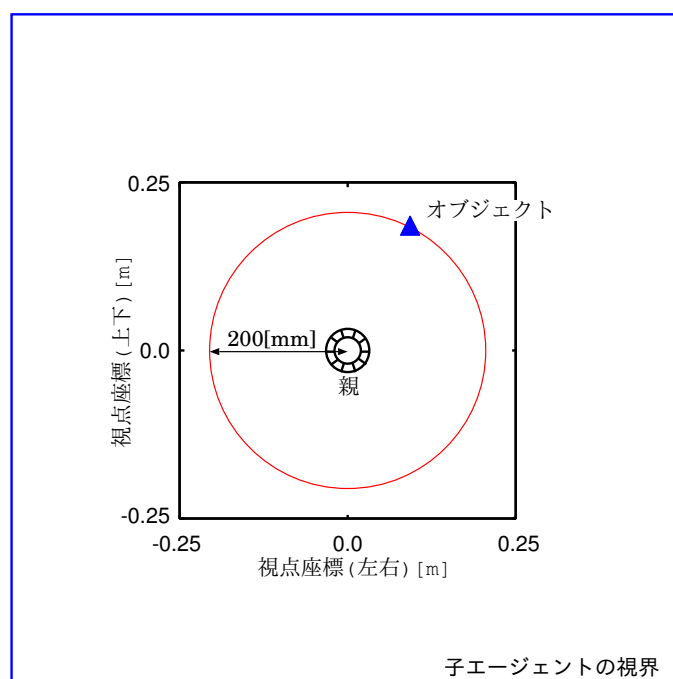


図 3.5: 親とオブジェクトの配置設定

た，ステップサイズパラメータはその値を小さくすることで，評価の変動を緩やかにすることができる³⁶。

実験結果：

図 3.6 (上) は，親やオブジェクトの注視試行を 5000[回] 繰り返したときに得られる学習曲線である．横軸が試行回数，縦軸が試行時間である．ここでは，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．

図 3.6 (下) は，学習途中の視点の移動軌道を示したものである．視点の移動時間の推移と移動軌道を併せて確認すると，移動時間の短縮が，視点の移動軌道の直線的な動きと

³⁶本論では，子エージェントは適切な評価を逐次得られることを仮定しているため，これらの値を厳密に調整しなければ学習できないということはない．

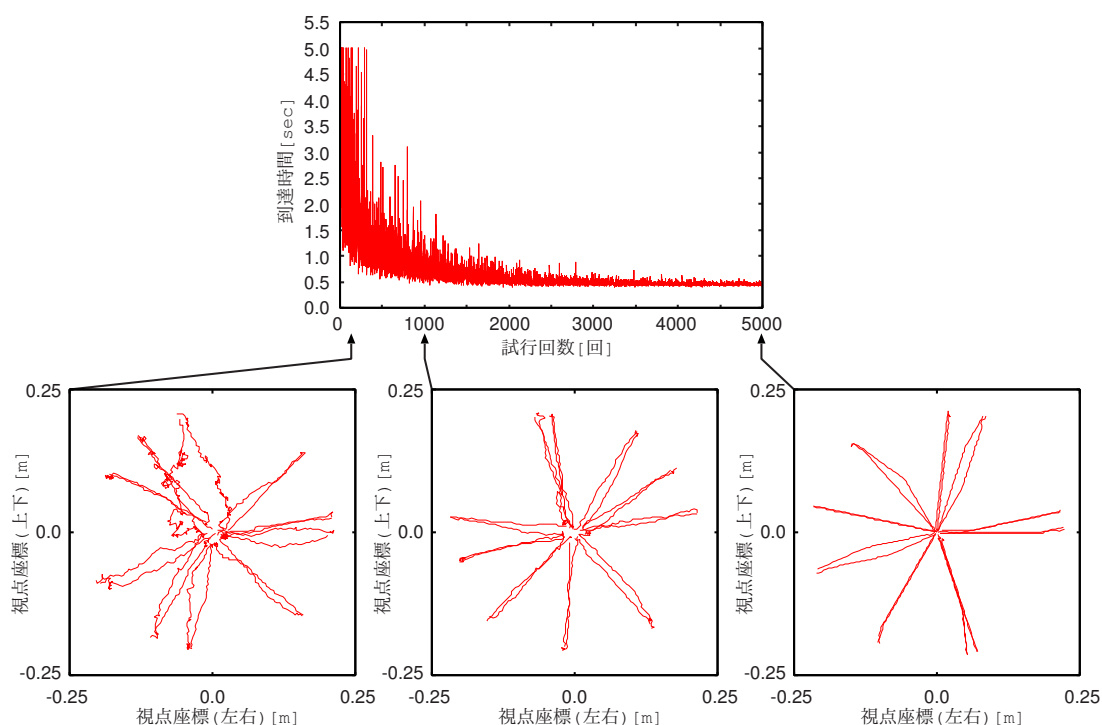


図 3.6: 試行毎の視点の移動時間の変化（上）と視点の移動軌道（下）

なって現われることが確認できる。

3.3 共同注視

視覚定位を足掛かりにして、共同注視を学習する過程を考える。2.4 節に述べたように、共同注視の獲得は視覚定位モジュールに注視目標を形成する学習器を直列に接続したシステムで実現する（図 2.10：右）。子エージェントは視覚定位だけでは視界の中に映った親やオブジェクトしか見るできない。この状態から共同注視を学習するということは、親の顔を見たときに視界の中にオブジェクトが映っていないくても、親の視線方向にあるオブジェクトへ自分の視点を移動できるようになることである。この共同注視行動はどのような学習アルゴリズムによって実現できるだろうか。

本論ではまず、子エージェントは視覚定位によって、親の視線の先にあるオブジェクトを見るという状況を体験することを前提にする。親の視線の先にオブジェクトが置かれている状況は、環境側にその規則性がある場合と、子エージェントが自ら抽出する場合の両

方が考えられるが，本論ではシステム内で考慮すべき問題を簡単にするため，環境側にその規則性が明確にある場合を仮定したモデルを構築する．

このような前提を置いたとき，子エージェントが共同注視を学習するための基本的な考え方は次のようなものである．まず子エージェントは親の視線の先にあるオブジェクトを見るという体験を記憶する．そして，親の視線から過去に見たオブジェクトの感覚情報を想起して，それを視覚定位のモジュールに入力する（図 3.7）．このようにすれば，実際に視界の中にオブジェクトが映っていないくても，子エージェントは視点をオブジェクトがあるだろう方向に移動することができるようになると思われる．

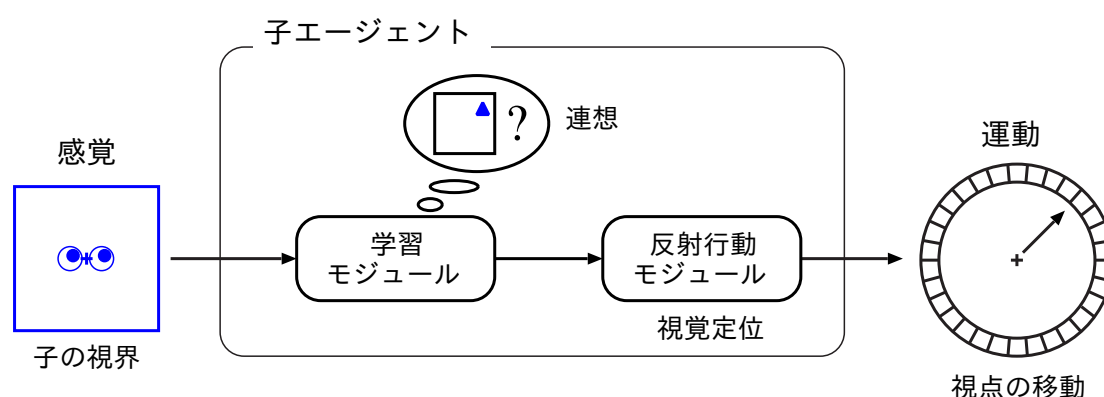


図 3.7: 共同注視を学習するシステムの基礎アイディア

この考え方にに基づき，視覚定位の体験から環境にある規則性を内部に取り込む学習モジュールがどのように構築できるのかを次節で考える．

3.3.1 共同注視の学習モデル

親の顔を見たとき，過去の体験に基づいてオブジェクトの感覚情報を連想したとする．この感覚情報を視覚定位に入力すると，視覚定位はその感覚情報が持つ配置情報に基づいて視点を移動させる．これが視覚定位の能力である．ここで連想が起こったとき，学習モジュールは視覚定位モジュールにオブジェクトの感覚情報を入力し続ける必要がある．ところが，視界には親が映っているので，感覚情報は親の情報になっている．このため，学習モジュールは連想した情報の出力を維持する必要がある．しかし，連想したオブジェ

クトの方向に視点を移動させて実際にオブジェクトが見えてきたら、学習モジュールはその見えているオブジェクトの情報を出力する必要がある。つまり学習モジュールは、連想した情報と実際に見えている感覚情報を適切に選択して出力しなければならない。この選択は両者を比較し、それらが同じオブジェクトかどうかによって出力する情報を変更するというものである。

従って、この学習モジュールには次の3点が必要とされる。

1. 感覚情報と連想した情報を比較すること
2. 両者が異なるものなのか、それとも同じものなのかを識別すること
3. その識別に基づいて出力する情報を決定すること

以下で、それぞれの要件を満たすシステムを構築する。

1. に関しては、図 3.8 のようなシステムを構築して、感覚情報と連想した情報を比較できるようにする。このシステムにおいて、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^*)³⁷ は運動器に伝えられる。ここで、連想器に入力される感覚情報 (s_t) には、視界に映る対象までの距離情報は含めない³⁸。そして、想起情報は離散時間制御系のサンプルホールド (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。また、想起情報が入力される運動器は、視覚定位の運動学習器と評価器を併せたものである。経験を蓄積する段階では、視覚定位の学習は停止する。

2. に関しては、感覚情報や想起情報がオブジェクトなのかそれとも親なのかを連想器が識別できることを仮定する。これは、子エージェントが受け取る感覚情報を単なる番号で表現するように抽象化したとき (3.2.1 節)、共同注視を学習するためには、少なくともその抽象化された番号の中からそれが親なのかオブジェクトなのかを識別する必要があるためである。このとき、子エージェントは視線方向の違う顔を全て違う顔と識別しても良いはずだし、オブジェクトの形状だけではなく感覚情報に含まれる配置情報によってそのす

³⁷ 想起情報は連想した情報のことを意味しているが、連想器は親の視線から連想した情報だけを出力すれば良いものではない。親からオブジェクトを連想することと連想器が出力するものの違いを明らかにするため、その出力は想起情報と呼んで、連想する情報と区別する。後に連想情報は s_t^+ で表記する。

³⁸ 共同注視では視界に映っていないオブジェクトを注視することを考えるので、想起する情報に距離情報は不要である。

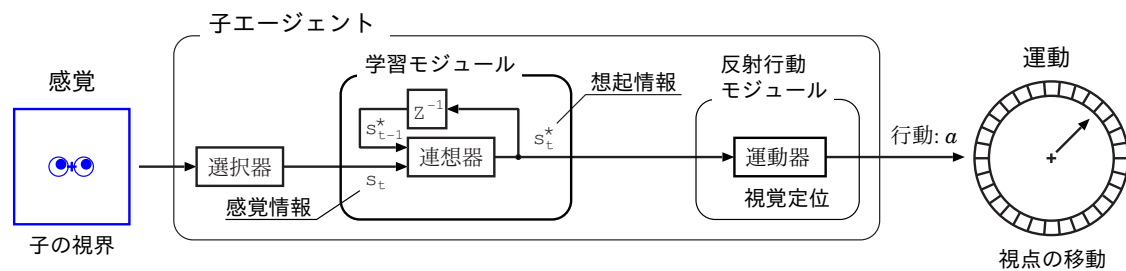


図 3.8: 共同注視のシステムブロック図

べてを異なるオブジェクトと識別しても良いはずである．この意味で，何を同じものとして何を異なるものとするのかという仮定は，ヒトが形成するカテゴリの最も基礎的なレベルの仕組みに関連していると考えられる．本論では，以降この識別（感覚情報における親やオブジェクトの識別）に関する仮定をカテゴリの識別として扱う．

まずは，子エージェントが感覚情報から親とオブジェクトを識別することを仮定して，どのような行動が実現されるのかを確認する³⁹．オブジェクトには形状の違いも特徴情報として用意してあるが，ここでは形状が違ってオオブジェクトとして同一なものとみなすことを仮定しておく．これは，親の視線方向に対してそれらを同じ親の顔であると識別することに対応させるものである．

3. に関して，感覚情報と想起情報を比較してその一致／不一致を親とオブジェクトという2つのカテゴリで判断するとき，連想器が出力すべき情報は3つある．1つは両者が不一致のときに出力する想起情報 (s_{t-1}^*)，2つ目が両者が一致のときに出力する感覚情報 (s_t)，そして3つ目が親を注視したときに出力する連想情報 (s_t^+)⁴⁰である．本論では子エージェントが共同注視を学習によって獲得することを考えるので，親を注視した後にどのオブジェクトを見たかという経験からこの連想情報を形成する必要がある．そこで，視覚定位によって視界に映るオブジェクトを注視する体験を頻度分布 (F) に蓄積する仕組み

³⁹ 本来，乳幼児はその発達過程で親やオブジェクトを識別する能力を自律的に成長させていると考えられる．それは，乳児は生後間もない頃から親の顔を識別するようになることが知られており (Johnson et al., 1991; 山口, 2003)，また3ヶ月程度までの間に，おもちゃのような周辺刺激に対する敏感性を発達させることが知られているからである (Atkinson et al., 1992)．このような発達過程をモデル化することは重要だが，本論では，まずはどのような識別が必要なのかを検討するため，カテゴリに関する仕組みをアブリアリに与える．

⁴⁰ この記号 (s^+) は想起情報 (s^*) と区別するためにここで定義するものである．

みを用意する．頻度分布に蓄積するのは，感覚情報が親からオブジェクトへ変わったときの遷移過程であり，その蓄積条件を表わしたのが次式である．

$$\begin{aligned} F'(s_{t-1}^*, s_t) &= F(s_{t-1}^*, s_t) + 1 \\ \text{if } G(s_{t-1}^*) &= 1, C(s_{t-1}^*) = CGV, C(s_t) = OBJ. \end{aligned} \quad (3.6)$$

ここで， F' は更新後の頻度分布である．また， $G(s)$ は感覚情報が注視状態なのか ($G(s) = 1$)，それとも注視していない状態なのか ($G(s) = 0$) を識別する関数である． $C(s)$ 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 (ϕ) のかを識別する関数である．本論ではこの $C(s)$ が識別するものをカテゴリと呼んでいる．このとき (3.6) 式は，一時刻前の想起情報 (s_{t-1}^*) で親 (CGV) を注視していた ($G(s_{t-1}^*) = 1$)，かつ今の感覚情報 (s_t) がオブジェクト (OBJ) になっているとき，その遷移過程の頻度を蓄積することになる．

この頻度分布から確率分布を (3.7) 式のように形成し，親の顔を注視したときに，その確率分布を参照して親の次に見たオブジェクトを連想する仕組みを構築する．

$$\begin{aligned} p(s_t^+ | s_t) &= \frac{F(s_t, s_t^+)}{\sum_{s'=1}^{N_c} F(s_t, s')} \\ \text{if } G(s_{t-1}^*) &= G(s_t) = 1, C(s_{t-1}^*) = C(s_t) = CGV. \end{aligned} \quad (3.7)$$

ここで， N_c は感覚情報の状態総数である ($N_c = 781$)．また，全ての s' に対して頻度が 0 なら $s_t^+ = s_t$ とする．この確率分布を使用するのは，感覚情報と一時刻前の想起情報が共に注視した状態にあり ($G(s_{t-1}^*) = G(s_t) = 1$)，連想していたもの (s_{t-1}^*) と感覚情報 (s_t) が共に親 (CGV) であるときである．つまりこの条件は，想起した情報と感覚情報がどちらも親を注視した状態になったことを意味する．

参照視

1. から 3. の要件にしたがってシステムを構築しようとするとき，親の視線からオブジェクトを連想するなら，オブジェクトから親を連想しても良いのではないかとことに気付く．視覚定位に基づいた注視体験の中で，オブジェクトを見てから親を注視する体験を蓄積すれば，オブジェクトから親を連想して親を見る行動が実現できるはずである．親の視線方向に自分の視点を移動させる共同注視は，親の視線という情報がシグナルとして機

能するようになる行動である．これに対して，参照視はオブジェクトを見てから親を見る行動である⁴¹．このことから，オブジェクトを見ているときの何らかの情報がシグナルとして機能するようになることで，参照視が実現できるのではないかと考えられるのである⁴²．

これを実現するには，頻度分布への蓄積条件を以下のように変更すれば良い．

$$\begin{aligned} F'(s_{t-1}^*, s_t) &= F(s_{t-1}^*, s_t) + 1 \\ \text{if } G(s_{t-1}^*) &= 1, C(s_{t-1}^*) \neq C(s_t), C(s_t) \neq \phi. \end{aligned} \quad (3.8)$$

この蓄積条件では何も映っていない状態 (ϕ) を除外している ($C(s_t) \neq \phi$)．これは，親やオブジェクトの注視から何も映っていない状態を連想しないようにするためである．また，蓄積した頻度分布から形成する確率分布への参照条件は次式のようにする．

$$\begin{aligned} p(s_t^+ | s_t) &= \frac{F(s_t, s_t^+)}{\sum_{s'=1}^{N_c} F(s_t, s')} \\ \text{if } G(s_{t-1}^*) &= G(s_t) = 1, C(s_{t-1}^*) = C(s_t). \end{aligned} \quad (3.9)$$

連想器のアルゴリズム

連想器のアルゴリズムを図 3.9 のように構築する．連想器はまず，想起していたもの (s_{t-1}^*) と今見えているもの (s_t) が同じカテゴリかどうかを判断する⁴³．違うとき，想起していたものが注視状態 ($G(s_t) = 1$) ならその状態遷移を (3.8) 式に従って頻度分布に蓄積して，想起していたもの (s_{t-1}^*) を出力する．注視状態でなければ，何もせずに想起していたものを出力する．逆に 2 つの情報のカテゴリが同じなら，今度は見えているもの (s_t) と想起していたもの (s_{t-1}^*) が共に注視した状態になっているかどうかを判断する．注視していないなら，見えているもの (s_t) を出力する．注視しているなら，頻度分布から構成される確率分布を (3.9) 式に従って参照して，親の次に見たオブジェクトもしくはオブジェクトの次に見た親を連想する．

⁴¹後で議論するように，参照視は単にオブジェクトを見てから親を見るというだけの行動ではないが，ここでは単純にその行動的側面だけを考える．

⁴²構成論的アプローチには，このように作っている過程で抽象的なレベルでの機能的共通性を見い出すことができるという利点がある．

⁴³カテゴリは，ここでは親 (CGV) なのかそれともオブジェクト (OBJ) なのかを表わす

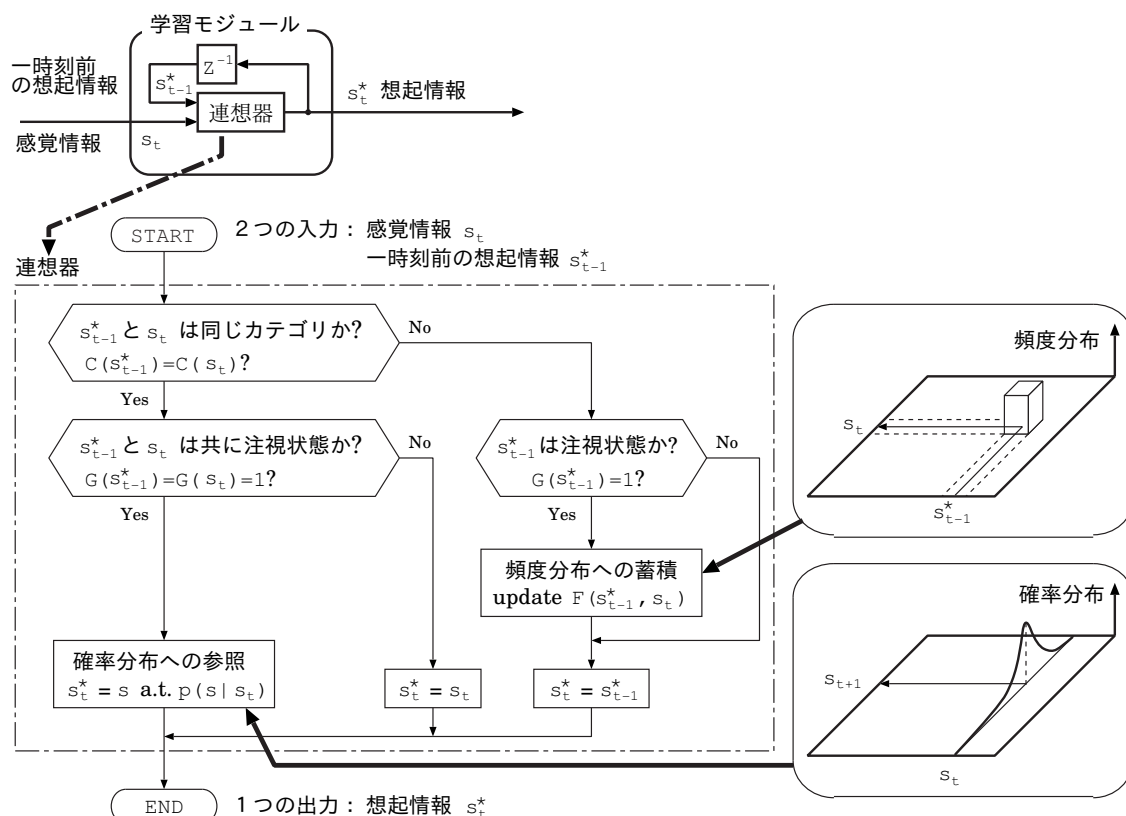


図 3.9: 連想器のフローチャート

このアルゴリズムを用いて，次節で子エージェントの共同注視および参照視の学習過程を調査する．

3.3.2 共同注視の学習

ここでは，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．また同時に，オブジェクトから親を見る参照視が学習できるの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、任意に決める子エージェント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（図 3.10 左）。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。

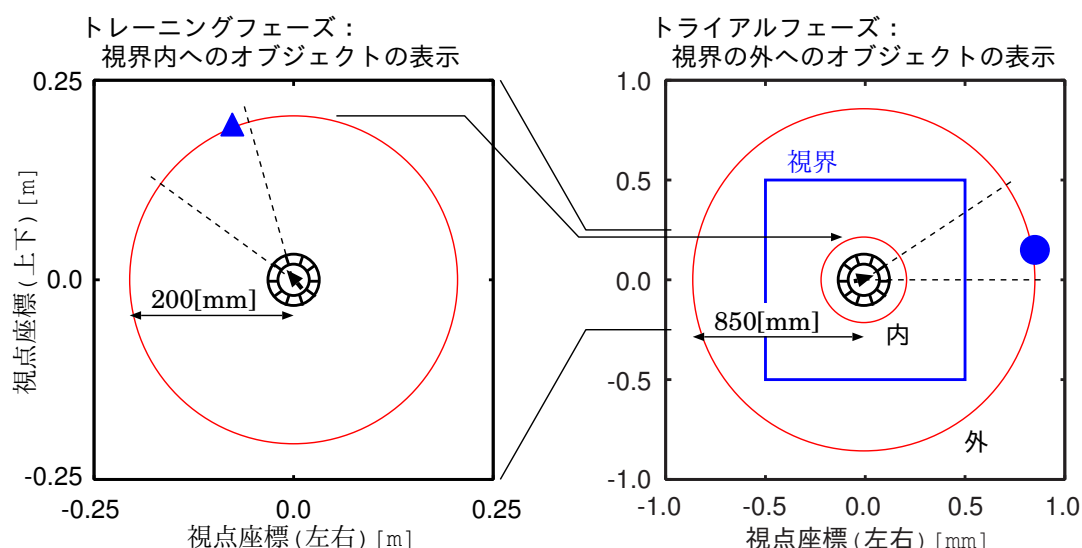


図 3.10: トレーニングフェーズにおける親とオブジェクトの配置設定（左）
とトライアルフェーズにおける親とオブジェクトの配置設定（右）

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、親を子エージェントの正視位置に配置し、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（図 3.10 右）。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⁴⁴。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れない。

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 3.11 のように上昇する。図 3.11 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。トライアルフェーズは、トレーニングフェーズを 100 回行なう毎に実施した。

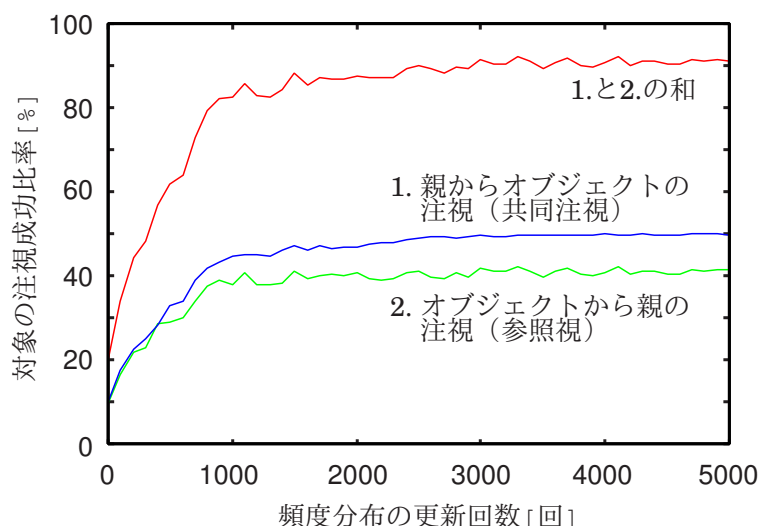


図 3.11: 頻度分布の更新回数に対する、視界外に配置されたオブジェクトや親の注視成功比率の推移

図 3.11 では、成功比率が 90[%] 程度までにしか達していない。これを共同注視場面（親の後にオブジェクトを注視する場面）と参照視場面（オブジェクトの後に親を注視する場

⁴⁴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。

面)で個別に見ると、参照視で失敗するケースがあることが分かる。ということが起こっているのかを確認するため、子エージェントの視点の移動軌道を調べてみる。図3.12は、トレーニングフェーズを5000回行った後にトライアルフェーズを実施して、視点の移動軌道を確認したものである。これを見ると、オブジェクトを注視した後に、まれに親のいる方向とはまったく違った方へ視点を移動していることが確認できる(図3.12の矢印で示した軌道)。これが参照視場面で親の注視に失敗しているときの状況である。

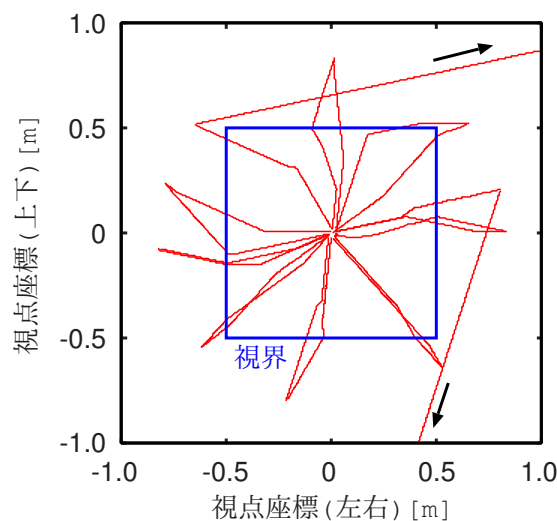


図 3.12: 視界外に配置されたオブジェクトへの視点の移動軌道：

親は視界の中心に配置され、オブジェクトはその周辺に配置される。親を注視してからオブジェクトを見るケース(共同注視)はほぼ全ての試行で成功するようになるが、オブジェクトを注視してから親を見るケース(参照視)ではまれに失敗する場合がある。

なぜこのようなことが起こるのだろうか。これを確認するため、連想に使用される確率分布を調べる。図3.13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)と配置方向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。ここで、図3.13の左列が親からオブジェクトを連想する場合(共同注視)で、右列がオブジェクトから親を連想する場合(参照視)である。

共同注視場面では、親の視線がオブジェクトの配置方向を指し示しているのに対して、

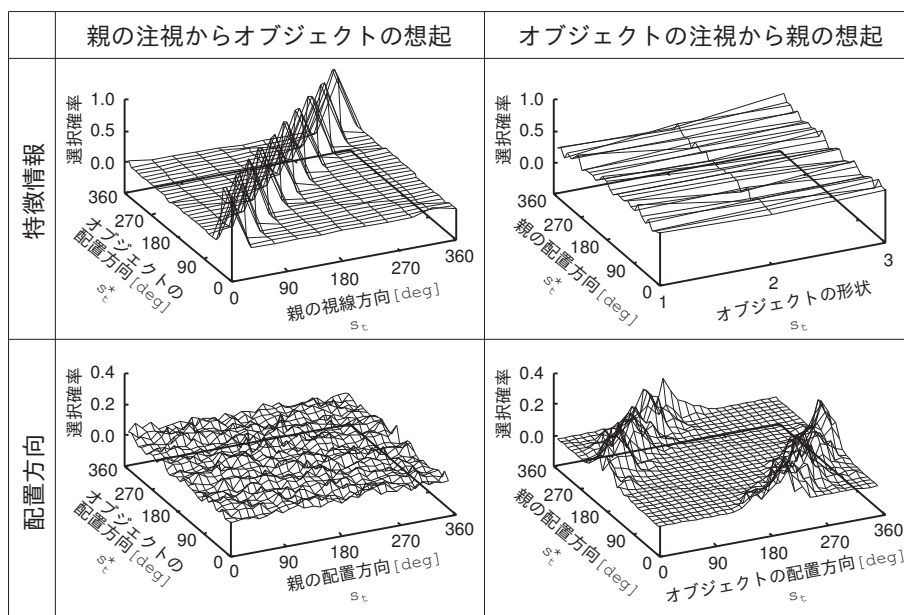


図 3.13: 親やオブジェクトを注視したときの感覚情報 (s_t) から想起される連想情報 (s_t^+) の確率分布

参照視場面では、オブジェクトの配置方向が親の配置方向を指し示している。ここから分かるように、参照視においては、子エージェントはオブジェクトが見えた方向を元にして、その逆方向にいる親を見ることを学習している。しかしその分布は、共同注視場面に比べるとピークが弱くなっている。ここで視点の移動軌道（図 3.12）をもう一度よく見ると、オブジェクトを注視するときの軌道（中心から外側に向かう軌道）は、親とオブジェクトを直線でつないだ軌道にはなっていないことに気付く。つまり、オブジェクトを見たときの軌道を逆にたどると、親がいない方向に視点を動かしてしまうことになる場合があるのである（図 3.14）。

これを解決するにはどのような方法があるだろうか。視点の移動軌道から親のいる方向を推定することにこだわれば、自分がどのような軌跡をたどってオブジェクトを注視したのかを覚えておくような仕組みを考えることができる。しかし、このような仕組みを視点の移動といったレベルの行動に用いることには大きな違和感を覚える。その違和感は、自分の家からあるランドマークに向かう場面を想像すれば分かりやすい。自分の視点が移動した軌跡を覚えておくことは、自分の家からランドマークへ辿る道順を覚えておくことに

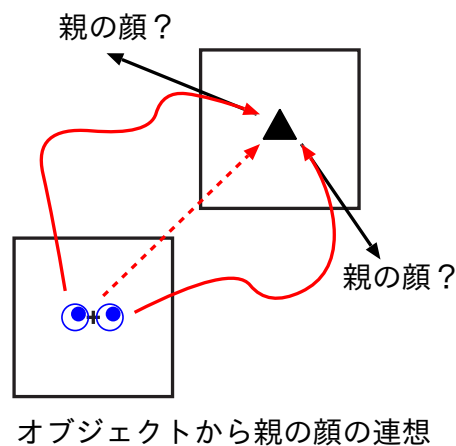


図 3.14: 親の注視に失敗する状況

相当する．そして，視点の出発点がどこにあったかを推論するということは，ランドマークに着いてから，自分の家の方向を推定するような高度な能力に相当するのである⁴⁵．

より簡単に，オブジェクトの注視から親の位置を知る手掛かりとして自己受容感覚 (Proprioception) を考えることができる．自己受容感覚は，体性感覚⁴⁶の一部で，筋肉の状態を知覚することによって，手足の位置や頭部の運動状態を感じる神経系である (p.220 Purves et al., 2007; 開・松井, 2001, p.65)．この感覚を使えば，親を注視したときの自分の頭部（あるいは眼球）の状態を記憶しておくことで，オブジェクトを見ているときにも，その記憶した情報によって親のいる方向を知ることができるのではないかと考えられる．そこで次節では自己受容感覚を感覚情報 (s) に追加して，視覚定位の学習と共同注視の学習をそれぞれ実施する．

⁴⁵ オブジェクトを注視するときの軌跡から親の位置を推定するシステムを構築すれば，確かに子エージェントは参照視においても失敗することなく親を注視することができるようになる (金野・橋本, 2005)．しかし，実際にシステムを作ってみると，軌跡を覚えておくような能力は反射的な行動レベルから少しだけ発達すれば獲得できるというようなものではないだろうことが良く分かる．

⁴⁶ 体性感覚は，少なくとも触覚，温度覚，痛覚，体の位置感覚の 4 つの感覚から構成されている (Bear et al., 2007, p.299)．

3.4 自己受容感覚を持った視覚定位

子エージェントが受け取る感覚情報として、特徴情報と配置情報に加えて自己受容感覚を設定する。この自己受容感覚は、乳幼児が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とする。改めて、子エージェントが受け取る感覚情報を図 3.15 に示す。

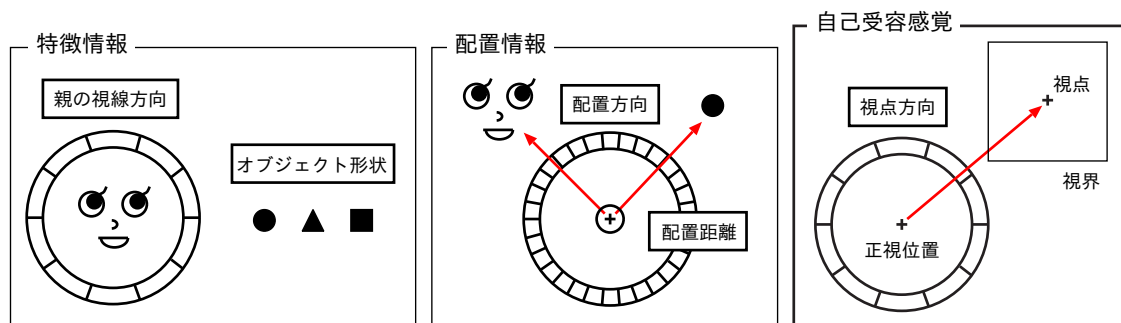


図 3.15: 子エージェントが受け取る感覚情報：自己受容感覚の追加

ここで、自己受容感覚は子エージェントの正視位置を筋肉のニュートラルな状態として、自分の視点を向けている方向を円周を 10 分割した方向で知覚できることを仮定する。感覚情報が特徴情報と配置情報から構成されるときには、その状態総数は 781 だったが、ここに自己受容感覚の 10 方向が加わるので $7801 (= (10 + 3) \times 30 \times 2 \times 10 + 1)$ 状態になる。

自己受容感覚を加えた視覚定位の学習システムは図 3.16 のようになる。

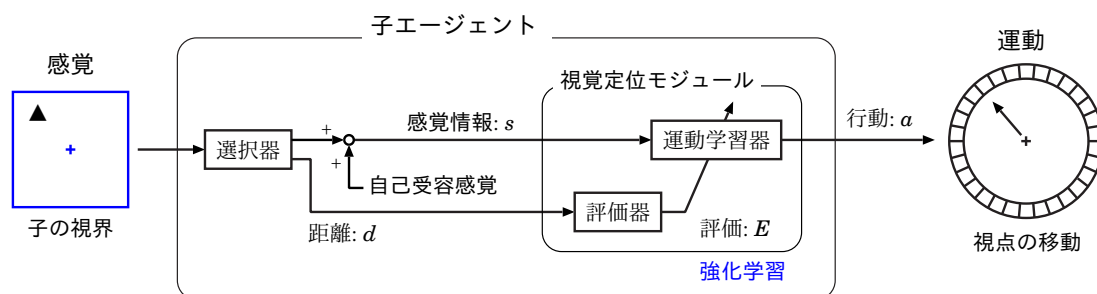


図 3.16: 自己受容感覚を加えた視覚定位のシステムブロック図

3.4.1 自己受容感覚を持った視覚定位の学習

実験の設定と手順：

自己受容感覚がないときには親の配置を固定していたが，様々な自己受容感覚の方向に親がいる状況を学習する必要があるので，今度は親の配置を可変にする（図 3.17）．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の移動を学習する．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を定めて，そこに親を表示する．

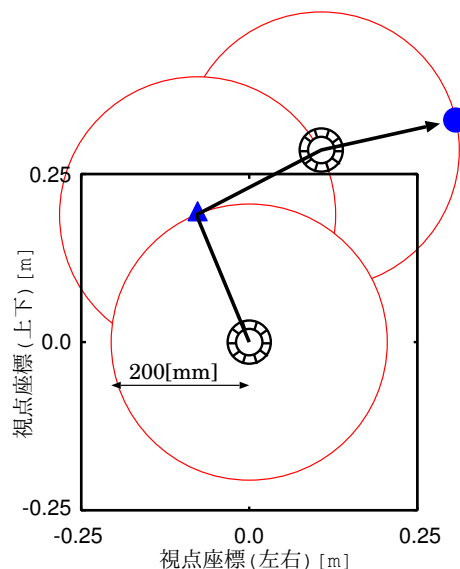


図 3.17: 親とオブジェクトの配置設定：

図 3.5 での設定と違い，ここでは親の配置も可変にする．

実験結果：

図 3.18（上）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⁴⁷．自己受容感覚がない場合よりも学習回数を多くしたのは，自己受容感

⁴⁷この図は自己受容感覚がない場合の学習曲線（図 3.6）に対応する．

覚の導入によって状態総数が多くなっているためである．図 3.18（下）は，学習途中の視点の移動軌道を示したものである．これを見ると，自己受容感覚がない場合と同様に，視覚定位が獲得できていることが確認できる．

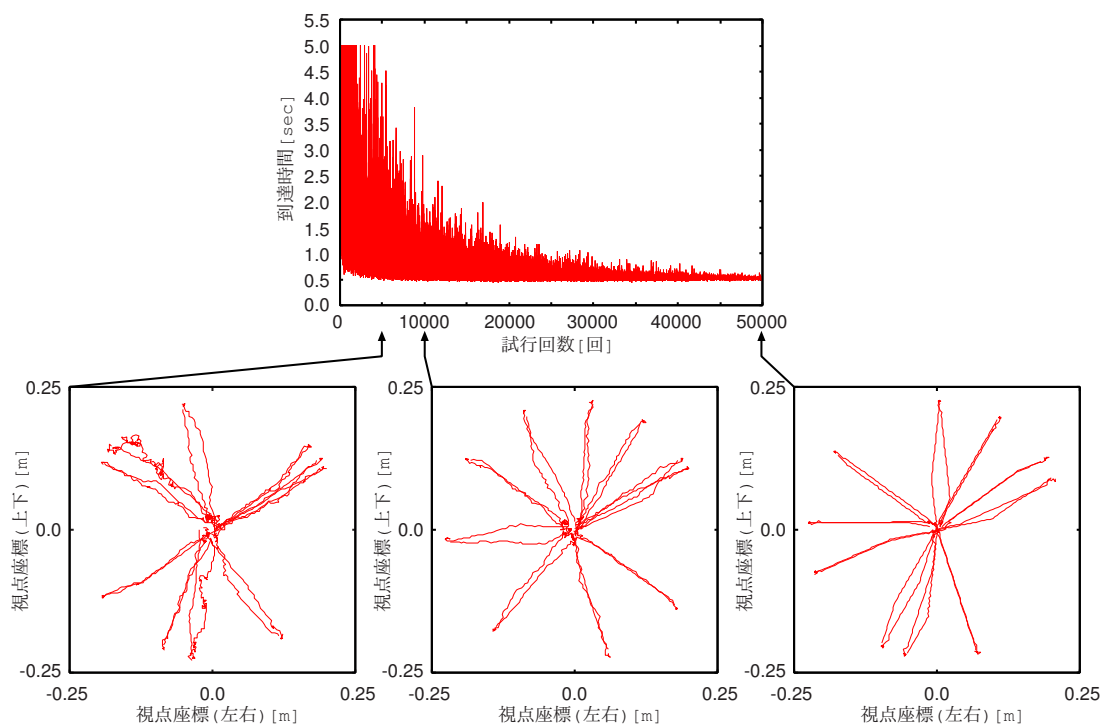


図 3.18: 試行毎の視点の移動時間の変化（上）と視点の移動軌道（下）

3.5 自己受容感覚を持った共同注視

3.3 節と同様に，子エージェントが視覚定位を足掛かりにして共同注視を学習する過程を調査する．共同注視のシステムは図 3.16 に示したように，自己受容感覚が子エージェントの感覚情報として追加されるだけである．また，実験の設定と手順は 3.3.2 節と同様にする．

実験結果：

共同注視の学習曲線は図 3.19 のようになる．図 3.19 は，横軸がトレーニングフェーズの試行回数，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．トライアルフェーズは，トレーニングフェーズを 100 回行なう毎に実施した．

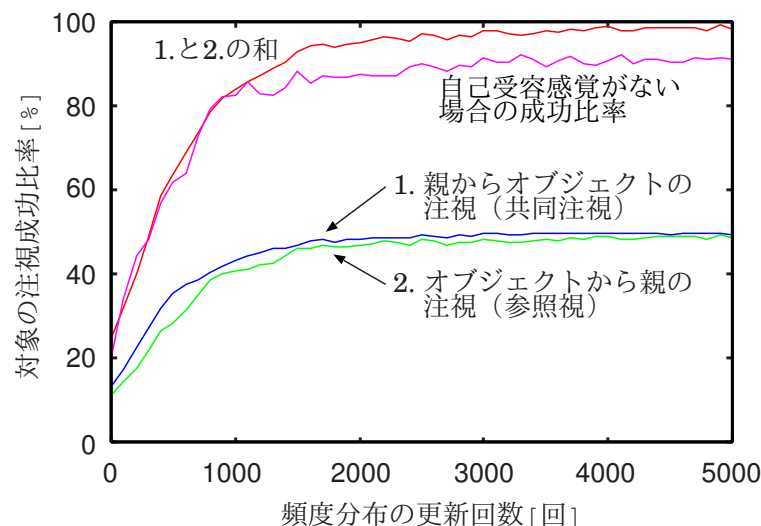


図 3.19: 自己受容感覚がある場合の共同注視・参照視の学習曲線：
頻度分布の更新回数に対して，視界外に配置されたオブジェクトや親を
注視する成功比率の推移を表わしたもの．

自己受容感覚がない場合の学習曲線（図 3.11）と比べると，参照視の失敗がなくなっていることが分かる．連想時に使用される確率分布を確認すると，図 3.20 のような特性が得られる．

図 3.20 は，親の注視からオブジェクトを想起する場合（共同注視：左列）と，オブジェクトの注視から親を想起する場合（参照視：右列）の連想情報の確率分布をそれぞれ表わしている．

親の注視からオブジェクトを想起する場合（左列）には，親の視線方向に対するオブジェクトの配置方向（左上）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（左中）や自己受容感覚（左下）には，オブジェクトがどこに配

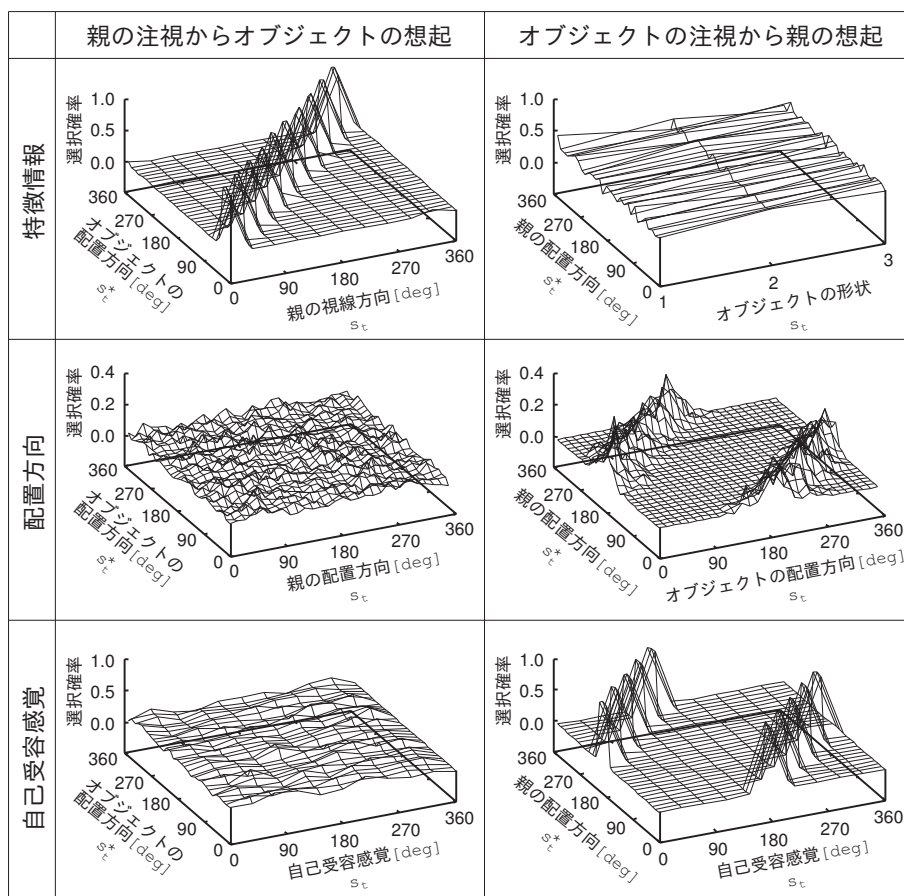


図 3.20: 自己受容感覚がある場合の連想情報の確率分布：

親やオブジェクトを注視したときの感覚情報 (s_t) から連想される連想情報 (s_t^+) の確率分布。

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 (右列) には、自己受容感覚に対する親の配置方向 (右下) 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 (右上) 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 (右中) 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、

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（右下）に見られるような鋭いピークは現われない。

以上の結果から、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くとも、親の視線が向く方向に自分の視点を移動することができるようになることを意味している（図 3.21：左）。また同時に、オブジェクトを見たときに想起する親の情報から、オブジェクトの配置方向や自己受容感覚を基にして、親のいる方向に自分の視点を移動することができることを意味している（図 3.21：右）。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と言える。

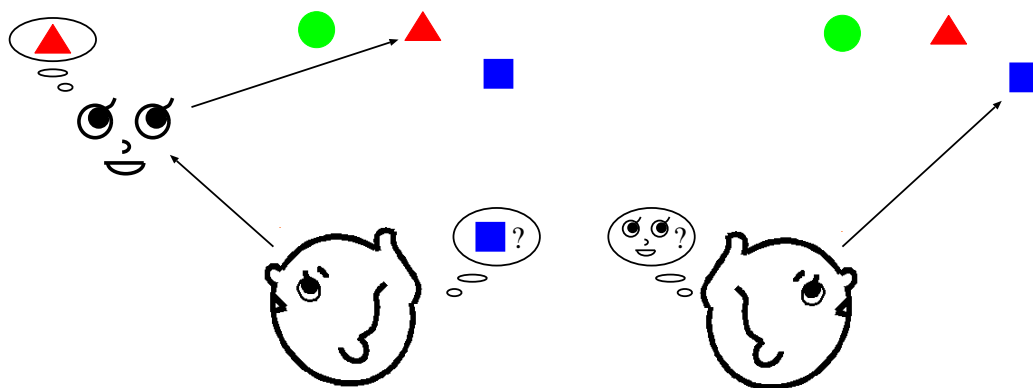


図 3.21: 親の視線からオブジェクトを想起することで実現する共同注視（左）と、オブジェクトの注視から親を想起することで実現する参照視（右）

3.6 連想器の学習規則

図 3.9 に示した連想器のフローチャート（図 3.22 に再掲）は、感覚情報（ s_t ）と一時刻前の想起情報（ s_{t-1}^* ）を入力として、想起情報（ s_t^* ）を出力する関数と見ることができる。

このとき、想起情報の決定には 3 つの経路がある。これを cond.A, B, C として表わすと、

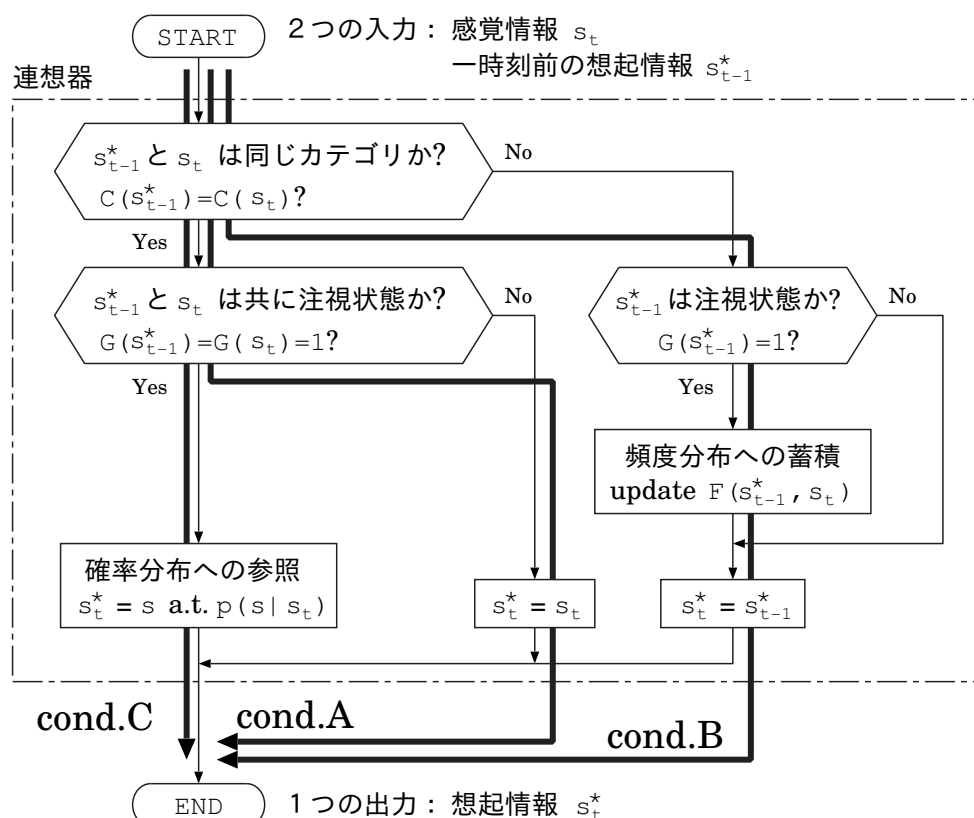


図 3.22: 連想器のフローチャート (図 3.9 のフローチャート部分のみを再掲)

想起情報を決定する関数は次式のように表現することができる。

$$s_t^* = \begin{cases} s_t & \text{if } \text{cond.A,} \\ s_{t-1}^* & \text{if } \text{cond.B,} \\ s_t^+ & \text{if } \text{cond.C.} \end{cases} \quad (3.10)$$

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連想情報である。

$$p(s_t^+ | s_t) = \frac{F(s_t, s_t^+)}{\sum_{s'=1}^{N_c} F(s_t, s')}, \quad (3.11)$$

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) が親からオブジェクトへ, あるいはオブジェクトから親へ遷移したときの頻度を蓄積する分布

である．そしてこの頻度分布 (F) は次式で更新される．

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

$$\text{if } G(s_{t-1}^*) = 1, C(s_{t-1}^*) \neq C(s_t), C(s_t) \neq \phi. \quad (3.12)$$

ここで, F' は更新後の頻度分布である．また, $G(s)$ 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 (ϕ) のかを識別する関数である (3.12) 式の条件は, 感覚情報のカテゴリ (親かオブジェクトか) 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．ここに示した頻度分布とその確率分布の形成は (3.8, 3.9) 式に示したものと同じである．

式 (3.10) のそれぞれの条件 (cond.A, B, C) はどのように表現できるだろうか．2つの入力情報 (一時刻前の想起情報 (s_{t-1}^*) と感覚情報 (s_t)) に対するフローチャートの条件を書き出すと, cond.A, B, C は表 3.2 のようになる．cond.A は2つの入力と同じカテゴリで, かつその両者が共に注視状態ではない条件である．これは, オブジェクトを連想しているとき, 実際に視界の中にオブジェクトが見えてきたときの状況に相当する．cond.B は2つの入力異なるカテゴリになっている場合である．すなわち cond.B は, 想起情報とは異なるカテゴリの対象が見えている状態である．これは, 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．

3.7 獲得した交互凝視行動の動作機構

前節までに, 親の視線からオブジェクトを想起する共同注視と, オブジェクトの注視から親を想起する参照視を学習するシステムが, どのようなシステムとして構築可能であるのかを検討した．ここでは, 交互凝視をしているときの内部状態がどのように機能しているのかを解析する．

図 3.23 は, 視界の外に配置されたオブジェクトに対して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．ただしここでは, 視界に

表 3.2: 想起情報の出力条件

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

何も映っていない状態(ϕ)での動作を確認するため,オブジェクトの配置距離を $1270[mm]$ に変更している(トレーニングフェーズでの設定は $850[mm]$)。

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が移動する。この間は,感覚情報(s_t)はオブジェクト(OBJ)かもしくは何も映っていない状態(ϕ)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(3.10)式に従い想起情報(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,親の方向に視点の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こる。やがて子エージェントが親を注視すると,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(3.9)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 3.23 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の移動できるのは,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 3.20 左上の情報)。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の移動させる。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(ϕ)であり,

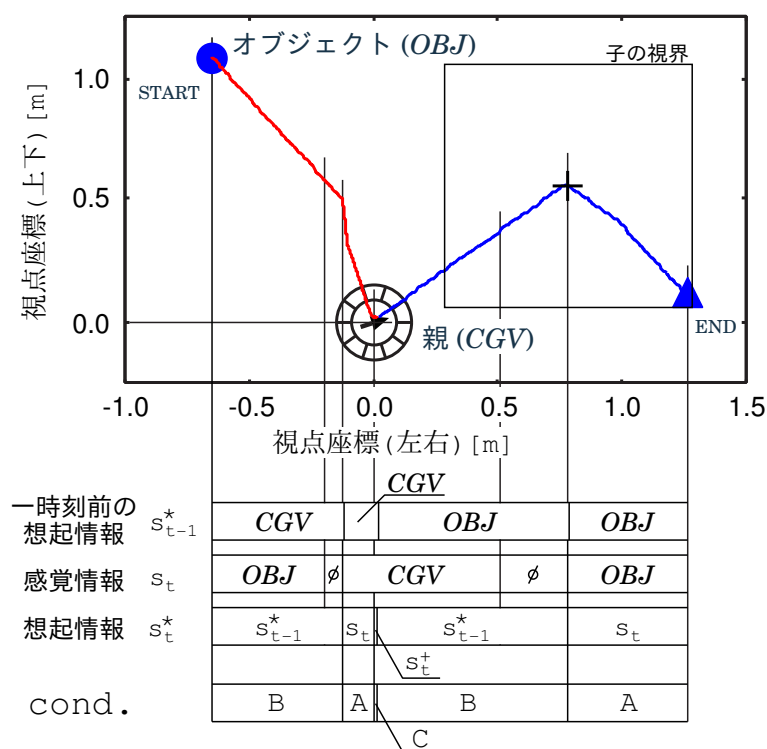


図 3.23: 視界の外に配置された親やオブジェクトとの交互凝視の行動過程と内部状態

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と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．

ここから分かるように，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ものを見ようとするという，子エージェントにとっての目的（注視目標）を形成する機能を持つと考えられる．

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．このことから，こうした目的と手段の結合状態を実現する本論のシステムは，意図的主体性という機能的概念の萌芽的な段階を実装する1つのモデルになっていると考えられる．

3.8 意図的主体性を実現する機構とその機能

子エージェントは，受け取る感覚情報から親やオブジェクトを識別し，その識別に基づいて適切な感覚情報を出力することによって，内部状態として持つ想起情報（ s_t^* ）を注視目標として機能させることができるようになる．ここには3つの機構がある．それは，

1. カテゴリを識別する機構
2. カテゴリの識別に基づいて出力情報を変更する機構
3. 親・オブジェクト間の感覚情報の遷移を頻度分布に蓄積する機構

である．このとき，2.の機構は(3.10)式に対応し，3.の機構は(3.12)式に対応する．本節では，これら3つの機構が意図的主体性に関わる機能にどのような役割を担っているのかを検討し，それぞれの機構が持つ意味を考える．

3.8.1 カテゴリの識別

子エージェントは，受け取る感覚情報が親なのかオブジェクトなのかを識別する．ここで，子エージェントが識別するカテゴリの内容を変更してみると，想起情報が持つ注視目標としての機能性が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

と判断することを仮定してみる．具体的には，表 3.2 を表 3.3 に変更すると共に，(3.12) 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．この設定で，3.3.2 節と同じようにトレーニングフェーズを行なうと，親の視線の先に置かれた複数のオブジェクトに対して，自らの想起情報に基づいて見るものを決めることができるようになる．

表 3.3: オブジェクトの形状を区別する場合の想起情報の出力条件

cond.			$C(s_{t-1}^*)$									
			ϕ	CGV		$OBJ1$		$OBJ2$		$OBJ3$		
				$G(s_{t-1}^*)$								
				0	1	0	1	0	1	0	1	
$C(s_t)$	ϕ		C	B	B	B	B	B	B	B	B	
	CGV	0	B	A	A	B	B	B	B	B	B	
		1	B	A	C	B	B	B	B	B	B	
	$OBJ1$	0	B	B	B	A	A	B	B	B	B	
		1	B	B	B	A	C	B	B	B	B	
	$OBJ2$	0	B	B	B	B	B	A	A	B	B	
		1	B	B	B	B	B	A	C	B	B	
	$OBJ3$	0	B	B	B	B	B	B	B	A	A	
		1	B	B	B	B	B	B	B	A	C	

図 3.24 は，視界の外に 3 つのオブジェクトを配置した場合に，想起情報（ここでは $OBJ2$: $\blacktriangle$ ）に基づいて自律的に見るものを決めることができることを示す視点の移動軌道とその内部状態の一例である．オブジェクトの注視から親を注視するまでは図 3.23 の場合と同じなので，ここでは親を注視したところから順に説明する．

まず，親を注視した状態で， cond.C によって子エージェントは $OBJ2$ ($\blacktriangle$) を想起する．この $OBJ2$ は，親の視線方向に配置されていたオブジェクトを注視した体験から連想されたものなので，これを視覚定位に入力すれば，親の視線が示す方向に視点が移動する．この移動中に，感覚情報は親 (CGV) や何も映っていない状態 (ϕ) になるが，感覚情報 (s_t) と想起情報 (s_t^*) が異なる場合には， cond.B として連想器は一時刻前の想起情報 (s_{t-1}^*) を出力するので，想起情報である $OBJ2$ ($\blacktriangle$) が維持される．また，視点の移動に伴って， $OBJ1$ ($\bullet$) や $OBJ3$ ($\blacksquare$) が順に視界の中に入るが，これらのオブジェク

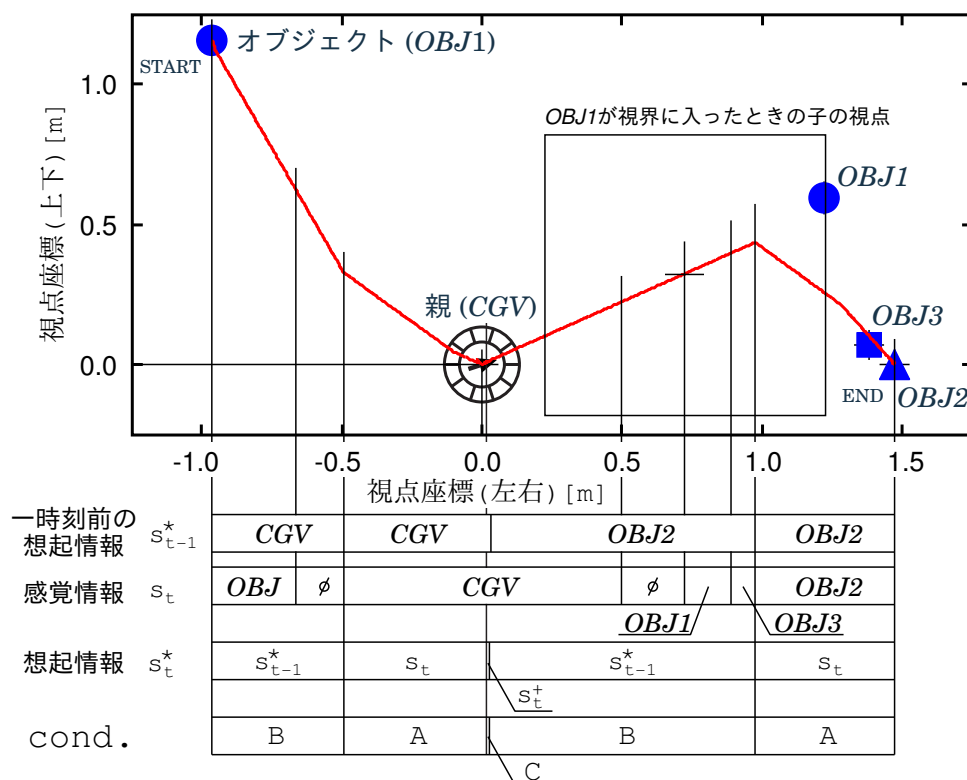


図 3.24: 視界の外に複数のオブジェクトが配置された場合の視点の移動軌道とその内部状態

トも $OBJ2$ (▲) とは異なるカテゴリであると判断されるので、状態は cond.B のままである。さらに視点が移動して $OBJ2$ (▲) が視界に入ると、感覚情報 (s_t) と一時刻前の想起情報 (s_{t-1}^*) が同じカテゴリとなるので、状態が cond.A に変わる。これにより、想起情報は実際に見えている $OBJ2$ の情報に変わる。この変化によって、視点の移動方向の調節が起こり、その移動方向に置かれた $OBJ2$ が注視される。

この機能は図 3.25 のように要約できる。つまり、オブジェクトの形状を別のカテゴリであると判断することによって、子エージェントは、想起情報 (▲) と異なるオブジェクト (■) が視界の中にあっても想起情報 (▲) を注視することができる (図 3.25: 左)。また、親が向く視線の先に複数のオブジェクト (▲, ■) が配置されていても、子エージェントは自律的に見るものを決定して注視することができる (図 3.25: 中央)。加えて、子エージェントは注視目標 (▲) を持っていることで、視界の中でオブジェクトが移動して

もそれを追い掛けることができる（図 3.25：右）。

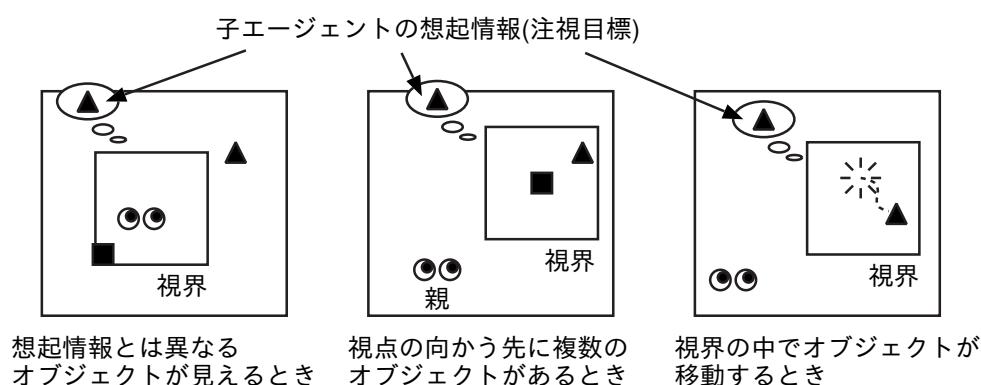


図 3.25: 想起情報 (s_t^*) が持つ機能性

このように、カテゴリを識別するという機構は、子エージェントが何を注視の対象とするのかを決める役割を担っている。このとき、システムの構築から分かるのは、子エージェントが交互凝視を学習するには、そもそも親やオブジェクトを識別する必要があるということである。同時に、これが本論のモデルが乳幼児に仮定する能力になる。

これに対して、乳幼児は非常に早い段階からヒトの顔刺激に注意を向けるようになることが知られている (Johnson et al., 1991; 山口, 2003)。また、オブジェクトに関しても周辺刺激への敏感性が3ヶ月程度までに発達することが知られている (Atkinson et al., 1992)。こういった知見から、子エージェントが親やオブジェクトを識別する能力を持つという仮定には十分な妥当性があると考えられる。

カテゴリを識別するということは、一般的にはある刺激群に特定のラベルを貼ることを指す。例えば、4本足で毛が生えていて「ワンワン」と鳴く動物には『イヌ』というラベルを貼る場合がそれである。構築したシステムでは、番号で表現された感覚情報から親やオブジェクトが切り出せることを仮定して、その親やオブジェクトの感覚情報群に特定の行動規則を割り当てている。これが『イヌ』というラベルを貼ることに相当している。つまり、親やオブジェクトの識別に、共同注視のための適切な行動が結び付いていることが、カテゴリの識別を表わしているのである。ただし、ヒトが作るカテゴリの特殊性は、『イヌ』というラベルが記号あるいは概念として抽象化されているところにある。この意味で、本論のシステムが必要とするカテゴリの識別は、最も基礎的な刺激の分類を対象と

していることになる．そして恐らく，こういったレベルでカテゴリを議論するときにはヒト以外の動物との違いは存在しない．このことから，子エージェントに設定するカテゴリの識別能力は，より高次のコミュニケーション行動の獲得を考えるためのよい出発点になると考えられる．なぜなら，本論のモデルを基にしてヒトが他者の心的状態を理解するようになる過程を考えると，どのような性質のカテゴリを形成することがヒトの特徴を表わす社会的なコミュニケーション行動を実現するのかを検討できると考えられるからである．

3.8.2 カテゴリの識別に基づいて出力情報を変更する機構

3.6 節に示した (3.10) 式は，簡単に言えば，連想器に入力される 2 つの情報（今見えているもの (s_t) と想起していたもの (s_{t-1}^*)）のカテゴリが同じであれば今見えているものを出力し (cond.A)，カテゴリが異なるならば想起していたものを出力する (cond.B)．そして，カテゴリが同じでかつ注視状態にあるならば，親・オブジェクト間の連想を働かせる (cond.C) というものである．この機構で感覚情報だけを常に出力するように設定すると，システムは視覚定位とまったく同じになる．よって，この状態を発達の初期状態として考えてみる．

このとき，まずは感覚情報 (s_t) とは異なるカテゴリの連想がなければ，一時刻前の想起情報 (s_{t-1}^*) と感覚情報のカテゴリが異なる状況がそもそも現れない．これに対して，親からオブジェクト，オブジェクトから親への連想を行なうのが次節で議論する 3. の機構なのだが，今はその連想が起こるとして話を進める．

親を見てからオブジェクトを連想したとき，もしオブジェクトの感覚情報を次の時刻で維持せずに，見えている親の感覚情報に変えてしまったらどうなるだろうか．そのときには，子エージェントはそのまま親を見続けることになり，視界の中に映っていないオブジェクトの方向へ視点を移動することができなくなる．オブジェクトを連想したとき，その連想情報と感覚情報（見えているもの）のカテゴリが違う場合には連想情報を維持しなければ，連想したものを見ようとする状態は実現できない．

では，そのまま連想した情報を維持し続けたらどうなるか．このときには，当然，同じカテゴリのオブジェクトがあっても視線は一方向に動き続けてしまう．なぜなら，連想しているオブジェクトと同じカテゴリであっても，感覚情報が示すオブジェクトの配置方向

は一定のままだからである．同じカテゴリと判断できるオブジェクトが見えたとき，視覚定位に入力する情報はその見えた感覚情報にしなければならない．

カテゴリが異なれば連想情報を維持し，連想した情報と同じものが見えたら，連想器の出力はそちらに変更する．この2つの仕組みは必須である．つまり，連想した情報が注視目標として働くかどうかは，その連想情報を内部状態として維持するかどうかの判断にかかっている．しかし，この機構が乳幼児にどのような能力を仮定することになるものであるのかは良く分からない．この問題は次章で改めて検討する．

3.8.3 親・オブジェクト間の感覚情報の遷移を頻度分布に蓄積する機構

構築したシステムには，親からオブジェクト，オブジェクトから親の連想を行なうために，カテゴリが変わったときの感覚情報の遷移を頻度分布に蓄積する機構がある．この機構によって交互凝視を学習するには，視覚定位によって反射的に視界に移るものを注視する体験の中に次のような規則があることが要求される．

- 共同注視：

親の次にはオブジェクトを見る．

親の視線の先には必ず何らかのオブジェクトがある．

- 参照視：

オブジェクトの次には親を見る．

自己受容感覚の原点には必ず親がいる．

これらの規則が環境に用意されていると考える場合と，体験する環境から選別すると考える場合では，乳幼児に想定する能力が変わってくる．

環境側に共同注視の規則があることを想定するのは，Triesch et al. (2006) や Nagai et al. (2003) のモデルである．特に Nagai らは抽象的な思考実験から，環境にある複数のオブジェクトを親と子がそれぞれに注視していても，互いに同じオブジェクトを注視している状況（共同注視場面）を論理的に最も多く体験することになると指摘している（長井他，2004）．Nagai らが考えるのは次のような状況である⁴⁸．まず3つのスロットがあり，そ

⁴⁸Nagai らの論文ではロボットと実験者の関係として説明しているが，ここではより簡潔な状況を設定した．ただし，基本的な考え方は Nagai らとまったく同じである．

ここに2つのオブジェクトが入る場面を想定する(図3.26)。そのスロットを挟んで親と子が向き合ってそれぞれのスロットに注意を向けるとき、親の見るスロットと子どもの見るスロットが一致する状況を共同注視体験と考える。ここで、親も子も表示されたオブジェクトを注視する(空のスロットは見ない)と仮定して互いの注視試行を繰り返し、共同注視の状態になるケースがどれくらいの頻度で発生するのかを調べる。すると、親の見ているものに子どもが注意を向けるケース(共同注視体験)が最も多くなるというのである。

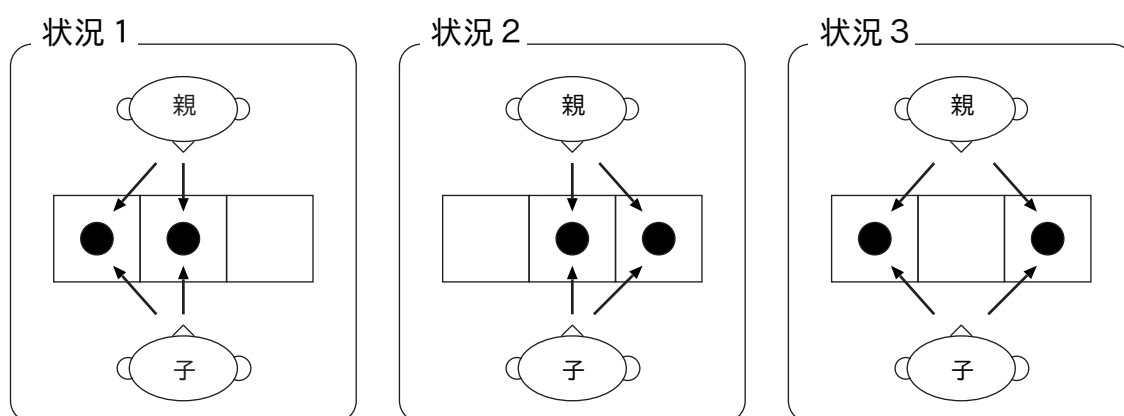


図 3.26: 共同注視体験の頻度に関する思考実験

これを以下で簡単に説明する。3つのスロットに2つのオブジェクトが入る状況は図3.26のように3つある。そして、1つの状況内で親が見るスロットと子が見るスロットの組み合わせは4つある。このとき、親と子が互いに真ん中のスロットを見る体験が、状況1と2で重なっている。同じように互いに左のスロットを見る体験は状況1と3で、右のスロットを見る体験は状況2と3でそれぞれ重なっている。このことから、全ての状況が均等に起こったとしても、互いに同じオブジェクトに注意を向けている状況を最も多く体験することになるのである。つまり、必ずスロットの数よりも少ないオブジェクトを配置し、親も子もオブジェクトのあるスロットを見ることを仮定すれば、子エージェントは親の視線の先にあるオブジェクトを見るという状況を最も多く経験するのである。こういった状況を学習すると考えることが、環境側に共同注視の規則があると考えすることに相当する。

環境側に共同注視の規則があると考える場合、乳幼児に想定する能力はもっとも頻度の多い状況を規則として抽出する能力ということになる。これに対しては、蓄積する頻度から確率分布を形成するとき(3.11)式のような一様分布ではなく、次式のような Gibbs 分

布を用いれば、頻度の多い状況が規則として定着するようになると考えられる。

$$p(s_t^+ | s_t) = \frac{e^{F(s_t, s_t^+)/\tau}}{\sum_{s'=1}^{N_c} e^{F(s_t, s')/\tau}}. \quad (3.13)$$

ここで τ は温度係数である。これは強化学習で採用される考え方であり、ヒトの心理的傾向を調べた実験から支持されている (Sutton and Barto, 1998)。

ただし環境側に共同注視の規則があると考えするには、Nagai らが指摘するような状況の学習が実際にあることを議論する必要がある。現実の状況ではオブジェクトが配置される領域は無数にある。スロットが多くなり、そこに配置されるオブジェクトがスロットの数に近づくほど、共同注視の規則性が頻度分布に形成されるまでには多くの体験が必要とされるようになる。環境に特定の構造を仮定することは十分に可能だと考えられるが、その構造によってのみ、共同注視の学習が行なわれていると結論することは難しい。また参照視においては、共同注視の場合よりさらに、環境に規則性があることを仮定することが難しい。オブジェクトの次に必ず親を見るわけではないし、親はいつでも同じ場所に居るわけではないからである。

一方、環境に共同注視の規則があるとする考えとは別に、親の視線の先に何か面白いものがある、それを見ることで親の視線方向にあるオブジェクトを見るようになるのではないかという考え方がある。これは親の視線の先にあるオブジェクトを見ることができるとに何らかの報酬を想定し、乳幼児自らが経験の中から規則性を抽出していくことを仮定するものである。Matsuda and Omori (2001) のモデルでは、親の見る方向に何か面白いものがあり、それが報酬として機能することを仮定している。親がおもちゃを持って乳幼児と向き合っているとき、親が笑いかけることで注意が親に引き寄せられ、おもちゃが動かされることによってまたおもちゃに興味に移るというように、親の顔とおもちゃの間を視線が行き来する場面は自然に考えることができる (岡本, 1982)。

しかし乳幼児は、興味深い体験を親とばかりするわけではない。特にオブジェクトどうしの関係を学習する場面を考えれば、参照視の規則性、つまりオブジェクトから親を連想する規則は学習できなくなることが容易に考えられる。なぜなら、親の見えないところで興味深いオブジェクトばかりを次々に注視することが考えられるからである。このことから、体験の中から親とオブジェクトの間にある規則性を抽出するには、特に参照視のケースにおいて、より確かな経験取得が必要なのではないかと考えられる。

構築したシステムが持つメカニズムの問題点と次章以降での取り組み

意図的主体性を実現する機構に関して、

1. カテゴリを識別する機構
2. カテゴリの識別に基づいて出力情報を変更する機構
3. 親・オブジェクト間の感覚情報の遷移を頻度分布に蓄積する機構

という3つが交互凝視行動の生成に対してどのような役割を担うのかを検討した。ここで、2.の「カテゴリの識別に基づいて出力情報を変更する機構」には、乳幼児に仮定することになる能力が何であるのかが良く分からないという問題があることを指摘した。また、3.の「親・オブジェクト間の感覚情報の遷移を頻度分布に蓄積する機構」には、視覚定位という反射的な行動による経験を強化するという仮定だけでは、親とオブジェクト間の規則性として、共同注視や参照視を学習することが難しいのではないかということを示唆した。

これを受けて次章では、視覚定位ではない反射的な行動によって参照視を動機付ける仕組みを考える。特に、参照視を基礎的に動機付けるのではないかと考えられる情動的参照視に着目し、これを本章で構築した人工システムに組み入れることを考える。そしてこのシステムを構築した上で、再度、共同注視や参照視を学習する仕組みがどのように考えられるのかを議論する。

第4章 情動的参照視と意図的主体性

前章で構築した交互凝視行動の学習モデルでは、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を学習する。この行動がやがて、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のではないかと考えられる。なぜなら、オブジェクトを見た後に親を見る行動を通じて、オブジェクトに対する親の表情に子エージェントが何らかの規則性を見い出すことが考えられるからである。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⁴⁹、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。これは、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ことに原因がある。構築したシステム（子エージェント）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。この問題を考えることは、前章の最後の節でオブジェクトの次に親を見る動機が何であるのかを考えたことに対応している。

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。このとき乳幼児は、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っているのだろうか。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ヶ月以降の乳幼児は、見知らぬおもちゃを見たときに親の顔を見ることがある（図4.1）。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乳幼児が親の表情を参照

⁴⁹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。

しているように見えることから、「親の表情を参照しようとする意図」を持った行動と考えられることがある⁵⁰。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い。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ではないかと指摘されている（小沢, 2005）⁵¹。

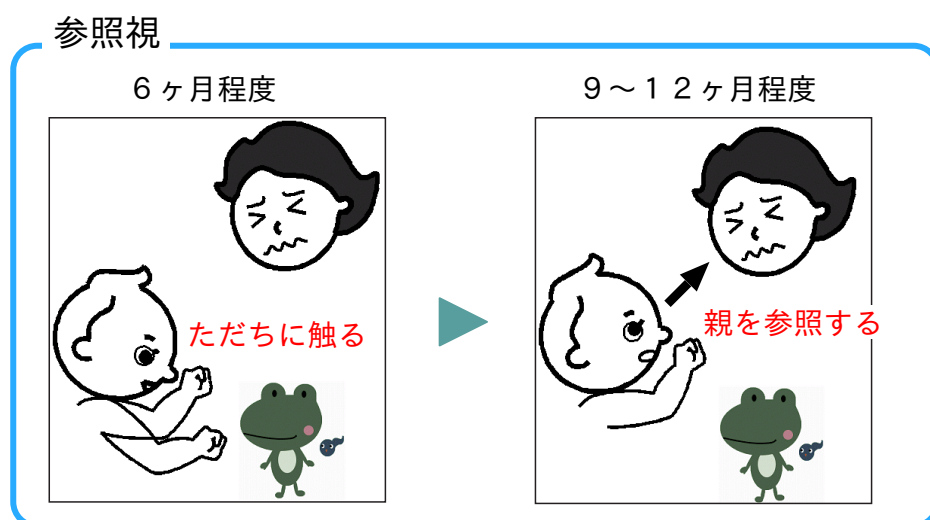


図 4.1: 参照視行動の出現：

9ヶ月より前の乳児が新規なおもちゃを見たときには、そのまま触ることが多い。これに対して9ヶ月以降の乳幼児は親の方を見る場合のあることが知られている（Tomasello, 1995）。

こういった指摘から、乳幼児がオブジェクトの注視から親を見るような行動を起こすメカニズムには、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より以前に、そもそも親を反射的に見てしまうようなメカニズムがあるのではないかと考えられる。そしてその動機には、情動的な要因を仮定することができるのではないかと考えられる。そこで本章では、オブジェクトの注視から情動的な要因によって反射的に親を見る行動が、前章で構築したモデルを前提にしてどのようなメカニズムによって構築できるのか

⁵⁰ 参照視が社会的参照の原形であると考えられる理由はここにある。

⁵¹ 小沢（2005）は愛着システムの不安定化として言及しているが、愛着のメカニズムは不明瞭な部分を多く含んでいる。そのため本論では、不安になることで引き起こされる参照視行動に限定して検討を進める。

を検討する．

本章は3つの節から構成される．まず4.1節で情動的参照視を実現するシステムがどのようなメカニズムによって構築できるのかを検討し，これを前章で構築したモデルに組み込む．4.2節で情動的参照視の動作機構を示し，4.3節でその情動的参照視が意図的主体性を形成する学習モデルにおいてどのような役割を持つのかを議論する．それと同時に，意図的主体性を形成する学習モデルを再検討し，モデルに仮定する能力が乳幼児の持つ能力とどのような関係にあるのかを検討する．

4.1 情動的参照視を実現する機構

交互凝視行動を学習する前章のモデルと同じように，視覚定位を手段とした参照視行動のメカニズムを考える．このとき前章で構築したモデルでは，子エージェントは親の情報をオブジェクトから連想して親のいる方向に視点を動かしていた．つまり，親の情報が想起されれば，それを入力された視覚定位モジュールは親のいるだろう方向に視点を移動させることができるのである．このことから，最後に見た親の情報（最後に親を見たときの感覚情報）を思い出すことができれば，それが視覚定位モジュールに入力された時点で即座に参照視が起こるのではないかと考えられる（図4.2）．

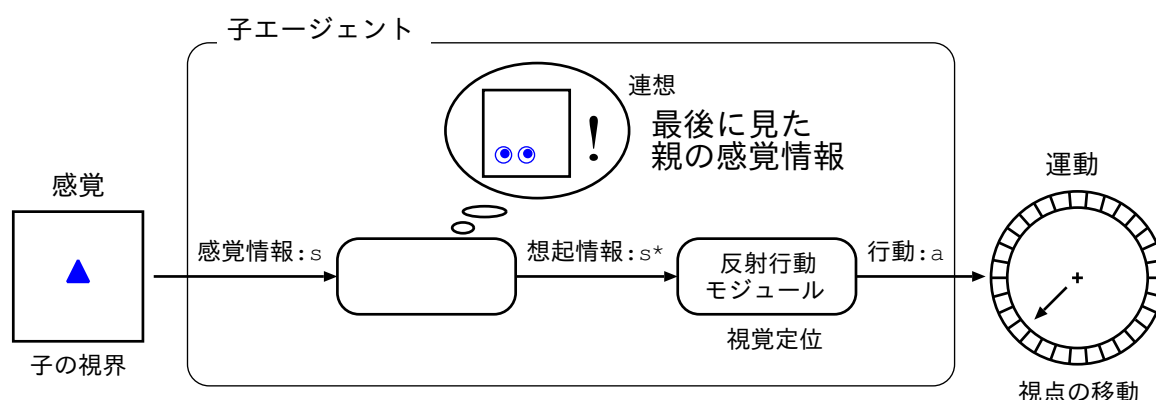


図 4.2: 情動的参照視を実現するシステムの基礎アイデア

オブジェクトを見ることによって情動が安心状態から不安状態になり，その不安状態が最後に見た親の情報を想起させて視覚定位モジュールを動かす．この仕組みを用意すれ

ば、後は連想した情報が注視目標として機能するための仕組み（3.8.2 節に述べた「カテゴリーの識別に基づいて出力情報を変更する機構」）を使えば良い．

この仕組みを用意するにはまず、連想器の想起情報を決定する（3.10）式に cond.D を追加する．

$$s_t^* = \begin{cases} s_t & \text{if } \text{cond.A,} \\ s_{t-1}^* & \text{if } \text{cond.B,} \\ s_t^+ & \text{if } \text{cond.C,} \\ s_t^\# & \text{if } \text{cond.D.} \end{cases} \quad (4.1)$$

ここで $s_t^\#$ は最後に見た親の感覚情報であり、次式に従う．

$$s_t^\# = \begin{cases} s_t & \text{if } C(s_t) = CGV, \\ s_{t-1}^\# & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (4.2)$$

この $s_t^\#$ を用意することは、頻度分布を形成するよりもさらに単純に1つの感覚情報を覚えておくだけの能力を仮定することになる．このとき、cond.D はどのような規則に従えば良いだろうか．3.6 節に示した表 3.2 で考えると、連想器の出力条件は表 4.1 のようになる．表 4.1 は左が不安状態、右が安心状態である（安心状態での出力条件は表 3.2 と同じ）．不安状態では、感覚情報（ s_t ）が親ではないときに 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．そして感覚情報（ s_t ）が親のときには、見えている親の情報を出力する．この機構が 3.8.2 節に述べた「カテゴリーの識別に基づいて出力情報を変更する機構」である．

4.2 参照視行動とその動作機構

4.1 節のように拡張したモデルをコンピュータシミュレーションでテストし、子エージェントが不安状態で親を見る行動（情動的参照視）を起こすことができるかどうかを確認する．

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

表 4.1: 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. ($em = 0$)				$C(s_{t-1}^*)$					
				ϕ	CGV		OBJ		
					$G(s_{t-1}^*)$				
0	1	0	1						
$C(s_t)$	ϕ				D	D	D	D	D
	CGV	$G(s_t)$	0	A	A	A	A	A	A
			1	A	A	A	A	A	A
	OBJ	$G(s_t)$	0	D	D	D	D	D	D
			1	D	D	D	D	D	D

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

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．

$$em_t = \begin{cases} 0(\text{不安}) & \text{if } G(s_t) = 1, C(s_t) = OBJ1, \\ 1(\text{安心}) & \text{if } G(s_t) = 1, C(s_t) = OBJ2 \text{ or } CGV, \\ em_{t-1} & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (4.3)$$

3.3.2 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3.3.2 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 4.3 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 4.3 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（4.3）によって $OBJ1$ を注視した状態で不安になると，表 4.1 左の cond.D によって，連想器が出力する想起情報（ s_t^* ）が，最後に親を見たときの感覚情報（ $s_t^\#$ ）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 4.1 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 3.23 の場合と同様である。

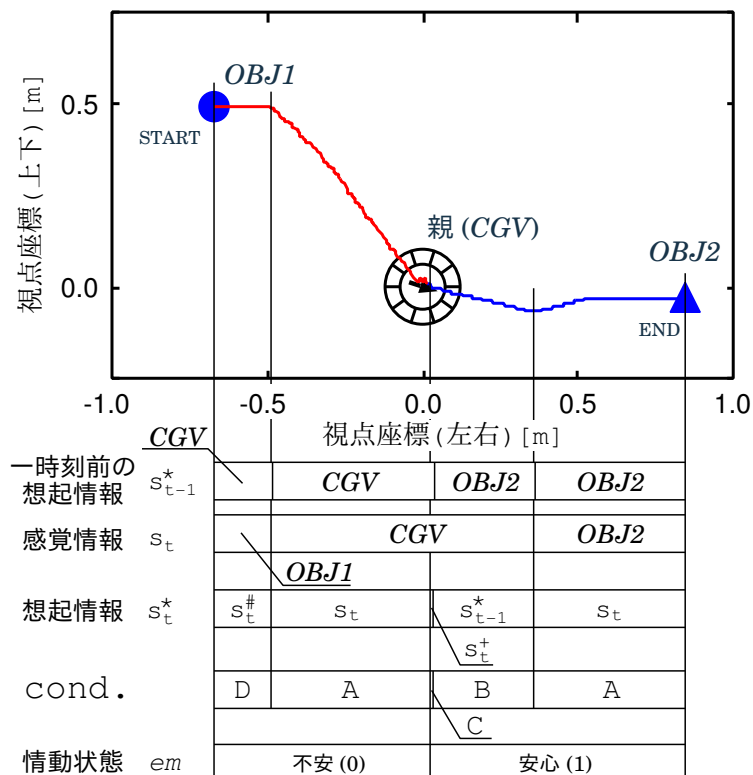


図 4.3: 情動状態を仮定したときの視界外への交互凝視行動とその内部状態

このように、オブジェクトを見て不安状態になることを仮定したとき、それに伴って最後に見た親の情報を想起する仕組みを構築すれば、即時的に親を見る行動を起こせることが確認できる。本論ではこの仕組みが情動的参照視を実現するモデルになると考える。

4.3 情動的参照視と意図的主体性のメカニズム

情動的参照視の仕組みが、意図的主体性を形成する仕組みに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，子エージェントが情動的参照視を行なうメカニズムは，感覚情報（ s_t ）と最後に見た親の情報（ $s_t^\#$ ）を順に親かどうか判断し（(4.4) 式），親であった時点でその情報を想起情報（ s_t^* ）にする（(4.5) 式）という簡単な規則で表現できる．

$$s_a = [s_t \succ s_t^\#], \quad (4.4)$$

$$s_t^* = s_a \quad \text{s.t.} \quad C(s_a) = CGV. \quad (4.5)$$

ここで， $\succ$ （succeed 記号）は感覚情報の判断順序を表わす．また s.t. は such that の略であり，右のような条件（ s_a が親である）を満たす場合に，その情報を想起情報（ s_t^* ）にすることを意味する．

ではここに，親・オブジェクト間の連想を行なう仕組み（(3.11) 式の s_t^+ ）をあてはめるとどうなるだろうか．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（感覚情報： s_t をそのまま想起情報に出力）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ことができる．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，視覚定位を学習した直後の状態とみなせるからである．つまりこれは，内部状態を持っていない段階である．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ー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．これは，内部状態を持ち得る段階に移行することを意味する．

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される．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ようになる．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体験するようになる．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．

このように情動要因によって動作する情報想起のメカニズムを構築すると、ある状況に仮定される情動状態と、そこで動作するメカニズムの関係を1つのモデルとして提示することができるようになる。これによって、例えば「ヒト以外の霊長類では、不安に結び付いた参照視行動しか行なわれないが、ヒトの場合には楽しいことや興味深いオブジェクトを見たときにも、情動的参照視のメカニズムが発動するのではないか」といった仮説を提示することが考えられるようになる。こういった仮説を提示することによって、情動状態に対する仮定が社会的なコミュニケーション行動を学習する機会に関してどのような違いを生み出す可能性があるのかを議論できるようになる。またこの仮説を構成論的アプローチによって検証することによって、今度はその仮定（不安状態だけではなく楽しい状態でも情動的参照視の機構が発動する）が発生する要因を検討する段階、つまり情動要因が系統発生的（進化的）に形成される段階へ議論を進めることができるようになる。Tinbergen (1963) が問う4つのなぜ（機構、発達、機能、進化）⁵²になぞらえると、本論で対象にする視覚的コミュニケーション行動の発達と進化は、上述のような接点を持って議論できるものであると考えられる。

4.3.1 意図的主体性を実現するメカニズムの再検討

引き続き cond.A から cond.B や C が形成されていく過程を (4.4,4.5) 式と同様のアルゴリズムで記述することを考えてみる。まず、安心状態 ($em = 1$) での連想器の条件テーブル (表 4.1 右) で、想起情報 (s_t^*) と異なるカテゴリを出力する部分と、一致するカテゴリを出力する部分に分ける。すると、cond.C だけが異なるカテゴリを出力していることが分かる (表 4.2)。cond.C であるか否かに応じて、出力する条件を変えるアルゴリズムであると捉えれば、3章で構築した交互凝視行動の学習モデルは図 4.4 のようなシステムと見ることができる。

図 4.4 において連想器は、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^+ ）と想起情報 (s_t^*) を順に比較する。このとき cond.C ならば、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 ((4.6,4.7 上) 式)。逆に cond.C 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 ((4.6,4.7 下) 式)。

⁵²1.3 節の脚注 (16) で言及。

表 4.2: 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 3.2 および表 4.1 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のは cond.C である．

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

$$s_a = [s_t \succ s_{t-1}^* \succ s_t^+], \quad (4.6)$$

$$s_t^* = \begin{cases} s_a & \text{s.t. } C(s_a) \neq C(s_{t-1}^*) \text{ if cond.C,} \\ s_a & \text{s.t. } C(s_a) = C(s_{t-1}^*) \text{ otherwise.} \end{cases} \quad (4.7)$$

このアルゴリズムには 2 つの機構がある．

1. 3 つの情報を特定の順序で比較する機構 ((4.6) 式)

3 つの情報は 1. 感覚情報 (cond.A の s_t) , 2. 一時刻前の想起情報 (cond.B の s_{t-1}^*) , 3. 感覚情報からの連想情報 (cond.C の s_t^+) の 3 つであり，想起情報 (s_t^*) とこの順序で比較する．

2. cond.C かどうかによって比較条件を変える機構 ((4.7) 式)

cond.C の場合には想起情報と同じカテゴリのものを出力し，cond.C ではない場合には想起情報と異なるカテゴリのものを出力する．

以下に，この 2 つの機構がそれぞれに持つ意味を考察する．

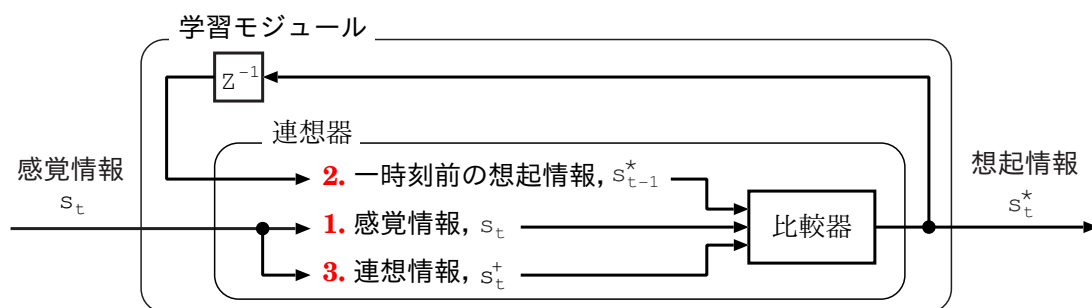


図 4.4: 連想器のシステム概念図：

視覚定位モジュールに直列に接続する学習モジュールを情動的参照視のメカニズムと同様に考えた場合のシステム概念図．

cond.C の持つ意味

順序は逆になるが、まずは cond.C についてこの条件がどういう意味を持っているのかを考える．cond.C では、子エージェント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) のカテゴリが一致していて、かつ両方共が注視した状態にある．これは、例えば子エージェントがオブジェクトを想起している場合には、オブジェクトを見ようとしていて、かつ実際に見えているオブジェクトが注視状態にあることを意味する．想起情報が注視した状態であり、かつ見えている情報も注視した状態にあるならば、目的は達せられたと考えて良いだろう．

このとき子エージェントは、連想器内で選択可能な情報に対して、注視しているものとは別のカテゴリのものを選択することで、その情報を見ようとする状態を作り出す⁵³．認知発達心理学では、乳幼児が見ているものを次々に変える状態を「馴化 / 脱馴化 (Habituation / Dishabituation)」として考える．見ているものに馴れる⁵⁴と、乳幼児は他のものに注意を移しやすくなる (馴化)．そして、見ているものの様子が変わったり新規なものが現れたりすると、それを注視する状態に移行する (脱馴化)．本論で構築したモデルは、その馴化 / 脱馴化がどのような要因によって起こるのかを議論できる．なぜなら、子エージェントが交互凝視を獲得するためには、親やオブジェクトを注視したら (cond.C になったら) それを見ることに馴れて (馴化)、見ていたものとは別のカテゴリを選択する (脱馴

⁵³ 正確には、もう 1 つの機構である「3 つの情報を特定の順序で比較する機構」が不可欠である．

⁵⁴ 一般的には「慣れる」を用いるが、ここでは専門用語に準じる．

化する) 必要があるからである⁵⁵。本論で構築したモデルにおいて、連想器がどのような情報を選択して出力するのかを検討することによって、乳幼児がこういった情報に注意を向けようとする傾向⁵⁶を持ち、それが視覚的コミュニケーション行動の獲得にどのように寄与しているのかを議論することができるのではないかと考えられる。

3つの情報を特定の順序で比較する機構の持つ意味

前述の分析では、連想器による情報選択が乳幼児に推定される馴化/脱馴化の認知能力と結び付いていることが分かった。しかしより重要なのは、連想器にある3つの情報(感覚情報: s_t , 一時刻前の想起情報: s_{t-1}^* , 連想情報: s_t^+)の中から、注視しているものとは異なるものを選択して連想器の出力とするだけでは、その情報が注視目標としては機能しないということである。そこでは(4.6)式のように情報を順序的に比較する必要がある。

この比較順序はどのような意味を持つだろうか。1つ考えられるのは、3つの情報に対するアクセス時間の違いである。感覚情報(s_t)は今受け取っている感覚なので最もアクセス時間が短く、次いで一時刻前の想起情報(s_{t-1}^*)がある。そして3つの情報の中で最もアクセスに時間が掛かるのが、確率分布を参照する連想情報(s_t^+)であると考えられる。また、情動的参照視において必要とされる(4.4)式の「最後に見た親の情報($s_t^\#$)」の比較順序は、 $[s_t \succ s_t^\# \succ s_{t-1}^*]$ あるいは $[s_t \succ s_{t-1}^* \succ s_t^\#]$ としても同様に機能することから、一時刻前の想起情報と同じ程度のアクセス時間に位置付けられる。ここでは、一時刻前の想起情報がワーキングメモリのような考え方に対応し、確率分布を参照する連想情報が短期記憶(あるいは中・長期記憶)のような考え方に対応するのではないかと考えられる。

ただし、アクセス時間によって比較する順序が決まるという考え方には、その順序に可塑性がなくなるという問題がある。確かに子エージェントが交互凝視を獲得する過程にお

⁵⁵ 馴化/脱馴化の傾向をモデルに組み込む必要性と重要性は、Triesch et al. (2006) のモデルにおいても指摘されている。

⁵⁶ ここで重要なのは、注意を向ける傾向ではなく、向けようとする傾向を検討することになるということである。なぜなら、連想器の出力は注視目標として機能するからである。本論のモデルがこの違いを表現できることは、反射的な行動と主体的な行動を明確に分けて考えることができることを意味する。また、見ようとする行動を検討する場合にも、構築したモデルを馴化/脱馴化のような生理現象と対応付けて考えることで、欲求(disire)や目的(goal)の違いを考察することができるようになると考えられる。

いては、この比較順序が守られる必要がある⁵⁷。しかし、視覚以外の媒体（音声やジェスチャなど）によるコミュニケーション行動や、より高次の行動においてもこの比較順序が必要とされるのかは分からない。比較順序を先述のように持つ必要があるという機構が、どの程度の一般性を持つのかを明らかにしていく必要があると考えられる。また、こういった傾向が本当にヒトの脳活動に観察されるのかどうかを同時に調査していく必要があるだろう。

4.3.2 意図的主体性を形成する過程における情動的参照視や反射的視覚定位の位置付け

3.8節の議論では、想起情報が注視目標として機能するための3つの機構を説明し、特に2.と3.の機構に関して次のような問題点があることを指摘した。

2. カテゴリの識別に基づいて出力情報を変更する機構：

乳幼児に仮定する能力が何であるのかが良く分からない。

3. 親・オブジェクト間の感覚情報の遷移を頻度分布に蓄積する機構：

反射的な行動（視覚定位）によって経験を強化するという仮定だけでは、親とオブジェクト間の規則性として、共同注視や参照視を学習することが難しい。

2.の「カテゴリの識別に基づいて出力情報を変更する機構」に関しては、前節のcond.Cの持つ意味と3つの情報を特定の順序で比較する機構の持つ意味において、それぞれが馴化／脱馴化と情報へのアクセス時間の違いに対応するのではないかと述べてきた。また、3.の「親・オブジェクト間の感覚情報の遷移を頻度分布に蓄積する機構」については、まさに本章が構築した情動的参照視が対応する。もともと指摘したのは、オブジェクトを見てから親を見る参照視が、経験からその規則性を抽出していると考えられるなら、興味深いオブジェクトばかりを見てしまったら子エージェントは親を見るのがなくなってしまふのではないかと問題である。認知発達心理学の知見を参考にすると、乳幼児には即時的に親を見てしまう機構があるのではないかと考えられた。この考えに基づいて構築した情動的参照視のモデルでは、子エージェントは不安になると、連想による交互凝視を

⁵⁷これが守られなかった場合には、3.8.2節のカテゴリの識別に基づいて出力情報を変更する機構において述べたことと同じように、交互凝視ができなくなる状態になる。

実現するために必要とされる3つの情報の比較順序に、最後に見た親の情報 ($s_t^\#$) を割り込ませ ((4.8) 式)、親に関する情報を出力するようになる ((4.5) 式)。

$$s_a = [s_t(\succ s_t^\#) \succ s_{t-1}^* \succ s_t^+], \quad (4.8)$$

この情動的参照視の機構は、視覚定位のような反射的な行動モジュールとは別に用意されるが、連想による交互凝視において注視目標を形成するような機能性は持たない。あくまでも即時的に親を見る行動を生成するだけである。この意味では、情動的参照視はオブジェクトを見た後に親を見る体験を提供する行動となる。これはつまり、情動的参照視を反射的行動である視覚定位と同じレベルの機能に位置付けることを意味する。このように考えると、2.4 節で指摘した眼球運動に関する反射的な共同注視行動も、親の次にオブジェクトを注視する体験を乳幼児に与える行動として捉えることができるようになる。このときには、子エージェントの持つ直列的な回路構成において反射的な行動を担うモジュールが、親の視線に対してその方向に視点を動かす機能を形成することになる⁵⁸。

まとめると、乳幼児の発達過程は次のように捉えることができる (図 4.5)。まず乳幼児は3ヶ月程度までに、周辺刺激への鋭敏性として反射的な視覚定位行動を獲得する。この反射的な視覚定位行動の獲得は、2.4 節でも触れた Atkinson et al. (1992) の実験から推定するものである。次いで6ヶ月程度までに反射的な共同注視を獲得し、9ヶ月程度までに情動的な参照視を獲得する。反射的な共同注視を獲得する月齢は、同じく2.4 節で触れた Hood et al. (1998) や板倉 (2005) の実験から推定するものである。また、情動的な参照視は第4章で触れた小沢 (2005) の知見を参考にするものである。そして9ヶ月以降には、これらの即時的な応答行動を基盤にして、親とオブジェクトの間にある規則性を学習し、視覚定位あるいは反射的共同注視を手段とするような注視目標を内部に形成し、連想による交互凝視行動を獲得する。この学習過程は、乳幼児の獲得する共同注視が基本的に6～18ヶ月程度の間に獲得されるものであるとする Butterworth and Jarrett (1991) の知見と、Corkum and Moore (1995) の指摘する条件付け的な学習の知見に対応するものである⁵⁹。

⁵⁸ このときの反射的共同注視は、親の次に見るオブジェクトの経験によってその規則性を学習するものではない。このため、実現する行動が反射的な行動だからと言って、Triesch et al. (2006) や Nagai et al. (2003) の学習モデルを採用することはできない。この反射的共同注視を何らかの学習によって獲得する場合には、親の視線の方向に自分の視点を動かすことを直接評価する仕組みを考える必要がある。これをニューラルネットワークで構成する場合には、教師なしで自律的な学習を行なう競合学習系のアルゴリズムが適用できるのではないかと考えられる。

⁵⁹ これらの知見に関しては1.2 節を参照のこと。

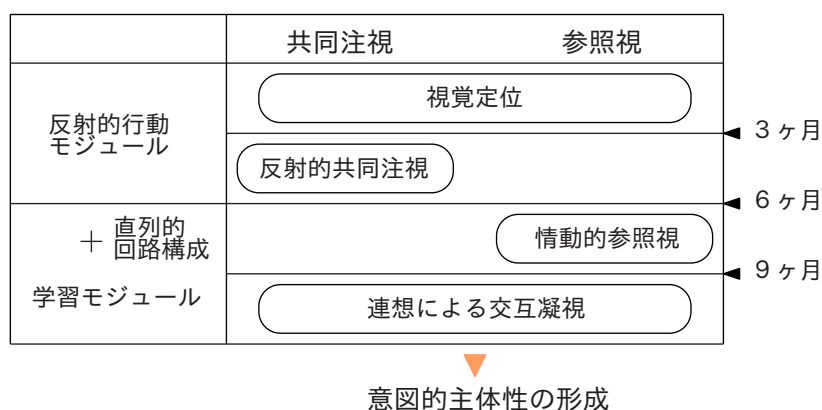


図 4.5: 連想による交互凝視を実現するメカニズム（直列的回路構成）と、乳幼児に観察されるコミュニケーション行動との対応関係

連想による交互凝視行動を獲得するには、乳幼児は次のような規則的な経験を積む必要があると考えられる（3.8.3 節に書いた規則を再掲）。

- 共同注視：親の視線の先にあるオブジェクトを見る経験。
- 参照視：オブジェクトを見て、自己受容感覚の原点⁶⁰にいる親を見る経験。

これまでの議論から、この規則の学習には3つのケースが考えられる。1つ目は反射的な行動（視覚定位、反射的共同注視）や情動的な参照視によってその規則を経験するケースである。この場合には、乳幼児は反射的な行動や情動的な行動を通じて、親の次にオブジェクトを見て、オブジェクトの次に親を見る体験を得ることになる。このように、乳幼児がその内部に注視目標を形成していく過程には、体験の中から規則性を見い出していく仕組みだけではなく、学習する規則性を得ることのできる基礎的な行動があると考えられる。2つ目は環境に埋め込まれた規則を経験するケースである。これは経験の蓄積によって頻度分布に現れる自然な構造がそのまま共同注視や参照視の構造を持つと考えることになる。このケースでは、3.8.1 節で説明した長井他（2004）の指摘するような規則を仮定することになる。そして3つ目が経験からの規則の抽出である。このケースでは、親とのインタラクションに嬉しさを感じることや、興味深いオブジェクトの出現を記憶に留めやすいといった傾向を検討することになる。

⁶⁰必ずしも原点である必要はない。

以上の議論から，意図的主体性を形成するシステムでは，その機能性の発揮には3章で指摘したカテゴリを識別する仕組みに加えて，馴化／脱馴化の仕組みと，情報へのアクセス時間の違いから派生する情報の比較順序が重要な役割を担うと言える．

第5章 議論：意図的主体性に基づく他者の意図理解

第3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モデルを構築した。そして第4章では、即時的な応答行動として親とのコミュニケーション機会を得る情動的参照視行動のモデルを構築した。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モデルを構築できたと考える。そこで本章では、ここまでに構築した人工システムの特徴をもう一度簡単にまとめて、次の発達ステップである「他者の意図を理解する過程」を検討する。

本章は4つの節から構成される。まず5.1節では、構築したモデルが持つ直列的な回路構成において、カテゴリを識別する仕組み、馴化／脱馴化の仕組み、そして情報を順序的に比較する仕組みという3つの仕組みが重要な役割を持つことを論じる。次いで5.2節では、形成する意図的主体性に他者が持つだ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。そして5.3節において、直列的な回路構成を持つ意図的主体性を入れ子状に組み上げることで、その発達過程が段階的に構築できると考えられることを論じる。最後に5.4節において、構築したモデルの発展と、そこで考えられる課題について述べる。

5.1 意図的主体性を実現する学習モデルのメカニズム

構築した人工システム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決めることができるようになる。こういった方法で見る物の曖昧性を解決する方法は、2.2節の先行研究に挙げた3つのモデル（Matsuda and Omori (2001), Triesch et al. (2006), Nagai et al. (2003)）の解決方法とは根本的に異なる。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。連想器を直列的な接続によって追加することで、注視目標を内部に持つための重要な仕組みとして分かったことが3つある。それは、カテゴリを識別する仕組み、馴化/脱馴化の仕組み、そして情報を順序的に比較する仕組みである。以下にそれぞれの仕組みが持つ特徴とその重要性をまとめる。

5.1.1 カテゴリを識別する仕組み

子エージェントは、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識別し、それぞれのカテゴリに特定の行動を割り当てることを学習する。カテゴリを認識することによって、形成される目的（注視目標）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。そしてその時系列は、カテゴリを特定の規則で選ぶ⁶¹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子エージェントが独自に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、そして既得能力の視覚定位が手段としてそれぞれ機能するようになる。

この仕組みは、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乳幼児が認識できることを仮定している。ここに乳幼児の認知能力を調査することと、本論が構築するモデルとの1つの接点がある。本論が構築したモデルを通じて、乳幼児が感覚情報をどのようなまとまりとして捉えているのかを検討することができるし、また逆に認知実験から得られる知見によって、モデルの妥当性を検証していくことが重要だと考えられる。

⁶¹ このカテゴリの選び方は、本論では感覚情報から親とオブジェクトを切り出せるように実験者が予め設計した。本来、どのようなカテゴリの形成が行なわれるかを調査することは重要で難しい課題である。

5.1.2 馴化 / 脱馴化の仕組み

子エージェントが親とオブジェクトを交互凝視するには、それぞれを注視できたときに、その注視しているものとは異なるカテゴリのもの（親ならオブジェクト、オブジェクトなら親）を選ぶ仕組みが必要である。つまり子エージェントには、内部に想起しているものを見ようとしているのか、それとも見ようとしていないのかを表現するために、想起したものと同じカテゴリのものを維持し続けるのか、それとも別のカテゴリのものを選ぶのかを決める仕組みがあるのである。

この仕組みが、乳幼児が持つと言われる馴化 / 脱馴化の仕組みに関連すると考えられる。乳幼児が何を見ようとするのかを認知実験から調べることは難しい⁶²。しかし、本論のようなモデルを構築することで、馴化 / 脱馴化のような認知傾向との接点をメカニズムの視点から議論することができるようになると考えられる。また、何を見ようとするのかを検討することは、経験からどのような規則を抽出するのかを考えることにも関連する。これは、乳幼児が親とのインタラクションを好むといった説明や、ある特徴を持ったおもちゃが好きであるといった説明に対して、記憶への蓄積強度というメカニズム的説明を与えることに関連する。

5.1.3 情報を順序的に比較する仕組み

子エージェントの内部には、「1. 今見ているもの」と「2. 見ようとしていたもの」、そして「3. 今見ているものから連想されるもの」という3つの情報がある（不安時の情動的参照視を考慮するなら、そこに「最後に見た親の情報」が含まれる）。カテゴリを識別し、内部に想起したものを見ようとするのか / しないのかが決められたとき、子エージェントはその3つの情報を特定の順序（1. → 2. → 3.）で想起している情報と比較する必要がある。この順序は、それぞれの情報にアクセスする時間の違いによってもたらされるのではないかと考えられるが、乳幼児にその仕組みを仮定できるのかどうかは良く分からない。ただしこの仕組みが、構築したモデルから論理的に導かれた仕組みであることから、逆に乳幼児の持つ機構として検証の必要性を提案できるのではないかと考えられる。この意味で、本論で構築したモデルの持つ意義を最も良く表わすのがこの仕組みであると言える。

⁶²乳幼児が何に視線を向けているのかを観察することはできる。しかし、それを見ようとしているのかどうかを知ることは難しい。

5.2 意図的主体性に基づく他者の意図理解

前節では、これまでに構築したモデルが、どのようなメカニズムによって自らが意図的に振る舞うようになるという意味での意図的主体性を形成するのかを論じた。そこでは、直列的な回路構成によって形成される目的と手段のセットが、交互凝視行動を起こすための1つの機能単位となっていることを述べた。本節では、この目的と手段が自分に関するものと他者に関するもの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のではないかと考えられることを論じる。

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、志向システムが入れ子の構造を形成し、その次数を増すことが、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⁶³。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覚的コミュニケーション行動の発達を見れば、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造の次数の深化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、そこに視覚的コミュニケーション行動の発達過程と、他者の意図を理解する過程を対応付ける。

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 (intentional system) 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

⁶³Dennett (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。

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学習モデルを当てはめる。すると、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直接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直接的に生成する。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状態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、チンパンジーが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。このように考えると、2次の志向システムで言われる「チンパンジーは実験者がバナナを食べたいことを知っている」という言明は、向き合った相手が今まさにバナナを取ろうとする目的を持っているかどうかを知ることと言及しているのであり、バナナがあれば実験者は必ず手を伸ばすだろうというような刺激-反応系としての振る舞いを知っていることを意味しているのではない。他者の内部状態に目的があることを前提に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見ようとしているのかを知った上でオブジェクトを注視す

るようになる（図 5.1）。また社会的参照においても，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ようになると考えられる．2 次の志向システムの構造を持つことによって，乳幼児はより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．

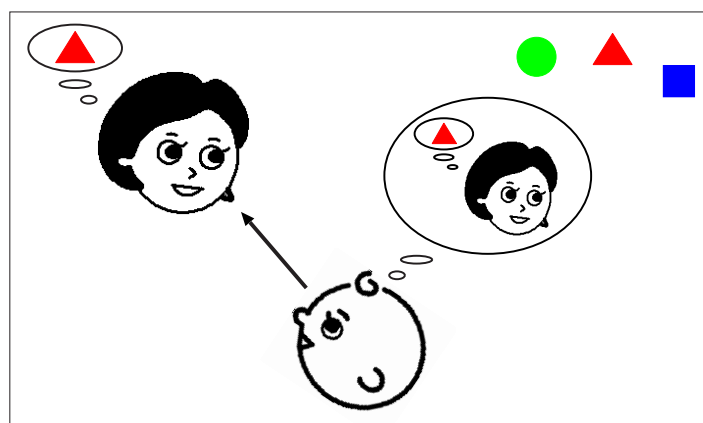


図 5.1: 共同注視における親の目的（見ようとするもの）の理解：
子は親のしているものを自らの持つ目的と手段から推論する．

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．これは，互いの注意を共有する状態である．特定の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い出すことができる．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．

この状態にある志向システムは、視線を活用し、自らの目的を相手に伝えることができる。子が、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、親はまだ、子が注意を向けているオブジェクトを理解していない状況を考える。このとき、子は親の注意をある対象に向けるという目的に対し、オブジェクトと親を交互に見るという交互凝視を手段として用いることが考えられる（図5.2）。3次の信念システムにおいて、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。この仕組みによって、子は自らの目的を他者に伝えることができるのではないかと考えられる。

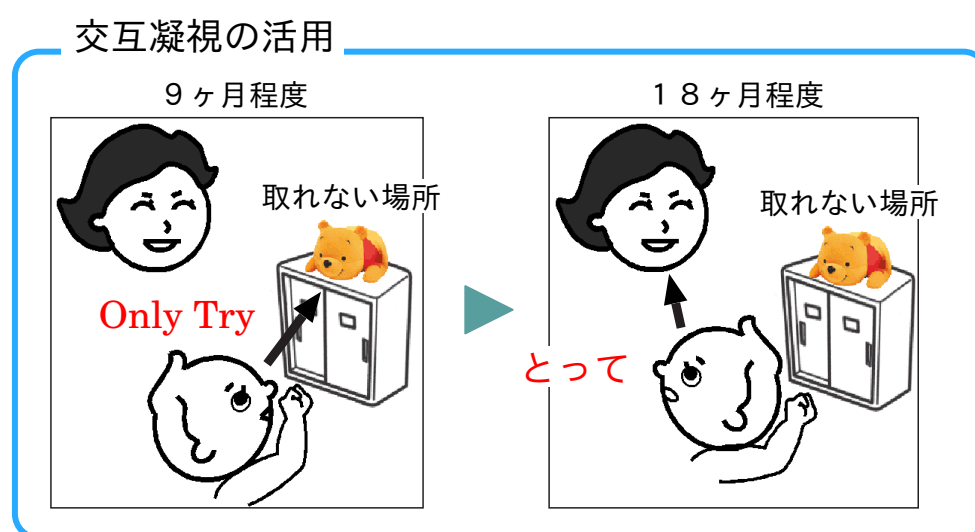


図 5.2: 交互凝視行動の手段的活用場面：

子は親とおもちゃの間で視線を行き来させることで、おもちゃを取りたいという目的（欲求）を親に伝える。

まとめると、3次までの志向システムは表5.1のような特徴を持つコミュニケーション階層として記述できる。0次の志向システムにおいては、子エージェントは感覚-運動間を直接結び付けたシステムを持つことによって、反射的な行動や情動的な行動を起こすという特徴を持つ（ここに視覚定位や情動的参照視が位置付けられる）。1次の志向システムでは、子エージェントは内部状態として注視目標を持ち、その注視目標に従って適切に親やオブジェクトを注視する手段を構成できる。これが意図的主体性の形成に相当する。2次の志向システムにおいては、子エージェントは親がどのオブジェクトを見ようとして

いるのかを理解し、そのオブジェクトを注視する。子エージェントが親の持つ目的を推論することによって、子エージェントは親の意図を理解した行動を獲得することが予想される。3次の志向システムにおいては、子エージェントがあるオブジェクトを注視しているとき、子エージェントは自分がそのオブジェクトを注視していることを親が分かっていることを知っている。自分の中に形成される他者のモデルが自分の目的を推論するという入れ子の構造を持つことで、子エージェントは他者と注意を共有し、自らの意図を伝えられるようになると思われる。

表 5.1: 志向システムのコミュニケーション階層

次数	機能的特徴	行動の変化(同じオブジェクトを見る状況)
0	反射的・情動的行動	子は視界に映るものを反射的に見る。(視覚定位)
1	意図的主体性の形成	子は、見ようとする目的を持って 親やオブジェクトを見る。(共同注視)
2	目的の推論による他者の意図理解	子は、親がどのオブジェクトを見ようとしているのかを知った上で、オブジェクトを見る。(社会的参照)
3	目的の伝達による他者との意図の共有	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とき、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。(共同注意)

5.3 他者の意図を理解する発達モデルの構築方法の検討

前節では、他者の意図的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を論じた。本節では、この入れ子構造の構築を検討する。

本論で構築する学習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前置接続することで実現できると考えられる(図5.3)。5.2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。

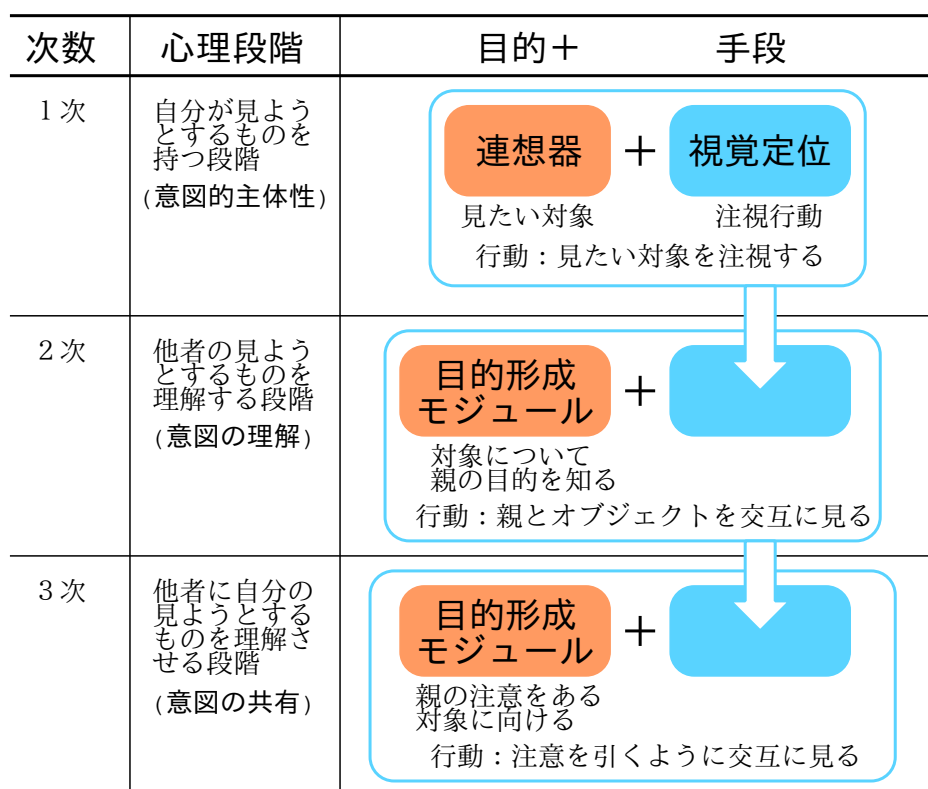


図 5.3: 目的と手段の入れ子構造の段階的な深化

本論で構築した学習モデルでは、視覚定位の行動モジュールに直列に接続した目的形成モジュール（連想器）が注視目標（目的）として機能し、視覚定位がその手段になる（図 5.3：1 次の状態）。ここに新たな目的形成モジュールを直列に前置接続し、このモジュールが「自分の見る対象について親の目的を知る」ことを目的とするようになることで、「見たい対象を注視する」という 1 次の目的と手段のセットが、上位の目的に対する手段として機能するようになる。これが、親がどんな目的を持って特定のオブジェクトを見ているのかを知るといった意図理解の状態を形成する（図 5.3：2 次の状態）。さらに新たな目的形成モジュールを前置接続し、このモジュールが「親の注意をある対象に向ける」ことを目的とするようになることで、2 次の「親とオブジェクトを交互に見る」ことが手段として機能するようになる。これが、自分がそのオブジェクトに注目していることを親に理解させることによる意図の共有状態を形成する（図 5.3：3 次の状態）。

上位の目的形成モジュールを前置接続することによって実現する入れ子構造は、そこに

流れる時系列信号に形成される入れ子構造であって、回路のアーキテクチャ自体が入れ子の構造を持つわけではない。いずれはアーキテクチャ自体の入れ子構造を併せて検討すべきだと考えられるが、意図的主体性を明示的な学習モジュールの追加によって検討したことに同じように、まずは上位の目的形成モジュールを明示的に前置接続する構造を用意することで、他者の意図を理解する過程に関しても、段階的にこういった仕組みが重要な役割を持つのかを明らかにしていくことができるのではないかと考えられる。ただし、ここで想定するような親の目的を知るなどの高度な目的を形成するモジュールを構築することは容易なことではない。特に、アプリアリに「目的」を与えるのではなく、学習を通じた発達過程において自律的に目的を形成できるようなモジュールを構築することが難しいのは言うまでもないことである。

また、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、上述のようなシステムの構築と共に、そのシステムの機能性や妥当性を検証する必要がある⁶⁴。機能性の検証には、本論の学習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のアプローチである。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 (Ouden et al., 2005; Purves et al., 2007, p.447,511)。この知見に本論の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3.8節や4.3節に示したようなメカニズム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 et al., 2000)。こういった知見に対しても、入れ子構造を持つシステム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、本論で構築したモデルには、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

⁶⁴これは、本論で構築した意図的主体性を形成する学習モデルにおいても同様である。

証していくには、こういった生得的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 et al., 1998; Shultz, 2003)。

本論のように人工システムを構築する手法は、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。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してい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。

5.4 モデルの発展と課題

ここでは、本論で構築したモデルを今後どのように発展させていけるのかを論じ、その課題を検討する。

意図的主体性を形成する学習モデルは、どのように他者の心的状態を理解していけるだろうか。本論が描き出そうとする発達過程は、「意図的主体性の形成→他者の意図理解→他者との意図の共有→他者の心的状態の理解」である。この道筋をたどる際のメカニズム的な特徴は、意図的主体性が他者を巻き込んで入れ子構造を形成することである。しかし入れ子構造の単純な拡張だけでは、ヒトの社会的なコミュニケーション行動を実現するには至らないことが予想される。なぜなら、人工システムによる入れ子構造の研究は人工知能の分野でさかんに取り組まれてきたが、フレーム問題 (McCarthy and Hayes, 1969) やガヴァガイ問題 (Quine, 1969)、さらにはシンボルグラウンディング問題 (Harnad, 1990) といった問題にはばまれて停滞しているように見えるからである。その証拠に、人工知能の分野で生まれた LISP 言語は、入れ子(再帰)構造の記述に特化したプログラミング言語として設計されているが、これを使って他者の意図を理解するようなコミュニケーションが人工システムで可能になったという話は聞こえてこない。

フレーム問題やガヴァガイ問題、そしてシンボルグラウンディング問題は、人工知能研

究の進展に伴って強く認識されるようになってきた問題である。注目したいのは、近年、進化的な視点を持つことの重要性が指摘されるようになってきたことである。例えばフレーム問題は、「<何を考えなくてもいいか>ということを考えずに、考えなくてもいいことをいかに考えないですか」（柴田, 2001）という問題で、この解決には、何に注目しなくてもいいのかを意識することなくやりすごす能力が必要とされる。生物はこの能力を進化的な適応過程から獲得していると考えられる。ヒトの生得的な行動は、生物進化の過程で意味のある行動として既に機能するようになっており、環境を捉えるためのフレームはそこで既に与えられていると考えられる。生物が進化の過程で適応的に獲得してきた行動の生成システムを、Wuketits (1990) は擬合理的装置と呼ぶ。

本論で構築したモデルにおいては、反射的な行動や情動的な行動がこの擬合理的装置に相当する。例えば、視覚定位が視界に映るものを反射的に捉えることには、敵から身を守ったり餌を見つけたりすることの適応価が考えられる。また情動的な行動も理性的思考の妨げになるだけだという通念が長く持たれていたが、近年では非理性的な情動こそが、社会の中での理性的な振る舞いを可能にしているとする主張が為されるようになってきている (Damasio, 1994; 藤田, 2007)。ここで重要なのは、一見非論理的に見える認知傾向でも、進化の過程では適応価を考えることができる可能性があるという点である。

この意味で、ヒトが持つ特異的でかつ非論理的能力として、対称性バイアスという認知傾向が注目されている (藤田, 1998; 岡ノ谷, 2003; 篠原他, 2007)。これは、 p ならば q を知ると、 q ならば p と思い込んでしまう傾向のことである。これは論理的には成立していない。例えば殺人を犯したヒトが精神異常者だったとしても、精神異常者なら殺人を犯すわけではないはずだが、ヒトにはそう思い込む傾向がある。この対称性バイアスは、言語を扱う基礎的な能力として重要である。りんごというオブジェクトを見て、*ringo* と発声したとき、逆に *ringo* と発声したことがりんごというオブジェクトを指すわけではない。しかし、ヒトではこれが当たり前に成立する。こういった傾向は、本論においても重要性を持っている。他者の見ようとしているものを自分の見ようとするものを基にして推論するとき、自分の見ようとしているものが他者の見ようとしているものだとは仮定することに、非論理的な推論が必要だと考えられるからである。

擬合理的装置を基に、社会的なコミュニケーション行動を獲得する過程を検討していくことが今後の課題である。進化的な視点でヒトのコミュニケーション行動を捉え、その発達過程のメカニズムを理解していくことが、ヒトの心の在り様をより正しく知ることに

つながっていくのではないかと考えられる。このとき、本論が用いる構成論的アプローチは、ヒトの心的状態の理解能力を抽象的なレベルで理解することを可能にする。またこれと同時に、計算理論的な仮説を構築することにも有効性を発揮すると考えられる⁶⁵。なぜなら、構築したモデルから重要性が示唆される3つの機構（カテゴリの識別、馴化／脱馴化、情報の順序的な比較）は、視覚的コミュニケーションだけではなく音声やジェスチャなどにシグナルの媒体を変えた場合にも適用できるものだと考えられるからである。ただし、構成論的アプローチが提示できるのは仮説だけである。構築するモデルで仮定する条件や能力は、認知実験や脳活動計測といった手法によってその妥当性を検証していく必要があることを忘れてはならない。

⁶⁵これが Marr (1982) の主張する3つのレベルのうちの「1. 計算理論のレベル」を理解することに相当する。

第6章 結論 —まとめと課題—

本論では、乳幼児が心的状態を理解するようになる発達過程の解明を目的として、意図的主体性を形成する学習モデルを構築した(3,4章)。また、その学習モデルを基に、他者の心的状態を理解するようになる過程がどのように考えられるのかを議論した(5章)。本章では、こういった学習モデルの構築や議論が本論の目的(1.4節)に対してどのように応えるものであるのかをまとめる(6.1節)。その上で、本論の研究がどのような課題を明らかにしているのかを6.2節に述べ、6.3節で本論が得る知見の持つ意義を述べる。

6.1 本論の取り組みとその結論

1.4節の「本論の目的」では、意図的主体性の形成過程に関する問いと、その意図的主体性を鋳型にして他者の意図を理解する過程に関する問いを発した。本節では、その問いに関して明らかになったことをそれぞれ述べる。

6.1.1 意図的主体性を形成する学習モデルのメカニズム

共同注視行動の獲得過程において、意図的主体性の持つ機能性を「自ら見ようとするものを自律的に決めることができるようになること」と捉え、次の問いを発した。

1. 意図的主体性の形成過程に関する問い

親の視線という刺激から内部に注視目標を形成するための人工システムとして、そのアーキテクチャおよびそこでの情報表現と学習アルゴリズムはどのように構築可能か。

この問いに対して本論では、

- 視覚定位によって手段を担うモジュールに、注視目標という目的を形成するモジュールを直列に前置接続する回路構成によって、その機能性が実現できる

ことを明らかにした。直列的な回路構成によって構築した学習モデルは、親の視線からオブジェクトを連想し、視界の外にあるオブジェクトを見るという共同注視行動を獲得する。このとき、親の視線の先に複数のオブジェクトが配置される状況に対しても、形成する注視目標によって見るものを自律的に決定する機能を獲得する。ここに、単に親の視線に反射的に反応して視線を動かす行動との質的な違いがある。

この学習モデルでは次の3つのメカニズムが重要な役割を担う(3.8節)。

1. 親やオブジェクトといったカテゴリを識別する仕組み(3.8.1節)
2. カテゴリの識別に基づいて出力情報を変更する仕組み(3.8.2節)
3. 親・オブジェクト間の感覚情報の遷移を頻度分布に蓄積する仕組み(3.8.3節)

2.の「カテゴリの識別に基づいて出力情報を変更する仕組み」は、2つのメカニズムから説明される(4.3.1節)。

2-a. 感覚情報を特定の順序で比較する仕組み

2-b. 対象を注視しているかどうかに応じて比較条件を変更する仕組み

2-a.の仕組みは、情報へのアクセス時間に違いがあることを仮定することで説明できることから、ワーキングメモリや短期記憶といった記憶情報のタイプに関連した仕組みであると考えられる。また2-b.の仕組みは、注視することに馴れた状態を仮定することで説明できることから、乳幼児の持つ馴化/脱馴化の生理的傾向に関連した仕組みであると考えられる。この2つの仕組みに加えて、1.のカテゴリを識別する仕組みを併せた3つの仕組みが、乳幼児の持つ認知傾向との接点を持つ重要な仕組みであると言える。中でも2-a.の仕組みは、乳幼児の行動観察からは推定が難しい仕組みであるという意味で、構成論的アプローチが発揮した1つの重要な成果であると考えられる。まとめると、本論が構築した学習モデルから乳幼児に必要な能力として推定されるメカニズムは、

- カテゴリ形成の仕組み
- 馴化/脱馴化の仕組み

- 記憶情報のタイプに関連した情報の比較順序に関する仕組み

の3つである。

3. の「親・オブジェクト間の感覚情報の遷移を頻度分布に蓄積する仕組み」に関しては、情動的参照視のモデルを構築することによって、共同注視や参照視の規則性を体験する基盤的な行動が実現できることを確認した（4.3 節）。このモデルの構築から本論は、体験の中から乳幼児が規則性を抽出する能力を仮定する以前に、そもそも共同注視や参照視を体験させるような基礎的な行動が反射的共同注視や情動的参照視として存在していることを示唆した（4.3.2 節）。先行研究のモデル（2.2 節）は、共同注視を反射的な行動として設計しながらも、親の視線の先にあるオブジェクトを見るという体験からその規則を学習する。しかし、反射的な行動（即時的という意味でここに情動的行動も含める）は視界の端に映るものを反射的に見てしまうような運動に類似した仕組みによって形成されるべきもので、親の視線とオブジェクトとの間にある規則をその体験から学習する仕組みとは分けて考えるべきだと思われる。

6.1.2 他者の意図を理解する発達モデルのメカニズム

意図的主体性を「自ら見ようとするものを持つこと」としたことに対応して、他者の意図を理解することを「他者の見ようとするものを理解すること」と定義し、次の問いを發した。

2. 他者の意図を理解する過程に関する問い

内部に注視目標を形成して意図的主体性を実現するメカニズムを鑄型にして、他者の意図を理解し、やがて他者の心的状態を理解するようになる発達過程はどのようなメカニズムを持った人工システムによって構築可能か。

この問いに対して、意図的主体性を形成する学習モデルに基づく議論から、

- 目的と手段がセットになった意図的主体性が、他者を巻き込んで入れ子の構造を構成するメカニズムがあるのではないか

ということを示唆した（5.2 節）。この意図的主体性の入れ子構造は、既にある目的と手段のセットを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前置接続するこ

とで実現できるのではないかということを論じた(5.3節)。これは、本論で構築したモデルが手段を担うモジュールに対して目的を形成するモジュールを前置接続する構造を持っているからこそ構築できる構造である。ただし本論では、具体的なモデルの構築には至っておらず、モデルを構築するための基本的な考え方を提示したに過ぎない。今後は、このメカニズムを実現するモデルを構築し、入れ子が2次の状態や3次の状態になる過程のそれぞれで、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がどのように構成可能であるのかを検討する必要がある。また、この入れ子構造を具体的に構築していくときには、5.4節の議論において述べたように、感覚情報の非論理的な蓄積規則を考える必要があるのではないかと考えられる。これは、本論のモデルが仮定する乳幼児の能力と、生物が進化過程で獲得したであろう能力の接点を議論した結果から示唆するものである。

6.2 明らかになった研究課題

まず、意図的主体性の形成過程として構築した学習モデルから明らかになったメカニズムと、乳幼児の持つ能力との関係をより詳しく検討する必要がある。構築したモデルと乳幼児に仮定される能力との接点は3つある。1. カテゴリを識別する仕組み、2. 馴化/脱馴化の仕組み、そして3. 情報を順序的に比較する仕組みである(5.1節)。

1. カテゴリを識別する仕組み

子エージェントは受け取る感覚情報からそれらが親やオブジェクトであることを識別できることを仮定した。この仮定の中で、例えば3.8.1節で説明したようにオブジェクトの形状を異なるカテゴリとして判断するように設定すれば、子エージェントはより具体的な対象を注視しようとするようになる。ただし、ヒトの持つカテゴリには抽象度を可変にするような階層性があることが知られている。例えば乳幼児は、交互凝視をする中で形状を無視してオブジェクト全体を想起する場合と、特定の形状のオブジェクトを想起する場合を状況に応じて適切に変化させていると考えられる。

成人のカテゴリがより複雑な構造を持っていることには疑いの余地がない。本論では目的と手段のセットに関する入れ子構造を示唆しているが、このカテゴリの形成においても入れ子構造を持った階層性の構築過程があるのではないかと考えている。

より高次の社会的コミュニケーション行動をモデル化する取り組みの中で、カテゴリが複雑化するメカニズムと、目的と手段の構造が複雑化するメカニズムの関連性は明らかにすべき課題の1つである。

2. 馴化 / 脱馴化の仕組み

今見ているものからの連想によって視界に映っていない親やオブジェクトを注視する行動を起こす子エージェントは、連想した情報を見ようとするかどうかを決める仕組みを持つ必要がある。構築した学習モデルにおいては、対象を注視しているかどうかに応じて比較条件を変更する仕組みによって、親を注視したときにはオブジェクトが、オブジェクトを注視したときには親がそれぞれ想起情報として維持されるようになっている。この仕組みは、親やオブジェクトを注視すると、子エージェントはそれを見ることに馴れると解釈することができる。このことから、この仕組みが乳幼児の持つ馴化 / 脱馴化の傾向に関連した仕組みであると考えられた。

見ているものに馴れることによって別のものに注意を向けるようになることは、視覚定位や情動的参照視のような即時的な行動とは別に、乳幼児が様々な体験をしていくことの基礎になると考えられる。そして、乳幼児が今見えているものに飽きた状態で、次にどのようなものを見ようとするのかを考えることが、今後に検討すべき乳幼児の能力傾向であると考えられる。そのときには、乳幼児の持つ情動や欲求といった要因を検討することが重要になると考えられる。またこの検討が、乳幼児が自らの経験をどのような要因によって強化しているのかを検討することにつながると考えられる。

3. 情報を順序的に比較する仕組み

見ようとするものを決めるだけでは、想起したものが注視目標として機能しないという意味で、この「情報を順序的に比較する仕組み」は重要である。この仕組みは、情報へのアクセス時間の違いとしてワーキングメモリや短期記憶といった記憶の機能に関連していると考えているが、実際にこのような仕組みが存在するかどうかは良く分からない。今後は、構成論的アプローチによって論理的に導かれたこの仕組みを、より詳しく調査していく必要がある。その方法の1つには、より多くのモデルを構築して、この仕組みがより一般的に必要とされるものであるのかを検討する

ことが考えられる．このときには，より高次の行動をモデル化の対象にしたり，視覚以外のコミュニケーション媒体（音声，ジェスチャ，表情など）による行動をモデル化の対象にすることが考えられる．またもう1つには，脳活動計測のような手法で明らかにされる知見と照合して，その仕組みの妥当性を検証していく方法を考えることができる．

次いで，他者の意図を理解する過程として，他者が見ようとするものを理解するようになる発達モデルの構築に取り組む必要がある．このときには，5.4節での議論のように，進化との接点を考えていくことが重要であると考えられる．また，この発達モデルの構築においては，乳幼児の行動観察や脳活動計測の知見を取り入れて，現実との接点を確認していく必要がある．このときには，1つの具体的な手法として，学習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実施して，ヒトの反応（行動観察や脳活動計測）を調査するような方法を考えることができる．

6.3 構成論的アプローチによる知見が持つ特徴とその意義

本論では，内面に意図性が形成されることを前提とした学習モデルの構築を行なった．これは，ヒトを刺激-反応系のブラックボックスとして扱う立場を離れて，ヒトの内面をメカニズムの観点から理解しようとする試みである．この研究が示すメカニズムの知見は，乳幼児の行動を観察する研究や脳活動を計測する研究に指針を与えることができるのではないかと考えられる．本論のような構成論的なアプローチと，行動観察や脳活動計測といった実験的なアプローチが相補的な関係を築くことによって，将来的には乳幼児が他者の意図を理解するようになる発達過程の初期段階を，メカニズムの側面から理解できるようになることが予想される．

また，他者の意図を理解し，やがて他者の心的状態を理解するようになる過程をメカニズムの側面から明らかにしていくことは，ヒトのコミュニケーションが持つ特徴をより正しく理解することに貢献するのではないかと考えられる．なぜなら，本論のモデルが提示するようなメカニズム的な知見は，ヒトのコミュニケーションが単に形式的な知識をやりとりするものではないことを教えてくれるからである．こういったことから，本論の研究は知識科学の基礎的な考え方を形成する研究としての意義を持つのではないかと考えられる．

6.4 おわりに

最後に個人的な研究の動機を書いて本論を閉じることにする。

私が興味を持つのは、主にヒトが表出する言語や社会といった現象である。それがなぜなのかを問えば、そこには「ヒトがヒトである本質的な要因が何かを理解したい」という単純な動機があるだけである。これはヒトのヒトらしさを問うことであると考えている。ヒトのヒトらしさとは何か、あるいは、ヒトは何によってヒトであるのかという問いは、誰もが持つ素朴な問いであると同時に科学が問い続ける難問の1つでもある。今は、本論の執筆によってこの難問に取りかかる端緒を得ることができたことに大きな喜びを感じると共に、その問題の難しさに改めて深い畏れを感じている。

本論は、この動機に基づいた4年間の思索の結果である。その動機は今でも変わらない。今はただ、この思索の時間がこれからも長く続くことを願うばかりである。

謝辞

本論の執筆に関してはもちろんのこと、私が JAIST に来ようと思ったそのはじめから、橋本先生には大変お世話になりました。橋本先生は、5 年前、企業を退職して研究者の道を歩みたいという私を快く受け入れてくださいました。また、工学的思考に凝り固まっていた私に、より広い哲学とその実践的研究分野を提示していただいたことは、本学で得た、他の何にも代えがたい貴重な財産となっています。私が執筆する各種の論文に対して、いつでも深い洞察と厳しい指導を重ねていただいたことに、深く感謝致します。

また、私が所属する複雑系解析論講座の指導教官である中森先生には、快適な研究生生活を送るための様々なご助力をいただきました。直接的な指導を受ける機会は多くありませんでしたが、本講座が自由な雰囲気の中で研究できる環境にあるのは、まぎれもなく研究科長である中森先生の御尽力に拠るところであると考えております。この場を借りてお礼申し上げます。

さらに、本論の審査にあたっていただいた審査員の皆さまには、貴重な御時間を割いて審査して頂けたことに心からお礼を申し上げます。とりわけ、外部審査員である大阪大学大学院の浅田先生には、わざわざ私の審査会に足を運んで頂くことになり、とても感謝しております。最初、浅田先生が審査を引き受けてくださることを聞いたとき、私は耳を疑いました。認知発達ロボティクスを掲げ、世界をリードする研究者である浅田先生に本論を審査していただいたことに、深い喜びを感じています。

また、今は研究室にいない並川 淳・佐藤 尚の両氏にも謝意を表します。私が本論で入れ子構造の重要性を考えるに至ったのは、間違いなく並川氏の影響があったからです。また、複雑な現象に対する世界観を熱く語る佐藤氏は、研究者としての情熱を共有する楽しい時間を与えてくれました。私が橋本研究室に来た最初の一年間、両氏がいることによって、私の見識は大きく広がりました。この場を借りてお礼申し上げます。

そして、同じ時期に、となりのブースで共に夜遅くまで執筆作業をし続けた畠山剛臣氏に謝意を表します。博士論文という未知の作業に立ち向かう気持ちを維持できたのは、い

つでも励まし合える同僚がいたからです。共に食事をし、温泉に入り、その中で様々に議論したことは、私の考えを深める貴重な機会を与えてくれました。これからも長く親交が続くと思いますが、ひとまずこの場を借りてお礼を申し上げます。

また、私が研究室で快適に過ごすことができたのは、橋本研究室のメンバのおかげです。橋本研究室は、皆の取り組む研究テーマがばらばらであると、内輪で話すこともあれば、外部の方から言われることもあります。しかし、そこには現象に対する共通した見方（哲学）があり、皆その見方に引き寄せられてきた者たちだと思っています。そういった吸引力として働く橋本先生、そしてその吸引力に引き寄せられてきた研究室メンバ。そういった方々の集団であるからこそ、私はこの研究室で、本論のアイディアを形にすることができたのだと思います。この集団を実現する知識科学研究科と、その得難い環境の中に身を置くことができたことに深く感謝致します。

最後に、職を辞して何の役に立つのだから分からない研究に没頭する私に理解を示し、食糧などの救援物資を送ってくれた母や姉に感謝します。そして何より、私の価値観や世界観に多大な影響を与えた、今は亡き父と、学びたくても学べない時代があったことを、幾度となく語ってくれた祖父に、この論文を捧げます。また、何が問題であるのかを考え続ける孤独な毎日に、彩りと安らぎを与えてくれた生涯のパートナーである妻に、これからも変わらぬ感謝の心を誓います。

社会に生きる一人の人間として、いかに多くの人々に支えられているか、それを素直に感じた4年間でした。そんな皆さまに、心からの感謝とお礼を申し上げます。

本当にありがとうございました。そしてこれからも宜しくお願い致します。

2008. 春 金野 武司

参考文献

- Anscombe, G.E.M. (1957) *Intention*: London : Blackwell.
- Asada, M., K.F. MacDorman, H. Ishiguro, and Y. Kuniyoshi (2001) “Cognitive developmental robotics as a new paradigm for the design of humanoid robots,” *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 37, pp. 185–193.
- 蘆田宏 (2004) 「動き知覚と動画の認識」,『映像情報メディア学会誌』, 第58巻, 第8号, 1151–1156 頁 .
- Atkinson, J., B. Hood, J. Wattam-Bell, and O.J. Braddick (1992) “Changes in infants’ ability to switch visual attention in the first three months of life,” *Perception*, Vol. 21, pp. 643–653.
- Baron-Cohen, S. (1995) *Mindblindness*: MIT Press. (長野 敬, 長畑 正道, 今野 義孝 訳 (1997), 『自閉症とマインド・ブラインドネス』, 青土社.).
- Baron-Cohen, S., A.M. Leslie, and U. Frith (1985) “Does the autistic child have a ‘theory of mind’?” *Cognition*, Vol. 21, pp. 37–46.
- Bear, M.F., B.W. Connors, and M.A. Paradiso (2007) *Neuroscience: Exploring the Brain, Third edition*: Lippincott Williams & Wilkins Inc., USA. (加藤 宏司, 後藤 薫, 藤井 聡, 山崎 良彦 監訳 (2007), 『神経科学—脳の探求—』, 西村書店.).
- Breazeal, C. and B. Scassellati (2000) “Infant-like social interactions between a robot and a human caretaker,” *Adaptive Behavior*, Vol. 8, pp. 49–74.
- Brooks, R. (1986) “A robust layered control system for a mobile robot,” *Robotics and Automation, IEEE Journal of [legacy, pre-1988]*, Vol. 2, No. 1, pp. 14–23.

- Brooks, R.A. (1992) "Intelligence without representation," *Foundations of Artificial Intelligence*, Vol. 47, pp. 139–159.
- Butterworth, G.E. and N.L.M. Jarrett (1991) "What minds have in common is space: Spatial mechanisms serving joint visual attention in infancy," *British Journal of Developmental Psychology*, Vol. 9, pp. 55–72.
- Corbetta, M., J.M. Kincade, and G.L. Shulman (2002) "Neural Systems for Visual Orienting and Their Relationshis to Spatial Workiing Memory," *Journal of Cognitive Neuroscience*, Vol. 14, No. 3, pp. 508–523.
- Corkum, V. and C. Moore (1995) "Development of joint visual attention in infants," in C. Moore and P.J. Dunham eds. *Joint Attention: Its Origins and Role in Development*: Lawrence Erlbaum, pp. 61–84. (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.).
- Damasio, A.R. (1994) *Descartes' Error: Emotion, Reason, and the Human Brain*: New York: Putnam. (田中 三彦 訳 (2000), 『生存する脳—心と脳と身体の神秘—』, 講談社.).
- Dennett, D.C. (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.L., E.A. Bates, M.H. Johnson, A. Karmiloff-Smith, D. Parisi, and K. Plunkett (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.).
- Frith, U. (1989) *AUTISM: Explaining the Enigma*: Blackwell, UK. (富田真紀, 清水 康夫 訳 (1991), 『自閉症の謎を解き明かす』, 東京書籍.).
- Frye, D. (1991) "The origins of intention in infancy," in D. Frye and C. Moore eds. *Children's theories of mind*: Hillsdale, NJ:Erlbaum, pp. 101–132.
- 藤田和生 (1998) 『比較認知科学への招待—「こころ」の進化学—』, ナカニシヤ出版 .

- (2007) 「感情の進化」, 藤田和生 (編) 『感情科学』, 京都大学出版会 .
- Harnad, S. (1990) “The symbol grounding problem,” *Physica D.*, Vol. 42, pp. 335–346.
- 長谷川寿一・長谷川真理子 (2000) 『進化と人間行動』, 東大出版会 .
- 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』, 紀伊國屋書店, 132–135 頁 .
- 開一夫・松井孝雄 (2001) 「空間認知と参照枠」, 乾敏郎・安西祐一郎 (編) 『イメージと認知』, 岩波書店, 61–90 頁 .
- Hood, B.M., J.D. Willen, and J. Driver (1998) “Adult’s Eyes Trigger Shifts of Visual Attention in Human Infants,” *Psychological Science*, Vol. 9, No. 2, pp. 131–134.
- Imai, M., T. Ono, and H. Ishiguro (2003) “Physical relation and expression: joint attention for human-robot interaction,” *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, Vol. 50, No. 4, pp. 636–643.
- 板倉昭二 (2005) 「視線理解の進化と発達」, 遠藤利彦 (編) 『読む目・読まれる目』, 東京大学出版会, 115–136 頁 .
- Jamone, L., G. Metta, F. Nori, and G. Sandini (2006) “James: A Humanoid Robot Acting over an Unstructured World,” in *Humanoid Robots, 2006 6th IEEE-RAS International Conference*, Genoa Univ., Genova, Italy, Dec. 4-6.
- Jasso, H., J. Triesch, and C. Teeuscher (2005) “A Reinforcement Learning Model Explains the Stages of Development of Gaze Following,” in *12th Joint Symposium on Neural Computation*, University of California, Los Angeles, USA, May 14.
- Jellema, T., CI Baker, B. Wicker, and DI Perrett (2000) “Neural Representation for the Perception of the Intentionality of Actions,” *Brain and Cognition*, Vol. 44, No. 2, pp. 280–302.
- Johnson, M.H., S. Dziurawiec, H. Ellis, and J. Morton (1991) “Newborns’ preferential tracking of face-like stimuli and its subsequent decline,” *Cognition*, Vol. 40, No. 1-2, pp. 1–19.

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 .

Kaneko, K. and I. Tsuda (1994) “Constructive complexity and artificial reality: an introduction,” *Physica D*, Vol. 75, pp. 1–10.

金子邦彦・津田一郎 (1996) 『複雑系のカオスのシナリオ』, 朝倉書店 .

川人光男 (1996) 『脳の計算理論』, 産業図書 .

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』, 第 2005 巻, 第 11 号, 179–186 頁, Oct.11-13 月 .

小嶋秀樹 (2001) 「社会的インタラクション能力の発達」, 『人工知能学会言語・音声理解と対話処理研究会, SIG-SLUD-A102』, 21–26 頁 .

Kozima, H. (2002) “Infanoid: A babybot that explores the social environment,” in K. Dautenhahn, A.H. Bond, L. Canamero, and B. Edmonds eds. *Socially Intelligent Agents: Creating Relationships with Computers and Robots*: Kluwer Academic Publishers, pp. 157–164.

Langton, C.G (1984) “Self-reproduction in cellular automata,” *Physica D*, Vol. 10D, pp. 135–144.

Marr, D. (1982) *Vision: A Computational Investigation into the Human Representation and Processing of Visual Information*: W.H. and Company, New York. (乾 敏郎, 安藤 広志 訳 (1987), 『ビジョン—視覚の計算理論と脳内表現』, 産業図書.).

Matsuda, G. and T. Omori (2001) “Learning of Joint Visual Attention by Reinforcement Learning,” in *International Conference on Cognitive Modeling*, pp. 157–162.

McCarthy, J. and P.J. Hayes (1969) “Some Philosophical Problems from the Standpoint of Artificial Intelligence,” in B. Meltzer and D. Michie eds. *Machine Intelligence 4*: Edinburgh University Press, pp. 463–502. reprinted in McC90.

- Meltzoff, N., A (1995) “Understanding the intentions of others: Re-enactment of intended acts by 18-month-old children,” *Developmental Psychology*, Vol. 31, No. 5, pp. 838–850.
- Meltzoff, A.N. (2007) “The ‘like me’ framework for recognizing and becoming an intentional agent,” *Acta Psychologica*, Vol. 124, pp. 26–43.
- Metta, G., G. Sandini, L. Natale, R. Manzotti, and F. Panerai (2001) “Development in Artificial Systems,” in *EDEC 2001 Symposium at the International Conference on Cognitive Science*, Beijing China, Aug.27-31.
- Nagai, Y. (2004) “Understanding the development of joint attention from a viewpoint of cognitive developmental robotics,” Ph.D. dissertation, Osaka University.
- Nagai, Y., K. Hosoda, A. Morita, and M. Asada (2003) “A constructive model for the development of joint attention,” *Connection Science*, Vol. 15, No. 4, pp. 211–229.
- 長井志江・細田耕・森田章生・浅田稔 (2004) 「視覚注視と自己評価型学習の機能に基づくブートストラップ学習を通じた共同注意の創発」,『人工知能学会論文誌』, 第 19 巻, 第 1 号, 10–19 頁 .
- 岡本夏木 (1982) 『子どもとことば』, 岩波書店 .
- 岡ノ谷一夫 (2003) 「身体的「知」の進化と言語的「知」の創発」,『人工知能学会誌』, 第 18 巻, 第 4 号, 392–398 頁 .
- den Ouden, HEM, U. Frith, C. Frith, and SJ. Blakemore (2005) “Thinking about intentions,” *Neuroimage*, Vol. 28, No. 4, pp. 787–796.
- 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』, 東京大学出版会, 139–156 頁 .
- Paterson, S.J., S. Heim, J.T. Friedman, N. Choudhury, and A.A. Benasich (2006) “Development of structure and function in the infant brain: Implications for cognition, language and social behaviour,” *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, Vol. 30, No. 8, pp. 1087–1105.

- Piaget, J. (1952) *The origins of intelligence in children*: New York: Norton.
- Posner, M.I. (1980) “Orienting of attention,” *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, Vol. 32, No. 1, pp. 3–25.
- Poundstone, W. (1988) *Labyrinths of Reason*: International Creative Management, Inc.
(松浦 俊輔 訳 (2004), 『パラドックス大全—世にも不思議な逆説パズル—』, 青土社.).
- Premack, D. and G. Woodruff (1978) “Does the chimpanzee have a theory of mind,” *Behavioral and Brain Sciences*, Vol. 1, No. 4, pp. 515–526.
- Purves, D., G.J. Augustine, D. Fitzpatrick, W.C. Hall, and A. Lamantia eds. (2007) *Neuroscience, Fourth Edition*: Sinauer Associates, Inc.
- Quine, W.V.O. (1969) *Ontological Relativity and Other Essays*: Columbia University Press.
- Ray, T.S. (1991) “An Approach to the Synthesis of Life,” in C.G. Langton, C. Taylor, J.D. Farmer, and S. Rasmussen eds. *Artificial Life II, SFI Studies in the Sciences of Complexity*, Vol. 10: Addison-Wesley, pp. 371–408.
- Saxe, R., S. Carey, and N. Kanwisher (2004) “Understanding Other Minds: Linking Developmental Psychology and Functional Neuroimaging,” *Annual Reviews of Psychology*, Vol. 55, pp. 87–124.
- Scaife, M. and J.S. Bruner (1975) “The capacity for joint visual attention in the infant,” *Nature*, Vol. 253, pp. 265–266, Jan.24.
- Scassellati, B. (2002) “Theory of Mind for a Humanoid Robot,” *Autonomous Robots*, Vol. 12, No. 1, pp. 13–24.
- 柴田正良 (2001) 『ロボットの心 —7つの哲学物語—』, 講談社現代新書 .
- 篠原修二・田口亮・桂田浩一・新田恒雄 (2007) 「因果性に基づく信念形成モデルと N 本腕バンディット問題への適用」, 『人工知能学会論文誌』, 第 22 巻, 第 1 号, 58–68 頁 .

- Shultz, T.R. (2003) *Computational Developmental Psychology*: A Bradford Book, MIT Press, cambridge, MA.
- Sutton, R.S. and A.G. Barto (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.).
- Tinbergen, N. (1963) “On aims and methods of Ethology,” *Zeitschrift fur Tierpsychologie*, Vol. 20, pp. 410–433. (Tinbergen, N. (2005), On aims and methods of ethology, *Animal Biology*, 55-4, pp. 297–321).
- Tomasello, M. (1995) “Joint attention as social cognition,” in C. Moore and P.J. Dunham eds. *Joint Attention: Its Origins and Role in Development*: Lawrence Erlbaum, pp. 103–130. (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.).
- (2000) *The cultural origins of human cognition*: Harvard University Press, Cambridge, pp. 72–73.
- Triesch, J., C. Teuscher, G. Deak, and E. Carlson (2006) “Gaze following: why (not) learn it,” *Developmental Science*, Vol. 9, No. 2, pp. 125–147.
- Wimmer, H. and J. Perner (1983) “Beliefs about beliefs: representation and constraining function of wrong beliefs in young children’s understanding of deception,” *Cognition*, Vol. 13, No. 1, pp. 103–128.
- Wuketits, F.M. (1990) *Evolutionary Epistemology and Its Implications for Humankind*: State University of New York Press. (入江 重吉訳 (1994), 『進化と知識 —生物進化と文化的進化—』, 法政出版.).
- 山口真美 (2003) 『赤ちゃんは顔をよむ —視覚と心の発達学—』, 紀伊國屋書店.
- 吉永良正 (1996) 『「複雑系」とは何か』, 講談社現代新書.

本研究に関する発表論文および学会発表

学術雑誌

- (1) 金野 武司, 橋本 敬 (2008), “乳幼児の視線：交互凝視行動の計算論的研究,” 認知科学, Vol.15, No.2 (in press).

国際会議における発表と予稿

口頭発表 (査読あり (概要))

- (2) Konno,T. and Hashimoto,T. (2008), “Computational Study on Joint Visual Attention How with Intentional Agency by Serial Architecture with Goals and Means,” *3rd International Nonlinear Science Conference*, Surugadai Memorial Hall, Chuo University, Tokyo, Japan, Mar.13 - 15.
- (3) Konno,T. and Hashimoto,T. (2007), “Elementary Developmental Process of Intentional Agency: Artificial Construction of Gaze Alternation in Communicative Eye Gaze by Infants,” *Proceedings of the Artificial Life and Robotics, AROB 12th '07*, CD-ROM, Oita Univ.,Beppu, Japan, Jan.25 - 27.

ポスター (査読あり (全文))

- (4) Konno,T. and Hashimoto,T. (2006), “Developmental Construction of Intentional Agency in Communicative Eye Gaze,” *Proceedings of the International Conference on Development and Learning, ICDL '06*, CD-ROM, Indiana Univ., Bloomington, USA, May 31 - Jun.3.

国内学会・研究会における発表と予稿

口頭発表 (査読あり (概要))

- (5) 金野 武司, 橋本 敬 (2006), “交互凝視における視線の応答的シグナル化と意図的主体性の発達の構成,” MPS シンポジウム 2006「複雑系の科学とその応用」講演論文集, vol.2006, 10, 名古屋大学, Oct.24-25, pp.195-202.
- (6) 金野 武司, 橋本 敬 (2006), “交互凝視における能動的主体性表現の構成論的モデル,” 電子情報通信学会技術研究報告書 ニューロコンピューティング研究会 (NC), vol.105, 543, 北海道大学, Jan.23, pp.41-46.
- (7) 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, vol.2005, 11, 名古屋大学, Oct.11-13, pp.179-186.

ポスター (査読あり (概要))

- (8) 金野 武司, 橋本 敬 (2007), “社会的参照の獲得における参照視行動の役割 —構成的アプローチによる検討—,” 日本認知科学会第 24 回大会発表論文集, 成城大学, 9/3-5, pp.80-81.