解　説

情動発達ロボティクスによる人工共感設計に向けて

Towards Artificial Empathy based on Affective Developmental Robotics

浅　田　　稔*　*大阪大学大学院工学研究科
Minoru Asada*　*Grad. School of Eng., Osaka University

1. は じ め に

懐に入り込むロボットに代表されるヒューマン・ロボット・インターラクションにおいて,「情動」の重要性が認識されており，感情コンピューティングの観点からも指摘されている [1]．しかしながら，現状では，設計者が共感的行動を明示的に指定しており (例えば，サーベィ [2])，より本質的な共感的行動の実現にはほど遠い．

発達ロボティクスの観点 ([3] [4]) からは，このような共感的行動が人間との社会的相互作用を介して学習されることが期待される．Asada et al. [5] は，認知発達ロボティクス ([4] 以下，CDR と略記) の観点から，人工共感がいかに設計されるべきかを議論した [6] が，神経科学と生物行動学の観点から，より正確な議論が必要である．そこで，本解説では，より本質的に近いと期待される人工共感の実現に向けて，感情発達過程の構成的手法による理解を目指した「情動発達ロボティクス」(Affective Developmental Robotics,　以下，ADR と略記) を提案し考察する．

まず最初に，神経科学と生物行動学における共感の進化と発達を概観する．情動伝染から始まり，情動的共感，認知的共感，同情や哀れみを介して，妬みや他人の不幸を喜ぶシャーデンフロイデまでに至る過程である．次に，これらの用語を ADR/CDR の観点から自他認知の発達過程にそって，再考し，ADR/CDR の観点から人工共感発達の概念モデルを提唱する．このモデルに従い，CDR の既存研究を位置づけ，最後に，今後の展望を議論する．

2. 共感の進化と発達

ここでは，個体発生，系統発生，脳のメカニズム，コンテクスト，精神病理学の観点からの神経科学的レビューである Gonzalez-Liencres et al. [7] の文献の定義に従って，共感を定義する．

原稿受付　2014 年 7 月 31 日
キーワード：Artificial Empathy, Affective Developmental Robotics, embodiment, sociality
*〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1
*Suita-shi, Osaka

狭義の共感は，他者の情動的状態の身体化表現を構築すると同時に，他者の情動的状態がどのようにして引き起こされたかのメカニズムに気づく能力である [7]．これは，共感者が自身の身体的状態を内受容的に気づき，自他を区別する能力を引き出す．このことは，以下での共感に関連した用語の進化的観点からの定義の要である．

2.1　情動伝染

情動伝染は，動物が自身の情動状態の共有を可能にする進化的プレカーソルである．ただし，動物は，なぜ他者がそのような情動状態になったかを理解出来ず，その意味で，情動伝染は，自動的，無意識的，そして，より高いレベルの共感のための基礎でもある．

de Waal [8] は，ものまね (motor mimicry) から始まる模倣と情動伝染から始まる共感の並行性を，自他識別の進化過程と重ねたモデルを提案している．ものまねは，情動伝染ための基本構造を提供する物理的身体のある種の共鳴機構を必要としており，以降の共感関連事象の礎である．

2.2　情動的共感と認知的共感

情動的共感と認知的共感 (Emotional Empathy and Cognitive Empathy，以下，EE と CE と略記) は，自身への気づき (self-awareness) 能力のある動物，すなわち，霊長類，象やイルカなどに生じる．このような複雑な情動と自身への気づきの神経表象は，前帯状皮質と前部島皮質に局在する [9]．EE と CE の違いは，次のようにまとめられる．

- 情動的共感 (EE)
  - 認知的共感よりも古い系統発生特性を持つ
  - 情動伝染により引き起こされる過程である身体化シミュレーションを通じて，他者の感情を共有することで，他者の感情の表現を構成可能にする．
- 認知的共感 (Cognitive Empathy)
  - 「心の理論」[10] の定義とかなり重なっている．
  - 類人猿とヒトに存在する [11]．
  - 他者視点獲得や他者の心の理解 (mentalizing) を必要とする [8]．

他者に引き起こされる情動の原因に関する推論を必要としない情動伝染に比べて，EE と CE は，自他の情動状態の区別を必要とし，自身の身体化された情動表現を構成す

る．発達後期の EE と CE では，観察者の情動状態は，観察された他者のそれと，必ずしも一致する必要はない．それらは，次節の同情や哀れみに見られる．

2.3 同情，哀れみ，妬み，シャーデンフロイデ

同情と哀れみは，情動状態の観点で共感に似て見えるが，相手の情動状態への応答の方法で異なる．ともに，他者の情動表現を形成する能力を必要とする．共感の場合は，情動状態は，同期していたが [12]，情動は必ずしも共有される必要はない．このことは，同情と哀れみが，自他の識別に加え，自身の情動を制御する能力を必要とすることを示唆する．

自分の情動のより強力な制御が，妬みやシャーデンフロイデに見られる．それは，同情や哀れみと異なり，他者の情動状態に対向する感情を表出する．妬みやシャーデンフロイデは，初期の狩猟採集民族における社会的団結の淘汰圧に呼応して進化したと考えられている [7]．

図 1 共感に関連した用語の図式的記述 (文献 [7] の Fig.1 を基に再構成)

2.4 共感に関連する用語の位置づけ

図 1 は，これまで共感に関連する用語を図式的に表している．横軸は，意識のレベルで，無意識 (左端) から自他認知を伴う意識 (右端) を表している．これに対し縦軸は，物理的/運動レベル (下) から情動/心的レベル (上) へのバリエーションを示している．一般には，これらの軸は，分離した「意識/無意識」,「物理的/心的」レベルを表すが，共感に関連する用語は，これらの二軸による二元論が必ずしも明でない空間に分散していると見なす．加えて，二つのポイントがある．

- この空間では，位置は，二軸の相対的重みを表し，上位 (右か上) は下位を内包する階層構造を示している．当然ながら，下位は上位を内包していない．すなわち，意識と自他認知は無意識下のプロセスを内包するが，逆はない．
- 左 (下) から右 (上) に向かう方向は，進化の方向を示し，個体発生が系統発生を繰り返すらば，発達過程とも見なせる．それ故，共感発達の全体概要は，左下から右上に向かう緩やかなスロープと見なせる．

図 3 自己と他者の概念を確立する発達過程

3. 情動発達ロボティクス

我々は，認知発達ロボティクス [4] [13] を提唱し，共感発達は，CDR の一部と見なしてきた．実際，サーベイ [4] では共感発達の研究を紹介し，CDR の一例として, [14] を引用している．ここでは，この部分に焦点を当てるために，CDR の一部を情動発達ロボティクス (ADR) を言い換える†．以下では，CDR のアプローチに基づき，情動発達に焦点を置いた ADR の手法を紹介し，共感発達にどのようにアプローチするか議論する．

3.1 ADR の主要な概念

CDR の基本コンセプトに倣い，ADR は，人間の情動の発達を構成的アプローチによって，理解することを目指す．その核となるアイデアは,「物理的身体性」とより重要な「社会的相互作用」であり，環境との相互作用を介した情報の構造化を可能にする．情動発達は両方をシームレスに繋ぐと期待される．

大まかに言えば，発達過程は，2 つのフェーズで構成される．固体発達の初期段階，そして，後期の固体間の相互作用を通じた社会的発達である．過去には，前者が神経科学 (内部機構) に主に関連しており，後者は，認知科学や発達心理学 (行動観察) が関連するとされてきた．今日では双方が互いに密に交叉している．例えば，社会的相互作用研究に徐々に脳機能イメージング研究が取り入れられたりして，行動研究と神経科学的アプローチが融合しつつある．しかしながら，まだまだ十分でなく，そのギャップが存在する．ADR は，単にそのギャップを埋めるだけでなく，より挑戦的に，将来我々と共生し，共感する存在であるヒューマノイドの設計論をベースに人間のより深い理解を提供するあらたなパラダイムを構築することを目指す．

3.2 自他認知と共感の関係

自他認知は，ADR/CDR では，最も基本的かつ本質的課

†ADR は、CDR の一部から始まったが，CDR の現在の範囲を超えて，進展することが期待されている．

図 2　共感発達と自他認知 (CDR/ADR) との並行性

題である．特に ADR では，

(1) 他者の心を理解することと，情動の代理共有の関係は，人間の進化の基本的な課題である [15].

(2) 自他認知の発達は，代理性を促す．

(3) メタ認知の能力は，一種の代理性を実現し，それは，自身を他者として仮想化する (情動制御).

上記 3 の代表例は，悲しい音楽を楽しむ場合に見られる [16] [17]．客観的な (仮想化された) 自己は，悲しい音楽を悲しいと知覚する一方で，主観的自己は，悲しい音楽を聞くことで心地よさを感じる．これは，メタ認知による自己を他者化することによる一種の情動制御とみなせる．情動制御能力は，自他認知の発達過程とともに，徐々に獲得されると考えられる．それは，他者を含む非自己と自己との間の区別がない状態からはじまる．それ故，自他認知の発達は，情動制御の発達を促し，それは，結果として，**2.4** 節で説明したさまざまな共感状態を生成する．

3.3　自他認知の発達

図 3 は，Neisser の自己の定義 [18] を部分的に利用した自己と他者の概念形成の発達過程を表している．同調と言う用語は，他者を含む外界との相互作用を通じて，この概念がどのように発達したかを説明するキーワードである．自己の発達の三段階は，実際はシームレスに繋がっていると想定される．

第一段階では，環境内の物体との物理的な相互作用を通じた，最も基本的な自己の萌芽の時期である．この段階では，打ったり，叩いたり，ノックしたりなどのリズム運動やリーチング運動を通じて，物体 (より一般的には環境) との同調が見られる．同調の調整や予測がメインの行動となる．もし，完全に同調したならば，フェーズがロックされ (位相差ゼロ)，その同調状態で，エージェントの物体がお互いに引き込み合う．このフェーズでは，エージェントはそれ自身の「生態学的自己」の表象を持つと言える．これは，ギブソン心理学に基づいており，乳幼児は，ある種の構造的規則性 (Structural Regularities†参照) に同調する感覚組織を通じて，直接環境から情報を獲得出来るとされている．このような同調を引き起こす基本構造の強力な候補として神経振動が考えられる．

第 2 段階は，内側からは，ミラーニューロンシステム (以降，MNS と略記) の基盤構造によって，外側からは，養育者の手助けによって，自他識別が支援され始める時期である．この段階の初期，乳幼児は，養育者の行動を自身の行動と見なす (“like me” 仮説 [19])．なぜなら，養育者は，乳幼児と同期できる他者として作用するからである．養育者は，時々，意識的に，もしくは無意識的に乳幼児を，マザリーズ ([20]) やモーショニーズ ([21]) などの様々な方法で助ける．そのような同期現象は，キャッチボールや物の受け渡し，互いに呼び合うなどのターンテーキングを通じて達成されうる．そして，徐々に乳幼児は，養育者の行動を他者のものと見なすようになる (“different from me” 仮説 [22])．これは，当初，養育者が乳幼児の行動を助けるが，徐々に，彼ら自身による行動制御 (より少ない援助) を促進するからである．また，同時に，乳幼児の未成熟な感覚運動系が発達するからでもある．養育者の働きかけがあったにも関わらず，第一段階ではなかった他者の明示的な表象が，この段階の後期に現れる．ターンテーキングの位相差は 180 度と想定される．他者の明示的な表象により，「対人的自己」と呼ばれる自身の表象を持つようになる．更に進んで，乳幼児は，養育者との間でターンテーキングが出来るように，位相差を検出して，自身の行動をいつ抑制するかを学習すると期待される．

上記の過程中，情動伝染 (単純な同期)，情動的共感，認知的共感 (より複雑な同期)，さらには，同情と哀れみ (同期の抑制) が見られ，これが自他認知に密接に関連する．

†Valerie Gray Hardcastle, A Self Divided:A Review of Self and Consciousness: Multiple Perspectives Frank S. Kessel, Pamela M. Cole, and Dale L. Johnson (Eds.)

この学習は 2 つの方向に拡張される．一つは，キャッチボール，物のやりとり，コールの掛け合いなどの，二者間の役割りの認識，割り当て，スイッチングである．もう一つは，ある他者との同調状態から脱同調し，別の他者と同調を始める学習である．理由は，最初の他者が突然去ったり (受動態)，二番目の他者に注意が移ったり (能動態) するからである．特に後者は同調の能動制御 (スイッチング) が必要であり，この能動制御が，エージェントのごっこ遊びの仮想的な役割りを演じることを可能にする．この時期，同調の対象は人だけでなく，物体も含まれる．しかしながら，第一段階の実際の物体と異なり，仮想化された物体，例えば，ごっこ遊びの携帯電話や食べ物で，それらを対象に，食べたり動かしたりなどの，仮想化された行動のごっこ遊びがなされる．そのような行動が観察された場合，エージェントは,「社会的自己」の表象を持っていると見なされる (より詳細な議論は，文献 [23] 参照)．

上記の過程で，情動制御の増大，特に，想像力は，より能動的な同情や哀れみ (同調の抑制)，自己を他者と見なすメタ認知，さらには，社会的に発達した妬みとシャーデンフロイデまでも導く．

3.4 自他認知発達のための概念的アーキテクチャ

図 3 に示される発達過程に応じて，図 4 は，三つの段階に対応する機構を示している．共通の構造は，一種の「引き込み」機構であり，エージェントの同調対象は，物体から他者に変化する．この変化に応じて，自他認知のより高度な概念やその制御を獲得するための副次的な構造が付加される．

最初の段階では，物体との単純な同調が実現され，第 2 段階では，養育者が同調を初期化し，エージェント (agency) の表象が徐々に確立し，抑制のサブの構造が，ターンテーキング用に付加される．最後に，同調対象切替のための，より高度な同調制御スキルが足され，十分に発達した切替スキルに基づいて，ごっこ遊びなどの，対象に対する仮想的な行動が実現される．

4. 人工共感に向けて

自他認知の発達は，共感の発達と並行する．図 2 は，この共感の ADR/CDR との並行性を示している．左の部分は，図 1 に示されている共感関連の用語を並べ替えて，ADR/CDR の発達との対応を取っている.「物理的身体性」は，ものまねと情動伝染を繋ぐ．ものまねによる運動共鳴 (Motoer Resonance) は，身体化された情動表現を引き出し，さらに情動伝染に繋がる．

図 2 の左から二番目のコラムは，自他認知発達にそった 7 つのポイントで，最初の 1 から 4 が，情動伝染，EE, CE に至る過程に対応する．同情や哀れみでは，他者の情動状態と自己のそれは，一致する必要はない．悲しい音楽を堪能するとき [16] [17] は，リスナーの客観的 (仮想化された) 自己は，悲しい音楽を悲しいと知覚し，かたや主観的自己は，楽しむ．さらに，グループ内外認知 (In-group/Out-group cognition) が，妬みやシャーデンフロイデなどの高次の情動状態も引き出す．

図 4 「自己」の発達の三つの機構

図 2 の右の部分は，上記過程を人工的に設計する際，共感ならびに自他認知の発達に必要な要件や機能を表している．

4.1 ものまねと情動伝染

2.1 で述べたように，情動伝染は自動的であり (無意識)，その設計課題は，どのようにして，人工システムの中に，そのような構造を組み込むかである．1 つの提案は，ものまねが，情動伝染 (埋め込まれた情動状態) を引き起こすことである．ものまねと情動伝染はともに，知覚運動照合 (物理的身体性) に基づいており，共感と自他認知を発達させる．

「物理的身体性」の考えは，新しくない．事実，Roger Sperry [24] は，知覚運動サイクルが神経システムの基本的なロジックであると論じた．知覚と行動の過程は，機能的に相互に絡み合い，知覚は運動の手段であり，逆もまたそうである．

マカクザルの腹側運動前野及び頭頂皮質におけるミラーニューロンの発見 [25] は，運動知覚と運動生成の直接的な照合の神経生理学的な証拠を提供した [26]．MNS は，情動伝染を引き起こす運動共鳴と呼ばれるものまね現象 (観察された他者の運動と同じ運動を生成する) と強く関連する．さらに，これは，自他識別，行動理解，共同注意，模倣，心の理論とも関連する (詳細な議論は，文献 [23] 参照)

人間の場合，前運動野，後頭頂皮質の運動共鳴は，被験者がゴール志向の運動を見たり，生成したりするときに生じる [27]．そのような運動共鳴は，事前にハードに組み込まれているか，少なくとも，かなり初期に機能していると思われる [28]．

図 5　人工共感の発達の概念図

4.2　情動的／認知的共感

共感の主要な部分は，情動的・認知的なものであり，発達的には，異なる経路をたどっているように見える．そのため，各々には異なる役割があり，異なる脳領域に位置している．Shamay-Tsoory et al. [29] は，腹内側前頭前野皮質 (VMPFC) に病変がある患者では，認知的共感と心の理論 (Theory of Mind，以下，ToM) に障害があり，下前頭回 (IFG) に病変がある患者では，情動的共感や情動認識に障害があることを発見した．例えば，ブロードマン領域 44(前頭皮質のなかの，運動前野の前) は，情動的共感に必要不可欠であることは発見されており，同じ領域は，以前，人間の MNS の一部であると同定されていたところ [30] でもある．

これらは，分離したシステムに見えるが，情動的共感 (EE) と認知的共感 (CE) は，相互に密接に関連していると思われる．Smith [15] は，それらの関係を表す幾つかのモデル候補を提案している．

(1) CE と EE は，分離不可能な一つのシステム
(2) CE と EE は，二つに分離可能なシステム
(3) EE が CE の可能な拡張システム
(4) CE が EE の可能な拡張システム
(5) EE が CE の可能なフィードバック付き拡張システム
(6) CE が EE の可能なフィードバック付き拡張システム
(7) CE と EE は，二つに分離可能で，相互補完システム

モデル (1) と (2) は，EE と CE の関係の両極端であり，モデル (7) はその中間である．Shamay-Tsoory et al. [29] に従うならば，それらは，個別であり，進化的にも発達的にも，CE が EE のあとに出現する．しかしながら，より重要なのは，発達の順番ではなく，それらの関係である．なぜなら，人間の大人は両方をもち，組み合わせているように見えるからである．Smith [15] は，一般のモデル 7 が妥当であると仮説を立てた†．彼は，二つの共感不均衡障害と二つの一般的な共感障害を予測した．

(a) 低認知的共感障害 (CEDD)：低い認知的共感能力と高い情動的共感感度 (自閉症の一部)．
(b) 低情動的共感障害 (EEDD)：低い情動的共感感度と高い認知的共感能力 (反社会的人格障害の一部)．
(c) 一般的な低共感障害 (GEDD)：低い認知的共感能力と低い情動的共感感度 (統合失調人格障害の一部)．
(d) 一般的な高共感障害 (GESD)：高い認知的共感能力と高情動的共感感度 (ウィリアムズ症候群の一部)．

ADR/CDR の観点から，以下の点が浮き彫りになる．

- EE は，自己への気づきを伴った情動伝染の拡張である．
- CE の設計の重要な課題は，自他認知に本質的な他者視点獲得と心の理論課題である．
- Smith のモデルと仮説は，自他認知能力が十分発達し，最低限の情動制御が獲得されたとして，EE の感度と CE の能力の制御設計に示唆的である．

4.3　共感的情動状態の代理性

自他認知の能力に基づき，EE と CE では，引き出される情動的・認知的状態は，他者のそれと同期している．自他認知のこの能力の二つの拡張が考えられる．最初の例は，

†興味あることに，行動学的データ解析から女性の共感はモデル 1 に，男性はモデル 2 に偏っている

他者の情動状態を理解して (CE)，それと異なる情動状態を引き出す同情と哀れみである．

二番目は，自身を他者視点で観察できるメタ認知に関係する．このケースでは，観察している自己と，されている自己があり，それぞれ，仮想化された (客観的な) 自己と，主観的な自己に，それぞれ対応する．典型的な側面は，悲しい音楽を楽しんでいる状況に見られる．そこでは，悲しい音楽を客観的自己が悲しいと知覚するのに対し，主観的自己は，悲しい音楽を聴くことを楽しむ [16] [17]．知覚される情動と感じられる情動は相反しており，これは，妬みやシャーデンフロイデにまで拡張される．最初に知覚される情動は他者と同じだが，その後，異なる (相反する) 感じられる情動が，社会的コンテクスト (内集団/外集団) に従い，引き出される．

妬みやシャーデンフロイデに至る上記の発達過程は，どの程度，自他認知と自他分離が可能か (図 2 の左から二番目のコラム) によって調整される，自身の情動を制御する能力 (他者との (脱) 同調) を増大させる (発達する) ことを示唆する．

5. ADR/CDR アプローチ

人工共感にむけて多くの設計課題がある．図 5 は，上記の議論を踏まえ，ADR/CDR アプローチによる人工共感の発達の概念的概要を示している．番号は，図 2 の左から二番目のコラムと対応している．

左から右への流れは，自他認知と情動制御の発達と進化の方向を示している．小円の中のカーブ矢印は，エージェントの内部状態を表し，自他を識別出来ない状態 (1) から，完全に分離し，異なる情動状態をもつケース (7) までに至る．カーブ矢印の向きは，情動状態の位相を示し，情動的共感 (EE) や認知的共感 (CE) まで (4) は，同位相で同調している．EE と CE までに必要な基本となる構造は図 5 の左下に示すように調和べき他者を含む環境との同調である．しかしながら，これ以降は，情動制御応力により，非同調 (異なる情動) 状態になりうる．

同情や哀れみは，そのような例で有り，自他で異なる情動状態を持つ (5)．直感的には，同情は，おもに EE よりで，哀れみは，主に CE よりと考えられる．なぜなら，同情はより情動的であり，哀れみは，他者の情動状態を論理的に理解したあとに実感されると考えられるからである．しかしながら，ともに他者の情動状態を知覚し，その要因を理解する必要があり，実際にその差は少ないと察せられる．同調の基本構造に加え，知覚された情動に対する同調への抑制が，エージェンシーの確立 (自他識別) に基づき，必要である (図 5 中央下参照)．

上記の自他における情動状態の不一致 (非同調) は，内的と外的の二つの異なる方向に進展する．内的進展は以下である．自己の情動空間が二つに分離し (6)，一つは主観的情動 (上) であり，もう一つは客観的情動 (仮想化された自己の情動：下) であり，これは，一般的な他者の情動状態の投影と考えられる．客観的自己の情動状態の知覚 (知覚された情動) は，客観的な判断なので CE 主体に映る．それに対し，それを感じる自己は，より主観的である (感じられた情動)．外的進展は，自他がそれぞれ集団化することで，各集団内では，全てのメンバーが同期するが，集団間では異なる．進化の淘汰圧により，集団間が競争的になると，敵対心が生まれる．集団は拡張された自己 (もしくは他) である．両方のケースとも，仮想化された自己の創造能力 (6) や，図 5 の右上に示す機構に基づき，自己情動のより強力な調整 (7) が，さまざまな情動を創発するために必要である．

以下では，既存研究や過去の研究を紹介する．幾つかは直接 ADR と関係しないが，上記の議論された課題に関連する．

5.1 情動伝染，MNS，そして，情動的共感

図 5 に示した発達過程を説明可能な計算論的モデルを構築することは，非常に挑戦的であり，そのようなモデルは，いまだ存在しない．以下では，ADR/CDR の観点から，関連する既存研究を紹介する．

情動伝染とものまねは，PAM† を介して，互いに関連し，運動共鳴がこれらを結ぶ重要な役割を担うと考えられる．Mori and Kuniyoshi [31] は，神経振動子，筋骨格系，子宮内 (胎児の場合) や重力下の外環境 (新生児の場合) の全体相互作用により生ずる神経振動に基づく行動生成の最も基本的な構造を提案した．コンピュータシミュレーションにより，胎児や新生児の振動的運動が生ずることを示した．このような相互作用が視覚や聴覚などの多種のモダリティを通じて他者との相互作用 (運動共鳴) に拡張され，秩序だった行動が自己組織化されることが期待される．

ものまねは，そのような相互作用の一種であり，情動的共感に繋がる情動伝染を引き出す可能性がある．この過程に中に，MNS の一部が含まれている可能性がある [29]．サルのミラーニューロンは見えるターゲットに対する目標志向の行動 (他動詞) にしか反応しないのに対し，ヒトの場合は，ターゲットがなく，自動詞的動作にも反応する [26]．これは，議論の余地があるところで，更なる検討が必要である [32]．仮説として，サルの場合，ヒトに比べて，個体の生存のための圧力が大きいので，ゴール指向の運動が個別に確立して早く駆動可能である．それに対し，ヒトの場合，養育者の庇護をうけるので，その圧力が小さく，ゴール指向のみならず，目的を持たない要素運動的なものにも反応

†元は，pserception and action mapping だが，ここでは，物理的身体性と等価と見なす

図 6　未熟な視覚が導く自他認知システムの創発の計算モデル

することで，学習による構造化や組織化による汎用性が高まる余裕があり，結果として，より社会的な行動や認知能力へ拡張されたと考えられないだろうか？

Nagai et al. [33] は，初期の未熟な視力に基づく MNS の発達の計算モデルを提案した．このモデルは，他者との原初的な相互作用を通じて，感覚運動マッピングを学ぶ一方，徐々に、ロボットの視力の時空間分解能を高める．発達の初期には，ロボットは，低い視覚分解能のために，観察されるすべての行動を，自他の区別なく等価と見なす．そして，それらを自身の運動指令と結びつける．視覚が発達するにつれ，自身の行動と他者によるものとの区別がつき始める．しかしながら，初期に獲得した自身の運動指令と運動知覚の連合は，発達期間維持され，結果として二つの連合を生み出す．一つは，自身の運動指令とその帰結の視覚，もう一つは，自身の運動指令と他者の運動を観測した視覚との関係である．彼らの実験は，自他認知システムの初期発達を達成し，このことが，ロボットが他者の行動を模倣することを可能にする．

図 6 は，未成熟な視覚に基づく自他認知の創発モデルを示している．これは，共感発達ではなく，行動 (模倣) であるが，共感と模倣との強い連関を考えると，このモデルは，図 5 の 1 から 2 と 3 の間に至る過程と見なせる．

人間以外の霊長類と異なり，人間の MNS は，非合目的な行動も適応可能である．Kuriyama et al. [34] は，遊びのための，偶発性と内的動機付けに基づくインタラクション・ルール学習の手法を示した．学習者は，養育者との相互作用を通じて，新しいインタラクション規則を獲得する．このような非合目的な母子インタラクションは，MNS のような機能や初期の模倣能力である物真似を獲得するのに重要な役割りを果たす．カメレオン効果は，この学習の結果によって，部分的に説明可能であろう．

上記の研究は，最も基本的な情動の軸 [35] である快 (不快) または覚醒 (睡眠) などの情動状態と直接関連しない．もし，人間の幼児が，情動の基本的な形態を持って生まれるとするならば，例えば幸せと怒りなどのさまざまな情動状態をどのようにして持てるのかは，非常に興味ある課題である．

養育者が子どもの情動的な顔の表情を真似したり，大仰にしたりする直観的親行動は，発達心理学において，母親の足場作りと見なされている [36]．子ども達は，これに基づいて，共感を発達させるとされている．Watanabe et al. [14] は，ロボットが共感的な応答を学習するために，ロボット自身の内部状態と養育者が真似したり，誇張した顔の表情とを関連づける人間の直感的的親行動をロボットを使ってモデル化した．内部状態空間と顔の表情を心理学的知見を用いて定義し，それらは，外的刺激に応じて，ダイナミックに変化する．学習後，ロボットは人間の顔表情を観察することで，養育者の内部状態に応答する．そして，ロボットは，それに呼応するように，自身の内部状態を変化させ (共感)，それに対応する顔の表情を表出する．

図 7 は，養育者の直感的親行動を通じて，共感の感覚を発達させる子どもの学習モデルを示す．子供が情動的な体験をし，顔の表情を変えることで，その感覚を表出し，養育者は共感し，付随して，誇張された表情を示す．そして，子供は，経験した情動と養育者の顔表情の間の関係を発見し，相互に情動と顔表情を結びつける．この図の情動空間は，Russell [35] が提案したモデルに基づいて構成されている．この再分化過程は，情動伝染から情動的共感への発達を表していると考えられる．

関連文献 (e.g., [29] [37] [38]) 中の共感に関する神経学的

図 7 直感的親行動に基づく子どもの共感発達の学習モデル (左)：自身の内部状態と観察される他者の顔表情との連合 (右)

図 8 文献 [14] における計算モデルのための神経解剖学的構造

実体を考慮して，上記の計算モデルのための神経解剖学的構造の概要を図 8 に示す．それぞれの文献では，異なるタスクデザインと機器で行っており，神経学的実体の統一性は保証されない．むしろ，この構造はおよそのネットワーク構造を伝えることを意図している．学習者が相互作用中に偶然遭遇する養育者の顔表情は，下前頭回 (IFG) と島で処理されると想定され，背側前帯状皮質 (dACC) に投影される．そこは，自身の情動状態を表出するための顔筋を駆動する学習者の情動空間を保守管理すると想定される．

図 5 の情動的共感は，2 つの円によって示されている．上の円が学習者の自身の内部状態 (扁桃体 (Amygdala)) を，下の円が顔表情から推察される養育者の内部状態の投影 (背側前帯状皮質 (dACC)) と我々は想定している．この場合，両者は同期しているが，妬みやシャーデンフロイデまでに至る発達後は，より高度な情動制御が，この投影を脱同調し，他の情動 (同情と哀れみ) に切り替えたり，仮想化された (客観的な) 自己 (メタ認知) に切り替える．部分的な支持は，fMRI 研究で，妬みと dACC の活動の間の相関関係を見つけた Takahashi et al. [39] によって得られている．

5.2 他者視点取得 (パースペクティブテーキング)，心の理論，情動制御

MNS に加えて，認知的共感は,「他者視点取得 (パースペクティブテーキング) や他者の心の理解 (mentalizing, メンタライジング) を必要とする [8]．これらはともに,「心の理論」[10] の機能を共有している.「心の理論」は，共感発達だけでなく，より一般的に人間の発達にとって重要な課題である．

他者視点取得の初期の発達は，視覚的他者視点取得として，24ヵ月の子どもで観察される [40]．子ども達は，同じ状況の中で，自分が見ているものが他者が見ているものと異なるかもしれないということを理解しているとき，レベル 1 であるとされる．レベル 2 では，子ども達は，他者と同じ物を同時に異なる視点から見ていることを理解している．Moll and Tomasello [40] は，24ヵ月の子どもは，レベル 1 だが，18ヶ月では，そこに達していないことを発見した．

通常の工学的解決法は，最初に，自己と他者と物体の三次元幾何学的再構成があり，そのあと，自己及び世界中心の座標間の変換である．自己と他者の位置姿勢を推定するためには，焦点距離，視角，リンクパラメータなどの正確な値を校正しなければならない．しかしながら，これらの値を，18ヶ月と 24ヵ月の間に正確に推定できるようになるとは，現実的には思えない．より現実的な解決は，互いに関連した二つの解決法であり，後者は前者を含んでいると思われる．ともに，ゴールが何であるかを知っていることが必要である．

最初の解決策は，養育者とゴールを共有した経験の蓄積である．物体に到達するリーチング行動を例にとってみよう．幼児は成功を経験するが，しかし，時々，遠方の物体に対して，失敗する．この場合，養育者は幼児の後，すなわち同側からを助けるかもしれない．そして，徐々に隣から，

さらに対面状況で助けるかもしれない．この過程で，幼児は，自身の行動と養育者の行動の両方の観察経験を集積する．ゴールが同じであるという知識から，これらの観察データは，同じゴールに向かう行動の異なる視点からのものの集合としてカテゴリー化される．ビューベースの認識の傍証としては，サルの脳の下側頭皮質における顔細胞があげられる (文献 [41] の第 26 章)．この顔細胞は顔の向きに選択的に反応する．ビューベースのコンピュータビジョンは，物体認識や空間知覚の工学的手法である†．Yoshikawa et al. [42] は，モジュラー型のニューラルネットワークを用いた呈示者のビューの逐次再構成法を提案している．これにより，学習者は，異なる位置姿勢の呈示者とのビューベースの模倣学習のための空間知覚を組織化できる．最近はやりのビッグデータ処理はこれに対するよりよい解を提供できるかもしれない．

二番目は，強化学習によって推定可能な価値に基づいて，異なるビューを等価と見なす手法である．すなわち，異なるビューでも，自己と他者で共有されているゴールへの距離に基づいて，同じ価値を持つ．観察者は，すでにユーティリティ(強化学習法による状態価値) を持っているとしよう．Takahashi et al. [43] は，観察者が，自己もしくは世界中心の座標空間の正確な物体の軌跡からではなく，観察された行動変遷における推定されたユーティリティの遷移から，呈示者の行動を理解／認識できることを示した．さらに，行動獲得と観察された行動の認識のループが学習を加速し，認識パフォーマンスを上げることを示した．状態価値更新は，実際の試行錯誤を要しない観察によって加速可能であり，学習された価値は認識システムのパフォーマンスをあげる．なぜなら，それらは，観察された行動の状態価値の推定に基づいているからである．学習結果は，猿の脳の MNS 機能に類似している．すなわち，自己と他者の見かけのことなる運動を同じゴールに向かう行動と見なしているからである．

5.3 情動制御，メタ認知，妬みとシャーデンフロイデ

情動制御は，図 5 中の 4 から 5 までの発達のトリガーを引く．この過程では，同情や哀れみのように，最初に他者の情動状態を理解し (同調)，そののち，似ているが多少異なる自身の情動状態へシフトする (脱同調)．

通常，メタ認識の 2 つの構成要素が考えられる．認知に関する知識と認知の制御 [44] である．メタ認知的気づきの構成と獲得を促進する 4 つの具体的な戦略の中で，制御技能 (自己モニタリング) は，図 5 中の 6 と関連しそうである．そこでは，脱同調した他者の情動状態 (5 の下の円) は，自己の情動状態内で制御されるターゲット (6 の下の円) として自己に内在化される．このターゲットは，他者としての (客観的もしくは仮想化された) 自己を表し，方や，主観的自己 (6 の上の円) は，この客観的自己をモニターする．悲しい音楽の鑑賞の場合 [16] [17]，認知過程は，悲しい音楽を悲しいと知覚し，それゆえ，そのこと自体は客観的に見える．この過程で，5 における自己 (主観的) と他者 (客観的) の単なる切替だけではなく，より強い制御力が皮質から投射されていると考えられる．内側前頭皮質 (MFC) は，社会的認知の神経学的実体と想定される．特に，前方吻側内側前頭皮質 (arMFC) は，大まかに言って，自己に関する知識，他者に関する知識，他者の心の理解の三つの異なるカテゴリーを保守管理していると言われいている [45]．

それゆえ，前方吻側内側前頭皮質からの図 8 の領域への投射が，妬みやシャーデンフロイデに至る情動制御を可能にするために必要と考えられる．

5.4 表情表出

顔や身振りの表情表出は，非常に重要でかつ欠くことのできない人工共感の部分である．パイオニア的な研究である WE-4RII [46] [47] は，非常に豊かな顔や身振りの表情表出に成功しており，観察者に対応する情動を想起させる．彼らの設計概念と具現化技術は秀逸であるが，実際のインタラクションは，設計者のスキルに依存するところが多い．

情動・認知発達ロボティクスで説明されるように，我々は 2 つの方向でより写実的な研究プラットホームを必要とする．一つは，情動発達の計算モデルを有する写実的ロボットの設計で，もう一つは，幼児と養育者の情動的インタラクションの研究用である．これらの目的にために，20ヶ月頃の幼児を想定した概観をもつロボット Affetto が設計され，構築されつつある [48] [49]．図 9 は，Affetto の現状を示している．

6. 討　　論

本稿では，共感の発達を自他認知の発達に沿って，構成論的アプローチ (ADR/CDR) の観点から，神経科学と発達心理学の間のギャップを埋めることができると期待して，議論してきた．しかし，この試みは，まだ途上であり，以下のポイントが残されている．

共感のコンテキストでの用語が概観され，自他識別の軸をもとに共感発達の概念モデルを提案した (図 5)．共感発達モデル [14] の神経的アーキテクチュアが，既存の関連研究を基に提案されたが，それらは，タスクデザイン，コンテキスト，計測機器が異なり，脳の領野との対応が必ずしも統一できていない．それらの詳細な対応よりも，むしろ，全体機能の構造が，皮質と皮質下が共同作業可能なネットワークを構成すると仮定したい．皮質下が皮質より先に発達するので，ある状況に遭遇したときには，前者が先に作用すると考えられる．この観点から，子どもを対象とした

†一般的な解説として，http://www.cs.rutgers. edu/〜elgammal/classes/cs534/lectures/appearance-based%20vision.pdf などがある．

図 9 Affetto: 顔表情，胴体の内部構造，最近の概観

イメージング研究や行動研究が必要である．特に，ロボットを用いた構成的手法に焦点をおいた研究が内在する発達構造を明らかにすることが期待される．

種々のホルモンと神経化学的合成物は，共感の構成と調整に関与する．中でも，代表的なものは，オキシトシン (OT) とドーパミン (DA) である．詳細説明は省いて，オキシトシンとオピオイドは，共感の情動的側面を，ドーパミンは認知的側面を調整していると考えられる [7]．共感障害を特徴づける [15] ために，これらの神経修飾伝達物質の機能的側面を，情動的共感の感度や認知的強化の能力の強化 (減衰) に使うことが考えられる．

心の理論 (ToM) と MN の活動は，書面の物語やマンガなどを用いて，いくつかのイメージング研究で調べられている．これは，心の理論における言語の包含性や必要性に関する異論もあり，重要なポイントである．なぜなら，ミラーニューロンが発見されたサルの脳の領野 F5 の近くの領域が人間の脳のでブローカ領野のホモロジーと想定されているからである．重い失語症の患者を対象とした研究 (例えば, [50]) では，通常の心の理論の能力が報告されれいる．これは，言語能力が心の理論の本質的な要件でないことを示しており [32]，そのため，図 5 の概念モデルでも，言語能力に触れていない．

ここまで言及してきた計算またはロボットのモデルにおいて，我々は内臓器官から来る情動状態を考えてこなかった．Damasio and Carvalho [51] は，身体のホメオスタシスの欠如が，脳のネットワークを通じて，適応行動にトリガーをかけると説明している．例えば，知らない人の次の動きに対する注意などがあげられる．これは，ホメオスタシスのような構造が，身体化した情動表現を設計するうえで必要であることを示唆する．初期のパイオニア的研究の一つは，早稲田大学の WAMOEBA [52] で，彼らは，自己観察システムとホルモンパラメータに基づく自己保存と連結した情動状態を表出する情動モデルを提案した．このシステムは外界からの刺激に対して，身体感情を安定に保つように適応的であった．したがって，最適行動は，エネルギー消費を最小にするため，外界からの刺激がないかぎり，睡眠することであった．しかしながら，動物の行動，特に人間の場合，生存のための基本的な構造によってのみ行動が生成されている訳ではなく，いわゆる内発的動機付け [53] によって，より能動的に行動生成がなされると考えられる．

機械学習と発達ロボティックスのコミュニティでは，内発的動機づけは，種々の行動を生成する駆動力として，近年，注目を集めている [54]．彼らの関心は，内発的動機づけがいかに発達したかではなく，その存在を前提として，情報理論からの定式化にある．共感と内発的動機付けの関係について，まだ，しっかり研究されていない．我々は，人工共感を発達させる内発的動機付けのある種の構造を考慮したい．明示的か非明示的か？アタックされるべき課題である．

7. 結　　論

本稿では，人工共感に向けて，それが，自然共感の発達的経路をいかにならうことができるかについて，議論した．共感発達のコンテキストで用語を整理し，人工共感発達の構成的な概念モデルを提案した．以下が結論である．

(1) 共感と模倣の発達は並行する．物真似とリンクする共感の初期スタイルである情動伝染は，他の動物とも共有する．情動伝染は情動的共感，同情 (哀れみ)，そしてさらに高度なものまで，主に皮質下の領域の活動を主体として拡張する (発達の時間的経緯に沿って，皮質下の依存度が弱まる)．

(2) 皮質の制御下で，認知的共感は哀れみ (同情) まで発達する (発達の時間的経緯に沿って，皮質からの制御投射が強まる)．

(3) 情動発達ロボティックス (ADR) を提唱し，自己の概念が創発，発達，分化 (情動制御がこれらを操作していると思われる) する自他認知の発達と並行して，共感発達の概念的構成的モデルを構築した．

(4) 情動・認知発達ロボティクスの既存研究について，共感や自他認知発達のコンテキストで議論し，可能な拡張についても検討した．

(5) 提案した構成的モデルは，共感の発達の理解に新たな洞察をもたらすと期待される．そして，それは，直接，

人工共感の設計に繋がる．

(6) まだまだ．多くの課題が残されている．子どもに対するイメージングや行動実験が，ロボットを使って，どの程度までシステマティックに可能かも課題である．

(7) 内発的動機付けが，どのように生まれ，共感とどのように発達するかは，挑戦すべき課題である．

謝　　辞

本稿の執筆に際し，生産的な討論をしてくれた下記の研究者に感謝する．荻野正樹 (関大)，長井志江 (阪大)，石原尚 (阪大)，川上愛 (玉大)．なお，科研特別推進研究 (24000012)，学振研究拠点形成事業 (認知脳理解に基づく未来工学創成のための競創的パートナーシップ) の一部，補助を受けた．

参 考 文 献

[1] Laurel D. Riek and Peter Robinson. Affective-centered design for interactive robots. In *Proceedings of the AISB Symposium on New Frontiers in Human-Robot Interaction*, pp. 102–108, 2009.

[2] Iolanda Leite, Carlos Martinho, and Ana Paiva. Social robots for long-term interaction: A survey. *International Journal of Social Robotics*, Vol. 5, pp. 291–308, 2013.

[3] Max Lungarella, Giorgio Metta, Rolf Pfeifer, and Giulio Sandini. Developmental robotics: a survey. *Connection Science*, Vol. 15, No. 4, pp. 151–190, 2003.

[4] Minoru Asada, Koh Hosoda, Yasuo Kuniyoshi, Hiroshi Ishiguro, Toshio Inui, Yuichiro Yoshikawa, Masaki Ogino, and Chisato Yoshida. Cognitive developmental robotics: a survey. *IEEE Transactions on Autonomous Mental Development*, Vol. 1, No. 1, pp. 12–34, 2009.

[5] Minoru Asada, Yukie Nagai, and Hisashi Ishihara. Why not artificial sympathy? In *Proc. of the International Conference on Social Robotics*, pp. 278–287, 2012.

[6] Minoru Asada, Yukie Nagai, and Hisashi Ishihara. Why not artificial sympathy? In *Proc. of the International Conference on Social Robotics*, pp. 278–287, 2012.

[7] Cristina Gonzalez-Liencresa, Simone G. Shamay-Tsooryc, and Martin Brünea. Towards a neuroscience of empathy: Ontogeny, phylogeny, brain mechanisms, context and psychopathology. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, Vol. 37, pp. 1537–1548, 2013.

[8] Frans B.M. de Waal. Putting the altruism back into altruism: The evolution of empathy. *Annu. Rev. Psychol.*, Vol. 59, pp. 279–300, 2008.

[9] AD (Bud) Craig. Interoception: the sense of the physiological condition of the body. *Curr. Opin. Neurobiol.*, Vol. 13, pp. 500–505, 2003.

[10] D. Premack and G. Woodruff. Does the chimpanzee have a theory of mind? *Behavioral and Brain Sciences*, pp. 515–526, 1978.

[11] Joanne L. Edgar, Elizabeth S. Paul, Lauren Harris, Sarah Penturn, and Christine J. Nicol. No evidence for emotional empathy in chickens observing familiar adult conspecifics. *PloS One*, Vol. 7, Issue 2, pp. 1–6, 2012.

[12] Jennifer L. Goetz, Dacher Keltner, and Emiliana Simon-Thomas. Compassion: an evolutionary analysis and empirical review. *Psychol. Bull.*, Vol. 136, pp. 351–374, 2010.

[13] Minoru Asada, Karl F. MacDorman, Hiroshi Ishiguro, and Yasuo Kuniyoshi. Cognitive developmental robotics as a new paradigm for the design of humanoid robots. *Robotics and Autonomous System*, Vol. 37, pp. 185–193, 2001.

[14] Ayako Watanabe, Masaki Ogino, and Minoru Asada. Mapping facial expression to internal states based on intuitive parenting. *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 19, No. 3, pp. 315–323, 2007.

[15] Adam Smith. Cognitive empathy and emotional empathy in human behavior and evolution. *Psychol. Rec.*, Vol. 56, pp. 3–21, 2006.

[16] Ai Kawakami, Kiyoshi Furukawa, Kentaro Katahira, Keiko Kamiyama, and Kazuo Okanoya. Relations between musical structures and perceived and felt emotion. *Music Perception*, Vol. 30, No. 4, pp. 407–417, 2013.

[17] Ai Kawakami, Kiyoshi Furukawa, Kentaro Katahira, and Kazuo Okanoya. Sad music induces pleasant emotion. *Frontiers in Psychology*, Vol. 4, Article 311, pp. 1–15, 2013.

[18] Ulric Neisser, editor. *The Perceived Self: Ecological and Interpersonal Sources of Self Knowledge*. Cambridge University Press, 1993.

[19] Andrew N. Meltzoff. The ‘like me’ framework for recognizing and becoming an intentional agent. *Acta Psychologica*, pp. 26–43, 2007.

[20] P. Kuhl, J. Andruski, I. Chistovich, L. Chistovich, E. Kozhevnikova, V. Ryskina, E. Stolyarova, U. Sundberg, and F. Lacerda. Cross-language analysis of phonetic units in language addressed to infants. *Science*, Vol. 277, pp. 684–686, 1997.

[21] Y. Nagai and K. J. Rohlfing. Computational analysis of motionese toward scaffolding robot action learning. *IEEE Transactions on Autonomous Mental Development*, Vol. 1, No. 1, pp. 44–54, 2009.

[22] Toshio Inui. Embodied cognition and autism spectrum disorder (in japanese). *The Japanese Journal of Occupational Therapy*, Vol. 47, No. 9, pp. 984–987, 2013.

[23] Minoru Asada. Can cognitive developmental robotics cause a paradigm shift? In Jeffrey L. Krichmar and Hiroaki Wagatsuma, editors, *Neuromorphic and Brain-Based Robots*, pp. 251–273. Cambridge University Press, 2011.

[24] R. W. Sperry. Neurology and the mind-brain problem. *Amer. Scientist*, Vol. 40, pp. 291–312, 1952.

[25] Vittorio Gallese, Luciano Fadiga, Leonardo Fogassi, and Giacomo Rizzolatti. Action recognition in the premotor cortex. *Brain*, Vol. 119, No. 2, pp. 593–609, 1996.

[26] Giacomo Rizzolatti, Corrado Sinigaglia, and Frances Anderson (trans. *Mirrors in the Brain - How Our Minds Share Actions and Emotions*. Oxford University Press, 2008.

[27] J. Grezes, J.L. Armony, J. Rowe, and R.E. Passingham. Activations related to "mirror" and "canonical" neuron in the human brain: an fmri study. *NeuroImage*, Vol. 18, pp. 928–937, 2003.

[28] J. A. Sommerville, A. L. Woodward, and A Needham. Action experience alters 3-month-old infants' perception of others' actions. *Cognition*, Vol. 96, pp. B1–11, 2005.

[29] Simone G. Shamay-Tsoory, Judith Aharon-Peretz, and Daniella Perry. Two systems for empathy: a double dissociation between emotional and cognitive empathy in inferior frontal gyrus versus ventromedial prefrontal lesions. *Brain*, Vol. 132, pp. 617–627, 2009.

[30] Giacomo Rizzolatti. The mirror neuron system and its function in humans. *Anat. Embryol.*, Vol. 201, pp. 419–421, 2005.

[31] Hiroki Mori and Yasuo Kuniyoshi. A cognitive developmental scenario of transitional motor primitives acquisition. In *Proceedings of the 7th International Conference on Epigenetic Robotics*, pp. 165–172, 2007.

[32] Zarinah K. Agnew, Kishore K. Bhakoo, and Basant K. Puri. The human mirror system: A motor resonance theory of mind-reading. *Brain Rearch Reviews*, Vol. 54, pp. 286–293, 2007.

[33] Yukie Nagai, Yuji Kawai, and Minoru Asada. Emergence of

mirror neuron system: Immature vision leads to self-other correspondence. In *IEEE International Conference on Development and Learning, and Epigenetic Robotics (ICDL-EpiRob 2011)* (CD–ROM), 2011.

[34] Takatsugu Kuriyama, Takashi Shibuya, Tatsuya Harada, and Yasuo Kuniyoshi. Learning interaction rules through compression of sensori-motor causality space. In *Proc. of the Tenth International Conference on Epigenetic Robotics (EpiRob10)*, pp. 57–64, 2010.

[35] J. A. Russell. A circumplex model of affect. *Journal of Personality and Social Psychology*, Vol. 39, pp. 1161–1178, 1980.

[36] G. Gergely and J. S. Watson. Early socio-emotional development: Contingency perception and the social-biofeedback model. In P. Rochat, editor, *Early Social Cognition: Understanding Others in the First Months of Life*, pp. 101–136. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum, 1999.

[37] Yan Fana, Niall W. Duncana, Moritz de Greckc, and Georg Northoffa. Is there a core neural network in empathy? an fmri based quantitative meta-analysis. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, Vol. 35, pp. 903–911, 2011.

[38] Belinda J. Liddell, Kerri J. Brown, Andrew H. Kemp, Matthew J. Barton, Pritha Das, Anthony Peduto, Evian Gordon, and Leanne M. Williams. A direct brainstem-amygdala-cortical 'alarm' system for subliminal signals of fear. *NeuroImage*, Vol. 24, pp. 235–243, 2005.

[39] Hidehiko Takahashi, Motoichiro Kato, Masato Matsuura, Dean Mobbs, Tetsuya Suhara, and Yoshiro Okubo. When your gain is my pain and your pain is my gain: neural correlates of envy and schadenfreude. *Science*, Vol. 323, pp. 937–939, 2009.

[40] Henrike Moll and Michael Tomasello. Level 1 perspective-taking at 24 months of age. *ritish Journal of Developmental Psychology*, Vol. 24, pp. 603–613, 2006.

[41] Dale Purves, George A. Augustine, David Fitzpatrick, William C. Hall, Anthony-Samuel LaMantia, James O. McNamara, and Leonard E. White, editors. *Neuroscience, fifth edition*. Sinauer Associates, Inc., 2012.

[42] Y. Yoshikawa, , M. Asada, and K. Hosoda. Developmental approach to spatial perception for imitation learning: Incremental demonstrator's view recovery by modular neural networkw. In *Proc. of the 2nd IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robot*, pp. 107–114, 2001.

[43] Yasutake Takahashi, Yoshihiro Tamura, Minoru Asada, and Mario Negrello. Emulation and behavior understanding through shared values. *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 58, No. 7, pp. 855–865, 2010.

[44] Gregory Schraw. Promoting general metacognitive awareness. *Instructional Science*, Vol. 26, pp. 113–125, 1998.

[45] D. M. Amodio and C. D. Frith. Meeting of minds: the medial frontal cortex and social cognition. *Nat. Rev. Neurosci.*, Vol. 7, pp. 268–277, 2006.

[46] Hiroyasu Miwa, Kazuko Itoh, Munemichi Matsumoto, Massimiliano Zecca, Hideaki Takanobu, Stefano Roccella, Maria Chiara Carrozza, Paolo Dario, and Atsuo Takanishi. Effective emotional expressions with emotion expression humanoid robot we-4rii. In *Proc. of the 2004 IEEE/RSJ Intl.Conference on Intelligent Robot and Systems*, pp. 2203–2208, 2004.

[47] Hiroyasu Miwa, Tetsuya Okuchi, Kazuko Itoh, Hideaki Takanobu, and Atsuo Takanishi. A new mental model for humanoid robts for humanfriendly communication-introduction of learning system, mood vector and second order equations of emotion-. In *Proc. of the 2003 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, pp. 3588–3593, 2003.

[48] Hisashi Ishihara, Yuichiro Yoshikawa, and Minoru Asada. Realistic child robot "affetto" for understanding the caregiver-child attachment relationship that guides the child development. In *IEEE International Conference on Development and Learning, and Epigenetic Robotics (ICDL-EpiRob 2011)* (CD–ROM), 2011.

[49] Hisashi Ishihara and Minoru Asada. Five key characteristics for intimate human-robot interaction: Development of upper torso for a child robot 'affetto'. *Advanced Robotics*, 2014 (in press).

[50] R. Varley, M. Siegal, and S.C. Want. Severe impairment in grammar does not preclude theory of mind. *Neurocase*, Vol. 7, No. 6, pp. 489–493, 2001.

[51] Antonio Damasio and Gil B. Carvalho. The nature of feelings: evolutionary and neurobiological origins. *Nat. Rev. Neurosci*, Vol. 14, pp. 143–152, 2013.

[52] Tetsuya Ogata and Shigeki Sugano. Emotional communication between humans and the autonomous robot wamoeba-2 (waseda amoeba) which has the emotion model. *JSME International Journal, Series C: Mechanical Systems Machine Elements and Manufacturing*, Vol. 43, No. 3, pp. 568–574, 2000.

[53] Richard M. Ryan and Edward L. Deci. Intrinsic and extrinsic motivations: Classic definitions and new directions. *Contemporary Educational Psychology*, Vol. 25, No. 1, pp. 54–67, 2000.

[54] Manuel Lopes and Pierre-Yves Oudeyer. Guest editorial active learning and intrinsically motivated exploration in robots: Advances and challenges. *IEEE Transactions on Autonomous Mental Development*, Vol. 2, No. 2, pp. 65–69, 2010.

浅田 稔（Minoru Asada）

大阪大学基礎工学部制御工学科卒業，同大学院基礎工学研究科修了工学博士（大阪大学）．大阪大学工学部教授，大阪大学大学院工学研究科知能・機能創成工学専攻教授となり現在に至る．この間 1 年間米国メリーランド大学客員研究員．知能ロボットの研究に従事．ロボカップ国際委員会理事 (2008 年までプレジデント)．2012 年 5 月より，学振科研特別推進研究研究代表者．