

ロボットを通じて考えるココロの未来

認知発達ロボティクスの挑戦

浅田稔 (大阪大学大学院工学研究科教授)
Minoru Asada



1 まえがき

こころの未来を語ろうとするとき、こころの過去と現在はどこにあるのだろうか？ と考えるのは理系筆者の特色だろうか？ しかし、それを語らずして未来は語れない。ここでは、過去や現在を既存の分野からの捉え方で論じるのではなく、「ロボット」という、一見、こころとは距離のありそうな人工物を通じて考えてみる。「こころ」の表記に関して、筆者は、個人的かつ意図的に以下のように使い分けている^{*1}。

- ・心：人間の大人の正常な心。
- ・こころ：未熟もしくは、こころらしきものがあると考えられる動物のこころなど。
- ・ココロ：人工物の心もどき、もしくはこころもどきが近いかもしれない。カタカナは四角くて、いかにもである。

上記に従えば、本稿は、ココロを創る試みを通して、赤ちゃんのこころの発生なぞに迫ろうとする。以下では、まず最初に発達マップと認知発達ロボティクスについて再考し、そのうち、われわれのプロジェクトの研究成果からココロの形成に関連するものを紹介し、ココロからこころへの橋渡しの可能性を論ずる。

2 発達マップ

発達の様相に関しては、文献^{*2}の第7章に論じているので、参照していただくとして、その多様相を踏まえた発達マップを考える。大きく2つの様相がある。はじめに、個体ベースの認知発達で主に初期、そして、個体間の相互作用による社会性の発達で主に後期である。脳科学／

神経科学（内部メカニズム）は主に前者、認知科学／発達心理（行動観察）は主に後者と関係する。本来、認知発達としてシームレスであるが、理解の対象の表象レベルに大きなギャップがある。認知発達ロボティクスは、その溝を埋めるだけでなく、新たな分野の創出を狙う^{*3}。以下では、認知発達ロボティクスを概観し、そのうち、ココロの設計に関連する研究を提示し、こころへのつながりを考察する。

ヒトの脳脊髄系の概要と大まかな機能構成は、進化を反映した階層構造となっており、脊髄、脳幹、間脳、小脳、大脳辺縁系、大脳基底核、大脳新皮質からなる。浅田、國吉ら^{*2}は、これらが、行動のための知能の各階層に対応するとしている。ここでは、非常にラフな提案として、この構造が個体としての時間的発展（発達）にも適用可能と考える。図1の中央に、これに対応する機能的流れとしての反射、感覚運動、知覚、随意運動、高次認知を示している。

3 認知発達ロボティクスのアプローチ

個体ベースの認知発達で、計算論的には、個体内の学習・発達メカニズムが焦点となり、個体間の相互作用による社会性の発達では、他者を含む環境設計が課題となる。また、これまで、認知発達ロボティクスでは、認知発達の計算モデルの構築が主であったが、人間自身の発達過程の理解を深める上で、人間を知るための新たな手段の提供も考慮されるべきであろう^{*4}。まとめると、

A 認知発達の計算モデルの構築

1. 仮説生成：既存分野からの知見を参考にした計算モデルや新たな仮説の提案
2. コンピュータシミュレーション：実機での実現が困難な過程の模擬（身体成長など）

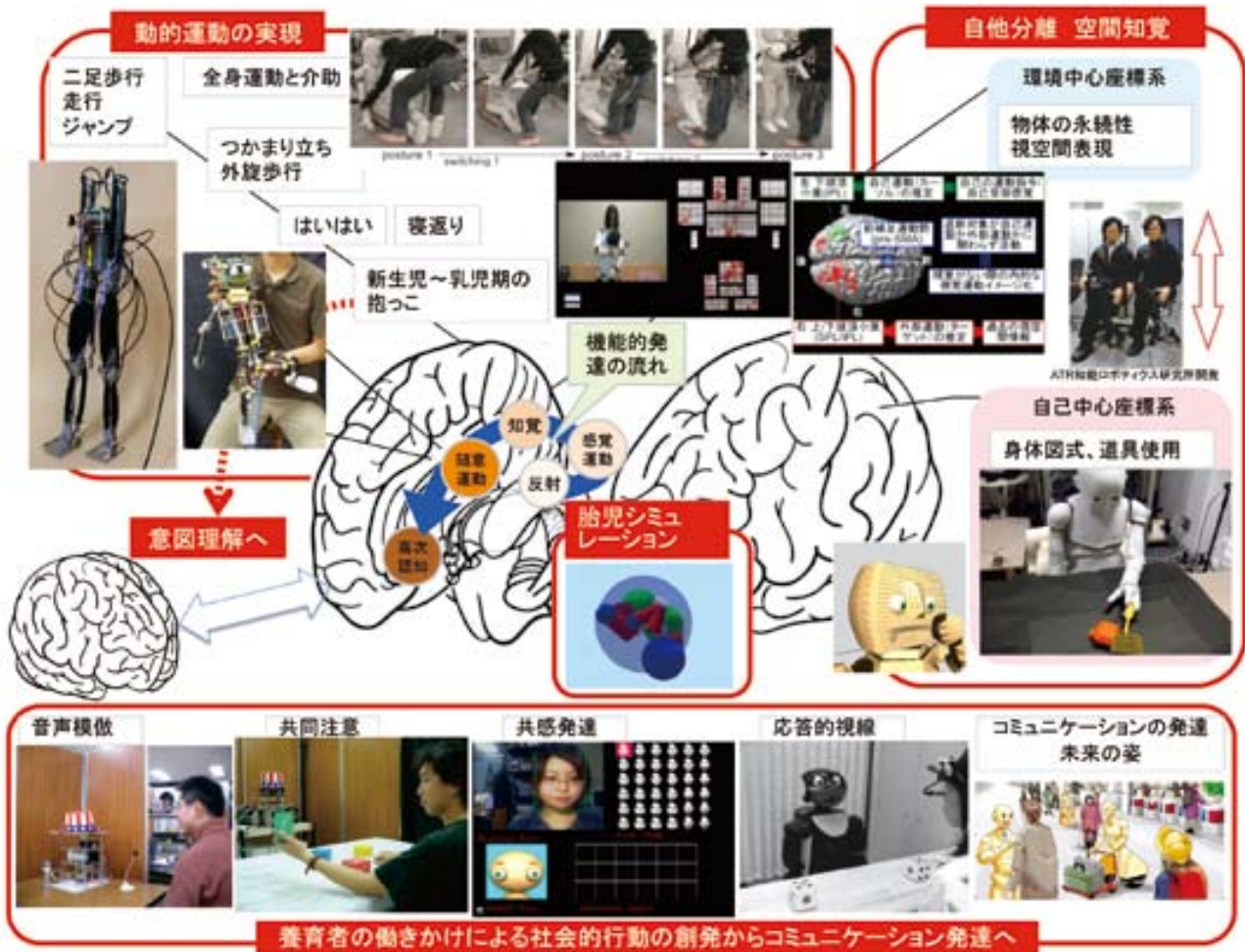


図1 認知発達マップ(文献*4のFig.3を拡充改編)

3. 実エージェント（人間、動物、ロボット）によるモデル検証→1へ

B 人間を知るための新たな手段やデータの提供→結果のAへのフィードバックやAからの結果のフィードバックもあり。

1. イメージングによる脳活動の計測
2. ヒト、動物を対象とした検証実験
3. 新たな計測手段の開発と利用（提供）
4. 再現性のある（心理）実験対象の提供

筆者が総括を務めるJST ERATO 浅田共創知能システムプロジェクトでは、上記に従った各種の研究を実施している。図1に示された機能的流れの周囲に、それぞれのテーマ

と実施研究を示す。以下では、おもにココロに関連する話題をとりあげる。

4 自己身体感覚から空間知覚へ

4-1 胎児・新生児の筋骨格・神経系発達シミュレーション

運動制御の初期のレベルは、脊髄と脳幹による反射と定型行動パタンの生成であろう。上位中枢を経由しない脊髄反射、延髄による身体各部を協調させた一定行動パタンの生成機能、上位中枢による脊髄がパターン化した運動の単位を利用した動作組み立て、大脳の頭頂連合野による感覚運動情報の統合、身体や空間の表現・認識、大脳の運動野による運動のさまざまなパタンのレパートリ表現や大脳基底核と連携したさまざま

な運動パタンの切り替え、および組み合わせ実行などの機能に発展していく（書籍^{*5}などに基づく）。

この時期における研究課題として、身体表象の獲得過程があげられる。身体表象獲得は、身体性に基づく認知発達にかかわる最も基本的な問題である。ボディスキーマやボディイメージと呼ばれている身体表象がどのように獲得されるかは、大ミステリーである。なかでも、新生児模倣のミステリーが著名で、生得論と学習発達論の議論はつきない。後者に関しては、胎児の母胎内での動きの可視化により、少なくとも14～15週あたりから、顔や自身の身体への接触運動が始まっており、これらの知見に基づく学習問題が扱われているが、胎児から新生児期の感覚運動創発の構成的アプローチとし

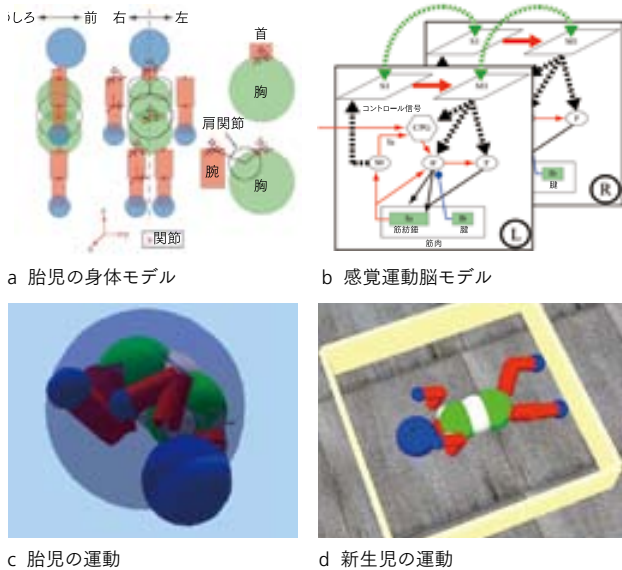


図2 胎児の感覚運動マップ学習

て、Kuniyoshi and Sangawa^{*6}の研究がある。彼らは、人の身体、神経系の生理学的知見に基づく個々のモデルを組み合わせ、1つの赤ちゃんモデルとした。そして、このモデルを用い、母胎中の胎児の発達および誕生後の行動をシミュレーションし、人の運動発達の理解を目指した。図2aに球や円筒で近似した胎児モデルを、bに脳のモデルを示す。

このシミュレーションでは、ヘブ学習や自己組織化マッピングにより、図2bの点線部分の全結合（解釈としては結合が未完）が、構造化され、結果として、体性感覚マップが構成され、それに準じて行動が徐々に秩序だったものに変化したと報告されている。現在では、詳細なパラメータ調整や各種の運動の構造化に関して、詳細精緻化され、種々の研究テーマとして展開されている（文献^{*7,8}など）。

4-2 空間概念の獲得

身体を環境との関係で認識する場合、最も基本となる環境情報は空間概念である。サルを使った実験では脳内においてはVIP野において頭部中心座標が表象されていることが知られている。われわれは赤ちゃんがしきりに手先に注意するというハ

象するニューロンが自己組織化的に生じるモデルを提案した（図3）。さらに、この頭部中心座標を表象するニューロンモデルを基盤として、手で顔に触るときの感覚情報の統合を行い、実際にVIP野で観測されるニューロンの振る舞いと同等な性質を持つニューロンを自己組織化的に構成した（図4）^{*9}。

4-3 顔表象の獲得

赤ちゃんは早い時期から新生児模倣に見られるような顔に対する身体表象を持っていると考えられるような行動を示す。特に顔についての身体表現の獲得において興味ある問題は、a) 身体表現は、触覚情報・視覚情報・体性感覚情報を統合したマルチモーダルな表現となっていると考えられるが、顔の視覚情報を直接得ることはできないということと、b) 口や目、鼻などの顔のパーツの情報をいかにして切り出すか、という問題である。

ンドリガードの経験が、頭部中心座標を構成するときの重要な因子として働いている可能性を考え、手の姿勢情報をリファレンスとして、さまざまな網膜位置と眼球角度の組み合わせにもかかわらず頭部からの相対的關係が同じ位置であることを表

a) については、見えない部位の視覚情報をいかにして見えている部位の視覚情報と統合するかが問題となる。われわれは手先をプローブ（探針）として、視野内で腕を動かして、運動中の関節角度の変化量と手先位置変化量の間を関係づける写像をニューラルネットによって学習し、その結果を用いて視野外でも腕の関節角度を通して手先位置を推測するモデルを提案した。

b) については、すべての触覚センサを同一のものと捉えているが、一様な触覚センサの中から目や鼻などの「パーツ」という特徴的な部位を検出することが必要となる。そこで、われわれは接触運動中の各種センサ入力値に発生する不連続性をもとに、顔表面からパーツを構成する特徴的な触覚センサ情報を抽出するモデルを提案した。さらに抽出した

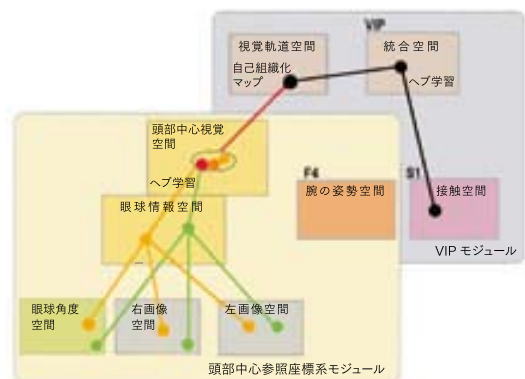


図3 VIPニューロンモデル

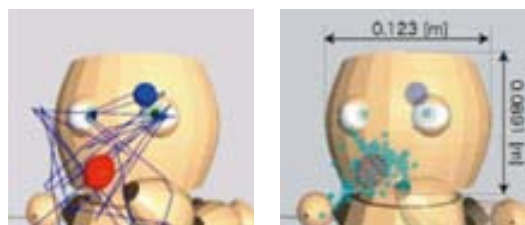


図4 実験の様子と推定された位置

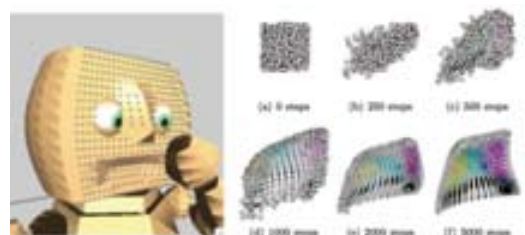


図5 顔表面の触覚分布(左)と分布推定の学習過程(右)

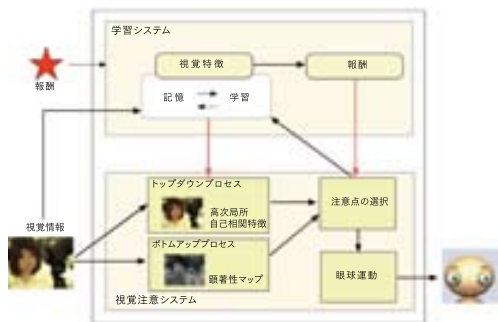


図6 アイコンタクト獲得モデル

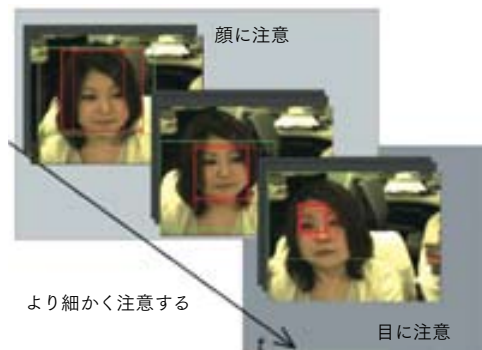


図7 モデルによるアイコンタクトの獲得

顔の情報を、他者の顔の視覚情報から抽出される特徴的な視覚情報と対応関係をとることにより、顔の模倣の基盤となるモデルを提案した^{*10}。

図5に実験の様子を示す。同図左にシミュレーション用の顔面を示す。21×21の触覚要素が格子状に並んでいるが、その配置は未知とする。同図右の学習過程により、最初ランダム配置であったが、徐々に自己組織化され、左眼(マゼンダ)、鼻(シアン)、右眼(イエロー)、口(ブラック)の位置関係が獲得された。

5 養育者の働きかけによる社会性行動の創発からコミュニケーション発達へ

社会的行動創発にむけたポイントとして、環境因子としての養育者の働きかけに注目する。それらの例として、共同注意、共感発達、音声模倣を挙げる。

5-1 共同注意の発達

共同注意は、養育者と乳児が同じ対象に視線を合わせることで、コミュニケーションの始まりと言われているが、養育者の応答による自身

の行動との因果性発見が視線合わせを導くことがシミュレーションで示されている^{*11}。さらに、随伴性の発見と適用の繰り返しによる新たな随伴性発見が共同注意に関連する行動の発現順序を規定することを示した研究もある^{*12}。その際、養育者の応答レベルにより、期待される行動の発現が左右されるシミュレーション結果が示されている。

赤ちゃんは生得的に顔に対して選好性を持つと言われているが、顔の詳細なパターンの認識やそのコミュニケーションにおける意味づけは、後天的にコミュニケーションを通じた学習によって獲得されると考えられる。そのようなコミュニケーションを通じたカテゴリ化の例として、コミュニケーションにおいて報酬予測が最も正確にできる情報を抽出することを目的として学習することによりアイコンタクトを獲得する学習モデルを提案した^{*13}。システムは大きく分けて画像処理システムと学習システムからなる(図6)。

画像処理システムでは、ボトムアップとトップダウンの2つのプロセスによってカメラ画像の中でロボットが注意すべき場所が計算される。ボトムアップなプロセスでは画像の顕著性に基づいて注意点の候補が選択され、トップダウンなプロセスでは学習システムで学習された画像特徴量を検出して注意点の候補とする。学習システムでは、ロボットが報酬を得たときに、その前後の画像群を記憶し、それらの画像群を識別する画像

特徴量を学習する。本モデルをバーチャルなロボットに実装して、実際に人間とインタラクションすることにより、ロボットの注意がだいに顔から目に移っていく結果を得た(図7)。

5-2 直感的親行動による情動マッピングの獲得

人間は幼児時代に養育者による「直感的親行動(intuitive parenting)」と呼ばれる行動を受ける(図8)。直感的親行動とは、養育者が自分自身の経験と幼児の経験を対応づけるように幼児を促し、その経験の感じ方、表現の仕方などを実況解說的に教える行動である。直感的親行動を受けることによって、幼児はその経験から得た状態と表現すべき人間の表情の関連性を強固にすると考えられる。われわれは、ロボットにダイナミクスを持つ情動モデルを組み込み、養育者が幼児に行う直感的親行動を基にして、変化した情動状態とそのとき表出されている他者の表情との結合を強める学習モデルを提案した(図9)。学習後、ロボット

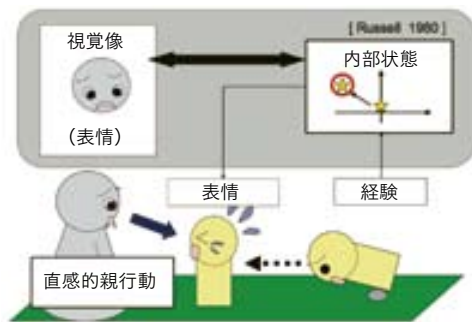


図8 直感的親行動の状況

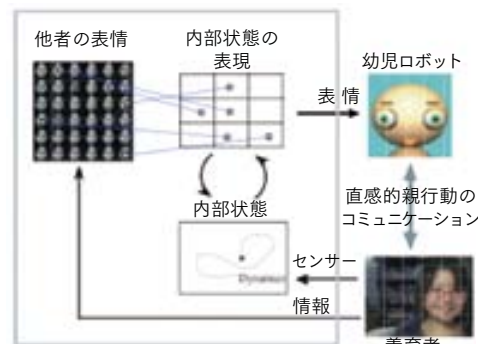


図9 直感的親行動モデルの動作

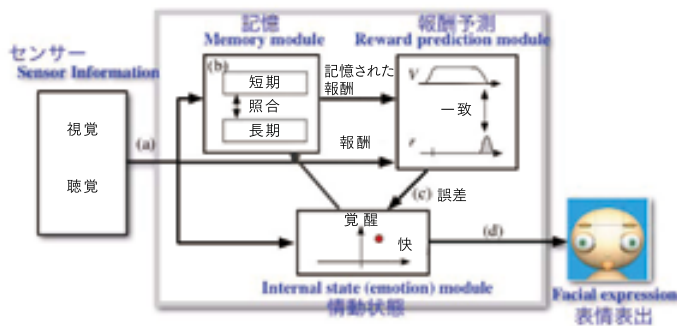


図10 初期コミュニケーション獲得モデル

は内部状態空間中で基本的な表情の範疇を見出すことが可能となり、入力された表情から情動状態を推測し、推測した人間の情動状態によって人間に同調した表情の表出が可能となった^{*14}。

5-3 初期コミュニケーション行動の獲得：イナイナイバー

共感発達の研究では乳幼児の最初期のコミュニケーションのモデル化を行った。発達心理学においては、乳児は4カ月ごろを境として養育者が与える規則性のある行動に敏感になり、この時期に乳児は自分の母親のタイミングや相互作用における相対的な随伴性への調律を発達させ始めると言われている。本研究では、そのような直感的親行動によるコミュニケーションの1つとして「イナイナイバー」をとりあげ、その遊びが成立するための赤ちゃんに必須の条件を考慮して赤ちゃんの認知発達モデル化を行った(図10)。

モデルでは、報酬予測にかかわるドーパミンニューロンの機能と、海馬と扁桃体の相互作用に関する脳科学の知見を取り入れ、赤ちゃんロボットが情動に基づいて養育者の行動を記憶し、その記憶の報酬に基づいて養育者の行動を予測するモデルを提案した。このモデルをバーチャルなロボットに実装し、実際に養育者に見立てた研究者と相互作用をさせる実験を行った。

赤ちゃんロボットは記憶モジュールが機能しない段階では、養育者の

行動に対して驚きを示す覚醒レベルがあがるのみであるが、記憶モジュールが機能して、養育者の行動を記憶できるようになると、その記憶をもとに養育者の行動を予測し、予測と実際の比較から親の「イナイナイバー」によって快の情動が現

れること確かめた。本モデルは4カ月ごろの養育者との相互作用における赤ちゃんの情動変化のメカニズムについて示唆を与えるものである^{*15}。

5-4 音声模倣

生後2~3カ月ごろから始まるクーイングは、乳児の発声練習と言われているが、この時期の養育者の働きかけ、とくに模倣が乳児の発声頻度を高めることや、乳児も養育者を模倣することで、相互に模倣することが観察されている。また、生後6カ月までは、乳児はあらゆる言語の母音を識別可能だが、6カ月をすぎるところには、母語のカテゴリーが構築され、離散的な識別(マグネット効果)を行うと言われている。また、聴覚フィードバックによる発話の自己モニタリングは、音声生成において重要な役割を果たしているが、それが遅延することで、吃音が発声することから、発話の自己モニタリングにおいては、自己音声の音響的特徴と調音動作の双方が用いられている可能性がある^{*16}。

そこで、最初に養育者がオウム返しすることで、母音のカテゴリーを獲得させる音声模倣ロボットの学習

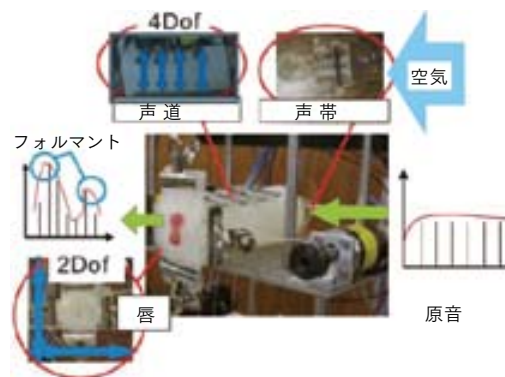


図11 発話のしくみ

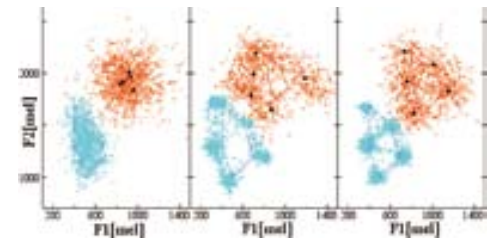


図12 再現された母音獲得過程

では、聴覚層と調音層をヘブ学習で連結させることで、話せることが聞くことに繋がることを示した^{*17}。

次に視覚による口唇形状模倣を含めた学習の加速^{*18}、そして、マグネット効果と相互模倣の期待効果によるバイアスを考慮した母音獲得^{*19}の構成的研究を行った。実際の養育者は、つねづね乳児の模倣をしていると限らないが、そのように仮定することで、模倣部分を検出し、その過程でより自然な母音を獲得する研究も行われている^{*20}。

図11に発話システムを示す。声道を模したシリコンチューブを変形させて、人工声帯の原音を調整し、母音らしい音声を発生する。図12に、Ishihara et al.^{*19}のシミュレーション結果を示す。第1(水平軸)、2(垂直軸)フォルマント空間で、水色が親の母音カテゴリーの五角形とその周辺の応答、赤が赤ちゃんの母音カテゴリー周辺の応答で、当初、互いがランダムに応答しながらも、マグネットバイアスと自己鏡像バイアスが適切に働くことで、乳児の母音カテゴリーが適正な形に収斂している様子が分かる。



図13 表出可能な表情の例

6 おわりに

赤ちゃんのところに繋がるロボットのココロの形成にかかわる身体表象や空間知覚、さらに初期社会性獲得としての共感発達、初期コミュニケーションの発達、共同注意からアイコンタクト、音声模倣などについて研究例を示し、その可能性を示した。個別の事例は、個別の機能を再現したが、内在するこころの要件に関しては、若干曖昧である。特に、近年話題を呼んでいるミラーニューロンシステムによる他者の行動から意図理解への道筋は本稿では触れていない。別項でその可能性を論議している^{*21}。乾は構成的認知神経科学の観点から、こころの要件とその発達の獲得過程の仮説を唱えている^{*22}。さらに、根源的な課題として、「情動」をどう扱うかが基本課題として残っている。今後扱わなければならない問題である。

われわれはCB2をはじめとして、一連のプラットフォームを開発し、発表してきた。認知発達のモデルを構築する上で人間のかかわり合いも研究対象であり、その意味で、養育者である人間が実際の赤ちゃんと同じような相互作用をおこす気持ちになる写実型の赤ちゃんロボットの開発に欠けていた。そのような動機から、愛着形成を通じた発達研究のための写実的な子供型表情表出ロボッ

ト Affetto を開発中である^{*23}。今後は、このようなロボットを使い、養育者側の行動の解析および発達モデルの精緻化を実施予定である。図13は、Affetto の多様な表情表出である。

本稿を作成するにあたり、日頃から討論を通じて、貴重なご意見をいただいている、JST 浅田プロジェクトグループリーダの乾敏郎教授（京大）、國吉康夫教授（東大）、石黒浩教授（阪大）、細田耕教授（阪大）、元研究員の荻野正樹助教（阪大）、吉川雄一郎講師（阪大）、プロジェクト研究員、参画している院生諸君に感謝する。

参考文献

- 1) 浅田稔『ロボットという思想——脳と知能の謎に挑む』NHK ブックス (1158), 2010.
- 2) 浅田稔、國吉康夫『ロボットインテリジェンス』岩波書店, 2006.
- 3) 浅田稔「認知発達ロボティクスによるパラダイムシフトは可能か？」日本ロボット学会誌, Vol. 28, No. 4, pp. 375-379, 2010.
- 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) 丹治順『脳と運動：アクションを実行させる脳』共立出版, 1999.
- 6) Y. Kuniyoshi and S. Sangawa. Early motor development from partially ordered neural-body dynamics: experiments with a cortico-spinal-musculo-skeletal model. Biol. Cybern., Vol. 95, pp. 589-605, 2006.
- 7) 國吉康夫、寒川新司、塚原祐樹、鈴木真介、森裕紀「人間的身体性に基づく知能の発生原理解明への構成論的アプローチ」日本ロボット学会誌, Vol. 28, No. 4, pp. 415-434, 2010.
- 8) 森裕紀、國吉康夫「新生児の原始歩行を誘発する胎児の子宮内触覚経験による脚間協調運動の自己組織化」第28回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. CD-ROM, 2010.
- 9) Sawa Fuke, Masaki Ogino, and Minoru Asada. Acquisition of the head-centered peri-personal spatial representation found in vip neuron. IEEE Transactions on Autonomous Mental Development, Vol. 1, No. 2, pp. 131-140, 2009.
- 10) S. Fuke, M. Ogino, and M. Asada. Body image constructed from motor and tactile images with visual information. International Journal of Humanoid

Robotics (IJHR), Vol. 4, No. 3, pp. 347-364, 2007.

11) Hidenobu Sumioka, Yuichiro Yoshikawa, and Minoru Asada. Causality detected by transfer entropy leads acquisition of joint attention. Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 20, No. 3, pp. 378-385, 2008.

12) Hidenobu Sumioka, Yuichiro Yoshikawa, and Minoru Asada. Development of joint attention related actions based on reproducing interaction causality. In The 7th International Conference on Development and Learning (ICDL08), pp. CD-ROM, 2008.

13) Masaki Ogino, Ayako Watanabe, and Minoru Asada. Detection and categorization of facial image through the interaction with caregiver. In The 7th International Conference on Development and Learning (ICDL08), pp. CD-ROM, 2008.

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) Masaki Ogino, Tomomi Ooide, Ayako Watanabe, and Minoru Asada. Acquiring peekaboo communication: Early communication model based on reward prediction. In Proceedings of the 6th IEEE International Conference on Development and Learning, pp. 116-121, 2007.

16) 田口明裕、笹岡貴史、乾敏郎「遅延聴覚フィードバックを用いた発話の自己モニタリング機構の検討」第5回日本認知心理学会, 2007.

17) Yuichiro Yoshikawa, Minoru Asada, Koh Hosoda, and Junpei Koga. A constructivist approach to infants' vowel acquisition through mother-infant interaction. Connection Science, Vol. 15, No. 4, pp. 245-258, Dec 2003.

18) Katsushi Miura, Minoru Asada, Koh Hosoda, and Yuichiro Yoshikawa. Vowel acquisition based on visual and auditory mutual imitation in mother-infant interaction. In The 5th International Conference on Development and Learning (ICDL06), 2006.

19) Ishihara Hisashi, Yuichiro Yoshikawa, Katsushi Miura, and Minoru Asada. Caregiver's sensorimotor magnetsguide infants' vowels through auto mirroring. In The 7th International Conference on Development and Learning (ICDL08), pp. CD-ROM, 2008.

20) Katsushi Miura, Yuichiro Yoshikawa, and Minoru Asada. Realizing being imitated: vowel mapping with clearer articulation. In The 7th International Conference on Development and Learning (ICDL08), pp. CD-ROM, 2008.

21) 浅田稔「ミラーニューロンシステムが結ぶ身体性と社会性」日本ロボット学会誌, Vol. 28, No. 4, pp. 386-393, 2010.

22) 乾敏郎「共創知能機構」第28回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. CD-ROM, 2010.

23) 石原尚、吉川雄一郎、浅田稔「愛着形成を通じた発達研究のための写実的な子供型表情表出ロボット Affetto の開発」第28回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. CD-ROM, 2010.7.