解 説

他者へのエージェンシー知覚の脳内基盤を探る方法論としての social-neuro robotics の提案

Social-neuro robotics as a Method for Social Cognitive Neuroscience

高 橋 英 之* 石 原 尚* *大阪大学工学研究科

Hideyuki Takahashi* and Hisashi Ishihara* *Graduate School of Engineering, Osaka University

1. は じ め に

近年の認知科学、神経科学のトレンドとして、個体内の認知メカニズムから個体間の関係を構築する認知メカニズムに興味が拡張しつつある。このような領域は社会認知神経科学といわれ、主に人と人の相互作用に焦点を絞った認知、脳内メカニズムの研究が行われている。これらの研究の多くでは、実験的に用意された仮想的な他者に対する被験者の信念や印象を独立変数とし、被験者の行動や脳活動を従属変数としてその関係が調べられてきた [1]。しかし実際の社会的相互作用に含まれる様々な変数を厳密に統制することは大変困難であり、要因を曖昧な言葉（例えば情動）で定性的にラベリングすることにより扱われることが多かった。だが近年の研究の進展により、今後より厳密なメカニズムの理解が要求されてきており、これまで曖昧に扱われてきた様々な社会的相互作用に含まれる要因をより定量的な変数として操作する必要に迫られてきている。しかし人間と人間の相互作用のみを対象とすると、前述の変数の統制の難しさから詳細な検討が難しい。

そこで本稿では、社会認知神経科学のツールとしてのコミュニケーションロボットの利用について議論を行いたい。近年、ロボットは見た目や動きなど人間にかなり似せて設計することが可能になってきている上に、その見た目や動きは厳密に統制することが可能である。本稿では、このようなロボットの特性を生かし、社会認知神経科学をさらに発展させることが可能であると考え。

具体的にはまず人間-人間の相互作用で特有に生じる行動、生理、脳反応を探し出す。このような試みはこれまでの社会認知神経科学の領域で数多く行われてきた。次に、人間-ロボットが同様なインタラクションを行う系において、ロボットの方で見た目や動きなどのパラメータを定量的な独立変数として設定し、被験者-ロボットの相互作用における被験者の行動、生理指標、そして脳活動の変化を従属変

数とし、その間の関係性をモデリングすることにより、社会的相互作用に必要な要因というものを定量的に扱うことを目指す。類似のパラダイムとして、脳科学とロボティクスを融合させた研究を行う cognitive neuroscience robotics という研究領域を石黒らが提案している [2]。我々は特に相互作用の中で相手の認知の仕方が変わっていく過程に焦点を絞り、対人相互作用・対ロボット相互作用を並列的に比較し、対人相互作用と同様の脳・生理・行動反応を引き出すロボットの最小要因を探索することを social-neuro robotics という言葉で定義する。

本稿では、まずこのようなスタンスでロボットに対するエージェンシーの脳基盤を fMRI で調べた筆者の一人である高橋の研究について紹介する。また social-neuro robotics で必要となる関係性の深まりが観察される程に親密な相互作用が可能なロボットの実現を目指し、筆者の一人である石原が開発している写実型ロボット Affetto について紹介した上で、このようなロボットを使用した今後の social-neuro robotics の展開について議論をしたい。

2. ロボットを用いたエージェンシーの脳内基盤の検討

エージェンシーとは自らや他個体に意志や目的などの心を感じることを指す。エージェンシーを知覚することは社会的相互作用に重要な要素である。近年の研究でエージェンシーが単一の知覚の軸ではなく、多元的な要素で表現されていることが示唆されてきた。我々はエージェンシーの多元性が神経レベルでどのように表現されているのかを検討するために、matching pennies game というゼロサム（被験者と対戦相手の利害が完全に対立する）の対戦ゲームを繰り返し行っている際の対戦相手に対するエージェンシーと脳活動の関係を検討した [3]。

これまでの我々の研究で、matching pennies game における被験者が選択する手の系列の複雑さを行動選択確率のエントロピーで定量化すると、ゲームの相手が人間だと思ひ込む、すなわちエージェンシーを感じるだけで相手に読まれるリスクを回避するために複雑な行動をとる、すなわちエントロピーが増大することが分かってきた [4]。しかしどのような軸のエージェンシーの知覚がエントロピーを増

原 2013 年 9 月 30 日

キーワード: Neurorobotics

*〒 565-0871 吹田市山田丘 2-1

*Suita-shi, Osaka

図1 各対戦相手に対する二つのエージェンシー量（被験者 16 人の平均）

加させているのかは不明である。

そこでエントロピーの増大にかかわるエージェンシーの神経表現を多面的に明らかにするために、様々な個性の対戦相手（人間、アンドロイド、メカメカしいロボット、かわいらしいヒヨコのようなロボット、コンピュータ）と被験者に簡単な会話をしてもらい、各相手に対する印象を多項目の感性評価の質問紙（7 件法）で評定してもらった。さらに各相手がどのような心的機能（例：無視するとアピールする）を持っているのかを複数項目にわたって yes, no の二択で被験者に判断してもらった。被験者の印象の質問紙の結果を主成分分析すると、ゲームの相手に対するエージェンシーに関係する二つの成分が見出された。一つは相手に対して意識や親しみを感ずる、すなわち相手を心の保持者（mind holder）であると感じるエージェンシー、もう一つは相手に対する共感的なものを排して知性を強く意識する、すなわち相手がこちらの心を読む存在（mind reader）であると感じるエージェンシーである。

16 人の被験者の各相手に対するエージェンシー量の平均を示したものが図 1 である。この図をみると人間は mind holder でも mind reader でもある一方で、かわいらしいロボットは mind holder と知覚されているが、mind reader ではなく、コンピュータは mind reader とは知覚されているが mind holder ではないことが分かる。Mind holder の知覚は、相手の心的機能に対する yes, no 判断の個数（明示的に相手の心を付与している強さ）と正の相関がある一方で、ゲームにおけるエントロピーとは無相関であった。一方で、mind reader の知覚は、相手の明示的な心的機能に対する評定とは無相関な一方で、エントロピーとは正の相関がみられた。すなわち前者は意識的な相手の心理状態の推定とかかわっており、後者はより無意識的なゲーム中のリスク回避行動と関係があることが示唆された。さらにゲーム中の各対戦相手に対するこの二つのエージェンシーの量と活動が関連する脳部位を探索したところ、mind holder

Mind holder

Mind reader

図2 エージェンシーに対応して賦活する脳部位（左：mind holder 右：mind reader）

の知覚とは前頭葉内側部、側頭・頭頂接合部の上部の活動が、mind reader の知覚とは右側頭極と側頭・頭頂接合部の下部の活動が関連することが示唆された（図 2）。これは多面的なエージェンシーがそれぞれ異なる神経基盤で表現されていることを示唆する。

この研究により、ロボットに対する印象の心理量とロボットとの相互作用における脳反応の対応を示した。このようなロボットに対する印象の心理量と脳活動の対応をとることは、social-neuro robotics にとって重要な取り組みの足がかりとなる知見である。その一方で、相手との関係性の発展によって上記のような実験場面で相手に感じる印象と脳活動はどのように変化するのかといった社会性相互作用における関係性のダイナミクスは扱えておらず、今後はこのような点についても検討を行っていく必要がある。次章ではこのような目的で筆者の一人である石原が開発中のロボット Affetto について紹介する。

3. 子供ロボットを用いた親密さの発展メカニズムの構成的研究

人と人はどのような相互作用を通じて親密になっていくのだろうか。親密さが深まる時、人は相手に何を感じ、どのような働きかけを行っているのだろうか。親密さの発展のメカニズムを深く知ることは、社会学や心理学において重要なテーマではあったが、従来の手法では、その要因があまりにも多岐にわたっており詳細なメカニズムの理解は難しかった。我々は、人と身体的な相互作用を通じて親密さを深めていける人型ロボットを実現し、social-neuro robotics 的な方法論に取り入れようと考えている。

人と人との親密化の過程ではコミュニケーションの仕方も段階的に移り変わっていく。初期には相手に対する知識

図3 人と近距離でやりとりをする Affetto の様子

がなく、円滑に相互作用するのが難しいため働きかけは型どおりの限定的なものになるが、試行的な働きかけを通じて新たな反応が発見されることで人達だけに通用する独自のルールが形成され、警戒が解けて働きかけの質量も増えていき、次第に相手にタイミングと表現を合わせた正確で迅速なコミュニケーションが行われるようになっていくと考えられている [5]。大坊 [6] も、親密化は試行的な働きかけを通じて関係の安定性とユニークさを確立していく過程であると述べている。これらの指摘を鑑みると、親密にかかわってもらえるロボットの実現に向けた設計方針としては、(A) できるだけ働きかけを躊躇させない印象を人に与えること、(B) 幅広い働きかけを人が容易に試せること、(C) 反応の発見がしやすいこと、(D) 新たな反応の発見が続くこと、(E) タイミングの合いやすい敏感な反応や行動ができること、(F) やりとりの中でルールを学び、そのやりとり相手だけに通じるユニークな関係を築けること、が重要であると考えられる。

我々は、これらの方針に従い開発したロボットと人との相互作用を観察し、人の行動の移り変わりやその時々ロボットの対する印象や情動的反応、脳活動などを見ることにより、上記の作業仮説を検証しようとしている。このためのロボットとしては、子供型ロボットが適していると思われる。一つの理由は、親子間の親密化の発展は愛着理論 [7] として発達心理学の分野で知見がまとめられており、発展のメカニズムの概念モデル [8] も提案されているためである。また、親密化の対人実験が行いやすいという利点もある。大人型のロボットと比較して、人は接触なども含めた多様な働きかけを行いやすいであろうし、また小型で軽量であれば安心・安全面でも有利である。動物型と比べても、やり取りの幅が広く、また人にとっては反応を発見していくための試行的働きかけを直感的に行うことができる。さらには、ロボットの動作制御技術や反応アルゴリズムの不十分さも、発達の未熟さとして寛容に捉えられる可能性もある。

図3の子供酷似型ロボット Affetto [9] は、上記のような

考えのもとで開発中のロボットである。密な相互接触を可能にする関節の柔らかさと耐久性を備え、小型・軽量ながらも幅広い動作表現のための多くの自由度を実現する構造となっている。柔らかい身体を持つことで、人からの接触にも自然に姿勢が追従し、密な身体相互作用を生み出す。身体各部の寸法や重量は20～24ヶ月齢の日本人男児に合わせて決定し、それにできるだけ多くの動作自由度が収まるように内部機構を設計している。現在頭部および上半身で合計22の自由度（首3、胸1、片腕7、腹4）を実現する関節がある。それらはエアシリンダを用いたスライダクランク機構、もしくはエアロータリアクチュエータで駆動され、関節角度とアクチュエータ内空気圧力が制御器にフィードバックされる。アクチュエータへの空気の流入量を調整する弁やコンプレッサ、制御用コンピュータはスペースや重量の問題のためロボット本体外部に設置し、空気圧チューブと電気ケーブルで接続している。空気圧駆動のため、動作が静かであり、また空気の弾性によって単純な（直線的な）動作指令であってもしなやかな動作となるため、動作の印象は聴覚的にも、視覚的にも柔らかいものとなる。減速機構を介さずに大きな出力が得られるため動作が機敏であるのに加えて、激しい動作中に人と接触をしても空気の弾性により衝撃が緩和され、触覚的にも柔らかい印象を与える。また、露出部である顔には、複数人の子供の顔を参考にして作成したウレタンエラストマー製の柔軟な皮膚を貼り付け、また眼球部には瞳孔や虹彩なども描かれた模擬眼球を取り付けている。また、取り付けられたスピーカを用いて発話させることも可能である。視覚的にも、聴覚的にも、また触覚的にも子供らしい写実的な印象を人に与えることで、恐怖感を感じず、安心して積極的に微笑みかけたり、話しかけたり、触ったりといった働きかけが行われると期待される。この効果について、現在予備の実験を実施中である。このように、Affettoの身体は親密化の発展のための設計方針 (A) (B) (E) を満たすように開発を行っている。現在は頭部および上半身のみで動作実験を行っているが、移動運動中の抱きあげなど全身を用いた接触相互作用もできるように、脚部の開発も進行中である。

残りの設計方針 (C) (D) (F) に関しては、ソフトウェアの設計方針となるが、ここでも子供が参考になる。すなわち、子供のようにやり取りの中で行動バリエーションを増やし、特定の人と愛着の絆を形成していくメカニズムをロボットに実装することが有効な取り組みだと思われる。人との相互作用の中で共創的に行動バリエーションが増える発達モデルの例としては、人との相互作用の中で因果性を発見し、その不確かさを確認するように行動を起こす学習・行動システム [10] や、ルールの共創が起こるようなロボットの馴化・脱馴化モデル [11] が提案されている。このような学習の仕組みがロボットにあれば、ロボットの反応のバ

リエーションが人との相互作用の中で増えていく過程を人も共有でき、ルールを覚えているかの確認を人が試したりする行動が行われることが期待される。

このように Affetto はまだ開発途中であるが、今後、前述の fMRI 実験の手法を用いた実験を行うことで、これまで未知な点が多かった親密性の形成過程についてより詳細な知見が得られることを期待している。

4. 今後の social-neuro robotics の展開に向けて

本稿では、まずロボットに対する印象の心理量が脳活動と対応していることを示した知見を紹介した。さらに今後、社会的相互作用のダイナミクスを研究する上で必要なロボットのコンセプトについて論じた後に、現在開発中のロボット Affetto について紹介をした。今後はこれらの手法を組み合わせることで、社会的相互作用を研究する方法論としての social-neuro robotics を洗練させていければと考えている。

Affetto は子供型のロボットであり、前述のように母子相互作用との対応をとりながら実験が可能である。母子相互作用であれば、愛着形成の計算モデルも並行して構築中であり、これらのモデルをロボットに実装して、被験者の行動、生理反応を検討することで、愛着形成のメカニズムを明らかにすることができるかもしれない。

今後は、脳活動計測に加えて、オキシトシン、テストステロンなどのホルモン、心拍や呼吸などの生理指標も利用することを計画している。今後は多数の指標をいかに統合して、統一的な社会的相互作用のモデル化をすすめていくのが大きな課題となるであろう。

謝 辞 本研究は科学研究補助金（特別推進研究：24000012）の補助を受けた。

参 考 文 献

- [1] U. Frith and C.D. Frith: "The social brain: allowing humans to boldly go where no other species has been," *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, vol.365, no.1537, pp.165–176, 2010.
- [2] 大阪大学グローバル COE「認知脳理解に基づく未来工学創成」, <http://www.gcoe-cnr.osaka-u.ac.jp/?p=3508>
- [3] 斎藤千夏, 高橋英之, 寺田和憲, 小嶋秀樹, 土師知己, 吉川雅博, 松本吉央, 大森隆司, 岡田浩之: “機械の向こうの私～ヒューマン-ロボットコミュニケーションにおける fMRI 研究～”, HAI シンポジウム 2012, 2012.
- [4] H. Takahashi, C. Saito, H. Okada and T. Omori: "An investigation of social factors related to online mentalizing in a human-robot competitive game," *Japanese Psychological Research*, vol.55, no.2, pp.144–153, 2013.
- [5] M.L. Knapp: *Interpersonal communication and human relationships*. Allyn & Bacon, 1984.
- [6] 大坊郁夫: しぐさのコミュニケーション. p.157, サイエンス社. 1998.
- [7] J. Bowlby: *Attachment and loss*. New York basic books, 1969.
- [8] 鯨岡峻: 関係発達論の構築. ミネルヴァ書房, 1999.
- [9] H. Ishihara, Y. Yoshikawa and M. Asada: "Realistic Child Robot "Affetto" for Understanding the Caregiver-Child Attachment Relationship that Guides the Child development," *Proc. of the First Joint IEEE Int. Conf. on Development and Learning and on Epigenetic Robotics*, 2011.
- [10] H. Sumioka, Y. Yoshikawa and M. Asada: "Reproducing Interaction Contingency toward Open-Ended Development of Social Actions: Case Study on Joint Attention," *IEEE Transactions on Autonomous Mental Development*, vol.2, no.1, pp.40–50, 2010.
- [11] 栗山貴嗣, 國吉康夫: “応答予測と馴化・脱馴化に基づき人とやりとりルールを探索・共創するロボットモデル”, *日本ロボット学会誌*, vol.28, no.8, pp.1036–1046, 2010.

高橋英之 (Hideyuki Takahashi)

2008 年北海道大学情報科学研究科博士課程修了。2008 年より玉川大学脳科学研究所研究員、2013 年より大阪大学工学研究科特任助教。社会的コミュニケーション能力の背後にある脳内メカニズムを理解し、コミュニケーションロボットなど社会の役に立つプロダクトの開発につながる知見を得たいと考えている。最近の専らの興味は、神経科学的に有効性が裏付けられた、自閉症のセラピーロボットの評価法の確立である。博士（情報科学）。日本認知科学会、日本神経科学学会、北米神経科学学会などの会員。2009 年認知科学会論文賞を受賞。

石原 尚 (Hisashi Ishihara)

2009 年より 2012 年まで日本学術振興会特別研究員 (DC1)。2012 年大阪大学大学院工学研究科博士課程単位満期取得退学。同年より同研究科特任研究員。2013 年より特任助教および理化学研究所脳科学総合研究センター特任研究員。現在に至る。人と親密にかかわる中で子供が学習していく過程に興味を持ち、より親密にかかわれるロボットの実現とかかわりの中での学習の仕組みに関する研究を行っている。日本認知科学会、情報処理学会会員。

(日本ロボット学会正会員)