

社会的共創知能

石黒浩 (JST ERATO, 阪大) 港隆史 (JST ERATO) 吉川雄一郎 (阪大)

Report of the activities in Socially Synergistic Intelligence Group

*Hiroshi ISHIGURO (JST ERATO, Osaka Univ.), Takashi MINATO (JST ERATO, Osaka Univ.), Yuichiro YOSHIKAWA (Osaka Univ.)

Abstract— Socially Synergistic Intelligence group has explored principles of communicative and intelligent machines and human social development through a development of humanoid robot which resembles human beings in physical and perceptual structures. We have proposed learning mechanisms and mechanisms of interpersonal cognition on a social developmental process through psychological experiments with humanoid robots, computer simulation, and observations of infant behaviors. We have also developed several humanoid robots as a standard research platform for cognitive developmental robotics. This paper briefly describes the developed humanoids and proposed learning and cognitive mechanisms followed by the summary of our studies and future research direction.

Key Words: Social development, Synthetic approach, Humanoid platform

1. はじめに

JST ERATO 浅田共創知能システムプロジェクトの社会的共創知能グループでは、人に酷似した構造・知覚基盤を有するロボットの開発を通じ、人が他者を含む環境や社会に適応するメカニズム、および人と関わる知的なコミュニケーション機械のメカニズムの探究に取り組んできた。本グループでは、特に他者と関わる社会性に重点をおき、ロボットを用いた実証実験、計算機シミュレーションおよび乳幼児の観察実験を通して、対人認知メカニズムや養育者との相互作用に基づく学習における学習メカニズムなどを提案してきた。またそれと並行して、認知発達ロボティクス [1] における汎用研究プラットフォームとなるヒューマノイドの開発にも取り組んできた。本稿では開発したヒューマノイドと、学習メカニズム、対人認知メカニズムに関するいくつかの研究を簡単に紹介し、それらのまとめと今後の研究展開について述べる。

2. 社会発達研究のためのヒューマノイドプラットフォームの開発

発達する乳幼児が社会の中で関係を築いていく際、様々な構造の相互作用現象に直面する。本研究では、築かれていく社会関係の複雑さを、身体・環境・他者を含む社会への働きかけに対して生じる変化の時間スケールの違いで分類可能であると考え、以下のような様々な時定数での相互作用 (Fig. 1 左) が実現可能なヒューマノイドロボットを社会発達研究のためのプラットフォームとして開発することを目指した。

- 身体的相互作用: 同時または直後と言える潜時での変化を伴う現象で、接触などの物理的な相互作用
- 対面相互作用: 他者と対面する場面のように、一瞬以上の間をおいての応答が繰り返される相互作用。
- 社会的相互作用: 複数他者と対峙する場面のように、他者同士の応答が存在することにより、より大きな潜時でフィードバックが返ってくる相互作用。

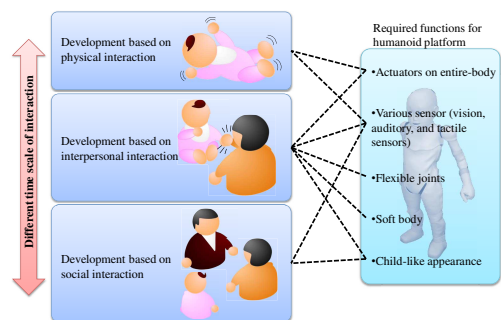


Fig.1 Design policy of research platforms for studying social cognitive development.

これら多様な相互作用をロボットを用いて実現するためには、以下の点が必要と考えられる (Fig. 1 右)。

- 人間らしい動作を生成可能な多自由度機構。
- 他者との多様な相互作用を実現するための多様なセンサ (視覚・聴覚・全身触覚)。
- 他者との安全で密接な相互作用を実現するための柔軟な関節。
- 他者との安全な相互作用を実現し、他者の相互作用の誘発するための柔らかい皮膚で覆われた身体。
- 他者の相互作用を誘発するための子供らしい見かけと大きさ。

他者との関わりを通じた発達をロボットを用いて実現するためには、人間の乳幼児と同様に他者の介助が必要不可欠である。そのためには、他者の介助行動を誘発し、さらに「ロボットを抱きかかえながら起こす」、「ロボットの手足を直接動かして教える」などの、既存のロボットと人の相互作用よりもさらに密接した相互作用を安全に実現することができるロボットが必要である。そのためには人間の介助を誘発するための子供らしい見かけ・大きさが必要と考えられる。さらには密接な相互作用を安全に実現するための、全身を覆う柔

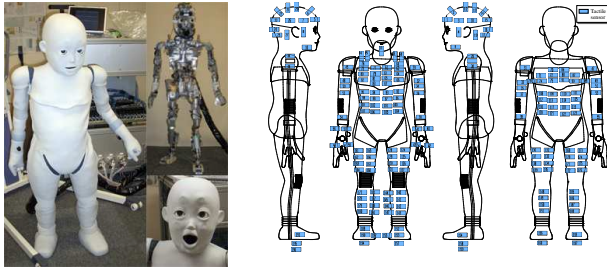


Fig.2 The humanoid platform for studying social development CB² (left) and its tactile sensor arrangement (right).

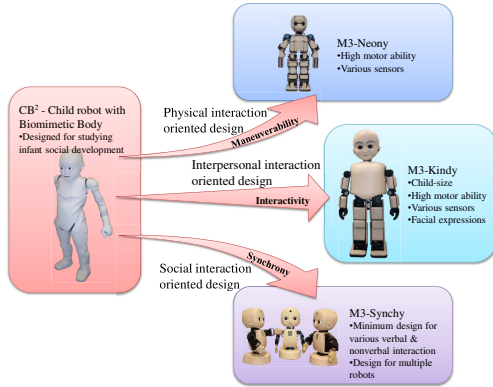


Fig.3 The design policy of the research platforms.

らかな皮膚および空気アクチュエータなどによるハードウェア的に柔軟な体が必要である。そして、人間らしい運動を実現するための全身のアクチュエータおよび、豊かな相互作用を実現するための種々のセンサ、特に物理的な相互作用において重要な全身触覚が必要である。そこでこれらの要件をすべて満たす研究用プラットフォームとして、Fig. 2 に示す CB²(Child-robot with Biomimetic Body) を開発した [2]。

CB² は全身がシリコン性の皮膚で覆われた身長約 130cm のヒューマノイドロボットで、全身に空気圧アクチュエータを採用することでハードウェア的に柔軟な運動が生成できる。またカメラ・マイクフォンだけでなく、PVDF フィルムを用いた触覚センサを全身に有している。CB² は問題発見型の研究のためのプラットフォームであり、可能な限り人間らしい身体機能を持たせた CB² を乳幼児らしく振る舞わせる過程で、発達上の様々な仮説を発見することが期待される。このような汎用プラットフォームは、認知発達ロボティクスにおいて工学研究者だけでなく人間科学の分野の様々な研究者が容易に使用可能なものとなっていることが望まれる。しかし、CB² をそのような標準プラットフォームとすることについては、開発コスト、メンテナンス性、制御性（空気圧アクチュエータの制御特性が悪く歩行などの運動が困難）において問題がある。そこで本研究では、Fig.1 で分類した研究対象に応じたヒューマノイドプラットフォームを開発した (Fig. 3)。

身体的相互作用を伴う発達過程の研究においては、ロボットの運動性能と感覚機能が重要である。そこで

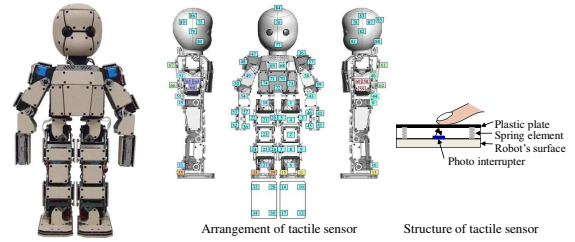


Fig.4 Photo of M3-Neony (left) and its tactile sensor system (middle and right).

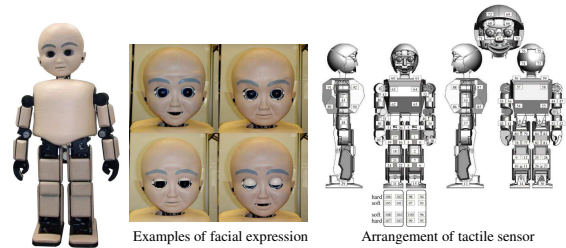


Fig.5 Photo of M3-Kindy (left), examples of facial expression (middle), and the arrangement of tactile sensor.

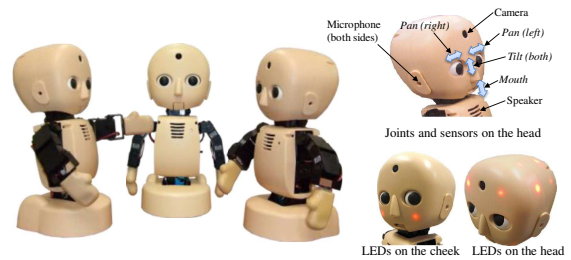


Fig.6 Photo of M3-Synchy (left) and functions for verbal/nonverbal communication (right).

身体的相互作用に指向したヒューマノイド M3-Neony (Fig. 4) を開発した [3]。M3-Neony は乳幼児の探索的運動に基づく運動学習などの研究用として開発された。M3-Neony は乳児程度の大きさ（身長約 50cm）で、頭部にカメラおよびマイクフォン、全身に Fig. 4 に示す触覚センサ、胴体に CPU を有した自立型ロボットである。また、全身にサーボモータ（全 22 個）を採用することにより運動性能が向上されている。小型の身体と全身のサーボモータにより寝返り、はいはい、歩行などの躍動的な全身運動が可能である [3]。

対面相互作用を伴う発達過程の研究においては、感覚・運動性能だけでなく、他者の相互作用を誘発するための性能（子供らしい見かけ、表情表出機能など）が必要である。そこで対面相互作用に指向したヒューマノイド M3-Kindy (Fig. 5) を開発した。M3-Kindy は他者との相互作用を実現しやすい子供サイズの身体（身長約 110cm）に、全身に多数の自由度（全 42 自由度）、特に表情を表出させるための自由度を備え、他者の相互作用を誘発するために社会的参照のような動作や表情を生成することができる。また M3-Neony と同様に

カメラ、マイクロフォン、全身触覚、CPUを有した自立型ロボットである。全身の自由度にはサーボモータが採用されており、寝返り、はいはい、歩行などの躍動的な全身運動も可能である。

社会的相互作用を伴う発達過程の研究においては、複数のロボットや人との間の同調的振る舞い（互いに頷き会うことやアイコンタクトなど）の実現が重要である。M3-Synchy (Fig. 6) はそのような社会的相互作用に指向したデザインを有するヒューマノイドである。M3-Synchy は言語・非言語コミュニケーションに必要な最小限の機能を持たせた小型ロボットであり、また頭身を小さくすることで可愛らしさを実現することを目指している。M3-Synchy は小型であるためにロボットの集団を容易に実現できるという特徴を有する。

M3シリーズのロボットには、商用のモータや教材用のCPUボードが採用されており、ロボットの開発コストの低減、メンテナンス性と扱いやすさの向上が実現されている。これまでに説明した特徴から、M3シリーズのロボットは認知発達ロボティクスのための汎用プラットフォームとして貢献すると期待される。

3. 社会発達における学習メカニズム・対人認知メカニズムに関する研究

社会共創知能グループでは、種々の時定数での相互作用、特に対面相互作用・社会的相互作用では養育者との相互作用における学習・認知メカニズムを提案してきた。身体的相互作用に関わる研究では、触覚における自他分離手法（自己運動起因と他者起因の触覚反応の分離）[4]、運動指令による運動のコツの表現とそれに基づく運動学習手法[5]などを提案した。対面相互作用に関わる研究では、他者の物理的介助を伴う運動学習[6]、他者の随伴性に基づく社会行動学習（共同注意や社会的参照の能力の学習）[7]、複数の社会的認知機能の相互促進的発達（視線追従能力と語彙理解の発達）[8]、相互応答を通じた対人認知モデル[9]、模倣発達をもたらす選好モデル[10]などの研究に取り組んだ。さらに社会的相互作用に関わる研究では、対人認知の社会ダイナミクスモデル（3者関係のバランス再現）[11, 12]などの研究に取り組んだ。ここでは社会共創知能の今後の研究方向性を議論する上で重要ないくつかの研究について紹介する。

他者の物理的介助を伴う運動学習 運動能力が未熟な乳幼児は、養育者の介助を借りて目的の運動を学習する場面が見られるが、このとき介助をうまく取り込んで運動を改善するためには他者との同調が必要と考えられる。そこで他者と同調する能力の発達は、他者とのコミュニケーション能力発達の基盤になっているという視点で他者との物理的相互作用を伴う運動学習に研究に取り組んだ[6]。まず、乳幼児は自身の柔らかな身体を利用して他者の介助をうまく取り込むと考え、柔軟な関節を持つヒューマノイドロボットCB²が他者の物理的介助に基づいて運動を達成するための制御手法を構築した。この手法では柔らかい身体を利用するべく、運動中に経由すると考えられるいくつかの姿勢を目標姿勢とし、他者の介助に伴って現在の目標姿勢を切り替えることによって運動を達成する。ここでは Fig. 7

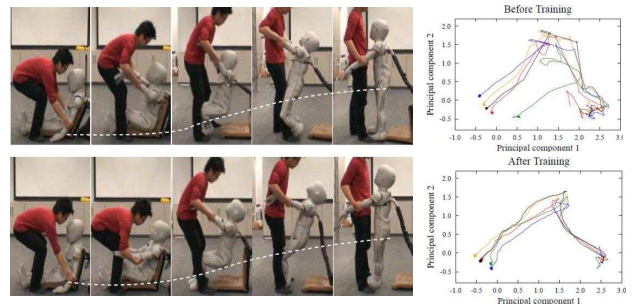


Fig.7 Improvement of physical interaction (top: before learning, bottom: after learning). The graphs show the trajectory of the robot posture in a lower dimensional space.



Fig.8 Mutual excitation mechanism on response and preference to other person (left) and experimental setup (right).

に示すように、座っているCB²の両腕を持って他者が立ち上がらせる運動を例題として扱った。実験より、介助をうまく取り込むためには姿勢切り替えのタイミングが重要であることを示唆する結果を得たため、介助者が判断する運動の評価（良/否）に基づいて目標姿勢を切り替えるタイミングを学習する手法を提案した。タイミングに注目することにより、30回程度の少試行回数でCB²の運動を改善させることが実験結果より示された（Fig. 7）。また、介助者の介護運動がロボットに適應すること、すなわち介助者とCB²の相互適應が生じていることが両者の運動解析により明らかになった。

相互応答を通じた対人認知モデル 対面相互作用は、相手に対して互に応答し合う過程であると考え、他者の応答の認知および他者への応答メカニズムが対人認知をモデル化する際の基本問題であると言える。そこでまず、社会関係を表現する典型的なモダリティの一つである視線に注目し、応答性と対人認知に関する仮説を導き出した。具体的には、人の「自分は今コミュニケーションをしている」という実感は、相手に適切に応答されること（知覚）のみから生じるのではなく、自分自身が相手に応答すること（行動）からも憶測的に生じるものであり、またそのように知覚や行動の経験から実感が生じるというだけの一方的な現象ではなく、逆にその実感により行動や知覚がコミュニケーションを続けるようにバイアスされる双方向的な現象である、という仮説（相互励起仮説, Fig. 8）である[9]。この全体像の一部である、行動と実感の双方向的関係の仮説を、ロボットにより視線の応答性を統制し

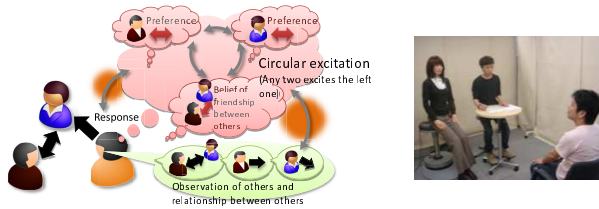


Fig.9 Circular excitation mechanism on response and preference to other person (left) and experimental setup (right).

た相互作用実験および接近行動の応答性を統制した相互作用実験により検証した。さらに、別の実験によって、行動と実感の双方的関係および実感と知覚の双方的関係の仮説についても検証した。

対人認知の社会ダイナミクスモデル 社会発達過程を理解するためには、子どもと大人の2者間のコミュニケーションのみに注目するのではなく、生後すぐから子どもが経験する複数の大人との間のコミュニケーション、すなわち社会相互作用にも注目する必要がある。そこで上述した2者の対面場面における視線相互作用の研究を、3者間コミュニケーション場面に拡張し、対人認知の社会ダイナミクスのモデル化に取り組んだ。人の対人認知はその対象の他者との関係性のみに依存するものではなく、その他のコミュニケーション相手と他者との関係性にも依存すると考え(循環励起仮説 [12], Fig. 9), 視線などの非言語モダリティがこれに寄与するという仮説を、ロボットを含む3者間コミュニケーション場面の心理実験により検証した [11]。さらに、循環励起仮説に基づいた視線相互作用による親近感のダイナミクスに関する計算モデルを構築した。そして子が両親とインタラクションする状況を想定した計算機シミュレーションを実施し、ハイダーのバランス理論 [13] を反映した状態が再現されること、また「子は鎧」と呼ばれる現象が再現されることを確認するなど、複数の観点でモデルの妥当性を検証した。

4. まとめと今後の研究展開

本プロジェクトを通じて構成的アプローチにより人間の社会的行動および社会的関係構築の基本であると考えられるいくつかのメカニズムを提案し、ロボットによる実証実験や計算機シミュレーションによりそれらを検証してきた。その中で核となるメカニズムは相互励起・循環励起メカニズムである。このような相互励起的な構造は、複数の社会的認知機能の相互促進的発達や他者の随伴性に基づく社会行動学習獲得においても見られる。さらには、介護者がCB²を立ち上げらせるような物理的相互作用を通じた運動学習においても相互励起的構造が内在していると考えられる。このことから、相互励起・循環励起メカニズムが社会発達において基盤となるメカニズムになっていると考えられる。しかしながら、そのメカニズムの検証は部分的な行動や社会的関係に留まっているため、今後は複数の時定数を跨ぐ相互作用が現れる事象を扱うことで、相互励起・循環励起構造を共通メカニズムとして一般化

する試み、そしてその妥当性の検証に取り組む研究への展開が望まれる。またこの相互励起構造がどのような神経基盤によって発現するのか、その生物学的な説明は十分とは言えなかった。したがって今後は、本プロジェクトの別の成果である乳幼児の認知発達過程の観察から導き出された脳構造の発達モデルに基づく形で、相互励起メカニズムのモデルを精錬化することが必要である。これに対し、開発したロボットプラットフォーム M3-Neony, M3-Kindy, M3-Synchy を使い分けることで、様々な時定数の相互作用において、生物学的により妥当なモデル化に引き続き取り組んでいくことが今後の課題となる。

参考文献

- [1] M. Asada, K. Hosoda, Y. Kuniyoshi, H. Ishiguro, T. Inui, Y. Yoshikawa, M. Ogino, and C. Yoshida. Cognitive developmental robotics: a survey. *IEEE Transactions on Autonomous Mental Development*, Vol. 1, No. 1, pp. 12–34, 2009.
- [2] T. Minato, Y. Yoshikawa, T. Noda, S. Ikemoto, H. Ishiguro, and M. Asada. Cb²: A child robot with biomimetic body for cognitive developmental robotics. In *Proceedings of the IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, pp. 557–562, 2007.
- [3] T. Minato, F. DallaLibera, S. Yokokawa, Y. Nakamura, H. Ishiguro, and E. Menegatti. A baby robot platform for developmental robotics. In *Proceedings of the Workshop on Synergistic Intelligence: Approach to Human Intelligence through Understanding and Design of Cognitive Development (IROS Workshop)*, 2009.
- [4] T. Noda, I. Fasel, and H. Ishiguro. Classifying tactile information of whole-body robot skin based on localization hypothesis. In *Abstract of the 33rd Annual Meeting of Japan Neuroscience Society (Neuro 2010)*, 2010.
- [5] 清水俊彦, 池本周平, 石黒浩. 運動指令に注目した動的な運動における特徴の解析. ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, 2009.
- [6] S. Ikemoto, H. Ben-Amor, T. Minato, H. Ishiguro, and B. Jung. Physical interaction learning: behavior adaptation in cooperative human-robot tasks involving physical contact. In *Proceedings of the 18th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, pp. 504–509, 2009.
- [7] H. Sumioka, Y. Yoshikawa, and M. Asada. Reproducing interaction contingency toward open-ended development of social actions: Case study on joint attention. *Transactions on autonomous mental development*, Vol. 2, No. 1, pp. 40–50, 2010.
- [8] 中野吏, 吉川雄一郎, 浅田稔, 石黒浩. 相互排他性原理に基づくマルチモーダル共同注意. 日本ロボット学会誌, Vol. 27, No. 7, pp. 814–822, 2009.
- [9] Y. Yoshikawa, S. Yamamoto, H. Sumioka, H. Ishiguro, and M. Asada. Spiral response cascades hypothesis - intrapersonal responding-cascade in gaze interaction. In *Proceedings the 3rd ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, pp. 319–326, 2008.
- [10] T. Minato, D. Thomas, Y. Yoshikawa, and H. Ishiguro. A model to the emergence of early imitation development based on predictability preference. In *Proceedings of the 9th IEEE International Conference on Development and Learning*, 2010.
- [11] M. Shimada, Y. Yoshikawa, and H. Ishiguro. Social balance effect of eye contact. In *Proceedings of the 18th IEEE International Symposium on Robot & Human Interactive Communication*, 2009.
- [12] Y. Yoshikawa, H. Ishiguro, M. Shimada, T. Minato, and D. Thomas. Mutual excitation model towards socially developmental robots. In *Proceedings of the Workshop on Synergistic Intelligence: Approach to Human Intelligence through Understanding and Design of Cognitive Development (IROS Workshop)*, 2009.
- [13] F. Heider. *The psychology of interpersonal relations*. John Wiley & Sons, New York, 1958.