

社会的共創知能

石黒浩 (ERATO JST, 阪大) 港隆史 (ERATO JST) 吉川雄一郎 (ERATO JST)
野田智之 (阪大) 池本周平 (阪大)

Socially Synergistic Intelligence

*Hiroshi ISHIGURO (ERATO JST, Osaka Univ.),

Takashi MINATO (ERATO JST), Yuichiro YOSHIKAWA (ERATO JST),
Tomoyuki NODA (Osaka Univ.), Shuhei IKEMOTO (Osaka Univ.)

Abstract— Socially Synergistic Intelligence group explores 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. In order to establish and maintain a long-term social interaction between human and robot, it is necessary to develop a robot which can safely and closely interact with persons. Our group, then, has developed a humanoid robot which has soft skin and flexible joint on the whole-body as a platform for our studies. This paper describes the developed robot and core studies of our group followed by our previous studies and future works.

Key Words: Development, Social development, Communication, Timing, Humanoid robot

1. はじめに

社会的共創知能では、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、人と関わる知的なコミュニケーション機械の原理、さらには人の社会発達の原理を探求する。他者とのコミュニケーション成立には種々の要因が関わると考えられるが、我々はコミュニケーション能力の発達に関わる要因として特にタイミングに注目する。ここで考えるタイミングとは、基本的には [1] で定義されている「反応のための最も有効な時間条件を創り出すこと」のことである。他者や周りの環境に対して、すなわち自身の属する社会において、行動すべきタイミングを計れるようになることは、ロボットが人との、また乳幼児が大人とのコミュニケーションを成立させるために必要不可欠な発達過程であると考えられる。時間知覚は視覚や聴覚などと異なり、時間自体を知覚する感覚器官が存在するわけではなく、感覚器官が存在する他の知覚から導かれるものである。それ故、時間知覚の発達を調べることにより、様々な機能の発達を導く要因、個々の機能の発達間の関係を知ることができる。社会的共創知能では、視覚や聴覚などの個々の機能の発達に閉じず、互いに依存する複数の機能の発達を考えていく。本研究では、このタイミングに視点をあて、対人関係における発達過程を実現・モデル化するため、ロボットの全身感覚・運動統合、非言語コミュニケーション、全身運動を題材とした時間的調節の発達メカニズムを構築する。

ロボットの発達を実現させる場合、人間の乳幼児と同様に他者(人間)の介助が必要不可欠である。そのため、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。言い換えれば、ロボットの発達過程に他者の(介助的)相互作用が自然に現れ

ることが重要である。そこで本研究では、ロボットの発達メカニズムの構築に先行して、人と密接に安全に関わることが可能なヒューマノイドロボット CB²(Child-robot with Biomimetic Body)を開発した。CB²は子供らしい見かけ・大きさのヒューマノイドロボットで、全身が柔らかなシリコン製皮膚で覆われている。また体の関節を空気アクチュエータで駆動することにより、ハードウェア的に柔軟な関節を実現している。全身に56個のアクチュエータを持ち、躍動的な全身運動を可能にするとともに、全身の皮下に分布した高感度触覚センサは全身触覚を実現する。

本稿ではまず開発した CB² の詳細について述べる。次いで、CB² をプラットフォームとした社会的共創知能の核となる3つの研究について、これまでの関連研究と今後の研究課題について述べる。

2. 研究プラットフォーム CB² の開発

開発した CB²(Fig.1) は次の5つの特徴を兼ね備えたヒューマノイドロボットであるという点において、人間-ロボット相互作用を通じた発達メカニズム研究のための新たなプラットフォームであると言える。

- 子供らしい見かけ・大きさ(身長130cm, 体重33kg)
- 全身に駆動関節(56個)を持つ(Fig.2)
- 柔軟な空気アクチュエータによる関節駆動
- 全身を覆うシリコン製の柔らかい皮膚(Fig.3)
- 全身に分布する触覚センサ(197箇所(Fig.4))

CB² は Fig.2 に示すように全身に56個の駆動関節を有する。その内、高速な運動が要求される眼球および腕の5自由度がモータ駆動で、他の51自由度が空気アクチュエータ駆動である。空気アクチュエータ駆動の関節は、圧縮空気が持つ特性により機械的に柔軟性を有する。これらの柔軟な関節と柔らかい皮膚により、CB² と人の密接な相互作用が可能となる。また子供らしい見かけ、全身の多数のアクチュエータで実現される人



Fig.1 The developed humanoid robot CB².

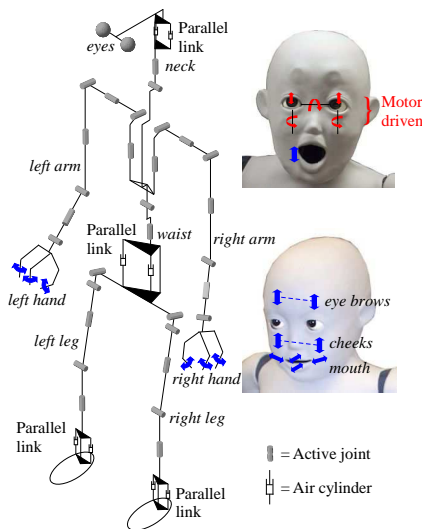


Fig.2 The kinematic structure of CB².

らしい動きにより、CB² に対する対人行動が引き出されることが期待できる。

CB² の空気アクチュエータは流量制御弁により制御される（圧縮空気の作動圧力は一定）ため、関節トルクを直接的に指令することはできないが、流量を変化させると管路特性等により関節トルクも変化する。またアクチュエータ内空気を解放することにより、各関節を受動関節にすることが可能である。CB² は人工声道を有しており、圧縮空気を振動させた音を声として発することができる。また口の動きと連動して人工声道が変形するため、口を動かすことにより声を変化させることができる。

CB² は外界センサとして眼球内のカメラ、耳内のマイクロフォンおよび全身の触覚センサを有する。触覚センサはPVDFフィルムを利用したセンサで、皮膚の変形速度に応じた信号を出力する。この出力を積分することにより接触力に相当する情報を得ることができる。触覚センサは Fig.3 に示すように内部メカを覆うウレタンとシリコン製皮膚に挟まれて取り付けられてい



Fig.3 The silicone skin and tactile sensors.

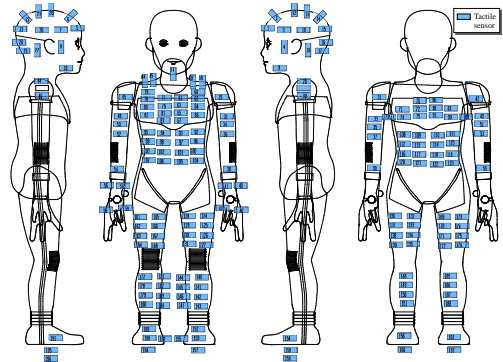


Fig.4 The tactile sensor layout.

る。ウレタンの変形の空間的広がりにより、センサのない部分の接触も感知可能である。このセンサを Fig.4 のように全身に分布することにより、CB² の全身触覚を実現している。

CB² の制御・情報処理計算機、制御弁等は体外に置かれているため、自立システムではない。その代わり長時間の連続稼動が可能である。

3. CB² 用いた研究1-自己組織化感覚の実現

ロボット全身を柔らかく触覚を有する皮膚で覆うことによって、人との予期せぬ接触による危険を減らすことができるだけでなく、人との自然な接触を伴う相互作用を促すことができる。さらに、硬い素材に比べて柔らかい素材に埋め込まれた触覚センサから得られる信号には、様々な接触の状態をより詳細に分類可能な情報が多く含まれていることが期待される。ここでいう接触の状態の分類の1つの例は、ロボット全身の触覚センサの時系列出力から、人との接触を伴う相互作用（触覚インタラクション）を分類することである。これまでに、触覚センサ間の相互相関を特徴量とし、触覚インタラクションを識別する方法を提案した [2, 3]。CB² と同様に全身分布型の柔らかい触覚を備えた Robovie-IIF [4] と人との触覚インタラクション時に得られた触覚情報に提案手法を適用した場合に、人の接触が期待されるインタラクションのクラス（「ハグ」、「頭をなでる」、「こちょこちょ」など）の 60% から 80% 以上を識別可能である結果が得られている。また、特徴量である相互相関からセンサ間の類似度を定義することで、特徴量を各センサが 2 次元平面上にプロットされたマップで可視化することができる。この自己組織化されたマップを体性感覚マップと呼んでいる。上記「ハグ」や「こちょこちょ」といった触覚インタラクションから得ら

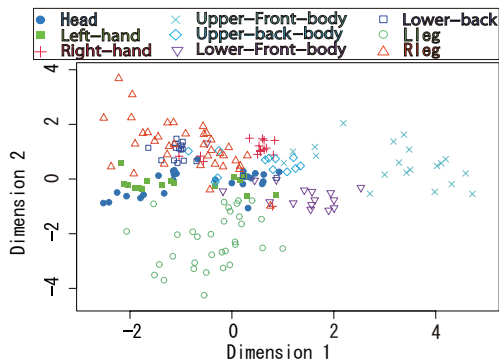


Fig.5 The somatosensory map of CB².

れた触覚時系列情報から体性感覚マップを作成すると、各クラス内で特徴的な共通のパターンが現れた。一方、人との接触が期待できないクラスのインタラクションでは、共通の分布パターンはみられたものの、そのパターンは別のクラスのパターンとも共通していた。このことから、接触なしの状態では相互相関は一定パターンを示し、人との接触によって特徴的な変化が得られると考えられる。

Fig.5にCB²の手や頭、体などを触り、その時の全身の触覚センサ出力からマップを作成した結果を示す。これまで得られている結果 [2, 3] と同様に、接触を特徴づける分布パターンがみられた。そのため、上述の手法は触覚センサの配置やロボットの種類によらず適用可能であると考えられる。Robovie-III や他の全身分布型触覚を備えるロボットは関節部分で、触覚センサが埋め込まれる柔らかい素材が分離していることが多かった。それらロボットと比較してCB²は多自由度の関節表面をやわらかい素材が覆っていることが特徴であり、CB²自身の動きによって多くの触覚センサが反応する。すなわち、自己の運動に起因する触覚反応が常に現れるため、触覚情報の類別には自己の運動の情報を欠かすことができない。もし自己の運動に伴う触覚反応のみをあらかじめ知ることができれば、触覚反応から自己の運動に起因する反応を除いたものを得ることができる。しかし実際にはロボットが環境中におかれた場合、必ず自己の運動以外に起因する触覚反応がある(例えばロボットの一部は常に床に接している)ため、この仮定は成立しない。ある現象の要因を自己の運動とそれ以外の要因に分離する問題は、人の発達過程にも見られるものである。このような空間的に識別不可能な問題は時間概念の導入により解決されると考えられる。今後、これまで提案してきた触覚インタラクションの識別手法に基づいて、運動と触覚の関係性を見つけ出す手法の開発を通して、自己とそれ以外の要因の分離を可能にするメカニズムを構築する。

4. CB²を用いた研究2—感覚の社会的共創発達

CB²は見かけや動作が子ども(生物)らしいことに加え、視覚・聴覚・全身触覚といった、人が通常知覚するものと近いものを捉える多様式感覚を備えている。従ってこれらを駆使することで、人が通常コミュニケー



Fig.6 A responsive behavior to elicit an interpersonal behavior.

ション相手に対して予期しているものと同じような反応動作を呈示することが可能である。またこれにより、人が通常他者に対して示すような対人知覚・対人行動をCB²に対しても示させることが可能であると期待される(Fig.6)。

このような応答性は、コミュニケーション可能な存在であるという印象を人に与える上で重要な要素であると考えられている [5] が、その詳細なメカニズムについては明らかでない。社会的共創知能ではこれに迫る第一歩として、応答のタイミングに注目し、被験者のまばたきに対して応答的にまばたきをして返すCGの顔を被験者と対面させる実験を行っている [6]。CGに見られている感じがしたかどうかを被験者に回答させたところ、CGの顔が早すぎずまた遅すぎない応答潜時でまばたきを呈示したとき、最も強い被注視感を被験者に抱かせることがわかった。この結果は、まばたきという微細なコミュニケーションチャンネルにおいてですら、タイミングに注目した応答性の制御により相手に抱かせる印象を変えうることを示唆している。今後CB²を用いて、複数様式のコミュニケーションチャンネルの応答タイミングと印象との関係を見出すことを通じ、人が相手に対して期待する応答性をモデル化が可能であると考えられる。

またこのような応答タイミングを、さらには相手の応答性に基づいて相手を認知するしくみをどのように身につけることができるのか、といった発達についての議論も尽くされてはいない。これに対しCB²のような子どもらしい応答性を期待させるロボットを用いることで、人がどのような応答の仕方に対して子どもらしいという印象を持ち、対子どもの行動を示すのかを調べることができると考えられる。またこれを通じて、どのように応答的に振舞えば、発達を手助け、あるいは誘導する養育者の対子どもの行動が導きだせるかという視点から、人およびロボットの他者認知に関する発達を考えていく予定である。

5. CB²を用いた研究3—運動の社会的発達

CB²の特徴の1つである柔軟な関節には、高い安全性を容易に実現でき、制御中に外力が加わった場合に故障し難いという利点がある。この利点により、人が物理的にロボットの動作に介入することが、電気モータで駆動されるロボットに比べて容易であり、人との物理的相互作用をより簡単な制御で実現できると考えられる。本節ではその特徴を利用した物理的相互作用



Fig.7 CB² is standing up with a person's help.

として、人がロボットを引き起こす動作に注目し、その実現のための制御システムについて述べる。

上述の引き起こし動作を実現するためには、人が加えた力に対して受動的および能動的に姿勢を変化させる制御が必要となる。そこで、CB²の全ての空気圧駆動関節をゲインスケジューリング制御によって角度制御する制御システムを実装した。これにより、ゲインが小さい場合は人の外力に対して受動的に姿勢を変化させ、ゲインが大きい場合は人の外力に対して各関節角を目標関節角に維持する制御となる。また人が加えた力は、外力によって角度制御されている関節に生じる誤差により検出可能である。

上述の制御システムを用いて以下の手順で引き起こし動作を実現した。

1. CB²の初期姿勢の設定
2. 外乱無し状態で立位を維持できる最終姿勢とゲインの設定
3. 初期姿勢から最終姿勢の間の中間姿勢の設定
4. 各姿勢を角度制御の目標値とし、それらを切り替えるタイミングを調節

Fig.7にこの手順によって実現した引き起こし動作を示す。このとき、姿勢、ゲイン、切替タイミングは試行錯誤により決定した。

Fig.7において、posture 1, posture 2, posture 3はそれぞれ初期姿勢、中間姿勢、最終姿勢を表しており、それらの切り替えによって引き起こし動作を実現している。また、初期姿勢と中間姿勢、および中間姿勢と最終姿勢の間は離散的に目標姿勢が変化するが、関節の柔軟性によって関節角が急激に変化することなく、滑らかな動作を実現できることを確認した。以上のことから、CB²が有する柔軟な関節は物理的な対人相互作用における安全性の確保および故障率の低減に寄与するだけでなく、制御システムの簡単化を行う上でも利点の1つになると考えられる。

社会的共創知能では、ロボットの全身感覚・運動統合、非言語コミュニケーション、全身運動における時間的調節の発達メカニズムを構築することを1つの目標としている。Fig.7に示した引き起こし動作は、教示者である人がロボットの動作に介入し、互いに力を授受しながらロボットの全身運動を実現させている、1つのコミュニケーションであるとみることができる。そこで今後、このような人がロボットに動作の教示を行う相互作用を、簡単化・定量化可能な物理的コミュニケーションと捉え、ロボットが有するべき全身運動の

表現、物理的相互作用における学習システムについて研究する。全身運動表現の簡単化については、柔軟な関節を有するロボットにおける効率的な基本運動要素、およびそれをういた制御システムについて研究を行う。また、物理的相互作用における学習システムについては、教示者との相互作用から教示者が希望するロボットの運動を推定する方法について研究する。このとき力の授受という相互作用を減少させることが教示者の意図推定であるという視点から、タイミングの発達が運動の社会的発達を導くメカニズムを構築する。

6. おわりに

本稿では、柔らかい皮膚と柔軟なアクチュエータを持つヒューマノイドロボットCB²の開発について述べ、CB²の特徴を利用した3つの発達メカニズム構築に関する研究の現状と今後の方針について述べた。人の発達メカニズム解明において、これらの研究は独立ではなく互いに依存するものである。CB²は人との長期的で密接な相互作用を実現可能なロボットであり、種々の機能が絡み合った複雑な発達メカニズムの検証用プラットフォームとなり得る。社会的共創知能では、タイミングの発達を鍵としてこれらの発達メカニズムから、ロボットのコミュニケーション能力の発達、人の社会発達原理を明らかにするための研究を行う。

- [1] R. Conrad. Timing. *Occupational Psychology*, Vol. 29, pp. 173–181, 1955.
- [2] T. Noda, T. Miyashita, H. Ishiguro, and N. Hagita. Map acquisition and classification of haptic interaction using cross correlation between distributed tactile sensors on the whole body surface. In *Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robot Systems*, 2007. (to appear).
- [3] 野田智之, 宮下敬宏, 石黒浩, 萩田紀博. 触覚インタラクションにより自己組織化可能な全身分布型超柔軟性触覚センサ. 第12回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp. 34–39, 2007.
- [4] T. Miyashita, T. Tajika, H. Ishiguro, K. Kogure, and N. Hagita. Haptic communication between humans and robots. In *Proceedings of 12th International Symposium of Robotics Research*, 2005.
- [5] A. Arita, K. Hiraki, T. Kanda, and H. Ishiguro. Can we talk to robots? ten-month-old infants expected interactive humanoid robots to be talked to by persons. *Cognition*, Vol. 95, pp. B49–B57, 2005.
- [6] Y. Yoshikawa, K. Shinozawa, and H. Ishiguro. Social reflex hypothesis on blinking interaction. In *Proceedings of 29th meeting of the Cognitive Science*, 2007. (to appear).