

## ERATO 浅田共創知能システムプロジェクト事後評価報告書

【研究総括】 浅田 稔 (大阪大学大学院工学研究科／教授)

【評価委員】 (あいうえお順)

浅間 一 (東京大学大学院工学系研究科／教授)

瀬川 昌也 (瀬川小児神経学クリニック／院長)

土井 美和子 (委員長；株式会社東芝 研究開発センター／首席主監)

藤田 雅博 (株式会社ソニー システム技術研究所／所長・主幹研究員)

### 評価の概要

本プロジェクトでは、人間型ロボットであるヒューmanoイドの新たな設計・開発・制御と認知科学や脳科学の手法を用いた構成モデルの検証による科学と技術の融合した新領域「共創知能システム」の構築が基本理念に掲げられ、約 5 年間にわたる研究が推進された。日本が世界をリードするヒューmanoイドにおいては、技術の長足の進歩が近年目覚ましい一方、身体と環境、他者との相互作用に基づく知能創発の設計論の確立が十分に実現できていない現状である中、本プロジェクトは、新たなブレークスルーをもたらすべく、「認知発達」に焦点をあてた、ユニークかつチャレンジングな課題を設定したと認められる。

効果的なプロジェクト運営や課題遂行を行うにあたり、浅田総括のもとには優秀なグループリーダー(細田・國吉・石黒・乾)及び研究者集団が結集し、グループ間の密な情報交換や連携が図られつつ、基本理念に基づく成果の創出に努められた。こうした有機的連携に関しては、プロジェクト終了後も何らかのかたちで継続され、より顕在的な成果創出へと繋がることを期待したい。

成果の一例として、既に中間評価の時点までに開発された幼児アンドロイド CB2 に加え、プロジェクトの後半においても多くの研究プラットフォームの創出がなされたことが挙げられる。初期ロコモーションの発達過程の理解を目的とした人工筋骨格ロボット・Pneu-born シリーズ、乳児の感覚運動学習過程の理解を目的とした 9 ヶ月児型ロボット・Noby、身体的相互作用を伴う運動学習過程の理解を目的とした M3-Neony、対面相互作用を伴う発達過程の理解を目的とした M3-Kindy、社会的相互作用を伴う発達過程の理解を目的とした M3-Synchy が、その具体例である。また、これらのロボットフォームやシミュレータを用いた発達過程のモデルと、それぞれの発達過程の脳部位、脳機能の対応を fMRI などでの検証をかけ、新しい脳科学的な発見も成果として挙げられる。人間の認知発達過程の理解という究極目標へ向け、現時点において、ロボットの専門家ではない理学療法士や認知科学者等が利用可能な研究方法論等を十分に提示することができたと認められるが、今後はプラットフォームとしての地位確立など、成果の更なる展開及び深化に努めてもらいたい。

また上記をはじめとしたプロジェクトの研究活動や研究成果などは、学術的 (IEEE 論文誌等) 及び社会的 (書籍や新聞・テレビ等のメディア等) な観点において、活発に公表されてきたと認められ、高く評価できる。

これらを踏まえ、本プロジェクトは、戦略目標「教育における課題を踏まえた、人の生涯に亘る学習メカニズムの脳科学による解明」に資する十分な成果が得られたと認められる。

## 1. 研究プロジェクトの設定および運営

### 1-1. プロジェクトの全体構想

ERATO 浅田共創知能システムプロジェクトの全体構想には、人間型ロボットであるヒューマノイドの新たな設計・開発・制御、および認知科学や脳科学の手法を用いた構成モデルの検証というアプローチを駆使することによって、人間の認知発達過程を理解するという究極目標がある。日本が世界をリードするヒューマノイドにおいては、技術の長足の進歩が近年目覚ましく、その結果として、表層的な機能が実装されるに至ってはいる。しかしその一方で、ヒューマノイド研究には、ロボット自らが社会に適応していくための、知能創発・発達を設計するというところにまで及んでいない状況が続いた。そのような背景のもと、浅田プロジェクトの目指すことには、2005年9月の発足当初から、「認知発達」という新たな着眼点が持ち込まれた。脳機能画像計測や臨床検査等によって、人間の知能創発や発達過程を理解するとともに、それらをヒューマノイドの開発へとフィードバックし、「ヒューマノイドにおける知能創発」へと展開するという戦略が採られた。

### 1-2. プロジェクトの枠組みや研究体制、および研究活動の状況

これらの全体構想や戦略は、同時に相当なチャレンジング性を持ったものであるといえ、研究総括である浅田教授としても、人員結集を含めた研究体制の整備に心血を注いだであろうことは、十分に推察することができる。浅田総括の直下には、細田耕 博士（現在、大阪大学大学院情報学研究所・教授）、石黒浩 博士（同、大阪大学大学院基礎工学研究所・教授）、國吉康夫 博士（東京大学大学院情報理工学系研究所・教授）、乾敏郎 博士（京都大学大学院情報学研究所・教授）がグループリーダーとして招聘され、それぞれ「身体的共創知能」「社会的共創知能」「対人的共創知能」「共創知能機構」のグループが置かれた。各グループリーダーは、それぞれが一つの研究プロジェクトを率いるだけの高い能力を有する気鋭の研究者として、関係分野からの認知度も高い。さらに個々のメンバーらの顔ぶれにまで及ぶと、ロボティクスや人工知能学、計算神経科学から、神経心理学、認知情報論をバックグラウンドとする「ヘテロな研究者集団」の形成が見受けられた。その一方で、大阪-東京-京都という各グループの研究実施場所の物理的な距離も存在したが、研究メンバーらが一堂に会するミーティングなどを定期的に設け、それらを極力解消するように努められ、さらに「ヘテロな研究者集団」が融合するメリットを活かそうという工夫が図られた。

さて次に、こうした研究体制が整備されてからの研究活動について概観する（各グループの、個々の研究成果については、次節で詳述）。既に中間評価時（2009年2月）でも一部触れてはいるが、発達段階に応じた認知発達研究用のロボットプラットフォームの整備、認知神経科学的発達モデルの構築、発達過程の脳部位・脳機能の対応のfMRIなどによる検証などが、プロジェクトの成果のハイライトとして挙げられる。これらの成果は、国内外の学術誌への投稿および掲載はいうに及ばず、IEEEの特集記事の冒頭を飾るなどした。加えて、プロジェクト主催および共催のワークショップや学会での発表、国内外での招待講演などを通じた、定期的な成果発信が行われただけでなく、書籍や新聞・テレビ等のメディア等を活用した研究活動のアウトリーチングも随所で見受けられた。

以上を踏まえ、改めて、「研究プロジェクトの設定および運営」に対する我々評価委員の所見を述べる。日本が世界をリードするヒューマノイド研究において、さらなるブレークスルーをもたらすべく、「認知発達」に着眼点を持ったチャレンジングな課題設定を行い、そしてその実現へ向けて、浅田総括のもとには、ERATO の趣旨にも掲げられている「ヘテロな研究者集団」が形成された。その結果、認知発達のシナリオとして、身体性に注目した構成論的アプローチをとり、複数の新しい研究プラットフォームや認知神経科学的発達モデルの構築が実現されるに至り、この過程においては、各グループの密な情報交換や連携も図られた。

これらの成果を含む、プロジェクトの一連の研究活動は、学術的及び社会的な観点において活発に公表されてきたと認められ、特筆して高く評価できる。以上の点などを総合し、研究プロジェクトの設定および運営は、特筆して的確かつ効果的であり、また研究活動の状況は、特筆して望ましい研究展開を示したと認められる。

さて、本 ERATO プロジェクトの存在意義が、後々にまで高く認められるための幾つかの期待する点を、以下に提言として記しておきたい。冒頭に述べたプロジェクトの究極目標である「人間の認知発達過程の理解（および実現）」には、今後もチャレンジングな課題設定および研究取組みが必要となるであろうが、その一方で、事例的で総花的な研究に陥ってしまう要素も孕んでいることは見逃せない。よって提言としては、プロジェクト終了後も、現在の研究体制（グループ間の有形無形の連携など）が何らかのかたちで維持されるとともに、プロジェクト全体としてのアウトカムは何かを常に意識し明確にしつつ、より顕在的な成果創出へと繋がることを期待したい。例えば、研究成果のハイライトとして上述した「認知神経科学的発達モデルの構築」については、今後、プラットフォームを使った検証実験によって、さらなる展開が期待できるであろうし、それは ERATO の枠組みとしての価値をさらに高めるものに繋がるといえよう。

【研究プロジェクトの設定および運営】 a+（特筆して的確かつ効果的であった）

【研究活動の状況】 a+（特筆して望ましい研究展開を示した）

## 2. 研究成果

### 2-1. 身体的共創知能グループ（グループリーダー： 細田 耕）

本グループは、身体と環境の相互作用を考慮しなければ生まれない歩行・走行・跳躍などの運動スキルをヒューマノイドにおいて実現し、そこに介在する知能発現の方法を解明することを主眼に研究を進めてきた。本グループの研究の特徴として、電気モータ系とは異なり、人間の筋配置構造を模倣した空気圧人工筋肉による内骨格系ヒューマノイドの開発が主軸となった。

中間評価までに、空気圧人工筋肉によって駆動するヒューマノイド・Pneumat-BT の製作に成功していたが、その後事後評価までの間に、人工筋骨格赤ちゃんロボット・Pneu-born

シリーズなどを開発し、赤ちゃんの「はいはい」や「歩き出し」に近い運動を実現するなど、大変に優れた研究進捗を示したと認められる。これらの成果は、個々のセンサの値から個別関節を制御している、従来の制御系とは全く異なる制御系の実現が可能となったという点でも、非常に興味深い。

今後への期待および提言として、まずこれまでの知見をもとに、空気圧アクチュエータと筋との共通性や相違性を考慮した幼児の歩行において、運動や知能の創発という点から明らかになったメカニズムを、さらに明確化してもらいたい、ということが挙げられる。また、理学療法士らとの連携を進めることで、身体運動と脳のメカニズムを解明するプラットフォームとしての深化も期待できよう。

加えて、重力に起因する床反力などの体性感覚のフィードバックに基づく姿勢制御、筋緊張制御への研究の展開なども期待される。空気圧系のロボット制御は、電気モータ系とは異なり、精細な制御は難しいかも知れないが、実世界で安全な存在としての期待はあり、今後、歩行を含め複雑と思われる運動を制御することができれば、工学面でも大きな進展が期待できる。

## 2-2. 対人的共創知能グループ（グループリーダー： 國吉 康夫）

本グループは、胎児期から乳幼児期までの多様な対象に対して、身体的行動からコミュニケーションに至るまで、認知機能がどのように獲得されていくかを明らかにするための課題に取り組んだ。また中間評価以降は、他のグループとの連携強化がより明示化され、取り分け共創知能機構グループとは、神経科学的モデル基盤の導入や、実ロボットでの検証などが進められた。

中間評価までの主な成果として、胎児・新生児の筋骨格・神経系発達シミュレーションの基盤構築が挙げられる。この成果については、その後事後評価までの間に、実胎児の計測結果を踏まえるなどして、シミュレーションを精緻化し、接触による運動学習の様子を再現するに至った。また、乳児の全身感覚運動学習過程の理解を目的とした9ヶ月児型ロボット・Nobyの開発も、本グループの代表的な成果として挙げることができる。

これらの成果等を踏まえ、構築したプラットフォームやモデルを用いることによって、認知機能が構成されるメカニズムの解明に迫っている点を高く評価したい。認知発達の大きなシナリオとして、身体イメージ獲得から、模倣、ターンテイキングなどまでの大きな流れを提案していることは、「科学的な仮説とその検証」ととらえて良いのかも知れない。もちろん検証内容の詳細は、今後検討が深められることを期待したい。特に、生物学的な知見に基づきモデル化されている部分と、アприオリに与えている部分が混在する中で、認知機能の獲得において何が本質的だといえるか、等の知見が得られるようであれば画期的なことである。

また、Nobyに用いられた接触センサなどは、ユニークかつ有用であるといえる。加えて制御に関しても、従来の制御とは異なり、カオスと身体性による運動の創発なども今後の有力な研究対象となりうるだろう。

## 2-3. 社会的共創知能グループ（グループリーダー： 石黒 浩）

本グループでは、身体的、対面的、社会的相互作用に着目し、人間が周辺環境（他者を含む）や社会に適応する仕組みを考察し、実際にヒューマノイドにその機能を実装することで、その考察を検証することを行った。またヒューマノイド開発においては、これまでの2グループとは異なり、脳や筋肉の仕組みよりも、他者と関わる社会性に必要な機能の実現に重点が置かれた。

このグループの最大の貢献は、複数種類のヒューマノイドプラットフォームの開発である。既に中間評価時に報告したように、人間を模倣した汎用的プラットフォーム **CB2** の開発という本グループの成果は、その後、カリフォルニア大学サンディエゴ校で **CB2** をプラットフォームとした認知研究プロジェクトが開始されるというかたちでのインパクトに繋がった。またグループ内でも、**CB2** を用いて、人の補助を介した起き上がり実験や、人との物理的な相互作用の実験が行われた。さらに事後評価までの間に、**CB2** で欠けている部分を補うための、身体的相互作用を伴う運動学習過程の理解を目的とした **M3-Neony**、対面相互作用を伴う発達過程の理解を目的とした **M3-Kindy**、社会的相互作用を伴う発達過程の理解を目的とした **M3-Synch**y が製作され、それぞれの研究に応じた利用しやすいプラットフォームの開発へと展開した（これらは現在、企業での製作・販売も行われている）。

このように、数多くのプラットフォームが開発されたことを受けての今後への期待および提言として、取り分け、今後取り組むべき研究対象となる「社会性」というものを、より明確に定義づけることなどを挙げたい。そもそも「社会性」のスコープは非常に広いと思われ、この定義づけをより明確にすることで、研究のさらなる深化はもちろんであるが、社会性研究のための研究プラットフォームには、どのような機能が要求されるかということにも、より明解な見通しが立つのではないかと考えられる。

#### 2-4. 共創知能機構グループ（グループリーダー：乾 敏郎）

本グループの基本的な考えは、体験を通して身体イメージ・動作イメージが構築され、そのイメージを操作して他者操作の認知・模倣が可能になるということである。この考えに基づき、模倣メカニズムーコミュニケーション機能（脳内ネットワーク）の関係を探ることなどを特徴とした研究を展開した。具体的には、自閉症やウィリアムズ症候群の発達障害児を対象とした行動実験、健常者を対象とした脳機能イメージング実験、さらにこれらの知見に基づく発達モデル研究を実施し、認知発達の基盤となる身体や空間表象の学習、言語獲得に至る発達モデルの提案などを推進した。

中間評価までの時点で、ウィリアムズ症候群のトラッキング不能が自己中心座標への変換の機能不全によって生じる可能性を指摘したり、前頭前野ニューロンが特定の動作系列に関与していることを明らかにしたりするなどの成果を上げていた。その後事後評価での間に、新生児の顔模倣の獲得モデル（触覚野と視覚野の間にある種の結合の存在を仮定し、胎児が母体内で自分の顔を触る時の指と顔のダブルタッチのみによって、顔の視覚的イメージを形成する）の提案がなされた。

また総じて、対人的共創知能グループを中心に、グループ間の協調も上手くとられているように見受けられた。身体イメージの獲得、自己中心・対象物中心座標系と模倣、模倣と言語、コミュニケーションという認知発達に関する新しい仮説を、脳内ネットワークとの対応づけを行ったり、工学的モデルを用いて検証したりという流れで成果を上げた。今後さら

に検証を進めることにより、その科学的価値はさらに高まるものと思われる。

加えて、こうした発達を工学的に完全に再現できれば、「人工知能」の新たな流れを作ったことになる。よって、随伴性をはじめとした研究成果の工学系研究との接点をさらに明確に打ち出すことができれば、発達することで人間と自然にコミュニケーション可能なロボットができる期待が高まる。

以上、各グループでの研究成果の状況などを踏まえ、我々評価委員としての所見を改めて整理する。認知発達の解明へ向けたロボットによる構成的なアプローチを進め、オリジナリティの高い研究成果を上げるとともに、プラットフォームとして専門家でなくても使用可能なヒューマノイドや胎児シミュレーションなどといった、脳神経モデルと身体性をつなぐものを実現し、ロボティックサイエンスという大きな両機を切り拓いたと認められる。質量ともに遜色ない学術論文への掲載に加え、IEEE 特集号の企画・実施、書籍の出版・取材など、アウトリーチ活動を通じた研究成果の対外的発信などを踏まえ、科学技術的側面での成果状況は秀逸なものであると判断した。その一方で、研究の性質上として、5年間のプロジェクト期間でソリッドな成果が確立したわけではなく、上述のように、寧ろ今後へのさまざまな期待すべきことが上げられるといえる。上述に加え、プロジェクト全般で俯瞰した際、これまでの研究は、胎児から生後の各年齢に対応したモデルやプラットフォームでの学習(年齢を固定した上での学習)に関する研究が多い。発達においては、スローダイナミクスとも呼ぶべき、長い時間をかけて身体の構造や脳の構造の変化があるはずであり、今後その発達のプロセスに注目した研究の展開も期待したい。

中長期視点を含めた産業・社会的側面での言及は容易ではないが、以下に述べる根拠等を踏まえ、成果は秀逸なものであると判断した。まず、ヒューマノイドの設計論として、今後の関連研究開発に影響を与えうる成果を出したことである。内骨格系、空気圧人工筋肉およびその制御、分布型センサ、それに覆われた全身センサロボットなどは、新たな設計論として注目に値するといえる。

またヒューマノイドの機能が向上し、普及が進んだ際に、本研究成果が基盤技術として活用される可能性が十分ある。また本研究で明らかになった知見によって、疾病や障害の理解や治療、リハビリの新しい方法論や手法に繋がる可能性もある。上述したように、ヒューマノイド研究者ではない、理学療法士や認知科学者との連携によってプラットフォームの活用などを進めてもらいたい。

〔研究成果（科学技術的側面）〕 a+（成果として秀逸である）

〔研究成果（産業社会的側面）〕 a+（成果として秀逸である）

### 3. 総合所見

本プロジェクトでは、ヒューマノイドの新たな設計・開発・制御と認知科学や脳科学の手法を用いた構成モデルの検証による科学と技術の融合した新領域「共創知能システム」の構築が基本理念に掲げられ、約5年間にわたる研究が推進された。

各グループリーダー及び全構成員の取り組みにより、ヒューマノイドや胎児シミュレーションなどといった研究プラットフォームを数多く開発するとともに、これらを用いた発達過程のモデルと、それぞれの発達過程の脳部位、脳機能の対応を fMRI などでの検証をかけ、新しい脳科学的な知見を得るなどの成果を上げた。なお前節までに述べたように、成果の秀逸さは確かなものであるが、今後さらなる検討を深めることで、より重要な研究成果が得られる可能性もあることから、本プロジェクトで培われたグループ間の有機的連携や、今後はプラットフォームとしての地位確立に資する異分野との連携などにも注意を払い、より顕在的な成果創出へと繋がることを期待したい。

なお上記をはじめとしたプロジェクトの研究活動や研究成果などは、学術的（IEEE 論文誌等）及び社会的（書籍や新聞・テレビ等のメディア等）な観点において、活発に公表されてきたと認められ、高く評価できる。

これらを踏まえ、本プロジェクトは、中間評価時に引き続き卓越した研究水準であったと認められ、戦略目標「教育における課題を踏まえた、人の生涯に亘る学習メカニズムの脳科学による解明」に資する十分な成果が得られたと認められる。

【総合評価】 A+（戦略目標に資する十分な成果が得られた）

以上