

ERATO 浅田共創知能システムプロジェクト中間評価報告書

【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（東京大学人工物工学研究センター／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／首席技監）

藤田 雅博（ソニー株式会社システム技術研究所／所長）

評価の概要

ERATO 浅田共創知能システムプロジェクトは、ヒューマノイド（人間型ロボット）の新たな設計・製作・作動と認知科学・脳科学の手法を用いた構成モデルの検証から知的機能を解明し実現する、という壮大な目標に挑んでいる。来るべきロボット社会を見据え、これまでの表層的な機能実現のためのロボティクスから脱却し、脳科学、神経科学、認知科学、生理学と工学の融合・統合により、人間社会が真に求める適応・発達型ロボットの基本原理を追求する独創的・挑戦的なプロジェクトである。

本プロジェクトは、浅田 稔 大阪大学大学院工学研究科教授が研究総括を務め、対人的共創知能・身体的共創知能・社会的共創知能・共創的知能機構の4グループが、人間の知能創発の理解、適応・発達型ロボットの設計原理を提示すべく精力的に研究を展開している。2005年9月のプロジェクト発足以後、評価委員によるヒアリングが実施された2009年2月までの間に、胎児シミュレータ、赤ちゃんロボット、ヒューマノイドなど、人間の発達段階に応じた研究プラットフォームの構築と理論仮説の検証が進められ、着実にかつ世界的にもインパクトのある成果が結実している。本プロジェクトで開発を進めたヒューマノイド（CB2）を研究プラットフォームとした大規模研究プロジェクトが米国・カリフォルニア大学サンディエゴ校で始まっていることは、その証の一つと言えよう。「知能の設計」、「発達」というロボット工学とそれを取り巻く生命科学が担うべき難問に道筋を与え、新たな学術領域「ヒューマノイドサイエンス」の創出を予感させるこれまでの研究成果に加えて、それを可能にした研究総括の研究構想と力強いリーダーシップによるプロジェクト運営も高く評価できる。このように、本プロジェクトは、中間評価の時点において、順調、かつ世界的にも誇れる優秀な水準にあると認められる。

本プロジェクトは発達神経学に基づいたものであるが、その胎児、乳幼児を想定した脳のモデルは、緒についたばかりであるのも事実である。プロジェクト後半期においては、各グループの成果、知見を有機的に連携させ、チャレンジングな目標をより具体的・現実的にすることで、人間社会に真に貢献可能な適応・発達型ロボットの基本原理の提示、人間の知能創発・発達の理解深化を期待すると共に、工学と科学の協働・融合による新たな学術領域の確たる基盤を築き上げてもらいたい。

1. 研究プロジェクトの設定および運営と今後の見込

1-1. プロジェクトの全体構想

21世紀は「脳の世紀」、「ヒトと共生するロボットの時代」と称される。脳科学とロボティクスは共に「ヒトの知能創発過程の理解と構築」という課題と対峙しながら、その先にある脳機能を実現する原理の解明、適応・発達型ロボットの具現化に向けて歩みを進めている。しかし、両者の結びつきはまだ希薄と言わざるを得ないのが現状であろう。

2005年9月に発足したERATO 浅田共創知能プロジェクトは、ロボット、ヒト、環境の相互作用から共創される知的機能のうち、特に認知機能に焦点を当て、実際にヒューマノイドを構築することによって理解するという構成的手法を特徴とし、脳科学、神経科学、認知科学、発達心理学などの生命科学と工学との融合・統合によりヒトの知能発達過程を解明せんとするものである。

構成的手法によるヒトへのアプローチを通じて、身体的行動から対人コミュニケーションまでを発達的につなぐ構成論的認知モデルが構築され、ヒトの知能創発・発達過程の構成的理解がもたらされる。これらは、脳機能画像計測、臨床検査によってその妥当性が検証されるのと同時に、ヒューマノイドの設計、製作へとフィードバックされ、ロボティクスにおける知能設計という課題に対する解が示される。こうした科学と工学の間に生まれる「知」の循環とそれに伴うロボティクスにおける人工知能・制御技術の進展は、図らずも脳科学とロボティクスの融合による、ヒトの認知発達に対する新たな理解と実現の「共創」に他ならない。

浅田総括は、学習、教示、模倣と言った行動生成や意図の理解、コミュニケーションの創発を題材とし、内部構造と環境要素の関わりを理解し、その成果をヒューマノイドに実装するという研究でロボティクス分野、脳研究において先導的な役割を果たしてきた。本プロジェクトの研究構想の基盤、すなわち従来型の分析的手法とは全く異なる構成論的アプローチは、浅田総括のこれまでの研究に裏打ちされた、浅田総括ならではの独創的なものとして評価できる。

表層的な機能実現としてのロボティクスからの脱却、そして脳科学に代表される生命科学との連携から運動・認知・コミュニケーションの創発過程を構成的に理解し、その先に広がる適応・発達型ロボット実現に向けたヒューマノイドのハード・ソフト両面の革新的展開に切り込む本研究構想は、ERATO で推進するに相応しい、先駆的かつ挑戦的な構想として高く評価されるべきものである。また、本プロジェクトにより、高度な社会的営みをする人間の発達の基礎的プロセス、その神経的基盤の理解深化が見込まれる。戦略目標「教育における課題を踏まえた人の生涯にわたる学習メカニズムの脳科学などによる解明」に資するものとして、本プロジェクトに大きな期待が寄せられることに異論を挟む余地は無い。

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

本プロジェクトは、身体的共創知能、対人共創知能、社会的共創知能及び共創知能機構グループの4グループから成る。研究拠点は、浅田総括の本務先（大阪大学大学院工学研究科）から至近の大阪大学フロンティア研究センターに置かれ、ここでは主として身体的共創知能及び社会的共創知能グループが研究を推進している。対人共創知能と共創知能機構の各グループは、それぞれのグループリーダーの本務先が東京大学及び京都大学であることから、東京大学工学部内及び京都市内の貸しビルに研究実施場所が置かれている。研究実施場所が分散することによる弊害が懸念されるところではあったが、浅田総括のリーダーシップのもと、研究スタッフ一同が会してのミーティング

を定期的に関わりあうなどして互いに進捗状況の確認しあい、また若手研究者が所属機関に縛られず、同一研究に携わるなど、課題共有を意識的に行っている様子が窺える。

研究スタッフの顔ぶれを見ると、各グループに対応する分野における、気鋭の研究者をリーダーに配し、そのもとに認知発達、認知情報論、ロボティクス、神経心理、計算神経科学、人工知能分野出身の若手研究者、外国人研究者が結集し、まさにERATOが意図するヘテロな研究者集団が出来上がっている。それぞれの出身分野にこだわらず、若手研究者が互いに切磋琢磨して研究を行うこの体制は、日本では少なく、それぞれの分野で先駆的な成果を挙げてきたグループリーダー達にも、良い刺激となっている。とは言え、本プロジェクトの研究対象は多岐に渡っている。自前の研究者だけでは必ずしもカバーしきれない部分については、いたずらに人員を増やすのではなく、外部機関との共同研究によって補っている。こうしたユニークかつ効果的な研究の枠組みを敷いたことが、次章のとおり当初の予想を超えた目覚ましい成果輩出の礎となっていることは言うまでもない。研究プロジェクトの設定および運営に関しては、特に優れた的確かつ効果的であると高く評価したい。

次に、研究活動の状況を概観する。中間評価の時点では、各グループにおいて要素的・基盤的な研究が、「発達」という重要な知的機能獲得のプロセスに注目した形で行われ、それぞれが対象とする発達段階に対応したプラットフォームが構築されている。身体的共創知能グループでは、固いセンサーアクチュエータ系では実現が困難であった生物的な振る舞いをやわらかい皮膚やしなやかな人工筋肉により実現するための運動創発構造の解明が進んだ。対人共創知能グループは、母胎内での感覚運動学習とそれに連なる誕生後の行動を胎児シミュレーションにおいて成功させ、人の運動発達に新たな理解をもたらしている。社会的共創知能グループは、認知発達ロボット研究用プラットフォーム、即ちCB2の開発と、それによる世界最初の人間-ロボット間の物理的相互作用の考察で大きなインパクトを与えた。共創知能機構グループは脳機能イメージング研究と発達障害のモデル化を進め、認知発達の基本課題である物体操作に関する運動表象、空間知覚を司る脳部位を明示した他、模倣から動作理解、言語獲得へと連なる発達過程の理解を深めている。

これらの成果はいずれも内外から高い評価を得ている。該当する分野の代表的国際誌へコンスタントに論文が掲載されている点、招待講演の多さ、主催するシンポジウムの盛況ぶりが何よりの証拠であろう。また、著書やメディアを使った研究成果の広報、啓蒙活動に注力している点も高く評価すべきである。

以上のように、本プロジェクトは、斬新かつ挑戦的な研究構想のもと、ERATOならではの研究スキームを整え、世界に誇ることができる高水準の研究を順調に進めているものと判断する。残る2年間においても、共創知能機構グループと他の3グループの有機的な連携が強化されることによって、更なる飛躍が期待できる。

[研究プロジェクトの設定および運営と今後の見込]

a+ (特に優れた的確かつ効果的である)

[研究活動の状況]

a+ (特筆して望ましい研究展開を示しており、今後にもさらに期待できる)

2. 研究成果の現状と今後の見込

2-1. 身体的共創知能グループ

身体的共創知能グループは、身体と環境の相互作用を考慮しなければ生まれにくい、歩行・走行・跳躍などの運動スキルを実現し、そこに介在する知能発現の方法を明らかにすることを主眼に研究を展開し、秀逸な成果を蓄積していることが認められる。

運動機能学の知見に基づき、空気圧人工筋を人間に類似した筋配置構造のヒューマノイドを開発し、これまで定性的な説明に留まっていた走行、跳躍など人間の動的運動制御を実験的に実証したことは高く評価できる。人工筋を拮抗駆動するとともに、Active、Compliant、Passiveなどのモードを作り出すことによって、柔軟かつ適応的な歩行が実現できることを構成的に示したことは、学術的に大きな意義があるだけでなく、歩行ロボットの実用化を進める上でも重要な知見である。また、バイオメタリックなアプローチで、高性能な空気圧アクチュエータを活用してさまざまな歩行プラットフォームを開発している点も、新しいロボットアクチュエーションの可能性を示すものとして評価に値する。

本グループの成果について、ロボットの実用化・産業化の観点からも言及しておきたい。今後、ロボットが家庭内に導入され普及する際には、安全性が高くかつ、少々乱暴に扱っても壊れない堅牢性を兼ね備えたロボットであることが求められる。本グループによる、応答性という課題の解決、空気圧人工筋の筋骨格構造によるプラットフォームの確立というアプローチによって実現されつつある、身体性を重視した歩行の創発は、従来の精緻なモデルと制御則による歩行制御という枠組みから脱し、安全で堅牢なロボット開発に対して一つの解を与えるという点で非常に意義深いものである。

かように柔軟で適応的な歩行が実現されつつある一方で、重心保持と足踏みについては、それが発達における歩様の獲得と呼べるのか、必ずしも明確ではない部分がある。発達における歩様の獲得プロセス、環境との相互作用によって適応的な歩行が創造される身体性の原理や制御の原理が解明されることを期待したい。

2-2. 対人的共創知能グループ

対人的共創知能グループは、身体性やその情報構造を発見・獲得・利用する機構に関し、身体的行動から対人コミュニケーションまでを発達的につなぐチャレンジングな研究に取り組んでいる。これまで胎児・新生児の筋骨格・神経系のシミュレーションモデルやカオス結合系による運動学習手法の開発、全身触覚皮膚や干渉型腱駆動機構などを含む全身感覚運動学習ヒューマノイドの開発、抱っこ実験を展開している。

特に、「身体が脳を創る」という従来とは全く逆の発想で、カオス結合系に基づく動作創発モデルを確立しことは高く評価したい。胎児の感覚運動学習が脳神経系—身体骨格系—母胎の相互作用により培われていくことを示し、生誕後の環境でハイハイや寝返りなどの動作を創発させたこの胎児・新生児シミュレータは、今後の新しい知能の創発仮説を検証するプラットフォームになると期待される。実寸・実重量の全身感覚運動学習ヒューマノイド（赤ちゃんロボット）の開発も注目される。ここで開発された要素技術は、ロボット研究を進める上での有用性・汎用性が高く、その波及効果も大きいと考える。この赤ちゃんロボットを用いて、ロコモーションを実現する脳内回路の解明ができれば、科学的に相当の成果となることが予想され、今後の進展が期待される。また、抱っこ実験などの他者とのやりとりの研究に関しては、体性感覚に注目している点が重要であ

る。触覚センサスーツの開発やそれを用いた体性感覚入力の計測などは、触覚を通じた他者との相互作用と発達知能の獲得の関係を解明する上で有効かつ重要な研究成果として高く評価できる。

身体性が知能創発や発達に大きく寄与するという独創的な発想から引き出されたこれらの成果が秀逸なものであるがゆえに、敢えて次の点を指摘しておきたい。プロジェクトとしてより大きな成果をあげるためには、研究の出口としてサイエンスに重きをおくのか、産業化を視野に入れた工学的部分を前面に出すのか、今後2年間はいずれかの方向性を明確にした上で研究を進める必要がある。ヒトの発達学習機能の理解を目的とするのであれば、生理学的・心理学的研究分野とのより密な連携が必要であろう。全体として、ロボット発達学習機能の実現を目的とするのであれば、そこで求められる要求仕様と、これまでの手法に対する優位性を明示する必要がある。

2-3. 社会的共創知能グループ

社会的共創知能グループでは、身体的、対面的、社会的相互作用を通じて社会的共創知能の解明迫るという挑戦的な課題に取り組んでいる。この課題を達成する一環としてCB2という、社会発達を理解するための新規な全身プラットフォームが開発された。開発にあたっては、その機構、皮膚センサ、制御システムなどにおいて、先端的な技術開発が行われた。それらが組み込まれたCB2は、従来の固い外骨格をもつヒューマノイドとは一線を画すものであり、我が国のロボット開発研究においてベンチマーク的成果に位置づけられるものとして評価する。

このCB2を用いた他者との物理的な相互作用が社会的行動の創発につながることを検証する研究も極めて興味深い。人の補助によりCB2を起き上がらせる実験では、相互作用を大局的なパラメータで可視化し、補助の成功、失敗を識別した。このデモンストレーションにより、他者の介助を借りながら立ち上がる動作などを学習し発達するロボットの実現を示した。さらに、視覚・聴覚・触覚情報に基づいた反応行動を見せるデモンストレーションにより、コミュニケーション発達の背景にある応答的振る舞いに係るタイミング調整の発達メカニズムにまで言及しうることを示したことは高く評価したい。CB2により再現性のある認知心理実験が可能となった点は、脳機能をfMRIで計測できるようになったのと同様のインパクトがある。このインパクトの大きさに、すでにアメリカは気付いており、CB2を用いた認知プロジェクトが始まる。この事実は、本グループの研究成果の意義を雄弁に物語っている。

本グループでは、この他に、アンドロイドロボットを用いた人間らしさの評価、対面相互作用による社会行動学習など、非常に多岐にわたる研究を展開し、いずれも新規性に富んだ質の高い成果を得ている。ただ、幅広い研究が行われている反面、研究が羅列的・事例的な感がある。今後の研究を展開する上では、社会的共創知能の本質とは何か、それを明らかにする、あるいはそれを実現する上で、各研究がどのように位置づけられるのかを整理し、対人的共創知能グループおよび共創知能機構グループとのシナジーが図られると、さらなる高みへ向けた飛躍が見られるであろう。

2-4. 共創知能機構グループ

共創知能機構グループでは、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動作の認知・模倣が可能になるという考えに基づき、ヒトの発達過程に関するイメージ化とメンタルシミュレーションに関する研究に取り組んでいる。研究方法の一つとして、神経生理学及び発達性精神・神経疾患の病態を参照し、模倣メカニズムーコミュニケーション機能の関係を探ることを実践している点は、本グループの特徴として見逃せない。

運動の予測制御機構を構成する脳内ネットワークのモデルは、ヒトの発達過程を説明する上で、重要な成果であると言える。また、行為階層と他者行為理解に関しても、脳のイメージングなどに基づき、重要な知見が提示されている。特に、左頭頂葉が自己中心、右頭頂葉が環境中心（他者理解）に関与していること、Williams 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であること、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などを明らかにした点は、科学的に大きな成果であり秀逸なものである。また、言語獲得と言語理解の脳モデルについては、ここから新しい“対話”能力を持つロボットの実現が期待されるという点で高く評価されるべきものであると同時に、今後の展開を注視していきたい。

本グループの研究は、ロボット系の研究が必要とする生理学的基盤を提供するものであり、非常に重要な役割を負っている。今後は、得られた知見を他のグループへフィードバックし、それぞれのプラットフォームへの実装、ロボット系の研究が求める生理学的なデータやモデルへの対応、あるいはロボット系の研究から得られた成果をどう生理学的研究に活かしていくのかという点を強く意識しながら研究を進めることを希望する。

以上、4つのグループの研究成果及び課題を含めて今後の見込みについて述べてきた。個々の研究成果は世界を先導するインパクトの高いものである。敢えて指摘した課題を考慮に入れ、各グループ間のシナジーが一層深まることで、本プロジェクトの最終到達点はより高くなるであろうことは想像に難くない。評価委員は、これまでの成果は秀逸であり、今後にも期待が持てるという意見で一致した。

〔研究成果の現状と今後の見込〕 a+（成果として秀逸であり、今後にもさらに期待できる）

3. 総合所見

本プロジェクトは、ヒューマノイドを作りながら人間を理解する、いわゆる構成論的にヒトの知能創発を理解することを目指している。単なる既存研究の延長ではない、新しい視点を盛り込んだ挑戦的なものである。工学的な視点からは、自律型ロボットを実現し産業化する際に直面するであろう、家庭環境などでどのように適応していけるか、という課題に対して、発達のメカニズムを解明し、その本質を実現することで解決する、というアプローチをとったものと言える。

これまでの3年弱の期間を通し各グループの研究活動は順調に行われ、個々の研究においては、秀逸な成果が得られている。特に、ロボットのプラットフォーム開発において、先端的技術の開発、高度な機能の実現など、優れた成果が得られており、人工システムにおける知の設計論に迫っている。一方で、ヒトの発達における知的機能の獲得プロセスの知見が、人工システムにおける知の設計へと必ずしもつながっていない部分がある。今後は、目標設定の具体化・絞込み、チーム間の有機的連携を進め、問題の解消が図られることを希望する。

従来の制御方法から脱却し、環境とのインタラクションから、身体性により学習する制御は、ロボット制御に大きな変革をもたらすことが期待される。提案されているプラットフォームは fMRI と並び、今後、人間を科学するための重要な要素となる。前述の通り、米国はすでにその可能性に気づいており、追従の準備を整えようとしている。これは、喜ばしいことであると同時に、先行される可能性もあることを十分認識すべきである。浅田総括をはじめプロジェクトには、現在の先行性を維持できるよう引き続き研究の手綱を緩めることなく、力強く歩みを進めて欲しい。同時に、

ERATO の事業主体としての JST には、世界の動向を見極め、必要に応じて柔軟かつ積極的な支援を行うことが、我が国の強みであるロボット研究開発の強化、さらには、本プロジェクトに端を発する科学と工学が融合した日本発ヒューマノイドサイエンスの展開に不可欠であることを提言したい。

以上、全体の研究テーマ設定、運営状況、研究活動およびその成果を総合的に判断し、評価委員会は本研究プロジェクトの研究実施状況は卓越した研究水準にあると結論する。

〔総合評価〕 **A+** （卓越した研究水準にある）