

## ICORP「計算脳プロジェクト」 追跡評価報告書

### 総合所見

ヒューマノイドロボットの研究は、日本が一貫して世界を先導して推進してきた。その中で ERATO「川人学習動態脳プロジェクト」は、脳を創ることで脳を知るという脳科学の新しい方法論を用いて、脳に学ぶ制御・学習方式をロボットに実装するとともに、これをテストベッドとして脳科学の推進に資するというこれまでにない研究方向を採用し、多大な成果を収めた。

国際共同研究(ICORP)「計算脳プロジェクト」(2003-2008)はこれをさらに発展させるべく、認知科学、神経科学、心理学の観点からのヒトの行動理解やヒューマノイドの運動学習計算理論の開発を目指す日本と、計算理論のヒューマノイドロボットへの適用に関する工学的研究を推進する米国の共同プロジェクトとして実施された。これにより、計算脳の構築とそれを搭載したヒューマノイドロボットの運動・姿勢制御、脳情報との通信・フィードバックによりヒューマノイドロボットが見まね学習を行う計算理論の開発、さらにこの計算理論をヒューマノイドロボットの運動制御学習やなめらかな動きの見まね動作として出力するロボティクス研究について多大な研究成果が得られた。日米双方の専門分野のチームが実質的に連携し、互いにフィードバックを行うことで、両分野の発展をもたらし、国際共同研究がうまく機能して成功したプロジェクトであるといえる。

本プロジェクトは、認知科学、神経科学、心理学、情報科学、ロボット工学の幅広い学際領域に、基礎科学・応用技術の両面で大なる発展をもたらし、当該分野の研究を活気づけた。例えば、脳や心の理解とヒューマノイドロボットのもつ可能性への期待を飛躍的に前進させ、また BMI (Brain-Machine Interface) を基礎とする脳にかかわる科学・技術の新しいパラダイムを確立した。さらに、BMI 技術は、医療・福祉分野をはじめとする、直接社会に貢献するものとして発展を遂げて来ており、実用化への道も着実に進められている。

プロジェクトに携わった研究者は、日米ともに、当該分野の教授・准教授、研究室長などのテニユアを得てそれぞれ研究リーダーとして活躍している。本プロジェクトを継承して発足した多くの研究プロジェクトへの若手研究者の参画を促したことも合わせて、人材育成の観点からも成功を納めたと評価される。プロジェクトの研究成果と、これを継承して推進されている研究の発展により、今後も、科学技術ならびに社会・経済に貢献する多くの研究成果が得られることが期待される。

本研究はヒューマノイドロボットと脳科学を融合する新しい研究分野を開拓し、研究者たちのその後の素晴らしい活躍と相まって、研究の新しい潮流を世界的に生み出すことに成功しており、非常に高く評価できる。

### 1. 研究成果の発展状況や活用状況

#### 1.1 プロジェクト終了後の研究の継続、発展

本プロジェクトの成果は、数々の後続大型プロジェクトの発足をもたらした。主要なも

のとして、BMI の開発を課題とする研究開発拠点整備事業と個人研究事業の 2 領域が文部科学省・脳科学研究戦略推進プログラム（脳プロ、2008-2013）として ATR((株)国際電気通信基礎技術研究所)を本拠に発足した。2008-2015 年には川人を研究総括とするさきがけ研究領域「脳情報の解読と制御」が実施されるとともに、総務省の「脳の仕組みを活かしたイノベーション創成型研究開発」(2011-2014)など、基礎研究から産業利用を指向した応用技術までの、幅広い多様な研究プロジェクトへと発展した。これらの後継プロジェクトにより、当該分野は大学・公的研究所、民間企業の多くの研究者を巻き込んだ広がりを見せ、研究開発が活発に推進されている。

具体的には、非侵襲脳計測による脳情報の解読において、Decoded Neurofeedback (DecNef)と名付けられた BMI の新しい手法が提案された。これにより視覚などの脳情報を解読して、治療やリハビリに応用する新しい医療応用への道が開けた。脳情報デコーディング技術では、大脳視覚野の fMRI (functional magnetic resonance imaging) のデータから画像を再構成することに成功し、夢の内容を解読することに繋がった。これらはインパクトの大きい学術的成果である。脳で制御する外骨格ロボットでは、小型軽量の空気電動ハイブリッドアクチュエータを開発し、BMI リハビリテーションに向けた外骨格型動作介助装置に応用した。BMI が拓く重度上肢麻痺治療の新たな可能性としては、これまで不可能であった完全麻痺筋のリハビリを BMI によって導入治療を行うことで、最終的に筋活動の誘発が可能であることを示した。

以上を総括すれば、これらのプロジェクト期間中に得られた知見は統合されて、計測機器・センシング技術・DecNef 法など実用可能なレベルのエンジニアリングへ繋がっている。この成果は、産業化を目指した医学・民生応用への研究へと波及しているのみならず、医療福祉分野にまで波及して、これまでの装置では適応が困難であった脊髄損傷や筋萎縮性側索硬化症の代償手段、脳卒中による重度麻痺の治療法として応用が試みられており、外骨格型ロボットの開発も含めて、高齢者や障害者の治療や支援に役立つことが期待できる。

## 1.2 相手国チームとの交流の効果

本プロジェクトでは、日本側が認知科学や神経科学、心理学の観点から脳情報の解読とそのロボティクスへの応用を行い、米国側は「計算脳」のヒューマノイドロボットへの搭載と運動・姿勢制御への工学的応用を担当し、異なる学際領域の連携による国際的・学際的な共同研究が実施された。

両者がタイアップすることで、脳情報から構築した計算理論の妥当性をヒューマノイドロボットの動きとして評価することが可能となる点や、計算理論をヒューマノイドロボットに搭載するために必要な工学的な技術の発展をもたらした点、また、逆にヒューマノイドロボットに搭載するにあたって計算理論に求められるものが明確になった点など、両者の融合と相互のフィードバックにより研究成果が得られるという、理想的な共同研究の形態であったとみることができる。また、研究拠点間の物理的な距離を活かし、サルコ歩行の位相情報を脳から抽出し、この情報をデコード（解読）してインターネットを介して日本側に送信し、日本側のヒューマノイドロボットをこの位相と同期させて歩行させること

に成功した。さらに、ロボットの視覚センサーからの情報をサルにみせるという、ネットワーク型の BMI の実施にも成功している。

本プロジェクトの研究成果はマスメディアにも注目され、日米両国の新聞、TV、雑誌・業界紙など多くにとりあげられた。たとえば、2014 年 FIFA ワールドカップがブラジルで開催されたが、この開会式で脊髄損傷者が BMI と外骨格型ロボットを用いてキックオフのデモストレーションを行った。これは ICORP 計算脳プロジェクト米国側メンバーであった M. Nicoletti 教授によるもので、世界のサッカーファンや一般市民が注目し、社会的にも話題を集めた。

日本・米国ともに若者の理科離れは社会の深刻な問題であるが、若者の科学技術への関心を増大させたことは大きな功績である。本研究の担当者たちは現在世界各国のロボット工学、ロボット産業の中心的なポジションで活躍していて、米国からの評価も高い。これは両者のタイアップが実質的に有効に働いたことを意味する。

## 2. 研究成果から生み出された科学技術的、社会的及び経済的な効果・効用及び波及効果

### 2.1 科学技術の進歩への貢献

ロボット技術、脳科学の双方を融合した研究分野を創り出すとともに、ロボット技術、脳科学の双方に新しい潮流を生み出した。具体的にはヒューマノイドロボットのさらなる発展と人と協調できるロボットの開発に大きく貢献するとともに、脳の情報表現とその解読を通じて脳の情報処理の原理に迫る脳科学研究の流れを加速している。工学的な観点からは、運動・姿勢制御による二足歩行ロボットの実現や、コンピュータビジョンと運動制御の連動により、ヒューマノイドロボットが投げられたボールを自分の目で認識し、タイミングを予測してバッティングすることに成功するなど、よりヒトに近い高精度な動きを行うロボットを実現し、ロボティクス分野に大きな波及効果をもたらした。福祉と医療の観点からは、自律制御機能が組み込まれた電動車椅子に搭乗した利用者が BMI によって住宅内での地点間を移動し家電の制御を行うことが可能であることを実証した。また、BMI 手法を活用することにより、脳活動を実験的に制御し、精神・神経疾患の革新的な治療法に発展させる可能性を示した。特に、脳情報を解読して、その結果を被験者にリアルタイムでフィードバックすることで、脳に特定の状態を誘起させ特定の認知・行動・学習を生じさせ得ることを示した DecNef 法の開発が素晴らしい。

さらには、脳情報工学の行き過ぎを懸念する観点から、神経倫理の考察まで進めている点が評価できる。装置安全性は動物で確認され、また、臨床的な効果を臨床現場と連携して確認するまでに至っている。これは、実用的な産業寄与を目指していることの表れであり、波及効果としての成功事例といえよう。今後の展開として、育ちつつある新技術が離散しないように、再統合し継続できる形で新規のプログラムが発展することが望まれる。

### 2.2 応用に向けての発展

脳情報の解読およびそのフィードバックは脳の情報原理の解明に役に立つだけではなくて、具体的な応用を持っている。医療の分野において、人工義手や義足の制御は言うに及

ばず、脳梗塞などの脳疾患の上肢麻痺治療のリハビリに脳情報のフィードバックが大変効果があることが見いだされ、臨床応用まで進んでいる。これはさらに自閉症などの精神疾患の治療にも応用されようとしており、これに伴う脳情報解読装置、リハビリ装置などが産業応用として新たに確立されようとしている。さらには、総務省委託研究「脳の仕組みを活かしたイノベーション創成型研究開発(高精度脳情報センシング技術・脳情報伝送技術、実時間脳情報抽出・解読技術及び脳情報解読に基づく生活支援機器制御技術)」の中でネットワーク型 BMI として高齢者や軽度要介護者の遠隔からの自立支援への応用が進められている。これを実現すれば、自宅や診療所にいながら、膨大なデータベースや大型コンピュータを用いた BMI 技術を楽しむようになることが期待される。わが国の人口構造が世界の人口問題を先取りしているといわれる中で、将来の地球規模の高齢者社会を背景にした産業革命が起きるとすると、BMI がその基盤技術になる可能性が高い。

今後の課題として、本技術が広く普及するにはさらなる大型の研究プロジェクトが必要である。脳・神経科学の大きな問題の一つに個体差があって、個々の例で明白な判断を下すには時間と労力を要する。この課題をクリアして、たとえば世界的に普及できる臨床応用まで持っていくには、どうしても緻密に設計された大規模な臨床試験を並行して実施しなければならない。

### 2.3 参加研究者の活動状況

本プロジェクトに参加した若手研究者は、日米ともに、当該分野の教授・准教授、研究室長などのテニユアを得てそれぞれ研究リーダーとして活躍している。このことは、人材育成の観点からも本プロジェクトが高い成果を挙げたことを示している。また、研究総括等のシニア研究者は、当該領域を率いるトップのリーダーとして活躍しており、本プロジェクト終了から現在に至るまで当該分野が大きく発展してきていることは、本プロジェクトの成果が若手研究者の知的好奇心を触発し、当該分野に引き込む魅力あるものであったことを示している。

具体的に述べれば、CMU(Carnegie Mellon University)の Christopher Atkeson 教授、Jessica Hodgins 教授は CMU でそれぞれ LAB の責任者となってヒューマノイドロボット研究や、アニメーション・エンターテインメント研究での米国での第一人者となっている。また、USC (University of Southern California) の Stephan Schaal 教授は脳科学とロボットの代表的な研究者となり、母国ドイツにおいても重要な Max Planck 研究所の責任者を兼任している。Gordon Chen 教授は現在 Technical University Munich の教授としてヒューマノイドロボット研究のヨーロッパでの中心的な研究者になっている。Ales Ude 教授もスロベニアの代表的な研究所である Jozef Stefan Institute の部門長を務めている。玄相昊准教授は立命館大学理工学部で勤務して油圧装置を用いたヒューマノイドロボット研究で活躍し、世界で注目されている。また、森本淳室長は IEEE(The Institute of Electrical and Electronics Engineers)のテクニカル・コミッティー等において活躍し、ヒューマノイドロボットやリハビリテーションなどで招待講演なども引き受けている。総じて、大変良い状況にあると考えられる。

### 3. その他

1)一連の脳を知るプロジェクトの波及効果の1つとして、精神腫瘍学などに関連する、心と身体の内部状態との相関関係についての科学的解明への応用が期待される。例えば、瞑想や気功など、またがんを弱いものと認識し、がんに打ち勝つイメージトレーニングを行うことにより、がん患者の精神状態が安定したり、痛みが軽減したり、さらにはがんを治癒する後押しをしたりする可能性があると言われている。こうした心の働きが身体内部の状態にもたらす影響について、脳科学、心理学や免疫学、情報工学などの多様な学際領域の共同研究によって科学的に解明することができれば、今後、日本では一生のうち2人に1人が患うとされるがんのケアとキュアへの貢献が期待される。

2)科学政策主導型の研究制度について、推薦に基づく選考でスタートした ERATO が、その推薦によってさらに ICORP に採択されるとしたら、それを純粋な研究成果ドリブンの展開研究としてみて追跡することには、やや制度的な無理がある。科学技術政策が主導する研究の展開の追跡評価については、研究内容の追跡評価だけでなく研究政策の立案についての追跡評価も同時並行して行いこれらを総合的に評価することが必要である。

ロボット技術から見れば、国際的にも脳科学のような先端科学と結びついた技術を展開することはきわめて重要である。その背景にはロボット技術を推進する科学政策がほとんど見られないことがある。科学技術政策の中で、ロボット技術を進展させる研究課題を見る目を政策立案者側が持つことが望まれる。

3)最近では企業においてもグローバル化が進み、雇用する人員の多くが外国人になってきた。また、国外にも研究拠点を設けるようになってきており、国境を越えてイノベーションを生み出すことがミッションになりつつある。そういった観点でも、グローバル・ニーズを捉えた国際共同研究はますます強化することが望まれており、本 ICORP で進めた国際共同研究は非常に重要な役割を果たしたと言える。

その中で、国際競争力の観点からは外国出願が最も重要であるため、国家プロジェクトで生み出された産業に寄与する知財の確保が不可欠である。また、脳・神経科学の最大の出口はヘルスケアと教育であり、基礎から生まれた新技術や新概念を社会実装するために、グローバルな大規模臨床試験を実施できるような研究プログラムがあると、基礎科学者・工学者の成果がいち早く普及につながる。基礎の科学技術から生まれた実用技術の普及が数多く生み出されるよう、ICORP 後のプログラムデザインを要望する。

以上