

ICORP 計算脳プロジェクト事後評価報告書

【研究総括】 川人 光男 (株式会社国際電気通信基礎技術研究所 脳情報研究所
／所長・フェロー)

Christopher G. Atkeson (米国・カーネギーメロン大学 (CMU) ロボ
ティクス研究所／教授)

【評価委員】 (あいうえお順)

田中 啓治 (委員長：理化学研究所能科学総合研究センター
／センター長代行)

中村 仁彦 (東京大学大学院情報理工学系研究科／教授)

蜂須賀 研二 (産業医科大学リハビリテーション医学講座／教授)

牧 敦 (日立製作所基礎研究所／主管研究員)

評価の概要

ICORP 計算脳プロジェクト (2004 年 1 月発足) は、脳の計算理論のモデル化を
通して人間の運動スキル、情報処理、認知能力のメカニズムの理解を目指した研究に
取り組んだ。ICORP 計算脳プロジェクトの研究総括 (以下、総括と略す) である川人
光男博士は、従来の機械制御の立場だけに立ったロボット開発の限界を超えるため、
「脳を創ることにより、脳を理解する」ことを本プロジェクトの研究主題として位置
づけた。

脳に学んでロボットを進化させようという動きは世界中で見られるが、本プロジ
ェクトの研究はその先鞭であるとともに、今も最先端でリードし続けている。今回の
プロジェクトの最大の特徴は、本格的な人間等身大のヒューマノイドロボットである
CBi を作成し、これに歩行運動や野球バットを持たせてヒッティングを行なわせるな
どして、そのために必要なアルゴリズムの開発を行なったことである。中でも、サル
脳活動から歩行に関連した位相情報を抽出し、中枢パターン生成器によるヒューマ
ノイドロボット歩行の二足歩行を実現させたのは特記すべき成果である。

本プロジェクトでは、Brain Machine Interface (BMI)、学習理論、柔軟で巧みな
手指、転倒回避戦略など、リハビリテーション医療の現場で直ぐに役立つ可能性のある
研究成果が生み出され、近い将来に大きな社会的価値を生み出すことが期待できる。
臨床現場と共同研究を進めることにより臨床での問題を理解しながら進めたことも良
い影響を与えたものと考えられる。ロボットの学習に関する興味深い成果も目立った。
本プロジェクトでは、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等による解明」に資する十分な成果が得られたと評価される。

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

本プロジェクトでは、脳の計算理論のモデル化を通して人間の運動スキル、情報処理、認知能力のメカニズムの理解を目指し、脳の計算理論を計算機シミュレーションやヒューマノイドロボティクスに適用し、ヒトの運動スキルの情報処理および学習・認知のメカニズムの理解に取り組んだ。本プロジェクトの特徴は、「ヒト脳の情報処理を理解する」ということと、「それをもとにした役に立つ機械（ヒューマノイドロボット）を開発する」ということを、研究課題の本流に取り込み、同時に検証に適したロボットを開発し、そのロボットによる実証に成功した点にある。ロボット開発のみを取り出しても高い評価が得られるものだが、開発と組み合わせることにより脳の情報処理を理解し、実証しようとする本プロジェクトの方法論は、総括が「脳の計算論」の研究で編み出した独自の方法論であり、「脳の理解」という現代科学のひとつの大目標に対する独特の立場である。研究によって生み出される成果は学術的な「理解」とどまらず、研究の過程で生まれるハードウェア、ソフトウェア、システムなどのテクノロジーとして社会に還元される可能性やリハビリテーション医療等に還元される可能性をも併せもつ。このように、本プロジェクトは、ロボティクス、情報科学、脳科学の本質的な融合によって、科学技術の新たな潮流を生み出すものであり、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等による解明」に資する ICORP に相応しいプロジェクトであったと言える。

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、株式会社国際電気通信基礎技術研究所（ATR）に日本側実施場所を置き、海外の研究機関として、米国 Carnegie Mellon University（CMU）、Robotics Institute では Christopher Atkeson 教授ら 3 名の教員が参加し、それぞれの研究所から多数の異なる分野の専門家が参加して研究体制を構築し、5 年間で費やして 3 領域に渡る研究を創造的に融合的に実施し運営した。

本プロジェクトは、(1)歩行と脳、(2)器用さと脳、(3)知覚と脳、からなり、脳の計算理論のモデル化により、学習や認知などの脳機能や運動制御の解明に取り組み、これらの研究成果に基づきながらヒューマノイドロボット CB-i に機能を実装して検証しながら、開発を進めた。

歩行に関しては、Central Pattern Generator を用いた二足歩行、運動制御、学習、全身運動制御、歩行制御に関する有用な知見が得られた。器用さに関しては、Anterior intraparietal area の視覚運動のモデル化を行い、視覚的学習の研究に発展させ、さらに、ロボットハンドの制御技術を組み合わせて、柔軟で巧みな運動を実現させた。知覚に

関しては、ヒューマノイドロボットの視覚認識を高め、ヒトに類似した視覚情報処理メカニズムを持つシステム構築を行った。これらの研究は、ヒューマノイドロボットを用いた実証的研究により、検証された。

本プロジェクトの研究の中で、サルの脳情報を読み取り、遠隔地にいるロボットを制御する研究がある。BMI 技術により、サルの脳活動から歩行に関連した位相情報を抽出して推定し、異なる場所に設置したヒューマノイドロボットの歩行制御を実現させたのは特記すべき成果である。Brain Machine Interface 技術とロボット歩行制御技術を融合させて、サルの運動に関わる情報の読み取りに成功すると共に、その情報を利用してロボットを制御した点、及び遠隔制御の可能性を示した点は、高く評価されるべきである。将来、歩行障害者の歩行機能再建の可能性も示唆される。また、学習理論、柔軟で巧みな手指機能制御、転倒回避戦略の分析やロボット制御への応用などは、リハビリテーション医療の現場で直ぐに役立つ重要な情報を含んでおり、今後の社会的展開が大いに期待できる。

1-3. 相手国機関との研究交流実施状況

本プロジェクトの研究では、相手国側の研究総括を務める Christopher Atkeson 教授の強みである運動学習制御や歩行の学習、ロボットハンドの制御等が、重要な役割を果たした。これまでの実績として、共催のワークショップの開催や、共同研究による人材の交流がなされており、両研究グループの意識の共有に配慮されている。共著の論文や書籍も出されており、加えて ICORP 事業としての「共同」という枠組みが、成果として目に見える形で示されていることも評価できる。

〔研究プロジェクトの設定および運営〕 a+ (特に優れ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活動・展開を示した)

2. 研究成果の現状

2-1. 歩行と脳 : Locomotion and Brain

歩行は、神経生理学的に見ると、脊髄、脳幹、大脳基底核、小脳、大脳皮質など各運動関連システムが関与していることが知られている。総括の報告では、神経生理学的研究との学際的研究の方向を今後考えているとのことであったが、特に大脳皮質の関与は、神経生理学でも未だ明確にはなっておらず、生体の歩行メカニズムについて脳科学へのフィードバックが大いに期待される。

本テーマでは、中枢パターン生成器 (Central Pattern Generator, CPG) を用いた歩行制御システムに関して、理論的研究および CB-i その他ロボットで歩行検証を行った。中枢パターン生成器を使って歩行運動を制御するという点において、脳に学んだロボット制御アルゴリズム開発を目指し、大きく前進した。既存の制御技術や階層性なども取り入れ、統合的な開発を行なっているのは極めて適当である。運動特徴の低次元化を行ない、確率的なダイナミクスの考えを導入するなど、優れた発想が複数生まれている。ここでは単に位置パターンを与えるのではなく、力そのものを制御することに挑戦し、ダイナミクス性の高い力の制御に成功した。Re-balance を人間の大人の大きさのロボットで実現したのは大きな前進である。学習プロセスに model-based の方法論を取入れ、現在流行している data-based の研究とは一線を画しており、目標設定として難易度が高い。ヒューマノイド型のロボット開発は、単に人に似た動作を有するロボット開発が最終ゴールでは無いとの意欲的な意思表示でもある。報酬最大化のための特徴抽出など、脳本来の根源的な機能を実装している点も評価できる。

米国で侵襲計測しているサルの大脳の神経細胞活動記録をリアルタイムで日本に送り、中枢パターン生成器によるヒューマノイドロボットの二足歩行を実現させたのは特記すべき成果であり、世界に大きなインパクトを与えた。遠隔制御にもかかわらず、歩行制御の遅れが数分の1秒以下に収まった点も興味深い。変分ベイズ推定に基づいた脳活動からの位相情報抽出に成功しており、レベルは高い。インターネットを介したロボット制御や動物とロボットのソフトな結合による BMI、リハビリテーションなどへの応用が期待される。

リハビリテーション医学では、ヒトの重度の歩行障害患者には myopathy や neuropathy があり、筋の活動電位をトリガーとすることは困難とされているので、脳活動から歩行制御に関する情報を抽出し歩行制御する技術は大変重要である。これらの成果は、リハビリテーション医療の直面している様々な問題を解決する可能性を秘めており、さらに安定性、再現性に優れ、より簡便な方法へと発展して臨床応用への道が開けることを期待する。

2-2 器用さと脳 : Dexterity and Neural Computation in Brain

本研究では、実験心理学、認知科学や神経生理学のデータを基に、証明可能な仮説を導出し、これによって脳研究にフィードバックすると共にヒューマノイドロボットの開発に重要な技術を生み出すことを目指した。本プロジェクト全体にわたる重要なキーコンセプトであり、独創的なテーマであるといえる。実際、従来は脳科学の成果が計算論に使われる状況であったが、このグループの現在までの内部モデルについての研究成果・アイデアは、逆に脳科学をリードするようになってきている。「器用さと脳」に関する研究テーマは本プロジェクトの中でも、より脳科学に接近している部分である。この研究テーマでは、特にその成果が顕著にみられている。本テーマでは、認知科学や心理学でみられるいくつかのキーワード、すなわちアフォーダンス（把握対象の空間的特徴）、模倣、身体図式などを対象に研究が行われた。

Affordance 学習では、Anterior intraparietal area (AIP)の視覚運動に関与するニューロンが把握動作に働く特性を示した。AIP の視覚に支配的なニューロンが視覚運動における把握動作の学習に働くならば、対象物の形状や大きさの選択性は学習により発現することを示している。視覚的に見て学習する行為はヒトでは日常的に行われていることであるが、視覚情報を計算処理して運動を行うニューラルネットワークを構築することで、見て学習する技能を生成することが可能である。これらの技術は、将来、ロボットがヒトらしく働く、あるいは社会の中でより好ましい活動をできる可能性を示唆している。

Gifu Hand を用いた柔軟で巧みな運動スキルの研究は大変興味ある内容であり、指の間にある二つの玉の位置を入れ替える課題をロボットが巧みにこなしていた。これは健常者でもやや難度の高い課題であり、運動失調や軽い片麻痺患者の手指ではほとんど実施不可能な課題であると予想される。Visual Eyes motion capture equipment を利用したシステムによりこの課題をこなすことができ、柔軟で巧みな運動制御がある程度可能となったと判断できる。

この研究は、さらに高次な認知機能へと展開しうる概念を含んでおり、計算論のみならず、発達心理学、認知科学、脳科学への波及効果も大きいと考えられる。

2-3. 知覚と脳 : Perception and Brain

ヒューマノイドロボット CB-i を用いて、豊富なセンサー、関節独立の力・位置制御機構、強力は演算処理により、人間並みの柔らかさとしなやかな動きを実現し、不整地でのバランス制御に優れていることが示された。静的立位バランスに優れた対応状況が提示されたが、不整地歩行など、今後は応用的歩行への発展が望まれる。

転倒回避戦略の検討が行われ、立位攪乱状況あるいはしゃがみ座位からの立ち上

がりの状況を解析し学習する過程は大変興味深い内容であった。臨床医療の現場では、高齢者や障害者の転倒は社会問題であり、その具体的対策を立ててこの問題を解決することが急務である。このロボットの転倒回避戦略のプロセスは、ロボット制御ばかりではなく臨床医学の立場から患者の関節や四肢の運動制御に関する重要な情報が得られるものであろう。

正立させた二足歩行ロボットのバッティングは、ヒトのバットスイングとは多少異なる点もあるが、自分に近づいてくるボールを瞬時に認知し、ボールの飛行を予測して、バットを振る運動を開始し制御することは、このロボットの感覚運動制御レベルが非常に高いことを示している。バランス制御が軟らかく作ることにより達成されるのに対し、バットにボールを当てる際の精密な制御は硬く作ることにより達成されることから、相反する二つの制御を高度に両立することが求められるからである。

中心視と周辺視、両眼での眼球運動の研究では、比較的地味ではあるが、ヒューマノイドロボットの高度化に関するこれからの研究の展開になくってはならない技術要素を乗り越えており、高く評価される。

本研究を通じて、より人間の内的情報処理戦略に近いロボットの実現性が明確になった。計算理論の確立のみならず、実装により現実味を帯びており、世界的に卓越した成果であると評価できる。

2-4. ツール : Tools

本プロジェクトではシミュレーションプラットフォームの開発やヒューマノイドロボットの開発など、研究環境整備に力を入れた。

シミュレーションおよび異なる種類のヒューマノイドロボットを共通のソフトウェア環境で扱うソフトウェアプラットフォーム、ヒューマノイドロボット CB のシミュレーションの計算モデル、市販の空間計測システムの GUI 環境での統合化など、通常は無視されがちであるかも知れないが、シミュレーションのロボットへの実装を視野に入れた研究推進においては、極めて重要な要素技術であると言える。

〔研究成果（科学的側面）〕 a+（成果として秀逸である）

〔研究成果（産業・社会的側面）〕 a（成果として良好である）

3. 総合所見

本プロジェクトでは、脳科学を応用したロボティクスを目指して、逆に脳を理解多数の異なる分野の専門家（例えば、運動学習、脳科学、認知システム、計算理論、ロボティクス）が参加して研究体制を構築し、効率的にプロジェクトを運営した。この混成チームをプロジェクトの目標に向かって総動員し、次世代ヒューマノイドを完成させた。また、認知科学、制御科学等の周辺の分野においても、これに関わる重要な成果を上げた。

サルの脳活動から歩行に関連した位相情報を抽出して推定し、インターネットを介して伝送し、異なる場所に設置しているヒューマノイドロボットを中枢パターン生成器に基づく歩行制御を利用して二足歩行を実現させたのは特記すべき成果である。Brain Machine Interface 技術とロボット歩行制御技術を融合させて、将来、歩行障害者の歩行機能再建の可能性が大きくなった。学習理論、柔軟で巧みな手指機能制御、転倒回避戦略の分析やロボット制御への応用などは、リハビリテーション医療の現場で直ぐに役立つ重要な情報を含んでおり、今後の社会的展開が大いに期待できる。

本研究は脳機能解明やヒューマノイドロボットの開発という科学的価値の高い成果がうまれているが、これらは社会的価値を生み出す可能性が大きいので、他領域の研究者や臨床家と一層の交流をはかり、具体的な臨床応用を念頭に置いて今後の展開を目指すことが望まれる。

本プロジェクトでは、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等による解明」に資する十分な成果が得られたと評価される。

〔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