

独立行政法人**科学技術振興機構**
創造科学技術推進事業
追跡評価用資料
(追跡調査報告書)

川人学習動態脳プロジェクト(1996～2001)

総括責任者 川人 光男

はじめに

人間の高度で多様な運動能力や知的活動をコントロールする脳の機能を理解することは、21世紀の科学分野における最大の未踏課題である。

近年、分子生物学や計測技術の進歩により、脳の機能に関連する脳内物質や脳の活動部位についての理解が飛躍的にすすんでいる。しかしながら、現時点でのロボットやコンピュータの運動制御、パターン認識、言語認識などの能力は人間の脳に比べると著しく劣ったレベルにとどまっている。このことは、脳のハードウェアに関する部分的な知識をいくら精緻にしても、それだけでは脳の複雑で高度な機能の本質は理解できず、従ってその応用も難しいことを意味している。

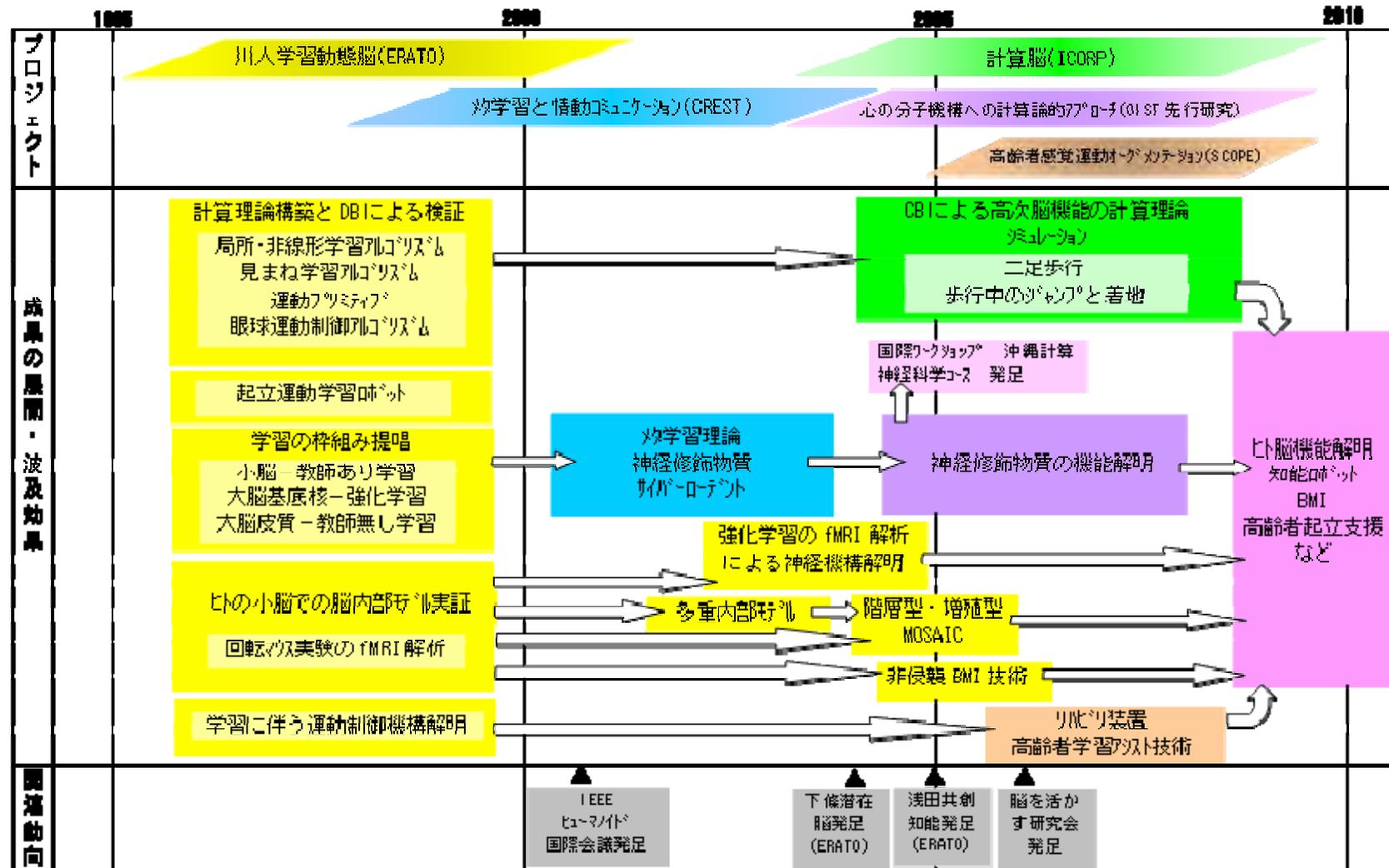
脳は、視覚や聴覚、運動に関与する筋肉からの感覚などを処理して人間の複雑な行動を制御しているが、様々な感覚を処理して行動を制御する脳の複雑でダイナミックな情報処理メカニズムの本質的な理解はあまり進んではない。脳の情報処理に関する理解を深めるためには、従来の伝統的な神経生理学、分子神経生物学などに加えて新しい研究手法を確立することが不可欠である。

David Marr は脳を理解するための計算論的アプローチを提唱し、視覚情報の処理に限定した範囲において計算理論の構築に成功している。しかしながら、Marrの研究は計算レベルに閉じた研究であったこと、記憶や運動等のその他の重要な機能との関連を排除した視覚だけに限られたものであったことから、脳の活動全体を理解する研究としては不十分であった。

以上の背景から、本プロジェクトでは、脳の高度な認知機能の根源である情報処理機構を明らかにすることを目的に、Marrの提唱した計算論的アプローチを踏襲しつつその欠点を克服する新しい手法により研究が推進された。すなわち、総括責任者が提唱するフィードバック誤差学習モデルを手がかりに、Marrの提唱した3つのレベル(計算理論のレベル、アルゴリズムのレベル、ハードウェアのレベル)を同時に研究し、脳の入力から出力までの情報処理を一貫して理解することを目標に研究が実施された。また、本プロジェクトは、脳の機能を脳と同じ方法で実現できる計算機プログラム、あるいは人工的な機械を作れる程度に深く本質的に理解することを目指した研究でもあった。

本プロジェクトの研究により、脳科学の新しい研究パラダイムが構築されるだけでなく脳の情報処理に関する理解が進み、情報処理装置やロボットなどの工学技術の進歩に計り知れない貢献をするものと期待された。

1. 研究の発展と展開図



川人学習動態脳プロジェクトの展開状況

2. 研究成果の継続と発展状況

2.1. プロジェクトのねらいと研究期間中に達成された成果

3.1.1. プロジェクトのねらいと主な設定されたテーマ

本プロジェクトは脳の高度な機能の根源である情報処理機構を明らかにするために、

- 1) 脳の情報処理に関する計算理論の構築
- 2) 非侵襲計測による脳機能の解明
- 3) ヒューマノイドによる計算理論の検証

これらを有機的に関連させて研究を行う組織として計算神経生理グループ、計算心理グループ、計算学習グループの3グループをプロジェクト内に編成、研究を実施し下記の極めて重要な成果を導いた。

- (1) 小脳・大脳基底核・大脳皮質の学習原理
- (2) 並列的、階層的な強化学習方式の開発
- (3) 小脳に獲得される道具の内部モデルの解明
- (4) 運動学習に伴う制御戦略の解明
- (5) 運動学習・運動生成アルゴリズムのヒューマノイドによる検証

3.1.2. 小脳・大脳基底核・大脳皮質の学習原理

学習の枠組みの一つに強化学習が知られており、強化学習においては、学習すべき正しい行動そのものは与えられず、自分から環境に働きかけてその評価(報酬あるいは罰)を得るといった試行錯誤を繰り返してゴールに近づいていくというのが基本スキームである。

強化学習には、行動を決める規則、行動を起こしてある状態になったときに貰える報酬、将来にわたって得られる報酬の総和が要素として必要であり、それぞれ「行動則」「報酬関数」「価値関数」と呼ばれる。これをもとに、強化学習のアルゴリズムについて検討した結果、「報酬関数」と運動の内部モデル(3.1.4. 参照)とを組み合わせることにより効率的な学習が可能であることを示した。

大脳基底核は中脳のドーパミン細胞の投射を強く受け、ドーパミン細胞は報酬が予測される時点で活動が活発になることが知られている。また、身体や環境の内部モデルが小脳に存在するという仮説を前提に川入プロジェクトはスタートしているが、強化学習にも運動の内部モデルの存在が重要な役割を果たしているとの結果から、小脳と大脳基底核とが大脳皮質の中継を介して、強化学習における感覚運動変換と報酬の予測という異なる計算処理を分担しているとのモデルを提案した。

上記の大脳基底核が強化学習という機能に特化した組織であるとのモデルをもとに、小脳および大脳皮質の学習における役割を加えて検討し、小脳は教師あり学習、大脳皮質は教師なし学習をそれぞれ担当しているとの学習の枠組みを構築した。小脳に関しては、伊藤正男は1970年に小脳の登上線維が教師になって運動学習が起きるとの指摘を行っており、その後さらに1984年に平衡線維シナプスの長期減衰を見出している。これらの解剖学的な知見も参考にし、小脳の教師あり学習の枠組みが提案された。

以上のような、小脳、大脳基底核、大脳皮質を含む脳全体を視野に入れた学習の全体枠組みに関するスケールの大きい仮説の提案は、脳の学習機能を俯瞰する点で意義が大きく、本仮説に関する論文(Doya K. What are the computations of the cerebellum, the basal ganglia, and the cerebral cortex. *Neural Networks*,12,961-974,1999)は、JNNS(日本神経回路学会、Japanese Neural Network Society)の2000年最優秀論文賞を受賞している。

3.1.3 並列的、階層的な強化学習方式の開発

人の身体の形を単純化した3リンク2関節、ジャイロセンサを持つ起立学習ロボットを開発し、床から立ち上がる行動を学習させる実験を行なった。事前の目標軌道などは提示せず、ロボット自身が行なう試行錯誤により起立動作を学習させることが目標であった。このロボットの学習アルゴリズムとして、階層的な強化学習方式を開発し、効率よく立ち上がり行動を学習することを実証した。本格的なヒューマノイドに比べれば自由度は非常に少ないが、試行錯誤により自力で学習して目標を達成するという「人間的」な能力をロボットに持たせることに成功したという点で画期的であった。その後、ノイズや環境の変化に対応可能なロバストな制御が出来る学習方式として「最悪の外乱」を学習するモジュールを自分自身の中に持っている方式を定式化した。

3.1.4. 小脳に獲得される道具の内部モデルの解明

総括責任者の川人は、小脳における学習の形態は教師あり学習と呼ばれるもので、運動する身体や他人の行動など、外部にあるものをまねたモデルを小脳に獲得するという仮説を20年ほど前から主張してきた(Kawato, M., et al., Biol. Cybern., 57, 169-185, 1987)。

解剖学的な視点からは、教師は、プルキンエ細胞と1対1に存在する登上線維に対応し、教師から与えられる信号は登上線維を伝播する誤差信号であり、内部モデル獲得は平行線維とプルキンエ細胞間のシナプス可塑性の変化に対応するとの仮説である。

小脳の活動を、機能的核磁気共鳴画像法 (Functional Magnetic Resonance Imaging、以下fMRI)により計測することは、本プロジェクトがスタートする以前から行なわれており、従来は、小脳の活動は学習が進むにつれて低下消失すると考えられていた。

これに対して、本プロジェクトでは、誤差信号により内部モデルが獲得されていくとの仮説から、誤差信号と内部モデル獲得のそれぞれに対応する小脳の活動があるはずと推定し、回転マウスを使ったトラッキング実験を上記仮説に基づいて行い、そのときの小脳の活動をfMRIで計測した。fMRIで計測した結果を定量的に解析し、回転マウスの操作の習熟に伴って、急速に活動が小さくなる部分と最初は殆ど認められないが徐々に大きくなり平衡値に達する部分が明確に分離され存在することが明らかになった。急速に活動が小さくなる部分は、マウスの操作ミスによる誤差信号に対応し、最初は殆ど認められないが徐々に大きくなり平衡値に達する部分は、小脳に獲得される内部モデルの活動に対応するものであることを強く示唆するものであった。

この結果は、小脳に内部モデルが存在するか否かという長年の議論に決着をつけるものであり、人の脳により内部モデルの存在を実証した画期的なものであった。その成果は2000年1月にNatureに発表され(Imamizu H., et al., Human cerebellar activity reflecting an acquired internal model of a new tool, Nature, 403(6766), 192-195, JAN13, 2000)世界的にインパクトを与えた。

3.1.5. 運動学習に伴う制御戦略の解明

新しい運動の学習において、学習初期にはぎこちない動きをしているが運動に習熟するに従い滑らかで楽な動きが出来るようになる。この変化を理解するために、筋肉の電位変化を定量的に測定した。その結果、学習初期においては筋肉の剛性を高めて未知の負荷に抵抗し、習熟の進んだ学習後期においては負荷を予測し必要十分な力を出す、という2種類の制御方式を組み合わせていることが判った。本研究成果は、2001年のNatureに発表された(Burdet E. et al., The central nervous system stabilizes unstable dynamics by learning optimal impedance, Nature, 414(6862), 446-449, NOV22, 2001)。

3.1.6. 運動学習・運動生成アルゴリズムのヒューマノイドによる検証

(1)研究のテストベッドとしてのヒューマノイドの開発

本プロジェクトは、脳の機能を脳と同じ方法で実現できる計算機プログラム、あるいは人工的な機械を作れる程度に深く本質的に脳の機能を理解することを目指した研究であり、理論から得られるアルゴリズムによりロボットを動かして理論を検証することは、本プロジェクトが目標とした大きな柱の 1 つであった。そのために、人のような、柔らかさをもち滑らかな動きが可能で、ほぼ人間と同じ大きさと重さで、かつ人の視覚入力機能を模した網膜構造と眼球部を搭載したヒューマノイドが開発された。研究のテストベッドとして開発されたヒューマノイドは Dynamic Brain(以下 DB)と名付けられ、以下に述べる様々な計算理論の実証、デモンストレーションとして活用された。DB のおもな特徴は次のとおりであった。

- ・ 30 の自由度(頭部:3、胴体:3、腕:7×2、脚:3×2、眼球運動部:2×2 自由度)。
- ・ 関節の駆動は油圧(約 650psi)による直動および回転アクチュエータ方式で、関節角測定用ポテンシオメータ、関節負荷測定用ロードセルを搭載。
- ・ 高さ;185cm、重量;約 80kg。
- ・ 自立は出来ず、コンピュータは別置き。

DB をテストベッドとして用いて脳の計算理論を実証するという研究の進め方は、新しい研究パラダイムとして、脳科学とロボット工学との垣根を取り払っただけでなく、脳科学における研究の新しい方法論を創出し、ロボットの制御に脳科学の知見を取り入れる契機となった。

(2)統計学習アルゴリズムの開発と適用

柔軟な関節を持つロボットを正確に素早く滑らかに動作させるためには、ロボットに学習により内部モデルを獲得させる必要があり、逆ダイナミクスや逆キネマティクスを表現する複雑な非線形関数を計算しなければならない。このとき複雑な非線形関数の厳密な全体解を得ようと思わなければ、局所的に線形の関数をフィッティングさせることにより、極めて簡単に複雑な非線形関数を学習することに着目し新しい神経回路の提案を行なった。これをもとに 30 自由度をもつ DB に対して、局所線形学習アルゴリズムを開発し、DB について全身の逆ダイナミクス学習や眼球運動学習などに適用した。

(3)見まね学習のアルゴリズム、運動プリミティブ

見まね学習は、運動学習における教師信号が直接得られるだけでなく、人のコミュニケーションにおける基本的な能力として認知科学的にも重要な意味を持っている。本プロジェクトでは、ビデオ画像から人の関節角の情報を再現するアルゴリズムを開発し、このアルゴリズムによる DB の制御に成功した。

教師から得られる情報や対象物の情報がどのようにして具体的な運動に変換されるのかという点に関して運動プリミティブという概念を提案し、具体的な運動に対していくつかの運動プリミティブを組み合わせることにより、DB のような自由度の大きいシステムの制御が効率的に行なえることを示した。また、運動プリミティブのコンセプトと神経振動子を利用することにより、人間が叩くドラムに同期して DB にドラムを叩かせることに成功した。

(4)眼球運動の学習制御

DB の頭部、眼球、視覚情報処理部分を使って、脳研究で最もシステムの理解が進んでいる眼球運動の学習制御モデルの実装を行ない、前庭動眼反射や円滑性追跡眼球運動について、モデルの有効性を証明した。これらの結果は、川人等が提案していたフィードバック誤差学習という学習スキームの正当

性を支持するものであった。

2.2. 研究期間終了後の研究の継続・発展状況

3.2.1. メタ学習研究への展開

強化学習においては、「行動則」「報酬関数」「価値関数」の3要素が存在するが、ヒトの学習においては、それらはあらかじめ与えられているわけではない。ヒトは、経験を通じて「行動則」「報酬関数」「価値関数」そのものも学習していく。このことから、学習を学習する、すなわち「メタ学習」の重要性が浮かび上がってくる。また、強化学習における報酬には、神経修飾物質であるセロトニンやドーパミンが深く関与していることが生理学の知見から明らかになっており、学習におけるこれらの物質の作用機構の解明が重要であると認識された。

これらの問題意識から、CRESTの研究領域「脳を創る」(研究総括:甘利俊一)において「行動系のメタ学習と情動コミュニケーション機構の解明」(代表研究者:銅谷賢治)というテーマの研究(1999.11~2005.3)に展開された。本研究では、メタ学習の理論的研究に加えて、ドーパミンやセロトニンなどの神経修飾物質に注目し、それぞれが報酬の期待、短期と長期の結果の予測に関与しているとの仮説を立て、脳の大域的な学習制御メカニズムの研究を行なった。また、サイバーローデント(人工マウス)をつかって、強化学習の理論を実証する実験に成功した。さらに、それらの成果を踏まえて、(独) 沖縄先端科学技術基盤整備機構(以下 OIST)の先行的研究事業「心の分子機構への計算論的アプローチ」(2003.10~2009.3、代表研究者:銅谷賢治)に採択された。

3.2.2. 多重内部モデル

プロジェクト終了後、今水らは、fMRIによる脳活動の計測を様々な道具に拡張し、回転マウスと速度変換マウスでは小脳の活動領域が異なること、鋏、櫛、スプーン、フォーク、ナイフ、鉛筆などの道具についても小脳の活動部位がそれぞれ異なることから、道具に応じて学習した内部モデルは異なった場所に獲得され、複数の内部モデルが構成されていることを明らかにした。道具を使いこなすのは人の行動の特徴であるが、単純な運動だけでなく、道具を使うという比較的高次の学習においても小脳が重要な役割をはたしていることが実証された。

さらに、最近になって、言葉の連想、パズルの解法を考えるなどの身体的な運動を伴わない認知的な活動においても小脳の活動レベルが上がるようになってきている。このことは、小脳の機能をより深く理解することが人間の高次の脳活動を理解する手がかりになることを示唆している。

以上から、人の高次の脳活動においては、小脳に複数存在する内部モデルが、それぞれ異なる役割を果たしつつ環境の変化に応じて適切な内部モデルの組合せが選択されていると考えられた。これらをもとにして、複数の内部モデルの役割分担、適切な内部モデル選択のメカニズムについての研究に発展しており、川人らが提案していたモザイク(Module Selection and Identification for Control、以下 MOSAIC)モデルの階層型、増殖型への拡張、MOSAICモデルとミラーニューロンとの関係などの研究が展開されている。

3.2.3. fMRI 等非侵襲計測技術の展開

人の小脳における内部モデルの存在実証にfMRI計測が有効であったことから、人の強化学習における神経機構を明らかにするため、確率的行動課題を学習している際の脳活動計測が行なわれた。その結果、強化学習でキーになっている4種類の情報処理(学習速度、学習記憶、短期報酬、累積報酬)が

行なわれている場所を特定し、大脳基底核の尾状核が強化学習において中心的な役割を果たしていることを初めて示した。

脳の活動を計測して外部の装置を制御する BMI (Brain Machine Interface) 技術が注目されているが、脳活動の計測に fMRI を用いることにより、人への負担の少ない BMI の基礎技術が開発された。

脳活動の非侵襲計測技術については、fMRI と MEG (Magnetoencephalography、脳磁図) との組合せや近赤外光を用いて頭皮上から非侵襲的に脳機能マッピングする NIRS (near-infrared spectroscopic imaging、近赤外光計測) と EEG (Electroencephalogram、脳波) との組合せなど、それぞれの手法の長短を相補うことにより、脳のダイナミックな情報処理機構の解明研究に発展している。ATR では、横河電機㈱と共同で 400 チャンネルという世界最高のチャンネル数を持った MEG 装置を開発している。さらに島津製作所と共同で、NIRS と EEG とを組み合わせた新規の脳機能解析技術の研究を行っている。

3.2.4. 小脳長期抑圧のシステムバイオロジーモデル

小脳の運動学習において、内部モデルの獲得は平行線維とプルキンエ細胞間のシナプス可塑性の変化に対応するとの仮説に関連し、小脳 LTD (Long Term Depression、長期抑圧) のモデルが研究推進委員の黒田真也により提案されており (Kuroda, S., et al., J. Neurosci., 21, 5693-5702, 2001)、このモデルの妥当性は、その後実験的に確かめられつつある。

小脳 LTD のモデル提案を契機にして、システムバイオロジーという生物学と情報科学との境界領域にまたがる新しい学術分野の発展が始まっており、黒田真也はこの分野を牽引する研究者として、文科省の平成 18 年度若手研究者賞を受賞している。また、CREST の研究領域「生命システムの動作原理と基盤技術」(研究総括: 中西重忠) における研究課題「シグナル伝達機構の情報コーディング」(研究代表者: 黒田真也) として平成 18 年度に採択されている。

3.2.5. 運動学習に伴う制御戦略の展開

プロジェクトにおいて用いられた腕筋肉の剛性を測定する装置を参考に、脳卒中などにより損傷を受けた脳機能の回復訓練において、リハビリ運動の助力装置をうまく使うことによって、機能の回復を早めることが出来るのではないかと想定された。具体的には、「スパイダー」とよばれる枠内に支持されたボールを把持したり放したりする装置や、機能を失った片腕だけでなく健全なもう片方の腕も同時に動かす装置などが検討されている。それらの装置をリハビリに活用する可能性を確認するため、病院でのリハビリの現場の調査が行なわれている。さらに、リハビリによる運動機能の回復過程と脳の活動計測とを同時に行い、機能回復と脳の活動との対応を調べることや、脳活動に応じてリハビリ内容を最適化することが出来るのではないかと考えられている。以上の考えをもとに、高齢者がデジタル機器などの操作を学習するのを助けるための基礎技術に関する研究が提案され、H18 年度 SCOPE-S (総務省 戦略的情報通信研究開発推進制度 特定領域重点型研究開発) のテーマ「高齢者のストレスレス・ネットワークアクセスを実現する感覚運動オーグメンテーション技術の研究開発」(2006 ~ 2009、研究代表者: 大須理英子) に採択された。

3.2.6. 運動学習・運動生成アルゴリズムのヒューマノイドによる検証

本プロジェクトでの DB の成功を踏まえて、さらに能力を進化させたヒューマノイド Computational Brain (以下 CB) を使った計算論的神経科学の研究 (ICORP、計算脳プロジェクト、2004.1 ~ 2009.1) が日米の共同研究としてスタートしている。この中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ており、これらの計算理論を計算機シミュレーシ

ョンやロボットに適用することで理論の評価、検証を行うとしている。CB は DB に対して、自由度を 30 から 50 に増やしたことで、背中に小型のコンピュータと油圧装置を搭載していることが特徴である。

DB、CB その他ロボットやシミュレーションにより、ジャグリング、エアホッケー、剣玉、二足歩行、歩行中のジャンプと着地などの学習実験を成功させており、今後さらに人の行動に関して認知科学、神経科学、心理学的理解を深めるとともに、より高度な行動の学習における計算理論構築、アルゴリズム開発が期待されている。ヒューマノイドロボットでの歩行実現を通じて、人間の歩行運動戦略を理解し、高齢者など歩行運動が困難な人を支援する手法を開発するための示唆を与えることに取り組んでいる。

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

3.1. 科学技術の進歩に貢献する成果

4.1.1. 学術上の新発見と発明

川人等が提唱していた小脳内部モデル仮説を踏まえて、精緻に計画された回転マウスを使ったトラッキング実験により、小脳の活動を fMRI により計測し、小脳に内部モデルが存在することをヒトの脳により世界で始めて実証した。この結果は、小脳に内部モデルが存在するか否かという長年の議論に決着をつける画期的なものであった。また、最近になって、言葉の連想やイメージの操作など運動以外の課題においても小脳の活動レベルが上がるのがわかってきている。このことから、小脳の機能をより深く理解することが人間の高次の脳活動を理解する手がかりとなると期待されており、今後、知能を持ったロボットの実現に内部モデルのコンセプトが大きな役割を果たす可能性がある。この小脳内部モデル理論の提案と次節 4.1.2 で述べる新しい研究手法の創出によって、言語など人間固有の脳機能の理解や停滞している人工知能研究の発展につながると期待されることから、総括責任者川人光男は 2006 年の朝日賞を受賞している(2007 年 1 月 1 日付朝日新聞)。2001 年 5 月には前ノーベル医学生理学賞選考委員 Sten Grillner 教授に招かれ、ただ一人のノーベルフォーラム講演を行い、さらに 2003 年 6 月にはノーベルシンポジウムで招待講演を行った。

小脳が運動以外の思考や認知に関わっていることや、大脳基底核が報酬の予測に関わっていることなど、従来は大脳皮質の機能と考えられていた活動が小脳や大脳基底核などに認められることから、小脳、大脳基底核、大脳皮質の役割が再整理され、学習の大局的な枠組みが提案された。すなわち、小脳は誤差信号と長期減衰による教師あり学習により身体や環境の内部モデルを獲得し、大脳基底核はドーパミンを介した強化学習を行い、大脳皮質は教師なし学習により感覚情報からの特徴抽出などを担当するというものである。この考え方はあくまでも仮説であり今後修正される可能性は否定できないが、脳の学習の大枠を見通す全体図が出来た意義は大きい。

4.1.2. 新理論・概念の構築

計算論的神経科学を基本にして、複雑な脳の働きの本質に迫るため、それまでの脳科学の中心であった解剖学や神経生理学だけでなく、認知学、ロボット工学、fMRI などの計測技術なども含めた学際的なプロジェクトを運営することによって、計算理論のロボットによる検証、内部モデル仮説のヒトの脳での実証などの高い成果をあげた。その結果、理論家と心理学や生理学の実験家とが一緒に研究を行なう契機となった。

DB を製作し、理論から導かれるアルゴリズムにより DB を動かし、理論を検証するという手法は、DB が人間に近い寸法と柔軟な関節および視覚機能を持っていたこともあり、脳科学およびロボット工学に大きなインパクトを与えた。また、社会的にも大きな反響を呼んだ。ロボット工学へのインパクトとしては、プロジ

エクトの後半の 2000 年ごろから、内部モデルとロボットあるいは小脳とロボットというキーワードを含んだ論文の発表数が、増減はあるものの年とともに漸増する傾向を示しており(4.3.2 参照)、特に 2006 年は過去最高の発表件数となっていることからもうかがうことが出来る。本プロジェクトでの DB による数々の成果を受けて、脳科学とロボット工学との融合が始まったといえる。また、プロジェクト終了時の DB のデモンストレーションは新聞などのマスメディアに広く取り上げられた(2001 年 8 月 31 日付、日本経済新聞、朝日新聞など)だけではなく、2001 年に National Geographic Discovery Channel で放送され、TIME 誌(2004 年 6 月 14 日号)に Rise of the Machines と題した特集において、世界的研究者 4 名の内の 1 名として川人が紹介され、さらにプロジェクトの中間段階で加藤紘一代議士の視察(1999 年 11 月 17 日)など、大きな社会的反響を呼んだ。

fMRI による脳活動の計測と解析は、小脳内部モデルの実証により、脳の機能解析に有効であることが示され、その後、計測技術の進歩も加わり脳科学における研究手段として広く使われるようになった。また、fMRI と MEG との組合せや NIRS と MEG との組合せなどに発展している。さらに、fMRI に代表される脳機能画像計測技術は、最近注目されている BMI における要素技術の 1 つとして無くてはならないものになりつつある。

4.1.3. 新領域・潮流の創出(学会分科会、国内外シンポジウム、研究会の創設)

本プロジェクトにより新たな学会が創設された例はないが、米国に本部がある IEEE(The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.電気電子学会)において、Humanoid Robots に関する International Conference が 2001 年からスタートしている。

また、OIST では、国際ワークショップとして、「沖縄計算神経科学コース」を 2004 年から毎年実施しており、2004 年に実施したワークショップの講師が執筆した「Bayesian Brain」というタイトルの本を出版する予定である。2006 年のワークショップは「Computing Neurons」というテーマで、6/26 ~ 7/7 に実施された。「沖縄計算神経科学コース」のオーガナイザーは、本プロジェクトで計算神経生理グループのリーダーであった銅谷代表研究者がつとめている。

本プロジェクトのあと、脳科学関連の ERATO プロジェクトとして、下條潜在脳機能プロジェクト(2004 ~ 2009)、浅田共創知能システムプロジェクト(2005 ~ 2010)がスタートしている。下條潜在脳機能プロジェクトでは、意識せずに自動的に働く潜在脳機能が注目され、浅田共創知能システムプロジェクトでは、人間の脳の認知機能の発達過程が注目され、脳機能の解析に fMRI の活用が図られている。

脳科学の急速な進展に伴い、脳科学と社会とのかかわりが急速に深まりつつある。人間の精神活動の根源である脳の働きが科学的に解明されるに従い、他人の心を読んだりコントロールできる可能性が出てきた。人間の精神をコントロールする極端な例としては、ハッピードラッグや遺伝子改変によって頭脳を良くすることが考えられるが、人間は他人の心のどこまで踏み込むことが許されるのかという大きな問題を孕んでいる。また、昨今のマスメディアが取り上げる脳に係わる話題やそれに伴ういわゆる「脳文化人」の登場は、社会がこの問題に関心を示していることの証左といえる。しかしながら、きちんとした科学的裏付けのない中途半端な知識が流布することは百害あって一利無しであり、脳科学の成果をきちんと社会に還元するという点でも問題が多い。

従来の神経倫理は、動物実験やヒトを使った実験におけるウェルフェアをどう確保するかというのが中心であったが、人の心のコントロールに関する問題は、ヒトの Stem Cell(胚性幹細胞)による実験に匹敵する倫理問題を抱えているといえる。米国にはこの問題に関する若い専門家がすでに育っているが日本での動きは鈍い。

これらの問題意識から、川人ら 7 名が発起人代表となり、「脳を活かす」研究会をスタートさせている

(2006年3月13日)。発起人(99名)には脳科学、ロボット工学、神経生理学などの分野の第一線の研究者が参加している。今後の活動としては、脳科学の成果を社会に還元し、社会の要望に応じて脳科学を発展させていく「脳と社会」の時代が到来したとの判断から、その状況を社会にアピールするとともに、研究者の連携強化、社会貢献、政策提言を行なうことが計画されている。

3.2. 社会的、経済的な効果・効用及び波及効果

4.2.1. プロジェクトの成果から期待される技術革新・インパクト

- (1) 計算論的神経科学を提唱しその有効性を実証した。
- (2) 脳科学の研究手法として、ロボットをツールとして使い理論を検証するというシステムティックなアプローチを切り開いた。
- (3) ロボット工学の立場からロボットと人間との格差を見ると、全ての点でロボットは人間にかなわないことが判る。例えば、皮膚感覚、視覚の持っている認識・知覚能力、運動の滑らかさ・柔軟さ、判断・推論などの高次の意識活動などである。ヒューマノイドの研究では日本は世界をリードしているので、脳科学とヒューマノイドの技術を総合した研究は、世界にアピールできる。ヒューマノイドは何の役に立つのかという議論もあるが、日本はヒューマノイドに対する親和性が高く、研究のシンボルとして若手の優秀な研究者を集めることが出来る。ロボカップなども、教育的効果が大きい。ヒューマノイドの研究において今後とも日本が世界をリードしていく必要がある。
- (4) ロボティクスの研究は人間とは何か(人間学)と表裏一体である。工学の分野だけでなく境界領域として脳科学、神経生理学、発達心理学などの他の分野の連携が始りつつある。今後ともこの分野で世界をリードする研究を進めていく必要がある。米国は BMI に関しては軍事的応用という目的もありトップレベルの研究を進めており、ロボットと脳科学とが結びついた研究が活発である。

4.2.2. 大学や研究機関で行われているプロジェクト成果の応用に向けた取組み

(1) 脳機能画像計測技術の展開

fMRI による脳活動の計測と解析は、小脳内部モデルの実証により、脳の機能解析に有効であることが示され、その後、計測技術の進歩も加わり脳科学における研究手段として広く使われるようになっていく。さらに、fMRI と MEG との組合せや近赤外光を用いて頭皮上から非侵襲的に脳機能マッピングする NIRS と MEG との組合せなどより計測技術の高速・高空間分解能化に向けて発展している。さらに、fMRI に代表される脳機能画像計測技術は、最近注目されている BMI における要素技術の 1 つとして無くてはならないものになりつつある。

(2) 神経修飾物質の働きの研究に展開

銅谷氏(グループリーダー)は、サイバーローデント(人工マウス)をつかって、強化学習の理論を実証する実験に成功している。ERATO の途中から CREST プロジェクトに移り、「メタ学習と情動コミュニケーション(1999-2004)」に発展させた。さらに、それらの成果を踏まえて、(独)沖縄科学技術研究基盤整備機構の先行的研究事業「心の分子機構への計算論的アプローチ」(2003~2008)に採択され、リーダーを務め、セロトニンなどの神経修飾物質の働きの研究に展開している。

(3) 医療・福祉に繋がる取組み(福祉・生活支援に繋がるロボット技術等)

大須氏は人間の脳の働きの理解を深めて、運動制御や運動学習のプロセスを明確にすることにより、運動機能に障害がある人の治療、リハビリに活用できると期待される。卒中などにより損傷を受けた脳機能の回復訓練において、リハビリ運動の助力装置(ある種のロボット)をうまく使うことによって、機能の回復を

早めることが出来るのではないかと考え、ハビリによる運動機能の回復過程と脳の活動計測とを同時に行い、機能回復と脳の活動との対応を調べている。

また、脳活動に応じて学習内容を最適化することが出来ると考えており、高齢者がデジタル機器などの操作を学習するのを助けるための基礎技術の研究を提案し採択された(大須氏;H18 年度 SCOPE-S、高齢者のストレス・ネットワークアクセスを実現する感覚運動オーグメンテーション技術の研究開発)

(4)次世代ロボット技術等に繋がる取り組み

1980 年代に原子炉など特殊な環境で作業する限界作業ロボットを研究したが、動きが十分でなく、人間の動作生成の研究の重要性に気がついた。センサーからの信号を使ったロボットのフィードバック制御は、作業環境などが完全に計算でき作業する課題が全て明らかになったときにのみ可能となる。環境の変化に応じて学習しながら自律的に自分の運動を計画し制御することが求められるが、川人プロジェクトの研究成果はその可能性を世界ではじめて示したといえる。サービス関連のロボットなど将来の産業に使えるものと期待されている。

琴坂准教授(計算学習グループ)は、神経振動子による運動制御をより合目的にするための修正モデルの研究、ロボットの衝突安全性の研究を行っている。現在の産業用ロボットは重くて剛いため、産業用ロボットに衝突するとヒトは負傷・死亡してしまう。ロボットの衝突安全向上のために、柔らかいロボットの研究を行っている。ATRにある腕ロボットは、重量 20Kg あるが、人間の腕は 2Kg 程度である。科研費で多自由度の柔らかいロボットを研究している。多数の関節をうまく動かすために全く新しいアプローチをしている。将来は、ERATO で実証した制御プログラムを応用することが考えられている(現、埼玉大学 琴坂准教授(計算学習グループ))。

また、D社では柴田准教授(計算学習グループ)とヒトの顔の認識技術を共同研究している(現、奈良先端科学技術大学院大学)。

4.2.2.企業による社会的、経済的な効果効用に繋がる取り組み

脳科学の知見を応用してロボットを制御する技術や、脳の活動の非侵襲計測技術に企業は強い関心を寄せており、ATRとH社やS社との共同研究に発展している。ICORPの計算脳プロジェクトで出願した特許をS社は購入している。

企業から見たとき、ATRでの脳科学関連の研究は、今後の機械装置を「賢く」するための基礎技術として高く評価している。センサーからの信号を使った従来のロボットのフィードバック制御では、作業環境などが完全に計算でき作業する課題が全て明らかになったときにのみ可能であった。環境の変化に応じて学習しながら自律的に自分の運動を計画し制御することが今後のロボットには求められるが、本プロジェクトはその可能性を世界ではじめて示したといえる。また、BMI 技術の進歩により、考えただけで機械装置を動かすことが夢でなくなりつつあり、将来何らかの形で実用化されることは間違いないと期待されている。

その中で脳活動の非侵襲計測でfMRIとMEG(Magnetoencephalography、脳磁図)との組合せやNIRS(near-infrared spectroscopic imaging、近赤外光計測)とMEGとの組合せなどによる脳のダイナミックな情報処理機構の解明研究に発展している。この脳の活動領域をfMRIは高空間分解能で分析できるが時間分解能は良くない、このため高時間分解能の高いMEG分析機がもちいられるが脳分析には多チャンネル化が必要で、横河電気・島津はATRと共同で400チャンネルという世界最高のチャンネル数のMEG(Magnetoencephalography、脳磁図)装置を開発している。

4.2.3. 企業等において始まっている応用・実用化の取り組み事例

現時点では本プロジェクトの成果を応用した実用化の具体例はない。しかし、BMI (Brain Machine Interface) の成果の一つに、HR社と(株)国際電気通信基礎技術研究所(以下 ATR)との共同研究で、脳活動を計測しそのデータでロボットを操作する基礎技術が開発された (http://www.atr.co.jp/html/topics/press_060526_j.html)。

HR社では ATR との共同研究でじゃんけんロボットを開発し、プレス発表した(2006年5月24日)。fMRI (Functional Magnetic Resonance Imaging、機能的 MRI) で計測したデータを処理して、ヒトと同じ動作をロボットにさせることに成功した。ヒトの負担の少ない BMI (Brain Machine Interface) 技術として開発した。今後、ハイテク義手・ロボットの制御・コンピュータの操作(考えただけで操作できる)など応用分野が期待される。

3.3. 統計資料に見た科学技術への影響

4.3.1. 成果を示す代表的な論文と被引用件数年次推移

被引用件数の年次推移を調べた対象論文のリストを表1に示す。～、はプロジェクトの成果に直接関連する主要論文、それ以外はプロジェクトのその後の展開により得られた成果に関する主要論文である。

表 1 被引用件数 年次推移調査 対象論文

No.	著者	タイトル	雑誌名	年	Vol/No/P
	Schaal, S., et al.	Constructive Incremental Learning from Only Local Information	Neural Computation	1998	10/ /2047-2084
	Wolpert, DM., et al.	Multiple paired forward and inverse models for motor control	Neural Networks	1998	11/7/1317-1329
	Wolpert, DM., et al.	Internal models in the cerebellum	Trends in Cognitive Sciences	1998	2/9/338-347
	Schweighofer, N., et al.	Role of the cerebellum in reaching movements in humans. . Distributed inverse dynamics control	Eur. J. Neuroscience	1998	10/1/86-94
	Schweighofer, N., et al.	Role of the cerebellum in reaching movements in humans. . A neural model of the intermediate cerebellum	Eur. J. Neuroscience	1998	10/1/95-105
	Schaal, S.	Is imitation learning the route to humanoid robots?	Trends in Cognitive Sciences	1999	13/6/233-242
	Doya K.	What are the computations of the cerebellum, the basal ganglia, and the cerebral cortex?	Neural Networks	1999	12/ /961-974
	Kawato M.	Internal models for motor control and trajectory planning	Current Opinion in Neurobiology	1999	9/ /718-727
	Imamizu H., et al.	Human Cerebellar activity reflecting an acquired internal model of a new tool	Nature	2000	403/6766/192-195
	Doya K.	Complementary roles of basal ganglia and	Current Opinion	2000	10/6/732-73

		cerebellum in learning and motor control	in Neurobiology		9
	Burdet,E., et al.	The central nervous system stabilizes unstable dynamics by learning optimal impedance	Nature	2001	414/6862/4 46-449
	Haruno,M., et al.	MOSAIC model for sensorimotor learning and control	Neural Computation	2001	13/10/2201- 2220
	Servos P., et al.,	The neural substrates of biological motion perception: An fMRI study	Cerebral Cortex	2002	12/7/772-78 2
	Doya K.	Metalearning and neuromodulation	Neural Networks	2002	15/4-5/495- 506
	Wolpert DM., et al.	A unifying computational framework for motor control and social interaction	Phil. Tras. R. Soc. Lon. Ser.B Bio. Sci.	2003	358/1431/5 93-602
	Imamizu H., et al.	Modular organization of internal models of tools in the human cerebellum	Proc. Nat. Aca. Sci. USA	2003	100/9/5461- 5466
	Haruno M., et al.,	A neural correlate of reward-based behavioral learning in caudate nucleus:A fMRI study of a stochastic decision task	J. Neuroscience	2004	24/7/1660-1 665
	Tananaka SC., et al.,	Prediction of immediate and future rewards differentially recruits cortico-basal ganglia loops	Nature Neuroscience	2004	7/8/887-893
	Cairhness,G , et al.,	Failure to consolidate the consolidation theory of learning for sensorimotor adaptation task	J. Neuroscience	2004	24/40/8662- 8671
	S. Schaal, et al.	Rhythmic arm movement is not discrete	Nature Neuroscience	2004	7/10/1137-1 144
21	Samejima K., et al.,	Representation of action-specific reward values in the striatum	Science	2005	310/5752/1 337-1340

これら論文の被引用件数の年次推移を表 2 に示す。

表 2 主要論文の被引用件数 年次推移(件)

(検索日:2006年12月22日)

論文No.	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	累積 件数
	0	1	6	6	8	4	7	7	8	47
	0	7	9	22	30	30	41	46	42	227
	2	16	15	21	23	28	30	25	34	194
	4	6	8	7	6	8	9	10	10	68
	4	4	7	9	4	8	7	6	5	54
		0	2	10	9	12	16	8	16	73
		0	3	6	7	9	6	9	8	48
		0	8	18	25	24	24	19	25	143
			4	17	22	32	34	27	27	163
			0	2	13	8	13	17	14	67
				0	2	15	14	11	18	60
				1	3	16	14	11	20	65
					1	8	4	11	12	36
					0	4	8	11	12	35
						4	13	8	19	44
						0	8	13	11	32
							1	10	19	30
							3	13	28	44
							0	11	13	24
							1	0	5	6
②								0	18	18
年間合計	10	34	62	119	153	210	253	273	364	1478
平均 被引用回数	2.0	4.3	6.2	9.9	10.9	13.1	12.7	13.0	17.3	

平均被引用件数とは当年までに発表された論文の数でその年の被引用件数合計を除いた値である。

プロジェクトの直接の成果に関する主要論文(~ 、)について、被引用件数の推移をプロットした結果を図1に示す。

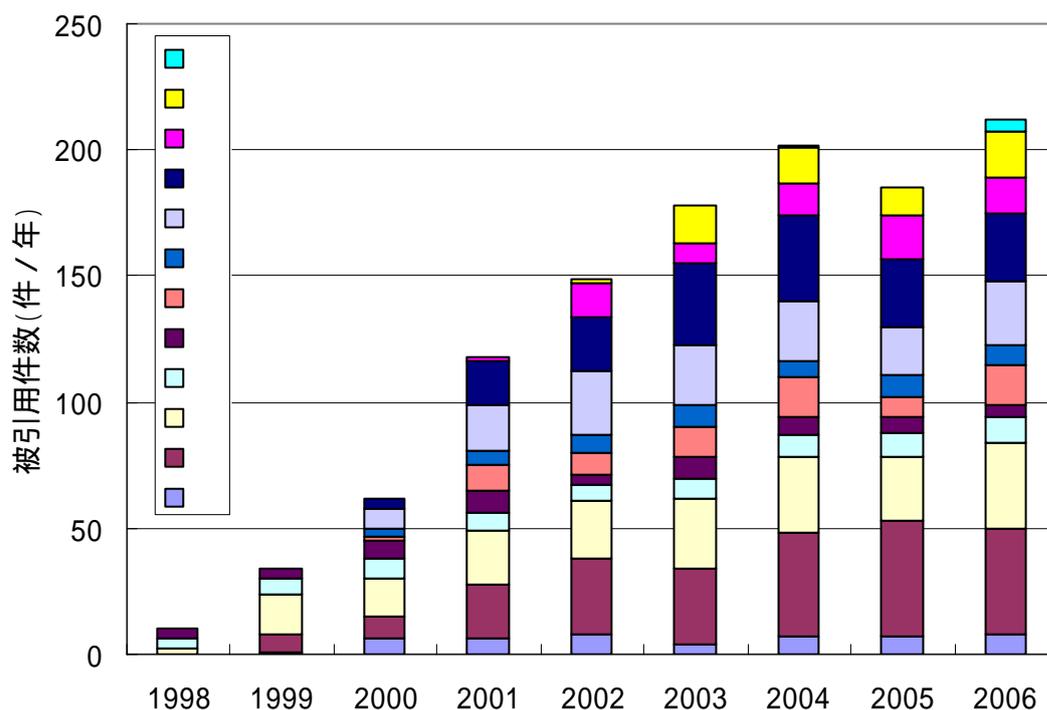


図1 プロジェクトに直接関連する論文の被引用件数の推移

プロジェクトの終了した2001年以降も、被引用件数は2005年に若干落ち込むが年とともに増加している。論文No. は2004年に発表されており、対象となる論文の母集団が増えたことになるが、その論文の被引用件数を差し引いても、2006年には、過去最高の被引用件数となっている。

プロジェクトが終了した以降も、関連する論文は発表されるので、関連する論文を加えた被引用件数合計は増えるのが当然である。そこで対象となる論文の総数が増えるのをノーマライズするため、平均被引用件数(その年の引用件数合計を前年までに発表された論文の数で除した値)を求めて、その年次推移をプロットした。結果を図2に示す。

この結果、平均被引用件数も、図1とほぼ同じ傾向であるが、2006年が際立って高い値になっている。プロジェクト終了後も質の高い論文発表が引続き発表されているといえる。

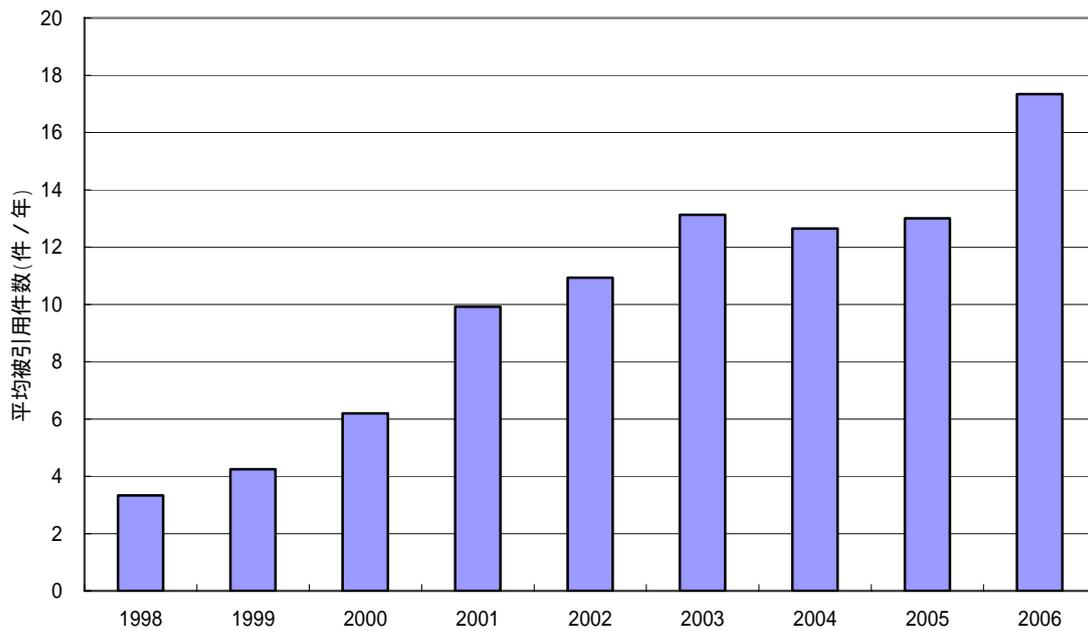


図2 平均被引用件数の年次推移

4.3.2. 創出された学術領域に関する論文数

本プロジェクトにより、小脳における内部モデルが実証され、脳科学とロボット工学を融合した新しい領域が開かれたと考えられる。これを確認するため、次のキーワードを含む検索式により、学術論文の発表件数の推移を調べた。検索式は次のとおりである。検索期間は1991～2006年とした。

内部モデル×小脳

小脳×教師あり学習 + 大脳基底核×強化学習 + 大脳皮質×教師なし学習

内部モデル×ロボット + 小脳×ロボット

検索した結果を表3に、論文数の年次推移をプロットした結果を図3に示す。

表 3 創出された分野に関連する論文数年次推移

(検索日:2006年12月26日)

検索式	91	92	93	94	95	96	97	98	99	00	01	02	03	04	05	06	合計
	3	3	4	4	4	4	5	11	8	10	3	7	14	12	14	9	115
	1	1				1	1	1	2	3	4	1	1	2	4	3	25
	2	3	1	1	3	4		5	6	5	11	6	8	2	11	14	82
合計	6	7	5	5	7	9	6	17	16	18	18	14	23	16	29	26	222

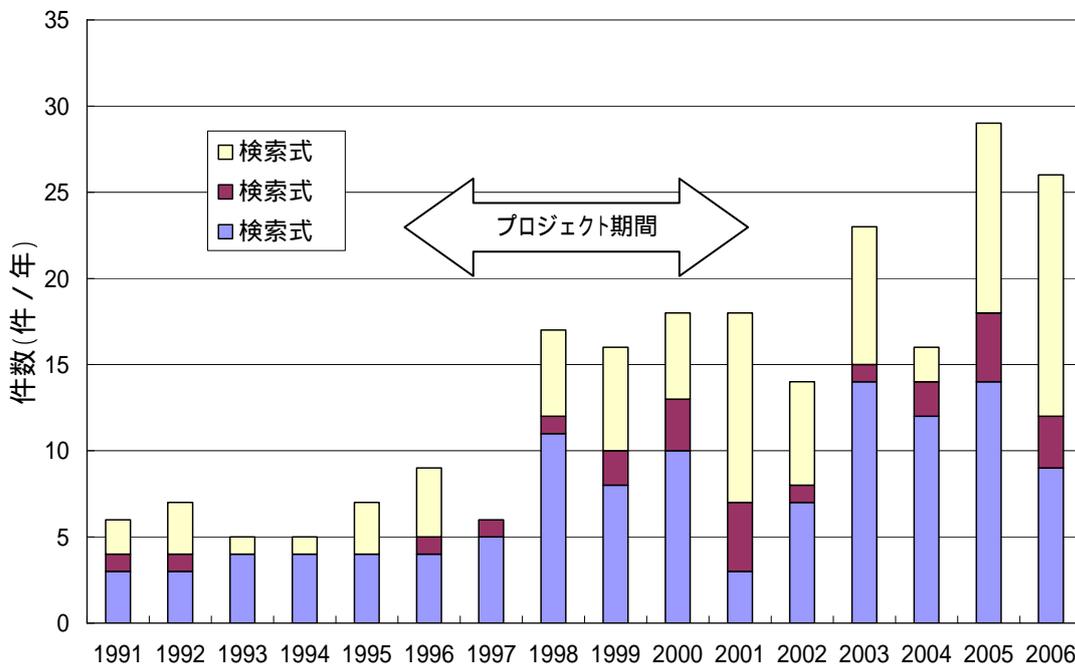


図3 創出された分野に関連する論文数の年次推移

この結果、プロジェクトがスタートした1996年ころから関連論文の発表が増え始め、終了した2001年以降も、増減はあるものの増加の傾向であり、本プロジェクトにより創出された分野が学術的に関心を集めていることを示している。特にロボティクス関連の論文数が2006年に最高となっている。

4.3.3.招待講演回数

本プロジェクト関係者について、総括責任者および主要研究者について、招待講演回数の年次推移を図4に示す。各人から入手した業績リストおよびインターネットに公表されている各人の業績データをもとに、招待講演を年次毎に数えた。

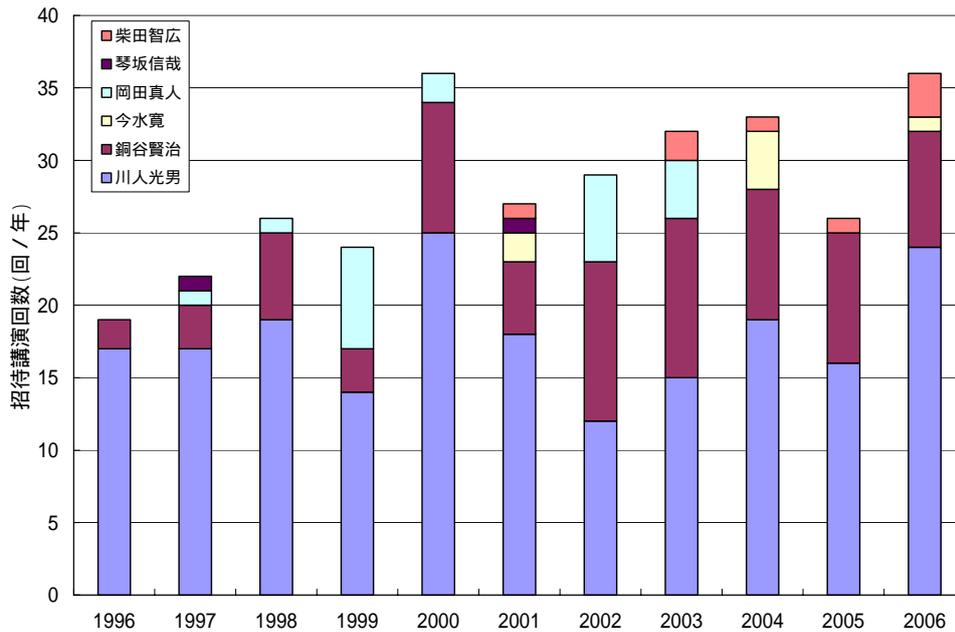


図 4 招待講演回数の年次推移

総括責任者、主要研究者の招待講演回数の合計は、プロジェクト開始後年毎に増加し、プロジェクト終了後いったん落ち込むが、その後増加傾向を示し、2006年には過去最高の回数となっている。

4.3.4 主な受賞

本プロジェクト主要メンバーの研究成果に対する1996年以降の主な受賞は次のとおりである。

・川人光男	1996年	第10回塚原仲晃記念賞
	1997年	第6回大川出版賞、日本神経回路学会論文賞
	1998年	計測自動制御学会論文賞友田賞
	2001年	第3回時実利彦記念賞、ビジュアルサイエンスフェスタ優秀賞
	2004年	ATRフェロー、電気通信情報学会 IEICE Fellow
	2005年	中日文化賞、志田林三郎賞
	2006年	朝日賞
・銅谷賢治	2007年	APNNA Outstanding Achievement Award
	1996年	日本神経回路学会研究賞
	2000年	日本神経回路学会論文賞
	2003年	日本神経回路学会論文賞
	2005年	日本神経回路学会論文賞、Neuroimage 編集者賞、
	2006年	日本神経回路学会論文賞
	2007年	日本学術振興会賞、第21回塚原仲晃記念賞
・岡田真人	1996年	日本神経回路学会奨励賞
	1997年	(社)計測自動制御学会生体・生理工学部会 研究奨励賞
	1998年	第17回AVIRG(視聴覚情報研究会)賞

・森本淳	2003年	日本神経回路学会奨励賞
・大須理英子	2002年	日本神経回路学会研究賞
	2004年	日本神経回路学会奨励賞、日本臨床神経生理学会奨励論文賞
	2007年	ICONIP Best Paper Award
・Schaal, S.	2002年	IEEE Robotics and Automation Society Best Paper Award
	2005年	日本神経回路学会論文賞
・琴坂信哉	2002年	第16回日本ロボット学会論文賞
・柴田智広	2002年	日本神経回路学会論文賞
	2007年	2006 Neuroscience Research Excellent Paper Award

3.4. 人材育成の面から参加研究者の活動状況

4.4.1 プロジェクトから育った人材の状況

本プロジェクトの人材育成面での成果は大きく、若手の研究者が35歳前後で参加し、40歳で卒業して自分の領域を確立するという意味でもタイミングがよかった。総括責任者の各研究者の研究内容だけでなく、若手研究者のキャリアディベロップメントも視野に入れた指導力は高く評価されるべきである。本プロジェクトに参加した研究者達は、本プロジェクトの経験により各自の研究分野、研究手法を確立するとともに、異なる分野の研究者との交流により研究者としての視野を広げ、その後の各自の研究の方向付けに成功している。

本プロジェクトに参加した19名の研究者、技術者の現在の所属機関は表4のとおりである。

表4 プロジェクト参加研究者、技術者の現在の所属機関

研究グループ	氏名	当時の役職	現所属機関 役職
計算神経生理	銅谷 賢治	グループリーダー	OIST 代表研究者
	Bapi R. S.	研究員	Hyderabad 大 准教授
	Schweighofer N.	研究員	南カリフォルニア大 准教授
	岡田 真人	研究員	東大 教授
	鮫島 和行	研究員	玉川大 COE 講師
	片山 直美	技術員	ルノー・ジャポン(株)
計算心理	今水 寛	グループリーダー	ATR 研究室長
	Puetz B.	研究員	Max-Planck 研究所
	小川忠	研究員	(不明)
	黒田 朋枝	研究員	滋賀医科大学
	大須 理英子	研究員	ATR 上級研究員
	吉岡 利福	研究員	(株)CSK
計算学習	Schaal S.	グループリーダー	南カリフォルニア大 准教授
	Vijayakumar S.	研究員	エジンバラ大 助教授
	Zeller M.	研究員	OTW Software Inc.
	内部 英治	研究員	OIST

琴坂 信哉	研究員	埼玉大 准教授
柴田 智広	研究員	奈良先端大 准教授
宮本 弘之	研究員	九州工大 准教授

表 4 を所属機関で整理した結果を表 5 に示した。

表 5 プロジェクト参加研究者の所属機関(括弧内は国外、内数)

所属機関	役職など
大学	教授1、准教授 1(1)、助教授 6(3)、研修医 1
研究機関	5(1)
一般企業	3(1)
不明	1

大学関係が 10 名と最も多く、研究機関と合わせると 15 名が研究関係の仕事を継続していることがわかる。

4.2.2.学位取得

ATR の連携講座の学生として、本プロジェクトに関連するテーマを担当し、その後そのテーマをベースにした研究で学位を取得した者は次のとおりである。

- ・森本 淳 (奈良先端大学院大学)
- ・樋口さとみ(奈良先端大学院大学)
- ・土居智和 (奈良先端大学院大学)
- ・杉本徳和 (奈良先端大学院大学)
- ・田中沙織 (奈良先端大学院大学)
- ・坂東誉司 (奈良先端大学院大学)
- ・田口進也 (京都大学)
- ・古川哲也 (京都大学)
- ・田端宏充 (京都大学)
- ・松本有央 (東京大学)