

『プロジェクト概要報告』

川人学習動態脳プロジェクト

総括責任者 川人 光男

20世紀は物理学の世紀であったといわれる。18世紀、19世紀に実験科学として着実な進歩を遂げてきた物理学が、相対性理論、量子力学、統計力学などの人類の歴史に残る偉大な理論を産み出し、自然科学の雄として、人々の自然観を根底から変えたのである。物理学を理解しない一般の人々にも日常的な物の考え方と、原子力、自動機械などの工学的技術として絶大な影響を与えている。残念ながら物理学は人々の外の世界に関する深い理解を与えてくれたが、人々の内なる世界に関して、自然科学的観点からは我々は相変わらず無知である。しかし、21世紀は脳の世紀となるはずである。20世紀後半に実験科学として長足の進歩を遂げた神経科学が理論研究者に刺激を与え理論物理学に匹敵する計算論的神経科学が開花するであろう。これは従来の物理学が単純な素子が一様に多数集まったシステムしか取り扱えなかったのに対して、複雑なシステムの科学を作り出すことになる。その影響は脳を守る（臨床医学への応用）、脳を創る（ニューロコンピュータ等の工学技術）に加えて脳を知るという人類の最も根源的な知への探究に通ずることになる。

脳の神経系の機能つまり情報処理の仕組みを明らかにするためには従来からの伝統的手法、神経生理学、神経解剖学、分子神経生物学などの大半はハードウェアレベルの研究に終始していて不十分である。計算論的アプローチの創始者である David Marr[1] は脳を理解するためには3つの異なるレベルでの理解が必要であると主張した。最上位のレベルは抽象的な計算理論である。そこでは計算の目標は何か、なぜそれが適切なのか、そしてその実行可能な方略の論理は何なのかということが問われる。中間のレベルでは入力と出力の表現および入力を出力に変換するのに用いられるアルゴリズムが決定される。つまり上位の計算理論がどのように実現されるのかを研究するのである。最下位のレベルは、アルゴリズムと表現がどのようにして物理的に実現されるかについて詳細に理解するいわば計算機回路の研究である。この3つのレベルを簡単に、計算理論のレベル、（表現と）アルゴリズムのレベル、ハードウェア（による実現）のレベルと呼ぶ。残念ながら提唱された計算論的アプローチは視覚研究の一部では成功したものの

脳研究全体にはいまだ大きなインパクトを与えているとはいえない。これには2つの大きな理由がある。第1は計算レベルの研究が下の階層から強い制約を受けないと成功し難いにもかかわらず、計算レベルに閉じて孤立していたこと。第2に視覚なら視覚だけに研究が閉じていて、脳の入力から出力までの首尾一貫した研究に至らなかったことである。

計算論的神経科学の上述の問題点を解決するためには、脳内の多数のモジュールを統合するために下位から上位と上位から下位への双方向の情報の流れを用いる理論の枠組みで、脳の入力から出力までの情報処理を首尾一貫して理解することが必要である。それには神経生理データの解析、心理・行動実験、計算理論研究、計算機シミュレーション、ヒューマノイドロボット制御実験を有機的に組み合わせ、Marrの3レベルを同時に研究してつないでゆくことが重要な鍵となる。

脳の理解は21世紀に向けて人類に残された最大の課題であるが、原理的にも最も困難な問題であると考えられ、従来手法に固執しているだけでは、大きな進歩は望めない。

1. 研究プロジェクトの内容

上記の基本概念に基づき、川人学習動態脳プロジェクトは、ヒト脳の高次機構を感覚運動変換を基本として解明することを主眼に研究を進めてきた。計算論的アプローチ、心理学・行動学の実験、神経生理学的研究、ロボティックスの実験の4つの研究手法を有機的に組み合わせ、ヒトの高次脳機能のなかでも、学習、思考、言語、意識、注意、コミュニケーションなどの機能を計算論的に解明することに挑戦してきた。

従来の知能の研究はそれが自然の知能に関してにせよ、人工の知能に関してにせよ、機能を入力から出力について縦割りに分割して、モジュールごとの研究を行ってきた。例えば、視覚入力の前処理、特徴抽出、パターン認識、記憶システムでの照合、行動の計画、運動系列の決定、運動の軌道の計画、座標変換、運動制御などである。このように問題を細分化することにより、1つ1つのモジュールの機能を切り出してきて、問題を取り扱える範囲に制限したのである。これが例えばDavid Marrの、「視覚の目的は二次元の画像から三次元世界を再構築することである」というような成功した計算理論を生み出す前提条件となったのである。しかしこれは同時にこれまでの計算理論の大きな欠点にもなっている。各モジュールが前後のモジュールとどのように相互作用して情報

を表現し交換しているかがわからないので、Marr の視覚の理論は記憶や運動・行動などと切り離されてしまったいびつなものになっている。記憶容量やスパース符号化などの理論について大きな進歩が得られた連想記憶神経回路モデルも、情報表現や他のモジュールとどう相互作用するかについてはアドホックな仮定に基づいたり、考慮されていなかったりする。

新しい計算理論と神経回路モデルはこのような過去の研究の欠点をふまえて複数のモジュールの統合の研究でなくてはならない。また、脳が自然な環境の中で入力から出力までを首尾一貫して、どのように情報処理を行なっているかを生態学的アプローチに基づいて明らかにすることが必要である。そこで、我々は次の4つの切り口が重要であると考え研究を進めてきた。

1) 生態学的アプローチ(Situatedness)

従来の、モジュールを階層的に分割するアプローチから、単純な行動から複雑な行動へとシステムを重層的(heterarchical)にとらえ、脳と生体が環境の中に配置されてこそ知性を発揮するという situatedness の考え[2] に基づいた研究を行なう。

2) 情報表現・情報のキャリアー・情報処理原理

脳での情報表現は中枢でどのようなになっているかを明らかにする。また発火頻度・周期発火のシンクロナイゼーション、カオス発火のコヒーレンスなどの様々の情報のキャリアーがどのような情報処理原理に活用されているかを明らかにする。

3) Symbol Grounding Problem

言語や行動計画の最中枢では情報表現はある程度シンボルに基づいているはずである。一方、認知や運動にかかわる中枢では、発火頻度に基づくパターン表現がなされている。シンボル表現とパターン表現の間はどのように表現の変換がなされているのかを明らかにしなければならない。

4) 脳研究のためのロボット研究

第1と第3の切り口に基づいて脳研究を行なうためには、環境の中に配置されていて、入力から出力まで首尾一貫した行動を実現でき、かつシンボル表現とセンサー・アクチュエータのパターン表現を可能とするテストベッド(ヒューマノイドロボット)が必要

となる。ロボット研究は、この意味で理想的であり、脳研究の計算論的手法の1つとして使うべきである。

2. 各研究グループの概要

本プロジェクトでは、前項で解説した(A)計算論的アプローチ、(B)心理学・行動学の実験、(C)神経生理学的研究、(D)ロボティックスの実験の4つの研究手法を有機的に組み合わせ、3研究グループに分かれ研究を進めた。3グループはそれぞれ、(A)と(C)、(A)と(B)、(A)と(D)の研究手法を重点としたものになっている。各々のグループの主な研究テーマとメンバー構成を以下に記す。

1) 計算神経生理グループ

大脳基底核学習モデルを提案し、生理実験と心理・行動実験、非侵襲脳活動計測によって検証・証明することを目指した。従来の理論モデルは眼球運動や手の到達運動など限られた機能の説明しか行なえなかったが、最近の知見によれば大脳基底核など運動制御だけにかかわると思われてきた脳部位も、運動と直接関係のない思考・言語・連想にも重要な役割を果たしていることが明らかになってきた。そこで従来の理論をこのような高次機能に拡張することを目指し、特に高次認知機能（手続き学習）の計算・神経回路モデルを、強化学習計算モデルと系列の学習に着目し研究を行った。

2) 計算心理グループ

視覚運動変換に関する様々の計算理論やモデルを検証するための心理行動実験、fMRIなどの脳機能非侵襲計測法を有機的に組み合わせ研究を進めた。小脳の新しい部分の計算原理として外界の（道具、視覚刺激、刺激の時間関係、他人の心、脳の他の部位）内部モデルの学習による獲得が考えられる。その内部モデルの存在、活動および、小脳大脳の機能的結合について研究を進めた。

3) 計算学習グループ

脳神経系の学習能力を理論的に明らかにする学習計算理論の研究。また視覚・聴覚・体性感覚と腕・体幹・眼球運動能力を持つ人間型ロボット（ヒューマノイドロボット）をテストベッドとした脳研究を進めてきた。特に視覚運動学習の強力な表現・アルゴリズム

ム・ハードウェアを提供するノンパラメトリック・ネットワーク・モデルについて研究を進めた。またヒューマノイドロボットの入力から出力への並列重層モジュールをどう学習的に統合するかを研究してきた。研究実施場所の一部は南カリフォルニア大学で、他は全てATR内にある。

3. 研究成果

この5年間を通じ、Nature、Proceedings of the National Academy of Sciences、Trends in Cognitive Sciences、Trends in Neurosciences、Journal of Neuroscience、Journal of Neurophysiology、Experimental Brain Research、Neural Computation、Physical Review Letter 等に論文が掲載された。

具体的には、ヒト小脳内内部モデルの存在証明、平衡位置制御仮説と内部モデル仮説の統合、インピーダンス制御の実験的証明、大脳皮質・大脳基底核・小脳の統一学習モデル、MOSAICによるコミュニケーションの研究、下オリーブ核のカオスによる低発火頻度符号化等の新しい成果が得られた。また、理論を計算の観点から実証するため、ヒューマノイドロボットを開発、見まね学習、前庭動眼反射、平滑性眼球運動などの実装に成功した。さらに、階層強化学習の実証として、起き上がりロボットを開発した。

4. 今後の展望

感覚運動学習の理論とデータを基礎にして、言語を含むコミュニケーションなどヒトの高次認知機能を解き明かす理論的な枠組が構築できた。具体的には、運動制御器官に限らない外界の対象物が小脳内に内部モデルとして獲得されること、複雑な環境や多数の道具と対処するために順モデルと逆モデルの対が多重にしかも階層的に学習されること、順モデルと逆モデルの相互作用は、運動制御、学習、軌道計画に限らず、コミュニケーション一般、さらにはバイオロジカルモーションの認知を含む視覚一般の解決法であることを示した。また、脳の異なる部位の異なる学習法、ニューロンの情報キャリアーなど非常に基本的な問題に正面から取り組んで新しい理論的枠組みを提案し続けてゆくつもりである。

上記の理論的な枠組は、心理実験、行動実験、脳活動非侵襲計測、神経生理実験など、有効な実験的手段を全て動員して、支持、検証、批判、反証、再構築のためのデータ蓄

積を行ってきた。従って、理論が理論のための理論、一般の神経科学者からは注目されず理解もされない狭いコミュニティでの活動に終わらず、理論家と実験家のあいだでアイデアとデータが何度もキャッチボールされる健全で建設的な新しい学問分野の構築に貢献できたのではないかと自負している。

一方理論を計算の観点から実証するためには、ロボット実験が最終的には不可欠であるとの信念から、ロボット研究グループと他の2つのグループの相互作用も深化させてきた。2年半をかけて完成させたヒューマノイドロボットは、研究の求心力として、様々な理論的な努力、実験データを統合する役割を果たしてきた。

これらの成果は、我々だけのためであるとは考えていない。脳の理論的研究、計算論的神経科学が原理的には重要であることはどんなに頑迷な分子生物学者、還元主義論者であっても認める所であろう。しかし、今や成果を出す事が期待される時代である。計算論的な研究をしたから初めて明らかになった新事実、新しい理論的枠組み、新しいロボットを世の中に示さねばならない。これが実現すれば、計算論的神経科学が、日本のみならず、世界でもっと重要視され、神経科学の王道を築くことになるであろう。当プロジェクトはここで一旦終了するが、このさらなる目標に向けて、新しい道を確認としたものにしたい。