

研究課題名 小脳における運動学習の計算機構の解明に関する研究  
所属研究機関名 独立行政法人 産業技術総合研究所  
研究者氏名 竹村 文

## 研究計画の概要

### 研究の趣旨・目的

この世の中には、情報を処理するための優れた装置として、「脳」と「コンピュータ」がある。現代社会においてコンピュータはめざましい勢いで普及しており、今後、人間の生活のあり方を変えていくと考えられる。脳とコンピュータの大きな違いは学習機能にある。本研究では、脳神経回路がシステム全体としてどのように運動学習を達成させているのかを解明することを目的とする。学習というコンピュータにない優れた脳機能の仕組みを理解する本研究は、今後の情報工学の発展につながる意義のある研究である。また、学習というテーマは脳科学分野の中心的課題であり、解明が期待されている課題である。

本研究で対象とする学習は、“運動学習”である。動物が外界の状況に適して運動するためには、運動学習が必要である。なぜなら、脳は、適切な運動指令を構築するメカニズムを学習によって獲得しているからである。この運動制御メカニズムは、確立された後も外界の情報によって修飾される。そのため、動物は様々な変化する環境の中で、その時々に適した運動を行うことができる。

本研究の目的は、入力から出力まで眼球運動制御系のシステム全体の振る舞いを通して、脳の学習機能のメカニズムを理解することである。そのために、運動学習を行っている覚醒サル複数の脳内領域から、電気生理学的実験によって実際の脳活動を計測する。それらの生理実験データを計算論に基づいて解析し、学習前、中、後を通して脳活動がどのように変化していくかを定量的に解析する。それらの結果に基づいて、計算機シミュレーションを行い、学習を通して運動誤差を最小にしていけるために、脳が神経機構をどのように変化させているかを明らかにしていく。

### 研究計画の概要

本研究では、運動学習が小脳で行われているとの仮説にたち、最終的には、学習前、中、後を通して小脳同一細胞からニューロン活動を記録し、小脳の神経回路における学習の計算機構を解明する。

まず新しい実験システムを構築し、運動学習課題をサルに行わせ、行動実験を通して最大効率の運動学習課題を確立する。なぜなら、同一のニューロンから神経活動を記録できる時間内で、学習の前、中、後の変化を観察する必要があるため、短時間で運動学習が完了する課題が必要だからである。

次に、小脳へ入力を送っている脳領域からニューロン活動を記録し、学習前後の小脳への入力信号がどのように変化しているかを把握する。そのために、行動実験で確立した課題を用いて、まず小脳へ入力を送っている大脳皮質後方連合野の一部である MST 野(Medial Superior Temporal Area)からニューロン活動を記録する。その発火活動が学習を通して、どのように変化するかを定量的に解析し、学習前後に小脳が受け取っている情報を理解する。

そして、学習の座と考えている小脳腹側傍片葉のプルキンエ細胞からニューロン活動を記録する。小脳のプルキンエ細胞から記録したシンプルスパイクとコンプレックススパイクについて、それぞれ定量的な解析を行い、発火活動の時間パターンが、運動学習の原因である視覚入力または結果である眼球運動出力とどのような関係にあるか、学習を通してその関係がどのように変化するのか、を数理科学的に解析する。

これらの実際の電気生理実験データに基づいて、小脳腹側傍片葉内のプルキンエ細胞集団の神経回路網を計算機内で構築し、脳全体の機能を表現する計算機シミュレーションを行う。その結果、運動学習中の脳の働きを包括的にとらえ、システムとしてどのように機能しているのか、脳の中でどのような計算が行われ学習が起きているのか、運動学習時に誤差を最小にしていける脳の戦略(計算機構)を明らかにする。

研究計画の詳細報告

(単位:百万円)

研究項目	所要経費					
	13年度	14年度	15年度	16年度	17年度	合計
1. 新実験システムの構築	11.3	5.2	1.3			17.8
(1)前庭および視覚刺激装置の設置	11.3					11.3
(2)前庭・視覚刺激装置システムの開発および改良		5.2				5.2
(3)前庭刺激装置システムの開発および改良			1.3			1.3
2. 行動実験および解析	9.7	4.0	3.9			17.6
3. 学習課題中のニューロン活動記録実験		10.8	9.6			20.4
(1)小脳へ入力信号を送る、大脳皮質 MST 野からの記録		10.8	4.5			15.3
(2)小脳腹側傍片葉からの記録			5.1			5.1
4. データの定量的解析			5.2			5.2
(1)学習に関連したニューロン活動の定量的解析			5.2			5.2
(2)シミュレーション						
(3)学習モデルの構築の検証						
所要経費(合計) (間接経費を含む)	21	20	20			61

## 研究成果の概要

### 研究成果の概要

1年目の平成13年度は、運動学習の計算機構の解明のために、必要な実験システムの設計を行い、構築に取りかかった。具体的には、コンピュータによって制御する視覚刺激装置、サルの行動実験用実験台、眼球運動計測装置、などを整備した。システム構築と平行しながら、サルのトレーニングを行った。覚醒サルを用いた行動実験を行うために、頭部固定用ヘッドホルダーと、眼球運動を定量的に計測するためのアイコイルを手術によって取り付けられた。サルの視野の広い範囲に視覚刺激を呈示し、さまざまな視覚刺激パターンで動かすことによって、短時間で最大効率の学習が得られる課題を調べ、タスクの確立を目指した。

2年目の平成14年度は、構築した行動実験システムに加え、小脳のニューロン活動をより詳細に調べるための前庭刺激装置を整備した。また、脳内の単一ニューロン活動のデータを収集する慢性電気生理実験設備を、行動実験システムに組み込んだ。本研究の対象である追従眼球運動の学習過程を捉える上で、学習の座と考えられる小脳のニューロン活動を記録する前に、まず小脳の上流(より感覚入力側)の領域における運動学習中の変化を確かめることが必須である。そのために、ニューロン活動記録用のチャンパーをサルの頭部に装着する手術を行い、大脳皮質後方連合野の一部であるMST野から学習の前後を通して、同一細胞から単一ニューロン活動を記録した。このデータの蓄積が、小脳で記録実験をする際の基礎データになる。

### 波及効果、発展方向、改善点等

運動学習が脳のどの部位で起こっているのかについては、20年間ほど前に小脳が運動学習の座であるか否かが問われ、現在も論争の只中である。動物を使って脳の中の神経活動を直接観察したり、脳機能を不活化させて行動を観察する生理学者、または脳を情報処理を行う臓器ととらえた情報工学者などの理論家が、数多くこの問題にアプローチしてきている。しかし、実験に用いる学習課題が不適切で、実際に記録したデータの解釈が困難であったり、理論家と生理学者の考えがかみ合わなかったりして、未だに結論がでていない。

本申請者のグループも含めた研究者の最近の研究では、洗練された実験パラダイムを用いることによって、実際に記録した生理データを計算理論に基づいて解析することが可能になり、解釈しやすい実験結果を得ることができている。特に本申請者は、これまでの研究を通して脳をシステムとしてとらえ、感覚情報がどのように運動情報へと変換されていくのか、運動制御のしくみを包括的に理解してきた。そうして初めて、運動学習中に小脳がどのような情報をどのように表現しているかを明らかにする本研究を展開することができた。

本研究では、信頼できるデータを理解しやすい手法によって解析し、その結果および議論を一流欧文誌に発表していく。また、学会発表・論文を通してその成果の普及に努める。そのことによって、国内外を問わず、多くの研究者たちに影響が及ぶと考えられる。本研究の成果をうけて、脳の学習機能のしくみへの理解が大きく前進することになると考えている。

また本研究の発展方向としては、解明された脳の学習機能のしくみを、情報技術にうまく応用し、人間の社会生活に役立てていくことが可能だと考えている。現代社会にはコンピュータが広く取り入れられ、その能力はめざましい勢いで発展している。今後は人間的な生活の場にはいりこみ、人間の生活の在り方を変えていくと考えられる。脳は情報処理能力を持つという点で、コンピュータとよく対比されるが、両者の大きな違いの1つには学習機能がある。現在のコンピュータは人間が使い方を学習し、人間がコンピュータに適應している。コンピュータにない優れた脳機能である学習のしくみを理解することによって、将来、脳と相性のよい情報技術が創り出され、人間の可能性を開発できると考えられる。

1年目、2年目の研究成果としては、実験システムの構築と整備が順調に進んでおり、ニューロン活動の記録実験を始めることができた。最終目標とする小脳のプルキンエ細胞からの記録を行っていないが、そこに至る入力信号を解析する上でMST野からのニューロン活動の記録実験は非常に重要であると考えている。学習課題として、現在は速度適応しか行っておらず、小脳での記録実験を始めるまでには方向適応についても適切な課題を確立していきたいと考えている。方向適応課題の確立と、前庭刺激装置の制御装置の設計および構築は、今後の課題である。

## . 研究成果発表等の状況

### (1) 研究発表件数

	原著論文による発表	左記以外の誌上発表	口頭発表	合 計
国 内	1 件	1 件	1 件	3 件
国 際	8 件	0 件	3 件	11 件
合 計	9 件	1 件	4 件	14 件

### (2) 特許等出願件数

合計 0 件 (うち国内 0 件、国外 0 件)

### (3) 受賞等

0 件 (うち国内 0 件、国外 0 件)

### (4) 主な原著論文による発表の内訳

#### 国内誌(国内英文誌を含む)

1. 小高泰、竹村文、和田佳郎、河野憲二:「The Effect of the Visual Scene on the Translational Vestibulo-Ocular Reflex」, Jpn.J.Physiology, 51,17,(2002)

#### 国外誌

2. 竹村 文、河野 憲二、C. Quaia、F. A. Miles:「Population Coding of Vergence Eye Movements in Cortical Area MST」, Levels of Perception , 257-270,(2002)
3. 竹村 文、河野 憲二:「Sensory-to-motor processing of the ocular-following response」, Neuroscience Research, 43(3), 201-206,(2002)
4. 竹村 文、河野 憲二、C. Quaia、F. A. Miles:「Population Coding in Cortical Area MST」, ANNALS NEW YORK ACADEMY OF SCIENCES , 956, 284-296,(2002)
5. 竹村 文、井上由香、河野 憲二:「Visually driven eye movements elicited at ultra-short latency are severely impaired by MST lesions」, ANNALS NEW YORK ACADEMY OF SCIENCES , 956, 456-459,(2002)
6. 山本 憲司、小林康、竹村 文、河野 憲二、川人光男:「Cerebellar Plasticity and the Ocular Following Response」, ANNALS NEW YORK ACADEMY OF SCIENCES,978,439-454,(2002)
7. 竹村 文、井上由香、河野 憲二、C. Quaia、F. A. Miles:「Change in neuronal firing patterns in the process of motor command generation for the ocular following response」, J. Neurophysiol. , 86(4), 1750-1763,(2001)
8. 竹村 文、井上由香、五味裕章、川人光男、河野 憲二:「Single-Unit Activity in Cortical Area MST Associated With Disparity-Vergence Eye Movements:Evidence for Populating Coding」, J. Neurophysiol. , 85, 2245-2266,(2001)
9. 山本 憲司、小林康、竹村 文、河野 憲二、川人光男:「Computational studies on the acquisition and adaptation of ocular following responses based on the synaptic plasticity in the cerebellar cortex」, J. Neurophysiol.,87, 1554-1571,(2001)

(5) 主要雑誌への研究成果発表

Journal	Impact Factor
J. Neurophysiol.	3.517
Neuroscience Research	1.770

小脳における運動学習の計算機構の解明に関する研究

