

## 学位論文の要旨

氏名

DAI LULIN

学位論文題目

物体認識に関わる脳内神経機構及びその働き

本論文は、物体の脳内表現及びその働きについて行動学的、電気生理学的な手法を用いて、調べた結果をまとめたものである。ヒトの視覚情報処理に似ているニホンザルを対象に、我々は様々な物体弁別経験を与え、それに伴った行動学及び電気生理学的な変化を調べた。論文は5つの章で構成されている。研究の背景から、行動学的な結果、単一神経細胞レベル・細胞集団レベルの電気生理学的な結果をまとめてある。

第1章は、研究の背景について述べている。網膜、外側膝状体 (LGN) を経て運ばれる視覚情報は、大脳皮質で2つの経路に分かれる。1つは背側にあり、皮質背側経路と呼ばれ、場所や空間関係などの視覚情報を処理する。もう1つは腹側に位置し、第一次視覚野から側頭葉下部皮質 (inferotemporal cortex: IT) に流れる経路で、形状や色などの情報を処理する。側頭葉下部皮質は腹側経路の最終段階に位置し、物体の認識や識別に重要である。ITは前頭前野や海馬など多種感覚入力を受ける領野に神経投射するため、純粋な視覚的領野として最も高いレベルである。本研究では、ITにおける物体の表現について調べた。さらに、このような表現に対して、様々な視覚的弁別経験による影響についても調べた。

第2章は、三次元物体像に対するIT単一神経細胞の応答を調べた結果について述べた。さらに、長期間の物体弁別経験がもたらす単一神経細胞の応答の変化も調べた。ITは細胞構築学的に前半部 (anterior part of inferotemporal cortex: AIT) と後半部 (posterior part of inferotemporal cortex: PIT) に分かれる。研究は、観察角度に対する単一細胞反応のチューニングを中心に、AITとPITの差異を調べた。PIT細胞の応答は観察角度

の違いに対する許容性を示さなかったが、AIT細胞は $60^{\circ}$ ~ $90^{\circ}$ の観察角度許容性を示した。AITの大半がPITから神経投射を受けるため、この結果によって、AIT細胞の刺激選択性の形成に関するモデルを立てた。

第3章では、PITおよびAITの細胞集団の刺激選択性とそのダイナミクスについて調べた。観察角度に依存しない物体認識の脳内メカニズムを理解するために、単一神経細胞活動から神経細胞集団の動きを知ることは重要である。脳における刺激画像間の距離を評価するために、細胞集団における反応の類似性を表すピアソンの相関係数 ( $r$ ) を導入した。各刺激に対する細胞集団の応答からポピュレーションベクトルを生成し、ベクトルペア間のピアソン相関係数を計算した。 $1-r$ は刺激画像間の脳内距離とした。距離が小さいほど、2つの画像に対する細胞集団の活動パターンは類似している。AITにおいて、同じ物体の異なる観察角度画像間の距離は、異なる物体の異なる観察角度画像間の距離よりも有意に小さかった。AITの細胞集団において、観察角度間隔 $90^{\circ}$ までの観察角度許容性が表現されていることが示された。一方、PITの細胞集団においては $30^{\circ}$ 程度までの観察角度許容性が表現された。

第4章では、刺激選択性のダイナミクスを解析した。用いた刺激セットのうち、神経細胞の最大の応答を引き起こす刺激画像を、応答の時間経過を追って解析する方法を提案した。刺激呈示に対して応答の100-280 msを初期段階、280-660 msを後期段階として、最大の応答を引き起こす視覚刺激を比較したところ、同じ画像に反応する細胞、同じ物体の異なる観察角度像に反応する細胞、異なる物体の同じ観察角度像に反応する細胞、異なる物体の異なる観察角度像に反応する細胞の4つのタイプにAIT神経細胞の応答は分けられた。さらに、応答を20 msのタイムウインドウに分け、物体セット内の刺激画像のうち最大の応答を引き起こす刺激画像を時間経過を追って解析した。

第5章においては、本研究の結果について総括した。事前の経験の後、AITの単一

細胞レベルでは30°～60°の観察角度許容性、細胞集団レベルでは90°までの観察角度許容性が示された。PITは単一細胞レベルでの観察角度許容性を示さなかったが、細胞集団レベルでは30°程度の観察角度許容性を示した。AITの単一神経細胞において、研究で使  
用した物体セットに対し最大の応答を引き起こす刺激画像を時間経過を追って解析し  
た。

## Summary of Doctoral Dissertation

Title of Doctoral Dissertation:

Neuronal basis for object recognition and its functions

Name: DAI LULIN

Neuronal basis for object recognition and its functions have been investigated with the use of behavioral and electrophysiological method. To understand the underlying neuronal mechanism on object recognition, I selected Japanese monkey as experimental animal, since it has similar visual system as human beings. Monkeys were asked to have various prior experiences through three types of object discrimination tasks before electrophysiological recording. The behavioral change and the electrophysiological change in inferotemporal cell activity were systematically investigated. This thesis summarizes the results. The thesis consists of five chapters. The research background, behavioral results, electrophysiological results at the level of single cells and at the level of cell population are summarized in different chapters.

Chapter 1 introduces the background of the research. Starting from the retina and lateral geniculate nucleus (LGN), information on outside visual environment first reaches the cerebral cortex at the primary visual cortex. There are two separate cortical pathways processing visual information in the cerebral cortex. One runs dorsally from the primary visual cortex to the parietal lobe. It is called as the cortical dorsal pathway, which is important for spatial or moving information processing. The other locates ventrally running from the primary visual cortex to the inferotemporal cortex, which processes mainly the information on shape and/or color. The inferotemporal (IT) cortex is the final stage of the ventral pathway, which is critical for object recognition and identification. IT is thought to be the highest level of pure visual area because its neuronal output goes to the prefrontal cortex, hippocampus and other cortical areas which process not only visual but also other sensory information. In this study, we first investigated the representation of objects in IT cortex, and further examined the stability of such representation by investigation of the changes of cell stimulus selectivity accompanying to object discrimination learning.

Chapter 2 describes the results in single-cell level. The representation of three-dimensional object was investigated through investigation of single cell stimulus selectivity. Furthermore, we also investigated the changes in the responses of single neurons after long-term object discrimination experiences. Cytoarchtonically, IT can be divided into the anterior part of the inferotemporal cortex (AIT) and the posterior part of the inferotemporal cortex (PIT). We also examined the difference in the properties of stimulus selectivity between AIT and PIT, with a focus on response tuning across changes in viewing angle. As a result, the response of PIT cells did not show tolerance to the change in viewing angle. In contrast, AIT cells showed response tolerance of 60° - 90° in viewing angle. As AIT receives mainly the neuronal projection from PIT, this result provides a possible explanation on the formation of cell stimulus selectivity in AIT.

In Chapter 3, we investigated the stimulus selectivity and its dynamical changes based on the cell population activity. To understand the underlying neuronal mechanism for view-invariant object recognition, not only the activity in single-cell level, it is important to know the behavior of cell population activity. To evaluate the distance between internal representations of two stimulus images, Pearson's correlation

coefficient ( $r$ ) representing the similarity of responses in the cell population was introduced. A population vector was generated from the responses of  $n$  cells to each stimulus, and a Pearson correlation coefficient ( $r$ ) was calculated between the vector pairs.  $1 - r$  is defined as the distance between stimulus images. Smaller distance denotes more similar internal representations of two stimulus images. In AIT, the distance between different viewing angle images of the same object was significantly smaller than the distance between different objects in the same viewing angle difference. In AIT, the responses in cell population showed the activity tolerance in the range of viewing angle up to  $90^\circ$ . On the other hand, the tolerance of response was in the range of up to  $30^\circ$  in PIT.

Chapter 4 discusses the dynamics of stimulus selectivity. We proposed a method identifying the optimal stimulus image in the stimulus set with temporal resolution as high as several ten milliseconds. We divided the response time period into the 100 - 280 ms as the early phase and 280 - 660 ms as late phase. We found that IT neurons could be divided into four types depending on the stimulus selectivity in the early and late phases: cells selective to the same viewing angle image of the same object, cells selective to different viewing angle images of the same objects, cells selective to the same viewing angle images but different objects, and those selective to different viewing angle images of different objects. Furthermore, the response window was divided into every 20 ms time windows, and the stimulus image causing the maximum response among the stimulus images in an object set was analyzed over time.

We made final conclusion of this study in Chapter 5. After the prior experience, in AIT, viewing angle tolerance of  $30^\circ - 60^\circ$  was confirmed at the single-cell level, and viewing angle tolerance of up to  $90^\circ$  was confirmed at the cell population level. PIT did not show a viewing angle tolerance at the single-cell level, but with a viewing angle tolerance in the viewing angle range of about  $30^\circ$  at the cell population level. In IT, the change in stimulus selectivity of single cells was analyzed with high temporal resolution.