

サル V4 野の神経反応が示す次元数の推定 Dimensionality estimation of neural responses in monkey V4

樹神 篤(PY)¹⁾, 酒井 宏²⁾

¹⁾ 筑波大学大学院情報理工学位プログラム

²⁾ 筑波大学大学院システム情報工学研究科

E-mail: kodama@cvs.cs.tsukuba.ac.jp

Abstract— The visual area V4 integrates multiple visual features and constructs proto-objects. We investigated the representation of visual information in V4 by estimating the intrinsic dimensionality which indicates the degree of complexity. We applied principle component analysis to the neural spikes in response to natural image patches and their silhouette patches. The estimated dimensionality was approximately 40, around one third of that reported in the cortical area IT, for non-normalized neural responses, and 200 for variance-normalized neural responses. A certain part of the principle components appeared mutually dependent across visual features.

Keywords— Vision, V4, Dimensionality, Electrophysiology

1 はじめに

「次元数」とはある情報全てを表現するために必要な変数の数のことを指す。物体認識に関与する視覚情報は、腹側経路において低次元の情報から高次元の情報へと変換されていると考えられる。視覚システムの始点である網膜では、波長特性の異なる 3 種類の錐体細胞によって 3 次元の情報で表現されているとすることができる。高次視覚野である皮質 IT 野のオブジェクト表現の次元は 100 程度であることが報告されている[1]。しかし、中間過程である皮質 V1 野, V2 野, V4 野などでは、視覚情報が何次元の情報として表現されているのかは良く判っていない。本研究では、脳内における情報表現の形成を理解することを目的として、自然画像とそのシルエット画像に対するサル中間皮質 V4 野の神経反応から、V4 野において表現されている情報の次元数を推定した。

2 電気生理実験

本研究では、先行研究で実施された電気生理実験[2]の記録を解析対象とする。記録は、鎮静不動化された 2 匹のニホンザルを被験体として、微小多電極から得た細胞外記録である。呈示刺激は、自然画像の一部を切り出した 210 枚の Natural 刺激と、それらの前景と背景を白黒に塗りつぶした 420 枚の Silhouette 刺激である(図 1)。本稿ではこれらの 630 枚の刺激を合わせて Patch 刺激と呼ぶ。

3 解析手法

生理実験で記録した細胞のうち Visual Response が有意であることを条件に、528 個の細胞を解析対象とした。また、各刺激に対する細胞の神経反応は、刺激呈示後 50~250ms の 10 トライアル分の平均スパイク数として定義した。

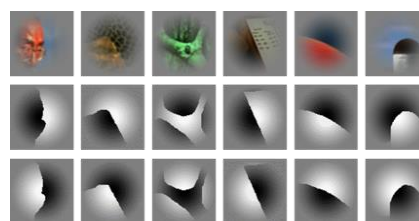


図 1 呈示刺激の例
Natural 刺激(上段)と Silhouette 刺激(中下段)

3.1 主成分分析を用いた次元数の算出

はじめに、 m 個の刺激に対する n 個の細胞の神経反応を要素として持つ $m \times n$ のデータ行列に対して主成分分析を行った。次にどの主成分を有効な次元とみなすかを決定することで次元数を算出した。本研究では、先行研究[1]と同様の平行分析を用いた方式と、累積寄与率が 90%を超えるまでを次元として採用する方式の 2 種の決定方式を検討した。

主成分分析を用いる際、データ行列の各変数の平均を 0、分散を 1 に変換する正規化が行われる場合がある。本研究では各細胞の神経応答について平均を引いた後に、分散の正規化を行う場合と行わない場合の両方について検討した。

3.2 無限データサイズにおける次元数の外挿推定

先行研究[1]では、細胞数と刺激数の増加に伴い増加する次元数に対して、非線形関数(式 1, 2)をフィッティングさせることでその収束点からデータサイズを限りなく大きくした場合の次元数(y)を推定した。

$$y = a \left[1 - \left(\frac{b}{\exp(x^c/d) - 1 + b} \right)^e \right]^f \quad (1)$$

$$y = a [\tanh(bx^c + d \log([x + 1]^e))]^f \quad (2)$$

まず、各細胞数における次元数(y)について、xを刺激数としてフィッティングを行うことで、刺激数が大きくなった場合の次元数の収束値を求めた。次に、その収束値をy、細胞数をxとして、再びフィッティングを行うことで、刺激数と細胞数の両方が限りなく大きくなった場合の次元数を推定した。

このような次元推定はフィッティングの初期値に依存する。したがって、本研究ではグリッドサーチを採用し、2段階目のフィッティングで得られた収束値のうち誤差の小さい方から5つの結果を採用した。さらに、上記の順序とは逆に、細胞数→刺激数の順序でも次元推定を行った。合わせて20回の推定の中央値を次元数とした。

4 結果

Patch 刺激に対する神経反応から平行分析を用いて算出した次元数を図2に例示する。縦軸を次元数、横軸を刺激数として、各細胞数毎の次元数をプロットした。次元数の増加幅は刺激/細胞数が大きくなるにつれて小さくなり、上述の外挿推定が適用可能である。外挿から得られた次元数を、各条件ごとに表1に示す。分散の正規化をしない場合(非正規化条件)は、全ての条件で次元数は30~40程度だった。これは同条件で得られたITの次元数[1]の1/3程度である。正規化をした場合(正規化条件)はPatch (P=N+S)刺激では180~200程度、Natural(N)刺激とSilhouette(S)刺激ではそれぞれ100程度であった。

刺激カテゴリ間の次元の直交関係を考慮して次元数を計算するpattern aggregation method(PAM) [3]を用いると、N刺激とS刺激とで共通な次元の数は、非正規化条件で34%、正規化条件で8%であった。このことは、正規化条件では刺激カテゴリ間で相当独立な主成分が得られていることを示す。これは、推定次元数が $P(180) \cong N(90) + S(93)$ であることと一貫している。

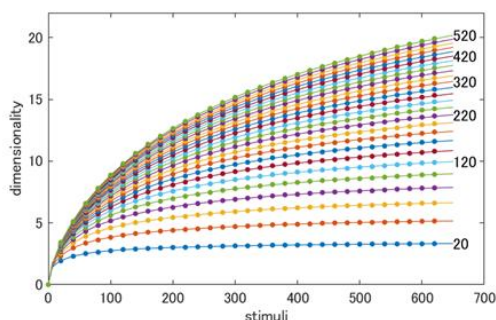


図2 各データサイズにおける次元数

表1 次元数の外挿推定の結果

		Patch	Natural	Silhouette
分散の正規化なし	平行分析	39.5	39.5	39.0
	90%閾値	34.0	28.0	29.0
分散の正規化あり	平行分析	179.5	90.0	93.0
	90%閾値	197.5	100.0	109.5

平行(P)分析法と90%閾値(T)法の推定結果は同程度であった。P法での次元の累積寄与率は、非正規化条件では70%~86%(刺激/細胞数に依存)で、T法と同程度であった。正規化条件では43%~71%で、T法(90%)の2/3程度なので、T法では次元数が過大に評価されている可能性がある。

5 まとめと考察

本研究では、主成分分析を用いてV4野で表現される情報の次元数の推定を行った。推定次元数は40程度となり、同条件下のIT野の1/3程度であった。一方、神経反応の分散を正規化をした場合は200程度と推定された。これはV4野の神経表現は少なくとも40個、多くても200個程度の理想的な細胞によって実現可能であることを示唆する。

神経応答の正規化は、全ての細胞の寄与を同程度に近づける。正規化の影響を見るために、各細胞の主成分への寄与を図3に示す。非正規化条件では、主成分(ある画像特徴と見なせる)に対して少数の細胞が発火している。しかし、正規化すると殆どの細胞が発火して、視覚皮質で見られるスパース性が欠如することが判る。応答分散の正規化は、視覚系の次元算出には適さない可能性がある。

次元数の決定では、機械的な90%閾値法よりも、誤差評価に基づく平行分析法の方が適当と考えられるが、いずれも主成分の分散評価にすぎない。これらの解析手順も含めて、視覚野の情報表現の基底として相応しい主成分であるかという点に着目して、さらに議論していく必要がある。

参考文献

- [1] Lehky, S. R., Kiani, R., Esteky, H., & Tanaka, K. (2014). Dimensionality of object representations in monkey inferotemporal cortex. *Neural Computation*, 26(10), 2135-2162.
- [2] Yamane, Y., Kodama, A., Shishikura, M., Kimura, K., Tamura, H., & Sakai, K. (2020). Population coding of figure and ground in natural image patches by V4 neurons. *PLoS ONE*, 15(6), e0235128.
- [3] Cowley, B. R., Smith, M. A., Kohn, A., & Yu, B. M. (2016). Stimulus-Driven Population Activity Patterns in Macaque Primary Visual Cortex. *PLoS Computational Biology*, 12(12), e1005185.

謝辞

電気生理実験データを提供して頂いた大阪大学の田村弘先生、山根ゆか子先生に感謝の意を表する。

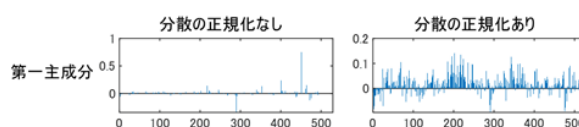


図3 Patch 刺激に対する第一主成分の係数
横軸は各細胞を表す。係数の絶対値は主成分に対する各細胞の寄与の程度に対応する。