

ハイパーコラム間相互作用による方位選択性への影響

Influence of Inter-Hypercolumn Interaction on Orientation Selectivity

瀧山 健 (PY)[†], 成瀬 康^{††}, 岡田 真人^{†,††}

Ken Takiyama(PY), Yasushi Naruse, and Masato Okada

[†] 東京大学大学院新領域創成科学研究科

^{††} 情報通信研究機構 未来 ICT 研究センター

^{†††} 理化学研究所 脳科学総合研究センター

takiyama@mns.k.u-tokyo.ac.jp

Abstract—

In this study, we propose a multi-hypercolumns model in which the hypercolumns interact with each other through horizontal connections. Each hypercolumn showed orientation tuning according to stimulus orientation. We injected stimuli with different orientations to the hypercolumns in the model. We found that the difference of the orientations represented on the hypercolumns was smaller than that of the orientation of the stimuli. This result suggests that horizontal connections between hypercolumns influence orientation tuning.

Keywords— hypercolumn, horizontal connection, mexican hat

1 はじめに

一次視野内には方位選択性を示すニューロンが存在し、それらが集まって 180 度の方位をカバーするハイパーコラム構造があることが知られている。そして、ハイパーコラム内相互作用としてメキシカンハット型の相互作用が存在することが示唆されている。メキシカンハット型の相互作用を用いることで、今まで様々な解析や応用がなされてきた。例えば一次視野ニューロンの方位選択性の形成のメカニズム [1], シンファイヤーチェーンにおける信号伝播のメカニズム [2] はメキシカンハット型相互作用モデルを用いることにより明らかにされている。このように、メキシカンハット型相互作用は脳のモデルとしても妥当性があり、また同時に様々な応用がなされており、有用性が明らかにされてきている。

しかし一方、一次視野内にはハイパーコラム間に水平結合があることも知られている [3]。それ故、一次視野のモデルを構築するためにはハイパーコラム内相互作用を考えるだけでは不十分であり、ハイパーコラム間の相互作用も含めたモデルの構築が必要である。しかしハイパーコラム間相互作用まで含めたモデルはほとんどない。

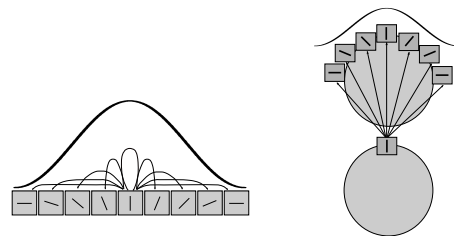


図 1: 左図: ハイパーコラム内相互作用. 右図: ハイパーコラム間相互作用. 方位の近いスピンは正の強い結合をもち, 方位の遠いスピンは負の結合をもち.

本研究ではメキシカンハット型相互作用をハイパーコラム内相互作用としてもち、さらにハイパーコラム間相互作用としてもメキシカンハット型相互作用をもつマルチハイパーコラムモデルを提唱する。ハイパーコラム間に相互作用がない場合、本モデルで用いたハイパーコラムに方位 θ をもつ刺激を加えるとハイパーコラムは刺激のもつ方位 θ に孤立局在興奮がたつことが知られている [1]。本研究では各々のハイパーコラムに異なる方位をもつ刺激を加えたとき、各々のハイパーコラムにたつ孤立局在興奮がハイパーコラム間相互作用によりどのような挙動を示すかを解析した。

2 モデルと理論

本モデルでは、1つのハイパーコラムを方位選択性をもった N 個のニューロンで表現する。本モデルではニューロンの発火、非発火をイジングスピン ($\sigma_i^k \in \{+1, -1\}$) で表現し、発火がスピンの $+1$ に、非発火が -1 に対応する。本研究では2つのハイパーコラムがお互いに相互作用するモデルを考える。

ハイパーコラム k に属する i 番目のスピンを σ_i^k とする。また、ハイパーコラム内相互作用を J 、ハイパーコラム間相互作用を K とするとき、系全体のハミルトニアンは (1) 式のようなになる。

$$H = -\frac{1}{2} \sum_{k=1}^2 \sum_{i \neq j}^N J_{ij} \sigma_i^k \sigma_j^k - \sum_{i,j}^N K_{ij} \sigma_i^1 \sigma_j^2 - \sum_{k=1}^2 \sum_n^N h_i^k \sigma_i^k \quad (1)$$

ここで、 h_i^k とは、コラム k に属するスピン i への刺激であり、 $h_i^k = c(1 - e(\cos 2(\theta_i - \theta^k)))$ であらわされる。 c, e, k は各々、刺激の強さ、コントラストの強さ、刺激のもつ方位を表す。ここでいう刺激とは、角度 θ をもった線分の刺激を意味する。また、 θ_i とは、ニューロン i の最適方位である。

ハイパーコラム内相互作用 J_{ij} 、ハイパーコラム間相互作用 K_{ij} は (2) 式、(3) 式で与えられる。

$$J_{ij} = \frac{J_0}{N} + \frac{J_1 \cos 2(\theta_i - \theta_j)}{N} \quad (2)$$

$$K_{ij} = \frac{K_0}{N} + \frac{K_1 \cos 2(\theta_i - \theta_j)}{N} \quad (3)$$

3 理論

各々のハイパーコラムに異なる方位をもつ刺激を加えたときの挙動を解析するため、秩序変数として次式であらわされるパラメータを導入する。 $(k=1,2)$

$$m_0^k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sigma_i^k \quad (4)$$

$$m_c^k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sigma_i^k \cos 2\theta_i \quad (5)$$

$$m_s^k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sigma_i^k \sin 2\theta_i \quad (6)$$

m_0^k はハイパーコラム k 内にあるニューロンの平均発火率を表す秩序変数である。 m_c^k, m_s^k は各々発火パターンのフーリエ 2 次モードの係数であり、空間的な発火パターンの偏りを表すパラメータである。つまり、局所的な発火パターンの揃い具合を表すパラメータである。ここで更に次式で与えられる新たな秩序変数を導入する。

$$m_1^k = \sqrt{(m_c^k)^2 + (m_s^k)^2} \quad (7)$$

$$\phi^k = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{m_s^k}{m_c^k} \right) \quad (8)$$

m_1^k, ϕ^k は各々ハイパーコラム k におけるスピンの局所的なスピンのそろい具合、ハイパーコラムがもつ方位である。ハイパーコラム間に相互作用がないとき、ハイパーコラムに方位 θ をもつ刺激を加えるとハイパーコラムのもつ方位 ϕ は θ と一致する。ハイパーコラム間相互作用があるときにハイパーコラムのもつ方位の変化を調べた。

4 結果

パラメータは各々 $J_0 = 0.0, J_1 = 4.0, K_0 = 0.0, \theta^1 = 0.0, c = 1.0, e = 0.5$ としている。 J_0, J_1 の選び方は m_1

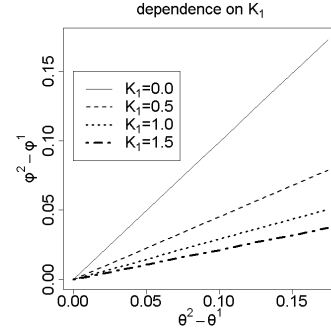


図 2: 回転角度の K_1 依存性。

が 0 でない値をとるパラメータとした。 K_1 を変化させたとき、刺激のもつ方位の差 ($\theta^2 - \theta^1$) とハイパーコラムのもつ方位の差 ($\phi^2 - \phi^1$) との関係を図 2 に示す。 $K_1 = 0$ のとき、相互作用がないため $\phi^2 - \phi^1 = \theta^2 - \theta^1$ となった。しかし、 K_1 を大きくしていくことにより $\phi^2 - \phi^1$ の値が小さくなった。 K_1 は局所的にスピンのそろい具合をハイパーコラム間で一致させるように働く相互作用の大きさを決めるパラメータである。異なる方位をもった刺激を各々のハイパーコラムに加えることにより、それぞれのハイパーコラムは異なる方位をもつ。ここで K_1 の値が大きくなることにより、異なる方位に反応したハイパーコラムが相互作用によりお互いを引きつけあった結果、各ハイパーコラム内が持つ方位が変化したと考えられる。

5 まとめ

ハイパーコラム間に水平結合をもつ系の解析を行った結果、ハイパーコラム間相互作用をもつ系に特有の現象があることがわかった。このことから、一次視覚野のモデルを構築する上で、ハイパーコラム内相互作用のみならず、ハイパーコラム間相互作用を考慮に入れることが必要であることが示唆された。また、今後本研究で構築したハイパーコラム間相互作用を考慮に入れたモデルを利用することにより、これまで明らかになっていなかった視覚野の現象を明らかにすることができる可能性があると考えられる。

参考文献

- [1] R. Ben-Yishai, R. Lev Bar-Or, and H. Sompolinsky, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **92**, 3844-3848(1995).
- [2] K. Hamaguchi, M. Okada, and K. Aihara, *Neural Comput.* **19**, 2468-2491(2007).
- [3] C. D. Gilbert, *Neuron* **9**, 1-13(1992).