

空間ばらつきを持つ視細胞の簡易受容野モデルにおける確率共鳴 Stochastic Resonance in a Simple Receptive-Field Model with Nonidentical Noisy Photoreceptors

佐橋 透 (PY), 宇田川 玲, 浅井 哲也, 雨宮 好仁

Toru Sahashi(PY), Akira Utagawa, Tetsuya Asai, and Yoshihito Amemiya

北海道大学大学院 情報科学研究科

sahashi@sapiens-ei.eng.hokudai.ac.jp

Abstract— We propose a simple receptive-field (RF) model consisting of nonidentical photoreceptors, to examine possible enhancement of weak-signal detection in stochastic image-processing systems. Through numerical simulations, we observed stochastic resonance (SR) among the proposed unit pixels, and found i) nonzero optimal RF sizes as well as optimal noise intensities of the neurons under the nonidentical photoreceptors and ii) quality of detected images was improved by SR rather than simple image smoothing.

Keywords— stochastic resonance, receptive field, noise, photoreceptors, image processing

1 はじめに

生物などに見られる確率共鳴を応用することで、微弱光の検出や刺激の感知ができそうである。近年 Simonotto らにより、画像処理への応用例 (暗画像の検出) が示された [1]。この仕組みを半導体イメージセンサ等に適用すれば、安価な構成で暗画像の検出ができるかもしれない。しかし、Simonotto らのモデルでは撮像素子の空間ばらつきが考慮されておらず、ばらつきそのものも確率共鳴により検出されてしまう。そのため、実環境における暗画像の高画質検出は難しそうである。

生物の視覚路における確率共鳴は、上記のような高画質検出に寄与しているのだろうか? Simonotto らのモデルは、入力光を受ける画素ユニットと後段の確率共鳴ユニットを一对一の関係で結ぶものであった。しかし、脊椎動物の網膜を例に考えると、視細胞の受容野は極端に狭いものではなく、近傍の視細胞同士の受容野は重なり合う。したがって、網膜の段階で確率共鳴が起こるとするならば、一つの視細胞と後段の一つの細胞 (確率共鳴ユニット) の対応関係ではなく、視細胞と後段の細胞集団間の「一对多」の対応関係を考えるべきである。我々の興味は、このような一对多の受容野系において、網膜細胞群がばらつきを持ったときどのような確率共鳴現象が起こるか、ということにある。本稿では、視細胞の簡易受容野モデルを提案し、確率共鳴の度合いと受容野の大きさがモデルに及ぼす影響を調べた。

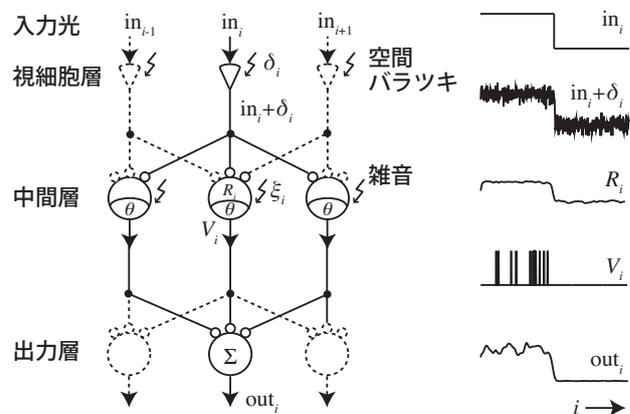


図 1: 簡易受容野モデル

2 提案モデル

提案する一次元受容野モデルを図 1 に示す。まず、空間ばらつきのない入力光を視細胞層に与える (in_i, i : 視細胞番号)。各視細胞は、平均 0, 分散 σ_v^2 の正規分布に従うランダムオフセット値 (δ_i) を持つとする。ここで、中間層の i 番目のニューロンが、 w_{ij} (j : 視細胞番号) によって重み付けされた視細胞出力を受けるとし、その重みづけ値を

$$R_i = \sum_{j=0}^N (in_i + \delta_i) \cdot w_{ij}$$

で表す (N : 視細胞数)。中間層における視細胞の受容野はこの w_{ij} の分布により決まり、ここでは以下のオンセンター型の受容野:

$$w_{ij} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{RF}} \exp\left(-\frac{(\Delta x \cdot j)^2}{2\sigma_{RF}^2}\right)$$

を仮定する ($\Delta x = 1/N$, σ_{RF} は受容野の大きさ)。

中間層のニューロンは、平均 0, 分散 σ_n^2 の正規分布に従う雑音系列 ($\xi_i(t)$) を受ける。その出力を

$$V_i = H(R_i - \theta + \xi_i(t))$$

とする ($H(\cdot)$: ステップ関数, θ : ニューロンのしきい値)。また、中間層の j 番目のニューロンと出力層の i 番

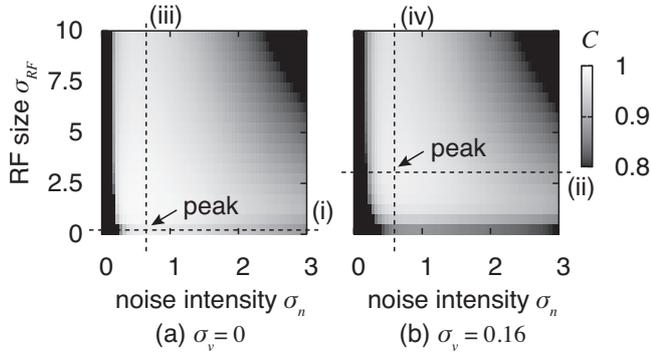


図 2: 受容野サイズ (σ_{RF}), 雑音分散 (σ_n^2), 空間バラツキの分散 (σ_v^2) に対する相関係数 (C) の分布

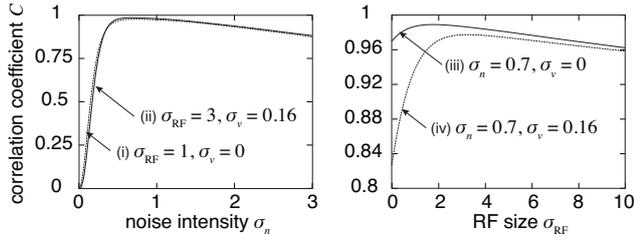


図 3: 図 2 の (i)~(iv) の断面における相関分布

目のニューロンが、視細胞-中間層間と同じ結合 (w_{ij}) を持つとすれば、出力層の i 番目のニューロンの出力は

$$\text{out}_i = \sum_{j=0}^N V_j \cdot w_{ij}$$

で表わされる。この構造の重要な点は、視細胞-出力層のニューロン間にしきい系確率共鳴の構造 (図 1 の実線部) が埋め込まれること、およびそれらの構造が中間層のニューロン (確率共鳴ユニット) を互いに共有することである。この中間層の共有がなければ、提案モデルは Simonotto らのモデルと同じである。この共有の効果を計算機シミュレーションにより調べる。

3 シミュレーション結果

まず、一次元モデルの評価を行った ($N = 100, \theta = 1, \text{in}_i = A \cdot H(i - N/2), A = 0.5$)。中間層に 500 回通りの異なる雑音集合を与え、出力層の平均値を計算した。評価値として、ばらつきのない入力光 (in_i) と出力 (out_i) の相関係数 C を用いる。視細胞の空間ばらつきがない場合 ($\sigma_v = 0$)、雑音の分散 σ_n および受容野の大きさ σ_{RF} を変化させると、 C のピークは $\sigma_{RF} = 0, \sigma_v \approx 0.7$ において見られた (図 2(a))。一方、空間ばらつきがある場合 ($\sigma_v = 0.16$)、 C のピークは $\sigma_{RF} \approx 3, \sigma_v \approx 0.7$ において見られた (図 2(b))。図 3 に図 2 における (i)~(iv) の断面の相関分布を示す。以上より、視細胞の空間ばらつきがある場合、受容野のある程度の広がりによって出力画像が入力画像に近づくことがわかつ

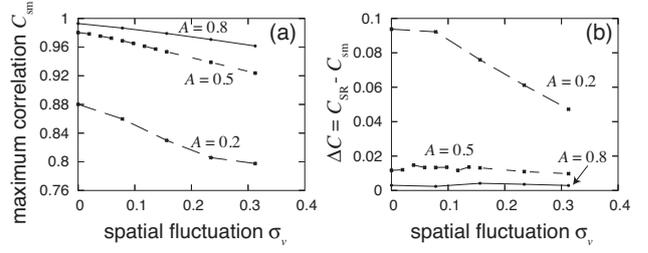


図 4: ぼかしの効果 vs 確率共鳴効果

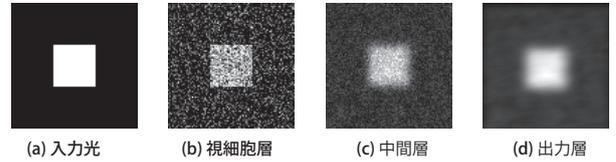


図 5: 二次元画像の処理例

た。これが単なる「画像のぼかし効果による空間バラツキの抑制」でないことを次に示す。

図 1 のモデルにおいて、空間バラツキを含む入力光が平滑化された分布 R_i は、雑音の力を借りて、中間層ニューロンの出力にあらわれる。よって、その出力分布 V_i は、ぼかしとしきい処理 (しきい値は雑音により変動) により得られたものである。一方、出力層の分布 out_i は、 V_i を重みづけ加算したものであり、図 1 の実線部の構造からわかるように、閉じた確率共鳴システムから得られるものである。そのため、ぼかしと確率共鳴の効果が相まって、入出力間の相関値の増加が期待できようである。図 4(a) に、空間バラツキ (σ_v) および入力光強度 (A) を変化させたときの、 V_i と入力光の最大相関値 (C_{sm}) の変化 (ぼかしとしきい処理による効果) を示す。出力層の out_i と入力光の最大相関値 (C_{SR}) の変化 (ぼかしと確率共鳴の効果) を観測し、図 4(a) の相関値との差 ($\Delta C \equiv C_{SR} - C_{sm}$) を計算したものを図 4(b) に示す。 $\Delta C > 0$ であることから、確率共鳴の効果で最大相関値が増加することがわかり、その度合いは入力光強度が低いほど大きいことがわかった。

図 5 に二次元画像の処理例を示す ($N = 90 \times 90, \sigma_n = 0.7, \sigma_v = 0.16, \sigma_{RF} = 3, \theta = 1, A = 0.5$)。出力層の画像 (d) は入力光 (a) の分布のコントラストが下がった画像として認識できるが、適度なレベル調整を行うことで、ぼかし効果による中間層の画像 (c) よりも明らかに入力画像に近い出力を得られることを確認した。

参考文献

- [1] E. Simonotto, M. Riani, C. Seife, M. Roberts, J. Twitty, and F. Moss (1997) "Visual perception of stochastic resonance," *Phys. Rev. Lett.*, **78**(6), 1186–1189.