

興奮性媒体の自発的活動による自己確率共鳴

石村 憲意[†] 小室 勝郎[†] Alexandre Schmid[‡] 浅井 哲也[†], 本村 真人[†]

[†] 北海道大学大学院情報科学研究科
北海道札幌市北区北 14 条西 9 丁目

[‡] Microelectronic Systems Laboratory, Swiss Federal Institute of Technology (EPFL)
Lausanne, CH-1015 Switzerland
Email: ishimura@lalsie.ist.hokudai.ac.jp

あらすじ—確率共鳴は、閾値下の微弱信号が入力されている二重井戸系やしきい系に対し、適度な外部雑音が重畳することで状態遷移を可能にする現象である。近年、外部雑音に因らず、これらの系内部で生成される雑音やゆらぎを利用した新しい確率共鳴が研究されてきている。本研究では、この内部雑音を利用した確率共鳴を再現する為に、非線形振動子が単一方向に環状結合したネットワークを構築した。このネットワークに共通の微弱信号を入力し、出力信号は非線形振動子全体の応答の加算平均から求める。シミュレーションを行った結果、入出力相関値と内部雑音強度の特性から典型的な確率共鳴曲線が得られた。内部雑音を利用することで、外部雑音を利用する従来の確率共鳴と同等な現象が起きることが示された。

1. 背景

確率共鳴は、閾値下の微弱信号が入力されている二重井戸系やしきい系に対し、適度な外部雑音が重畳することで状態遷移を可能にする現象である。そして、多くの生物系は外部雑音や熱雑音を取り込むことによって確率共鳴現象を引き起こし、情報処理を行っていることが知られている [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9]。また、閾素子を並列化することにより、素子の特性ばらつきや雑音強度に耐性を持たせることで、入出力相関値が向上することが知られている [10]。

一方、外部雑音源を用いない、脳内部の活動により生成される雑音やゆらぎを利用した新しい確率共鳴が観測されている [11, 12]。この新しい確率共鳴の研究が、ニューラルネットワークのシミュレーションや、カオスの内部ゆらぎを生成する電子回路の実装などを通して行われている [14, 15]。

本研究では、系内部の雑音を利用した新しい確率共鳴現象、自己確率共鳴を再現する為に、単一方向に興奮性媒体を結合させた環状ネットワークを構築し、シミュレーションを行った。このネットワークの結合強度は、結合する興奮性媒体間の距離に応じて調整されており、自己フィードバックが一番強く、距離が長くなるほど弱く結合する。このように構成されたネットワークでは、興奮性媒体の応答が円環状に伝搬し続けるため、内部雑音が生成され、持続しているとみなすことができる。そのため、入力された微弱信号を、ネットワーク内部で生成された雑音を利用して検出することが出来るようになる。シミュレーションを行った結果、入出力相関値

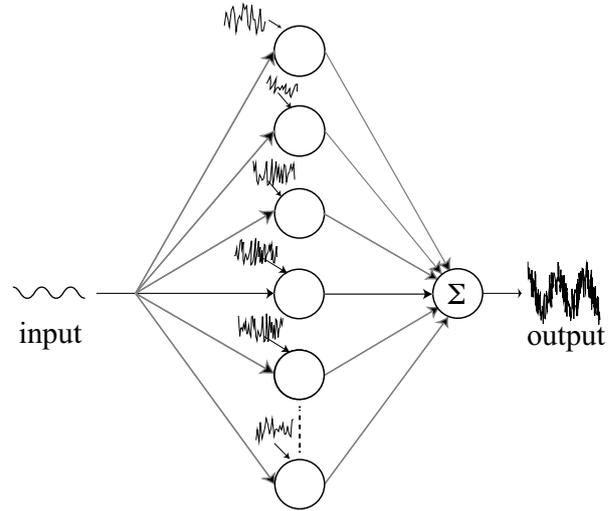


図 1: 興奮性媒体並列加算ネットワーク。

と内部雑音強度の関係から典型的な確率共鳴曲線が得られた。このことから、内部雑音を利用する微弱信号検知、自己確率共鳴現象が起きることが示された。

以下、二章ではシミュレーションに用いた興奮性媒体と方法について説明する。三章では、提案ネットワークを用いたシミュレーションについて説明し、四章では、研究結果についてまとめる。

2. 単一方向環状結合ネットワークの構築とその応答

Collins らによって提案されたネットワークでは、フィッツヒュー南雲 (FHN) モデルのニューロンが並列に配置され、それぞれに独立の外部雑音源が加えられている (図 1)。このネットワークに対し、共通の微弱信号を入力し、出力信号はネットワーク全体の加算により求められる。我々の研究では、この Collins らのネットワークを基に FHN モデルのニューロン群を環状に結合し、内部で生じる発火を雑音として利用するネットワークを構築した。FHN モデルのダイナミクスは

$$\dot{u} = u(1-u)(u-a) - v + I(t), \quad (1)$$

$$\dot{v} = \epsilon(bu - v) \quad (2)$$

のように表され、 u は活性度、 v は抑制度、 ϵ は時定数、 a と b は係数、 $I(t)$ は入力信号を表している。図 2(a) で

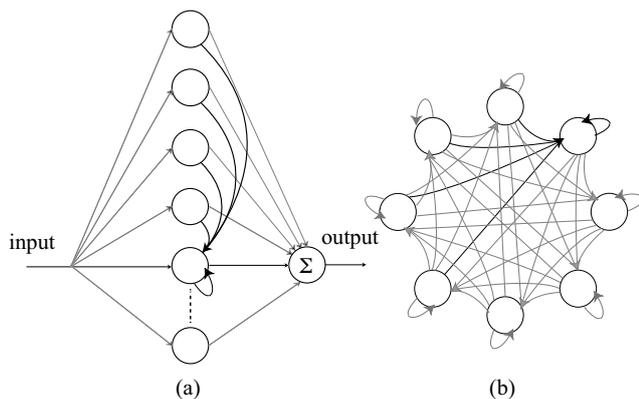


図 2: (a) 提案した環状結合ネットワーク上の一つの興奮性媒体に対する結合例 (自己フィードバックと四つの単一方向結合). (b) 環状結合ネットワーク層の全体図.

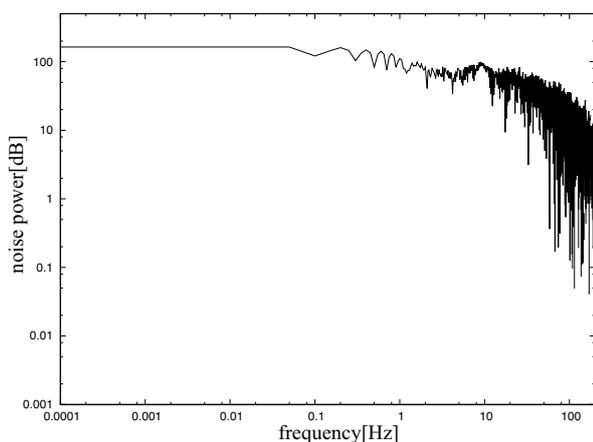


図 3: 500 個の FHN モデルで構築した環状結合ネットワークに対し, FHN モデルが発火する程度に大きい振幅の正弦波を入力したときの出力信号のパワースペクトル.

は, 入出力と提案する環状ネットワークの結合の一部分を示している. ここでは, ある一つのニューロンに対して, 自己フィードバックと四つのニューロンが結合しており, 結合強度はニューロン間の距離が離れるほどに弱くなる. 環状結合ネットワーク全体の様子を図 2(b) に示す. この提案したネットワークは全結合ではなく, それぞれのニューロンに対して四つのニューロンが単一方向に結合している.

次に, 環状結合ネットワークを構成するニューロンの発火の伝搬が内部雑音として確率共鳴に利用できるか調査した. ニューロンを 500 個配置し, それらのパラメータを $a = 0.1$ から 5% のばらつき, $b = 0.24$ から 1% のばらつき, そして $\epsilon = 0.01$ から 3% のばらつきを与えた. 共通の入力信号として, ニューロンが発火する程度に大きい振幅の正弦波をネットワークに加え, このときの出力信号のパワースペクトルを図 3 に示す. この図からわかるように, 正弦波入力に対し出力信号は広い周波

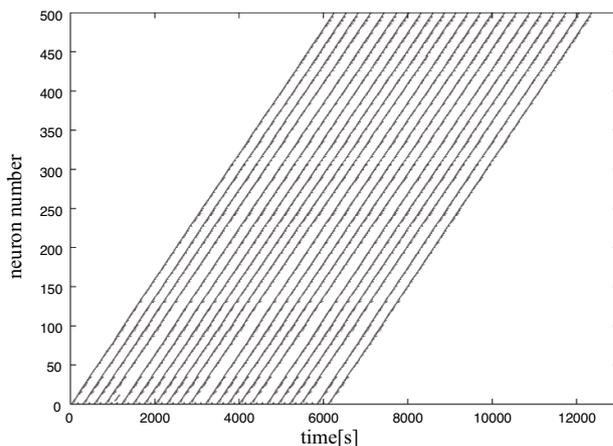


図 4: 単一方向直線ネットワークに対して FHN モデルが発火する程度に大きい一定振幅値を入力したときの興奮波の伝搬.

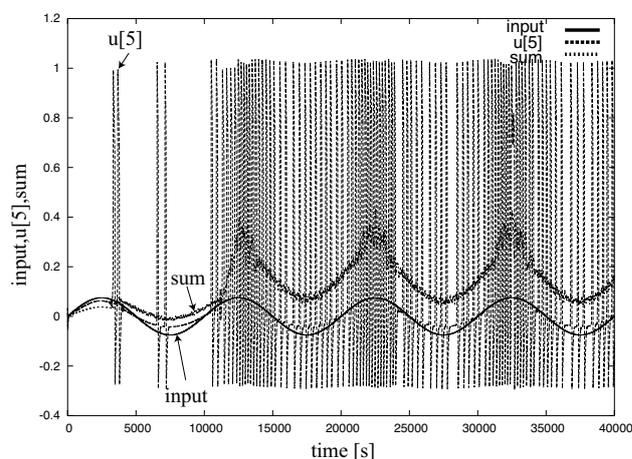


図 5: 微弱な正弦波入力, 5 番目のニューロンの応答とネットワークの出力の時系列波形.

数範囲でエネルギーを持つことから, ネットワーク内部で雑音が生成されていると考えられる. また, 同一時刻でネットワーク内部で発火しているニューロンの数が多いほど雑音強度が高くなると考えられる. そこで, 500 個のニューロンを直線状に単結合し, 端から一定値の信号を 6200 秒間入力したときの様子を図 4 に示す. この図から, ネットワーク状で複数の発火が伝搬して行くことで内部雑音を生成している様子がわかる. これらの結果から, 複数のニューロンの発火とそのネットワーク内部での持続的な伝搬が, 確率共鳴を起こす雑音としての役割を担うことが出来ると考えられる.

3. 内部雑音による自己確率共鳴のシミュレーション

自己確率共鳴を起こす為, 500 個のニューロンからなる単一方向環状結合ネットワークを構築した. この

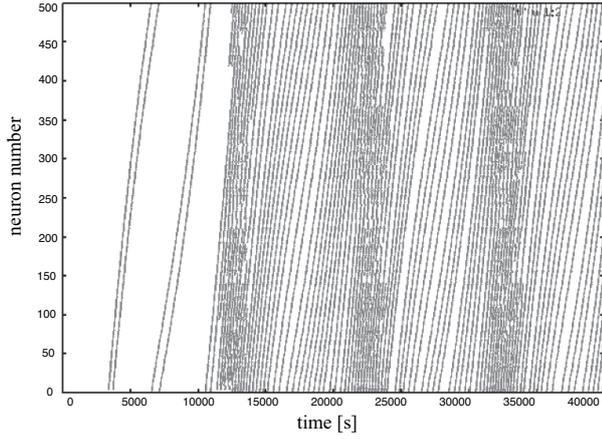


図 6: 環状結合ネットワークを構成する 500 個のニューロンのラスタプロット.

ネットワークにおける i 番目の FHN モデルのダイナミクスは

$$\dot{u}_i = u_i(1 - u_i)(u_i - a_i) - v_i + w_i I(t) + \xi, \quad (3)$$

$$\dot{v}_i = \epsilon(b_i u_i - v_i) \quad (4)$$

の様に表すことができ、 w は入力信号の結合強度、 ξ は複数個結合した FHN モデルからの応答の総和を表している。図 3 に示したように、複数のニューロンの発火の総和は雑音としてみなすことができる。環状結合する N 個のニューロン (n) の数が 4 個の時、 ξ 項はさらに

$$\xi = \beta(70n_N + 56n_{N-1} + 28n_{N-2} + 8n_{N-3} + n_{N-4})/163 \quad (5)$$

と、ガウシアン分布の係数で重み付けして表す。ここで、 β は加算された結合ニューロンの応答の強度を調整する係数で、雑音強度とみなすことができる。ニューロンのパラメータを $a = 0.1$ から 5% のばらつき、 $b = 0.24$ から 1% のばらつき、 $\epsilon = 0.01$ から 3% のばらつき、 $w = 0.045$ から 1.8% のばらつき、入力信号強度は $I(t) = 0.075$ 、そして雑音強度は $\beta = 0.057$ に設定した。図 5 に微弱信号と 5 番目のニューロンの応答、出力信号の時系列波形を示す。入力信号が高い値のときに発火密度が高くなり、低い値のときには発火密度が低くなる様子が確認できる。次に、環状結合ネットワークのラスタプロットを図 6 に示す。始めの間は、わずかな数の発火が伝搬するが、次に入力正弦波が高い値になるときに、伝搬している内部雑音を利用してネットワークの多数のニューロンが発火している様子が確認できた。

次に、環状結合ネットワークの性能を解析する為に、入力信号 $I(t)$ と出力信号 $O(t)$ の相関値を

$$\text{correlation value} = \frac{\langle I(t) \cdot O(t) \rangle - \langle I(t) \rangle \langle O(t) \rangle}{\sqrt{\langle I(t)^2 \rangle - \langle I(t) \rangle^2} \sqrt{\langle O(t)^2 \rangle - \langle O(t) \rangle^2}}, \quad (6)$$

$$\langle X(t) \rangle \equiv \frac{1}{T} \int_{-T}^T X(\tau) d\tau \quad (7)$$

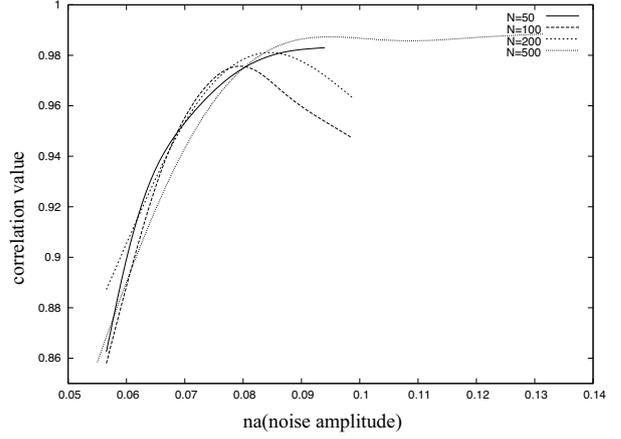


図 7: 入出力相関値対雑音強度 (β) 特性 ($N = 50, 100, 200, 500$).

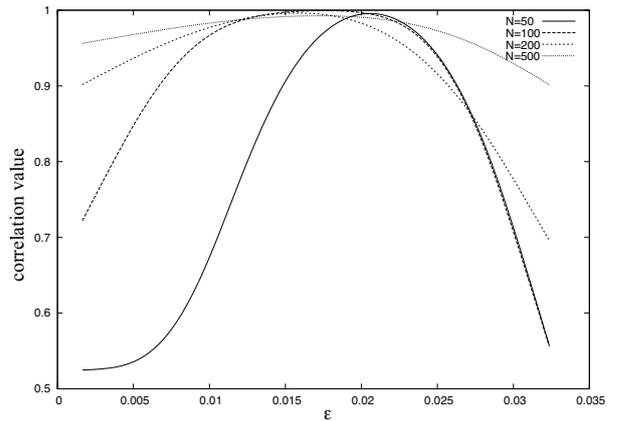


図 8: 入出力相関値対時定数 (ϵ) 特性 ($N = 50, 100, 200, 500$).

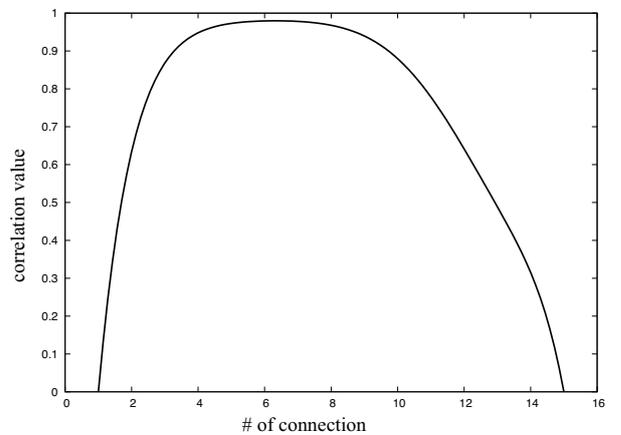


図 9: 入出力相関値対結合数特性 ($N = 500$).

として求める。まず、図 7 に示すように雑音強度 β と入出力相関値の関係調べた。このとき、環状結合ネットワークを構成するニューロンの数 N を、 $N = 50, 100, 200, 500$

の四通りの場合においてシミュレーションを行った。 β が上昇するに従って相関値も上昇し、 $N = 50, 100, 200$ の場合は、 β をさらに上昇させていくと、 $\beta = 0.08$ 前後をピークに相関値が低下した。このように、ネットワーク内部において適切な量の雑音が生産されることが重要であると考えられ、 $\beta = 0.08$ に設定した。次に、時定数 ϵ と入出力相関値の関係を図8に示す。この場合においても、ネットワークのサイズが増えていくのに従って、相関値が上昇する範囲が広がる。ここで、 ϵ を0.02に設定した。最後に、今まで四つに固定していた、結合するニューロンの数と入出力相関の関係を、図9に示す。結合数が増えてくると内部の雑音が増加し、入出力相関値が上昇するが、結合数が八つを超えると相関が下がってくる。このようにして、適度な雑音が内部で生成されるときに入出力相関値のピークになり、従来型の確率共鳴曲線と同様な特性が得られた。

4. まとめ

FHNモデルを単一方向に環状結合したネットワークを構成し、自己確率共鳴のシミュレーションを行った。提案ネットワークでは、入力された微弱信号に重畳し、環状結合ネットワーク全体が応答出来るようになった。これは各々のニューロンのパラメータばらつきが存在することにより、発火タイミングがばらついてネットワーク全体の出力が雑音として現れていること、そして、ニューロンの発火が円環状に伝搬し続けることで、ネットワーク内部の雑音が持続することが要因となったと考えられる。

次に、環状結合ネットワークに対し、内部雑音強度(結合するニューロン数)と入出力相関値の解析を行った。これにより、結合数が少ない単一方向環状ネットワークや、結合数が多くなる全結合のようなネットワークでは微弱信号に反応できず、適切な結合数のネットワークが構成されたときに十分な内部雑音が生産され、入出力相関値が高くなる、従来型の確率共鳴曲線と同等な特性が得られた。

参考文献

- [1] T. Shimozawa, "The aerodynamics and sensory physiology of range fractionation in the cercal filiform sensilla of the cricket *Gryllus bimaculatus*," *J. Comp. Physiol. A*, vol. 155, no. 4, pp. 495-505, 1984
- [2] J.K. Douglass, L. Wilkens, E. Pantazelou, and F. Moss, "Noise enhancement of information transfer in crayfish mechanoreceptors by stochastic resonance," *Nature*, vol. 365, no. 23, pp. 337-340, 1993.
- [3] D.J. Mar, C.C. Chow, W. Gerstner, R.W. Adams, and J.J. Collins, "Noise shaping in populations of coupled model neurons," *Neurobiol.*, vol. 96, no. 18, pp. 10450-10455, 1999.
- [4] T. Mori and S. Kai, "Noise-induced entrainment and stochastic resonance in human brain waves," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 88, no. 21, 218101, 2002.
- [5] M.C.W. van Rossum, B.J. O'Brien, and R.G. Smith, "Effects of noise on the spike timing precision of retinal ganglion cells," *J. Neurophysiol.*, vol. 89, no. 5, pp. 2406-2419, 2003.
- [6] K. Funke, N.J. Kerscher, and F. Wörgötter, "Noise-improved signal detection in cat primary visual cortex via a well-balanced stochastic resonance like procedure," *Euro. J. Neurosci.*, vol. 26, no. 5, pp. 1322-1332, 2007.
- [7] T.M. Hospedales, M.C.W. van Rossum, B.P. Graham, and M.B. Dutia, "Implications of noise and neural heterogeneity for vestibulo-ocular reflex fidelity," *Neural Comput.*, vol. 20, no. 3, pp. 756-778, 2008.
- [8] A. Ochab-Marcinek, G. Schmid, I. Goychuk, and P. Hänggi, "Noise-assisted spike propagation in myelinated neurons," *Phys. Rev. E*, vol. 79, no. 1, 011904, 2009.
- [9] S.A. Ibáñez, P.I. Fierens, R.P.J. Perazzo, and D.F. Grosz, "Performance robustness of a noise-assisted transmission line," *Physica D*, vol. 238, no. 21, pp. 2138-2141, 2009.
- [10] J.J. Collins, C.C. Chow, and T.T. Imhoff, "Stochastic resonance without tuning," *Nature*, vol. 376, no. 20, pp. 236-238, 1995.
- [11] N. Schweighofer, K. Doya, H. Fukai, J.V. Chiron, T. Furukawa and M. Kawato, "Chaos may enhance information transmission in the inferior olive," *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 101, no. 13, pp. 4655-4660, 2004.
- [12] I. Tokuda, C.E. Han, K. Aihara, M. Kawato, and N. Schweighofer, "The role of chaotic resonance in cerebellar learning," *Neural Netw.*, vol. 23, no. 7, pp. 836-842, 2010.
- [13] J. Teramae, Y. Tsubo, and T. Fukai, "Optimal spike-based communication in excitable networks with strong-sparse and weak-dense links," *Scientific reports*, 2012.
- [14] G.M. Tovar, T. Asai, and Y. Amemiya, "Array-Enhanced Stochastic Resonance in a Network of Noisy Neuromorphic Circuits," *Springer*, vol. 6443, pp. 188-195, 2010.
- [15] K. Ishimura, T. Asai, and M. Motomura, "Chaotic Resonance in Forced Chua's Oscillators," *Journal of Signal Processing*, vol. 17, no. 6, pp 231-238, 2013.