

共通雑音により誘起されるハードウェアニューロン群の位相同期現象： 実環境における評価

Real-World Experiments for Noise-Induced Synchronization among Noisy Electric Neuron Circuits

宇田川 玲 (PY), 浅井 哲也, 雨宮 好仁

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

北海道大学大学院 情報科学研究科

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

Abstract— We observed noise-induced synchronization [1] in a hardware neural oscillator designed with discrete electronic devices. Experimental results showed that oscillators got synchronized when they were driven by common noises. Also we evaluated the effect of mismatches of neural oscillators, and found that even when natural frequencies of oscillators were slightly different each other, frequencies of oscillators became same by applying common noises to the oscillators.

Keywords— hardware, noise-induced synchronization, neural oscillator, analog MOS circuit

1 背景

近年、共通雑音を与えることで、相互結合を持たないニューロン群が同期発火する、という現象が注目を集めている [1]。我々はこれまで、神経振動子をアナログ電子回路を用いて設計し、共通雑音による振動子回路の位相同期現象を電子回路シミュレーションにて確認してきた [2]。我々は今回、振動子回路をユニバーサル基板上に試作し、実環境における評価を行なった。

2 回路構成と実験手法

図 1 に [2] を元に構成した Wilson-Cowan 神経振動子回路を示す。ここで u_i, v_i は振動子のシステム変数、 C_1, C_2 はそれぞれ u_i, v_i の時定数を決めるキャパシタである。 V_{ref} は振動子の固有発火周波数を決めるバイアス電圧である。雑音は M 系列発生器により生成され (V_{mseq})、振動子に加わる雑音の強度は C_0 の大きさにより決める。

実験に際しては、図 1 の回路を複数作成して同時測定をするかわりに、回路を一つだけ作製しその回路を N 回測定して評価を行なった (振動子回路間の素子バラツキの効果を本実験に反映させないため)。各試行ごとに同じ雑音系列を与え、振動子の振る舞いを観測した。さらに、振動子の固有発火周波数を変化させたとき、雑音を加えた/加えない場合の振動子の発火周波数の変化

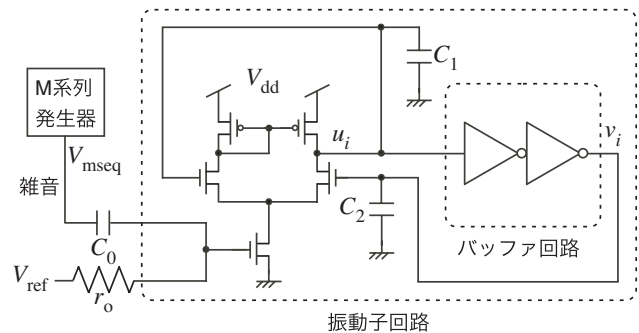


図 1: 雑音源を含む Wilson-Cowan 振動子回路の構成

を観測した。

3 実験結果

以下のパラメータ/条件で測定を行なった: $C_0 = 21$ pF, $C_1 = 4.7$ nF, $C_2 = 10.3$ nF, $r_o = 1$ k Ω , 電源電圧 (V_{dd}) = 5 V, $V_{ref} = 1.5$ V, 試行回数 (N) = 10。疑似雑音発生器 (4 bit M 系列) は、D-FF IC (HD14174BP) と Ex-OR IC (TC4030BP) を用いて構成し、20 kHz のクロックで動作させた。nMOS および pMOS トランジスタにはそれぞれ 2SK1398 と 2SJ184 を使い、バッファにはインバータ IC (TC4069BP) を用いた。

まず、各試行における振動子回路間の位相同期を観測した。図 2 に振動子回路のラスタプロットを示す。図中の棒線は発火イベント ($v_i > 2.5, dv_i/dt > 0$ になった時刻) を表す。雑音を加えない時は全ての振動子は非同期に発火したが (図 2(a))、雑音を加えた時は全ての振動子が同期発火した (図 2(b))。

位相同期の度合いを評価するために、以下のオーダーパラメータ

$$R(t) = \frac{1}{N} \left| \sum_{i=1}^N \exp(j\phi_i(t)) \right|,$$

を用いる。ここで、 i は試行番号、 j は虚数単位、 $\phi_i \equiv \arctan((v_i - v^*) / (u_i - u^*))$ 、 (u^*, v^*) は振動子回路の固定点である。図 3 に雑音あり/なしの場合のオーダーパラメータの時間変化を示す。雑音なしの場合は、各試行

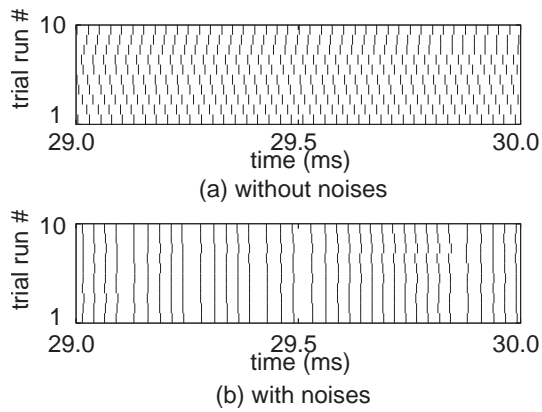


図 2: 10 回試行した時のラスタプロット; (a) 雑音なし (b) 雑音あり

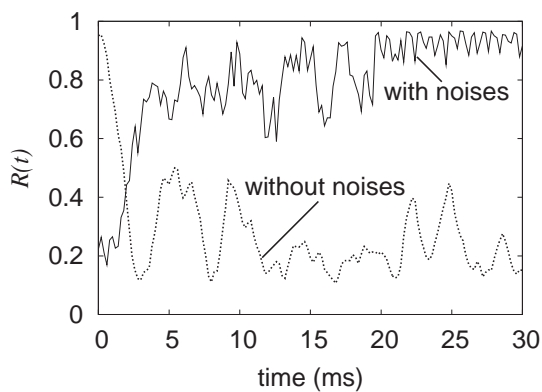
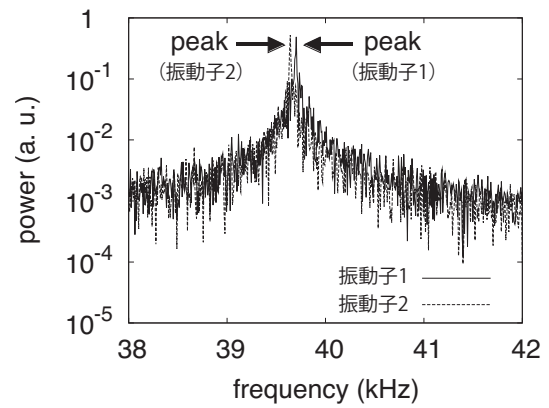


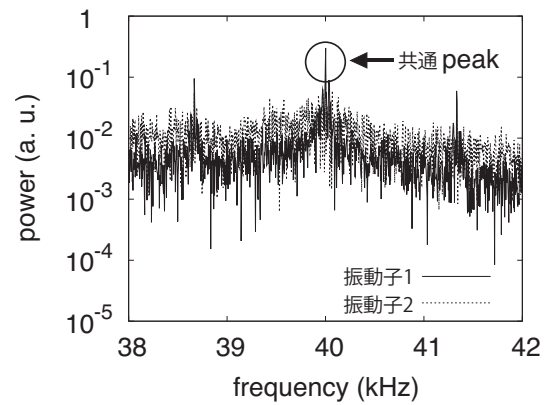
図 3: オーダーパラメータ $R(t)$ の時間変化

において共通の初期値を振動子に与えたにも関わらず、 $R(t)$ はただちに 1 から 0 へと減少し、以後小さな値に留まった (図 3: 点線)。試行中に加わる微弱な環境雑音が振動子の位相差を拡大させたと考えられる。一方、雑音ありの場合は、各試行ごとに振動子回路にランダムな初期値を与えたにも関わらず、25 ms 以降は 0.9 ~ 1.0 と高い値を保ち続けた (図 3: 実線)。各試行ごとに同じ雑音系列を与えると、環境雑音があっても振動子回路が同期する、という現象が本実験により確認できた。

次に、雑音が振動子回路の固有発火周波数に及ぼす影響を評価した。本実験では、固有発火周波数の異なる二種類の回路を用意した (振動子 1: $V_{ref,1} = 1.5$ V, 振動子 2: $V_{ref,2} = V_{ref,1} - \Delta V_{ref}$, $\Delta V_{ref} = 3$ mV)。雑音なし/ありの場合のパワースペクトルをそれぞれ図 4(a), (b) に示す (実線: 振動子 1, 点線: 振動子 2)。雑音を加えない場合、両振動子のピーク周波数の差は 50 Hz 程度であった。一方、雑音を加えた場合、異なる V_{ref} を与えたにも関わらず、ピーク周波数の差は 0 となった。このピーク周波数は、雑音を加えないときの振動子の固有発火周波数とは異なった。



(a) without noises



(b) with noises

図 4: パワースペクトル; (a) 雑音なし, (b) 雑音あり

4 まとめ

共通雑音によるニューロン回路の位相同期現象 [2] を実環境で確認するために、電子回路を試作して評価を行った。一つのニューロン回路を複数回測定し、各試行において同じ雑音を加えることで、ニューロン回路間の位相同期の度合いを評価した。雑音を加えない場合は、環境雑音の影響で位相同期は観測できなかったが、雑音を加えた場合は、各試行間で「実環境における」位相同期が観測できた。また、固有発火周波数が 50 Hz 程度異なる二つのニューロン回路が、雑音を加えることで同期発火する (同じ周波数で発火する) ことがわかった。

参考文献

- [1] H. Nakao, K. Arai, and Y. Kawamura (2007) "Noise-induced synchronization and clustering in ensembles of uncoupled limit-cycle oscillators," Phys. Rev. Lett. **98** : 184101.
- [2] A. Utagawa, T. Asai, T. Hirose, and Y. Amemiya (2008) "Noise-induced synchronization among sub-RF CMOS analog oscillators for skew-free clock distribution," IEICE Trans. on Fundamentals, **E91-A** : in press.