

単電子スパイクニューロンによる抑制型相互結合ニューラルネットの温度特性

Temperature Characteristics of Inhibitory Neural Networks with Single-Electron Spiking Neurons

加賀谷 亮 (PY), 大矢 剛嗣, 浅井 哲也[†], 廣瀬 哲也, 雨宮 好仁

Ryo Kagaya(PY), Takahide Oya, Tetsuya Asai[†], Tetsuya Hirose, and Yoshihito Amemiya

北海道大学大学院情報科学研究科 [†]asai@sapiens-ei.eng.hokudai.ac.jp

Abstract— We propose neuromorphic single-electron circuits for fundamental neural components in modern spiking neural networks, aiming at exploring robust and fault-tolerant circuit architectures for nano-devices. A unit circuit consists of a pair of single-electron oscillators. Using these unit circuits with coupling capacitors, we designed a single-electron neuron circuit. We present an application of the neuron circuit in an inhibitory neural network, where the neurons compete with each other in the frequency domain.

Keywords— Nano-electronics, Neuromorphic LSI, Single-electron circuit, Spiking neuron, Inhibitory neural networks, Neural competition

1 はじめに

神経素子を一つの情報処理デバイスと考えると、それ自体は極めて信頼性のないものである。しかし、脳システムは全体として高い信頼性と機能を実現している。このことは、温度の増加に伴って信頼性が指数関数的に低くなる微細 MOS デバイスや量子ナノデバイスでも、脳の構造を模することによって、システム全体として高い信頼性と機能を実現できることを示唆している。しかし現時点では、量子ナノデバイスを用いた神経ネットワークに関する研究例は極めて少ない。近年、NIPS や IJCNN など目立つのは、単電子トンネル素子の生みの親である K. Likharev らによる「量子ナノデバイスと通常の LSI デバイスを融合した新しいニューロデバイス (のコンセプト)」であるが [1]、脳の仕組みがまだはっきりとわかっていない現時点では、より脳・半導体の物理に根ざした基礎研究が重要である。

本稿では、量子ナノ神経ネットワークの基本素子として、単電子振動子を用いた単安定オシレータ [2] を利用して、スパイクニューロン回路を構成する。次いで、そのニューロン回路を組み合わせた抑制型相互結合ニューラルネットワークを構築し、神経競合のパフォーマンスと温度の関係について考察する。特に、ネットワークの物理パラメータが、各ニューロン回路のスパイク特性や競合パフォーマンスに与える影響について考察する。

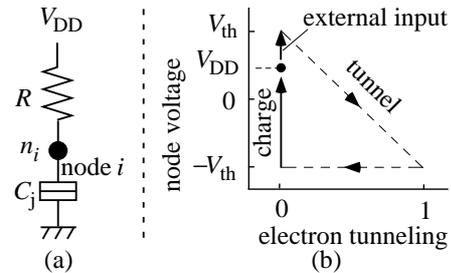


図 1: 単電子振動子; (a) 回路構成, (b) 回路の挙動

2 単電子スパイクニューロン回路の構成

単電子スパイクニューロン回路を構成するために図 1(a) に示す単電子振動子を利用する。これはニューロン回路の動作として必要になる興奮、不応、休止の三状態をもつ。回路はトンネル接合 (C_j)、抵抗 (R)、バイアス電圧 (V_{DD}) で構成される。この回路では、クーロンブロッケード現象のために、 n_i の電圧があるしきい値 ($\pm V_{th}$) を越えたときに電子のトンネルが生じる。図 1(b) に相平面での動作例を示す。ここで、横軸はトンネルの有無を示す (電子トンネルの発生: 1, 発生しない: 0)。 $-V_{th} < V_{DD} < V_{th}$ の条件でトンネル接合端 n_i への入力 (電位刺激) が無い時、 n_i の電位は安定状態にある (休止状態)。ここに外部から n_i の電位が V_{th} を越えるような刺激を与えると、電子はアースから n_i へとトンネルする。これに伴い、 n_i の電位が $-V_{th}$ まで下がる。この電子トンネルによるノード電位の急激な変化をニューロンのスパイク信号 (興奮状態) と考える。 n_i の電位が下がることで容量 (トンネル接合) への充電が行われる (不応状態)。充電の効果で n_i の電位は刺激を与える前の電位に戻る。

上記の単電子振動子は入出力端子が共通である (n_i)。したがってニューロン回路の構成において、入力と出力を区別するような機構が必要である。図 2 に単電子ニューロン回路の構成を示す。振動子 1 は外部入力を受ける振動子、振動子 2, 3, 4 はバッファ、振動子 5 は他のニューロンへと信号を出力する振動子である。ここで信号伝搬のために V_{DD} は、隣り合う振動子と極性が逆になるように設定する。なお、負バイアスの振動子の挙動は図 1(b) とは矢印の向きが逆のものとなる。信号の進む向

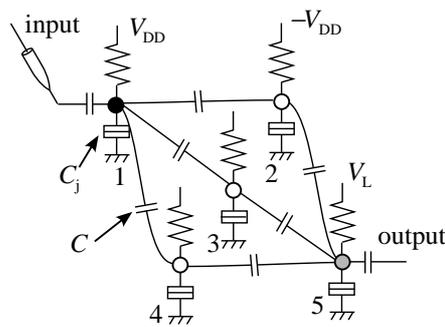


図 2: 単電子スパイクニューロン回路の構成

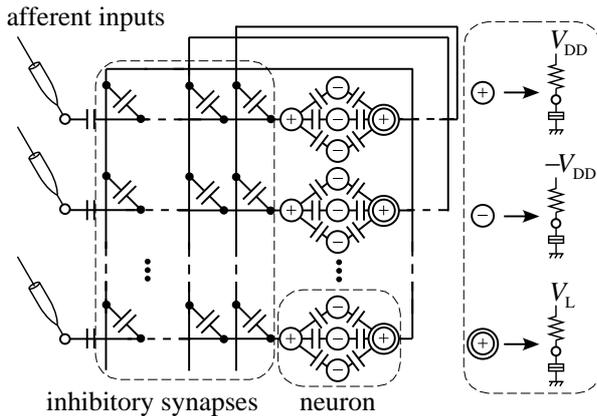


図 3: 抑制型相互結合ニューラルネットの構成

きを一方にするために、振動子 5 は発火するのに必要な入力数が三つとなるようにバイアス電圧 V_L を V_{DD} より小さくする。このニューロン回路の挙動は振動子 1 が外部入力を受けると振動子 1 が発火し、2, 3, 4 に信号を伝える。2, 3, 4 は 1 からの信号を入力としてそれぞれ発火し、それを 5 に伝える。5 は 2, 3, 4 からの三つの信号を受けることにより発火し信号を出力する。なお、5 は外部への端子が一本なので外部信号では発火しない。また、同極性の振動子の連結は入力信号が振動子を発火させないようにはたらく。

3 抑制型相互結合ニューラルネットの構成とシミュレーション結果

単電子回路による抑制型相互結合ニューラルネットの構成を図 3 に示す。これはニューロン回路を複数個配列し、各出力をすべてのニューロンへ接続した構成である。ここで、ニューロンの発火信号は各素子への抑制信号となる。これは振動子同士の接続が $\oplus \leftrightarrow \oplus$ という同極性バイアスの連結になっているためである。

ニューロン数を 200 としてこのネットワークのシミュレーションを行った (図 4)。入力スパイクは、周波数がニューロン番号に対して線形減少するものである。ここでは入力信号と抑制信号を受ける振動子 (図 2 の振動子 1) の発火数をプロットしている。これは回路の温

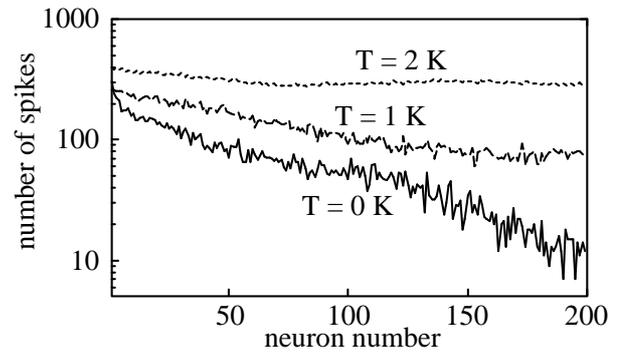


図 4: 相互結合ニューラルネットのシミュレーション結果

度が 0 K の時にはっきりとした競合現象が現れ、温度が上がるにつれてその効果が薄れることを示している。

4 考察

本研究では、単電子回路に脳の構造を模擬し、温度の上昇に伴う回路への影響を調べた。本稿では抑制型相互結合ニューラルネットを単電子回路で構成し、ニューロン数を 200 個としてシミュレーションを行った。温度が 0 K の時、各ニューロンの発火数に競合の効果が現れることを確認できた。これは、抑制の効果が十分はたらいた結果であり、単電子回路による抑制型相互結合ニューラルネットの構成が可能であるといえる。しかし、現段階では温度が上がるとその効果が薄れてしまう。その要因として、ニューロン回路 (図 2) 内のバッファが温度の影響 (熱雑音) で抑制信号の有無に関わらず発火するためと考えられる。

今回、量子ナノ神経ネットワークを構成するための第一歩として、最も簡単な単電子ニューロンを構成し、それを用いた抑制型相互結合ニューラルネットの基本的動作を確認した。今後は、信頼性上昇の実現のためにバッファ部を温度の影響が出にくい構造にすることを検討する。一つの方法としては温度による自然発火を打ち消すような機構の実装が挙げられる。また、温度の影響をキャンセルできる機構について検討を行う。これにより量子ナノ神経ネットワークの実現につながるものと考えられる。

参考文献

- [1] K. Likharev, A. Mayr, I. Muckra, and O. Turel (2003) "CrossNets: High-performance neuromorphic architectures for CMOS circuits," *Molecular Electronics III: Annuals of New York Acad. Sci.* **1006**: 146-163.
- [2] T. Oya, T. Asai, T. Fukui and Y. Amemiya (2004) "Reaction-diffusion systems consisting of single-electron circuits," *Int. J. Unconventional Computing*, in press.