

網膜のしくみに学んで輪郭検出を行う単電子画像プロセッサ

— 単電子ビジョンチップの設計にむけて —

キコンボ アンドリュー キリंगा[†] Alexandre Schmid^{††} 浅井 哲也[†]
Yusuf Leblebici^{††} 雨宮 好仁[†]

[†] 北海道大学大学院情報科学研究科
060-0814 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

E-mail: [†]{kikombo,asai,amemiya}@sapiens-ei.eng.hokudai.ac.jp,
^{††}{alexandre.schmid,yusuf.leblebici}@epfl.ch

あらまし 網膜における情報処理の基本機能である“輪郭検出”を単電子回路で実現する回路アーキテクチャを提案する。これまで、同等の機能を有する多数の CMOS ビジョンチップが提案・製作されてきた [1], [2]。本研究では、網膜の輪郭検出モデルに基づいて単電子デバイスに特化した新しい回路構成を提案する。コンピュータシミュレーションにより、提案する回路の動作確認を行った。

キーワード 単電子回路、輪郭検出、ビジョンチップ、人工網膜、生体様回路

Toward a bio-inspired image processor for edge extraction with single-electron devices

Andrew KILINGA KIKOMBO[†], Alexandre SCHMID^{††}, Tetsuya ASAI[†], Yusuf LEBLEBICI^{††}, and Yoshihito AMEMIYA[†]

[†] Graduate School of Information Science and Technology, Hokkaido University
Kita 14, Nishi 9, Kita-ku, Sapporo, 060-0814, Japan

^{††} Microelectronic Systems Laboratory, Swiss Federal Institute of Technology (EPFL)
Lausanne, CH-1015 Switzerland

E-mail: [†]{kikombo,asai,amemiya}@sapiens-ei.eng.hokudai.ac.jp,
^{††}{alexandre.schmid,yusuf.leblebici}@epfl.ch

Abstract Edge extraction in incident images is a primary function carried out in the vertebrate retina. Based on a biological model for edge extraction in the vertebrate retina, several silicon-based edge extracting circuits have been proposed and implemented [1], [2]. In this research, based on fundamental models for edge detection, we propose a novel single-electron circuit that can perform edge extraction. Through computer simulations, we demonstrate its performance.

Key words single-electron circuit, vision chip, edge extraction, artificial retina, neuromorphic circuits

1. はじめに

近年の半導体集積技術の進歩に伴い、次世代集積デバイスの候補として単電子集積回路の実現が期待されている。しかしここ数年の間に、デバイス技術だけでなくアーキテクチャの技術革新の必要性が高まってきた。国際半導体ロードマップ (ITRS) の最近の調査によれば、今後はノイマン型アーキテクチャの延長上にあるものだけでなく、量子計算などの並列性を有効利用するアーキテクチャに関する大きな技術革新が必要とこのことである。その一例として、ITRS では生物のもつ高い情報処理に着目し、その機能と構造に学んだアーキテクチャを ‘morphic’ という言葉で表現し、今後のリサーチニーズに組み込んでいる。ところが現状では、脳科学の核となる神経生理学、解剖学、計算科学などのボトムアップ的研究分野と、実デバイスを扱うハードウェア研究の間に大きな溝がある。これは、脳を理解して創る、という研究が分野横断的な複合的研究であることに起因する。本研究の目的は、比較的しくみが明らかになっている ‘網膜における輪郭検出’ を単電子回路化することで、上記の溝を少しでも埋めることにある。単電子回路の設計法はシリコン CMOS 回路のそれとは根本的に異なることから、これまでの CMOS ビジョンチップ研究 ([1],[2] など) から得られた回路設計上の知見やテクニックはあまり役に立たない。そこで本稿では、網膜の輪郭検出モデルに立ち戻って、単電子デバイスに特化した新しい回路構成法を提案する。

2. 生物の輪郭検出モデル

脊椎動物の網膜における画像処理、特に輪郭検出は、主に三種の細胞 (視細胞, 水平細胞および双極細胞) により行われる [1]。網膜の輪郭検出モデルの概念を図 1(a) に示す。視細胞 (P) は、受光素子に投影された画像の明暗 (図 1(b)) に応じたポテンシャルを生ずる。水平細胞 (H) は自身の周りの視細胞の出力ポテンシャルを空間的に平滑化する。双極細胞 (B) は、視細胞と水平細胞のポテンシャルの差を出力する。その差の絶対値が大きい場所が輪郭の位置を表わす。図 1(c) に各層の細胞の応答を示す。本例では、光を受けた視細胞 (図 1(c)-P) が低いポテンシャルを発生すると仮定した。水平細胞の出力分布は図 1(c)-H のようになる。すると、双極細胞の出力の絶対値が大きい場所が輪郭の位置を表わすことになる (図 1(c)-B)。以下では、上記のモデルに基づ

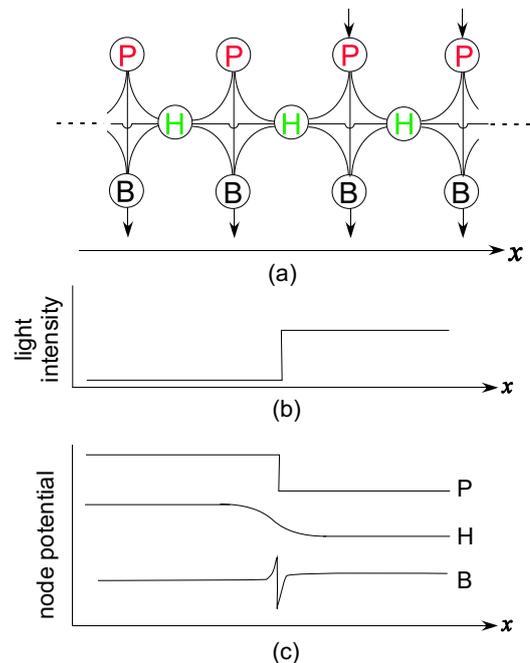


図 1 脊椎動物の網膜における輪郭検出モデル; (a) 輪郭検出に寄与する網膜断面モデル: P は視細胞, H は水平細胞, B は双極細胞. (b) 投影光の強度分布 (c) 各層の細胞のポテンシャル.

いて各層 (P, H, および B) の機能を単電子デバイスで構成し、回路全体の構築を行う。

3. 単電子回路を利用した輪郭検出回路の構成

上記の網膜モデルを量子ナノデバイスで実現するための基本素子として、単電子振動子を用いる (図 2(a))。単電子振動子の構成は、トンネル接合 C_j と高抵抗素子 R を直列接続して電源電圧 V_{dd} でバイアスしたものである。極低温では、クーロンブロック現象によってアースとノード間の電子の輸送 (トンネル) が電子一つのレベルで制御され、電子トンネルの振動性や単安定性が発現する [3], [4]。本稿で用いる全ての振動子は、単安定状態で動作するものとする (電源電圧を電子トンネルに必要な接合のしきい電圧より低い値に設定する [4])。したがって、定常状態ではノード電位は電源電圧と等しい。この状態は、振動子に外部刺激 (フォトンの照射や熱雑音) が与えられない限り維持される。

トンネル接合は量子ドット構造を用いて実現できる。量子ドットに光を照射すると、フォトン誘起電荷が発生し、電子トンネルが発生する [5], [6]。例えば、正の電源バイアスの振動子はアースからノードに電子がトンネルし、ノード電位が高い値から低い値に急激に転ずる。図 2(b-実線) にその様子を示す。逆に

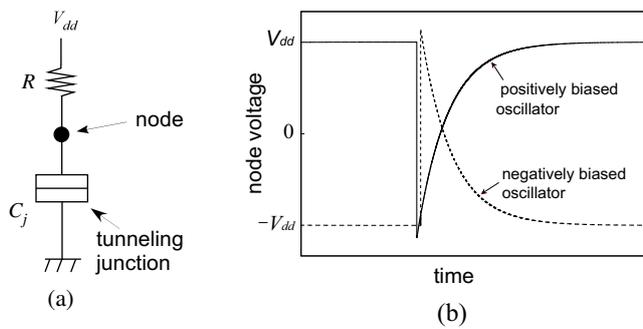


図2 単電子振動子; (a) 回路構成, (b) 電子トンネルによるノード電位の変化。

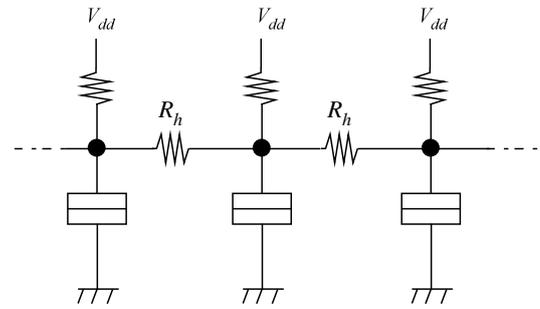


図3 水平細胞の動作を模擬する単電子回路の構成。

負の電源バイアスの振動子は、ノードからアースへ電子がトンネルし、ノード電位が低い値から高い値に変化する(図2(b)-点線)。電子トンネル後、接合は R を介して充電され、ノード電位が元の状態(電源電圧)に戻る。上記の単電子振動子を基本回路として、輪郭検出モデルの各層を模擬する回路ブロックを以下に提案する。

3.1 視細胞層

一つの視細胞を正バイアスの単安定振動子で模する。上述したように、正バイアスの振動子では量子ドットに光を照射するとアースからノードへの電子トンネルが発生する。光を照射し続ければ、電子トンネルと接合の充電のサイクルが繰り返される。この電子トンネルの頻度は光強度の関数であり、光強度の増加に伴いトンネル頻度が増加すると考えられる。したがって、正バイアスの振動子アレイを用意しそこに画像を投影すれば、画像の明るい(暗い)領域に対応する振動子のトンネル頻度は高く(低く)なる。つまり、一つの視細胞に相当する単電子振動子は、光強度を電子トンネル頻度に変換するトランスデューサの役割を果たす。

3.2 水平細胞層

網膜の水平細胞層では、近傍の水平細胞同士がギャップ・ジャンクションを介して電氣的に結合している。この構造に習って、一つの水平細胞を正バイアスの単電子振動子とし、隣り合う振動子を抵抗 (R_h) を介して結合することで水平細胞層を模擬する(図3)。抵抗ネットワーク構造のため、一つの振動子で電子トンネルが発生した場合、回路網全体の電荷の空間的配分が変化する。ある振動子(A)の電子トンネルによりノード電位が減少すると、その近傍の振動子のノード電位も減少する。Aの第一近傍、第二近傍と、距離が離れるにしたがって振動子のノード電位の減少度合いが低下する。よって、抵抗結合を用いることで、空間的平滑の効果が得られる。

3.3 双極細胞層

双極細胞は視細胞と水平細胞のポテンシャル差を出力する。シリコンのビジョンチップでは、演算増幅器や電流則に基づく構成でポテンシャル差を計算する。ところが単電子振動子回路には演算増幅器に相当する回路がなく、電流則あるいは別のしくみによりポテンシャル差を計算する必要がある。電流則を用いる場合は、視細胞と水平細胞のポテンシャルを電流(drainおよびsourceタイプの電流源)に変換する必要がある。単電子回路においては、この制御は非常にテクニカルであり、本研究の本質的な目的から逸れる恐れがある。そこで、双極細胞は視細胞の発火により興奮し、水平細胞の発火により短絡抑制されるという仮説を立てた。後述するように、この仮説により回路構成の見通しが良くなる。単電子回路で興奮結合と短絡抑制結合を実現する方法を以下に述べる。基本的には、単電子振動子(細胞)間を容量結合することで、実現可能である。

興奮性結合は、容量結合された隣り合う振動子のバイアス電源の極性を逆に設定すれば実現できる[4]。例えば、正の電源バイアスの振動子において電子がアースからノードにトンネルすると、ノード電位が正から負に転ずる。この振動子と容量結合した負バイアスの振動子ではノード電位が減少する。接合のしきい電圧よりもノード電位が低くなれば、負バイアスの振動子でも電子トンネルが起こる。つまり、正バイアスの振動子の電子トンネルが、負バイアスの振動子の電子トンネルを誘発するため、このしくみを振動子の興奮性結合と見なす。

一方、抑制性結合は容量結合された隣り合う振動子のバイアス電源を同極性に設定すれば実現できる[8]。共に正バイアスされた二つの振動子(A, B)の結合を考えよう。この場合、振動子Aで電子トンネルが発生した場合、自身のノード電位が正から負に変わり、振動子Bのノード電位を引き下げる。この状態

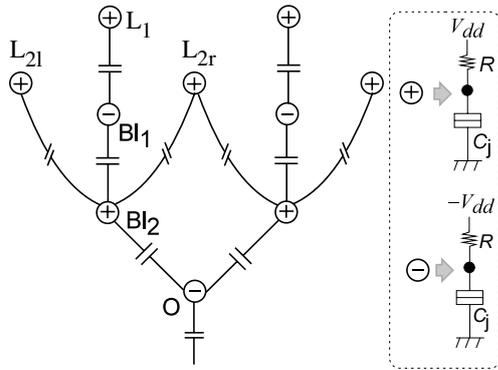


図4 興奮性と抑制性結合を利用した双極細胞の挙動を模擬する単電子回路

では、振動子 B が外部から刺激を受けても電子はトンネルしにくい。この仕組みを利用して短絡抑制の機能を実現する。具体的には、振動子 B を双極細胞と見なし、振動子 A は水平細胞から、振動子 B は視細胞から刺激を受けるものとする。この場合、振動子 A が水平細胞から刺激を受けると、振動子 B (双極細胞) は視細胞から刺激を受けても発火できない (電子トンネルが生じない)。つまり、双極細胞は水平細胞により短絡抑制される。

上記の興奮-短絡抑制のしくみに基づく双極細胞回路を図4に示す。双極細胞回路は上層部の電子トンネルを受けて動作する。例えば上層部の振動子 (L_1, L_{2l} と L_{2r}) において電子トンネルが発生したとしよう。すると、 L_1 の電子トンネルは BI_1 の電子トンネルを誘発する (興奮性結合)。逆に、 L_{2l} と L_{2r} の電子トンネルは BI_2 のノード電位を下げ、 $BI_1 \rightarrow BI_2$ へのトンネル誘発を抑制する。 BI_2 で電子トンネルが発生した場合、それが興奮性の結合を介して双極細胞回路の出力である振動子 "O" に伝わる。ただし、振動子 L_{2l}, L_{2r} のどちらか一つのみで電子トンネルが発生すると、その抑制力は BI_1 の興奮の影響を十分に取り消せず、 BI_2 で電子トンネルが起こりえることに注意する。

提案する輪郭検出回路の1ピクセルの構成を図5に示す。トンネル事象の伝搬がフィードフォワードとなるように、視細胞層-水平細胞層の間に電子トンネルを一方のみ (上層から下層のみ) に伝える単電子ダイオード (バッファ) 回路を用いる [7]。また、水平細胞 (H) による双極細胞細胞 (B_2) の短絡抑制効果を上げるために、H- B_2 間を容量結合する (興奮性)。 B_1 の近傍の H セルにおいて電子トンネルが発生すると、 B_1 のノード電位が下がり、 B_1 において電子トンネルが発生する可能性が高くなる。 B_1 で電子トンネルが生じた場合、 B_1 は不応期に入るため、

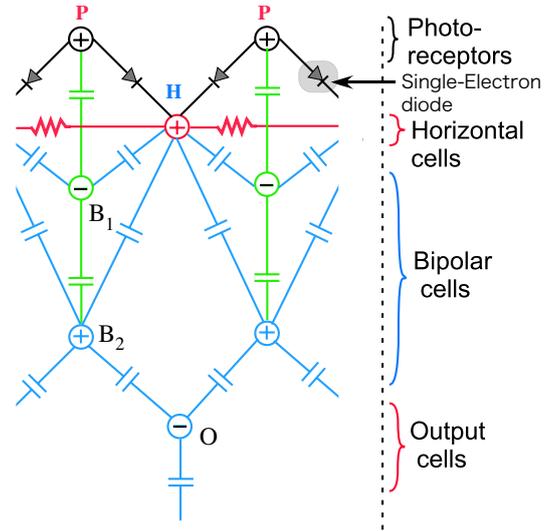


図5 単電子回路による単位ピクセルの構成。

視細胞 (P) において電子トンネルが発生しても B_1 で電子トンネルは起こりにくい。このしくみによって、H- B_2 間の短絡抑制結合の効果が向上する。

4. シミュレーション結果

提案する回路を用いて、100ピクセルの一次元網膜回路のシミュレーションを行い、各層の応答を調べた。図6に、単ピクセルにおける視細胞回路、水平細胞回路および双極細胞回路の時間応用を示す (水平細胞のギャップ・ジャンクション: $R_h = 400 \text{ M}\Omega$, 興奮性および抑制性の結合容量: 2 aF , 単電子振動子および単電子ダイオードのパラメータは [7] と同じものを使用)。シミュレーションでは画素番号 33~67 の視細胞回路に光入力に相当するパルスを与えた (パルス周波数: 110 MHz , 振幅: 2.5 mV , duty: 50%)。図6(a)に、光が投影 (パルス入力された) 領域の一つの振動子 (画素番号: 50番) の時間応用を示す。図6(b)に、上記視細胞回路の直下 (図5における視細胞回路の左下) の水平細胞回路の時間応答を示す。予想通り、ギャップ・ジャンクションの平滑化効果により水平細胞回路のトンネル頻度は視細胞細胞の頻度よりも低くなった (平滑化が行われなければ、水平細胞は視細胞と同じ時間応答を示す)。図6(c)に双極細胞回路 (B_2) の時間応答を示す。本来、50番目の画素位置では輪郭出力 (B_2 の電子トンネル) は得られないはずであるが、短絡抑制のタイミングによっては、同図に示すように B_2 で電子トンネルが確率的に発生する。このような確率的な電子トンネルによる影響は、トンネル事象の時間平均値 (平均トンネル率—単位時間あたりの電子トンネル回数) で出力を評価することで低減できる。

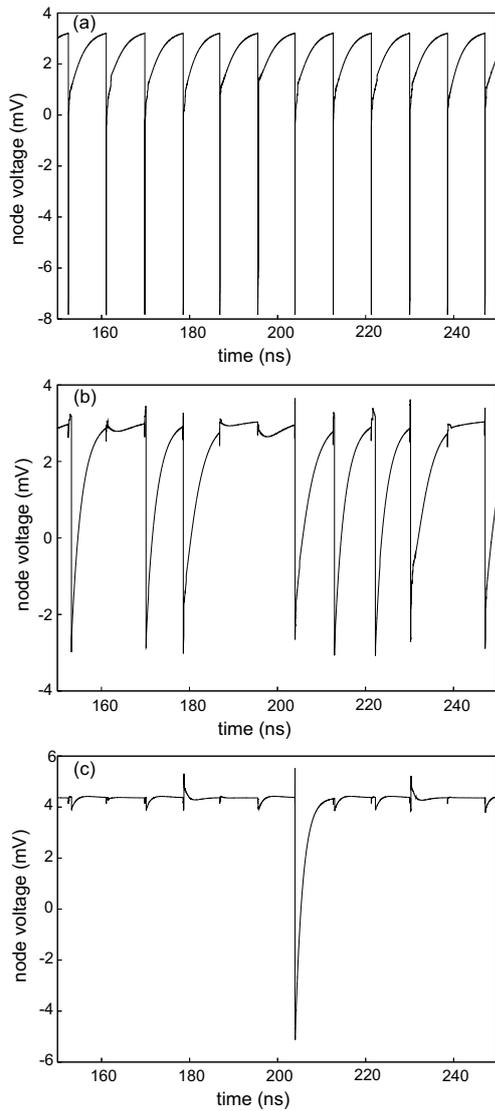


図 6 輪郭検出回路の各層における (a) 視細胞回路, (b) 水平細胞回路, (c) 双極細胞回路の時間応用 ($T = 0$ K) .

図 7 に、上記シミュレーションにおける視細胞層および双極細胞層の応答を示す。図 7(a) は、光が投影された直後の視細胞層のポテンシャル分布, (b) に双極細胞層の平均トンネル率の分布を示す (全シミュレーション時間: 700 ns, 縦軸は双極細胞回路の最大の平均トンネル率で正規化したもの)。想定どおり、輪郭位置において双極細胞回路が高いトンネル率を示した。ただし、上述したように上層の視細胞回路が光入力を受けている双極細胞回路 (画素番号 33~67) の平均トンネル率は完全にはゼロにならない。これは、短絡抑制部の振動子のパラメータ最適化により改善できる見込みである。

図 8 に光強度 (=入力パルス周波数) に対する双極細胞回路の SN 比の変化を示す (≡ 輪郭位置にある双極細胞回路の平均トンネル率とそれ以外の双極

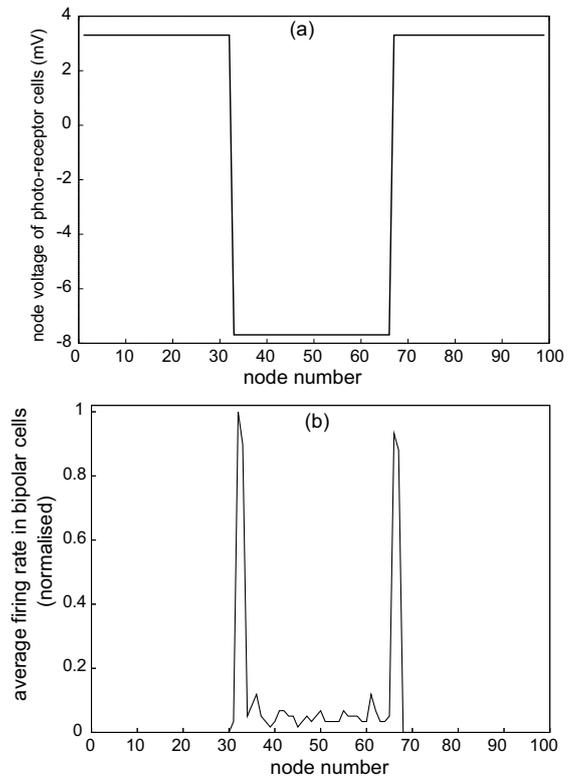


図 7 画素番号 33~67 に光を照射した場合の輪郭検出回路の応答分布; (a) 光を照射した直後の視細胞回路のポテンシャル分布, (b) 双極細胞層の平均トンネル率の分布 ($T = 0$ K) .

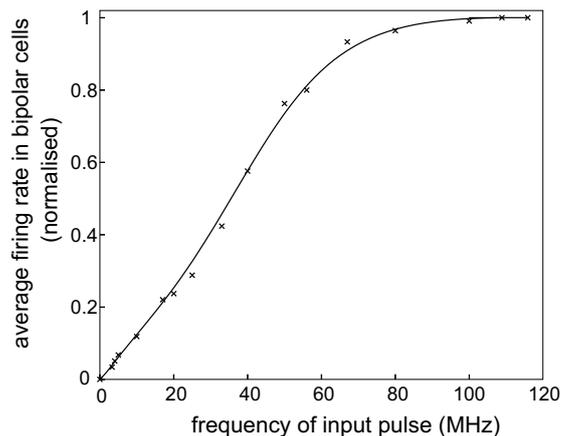


図 8 入力光強度 (=入力パルス周波数) に対する双極細胞回路の SN 比の変化 ($T = 0$ K) .

細胞回路の平均トンネル率との差; 縦軸は最大入力パルス周波数における平均トンネル率で正規化)。光強度の増加に伴い SN 比が増加する傾向が見られる。110 MHz 以上の入力周波数では、入力パルスの周期が視細胞回路の不応期よりも短くなるため、平均トンネル率は飽和する。

次に、提案回路の温度特性を調べた。回路の動作温度を 0.5 K, 1 K, 1.5 K としたときの双極細胞回路

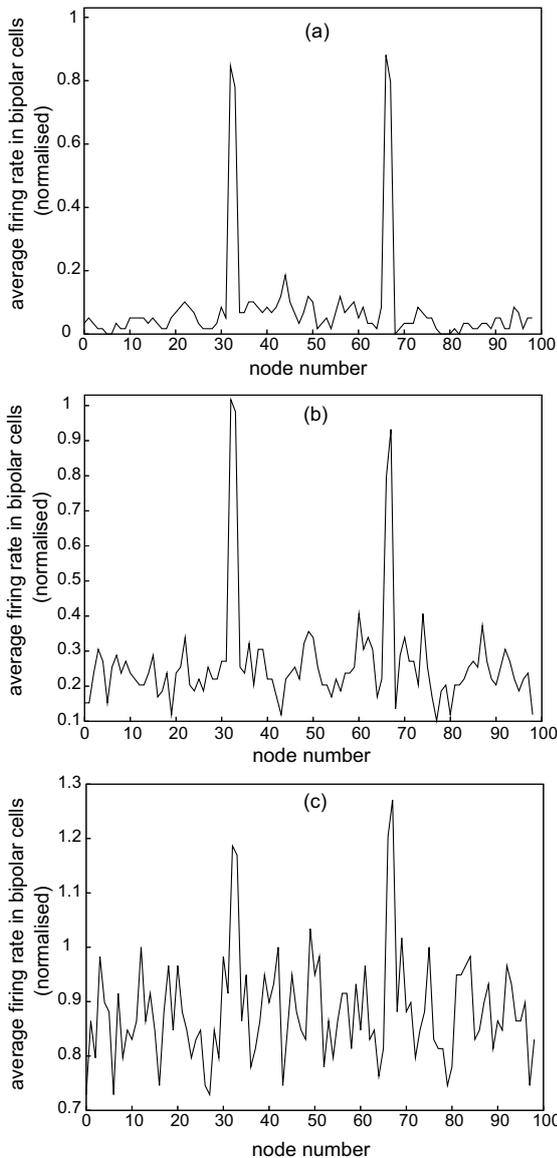


図9 輪郭検出回路の温度依存性; (a) $T = 0.5$ K, (b) $T = 1$ K, (c) $T = 1.5$ K.

の平均トンネル率の分布を図9に示す(縦軸は $T = 0$ Kにおける双極細胞回路の最大平均トンネル率で正規化)。同図からわかるように、温度の増加に伴い輪郭の検出が困難になる(SN比が低下する)。これは、温度の増加に伴い熱雑音による電子トンネル頻度が増加するためである。

図10に、温度に対する双極細胞回路のSN比の変化を示す(輪郭位置にある双極細胞回路の平均トンネル率とそれ以外の双極細胞回路の平均トンネル率との差; 縦軸は $T = 0$ Kにおける双極細胞回路の最大平均トンネル率で正規化)。1.5 K以下の温度では輪郭検出位置がある程度特定できるが、それ以上では輪郭出力は熱雑音に埋もれてしまう。現在のフィードフォワード型の回路構成は熱雑音に関する考慮を行っていないため、これは予期された結果ではある

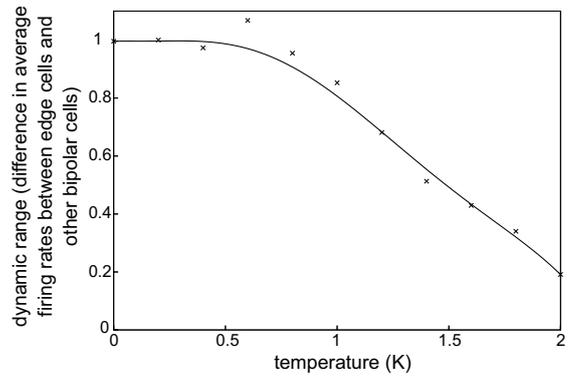


図10 温度に対する双極細胞回路のSN比の変化。

が、今後はフィードバック機構を含めた何らかの対処が必要であると考えられる。

5. まとめ

単電子振動子を用いて網膜の輪郭検出モデルの構造を模擬する回路構成を提案した。視細胞を単安定振動子で、水平細胞を単電子振動子と抵抗回路網で構成した。また双極細胞は単電子振動子の短絡抑制機構を導入して構成した。回路の基本動作をシミュレーションにより確認し、温度評価を行った。その結果、提案回路は1.5 K以下の温度で動作することが明らかになった。今後は、温度冗長性を持つ単電子回路の検討を行う。

文 献

- [1] C. Mead, *Analog VLSI and neural systems*. Addison Wesley, New York, 1989.
- [2] A. Moini, *Vision Chips*. Kluwer: 1999.
- [3] H. Gravert and M.H. Devoret, *Single Charge Tunneling—Coulomb Blockade Phenomena in Nanostructures*. New York: Plenum, 1992.
- [4] T. Oya, T. Asai, T. Fukui, and Y. Amemiya, "Reaction-Diffusion Systems Consisting of Single-Electron Oscillators," *Int. J. Unconventional Computing*, vol. 1, no. 2, pp. 177-194, 2005.
- [5] A. Fujiwara, Y. Takahashi, and K. Murase, "Observation of single electron-hole recombination and photon-pumped current in an asymmetric Si single-electron transistor," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 78, no. 8, pp. 1532-1535, 1997.
- [6] R. Nuryadi, Y. Ishikawa, and M. Tabe, "Single-photon-induced random telegraph signal in a two-dimensional multiple-tunnel-junction array," *Phys. Rev. B*, vol. 73, pp. 45310-45316, 2006.
- [7] T. Oya T., A. Schmid, T. Asai, Y. Leblebici, and Y. Amemiya, "On the fault tolerance of a clustered single-electron neural network for differential enhancement," *IEICE Electronics Express*, 2, no. 3, pp. 76-80, 2005.
- [8] T. Oya, T. Asai, R. Kagaya, T. Hirose, and Y. Amemiya, "Neuronal synchrony detection on single-electron neural network," *Chaos, Solitons & Fractals*, vol. 27, no. 4, pp. 887-894, 2006.