

論文 内網膜機能に学んだ動き情報の生成とその電子回路化*

An Analog MOS Circuit Inspired by an Inner Retina for Producing Signals of Moving Edges

山田 仁

Hitoshi YAMADA

宮下 貴重

Takashige MIYASHITA

大谷 真弘

Masahiro OHTANI

米津 宏雄

Hiroo YONEZU

In this paper, we propose a novel analog MOS circuit which is inspired by an inner retinal neural network. The analog circuit produces signals of motion of edges which are output in an outer retinal neural network. Edge signals are formed into half-wave rectified impulses in 2 types of amacrine cells, and fed back to the wide field amacrine cell in order to modulate width of impulses. The SPICE is used to simulate the performance of the unit of this circuit, and the modulation is successfully presented in the result.

Key Words : Motion detection, Analog MOS circuit, Inner retina, Neural network

1. はじめに

微細加工技術の進歩とともに、LSIの処理速度は向上の一途をたどっている。しかし、現在の逐次演算方式では、画像処理に代表されるように、大量の情報についてリアルタイムで処理することは難しい。これに対して生物では、一つひとつの信号を発生する速度はLSIに比べて桁違いに遅いが、外界の変化をリアルタイムで認識しこれに対応して行動できる。生物は神経ネットワークによる並列処理が可能のため、このような高い情報処理能力を実現できる。

生物の神経ネットワークとLSI技術の処理速度を融合できれば、大量の情報をリアルタイムで処理できると考えられる。ここでは、脊椎動物が情報の大半を得る視覚の情報処理に着目し、網膜の神経ネットワークに学んで、シンプルな視覚機能ニューロデバイスの実現を図る。

生体の網膜は、外部からの画像入力のセンサとして機能するが、単に光信号を神経インパルスに変換するのみでなく、網膜の内部において複雑な信号処理を行った後に、脳へ信号を送り出している。網膜は、光入力を受ける視細胞側の外網膜と、脳へ神経インパルスを送り出す側の内網膜からなる。外網膜では、光が視細胞へ入ると、視細胞からの出力を二次元状に広がる水平細胞が集めて抑制性の出力を双極細胞へ渡す。これにより、外網膜では光強度の空間的变化分の強調を行っていると考えられている¹⁾²⁾。

一方、内網膜では、双極細胞からの出力を二次元的に広がるアマクリン細胞が受け、抑制性の出力を双極細胞、神経節細胞へ渡す。これにより、内網膜では双

極細胞の時間的・空間的な変化分を検出していると考えられている¹⁾²⁾。近年、アマクリン細胞が双極細胞や神経節細胞とどのようなネットワークを形成しているかが解剖学的に解明されてきた。

網膜構造の解明と歩を合わせて、網膜の構造や機能に範を得たニューロデバイスの研究が盛んに行われている。宮下らは、外網膜における水平細胞の機能に着目し、局所適応機能を有するエッジ検出が可能な集積回路を提案した³⁾。一方、内網膜の機能に学んだ例として、Boahenは内網膜のアマクリン細胞として広域と狭域の2種類を想定し、4種類の神経節細胞の出力を生成する電子回路を提案した⁴⁾。しかし、その回路は比較的大規模となり、広域アマクリン細胞の不安定性に起因する回路の振動が報告されている。

本報告では、Kolbらが明らかにした内網膜の神経回路の構造⁵⁾に範を得て、宮下らの提案したエッジ検出回路の出力を入力とすることを想定し、動き情報を生成する、アマクリン細胞を中心とした信号処理モデルとその電子回路を提案する。以下、2節では、動き情報を生成する内網膜のモデルについて述べ、3節ではモデルの中のアマクリン細胞について電子回路化を行う。4節では、電子回路シミュレータSPICEを用いて、電子回路化したアマクリン細胞の単位回路の動作についてシミュレーションを行った結果を示し、5節をまとめとする。

* (社)電子情報通信学会の了解を得て、技術研究報告 Vol.99 No.684, pp.149-155(2000)を加筆修正の上、転載

2. 内網膜における動き情報の生成モデル

脊椎動物の内網膜において、視細胞の桿体(ロッド)からの信号処理経路にある広域アマクリン細胞A17と狭域アマクリン細胞Aは、双極細胞から内網膜への入力を受けて相互に接続し、神経節細胞へ信号を出力していることが知られている⁵⁾。このロッド系のアマクリン細胞の構造に範を得て、動き情報を生成するモデルを作成した。これをFig. 1に示す。

Fig. 1において、入力には移動するエッジ信号を想定する。双極細胞から広域アマクリン細胞A17に入力された信号は、A17において時間遅れ t を経た後、元のA17への入力から差し引かれることにより、入力信号の立ち上がり時と立ち下がり時に時間幅 t を有するインパルスを生成する。エッジが一つの視細胞の視野を横切って動く時にこのインパルスが発生するので、インパルスをエッジの動き情報と考えることができる。

広域アマクリン細胞A17は、複数の双極細胞からエッジ信号を受け、狭域アマクリン細胞Aへインパルスを出力する。また、A17は、複数の狭域アマクリン細胞Aからのフィードバック信号を受け、これらのある時間、空間にわたって積分し、この積分値に応じて t を変化させる。

ここで、一つの広域アマクリン細胞A17が入力を受けている複数の狭域アマクリン細胞Aの形成する空間的な広がり、を、A17の受容野と呼ぶことにする。

狭域アマクリン細胞Aは、広域アマクリン細胞A17が出力したインパルスを入力として受け、これを半波整流した後、動きを検出する型神経節細胞へ出力する。また、別途、双極細胞の出力はA17によってベースラインの変調を受けて型神経節細胞へ伝達される。

広域アマクリン細胞が双極細胞から入力を受け狭域アマクリン細胞へ出力する部分を、広域アマクリン細胞のターミナルとよぶことにする。このターミナルは、入力を受ける双極細胞(または出力する狭域アマクリン細胞)一個あたりに一個ずつ存在する。すなわち、広域アマクリン細胞A17一個は、半波整流されたインパルスを積分する部分、及び複数のターミナルから構成される。広域アマクリン細胞のターミナルと狭域アマクリン細胞をあわせて、アマクリン細胞の構成単位と考え、このブロック図をFig. 2に示す。

前述のように、広域アマクリン細胞A17は、受容野を形成する狭域アマクリン細胞から出力される半波整流されたインパルスを積分し、A17のターミナルから出力するインパルス幅 t を変化させる。いま、イン

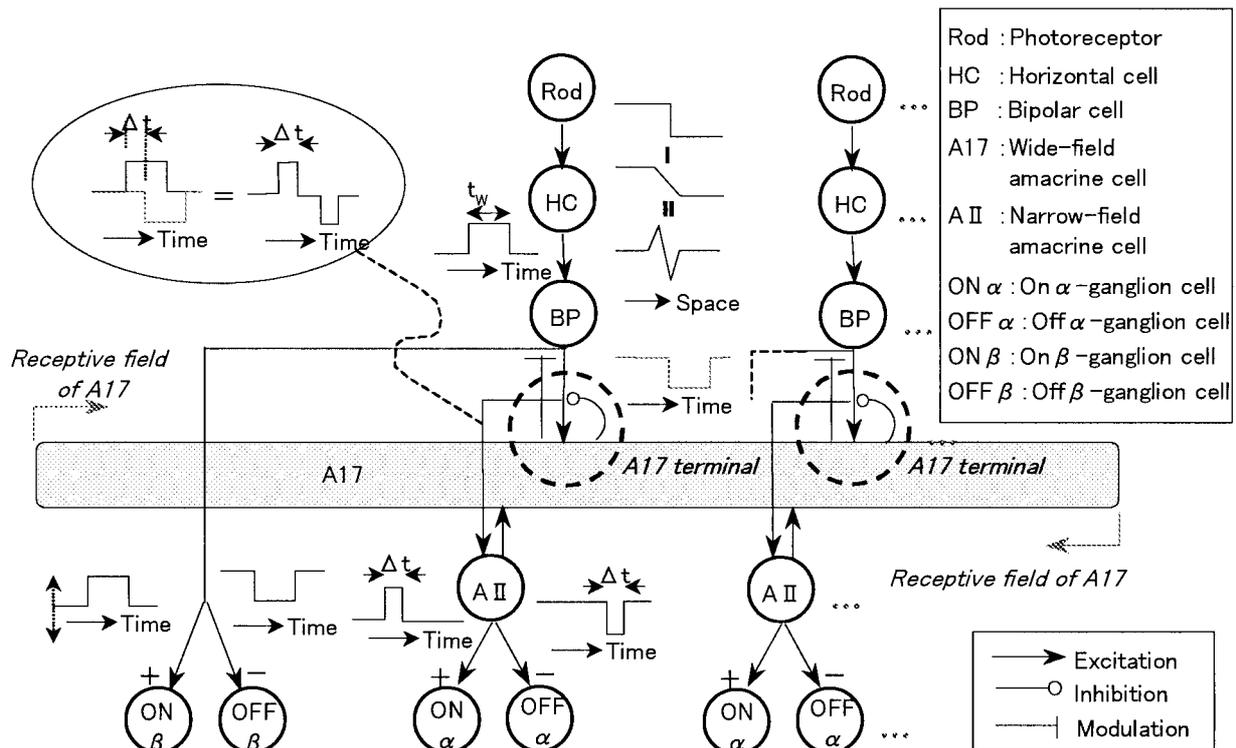


Fig. 1 A model of retinal circuit

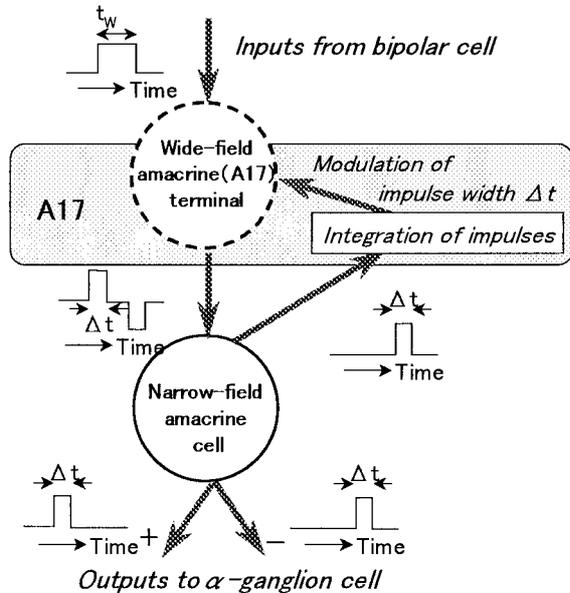


Fig. 2 A unit of amacrine cell

パルス幅にエッジの速度を対応させることができれば、変調を受けたインパルス幅 t から、A17の受容野内の平均速度の大きさが類推できる。また、平均速度に適したインパルス幅を設定できる。そこで、仮に、エッジの速度が速い時はインパルス幅を小さくし、エッジの速度が遅い時はインパルス幅を大きくすることとし、いかにして t を変化させることができるかに着目して、 t を制御する電子回路の実現に注力した。

以下では、 t を制御するために、動き情報に関与する型神経節細胞への出力を想定して、Fig. 2に示したamacrine細胞の動作を行う電子回路を提案し、SPICEシミュレーションを用いて t が変調できるという結果を示す。

3. 動き情報を生成するamacrine細胞の電子回路化

広域amacrine細胞は、双極細胞から電流 I_{in} を受け、狭域amacrine細胞へ電流 I_{out} を出力するターミナルと、狭域amacrine細胞の出力を積分する回路から構成される。広域amacrine細胞の電子回路をFig. 3に示す。

ターミナルでは、入力電流 I_{in} を、 MN_1 、 MN_2 、 MN_3 からなるカレントミラー回路によってコピーする。一方、キャパシタ C_d を用いて時間遅れを生じさせ、 MP_1 を流れる電流を MP_2 にコピーする。 MN_3 にコピーした電流 I_{in} から、時間遅れを生じた電流 I_d を減算することにより、出力電流 I_{out} を生成している。い

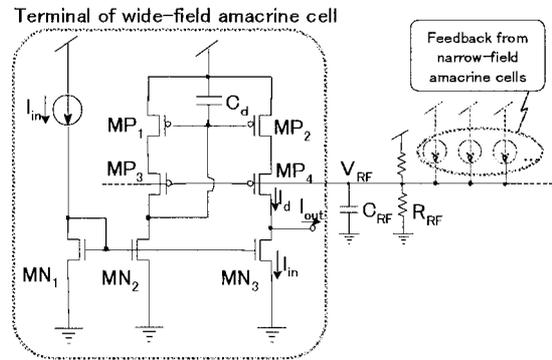


Fig. 3 A unit circuit of a wide-field amacrine cell

ま、双極細胞から広域amacrine細胞のターミナルへ、時間に対してパルス状に変化する信号が入力したときを考えると、パルスの立ち上がり時と立ち下がり時において、キャパシタ C_d を充電または放電するための時間遅れが生じて、インパルス出力を生成する。

ここで、キャパシタ C_d に並列にMOSトランジスタ MP_3 を挿入し MP_3 のコンダクタンスをゲート電圧によって変えることにより、 C_d と MP_1 、 MP_3 で決まる時定数によって、減算する電流 I_d の時間遅れを調整することができる。この時間遅れは、インパルス状の出力電流 I_{out} の時間幅 t を意味する。

一方、時間遅れを調整するMOSトランジスタ MP_3 では、狭域amacrine細胞の出力を積分することによって得られる電圧 V_{RF} によって、ゲート電圧を変化させる。このとき、狭域amacrine細胞の出力の積分値が大きければ V_{RF} が高くなり、 MP_3 のコンダクタンスは小さくなって t は大きくなる。他方 V_{RF} が低くなれば MP_3 のコンダクタンスは大きくなって t は小さくなる。このようにして、インパルス幅 t を変えることができる。

Fig. 4に、狭域amacrine細胞の回路を示す。入力電流が狭域amacrine細胞に流入する向きと流出する向きのいずれの場合でも出力できるように、nMOSもしくはpMOSよりなる2種類の半波整流回路を用い、それぞれが神経節細胞への出力のための積分回路を備える。これら2種類の回路は、広域amacrine細胞から入力電流を受け、広域amacrine細胞の受容野に出力電流をフィードバックする。Fig. 4(a)に示したnMOSからなる回路では、 MN_1 に電流が流入するときのみ、 MN_2 から電流が出力される。これは、双極細胞から広域amacrine細胞へパルス状の入力があつたときの、パルスの立ち下がり時に発生するインパルスに相当する。同様に、Fig. 4(b)に示したpMOSからな

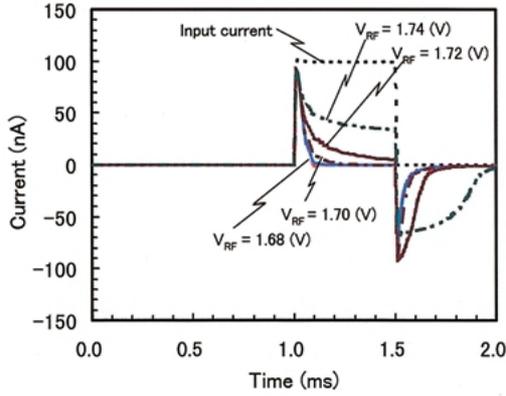


Fig. 6 A simulation result of a wide-field amacrine ($C_d=50\text{pF}, I_{in}=100\text{nA}$)

は、 V_{RF} が高くなるのに従って MP_3 、 MP_4 のコンダクタンスが小さくなるためと考えられる。

Fig. 3の回路の出力を、Fig. 4の回路を通して半波整流した結果を、Fig. 7に示す。Fig. 7(a)では、Fig. 6に示したインパルス出力電流が半波整流されている様子がわかる。また、Fig. 7(b)では、Fig. 7(a)の電流を適当なコンダクタンスを用いて放電させつつ時間積分した出力電圧を示す。入力パルスの立ち上がり開始後、または立ち下がり開始後の出力電圧が、 V_{RF} に応じて異なった値を示すことを確認した。

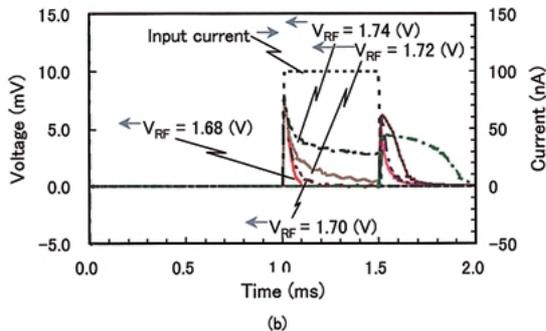
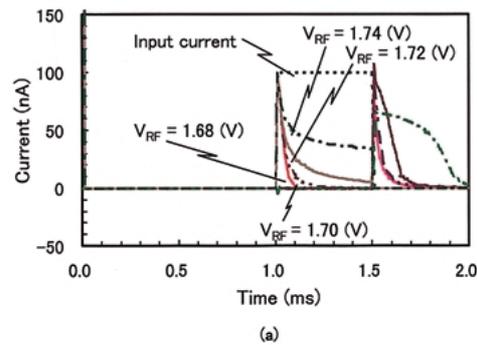


Fig. 7 A simulation result of a unit circuit of wide-and narrow-field amacrine cell ($C_d=50\text{pF}, I_{in}=100\text{nA}$)

受容野の電圧 V_{RF} を変えたとき、連続的に入力したパルス列に応じて、出力インパルス幅が変化してゆく様子をFig. 8に示す。Fig. 8は、Fig. 5の回路を用いてSPICEでシミュレーションした結果である。Fig. 8(a)では、Fig. 5の C_{RF} からの放電を比較的速くするように R_{RF} を調整した。この結果、最初に出力するインパルスを基準としたとき、時間を経るに従ってインパルス幅が徐々に小さくなるように変化させることができた。

一方、Fig. 8(b)では、Fig. 5の C_{RF} からの放電を比較的遅くするように R_{RF} を調整した。この結果、最初に出力するインパルスを基準としたとき、時間を経るに従ってインパルス幅が徐々に大きくなるように変化さ

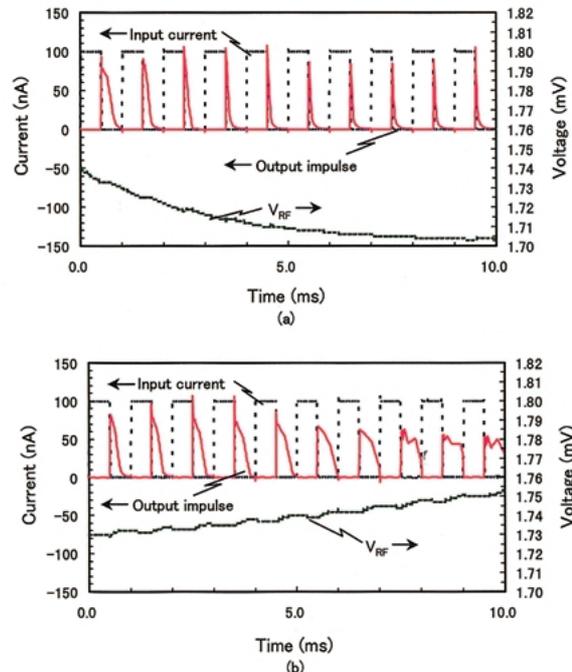


Fig. 8 A simulation result of modulation of impulse width. (a) Diminution. (b) Enlargement.

せることができた。なお、Fig. 8(b)では入力したパルス列の間隔を0.5msとしたため、出力される時間幅がこれより大きいインパルスは、時間幅0.5msにて強制的に出力が抑制されている。

2節において、エッジの速度が速い時はインパルス幅を小さくし、エッジの速度が遅い時はインパルス幅を大きくすることを仮定し、3節で t を制御する電子回路を提案した。この結果、インパルス幅が変調できることをSPICEによって確認した。

ここで、課題として、インパルス幅にエッジの速度を対応させる必要性が挙げられる。例えば、受容野内に一つのエッジしか無いと仮定し、さらにエッジが、

ある時間内に複数の視細胞を横切ると仮定したとき、ある時間内に信号を出力する狭域アマクリン細胞の数を計数すれば、エッジの速度が速い場合は大きな計数値が得られ、遅い場合は小さな計数値になるので、この値に応じて、広域アマクリン細胞が受容野の狭域アマクリン細胞のフィードバック出力を積分するときのコンダクタンスを制御する。

また、本報告ではアマクリン細胞の電子回路化を検討したが、神経節細胞の出力によって動きの方向を判定するモデルと電子回路を実現することも課題である。

5. まとめ

内網膜の神経回路の構造に範を得て、動き情報を生成する、アマクリン細胞を中心とした信号処理モデルを提案した。広域アマクリン細胞が、受容野を形成する狭域アマクリン細胞から出力される半波整流されたインパルスを集積し、出力するインパルス幅 t を変調する電子回路を提案し、 t が変調できることをSPICEシミュレーションにより示した。

しかし、ここでは、インパルス幅にエッジの速度を対応させるという課題を解決する必要がある。今後、インパルス幅にエッジの速度を対応させるモデルを検討し、さらには神経節細胞の出力によって動きの方向を判定するモデルと電子回路を検討してゆく。

<参考文献>

- 1) 平井有三, “視覚と記憶の情報処理”, 培風館, p36, 1995.
- 2) C.A.Mead, (米津宏雄, 臼井支朗 訳)
“アナログVLSIと神経システム”, トッパン, p302, 1993.
- 3) 宮下貴重, 大谷真弘, 西尾公裕, 米津宏雄,
“局所適応機能を有するエッジ検出機構の集積回路化”, 日本神経回路学会第9回全国大会, 1999.
- 4) K.Boahen, “Retinomorphic Chips that see Quadruple Images”, Proceedings of the Seventh International Conference on Microelectronics for Neural, Fuzzy, and Bio-Inspired Systems, pp12 - 20, 1999.
- 5) H.Kolb, “Amacrine Cells of the Mammalian Retina: Neurocircuitry and Functional Roles”, Eye, 11, pp904 - 923, 1997.

<著 者>



山田 仁
(やまだ ひとし)

技術技能研修部 技術研修
技術研修の企画・運営に従事しつ
つ, 豊橋技術科学大学において集
積回路の研究に従事。



宮下 貴重
(みやした たかしげ)

豊橋技術科学大学 工学部 電気・電
子工学系
(現所属: ローム株式会社)
集積回路の研究に従事。



大谷 真弘
(おおたに まさひろ)

豊橋技術科学大学 工学部 電気・電
子工学系
集積回路の研究に従事。



米津 宏雄
(よねづ ひろお)

豊橋技術科学大学 工学部 電気・電
子工学系 教授・工学博士。
ニューロデバイス・ネットワーク
(集積回路), 光デバイスの研究に
従事。