

神経回路網における微分処理と非線形処理の性質

7D-2

石井直宏 吉根勝美

名古屋工業大学 名古屋市立大学

1 まえがき

視覚から得られる情報は膨大であるが、その入力部となる網膜神経回路の情報処理は並列処理ばかりでなく、情報圧縮し効率よく伝送するための各種の神経細胞の役割が大きい。本研究では、網膜神経回路の各層の神経回路の機能面に注目し、従来明確にされにくいアマクリン細胞の機能を明らかにすることを目的とした。この細胞の機能が時間変化に対応する微分処理にあることを明らかにし、これが網膜神経回路の非線形関数を強調し、さらに網膜の全体の非線形処理に大きな役割を示すことを述べる。

2 網膜神経回路網のモジュール

本研究では網膜神経回路について、今までの研究から明らかにされた catfish の神経細胞の回路網を Fig.1 に示す。図中の B は双極細胞、G は神経節細胞、C と N は各々 C 型と N 型のアマクリン細胞である。

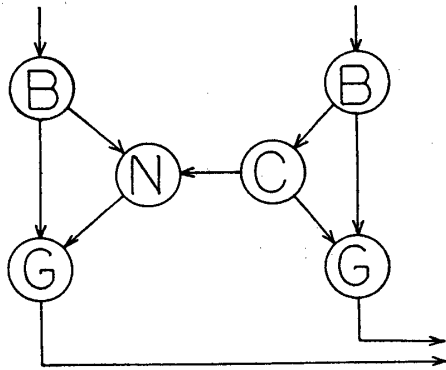


Fig.1 Simplified neural network of retina

Fig.1 の回路を分解し、Fig.2 のようなモジュールとして解析を行なう。図中のモジュールを C-network と呼ぶことにする。

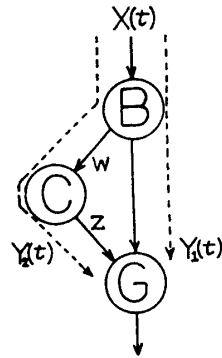


Fig.2 C-network

このモジュールの入出力の関係を表わせば、線形処理 (Linear) として、

$$Y_1(t) = \int h_1(\tau) \times (t - \tau) d\tau$$

さらに非線形処理 (Nonlinear) として、

$$Y_2(t) = \int h_1(\tau) \times (t - \tau) d\tau + \iint h_1(\tau_1) h_1(\tau_2) \cdot x(t - \tau_1) \times (t - \tau_2) d\tau_1 d\tau_2$$

で表わされる。ここで、 $h_1(\tau)$ は双極細胞のインパルス応答であり、 a_1 と a_2 は係数である。入出力に対し、Lee-Schetzen 理論を適用すれば、線形処理の1次の核関数は

$$K_1(\tau) = h_1(\tau) + a_1 h_1(\tau)$$

さらに非線形処理の2次核関数は

$$K_2(\tau_1, \tau_2) = a_2 h_1(\tau_1) h_1(\tau_2)$$

で与えられる。

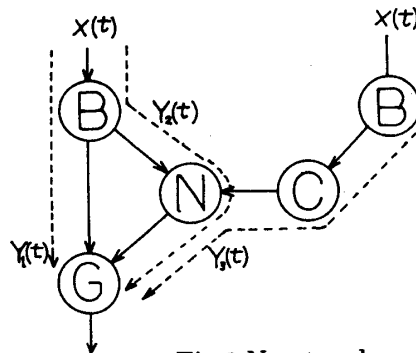


Fig.3 N-network

Fig.3でCはC型細胞であり、非線形の入出力関係が2乗特性を示す。ここでは

$$Z = a_2 W^2 + a_1 W$$

を考える。Fig.3の線形処理の入出力関係は

$$Y_1(t) + Y_2(t) = \int h_1(\tau) \times (t - \tau) d\tau + \int [h_1'(\tau) * h_1(\tau)] \times (t - \tau) d\tau$$

ここで*は畳み込み積分である。 $h_1'(\tau)$ はN型細胞のインパルス応答である。非線形の入出力関係は

$$Y_3(t) = a_1 \int [h_1'(\tau) * h_1(\tau)] \times (t - \tau) d\tau + a_2 \iint h_1'(\tau) \otimes [h_1(\tau_1) h_1(\tau_2)] \times (t - \tau_1) \times (t - \tau_2) d\tau_1 d\tau_2$$

となる。ここで \otimes は

$$\int h_1'(\tau) h_1(\tau_1 - \tau) h_1(\tau_2 - \tau) d\tau = h_1'(\tau) \otimes [h_1(\tau_1) h_1(\tau_2)]$$

と定義する。このN-networkの1次の核関数は

$$K_1(\tau) = h_1(\tau) + h_1'(\tau) * h_1(\tau) + a_2 h_1'(\tau) * h_1(\tau)$$

で与えられ、2次の核関数は

$$K_2(\tau_1, \tau_2) = a_2 h_1' \otimes [h_1(\tau_1) h_1(\tau_2)]$$

で与えられる。C-networkとN-networkの差異はN細胞があるかないかである。

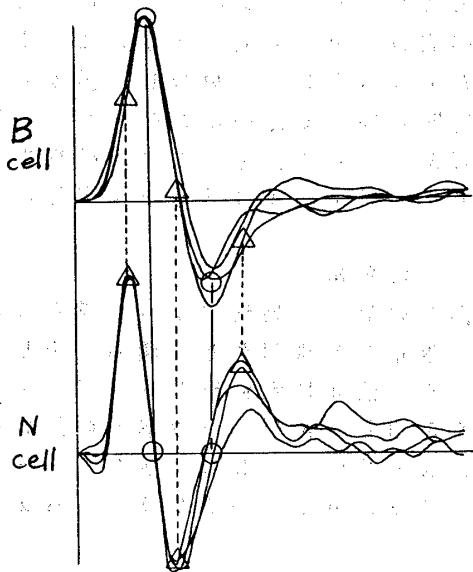


Fig.4 Kernel responses of bipolar and N-type amacrine cells

双極細胞Bの出力はN型細胞の入力となる。この時のN型細胞1次の核関数の応答波形をFig.4に示す。Fig.4の双極細胞(B)の1次核の応答波形のピーク値(○印)はN型細胞のそれの0交叉点(○印)に対応する。またN型細胞のピーク値(△印)は双極細胞の応答波形の変化率の大きな箇所(△印)に対応する。この性質はN型細胞の微分処理を示す顕著な特徴を示す。この微分処理の性質は時間的に微分値が変化することがFig.5より明らかになった。Fig.4の双極細胞の応答のdepolarization方向に対して微分値に+1.0の係数を乗算し、hyperpolarizationの方向に対して+0.65を乗算したものである。(Fig.5の実線で示す。点線は応答波形。)すなわち、細胞の時間的微分特性が変化する。時間領域での微分特性の変化が、周波数領域での帯域フィルタとしての性質を示す。

以上の考察から、N型細胞の機能はC型細胞の非線形情報の特徴をさらに微分処理することによって強調し、上位中枢へ伝達することである。次にG細胞ではアナログ量からスパイク列に変換する機能を有しているが、N細胞がその準備となる機能を担っていることである。

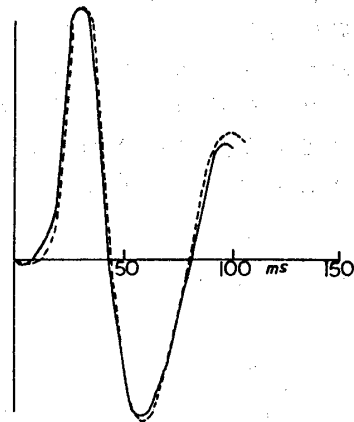


Fig.5 Modified differentiation

3 まとめ

神経回路網として線形処理および非線形処理を行なう網膜回路を取りあげた。膨大な入力情報並列処理するばかりでなく、個々の細胞の機能がことなる処理を担っていることを述べた。

[文献] K.I.Naka, H.Sakai and N.Ishii, "Generation and transformation of second-order nonlinear in catfish retina", Annals of Biomedical Eng., vol.16, 1988