M-5

側抑制の特性を有した神経節細胞の電子回路モデル化に対する一検討

A Study on Electronic Circuit Model of the Retinal Ganglion Cell with Lateral Inhibition

○宮武良乃介[1]，佐伯勝敏[2]，佐々木芳樹[2]
*Ryonosuke Miyatake[1], Katsutoshi Saeki[2], Yoshiki Sasaki[2]

Abstract: In the electronic circuit model of the vision device, to process the visual information while flexibly responding to the outside situation, active information processing capability is indispensable. In this paper, we were examined with the construction of the electronic circuit model of ganglion cells having the characteristics of lateral inhibition. Moreover, we verified for propose circuit model using the optical illusion. As a result, it is shown that propose circuit model reproduced the characteristics of lateral inhibition.

1.　まえがき

近年，生体の情報処理機構をモデル化し，工学的に応用しようとする研究が行われている[1]．例えば，画像を用いたパターン認識において，外界の状況に柔軟に対応しながら視覚情報を取り込み，処理するためには，能動的な情報処理能力は不可欠である[2]．

今回，目から脳に信号を送る役割を果たしている神経節細胞が持っている，側抑制の特性を再現した電子回路モデルの構築に対して検討を行い，錯視を用いて，この回路モデルの動作検証を行ったので報告する．

2.　本論

図 1 に今回構築した網膜の回路モデルの概略図を示す．シミュレーションで用いた回路は，1 つの神経節細胞モデルが 25 個の錐体細胞モデルを取りまとめており，中心の 9 個を受容野中心部，周辺の 16 個を受容野周辺部とする．中心部は神経節細胞モデルに対して電流を送り，興奮させる．周辺部は神経節細胞モデルから電流を引き抜き，抑制する．

図 2 に錐体細胞モデルを示す. 同図は図 1 中の 25 個の錐体細胞モデルの 1 つを示す．初期状態は，V_{DD} から M_2 を介して C_1 に電荷がチャージされるため, M_3 はオフになっている．まず V_{in} に電圧が入力されると，M_1 がオンになり，C_1 から電荷を引き抜く．すると C_1 の電位が下がるため，M_3 がオンになり，I_{OUT} として電流が出力される．このモデルは，錐体細胞が光の刺激を受けたときに，過分極によって活動電位が低下する特性[3]を再現可能である．

図 3 に網膜の回路モデルの構成を示す．図中，中心部として扱う錐体細胞モデルを 9 個カレント・ソース電流源に，周辺部として扱う錐体細胞モデルを 16 個カレント・シンク電流源に接続している神経節細胞モデルとして構築した負性抵抗素子を用いた細胞体モデルに対して電流の送り込みと引き抜きを行うことで負性抵抗素子を用いた細胞体モデルの発振周波数が変化する．

図 4 にそれぞれの錐体細胞モデル一つ一つに，電圧を入力した場合の神経節細胞モデルの発振周波数を示

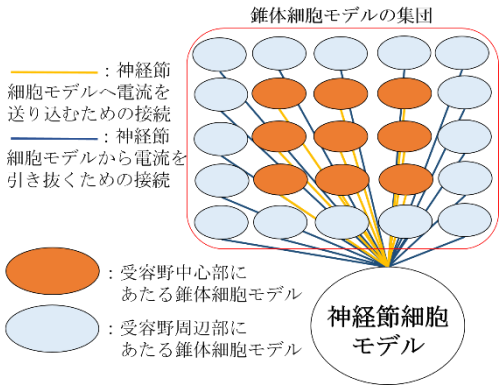


図 1　網膜の回路モデルの概略図

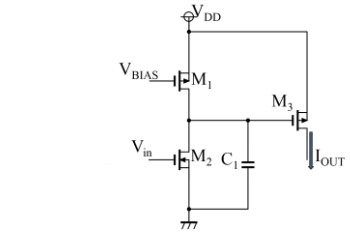


図 2　錐体細胞モデルの回路図

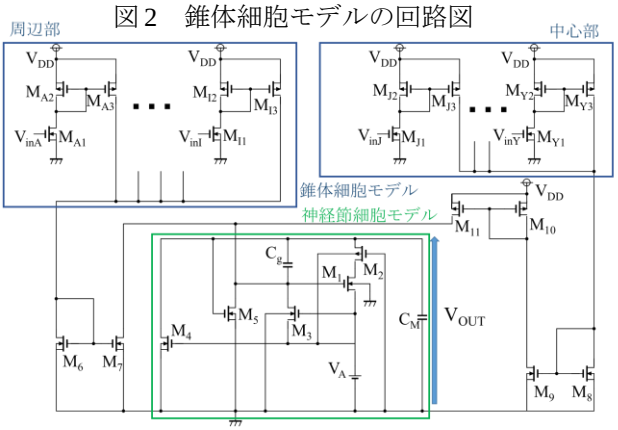


図 3　網膜の回路モデルの構成

1：日大理工・学部・電子　2：日大理工・教員・電子

す．同図において，縦軸は発振周波数，横軸は電圧を入力した錐体細胞モデルの位置を示す．同図は図 1 の回路モデルの 25 個の錐体細胞モデルを 2 次元平面に配置し，神経節細胞モデルの発振周波数がどのように変化するのかを示している．周辺部に電圧を入力した場合は，抑制されるため，神経節細胞モデルは発振が止まる．また，中心部に電圧を入力した場合，興奮するため，神経節細胞モデルの発振周波数が上昇していることを示している．同図より，この回路モデルは側抑制の特性[3] [4]を再現可能であることを示している．

図 5 に，複数の錐体細胞モデルに電圧を入力したときの発振波形の例を示す．同図において，横軸は時間を，縦軸は出力電圧を示している．図(a)は，中心部全体に電圧が入力されているため，発振周波数が高くなっている．図(b)は周辺部の錐体細胞モデル 6 つに，また図(c)は周辺部の錐体細胞モデル 16 個に電圧が入力しており，抑制されることで，発振周波数が低くなっていることを示している．

次に，このモデルを，錯視を用いて動作検証を行った．

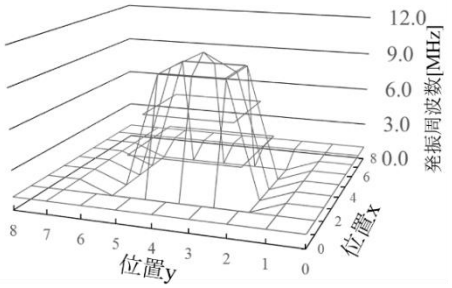
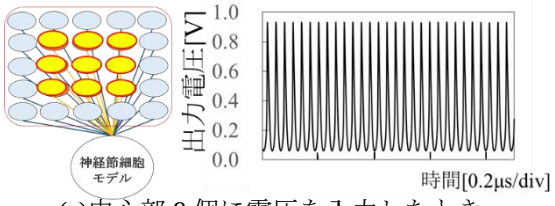
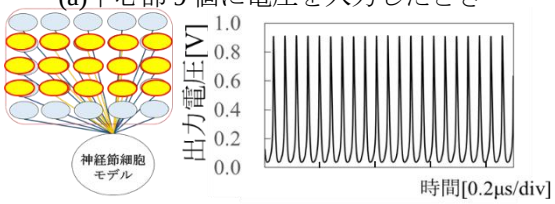


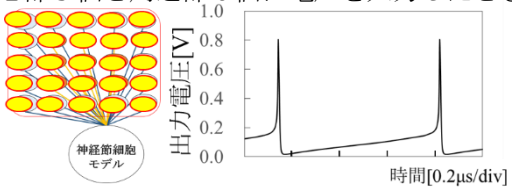
図 4　神経節細胞モデルのシミュレーション結果



(a)中心部 9 個に電圧を入力したとき



(b)中心部 9 個と周辺部 6 個に電圧を入力したとき



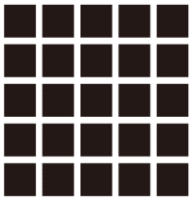
(c)中心部 9 個と周辺部 16 個に電圧を入力したとき

図 5　複数の錐体細胞モデルに
電圧を入力したときの発振波形

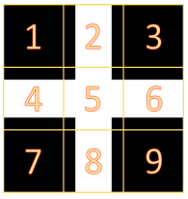
た．

図 6(a) に白線の格子部分に黒い点が見えるハーマングリッド錯視を示す．シミュレーションでは図(b)に示すように，1 つの格子部分の画像を 9 分割し，それぞれの分割した場所に網膜の回路モデルを配置し，錐体細胞モデルに入力する電圧を黒の部分はオフ，白の部分はオンとしたときに，それぞれの神経節細胞モデルがどのような振る舞いをするか検証を行った．

表 1 にシミュレーションの結果を示す．光の刺激を中心部に受けている神経節細胞モデル 2，4，5，6，8 は，興奮し，周波数が大きくなっている．その中でも抑制が大きい神経節細胞モデル 5 のみは他の細胞に比べて周波数が低くなっている．このことは，発振周波数が低いため，他の細胞が見ている部分に比べて黒く見える錯視が起こっていることを示している．



(a)ハーマングリッド



(b)シミュレーション方法

図 6　ハーマングリッド錯視のシミュレーション

表 1　シミュレーション結果

Cell No.	発振周波数[MHz]
1,3,7,9	1.47
2,4,6,8	23.0
5	13.6

3. まとめ

今回，神経節細胞が持っている側抑制の特性を再現した電子回路モデルの構築に対して検討を行い，錯視を用いて，提案する回路モデルの動作検証を行った．その結果，構築したモデルが側抑制の特性を満たしていることを明らかにした．

今後は，色情報を含めることができる回路や，今回作成した回路を用いた輪郭検出のニューラルネットワークを構築する．

4. 参考文献

[1]伊藤真，黒岩丈介，三宅章吾：「海馬を用いた記憶システムの神経回路網モデル」電子情報通信学会論誌 Vol.J-D-II(2)，No.3，pp.276-286，1999.

[2]福島邦彦：「神経回路モデルによる視覚の研究」，コンピュータビジョンとイメージメディア,114-5, 1999.

[3]安井湘三，「感覚情報処理」，コロナ社，2004.

[4]Enroth-Cugell, C., Robson, J.G,Schweitzer-Tong, D. E. and Watson, A. B., “Spatio-tenporal interactions in cat retinal ganglion cells showing linear spatial summation,” J. Physiol., Vol. 341, pp. 279-307, 1983.