網膜シミュレーションによる Mach Band 錯視の検討*

青木 謙二[†]・小野 智司[†]・中山 茂[†]

Examination of Mach Band Visual Illusion by Retinal Simulation*

Kenji AOKI[†], Satoshi ONO[†] and Shigeru NAKAYAMA[†]

1. はじめに

古くから多くの錯視が案出されているが、錯視が生じるメカニズムについては、様々な説があり、明確な結論は得られていない。錯視の種類によって発生のメカニズムが異なると考えられている。最も知られている錯視の一つに Mach Band がある。Mach Band の錯視は、網膜細胞間の側抑制に起因するものと考えられており、ニューラルネットワークなどによる数理的な検証も行われている [1,2]。さらに、DOG 関数を用いた側抑制モデルに加え、高次機能である特徴抽出モデルを提案し、Mach Band を再現した報告もなされている [3]。本研究では、これらの報告とは異なる外網膜の神経回路構造を基にしたモデルを用いてシミュレータを作成した。本速報では、Mach Band の画像をシミュレータの入力として与えたとき、出力輝度が見かけの明るさの増大・減少を再現しているかを検証し、その結果について述べる。

2. 外網膜シミュレータ

本研究で作成したシミュレータは、脊椎動物の網膜神経回路網を基に作成した。一般的に脊椎動物の網膜は6種類の細胞から構成されており、その細胞は層構造に並んでいる。Fig. 1(a) に示す網膜の外側の外網膜とよばれる層は、光信号を電気信号に変換する視細胞と、視細胞から信号を受ける水平細胞、視細胞と水平細胞から信号を受ける双極細胞からなる。隣接する視細胞間、水平細胞間はギャップジャンクションとよばれる電気的なつながりによって、信号を側方向へ伝播する。

電気的には、細胞の中は電気を通すので抵抗、細胞膜は薄い絶縁体の両側に電位差が生じているのでコンデンサ、ギャップジャンクションは電気を通すので側方向の抵抗として構成できる。水平細胞からの出力は、視細胞か

Fig. 1 Equivalent electrical circuit to retinal structure

らの出力に対して極性が反転している。よって、双極細胞からの出力は、視細胞層からの出力と水平細胞層からの出力との差分とした。これらの特徴に基づく外網膜の構造を、等価の電気回路として表現したものが Fig. 1(b) である [4]。これは、視細胞、水平細胞、双極細胞の関係を電気回路図として一列に表したもので、実際にはこの回路が 256×256 の格子状に接続されている。Fig. 1(b) に示した回路から、格子座標 (x, y) の時刻 t における入力を V_t^i 、出力を V_t^o とすると、 $V_{t+\Delta t}^o$ は次式で表すことができる。

$$\begin{aligned} V_{t+\Delta t}^o = & V_t^o(x, y) + \frac{\Delta t}{\tau} V_{t+\Delta t}^i(x, y) \\ & - (1 + 4\alpha + \beta) \frac{\Delta t}{\tau} V_t^o(x, y) \\ & + \alpha \frac{\Delta t}{\tau} \{ V_t^o(x-1, y) + V_t^o(x+1, y) \\ & + V_t^o(x, y-1) + V_t^o(x, y+1) \} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\alpha = r/R, \quad \beta = r/R_m, \quad \tau = rC \quad (2)$$

ただし、 r, R, R_m, C は Fig. 1(b) 中の視細胞 (cone) に関連した r_c, R_c, R_{mc}, C_c 、水平細胞 (horizontal cell) に関連した r_h, R_h, R_{mh}, C_h にそれぞれ対応している。(1) 式は、隣り合う画素の輝度値の時間的に一つ前の出力に重みを付けて、入力値に加算することを表している。

本研究では、(1), (2) 式に基づくシミュレータを Java 言語で実装した。入出力画像を 256×256 画素、256

* 原稿受付 2007 年 7 月 18 日

[†] 鹿児島大学 工学部 Faculty of Engineering, Kagoshima University; 1-21-40 Korimoto, Kagoshima city, Kagoshima 890-0065, JAPAN

Key Words: retinal circuit, simulation, illusion, Mach Band.

階調のグレースケール画像とした．各パラメータの値は，生理学的に妥当な範囲内の値を実験的に求め， $r_c = 0.01[\text{M}\Omega]$ ， $R_{mc} = 1[\text{M}\Omega]$ ， $C_c = 1[\text{nF}]$ ， $R_c = 0.6[\text{M}\Omega]$ ， $r_h = 0.08[\text{M}\Omega]$ ， $R_{mh} = 1[\text{M}\Omega]$ ， $C_h = 1[\text{nF}]$ ， $R_h = 0.06[\text{M}\Omega]$ とした．

Fig. 1(b)の右側に入出力画像を模式的に示す．上から入力，視細胞層の出力，水平細胞層の出力，双極細胞の出力（最終出力）の画像で，画像の平滑化と輪郭強調の処理が行われる．

3. シミュレーション実験の結果と考察

3.1 Mach Band における錯視現象の検証

シミュレーション実験に使用した入力画像を，Fig. 2に示す．Fig. 2は，両端に黒色と白色の領域があり，その間が単調なグラデーションとなっている錯視画像である．この画像を人間が見たとき，Fig. 2中矢印で示す黒色部とグラデーションの境界に暗い帯が，白色部とグラデーションの境界に明るい帯が見える．また，Fig. 2に示した五つの Mach Band の画像は，中央グラデーション部の幅 $w[\text{pixels}]$ が，それぞれ (a)128，(b)64，(c)32，(d)16，(e)8 である．

Fig. 2 Mach Band with some width of gradation area
注) Fig. 2は印刷の都合により正確な濃淡を表現できていない場合があります．

Fig. 2に示した画像を，作成したシミュレータへ入力として与え，Mach Bandが見える錯視現象が出力結果に表れるかを，出力画像の輝度値の変化によって検証した．その結果をFig. 3に示す．Fig. 3に示したグラフは，入力または出力画像の上下中央1画素を横方向に256画素切り出したときの，それぞれ1画素ごとの輝度値を示したものである．横軸を左端からの画素数，縦軸を出力

輝度値（黒：0，白：255）とした．Fig. 3(a)で示すように，入力画像の最低輝度値を51，最高輝度値を230となるように設定した．この値は出力輝度値の上下の振幅が等しく現れるように実験的に設定した．グラデーション部の幅 w が狭くなるにつれて，グラデーション部の輝度変化が急峻になっている．

シミュレーションで得られた出力結果をFig. 3(b)に示す．ここで，Fig. 3(b)に示すように，グラデーション部と黒色部との境界で見られる輝度変化の振幅を P_{black} ，白色部との境界で見られる輝度変化の振幅を P_{white} とした．Fig. 2(a)の入力画像に対しては， $P_{black} = 0$ ， $P_{white} = 1$ とほとんど境界部での輝度変化は見られなかった．Fig. 2(b)の入力画像に対しては，Fig. 3(b)点線で示すとおり，左右端は輝度値が0，6～96画素では輝度値8となり，97画素でいったん輝度値7に下がってから上昇した．162画素で輝度値22まで上がってから，輝度値21まで下がり，163～251画素では輝度値21であった．なおこの場合， $P_{black} = 1$ ， $P_{white} = 1$ となった．輝度値が7まで下がった部と22まで上がった部が，グラデーションの境界部に帯が見える錯視現象を反映した結果となっている．

Fig. 3(b)の結果から，グラデーション幅 $w[\text{pixels}]$ が小さくなるにつれて， P_{black} ， P_{white} が大きくなっていることがわかる． w と振幅との関係をFig. 4（実線，左軸）にまとめた．横軸が w ，縦軸が P_{black} ， P_{white} である．Fig. 4に示すとおり， w が小さくなるにつれて振幅は大きくなり， $w=8$ のとき振幅が最も大きかった．この結果は， $w=128$ の画像では錯視現象が起こらないのに対し， $w=8$ の画像では錯視現象が顕著に見られることを表している．実際に，Fig. 2の Mach Band 画像を見ると， w が小さくなるほど境界が際だって見え，シミュレーション結果と一致している．よって，本研究で作成したシミュレータを用いて Mach Band の錯視現象を再現することができたと考える．

また，振幅 P_{black} ， P_{white} の横方向の幅を D_{black} ， D_{white} として， w と D_{black} ， D_{white} との関係をFig. 4（点線，右軸）に併せて示した． w が小さくなるにつれて D_{black} ， D_{white} は大きくなり， $w=8$ のとき最も大きかった．この結果は， $w=128$ の画像では Mach Band の幅がほとんどないのに対し， $w=8$ の画像では Mach Band の幅が大きいことを表している．

さらに，各パラメータの値を変え，パラメータが出力輝度の振幅に与える影響を調べた．まず，水平細胞層の側方向の強さを表すパラメータ R_h の値と出力との関係をFig. 5に示す． R_h の値を0.06，0.2，0.6，2，6 $[\text{M}\Omega]$ と変え，Fig. 2に示した五つの画像を入力としてシミュレーションを行った．シミュレーションの出力結果から，グラデーション部の境界における輝度変化の振幅（ P_{black} ， P_{white} ）を測定した．Fig. 5(a)は P_{black} と R_h との関係を，Fig. 5(b)は P_{white} と R_h との関係を

(a) Input luminances of Mach Band illusions

(b) Output luminances of Mach Band illusions

Fig. 3 Luminances of Mach Band inputs and outputs

Fig. 4 Relationship between width and amplitude, duration of Mach Band illusion

示している. 両者とも R_h の値が大きくなるにつれ, 振幅 (P_{black} , P_{white}) が小さくなる傾向が見られた. このことから, 側方向の影響が小さくなるほど, 錯視現象が現れなくなることがわかる. なお, その他のパラメータの値も変えてシミュレーション実験を行ったが, 振幅 (P_{black} , P_{white}) のみへの大きな影響はほとんど見られなかった.

3.2 考察

上記の結果より, 本研究において外網膜の神経回路構造を基に作成したシミュレータでは, Mach Band 錯視を再現できることがわかった. このシミュレータは, 網膜の神経回路構造を基に作成したものであり, 側抑制の構造を持つ. 側抑制の構造をもつことによって, 本研究で作成したシミュレータが Mach Band の錯視を再現できたと考えられる. また, 入力画像の輝度変化が急峻な

(a) Black side amplitude (b) White side amplitude

Fig. 5 Relationships between R_h and P_{black} , P_{white}

部で錯視が強く起こりやすいことを定量的に示すことができた. これは, 本シミュレータの出力が側方向の入力の影響を受ける構造となっているため, 輝度の変化が急峻である領域ほど側方向の影響が大きいことを表している. 上記の結果は, 錯視現象発生の際抑制説を支持するものとなった.

4. おわりに

本研究のシミュレーションで得られた結果は, どのような画像が錯視現象を起こす可能性があるかを, 定量的に評価できる可能性を示すものであった.

本研究でシミュレーションに用いたパラメータは実験的に値を決定したが, 出力結果の各パラメータへの依存度, および実際の人間の見え方とどのような関係にあるのかを, 心理学実験との比較により, より詳細に検証する必要がある. さらに, 実際の網膜では一つの神経細胞は隣接する四方の細胞以外にも接続しており, 広く側方向の影響を受けている. 本シミュレータでは四方格子構造のため隣接する四方からのみ影響を受ける. 隣接細胞との接続数が錯視にどの程度寄与するかについても, 今後六方や八方格子構造などのシミュレータで検証する必要がある.

参考文献

- [1] H. Ito: Mathematical models of the human visual system describing Mach Band phenomena and their implications for computer vision systems design; *ITEJ Technical Report*, Vol. 12, No. 20, pp. 37-44 (1988)
- [2] S. Hongo, T. Inui and M. Kawato: A computational theory and a neural network model on the brightness perception: A Markov random field model for the filling-in process; *ITEJ Technical Report*, Vol. 14, No. 54, pp. 1-6 (1990)
- [3] 塚田, 佐々木, 八木: 側抑制を用いた明るさ知覚の特徴抽出モデル; 信学論, Vol. J77-D-II, No. 4, pp. 866-873 (1994)
- [4] T. Yagi, F. Ariki and Y. Funahashi: Dynamic model of dual neural network for vertebrate retina; *Proc. of Int'l Joint Conf. on Neural Networks*, Vol. 1, pp. 787-789 (1989)