

G-001

## 網膜外網状層の生理工学的モデルによる Footstep 錯視の解析

Analysis of Footstep illusion by physiology technological model  
of outer plexiform layer of the retina

鷲野 希望† 石原 彰人‡  
Nozomi Washino Akito Ishihara

## 1. まえがき

Footstep 錯視(FI)は、ヒトの運動検出特性によって生じる[1][2]他に、ある種の幾何学的錯視に由来するとも言われている[4]。また、その錯視量は刺激を観測する視野角で異なっている。これらは、網膜の生理的な構造が FI 発生メカニズムに深く関与する可能性を示している。幾何学的錯視と FI との関係をより詳細に調べるために視覚系のモデルを用いた解析が有効であると考えた。

そこで、我々は網膜内の空間的な細胞配置や結合特性を考慮した生理工学的な網膜の数理モデルを構築し、FI に関係する幾何学図形に対する網膜出力を解析した。ここでモデルは、異なる視野角での細胞応答をシミュレーションするため、細胞配置や受容野に関わるパラメータを生理学的知見から推定した。

## 2. Footstep 錯視

Footstep 錯視 (FI) は、白黒の縦縞模様からなる背景の上を、異なる2色の並列に移動する横長のバーを見たときに生じる錯視である(図1)。これらのバーはどちらも同じ一定速度で移動しているのにも関わらず、両者が交互に加減速を繰り返すように知覚される。この錯視が引き起こされる原因は、ヒトの運動検出特性において、運動物体と背景のコントラストが知覚される速度に影響を及ぼすために生じる[1][2]と言われており、その仮説に基づいた視覚心理物理実験が報告されている[3]。しかし、近年背景のグレーティングによって誘導されたある種の幾何学的錯視が FI の要因であるとした報告もあり[4]、その知覚メカニズムはまだ分からない部分も多い。FI やその静止画像を見たときに起きる幾何学的錯視の錯視量はどちらも、刺激を観測する視野角で異なり、中心視野より周辺視野で知覚した場合の方が大きいという特徴がある[1]。こ

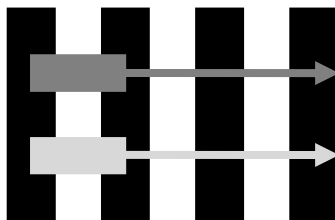


図1 FIを起こす視覚刺激

縦縞模様の背景の上を、異なる2色のバーが矢印方向へ移動する。

のような結果は、次節にて述べる網膜レベルでの細胞配置の影響が強く出ていることが予想される。

## 3. 網膜外網状層の生理工学的モデル

網膜は、視細胞、水平細胞、双極細胞、アマクリン細胞、神経節細胞の5種類の細胞からなる。このうち視細胞から水平細胞、双極細胞からなる神経回路は網膜外網状層と呼ばれ、視覚に関する最初の基本的な情報処理が行われる。FIに対する網膜細胞応答を解析するために、視細胞、水平細胞、双極細胞における空間特性をシミュレーションする2次元多層構造の数理モデルを構築した。

ヒトなどの霊長類では、網膜を構成する各細胞が空間的に配置分布が不均一で特徴がある。例えば視細胞では、一般に、中心視の役割を果たす中心窩と呼ばれる網膜の中心領域では細胞密度が高く、周辺部分にいくほど細胞分布はまばらになる(図2)。また、その他の水平細胞や双極細胞といった細胞も同様に不均一な細胞分布特性を有している。さらには、細胞間の結合も中心野と周辺野では異なり、周辺野ほど受容野が大きくなるなどの特徴も見られる[6]。そこで、こうした細胞分布に基づいた空間的配置と受容野の大きさを考慮した網膜外網状層のモデルを構築した。図3に構築したモデルの概略図を示す。網膜モデルは、錐体、水平細胞、双極細胞の3層からなり錐体から水平細胞、双極細胞へ情報は伝達する。水平細胞からの出力は錐体出力へ抑制的に働き、双極細胞ではそれらが統合された応答が生じる。細胞分布や結合特性のモデルパラメータは、生理学的知見[7-10]を満足するように推定した。

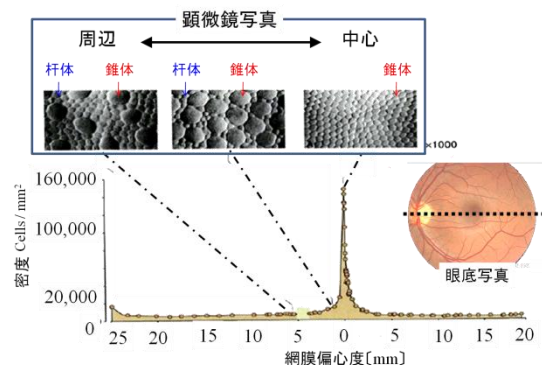


図2 視細胞錐体分布[5]

†中京大学大学院 情報科学研究科

‡中京大学 情報理工学部

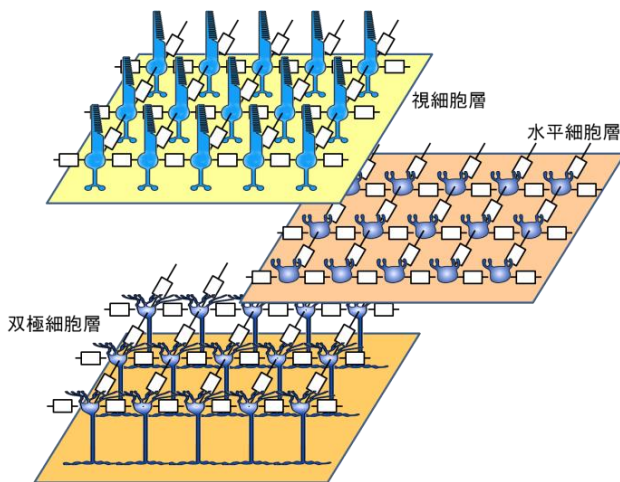


図3 網膜外網状層のネットワークモデル

#### 4. 結果

構築したモデルに対して入力刺激として FI に関する幾何学的図形を与え、その時の各細胞層応答をシミュレーションし解析した。このとき網膜の中心窩から  $2^{\circ} \sim 11^{\circ}$  の位置に幾何学図形刺激を与えた細胞層応答を調べ、心理実験結果[4]と比較した。図4に、細胞層応答の一例を示す。解析の結果、視野角  $11^{\circ}$  の位置を刺激したとき、錯視量が大きい背景の縞模様のエッジとバーのエッジが重なる条件 (図4A) と、錯視量が小さい背景のエッジとバーのエッジが重ならない条件 (図4B) で、低コントラスト部分での双極細胞層応答は、それほど大きな違いは現れなかった。これは、視覚系のこのレベルでは、この情報が保存されていることを示している。一方で、刺激位置を変え中心視野に近い部位 (例えば  $2^{\circ}$ ) を刺激した場合と中心か周辺部 (例えば  $11^{\circ}$ ) を比較すると、エッジ部分のコントラストの差に対する応答が、 $11^{\circ}$  のほうが小さい結果となった。この結果は、佐藤らの心理実験[4]に見られる視角による錯視量の影響と深く関係があるものと考えられる。

#### 5. むすび

本研究では、網膜内の空間的な細胞配置や結合特性を考慮した生理工学的な網膜の数理モデルを構築し、FI に関する幾何学的図形に対する網膜出力を解析した。その結果、空間的に低コントラストな情報は、この双極細胞層レベルでは保持されていたが、中心視野に近い位置での応答よりも周辺視野での刺激に対する応答の方が減少する傾向を示した。これは、心理実験による結果を支持している。今後、細胞配置などを考慮し、より高次のメカニズムまで含めた解析を進めることで、佐藤らの幾何学的錯視[4]だけでなく FI の要因となる神経メカニズムも明らかになるものと考えている。

#### 参考文献

[1] Anstis S: Factors affecting footsteps: Contrast can change the apparent speed, amplitude and direction of motion, *Vision Research*, Vol.44, pp.2171-2178 (2004)  
 [2] Anstis S: Footsteps and inchworms: Illusions show that contrast affects apparent speed, *Perception*, Vol.30, pp.785-794 (2001)  
 [3] Howe PD, Thompson PG, Anstis SM, Sagreya H,

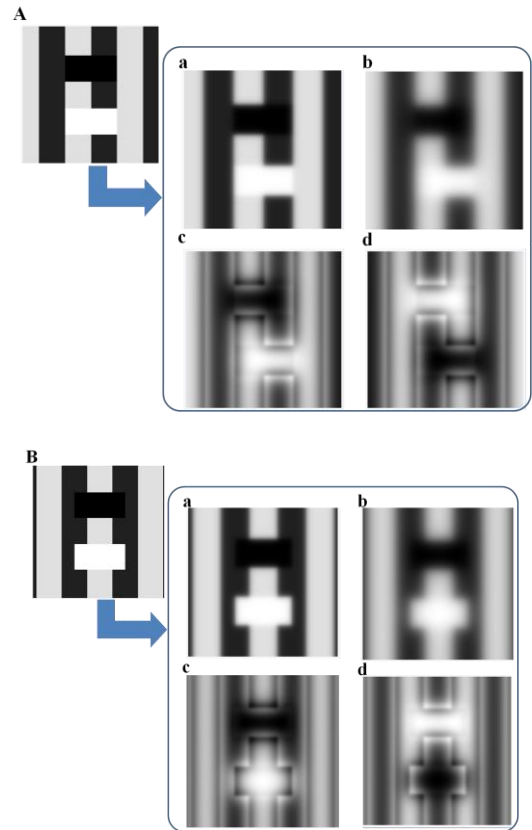


図4 シミュレーションによる細胞層応答の一例  
 A: 背景縞のエッジとバーのエッジが重なる条件  
 B: エッジ同士が重ならない条件  
 それぞれ a が視細胞層, b が水平細胞層, c が on 型双極細胞層, d が off 型双極細胞層の応答。

Livingstone MS: Explaining the footsteps, belly dancer, Wenceslas, and kickback illusions, Vol.6, *J. Vision*, pp.1396-1405 (2006)

[4] 佐藤 雅之, 須長 正治, 城本 宏志, フットステップ錯視における静的な幾何学的錯視の寄与, 電子情報通信学会, HIP2006-59(2006-10)

[5] Rodieck, *The First Steps in Seeing*, Sinauer (1998)

[6] M.F.ベアー, B.W.コノーズ, M.A.パラディーゾ, 神経科学—脳の探求—, 西村書店(2007)

[7] Ahmad KM, Klug K, Herr S, Sterling P, Schein S.: "Cell density ratios in a foveal patch in macaque retina.", *Vis. Neurosci.*, 20, pp.189-209, 2003.

[8] Curcio CA, Sloan KR, Kalina RE, Hendrickson AE.: "Human photoreceptor topography.", *J. Comp. Neurol.*, 292, pp.497-523, 1990.

[9] Wässle H, Boycott BB, Röhrenbeck J.: "Horizontal Cells in the Monkey Retina: Cone connections and dendritic network.", *Eur. J. Neurosci.*, 1, pp.421-435, 1989.

[10] Dacey D, Packer OS, Diller L, Brainard D, Peterson B, Lee B.: "Center surround receptive field structure of cone bipolar cells in primate retina.", *Vision Res.*, 40, pp.1801-11, 2000.