

## 明るさ錯視のためのフィードバックモデル

野田坂 祥史<sup>†1</sup> 齊藤 朝輝<sup>†1</sup>

ヘルマン格子錯視が発生するメカニズムについての考察を行った。ヘルマン格子錯視はオン中心オフ周辺型受容野による側抑制の影響で説明されているが、本研究では初期視覚での線分抽出を行う処理によって引き起こされていると仮定し実験を行った。線分抽出の性質を表現するためにDOG(Difference of two Gaussians)関数を用いて8方位のエッジ抽出を行い、それらを足し合わせることで実際に知覚するものとはほぼ等しい錯視が現れた。また、ヘルマン格子錯視で現れる灰色の円は明滅して見える。この現象は視覚野で情報がフィードバックされて起きていると考え、その効果を取り入れたモデルで数値実験を行った。

### A feedback model for the brightness illusion

SHOJI NODASAKA<sup>†1</sup> and ASAKI SAITO<sup>†1</sup>

We consider mechanism of the Hermann grid. The mechanism is usually explained by effects of on-center receptive fields' lateral inhibition. We suppose that optical illusion is caused by a process of edge detection in early vision, and perform numerical experiments. DOG functions are used to detect edges in eight detection. By summing up these functions, we obtain almost same figure as we recognize. The Hermann grids' circle also seems to be glimmering. To analysis the glimmering circles, we construct a new model that adopts feedback connections between the lateral geniculate nucleus and parts of early vision, and conduct some numerical experiments.

#### 1. はじめに

我々人間やその他多くの生物の視覚システムは高度なパターン認識を行う情報処理器官で

あると考えられる。脳の視覚系では第1次視覚領野の細胞が詳しく研究されており、単純型細胞と複雑型細胞という2種類の細胞が存在し、中心がオン領域、その周辺がオフ領域の構造を持っている。このような受容野は一種のエッジ強調型画像フィルタと同じ振る舞いをする。具体的には空間的に隣り合う領域で情報の差を強調するはたらきであり、明暗情報の場合は明暗コントラストが強調される。また、面状の明るさの変化に対してその境界部分にだけ反応することや特定の傾きに対して特異的に反応することが知られている。これらの細胞は局所的な線分の傾きや動き、奥行きなどの基本的な視覚情報の検出を行っていると考えられている。このオン中心オフ周辺型受容野の機能によって物体のエッジ部分が強調され、本来見えているはずのものとは異なった映像が知覚されることがある。その例としてマッハバンドやヘルマン格子錯視がある。

本研究では、ヘルマン格子錯視が初期視覚における情報処理過程で発生しているという仮説を立て、様々な角度に並べたエッジ抽出フィルタによる出力の合成を行った。また外側膝状体と第一次視覚野との間でのフィードバックモデルを用いて錯視への影響を検証した。我々は視覚野における情報処理は正確に行われていると考えているが、一方で特定の図形を見ると物理的に存在しない線などが見えてしまうことがある。これは外界の情報を正しく捉えようとするが故の副次的な現象であるとも考えられる。錯視が網膜や視覚野における情報処理の中でどのように発生しているかを調べ、錯視を人工的に生成することができるならば、そのモデルは我々人間の視覚システムをよく反映していると考えられる。人間の視覚システムは非常に複雑な構造をしており部位によっては具体的にどのような機能を持っているのが解明されていないが、初期視覚では錯視が発生するときの主要な原因と考えられる処理をしていることが推測される。

##### 1.1 マッハバンド

マッハバンドとはErnst Machによって発見された錯視で、図1のような図形を見たときに知覚される。この画像はまず一定の白い領域をおき、続いて白から輝度が一定の傾きで暗くなる領域をおき、暗くなったあとそこから同じ明るさの領域をおいた画像である。この画像を観察すると、明るさが変化している領域と黒い領域との境界で周囲の黒よりさらに黒い線が現れる。同様に明るい領域の境界でも周囲の白より明るい線が観察される。

受容野の性質により視野の中心と周辺の輝度の差が計算されることにより、輪郭が強調され、マッハバンドのような錯視が生じると考えられている。受容野の荷重結合は図2のような形状をしている。

<sup>†1</sup> 公立はこだて未来大学

Future University Hakodate



図 1 マッハバンド  
Fig. 1

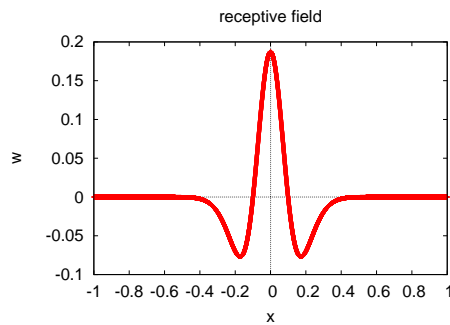


図 2 側抑制の荷重結合

ここで,

$$w(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_e^2}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma_e^2}} - a \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_i^2}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma_i^2}} \quad (\sigma_i = 1.6\sigma_e)$$

である。この側抑制を用いた数理モデルを扱うために神経場という概念を導入する。これは離散的に存在している神経細胞を連続的に扱う。視覚系には神経細胞が十分に多いためこのような近似を行ってもその本質を失わずに議論ができると考えてよい。位置  $x$  にある細胞は位置  $x'$  に与えられた入力  $s(x')$  から距離の関数としての結合荷重  $w(x-x')$  の影響を受ける。位置  $x$  にある細胞が受け取る入力の総和  $z_f(x)$  は,

$$z_f(x) = \sum_{x=0}^{200} w(x'-x)s(x')dx' \quad (1)$$

と畳み込みの形で表される

### 1.2 側抑制モデルによるマッハバンドの数値実験

神経場による側抑制モデルを用いると、マッハバンドで見られる輝度勾配が変化している

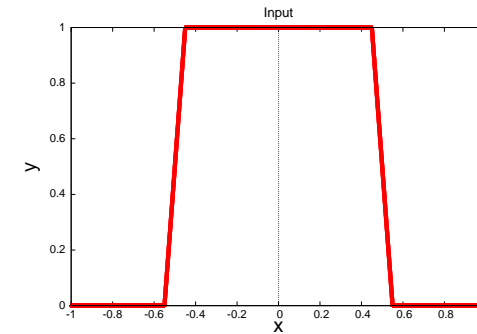


図 3 入力

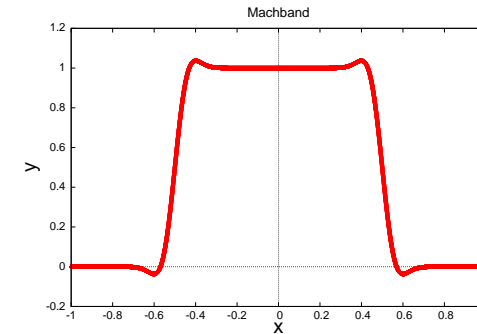


図 4 出力  
Fig. 4 output

付近でのオーバーシュートを説明できる。まずこれを確認するために以下の数値実験を行った。入力  $s_1(x)$  を図 3 のようなマッハバンドの輝度コントラストに相当する関数とする。ここでは  $y=0$  が黒、 $y=1$  が白に相当するものとする。この入力関数と DOG 関数  $w(x)$  を式 (1) によって計算する。すると図 4 の出力が得られ輝度勾配の前後にオーバーシュートが現れる。これはマッハバンドを見るときに我々が知覚する明暗の線分に対応していると考えられる。マッハバンドに関してはこのような単純なモデルで十分に説明がつくと考えられる。

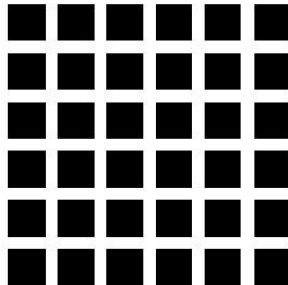


図 5 ヘルマン格子錯視  
Fig.5 Hermann grid

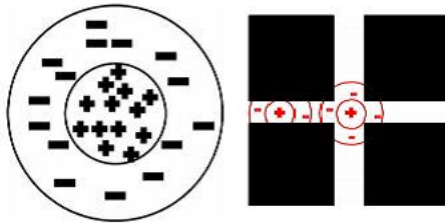


図 6 ヘルマン格子錯視原因  
Fig.6 cause of Hermann grid

## 2. ヘルマン格子錯視

Ludimar Hermann により発見された錯視図形で、白と黒の格子模様を見ていると白い道が交差している場所に灰色の円が現れる錯視である。

ヘルマン格子錯視では神経細胞の受容野特性によって説明がされている。図?? はオン中心オフ周辺型の神経細胞の受容野の模式図である。

この受容野が交差点の中心にある場合とそこからずれている位置にある場合を比べると、これらが受け取る刺激の量が異なっていることが分かる。つまり受容野の中心が交差点の中心にある場合には出力がより抑えられるのでその部分が暗く見えている。

## 3. エッジ抽出

線分のエッジを抽出をする DOG 関数は

$$wl(x, y) = \left( \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{x,e}^2}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma_{x,e}^2}} - \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{x,i}^2}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma_{x,i}^2}} \right) \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_y^2}} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} \quad (2)$$

で与えられる。これを回転させることで方位選択性細胞を再現する。ここでは 8 方位の線分を抽出する。すなわち、

$$wl_{\theta(k)} = wl(x \cos \theta - y \sin \theta, x \sin \theta + y \cos \theta) \quad (3)$$

$$\theta = \frac{k\pi}{8}, (k = 0, \dots, 7) \quad (4)$$

とする。

## 4. 視覚野におけるフィードバック

ヘルマン格子錯視では錯視図形がはっきりと現れず明滅をしている。これは視覚野で入力情報やそれらを処理した後の情報がフィードバックされているためであるという仮説が立てられる。そこで網膜から第一次視覚野にかけてどのような情報処理が行われているかを述べる。外側膝状体は網膜から視神経、視交叉、視索を通して直接情報を受け取り、第一次視覚野に視放線を通して直接投射する。しかし視覚野は網膜から外側膝状体へは順に列につながっているわけではなく、並列な結合を含め複雑な結合をしている。特に、上位の領野から下位の領野へフィードバックがあることが特徴である。外側膝状体と第一次視覚野の間にはほぼ同じくらいの双方向の結合がある<sup>2)</sup>。また、情報のフィードバックだけではなく外側膝状体の受容野が第一次視覚野の細胞に対して抑制や興奮の刺激を与えているという研究<sup>3)</sup>、一次視覚野の単純型細胞の反応特性が外側膝状体からの入力の単純な総和だけでなく、側抑制やフィードフォワード型の抑制などによる正規化によって形成されるとするモデルの研究もある<sup>4) 5)</sup>。網膜で捉えられた刺激は視覚野の中を回っており、このようなフィードバック構造がヘルマン格子錯視で白い部分の交差点に現れる灰色い丸が明滅する原因であると考えられる。

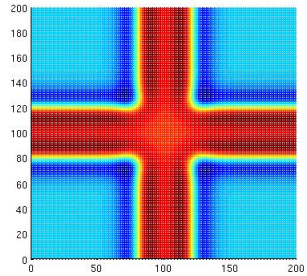


図 7 出力  $z'$   
Fig.7 output  $z'$

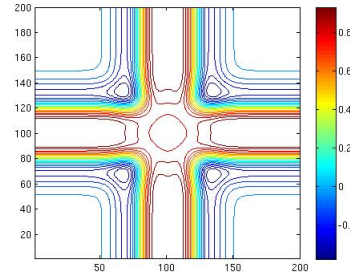


図 8 出力  $z'$  の等高線  
Fig.8 contour line of output  $z'$

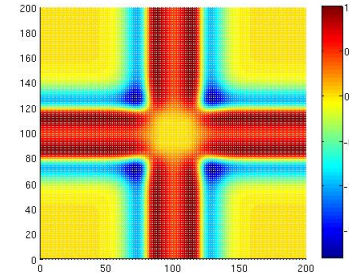


図 9 提案手法によって得られたヘルマン格子錯視  
Fig.9 Hermann grid's output by proposal technique

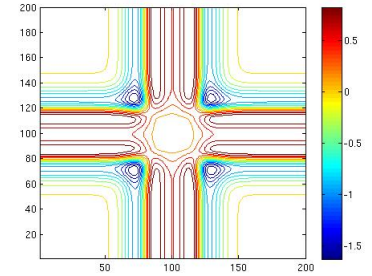


図 10 提案手法によって得られたヘルマン格子錯視 (等高線)  
Fig.10 contour line of Hermann grid's output by proposal technique

## 5. ヘルマン格子錯視の数値実験

### 5.1 受容野特性による数値実験

先に説明したヘルマン格子錯視の発生を数値計算で確認する．本研究では計算の範囲を  $200 \times 200$  とする．ヘルマン格子錯視は 2 次元であるので DOG 関数は式 (5) を用いる．

$$w_k(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_e^2}} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma_e^2}} - a \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_i^2}} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma_i^2}} \quad (5)$$

ヘルマン格子に相当する関数を  $s_2(x, y)$  とすると畳み込みは以下の式 (6) となる．

$$z'(x_0, y_0) = \sum_{x=0}^{200} \sum_{y=0}^{200} w_k(x - x_0, y - y_0) s_2(x, y) dx dy \quad (6)$$

この計算結果として図 7, 図 8 が得られる．この計算結果はヘルマン格子錯視の発生をよく表現していると考えられるが, 錯視として現れる図形が小さいことと, その形が菱形のようになっていることが問題として挙げられる．このことを解決するために, ヘルマン格子錯視の発生を方位選択性細胞によるエッジ抽出に着目して考える．

### 5.2 提案手法による数値実験

$w_\theta$  と  $s_2(x, y)$  を式 (7) によって畳み込んだ結果が図 (11) である．

$$z'_{\theta(k)}(x_0, y_0) = \sum_{x=0}^{200} \sum_{y=0}^{200} w_{\theta(k)}(x - x_0, y - y_0) s(x, y) dx dy \quad (7)$$

得られた  $z'$  を全ての  $k$  について足し合わせ, 最大値が 1 になるように正規化したものが図 9 であり, 図 10 はその等高線である．

## 6. 出力のフィードバック

得られた出力  $z$  に対して式 (8) でフィードバックを与える．

$$S_{n+1}(x, y) = \alpha z + \beta S_n(x, y) \quad (8)$$

ここで, 最初に得られた出力が増幅されて伝えられることはないと仮定し,

$$0 < \alpha < 1, -1 < \beta < 0 \quad (9)$$

とした．式 (8) と  $\beta \neq 1$  から,

$$S_{n+1} - \frac{\alpha z}{1-\beta} = \beta \left( S_n - \frac{\alpha z}{1-\beta} \right) \quad (10)$$

$$= \beta^2 \left( S_{n-1} - \frac{\alpha z}{1-\beta} \right) \quad (11)$$

$$= \beta^n \left( S_1 - \frac{\alpha z}{1-\beta} \right) \quad (n \geq 0) \quad (12)$$

となる．したがって,

$$S_{n+1} = \beta^n \left( S_1 - \frac{\alpha z}{1-\beta} \right) + \frac{\alpha z}{1-\beta} \quad (n \geq 0) \quad (13)$$

より,

$$S_n = \beta^{n-1} \left( S_1 - \frac{\alpha z}{1-\beta} \right) + \frac{\alpha z}{1-\beta} \quad (n \geq 1) \quad (14)$$

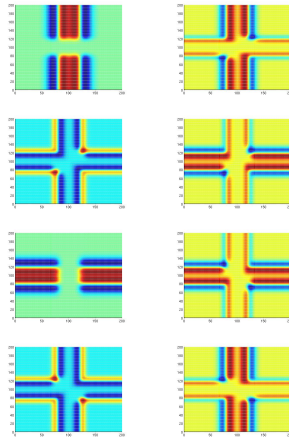


図 11  $z'_0$  から  $z'_{7\pi/8}$  の出力  
 Fig. 11 output from  $z'_0$  to  $z'_{7\pi/8}$

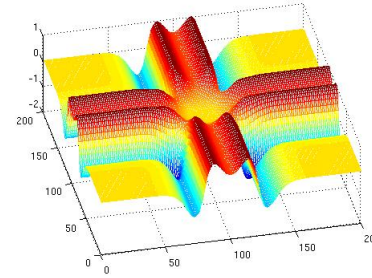


図 12 出力の初期状態  
 Fig. 12 initial state of output

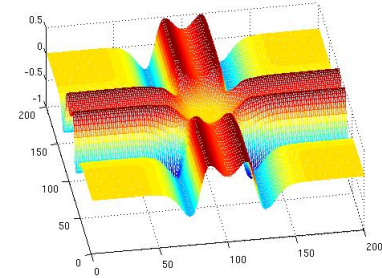


図 13  $n = 100$  の出力の状態  
 Fig. 13 state at  $n = 100$

が得られる．ここで  $n \rightarrow \infty$  とすると、 $|\beta| < 1$  より、

$$S_n = \frac{\alpha I_0}{1 - \beta} \quad (15)$$

となる．

$\sigma_{x,e} = 8.0, \sigma_{x,i} = 1.6 \times \sigma_{x,e}, \sigma_y = 5.0$  として計算を行った結果を示す．図 12 が出力の初期状態で  $S(100, 100)_1 = 0.510709$  である．図 13 が  $n = 500$  のときの状態で  $S(100, 100)_{500} = 0.241915$  である．これは  $(\alpha I_0 / (1 - \beta)) = 0.9 \times 0.510709 / (1 - (-0.9)) = 0.2419147$  とほぼ等しい値になっている．

## 7. 考察と結論

### 7.1 ヘルマン格子錯視の発生について

ヘルマン格子錯視が発生する原因について従来は受容野のオン領域とオフ領域による刺激の相互作用によって、白色と黒色のコントラストが強まった結果交差点の個所に灰色の円が現れるという説明がされていた．それを数値計算で検証した結果、交差点の個所に円が現れたが、我々が知覚するものと比べてサイズが小さく、周囲の白い部分とのコントラストの差がなだらかであるため原因を十分に説明できていない．一方本研究の提案手法

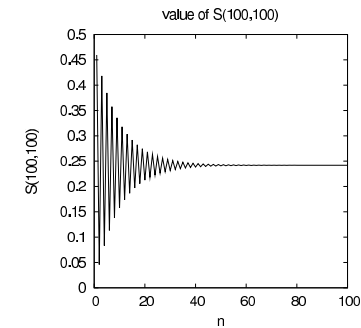


図 14  $S(100, 100)$  の値:横軸  $x$ , 縦軸  $S(100, 100)$   
 Fig. 14 value of  $S(100, 100)$ :y-axis- $x$ , x-axis: $S(100, 100)$

によって現れた図形はサイズが大きく、周辺とのコントラストの差も鋭くなっており実際に錯視で見えている図形に近いものと考えられる。ヘルマン格子錯視の原因は神経細胞の受容野の働きで起こるのではなく、神経細胞によって様々な傾きの線分のエッジが抽出され、それらが組み合わされた結果起こると考えられる。

## 7.2 フィードバックモデルについて

ヘルマン格子錯視が瞬いて見える原因について研究された例が見られないことから、視覚野で情報がフィードバックされているという事実を基にその状態を再現するモデルを提案した。このモデルを用いた計算結果により、出力された値が振動することが分かった。これは我々が見ている図形の輝度が時間的に変化しているということを示しており、錯視図形が瞬いていることの説明になり得ると考えられる。このフィードバックモデルを拡張することによりヘルマン格子だけではなく、動きが生じる錯視などへの応用ができると考えられる。

## 参 考 文 献

- 1) 中野 馨 編, ニューロコンピュータの基礎, コロナ社, p.165 (1998).
- 2) 福田 淳 監修, "神経情報科学入門", コロナ社, pp118-119 (2009).
- 3) Ben S. Webb., Chris J. Tinsley, Nick E. Barraclough, Alexander Easton, Amanda Parker and Andrew M. Derrington.: Feedback from V1 and inhibition from beyond the classical receptive field modulates the responses of neurons in the primate lateral geniculate nucleus Visual Neuroscience, Vol.19, pp.583-592 (2002)
- 4) Matteo Carandini, David J. Heeger.: Summation and division by neurons in primate visual cortex, Science, 27 May, Vol.264, pp.1333-1336 (1994).
- 5) Matteo Carandini.: Linearity and Normalization in Simple Cells of the Macaque Primary Visual Cortex, The Journal of Neuroscience, November 1, 17(21), pp.8621-8644 (1997).