



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	周辺視を考慮した視覚の数値モデルとヘルマン錯視への応用
Author(s)	小山, 隆正; Oyama, Takamasa; 山ノ井, 高洋 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 123, 67-76
Issue Date	1984-10-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/41890
Type	departmental bulletin paper
File Information	123_67-76.pdf



周辺視を考慮した視覚の数理モデルと ヘルマン錯視への応用

小山 隆 正 山ノ井 亨 洋
山崎 敏 正 河口 至 商
(昭和59年 6 月30日受理)

A Mathematical Model of Visual Perception Regarding Peripheral Vision and Its Application to the Hermann's Illusion

Takamasa OYAMA, Takahiro YAMANOI, Toshimasa YAMAZAKI
and Michiaki KAWAGUCHI
(Received June 30, 1984)

Abstract

Human visual perception is treated on the basis of the concepts of receptive field in physiology and in psychology.

The distribution of receptive field on the retina is assumed by the fact that the central vision differs from the peripheral one. A function is introduced so that it fits the assumption.

A mathematical model of visual output function is determined by the function introduced and by the model of the lateral inhibition.

The deeper understanding of the mechanism of the Hermann's illusion is acquired by this model.

1. ま え が き

人間の感覚情報処理過程を数理モデルを用いて実現することは生体の内部機構を解明する上で重要な課題である。モデル化の方法として生体の機構を一種の制御系とみなし、入力・出力の関係に注目することに主眼を置くことが考えられる。この研究方法は生体内部の情報処理過程を外側から推定できることに特徴がある。本研究はこの立場から心理・生理学的事実に基づき、人間の視覚の周辺視の情報処理機構を解明することを目的とする。

従来、網膜の機能を取り入れた視覚の数理モデルの研究においては、網膜情報処理の最終過程を担う神経節細胞 (或は視神経) からの出力 (電気信号) を解析するものが多い。その主なものとして Hartline と Ratliff によるカプトガニの複眼の側抑制機構¹⁾を基本にした森田・藤井の二層空間回路がモデルとして提案されており²⁾、中心窩 (注視点の像を網膜上で結ぶ所) 付近での出力を定量的に求めることにより、二次元図形の錯視を定量的に論じている²⁾。更に、この出力の変化量に注目して幾何学図形の錯視を説明したモデルも考案されている³⁾。

ところで網膜では、(1)中心窩付近の情報に限定されず周辺の情報も処理される (中心視で視角

10°, 準周辺視で視角20°以内)⁴⁾こと, (2) X型の神経節細胞の受容野の大きさが場所によって異なる⁵⁾こと, (3)中心窩付近と周辺では網膜内の細胞の配置構造が異なる⁴⁾ことが生理学的に分かっており, この事実を考慮すればより正確な処理機構を探る上で周辺処理までを含めた視覚モデルを設定することが不可欠となる。

本論文では X型の神経節細胞の受容野の大きさの分布に注目し, 二次元空間の刺激図形に対する中心視と周辺視の機能の相違がこの受容野の大きさにより決定されるものとみなした。具体的には, 側抑制関数の中に, パラメータとして受容野の大きさ(半径)を組み込んだ数理モデルを設定することでこのモデルに中心視・周辺視の機能をもたせた。更に応用として中心・周辺視の相違がみられるヘルマン格子図形を刺激としてこのモデルに用いた所, 人間の視覚と同様の結果が出力として得られ, ヘルマン格子錯視の理論的な説明ができた。

2. 神経節細胞(X型)の受容野の大きさと中心視・周辺視に関する考察

視覚情報は, 眼球→網膜→大脳皮質視覚領の順に伝達され, 網膜では更に視細胞層→水平細胞・双極細胞層→神経節細胞層の順に情報が送られ主として図形の輪郭・境界・コントラストの検出が行なわれている⁶⁾。

本研究では二次元空間定常状態での錯視は網膜における細胞の密度分布の不均一性に由来すると考えた。ここで「分布の不均一性」とは網膜を構成する視細胞・神経節細胞の密度分布が中心窩で密, 周辺で粗になっていることを意味する。中心窩付近は認識する対象の特徴分析に優れ, 周辺は物体の移動・方向検知に優れているという生理学的事実⁴⁾は, この不均一性に関係して来る。尚, 密度分布の不均一性は細胞の密度分布, 及び受容野の大きさにより定量的に示すことができる。例えば山城・森田・藤井は網膜視細胞の分布関数を近似的に次の式で与えている⁷⁾。

$$D(\phi) = 0.8 \exp(-\phi) + 0.2 \exp(-0.1\phi) \quad (\phi: \text{偏心率}) \quad (2 \cdot 1)$$

網膜受容野の研究はKuffler(1953)のネコの実験により始まる⁸⁾。神経節細胞1個が反応するのに必要な視細胞層の領域を神経節細胞の受容野と呼び, 生理学的にこの受容野は円形のON中心, 或いはOFF中心である事が明らかにされている⁹⁾。更に, この受容野は反応時間, 及びその機能からX型とY型に分けられ, 刺激反応の定常状態を考慮すれば, 刺激に対して持続時間が長く受容野半径が小さいものはX型であることも分かっている⁶⁾。

本論文では X型の受容野半径を, 視角をパラメータとする関数とした。尚, 受容野半径を表わす関数は以下のFisherの法則⁶⁾に従って推定した。

Fisherの法則: 点刺激が視野上を移動する場合, 網膜上の各点においては網膜の神経節細胞の密度や受容野の大きさが変化するにもかかわらず, 1つの受容野に対する X型の神経節細胞の数は一定である。

この法則によれば一つの受容野に関与する X型の神経節細胞の数 k は式(2・2)で与えられる。

$$k = \pi R_{GC}^2(\phi) \times D_{GC}(\phi) = \text{一定} \quad (2 \cdot 2)$$

ただし, ϕ は偏心率(中心窩からの角度による距離), $R_{GC}(\phi)$ は X型の神経節細胞の受容野半径, $D_{GC}(\phi)$ はその細胞の密度である。式(2・2)より受容野半径 $R_{GC}(\phi)$ は,

$$R_{GC}(\phi) = \sqrt{\frac{k}{\pi D_{GC}(\phi)}} \quad (2 \cdot 3)$$

となる。更に密度関数 $D_{GC}(\phi)$ は山城・森田・藤井⁷⁾の分布関数を考慮し次のもので与えた。即ち、

$$D_{GC}(\phi) = mN_{GC}D^*(\phi) \quad (2 \cdot 4 \cdot 1)$$

$$D^*(\phi) = A \exp(-\alpha\phi) - (1-A) \exp(-\alpha\phi/N) \quad (2 \cdot 4 \cdot 2)$$

ただし、 m 、 α 、 N 、 A ($0 < A < 1$) は正の定数、 N_{GC} は視神経の数 ($= 1.0 \times 10^6$) で与えた。ここで式 (2・1) と式 (2・4・1)、(2・4・2) は次の4つの条件を満たす。

条件1 (密度関数の条件より)

$$\lim_{\phi \rightarrow \infty} D^*(\phi) = 0, \quad \lim_{\phi \rightarrow 0} D^*(\phi) = 1$$

条件2 (錐体の密度分布と神経節細胞 (X型) の密度分布の比較より)

$$D^*(\phi) \leq D(\phi), \quad \frac{\partial D^*(\phi)}{\partial \phi} \geq \frac{\partial D(\phi)}{\partial \phi} \quad (0^\circ \leq \phi \leq 1^\circ 40')$$

視細胞層は光に敏感な錐体と色に敏感な杆体で構成され、中心窩付近では $1^\circ 40'$ までは視細胞は錐体のみから成る。このことから錐体と神経節細胞との比較を行えばよい。

条件3 (錐体数と神経節細胞数 (=視神経数) の全体比より)

$$\int_{-\infty}^{\infty} D^*(\phi) d\phi : \int_{-\infty}^{\infty} D(\phi) d\phi = 1 : 6$$

条件4 (Jung と Spillmann の心理実験より)

$$R_{\min}(\phi) \leq R_{GC}(\phi) \leq R_{\max}(\phi) \quad (20^\circ \leq \phi \leq 80^\circ)$$

Jung と Spillmann は後述するヘルマン格子錯視現象から心理学的に受容域 (=受容野) の直径を 20° から 80° について求めている⁹⁾。ここで $R_{\min}(\phi)$ は受容域の直径の最小値、 $R_{\max}(\phi)$ は受容域の直径の最大値であり、それぞれ

$$R_{\min}(\phi) = 11 \tan(0.034\phi + 0.5) \quad (2 \cdot 5 \cdot 1)$$

$$R_{\max}(\phi) = 11 \tan(0.03\phi + 2.02) \quad (2 \cdot 5 \cdot 2)$$

で与えられる。ただし、眼球直径は 22 mm とする。

以上の4つの条件の下に本研究では $k/(mN_{GC}) = 300$ 、 $\alpha = 0.215$ 、 $N = 50$ 、 $A = 0.9958$ を得た。図1は視角 0° から 70° までの受容野半径を神経節細胞の密度関数から推定したもの ($R_{GC}(\phi)$) を示す。尚、参考として山城・森田・藤井の錐体の密度分布関数から推定したもの ($R(\phi)$ で表わし視細胞層のみの情報を考慮したものと解釈できる) を示し Jung と Spillmann の心理学測定の結果も加えておいた。X型の受容野半径 $R_{GC}(\phi)$ は約 2.3° で変曲点を持ちこのことと生理学事実を参考にして約 4.6° までは特徴分析に優れていると考えられる。生理学的には 2.6° までを中心窩、 4.3° までを傍中心窩と呼び本研究の結果とほぼ一致している。

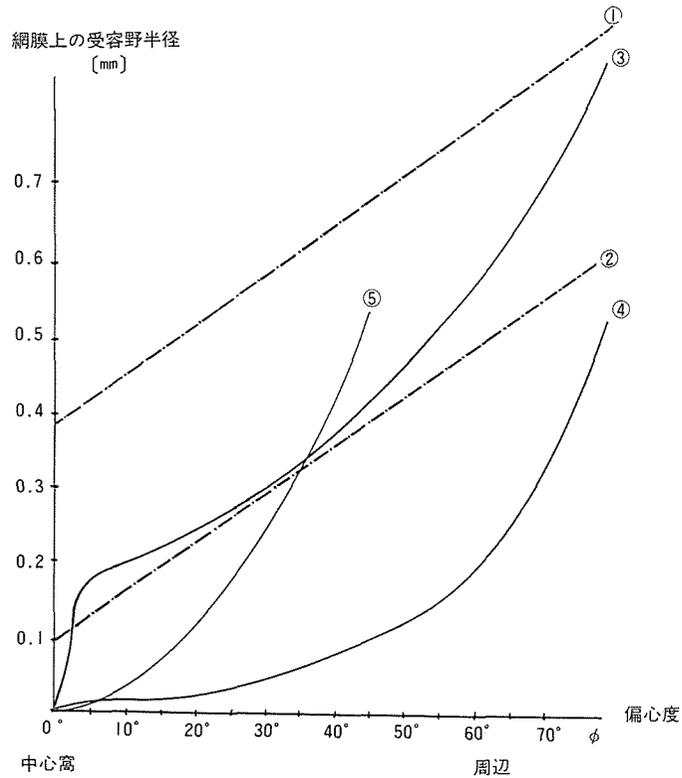


図1 受容野半径の大きさの推定

- ① Spillmann の実験による受容域 (受容野) の最大値 $R_{MAX}(\phi)$
(心理学的測定)
- ② Spillmann の実験による受容域 (受容野) の最小値 $R_{MIN}(\phi)$
(心理学的測定)
- ③ Fisher の理論に基づく X 型の受容野半径 (GC^{*註1}) $R_{GC}(\phi)$
(生理学的測定)
- ④ Fisher の理論に基づく X 型の受容野半径 (CN^{*註1}) $R(\phi)$
(生理学的測定)
- ⑤ Zeeman の受容野半径の最小値^{**註2} (生理学的測定)

* 注1 GC (Ganglion Cell : 神経節細胞) の密度分布からの推定
CN (Cone : 視細胞層の錐体) の密度分布からの推定

**注2 Zeeman は生理学的に中心窩付近での受容野半径の最小値 $10(1 - \cos \phi)$ を算出している。

3. 周辺処理機能をもつ側抑制出力関数の提案

森田・藤井は定常線型連続な神経回路モデルを提案している²⁾。これによると刺激図形 $u(x, y)$ に対する出力関数 $Z(x, y)$ は重み関数 $g(x, y)$ を用いて、

$$Z(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g(x-\xi, y-\eta) u(\xi, \eta) d\xi d\eta \quad (3 \cdot 1 \cdot 1)$$

$$g(x, y) = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma_1^2}\right) + \frac{K_2}{\sqrt{2\pi}\sigma_2} \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma_2^2}\right) \quad (3 \cdot 1 \cdot 2)$$

$$(K_1 = -K_2 = 1)$$

ただし、 $\sigma_1 < \sigma_2$ (ON 反応の場合)、 $u(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{刺激図形あり (図)} \\ 0 & \text{刺激図形なし (地)} \end{cases}$

と表わされる。このモデルは中心窩付近における網膜からの出力を得るものである。一方では、Hildebrand が式 (3・1・2) の σ_1, σ_2 をパラメータとしてその線型変化 ($\sigma_i = k_i r, r = \sqrt{x^2 + y^2}, i=1, 2$; ただし k_i は定数) に対する出力を求めている¹⁰⁾ がその生理・心理学的意味は明確ではない。

本研究において提案された中心視・周辺視の情報を組み入れた数理解モデルは、入力 $u(x, y)$ に対して出力 $Z(x, y)$ は次の形で与えた。

$$Z(x, y) = \sum_{i,j=1}^n g(x-\xi_i, y-\eta_j) u(\xi_i, \eta_j) \Delta\xi_i \Delta\eta_j \quad (3 \cdot 2 \cdot 1)$$

$$g(x, y) = \sum_{i=1}^2 \frac{K_i}{\sigma_i(\phi)} \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{\sigma_i^2(\phi)}\right), \quad K_1 = -K_2 = 1, \quad (3 \cdot 2 \cdot 2)$$

ただし、 $\sigma_1 = R_{GC}(\phi), \sigma_2 = 2.86R_{GC}(\phi)$ (森田・藤井の側抑制モデルの初期値からの推定)
 $\Delta\xi_i, \Delta\eta_j$ は視細胞層における細胞 (錐体) 間の距離で
 $\Delta\xi_i = (2\sigma_2(\phi)i/n) + x_0, \Delta\eta_j = (2\sigma_2(\phi)j/n) + y_0, (x_0, y_0)$ は初期値とする。

2章では X 型の神経節細胞の受容野の大きさ (半径) を推定したが、この受容野半径は ϕ (偏心度) の関数で与えられる。網膜上の不均一性を表現するために式 (3・1・2) における σ_1, σ_2 を受容野半径 $R_{GC}(\phi)$ で与えた。この時、重み関数 $g(x, y)$ のパラメータ σ_1, σ_2 は中心窩からの距離の単調増加関数であることが解かる。また式 (3・2・1) の計算にあたり n が大きいとき数値積分で近似することができる。その際、積分領域は受容野内と考える。これは、①神経節細胞 1 個の受け取る視細胞層の領域が受容野内に限られること、②中心窩から周辺に移行するに従って神経節細胞 (又は視細胞) の密度が小さくなるという生理学事実に基づいている。

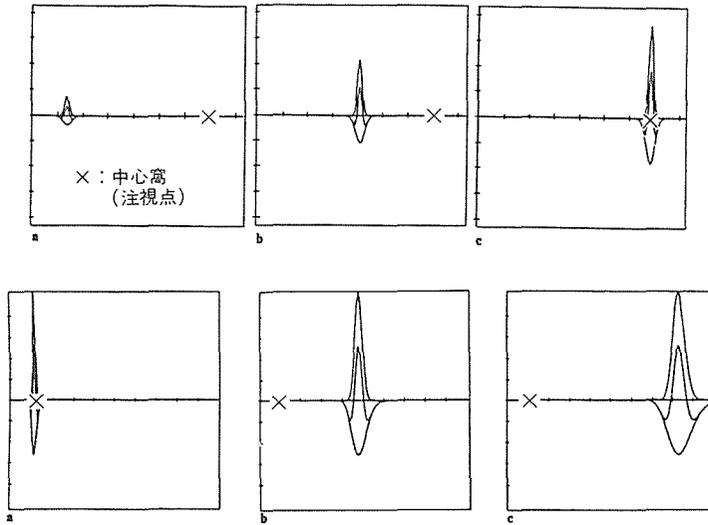


図2 パラメータ $\sigma_1(\phi)$, $\sigma_2(\phi)$ を変化させたときの中心窩と周辺での出力変化

1次元の場合を取り扱う。上に凸の部分は興奮，下に凸の部分は抑制を示す。

(上) 振幅変化に対する出力関数の場所的变化 (周辺に移ると振幅減少) : 重み関数を

$$g_1(x, \phi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_1(\phi)} \exp\left(-\frac{x^2}{2k_1^2}\right) - \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_2(\phi)} \exp\left(-\frac{x^2}{2k_2^2}\right)$$

($k_1 < k_2$, k_1, k_2 は定数)

とし $\sigma_1(\phi) < \sigma_2(\phi)$ となる単調増加関数 $\sigma_1(\phi), \sigma_2(\phi)$ の変化をみたもの。

(下) 分散変化に対する出力関数の場所的变化 (周辺に移ると分散拡大, 振幅一定) : 重み関数を

$$g_2(x, \phi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} l_1} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_1^2(\phi)}\right) - \frac{1}{\sqrt{2\pi} l_2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_2^2(\phi)}\right)$$

($l_1 < l_2$, l_1, l_2 は定数)

とし $\sigma_1(\phi) < \sigma_2(\phi)$ となる単調増加関数 $\sigma_1(\phi), \sigma_2(\phi)$ の変化をみたもの。

側抑制関数は $g_1(x, \phi)$ と $g_2(x, \phi)$ の合成から成り立っている。尚、入力信号は impulse。

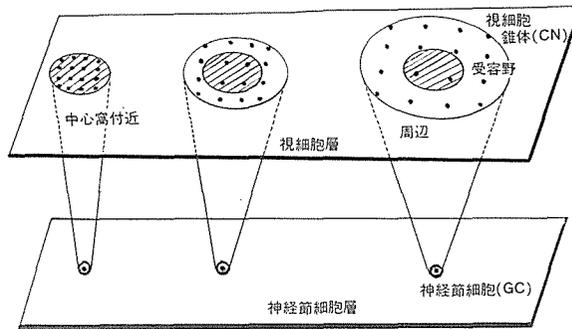


図3 入力刺激に対する情報の緻密さと粗さの様子（概略図）

・印は細胞の sample point.  を刺激領域とした時に反応する細胞の個数によって情報を精密に取り扱っているか否かが分かる。細胞数16の場合、中心窩では16個全ての視細胞が反応しているのに対して周辺に移るにつれ9個、6個と1つの受容野内の反応する細胞数が減少する。

4. ヘルマン(Hermann)格子錯視現象への応用

生理学の受容野の研究に刺激を受け心理学からの受容野の研究は Westheimer 及び Jung と Spillmann へ引き継がれた⁹⁾。心理学上の受容野は受容域(或は知覚域)と呼ばれる。受容域は背景光の中で光刺激に反応する最大の領域として定義される。生理学的手法と違って心理学的手法は主観的に、しかも簡単な実験により反応閾値を測定できる利点を持っている。尚、本論文では生理学上の受容野の大きさと心理学上の受容域の大きさを同じものとみなした。

Jung と Spillmann は受容域の測定にあたりヘルマン格子錯視の生ずる罫の格子の幅をもって受容域の大きさ(直径)とした⁹⁾。ヘルマン格子図形の中央を注視すると、その回りの格子の交叉する所に黒の斑点がみえ、この斑点は中心視よりも周辺視でよく見える(白線格子の場合)。彼等は格子図形の幅の心理実験に基づき受容域の直径の最小値と最大値を式 $(2 \cdot 5 \cdot 1)$, $(2 \cdot 5 \cdot 2)$ で与えている。また、彼等は錯視の要因を同時対比から説明をしているが、本論文では更に側抑制機構と受容野の大きさの中心と周辺での相違も要因の1つに加えて考えた。

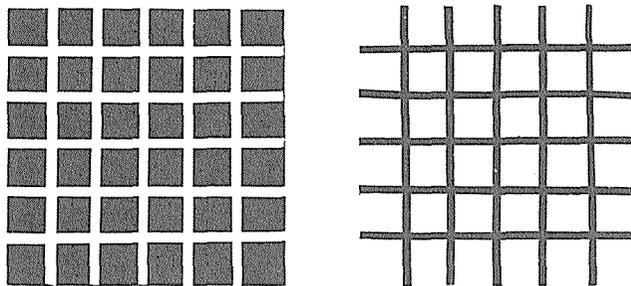


図4 ヘルマン格子錯視図形

ヘルマン格子図形は白を背景(右)(もしくは黒を背景(左))とする黒い(右)格子(もしくは白い格子(左))から成る。網膜中心窩で固視する時以外は白い線が交差する所に、灰色のスポットを観察できる。

3章で提案したモデルの実際的な応用にあたり、黒地に白の格子のヘルマン格子図形を刺激図形に用い、その出力分布を解析した（中心視・周辺視の機能を考えて視野20°までを想定している）。表1に視野20°前後で黒い斑点の見える格子の幅の最大値・最小値を示して置いた。

表1 錯視の生ずる格子の幅の最大値・最小値・平均（単位はcm）

注視点から錯視の生ずる距離	白線の幅の最小値 $R_{\text{MIN}}(\phi)$	白線の幅の最大値 $R_{\text{MAX}}(\phi)$	平均 $(R_{\text{MIN}}(\phi) + R_{\text{MAX}}(\phi))/2$
9.3	0.766	1.560	1.163
5.5	0.777	1.570	1.174
9.7	0.788	1.582	1.185

(注)眼球の直径を22mmとしてある。

図5は刺激図形を計算機実験から得た視野20°内の出力分布図である。ここで任意の1つの受容野に対して400個のX型神経節細胞に影響を与えていると仮定した。この錯視現象に対して注視点と錯視の生ずる点の出力状況(図6)から以下のことが分かった。注視点(×印)の近傍においては、その周囲の出力が高いため同時対比により注視点ではより明るく感じられる。一方、斑点のみえる白い格子の交叉する所では、その周りに比べて高い出力を出しているため同時対比により交叉の中央部がより暗く感じられる。この様にして刺激図形に対する錯視が説明された。尚、同時対比による説明で数量的に錯視量を定めるためには、出力の2次微分、即ち

$$I(x, y) = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) Z(x, y)$$

を用いれば明瞭となることが予想される。

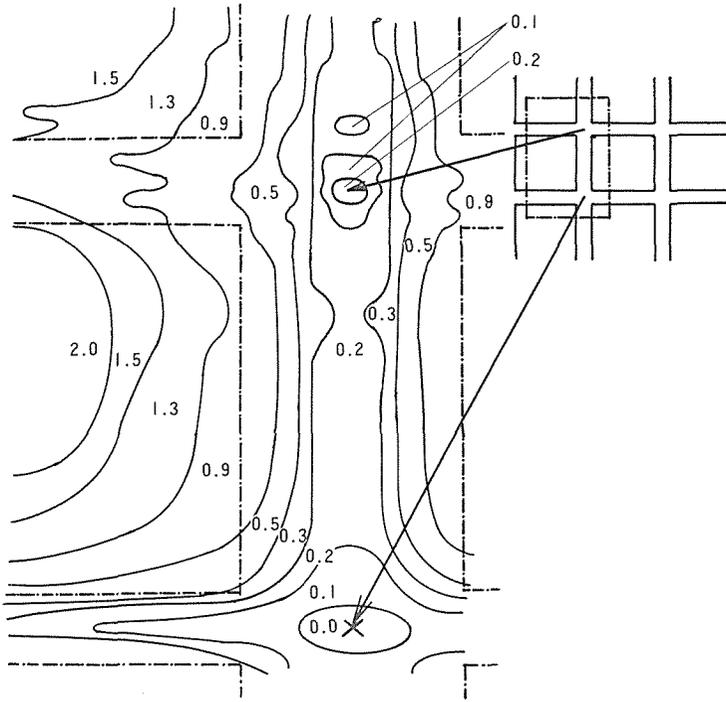


図5 計算機実験によるヘルマン格子図形の出力分布
 観察距離30cm, 線条の幅0.8cmとしている。高, 横のスケールは
 縦の2倍にしているため, 出力分布図は横に伸びた形となる (細部
 の情報を詳しくみるため)。

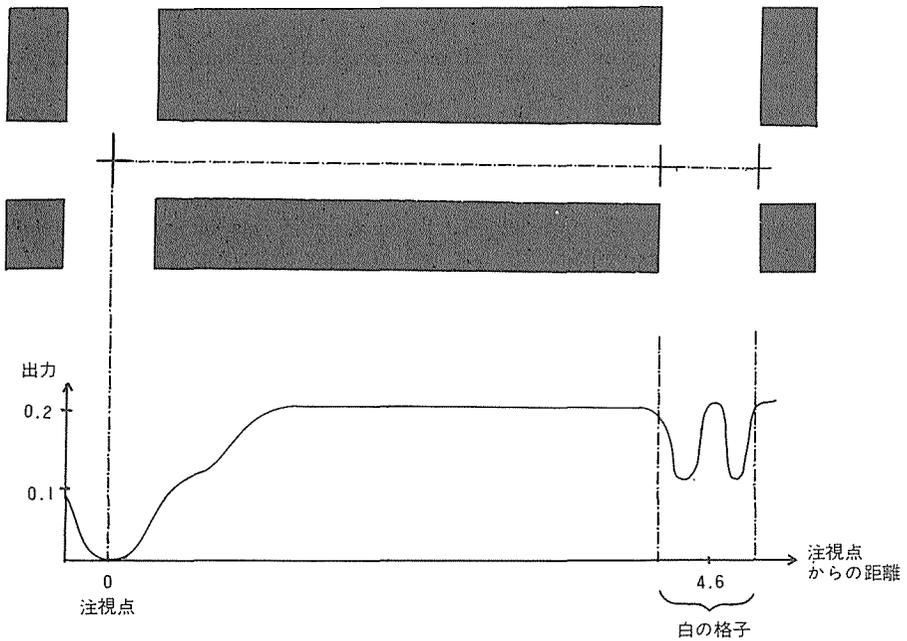


図6 注視点から白線に沿っての出力分布
 中心では明るく白い線の交差では灰色にみえる。

5. あとがき

網膜上の情報処理過程が中心視と周辺視で異なる機能を有する点に着目し、生理学上の受容野・心理学上の受容域の概念を取り入れた人間の視覚網膜モデルを設定し、その裏付けとして心理現象（ヘルマン錯視）を説明することを試みた。従来、周辺視を取り扱った数理モデルは、周辺視の機能の多様さにより複雑になる傾向が強い。しかしモデルの簡略化を考慮してみた場合、重み関数のパラメータを変化させることは心理・生理学にも妥当だと考えられる。本研究で取り扱ったヘルマン錯視については同時対比という心理学的解釈が有力であったが、数理工学的手法により定量的な取り扱いが可能になった。尚、2次微分による錯視量の検出は生理学・心理学的分野との結びつきが不十分のため参考を示すにとどめた。本論文の数理モデルによる他の錯視現象への応用、先の2次微分の解釈の問題、網膜各細胞の不均一性と異方性（即ち、見る方向に依存した情報処理）を考慮した網膜モデル、それにX型の神経節細胞のみでなく時空間の要素の入るY型の神経節細胞を考慮した網膜モデルの設定とその応用などが今後の課題として掲げられる。尚、本研究の数値計算に関しては情報工学専攻計算機室 ECLIPSE-S200 を使用した。

最後に、本研究をすすめるにあたりご助言をいただいた本学、伊達惇教授、新保勝教授、佐藤義治講師に深く感謝致します。

参考文献

- 1) Hartline, H. K., Wagner, H. G. and Ratliff, F.: Inhibition in the eye of *Limulus*. J. Gen. Physiol., 39(1956), pp.561~573.
- 2) 森田・藤井：生体のパターン認識過程における Lateral Inhibition の機能. 電子通信学会誌, 49 (1966), pp. 1857~1864.
- 3) 山ノ井・斉藤・梶川・河口：網膜視神経の側抑制出力関数に基づく視知覚の数理工学的研究. 北大工学部研究報告, 第111号, 昭和57年 pp.89~94.
- 4) 渡辺・坂田・長谷川・吉田・畑田：視覚の科学 (1975), pp.15~55, 写真工業.
- 5) Fisher, B.: Overlap of receptive field centers and representation of the visual field in the cat's optic tract. Vision Research, 13(1973), pp.1857~1864.
- 6) 南雲仁一：生体における情報処理—感覚器と脳の生理, 岩波講座 情報科学24(1982), pp. 1~42, 岩波書店.
- 7) 山城・森田・藤井：視細胞の密度分布に従った細胞配列による側抑制視覚モデル, 昭和57年度電子通信学会総合全国大会, 1379.
- 8) 相場 覚：現代基礎心理学知覚 I —視知覚現象の基礎—受容域 (1980), pp.11~27, 東京大学出版会.
- 9) Yung, F. A. and Lindsay, D. B.: Early experience and visual information processing in perception and reading disorders. (1970), pp.181~197, National Academy of Science.
- 10) Hildebrand, T.: Performance of inhomogeneous and anisotropic filters in the visual system. Biological Cybernetics, 36(1980), pp.235~241.