



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	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
Author(s)	山ノ井, 高洋; Yamanoi, Takahiro; 斎藤, 正明 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 111, 89-94
Issue Date	1982-10-30
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/41756
Type	departmental bulletin paper
File Information	111_89-94.pdf



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

山ノ井高洋 斎藤正明 梶川 聡 河口至商
(昭和57年 6 月30日受理)

A Research for the Visual Perception by Mathematical Engineering
Based on the Output Function of Lateral Inhibition
from Optic Nerves in the Retina

Takahiro YAMANOI, Masaaki SAITO, Satoshi KAJIKAWA
and Michiaki KAWAGUCHI
(Received June 30, 1982)

Abstract

A differential geometrical treatment of visual fields is shown with regard to the output function from optic nerves in the retina. One of the metrics of the visual field is assumed from the output function of the lateral inhibition introduced by Morita et al. By means of this metric the equation of geodesic, the straight line in the visual field, is derived and solved numerically.

Some structures of the perception to the geometrical-optical illusions: Orbison's, Zöllner's and Poggendorff's, are explained with reference to the geodesic in each fields.

1. ま え が き

人間の感覚を模擬した装置の実現化は情報処理の機械化における重要な課題である。視覚に関する情報処理を目的とする際には人間の視覚認識機構を明らかにすることが不可欠となる。しかしながら視覚認識の過程においては生体の様々な部位から種々の影響を受けるのであるから、この認識機構を解明することは容易ではない。したがってこの心理物理的認識過程を一つの情報処理系として全体的にとらえることも研究の一方法である¹⁾

このような観点から視知覚において特徴的な錯視現象に注目して、本川は錯視図形における誘導場を心理物理的に求めている²⁾。森田・藤井らは二層の側抑制回路を用いて図形のまわりのポテンシャル場を導出し錯視現象を定性的に論じている³⁾。視覚の心理物理的認識過程の定量的な研

究も必要であることから、山ノ井らは心理物理実験をもとに局所的な計量を求め、一部の錯視図形における視空間の構造を明らかにした⁶⁾⁷⁾⁸⁾

一方、川端は森田・藤井らによる側抑制回路の出力関数の逆数が視知覚の場の単位距離を表す関数であるとして、視知覚の場における直線の方程式を導出し錯視図形を議論している⁹⁾¹⁰⁾ また、安田は大きさの恒常性に関して Riemann 計量を導入している¹¹⁾ しながら、川端の距離関数、安田の計量は視知覚の場における幾何学的意味が明確ではない。

本論文では、眼が図形の長さを正確に測る際には焦点を合わせた点の近傍のみの情報を抽出していることに注目し、森田・藤井らによる側抑制からの出力関数の微小変化が意味あるものと考えて自然な計量を与え、入力図形を限定せずに一般の図形の錯視を定量的に論ずる。

2. 網膜視神経の側抑制出力関数と視知覚の場の対応関係

網膜は脳の一部が突出したものといわれ、視知覚において重要な役割を演じている。したがって網膜視神経の出力を解析することは視覚の機構の解明にとって必要なことである。

森田・藤井らは Hartline と Ratliff によるカブトガニの複眼の側抑制機能¹²⁾ を基本とした二層の空間回路を提案し二次元図形の錯視を定性的に論じている⁴⁾⁵⁾ これによれば刺激図形 $h(x, y)$ に対する出力関数 $Z(x, y)$ は

$$Z(x, y) = \int_{\xi_1}^{\xi_2} \int_{\eta_1(\xi)}^{\eta_2(\xi)} \omega(\xi - x, \eta - y) \cdot h(\xi, \eta) d\eta d\xi$$

で近似される。ここで、

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

なる ON-中心型受容器を考えれば

$$Z(x, y) = \sum_{i=1}^2 \frac{K_i}{2\pi\sigma_i^2} \int_{\xi_1}^{\xi_2} \int_{\eta_1(\xi)}^{\eta_2(\xi)} h(\xi, \eta) \cdot \exp\left[-\frac{1}{2\sigma_i^2}\{(\xi - x)^2 + (\eta - y)^2\}\right] d\eta d\xi \quad (2.1)$$

となる。ただし $h(x, y)$ は点 (x, y) に刺激図形が存在するときのみ $h(x, y) = 1$ となる。 K_1, K_2 については Hubel と Wisel の生理学的所見から $K_1 = 1, K_2 = -1$ とし、 σ_1, σ_2 に関しては錯視実験の結果より $\sigma_1 = 0.23^\circ, \sigma_2 = 1.8^\circ$ としている。錯視実験の結果も参考にしていることから、(2.1) 式は単に網膜視神経の出力ではなく、心理的要因も含めた心理物理的認識を表す関数とみなせる。川端は (2.1) 式をもとに知覚の場における距離関数として

$$D(x, y) = \frac{1}{Z(x, y)} \quad (2.2)$$

を提案し視覚の場における直線（心理的直線）を求めている⁹⁾¹⁰⁾ ただし $\sigma_1 = 0.28^\circ, \sigma_2 = 0.56^\circ$ としている。また側抑制効果を取り除いた関数についても同様な考察がなされている。しかしながら距離関数として (2.2) 式をとる根拠は明確ではない。また安田は大きさの恒常性に関して Riemann 計量を導入し計量テンソル g_{ij} を

$$g_{11} = g_{22} = g(x, y) = \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x - x', y - y') f(x', y', s) dx' dy' + r \right\}^2$$

$$g_{12} = g_{21} = 0$$

と与えている¹¹⁾ が、この幾何学的意味が不明である。

本論文では視知覚の場を二次元に限って議論する。物理空間の座標を (x^1, x^2) で表し、対応す

る視知覚の場の座標を (u^1, u^2) で表す。物理空間における図形上の点 $P(x^1, x^2)$ を注視したとき網膜視神経の出力が (2.1) 式で与えられるものと仮定する。点 P から微小距離へだたった点 $P'(x^1 + \Delta x^1, x^2 + \Delta x^2)$ へ注視点を移したときの視神経の出力は (2.1) 式において $Z(x^1 + \Delta x^1, x^2 + \Delta x^2)$ として求まる。物理空間の距離を正確に測る際に我々は注視点の像を中心窩に結んでいる。注視点の移動にしたがい中心窩の像としての入力に変化することから視神経の出力も変化を受ける。この微小変化を次々につなぎ合わせるにより視知覚の場が構成されると考えられる。このように網膜視神経の微小変化量が視知覚の場の重要な因子となっている。したがって、我々の認識する視知覚の場を次のごとく考える。刺激の出力 $x^3 = Z(x^1, x^2)$ と $x^{3'} = Z(x^1 + \Delta x^1, x^2 + \Delta x^2)$ を次々につなぎ合わせたものは、 x^1, x^2, x^3 を軸とする三次元空間の二次元曲面を構成している。刺激の微小変化が大きいほど視知覚の場の距離が大きく認識されるので、この曲面の計量が視知覚の場の計量に対応しているとみなせる。

この曲面上に座標 (u^1, u^2) をとれば、線素の長さ ds は

$$ds^2 = g_{ij} du^i du^j$$

で与えられる。ここで計量テンソル g_{ij} は簡単な計算より、

$$g_{ij} = \delta_{ij} + Z_i Z_j \quad (i, j = 1, 2) \quad (2.3)$$

$$Z_i = \frac{\partial Z}{\partial u^i} = \iint h(\xi^1, \xi^2) \cdot (\xi^i - u^i) \left[\frac{1}{2\pi\sigma_1^2} \exp\left(-\frac{T}{2\sigma_1^2}\right) - \frac{1}{2\pi\sigma_2^2} \exp\left(-\frac{T}{2\sigma_2^2}\right) \right] d\xi^1 d\xi^2 \quad (2.4)$$

$$T = (\xi^1 - u^1)^2 + (\xi^2 - u^2)^2$$

となる。ただし δ_{ij} は Kronecker のデルタで、指標に関しては以後 Einstein の総和規約を適用する。

視知覚の場における直線は u^i 座標で表される曲面の測地線と考えられる。この曲面上の測地線の方程式は

$$\frac{d^2 u^i}{ds^2} + \left\{ \begin{matrix} i \\ jk \end{matrix} \right\} \frac{du^j}{ds} \frac{du^k}{ds} = 0 \quad (i = 1, 2)$$

で与えられる。ただし $\left\{ \begin{matrix} i \\ jk \end{matrix} \right\}$ は第2種の Christoffel の記号であり、計量テンソル g_{ij} によって

$$\left\{ \begin{matrix} i \\ jk \end{matrix} \right\} = \frac{1}{2} g^{ii} \left(\frac{\partial g_{ij}}{\partial u^k} + \frac{\partial g_{jk}}{\partial u^i} - \frac{\partial g_{ik}}{\partial u^j} \right) \quad (i, j, k = 1, 2)$$

と定義される。ここで g^{ii} は $g^{ij} g_{ij} = \delta_j^i$ で定まるテンソルであり、(2.3)式により、

$$g^{ii} = \frac{1}{g} (\delta^{ii} + (-1)^{i+1} Z^i Z^i)$$

となる。ただし g は g_{ij} の行列式であり、 Z^i なる記号は

$$Z^i = \begin{cases} Z_1 & i=2 \text{ のとき} \\ Z_2 & i=1 \text{ のとき} \end{cases}$$

を表すものとする。これらを用いて第2種の Christoffel の記号を計算すると、

$$\left\{ \begin{matrix} i \\ jk \end{matrix} \right\} = \frac{Z_i Z_{jk}}{g}$$

と求まる。ここで、

$$Z_{jk} = \frac{\partial^2 Z}{\partial u^k \partial u^j}$$

である。したがって測地線の方程式は具体的に

$$\frac{d^2 u^i}{ds^2} + \frac{Z_i Z_{jk}}{g} \frac{du^j}{ds} \frac{du^k}{ds} = 0 \quad (2 \cdot 5)$$

と導ける。

3. 幾何学的錯視図形の視知覚の場における直線

我々は視知覚の場における測地線を直線として認識しているのであるから、測地線を基準として視知覚の場のゆがみを論ずることが可能である。各種の幾何学的錯視図形の視知覚の場における直線をシミュレートしたものを図3.1(b), 図3.2(b), 図3.3(b)に示す。なお、(2.5)式の数値解を求める際には高階の Runge-Kutta-Gill 法を用い、(2.4)式の積分は Simpson 法により積分域を近似的に $u^i + 2.1^\circ \sim u^i - 2.1^\circ$ の範囲で求めている。本論文では $K_1=1$, $K_2=-1$, $\sigma_1=0.28$, $\sigma_2=0.56$ としてある。

図3.1の Orbison の錯視を例にとり、この視知覚の場における直線を説明する。図3.1(b)中の実線が視知覚の場における直線であることから、物理空間における直線は視知覚の場において逆に下に凸の曲線となって見える。

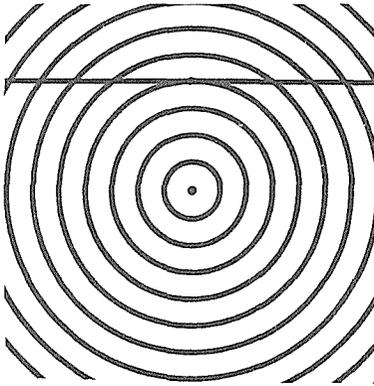


図3.1 (a) Orbison の錯視図形

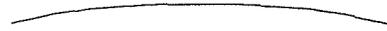


図3.1 (b) Orbison の錯視図形の視知覚場における測地線

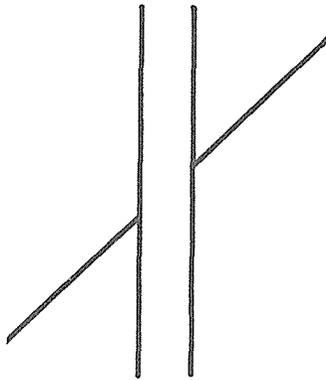


図3.2 (a) Poggendorff の錯視図形

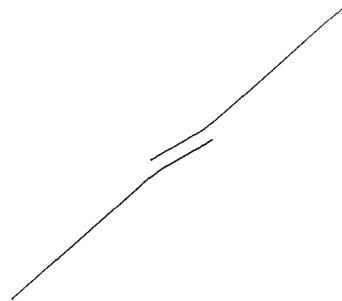


図3.2 (b) Poggendorff 錯視図形の視知覚場における測地線

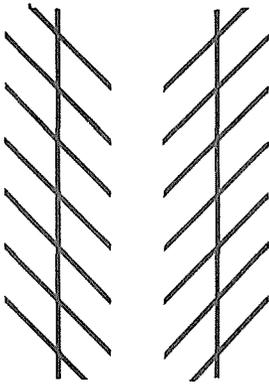
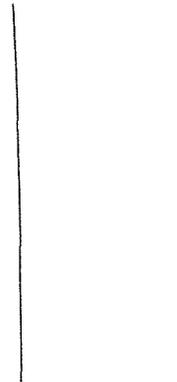


図3.3 (a) Zöllner の錯視図形

図3.3 (b) Zöllner の錯視図形の
視知覚場における測地線

式(2.3)で与えられた計量は u^i 座標を曲面の曲線座標系としたものであった。上記の議論は視知覚の場を物理空間にひき戻した場合のものであるが、以下で物理空間が視知覚の場ではどうとらえられるかについて論ずる。視知覚の場を Euclid 空間とみれば、 u^i 座標系を Descartes 座標とすればよい。この場における物理空間の計量は、(2.3)式における計量テンソルの逆行列を G_{ij} として

$$ds^2 = G_{ij} dv^i dv^j$$

と表せる。ただし v^i は物理空間の座標系 x^i に対する視知覚の場の曲線座標系である。また $G_{ij} = g^{ij}$ として(2.3)式より与えられる。物理空間の直線は v^i 座標系で表される空間の測地線に対応する。よって幾何学的錯視図形の直線部分は

$$\frac{d^2 v^i}{ds^2} + \frac{1}{2} \varepsilon_{jk} [G^{\alpha i} G_{js} (Z_k Z_{\alpha s} - Z_\alpha Z_{ks}) - Z_j Z_k] \frac{dv^j}{ds} \frac{dv^k}{ds} = 0 \quad (i=1, 2) \quad (3.1)$$

なる方程式の解である。ここで ε_{jk} なる記号は $[]$ 内の指標 j, k を交換したもの同志の和を表す。(3.1)式を解くことにより見かけの図形の傾向がわかることになる。

4. あとがき

以上、網膜視神経の側抑制出力関数に注目し視知覚の場に計量を導入することにより、見かけ上の直線の方程式を求め、その数値解を具体的に得た。これにより側抑制の出力関数が視知覚の場において重要な因子となっていることが確認できると共に、一般の幾何学的錯視図形の視知覚の場を定量的に論ずることが可能となった。今後の課題としては、錯視実験を行なうことによりさらに σ_1 と σ_2 、 K_1 、 K_2 の値を最良にすることが考えられる。なお、本研究の数値計算に関しては本学大型計算機センター HITAC M-200H および情報工学専攻計算機センター 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新保勝教授、伊達惇助教授、佐藤義治講師に感謝する。

参 考 文 献

- 1) 新保勝・山ノ井高洋：北大工学部研究報告, 87(1978), p. 169~173.
- 2) Shimbo, M. Yamanoi, T. and Kawaguchi, M.: Proc. International Conference on Cybernetics and Society '78, I (1978), p. 394~397.
- 3) 本川弘一：大脳生理学, (1964) p. 315~319, 中山書店.
- 4) 森田龍彌・藤井克彦：電子通信学会誌, 49(昭41), 10, p. 1857~1863.
- 5) 藤井克彦・松岡章・森田龍彌：医用電子と生体工学, 5(1967), 2, p. 117~126.
- 6) 山ノ井高洋・工藤司・成田雅博・河口至商：北大工学部研究報告(昭55), 100, p. 107~112.
- 7) Yamanoi, T. Yamazaki, T. and Kawaguchi, M.: Behaviormetrika (1981), 10, p. 77~85.
- 8) Yamanoi, T. Kudo, T. Yamazaki, T. and Kawaguchi, M.: Tensor (1982), 37, p. 257~261.
- 9) 川端信男：医用電子と生体工学, 14(1976), 4, p. 289~295
- 10) Kawabata, N.: IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics, SMC-6(1976), 12, p. 818~824.
- 11) 安田稔：昭和56年度電子通信学会総合全国大会講演論文集, (昭56), 6, p. 265~266.
- 12) Hartline, H. K. and Ratiff, F.: J. Gen. Physiol., 41(1958), 5, p. 1049~1066.