点列の周りに生じた誘導場を用いた錯視量の推定法

Method for Estimating Quantity of Optical Illusions Using Induced Field That Occurred Around multiple points

正会員 東 恒 人[†], 正会員 島田 恭宏[†], 前田 征大^{††}

Tsunehito Higashi[†], Yasuhiro Shimada[†] and Masahiro Maeta^{††}

Abstract Calculating an induced field is generally complicated even if an optical illusion phenomenon makes the shape look simple. In addition, a technique did not previously exist for explaining an optical illusion in a figure with line width. This paper describes a method for estimating the quantity of optical illusions of a figure by composing an induced field to produce a figure constituted by arranging multiple points. We first clarified that the quantity of estimated optical illusions resembles the felt optical illusion phenomena. Next, we quantitatively estimated the weakened effect of optical illusion phenomena for figures, and, we also quantitatively estimated the influence of line width on optical illusion phenomena.

キーワード: 点列, 誘導場, 二分法, 錯視量, 線幅

1. ま え が き

従来, 錯視図形¹⁾によって引き起こされる錯視現象を説明するために, 2種類の方法が用いられてきた. 一つは, 網膜神経節細胞の受容野の感度分布を用いる方法^{2)~4)}であり, もう一つは, 図形の周りに生じる誘導場を用いる方法⁵⁾⁶⁾である. これらの方法では, 積分計算を用いて, 錯視現象の程度を定量化していた. したがって, 錯視図形の形状が単純であっても, 錯視現象の程度を定量化するためには, 労力と時間を必要とした. また, デジタル画像の周りに生じる誘導場を求める手法⁷⁾が提案されているが, この手法で提案されている計算式が誘導源に接近すると, 誘導場の強さが発散するために, この式では, 誘導源付近の誘導場を計算できないという不便さがある. 最近, 線幅を考慮した図形の錯視現象が調査され⁸⁾, また, その現象を説明するための手法が望まれている⁹⁾. そこで本論文では, このような課題を解決するために, 任意の図形の錯視現象を定量的に推定できるような手法を提案している. まず, 複数の点を配置することによって, 図形の形状を近似し, これらの点の周りに生じる誘導場を合成することによって, 図

形の周りに生じる誘導場の代用とする. この誘導場について, 一定の強さの誘導場の分布, すなわち, 等高線から図形の錯視量を計算する方法を提案し, 得られた錯視量が現実に知覚される錯視現象と類似していることを示している. 次に, 錯視現象を抑制した図形を生成し, この図形について得られた錯視量から, 錯視現象が抑制されることが確認できることを明らかにしている. さらに, 複数の点を配列して表現された線幅と錯視現象の関係を錯視量を用いて定量化できることを示している.

2. 点列からの誘導場

2.1 誘導場の基本式

原点 $O(0,0)$ に誘導源があり, 誘導源から $r\xi$ だけ離れた観測点 $P(x_P\xi, y_P\xi)$ に生じる誘導場の強さを $F_0(P)$ とする. 誘導源が一個の点である場合の誘導場の強さ $F_0(P)$ は, 通常, 式 (1) が使用されているが, この式には, $F_0(O) = \infty$ となる現象があり, この現象は, 現実にはありえないし, このような現象が生じると, 誘導源近辺における場の強さの議論が不可能である. なお, ξ は寸法換算係数と呼称する.

$$F_0(P) = \frac{1}{r\xi} \quad (1)$$

そこで, 式 (1) の代わりに, 式 (2) を定義する. この式では, 原点では $F_0(O) = 1$ となり, 現実の現象では, 原点で飽和すると考えられるので, 式 (2) の傾向は, 現実の現象に整合しているといえる. また, 式 (2) により, 誘導源近辺における場の強さの議論が可能となる.

$$F_0(P) = \frac{c\xi}{r_i\xi + c\xi} \quad (2)$$

2004 年 7 月 14 日受付, 2005 年 1 月 27 日再受付, 2005 年 6 月 24 日採録

[†]岡山理科大学 工学部

(〒 700-0005 岡山市理大町 1-1, TEL 086-256-9575)

^{††}株式会社ユニバーサルコンサルティング

(〒 550-0002 大阪府大阪市西区江戸堀 1-18-35, TEL 06-6225-2200)

[†]Faculty of Engineering, Okayama University of Science

(1-1, Ridai-cho, Okayama-shi, Okayama 700-0005, Japan)

^{††}Universal Concern Co. Ltd

(1-18-35, Edobori, Nishi-Ku, Higobashi-IP Bldg #701 Osaka-City, Osaka-Fu, 550-0002, Japan)

ここで、 c を飽和定数と呼称する。

図形をディスプレイ上に表示した場合、使用するディスプレイによって図形の表示寸法が異なることがあるので、本論文では、2.2 で述べるように、図形を点の個数 n_x やその点の間隔 δ_x などです。これらの n_x や δ_x 、飽和定数 c および観測点の位置 (x_P, y_P) を無次元量として扱うと、どのようなディスプレイ上に表示された図形でも、その図形に対応した結果が得られる。

5.4(1)で述べるように、使用するディスプレイが決まれば、図形の寸法が決まり、点の間隔の実際の寸法 $\delta_x \xi$ が明らかになる。その結果、寸法換算係数 ξ が決まり、飽和定数の実数 $c \xi$ が決まることになる。

以下、2.2～5 において、図形の形状に関わるパラメータの値をすべて、無次元量で表し、パラメータの値を実際の値に換算するには、5.4(1)の手順により、寸法換算係数 ξ の値を求め、この値をパラメータの値にかければよい。

2.2 飽和定数の役割

図 1 に場の強さ $F_0(P)$ と飽和定数 c の関係を示す。ここでは、 $0 \leq R \leq 0.3$ ($-0.3 \leq x, y \leq 0.3$) とし、 $c_1 = 0.0002, c_2 = 0.0020, c_3 = 0.0200$ である。図 1 から、 $c = c_1, c_2, c_3$ と変化すると、誘導源から離れるに従って、場の強さの低下割合が小さくなることがわかる。

誘導源 $S_i(x_i, y_i)$ から距離 r_i だけ離れた観測点 P における場の強さを $F_i(P)$ とすると、このような複数の誘導源から生じる誘導場の強さ $F(P)$ は、式 (3) で表せる。ここで、 N は点の数である。

$$F(P) = \sum_{i=1}^N F_i(P)$$

$$F_i(P) = \frac{c}{r_i + c}$$

$$r_i = \sqrt{(x_P - x_i)^2 + (y_P - y_i)^2} \quad (3)$$

図 2 に複数の点の配置例を示す。

x 軸上に間隔 δ_x で n_x 個の点が配置され、この点列に対して間隔 d で上下に n_y 組の平行な点列が配置されている。各点列は、 x 方向に間隔 δ_x で n_x 個、 y 方向に間隔 δ_y で配置されている。

表 1 の条件のもとに、誘導場を計算し、その結果を図 3 のような濃淡表示で示す。なお、誘導場は、 $-0.3 \leq x, y \leq 0.3$ の領域について、間隔 $\Delta = 10^{-3}$ の条件で表示されている。

図 1 飽和定数 c と場の強さ $F_0(P)$ の関係
Relation of c and $F_0(P)$

図 2 複数の点の配列
An arrangement of plural points

表 1 計算条件 I
Calculation condition I

	G_1	G_2	G_3	G_4	G_5	G_6
δ_x	0.005	0.005	0.010	0.010	0.010	0.010
δ_y	0.005	0.005	0.005	0.005	0.010	0.010
c	0.0020	0.0002	0.0020	0.0002	0.0020	0.0002
d	0.0250	0.0250	0.0250	0.0250	0.0250	0.0250

図 3 図 2 に示した源から生じた誘導場
The field induced from the source shown in Fig. 2

図 4 $F_P = 0.5$ における等高線
Contour lines in $F_P=0.5$

二分法を用いて、一定の強さ F_P の誘導場の分布を求め、その結果を図 4 に示すような等高線で示す。ここでは、誤差 $\epsilon = 0.00005$ の条件で、 $F_P = 0.5$ となる場の強さの分布を求めた。図 4 から、飽和定数 c を調整することにより、点列群を、局所的な点列の分布や横点列の集まりなどの分布として把握できることを示唆している。この結果は、図 2 を一見すると、「太い線 2 本と細い線 1 本並んでいる」として知覚し、詳細に見ると、「点が前述のように規則的に配列されている」と知覚する現象を説明できそうである。この点については、5.4(4)で述べる。

3. 錯視量の推定法

プント・フィック図形、ポッケンドルフ図形、ミュラー・リヤ図形を点列で表現し、これらの図形の周りに生じる誘

図 5 錯視図形 I
Optical illusion source I.

導場から、錯視量を推定する方法を示す。

3.1 ブント・フィック図形

図 5 に、ブント・フィック図形を点列で表現した図形を示す。この図形では、原点 O にある点に対して、 $\pm x$ 方向に δ_x の間隔で、総計 n_x 個の点を配置し、 $+y$ 方向に δ_y の間隔で、 n_y 個の点が配置されている。ここでは、 $\delta_x = \delta_y = 0.005$ 、 $n_x = n_y = 40$ とする。この図形から、点列 V の長さが点列 H の長さよりも、長くなるという錯視現象が生じる。

この図形の誘導場と $F_P = 0.5$ における等高線を図 6 に示す。なお、点列 H と点列 V が、横線と縦線として識別できるように、 $c = c_2$ および $F_P = 0.5$ とした。

図 6 に示したパラメータ a, b を用いて、錯視量 R_I を式 (4) で定義する。 a と b は、それぞれ等高線の x 方向の幅と等高線の y 方向の幅である。

$$R_I = \frac{b}{a} \quad (4)$$

図 6 の等高線の場合には、錯視量は $R_I = 1.100$ である。この結果は、 $b > a$ を意味し、図 5 から得られる錯視現象と類似している。

3.2 ポッケンドルフ図形

図 7 に、ポッケンドルフ図形を点列で表現した図形を示す。

点列 H_1, H_2 の間の中心を原点として、水平方向を x 軸にとり、垂直方向を y 軸にとることとする。点列 H_1, H_2 では、 x 軸に平行に、 δ_x の間隔で、 n_x 個の点が配置され、点列 H_1 と点列 H_2 の間隔は d である。点列 S_1 では、 $y = \tan(\theta)x$ の線上に、点列 H_1 と $y = \tan(\theta)x$ の交点 e_1 から δ_r の間隔で、 $y > d/2$ を満たす n_s 個の点が配置され、点列 S_2 では、 $y = \tan(\theta)x$ の線上に、点列 H_2 と $y = \tan(\theta)x$ の交点 e_2 から δ_r の間隔で、 $y < -d/2$ を満たす n_s 個の点が配置されている。ここでは、 $\theta = 45^\circ$, $\delta_x = \delta_r = 0.005$ 、 $n_x = 40$, $n_s = 20$, $d = 0.100$ とする。この図形から、原

図 6 図 5 の源から生成された誘導場とその等高線
The field induced from the source shown in Fig.5 and its contour line.

図 7 錯視図形 II
Optical illusion source II.

図 8 図 7 の源から生成された誘導場とその等高線
The field induced from the source shown in Fig.7 and its contour line.

点に対して、 S_1 は $+x$ 方向に、 S_2 は $-x$ 方向に、互いにずれた平行線が存在するような錯視現象が生じる。この図形の誘導場と等高線を図 8 に示す。なお、点列 H_1, H_2, S_1, S_2 が線として識別できるように、 $c = c_2$, $F_P = 0.7$ とした。

図 8 において、点 P_1 は $+y$ 方向における等高線の y 座標の最大値を与える点であり、点 P_2 は $+y$ 方向における等高線の y 座標の最小値を与える点である。また、点 P_3 は $-y$ 方向における等高線の y 座標の最小値を与える点であり、点 P_4 は $-y$ 方向における等高線の y 座標の最大値を与える点である。点 P_1 と点 P_2 を結ぶ線分と点 P_3 と点 P_4 を結ぶ線分を表す方程式を求め、 x 軸とのそれぞれの交点座標 x_{12} と x_{34} を用いて、錯視量 R_{II} を式 (5) で定義する。

$$R_{II} = x_{12} - x_{34} \quad (5)$$

図 8 の等高線の場合には、 $R_{II} = 6.495 \times 10^{-2}$ であり、この結果は、線分 P_1P_2 と線分 P_3P_4 がずれていることを意味し、図 7 から知覚される錯視現象と類似している。ポッケンドルフ図形の場合には、角度 θ が小さく、間隔 d が広く、斜め線 S_1, S_2 が短くなると、錯視現象が強くなる。図 9(a) は図 7 と同一の図形であり、 $\theta = 45^\circ$ の図形であり、図 9(b) は $\theta = 20^\circ$ の図形であり、図 9(c) は間隔 d が 2 倍となった図形であり、図 9(d) は S_1, S_2 の点の数 n_s が半分になった図形である。

これらの図形について、 $F_P = 0.7$ における等高線を図 10 に示す。図 10(a),(b),(c),(d) から得られた錯視量は順に、 $R_{II} = 6.495 \times 10^{-2}, 1.778 \times 10^{-1}, 7.791 \times 10^{-2}, 6.735 \times 10^{-2}$ となり、図 9(a) に比べて、図 9(b),(c),(d) のそれぞれの錯視量が増加している。特に、図 9(b) の場合に錯視量の増加が顕著であり、この結果は、知覚される錯視現象と類似している。

3.3 ミューラ・リヤ図形

図 11 に、ミューラ・リヤ図形を点列で表現した図形を示

図 9 他の錯視図形Ⅱ
Other illusion sources II.

図 10 図 9 の源に関する等高線
Contour lines about the sources shown in Fig.9.

す。この図形では、原点 O に対して、 $\pm x$ 軸上に、 δ_x の間隔で、 n_x 個の点が、原点 O を含めて、総計 $(2n_x + 1)$ 個配置され、矢羽 $p_1e_1q_1$ において、角度 p_1e_1O および角度 q_1e_1O を θ とすると、矢羽 $p_2e_2q_2$ において、角度 p_2e_2O および角度 q_2e_2O は $(180^\circ - \theta)$ であり、矢羽 p_3Oq_3 において、角度 p_3Oe_1 および角度 q_3Oe_1 は θ である。

矢羽 $p_1e_1q_1$, p_3Oq_3 , $p_2e_2q_2$ について、上部および下部のそれぞれの点列は、点 e_1 , O , e_2 から、 δ_r の間隔で、 n_s 個の点で構成されている。

ここで、 $\theta = 45^\circ$, $\delta_x = \delta_r = 0.005$, $n_x = 40$, $n_s = 10$ である。この図形から、点列 e_1O よりも Oe_2 の方が長く見えるという錯視現象が生じる。

この図形の誘導場と等高線を図 12 に示す。なお、点列が線として識別できるように、 $c = c_2$, $F_P = 0.4$ とした。

図 12 における等高線において、原点 O から左側の y 座標 ($y > 0$) の極大値を与える x 座標の最小値および原点 O

図 11 錯視図形Ⅲ
Optical illusion sources III.

図 12 図 11 の源から生成された誘導場とその等高線
The field induced from the source shown in Fig.11 and its contour line.

図 13 他の錯視図形Ⅲ
Other optical illusion sources III.

図 14 図 13 の源に関する等高線
Contour lines about the sources shown in Fig.13.

から右側の y 座標 ($y > 0$) の極大値を与える x 座標の最大値をそれぞれ $-a$ および b で表している。 a, b を用いて、錯視量 R_{III} を式 (6) で定義する。

$$R_{III} = b/a \quad (6)$$

図 12 の等高線の場合には、錯視量は $R_{III} = 1.161$ である。ミューラ・リヤ図形では、矢羽の傾きが水平に近づき、矢羽が長くなると、錯視現象が強くなる。図 13(a) は図 11 と同一の図形であり、図 13(b) では $\theta = 20^\circ$ であり、図 13(c) では図 13(a) と同様に $\theta = 45^\circ$ であるが、矢羽の点の数 n_s が半分である。

これらの図形の $F_P = 0.4$ における等高線を図 14 に示す。これらの図形の錯視量は、図 14(a),(b),(c) の順に $R_{III} = 1.161, 1.261, 1.074$ である。この結果、矢羽の角度が小さく、矢羽が長くなると、錯視量が増大することを意味し、知覚される錯視現象に類似している。

4. 錯視現象が抑制された図形

錯視現象が抑制された図形について、錯視量を推定し、本

図 15 錯視図形 I とその変形図形
Optical illusion source I and its deformed optical illusion source.

図 16 図 15 の源に関する等高線
Contour lines about the sources shown in Fig.15.

手法の効果を調べる。

そのために、被験者 9 名を対象として、各錯視図形について、錯視現象を抑制するための調整量を変化させて、被験者が「錯視現象が抑制された」と認識したときの調整量を調査し、調整量の平均値とその標準偏差を求めた。ここでは、調整量の範囲として、(平均値-標準偏差) ~ (平均値+標準偏差) として示す。調整量は、点列の数で表現することにした。その理由は、点列の間隔を変化させると、誘導場の重量の仕方が変化し、全体の誘導場の分布が変化するからである。したがって、調整量を点列の数で表現するので、調整量の範囲を整数で表すことになる。そこで、この調整量の範囲に対応した錯視量の範囲を明らかにする。

4.1 変形されたブント・フィック図形

図 15(a) は図 5 と同一の図形 ($n_y = 40$) である。調整量として、点列 V の個数 n_y の数値の減少値で表すと、調整量の範囲は 5~7 であり、これに対応する図形の錯視量 R_I の範囲は $9.757 \times 10^{-1} \sim 9.260 \times 10^{-1}$ である。調整量 6 ($n_y = 34$) として変形されたブント・フィック図形の例を図 15(b) に示す。図 15(b) の図形は、図 15(a) の図形よりも、錯視現象が抑制されている。図 15(a),(b) に対応したそれぞれの $F_P = 0.5$ における等高線を図 16(a),(b) に示す。これらの等高線から得られる錯視量はそれぞれ $R_I = 1.100, 9.508 \times 10^{-1}$ であり、図 15(b) の方が図 15(a) に比べて、錯視量が減少している。この結果は知覚される錯視現象と類似している。

4.2 変形されたポッケンドルフ図形

図 17(a) は図 9(c) と同一の図形である。調整量として、図 7 における上部の斜め点列 S_1 を左方向に、かつ、下部の斜め点列 S_2 を右方向に、それぞれ点間隔を単位として移動させたときの移動量で表す。調整量の範囲は 4~6 であり、これに対応する図形の錯視量 R_{II} の範囲は $3.961 \times 10^{-2} \sim 2.453 \times 10^{-2}$ である。

図 17 錯視図形 II とその変形図形
Optical illusion source II and its deformed optical illusion source.

図 18 図 17 の源に関する等高線
Contour lines about the sources shown in Fig.17.

調整量 5 として変形されたポッケンドルフ図形の例を図 17(b) に示す。図 17(b) は、図 17(a) よりも、錯視現象が抑制されている。図 17(a),(b) に対応したそれぞれの $F_P = 0.7$ における等高線を図 18(a),(b) に示す。これらの等高線から得られた錯視量は $R_{II} = 7.791 \times 10^{-2}, 3.137 \times 10^{-2}$ であり、図 17(b) の方が図 17(a) よりも錯視量が減少している。この結果は、知覚される錯視現象に類似している。

4.3 変形されたミュラー・リヤ図形

図 19(a) は図 11 と同一の図形である。調整量として、図 11 に示した点列 Oe_2 の点の数の減少量で表すと、調整量の範囲は 6~12 であり、これに対応する図形の錯視量 R_{III} の範囲は 1.024~0.887 である。

調整量 9 として変形されたミュラー・リヤ図形の例を図 19(b) に示す。図 19(b) は、図 19(a) よりも、錯視現象が抑制されている。図 19(a),(b) に対応した $F_P = 0.4$ における等高線をそれぞれ図 20(a),(b) に示す。これらの等高線から得られた錯視量は $R_{III} = 1.161, 0.956$ であり、図 19(b) の錯視量が図 19(a) の錯視量よりも低下している。この結果は、知覚される錯視現象と類似している。

図 20 図 19 の源に関する等高線
Contour lines about the sources shown in Fig. 19.

図 21 線幅のある錯視図形 I
Optical illusion sources I with line width.

図 22 図 21 の源に関する長さの比較の仕方
Way of comparison of length about the source shown in Fig. 21.

5. 線幅を考慮した図形の錯視量

5.1 線幅のあるブント・フィック図形

図 21 に、線幅のあるブント・フィック図形として点列で表現した図形を示す。これらの図形は以下の手順で生成される。図 5 に示した点列 H と同一の点列を δ_y の間隔で $\pm y$ 方向に h 組ずつ配置し、点列 V に対して $\pm x$ 方向に δ_x の間隔で、 V に平行に、点列 V の長さ一致するだけの点を付加して、 h 組の点列が生成されている。この方法により、点列 H と点列 V の長さを変化させないようにしている。図 21(a),(b),(c) は、それぞれ $h = 2, 4, 6$ の場合の図形である。なお、 $\delta_x = \delta_y = 0.005$ である。

被験者は、図 22 に示すように、線幅が太くなると、線幅の太さの影響により、点列 H の長さ一致と点列 V の長さを比較するのではなく、横棒部分（横方向に並んだ点列） H' と縦棒部分（縦方向に並んだ点列） V' を個別に認識するようになる。この場合には、縦棒部分 V' が横棒部分 H' よりも短くなるために、線幅が太くなると、点列 V' の方が点列 H' よりも長く見えるという錯視現象が低下する。

線幅のある図形に対して、錯視量の推定には、上記の状況を考慮して、図 23 のようなパラメータを用いて錯視量 R'_I を式 (7) で定義する。 b_1 と b_2 はそれぞれ等高線の $+y$ 方向の幅と等高線の $-y$ 方向の幅である。

$$R'_I = \frac{b_1 - b_2}{a} \quad (7)$$

図 24 に、この図形の $F_P = 0.5$ における等高線を示す。図 6 では、錯視量は $R'_I = 0.879$ であり、図 24(a),(b),(c)

図 23 錯視量の計算のためのパラメータ
Parameters for calculation of quantity of optical illusion.

図 24 図 21 の源に関する等高線
Contour lines about the sources shown in Fig. 21.

の順に、それぞれの錯視量は $R'_I = 0.813, 0.767, 0.729$ となるので、線幅が広くなるにつれて、錯視量が減少していることになる。

5.2 線幅のあるポッケンドルフ図形

図 25 に、線幅のあるポッケンドルフ図形として点列で表現した図形を示す。これらの図形は以下のような手順で生成される。図 7 に示した H_1 と同一の点列を H_1 に平行に、 H_1 の上に δ_y の間隔で、 h 組生成し、 H_2 の下にも、同様の点列を h 組生成する。さらに、点列 S_1 の $-x$ 方向に、 δ_x の間隔で、 H_1 に付加された水平点列の上辺の点から、 S_1 に平行に、 S_1 の長さ一致するだけの点が付加され、点列 S_2 の $-x$ 方向に、 δ_x の間隔で、 H_2 に付加された水平点列の下辺の点から、 S_2 に平行に、 S_2 の長さ一致するだけの点が付加されている。このようにして、 H_1 と H_2 のそれぞれの傾きと長さ、および、 H_1 と H_2 の間隔がともに変化しないようにしている。図 25(a)(b) では、それぞれ $h = 2, 4$ である。なお、 $\delta_x = \delta_y = 0.005$ である。

これらの図形の $F_P = 0.7$ における等高線を図 26 に示す。図 8 から得られる錯視量 $R_{II} = 6.495 \times 10^{-2}$ に対して、錯視量は、 $R_{II} = 7.276 \times 10^{-2}, 7.326 \times 10^{-2}$ のように増加しており、線幅が広いほど、錯視現象が強くなる傾向にあることを示している。

5.3 線幅のあるミューラ・リヤ図形

図 27 に、線幅のあるミューラ・リヤ図形を点列で表現した図形を示す。これらの図形は以下の手順で生成される。点列 $e_1 O e_2$ の上下に、 δ_y の間隔で、点列 $e_1 O e_2$ と同一の

図 25 線幅のある錯視図形 II
Optical illusion sources II with line width.

図 26 図 25 の源に関する等高線
Contour lines about the sources shown in Fig. 25.

図 27 線幅のある錯視図形Ⅲ
Optical illusion sources III with line width.

図 28 図 27 の源に関する等高線
Contour lines about the sources shown in Fig. 27.

点列を h 組生成する。矢羽 $p_1e_1q_1$ の上部に、点列 p_1e_1 の長さにそろえながら、点列 p_1e_1 に平行に、 $+y$ 方向に δ_y の間隔で点列を、 h 組付加し、矢羽 $p_1e_1q_1$ の下部についても、 $-y$ 方向に δ_y の間隔で点列を、同様な方法で h 組増設する。他の矢羽についても、矢羽 $p_1e_1q_1$ と同様な方法で、点列を付加させる。このようにして、点列 e_1Oe_2 と矢羽のそれぞれの長さや矢羽の角度を変化させないようにしている。

図 27(a)(b)(c) では、それぞれ $h = 1, 3, 5$ である。なお、 $\delta_x = \delta_y = 0.005$ である。これらの図形からは、線幅が広がると、点列 e_1O と点列 Oe_2 に関する錯視現象が低減しているように見える。

図 28 に $F_P = 0.4$ の等高線を示す。この等高線から得られる錯視量は $R_{III} = 1.103, 1.096, 1.097$ である。図 11 の錯視量は $R_{III} = 1.161$ であることを考慮すると、図形の線幅が広いほど、錯視量が低下することになる。この結果は、知覚される錯視現象に類似している。

5.4 本手法の適応分野

(1) 図形寸法とパラメータの単位の関係

図形を液晶モニタ (MITSUBISHI : RDT1565) 上に表示した場合、 $\delta_x = 0.005$ に相当したドット間隔が約 0.75mm 、あるいは、2 倍に拡大して約 1.5mm となる図形を表示したとすると、ドット間隔が約 1.5mm の場合には、

各ドットを鮮明に識別でき、また、ドット間隔が約 0.75mm の場合には、一部のドットの識別は不鮮明となるが、いずれの場合も、モニタから 1m 離れて図形を観測すると、錯視現象が知覚される。

表示された点列の個数が、例えば、ドット間隔が 0.75mm であれば、 $\xi = 150\text{mm}$ であり、 $n_x = 40$ の場合、点列は約 30mm 長さの線分を表し、この点列の誘導場は、 $-0.3 \leq x, y \leq 0.3$ の範囲、すなわち、 $-45\text{mm} \leq x\xi, y\xi \leq 45\text{mm}$ の範囲で得られたことになる。このときに、飽和定数 c_2 の実数 $c_2\xi$ は 0.3mm となる。

ドットの代わりに、例えば、 50cm 間隔で、40 個 ($n_x = 40$) の構造体が地上に設置され、構造体がドットとみなされる距離だけ離れて、空中から構造体群を観測した場合、構造体によって生じる錯視現象は、 $-0.3 \leq x, y \leq 0.3$ ($\Delta = 10^{-3}$) の範囲、すなわち、 $-30\text{m} \leq x\xi, y\xi \leq 30\text{m}$ の範囲で生じる誘導場を計算しなくても、ここで得られた結果によって説明できることになる。

(2) 事故対策

工事現場などで、見誤りによって予想外の事故が発生する場合がある。このような事態を避ける一手法として次の方法が考えられる。まず、カメラなどで現場の状態を白黒映像として記録する。つぎに、この画像の画素を δ_x および δ_y の間隔で並んだ画像とみなして、式 (3) を用いて、誘導場および等高線を計算し、錯視量を計算する。この結果に基づき、現場に潜む錯視現象による見誤りそうな個所を抽出することができ、現場に立ち入る人に、事前に、注意を喚起することができる。

(3) 設計

例えば、ブント・フィック図形のような構造体の設計において、縦の構造体を横の構造体よりも短くして、安定感を表現する必要がある場合、本手法を用いて、錯視によって生じる現象の程度を、事前に推定し、安定感のある構造体の設計が可能となるであろう。

(4) 群化

図 2 の点の配列を見た場合、「点列が横に並んでいる」と表現してしまう。これが最も簡単な群化現象²⁾である。この群化現象は、一定の強さの誘導場の分布、すなわち、等高線を用いて、次のように可視化できる。例えば、図 2 の図形について得られる $F(P) = 0.55$ における等高線を図 29(a),(b) に示す。

図 29(a) は $\delta_x = 0.01, \delta_y = 0.005$ の配置に対して、 $c = 0.003$ の条件で、図 29(b) は $\delta_x = \delta_y = 0.005$ の配置に対

図 29 $F(P) = 0.55$ における等高線
Contour line in $F(p)=0.55$

して, $c = 0.002$ の条件で得られる. このように, 飽和定数 c と場の強さ $F(P)$ を調整することにより, 群化現象を可視化することができる.

6. ま と め

従来, 錯視図形が単純な形状であっても, 誘導場の計算が煩雑であり, また, 線幅のある図形における錯視現象を定量的に説明する手法が明らかでなかった. そこで本論文では, このような課題を解決するために, 任意の形状の図形の錯視現象を定量的に推定できるような手法を提案した. すなわち, まず, 複数の点を配置することによって, 図形の形状を近似し, これらの点の周りに生じる誘導場を合成することによって, 図形の周りに生じる誘導場を代用する. この誘導場から得られる等高線から錯視量を計算し, この値から, 現実に知覚される錯視現象が定量的に推定することができる. また, 錯視現象を抑制した図形の錯視量から, 錯視現象が抑制されていることを定量的に確認することができる. さらに, 複数の点を配列して表現された線幅と錯視現象の関係を, 錯視量を用いて, 定量的に把握することができる.

本手法では, 調整量を整数値でしか変化させることができないが, このような手法でも, 錯視量の推定が可能となった. より細かく調整量を変化させることによって, 錯視現象が抑制される範囲を調べるには, 処理時間が長くなることを許容するならば, 錯視図形を構成する点の間隔を狭くし, 点数を増加させればよい.

今後, ここで用いた錯視図形を含めた多くの錯視図形¹⁾に対して, より多くの被験者による実験を実施することにより, 本手法の適用限界を明らかにする必要がある.

〔文 献〕

- 1) 今井省吾著, “錯視図形”, サイエンス社 (1984).
- 2) 森田龍弥, 藤井克彦, “生体のパターン認識における Lateral inhibition の機能”, 電学誌, **49**, 10, pp.1857-1868(1966).
- 3) 藤井克彦, 松岡章, 森田龍弥, “Lateral Inhibition による錯視現象の解析”, 医用電子と生体工学, **5**, 2, pp.25-34(1967).
- 4) 石寺永記, 荒井祐之, 土屋雅彦, 宮内裕子, 高橋信一, 栗田正一, “主観的輪郭の形状に関する視覚情報処理モデル”, 信学論, **J76-D-II**, 4, pp.873-880(1993).
- 5) 横瀬善正, “図形認識と機械的読み取り”, 人間工学, **2**, 3, pp.10-16(1966).
- 6) 横瀬善正, “視知覚と場”, 現代数学, **3**, 4, pp.16-22(1970).
- 7) 長石道博, “視覚の誘導場モデルを用いたパターン認識時の心理実験結果の検証”, テレビ誌, **50**, 12, pp.1965-1973(1996).
- 8) 赤川奈緒, 工藤博章, 長石道博, 大西昇 “図形の線幅が視覚の誘導場に及ぼす効果”, 映情学誌, **57**, 11, pp.1551-1558(2003).
- 9) 深水義之, 長石道博 “視覚の誘導場の最新研究動向とその応用”, 映情学誌, **57**, 12, pp.1646-1651(2003).

東 恒人 1972 年, 大阪大学大学院修士課程修了. 同年, 日本電信電話公社 (現 NTT) 入社, 茨城電気通信研究所勤務. 1990 年, 岡山理科大学工学部教授. 生体計測法, 形状解析法, 画像や図形の自動生成法, 生体現象および自然現象のモデル化に関する研究に従事. 工学博士. 正会員.

島田 恭宏 1986 年, 岡山理科大学理学部電子理学科卒業. 1991 年, 同大学院博士課程修了. 同年, 同助手. 1997 年, 同講師. 現在に至る. パターン認識, 画像処理, HCI 等の研究に従事. 理学博士. 正会員.

前田 征大 2001 年, 岡山理科大学工学部情報工学科卒業. 現在, 株式会社ユニバーサルコンツェルン, 大阪支店 e ビジネス推進部にて, e ビジネス関連の業務に従事.