輪郭線間に生じる幾何学的錯視量の定量化†

平井 豊 祥*・北山 正文**

高木 敬 雄***・森保 洋 之**

Formulation and Measurement of the Geometrical Optical Illusion Magnitude in Relation to the
Effect of the Surround Lines Upon the Viewed Test-Line†

Toyonaka HIRAI*, Yoshifumi KITAYAMA**,
Takao TAKAGI*** and Hiroshi MORIYASU**

Recently, the speed of image processing has been increased owing to the outstanding advance in CPU capability and various techniques in image measurement have been proposed. In most of these techniques, size and absolute coordinate of any object are obtained from the image taken by CCD camera with the resolution into account. As human being recognizes the object in the scene through experience and background, its size and coordinate do not necessarily coincide with those acquired through traditional image algorithms. Accordingly, in measuring the perceptual characteristic of esthetic phenomena from the image and perceptibly recognizing the scene, it is needed not to evaluate qualitatively but to formulate it so as to be able to use as an application. We then aimed at illusion figure well known in experimental psychology, formulated the illusion magnitude of the figure, and applied to test-line information of real image. As a result, we could get a fairly good result.

Key Words: geometrical optical illusion, human sight function, minimum square method, partial regression coefficient

1. 序 論

近年 CPU 能力の飛躍的な向上により、画像処理の速度も向上し画像計測におけるさまざまな手法が提案されてきた。それらの大半は、任意のターゲットをカメラで撮影した画像に対して、分解能などを考慮し、絶対的な座標や、大きさを取得するものである。しかし、われわれ人間が観察している風景は、周囲の状況から経験的に、座標や、大きさを認識するため、従来の画像処理アルゴリズムから得られる座標や、大きさと、人間が知覚する座標や、大きさは必ずしも一致しない。

したがって、空間を視覚的に把握するための計測を行う場合や^{1), 2)}、画像から受ける美的現象などの知覚特性を計測する場合などは³⁾、従来の画像処理から得られる絶対的な座標や、大きさのみでの実現は困難である。

また、従来の錯視に関する研究は、人間が知覚する座標や、大きさの傾向を知るまでにとどまっており、数式などで定量的に表現し、あらかじめ CAD などを用いるテンプレートに組み込み、設計段階で空間の視覚的把握を実現しているなどの例は少ない^{4)~6)}。

そこでわれわれは、実験心理学において、過大視、過小視の統計的有意性が証明されている錯視図形に着目し、これら図形の錯視量を定量的に表現し、実画像や、CAD などを用いるテンプレートに適用することで、人間が知覚する座標や、大きさを計測しようと試みた。

本報は、その第一歩として、パラメータ化した錯視図形^{9), 10)}をパソコンのディスプレイに表示し、ディスプレイ上の図形を、被験者の目で同じになるように調節させる実験を行い、実際の値との比較結果から錯視量を求めた。そして、それらのデータをもとに、幾何学的錯視量を数式化し、実画像の誘導線分に対して適用した結果、ある程度納得の行く結果が得られたので、本論文にまとめることにした。

2. 錯視図形の各パラメータと測定法¹¹⁾

今回研究対象とした錯視図形と、各図形を数式化するために用いた各パラメータを、Fig. 1~Fig. 6 に示す。ただし、角度はすべて左回りを正とする。

† 第 38 回 SICE 学術講演会で発表 (1999・7)

* (株) アブコット 広島市中区鞆町 14-14

** 広島工業大学 広島市佐伯区三宅 2-1-1

*** 広島修道大学 広島市安佐南区沼田町大塚 1717

* APCOT, Hiroshima

** Hiroshima Institute of Technology, Hiroshima

*** Hiroshima Shudo University, Hiroshima

(Received December 5, 2000)

(Revised April 16, 2001)

Table 1 Parameters on Illusion Figures

Fig.1		Fig.2		Fig.3		Fig.4		Fig.5		Fig.6	
d	1	d_t	3	d_t	2	d	3	d	3	d	1
d_{ai}		l	1	h	2	d_{lr}	3	l_t	1	l_t	1
r_{ai}/r_t	5	l_{ai}	3	d_d	3	l_t	3	l_{lt}	4	d_{ai}	6
θ_{ai}	6	θ_{ai}	6	l	1	θ_e	6	θ_e	6	θ_{ai}	6
						θ_l, θ_r	6	θ_t	6	l_{ai}	2
Condition				Min.		Max.		Step		Unit	
1				0		500		25		dot	
2				0		300		10		dot	
3				0		100		10		dot	
4				0.0		1.0		0.1		-	
5				0.5		6.0		0.5		-	
6				0		180		10		deg	

錯視量の測定方法は、まず、パラメータを **Table 1** に示すような条件で変化させた錯視図形を、パソコンのディスプレイにランダムな順序で表示し、被験者に 1[m] 離れた場所から観察させ、以下に示すような調整法によって、主観的等価点を求めさせる。そして、あらかじめ準備しておいたプログラムで錯視量 E を算出する。このとき、各図形の錯視量 E はそれぞれつぎに示すように定義する。

Fig. 1 の Ebbinghaus illusion 図形については、左右の中心にある円の大きさ r_t と r_e が同じ大きさに見えるように r_e を調整させた。錯視量 E は、 $E = r_e/r_t$ とする。

Fig. 2 の Zöllner illusion 図形については、縦に並んでいる 2 直線の上下の幅 d_t と d_e が同じ幅に見えるように d_e を調整させた。錯視量 E は、 $E = d_e/d_t$ とする。

Fig. 3 の Wundt illusion 図形については、横に並んでいる 2 直線の端と中心の幅 d_t と d_e が同じ幅に見えるように d_e を調整させた。錯視量 E は、 $E = d_e/d_t$ とする。

Fig. 4 の Ponzo illusion 図形については、傘の下にある 2 直線の長さ l_t と l_e が同じ長さに見えるように l_e を調整させた。錯視量 E は、 $E = l_e/l_t$ とする。

Fig. 5 の Wundt-Fick illusion 図形については、T 字になっている 2 直線の長さ l_t と l_e が同じ長さに見えるように l_e を調整させた。錯視量 E は、 $E = l_e/l_t$ とする。

Fig. 6 の Müller-Lyer illusion 図形については、横に並んでいる 2 直線の長さ l_t と l_e が同じ長さに見えるように l_e を調整させた。錯視量 E は、 $E = l_e/l_t$ とする。

3. 錯視現象の定量化

測定結果の数式化は、まず各図形において一つのパラメータだけを変化させた場合の錯視量のみを考え、その錯視量の傾向をあらかじめ準備しておいた (1) 式から (8) 式に示すような 7 種の数式すべてにおいて、いずれか 1 種、または、2 種の和 (ただし定数項が 2 項存在するので、片方の値を 0 とする) で最小自乗法による近似を試み、相関係数が最大になる数式を採用する。

Fig. 1 Ebbinghaus illusion

Fig. 2 Zöllner illusion

Fig. 3 Wundt illusion

Fig. 4 Ponzo illusion

Fig. 5 Wundt-Fick illusion

Fig. 6 Müller-Lyer illusion

Fig. 7 Illusion Magnitude in Ebbinghaus Illusion

However, default values are $r_t=50[\text{dot}]$, $d=4r_t$, $r_{ai}=2r_t$, $d_{ai}=1.5r_t$, and $\theta=0[^\circ]$

$$f_1(x) = \frac{\alpha_1}{1 + \exp(-(x - \alpha_2)/\alpha_3)} + \alpha_4 \quad (1)$$

$$f_2(x) = \alpha_1 \exp(-(x - \alpha_2)^2/\alpha_3) + \alpha_4 \quad (2)$$

$$f_3(x) = \alpha_1 \left[1 - \frac{1}{1 + \exp(-(x - \alpha_2)/\alpha_3)} \right] + \alpha_4 \quad (3)$$

$$f_4(x) = \alpha_1 \sin(\alpha_2 x) + \alpha_3 \quad (4)$$

$$f_5(x) = \alpha_1 |\sin(\alpha_2 x)| + \alpha_3 \quad (5)$$

$$f_6(x) = \alpha_1 \cos(\alpha_2 x) + \alpha_3 \quad (6)$$

$$f_7(x) = \alpha_1 |\cos(\alpha_2 x)| + \alpha_3 \quad (7)$$

$$f_8(x) = \alpha_1 \quad (8)$$

その後、他のパラメータについても同様に作業を行い、全体の錯視量を、それぞれのパラメータがもたらす作用が独立していると仮定し、各パラメータ関数の定数倍の和で表現する。たとえば、Fig. 1 に示される Ebbinghaus illusion 図形の場合は、まず、 d 以外の値はすべてある値で一定のものを測定結果の中より選択し、 d が変化した場合のみの錯視量を数式化する。Fig. 7(a) は、具体的に $r_t = 50[\text{dot}]$ (ただし $1[\text{dot}] = 0.317[\text{mm}]$)、 $r_{ai} = 2r_t$ 、 $d_{ai} = 1.5r_t$ 、 $\theta = 0[^\circ]$ のように各値を一定とし、 d のみが変化した場合の錯視量をグラフにしたものである。同様に Fig. 7(b)~(d) に示すように、各パラメータ d_{ai} 、 r_{ai} 、 θ_{ai} についても数式化し、これらの関数の定数倍の和で表現することにより、全体の錯視量 (Illusion Magnitude) を数式化する。

4. 実験データの解析結果

今回の被験者は、工学部の計測システムに興味を持つ学生 20 名であった^{1), 2)}。第 2 章で示した測定方法で得られた実験結果を、第 3 章に錯視現象の定量化として示した方法で解

析し、(9) 式から (14) 式に示すような数式で近似的に表現した。ただし、(8) 式は定数であり、最終的に定数項になるため、(8) 式に乗算される偏回帰係数 β は 0 として扱う。なお、錯視量は個人差があるものの、最尤推定では小標本でよい推定量になりにくいということを懸念し、各測定データの平均値を用いて算出した。

Fig. 1 の Ebbinghaus illusion 図形の場合、

$$E = \beta_1 f_1(d) + \frac{1 - \exp(-N)}{N} \left[\beta_2 \sum_{i=1}^N f_2(d_{ai}) + \beta_3 \sum_{i=1}^N f_1(r_{ati}) + \beta_4 \sum_{i=1}^N f_6(\theta_{ai}) \right] + \beta_5 \quad (9)$$

ただし、

N : 付加線分の数, $r_{ati} = r_{ai}/r_t$

Fig. 2 の Zöllner illusion 図形の場合、

$$E = \beta_1 f_2(d_t) + \beta_2 f_8(l) + \frac{1 - \exp(-N)}{N} \left[\beta_3 \sum_{i=1}^N f_1(l_{ai}) + \beta_4 \sum_{i=1}^N (f_2(\theta_{ai}) + f_2(\theta_{ai})) \right] + \beta_5 \quad (10)$$

ただし、

N : 付加線分の数

Fig. 3 の Wundt illusion 図形の場合、

$$E = \beta_1 (f_2(d_t) + f_1(d_t)) + \beta_2 f_2(h) + \beta_3 f_2(d_d) + \beta_4 (f_2(l) + f_1(l)) + \beta_5 \quad (11)$$

Fig. 4 の Ponzo illusion 図形の場合、

$$E = \beta_1 f_1(d) + \beta_2 f_3(d_{lr}) + \beta_3 f_3(l_t) + \beta_4 f_7(\theta_e) + \beta_5 f_4(\theta_{lr}) + \beta_6 \quad (12)$$

ただし、

$$d_{lr} = (d_l + d_r)/2, \quad \theta_{lr} = -\theta_l + \theta_r$$

Fig. 5 の Wundt-Fick illusion 図形の場合、

$$E = \beta_1 f_1(d) + \beta_2 f_8(l_t) + \beta_3 f_1(l_{lt}) + \beta_4 f_5(\theta_e) + \beta_5 f_7(\theta_t) + \beta_6 \quad (13)$$

ただし、

$$l_{lt} = l_l/l_t$$

Fig. 6 の Müller-Lyer illusion 図形の場合、

$$E = \beta_1 (f_2(d) + f_1(d)) + \beta_2 f_3(l_t) + \frac{1 - \exp(-N)}{N} \left[\beta_3 \sum_{i=1}^N f_2(d_{ai}) + \beta_4 \sum_{i=1}^N f_4(\theta_{ai}) + \beta_5 \sum_{i=1}^N (f_2(d) + f_1(d)) \right] + \beta_6 \quad (14)$$

ただし、

N : 付加線分の数

Table 2 Various coefficients of Ebbinghaus illusion

	$f_1(d)$	$f_2(d_{ai})$	$f_1(r_{ati})$	$f_6(\theta_{ai})$	
α_1	1.4631E-01	2.4485E-01	2.1065E+00	-1.7950E-02	
α_2	1.1866E+02	-1.7257E+01	-2.1296E+00	4.0000E+00	
α_3	3.9506E+01	5.8417E+04	1.5510E+00	1.1546E+00	
α_4	1.0000E+00	1.0000E+00	-8.536E-01		
β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	R
1.0630	0.5391	1.0146	1.1877	-3.2049	0.9541

Table 3 Various coefficients of Zöllner illusion

	$f_2(d_t)$	$f_8(l)$	$f_1(l_{ai})$	$f_2(\theta_{ai})$	$f_2'(\theta_{ai})$
α_1	1.1817E-02	1.0095E+00	2.2342E+00	2.5170E-02	2.5170E-02
α_2	2.5096E+01		-8.1385E+02	5.7939E+01	1.2206E+02
α_3	3.5453E+00		1.4028E+05	2.0338E+02	2.0337E+02
α_4	1.0000E+00		1.0000E+00	1.0000E+00	0.0000E+00
β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	R
0.9125	0.0000	0.9342	0.9851	-1.8278	0.9851

Table 4 Various coefficients of Wundt illusion

	$f_2(d_t)$	$f_1(d_t)$	$f_2(h)$	$f_2(d_d)$	$f_2(l)$	$f_1(l)$
α_1	1.3448E-01	4.5875E-01	6.7452E-01	1.2127E-01	2.4331E-01	1.1019E-01
α_2	1.5387E+01	-4.8025E+00	-7.4337E+01	3.5715E+01	9.7441E+01	8.5031E+01
α_3	1.4975E+02	3.1257E+00	1.1059E+04	1.3605E+03	3.4752E+03	3.5110E+01
α_4	5.9482E-01	0.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	0.0000E+00
β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	R	
1.0183	0.8278	0.9670	1.0841	-3.1528	0.9653	

Table 5 Various coefficients of Ponzo illusion

	$f_1(d)$	$f_3(d_{lr})$	$f_3(l_t)$	$f_7(\theta_e)$	$f_4(\theta_{lr})$	
α_1	1.1215E-01	2.1463E+00	8.3089E+00	1.3903E-01	7.2435E-02	
α_2	1.1597E+02	-4.4208E+01	-1.0897E+03	1.0000E+00	1.0000E+00	
α_3	4.0066E+01	1.0525E+01	2.0359E+02	8.8951E-01	1.0000E+00	
α_4	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00			
β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6	R
0.9762	0.8667	0.7416	0.9120	0.6019	-3.1653	0.9903

Table 6 Various coefficients of Wundt-Fick illusion

	$f_1(d)$	$f_8(l_t)$	$f_1(l_{lt})$	$f_5(\theta_e)$	$f_7(\theta_t)$	
α_1	3.8249E-02	8.8351E-01	-9.4001E-02	9.9767E-02	-1.7564E-02	
α_2	2.6962E+01		5.1741E-01	1.0000E+00	2.0000E+00	
α_3	1.6122E+02		8.5109E-02	1.0000E+00	9.0830E-01	
α_4	8.8389E-01		1.0000E+00			
β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6	R
0.7051	0.0000	1.2156	1.0864	0.9403	-2.8202	0.9608

Table 7 Various coefficients of Müller-Lyer illusion

	$f_2(d)$	$f_1(d)$	$f_3(l_t)$	$f_2(d_{ai})$	$f_4(\theta_{ai})$	$f_2(l_{ai})$	$f_1(l_{ai})$
α_1	2.2738E-02	1.4377E-02	3.0932E-02	1.4164E-01	2.0306E-02	1.3915E-02	2.9314E-01
α_2	2.5092E+02	9.7979E+01	1.1233E+02	-5.1690E+01	1.0000E+00	4.4488E+01	-9.0011E+02
α_3	1.4572E+04	1.3836E+02	1.7537E+01	1.5196E+03		8.1936E+02	2.9589E+01
α_4	9.9606E-01	0.0000E+00	1.0210E+00	1.0000E+00		7.1876E-01	0.0000E+00
β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6	R	
0.4869	1.1265	0.7247	0.8748	0.7725	-3.0469	0.9547

Photo. 1 Original image

解析の結果、偏回帰係数 α_j , β_k , および、各測定データの平均値との相関係数 R はそれぞれ Table 2~Table 7 に示すようになった。以上の結果より、(9) 式から (14) 式に示すなどの近似式においても、相関係数が 0.95 以上の高い相関を持っていることから、複数のパラメータ間にわたる相互作用は小さく、この相互作用を無視し、パラメータそれぞれがもたらす作用を独立して近似できていると考えられる。

5. 実画像への適用と検証

実画像への適用は、まず、Photo. 1 に示す画像に対して、輪郭抽出を行い¹²⁾、主観的な仮想ラインを生成したのち¹³⁾、直線近似ができる輪郭情報を誘導線分情報として取得する。そして、今回数式化した錯視図形のうち、Fig. 4~Fig. 6 の各パラメータを自由に変更できるテンプレートを準備し、取得した誘導線分情報に、手動で重ね合わせることにより、(12)~(14) 式の各パラメータと対応させ、錯視量を算出した。その結果を Fig. 8~Fig. 10 に示す。なお、図中の数値は、錯視量 E の定義から明らかなように、1 より大きければ過大視、小さければ過小視になることを意味する。また、第 2 章で示した測定方法と同じ条件で Photo. 1 に示す画像を教示し、その画像の 10[mm] 下に、指定した輪郭(直線近似ができる輪郭)が同じ長さに見えるような水平線を描かせる実験を行い、錯視量 E を求めた結果を Fig. 11 に示す。Fig. 8 については、屋根下の窓部分が、Fig. 9 については、1 階の窓部分が、Fig. 10 については、屋根部分が、Fig. 11 の結果とそれぞれ類似した傾向を示していることがわかる。

6. 結 論

第 4 章までに示したように、それぞれの図形の錯視量を、各パラメータ関数の定数倍の和で表現することにより、おのおのの錯視図形における人間の錯視の傾向を 0.95 以上の高い相関を持つ数式で近似することができた。さらに、Photo. 1 に示した事例のように、実画像における誘導線分情報のパラメータと、錯視を引き起こす要因として考えられる錯視図形のパラメータを対応させることにより、特定の錯視現象を考慮した、任意の画像における人間が知覚する座標や、大きさの計測が可能であることがわかった。

Fig. 8 Calculation result with Ponzo Illusion

Fig. 9 Calculation result with Wundt-Fick Illusion

Fig. 10 Calculation result with Müller-Lyer Illusion

Fig. 11 Result by recognition of man

今後は、それぞれの数式により算出された錯視量 E_i を

$$E = \sum_{i=1}^N \gamma_i f(E_i, R_i) \quad (15)$$

ただし

N : 適用する錯視図形の種類数

R_i : パラメータ変更後のテンプレートの、
オリジナルテンプレートに対する形状相関値¹⁵⁾

γ_i : 偏回帰係数

のように統合し、多種の錯視現象を考慮した、任意の画像から人間が知覚する座標や、大きさを計測する手法を構築する予定である。本論文を書き終えるにあたり、実験被験者を引き受けてくださいました広島工業大学学生諸氏に心より謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 森保 洋之: 広島基町高層住棟型ファサードモデル形態の視知覚的把握の特性について～住宅集合形態の視知覚的把握に関する建築計画的研究 その1～, 日本建築学会計画系論文報告集 第410号, 53/63 (1990)
- 2) 森保 洋之: 広島基町高層住棟型ファサードモデル形態の視知覚的把握の被験者別特性について～住宅集合形態の視知覚的把握に関する建築計画的研究 その2～, 日本建築学会計画系論文報告集 第425号, 55/65 (1988)
- 3) 野口, I.Rentschler: 幾何学的錯視と美的判断の比較, 千葉大学工学部研究報告 第98号 (1998)
- 4) M.J.Morgan, G.J.Hole and A.Glennerster: Biases and Sensitivities in Geometrical Illusions, Vision Res. 30-11, 1793/1810 (1990)
- 5) P.Wenderoth and S.Johnstone: The Different Mechanisms of the Direct and Indirect Tilt Illusions, Vision Res. 28-2, 301/312 (1988)
- 6) J.E.Calvert and J.P.Harris: Spatial Frequency and Duration Effects on the Tilt Illusion and Orientation Acuity, Vision Res. 28-9, 1051/1059 (1988)
- 7) 北山, 高木, 中島: 色配列を考慮した1/f揺らぎ解析システムの基礎的研究, 計測自動制御学会論文集, 34-3, 270/274 (1998)
- 8) 田崎, 大山: 視覚情報処理, 朝倉書店, 217/333 (1979)
- 9) 村上, 奥水, 中山, 福村: 似顔絵評価のための錯視現象の適用と錯視評価式の検討, 電子情報通信学会, 信学技法 PRU93-10, 41/48 (1993)
- 10) 藤沢, 関, 杉江, 杉原: 図形変換規則を用いた錯視現象のモデル化, 電子情報通信学会 信学技法, PRU86-67, 41/48 (1993)
- 11) 高木, 神田: 主観的輪郭線の錯視効果, 広島修大論集, 29-1, 1/26 (1988)
- 12) 北山, 橋本, 若宮: 複数パーツから構成される物体の認識システムに関する基礎的研究 任意の点からの輪郭追跡による領域抽出法について, 第36回計測自動制御自動学会学術講演会予稿集, 557/558 (1997)
- 13) 北山, 平井, 越智: アモータル補完に相当する仮想ライン形成のための一手法, 第38回計測自動制御自動学会学術講演会予稿集, 319/320 (1999)
- 14) 北山, 高木, 平井: 輪郭線間に生じる幾何学的錯視量の定量化, 第38回計測自動制御自動学会学術講演会 予稿集, 397/398 (1999)
- 15) 北山, 藤井: デジタル曲線認識法の複数パーツからなる物体の形状認識への適応, 第37回計測自動制御自動学会学術講演会予稿集, 185/186 (1998)

[著 者 紹 介]

平 井 豊 祥 (正会員)

2000年, 広島工業大学大学院工学研究科博士前期課程電子工学専攻修了。同年(株)アプロットに入社, 現在に至る。

北 山 正 文 (正会員)

1967年, 東北大学大学院工学研究科修了。同年広島工業大学に着任。気液二相流中の気液状態計測法などの研究に従事。工学博士(東京大学)。各種実システム, 弱電解液微流速流向測定法, 微粉体粒度計測法, 独立型二足歩行ロボットの開発研究に従事。現在, 工学部電子工学科教授。日本原子力学会, 日本ロボット学会, 情報処理学会などの会員。

高 木 敬 雄

1962年, 広島大学大学院教育学研究科後期博士課程(実験心理学専攻)退学。75年, 広島修道大学人文学部心理学教授に着任。幾何学的錯視, 色彩知覚, 主観的輪郭, ゲシュタルト心理学・図地体制化など視知覚の研究に従事。日本心理学会, 日本人間工学会, 日本教育心理学会, 日本広告学会などの会員。

森 保 洋 之

1968年, 千葉工業大学工学部建築学科卒業。81年, 広島工業大学に着任。生活空間の領域性, 住宅の集合形態, 住宅等の室内空間の視知覚的把握, 教育施設の計画などの研究に従事。工学博士(東京工業大学)。現在, 環境学部環境デザイン学科教授。日本建築学会, 日本都市計画学会, 日本インテリア学会, 都市住宅学会などの会員。