

空間周波数によるパターンの認知限界の解析

6D-5

小林 富士男 坪井 始 田中 始男 美咲 隆吉 富田 将英
福山大学 工学部

1. まえがき

指標パターンの波形解析を行い、そのパターンの細部視認距離を算出する方法として、視角法、MTF法、等価帯域法、帯域制限比較法などを比較、検討する。

2. 指標パターン

図1は指標パターンで、(a)は線幅Wと線間隔Sが等しく、これらのパターンを均等バー・パターンと呼ぶ。これに対して、同図(b)はW≠Sパターンの例で、これらを不均等バー・パターンと呼ぶ。WとSの関係を示すパラメータとして同図の(a)では、 $k = S/W$ 、(b)では $k_1 = S_1/W$ 、 $k_2 = S_2/W$ を用いる。

3. 指標パターンの波形解析

1次元の指標パターンは座標xの関数としてその輝度分布f(x)が表されるが、そのフーリエ変換ならびに逆変換はそれぞれ式(1)、(2)によって表される。

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \text{EXP}(-j\omega x) dx \quad (1)$$

$$f(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) \text{EXP}(j\omega x) d\omega \quad (2)$$

ここで、xおよびωはそれぞれ指標面上での距離(mm)、および空間角周波数(rad/mm)を表す。x軸と垂直に原点に置かれた幅Wの細長い1本のバー・パターンのフーリエ変換は式(1)から次式となる。

$$F(\omega) = \frac{2}{\omega} \sin \omega \frac{W}{2} \quad (N=1) \quad (3)$$

以下、同様にしてN本の均等バー・パターンに対するフーリエ変換式は、次のようになる。

$$F(\omega) = \frac{4}{\omega} \left(\sin \omega \frac{W}{2} \right) (\cos \omega W) \quad (N=2) \quad (4)$$

$$F(\omega) = \frac{2}{\omega} \left(\sin \omega \frac{W}{2} \right) (1 + 2 \cos 2\omega W) \quad (N=3) \quad (5)$$

$$F(\omega) = \frac{4}{\omega} \left(\sin \omega \frac{W}{2} \right) (\cos \omega W + \cos 3\omega W) \quad (N=4) \quad (6)$$

$$F(\omega) = \frac{2}{\omega} \left(\sin \omega \frac{W}{2} \right) (1 + 2 \cos 2\omega W + 2 \cos 4\omega W) \quad (N=5) \quad (7)$$

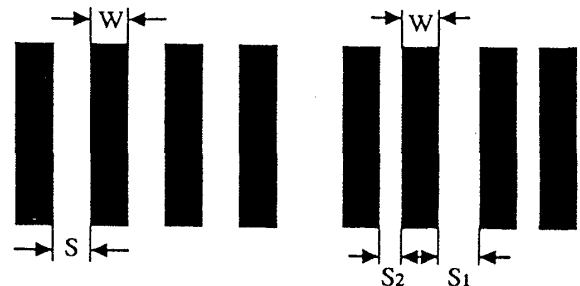
$$F(\omega) = \frac{4}{\omega} \left(\sin \omega \frac{W}{2} \right) (\cos \omega W + \cos 3\omega W + \cos 5\omega W) \quad (N=6) \quad (8)$$

また、2本の不均等バー・パターンのフーリエ変換は

$$F(\omega) = \frac{4}{\omega} \left(\sin \omega \frac{W}{2} \right) \left\{ \cos \omega \frac{W}{2} (1+k) \right\} \quad (9)$$

となり、図1(b)の場合には次式のようになる。

$$F(\omega) = \frac{4}{\omega} \left(\sin \omega \frac{W}{2} \right) \left\{ \cos \omega \frac{W}{2} (1+k_1) + \cos \omega \frac{W}{2} (3+k_1+2k_2) \right\} \quad (10)$$



(a) (b)

図1 指標パターン

The Analyses of Cognitive Limit for
Patterns Using Spatial Frequency
Fujio Kobayashi, Hajime Tsuboi, Motoo Tanaka,
Takayoshi Misaki, Masahide Tomita
Fukuyama University
1 Banchi, Gakuencho, Fukuyama, 729-02, Japan

以上は、指標面上のフーリエ変換式であるが、網膜上の輝度分布 $f(x')$ および、そのフーリエ変換 $F(\omega')$ は次のようになる。

人間の眼球の結節点から網膜までの距離を l 、指標から結節点までの距離を L とすると、

$$x' = \frac{l}{L} x \quad (11)$$

$$\omega' = \frac{L}{l} \omega \quad (12)$$

となる。 $l = 16 \sim 17$ (mm) であるから、 $L = 5$ (m) とすると、 $L/l \approx 300$ となり、網膜上での指標の空間周波数 ω' は指標面上での空間周波数 ω の約 300 倍となる。ところで、眼球は光学系として空間周波数特性 $H(\omega')$ をもっているから、与えられた指標 $f(x)$ を距離 L で観察したとき、網膜上に結像する分布 $g(x')$ は次式となる。

$$g(x') = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega') H(\omega') d\omega' \quad (13)$$

さらに、網膜から脳にいたる視覚系全体の空間周波数特性 (MTF) を $M(\omega')$ とすると、これを考慮した感覚の分布 $r(x')$ は、

$$r(x') = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega') M(\omega') d\omega' \quad (14)$$

で表すことができる。この $r(x')$ は感覚上の推定した分布であり、物理的に直接測定することはできない。しかし、人間が物を見てその細部を見分けられる能力を定量的に評価するために、 $r(x')$ 上での識別の基準を考えることにする。そこで、いま光学系の分解能の限界として用いられている Rayleigh limit を採用すると、 x' 軸上での 2 点 x'_0 と x'_1 とにおける r の値の比

$$\xi = \frac{r(x'_0)}{r(x'_1)} \quad (15)$$

が 2 点を識別できるか否かの閾値を与える。

4. 等価帯域角周波数

式 (2) において、積分限界の $\pm\infty$ を有限な角周波数 $\pm\omega_c$ で制限したときに得られる波形は次式で表される。ただし、網膜上での表現とする。

$$f'(x') = \frac{1}{2\pi} \int_{-\omega_c}^{\omega_c} F(\omega') \text{EXP}(j\omega'x') d\omega' \quad (16)$$

この式で ω_c の値を変えると、 $f'(x')$ は $f(x')$ より相当異なった波形となる。 f'

(x') の細部を識別し得る基準として、 x' の特定の値 x'_0 と x'_1 に対する $f'(x')$ の値の比を次式のように ξ' とする。

$$\xi' = \frac{f'(x'_0)}{f'(x'_1)} \quad (17)$$

すると、式 (16)、(17) から

$$\xi' = \frac{\int_{-\omega_c}^{\omega_c} F(\omega') \text{EXP}(j\omega'x'_0) d\omega'}{\int_{-\omega_c}^{\omega_c} F(\omega') \text{EXP}(j\omega'x'_1) d\omega'} \quad (18)$$

となる。 $F(\omega)$ および ξ' が与えられたとき、式 (18) を満足する ω_c を等価帯域角周波数とよぶ。

5. 指標パターンの細部視認距離

複雑な指標パターンが提示されたとき、その細部をはっきりと認め得る距離はパターンによって異なるが、その距離を細部視認距離 L とする。視覚実験で L を決定するためには、指標までの距離を変化させて、その細部が確認できる最大距離を L とする。一方、指標の L を理論的に算出する方法として、視角法、MTF法、等価帯域法、帯域制限比較法を採用する。ここで視角法とは指視の細部が眼に対して張る角度を被験者のランドルト環視力の視角に一致させる距離から L を算出するものであり、MTF法とは指標の $F(\omega)$ と被験者の $M(\omega)$ を式 (14)、(15) に代入して、それらを満足させる L を式 (12) から決定するものである。また、等価帯域法とは指標の $F(\omega)$ を式 (18) に代入して ω_c を求め、それをランドルト環視力の ω_c (視力 1 のとき約 2.53 rad/mm となる) と一致させる距離から L を算出するものであり、帯域制限比較法は指標の $F(\omega)$ を式 (16) によって計算するとき、 ω_c をパラメータとして $f'(x')$ の曲線を描き、その相互比較によって ω_c を決め、以後は等価帯域法と同様にして L を算出する。

6. むすび

指標パターンの細部視認距離を算出する理論を確立するため、パターンの波形解析と判別基準として Rayleigh limit を組み合わせた。パターンに対する視覚実験結果は、視角法では説明できないが、等価帯域法、帯域制限比較法によって、かなりよく推定できることが明らかとなった。