

視覚系の認知限界

小林富士男*・坪井 始*・田中 始男*・美咲 隆吉*・富田 将英*

Cognitive Limit of Visual System

Fujio KOBAYASHI, Hajime TUBOI, Motoo TANAKA,
Takayoshi MISAKI and Masahide TOMITA

ABSTRACT

When visual information is discussed, one of the most important elements is a visual acuity. Many researches concerning a visual acuity are reported. The Landolt ring is used as the typical index. The value of a visual acuity shows a variation according to the measurement condition. On the other hand, there are many researches about the spatial frequency response or MTF (Modulation Transfer Function) of eye. From the point of view whether the detail of the pattern can be identified, the MTF method is more general. However, a theoretical paper for a concrete pattern is not reported. It is necessary to establish a quantitative evaluation to identify an arbitrary pattern under the various conditions. In this paper, a cognitive limit of visual system is described from the theory and the experimental values. The pattern visible distance is derived from the wave-form analysis. It became clear that the experimental results which are made by visual angle method are presumed considerably well by the equivalent band-pass method. If the modulation transfer function is changed a little, a very big effect is exerted on the pattern visible distance.

キーワード：視覚，視力，情報量，認知，パターン

Keywords: sense of sight, visual acuity, amount of information, cognition, pattern

1. まえがき

視覚情報を論ずる場合の最も重要な要素の一つは人間の視力の問題である。視力に関する研究は多く報告されている^{(1)~(3)}。広義の視力には、(1)光覚閾、(2)2点分解能力、(3)形態の認知能に関する心理的要素、などが関係するが、(3)の条件をコントロールすることは困難であるから、これをなるべく一定にしておいて、2点分離能力を測る立場がとられている。その代表的なものとしてランドルト環指標が用いられる。2点分離の思想に基づいた視力を狭義の視力と考えることにするが、その場合にも測定条件によって視力の値が左右される。たとえば、静止視力と動体視力、中心視力と周辺視力の相違、さらに測定時の瞳孔の大きさ、照明の条件、図形のコントラスト、刺激提示の時間、眼の順応状態、眼の運動状態など視力に関与する要因は極めて多い。

一方、眼の空間周波数レスポンスあるいはMTF (Modulation Transfer Function) を測定して視覚の

* 情報処理工学科

問題を研究する方法が増えてきた。視野内の物の細部をどこまで識別できるかという点では、指標あるいは図形のパターンが複雑になれば、ランドルト環による視力よりもMTF法による方がより一般性があると考えられる。しかしながら、具体的なパターンに対して、ある視力の人がある距離でその細部を十分識別できるかという理論的報告は余り発表されていない。それは視力を左右する要因が多いためと考えられるが、今後の視覚情報の研究を進めるに当たって、任意の入力パターンの細部がある条件の下で、どこまで識別できるかという定量的評価を確立することが必要である。

本研究では、数種の棒縞パターンに対して、視角法、MTF法、等価帯域法、波形による考察などを理論値と視覚実験結果を対応させて報告する。

2. 指標パターン

一般の図形は2次元的な輝度分布をしているから、2次元的に複雑な分布に対する指標についての議論がより一般性をもつことは当然である。しかし、2次元分布に対する議論は一層複雑になることと、1次元分布の場合にも問題があるので、本報告では1次元的取り扱いのできる棒縞パターンにする。

ランドルト環による視力の定義は、図1に示すように環の切れ目がやっと識別できる角度(分)の逆数で表されるが、この指標では環の線幅(W)と切れ目の長さ(S)は等しくなるように描かれる。しかし、 $W \neq S$ なる環を用いると、その場合の視力は $W = S$ なるときの値と異なることが実験的に得られる。この場合、両環のSは共に等しいから、切れ目の大きさが等しいわけで、それにも拘らず視認限界の視角は異なってくることを意味する。しかし、 $W \neq S$ となる時、視力がどのように変化するかを示す理論は見あたらない。そこで、棒縞パターンの線幅と線間隔を変えたとき、また線の数を増したとき、その切れ目を識別できる距離Lを総合的に調べるために次のような指標を採用する。図2はいずれも線幅Wと線間隔Sが等しく、線の長さはWの約10倍であって、これらのパターンを均等バー・パターンと呼ぶ。また、図2の(a)、(b)、(c)は線の数Nをそれぞれ2、4、6とした場合である。これに対して、図3は $W \neq S$ パターンの例で、これらを不均等バー・パターンと呼ぶことにする。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。なお、Wの値は1.5mmまたは3mmとした。

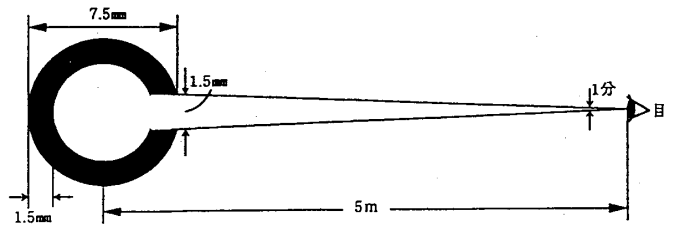


図1. ランドルト環による視力
(視力1.0状態)

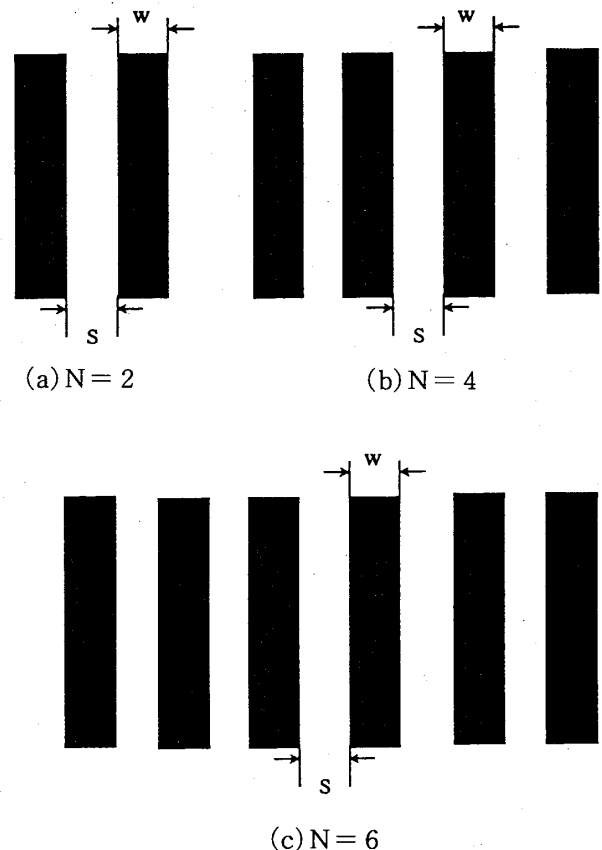
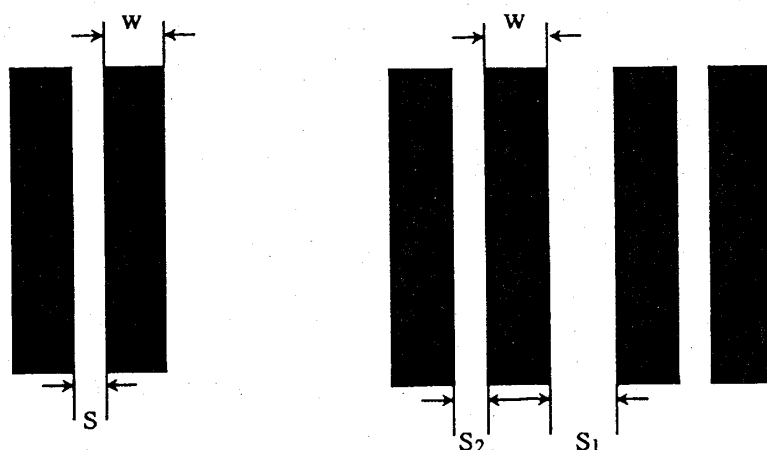


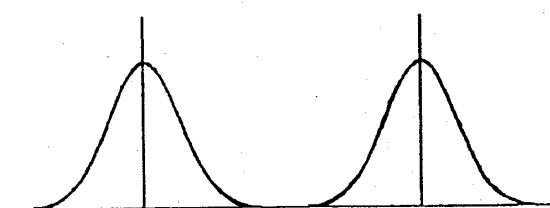
図2. 均等バー・パターン($W = S$)

(a) $N=2, K=S/W$ (b) $N=4, k_1=S_1/W, k_2=S_2/W$ 図3. 不均等バー・パターン($W \neq S$)

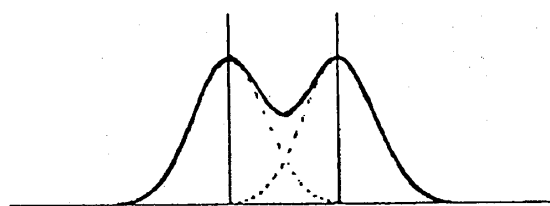
3. 識別理論

(1) 光学系の分解能

光学系の分解能は回折によって限界をもつが、その限界をきめる一つの基準としてRayleigh limit⁽⁴⁾がある。それは図4(a)に示すように離れている2線の像は明らかに分離して観測されるが、これらの2線が互いに接近すると、それらの像は次第に重なってきて遂には2線として分離できなくなる。そこで2線分離可能な限界をどこにするかが問題となるが、図4(b)に示すように中心の凹みの高さが両側の山の高さの0.75倍となったときとするのがRayleigh limitである。これは一つの合理的な基準である。



(a) 離れている2線の像



(b) 接近している2線の像

図4. 光学系の分解能

(2) 視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 はそれぞれ視標面上での距離(mm)、および空間角周波数(rad/mm)を表す。例として、図5(a)に示すような x 軸に垂直に置かれた幅 W の細長い1本のバー・パターンは、その分布 $f(x)$ を図5(b)に示すように仮定すると、そのフーリエ変換は式(1)から次式となる。

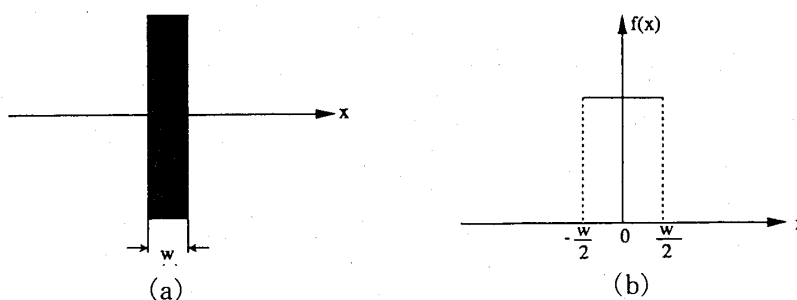


図5. 1本のバー・パターン

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

以下、同様にして図2に示すような均等バー・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、図3(a), (b)の不均等バー・パターンのフーリエ変換はそれぞれの図に示したパラメータを用いると次のようになる。

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

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

以上は、視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 l は、16~17(mm)とされている。一方、視標から結節点までの距離を L とすると、

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

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

となるから、これを用いて $f(x')$ および $F(\omega')$ を計算することができる。 $L=5$ (m) とすると、 $L/l \doteq 300$ となり、網膜上での視標の空間周波数 ω' は視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、与えられた視標 $f(x)$ 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。そこで、いま上述の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 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。

(3) 視覚系の空間周波数

視覚の空間周波数特性は、輝度分布が正弦波状に変化する線状パターンを用いて測定される。すなわち、図6に示すように、空間周波数 u の正弦波輝度分布のパターンを観測し、輝度の振幅を変化させて、ちょうど明暗が識別できなくなるときの輝度振幅 ΔB を求め、そのときの平均輝度 B_M を ΔB で割った値をもって u に対する視覚系の空間周波数特性 $M(u)$ とすれば、

$$M(u) = \frac{B_M}{\Delta B} \quad (16)$$

となる。

u の単位は、単位視角当りの線数(lines/min, arc)、視標上での単位距離当りの線数(lines/mm)、または網膜上の単位距離当りの線数などが用いられる。今までに報告されているMTFの比較によると⁽²⁾、それぞれの特性には或程度の相違がある。本研究の計算では、図7に示すCraneのMTF⁽⁵⁾を採用する。

(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。

$$f'(x') = \frac{1}{2\pi} \int_{-\omega_c}^{\omega_c} F(\omega') \text{EXP}(j\omega' x') d\omega' \quad (17)$$

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。

$$\xi' = \frac{f'(x'_0)}{f'(x'_1)} \quad (18)$$

すると、式(17)、(18)から

$$\xi' = \frac{\int_{-\omega_c}^{\omega_c} F(\omega') \text{EXP}(j\omega' x'_0) d\omega'}{\int_{-\omega_c}^{\omega_c} F(\omega') \text{EXP}(j\omega' x'_1) d\omega'} \quad (19)$$

となる。 $F(\omega)$ および ξ' が与えられたとき、式(19)を満足する ω_c を等価帯域角周波数とよぶ。

(5) 視標パターンの細部視認距離

複雑な視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、視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、視標の L を理論的に算出する方法としては、視角法、MTF法、等価帯域法、帯域制限波形比較法

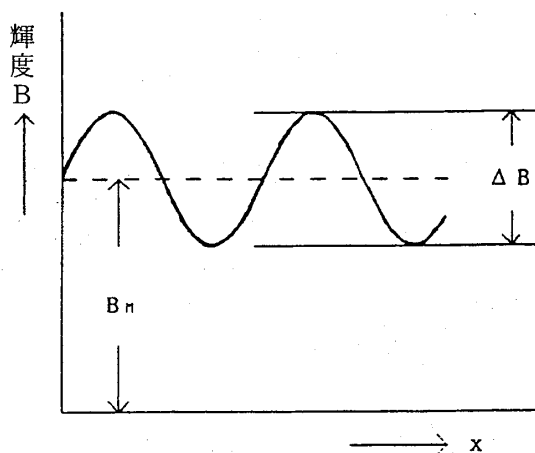


図6. 正弦波状輝度分布

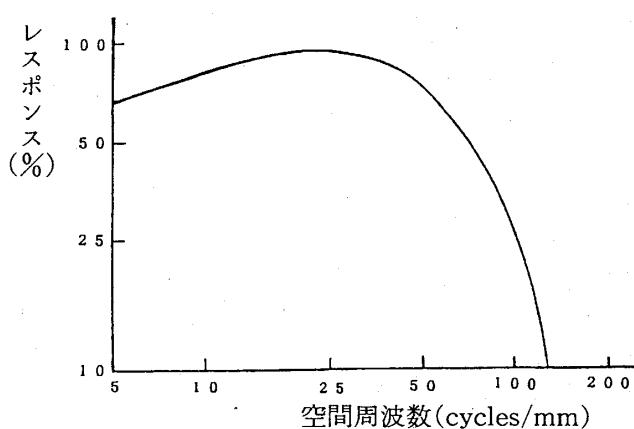


図7. CraneのMTF曲線

が考えられる。ここで視角法とは視標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法とは視標の $F(\omega)$ 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、等価帯域法とは視標の $F(\omega)$ を式(19)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253rad/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、帯域制限波形比較法は視標の $F(\omega)$ を式(17)によって計算するとき、 ω'_c をパラメータとして $f'(x')$ のカーブ群を描き、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。

4. 計算結果と視覚実験値の比較

(1) 波形

図8は図5に示した1本のバー・パターンで、 $W=2$ (mm)としたとき、式(3)でその $F(\omega)$ を求め、さらに式(17)でフーリエ逆変換を行ったものである。なお、カーブのパラメータは、 $\omega_c=2\pi$ 、 $\pi/2$ 、 $\pi/4$ としている。この図の座標は視標面上のものである。

図9は同じ視標パターンについて、視標と観測者の眼との間の距離を変えたとき網膜上でのフーリエスペクトルの変化を示したものである。すなわち、各曲線の距離はそれぞれ①は5(m)、②は10(m)、③は30(m)ある。視標の距離が遠くなる程、底周波域での視標のもつ情報が失われることが認められる。眼のMTFが図7に示すように大体低域ろ波特性であることから、視標の細部を確実に識別するためには、視標の距離を近付けないければならないことは、両者の特性から分かる。

図10は図2(a)の均等バー・パターンについて、式(19)の ξ' を0.75としたとき、それを満足する ω'_c のもとで $f'(x)$ を再現したものである。図中の点線の矩形はバー・パターンの位置を示す。この場合の網膜上での等価帯域角周波数 ω'_c は、253(rad/mm)である。ただし、 $L=5$ (m)である。

(2) $N=2$ の不均等バー・パターン

図11は図3(a)の k を横軸に、そして各 K に対する線間の細隙を確認できる距離 L を横軸にとったものである。この場合、 L を決定する4つの方法(視角法、MTF法、等価帯域法、視覚実験法)を比較すると、視覚実験値を基準にして考えると、これに最も近いものがMTF法、ついで等価帯域法であり、視角法は大きなずれを生ずる。この図の曲線はいずれも視力1.0に基準化してある。

(3) $N=2\sim 6$ の均等バー・パターン

図12は図2のバー・パターンで $N=2, 3, 4,$

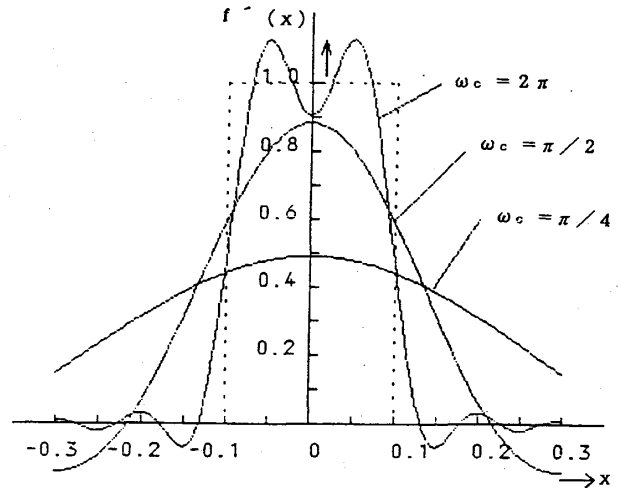


図8. 1本のバー・パターンの帯域制限下の再現波形

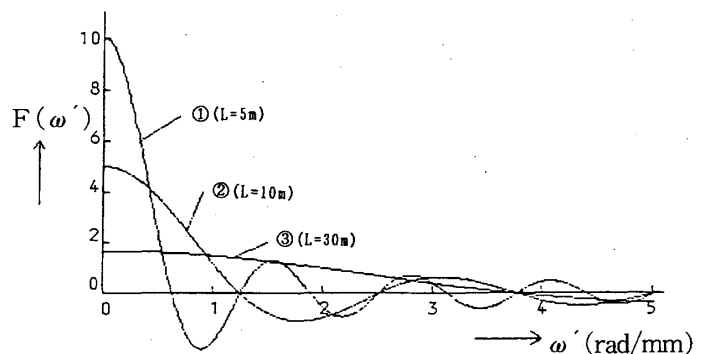


図9. 1本のバー・パターンの視標の距離をパラメータとした網膜上のフーリエ・スペクトル

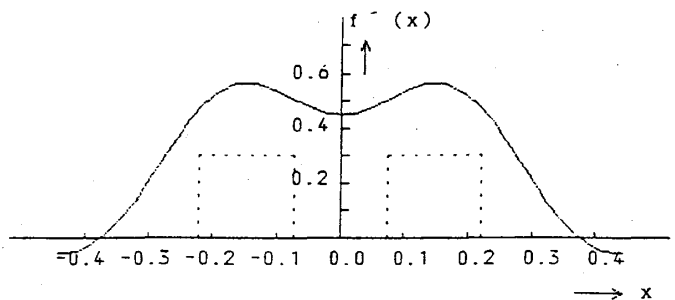


図10. 2本のバー・パターンで $\xi'=0.75$ としたときの波形

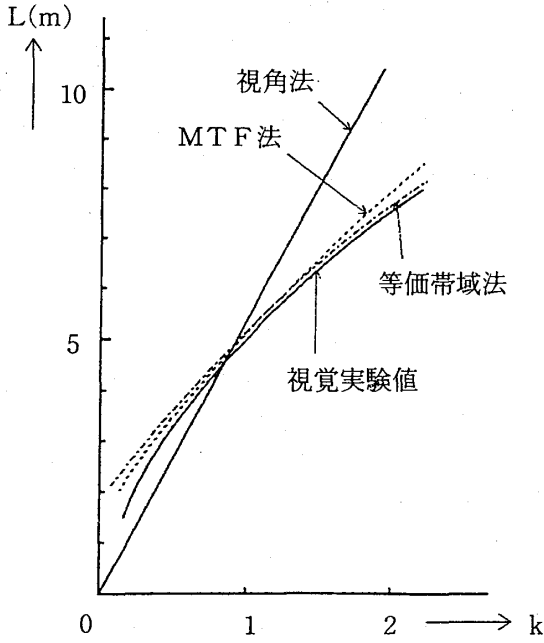


図11. 2本の不均等バー・パターンの細隙視認距離特性

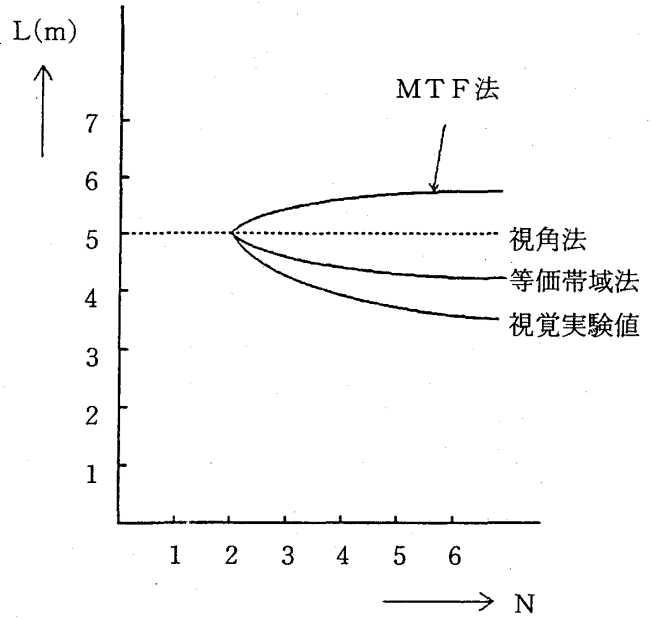


図12. 均等バー・パターンの線数対細隙視認距離特性

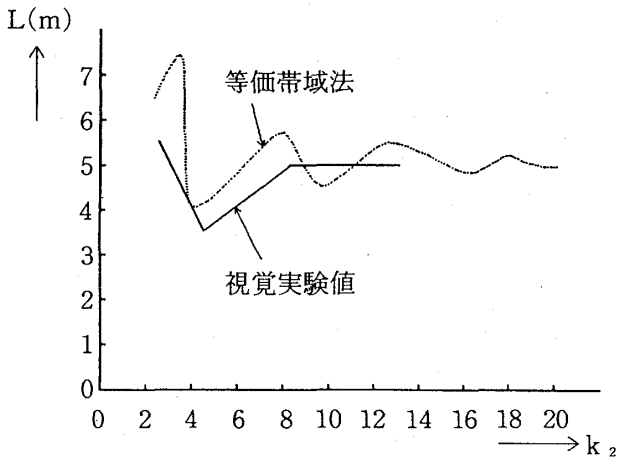


図13. 4本の不均等バー・パターンの細隙視認距離特性

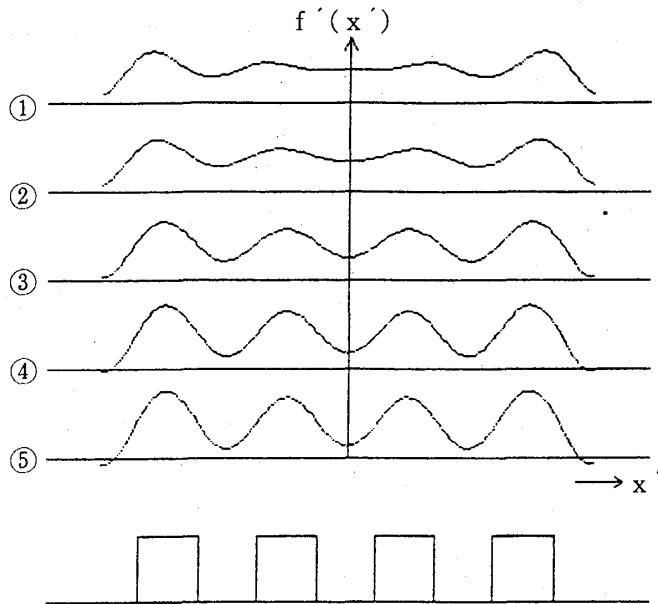


図14. 4本のバー・パターンの帯域制限波形比較り例

5, 6に対するLの関係を前記(2)と同様の比較基準で示したものである。このテスト・パターンは均等バー・パターンであるから線間の細隙の眼に対して張る角度はNに無関係となり、視角法では点線で示すように一定となる。しかし視覚実験値は図に示すようにNが増すとLが低下する傾向を示し、これに近い特性を示すのは等価帯域法だけであって、MTF法はNとともに増加するという逆の傾向となった。

(4) N=4の不均等バー・パターン

図13は図3(b)のパターンで $k_1=1$, k_2 を変数としたときのLを示したものである。この場合の実験条件は中央の2線間の間隔をパターンの細部とみなし、これを確実に視認できる距離を細部視認距離としたものである。図に示すように、この場合のLの特性は複雑な変化を示し、これに対し理論値は等価帯域法の結果が点線に示すようにややこれに似た特性を与えるにとどまる。MTF法や視角法では、とてもこの程度の近似的特性も得られない。

(5) 帯域制限比較法の例

(4)で述べたように、4本のバー・パターンでもその線間隔が変化したときのLを実測値と精密に一致させる理論値を得ることはなかなか困難である。図14はこれに対して、与えられたパターンの $F(\omega')$ を式(17)に代入し、 ω'_c の値を変化させたときの $f'(x')$ を示したものである。同図の各曲線の ω'_c の値は、①が280、②が290、③が300、④が310、⑤が320(rad/mm)である。また図の最下部の矩形波はバー・パターンの位置を示す。

5. むすび

バー・パターン指標の細部視認距離L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を組み合わせてその結果を示した。従来の視角法では説明できなかった図11、12のパターンに対する視角実験結果は、等価帯域法によってかなりよく推定できることがわかった。MTF法が余り良い結果を示さなかったのは、MTFの関数形を少し変化させると最終のLに相当大きな影響を及ぼすことから、今回採用したCraneのMTFに対して今後さらに検討を加える必要があると考える。

複雑なパターンのLを1つのパラメータで決定することはなかなか困難であるので、帯域制限波形比較法を一層拡張発展させることが必要である。また、今回は1次元の取扱のバー・パターンに制限したが、今後さらに2次元のパターンについても研究を進める必要があると考えている。

参考文献

- (1) 日本生物物理学会編：神経の生物物理，p.324，吉岡書店(1974)。
- (2) 滝，他編：画像工学 p.22，コロナ社(昭和52)。
- (3) 照明学会照明普及会：照明における心理効果，p.16(昭和47)。
- (4) 久保田 広：応用光学 p.118 (1963)。
- (5) E. M. Crane："An Objective Method for Rating Picture Sharpness: SMT Acutance"，Journal of the SMPTE, Vol.73, pp.643-647(August, 1964)。