

ローパス・フィルタリング法による文字の視認性評価

舟川 政美

日産自動車 (株) 総合研究所 社会・商品研究所 基礎研究 G

〒 237 神奈川県横須賀市夏島町 1

1. はじめに

文字の視覚情報処理に関する応用研究として、文字を含む形状の視認性を定量評価する手法、及び考え方について紹介する。「見えるか見えないか」、「見やすいか見にくいかな」は、(1) 視覚系、(2) 視環境、(3) 視対象、の3者の相互作用の結果であり、しかも常に変動する過程である。ここでは、視覚特性や観察条件とできるだけ独立に、視対象の属性として視認性を定量的に計測することを試みる。

2. ローパス・フィルタリング法の考え方

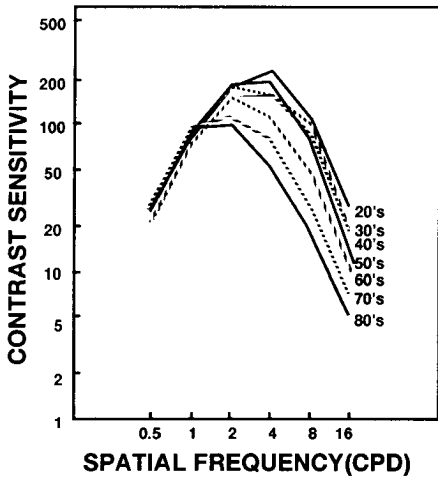
原則的に、コントラスト感度 (CSF) と視対象の時空間周波数特性から、「見えるか見えないか」、「見やすいか見にくいかな」を予測することができる。人間の特性や観察条件の変化によって CSF がどう変化するかを図 1 に示す。それぞれ、(A) 加齢¹⁾、(B) 順応輝度²⁾、(C) 背景輝度の時間変化³⁾、(D) 網膜部位⁴⁾、(E) 時間周波数⁵⁾ による CSF の変化を表している。また、(F) 等輝度⁶⁾、(G) 医学的弱視⁷⁾ の場合も併せて示す。CSF 測定の有効性と合理性の背景には、網膜像が様々な周波数・振幅・位相を持つ空間的な輝度変調の正弦波の線形な和に分析できること (フーリエ分析)、さらに、視覚の初期過程は、空間的に局在する時空間フィルタの集合であり、それらを通して時空間周波数毎の処理を並列的に行なっていると考えられることがある⁸⁾。この考えは、多くの心理物理学的・生理学的支持を得ている多重チャネル・モデルの基礎である⁹⁾。本解説の趣旨から言えば、視認性をこの視覚の基

礎モデルに合致したものとさして測定することが重要である。

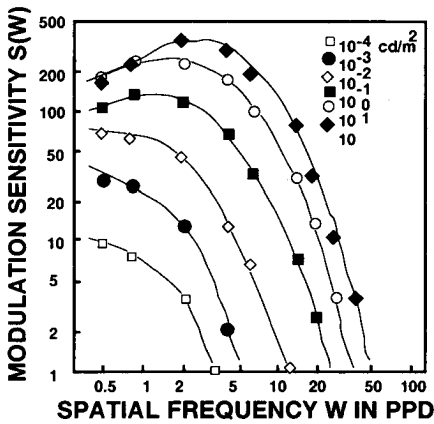
文字の視認性の観点から見て重要なのは、図 1 に示した多くの場合で、高空間周波数側のカットオフ周波数の低下、即ち、視力低下が起ることである (C を除く)。周辺視/暗所視や薄明視/高齢者の視覚/等輝度条件下の色覚/運動視、これらは、中心視/明所視/若年者の視覚/輝度変化に対する視覚/静止対象の視覚に較べ、低空間解像度と特徴付けることができる。

今、ある文字画像からそれを構成する空間周波数成分を高い方から順次取り除いていくと、しだいに形状がぼけていくのが観察される。形状の詳細な情報は失われ、最終的には、その文字の位置しかわからない程度にまで、我々の視覚の質は低下していく。このような観察に基づいて、以下のような指摘が可能である。(a) 文字を正しく認識・同定できなくなるほどの臨界値、あるいは、その文字形状を特徴付けている空間周波数帯域が存在し、それは文字形状の複雑さによって変化する。(b) 文字を正しく認識・同定するために全ての空間周波数成分が必要なわけではなく、空間周波数帯域によって我々が受け取る情報の内容は異なる。

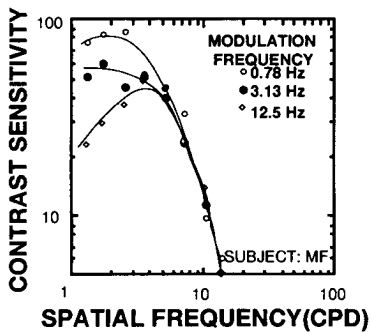
ある文字形状を特徴付けている空間周波数帯域がわかれば、その帯域での文字のコントラストと観察者のコントラスト感度から、その文字が正しく認識・同定されるか否かを一義に予測できる。この意味で、文字形状を特徴づけている空間周波数帯域は、その文字の視認性を決定的に規定し、さらに、視環境条件や視覚特性と



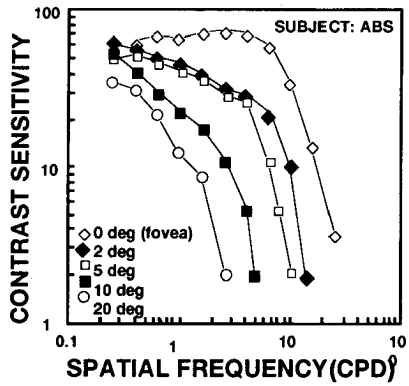
(A) 加齢
R. Sekuler, C. Owsley and L. Hutman(1982)



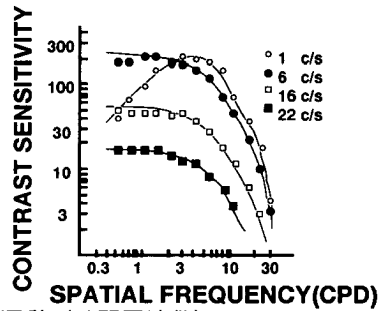
(B) 順応輝度 (平均輝度)
A. van Meeteren and J. J. Vos(1972)



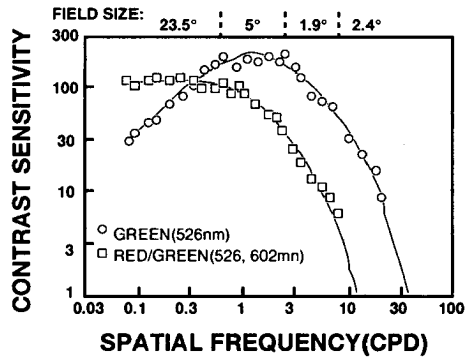
(C) 背景輝度の時間変動
M. Funakawa(1996)



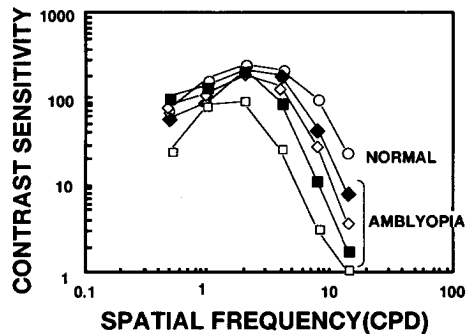
(D) 網膜部位 (離心率)
M. S. Banks, A. B. Sekuler and S. J. Anderson(1991)



(E) 運動 (時間周波数)
Robson(1966)



(F) 等輝度
K. T. Mullen(1985)



(G) 弱視
J. P. Nordmann, R. D. Freeman and C. Casanova(1992)

図1 測定条件によるコントラスト感度の変化

は独立な評価が可能である。加齢や順応など視覚特性の変化、昼夜など観察条件の変化は、多くの場合、高空間周波数側カットオフ周波数の低下、即ち、視力の低下を伴う。したがって、文字形状を特徴付けている空間周波数帯域が低いほど、その影響を受けにくい、即ち、視認性が高いとみなすことができる。高空間周波数帯域に含まれるエネルギーはそもそも相対的に小さく、S/N比も低いと予想され、高空間周波数に対して高い感度を有するのは、明所視の下、網膜の中心部位約2度の領域のみである。このように、高い視認性とは、より低い空間解像度でも、言い換えると、より低視力でも、その形状を認識・同定できる性質であると定義できる。

文字形状を特徴付けている空間周波数帯域は、心理物理学的に測定しなければならない。その方法として、ローパス・フィルタリング法を提案する。ローパス・フィルタリングでは、あるカットオフ周波数より高い周波数成分が評価対象から取り除かれる。色々なカットオフ周波数における文字認識の精度を測定することによって、また、カットオフ周波数を順次低下させ初めて正確な文字認識が可能な点を測定することによって、ある文字形状を特徴づけている

空間周波数帯域を測定することができる。そして、カットオフ周波数の臨界値から、その文字を正しく認識できる最低視力を換算できる。この臨界周波数が低いほど、そして、この換算視力が低いほど、視認性が高い文字形状といえる。具体的なローパスフィルタリングの方法には、画像処理と光学的処理の2つがある。ローパス・フィルタリングは、一般に平滑化と呼ばれる画像処理であり、ガウシアン・フィルタがその代表である^{10,11)}。他に、フーリエ分析やピラミッド法¹²⁾などが利用できる。光学的処理については、次節で説明する。

3. 測定装置

ここに報告する実験では、ローパス・フィルタリングのカットオフ周波数をリアルタイムに変化させるため、光学的処理によりローパス・フィルタリングを実現した。光学的なローパス・フィルタとしてはすりガラスを利用した^{13,14)}。一定距離からすりガラスを通して画像を観察している時、すりガラスと画像との距離を大きくするにつれ、すりガラスのカットオフ周波数、即ち、通過できる最も高い空間周波数は組織的に低下する。

装置の概略を図2に示す。ガラス・フィルタ

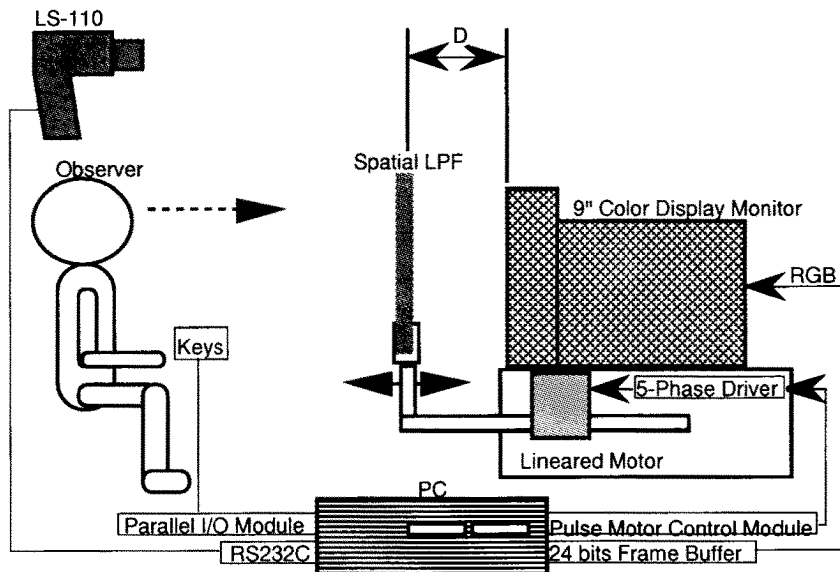


図2 ローパス・フィルタリング法による視認性評価 装置図

が、観察者とディスプレイ画面との間に在り、フィルタと画面との距離Dは、コンピュータにより制御される。光学フィルタを利用するためには、Dが変化するにつれてフィルタのカットオフ周波数がどう変化するか（距離毎のMTF, Modulation Transfer Function）を、事前に測定しておかなければならない。そのため、特定のコントラストの輝度正弦格子をディスプレイ上に呈示し、観察者の代わりに輝度計を置き、各空間周波数、各距離毎にすりガラスを通過することによるコントラストの低下の割合を測定した。

測定結果の例、及び、最小二乗法による回帰曲線を図3に示す。画像とフィルタとの距離Dがある値の時、ある空間周波数 F_c よりも高い正弦格子は空間的に平均化されコントラストは伝達されないこと、他方、 F_c よりも低い周波数のコントラストはフィルタによって変化しないことがわかる。また、画像とフィルタとの距離が変化するにつれ、MTFはほぼ左右方向に平行移動しており、Dの値から、近似的にMTFを計算し求めることができる。

画像とフィルタとの距離Dからローパス・フィルタのカットオフ周波数を計算するには、 F_c を定義しなければならない。しかし、得られたMTFは、シグモイド型の関数であり、 F_c の位置は一義に決まらない。ここでは、伝達率

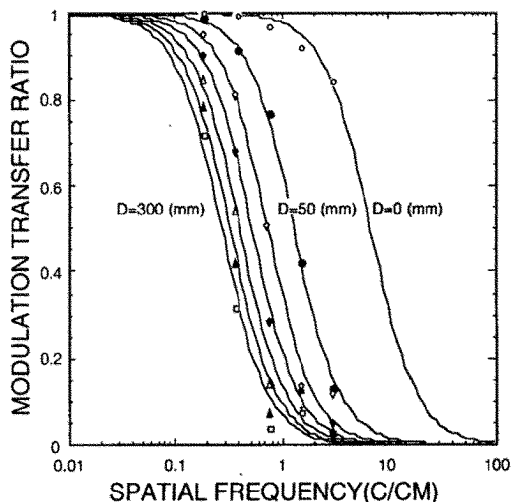


図3 ローパス・フィルタのMTF測定例

$1/e$ %を基準として F_c を定義した。カットオフ周波数 F_c が決まれば、最小分離閾、その逆数の換算視力が得られる。

視認性は、形状やコントラストの他、文字サイズに依存して変化する。ローパス・フィルタリング法は、いわば視力をものさしとして視認性を評価するものであるから、形状とコントラストが等しければ、視認性と文字サイズの関係は単純な線形であり、サイズの違いは計算で補正できる。サイズの効果を取り除いた視認性の比較のため、カットオフ周波数を単位視角あたり (Cycles/deg) で表記するかわりに、サイズを単位として (Cycles/Size) 表記することも、同じ意味である。

4. 視認性評価実験

4.1 被験者

正常視力を有する2名。

4.2 装置

上記の視認性評価装置を用いた。

4.3 刺激

書体14種の数字0～8の視認性を評価した (図4参照、9は6を回転させたものと見なし省略)。コントラストは、99% (暗背景明文字)。各書体は、印刷用書体として同サイズとして扱われているが、視角で高さ32.6～47.0分、幅9.3～37.0分の範囲で変化し、視覚的に明らかにサイズが異なる。

4.4 手続き

被験者は、暗室内で、観察距離114 cmから、ローパス・フィルタ越しにディスプレイ中央の凝視点を見た。被験者の眼は、顎台により固定された。両眼視で、人工瞳孔は使用しなかった。書体毎に視認性評価実験が行われ、1度の実験に同一書体の9文字 (0～8) の測定が行われた。被験者は、ディスプレイにランダム順に継時的に、1文字200 msの速さで呈示された8個の数字にターゲット文字があったか否かを判断した。数字の向きは、0, 90, 180, 270度の4通りからランダムに選択され、位置も、凝視点を中心に1.65 (W) × 1.93

(H)度の矩形領域内でランダムに変化した。また、ターゲット文字が呈示される確率は1/2であった。正答の場合、次試行におけるDは一定距離延長され（観察されるほかしの大きさは大きくなり）、誤答の場合、逆に、一定距離小さくなった。この手続きを繰り返し（上下法）、正答率約70%を基準に閾値が決定された。ターゲット文字と非ターゲット文字は、常に同一書体であり、継時呈示される8個の数字は、全て異なっていた。

4.5 結果

14書体、各9文字について、刺激画面とローパス・フィルタ間の距離Dが文字検出閾として測定された。距離Dから、その時のローパス・フィルタのMTFが推定され、それに基づいてカットオフ周波数が計算され、さらに、視力に換算された。一名の被験者の結果を図5に示す。二名の被験者間に大きな違いは認められなかった。両被験者、同一書体の全数字の平均値を図4に示す。図4、5は、視認性の平均値が

高い順（換算視力が低い順）に並んでいる。

数字間の比較では、書体の種類に関わらず、8, 3, 6, 5の視認性が低く、1, 7, 0, 4の視認性が高い。より複雑な形状、具体的には、文字サイズに対し相対的に小さなgapやholeをもった形状の数字の視認性が低くなっている。

書体間の比較では、平均して(A), (B)の視認性が高く、(M), (N)の視認性が低い。この結果の全てが形状の違いに帰因するとは考えられない。1部の書体は、明らかにサイズが異なっているからである。

以上の結果は、形状の開口性、ボールド化、外輪郭の類似性などと、数字文字の視認性との関係を示唆している。

4.6 考察

4.6.1 観察条件の評価

異なる条件下で測定された異なる視対象の最低視認視力は、単純に比較することはできない。どのような観察条件下でどのような視覚課

平均換算視力	書体名*
(A) 0.0426	ゴードイ・オールド
(B) 0.0453	オブティマ
(C) 0.0486	スーベニア
(D) 0.0564	ボドニ・ボールド
(E) 0.0572	セグメント
(F) 0.0576	ピサ
(G) 0.0628	ガラモン・ボールド・イタリック
(H) 0.0663	フェッテ・ゴートイッシュ
(I) 0.0687	クロー・モダン・ボールド
(J) 0.0787	ヘルベチカ・ボールド
(K) 0.0790	ブラッシュ・スクリプト
(L) 0.0793	バンク・スクリプト
(M) 0.0818	チュビイ
(N) 0.1058	オニクス

*セグメントは著者作成、他は近似した活字書体名。

図4 刺激文字画像と各書体毎の平均換算視力

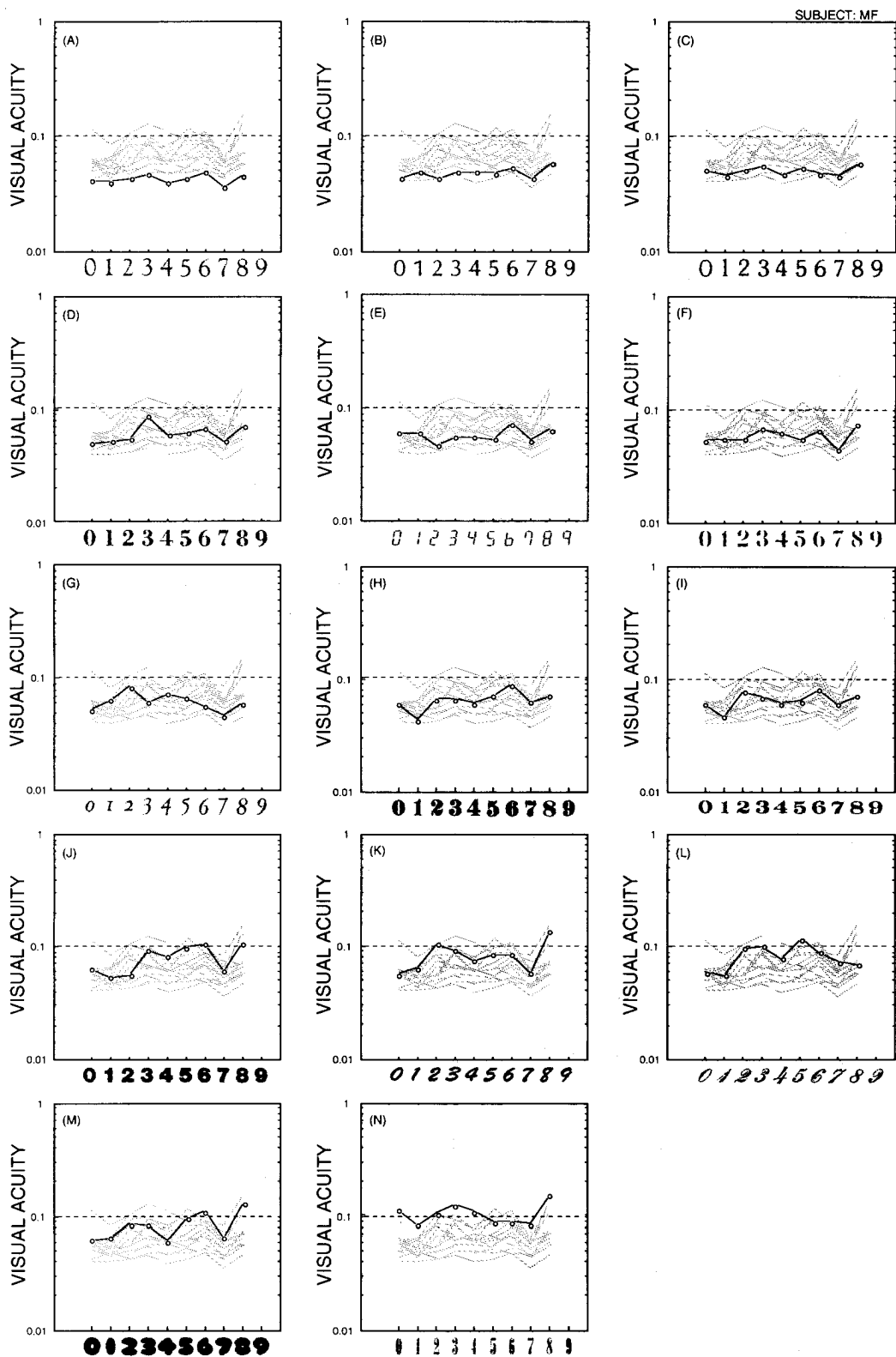


図5 視認性測定結果 (被験者MF)

題を用いて測定したかによって視認性もその評価値も変化するからである。しかし、このことは、ローパス・フィルタリング法が、視対象の属性としての視認性だけでなく、表示方法や周囲の環境の適切さの評価に応用できることを意味している。同一対象の視認性を様々な表示条件や観察条件で測定することによって、どの条件でより良い視認性が得られるかを探ることができる。

4.6.2 視力と視認性の変動

視認性評価結果を視力に換算することは、評価値の意味を直感的に理解させるという利点がある。しかし、その形状の認識に必要な最低視力として、あらゆる環境の下で安定していると捉えるべきではない。図1に示したCSFの変化の様相から、視力が様々な条件で動的に変化するものであることがわかる。健康診断などでランドルト環を用いて測定する視力は、1つの代表値に過ぎない。ここで測定した視認性評価値である換算視力も、同様に1つの代表値である。ある環境下における観察者のCSFと視対象の形状を特徴付ける空間周波数帯域から、ある程度正確に「見やすさ」を予測できるという基本的な原理に変わりはないが、視力も視認性も変動することを考慮すべきである。

4.6.3 視認性の定義

視認性の定義に関して、研究者間に意見の一致が得られていないのが現状である。ここで、視力をものさしとして、即ち、どれだけ低視力でも認識できるかによって、視認性を測ることを提案した。視覚機能と視対象の属性を同じものさしで測ることができるのは、利点である。しかし、視力というものさしで視認性の問題を全て説明できないのは、図1から明らかである。低空間周波数選択的な感度低下の場面には少なくともローパス・フィルタリング法では対処できない。また、誘目性は、視覚の別の側面である。注意のダイナミクス、前注意過程における視野の分節化、カテゴリーの知覚など、広範な内容を含んでいる。ただ、このことを考慮しても、視覚の空間解像度の低下という事態

は、日常生活において一般的であることにはかわりはない。

5. むすび

文字の視認性を定量評価する手法として、ローパス・フィルタリング法を提案した。ローパス・フィルタリング法では、視力をものさしとして視認性を測定する。視力低下は、最も日常的なありふれた視機能低下であることから、多種多様な環境下、不特定の個人が利用する各種情報表示のデザインに、有効な視認性指標を提供すると期待できる。

文 献

- 1) R. Sekuler, C. Owsley and L. Hutman: Assessing spatial vision of older people. *American Journal of Optometry and Physiological Optics*, 59, 961-968, 1982.
- 2) A. von Meeteren and J. J. Vos: Resolution and contrast sensitivity at low luminance. *Vision Research*, 12, 825-833, 1972.
- 3) 舟川政美: 背景輝度変調がコントラスト感度に与える影響. *VISION*, 8, 185, 1996.
- 4) M. S. Banks, A. B. Sekuler and S. J. Anderson: Peripheral spatial vision: limits imposed by optics, photoreceptors, and receptor pooling. *Journal of the Optical Society of America A*, 8, 1775-1787, 1991.
- 5) J. G. Robson: Spatial and temporal contrast sensitivity functions of the visual system. *Journal of the Optical Society of America*, 56, 1141-1142, 1966.
- 6) K. T. Mullen: The contrast sensitivity of human colour vision to red-green and blue-yellow chromatic gratings. *Journal of Physiology*, 359, 381-409, 1985.
- 7) J. P. Nordmann, R. D. Freeman and C. Casanova: Contrast sensitivity in amblyopia: Masking effects of noise. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, 33, 2975-2985, 1992.
- 8) A. P. Ginsburg: Spatial filtering and visual form perception. K. R. Boff, L. Kaufman and J. P. Thomas (eds): *Handbook of Perception and Human Performance*, Vol.2 *Cognitive Processes and Performance*. John Wiley and Sons, New York, 1986.
- 9) R. L. De Valois and K. K. De Valois: *Spatial vision*. Oxford University Press, New York, 1988.

- 10) M. S. Landy, Y. Cohen and G. Sperling: HIPS: Image processing under UNIX. *Software and Applications. Behavior Research Methods, Instruments and Computers*, 16, 199-216, 1984.
- 11) 小田浩一：人間の視覚情報処理研究のためのマイクロコンピュータの画像処理ツール. 第53回日本心理学会発表論文集, 563, 1989.
- 12) P. J. Burt and E. H. Adelson: The laplacian pyramid as a compact image code. *IEEE Transactions on Communications*, COM-31, 532-540, 1983.
- 13) G. E. Legge, D. G. Pelli, G. S. Rubin and M. M. Schleske: Psychophysics of reading: I. Normal vision. *Vision Research*, 25, 239-252, 1985.
- 14) 小田浩一：弱視のシミュレーション (I) 視野のほげによる文字認識の障害. 第28回日本特殊教育学会大会発表論文集, 6-7, 1990.