視覚系の空間周波数特性と照明設計[†]

専門会員 江島 義道* 専門会員 野口 透*

1. ま え が き

視認性を重視する照明設計では、人間の視覚に関する種々の特性がその基礎資料として利用されている。その中でも、従来からもっともよく用いられているものは視力 (visual acuity) に関するもので、Blackwell¹⁾、蒲山ら²⁾、Guth & Mcnelis³⁾ などの資料である。これは対比、輝度および見え方の関係を、単一の指標に対して求めたもので、設計条件が単純な場合には現場への適合性もよく、非常に有用である。

しかし、複雑な設計条件、たとえば複雑な視対象とか錯綜した背景の場合には、見え方は単一指標の場合とは異なり、この資料をそのまま用いて設計を行なうことはできない。また、この資料をどのように応用するかの方法論も現在のところまだない。

そこで、最近、複雑な設計条件にも適用の可能性のある設計手法として、視覚系の空間周波数特性を利用する方法が検討されている。これは視覚系を一つの伝達系と考えて、視覚系の空間周波数特性と視対象の空間的特性から知覚特性を推定して、この特性により設計を行なおうとするものである。

ところが、この研究はまだ緒についたばかりであり、問題点も多い。そこで本稿ではこの問題点にふれながら、この新しい設計手法の考え方、研究の現況および将来を展望してみた。

2. 視覚系の空間周波数特性を用いる設計方法

これは視覚系を一つの情報伝達系と考えて、その取り扱いに伝送理論を導入し、知覚レベルでの応答特性を推定して、設計を行なおうとするものである。まだ設計手法として完成されたものではなく、将来の研究にまつた面も多いが、魅力ある考え方である。

2.1 設計方法の考え方

重ね合わせの原理の成り立つ線形系では、入力 $f(x)$ と出力 $g(x)$ の関係は、伝達系のインパルス応答を知ることによって求めることができる。ここで、インパルス応答はひろがり関数ともいわれ、スリット入力 $\delta(x)$ に対する出力応答波形を数式的に表わしたものである。普通これは $h(x)$ で与えられる (図 1 参照)。この $h(x)$ を用いれば、入力 $f(x)$ は $\delta(x')$ の荷重の和 $\sum f(x')\delta(x-x')\Delta x'$ と考えることができるから、出力 $g(x)$ はそれぞれの応答出力の和として次のように与えられる。

$$g(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x')h(x-x')dx' \dots\dots\dots (1)$$

図 1 伝達要素とインパルス応答

したがって、 $h(x)$ の形が何らかの方法でわかれば、任意の入力に対して、出力応答特性を求めることができる。以上は伝送理論の概要であるが、これを視覚系の情報処理にも適用しようというのが、空間周波数特性を用いる設計手法の考え方である。具体的にいえば、入力 $f(x)$ に視対象の輝度パターンを*、伝達系 $h(x)$ に瞳孔から大脳に至る視覚系を、出力 $g(x)$ に視覚の最終レベルで得られる明るさ感覚の空間的分布 (知覚特性) を、それぞれ対応させて (図 2 参照)、出力 $g(x)$ を推定し、これを何らかの基準で評価して、最適の設計条件を求めようとするものである。

さて、出力 $g(x)$ を推定するには、視覚系の $h(x)$ を何らかの方法で求めなければならないが、スリット光入力 $\delta(x)$ に対する知覚特性の測定が非常に困難であるた

[†] Modulation Transfer Function of the Visual System and Lighting Design

* 京都大学工学部
Yoshimichi Ejima, Toru Noguchi

* 一般の画像は二次元であるから、 $f(x, y)$ を考えなければならないが、議論を簡単にするため本稿では一次元としている。

図 2 視覚系の伝達要素と入出力

め、これを直接求めることはできない。そこで普通、これに数学的変換（フーリエ変換）を施して得られる空間周波数特性を測定し、これに逆フーリエ変換を行なって間接的に求める手法がとられる。

(1)式にフーリエ変換を行なうと

$$G^*(\nu) = H^*(\nu) \cdot F^*(\nu) \dots \dots \dots (2)$$

ここで

$$\begin{cases} G^*(\nu) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} g(x) e^{-i\nu x} dx \\ H^*(\nu) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} h(x) e^{-i\nu x} dx \\ F^*(\nu) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-i\nu x} dx \end{cases}$$

ここで、 ν は空間周波数である。

$H^*(\nu)$ は空間周波数特性といわれるもので、 $h(x)$ のフーリエ変換である。入出力の関係からみれば、入出力のフーリエ変換の比である。振幅項と位相項を分ければ

$$H^*(\nu) = H(\nu) \exp(iQ_h(\nu)) \dots \dots \dots (3)$$

ここで $Q_h(\nu)$ は位相角である。

ところで、中心視の場合はひろがり関数 $h(x)$ はほぼ偶対称分布すなわち、 $h(x) = h(-x)$ であると考えてよいから、 $Q_h(\nu) = 0$ となり、 $H^*(\nu) = H(\nu)$ となる。

$H(\nu)$ は、後述するような方法で測定することができるから、これに逆フーリエ変換を施せば $h(x)$ を次のようにして求めることができる。

$$h(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} H(\nu) e^{i\nu x} d\nu \dots \dots \dots (4)$$

この $h(x)$ を(1)式に代入すれば、任意の入力の出力応答を知ることができる。(1)式の利用は空間領域での議論であるが、空間周波数領域で検討する考え方もある。

これは(2)式を使って $G^*(\nu)$ を求め、これをそのまま空間周波数領域で評価して、設計条件の良否を判定しようとするものである。

以上が、空間周波数特性を用いる設計方法の基本的な考え方である。この方法の特色としては次の点をあげることができる。

(1) 任意の入力波形に対して、出力応答波形を推定することができる。したがって複雑な設計条件にも適用できる。

(2) 視力と輝度弁別を同一基盤の上で議論できる。

(3) 水中、煙中、霧中での見え方を問題とする場合でも、あらかじめそれぞれの媒質の空間周波数特性を測定しておけば、わざわざ高価なシミュレーション実験を行

なわなくとも、最適の設計条件を求めることができる。

(4) 視覚系の時間的特性を合わせて考えれば視対象が時間的、空間的に変動するような場合にも適用できる。

(5) 照明設計だけでなく、一般の画像設計にも同じ考え方を応用することができる。

2.2 視覚系の空間周波数特性⁴⁾

視覚系の空間周波数特性の測定方法は、使用する入力波形の違い、および測定基準の違いで次のように分類される。いずれも(2)式の活用で $H(\nu)$ が入出力波形のフーリエ変換の比で与えられるということに基づいている。

(1) 空間正弦波を用いる方法

$H(\nu)$ が、正弦波の入出力振幅比となることに基づいている。これには次の二とおりがある。

(a) コントラスト弁別閾を測定するもの

正弦波パターンの平均輝度 $\bar{B}_0$ を一定に保ち、コントラストを変化刺激とし、弁別閾 ΔB を測定し、閾変動度 $\Delta B/\bar{B}_0$ と空間周波数の関係を求める。

(b) コントラストの主観的等価値を測定するもの

正弦波パターンを二つ用いる。一つは基準パターンで ν , $\Delta B/\bar{B}_0$ を一定とする。他は比較パターンで、平均輝度 $\bar{B}_0$ は基準パターンと等しく、種々の ν について ΔB を変化刺激として、コントラストの主観的等価値を測定し、変動度 $\Delta B/B$ と空間周波数の関係を求める。

(2) 任意の空間波形を用いる方法

任意の空間波形を与えて、出力波形を適当な方法で測定すれば、両者のフーリエ変換の比として空間周波数特性を求めることができる。

図 3 視覚系の空間周波数特性の例

A: 掃渡らによる	平均輝度	10 fL(1964)
B: 大上による	"	200 rlx(1959)
C: Schadeによる	"	4 fL(1956)
D: Pateliによる	"	1,000 td(1965)

以上の方法の中で、測定が容易であるという観点からもっともよく用いられるのは、(a)の方法であり、すでに多数の研究者によって測定されている。図3はその代表的なものを示したものである。

研究者によって特性の形状が多少変わっているが、帯

域フィルタ形となる点ではほぼ一致している。この特性から、(4)式を使って $h(x)$ を求めることができる。

3. 問題点

前節で述べた設計方法は、まだ提案の域を出ないものであり、これを実用に耐える手法として完成させるためには、まだいくつかの問題を解決しなければならない。その中でもとくに次の問題は重要である。

・観測条件によって、空間周波数特性が変動することの情報処理機構を解明すること。

・ $g(x)$ あるいは、 $G^*(\nu)$ の良否を評価する方法を確立すること。

3.1 空間周波数特性が観測条件によって変動すること

図3に示されたような空間周波数特性は、提示パターンの物理条件や見る人の視覚条件で多様な変化を示す。変動の主な要因としては、順応輝度⁵⁾、提示時間⁶⁾、パターンの方向⁷⁾、パターンの運動速度⁷⁾、パターンの波形⁸⁾、画わくの大きさなどである⁹⁾。図4はこれらの条件が変わった場合、空間周波数特性がどのように変容するかを示したものである。この中で、順応輝度、提示時間およびパターンの運動速度は、設計条件に応じてある程度明確に規定できるから、それに見合った特性を選ぶべく、またパターンの方向についても、それほど大きな差異はないのであまり問題はない。

ところがパターン波形と画わくの大きさの問題は、系の線形性、すなわち(1)式が使用できるか否かに関することであり、重要である。

図4 空間周波数特性の各種条件による変化

そこで、これについて少し詳述してみる。

(1) パターン波形による相違

Campbell & Robson⁹⁾ は、パターン波形として正弦波と矩形波を用いてコントラスト閾値を求め、図 5 のような結果を得た。

ここで、もし線形性が完全に成り立つとするなら、振幅 a 、周波数 ν の矩形波形 $g(x)$ は

$$g(x) = \frac{4}{\pi} \left(\sin 2\pi\nu x + \frac{1}{3} \sin 6\pi\nu x + \frac{1}{5} \sin 10\pi\nu x + \dots \right)$$

と表わすことができるから、このときのコントラスト感度は、周波数 ν の正弦波のコントラスト感度を $H(\nu)$ とすれば

$$\frac{4}{\pi} H(\nu) \sin 2\pi\nu x + \frac{1}{3} H(3\nu) \sin 6\pi\nu x + \frac{1}{5} H(5\nu) \sin 10\pi\nu x + \dots$$

の最大値で与えられる。したがって、矩形波と正弦波のそれぞれのコントラスト感度の比をとれば、図 5 の鎖線のようなになるはずである。しかし現実には実線のようにになっており、周波数の低い部分で線形性は成り立っていない。そこで Campbell & Robson はこの実測値と理論値のずれを説明するために、マルチチャンネルモデルを提唱した。これは、視覚系の空間情報処理が単一の機構 (single channel) でなされるのではなく、一定の周波数帯域ごとに並列的に結合された機構 (multiple channel) でなされるというモデルである。その後、この考えを裏づけるような生理学的、心理学的報告が数多くなされており、マルチチャンネルの存在はほぼまちがいないものと思われる。

Campbell & Robson の結果は、線形性を一部否定するもので、(1) 式あるいは (2) 式を使う設計法の論理的根拠を危うくするものであるが、将来マルチチャンネルの情

図 5 測定波形による空間周波数特性の相違 (Campbell らによる) 鎖線は単一機構 (Single Channel) で処理されると仮定した場合の矩形波と正弦波のそれぞれのコントラスト感度の比の理論曲線

報処理機構が明らかにされれば、この問題も解決されるだろう。

(2) サイクル数による相違

Hoekstra らは¹⁰⁾、正弦波格子のサイクル数によってコントラスト感度が変化することを明らかにしている。図 6 はその結果を示したもので、これを要約すると次のようになる。

- (i) コントラスト感度は、サイクル数が大きくなるにしたがって増加し、やがて飽和する。
- (ii) このときの変化の特性は、空間周波数によって変わらない。
- (iii) 輝度レベルが上昇すれば、飽和するサイクル数は大きくなる。

さらに、彼らはこの結果を説明するためにマルチチャ

図 6 サイクル数によるコントラスト感度の相違 (Hoekstra による)

ネルモデルを構成し、計算機シミュレーションを行ない、このモデルによって測定結果がうまく説明できることを明らかにした。しかしシミュレーションに用いたチャンネルの幅が、他の研究者の測定したものとかなり異なっており、モデルの適否についてはまだ明確な結論はくたせない。

(3) 正弦波格子の高さによる相違

筆者らは、正弦波格子の空間周波数特性に及ぼす影響を調べ、図7のような結果を得た¹¹⁾。これを要約すると次のようになる。

図7 正弦波格子の高さによる空間周波数の相違

(i) コントラスト感度は、格子の高さが大きくなるにしたがって上昇する。

(ii) 上昇の程度は、高周波域より低周波域のほうが大きい。

以上の結果は、Hoekstra らの提案したモデルを二次元に拡張して用いれよううまく説明できる。この場合も Hoekstra らの場合と同様、チャンネルのフィルタ特性の設定に問題があり、モデルの適否は将来の研究にまたなければならない。

3.2 $g(x)$ あるいは $G(\nu)$ の良否を判定する評価基準がまだ明らかにされていない

(1)式あるいは(2)式によって $g(x)$ あるいは、 $G^*(\nu)$ が推定できても、この良否を定量的に評価する方法はまだ確立されていない。これに関する研究としては、写真工学、テレビジョン工学の分野で行なわれている鮮鋭度研究^{12)~14)}があるが、これは伝送系の評価を対象としたもので、画像そのものの評価には適用できない。この鮮鋭度研究の成果を踏み台にして、今後の研究が期待されるところである。

4. む す び

以上、視覚系の空間周波数特性を用いる照明設計法の考え方について解説を試みた。この方法はまだ提案の域を出ないものであり、3で述べたような今後解決して行かなければならない多くの困難な問題点を持っている。

あえて、雑然とした本論を寄稿したのは、最近にわか

に話題になっている「視覚系の空間周波数特性と照明設計」に関する事柄を、多数の人にご理解願いたいと思ったからであり、場合によっては、この種の研究に対する同好の士を1人でも多く得られたら、という筆者らの願いからである。

参 考 文 献

- (1) H.R. Blackwell: Contrast Thresholds of the Human Eye, J. Opt. Soc. Amer. **36** (1946) 624
- (2) 蒲山, 本橋, 佐藤: 明視照明のための基礎的研究, 照学誌 **46** (昭37) 92
- (3) S.K. Guth and J.F. McNelis: The Threshold Contrast as a Junction of Target Complexity, Amer. J. Optom. and Arch. Amer. Acad. Optom **46** (1969) 491
- (4) 森: 視覚の伝達関数の問題, 心理学研究 **35** (昭39) 37
- (5) A.S. Patel: Spatial resolution by the human visual system, The effect of mean retinal illuminance, J. Opt. Soc. Amer. **56** (1966) 689
- (6) L.E. Arend: Response of the Human Eye to Spatially Sinusoidal Gratings at Various Exposure Durations, Vision Res. **16** (1976) 1311
- (7) 樋渡, 渡部, 森, 長田: 視覚の空間正弦波レスポンス, NHK技術研究 **16** (昭39) 38
- (8) D.H. Kelly & H.S. Magnuski: Pattern Detection and Two-Dimensional Fourier Transform, Circular Targets, Vision Res. **15** (1975) 911
- (9) F.W. Campbell & J.G. Robson: Application of Fourier Analysis to the Visibility of Gratings, J. Physiol. **197** (1968) 551
- (10) J. Hoekstra, D.P.J. van der Goot, G. van den Blink and F.A. Bilsen: The Influence of the Number of Cycles upon the Visual Contrast Threshold for Spatial Sine Wave Patterns, Vision Res. **14** (1974) 365
- (11) 江島, 伊藤, 桂, 野口: 視覚系の空間周波数特性に及ぼす画わくと提示時間の影響, テレビジョン学会全国大会講演集 (昭52)
- (12) 大上: 写真像の鮮鋭度, 応物 **31** (昭38) 178
- (13) 長谷川: テレビジョン画像における鮮鋭さと視距離, NHK技術研究 **18** (昭39) 81
- (14) 長岡, 古橋, 佐々木: テレビジョン画像における鮮鋭度の尺度化, テレビジョン **27** (昭48) 524
全般的には次のものを参考にした
- (15) 池田: 視覚の心理物理学, 東北出版 (昭50)

(受付1977年4月27日)