図形の極性に対応する視覚の空間周波数特性

正会員 坂 田 晴 夫[†]

あらまし 灰色の地に白図形（正極性）がある場合と黒図形（負極性）がある場合とでは、地の明るさが異って見える。このような図形の極性による見え方に対応した視覚の空間周波数特性を、心理物理的に測定した。その結果、高コントラストの条件では正極性の空間周波数特性は低周波の感度が高周波の感度に比べて低下するのに対し、負極性の特性は低周波の感度が高周波の感度よりも高くなった。一方、低コントラストの条件では正、負の極性による特性の差は小さく、いずれも低周波の方が高周波よりも感度が低くなった。得られた結果と一定コントラストに見える条件の視覚の空間周波数特性との関係や、文字の見え方との関係についても検討した。

1. ま え が き

近年、文字放送、キャプテンシステムなどテレビ放送、画像通信の分野において、また、オフィスオートメーション（OA）など事務情報処理の分野において、図形が画像情報の主役として扱われるものが出現してきている。文字、図形も視覚で受けとる情報であるから、その見やすさには視覚の特性が関わっている。文字（図形）の階調は2値であり、文字の大きさ、線幅、コントラスト地（背景）に対する極性（字が背景よりも明るい場合を正極性、逆を負極性とする。正コントラスト、負コントラストと呼ぶ場合もある）による見え方が問題となる。大きさ、線幅、コントラストの限界は視覚の空間分解能または空間周波数特性で決まる。視覚の心理的な空間特性については従来から調べられており¹⁾、生理学の知見との照合もされている²⁾。これに対して、図形の地に対する極性の効果（正、負コントラストの見え方の差）は充分検討されていない。

生理学では網膜から脳への信号を送出する神経節細胞が2層になっていて、1層は入射する光点に対して正の反応（興奮）を示し、その周辺に負の反応（抑制）を示しオンセンター型と呼ばれ、他の層は入射光が切れた場合に興奮し、その周辺に抑制を生じてオフセン

ターと呼ばれている³⁾。かかる生理学の光点に対する興奮とその周辺の抑制は、心理物理学的な視覚の空間周波数特性が帯域通過フィルター形になることと対応づけされている。一方、光の刺激の極性に対する反応の違い、すなわちオンセンター形とオフセンター形の反応についても心理物理学的検討が進められ、極性を含めて提示図形のコントラストによる周辺の見えの明るさが明らかにされた⁴⁾⁵⁾。

しかし、図形の極性による視覚の空間周波数特性の違いについては、これまで明らかにされていない。わずかに、白地に黒文字と黒地に白文字の視認距離が求められているに過ぎない⁶⁾。

本研究では、今後増大するであろう文字、図形の画像情報の見えやすさの基本として、図形の極性の違いによる視覚の空間周波数特性の違いを解明するものである。なお、図形の空間知覚は視覚の明暗と色度の空間周波数特性の違いからも明らかのように⁷⁾、明暗知覚が主役であり、色度情報に基づく図形知覚は2次的であることが知られているので、ここでも図形の極性としては明暗情報のみに限ることとする。

2. 測定パターンの検討

2.1 光刺激の極性と側抑制

灰色の背景に種々のコントラストの白～黒の2線刺激を設け、心理物理的に線間の明るさを測定した結果より、図形の正極性（背景より図が明るい条件）と負極性（背景より図が暗い条件）による見え方の違いが明らかにされ、つぎの(1)の結論と(2)の推定が得ら

[†] NHK 放送技術研究所（現在、クラリオン株式会社）
“Spatial Frequency Characteristics of Vision Corresponding to Appearance of Figures with Different Polarities” by Haruo Sakata (NHK Broadcasting Science and Technical Research Laboratories, Tokyo)

図 1 視覚の線拡がり関数
Line spread function of vision.
(a) positive polarity with inhibition, (b) negative polarity with inhibition, (c) negative polarity without inhibition

れている⁴⁾⁵⁾.

- (1) 灰色の地に黒 (暗) 図形, 白 (明) 図形を設けた場合の地の明るさの見えは, 図形のない場合の地の明るさを基準にとると図形の極性 (白か黒) によって対称的な変化とならない。
- (2) 正極性 (白) の図形の場合には図形のコントラストによらずに側抑制が存在する*. 負極性 (黒) の図形の場合には図形のコントラストが小さい条件では側抑制が存在するが, 図形のコントラストが大きくなると側抑制が消失する。

これまでの心理物理実験の結果により, 線刺激に対して視覚の反応 (視覚の線拡がり関数) は図 1 になることが推定された。すなわち, 正極性では図 1(a) に示すように正の興奮応答の周辺に負の側抑制の拡がりがある。負極性では刺激の振幅が小さい場合には図 1(b) に示すように負の興奮応答の周辺に正の側抑制の拡がりがある。しかし, 負極性では刺激の振幅が大きくなると図 1(c) に示すように側抑制は消失する。

2.2 測定パターン

図 1 の線拡がり関数は灰色地に白 (正極性) の 2 線のパターンと黒 (負極性) の 2 線のパターンに対する応答より導いたものであり⁴⁾⁵⁾, 極性の効果は, このように輝度分布が正負で非対称なパターンの場合に明

図 2 試験視標の輝度分布
Luminance distribution of test pattern.
(a) positive polarity, (b) negative polarity

確に測定できる。図形の極性に対応する視覚の空間周波数特性も, 正負で非対称な輝度分布のパターンを用いることが第一条件となる。ここでも, 基本的には線刺激から成りたち, その集合として空間正弦波となるパターンを用いることにする。

図 2(a)(b) が提案するパターンの輝度分布を示す。一定間隔のパルス列 U の振幅を低周波の空間正弦波 V でパルス振幅変調した形 $M(x)$ である。ここで, 以下の記号を用いるとパルス振幅変調波 $M(x)$ は (1) 式のように表示できる。

パルス幅: x_0

パルス周期: X

$$w_c = 2\pi f_c = 2\pi/X, \quad k = x_0/X$$

$$U = k \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\sin nk\pi}{nk\pi} \cos nw_c x$$

$$V = A_v(1 + \cos w_v x)$$

$$M(x) = UV$$

$$= A_v k \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\sin nk\pi}{nk\pi}$$

$$\cdot \cos nw_c x (1 + \cos w_v x)$$

$$= A_v k (1 + \cos w_v x) + A_v k \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin nk\pi}{n\pi}$$

$$\cdot \{2 \cos nw_c x + \cos(nw_c \pm w_v)x\} \quad (1)$$

(1) 式の第 1 項の $\cos w_v x$ は変調信号そのものであり, パルス振幅変調波 $M(x)$ には変調信号自身が含まれている。また, パルス波形で $x_0/X = k < 1/2$ ならば明方向への刺激が小面積を占める正極性の刺激となる。負極性の刺激は信号全体の極性を反転すればよい。したがって, 空間正弦波を, 図 2 に示すように

* 心理物理実験の結果から生理学の受容野の特性を推定した結果であり, (2) の現象が電気生理学で確認されているわけではない。

明方向または暗方向にパルス変調したパターンは、パルスの極性に依じて光刺激の極性が変わったパターンとなる。この場合の空間正弦波の周波数(w_v)を変化して正弦波の見え方、すなわち、パルス振幅変調波の包絡のコントラストを測定すれば周波数による(1)式の第1項の大きさを測定することになり、極性の違いによる視覚の空間周波数特性を求めることができる筈である。

3. 実験

3.1 パターンの発生

図3にテレビモニターを視標とするパターン発生回路を示す。テレビの水平同期信号に位相結合したI, II, IIIの信号発生器のうちII, IIIは正弦波モードでIはパルスモードとする。発生器の周波数 f_v が測定しようとする空間周波数であり、発生器Iのパルス(テレビモニター上でパルス幅 x_0 , 周期 X)でパルス振幅変調を行う。試験視標の極性はSW-1により正または負を選択する。発生器IIIの正弦波はマッチングに用いる基準用である。テレビモニターの上半分は試験パターンを下半分に基準パターンを表示する。このためのスイッチングパルスは垂直同期信号VDに位相結合した発生器IVの出力を用いる。試験視標と基準視標のコントラストのマッチングには基準信号の振幅を電氣的減衰器で制御することのほかに、減衰器AT-3によってブランキング混合増幅器で混合するブランキング信号の振幅を制御して基準パターンの平均輝度を制御する。テレビモニターは直流再生機能が充分あるものを用い、電気信号を忠実に視標として再現する必要がある。ここではテレビモニターとしてカラー用を

図3 実験のブロックダイアグラム
Blockdiagram of experiment.

白黒モードで用いた。

発生したパターンの一例を図4に示す。図4(a)は正極性、(b)は負極性の試験視標を上半分にし、下半分は基準視標を示す。(c)は(a)の輝度分布の説明図である。

4.2 実験方法

一定の視条件でテレビモニター上半分の試験視標の包絡のコントラストをモニター下半分の基準視標のコントラストを調整(AT-2による)してマッチングをとる。図4(c)の試験視標のAとBの明るさに基準視標のDとEの明るさを合わせた。この際、試験視標

(a) 正極性パターン

(b) 負極性パターン

(c) (a)パターンの波形

図4 試験視標と波形(上:試験視標,下:基準視標)
Test target and waveform.

(a) positive polarity pattern, (b) negative polarity pattern (upper: test target, bottom: reference target), (c) waveform of (a) pattern

図 5 極性による視覚の空間周波数特性
Spatial frequency response of vision by polarity.

(a) Subj.: HS, (b) Subj.: MM

---○--- positive polarity
—●— negative polarity

と基準視標の平均輝度のマッチングは AT-3 の調整による。試験視標の変化パラメーターはつぎの因子である。

(a) 空間周波数 0.15~1.5 cpd (cycle per degree) 周波数範囲は変調波が再現される範囲に制限される。

(b) 極性: 正負, 図 2, 図 4 参照。

(c) コントラスト (正負の極性で物理的に等しくする)

変調度 $m=0.08, 0.25, 0.6$ の 3 段階を使用, ただし変調度 $m=\Delta I/I$ (図 2 参照)。

見掛けの変調度 m' はマッチングをとった基準視標について I' と $\Delta I'$ を輝度計で測定して下式により計算する。

$$m' = \Delta I' / I'$$

視条件

暗室, 両眼自然視

視標サイズ: $17^\circ \times 12^\circ$ (カラーモニター: 中央無線 KK RGB 20 型)

視標平均輝度: 13 cd/m^2

視距離: 1.08 m

周波数範囲: 0.15~1.5 cpd (50~500 kHz)

試験波形: 図 2 参照。パルス周期 8 cpd (50% duty)

基準視標: 周波数 1.2 cpd

コントラスト範囲: 0.08~0.6 (変調度)

輝度計: Minolta Luminance Meter

被験者: 2 名 MM 26 歳 F 視力 1.2
HS 54 歳 M 矯正視力 1.0

(a) 被験者: HS

(b) 被験者: MM

図 6 視覚の空間周波数特性 (変調度 $m=0.16, 0.53$)
Spatial frequency response of human vision.
(a) Subject HS, (b) Subject MM

4.3 測定結果

3種のコントラストと両極性の空間周波数特性を被験者 HS, MM について図5に示す. 図5は横軸に空間周波数を取り, 縦軸にはマッチングで求めた見掛けの変調度 m' を dB 表示した. 白丸が正極性, 黒丸が負極性である.

図6には参考のために同じ測定条件で空間正弦波のコントラストを $m=0.16$, $m=0.53$ に選んだ場合の周波数特性を示す. この場合は被験者 HS, MM とも低コントラスト ($m=0.16$) では帯域通過フィルター形になる. 高コントラスト ($m=0.53$) では相対的に低域の感度が上昇して低域通過フィルターに近くなる. 一方, 極性によるパターンのは見えは図5に示すように低コントラストの条件では正極性, 負極性とも周波数特性の形は低周波で感度が低くなり, 図6での低コントラストの特性に似た形となる. 高コントラストでは正極性で低周波の感度が低下し, 負極性で低周波の感度が増大する.

5. 考 察

5.1 線拡がり関数との照合

提示パターンの輝度分布は(1)式で示されている. 視覚系がオンセンター形, オフセンター形のいずれの形をとるかは, パターンの輝度分布による. すなわち, 灰色の地に対して, 図が白か黒かの極性により見え方が異なる.

実験の結果から低コントラストではパターンの極性によらず低周波の感度が低くなる. 一方, コントラストが高くなる (例えば $m=0.6$) と正極性では低周波の感度が低下するが, 負極性では低周波の感度が高くなる. なお, 平均輝度が高いと感度が上昇するが, 図5の高コントラストでは平均輝度が多少低い負極性の方が感度が高くなっているのは, 極性の効果の方が平均輝度の効果よりも大きいためであろう. $m=0.08$ のような低コントラストでは平均輝度の差もほとんどなく, 極性の効果も小さいので正極性, 負極性の感度の差がなくなるはずであるが, 若干負極性の方が感度が高くなった.

実験ではパルス周期を 8 cpd としたが, これはテレビモニターの解像度や視覚の分解能により試験視標が図2に示したパルス変調波に見える範囲でなるべく高周波に選んだものである. このために変調信号の周波数は 1.5 cpd 以下に限られ, 図5に示すように低周波で感度が低下している特性も, 帯域通過型か高域通過形かは決定されない. しかし, 視覚の分解能が存在する点から, 図5で低周波の感度が低下している特性は

帯域通過形の低周波領域の特性を示しているものと推定される.

低コントラストで極性の差が出ないのは, すでに報告したように, 図形が2線の場合にも低コントラストでは正極性, 負極性とも側抑制が存在したことに対応し⁴⁾⁵⁾, 空間周波数特性も正極性, 負極性とも帯域通過形となった.

一方, 高コントラストでは2線パターンの場合には正極性では等価的に側抑制が存在し, 負極性では等価的に側抑制がなくなった⁴⁾. 測定した空間周波数特性もこの線拡がり関数の形に対応した形が得られ, 低周波領域での負極性の方が感度が高くなった.

5.2 閾上値の空間周波数との照合

視覚の空間周波数特性を分析すると図7に示すように, 帯域通過形は等価的に受容野の興奮に対応する広帯域の低域フィルター I と受容野の側抑制に対応する狭帯域の低域フィルター II の引算と見なすことができる. したがって, 図7に示すように正極性では常に I, II の帯域の異なる低域フィルターの差 III となっているのが, 負極性では低コントラストでは I, II が存在するが, 高コントラストでは側抑制に対応する II のフィルターが消失することになる.

このため, 視覚の空間周波数特性を通常为正負で対称的な空間正弦波を用いて測定すると, 閾値や低コントラストの特性は $\text{III} = 2(\text{I} - \text{II})$ の帯域通過形となり, 高コントラストでは $\text{IV} = (\text{正極性高コントラストの特性}) + (\text{負極性高コントラストの特性}) = (\text{I} - \text{II}) + \text{I} = (2\text{I} - \text{II})$ と低域通過フィルター形に近くなることが推定できる. ここで測定した図6でもすでに発表

図7 コントラストによる空間周波数特性
(低コントラスト $\text{III} = \text{I} - \text{II}$, 高コントラスト $\text{IV} = \text{I} - 0.5\text{II}$)
Spatial frequency response by contrast.
(Low contrast $\text{III} = \text{I} - \text{II}$,
High contrast $\text{IV} = \text{I} - 0.5\text{II}$)

図 8 数字の線幅と視認距離 (Berger⁴⁾)
(字の高さは 80 mm)

Relation between width of numeral and the distance of cognition. (by Berger⁴⁾) (Height of numeral is 80 mm)

—○— White numeral on black back ground
—●— Black numeral on white back ground

の測定例⁸⁾でもこのことが実証されている。

5.3 応用との関係

地に対する図の明、暗の見え方は、文字や図形の見え方に関係する。図 5 の結果は低周波領域では黒図形の方が白図形よりも感度が上昇している。文字の線幅と視認距離との関係を調べた結果は図 8 となっている⁶⁾。図 8 では、白地に黒文字の場合と黒地に白文字の場合とを比べており、図 8 に示すように線幅の狭い範囲では黒地に白文字の視認距離が大きくなっている。このことは、図 5 に示したように視覚の高周波の感度は黒図形、白図形でほとんど変わらないにもかかわらず、低周波の感度が高い黒図形の方が相対的に白図形よりも視認性が悪くなることを意味している。すなわち、図 5 に得られた視覚の空間周波数特性と図 8 の白文字、黒文字の視認性から、大面積の輝度変化に対応する低周波の感度が一定となるような視覚の自動利得制御機構が想定され、このために、高周波成分の感度が黒図形と白図形とで相対的に変化するものと推定される。

今後発展と思われる文字放送や OA での表示装置の文字には、視認性の点からは地を暗くして文字を明るくする組合せが良いことがわかる。なお、色図形、色文字については、視覚の分解能は明暗が色度の数倍もすぐれているので、1 次的にはほとんど色度の影響を受けることはない。むしろ、色の好みの点などが影響しよう。もちろん、2 次的には色度の影響もあ

るが、現在、明暗の極性に対応する色度の極性の現象が明確になっていないので、今後の検討課題である。

6. む す び

明図形、暗図形の見え方の基礎となる視覚の空間周波数特性を新しい試験視標により測定し、以下の結論を得た。

(1) 高コントラストパターンでは、正極性は低周波での感度が低下するのに対して負極性は低周波の感度が上昇する。低コントラストでは、極性によらず低周波で感度が低下する。このことは 2 線図形等の見え方より求めた低コントラストでは側抑制が存在しているのに、高コントラストでは負極性の場合に側抑制が消失することに対応している。

(2) 視覚の空間周波数特性は、コントラストが小さい場合の帯域通過フィルター形からコントラストが大きくなると低域通過フィルター形に移ることに対応するデータが、正極性と負極性の空間周波数特性の見え方から得られた。

(3) 文字などの 2 値図形の見やすい条件の基礎を得た。残された課題として色図形の見え方の基礎となる色度図形の効果についての検討および明暗での極性の効果の画像処理への応用などがある。

終りに、本研究の実施に当って検討いただいた放送科学基礎研究所視覚心理グループ(当時)各位、評定実験に参加された村口道子さんに感謝する。

(昭和 59 年 3 月 23 日受付、昭和 59 年 8 月 22 日最終受付)

【参 考 文 献】

- 1) 森、渡部、山口：“視覚の空間正弦波レスポンス”，NHK 技研月報，18，2，pp. 79-94 (1966)
- 2) H. K. Hartline, F. Ratliff：“Inhibitory Interaction of Onits in the Eye of Limulus”，J. Gen. Physiol., 40, pp. 357-376 (1957)
- 3) C. Enroth-Cugell, L. H. Pinto：“Pure Central Response of from Off-Center Cells and Pure Surround Response from On-Center Cells”，J. Physiol. (Lond.), 220, 2, pp. 441-464 (Jan., 1972)
- 4) 坂田晴夫：“明暗パターンの極性による見え方の違い”，応用物理学会講演会予稿，p. 89 (1983)
- 5) 坂田晴夫：“明暗図形の極性による応答の違い”，信学論誌，J67A, 5, pp. 415-422 (1984)
- 6) C. Berger：“Stroke, Width, Form and Horizontal Spacing as Determinants of the Threshold Recognition”，I, J. Appl. Psychol., 28, pp. 208-231 (Apr., 1944)
- 7) 坂田、磯野：“視覚における色度の空間周波数特性”，テレビ誌，31, 1, pp. 29-35 (Jan., 1977)
- 8) 磯野春雄：“電子通信ハンドブック第 30 編，第 1 部門 2 の図 11”

Spatial Frequency Characteristics of Vision Corresponding to Appearance of Figures with Different Polarities

by Haruo Sakata

When exposed to light, a gray background looks different in two cases: one where a white (positive polarity) figure is present in it, and the other where a black (negative polarity) figure is present. A psychophysical experiment is conducted to investigate how spatial frequency response corresponds to the above polarity-dependent appearances. Under high-contrast conditions, the positive-polarity spatial frequency response is a bandpass-filter type and the negative-polarity spatial frequency response is a low-pass-filter type. Under low-contrast conditions, the difference in response between the opposite polarities is insignificant. Moreover, in each case, the response is the bandpass-filter type.

J. Inst. TV Engrs. of Japan, Vol. 38, No. 12 (1984) 1069~1074

Electron-Beam Divergence and Current-Density Distribution of Camera-Tube Diode-Guns

by Yoshinori Hatanaka and Mitsuru Aoyama

The electron-beam divergence and current distribution of camera-tube diode-guns are studied experimentally and theoretically. This is done in consideration of the analytical results of the electron beam trajectory near the defining aperture of the diode-gun. It is found that the scattered electrons on the wall of the aperture hole increase beam divergence. For suppressing the beam divergence, a special double aperture and accelerating electrode formed into a conical shape are used. The electron beam divergences obtained are 0.3 to 0.65 degrees for G 1 voltages of 10 to 25 volts. They promise good resolution and low image lag characteristics for camera-tube applications.

J. Inst. TV Engrs. of Japan, Vol. 38, No. 12 (1984) 1075~1081