

研究速報

主観的輪郭知覚に基づく分光視感効率

内川 恵二・鈴木 修二・池田 光男

東京工業大学大学院総合理工学研究科 〒227 横浜市緑区長津田町 4259

(1990年6月26日受付, 1990年9月20日受理)

Spectral Luminous Efficiency Based on
Subjective Contour Perception

Keiji UCHIKAWA, Shuuji SUZUKI and Mitsuo IKEDA

Department of Information Processing, Tokyo Institute of Technology
Graduate School, 4259, Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama 227

(Received June 26, 1990; Accepted September 20, 1990)

Spectral luminous efficiency functions were measured by minimum subjective contour (MSC) method for 510 to 630 nm monochromatic lights in 10 nm steps with two observers in order to study by which attribute, luminance or brightness of stimuli, subjective contour was perceived. These functions were compared with those obtained by heterochromatic flicker photometry (HFP), minimally distinct border (MDB) and heterochromatic brightness matching (HBM) methods. Spectral luminous efficiency functions were found similar in shape with MSC, HFP and MDB methods, but clearly different in HBM method. This indicates that differences in luminance, not brightness, responses of stimuli determine subjective contour.

1. はじめに

主観的輪郭 (subjective contour) とは, たとえば, Fig. 1 のように, 円の一部分が欠けた図形 (ここでは 3/4 円図形とよぶ) を 4 個配置すると図の中央に四角形が知覚されるが, そのとき, 四角形の辺に対応して物理的に一様な面上にも見える輪郭のことをいう. Fig. 1 では周囲の背景よりやや明るい四角形が見えるが, このように主観的輪郭で囲まれた図と背景との明るさが異なる場合もある. 主観的輪郭を作るためには, まず, この例の 3/4 円図形に相当する刺激部分を背景から輝度, 色度, 動き, 両眼視差やテクスチャーなどといったある視覚的な次元で分離して見せなければならない. これまでの研究により, 3/4 円図形部分と背景の間には輝度 (luminance) 差が必要であり, それ以外の次元の差では主観的輪郭はなくなるか, あるいはきわめて弱くなってしまうことが報告されている¹⁾.

輝度差をもつ 2 刺激は無彩色の場合は明るさ (brightness) の差が生じる. しかし, 有彩色の場合は輝度差と

明るさの差は必ずしも一致せず, 等輝度の 2 刺激も色度が違うと等明るさにはならない場合がある²⁾. これまでの主観的輪郭の研究では輝度と明るさを明確に分離して扱っているものが少なく, 主観的輪郭が生じるために, 3/4 円図形部分と背景との間に輝度差が必要なのか, あるいは明るさの差が必要なのかについてはまだ十分検討されていない.

明るさには刺激の輝度成分だけでなく色成分も寄与している³⁾. したがって, 主観的輪郭が輝度差によるものか明るさの差によるものかを明らかにすることは, 形状の知覚に視覚系の色応答が影響するかどうかという点できわめて重要な問題である. また, これまでに境界の明瞭さ (border distinctness) といった空間的に細かい形状の知覚は輝度応答のみによっていることが明らかにされている⁴⁾. しかし, Fig. 1 の主観的輪郭のように, 複数の 3/4 円図形部分が空間的にある程度広い範囲に分布して初めて生じるという, いわば形状全体をとらえる視覚系の機能が輝度応答のみによるのか, あるいは色応答の寄与も受けているのかについてはまだ明らかとなつて

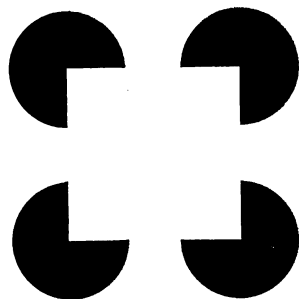


Fig. 1 A figure yielding subjective contour perception used in the present experiments.

いない⁵⁾.

そこで、ここでは、Fig. 1 に示した刺激パターンを用いて、3/4 円図形を参照白色光、背景をテスト単色光として、主観的輪郭が最も見えにくくなるという判断基準により分光視感効率を求めた。これを交照法、最小明瞭境界法 (MDB 法)、明るさマッチング法により求めた分光視感効率と比較して、主観的輪郭知覚が刺激の輝度差によるものか明るさの差によるものかを調べた。

2. 方 法

2.1 装 置

3 光路からなる光学系を用いた。光源は 300 W のキセノンランプである。刺激パターン (Fig. 1) はガラス板上に 4 個の 3/4 円図形部分が鏡面となり、背景部分は透明となるようにして作った。光路 1 はテスト単色光を干渉フィルターにより作り、光路 2 は参照白色光を作る。刺激パターンは光路 1 と 2 が垂直に交わる位置に置かれ、光路 1 の単色光が刺激パターンの背景部分を透過し、光路 2 の白色光が 3/4 円図形部分で反射されるようにした。これは 3/4 円図形部分と背景部分との境界での光学的な不一致をできるだけ少なくするためのものである。被験者はリアスクリーン上に投影された刺激パターンを観察する。光路 3 は交照法に用いる参照白色光を用意する。刺激パターンの 3/4 円図形は直径視角 1.1° 、隣り合う 3/4 円図形の間隔は端間が 0.55° である。3/4 円図形部分の色度座標は $x=0.345$, $y=0.363$ で輝度は 0.53 cd/m^2 一定である。この輝度値は各方法での判断が十分精度よく行われ、かつ、なるべく広い波長範囲からテスト光を選べるように、予備実験の結果を参考にして設定した。

2.2 手 続 き

被験者は最小主観的輪郭法 (minimum subjective contour, MSC 法)、交照法 (heterochromatic flicker

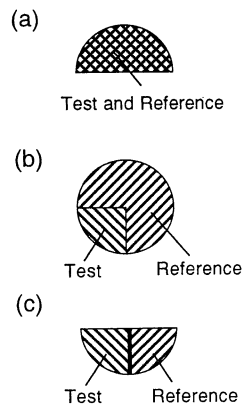


Fig. 2 (a) A stimulus field used for heterochromatic flicker photometry (HFP) method. A test and reference fields are spatially superimposed and temporally alternated. (b) A stimulus field used for minimally distinct border (MDB) method. (c) A stimulus field used for heterochromatic brightness matching (HBM) method.

photometry, HFP 法)、最小明瞭境界法 (minimally distinct border, MDB 法)、明るさマッチング法 (heterochromatic brightness matching, HBM 法)、の四つの方法により、3/4 円図形光を白色参照光として、背景のテスト単色光の強度を調節する。

MSC 法では被験者は主観的輪郭が最も見えにくくなる、あるいは消失するという判断基準を満足するように背景単色光の強度を調節する。背景光が 3/4 円図形光よりも強い場合には Fig. 1 のように中央に明るい四角形が見え、弱い場合には反対に暗い四角形が見える。このどちらの場合でも四角形の辺に対応した位置に主観的輪郭は生じる。しかし、背景光の強度をこの中間の値付近で調節すると主観的輪郭が最も見えにくくなるか消失して、中央の四角形が見えずに背景全体が連続した様な面に見えるようにできる。本実験では MSC 法の判断基準として、刺激パターンの中央部分に主観的輪郭による四角形が見えずに、背景全体が一様な面が見えてしまうという判断基準を採用した。この方法では、3/4 円図形白色光を参照光、単色背景光をテスト光として、主観的輪郭が最も見えにくくなるという判断に対応した分光視感効率が求められることになる。

HFP 法では光路 3 の白色光を背景の中央部に重ねて参照白色光とする。この参照白色光は直径 1.1° の半円形 (Fig. 2(a)) で輝度は 3/4 円図形白色参照光と交照法によりマッチングして等しくした。この方法では、背景も参照白色光にちょうど重なる部分だけを残して他の部分はマスクする。被験者は最小フリッカーの判断基準

でマッチングする。フリッカーの周波数は 10 Hz とした。MDB 法では Fig. 2(b)のように、刺激パターンの右上の一個の 3/4 円図形とそれと組み合わせられて円をなす 1/4 円背景光を残して、他の部分はマスクして見えないようにする。被験者は円形の視野内のカギ型の境界に注目して、その境界が最も見えにくくなる点を求める。HBM 法では Fig. 2(c)のように、MDB 法で用いた円形視野の上半分をさらにマスクし、下半分の視野だけを残す。さらに、左右の視野間に 6' のギャップを設けて 2 分視野を作る。被験者は右の参照白色光と左のテスト単色光の明るさが等しくなる点を求める。

被験者としては色覚正常の男性 2 名、HK (26 歳)、SS (24 歳) を用いた。テスト波長としては 510 から 630 nm までの単色光を 10 nm ステップに選んだ。被験者は実験ブース内に入り、まず、5 分間暗順応する。その後セッションを開始するが、セッション中に被験者が完全に暗順応してしまわないように、実験ブース内は足元が薄暗く照明されている。刺激パターンの周囲は暗黒である。1 セッション内では一つの判断基準だけを用いて実験する。実験者はランダムにテスト波長を選び光路 1 にセットする。被験者は与えられた判断基準により 1 回マッチングする。これを繰り返し、すべての波長が終わったらセッションの終了とする。セッション数は MSC 法では 8 回、HFP 法では SS は 8 回、HK は 5 回、MDB 法では 5 回、HBM 法では 8 回である。それぞれの判断基準のセッションもランダムな順序にして実験を行った。

3. 結果と考察

Fig. 3 に 4 方法で求めた分光視感効率を被験者別に実線で示す。被験者が設定したテスト単色光の強度の逆数を平均して対数軸上に波長の関数としてプロットしてある。また、比較のために標準分光視感効率 $V(\lambda)$ を図中破線で示した。曲線の形状の比較が容易になるように、すべての曲線は 570 nm で正規化してある。各テスト波長に対する被験者の設定の標準偏差は波長によりシステマティックな違いがなかったため、すべての値を平均して方法別に誤差棒として図中右上に示した。

Fig. 3 では最小主観的輪郭法 (MSC 法) による分光視感効率 (黒丸) は交照法 (HFP 法) によるもの (白三角) と最小明瞭境界法 (MDB 法) によるもの (白四角) とよく一致していることが示されている。さらに、この 3 者の曲線は $V(\lambda)$ 関数とも一致している。しかし、明るさマッチング法 (HBM 法) による結果 (白

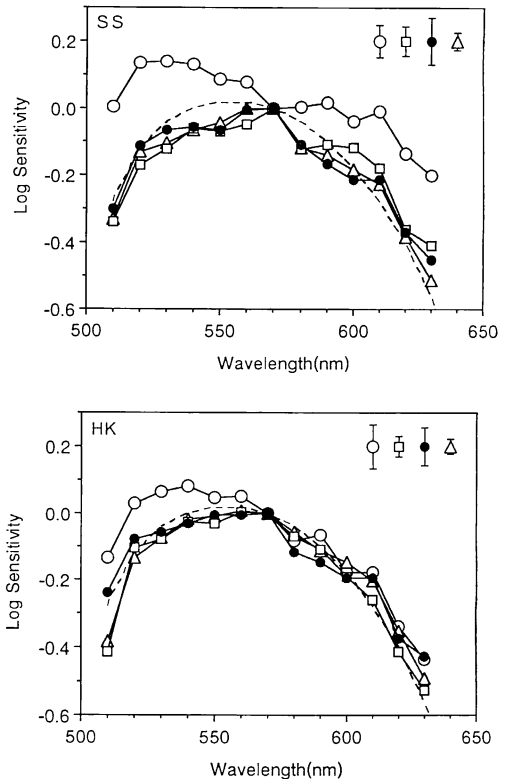


Fig. 3 Spectral luminous efficiency functions obtained with four methods for two observers SS and HK. ○ : heterochromatic brightness matching (HBM), □ : minimally distinct border (MDB), ● : minimum subjective contour (MSC), △ : heterochromatic flicker photometry (HFP) methods. Dashed curves indicate the standard spectral luminous efficiency function $V(\lambda)$. Mean standard deviations for four methods are shown in upper-right corners of each panel.

丸) は他の方法とは異なり、被験者 SS では 570 nm より長波長側および短波長側で感度が高く現れ、被験者 HK では短波長側で感度が高く現れている。また、各曲線の絶対的な位置関係は、570 nm で HBM 法による点に対して他の方法による点の対数値の差で表すと、それぞれ被験者 SS, HK で -0.024 , -0.008 (HFP 法), -0.065 , -0.0005 (MDB 法), -0.122 , -0.021 (MSC 法) である。各方法での差の値はあまり大きくないが、両被験者とも HBM 法による結果が HFP 法や MDB 法に比べて絶対的にも感度がよいことはこれまでの研究結果²⁾と一致する。しかし、それぞれの方法で参照白色光が必ずしも等しい刺激光ではないので、結果の絶対的な値の差を細かく論じることはできないと考えられる。

Fig. 4 は HFP 法により求めた値に対する他の 3

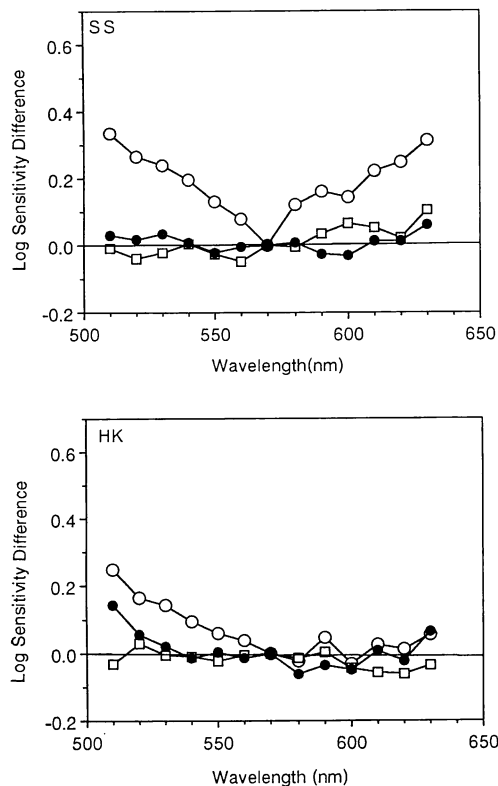


Fig. 4 Log difference of sensitivity values of HBM (○), MDB (□), and MSC (●) from that of HFP for two observers SS and HK.

方法の値の差をプロットしたものである。両被験者ともHFP法による結果に対して、MSC法とMDB法による結果はほとんど差がなく、HBM法による結果だけが差が大きく現れている。この差は570 nmよりテスト波長が長波長および短波長方向に離れるにつれて増大している。

HFP法とMDB法では刺激の輝度に対応する分光視感効率が求まるので⁴⁾、これらの方法による結果と $V(\lambda)$ 関数が一致していることはこれまでの研究結果を裏付けている。また、HBM法による結果が輝度タイプの関数よりも感度が高くなることは明るさ・輝度不一致(B/L 効果)としてよく知られていることである^{2,3)}。しかし、MSC法による分光視感効率が輝度タイプの関数と一致し、明るさタイプの関数とは異なっていることは本研究で初めて明らかにされたもので、主観的輪郭は刺激(ここでは3/4円図形と背景)間の輝度差が決定要因であり、明るさの差ではないことが明確となった。

HBM法では分光視感効率関数の形状に被験者間の相違がみられた(Fig. 3)。明るさの分光視感効率関数は

被験者による差が大きいことはこれまで多数の研究によって報告されている⁶⁾。これは視覚系の色応答の明るさへの寄与が被験者によって異なっているためであると解釈されている⁷⁾。本実験でのSSとHKの違いもこれまでに報告されている被験者間の違いと同様なものであることから、ここでも色応答の明るさへの寄与の違いが現れていると考えられる。

本実験結果として、主観的輪郭が生じない輝度条件は3/4円図形と背景間に輝度差がないことが得られたが、この条件はまた図形と背景間に明瞭なエッジが生じない条件でもある。しかし、二つの条件が一致したからといって必ずしも、図形と背景間の局所的なエッジが主観的輪郭を生じさせているとはいえず、ここで明らかとなったことはこの二つの知覚がどちらも図形と背景間の輝度差から生じる現象であるということである。局所的なエッジが主観的輪郭の必要条件であるかどうかはこれからの研究で明らかにしていかなければならない。主観的輪郭はいくつかの図形が空間的に離れて配置されて初めて見える現象であるから、そこには全体としての形、本実験では主観的形狀の四角形、をとらえる知覚が働いていると考えられる。したがって、本実験結果は全体として形をとらえる知覚においても視覚系の輝度応答が重要であることを示している。これは局所的、全体的を問わずに視覚系には輝度応答により形状の情報を伝え、色応答の寄与のある明るさは形状が決まった後に面に付加されるような機能の存在を示唆している。

4. おわりに

本実験では、最小主観的輪郭法、交照法、最小明瞭境界法(MDB法)と明るさマッチング法により分光視感効率を求めた。その結果、最小主観的輪郭法による分光視感効率は交照法、MDB法によるものと一致し、明るさマッチング法によるものとは明らかに異なっていた。したがって、主観的輪郭を生む要因は、刺激の輝度であり、明るさではないことが示された。本研究により、これまであいまいにされていた主観的輪郭形成における刺激の輝度と明るさの違いが明らかとなったといえる。本実験では分光視感効率を求めることを目的としたために単色光をテスト光として用いた。しかし、そのため、装置上の制限からテスト刺激は低輝度となり、510 nmより短波長の刺激を用いることができなかった。青領域も含む高輝度刺激については今後の課題といえる。

最後に、本研究を進める上でご助言をいただいた千葉大学工学部の塩入諭氏に感謝いたします。

文 献

- 1) P. Cavanagh: "Reconstructing the third dimension: interactions between color, texture, motion, binocular disparity, and shape," *Comput. Vision Graphics Image Processing*, **37** (1987) 171-195.
- 2) K. Uchikawa, H. Uchikawa and P. K. Kaiser: "Luminance and saturation of equally bright colors," *Color Res. Appl.*, **9** (1984) 5-14.
- 3) 内川恵二, 内川弘美: "等明るさ色光の輝度-彩度関数のモデル", *光学*, **14** (1985) 468-471.
- 4) G. Wagner and R. M. Boynton: "Comparison of four methods of heterochromatic photometry," *J. Opt. Soc. Am.*, **62** (1972) 1508-1515.
- 5) P. Cavanagh, S. Shioiri and D. I. A. MacLeod: "Is the achromatic form pathway based on luminance or brightness?," *Invest. Ophthalmol. Visual Sci. Suppl.*, **28** (1988) 362.
- 6) CIE: *Spectral Luminous Efficiency Functions Based upon Brightness Matching for Monochromatic Point Sources, 2 and 10 Fields*, Publication CIE No. 75 (Central Bureau of the CIE, Paris, 1988).
- 7) Y. Nakano, M. Ikeda and P. K. Kaiser: "Contribution of the opponent mechanisms to brightness and nonlinear models," *Vision Res.*, **28** (1988) 799-810.