

輝度と彩度の相関に基づくテクスチャー弁別

齋藤 晴美^{*,**}・竹内 龍人^{**}

* 東京大学人文社会系研究科 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1

** 日本電信電話株式会社 NTT コミュニケーション科学基礎研究所 〒243-0198 厚木市森の里若宮 3-1

Texture Discrimination Based on the Correlation between Luminance and Saturation

Harumi SAITO^{*,**} and Tatsuto TAKEUCHI^{**}

* Graduate School of Humanities and Sociology, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033

** NTT Communication Science Laboratories, Nippon Telegraph and Telephone Corporation, 3-1 Morinosato Wakamiya, Atsugi 243-0198

The human visual system exploits the correlation between luminance and saturation to estimate effects of illumination. In this study, we have examined whether texture pattern could be discriminated based on the correlation between luminance and saturation. We found that the discrimination performance between adjacent texture regions increased as the difference in the correlation between luminance and saturation increased. Discrimination performance for the positive correlation was higher than that of negative. We also found that when the space was inserted between texture elements, the discrimination performance was greatly decreased. Our results indicate that the human visual system is sensitive to the correlation between luminance and saturation, and acquires the information of luminance and saturation from a continuously structured image.

Key words: texture discrimination, luminance, saturation, correlation

1. はじめに

自然界では、照射される光と、それを受ける物体の位置関係から影が形成される。一方で、複数の表面間では、ある表面から反射された光が別の表面に照射されるという相互反射が起こる。ある2つの同じ色をもつ表面間の間隔が狭く、一方の表面によって影ができていた部分は、同時にその表面から反射された光を多く受けることで色の鮮やかさが増し、暗くかつ色が鮮やかになる。このことから、自然画像においては輝度が低い部分は彩度が高く、輝度が高い部分は彩度が低くなるという傾向がある^{1,2)}。Fig. 1は、自然画像における輝度と彩度の関係をプロットした図である。縦軸の彩度は、赤/緑反対色メカニズム³⁻⁶⁾からの応答に基づいている。縦軸では、原点において無彩色であり、上側にいくほど彩度が高くなり、すなわち色みが増す。横軸では、右側になるほど輝度が高くなる。自然画像における輝度と彩度の関係は、Fig. 1にみられるように右下がり

のグラフとなる。このように、自然画像においては、輝度と彩度の高低の間に負の相関関係がみられる。

この輝度と彩度の相関関係という情報は、視覚系によって色の恒常性など高次の視覚機能に利用されているといわれている^{7,8)}。従来、色の恒常性に関して輝度と彩度の相関関係を扱った実験では、輝度と彩度の相関関係が変化するような背景刺激の中にテスト領域を置き、標準刺激に対して等色させるという、テスト領域の色の見えを調べる手法が主であった^{7,9)}。この方法により、輝度と彩度の相関関係の情報が物体の色の見えに影響を与えることが示されてきた^{7,8)}。

本研究では、視覚系が輝度と彩度の相関関係という情報自体を検出し、利用できるか否かを検討するため、輝度と彩度の相関のみを手がかりとしたテクスチャー面の弁別実験を行った。もし、輝度と彩度の相関関係の違いからテクスチャーが弁別された場合、輝度あるいは彩度という単一

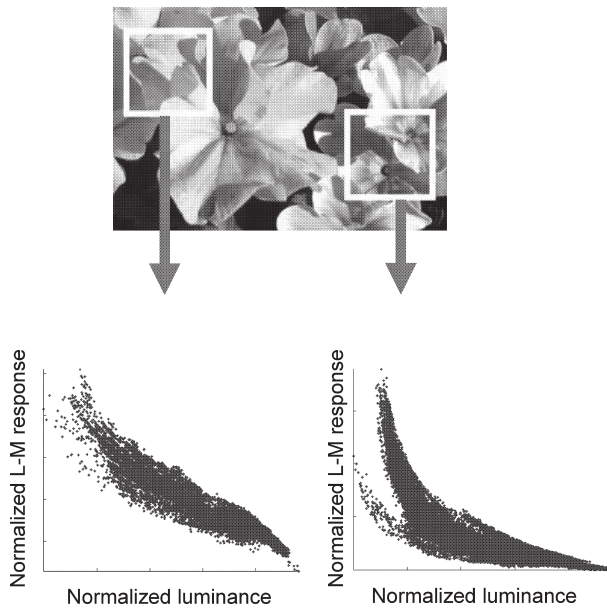


Fig. 1 The scatterplot of luminance and saturation of a part of the natural image. The horizontal axis denotes normalized luminance and the vertical axis denotes normalized L-M response, which corresponds to saturation. Luminance increases along the horizontal axis from left to right side and saturation increases along the vertical axis from bottom to top.

の要因ではなく、輝度と彩度の相関関係という高次の統計量をもつ情報が検出され、利用されたことによるということが出来る。また、実験では、輝度と彩度がともに低い色と、輝度と彩度がともに高い色を集合させた正の相関関係と、その逆である負の相関関係の2つの条件を用いた。自然界では負の相関関係がより典型的にみられるが、今回の実験では、相関関係の正と負でテクスチャー弁別のしやすさ、すなわちどの程度相関が異なった場合にテクスチャーが弁別できるかという弁別閾に違いが表れるかどうかを検討した。

2. 実験手続き

2.1 被験者

1名のナイーブな被験者 (KY) と、2名の著者 (TT, HS) が実験に参加した。各被験者とも正常な視力を有していた。また、石原色覚検査表と Farnsworth-Munsell の 100 ヒューテストにより、色覚正常であることを確認した。

2.2 装置

視覚刺激はコンピューターによって制御された VSG2/4 (Cambridge Research Systems 社製) により、15ビットの階調で作成し、21インチのカラーモニター (SONY 社製 GDM-F520) に呈示した。モニターの解像度は 640×480 ピクセル、フレーム周波数は 140 Hz であった。実験

前に、色彩輝度計 (Cambridge Research Systems 社製 ColorCAL) によってモニターの γ 補正を行った。刺激の観察距離は 80 cm とし、実験中、被験者は顎台によって頭部を固定した。実験は暗室内で行った。

2.3 刺激

刺激は $7.5^\circ \times 7.5^\circ$ の正方形のテクスチャーとした。このテクスチャーは 50 個 \times 50 個のテクスチャー要素から構成され、各要素の大きさは $0.15^\circ \times 0.15^\circ$ であった。テクスチャー要素は単一の色相をもち、輝度と彩度を独立に変化させた (輝度と彩度の定義は後述)。テクスチャー全体を中央で上下あるいは左右に二分し、2つの領域間でテクスチャー要素の輝度と彩度がそれぞれ異なる相関関係をもつようにした。各要素の輝度は、テクスチャー全体でランダムとなるように配置した。Fig. 2 上段は、刺激の特徴を簡潔に示した図 (テクスチャー要素を実際よりも少なく図示) である (実際のテクスチャー刺激の例は Fig. 3 に示した)。Fig. 2 上段は例としてテクスチャーを縦に二分し、刺激の左右の領域で輝度と彩度が異なる相関関係をもつようにしたものである。左右それぞれの領域について、テクスチャー要素の輝度と彩度の関係を Fig. 2 下段のグラフに示した。グラフは縦軸が彩度変化、横軸が輝度変化を表している。Fig. 2 の刺激は、左右の領域とも輝度と彩度が負の相関関係 (輝度が低く彩度が高い色と、輝度が高く彩度が低い色の集合) をもつが、左側の領域は輝度と彩度の関係が直線関係にある色の集合 (相関係数 $R = -1.0$)、右側の領域は同じ負の相関関係でも、より相関が弱くなるような色の集合 (相関係数 $R = -0.5$) となるように輝度と彩度の組み合わせを決定している。このような輝度と彩度の組み合わせは、ピアソンの積率相関係数 (R) によって求められる回帰直線およびその予測の誤差を考慮して作成した。輝度と彩度の組み合わせの操作は、相関係数 R の値を変化させることで行った。

輝度と彩度の相関係数 R を変化させた際の、テクスチャーの変化の様子を Fig. 3 に示す。Fig. 3 右側は、テクスチャーの左半分を相関係数 $R = -1.0$ によって固定し、右半分の相関係数を変化させた様子を表している。Fig. 3 左側のグラフは、この図におけるテクスチャー要素の輝度と彩度の相関関係を、テクスチャーの各領域ごとに分けて表したものである。グラフの縦軸は各テクスチャー要素の彩度を表している。原点を無彩色として、実験で用いた最大の彩度まで錐体コントラストを変化させていくことにより、異なる彩度をつくり出している。縦軸において、下から上へいくにつれて、テクスチャー要素の色がより鮮やかになる。一方、横軸は、各テクスチャー要素の輝度を表し

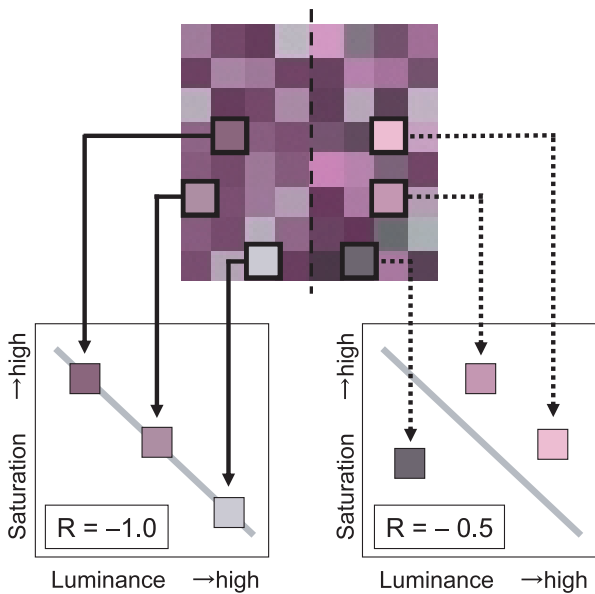


Fig. 2 (Upper) A schematic representation of the stimulus in Experiment 1. Texture is divided vertically to have the different correlation between luminance and saturation in each region. Luminance of each texture element was determined randomly. Saturation of each texture element was determined based on the correlation with the luminance. (Lower) The horizontal axis denotes luminance of texture elements selected from the upper figure. The vertical axis denotes saturation of the same elements. The left figure represents $R = -1.0$ and the right figure represents $R = -0.5$. “ R ” is the correlation coefficient.

ている。Fig. 3 左側のグラフ内の赤い印は彩度と輝度の相関係数が $R = -1.0$ の場合で、青い印はもう一方の相関係数 ($R = -0.9, -0.7, -0.5$) の場合に対応する。被験者の課題は、このように半分の領域で相関係数が異なっているテクスチャー刺激について、境界線が縦と横のどちらであるかを回答させるものであった。Fig. 3 の場合は、縦に境界線がある。

テクスチャー要素の色相は、外側膝状体 (以下 LGN) の神経細胞の色応答特性に基づく MBDKL 色空間³⁻⁶⁾ から選択した。MBDKL 色空間は、1 本の輝度軸と、2 本の色度軸 (LM 軸, S 軸) からなっている。これは、輝度応答と 2 種類の反対色応答という、LGN において独立していると考えられている 3 種類の細胞応答に対応している⁵⁾。本実験では、MBDKL 色空間内の等輝度平面上にある 2 つの色度軸のうち、L 錐体と M 錐体からの拮抗的な入力を受ける P 細胞の応答に対応する LM 軸上の色を用いた。LM 軸において、L 錐体がより強く興奮した状態である色を L-M 色 (ピンク色)、M 錐体がより強く興奮した状態である色を M-L 色 (青緑色) と呼ぶ。本実験での最大の彩度の色は、M-L 色はモニターの色再現範囲 (gamut) の

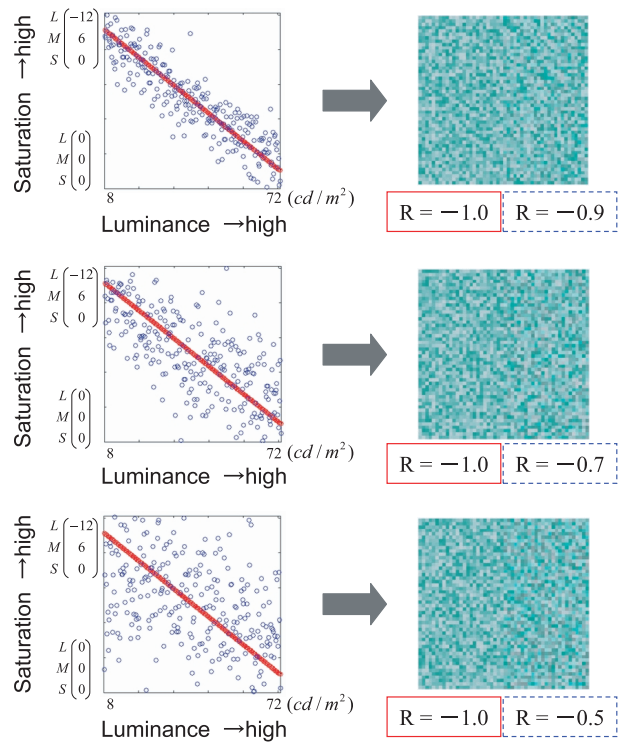


Fig. 3 The left graphs are scatterplot of saturation (the vertical axis) specified by the L, M, and S cone contrasts and luminance (the horizontal axis) of each texture element. Red circles represent $R = -1.0$, and blue circles represent $R = -0.9, R = -0.7$ or $R = -0.5$ from upper to lower, respectively. Corresponding texture patterns are shown on the right side. R equals -1.0 in the right region of the texture pattern.

限界点での色とし、一方 L-M 色は、錐体コントラストの絶対値をこの gamut 点での M-L 色と等しくしたものを用いた。本実験で用いた 2 色について、L-M 色は L 錐体コントラスト 12%, M 錐体コントラスト $-6%$, S 錐体コントラスト 0% であった。一方 M-L 色は、L 錐体コントラスト $-12%$, M 錐体コントラスト 6%, S 錐体コントラスト 0% であった。Fig. 3 に示したテクスチャーは M-L 色を用いた刺激の例であり、テクスチャー要素の彩度は、無彩色 (灰色、各錐体コントラストは $L = 0%$, $M = 0%$, $S = 0%$) から最大の彩度 (各錐体コントラストは $L = -12%$, $M = 6%$, $S = 0%$) まで変化している (Fig. 3 左側グラフの縦軸)。

M-L 色と L-M 色を CIE1931 (x, y) 色度座標図上で表したものが Fig. 4 である。Fig. 4 において、M-L 色の最大彩度の色は丸印 (○)、L-M 色の最大彩度の色は四角印 (□) で示した。図中の灰色の実線は、本実験に用いたモニターの色再現範囲 (gamut) である。図中×印は無彩色 (W) である。Fig. 2 が L-M 色、Fig. 3 が M-L 色の例である。

本実験において、テクスチャー要素の輝度変化と彩度変化は、Smith と Pokorny¹⁰⁾ の錐体分光感度関数に基づく錐体応答量によって操作した。輝度を変化させる場合は、無彩色（灰色）を保つために、L, M, S すべての錐体応答量を同方向に等間隔で変化させた。本実験での刺激の平均輝度は 40 cd/m²、輝度のマイケルソンコントラストは 0.8 とし、無彩色の CIE1931(x, y) 色度座標値は W = (0.29, 0.33) であった。したがって、Fig. 3 左側の横軸に記したように、各テクスチャー要素の輝度は 8.0 cd/m² から 72.0 cd/m² まで変化した。

一方、彩度は LM 軸上において、L, M の錐体応答量を反対方向に等間隔で増減させることによって、等輝度平面上を無彩色からそれぞれの色の最大彩度まで変化させた。無彩色 (Fig. 4 における W) の錐体応答量を LW, MW, SW, 決定した最大彩度の L-M 色または M-L 色の錐体応答量を L, M, S とおくと、無彩色から最大彩度の色にかけての錐体応答量の変化の様子は以下の式によって表せる。

$$L_k = LW + \{(L - LW) / (N - 1)\} (k - 1) \quad (1)$$

(k = 1, 2, 3, ..., N)

$$M_k = MW + \{(M - MW) / (N - 1)\} (k - 1) \quad (2)$$

$$S_k = SW + \{(S - SW) / (N - 1)\} (k - 1) \quad (3)$$

Fig. 4 の実線は、この式に基づき錐体応答量を無彩色 (Fig. 4 の × 印) から L-M 色 (Fig. 4 の □ 印)、あるいは M-L 色 (Fig. 4 の ○ 印) まで等輝度平面上を変化させた様子である。本実験では、この錐体応答量の操作により、無彩色（灰色）から最大彩度（L-M 色, M-L 色）まで色の鮮やかさを変化させ、各テクスチャー要素の彩度とした。本実験では、彩度を 253 段階 (N = 253) で変化させた。各テクスチャー要素における彩度変化の様子を、Fig. 3 左側のグラフに示した。

Fig. 3 右側および Fig. 6 に示した刺激の作成においては、まず、テクスチャー刺激を構成する各テクスチャー要素に輝度値をランダムに割り当てた (Fig. 3 左側図の横軸)。そして、その輝度値と相関係数に応じて各テクスチャー要素の彩度を決めた (Fig. 3 左側図の縦軸)。

2.4 手 続 き

実験では、正方形のテクスチャーを上下または左右に二分し、そのうち一方の領域の相関係数を基準として 1 種類に固定する。基準の相関係数には相関係数 R = 1.0, R = -1.0 の 2 種類を用いた。この 2 種類を基準として用いた理由は、相関の正と負によって物体の色の見えが変化するという研究結果^{7,8)} との関連を検討するためである。

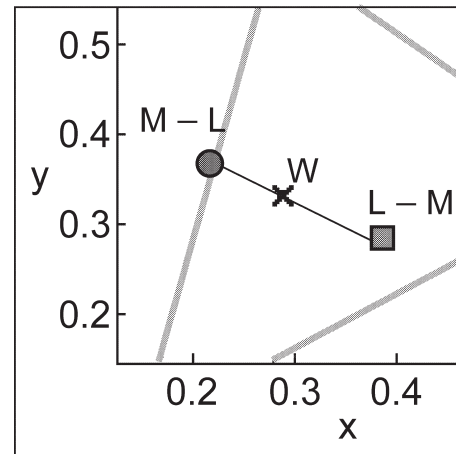


Fig. 4 The circle (○) and the square (□) represent the maximum saturation of M-L color and L-M color, respectively. W is the white point in the CIE1931 xy Chromaticity Diagram. Saturation of each texture element was varied along the line. Three gray lines represent the monitor gamut.

もう一方の領域の相関係数は、基準の相関係数に対して 0.1 刻みで、6 段階に変化させた。

刺激は、背景が黒色の画面の中央に 1 秒間呈示された。実験は、1 つの基準の相関係数に対し、相関係数の変化が 6 段階、色相が 2 種類 (L-M, M-L)、分割の方向が 2 種類 (縦, 横)、試行の繰り返しが 8 回の計 192 試行を 1 ブロックとし、恒常法により呈示した。実験は全体で 12 ブロック行った。基準の 2 種類の相関係数はブロックごとにランダムに用い、基準の相関係数をもつ領域の位置は試行ごとにランダムに変化させた。被験者の課題は領域が上下左右どちらに分割されているかを回答する 2 肢強制選択とし、回答に対するフィードバックは与えなかった。各ブロック間には十分な休憩をとった。

なお、実験の前に、各被験者に対して、最大彩度の L-M 色および M-L 色と、平均の無彩色（灰色）との間で、それぞれ交照法による主観的等輝度設定を行った。また、2 章 3 節で記したように、各テクスチャー要素の輝度値はランダムに割り振られているが、彩度の分布は相関係数に応じて異なっている。そのため、彩度と輝度情報の相関関係に基づくテクスチャー弁別の検討が本研究の目的であるにもかかわらず、彩度情報のみでテクスチャー弁別が遂行できてしまう可能性がある。そこで、本実験を行う前に、輝度変化がなく各テクスチャー要素の彩度のみが変化する、主観的等輝度に保ったテクスチャー刺激を用いた弁別課題を行った。この実験の結果、彩度情報のみではテクスチャー弁別が不可能であることを確認した。

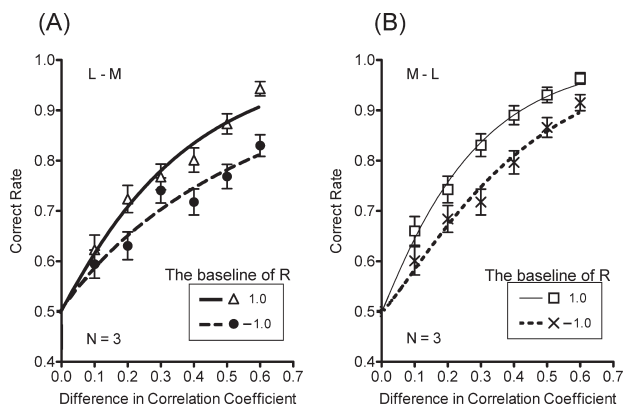


Fig. 5 Results of Experiment 1. Averaged data of the three subjects. The vertical axis denotes the correct rate. The horizontal axis denotes the difference in correlation coefficient between two texture regions. Different symbols represent the baseline of correlation coefficient. The color of stimulus is L-M color in (A), and M-L color in (B). Curves represent the best fitting Weibull function. Error bars represent ± 1 SE.

3. 実験 1

テクスチャー要素の輝度と彩度の相関関係の違いによって、テクスチャーが弁別されるかどうか調べた。また、輝度と彩度の相関係数が正である場合と負である場合で、テクスチャー弁別の結果の違いが表れるか否かを検討した。

3.1 結果

被験者3名の正答率の平均を Fig. 5 (A), (B) に示す。(A) は、L-M 色の刺激について、基準として用いた相関係数の正負 ($R=1.0$ と $R=-1.0$) によって正答率を比較したものである。(B) は、M-L 色の刺激について、同様に基準として用いた相関係数の正負によって正答率を比較したものである。縦軸は課題の正答率、横軸はテクスチャー内の2つの領域間の相関係数の差を示す。基準として用いたテクスチャーの相関係数が $R=1.0$ の場合は、もう一方のテクスチャーの相関係数を 0.9, 0.8, … と変化させた場合の正答率の変化を示しており、一方基準として用いたテクスチャーの相関係数が $R=-1.0$ の場合は、もう一方のテクスチャーの相関係数を $-0.9, -0.8, …$ と変化させた場合の正答率の変化を示している。グラフ内の各点はそれぞれの条件における正答率の平均値であり、曲線は Weibull 関数による非線形近似の結果である。Weibull 関数の式は以下である。

$$Y = (1 - 0.5) \exp\{- (X/\alpha)^\beta\} \quad (4)$$

X はテクスチャー内の2つの領域間の相関係数の差、

Y は正答率を表す。Weibull 関数におけるパラメーター α は正答率 83% の点を示し、弁別閾を表す指標として用いた。 α 値が小さいほうが、2つの領域間の相関係数の差がより小さいときに弁別が可能であった(すなわち、弁別の感度が高かった)といえる。パラメーター β は近似曲線の傾きを表している。

各実験条件における α 値は、L-M 色で基準の相関係数が $R=1.0$ の場合 $\alpha=0.363$ (Fig. 5 (A) における実線)、L-M 色で基準の相関係数が $R=-1.0$ の場合 $\alpha=0.613$ (Fig. 5 (A) における破線)、M-L 色で基準の相関係数が $R=1.0$ の場合 $\alpha=0.271$ (Fig. 5 (B) における実線)、M-L 色で基準の相関係数が $R=-1.0$ の場合 $\alpha=0.412$ (Fig. 5 (B) における破線) となった。

この α 値を用いた t 検定によって、各条件間の結果の比較を行った。結果の比較は、被験者3名の平均値に基づいて行った。Fig. 5 (A), Fig. 5 (B) に表された基準の相関係数の正負による比較では、L-M 色、M-L 色どちらの色においても、相関係数 1.0 を基準とした条件のほうが有意に α 値が低かった [$t(10)=3.674, p<.01$ (L-M 色); $t(10)=7.175, p<.001$ (M-L 色)][†]。また、テクスチャー要素の色相により比較すると、相関係数 $-1.0, 1.0$ 基準どちらの条件においても、M-L 色の条件のほうが有意に α 値が低かった [$t(10)=4.067, p<.001$ ($R=1.0$ 基準); $t(10)=2.996, p<.05$ ($R=-1.0$ 基準)]。

以上のように、実験1では、2つの領域間の相関係数の差が大きくなるにつれて弁別課題の正答率が上がることがわかった。このことから、テクスチャー要素の輝度と彩度の相関関係の違いからテクスチャーが弁別されることが示された。そして、基準の相関係数が $R=-1.0$ であるよりも $R=1.0$ であるほうが、またテクスチャー要素の色相が L-M 色であるよりも M-L 色であるほうが、弁別閾が低くなることがわかった。

3.2 考察

輝度と彩度の相関関係の違いからテクスチャーが弁別されたことから、視覚系が輝度と彩度の相関という情報を利用していることがわかった。輝度と彩度の高次統計量は色の恒常性に利用されていると指摘されているが^{7,8)}、本研究の結果は、三次元情報や輪郭情報をもたないテクスチャー刺激の弁別においても、視覚系がこの輝度と彩度の相関情報を利用できることを示している。

本実験の刺激では、刺激全体がもたらす錐体応答量の総和は相関係数に依存せず一定である。つまり、相関係数

[†] 自由度 $10 = (\text{データ点 } 7 \text{ 個} - \text{パラメーター数 } 2 \text{ 個}) \times \text{基準の相関係数 } 2 \text{ 通り}$ 。

$R=1.0$ を基準として $0.9, 0.8, \dots$ と変化する場合と、相関係数 $R=-1.0$ を基準として $-0.9, -0.8, \dots$ と変化する場合で、刺激がもたらす錐体応答量の変化は等しいため、両者の間で弁別成績が異なったことを錐体応答量の変化から説明することはできない。したがって、基準の相関係数の正負による弁別閾の違いは錐体レベルではなく、より高次の色彩処理段階が関係しているものと考えられる。

また、テクスチャー要素の色相が L-M 色よりも M-L 色である場合に弁別成績がよかった。L-M 色は M-L 色の錐体コントラストを反転させたものであるため、錐体コントラストの違いからはこの非対称性は説明できない。この結果も、錐体レベル以降の処理過程によりもたらされる色の見えが影響していると考えられる。本実験で用いた 2 つの色相を比較した場合、弁別成績のよかった M-L 色のテクスチャー刺激は、L-M 色のテクスチャー刺激よりも彩度が高く知覚される（より鮮やかに知覚される）と全被験者が報告した。テクスチャー弁別の成績は、このような見かけの彩度に依存している可能性もあり、これは今後の検討課題である。例えば、異なる色相間で見かけの彩度が等しくなる条件のもとで同様の実験を行うことにより、この点を明らかにすることができると考えられる。

4. 実験 2

実験 2 では、実験 1 で観察された輝度と彩度の相関関係に基づくテクスチャー弁別が可能になる条件として、テクスチャー要素間の空間的な距離を検討した。テクスチャーの弁別が可能となるテクスチャー要素間の空間的な距離は、テクスチャーを規定する視覚属性により変化する。例えば、テクスチャー要素の位相や方位、運動方向が弁別の手がかりとなる場合、テクスチャー要素間の距離がその要素の大きさの数倍になっても弁別精度が変化しない¹¹⁻¹³⁾。実験 2 では、実験 1 で用いた刺激のテクスチャー要素をそれぞれ分断し、テクスチャー要素の空間的な連続性を失わせた。テクスチャー要素間の距離を増加させることによる空間的な連続性の喪失が、テクスチャー弁別に影響を及ぼすか否かを検討した。

4.1 刺激

実験 1 で用いたテクスチャーの各テクスチャー要素間に間隔をあけた。Fig. 6 (B) は、実験 2 に用いた刺激の例である。比較のために、実験 1 で用いた刺激の例を Fig. 6 (A) に示している。Fig. 6 (B) におけるテクスチャー要素間の間隔の幅は 0.1° (2 ピクセル) とし、テクスチャー全体の大きさは $12.4^\circ \times 12.4^\circ$ とした。実験 2 のテクスチャー要素の輝度と彩度の関係は、実験 1 の刺激と同様であ

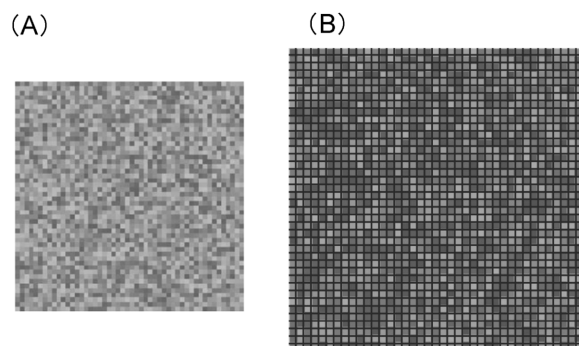


Fig. 6 (A) An example of stimulus in Experiment 1. (B) An example of stimulus in Experiment 2. The same texture as in (A), but each texture element is separated.

る (Fig. 2 参照)。テクスチャー要素間の間隔の影響がなければ、弁別の正答率は実験 1 と同じ傾向を示すと考えられる。

なお、1 名の被験者 (HS) において、テクスチャー要素間の幅を $0.05^\circ, 0.15^\circ$ に変化させた実験と、背景およびテクスチャー要素間の間隔部分を白色 (輝度 72 cd/m^2) とした実験を行った。実験 2 の手続きは実験 1 と同じであった。

4.2 結果と考察

Fig. 7 は、実験 2 の各実験条件について、被験者 3 名の正答率の平均を示したグラフである。各グラフ内に、テクスチャー要素の色相 (L-M, M-L) と、基準とした相関係数の値 ($R=1.0, R=-1.0$) を示している。灰色の実線は、各条件の実験 1 での正答率の近似曲線を表している (Fig. 5 よりプロット)。縦軸は課題の正答率、横軸はテクスチャー内の 2 つの領域間の相関係数の差を示す。Fig. 7 にみられるように、テクスチャー要素間の間隔をあけた場合のテクスチャー弁別の正答率は、実験 1 と比較して非常に低かった。Weibull 関数によって近似できた条件において、正答率 83% を示すパラメーター α の値は、L-M 色で基準の相関係数が 1.0 の場合 $\alpha=0.967$ (Fig. 7 (A))、M-L 色で基準の相関係数が 1.0 の場合 $\alpha=0.804$ (Fig. 7 (C))、M-L 色で基準の相関係数が -1.0 の場合 $\alpha=0.743$ (Fig. 7 (D)) となった。

α 値により実験 1 と実験 2 の間で t 検定を行ったところ、実験 1 のほうが有意に α 値が低い、すなわち弁別の成績がよかった [$t(10)=2.58, p<.05$ (L-M 色, $R=1.0$ 基準); $t(10)=4.51, p<.01$ (M-L 色, $R=1.0$ 基準); $t(10)=9.65, p<.001$ (M-L 色, $R=-1.0$ 基準)]. Fig. 7 (B) に示した、L-M 色で相関係数 -1.0 を基準とする条件では、正答率が 0.5 付近となり、課題の遂行がほぼ不可能であったことがわかる。

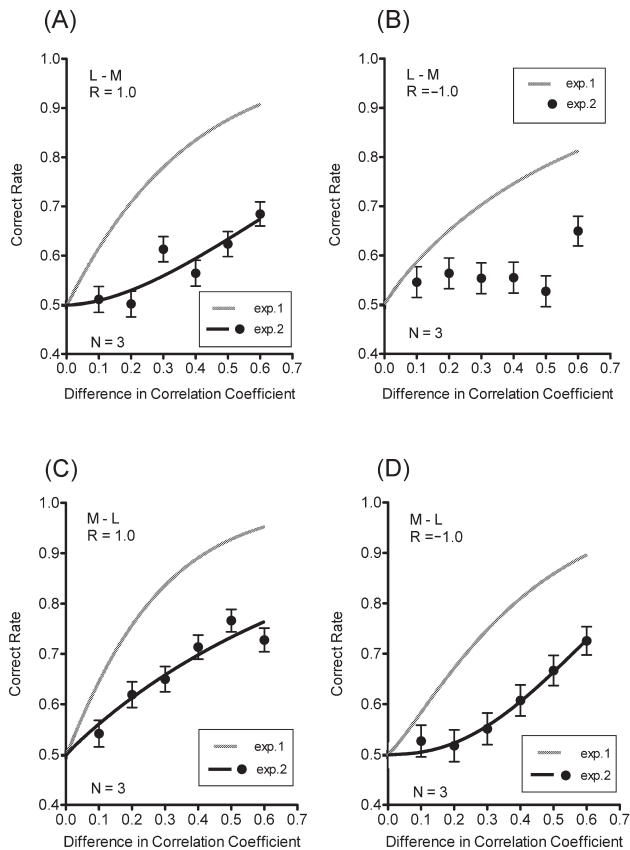


Fig. 7 Results of the four experimental conditions in Experiment 2. The vertical axis denotes the correct rate. The horizontal axis denotes the difference in correlation coefficient between two texture regions. The color of stimulus and the baseline of correlation coefficient are shown on the upper left in each graph. The black circles are averaged data of the three subjects and black curves represent the best fitting Weibull function. Gray lines represent the fitting curves in the same condition in Experiment 1 re-plotted from Fig. 5. Error bars represent ± 1 SE.

なお、1名の被験者で行った、テクスチャー要素間の間隔の幅を変化させた実験では、幅が広くなるに従い領域間の相関係数の差が大きくなって正答率が約0.5程度になり、課題ができなくなることがわかった。また、背景およびテクスチャー要素間の間隔部分を白色（輝度 72 cd/m^2 ）にした実験でも、課題の正答率は黒色の場合と同じ傾向を示した。これは、間隔を黒色とした条件における低い正答率が、画面の平均輝度が低下したことによるものではないことを示している。

以上のことから、輝度と彩度の相関関係の情報を検出しテクスチャーを弁別するためには、各テクスチャー要素が空間的に連続している必要があることがわかった。

5. 総合考察

以上の2つの実験から得られた結果をまとめる。はじめ

に、テクスチャー要素の輝度と彩度の相関関係の違い、すなわち輝度と彩度の組み合わせの違いに基づいてテクスチャーを弁別することが可能であった。また、輝度と彩度の相関関係の違いが顕著であるほど弁別が容易となった。そして、テクスチャー要素の輝度と彩度の相関関係が正の相関関係にある場合に、負の相関関係にある場合よりもテクスチャー弁別の弁別閾が低かった。また、輝度と彩度の相関関係の違いからテクスチャー弁別がなされるためには、テクスチャー要素の空間的な連続性が重要であることがわかった。この結果は、本実験におけるテクスチャー弁別が、輝度または彩度という単一の要因によるものではなく、テクスチャー全体の輝度と彩度の相関関係という、空間的に広範囲に連続している情報をとらえたことによることを示している。

輝度と彩度の相関情報の検出はどの段階でなされるのだろうか。テクスチャー弁別は、視覚系の初期段階で行われるという説と、より高次の視覚機能であるという説がある^{14,15)}。本実験でのテクスチャー弁別は、輝度情報と色情情報との相関情報を考慮しなければならないことから、輝度情報と色情情報が独立して処理されていると考えられている初期段階よりも後のメカニズムである可能性が高い。実験2で示したように、テクスチャー要素の連続性が失われるとテクスチャー弁別ができなくなる。実験2でのテクスチャー要素間に挿入した間隔は、輝度と彩度の相関に関する情報の検出に対してノイズとして働いている。テクスチャー要素のおおのこの色の出現確率が実験1と実験2でまったく等しいことから、各テクスチャー要素が集合した状態という大局的な情報に基づいて弁別が行われたことが示唆される。これは、より広い空間領域から集められた情報が利用されているという意味で、後期の段階のメカニズムがテクスチャー弁別を担っているという見解に一致する。ただし、間隔が挿入されたことにより、テクスチャー要素間の色差に関する弁別精度が低下した可能性もある。この精度の低下が、テクスチャー弁別閾の増加 (Fig. 7) にどのような影響を及ぼしたかについては、今後の検討課題である。

本実験では、テクスチャーの輝度と彩度の相関係数が正である場合において弁別閾が低かった。自然界では輝度と彩度間に負の相関関係がみられ、人間の視覚系は自然界に典型的な事象に対して同調するようなメカニズムをもっているとする説が有力である¹⁶⁾。もし、視覚系が正の相関よりも負の相関に対して感度がよい、すなわち検出閾が低いのであれば、(ウェーバー比がほぼ等しいという仮定のもとに) 負の相関関係における弁別閾のほうが低いことが

予測される。しかしながら、本実験の結果は、正の相関から逸脱する場合のほうが、負の相関から逸脱する場合よりも感度が高いということを示しており、この予測とは逆になっている。本実験は輝度と彩度の相関関係の正と負に対する感度を直接比較したものではないため、この点はさらなる検討が必要である。もし検出閾が負の相関関係の条件でより低いとしても、本実験で用いたのは検出閾上の刺激であり、閾上の刺激に対する視覚応答の強弱が検出閾値の高低をそのまま反映するとは限らない¹⁷⁾。閾上における感度を調べるには、本実験で用いた刺激に対する視覚系のコントラスト応答の特性を調べる必要があり、これらの点は今後の課題である。いずれにせよ、本研究の結果は、輝度と彩度の負の相関関係という自然界に典型的な事象に対して、視覚系が明らかに高い感度をもつというわけではない可能性を示すものである。

最後に、実験で用いたテクスチャー要素の色は、自然界にみられる色の配置、例えば同一の物体上であればほぼ同じ色相や彩度を持ち、輪郭部分で輝度が大きく変化するというような、特徴的な連続性と不連続性をもった配置ではない。刺激のテクスチャーは、輝度と彩度の相関関係のみを保って、それぞれの要素の位置は完全にランダムに配置したものであった。しかし、実験から、テクスチャー内の各要素、すなわち個々の色の配置に依存せず弁別が可能であることが明らかになった。つまり、視覚系は輝度と彩度の相関に関する情報を、その要素の空間的な位置とは独立して検出することが可能であるといえる。このことは、従来、色の恒常性の解決に重要であると考えられていた、自然界における色の属性（色相、輝度、彩度）の空間的な連続性¹⁸⁾だけが色の恒常性を解決する手段ではなく、視覚系が、輝度と彩度の相関関係を検出することによっても、色の恒常性を解決している可能性があることを示している。Golz と MacLeod⁷⁾ は、場景内の輝度と彩度間の相関情報と、場景内の彩度の平均値の情報を合わせることでより色の恒常性が解決されているとしている。本実験で得られた見解は、彼らの仮説を支持するものである。

文 献

- 1) M. G. Bloj, D. Kersten and A. C. Hurlbert: "Perception of three-dimensional shape influences colour perception through mutual illumination," *Nature*, **402** (1999) 877-879.
- 2) E. H. Adelson: "Textural statistics and surface perception," *J. Vision*, **3** (2003) 48a.
- 3) D. I. MacLeod and R. M. Boynton: "Chromaticity diagram showing cone excitation by stimuli of equal luminance," *J. Opt. Soc. Am.*, **69** (1979) 1183-1186.
- 4) A. M. Derrington, J. Krauskopf and P. Lennie: "Chromatic mechanisms in lateral geniculate nucleus of macaque," *J. Physiol.*, **357** (1984) 241-265.
- 5) K. K. De Valois and R. L. De Valois: "Color vision," *Seeing*, ed. K. K. De Valois (Academic Press, New York, 2000) pp. 129-175.
- 6) D. H. Brainard: "Cone contrast and opponent modulation color spaces," *Human Color Vision*, 2nd ed., eds. P. K. Kaiser and R. M. Boynton (Opt. Soc. Am., Washington, DC, 1996) pp. 563-579.
- 7) J. Golz and D. I. A. MacLeod: "Influence of scene statistics on colour constancy," *Nature*, **415** (2002) 637-640.
- 8) D. I. A. MacLeod and J. Golz: "A computational analysis of colour constancy," *Colour Perception*, eds. R. Mausfeld and D. Heyer (Oxford Univ. Press, New York, 2003) pp. 205-246.
- 9) R. Mausfeld and J. Andres: "Second-order statistics of colour codes modulate transformations that effectuate varying degrees of scene invariance and illumination invariance," *Perception*, **31** (2002) 209-224.
- 10) V. C. Smith and J. Pokorny: "Spectral sensitivity of the foveal cone photo-pigments between 400 and 500 nm," *Vision Res.*, **15** (1975) 161-171.
- 11) J. Beck, A. Sutter and R. Ivry: "Spatial frequency channels and perceptual grouping in texture segregation," *Comput. Vision Graphics Image Process*, **37** (1987) 299-325.
- 12) D. Sagi: "Detection of an orientation singularity in gabor textures: Effect of signal density and spatial-frequency," *Vision Res.*, **30**, (1990) 1377-1388.
- 13) T. Takeuchi, K. Yokosawa and K. K. De Valois: "Texture segregation by motion under low luminance levels," *Vision Res.*, **44** (2004) 157-166.
- 14) B. Julesz: "Textons, the elements of texture perception and their interactions," *Nature*, **290** (1981) 91-97.
- 15) P. Mollor and A. C. Hurlbert: "Psychophysical evidence for fast region based segmentation processes in motion and color," *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **93** (1996) 7421-7426.
- 16) D. J. Field: "Relations between the statistics of natural images and the response properties of cortical cells," *J. Opt. Soc. Am. A*, **4** (1987) 2379-2394.
- 17) M. A. Georgeson and G. D. Sullivan: "Contrast constancy: Deblurring in human vision by spatial frequency channels," *J. Physiol. (Lond.)*, **252** (1975) 627-656.
- 18) E. H. Land and J. J. McCann: "Lightness and retinex theory," *J. Opt. Soc. Am.*, **61** (1971) 1-11.