

輝度と彩度の相関に基づく複数色相のテクスチャー弁別

齋藤 晴美^{*,**,*}・竹内 龍人^{**}・佐藤 隆夫^{*}

^{*} 東京大学大学院人文社会系研究科 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1

^{**} 日本電信電話(株)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

^{***} (現所属) 日本電信電話(株)NTT サイバーソリューション研究所 〒239-0847 横須賀市光の丘 1-1

The Multi Colored Texture Discrimination Based on the Correlation between Luminance and Saturation

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

^{*} 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

^{***} (Present address) NTT Cyber Solutions Laboratories, Nippon Telegraph and Telephone Corporation, 1-1 Hikarino-Oka, Yokosuka 239-0847

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. For the purpose, we run experiments in which subjects discriminated two textured regions determined by the correlation. We found that the discrimination performance between adjacent texture regions increased as the difference in the correlation between luminance and saturation increased. The discrimination performance increased when as the number of hues in the texture pattern decreased. When the texture pattern was consisted of elements having four hues, texture discrimination was almost impossible. In addition, subjects could not discriminate the texture when each texture element was separated in space. Our results indicate that human visual system being sensitive to the correlation between luminance and saturation is selective to hue and has a spatially broad receptive field.

Key words: texture discrimination, luminance, saturation, correlation

1. はじめに

自然情景内の色の輝度と彩度は、光源と物体表面の位置関係から一定の相関関係をもつ。具体的には、光が当たっている表面は輝度が高くなるが色みが薄くなり、一方、他の表面に遮られ影ができる表面では、同時に表面間の相互反射が起こることによって色みが濃くなるため、輝度が高い部分は彩度が低くなり、輝度が低い部分では彩度が高くなるという相関関係が生じる^{1,2)}。このような自然情景内でみられる色の統計量は色知覚に影響を与えていると考えられている。特に、輝度と彩度の相関関係は照明や物体の色みの推定に用いられ、色の恒常性の解決に用いられているとい

われている^{1,3,4)}。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^{3,5)}。この手法によって、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^{3,4)}。

筆者らの研究では、輝度と彩度の相関関係が色の見えに与える影響ではなく、視覚系がこの相関の情報を直接利用することで、表面の違いを知覚できるかどうかについて検討する。齋藤と竹内⁶⁾は、輝度と彩度の相関のみを手がか

^{***} saito.harumi@lab.ntt.co.jp

りとしたテクスチャー面の弁別実験を行い、視覚系が領域分割のために輝度と彩度の相関の情報を利用できるかどうかを調べた。結果、輝度あるいは彩度という単一の要因ではなく、輝度と彩度の相関関係の違いを利用してテクスチャーが弁別された。すなわち、人間の視覚系が輝度と彩度の相関関係という高次統計量の情報を検出し、利用できることがわかった。これは、輝度と色の処理システムの相互作用があることを示唆するものである。齋藤と竹内⁶⁾の実験では単一色相のテクスチャーを用いたが、本研究ではテクスチャーを構成する色相数を増やしテクスチャー弁別課題の成績を調べ、複数色相がテクスチャー知覚においてどのように統合されているかを検討した。

2. 実 験

2.1 被 験 者

1名のナイーブな被験者(SS)と2名の筆者(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、Farnsworth-Munsellの100-Hue testにより、それぞれの被験者が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140Hz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80cmとし、実験中、顎台によって被験者の頭部を固定した。実験は暗室内で行った。

2.3 刺 激

刺激は、齋藤と竹内⁶⁾(実験1)で用いた刺激と同様の、視角 $0.15^\circ \times 0.15^\circ$ の正方形の要素を50個×50個並べたテクスチャーとした。テクスチャー全体の大きさは $7.5^\circ \times 7.5^\circ$ であった。テクスチャー要素の色相、輝度、彩度は独立に変化させた(各属性の定義は後述)。各テクスチャー要素の輝度をテクスチャー全体でランダムとなるように配置し、テクスチャー全体を中央で上下あるいは左右に二分した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彩度を変化させた。Fig. 1右側のテクスチャーは、例として上下で相関関係が異なるように二分したものである。

輝度と彩度の相関関係は、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。その際、輝度と彩度それぞれの平均および

分散を相関係数にかかわらず一定とした。すなわち、上下あるいは左右に二分した2つの領域間では、輝度と彩度の相関係数のみが異なっている。テクスチャーの輝度と彩度の相関は、ピアソンの積率相関係数 R の値を0.1単位で変化させることで操作した。

Fig. 1左側のグラフは、Fig. 1右側のテクスチャー刺激の上下それぞれの領域について、テクスチャー要素を構成する輝度と彩度の関係を示したものである。グラフの縦軸は彩度を、横軸は輝度を表している。上側、赤色の印で示したグラフは彩度と輝度の相関係数が $R = -1.0$ の場合、下側、青色の印で示したグラフは $R = -0.7$ の場合を示しており、Fig. 1右側に示したテクスチャー刺激の上下それぞれの領域に対応している。Fig. 1の刺激例は、上下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、上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 $R = -1.0$)、下側の領域は同じ負の相関関係でも、より相関が弱い色の集合(相関係数 $R = -0.7$)となるように輝度と彩度の組み合わせを決定している。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固定した。

テクスチャー要素の色相はMBDKL色空間⁷⁻¹⁰⁾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)から成っている。これは、外側膝状体(LGN)において独立していると考えられている輝度応答と2種類の反対色応答という3種類の神経細胞応答に対応する⁹⁾。2本の色度軸はそれぞれ、L錐体とM錐体からの拮抗的な入力を受けるP層の神経細胞応答に対応するLM軸と、L錐体とM錐体の応答量の和から、S錐体の応答量の差分を示すS軸である。S軸は、その多くがS錐体からの入力があるK層の神経細胞応答に対応している¹¹⁾。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、M錐体がより強く興奮した状態である色をM-L色とよぶ。S軸において、S錐体がより強く興奮した状態である色をS-(L+M)色、S錐体が少ない割合で応答している色を(L+M)-S色とよぶ(本論文では便宜上それぞれの色をS色、-S色とよぶ)。2本の色度軸の端点にあたるこの四色相の見えは、L-M色がピンク色、M-L色が青緑色、S色が青紫色、-S色が黄緑色である¹²⁾。本実験で用いた最大の彩度は、M-L色および-S色はモニターの色再現範囲(gamut)の限界点とした。一方、L-M色とS色はそれぞれ錐体コントラストの絶対値をgamut点でのM-L色あるいは-S色と等しくしたものをを用いた。それぞれをCIE 1931(x, y)色度座

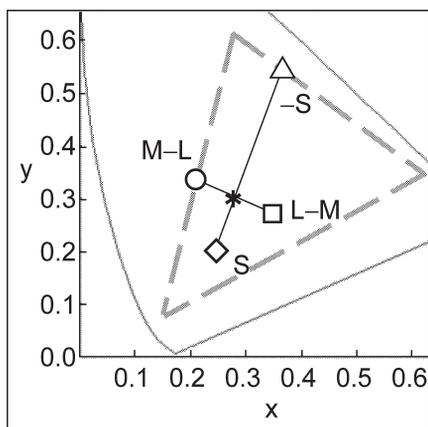


Fig. 2 The circle (○), the square (□), the diamond (◇) and the triangle (△) represent the maximum saturation of M-L color, L-M color, S color and -S color, respectively. The asterisk (*) is the white point in the CIE 1931 *xy* Chromaticity Diagram. Saturation of each texture element was varied along the line. Three gray lines represent the monitor gamut.

標図上で表したものが Fig. 2 である。各最大の彩度を、L-M 色は灰色の四角印 (□), M-L 色は灰色の丸印 (○), S 色は菱形印 (◇), -S 色は三角印 (△) で示した。図中の灰色の破線は、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 ($W(x, y) = (0.291, 0.331)$) である。Fig. 1 右側は L-M 色を用いたテクスチャーの例である。

本実験における彩度は、等色相における白から最大の彩度までの錐体応答量の変化と定義した。LM 軸, S 軸上において、錐体応答量を反対方向に等間隔で増減させることにより等輝度平面上を変化させた。錐体応答量は Smith と Pokorny¹³⁾ の錐体分光感度関数に基づくものとした。無彩色 (Fig. 2 における * 印) の錐体応答量を LW, MW, SW , 決定した最大彩度の色の錐体応答量を 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。

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

$(k = 1, 2, 3, \dots, N)$

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

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

Fig. 2 の実線は、この式に基づき錐体応答量を無彩色 (Fig. 2 の * 印) から各最大彩度の色まで等輝度平面上を変化させた様子である。本実験では彩度を 253 段階 ($N = 253$) で変化させ、各テクスチャー要素の彩度とした。輝度も彩度と同様に錐体応答量に基づき変化させた。

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。本実験での各テクスチャー要素の平均輝度は 40 cd/m^2 で、 8.0 cd/m^2 から 72.0 cd/m^2 まで変化させた (マイケルソンコントラスト = 0.8)。Fig. 1 の縦軸は L-M 色の錐体コントラストを記しており、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。

実験 1 では、単一色相をもつテクスチャーと二色相をもつテクスチャーを刺激として用いた (Fig. 3)。単一色相刺激の場合には、L-M 色 (Fig. 1), M-L 色 (Fig. 3 (A)), S 色 (Fig. 3 (B)), -S 色 (Fig. 3 (C)) の四色をテクスチャーの色相とした。

二色相刺激では、テクスチャー要素および刺激全体の大きさは単一色相刺激と同じとし、テクスチャー要素の半数ずつで色相が異なるようにした。二色相刺激における色相差は、 90° 条件, 180° 条件, 色相差不定条件の 3 種類とした。MBDKL 平面において色相は角度によって表されることがあり、LM 軸上の L-M 色を 0° , M-L 色を 180° と定義すれば、中間の S 軸の S 色が 90° , -S 色が 270° となる¹²⁾。色相差 90° 条件では、MBDKL 平面において 90° 間隔にある二色から成る刺激を用いた。 180° と 90° の組み合わせとなる M-L 色と S 色を用いた刺激 (Fig. 3 (D) (E)) と、 180° と 270° の組み合わせとなる M-L 色と -S 色 (Fig. 3 (F)) である。二色の配置はランダムとした。

色相差 180° 条件で用いた色相は、MBDKL 平面における色度軸の端点の色相どうし、すなわち L-M 色と M-L 色、および S 色と -S 色の二組である。Fig. 3 (G) と (H) は LM 軸上の二色を含む刺激の例であり、Fig. 3 (I) は S 軸上の二色の例である。MBDKL 平面においては、 180° 間隔にある二色よりも、 90° 間隔にある二色のほうが類似する色相となっている。

色相差不定条件では、ランダムに選んだ半数の要素のみ無彩色, 平均輝度とした刺激を作成した。本実験ではもう一方の色相としては M-L 色のみを用いた。Fig. 3 (J) と (K) に刺激例を示す。

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^{3,4)} との関連を検討するためである。もう一方の領

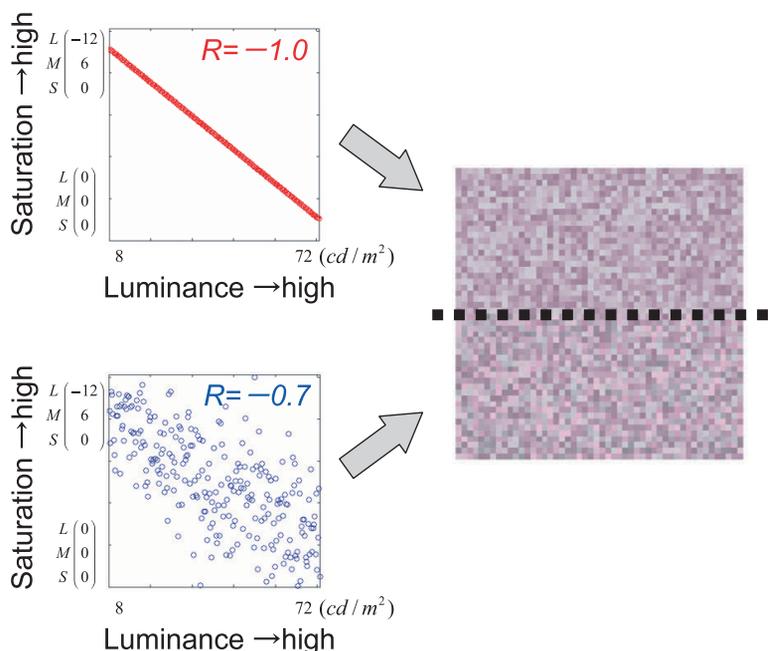


Fig. 1 A schematic representation of the stimulus. The texture on the right side is example of stimulus in Experiment 1. The texture is divided horizontally to have the different correlation between luminance and saturation in each region. The left graphs are scatterplot of luminance and saturation of each texture region. The horizontal axis denotes luminance and the vertical axis denotes saturation specified by the L, M, and S cone contrasts. The upper graph represents $R = -1.0$ and the lower graph represents $R = -0.7$. “ R ” is the correlation coefficient.

域の相関係数は、基準の相関係数に対して0.1単位で、6段階に変化させた。

刺激は画面の中央に1秒間呈示された。実験は、基準の相関係数 $R = 1.0$, $R = -1.0$ のうちどちらか一方に対し、相関係数の変化が6段階、単一色相条件 (Fig. 3 (A)~(C)) の場合は色相条件が2種類 (L-MとM-L, またはSと-S), 分割の方向が2種類 (縦, 横), 試行の繰り返し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種類の相関係数の条件, および色相条件はブロックごとにランダムに使い、基準の相関係数をもつ領域の位置は試行ごとに上下左右にランダム変化させた。被験者の課題は、領域が縦か横のどちらに分割されているかを回答する二肢強制選択とし、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時間を挟んだ。二色相条件においても同様の実験手続きをとった。

なお、実験の前に、各被験者に対して、四色それぞれの最大彩度の色と平均の無彩色 (灰色) との間で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ため、彩度の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。

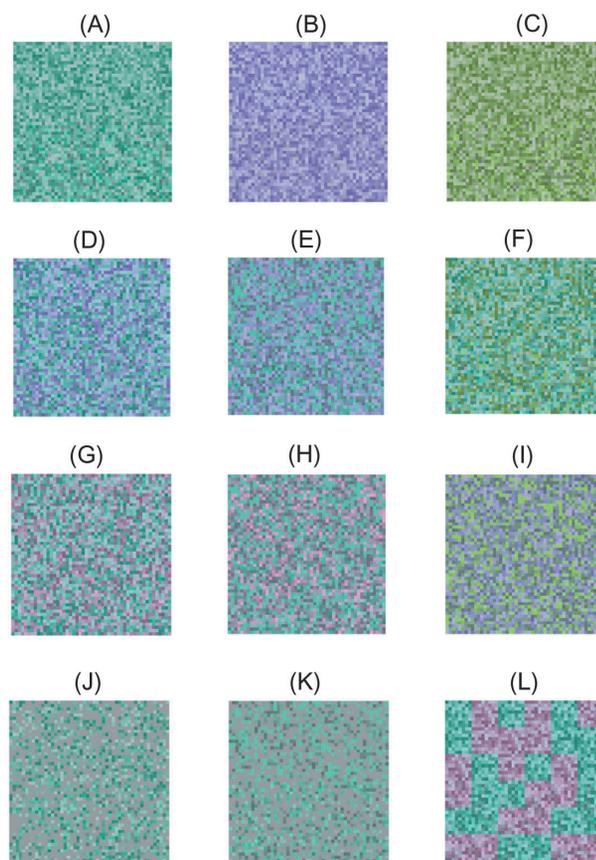


Fig. 3 Examples of the stimulus. These textures are divided horizontally. R equals -1.0 or $+1.0$ in the upper region of the texture pattern. (A) M-L color ($R = -1$). (B) S color ($R = -1$). (C) -S color ($R = +1$). (D) M-L and S color ($R = -1$). (E) M-L and S color ($R = +1$). (F) M-L and -S color ($R = -1$). (G) L-M and M-L color ($R = -1$). (H) L-M and M-L color ($R = +1$). (I) S and -S color ($R = +1$). (J) M-L and gray color ($R = -1$). (K) M-L and gray color ($R = +1$). (L) An example of stimulus used in Experiment 2.

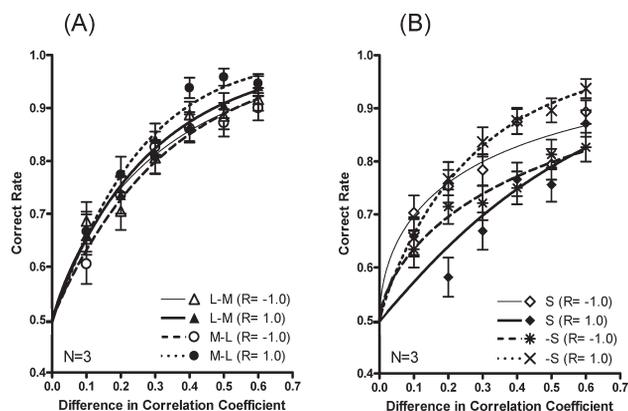


Fig. 4 Results of Experiment 1 (Single-color condition) ($N=3$). The vertical axis denotes the correct rate. The horizontal axis denotes the difference in correlation coefficient between two texture regions. The color of stimulus and the baseline of correlation coefficient are shown on the lower right in each graph. (A) L-M or M-L color. (B) S or -S color. Curves represent the best fitting Weibull function. Error bars represent ± 1 SE.

2.5 結果 (単一色相条件)

単一色相条件では、齋藤と竹内⁶⁾のL-M色、M-L色の実験に加え、S色、-S色のテクスチャー刺激を用いて実験を行った。これらの結果は、二色相条件や実験2の結果と比較検討するうえでのベースラインとして利用した。

テクスチャー弁別課題の正答率の平均 ($N=3$) を Fig. 4 (A), (B) に示した。Fig. 4 (A) はL-M色およびM-L色の結果を示している。一方、Fig. 4 (B) はS色および-S色の結果を示している。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表す。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、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 , ...と変化させた場合を示している。各グラフには、基準の相関係数が $R=1.0$ である条件と $R=-1.0$ である条件の両方の結果を示している。グラフ内の曲線は、Levenberg-Marquardt法によりWeibull関数を非線形最小二乗近似した結果である。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 は正答率とする。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。

実験の結果、L-M、M-L、S、-Sのすべての条件において、テクスチャーの輝度と彩度の相関係数の差が大きくなるほどテクスチャー弁別の正答率が上がることがわかった。すなわち、輝度と彩度の相関係数の違いからテクスチャーが弁別され、相関が異なるほど弁別が容易になった。

近似曲線の α 値は、L-M色 (Fig. 4 (A)) で基準の相関係数が $R=-1.0$ の場合 $\alpha=0.309$ (細い実線)、基準の相関係数が $R=1.0$ の場合 $\alpha=0.2871$ (太い実線) であった。M-L色で基準の相関係数が $R=-1.0$ の場合 $\alpha=0.3312$ (破線)、基準の相関係数が $R=1.0$ の場合 $\alpha=0.25$ (点線) であった。S色 (Fig. 4 (B)) で基準の相関係数が $R=-1.0$ の場合 $\alpha=0.3554$ (細い実線)、基準の相関係数が $R=1.0$ の場合 $\alpha=0.5719$ (太い実線) であった。-S色で基準の相関係数が $R=-1.0$ の場合 $\alpha=0.5798$ (破線)、基準の相関係数が $R=1.0$ の場合 $\alpha=0.2779$ (点線) であった。これらの α 値は、他の色相条件における結果とも合わせて Fig. 9 (横軸の single) に示した。それぞれの α 値を比較すると、M-L色と-S色の条件において、基準の相関係数が $R=1.0$ のほうが $R=-1.0$ のときより有意に小さかった [$t(10)=3.20$, $p<.01$ (M-L色); $t(10)=5.96$, $p<.001$ (-S色)]. L-M色およびS色では α 値に差がみられなかった [$t(10)=0.84$, n.s. (L-M色); $t(10)=-1.80$, n.s. (S色)]. また、L-M色とM-L色の間に有意な差はみられなかった [$t(10)=-0.74$, n.s. ($R=-1.0$); $t(10)=1.81$, n.s. ($R=1.0$)]. S色と-S色では基準の相関係数が $R=-1.0$ の条件でS色のほうが、基準の相関係数が $R=1.0$ の条件で-S色のほうが有意に小さくなった [$t(10)=-3.01$, $p<.02$ ($R=-1.0$); $t(10)=2.76$, $p<.05$ ($R=1.0$)]. L-M色とM-L色の結果に関しては、齋藤と竹内⁶⁾と一貫していた。

2.6 結果 (二色相条件)

続いて二色相条件における色相差 90° 条件の結果を Fig. 5, 色相差 180° 条件の結果を Fig. 6, 色相差不定条件の結果を Fig. 7 に示す。各図において、基準の相関係数 $R=-1.0$ の結果は (A), $R=1.0$ の結果は (B) に記述した。図内の破線および実線は、それぞれの正答率の近似曲線を表したものである。近似曲線の α 値は Fig. 9 (90° 条件は横軸の 90 deg , 180° 条件は横軸の 180 deg , 色相差不定条件は横軸の M-L & gray) にまとめて記述した。

色相差 180° 条件 (Fig. 6) の場合、LM軸上の二色で基

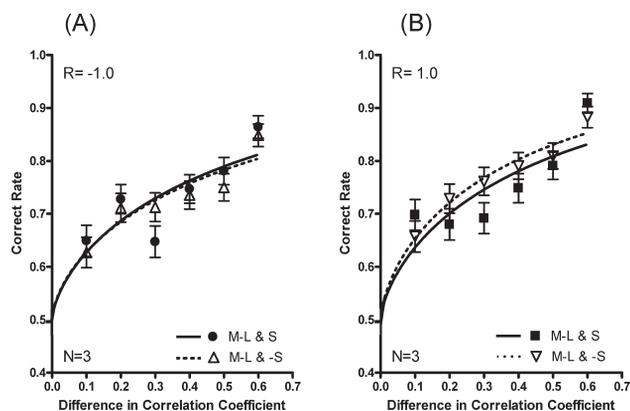


Fig. 5 Results of Experiment 1 (90 deg separation condition) ($N=3$). The vertical axis denotes the correct rate. The horizontal axis denotes the difference in correlation coefficient between two texture regions. The color of stimulus is shown on the lower right in each graph. (A) $R=-1.0$. (B) $R=1.0$. Curves represent the best fitting Weibull function. Error bars represent ± 1 SE.

準の相関係数が $R=1.0$ であった条件以外では相関係数の差の増加に応じた正答率の上昇がみられず、Weibull 関数による近似を行った場合 α 値が 1.0 を大きく超えた。このような場合には近似曲線をグラフ内に記述せず、また Fig. 9 内に * で記した。色相不定条件 (Fig. 7) の場合も同様に α 値が 1.0 を超えた。

近似された場合の α 値 (Fig. 9) に基づいて色相差 90° 条件と色相差 180° 条件を比較すると、 $R=1.0$ を基準としたとき、M-L と -S 色のテクスチャー (90° 条件) の α 値は $\alpha=0.4453$ 、M-L 色と L-M 色 (180° 条件) のテクスチャーの α 値は $\alpha=0.9187$ で、 90° 条件のほうが α 値が小さい傾向がみられた [$t(10)=1.94, p<.1$]. しかし、単色のテクスチャーを用いた場合よりは 90° 条件で得られた α 値が高くなり、成績が悪くなった [$t(10)=-2.72, p<.05$ ($R=-1.0$, M-L 色との比較); $t(10)=-5.33, p<.001$ ($R=1.0$, M-L 色との比較)]. M-L 色と S 色のテクスチャー (90° 条件) についても、他条件と比較すると同様の有意傾向がみられた [$t(10)=1.40, p<.2$ ($R=1.0$, 180° 条件との比較); $t(10)=-1.71, p<.2$ ($R=-1.0$, M-L 色との比較); $t(10)=-2.11, p<.1$ ($R=1.0$, M-L 色との比較)].

テクスチャー要素のうち半分を無彩色かつ平均輝度にして組み合わせた色相不定条件 (Fig. 3 (J) (K), Fig. 7) では、課題の遂行がさらに困難であった。実際に、 180° 間隔の二色 (L-M 色と M-L 色) のテクスチャー弁別 (Fig. 6) よりも正答率が低下した。

2.7 考 察

ここまでの結果をまとめると、一色のテクスチャーにお

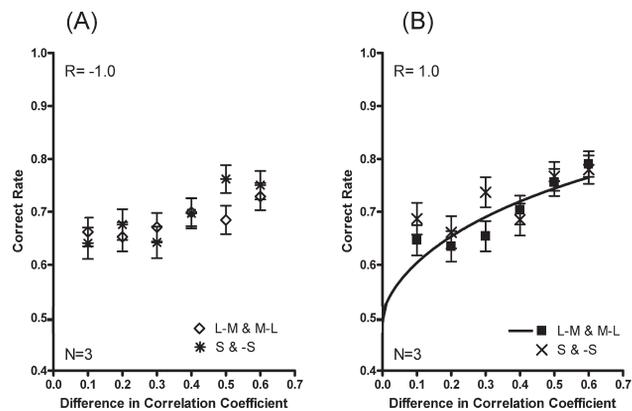


Fig. 6 Results of Experiment 1 (180 deg separation condition) ($N=3$). The vertical axis denotes the correct rate. The horizontal axis denotes the difference in correlation coefficient between two texture regions. The color of stimulus is shown on the lower right in each graph. (A) $R=-1.0$. (B) $R=1.0$. Curves represent the best fitting Weibull function. Error bars represent ± 1 SE.

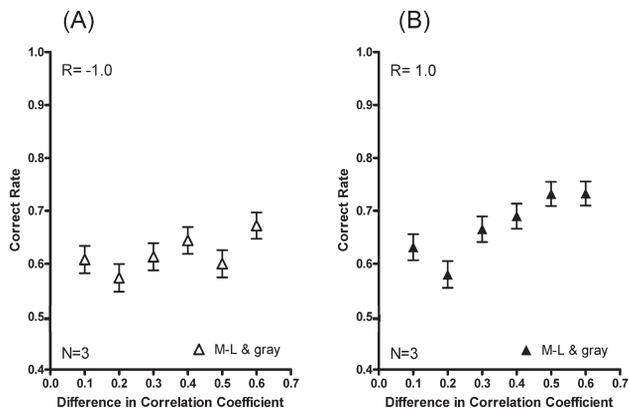


Fig. 7 Results of Experiment 1 (Color of half of the pixels are gray) ($N=3$). The vertical axis denotes the correct rate. The horizontal axis denotes the difference in correlation coefficient between two texture regions. The color of stimulus is shown on the lower right in each graph. (A) $R=-1.0$. (B) $R=1.0$. Curves represent the best fitting Weibull function. Error bars represent ± 1 SE.

ける正答率が最も高く、感度が高いことが示された。次に 90° 間隔の二色を用いたテクスチャーの結果、 180° 間隔の二色を用いたテクスチャーの結果の順に正答率が下がった。この結果より、テクスチャー上に補色に近い 2 つの色相がある場合は、輝度と彩度の相関の情報が完全に利用できないということはないが、困難になっているということがわかる。また、色相不定条件では正答率が相関係数の差の増加に伴う上昇がみられなかったことから、テクスチャー要素が空間的に離れている場合は、齋藤と竹内⁶⁾ の実験と同様に輝度と彩度の相関の情報が得られなくなることがわかった。すなわち、輝度と彩度の相関の情報が得られるためには、輝度と彩度の相関関係を保った色みのある要

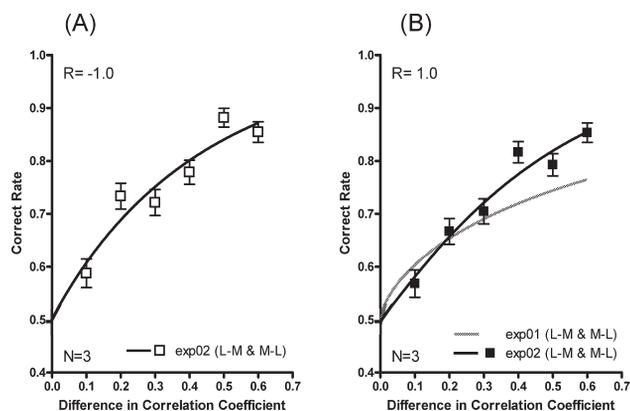


Fig. 8 Results of Experiment 2 ($N=3$). The vertical axis denotes the correct rate. The horizontal axis denotes the difference in correlation coefficient between two texture regions. (A) $R=-1.0$. (B) $R=1.0$. Black curves represent the best fitting Weibull function. Gray curve in (B) represents the fitting curves in the 180 deg condition ($R=1.0$) in Experiment 1 re-plotted from Fig. 6 (B). Error bars represent ± 1 SE.

素が空間的に連続していることが重要であるといえる。そこで次の実験では、複数の色相から成るテクスチャーで、それぞれの色相の要素が空間的に連続している場合に、輝度と彩度の相関の情報に基づくテクスチャー弁別の成績がどう変化するかを検討した。

3. 実験 2

3.1 刺激

刺激は、実験1の180°条件同様、LM軸上の端点の二色であるL-M色とM-L色の2つの色相を用いているが、テクスチャー要素が各色相ごとに8個×8個の大きさに連続した範囲（以下ブロックとよぶ）をそれぞれ18箇所、ブロックの位置によってテクスチャーが弁別されることのないよう、偏らない位置に配置したものを用いた。Fig. 3 (L) に用いた刺激の一例を示している。刺激全体の大きさは $7.2^\circ \times 7.2^\circ$ であった。これまでの刺激と同様、テクスチャーの半分の領域で相関関係が異なるものとした。また実験条件、課題、手続き等はこれまでの実験と同様とした。

3.2 結果と考察

Fig. 8 は実験2のテクスチャー弁別の正答率とその近似曲線（黒色実線）を示すとともに、LM軸上の二色を用いた実験1の180°条件の正答率（灰色の実線、Fig. 6 (B)の曲線を再掲）とを比較したグラフである。実験の結果、180°条件と同じLM軸上の二色を用いたにもかかわらず、各色相の要素をブロック状に連続させて配置した実験2のほうが正答率が高くなることがわかった。実験2の α 値

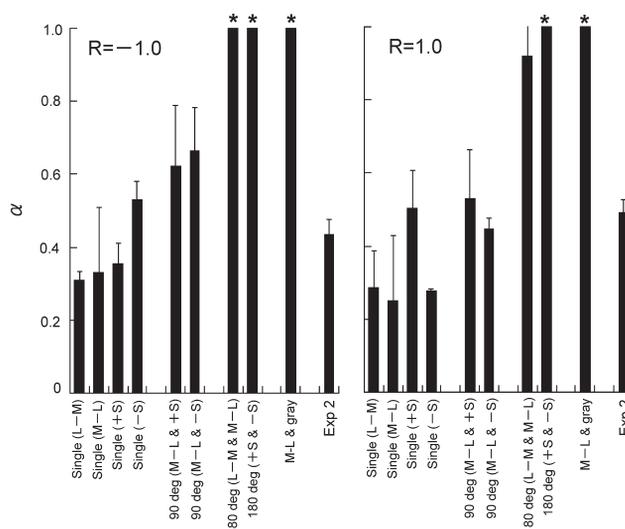


Fig. 9 The α -values of the best fitting Weibull functions for each experimental condition are plotted. Error bars represent ± 1 SE. Asterisks are the conditions in which α -value of less than 1.0 were not obtained.

は相関係数 $R=-1.0$ の条件では $\alpha=0.4357$ 、相関係数 $R=1.0$ の条件では $\alpha=0.4926$ であった（Fig. 9の横軸のExp 2に記述）。180°条件と比較すると有意に α 値が小さい傾向を示し [$t(10)=1.74, p<.1 (R=1.0)$]、感度がよりよくなっていることがわかった。しかし、単色相条件の結果と比較すると、どの条件でも単色相条件の α 値のほうが有意に小さかった [$t(10)=-2.62, p<.05 (R=-1.0, L-M$ 色との比較); $t(10)=-5.88, p<.001 (R=1.0, L-M$ 色との比較); $t(10)=-2.29, p<.05 (R=-1.0, M-L$ 色との比較); $t(10)=-6.39, p<.001 (R=1.0, M-L$ 色との比較)] (Fig. 9)。このことから、複数の色相から成るテクスチャーについて輝度と彩度の相関に基づいた弁別を行う場合、単色のテクスチャーよりは弁別の感度が落ちるが、同じ色相の占める空間的範囲が広い場合は弁別の感度がよくなることが示された。

なお、本実験ではブロックの配置をランダムとしたため、Fig. 3 (L) にみられるように、複数の同色相ブロックが隣り合うことにより、連続した領域は1ブロックのサイズよりも大きくなっている。そのためFig. 8の結果は、連続した領域の面積が1ブロックのみの刺激を用いて得られるであろう成績よりも向上している可能性がある。単色相の面積と正答率との関係の解明については今後の検討課題である。

4. 総合考察

本実験では、輝度と彩度の相関の違いに基づいたテクスチャーの弁別が可能であることを示した。このことから、

人間の視覚系は輝度と彩度の相関という情報を利用しているといえる。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、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。ただし、テクスチャーがより弁別できたのは、テクスチャーが単色あるいは類似した色相から構成され、かつ空間的に連続した領域となっている場合であった。この条件を満たさない場合は、輝度と彩度の相関の違いからテクスチャーを弁別することは困難であった。特に、異なる色相をもつテクスチャーでは弁別の正答率が低かったことから、異なる色相間で共通の鮮やかさという情報を得たり、あるいは異なる色相間でより多くの輝度と彩度の相関の情報を得たりすることはないといえる。齋藤と竹内⁹⁾は、テクスチャー要素が空間的に不連続である場合は、輝度と彩度の相関に基づいた弁別は困難であるとしたが、本実験でもその見解を支持する結果が得られた。

本実験で得られた結果を生理学的メカニズムの観点から考察すると、テクスチャーを弁別するために、輝度と彩度の情報が空間的に連続した広い領域から得られなければならないということ、比較的広い受容野からそれらの情報を得ていることを示すものである。また、網膜からの輝度情報および色情報は、視覚系の初期段階では独立して処理されているといわれており¹⁴⁾、本実験でのテクスチャー弁別は輝度と色の両方の情報を処理しなければならないことを考えると、本実験でのテクスチャー弁別は視覚の初期の段階で行われるものではなく、比較的后の処理段階で処理されていることが予想できる。これまでの研究で、一般的に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^{15,16)}が、本実験では後者の見解に近い結果が得られた。

本実験において見いだされたテクスチャー弁別が可能である条件は、視覚系のメカニズムについていくつかのことを示唆する。まず、視覚系は、自然情景において輝度と彩度の相関が等しく視野に投影される領域は、不自然な変化のない反射率をもった領域であると仮定する。視覚系が輝度と彩度の相関の情報を検出し利用するためには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が、これはテクスチャーが分断されると、ほぼ同じ反射率をもつ空間領域であるという仮定が崩れてしまい、輝度と彩度の相関の情報がキャンセルされてしまうものと考えられる。また、同じ色相の領域が広く連続していた条件ではテクスチャー弁別の成績がよかったことについては、視覚系が自然界において物体はある一定の広さの空間領域で

同一の色相をもつという仮定をもつことが示唆される。視覚系は同一物体であると仮定した空間領域内において輝度と彩度の相関の情報を利用することで、照明あるいは物体の色の見えを推定すると考えられる。また、1つの色相よりも複数の色相においてテクスチャー弁別が困難となったが、これは、照明の光の色みはほぼ一様、すなわち、高い空間周波数で変化することはないとする仮定から、視覚系が色相の変化を物体の変化であるとみなすことによって起こるものであると考えられる。

輝度と彩度の相関関係が負であるか、正であるかの違いについては、本実験では顕著な差はみられなかった。本実験の結果からは Golz と MacLeod⁹⁾ が主張したような相関の正負による色の見えの違いを導くことはできないが、情景知覚のために輝度と彩度の相関の情報が何らかの形で利用されている可能性を示すという点で、彼らの仮説を支持する結果となった。

文 献

- 1) E. H. Adelson: "Textural statistics and surface perception," *J. Vision*, **3** (2003) 48a.
- 2) 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.
- 3) J. Golz and D. I. A. MacLeod: "Influence of scene statistics on colour constancy," *Nature*, **415** (2002) 637-640.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 齋藤晴美, 竹内龍人: "輝度と彩度の相関に基づくテクスチャー弁別", *光学*, **34** (2005) 154-161.
- 7) 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.
- 8) A. M. Derrington, J. Krauskopf and P. Lennie: "Chromatic mechanisms in lateral geniculate nucleus of macaque," *J. Physiol.*, **357** (1984) 241-265.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) R. L. De Valois: "Neural coding of color," *The Visual Neurosciences Vol. 2*, eds. L. M. Chalupa and J. S. Werner (The MIT Press, London, 2004) pp. 1003-1016.
- 12) R. L. De Valois, K. K. De Valois, E. Switkes and L. Mahon: "Hue scaling of isoluminant and cone-specific lights," *Vision Res.*, **37** (1997) 885-897.
- 13) 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.
- 14) R. L. De Valois and K. K. De Valois: "A multi-stage color
model," Vision Res., **33** (1993) 1053-1065.
- 15) B. Julesz: "Textons, the elements of texture perception and
their interactions," Nature, **290** (1981) 91-97.
- 16) 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.