

## 混同色線理論と色覚モデルに基づくカラー画像からの 弁別困難色の検出と弁別しやすい色への変換

目黒 光彦<sup>†</sup> 高橋 知紘<sup>†</sup> 古閑 敏夫<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 山形大学工学部情報科学科

〒 992-8510 山形県米沢市城南 4-3-16

E-mail: †{meguro,koga}@yz.yamagata-u.ac.jp

**あらまし** 本稿では、色盲と呼ばれる色覚異常により色の区別が難しいユーザ向けに、カラー画像中の色を弁別しやすいように色の修正を施すことで、見やすいカラー画像を作成する方法を提案する。人間は、光の波長に対して感度の異なる三種類の錐体による反応値の比により色を知覚している。俗に色盲と呼ばれる色覚異常者の多くは、三種類の錐体のうちいずれか一つの錐体を欠いている二色型色盲である。そのため色盲者にとって、色の弁別が困難な色の組み合わせが存在する。提案手法は、処理対象のカラー画像を色により領域分割を行い、それぞれの領域の代表色同士の色弁別がしやすいか否かを判定し、弁別が難しい領域の色の値を変換させることで、知覚しやすいカラー画像を生成するものである。これにより、色覚におけるバリアフリーを実現する一手法が実現される。

**キーワード** 色覚バリアフリー、カラー画像、色変換、色覚異常

## Detection of the difficult colors for discrimination by dichromats and color conversion for the legibility of color images based on confusion loci theory and color-defective vision models

Mitsuhiko MEGURO<sup>†</sup>, Chihiro TAKAHASHI<sup>†</sup>, and Toshio KOGA<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Department of Informatics, Faculty of Engineering, Yamagata University

4-3-16 Jonan, Yonezawa-shi, Yamagata, 992-8510 Japan

E-mail: †{meguro,koga}@yz.yamagata-u.ac.jp

**Abstract** In this paper, we propose a color conversion method for realizing barrier free of color defective vision. Human beings is perceiving colors by a ratio of a reaction value by three kinds of cones in a retina. The three cones have different sensitivity to a wavelength of light. Nevertheless, dichromats, who are lacking of a sensitivity of one of cones, tends to be difficult for discriminating the colors of a certain combination. The proposed techniques make new images by converting colors for creating perceptible color. Based on confusion loci theory, the proposed technique realizes the perceptible images for dichromats by changing the confusion colors in several regions of images.

**Key words** Barrier free of color vision, color image, color conversion, color-defective vision

### 1. はじめに

白人男性の8%, 黒人男性の4%, そして、日本人を含む黄色人男性の5%は、特定の範囲の色について差を感じにくいという色覚特性を有している。この色覚特性は、俗に色盲<sup>(注1)</sup>ないし色弱<sup>(注1)</sup>と呼ばれている[1]~[3]。人間は、光の波長に対する感度の異なる三種類の錐体を網膜上に有する。色は、それら三種類ある錐体の反応値の相対比により知覚される。色盲と呼ばれる色覚異常の多くは、三種類の錐体のうち、いずれか一つ

の錐体を欠く二色型色覚(dichromatism)と分類される。色弱と呼ばれる色覚異常は、光の波長に対する感度特性が変化している錐体を有し、異常三色型色覚(anomalous trichromatism)と分類される。これらの錐体に関する問題により、色盲者、色弱者にとって色の弁別が難しい色の組み合わせが存在する。

(注1): (近年、「色盲」、「色弱」という表現を使わず、「色覚異常」、「色覚障害」という表現を使うことが推奨されている。ただし、本稿では、「色盲」「色弱」と呼ばれる俗称を、医学的な分類との関連性を理解しやすくするために使用する[4]~[6].)

混同しやすい色の組み合わせの検出は、 $x-y$  の二次元平面で色の種類を表現する  $xy$  色度図において求められる混同色線から推測可能である。混同色線とは、色盲の種類により位置の異なる混同色中心と呼ばれる  $xy$  色平面上の一点の座標から引かれる無数の直線のことであり、混同色線のうち、同一の直線上に位置する個々の色は、色盲者にとって別の色であると弁別することが難しい。よって、同一混同色線上に異なる色が位置するか否かを判定することにより、色盲者にとって識別が困難な色の組み合わせを判定することが可能である [1]~[3], [5], [7]~[9]。さらに、色盲の種類によって、どのように色を観測しているかを推測可能とする、色盲者の色覚モデルについての研究もなされている [7]~[9]。色を感知するために三種類ある  $S$ ,  $M$ ,  $L$  錐体のうち、 $L$  錐体、および、 $M$  錐体を欠落している、二色型第一、および二色型第二色盲における  $S$ ,  $M$ ,  $L$  錐体による色覚の応答モデルにより、第一、および、第二色盲者が観測する色覚を模倣する研究がある [8], [9]。

そこで本稿では、二色型色盲の中で割合の多い、第一、および第二色盲により色の区別が難しいユーザ向けに、カラー画像中の色を弁別しやすいように色変換を施すことで、色の知覚がしやすいカラー画像の生成法を提案する。そのためには、色盲者にとって色弁別が困難な混同色の検出を行う手法、及び、色盲者にとって分別しやすい色に変換する手法を実現する必要がある。本研究における手続きについて述べる。まず、処理対象のカラー画像を、色が類似している領域ごとに K-means アルゴリズム [15] により領域分割を行い、それぞれの領域の代表色を算出する。次に、代表色同士が色の弁別がしやすいか否かを、 $xy$  色度図における混同色線のなす角度、及び、色盲者の色覚モデルにより推測した色の見え方から、色混同の度合いを評価する。色変換が必要と判断された場合、均等色空間として知られる  $L^*a^*b^*$  色空間において、二色のうちいずれかの色の値を、 $a^*b^*$  色度図上に写像した混同色線の軌跡に直交する方向に  $a^*b^*$  値を修正しながら、色変換後の二色が弁別可能か否かを色覚モデルにより確認する。本手法は、変更後の色の候補を、表色系全体を網羅する三次元空間から探索するのではなく、混同色線の軌跡に直交する一次元の線上のみから探索すればよく、色変換処理が容易である。色盲者にとって知覚しやすいカラー画像を生成する提案手法の有効性を、適用例を通じて明らかにする。

## 2. 混同色線理論に基づく混同色の検出

### 2.1 $xy$ 色度図による色の表現

コンピュータによりカラー画像を取扱う場合、 $RGB$  による表現が多く用いられている。但し  $RGB$  は、撮影するカメラや撮像するディスプレイにより表示される色の見え方が大きく異なる、デバイスに大きく依存した表現である。そのため、色の研究においては、CIE (国際照明委員会) において規定されている CIE-1931  $XYZ$  表色系 (以降  $XYZ$  表色系と略する) を色表現の基準として用いることが一般的である [11], [12]。  $RGB$  から  $XYZ$  への変換は、 $RGB$  の各チャンネル値を 0~1 の値に正規化した  $R'G'B'$  に対し、

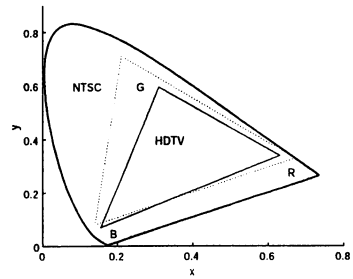


図 1  $xy$  色度図

Fig. 1  $xy$  Chromaticity diagram

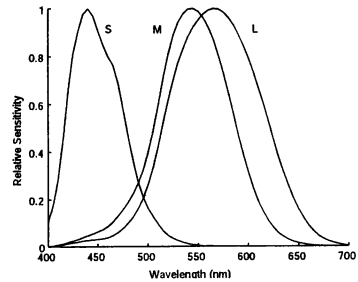


図 2  $LMS$  錐体の分光感度特性

Fig. 2 Spectral sensitivities of the human cones

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 40.9568 & 35.5041 & 17.9167 \\ 21.3389 & 70.6743 & 7.9868 \\ 1.8629 & 11.4620 & 91.2367 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} \quad (1)$$

により求められる。なお、上式による表色系変換式は、HDTV の国際標準である ITU-R BT.709 規格に基づき、標準光を  $D_{65}$  とするときのものである [9]。  $XYZ$  は、三刺激値と呼ぶ正値の  $XYZ$  値による、表色計算に便利のように制定された仮想的な表色系である [11], [12]。  $XYZ$  は、色と直接に対応するように作られていない。そのため、色との対応関係を調べるには、

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \quad (2)$$

$$y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad (3)$$

によって求められる色度値  $xy$  を用いる。平面に作図される  $xy$  色度図を図 1 に示す [11], [12]。図 1 で示される釣鐘状の曲線がスペクトル軌跡であり、その下側を結ぶ直線が純紫軌跡である。スペクトル軌跡と純紫軌跡の内側に可視光の色が存在する。HDTV および NTSC 規格により  $RGB$  で表現される色の領域は、それぞれ実線、および、破線の三角形内に示される [9], [12]。

### 2.2 混同色線による混同色検出

本節では、 $xy$  色度図において求められる混同色線と、混同色線理論に基づく混同色の検出について説明する。網膜上に存在する色を感知する錐体は、光の波長に対する感度特性の違いから、 $S$ ,  $M$ ,  $L$  の三種類に分類される。 $S$ ,  $M$ ,  $L$  錐体は、それぞれ短波長 (Short wave)、中波長 (Middle wave)、そして、長波長 (Long wave) の光に対して、高い感度を有することが知られてい

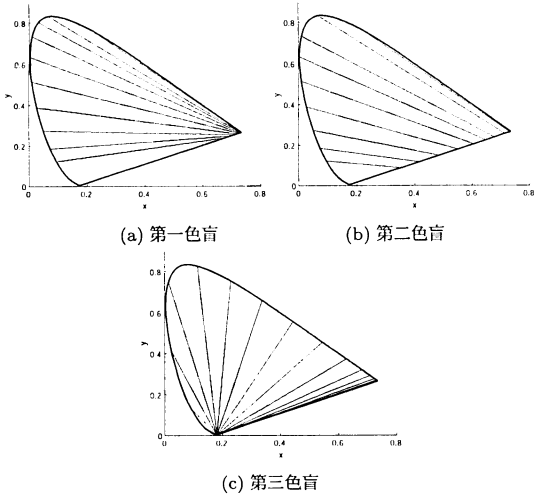


図3  $xy$  色度図における混同色線  
Fig. 3 Confusion loci in  $xy$  diagram

る [2]~[4]. 異なる波長の光に対する、それぞれの錐体における反応値である分光感度特性の相対値比を図 2 に示す [1], [2], [13]. それら  $S, M, L$  錐体のうち、いずれか一つの欠落による色盲の場合、二色型の第一色盲 (Protanope), 第二色盲 (Deuteranope), そして第三色盲 (Tritanope) の三種類に分類される [4], [5]. 色盲の種類により、 $xy$  色度図上の異なる場所に混同色中心と呼ばれる座標を有する. Judd より求められた混同色中心の座標は、第一色盲が、 $x_p = 0.747, y_p = 0.253$ , 第二色盲が、 $x_d = 1.000, y_d = 0.000$ , 第三色盲が  $x_t = 0.180, y_t = 0.000$ , である [2]. 三点ある混同色中心のうち、いずれか一点から無数に引かれる線のグループが、それぞれの色盲における混同色線である.  $xy$  色度図上における混同色線を図 3(a)-(c) に示す. 同一直線の混同色線上に位置する個々の色は、色盲者にとって別の色であるとする色弁別が難しいことが知られている [1]~[9]. よって、同一混同色線上に異なる色が位置するかどうかを判定することにより、色盲者により識別が困難な混同色となる色の組み合わせを判定することが可能である.

### 3. 錐体の反応による色覚モデル

本章では、網膜に存在する  $LMS$  錐体の反応による色盲者の色覚モデルについて説明する. 人間は、光に対する  $L, M, S$  錐体の反応値の比によって色を知覚する.  $LMS$  錐体の分光感度値と  $XYZ$  との対応関係は、

$$\begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.15514 & 0.54312 & -0.00323 \\ -0.15514 & 0.45684 & 0.03286 \\ 0.0 & 0.0 & 0.01608 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (4)$$

で与えられる [9], [14]. 二色型第一色盲, 第二色盲の色覚は、 $LMS$  錐体において、それぞれの応答を  $L_p M_p S_p$  および  $L_d M_d S_d$  とすると

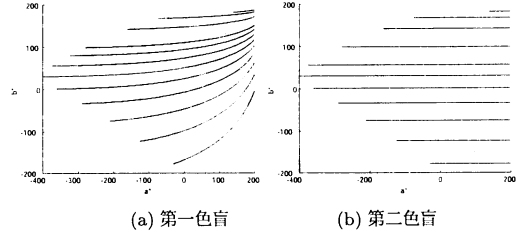


図 4  $a^*b^*$  色度図における混同色線の軌跡  
Fig. 4 Loci of confusion loci in  $a^*b^*$  diagram

$$\begin{bmatrix} L_p \\ M_p \\ S_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0 & 2.0222 & -2.5258 \\ 0.0 & 1.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 1.0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} L_d \\ M_d \\ S_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.4942 & 0.0 & 1.2483 \\ 0.0 & 0.0 & 1.0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix} \quad (6)$$

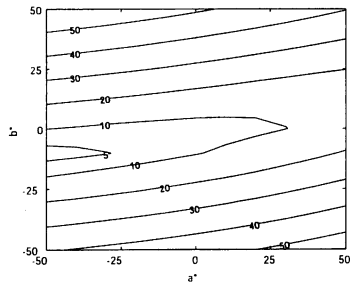
と求められる [9]. よって、式 (5), (6) から求められた  $LMS$  値から、式 (4) の逆行列により  $XYZ$  を逆算することで、二色型第一色盲, および、第二色盲者が知覚する色を推測することが可能である. つまり、色盲者が観測している色の見え方によるカラー画像を生成することができる.

## 4. 色覚バリアフリーを実現するカラー画像の色変換

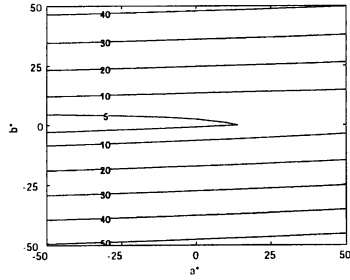
### 4.1 混同色理論に基づく混同色の修正

色変換は、 $XYZ$  や  $RGB$  等の表色系の表す三種類のパラメータ値を変更することでなされる. しかしながら、三種類ものパラメータを変更することは、数多くの色の組み合わせを調べることになり、処理の負荷が大きい. 本研究では、一種類のパラメータの調整のみにより実現する色の変換法について提案する. 第一色盲, 第二色盲の混同色中心から引かれる、それぞれの  $xy$  色度図上において、ある同一の混同色線を通して色の値  $(x, y)$  を、均等色空間として知られる  $L^*a^*b^*$  表色系の  $a^*b^*$  色度図に写像する. その様子を図 4(a),(b) に示す. 付録に示す通り、 $L^*a^*b^*$  は  $XYZ$  から算出される表色系であり、 $z = 1 - (x + y)$ , かつ  $X : Y (= 100) : Z = x : y : z$  の関係から  $xy$  値からも算出される. 色変換は、混同色線から離れた色に修正する必要がある. そのため、図 4(a),(b) における同一曲線ないし直線とある程度離れた線上の色を選択すればよい.  $a^*b^*$  色度は、色相と彩度からなる色の属性 (クロマティックネス指数) を表している.  $L^*a^*b^*$  表色系は均等色空間として規定されているため、 $a^*b^*$  色度図における幾何学的距離は、色覚の正常な人間が知覚する色の差異の度合いと比例している. よって、 $a^*b^*$  色度図において混同色線の軌跡と直交する方向に色を修正すれば、必要以上に色変更を行わずに、色混同を生じない色変換が実現される.

図 5(a) は、第一色盲において混同しやすい色の



(a) 第一色盲



(b) 第二色盲

図5  $a^*b^*$  における色修正による色差の変化

Fig. 5 Color difference value given by color correction in  $a^*b^*$

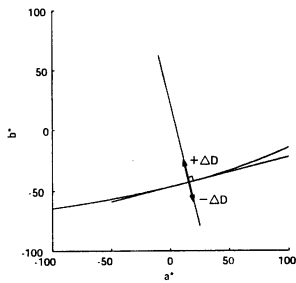


図6  $a^*b^*$  色度図の混同色線の軌跡による色の修正

Fig. 6 Color correction by confusion loci in  $a^*b^*$

組み合わせである  $L^*a^*b^*$  値  $C_1(74.57, -46.07, 44.35)$  と  $C_2(87.52, 11.00, 54.08)$  のうち、 $C_1$  を、 $-50 \leq a^* \leq 50$ 、 $-50 \leq b^* \leq 50$  の範囲で元の値に加えることで修正した色を  $C'_1$  とし、式 (5) で求めた第一色盲者の視覚モデルによって  $C'_1$  と  $C_2$  を第一色盲者の見え方により色変換した後、 $L^*a^*b^*$  における  $C'_1$  と  $C_2$  間の色差  $\Delta E_{Lab}$  (式 (A. 4) 参照) を等高線グラフ化したものである。図 5(b) は同様に、 $C_1(72.60, 42.81, 23.12)$  と  $C_2(74.39, -20.23, 24.40)$  としたときの第二色盲における色修正時の色差の等高線である。図 4、図 5 から、第一色盲においては、 $a^*b^*$  色度図における混同色線の軌跡の接線に直交する方向の色修正  $\Delta D$  を、第二色盲においては、 $b^*$  の軸方向に  $\Delta D$  だけ色修正処理を行うことで、 $a^*b^*$  色度図上における最短距離の色修正にもかかわらず、色混同を避ける色変換が可能であることがわかる。

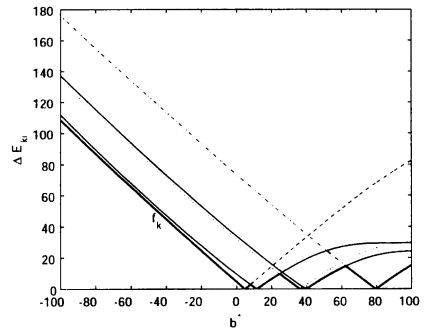
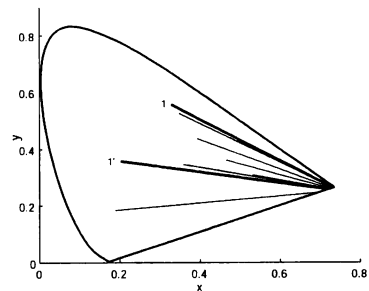
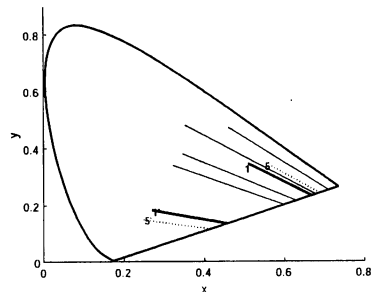


図7 色修正におけるクラスタ間色差の変化と最小色差  $f_k$

Fig. 7 Color difference value of clusters and minimum value  $f_k$



(a)N3A(第一色盲)



(b)Parrots(第二色盲)

図8 色変換による混同色線の変化

Fig. 8 Change of confusion loci by color conversion

#### 4.2 クラスタ代表色の分布に従った色修正法

カラー画像を色により分割した領域のうち、色混同を生じているクラスタとは別の領域の色を考慮に入れずに、特定領域の色のみを修正することにより、別の領域の色と再び混同する恐れが生じる。そのため、色の修正を行う前に、画像内に含まれる色の分布を調べ、他の領域の色との混同を防いだ、以下の手続きによる色修正を行う必要がある。

- (1) 色の修正対象であるクラスタ  $k$  の代表色  $C_k(L_k^*, a_k^*, b_k^*)$  から、4.1 で述べた  $\Delta D$  値を特定の範囲においてシフトさせたとき、別のクラスタ  $i$  ( $i \neq k$ ) の代表色  $C_i(L_i^*, a_i^*, b_i^*)$  との、色盲者の色覚モデルによる色差  $\Delta E_{ki}(\Delta D)$  を算出する。
- (2) (1) で算出した色差  $\Delta E_{ki}(\Delta D)$  のうち、同一の  $\Delta D$  において色差が最小となるクラスタの値を集めた  $\min\{\Delta E_{ki}(\Delta D)\}$

を関数  $f_k(\Delta D)$  とする。

(3) (2) で求めた関数  $f_k(\Delta D)$  の値が  $\Delta E_{Th}$  以上となる  $\Delta D$  の最小値を求め、その値を色修正値とする。

後に 5. で用いる図 10(a) に示す画像 Parrots を、6 クラスタに分割させる K-means クラスタリングを行う。その結果により得られる、あるクラスタの代表色の値を変更させながら、その他 5 つのクラスタ代表色との間に求められる、第二色盲者の色覚モデルによる色差  $\Delta E_{ki}$ 、および、 $f_k$  のグラフを、図 7 に示す。色混同を生じている色の組み合わせ以外の他のクラスタの色との混同を防ぎながら、新しい色への変更を行うには、図 7 から明らかのように、 $b^*$  値を零よりも小さい値に変更するに従い  $f_k$  値が大きくなることから、 $b^*$  値を負の値に変更することにより、適切な色変換がなされることがわかる。

#### 4.3 混同色を含んだカラー画像の色変換法

本節では、実際のカラー画像において、色盲者の色覚モデルから推測される色の見え方における色差、および、 $xy$  色度図上で求められる混同色線間のなす角度から、色が混同しやすいか否かを判定する手続き、並びに、色混同を生じている色に対する色変換法を提案する。まず、 $L^*a^*b^*$  表色系におけるカラー画像のクラスタリング処理を K-means 法により行う [15]。これにより、人間の色覚に沿うように同一系列色ごとに領域が分割される。次に、各領域におけるクラスタの代表色を用いて色混同の有無を調べ、混同している色の値をシフトさせる度合いを求める。最後に、色変換させる同一領域内の色を同じ値だけシフトさせることで、色変換が実現される。以下に具体的な手順について述べる。

(1)  $xy$  色度図上において二色の  $xy$  値を求め、それぞれの  $xy$  値座標を通過する混同色線を引く。

(2) 2本の混同色線のなす角度  $\theta$  を求め、 $\theta$  がある角度  $\theta_{Th}$  以下のとき、混同色の候補とする。

(3) 混同色候補の二色に対し、 $L^*a^*b^*$  における元々の色差  $\Delta E_{Lab}$  と、色盲者の色覚モデルで観測される画像による色差  $\Delta E'_{Lab}$  を求め、 $\Delta E_{Lab} > T_1$  かつ  $\Delta E'_{Lab} < T_2$  となる組み合わせが存在したとき、該当する二色は、元々色が異なるにもかかわらず、色弁別が難しい組み合わせであると判断する。

(4) さらに、(3) で求められた色の組み合わせの中で、画像全体の画素数に対する、それぞれのクラスタに属する画素数の割合を調べ、ともに割合  $S_{Th}$  を上回る時、その混同色の組み合わせのうち、面積の小さい一方を色変換する必要があると判断する。該当色を通過する混同色線上の色を  $a^*b^*$  色度図上に写像し、 $a^*b^*$  色度図における混同曲線の軌跡の接線に直交する方向に、4.2 にしたがって  $\Delta D$  だけ修正する。

### 5. 適用例

適用例では、実際の処理対象画像として、第一色盲モデルに対しては図 9(a) に示す JIS/SCID N3A 画像を、第二色盲モデルに対しては図 10(a) に示す Parrots を用いる。まず、あらかじめそれぞれの画像を 11 および 6 クラスタにて K-means クラスタリングしておく。図 9(a) および 図 10(a) には、各領域の境界線が重ね書きしてある。共通のパラメータとして、

表 1 N3A 画像の混同色間色差の変化 (第一色盲)

Table 1 Color difference of confusion colors in N3A image(Protanope)

Step	Cluster No.	$\Delta E_{Lab}$	$\Delta E'_{Lab}$	$\Delta E''_{Lab}$
1	(1,3)	59.3	6.9	110.0

表 2 Parrots 画像の混同色線間色差の変化 (第二色盲)

Table 2 Color difference of confusion colors in Parrots image(Duteranope)

Step	Cluster No.	$\Delta E_{Lab}$	$\Delta E'_{Lab}$	$\Delta E''_{Lab}$
1	(1,2)	61.9	13.6	66.53
2	(2,5)	78.9	8.8	92.5

$\cos \theta_{Th} = 0.9, T_1 = 30, T_2 = 15, \Delta E_{Th} = 40, S_{Th} = 0.1$  を用いる。

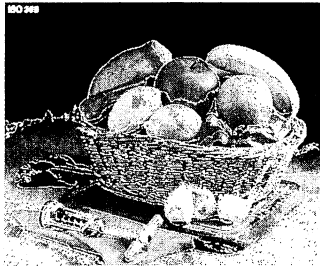
第一色盲モデルにおける色変換の手続きとその結果について説明する。画像 JIS/SCID N3A の領域分割結果から得られた各クラスタの代表色の混同色線と、色変換により修正されたクラスタ 1 の混同色線を図 8(a) に示す。修正後のクラスタ 1 は、1' と表記してある。処理前には混同色線において重なりがあることが理解される。画像 N3A における色変換の過程を表 1 に示す。Step は色変換手続きの順序を、Cluster No. は、色変換時に比較対象としたクラスタ番号であり、先頭の番号のクラスタ色を変換させる。一番右の  $\Delta E''_{Lab}$  は、色変更処理後の色盲者の見え方による二色間の色差である。 $\Delta E'_{Lab}$  に比べ値が大きくなっていることがわかる。実際の処理画像である図 9(c) においても図 9(b) と比べ、バスケット左側の緑ピーマンと中央手前のレモンとの色弁別が可能となっている。第二色盲モデルにおいても同様に、修正前後における代表色の混同色線の図を図 8(b) に、色変換の過程を表 2 に示す。第一色盲における処理と同様に、図 10(b), (c) より、色弁別しやすい画像が得られている。なお、実際に処理したカラー画像は、著者らの大学の Web ページにて参照されたい。

### 6. むすび

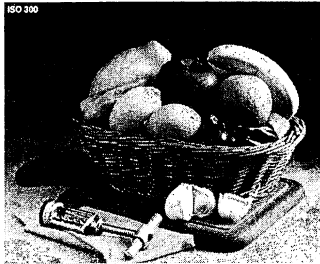
本稿では、カラー画像から、色が類似している領域ごとに領域を分けて分割を行い、それぞれの領域の代表色同士が色の弁別がしやすいか否かを判定し、弁別が難しい領域の色の値を変換させることで、知覚しやすいカラー画像を生成する手法を提案した。限られた色候補から探索する簡易な手法であるが、色盲者においても識別可能で、見やすい色変換処理を実現した。

#### 文 献

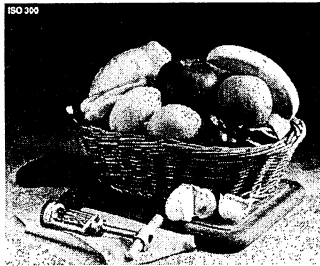
- [1] 日本視覚学会 (編), 視覚情報処理ハンドブック, 朝倉書店, 2000.
- [2] 内川恵二, 色覚のメカニズム, 朝倉書店, 1998.
- [3] 大田安雄, 清水金郎, 色覚と色覚異常, 金原出版, 1999.
- [4] 岡部正隆, 伊藤啓, “色覚の多様性と色覚バリアフリーなプレゼンテーション第 1 回, 色覚の原理と色盲のメカニズム,” 細胞工学, vol.21, no.7, pp.733-745, July 2002.
- [5] 岡部正隆, 伊藤啓, “色覚の多様性と色覚バリアフリーなプレゼンテーション第 2 回, 色覚が変化すると, どのように色が見えるのか?,” 細胞工学, vol.21, no.8, pp.909-930, Aug. 2002.
- [6] 岡部正隆, 伊藤啓, “色覚の多様性と色覚バリアフリーなプレゼン



(a) 処理画像 N3A の領域分割結果



(b) 色覚モデルによる見え方 (第一色盲)



(c) 提案手法による見え方 (第一色盲)

図 9 処理画像結果 (N3A)

Fig. 9 Results of N3A image

テーション第3回, すべての人に見やすくするためには, どのように配慮すればよいか,” 細胞工学, vol.21, no.9, pp.1080-1104, Sept. 2002.

- [7] G.W. Meyer and D.P. Greenberg, Color-defective vision and computer graphics display, *IEEE Computer Graphics & Applications*, vol.8, no.5, pp.28-40, Sept. 1988.
- [8] H. Brettel, F. Vienot, and J.D. Mollon, Computerized simulation of color appearance for dichromats, *J. Opt. Soc. Am. A*, vol.14, no.10, pp.2647-2655, Oct. 1997.
- [9] F. Vienot, H. Brettel, and J.D. Mollon, Digital video colourmaps for checking the legibility of displays by dichromats, *COLOR research and application*, vol.24, no.4, pp.243-252, Aug. 1999.
- [10] C. Rrigden, The eye of the beholder' -Designing for colour-blind users, *British Telecommunications Engineering*, vol.17, pp.2-6, Jan. 1999.
- [11] 大田登, 色彩工学, 東京電機大学出版局, 1993.
- [12] 三宅洋一, デジタルカラー画像の解析・評価, 東京大学出版会, 2000.
- [13] V.C. Smith and J. Pokorny, Spectral sensitivity of the foveal cone photopigments between 400 and 500 nm, *Vision Research*, vol.15, pp.161-171, 1975.
- [14] D. I. A. MacLeod and R. M. Boynton, Chromaticity diagram showing cone excitation by stimuli of equal luminance, *J. Opt. Soc. Am.*, vol.69, no.8, pp.1183-1186, Aug. 1979.
- [15] 宮本定明, クラスタ分析入門, 森北出版, 1999.



(a) 処理画像 Parrots (b) 色覚モデル (第二色盲)



(c) 提案手法の見え方 (第二色盲)

図 10 処理画像結果 (Parrots)

Fig. 10 Results of Parrots image

## 付 録

### 付録 $L^*a^*b^*$ 表色系

色空間内の距離が, 人間の知覚する色の違いの度合いと一致するように, 色空間における色の配置関係を均等に近づけるように分布された均等色空間として,  $L^*a^*b^*$  表色系が CIE によって規定されている [11], [12].  $XYZ$  表色系から  $L^*a^*b^*$  表色系への変換は,

$$L^* = 116 \cdot (Y/Y_N)^{1/3} - 16 \quad (\text{A. 1})$$

$$a^* = 500 [(X/X_N)^{1/3} - (Y/Y_N)^{1/3}] \quad (\text{A. 2})$$

$$b^* = 200 [(Y/Y_N)^{1/3} - (Z/Z_N)^{1/3}] \quad (\text{A. 3})$$

により算出される。本稿では, 標準光  $D_{65}$  における三刺激値である  $[X_N, Y_N, Z_N] = [95.04, 100.0, 108.89]$  を用いる。  $L^*a^*b^*$  における色差は, 二色を  $(L_1^*, a_1^*, b_1^*)$ ,  $(L_2^*, a_2^*, b_2^*)$  としたとき,

$$\Delta E_{Lab} = \sqrt{(L_1^* - L_2^*)^2 + (a_1^* - a_2^*)^2 + (b_1^* - b_2^*)^2} \quad (\text{A. 4})$$

により算出される [11], [12].