

## Color2Gray アルゴリズムに基づいた 弁別困難色に対する明度修正法の一提案

田中 豪<sup>†</sup> 末竹 規哲<sup>†</sup> 内野 英治<sup>†,††</sup>

<sup>†</sup> 山口大学大学院理工学研究科 〒753-8512 山口県山口市吉田 1677-1

<sup>††</sup> 財団法人ファジィシステム研究所 〒820-0067 福岡県飯塚市川津 680-41

E-mail: †{tanaka,suetake,uchino}@ic.sci.yamaguchi-u.ac.jp

あらまし 原画像のもつ色彩をなるべく変えずに、色覚異常者にとって視認性の良いカラー画像を作成する手法を提案する。提案手法では、まず、Color2Gray アルゴリズム (色の違いを考慮したモノクロ変換) により、対象となるカラー画像をモノクロ化する。そして、色の違いを反映したモノクロ画像 (明度情報) と色覚異常者の感じる明度成分が一致するように原画像の色を変換することで、色覚異常者に対する弁別困難色の解消を実現する。また、一般色覚者に対する色彩の印象をなるべく保存するために、色の変換に際して色度を不変にするという制約を加える。この制約は、変換を一意的なものにする効果ももつ。実験により、提案手法の有効性を示す。

キーワード 弁別困難色, 色覚異常, 色覚バリアフリー, カラー画像

## A Proposal of Lightness Modification Method Based on Color2Gray Algorithm for Undiscriminatable Colors

Go TANAKA<sup>†</sup>, Noriaki SUETAKE<sup>†</sup>, and Eiji UCHINO<sup>†,††</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Science and Engineering, Yamaguchi University,  
1677-1 Yoshida, Yamaguchi-shi, 753-8512 Japan

<sup>††</sup> Fuzzy Logic Systems Institute,  
680-41 Kawazu, Iizuka-shi, 820-0067 Japan

E-mail: †{tanaka,suetake,uchino}@ic.sci.yamaguchi-u.ac.jp

**Abstract** We propose a method which improves visibility of color images for color defectives while it doesn't change hue and chroma so much. In the proposed method, at first, the salience-preserving color removal is applied to an input color image, and the monochrome image considering the color differences is obtained. Then, colors in an input image are changed so that the lightness components perceived by color defectives become the monochrome image. Moreover, the restriction which saves chromaticity is introduced to preserve the impression for common viewers. Experiments prove the effectiveness of the proposed method.

**Key words** Undiscriminatable colors, Color defective, Color barrier free, Color image

### 1. まえがき

ヒトは、光の波長に対して感度の異なる 3 種類の錐体細胞を網膜上に有し、それらの反応強度によって色を知覚している。色覚異常者の多くは、3 種類の錐体のうちいずれか一つの錐体を欠いた状態で色を知覚しており、特定の範囲の色について色の差を感じにくいという色覚特性を持つ [1], [2]。このような色覚特性を持つ人に対して、カラー画像中の弁別困難色を弁別が容易な色に変換し、視認性の良い画像を提供することは非常に重要である。

この問題に対して、従来より、いくつかの色変換手法が提案されている [3], [4]。しかしながら、これらの手法は、色変換を色に関する組み合わせ最適化問題と捉えたものや、繰り返し計算を要するクラスタリングによって画像中の代表色を決定し、それらの組み合わせを考えて色を修正するといったものであり、計算コストの面からみて実用性が高いとはいえない。また、赤色が紫色に変更されるといったように、色弁別は容易になるものの、元の色と著しく異なった色へ変換される場合もあり、必ずしも適切に色変換が行われているとはいえない。このような色変換は、画像のもつ印象までも変えてしまうので、特に、

絵画や自然画像に対しては、ふさわしくないといえる。

本報告では、色覚異常者の中でも比較的多いといわれる二色型色覚特性を対象とした色変換手法を提案する。具体的には、色の違いを反映したモノクロ画像（明度成分）を色覚異常者の感じる明度成分に埋め込むことで、色相や彩度をほとんど変えることなく、視認性の良いカラー画像を作成する。

以下に、まず、色の違いを考慮したモノクロ変換手法と、その高速な計算方法について説明する。次に、色の違いを反映したモノクロ画像を一般色覚者の明度成分とする手法について説明する。その後、提案手法（色の違いを反映したモノクロ画像を色覚異常者の明度成分とする手法）を述べる。実験により提案手法の色変換能力を示す。また、計算時間についても述べる。

## 2. 色の違いを考慮したモノクロ変換手法

A.A. Goochらは、カラー画像の画素間に“符号付き色距離”を定義し、それを用いた目的関数を構成し、最小化することでモノクロ画像を得る手法（Color2Gray アルゴリズム）を提案している [5]。Color2Gray では、目的関数の最小化を通して、符号付き色距離（色の違い）をグレーレベルに反映させる。この章では、Color2Gray について説明する。

### 2.1 目的関数と最小化問題

Color2Gray では、次の目的関数を構成する。

$$E(f) = \sum_{(i,j) \in \sigma_\rho} ((f_i - f_j) - \delta_{ij})^2. \quad (1)$$

ここで、 $f_i$  は画素  $i$  のグレーレベルであり、ベクトル  $f = (f_1, f_2, \dots, f_n)$  はモノクロ画像を表す（ $n$  は画素数である）。 $\delta_{ij}$  は画素  $i$  と  $j$  の間の符号付き色距離であり、画素  $i$  と  $j$  の色の違いを定量的に表現したものとなっている。 $\delta_{ij}$  の定義は 2.2 で述べる。 $\sigma_\rho$  は“画素対集合”であり、画素  $i$  の空間座標を  $(x_i, y_i)$  で表すとき、 $\max(|x_i - x_j|, |y_i - y_j|) \leq \rho$  である画素対  $(i, j)$  を要素とする。このように、 $\rho$  は近傍の範囲を表す。また、入力画像における全ての画素対が  $\sigma$  の要素である場合  $\rho = \infty$  で表すことにする。

Color2Gray では、次の最小化問題を解くことで、出力画像  $\bar{f}$  を得る。

$$\bar{f} = \arg \min_{f_i \in \mathbb{R}} E(f). \quad (2)$$

この最小化問題は、具体的には、共役勾配法を用いて解く。この際、 $f$  の初期値は入力画像の明度成分  $l = (L_1^*, L_2^*, \dots, L_n^*)^T$  とする。 $L^*$  は CIE 1976  $L^*a^*b^*$  色空間 [6] 上の明度成分であり、 $L_i^*$  は画素  $i$  の  $L^*$  成分を表す。また、 $T$  は転置を表す。

式 (1), (2) は、符号付き色距離  $\delta_{ij}$  を画素  $i, j$  間のグレーレベルに反映させるものである。ただし、 $c = (c_1, c_2, \dots, c_n)^T$ ,  $c_i = \text{const.}$  と定義した  $c$  に対し、 $E(f+c) = E(f)$  であるので、この最小化問題は無数の解を持つ。

Color2Gray では、出力画像の平均明度を妥当なものにするために、ある解  $\bar{f}$  が得られた後、 $\bar{f}$  のシフトを行う。具体的には、出力画像の平均明度が入力画像の平均明度に等しくなるように  $\bar{f}$  をシフトさせ、それを最終的なグレーレベルとする。

### 2.2 符号付き色距離の定義

画素  $i$  と  $j$  の間の符号付き色距離  $\delta_{ij}$  は、

$$\delta_{ij} = \begin{cases} \Delta L_{ij}^* & |\Delta L_{ij}^*| > \Phi_\alpha(\|\Delta C_{ij}\|) \\ \text{sign}(\Delta C_{ij} \cdot v_\theta) \Phi_\alpha(\|\Delta C_{ij}\|) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

で定義される。ここで、 $\Delta L_{ij}^* = L_i^* - L_j^*$ ,  $\Delta C_{ij} = (\Delta a_{ij}^*, \Delta b_{ij}^*) = (a_i^* - a_j^*, b_i^* - b_j^*)$ ,  $\|\Delta C_{ij}\| = \sqrt{\Delta a_{ij}^{*2} + \Delta b_{ij}^{*2}}$  であり、

$$\text{sign}(x) = \begin{cases} +1 & x > 0 \\ -1 & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (4)$$

$$\Phi_\alpha(x) = \alpha \tanh(x/\alpha), \quad (5)$$

$$v_\theta = (\cos \theta, \sin \theta) \quad (6)$$

である。また、式 (3) において“ $\cdot$ ” は内積を表す。 $a^*, b^*$  は CIE 1976  $L^*a^*b^*$  色空間上の成分であり、例えば、 $a_i^*$  は画素  $i$  の  $a^*$  成分を表す。式 (5) 中の  $\alpha$  は、正の実数であり、カラー画像における色の違いをどの程度グレーレベルに反映させるかを調節するパラメータである。また、式 (6) 中の  $\theta$  は、 $\pi/4$  程度にすることで、モノクロ化において暖色の画素を明るく、寒色の画素を暗くする効果を持つパラメータである。ただし、 $\theta$  に原理的な制約はない。

式 (3) は、画素  $i$  と  $j$  において明度差  $\Delta L_{ij}$  と色み差  $\Delta C_{ij}$  を比べ、明度差が優勢なときは明度差を、色み差が優勢なときには色み差に関連する量を、その画素間の色距離とするものである。 $\Phi_\alpha$  は、明度差と色み差のバランスを取るための関数である。 $\Phi_\alpha$  により、色み差の評価はたかだか  $\alpha$  に抑えられる。

### 2.3 最小化問題の解析解

筆者らは以前、文献 [7] において、 $\rho = \infty$  とした Color2Gray では、最小化問題の最適解を解析的に与えられることを示した。 $\rho = \infty$  とした Color2Gray では、出力画像  $\bar{f}$  における画素  $i$  のグレーレベル  $\bar{f}_i$  (最小化問題の解析解) は、

$$\bar{f}_i = \bar{L}^* + \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \delta_{ij} \quad (7)$$

と書ける [7]。ここで、 $\bar{L}^*$  は入力画像全体の平均明度であり、 $n$  は入力画像の画素数である。また、式 (7) は、適切にシフトされた最終的なグレーレベルである [7]。

式 (7) を見ると、同じ色 (RGB 値) の画素は、同じグレーレベルに変換されることが分かる。つまり、 $\rho = \infty$  の場合には、同じ色が同じグレーレベルに変換される保証がある。一方、 $\rho \neq \infty$  の場合には、同じ色が同じグレーレベルに変換される保証はない。つまり、 $\rho = \infty$  は妥当な設定といえる。本報告では、 $\rho = \infty$  の場合のみを考え、Color2Gray のモノクロ変換は解析解 (式 (7)) に基づいて行う。また、式 (7) によりグレーレベルを計算することを、Original Color2Gray と呼ぶことにする。

## 3. 色の違いを考慮した高速モノクロ変換手法

筆者らは、前報 [8], [9] において、Color2Gray の高速化法を

提案した。その高速化法は、

- A. 符号付き色距離  $\delta_{ij}$  の定義の変更
- B. 同色画素の数を考慮した計算
- C. 色の量子化

である。更に、高速化による画質の劣化を防ぐために、

- D. 明度補正

も提案した [9]。以下に、方法 A~D について説明する。

### 3.1 方法 A: 符号付き色距離の変更

符号付き色距離  $\delta_{ij}$  の定義のうち、式 (5) は、

$$\Phi_{\alpha}(\|\Delta C_{ij}\|) = \alpha \tanh\left(\sqrt{\Delta a_{ij}^{*2} + \Delta b_{ij}^{*2}} / \alpha\right) \quad (8)$$

であるが、

$$\Phi'_{\alpha}(\|\Delta C_{ij}\|) = \alpha \tanh\left(\left[\sqrt{\Delta a_{ij}^{*2} + \Delta b_{ij}^{*2}}\right] / \alpha\right) \quad (9)$$

とした場合の符号付き色距離を  $\delta'_{ij}$  と定義する。

実際の処理では、まず、 $x$  を 0 以上の整数として、

$$T_1(x) = \lfloor \sqrt{x} \rfloor, \quad (10)$$

$$T_2(x) = \alpha \tanh(x/\alpha) \quad (11)$$

なる look up table (LUT)  $T_1$  及び  $T_2$  を作成する。このとき、 $\Phi'_{\alpha}(\|\Delta C_{ij}\|) = T_2(T_1(\lfloor \Delta a_{ij}^{*2} + \Delta b_{ij}^{*2} \rfloor))$  である。

Original Color2Gray では、画素対の数だけ平方根と  $\tanh$  の計算を行うが、その計算にもかなりの時間がかかる。式 (9) を用いると、平方根と  $\tanh$  の計算は、LUT を作成するときのみ行えばよい。 $\delta'$  を用いることで、処理を高速化しつつも、Original Color2Gray に比べてほとんど劣化のない出力画像を得ることができる。

### 3.2 方法 B: 同色画素の数を考慮した計算

ここでは、何らかの方法により、入力画像中の色に対して通し番号 (色番号  $i'$ ) が与えられており、また、色番号が  $i'$  である画素の数は  $s_{i'}$  であると分かっているとす。更に、画素番号  $i$  と色番号  $i'$  の LUT  $T_3$  も存在するとす。ここで、画素  $i$  が色番号  $i'$  の色であるとき、

$$i' = T_3(i) \quad (12)$$

である。色番号  $i'$  の色に変換されるべきグレーレベル  $\bar{f}'_{i'}$  は、式 (7) に基づいて、

$$\bar{f}'_{i'} = \bar{L}^* + \frac{1}{n} \sum_{j'=1}^m s_{j'} \delta'_{ij'} \quad (13)$$

と書ける。ここで、 $m$  は入力画像中の色数である。 $m \leq n$  であり、更に、多くの場合、 $m$  は  $n$  よりも十分に小さいので、式 (13) による計算は、式 (7) よりも短時間で行える。最終的に、画素  $i$  におけるグレーレベル  $\bar{f}_i$  は、 $\bar{f}_i = \bar{f}'_{T_3(i)}$  で得られる。

$s_{i'}$  の取得及び  $T_3$  の作成は、Original Color2Gray にはない処理である。もしこれが計算時間のかかるものであるとす、全体としての高速化にはならない。これらの高速な処理方法については、文献 [8] を参照されたい。

### 3.3 方法 C: 色の量子化による高速化

本節では、入力画像中の似た色を集約する (量子化する) ことで、色数  $m$  を減らし、方法 B と併せて用いることで高速化を実現する方法について説明する。

画素  $i$  における量子化後の R 成分  $r'_i$  を

$$r'_i = \begin{cases} \beta \lfloor r_i / \beta \rfloor + \lfloor \beta / 2 \rfloor & \text{if } \beta \text{ is odd number} \\ \beta \lfloor r_i / \beta \rfloor + \beta / 2 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

で定める。ここで、 $\beta$  は色の量子化幅であり、正の整数である。また、 $\lfloor x \rfloor$  は床関数であり、 $x$  を超えない最大の整数を表す。G、B 成分についても、同様の量子化を行う。この量子化は、RGB 色空間を量子化幅  $\beta$  で格子状に分割し、各領域内における中心の色を代表色とするものである。

量子化された  $(r'_i, g'_i, b'_i)$  では、入力画像に比べて、同じ RGB 値をもつ画素が増えていることが多い。量子化後の色数  $m'$  について、 $m' \leq m$  である。

色の量子化による計算量低減の度合いは、入力画像の色の分布と  $\beta$  の値に依存する。 $\beta$  を大きくするほど大幅な計算量の低減を実現できる。ただし、 $\beta$  を大きくするにつれて、Original Color2Gray の出力画像との差異は増大する。また、量子化幅が 1 である場合は、方法 B のみをを用いる場合と等しい。

### 3.4 方法 D: 明度補正

方法 C により色の量子化を行うと、量子化領域内の色は同じ代表色で置き換えられて変換されるので、画質の劣化を招くことがある。そこで、画素  $i$  の色と代表色  $i' = T_3(i)$  の違いを考慮し、そこから算出される補正量を  $\bar{f}'$  に付加して画質の劣化を軽減する。画素  $i$  の最終的なグレーレベル  $\bar{f}_i$  は、

$$\bar{f}_i = \bar{f}'_{T_3(i)} + (L_i^* - L'^*_{T_3(i)}) \quad (15)$$

で得る。ここで、 $L'^*_i$  は、色番号が  $i'$  である色の明度  $L^*$  であり、 $L_i^* - L'^*_{T_3(i)}$  は、画素  $i$  の色と代表色の明度差である。

### 3.5 方法 A~D の実装

ここでは、方法 A~D 全てを用いた場合の手順について説明する。まず、式 (14) により、入力画像における色の量子化を行う。次に、量子化された RGB 値  $(r'_i, g'_i, b'_i)$  に対し色番号  $i'$  を付与する。色番号  $i'$  の色に対応するグレーレベル  $\bar{f}'_{i'}$  は、

$$\bar{f}'_{i'} = \bar{L}^* + \frac{1}{n} \sum_{j'=1}^{m'} s_{j'} \delta'_{ij'} \quad (16)$$

で得る。最終的に、画素  $i$  のグレーレベル  $\bar{f}_i$  は次式で得る。

$$\bar{f}_i = \bar{f}'_{T_3(i)} + L_i^* - L'^*_{T_3(i)} \quad (17)$$

この高速な計算方法を Fast Color2Gray と呼ぶことにす。

## 4. 明度変換によるコントラスト強調

Gooch らは、原画像の明度成分を Color2Gray の出力結果に置き換えることで、コントラストの改善が実現できることを示している [5]。本報告では、その手法のことを彼らに倣って Color2Gray+ と呼ぶ。Color2Gray+ は、カラー画像のコント

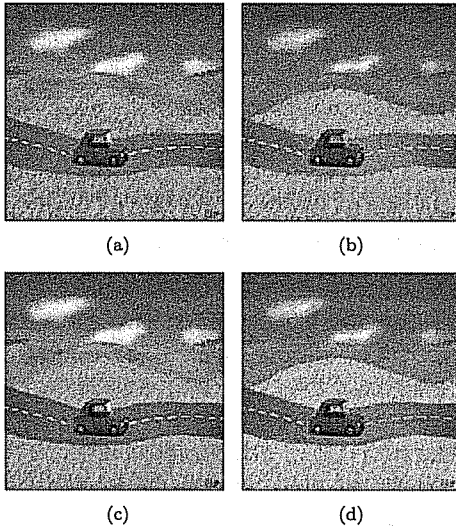


図1 Voitureの実験結果 (a) 原画像, (b) Color2Gray+, (c) 明度成分, (d) Fast Color2Gray ( $\alpha=15, \theta=\pi/4, \beta=8$ )

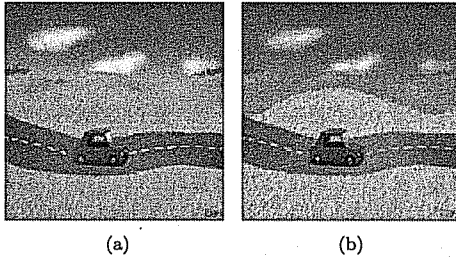


図2 (a) 図1(a)に対するP型色覚者の見え方, (b) 図1(b)に対するP型色覚者の見え方

ラスト強調手法として示されたものであるが、色の違いを強調するという意味において、弁別困難色の解消に役立つ可能性がある。本章では、Color2Gray+の効果について簡単に述べる。

図1(a)に、L. BliのVoiture (125×125画素)を示す。この画像では、(一般色覚者にとっても)草原の黄緑色と山の緑色が弁別しにくい。特に、図1(c)に示したように、明度差はほとんどない。一方、図1(d)は、図1(a)のFast Color2Gray出力であり、草原と山の境界部分の弁別が容易な画像となっている。Fast Color2Grayのパラメータは、 $\alpha=15, \theta=\pi/4, \beta=8$ とした。図1(b)はColor2Gray+の結果であり、図1(a)と比べて、色弁別が容易になっていることが分かる。

図2(a)は、図1(a)に対する二色型第一色覚者(P型色覚者)の見え方のシミュレーション結果である。このシミュレーションは、F. Viénotらのモデル[10]に従って行った。図2(a)では、図1(a)と同様、色の違いはわずかにあるものの、草原と山の色弁別は困難である。図2(b)は、図1(b)に対するP型色覚者の見え方のシミュレーション結果である。図2(a)と比べると、草原と山の色弁別は容易であることが分かる。このように、Color2Gray+により、弁別困難色が解消されることがある。

## 5. 提案手法

図1と図2に示した例では、Color2Gray+によって弁別困難色が適切に解消された。しかし、Color2Gray+は、一般色覚者の明度成分をColor2Gray出力で置き換えるので、P型色覚者の見え方においてコントラストが適切に強調されるという保証はない。

Color2Gray出力 $\bar{f}$ は、(色覚異常者にとっての弁別困難色であろうとそうでなかろうと)色の違いを考慮したモノクロ画像となっている。本報告では、まず、P型色覚者の感じる明度成分 $L_P^*$ を定義し、 $\bar{f}$ (明度情報)を $L_P^*$ に埋め込むことで、弁別困難色の解消を実現する手法を提案する。また、(一般色覚者に対して)画像の印象があまり変化しないように、色変換の前後で色度[6]を不変にする制約というを加える。

### 5.1 二色型第一色覚者に対する明度成分

Viénotらのモデル[10]に基づいて、P型色覚者に対する明度成分 $L_P^*$ を定義する。Viénotらのモデルでは、XYZ値とLMS値(L, M, S各錐体の反応値)の関係が

$$\begin{pmatrix} L \\ M \\ S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.15514 & 0.54312 & -0.03286 \\ -0.15514 & 0.45684 & 0.03286 \\ 0 & 0 & 0.01608 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (18)$$

で表される。また、P型色覚者の錐体反応値を( $L_P, M_P, S_P$ )と表すと、

$$\begin{pmatrix} L_P \\ M_P \\ S_P \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 2.02344 & -2.52581 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L \\ M \\ S \end{pmatrix} \quad (19)$$

なる関係がある。P型色覚者の感じるXYZ値を( $X_P, Y_P, Z_P$ )と表すと、式(18)、(19)より(式(18)の逆行列も使用)、

$$\begin{pmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.3813 & 1.1228 & 0.1730 \\ -0.4691 & 1.3813 & 0.0587 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (20)$$

が得られる。 $(X_P, Y_P, Z_P)$ を、 $(X, Y, Z)$ の場合と同様の手続きで $L^*a^*b^*$ 色空間上の値に変換したときの値を( $L_P^*, a_P^*, b_P^*$ )とする。このとき、 $L_P^*$ がP型色覚者に対する明度である。

RGB値をXYZ色空間や $L^*a^*b^*$ 色空間上の値に変換する方法については、文献[6]を参照されたい。

### 5.2 提案アルゴリズム

提案手法では、 $(X, Y, Z)$ の値を適宜変更することで、弁別困難色の解消を実現する。また、色変換に際して色度[6]を不変に保ち、原画像の色彩があまり変わらないようにする。色度 $(x, y)$ の定義は、

$$x = X/(X+Y+Z), \quad (21)$$

$$y = Y/(X+Y+Z) \quad (22)$$

である[6]。色変換後のXYZ値を $(X', Y', Z')$ としたとき、変換の前後で色度を不変にするには、

$$\begin{pmatrix} X' & Y' & Z' \end{pmatrix}^T = k \begin{pmatrix} X & Y & Z \end{pmatrix}^T \quad (23)$$

で表される変換を行えばよい。ここで、 $k$  は実数である。また、式 (23) は色度を変化させない唯一の方法である。(P 型色覚者に対する) 明度が等しい色は無数にあるが、この制限は変換の不定性を除去するのに役立つ。

色変換後の P 型色覚者に対する Y 値を  $Y'_p$  で表す。色変換は式 (23) で行うことにすると、式 (20) より、

$$Y'_p = k Y_p \quad (24)$$

となる。提案手法では、 $L_p^*$  を  $f$  に近づける。 $L^*$  値と Y 値の間には一対一の関係があり、 $f_i$  を Y 成分値に変換したものを、画素  $i$  における変換目標値  $\tilde{Y}_i$  とする。 $Y'_{p,i}$  が  $\tilde{Y}_i$  となるためには、

$$k_i = \tilde{Y}_i / Y_{p,i} \quad (25)$$

とすればよい。最終的に、式 (23)、(25) により得られた  $(X', Y', Z')$  を RGB 値に変換して出力画像を得る。

ただし、色変換後に色域 (ディスプレイの表示可能範囲) 外となってしまった画素値については、色域内の値となるように適宜修正する。

以上は P 型色覚者を対象とした色変換方式である。二色型第 2 色覚者 (D 型色覚者) を対象とする場合は、式 (20) を

$$\begin{pmatrix} X_D \\ Y_D \\ Z_D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.1884 & 0.6597 & 0.1016 \\ 0.2318 & 0.8116 & -0.0290 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (26)$$

と、D 型色覚者の変換式 [10] に変更すればよい。

## 6. 実験

実験により、提案手法の有効性を示す。Fast Color2Gray のパラメータは、Color2Gray+と提案手法で共通して、 $\alpha = 15$ 、 $\theta = \pi/4$ 、 $\beta = 8$  とした。

まず、Voiture に対する提案手法の結果を図 3 に示す。図 3(a) が色変換結果であり、図 3(b) が図 3(a) に対する P 型色覚者の見え方のシミュレーション結果である。Color2Gray+の結果と同様、草原と山の色弁別が容易になっている。この画像については、Color2Gray+と提案手法の結果に大きな差はない。

次に、人工的なテスト画像によって、Color2Gray+と提案手法の違いを明らかにする。図 4(a) にそのテスト画像 (Test,  $100 \times 100$  画素) を示す。赤色の部分と緑色の部分の RGB 値はそれぞれ、(230, 70, 50) と (20, 150, 20) である。図 4(d) は P 型色覚者の見え方のシミュレーションである。これから分かるように、実は、このテスト画像の配色は弁別困難色ではない。図 4(g) は、図 4(a) に対する Fast Color2Gray 出力結果である。Color2Gray+による色変換結果とその P 型色覚者の見え方をそれぞれ、図 4(b)、(e) に示す。図 4(e) から分かるように、Color2Gray+による結果では、色弁別が非常に困難になってしまっている。このように、Color2Gray+では不適切な色変換がなされることがある。一方、提案手法による結果 (図 4(c)、(f))

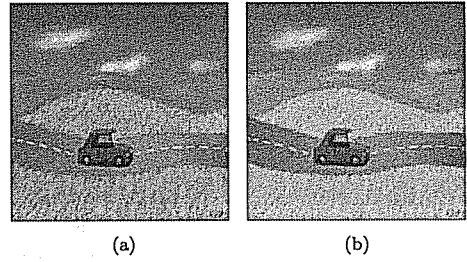


図 3 Voiture の実験結果 (a) 提案手法による図 1(a) の色変換結果、(b) (a) に対する P 型色覚者の見え方

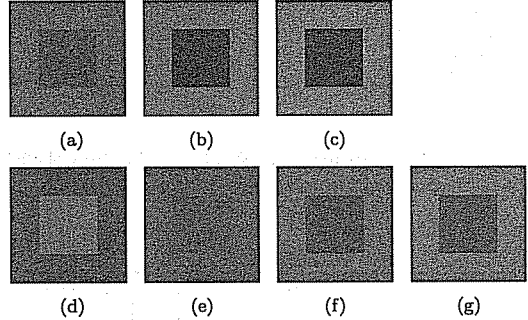


図 4 Test の実験結果 (a) 原画像、(b) Color2Gray+、(c) 提案手法、(d) (a) に対する P 型色覚者の見え方、(e) (b) に対する P 型色覚者の見え方、(f) (c) に対する P 型色覚者の見え方、(g) (a) の Fast Color2Gray 出力 (目標埋め込み明度)

では、元々の状況 (図 4(d)) に比べるとコントラストは低下しているものの、弁別不可能とまではなっていない (図 4(f))。また、Color2Gray 出力 (図 4(g)) を埋め込むという観点からは、良好な結果ともいえる。

続いて、P. Gauguin の Arearea ( $250 \times 198$  画素) に対する結果について述べる。この例では、図 5(d) に示したように、左下に描かれたオレンジ色の犬と背景の緑色が弁別困難色である (弁別可能ではないが、P 型色覚者の感じるコントラストは著しく低い)。図 5(g) は、図 5(a) の Fast Color2Gray 出力であるが、色彩の違いをよく反映したモノクロ画像となっている。図 5(b) に示した Color2Gray+による結果では、一般色覚者に対するコントラストは強調されているが、P 型色覚者に対するコントラストは十分に改善されているとはいえない (図 5(e))。一方、提案手法による結果 (図 5(c)) は、P 型色覚者にとって、Color2Gray 出力をよく反映した色弁別容易な画像であるといえる (図 5(f))。

$L_p^*$  に対する  $f$  の埋め込み精度について、定量的な評価を行う。色変換結果画像の画素  $i$  における P 型色覚者に対する明度を  $L_{p,i}^*$  で表し、評価指標  $\bar{e}$  及び  $e_{\max}$  を以下に定義する。

$$\bar{e} = \frac{1}{N} \sum_{(i,j) \in \sigma} e_{ij}, \quad (27)$$

$$e_{\max} = \max_{(i,j) \in \sigma} e_{ij}, \quad (28)$$

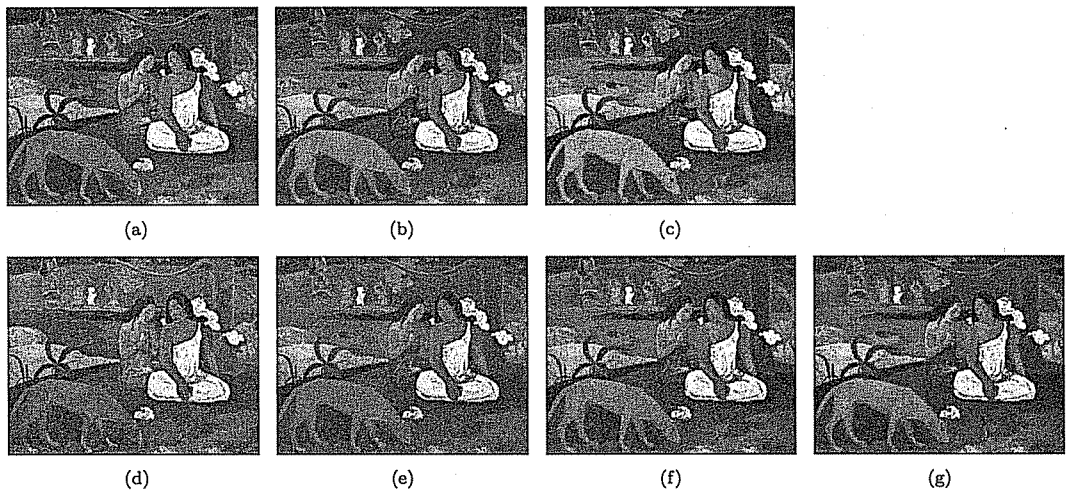


図5 Areareaの実験結果 (a) 原画像, (b) Color2Gray+, (c) 提案手法, (d) (a)に対するP型色覚者の見え方, (e) (b)に対するP型色覚者の見え方, (f) (c)に対するP型色覚者の見え方, (g) Fast Color2Gray出力  $\bar{f}$

表1 定量評価指標  $\bar{e}$  及び  $e_{\max}$

	Voiture		Test		Arearea	
	$\bar{e}$	$e_{\max}$	$\bar{e}$	$e_{\max}$	$\bar{e}$	$e_{\max}$
Color2Gray+	0.84	7.45	5.37	14.3	2.53	13.7
Proposed method	0.23	6.46	2.13	5.69	0.31	7.52

表2 計算時間 (単位: 秒)

	Voiture	Test	Arearea
Original Color2Gray	15.5	3.20	154.9
Fast Color2Gray	0.02	0.01	0.16
Color2Gray+	0.04	0.02	0.25
Proposed method	0.09	0.06	0.39

$$e_{ij} = \left| |L_{P,i}^* - L_{P,j}^*| - |f_i - f_j| \right| \quad (29)$$

ここで、 $\sigma$  は画像中の全ての画素対を要素とする集合であり、 $N$  は  $\sigma$  の要素数を表す。  $e_{ij}$  は画素  $i$  と  $j$  に関する埋め込み誤差であり、 $\bar{e}$  は平均の誤差、 $e_{\max}$  は最大の誤差である。Color2Gray+及び提案手法による出力画像に関する  $\bar{e}$  及び  $e_{\max}$  を表1に示す。表1より、いずれの場合も提案手法の方が誤差が小さいことが分かる。すなわち、提案手法の方が、P型色覚者の明度  $L_P^*$  に目標明度  $f$  をうまく埋め込んでいる。ただし、提案手法の  $\bar{e}$  及び  $e_{\max}$  がゼロでないのは、色変換後に色域外となった画素値を修正したからである。

最後に、計算時間について述べる。Color2Gray+及び提案手法の計算時間を表2に示す。実験に用いたCPUは、Intel® Core™2 Duo 3.0GHzである。また、参考として、Original Color2GrayとFast Color2Gray ( $\beta=8$ )の計算時間も示した。提案手法について、Color2Gray+に比べると時間はかかるが、それでも1秒未滿であり、十分実用であるといえる。

以上より、提案手法の有効性が確認されたといえる。

## 7. むすび

本報告では、Color2Gray出力(色彩の違いを反映した明度情報)を色覚異常者の感じる明度に埋め込むことで、弁別困難色の解消を実現する手法を提案した。また、実験により提案手法の有効性を示した。

謝辞 本研究は科研費(19650041)の助成を受けたものである。

## 文 献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] M. Ichikawa, K. Tanaka, S. Kondo, K. Hiroshima, K. Ichikawa, S. Tanabe, and K. Fukami, “Web-page color modification for barrier-free color vision with genetic algorithm,” LNCS2724, pp.2134-2146, Springer-Verlag, 2003.
- [4] 目黒光彦, 高橋知絃, 古関敏夫, “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,” 信学技報, SIP2004-79, pp.19-24, Oct. 2004.
- [5] A.A. Gooch, S.C. Olsen, J. Tumblin, and B. Gooch, “Color2Gray: Saliency-preserving color removal,” Proc. SIGGRAPH 2005, pp.634-639, Aug. 2005.
- [6] 高木幹雄, 下田陽久(監修), 新編 画像解析ハンドブック, 東京大学出版会, 東京, 2004.
- [7] 田中 豪, 末竹規哲, 内野英治, “符号付き色距離を用いたカラー画像のモノクロ変換に関する考察と計算量の低減,” 信学論(A), vol.J91-A, no.8, pp.817-822, Aug. 2008.
- [8] 田中 豪, 末竹規哲, 内野英治, “符号付き色距離を用いたカラー画像のモノクロ変換の高速化,” 信学技報, SIP2008-3, pp.13-18, April 2008.
- [9] 田中 豪, 末竹規哲, 内野英治, “符号付き色距離を用いたカラー画像の高速モノクロ変換の改良,” 信学技報, SIP2008-87, pp.61-66, July 2008.
- [10] F. Viénot, H. Brettel, and J.D. Mollon, “Digital video colourmaps for checking the legibility of displays by dichromats,” Color Research & Application, vol.24, no.4, pp.243-252, Aug. 1999.