

# クレイク・オブライエン錯視効果に基づくデジタルカラー画像の色覚バリアフリー高速色変換システムの構築

研究代表者 末竹規哲 山口大学 大学院理工学研究科 准教授

## 1 はじめに

近年、我々が生活するメディア社会では、様々な色を使用した文字や画像、映像等が提供されている。特に、Web 上等では色によって多くの情報が表現されている。しかしながら、色の情報はいつも正しく伝えられるとは限らない。2 色覚者は、特定の色の組合せについて、その違いを認識しにくいという色覚特性を有しており、色情報がうまく伝わらない場合がある[1-5]。2 色覚者が色の違いを認識しにくい色は、弁別困難色と呼ばれる。例えば、2 型 2 色覚では特定の赤色と緑色が弁別できない。2 色覚者に対して視認性の良いカラー画像を提供することは重要な課題である。

近年、この問題に対してカラー画像内における弁別困難色のコントラスト改善を目的とした色変換手法がいくつか提案されている[6-15]。K. Rasche ら[6, 7]と J. B. Huang ら[8]は、入力画像内の色の組合せに関する最適化問題を設定し、これを解くことにより色変換を行う手法を提案した。M. Ichikawa ら[9, 10]や目黒ら[11, 12]、星野ら[13]は、クラスタリング処理により入力画像内の代表色を決定し、この代表色の組合せを考慮した上で色変換を行う手法を提案している。R. Dougherty らは、色変換ソフトウェア Daltimization[14]をインターネット上に公開している。しかし、いずれの手法も色変換により弁別容易にはなるものの、元の色と著しく異なった色となり、原画像のもつ色彩の印象を損なってしまうという問題を有する。具体的には、赤色が紫色に変換されるといったことが起こり、正常色覚者にとって好ましくない結果となる。更に、上記の手法の多くは、遺伝的アルゴリズム、共役勾配法、シミュレーテッドアニーリング、クラスタリングアルゴリズムなど計算時間のかかる反復処理を必要とし、実用的でないという問題をもつ。これらの問題を解決するために、処理が簡便である「Huang らの手法[15]」、原画像のもつ色彩の印象の保持が可能である「色の違いを考慮した明度修正[16, 17]」が提案されている。しかしながら、前者は処理が簡便であるものの、色変換量が大きく、画像によっては良好なコントラスト改善が行われにくいという欠点をもつ。後者は、正常色覚者にとって自然な印象をもつ色変換結果が得られるという利点を有するが、入力画像内の色の組合せを考慮した最適化問題を解き、色変換を行うので、計算量が大きいという欠点をもつ。

本研究では、クレイク・オブライエン効果 (Craik-O'Brien effect : C-O 効果) [18-21]に基づいた新奇な弁別困難色のコントラスト改善手法を提案する。C-O 効果は、輪郭情報から主観的にコントラストが生起して見える錯視現象である[21]。提案手法では、2 色覚における明度に対する C-O 効果の生起を考え、色の違いに基づいて入力画像の輪郭部の明度修正を行う。提案手法の特長は以下の通りである。

- (1) 輪郭部のみの明度修正であるので、入力画像の印象を保持できる。
- (2) 計算量が小さい。

以下に、本研究の概要を報告する。

## 2 2 色覚の特性とクレイク・オブライエン効果

### 2-1 2 色覚の特性

ヒトは、光の波長に対して感度特性の異なる 3 種類の錐体 (赤錐体、緑錐体、青錐体) を網膜上の視細胞群に有しており、それらの反応値の比率により色を知覚している。しかし、日本人の多くを占める黄色人では男性の約 5%が、また白人男性の約 8%、黒人男性の約 4%が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[1-4]。そのような色覚特性は、3 種類の錐体の状態から以下のように分類される。3 種類の錐体のうち、いずれか一つの反応特性が変化した場合を異常 3 色覚、いずれか一つが欠けた場合を 2 色覚、二つ以上が欠けた場合を 1 色覚という。本研究では、このうちの 2 色覚に着目する。2 色覚は、失われる錐体の種類によって以下のように、細かく分けられる。赤錐体を欠く場合を protanopia (P 型色覚 : 1 型 2 色覚)、緑錐体を欠く場合を deuteranopia (D 型色覚 : 2 型 2 色覚)、青錐体を欠く場合を tritanopia (T

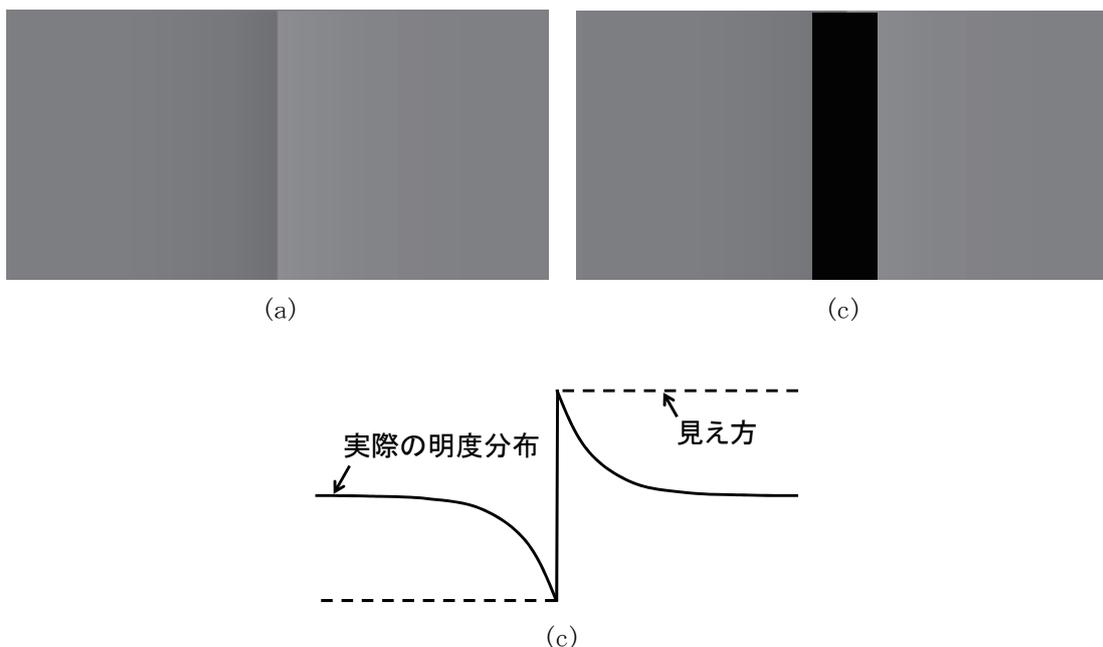


図 1：クレイク・オブライエン効果の例，(a) サンプル画像 1，(b) サンプル画像 2，(c) (a) の明度分布

型色覚：3 型 2 色覚) という。2 色覚者全体において各色覚の占める割合は，P 型色覚者が約 25%，D 型色覚者が約 75% である。T 型色覚者については，約 0.02% と極めてまれである。このように，2 色覚では P 型及び D 型色覚者が大半を占めている。また，P 型色覚及び D 型色覚は，失われた錐体の反応特性が似ているので，どちらも似た色覚特性となり，ともに特定の赤色と緑色の識別が困難となる。本研究では，このような色の組合せを弁別困難色と呼ぶ。

## 2-2 クレイク・オブライエン効果

クレイク・オブライエン効果 (Craik-O'Brien effect : C-O 効果) [18-21] について概説する。C-O 効果は，輪郭情報から主観的にコントラストが生起して見える錯視現象である [20]。図 1(a) に C-O 効果の例を示す。図 1(a) は，図 1(b) から黒いブロックを除いたものに等しい。すなわち，図 1(a) では画像内のエッジにより主観的なコントラストが生起していることが分かる。図 1(c) に図 1(a) の明度分布を示す。実線と破線は，それぞれ実際の明度分布と知覚される明度分布を表している。本研究では，C-O 効果を 2 色覚における弁別困難色のコントラスト改善へ応用することを考える。C-O 効果は明度に対する作用が大きく，彩度や色相に対する作用は小さいことが知られている。したがって，2 色覚における明度に対する C-O 効果の生起を考える。図 2 に例を示す。図 2(b) は，D 型色覚における図 2(a) の見え方であり，赤色と緑色の違いが判別できなくなっている。また，図 2(b) の明度成分である図 2(c) を見ると，D 型色覚において 2 色には明度差もないということが分かる。そこで，図 2(f) のように D 型色覚の明度成分に対して C-O 効果を生起させる (※境界を隠し，右側と左側に明度差はないことを確認していただきたい)。図 2(d) を見ると，C-O 効果により D 型色覚において色の違いが判別できるようになっていることが分かる。また，C-O 効果は錯視現象であり，輪郭部のみの明度修正であるので，色変換画像は正常色覚者にとって自然な印象をもつ結果となっている (図 2(b))。

## 3 2 クレイク・オブライエン効果に基づいた弁別困難色のコントラスト改善手法

本研究では，C-O 効果を利用した新奇な弁別困難色のコントラスト改善手法を提案する。提案手法では，画素値を CIE 1931 標準表色系 (XYZ 表色系) 上の値に変換して用いる。ここでは，正常色覚者と K 型色覚者 (K は P, D, T のいずれか) の感じる XYZ 値をそれぞれ， $\mathbf{x} = (X, Y, Z)$ ， $\mathbf{x}_K = (X_K, Y_K, Z_K)$  と表す。 $\mathbf{x}_K$  は Brettel ら [22] によって提案された色覚モデルを用いて  $\mathbf{x}$  から得られる。 $Y$  は明度情報を表しており，提案手法では C-O 効果が生起するように  $Y_K$  に対して色の違い (輪郭情報)  $\Delta X$  に基づいた修正を行う。具体的な修正方法は 3-1 で述べる。また，3-2 では得られた修正明度をもつような出力画像を得る手順について説明する。図 3 に提案手法の流れを示す。

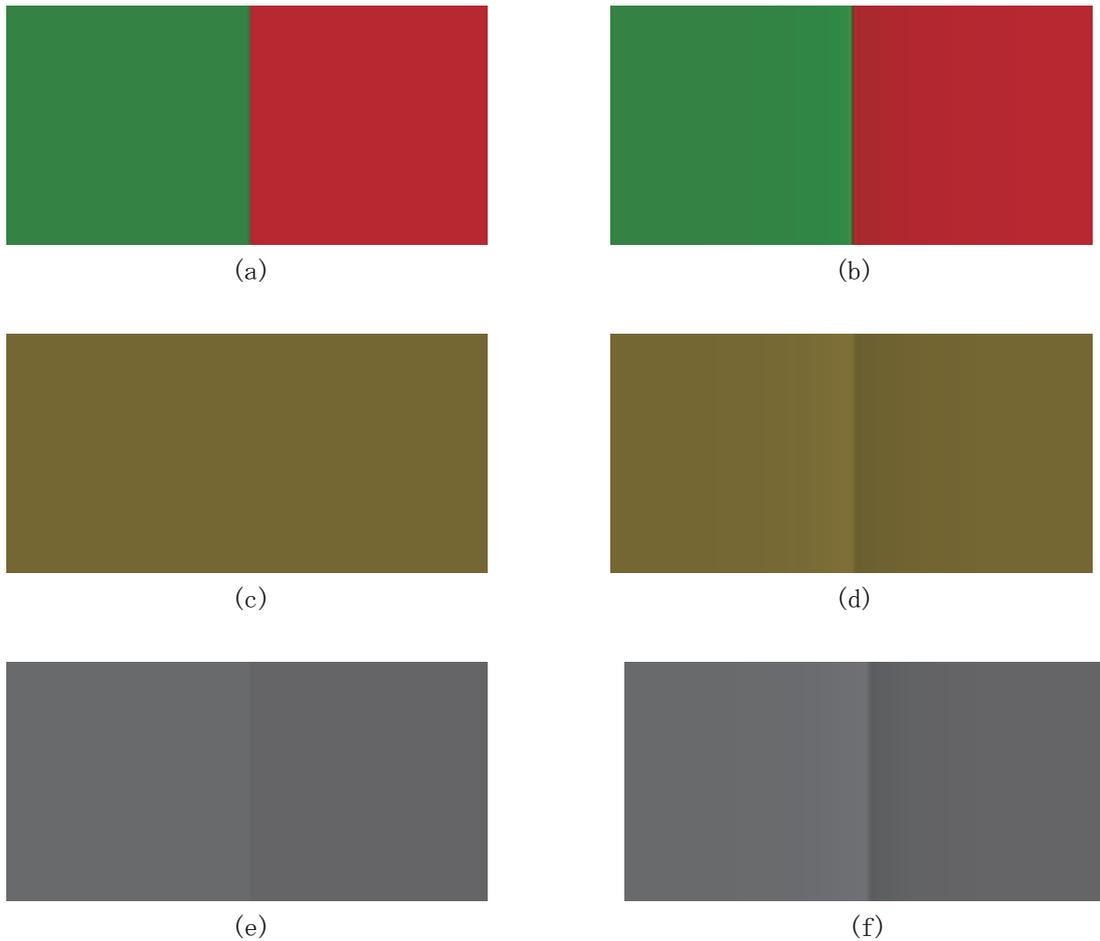


図 2: クレイク・オブライエン効果の 2 色覚における弁別困難色のコントラスト改善への応用, (a) サンプル画像, (b) 色変換結果, (c) D 型色覚における (a) の見え方, (d) D 型色覚における (b) の見え方, (e) (c) の明度成分, (f) (d) の明度成分

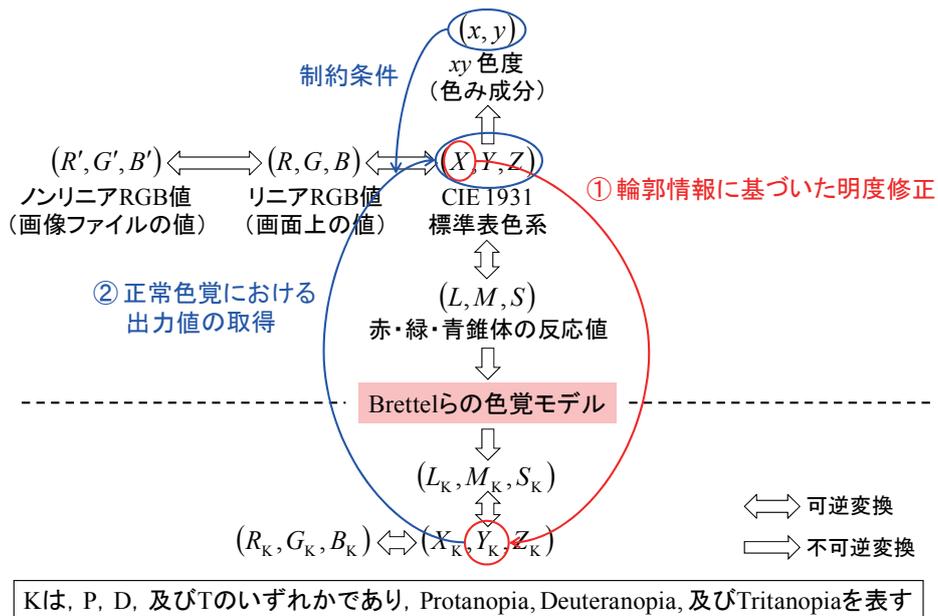


図 3: 提案手法の流れ

### 3-1 輪郭情報に基づいた明度修正

提案手法では, K 型色覚における明度  $Y_K$  に対して入力画像における輪郭情報 (色の違い) に基づいた修正を行う. 画素  $i$  の修正後の明度は,

$$\tilde{Y}_{K,i} = Y_{K,i} + \text{sign}(\Delta Y_{K,\sigma,i}) \lambda w_{K,i,\rho} \Phi(\Delta X_{\sigma,i}) \quad (1)$$

で得られる. ここで,

$$\text{sign}(z) = \begin{cases} +1 & z > 0 \\ -1 & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (2)$$

$$w_{K,i,\rho} = \tanh(\alpha / D_{K,i,\rho}), \quad (3)$$

$$D_{K,i,\rho} = \frac{1}{n_\rho} \sum_{j \in N_{i,\rho}} \| \mathbf{x}_{K,j} - \mathbf{x}_{K,i} \|, \quad (4)$$

$$\Phi(\Delta X_{\sigma,i}) = \tanh(|\Delta X_{\sigma,i}| / \beta) \quad (5)$$

である. 輪郭情報  $\Delta X_\sigma$  は  $X$  の高周波数成分であり, 標準偏差  $\sigma$  のガウシアンフィルタ  $F_\sigma$  を用いて,

$$\Delta X_{\sigma,i} = X_i - X_{\sigma,i}, \quad (6)$$

$$X_\sigma = F_\sigma * X \quad (7)$$

で得られる. ここで,  $*$  は畳込み積分を意味する. 式(1)における  $\Delta Y_{K,\sigma}$  も同様にして計算される.  $N_{i,\rho}$  は画素  $i$  からのチェス盤距離が  $\rho$  以下の画素の集合を表し,  $n_\rho$  はその要素数である.  $\rho$  は正の整数であり,  $2\sigma$  程度にすれば十分である.  $w_{K,i,\rho}$  は, K 型色覚における画素  $i$  の色の弁別困難さに基づいた重みである. K 型色覚において, 周囲の色と画素  $i$  の色が弁別困難である場合,  $w_{K,i,\rho}$  は大きくなる.  $\lambda, \alpha, \beta$  は, 輪郭情報  $\Delta X_\sigma$  を  $Y_K$  に反映させる程度を決めるパラメータであり, 正の実数である.

式(1)によって得られた修正明度は,  $[0, 100]$  の範囲外の値となることがある. したがって, 次式のような補正を行う.

$$\tilde{Y}_{K,i} = \begin{cases} 0 & \tilde{Y}_{K,i} < 0 \\ \tilde{Y}_{K,i} & 0 \leq \tilde{Y}_{K,i} \leq 100. \\ 100 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

### 3-2 正常色覚における出力値の取得

出力画像を得るには, K 型色覚における明度が式(1)で求められたものと一致するに (正常色覚での) RGB 値を求めなければならない. しかし, そのような RGB 値は無数に存在する. 出力画素値を一意に得るには, いくつかの制約 [16, 17] が必要である. 提案手法では, 文献 [16, 17] に倣い, 色度に関する制約条件を付加

することで、出力 RGB 値を得る。具体的には、入力画像の印象を変化させないという観点から、色変換の前後で色度  $x, y$  を保つという制約を加える。

色度  $x, y$  の定義は以下の通りである。

$$x = \frac{X}{X+Y+Z},$$

$$y = \frac{Y}{X+Y+Z}.$$

したがって、色変換後の XYZ 値を  $\mathbf{x}'=(X', Y', Z')$  で表すと、色度を不変とする色変換は次式により実現される。

$$\mathbf{x}' = k_{K,i} \mathbf{x}_i.$$

ここで、 $k_{K,i}$  は非負の実数である。このとき、K 型色覚における修正後の明度  $Y'_K$  は次式により得られる。

$$Y'_{K,i} = k_{K,i} Y_{K,i}.$$

$Y'_K$  は式(1)で得られた明度に一致しなければならない。したがって、変換係数  $k_{K,i}$  は以下のような定まる。

$$k_{K,i} = \frac{\tilde{Y}_{K,i}}{Y_{K,i}}.$$

次に、 $X$  は  $[0, X_{[w]}]$  でなければならないので、

$$X'_i = \begin{cases} X'_i & X'_i \leq X_{[w]} \\ X_{[w]} & \text{otherwise} \end{cases}$$

とする。ここで、 $X_{[w]}$  はディスプレイ上に表示された白色の  $X$  値である。 $Y$  及び  $Z$  についても同様の修正を行う。その後、 $\mathbf{x}'$  をリニア RGB 値に変換し、RGB 各成分に対して 0 未満の値は 0、1 を超える値は 1 とし、 $[0, 1]$  にしたものを最終的な出力値とする。最後に、修正したリニア RGB 値をノンリニア RGB 値に変換したものが出力画像となる。

## 4 実験

提案手法の有効性を示すために、計算機実験を行った。まず、実験に使用した画像、従来手法と提案手法のパラメータ設定などの実験条件について述べる。次に、実験によって得られた結果を示し、主観評価及び定量評価を行う。

### 4-1 実験条件

実験に用いた試験画像を図 4(a), (c), (e) に示す。各画像の大きさは  $280 \times 100$  画素である。図 4(b), (d), (f) は、それぞれ P 型、D 型、T 型色覚における図 4(a), (c), (e) の見え方である。2 色覚の各色覚において、`ABCDE` という文字が識別できないことが分かる。このシミュレーションには、Brettel らの色覚モデルを用いた。また、自然画像の例として flower 1, flower 2 を用いた (図 5(a), (b))。flower 1, flower 2 の大きさは、それぞれ  $128 \times 133$ ,  $237 \times 179$  画素である。図 5(c), (d) は、それぞれ P 型、D 型色覚における図

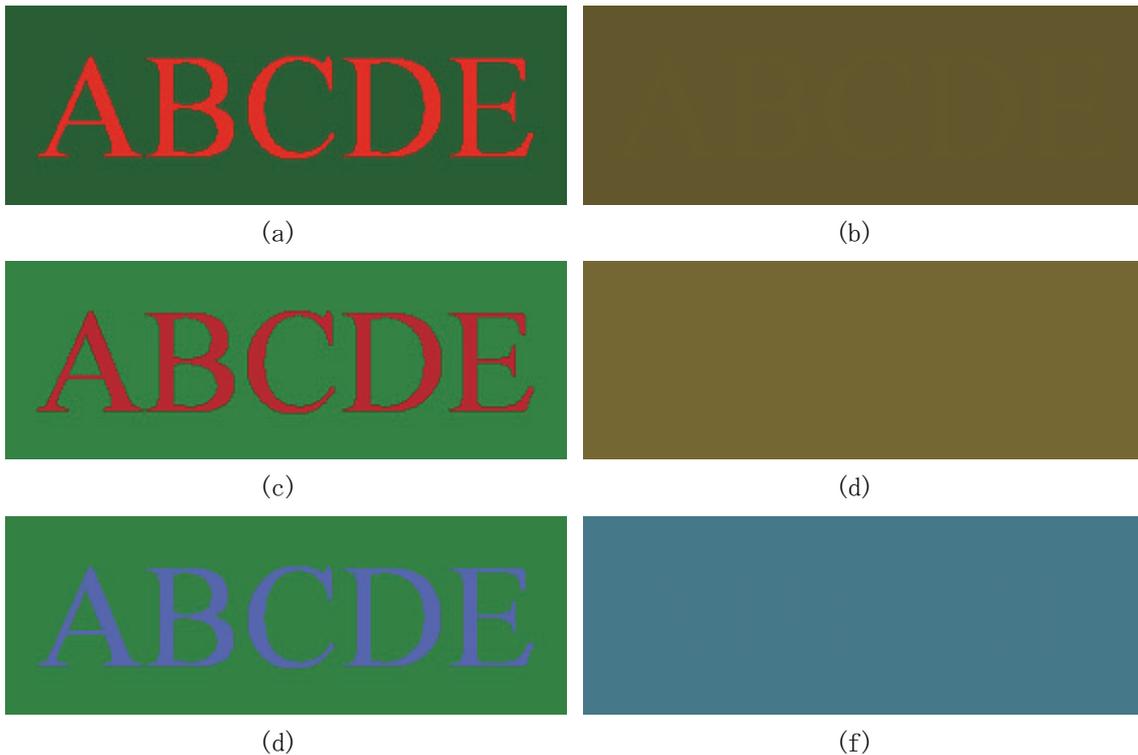


図 4：実験に用いた試験画像 (a) 試験画像 1, (b) P 型色覚における (a) の見え方, (c) 試験画像 2, (d) D 型色覚における (c) の見え方, (e) 試験画像 3, (f) T 型色覚における (e) の見え方

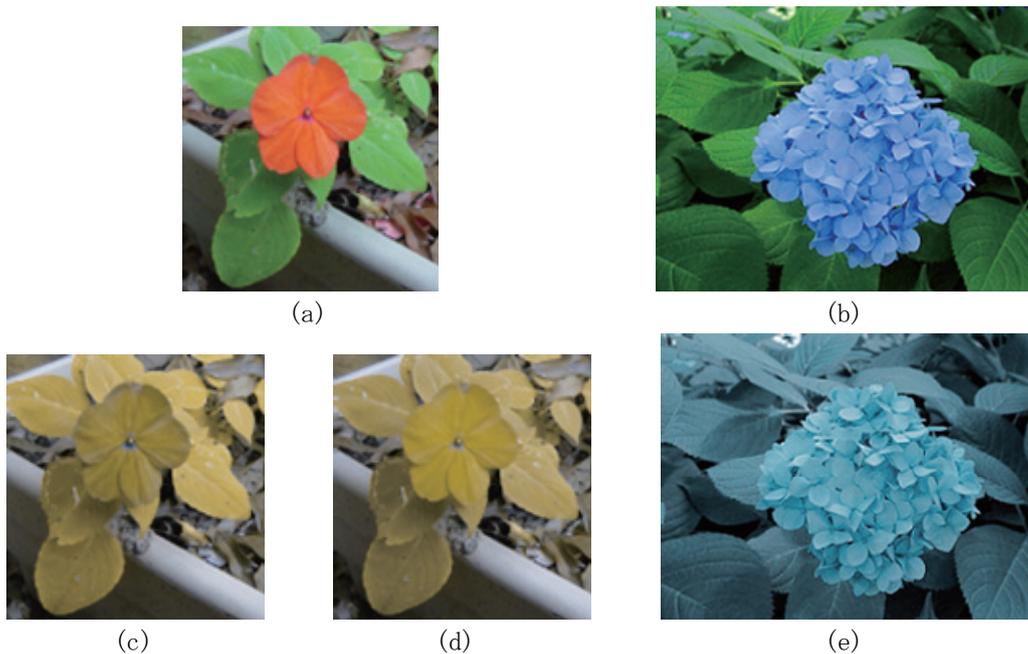


図 5：実験に用いた自然画像 (a) flower 1, (b) flower 2, (c) P 型色覚における (a) の見え方, (e) D 型色覚における (b) の見え方, (f) T 型色覚における (c) の見え方

5(a) の見え方である。図 5(c), (d) より, P 型, D 型色覚ではオレンジの花と緑の葉が判別しにくいことが分かる。図 5(e) は, T 型色覚における図 5(b) の見え方である。T 型色覚では, 青い花びらと緑の葉が判別しにくい。

実験では, 比較手法として Huang ら [15] の手法 (RGHE), 色の違いに基づいた明度修正 (LMDC) を用いた。各従来手法は, 比較のため提案手法と色変換量が等しくなるようにパラメータ調整を行った。RGHE における変換強度パラメータ  $p$  は,  $p = 0.05, 0.1, 0.2 \dots 2.0$  と変化させ, 画像ごとに調節した。LMDC におけるパ

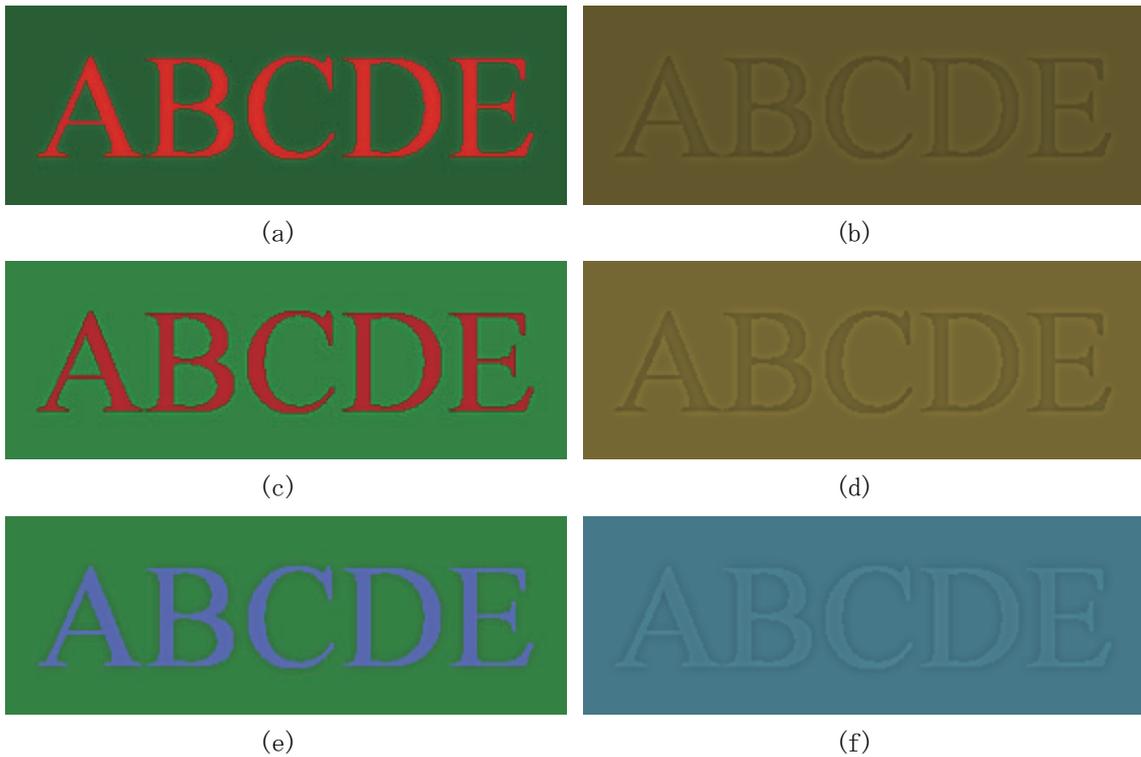


図 6 : 試験画像に対する提案手法による実験結果 (a) 試験画像 1 ( $\lambda=3.0$ ), (b) P 型色覚における (a) の見え方, (c) 試験画像 2 ( $\lambda=8.0$ ), (d) D 型色覚における (c) の見え方, (e) 試験画像 3 ( $\lambda=8.0$ ), (f) T 型色覚における (e) の見え方

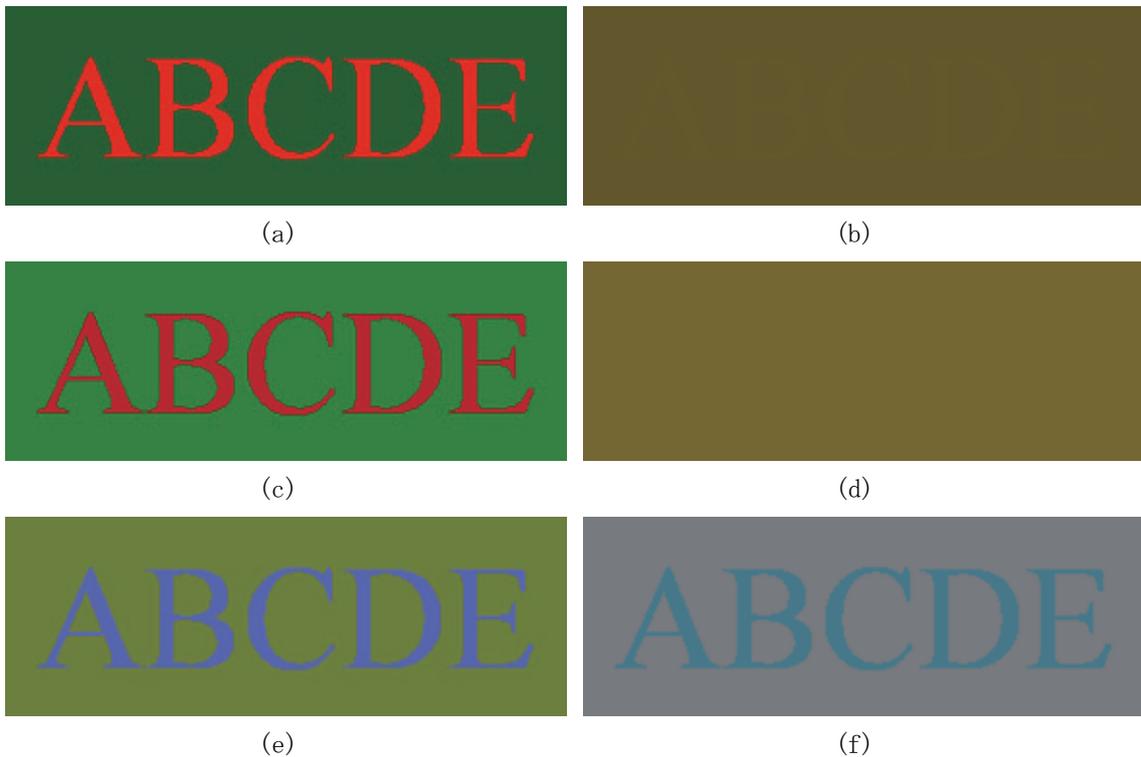


図 7 : 試験画像に対する RGHE による実験結果 (a) 試験画像 1 ( $p=0.05$ ), (b) P 型色覚における (a) の見え方, (c) 試験画像 2 ( $p=0.05$ ), (d) D 型色覚における (c) の見え方, (e) 試験画像 3 ( $p=0.05$ ), (f) T 型色覚における (e) の見え方

ラメータは、文献[17]に従い、弁別困難さに基づいた重みに関するパラメータ  $\kappa$  は 0.2 と固定し、色の違い

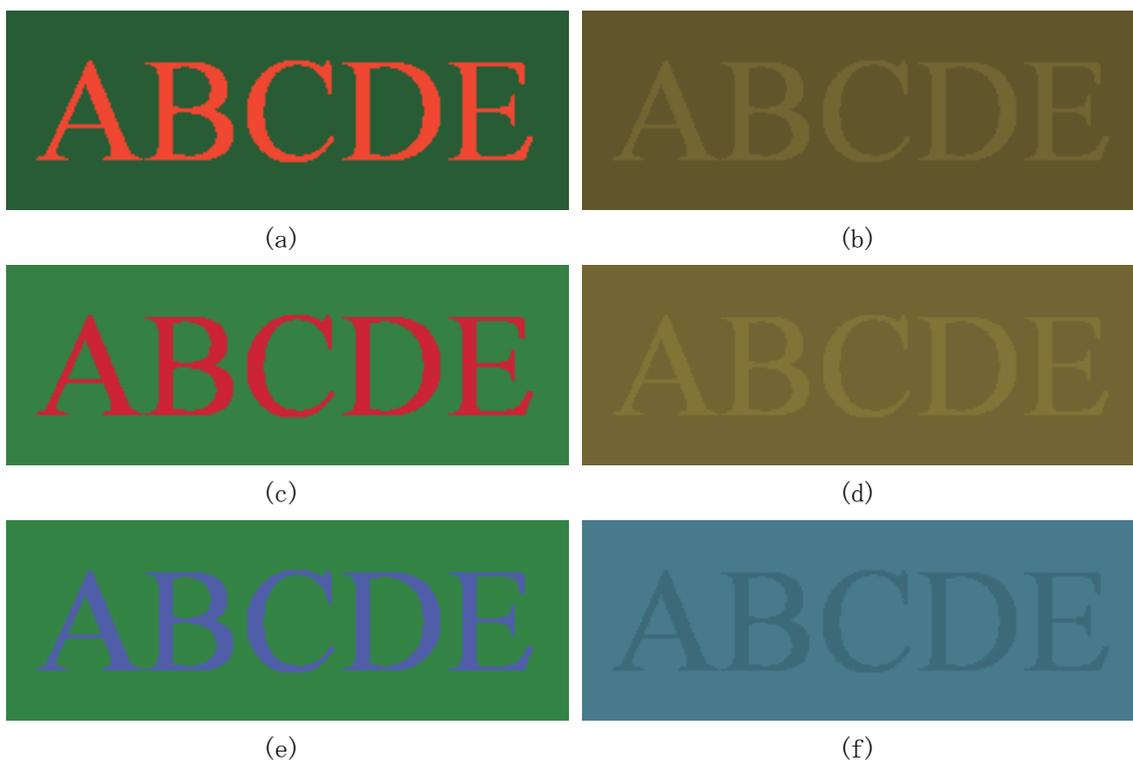


図 8 : 試験画像に対する LMDC による実験結果 (a) 試験画像 1 ( $\eta=0.05$ ), (b) P 型色覚における (a) の見え方, (c) 試験画像 2 ( $\eta=0.05$ ), (d) D 型色覚における (c) の見え方, (e) 試験画像 3 ( $\eta=0.05$ ), (f) T 型色覚における (e) の見え方

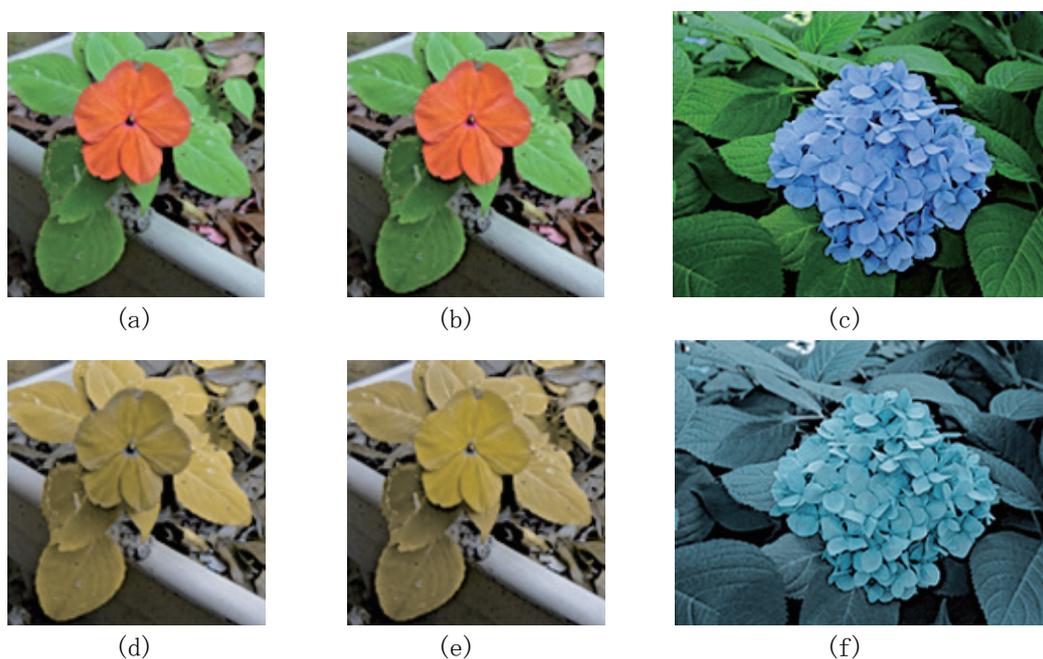


図 9 : 自然画像に対する提案手法による実験結果 (a) flower 1 (P 型) ( $\lambda=10.0$ ), (b) flower 1 (D 型) ( $\lambda=15.0$ ), (c) flower 3 (T 型) ( $\lambda=15.0$ ), (d) P 型色覚における (a) の見え方, (e) D 型色覚における (b) の見え方, (f) T 型色覚における (c) の見え方

を明度修正量にどの程度反映させるかを決定するパラメータ  $n$  は  $n=0.05, 0.1, 0.2 \dots 5.0$  と変化させ、画像ごとに決定した。

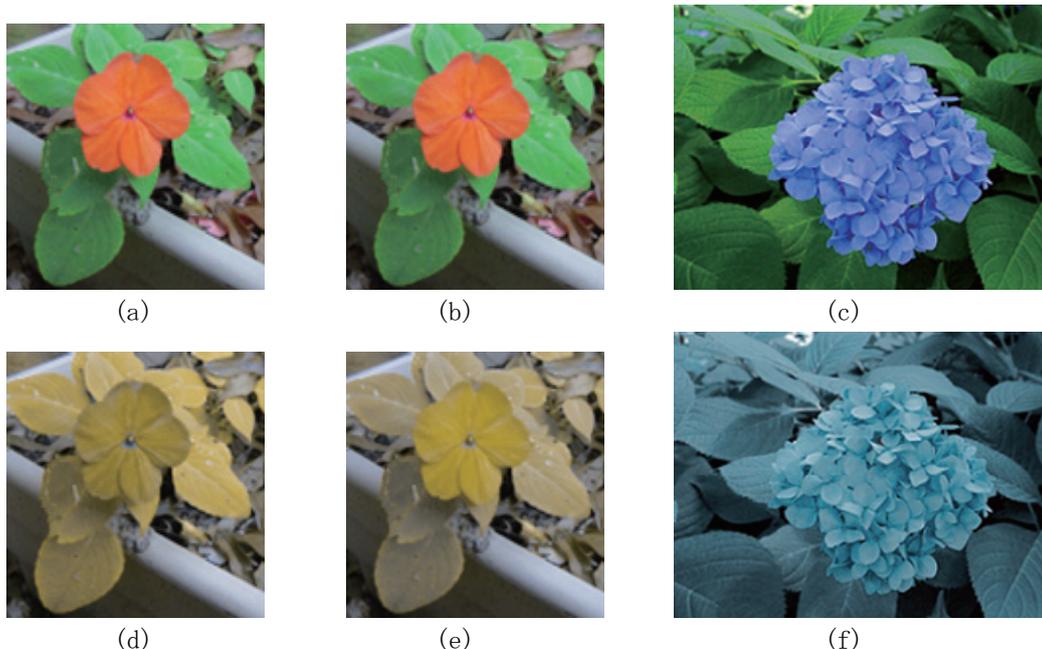


図 10 : 自然画像に対する RGHE による実験結果(a) flower 1 (P 型) ( $p=0.05$ ), (b) flower 1 (D 型) ( $p=0.1$ ), (c) flower 3 (T 型) ( $p=0.05$ ), (d) P 型色覚における(a)の見え方, (e) D 型色覚における(b)の見え方, (f) T 型色覚における(c)の見え方

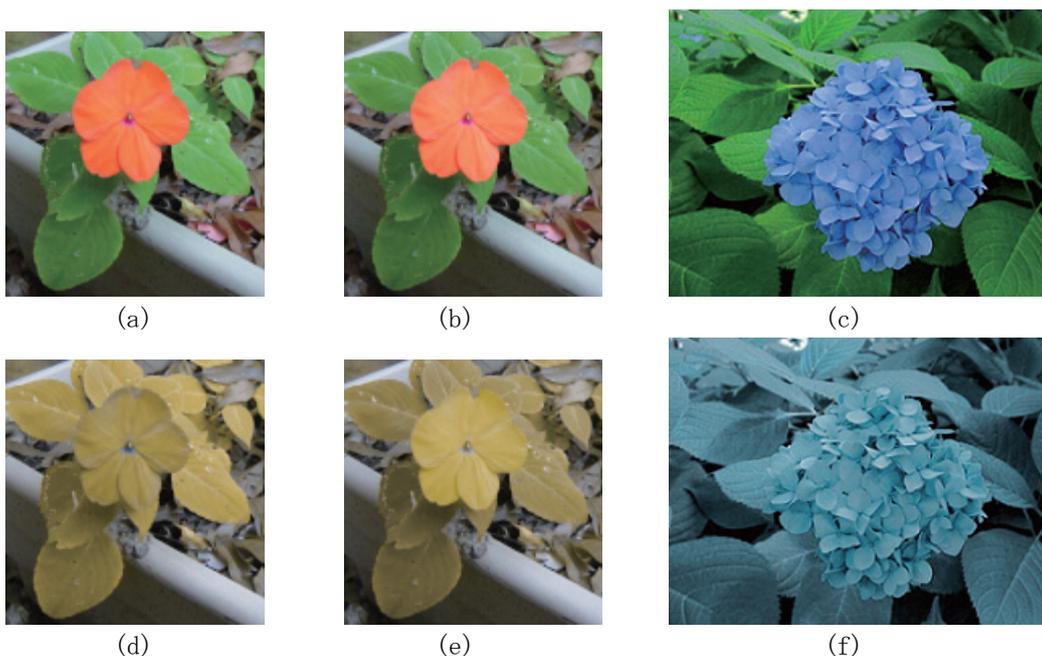


図 11 : 自然画像に対する LMDC による実験結果(a) flower 1 (P 型) ( $\eta=0.1$ ), (b) flower 1 (D 型) ( $\eta=0.02$ ), (c) flower 3 (T 型) ( $\eta=0.1$ ), (d) P 型色覚における(a)の見え方, (e) D 型色覚における(b)の見え方, (f) T 型色覚における(c)の見え方

#### 4-2 評価

図 4(a), (c), (e)の提案手法による色変換結果を図 6 に示す. 提案手法におけるパラメータは, 実験的に  $\sigma=2.5$ ,  $\alpha=15$ ,  $\beta=20$  とし,  $\lambda$ は画像ごとに決定した. 図 6(b), (d), (f)から分かるように, ``ABCDE''の視認性は十分に改善されており, 文字と背景のコントラストが生起している. 更に, 図 4(a), (c), (e)及び図 6(a), (c), (e)より, 色変換画像は入力画像からほとんど変化していないことが分かる. これらのことから, 提案手法の有効性が確認できる. 図 4(a), (c), (e)に対する RGHE による色変換結果を図 7 に示す. 図 7(b), (d)から分かるように, P 型, D 型色覚に対する色変換結果は不十分であった. 一方, T 型色覚に対する色変換結

果は良好であり、`ABCDE'`という文字がはっきりと認識できる。しかし、図4(c)、図7(c)より、入力画像の色が変化していることが分かる。図4(a), (c), (e)に対するLMDCによる色変換結果を図8に示す。図8(b), (d), (e)より、どの各色覚においても`ABCDE'`の文字がはっきりと認識できることが分かる。また、色変換画像も入力画像における色彩の印象を保持しており、正常色覚において自然な結果といえる。

次に、自然画像に対する各手法の実験結果を図9～図11に示す。提案手法による色変換結果を見ると、ほとんど色が変わらせず、自然な印象となっていることが分かる(図9(a), (c), (e))。また、色変換結果では花の視認性が改善されており、はっきりとした印象をもつ画像が得られている。しかしながら、出力画像におけるC-0効果は観察しにくい。図5(a), (b)のRGHEによる色変換結果を図10に示す。図10(d)～(f)を見ると、花と葉の色の違いはあまり改善されていないことが分かる。特に、T型色覚ではコントラストが少し低下してしまっている。また、LMDCの結果もRGHEの結果と同様、十分なコントラスト改善が実現されなかった。いずれの手法も、十分なコントラスト改善を実現するためには、色変換量を大きくする必要があると考えられる。しかし、余計な色変換は入力画像の印象を損なうおそれがあり望ましくない。提案手法は、比較手法に比べ効率的で優れた色変換を実現できているといえる。また、図6と図9から、提案手法は平坦部を含む人工画像に適していることが分かる。

## 5 まとめ

本研究では、クレイク・オブライエン効果(Craik-O'Brien effect: C-0効果)に基づいた2色覚における弁別困難色のコントラスト改善手法を提案した。従来手法の多くは、計算時間が実用的でないものや原画像のもつ色彩の印象を著しく損なうものであった。原画像のもつ色彩の印象を保持する手法として、色の違いを考慮した明度修正法が提案されていたが、計算量が大きいという問題点があった。計算量の削減方法も提案されているが、それは画質の低下を伴うものであった。

提案手法では、2色覚における明度に対するC-0効果の生起を考え、色の違いに基づいて入力画像の輪郭部の明度修正を行った。輪郭部のみでの明度修正であり、C-0効果は錯視現象であることから、入力画像のもつ色彩の印象を保持できる。また、提案手法における色空間の変換は線形変換のみであり、輪郭情報や弁別困難さに基づいた重みの計算も簡易なフィルタリング処理により行われていることから、提案手法の計算量は小さい。

提案手法の有効性を示すために、種々の画像を用いた実験を行った。主観評価では、提案手法が2色覚における弁別困難色のコントラスト改善と原画像のもつ色彩の印象の保持を両立した色変換手法であることを確認した。提案手法と色変換量を等しくした従来手法(特に、Huangらの手法)は、良好なコントラスト改善が実現できなかった。また、試験画像と自然画像の色変換結果から、提案手法は平坦部を含む人工画像に適していることが分かった。また、計算時間の結果などから、計算量に関して提案手法の優位性を確認した。

今後は観測実験に用いたエッジパターンの基本形状を変化させるなど、さらなる検討を行っていきたいと考えている。また、C-0効果を効率的に生起させる輪郭情報を得る手法の開発も必要となる。

## 【参考文献】

- [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] 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.
- [4] <http://www.nig.ac.jp/color/handout1.pdf>
- [5] カラーユニバーサルデザイン機構, <http://www.cudo.jp/>
- [6] K. Rasche, R. Geist, and J. Westall, "Detail preserving reproduction of color images for monochromats and dichromats," IEEE Computer Graphics and Applications, vol.25, no.3, pp.22-30, May/June 2005.
- [7] K. Rasche, R. Geist, and J. Westall, "Re-coloring images for gamuts of lower dimension," Computer Graphics Forum, vol.24, no.3, pp.423-432, Sept. 2005.

- [8] J.-B. Huang, Y.-C. Tseng, S.-I. Wu, and S.-J. Wang, "Information preserving color transformation for protanopia and deuteranopia," *IEEE Signal Process. Lett.*, vol.14, no.10, pp.711--714, Oct. 2007.
- [9] 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," *Lect. Notes Comput. Sci.*, vol. 2724, pp. 2134--2146, Springer-Verlag, Heidelberg, 2003.
- [10] M. Ichikawa, K. Tanaka, S. Kondo, K. Hiroshima, K. Ichikawa, S. Tanabe, and K. Fukami, "Preliminary study on color modification for still images to realize barrier-free color vision," *Proc. IEEE Int. Conf. Systems, Man, and Cybernetics*, vol.1, pp.36--41, Oct. 2004.
- [11] 目黒光彦, 高橋知紘, 古閑敏夫, "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," *電子情報通信学会技術研究報告 SIP2004-79*, pp.19--24, Oct. 2004.
- [12] M. Meguro, C. Takahashi, and T. Koga, "Simple color conversion method to perceptible images for color vision deficiencies," *Proc. SPIE*, vol.6057, pp.1--11, San Jose, CA, USA, Jan. 2006.
- [13] 星野隆太, 目黒光彦, 古閑敏夫, "組合せ最適化に基づく色覚異常者におけるカラー画像中の弁別困難色の変換," *電子情報通信学会技術研究報告 SIS2006-76*, pp.27--32, March 2007.
- [14] R. Dougherty and A. Wade: <http://www.vischeck.com/daltonize/>
- [15] J.-B. Huang, S.-Y. Wu, and C.-S. Chen, "Enhancing color representation for the color vision impaired," *Workshop Computer Vision Applications for the Visually Impaired*, Marseille, France, Oct. 2008.
- [16] G. Tanaka, N. Suetake, and E. Uchino, "Lightness modification of color image for protanopia and deuteranopia," *Opt. Rev.*, vol. 17, no. 1, pp. 14--23, Jan./Feb. 2010.
- [17] H. Hashii, G. Tanaka, N. Suetake, and E. Uchino, "Contrast improvement of undiscriminatable colors based on the modification of lightness components perceived by dichromats," *Proc. 2009 Int. Workshop Smart Info-Media Systems in Asia*, pp.96--101, Oct. 2009.
- [18] K. J. W. Craik, *The Nature of Psychology*, Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 1966.
- [19] V. O'Brien, "Contour perception, illusion and reality," *J. Opt. Soc. Am.*, vol.48, no.2, pp.112--119, Feb. 1958.
- [20] 磯野春雄, 坂田晴夫, 日下秀夫, "輪郭情報による視覚のコントラスト生起現象の実験的解析," *電子情報通信学会論文誌(A)*, vol.J61-A, no.10, pp.1020--1025, Oct. 1978.
- [21] 磯野春雄, "視覚における色のクレイク・オブライエン効果の実証," *電子情報通信学会論文誌(A)*, vol.J62-A, no.11, pp.769--776, Nov. 1979.
- [22] 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.

### 〈 発 表 資 料 〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Simple Lightness Modification for Color Vision Impaired Based on Craik-O'Brien Effect	Journal of the Franklin Institute	2012年6月