低次元化された色域のための カラー画像の色変換技術 —モノクロ表示・印刷及び2色覚のための色変換—

Color Transformation Techniques for Gamuts of Lower Dimension
—Color Transformation for Monochrome Display/Print and Dichromacy—

末竹規哲 Noriaki SUETAKE
田中 豪 Go TANAKA

アブストラクト デジタルカメラやディスプレイ、カラープリンタ等の発達・普及に伴い、カラー画像を扱うことが身近になった。テレビやインターネットの世界でも様々な色によって情報が表現されている。このように、色は現代における情報伝達手段の一翼を担っている。一般に、色は三次元色空間上に広がる色域を持つ。しかし、特定の場面では、低次元化された色域で色を表現する必要が生じる。例えば、カラー画像をモノクロ印刷する場合には、一次元の色域上で色を表現しなければならない。2色覚などの色覚特性を持つ人を対象とした場合も、有効な色域は低次元化される。本稿では、低次元化された色域において、画像の視認性の改善に優れた色変換技術について解説する。特に、カラー画像のモノクロ変換に焦点を当てて詳しく述べる。更に、2色覚者のための色変換技術についても簡単に解説する。

キーワード 色変換, 色域, カラー画像, モノクロ変換, 2色覚

Abstract In accordance with the widespread use of digital cameras, digital displays and color printers, color images have become common in our daily lives. Colors are used frequently to express information even on television and the Internet. Thus, it can be said that colors play a fundamental part in conveying information. In general, the color gamut spreads to the three-dimensional color space. However, in certain circumstances, it becomes necessary to express colors in the gamut represented in a low-dimensional space. For example, colors should be expressed in a one-dimensional gamut when a color image is printed as a grayscale image. Furthermore, the number of dimensions of a valid color gamut for people with color vision impairment such as dichromats is decreased. In this paper, color transformation techniques that improve the visibility of an image in a low-dimensional color gamut are explained. In particular, a detailed description of such transformation techniques for obtaining a monochrome image from a color image is given. Moreover, color transformation techniques for dichromacy are described.

Key words color transformation, color gamut, color image, color removal, dichromacy

1. はじめに

色は三つの要素により表現できることが知られている。例えば、明度・色相・彩度がその3要素の例である。ほかに、ディスプレイであれば赤・緑・青(RGB)、プリンタであればイエロー・マゼンタ・シアン(3原色)が用いられる。いずれの表色方法を用いたとしても、ある色は三次元色空間内の1点として表現できる。また、機器上で表現できる色の範囲を色域⁽¹⁾⁽²⁾という。例えば、ディスプレイに表示可能な色は、そのディスプレイに搭載されているRGBの3原色の混合で表現できるもののみであり、その色の範囲が色域である。色域は色空間におけ

る部分集合であり、通常、三次元に分布している。一般に、ヒトが見ることのできる全ての色をディスプレイ上に表現できるわけではないが、三原色を利用することにより、十分多くの色を表現することができる。

しかし、特定の場面では低次元化された色域で色を表現する必要が生じる。例えば、モノクロ画像では、使える色は白～灰色～黒のみであり、色域は一次元である。現在、カラーディスプレイが一般的であるので、カラー画像のモノクロ変換について重要性はないようにも思われるかもしれない。しかし、カラー印刷は高コストであるのでモノクロ印刷とするなど、モノクロ変換が必要となる場面はある。また、2色覚⁽²⁾(2色型色覚⁽³⁾⁽⁴⁾)などの色覚特性を持つ人にとっては有効な色域は低次元化される。2色覚において視認性の良い画像を作成しようとした場合、低次元化された色域内での色分布を考慮しなければならない。

カラー画像をモノクロ画像に変換するには、通常、明度成分を用いる。すなわち、RGB値から明度成分を算出し、モノクロ画像の画素値(グレーレベル)とするのが一般的である。明度成分 Y は、一般にRGB値の線形射影

$$Y = c_R R + c_G G + c_B B \quad (1)$$

末竹規哲 正員 山口大学大学院理工学研究科
E-mail suetake@yamaguchi-u.ac.jp
田中 豪 正員 名古屋大学大学院システム自然科学研究科
E-mail tanakago@nsc.nagoya-cu.ac.jp
Noriaki SUETAKE, Member (Graduate School of Science and Engineering, Yamaguchi University, Yamaguchi-shi, 753-8512 Japan), Go TANAKA, Member (Graduate School of Natural Sciences, Nagoya City University, Nagoya-shi, 467-8501 Japan).

電子情報通信学会 基礎・境界ソサイエティ
Fundamentals Review Vol.6 No.2 pp.102-113 2012年10月
©電子情報通信学会 2012

図 1 Monet の Impression (a) 原画像, (b) 明度成分。

図 2 2 色覚での色の見え方 (a) 原画像, (b) 1 型 2 色覚での見え, (c) 2 型 2 色覚での見え。

で算出することができる。 c_R, c_G, c_B は射影係数であり、例えば sRGB⁽¹⁾⁽²⁾では、 $(c_R, c_G, c_B) = (0.2126, 0.7152, 0.0722)$ である。この係数値はヒトのすい体の反応特性を考慮した値である。同じ強さの光でも、原色 R や B に比べて、原色 G の方がヒトは明るく感じる。式 (1) によるモノクロ変換は、計算量も非常に小さく実用的である。

しかし、単に明度成分を用いるだけでは、カラー画像における色（色相・彩度）の情報はモノクロ画像に反映されない。例えば、カラー画像におけるある二つの色について、色相・彩度が異なる一方で明度が等しい場合、式 (1) による変換ではその 2 色は同じグレーレベルとなり、モノクロ画像においては判別できなくなってしまう。そのような例を図 1 に示す。原画像（図 1(a)）における太陽と水面での照り返しが、図 1(b) では判別できない。したがって、色の情報を適切に反映できるモノクロ変換手法が必要となる。

また、2 色覚での見えの例を図 2 に示す。2 色覚での見えをシミュレーションする方法は幾つか提案されているが⁽⁵⁾⁻⁽⁹⁾、ここでは Viénot らの方法⁽⁸⁾を用いた。2 色覚には複数の種類があり、図 2 では 1 型と 2 型での見え方を掲載している。図 2(b), (c) から分かるように、色覚の種類によって判別しにくい色の組合せは異なる。詳しい説明は後述するが、2 色覚の色域は二次元平面であると考えることができる。三次元色空間内の各色は、2 色覚では、その色域（平面）に射影されて観測されているといえる。その平面は、図 2 に見られるように、1 型・2 型 2 色覚では“明度成分”と“黄-青成分”から成る。2 色覚において視認性の良いカラー画像を作成するためには、2 色覚色平面における色の分布を考慮して配色する必要がある。

以上のように、特定の場面においては、三次元色空間内の色分布（色の違い）を低次元化された色域に反映させる必要がある。本解説論文ではそのための手法について述べる。以下に、まず色空間について 2. で説明する。その後、三次元から一次元への変換であるモノクロ変換について 3. で詳しく述べる。4. では、三次元から二あるいは一次元への変換を考慮する必要がある“2 色覚のための色変換”について述べる。5. はまとめである。

2. 色空間

カラー画像は一般に RGB 値により記録されているが、本稿で扱うアルゴリズムでは RGB 色空間以外の色空間も利用する。本章では、RGB 値を他の色空間、特に CIELAB 色空間⁽¹⁾⁽²⁾上の値（ $L^*a^*b^*$ 値）に変換する方法について紹介する。

ここでは、カラー画像は sRGB により記録されているとする。画像ファイルに記録された RGB 値から $L^*a^*b^*$ 値を得る手続は以下のとおりである。まず、ガンマ補正⁽¹⁾⁽²⁾によりリニア RGB 値を得る。その後、リニア RGB 値を CIE 1931 標準表色系⁽¹⁾（XYZ 色空間）の値へと変換し、XYZ 値から $L^*a^*b^*$ 値を得る。具体的な変換方法を以下に示す。

画像ファイルの RGB 値は $[0, 255]$ の整数（8bit）で符号化されており、それを E'_{8bit} で表す。ただし、 E の文字は $\{R, G, B\}$ である。リニア RGB 値 E_{sRGB} は以下で得られる。

$$E_{sRGB} = \begin{cases} E'_{sRGB}/12.92, & E'_{sRGB} \leq 0.03928, \\ \left(\frac{E'_{sRGB} + 0.055}{1.055} \right)^{2.4}, & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (2)$$

$$E'_{sRGB} = E_{8bit}/255. \quad (3)$$

ここで、 $'$ はノンリニア値であることを示している。式 (2) がガンマ補正であり、これは、駆動信号（ノンリニア値）とディスプレイ上での実際の光の強度（リニア値）との関係を表している。

次に、リニア RGB 値 ($R_{sRGB}, G_{sRGB}, B_{sRGB}$) を XYZ 色空間上の値 (X, Y, Z) へと次式で変換する。

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.4124 & 0.3756 & 0.1805 \\ 0.2126 & 0.7152 & 0.0722 \\ 0.0193 & 0.1192 & 0.9505 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_{sRGB} \\ G_{sRGB} \\ B_{sRGB} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

最後に、XYZ 値から $L^*a^*b^*$ 値を得る。

$$L^* = 116\phi(Y/Y_n) - 16, \quad (5)$$

$$a^* = 500(\phi(X/X_n) - \phi(Y/Y_n)), \quad (6)$$

$$b^* = 200(\phi(Y/Y_n) - \phi(Z/Z_n)). \quad (7)$$

ここで、

$$\phi(x) = \begin{cases} x^{1/3}, & x > 0.008856, \\ 7.78x + 16/116, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

である。また、 X_n, Y_n, Z_n は、標準の光の下での XYZ 値である。sRGB の標準の光は $D_{65}^{(1)(2)}$ であり、 Y_n を 1 に規格化した場合、 $(X_n, Y_n, Z_n) = (0.9505, 1.000, 1.089)$ となる。

L^* は明度であり明るさの情報のみを持つ。式 (5) から分かるように、 L^* と Y は一対一に対応している。本稿では、便宜的に Y も明度と呼ぶ。 a^*, b^* はそれぞれ、赤-緑成分及び黄-青成分である。sRGB に関し、異なる L^* について、 a^*b^* 平面の様子を描画したものを図 3 に示す。いずれの断面でも a^* 軸方向に赤～緑、 b^* 軸方向に黄色～青が分布しているが、その分布形状は複雑な形をしていることが分かる。

図3 CIELAB 色空間 (a^*b^* 平面) (a) $L^* = 30$, (b) $L^* = 50$, (c) $L^* = 70$.

また, a^* , b^* 値に基づいて,

$$C^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2}, \quad (9)$$

$$h = \arctan(b^*/a^*) \quad (10)$$

が定義される. C^* , h はそれぞれ, 心理メトリッククロマ, 心理メトリック色相角と呼ばれ, 彩度及び色相に対応する^{(1) (2)}.

また, XYZ 値から xy 色度が以下のように定義される^{(1) (2)}.

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}, \quad (11)$$

$$y = \frac{Y}{X+Y+Z}. \quad (12)$$

xy 色度が分かれば (明度を除いて) どのような色であるかが分かる. xy 色度は, 色みの情報を持っているといえる.

3. カラー画像のモノクロ変換

1. で述べたように, 明度のみによるモノクロ変換では不都合な場合があり, 色情報 (色の違い) を考慮したモノクロ変換手法について様々な研究がなされている^{(10)~(26)}. 高性能モノクロ変換は基本的に, 図4に示すように, いかにして異なる色に異なるグレースケールを割り当てるかという問題であるといえる.

まず, 比較的簡単な状況として, 色を用いた文書のように, 色数が少なく, また元々の色の持つ明度とかけ離れたグレースケールを割り当てても差し支えない場合が考えられる⁽¹⁰⁾. しかし, カラー画像のモノクロ変換を一般的に考えた場合, 画像内で使用されている色数は多い. 色数が多い場合, 多くの色の組合せを考慮する必要があり, 難しい問題となる. この問題に対し, 各画素のグレースケールを決める問題を最適化問題として定義し, それを解くことによりモノクロ画像を得る手法が提案されている^{(11)~(14)}. 一方, 式(1)の射影係数を画像ごとに適切に変化させることで, 入力画像における色の違いをモノクロ画像に反映させる手法も研究されている^{(15)~(19)}. また, テクスチャを利用することでモノクロ画像において色の違いを表現する方法もある⁽²⁰⁾. この手法では, 色 (色相・彩度) を引数としてテクスチャを与える関数を作成する. 明度は近いが色の異なる領域に異なるテクスチャを付与することで, それらの領域を判別できるようにする. 更に, テクスチャ情報を利用することによって, 可逆なモノクロ変換も可能である⁽²¹⁾. すなわち, 色情報と対応させたテクスチャを与えることで, モノクロ印刷された画像から元のカラー画像を (ある程度) 復元することも可能である.

上記の手法は, 基本的に各色に対していかにグレースケールを

図4 明度のみによるモノクロ変換の問題点とその解決方法 図中の赤・青はそれぞれ図1(a)の太陽とその周辺の背景色を意味する (a) 明度によるモノクロ変換, (b) 高性能モノクロ変換.

表1 各モノクロ変換手法の特徴 (+, ±, 干, - の順に良いことを表す)

評価項目	モノクロ変換手法			
	Color2Gray 全域	Color2Gray 近傍	Decolorize	筆者らの手法 ⁽¹⁹⁾
全域整合性	+	-	+	+
高コントラスト性	±	+	干	±
低計算量性	-/+	干	+	+
平均明度保存	+	+	干	干
グレースケール保存	干	干	+	+

与えるかという手法であるが, それらとは異なり, アンシャープマスキング⁽¹⁾ (Unsharp Masking: UM) を利用した方法も提案されている^{(22) (23)}. 本来, UM は画像鮮鋭化のための処理であり, 処理結果としてはエッジの強調された画像が得られる. パラメータの設定次第ではあるが, 極端に言えば, 輪郭線が引かれたような画像を得ることができる. 更に, UM に加えて Helmholtz-Kohlrausch 効果^{(2) (27)} を考慮した手法もある⁽²³⁾. 同効果は, 同一の明度及び色相を有する色でも, 彩度の高い方が明るく見えるという現象である. これを考慮することによって, よりカラー画像の印象を反映したモノクロ画像を得ることが期待できる.

カラーの文書をモノクロ印刷したい場合や, 後で色情報を復元したい場合など, どのような目的でモノクロ変換を行うかによって適切な手法は異なる. 本稿では, 一般的なカラー画像を対象とし, 視覚的に良好なモノクロ画像を得る方法について考える. この場合, ①各画素のグレースケールを最適化問題によって決定する方法^{(11)~(14)}と, ②射影に基づく方法^{(15)~(19)}が有力である. ①からは Color2Gray⁽¹³⁾, ②からは Decolorize⁽¹⁸⁾と筆者らの手法⁽¹⁹⁾について述べる. 表1に各手法の特徴を示す. Color2Gray では, パラメータの設定により “全域 Color2Gray” と “近傍 Color2Gray” を考えることができる. 表1の各評価項目の詳しい意味については, 3.1(a) の Color2Gray の説明の後で述べる.

3.1 モノクロ変換手法

(a) Color2Gray

Color2Gray では, 各画素間における色の違いを考慮した目的関数を構成し, それを最小化することによりモノクロ画像を得る. 最小化問題は, CIELAB 色空間において近い色同士には似たグレースケール, 離れた色同士には異なるグレースケールを割

図5 画素 i に対する σ_2 の範囲

り当てるように構成されている．結果として，色相・彩度が異なる同明度の色に異なるグレーレベルを割り当てる効果がある．以下に具体的に述べる．

目的関数：Color2Gray における目的関数 E は，

$$E(f) = \sum_{(i,j) \in \sigma_\rho} ((f_i - f_j) - \delta_{ij})^2 \quad (13)$$

である．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 は入力画像の画素数である．画素番号は，左上の画素から順に，ラスタ順⁽¹⁾につける． δ_{ij} は画素 i と j の間の“符号付色距離”であり，画素 i と j の色の違いを定量的に表したものである．具体的な定義については後で説明する． σ_ρ はチェス盤距離⁽¹⁾が ρ 以下である画素の対の集合を表す． ρ は画像空間における近傍範囲であり，正の整数である．画素 i の空間座標を (x_i, y_i) で表すとき， $\max(|x_i - x_j|, |y_i - y_j|) \leq \rho$ を満足する画素対 (i, j) が σ_ρ の要素となる．例として，画素対集合 σ_2 を考えたとき，画素 i と対となる画素の範囲を図5に示す．図5は画像の左上の部分であり，黄色で着色した画素が画素 i と対になる．また，本稿では，入力画像における全ての画素対を考える場合を全域 Color2Gray と呼ぶ． ρ を小さな値にして近傍画素対のみを考慮するときは，近傍 Color2Gray と呼ぶ．

符号付色距離：画素 i と j の間の符号付色距離 δ_{ij} は，

$$\delta_{ij} = \begin{cases} \Delta L_{ij}^*, & |\Delta L_{ij}^*| > \Phi_\alpha(\|\Delta C_{ij}\|), \\ \text{sign}(\Delta C_{ij} \cdot v_\theta) \Phi_\alpha(\|\Delta C_{ij}\|), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

で定義される．ここで， ΔL_{ij}^* は明度差であり， $L_i^* - L_j^*$ である． ΔC_{ij} は色み差であり， $(\Delta a_{ij}^*, \Delta b_{ij}^*) = (a_i^* - a_j^*, b_i^* - b_j^*)$ で定義する．また， $\|\Delta C_{ij}\| = \sqrt{(\Delta a_{ij}^*)^2 + (\Delta b_{ij}^*)^2}$ であり，

$$\text{sign}(x) = \begin{cases} +1, & x > 0, \\ -1, & \text{otherwise}, \end{cases} \quad (15)$$

$$\Phi_\alpha(x) = \alpha \tanh(x/\alpha), \quad (16)$$

$$v_\theta = (\cos \theta, \sin \theta) \quad (17)$$

である．ここで， α は正の実数， θ は $[0, 2\pi)$ の実数である．また，“ $\cdot$ ” は内積を表す．

式 (14) は，画素対 (i, j) について明度差と色み差の大きさを比べ，優勢な方を色距離とする．その際，色み差の大きさを明度空間のスケールに適合させるために， Φ_α を用いて色み差の大きさを調整する． $\Phi_\alpha(x)$ は $x \rightarrow \infty$ で α に収束する単調増加

図6 色み差ベクトル ΔC_{ij} と v_θ の効果 (a) 色み差ベクトル ΔC_{ij} , (b) v_θ による符号付色距離の符号の決定．

関数である．

θ は，モノクロ変換においてどのような色を明るくするか（あるいは暗くするか）を制御するパラメータである． θ の効果について図6に例を示す．まず，図6(a)のように，2色 i と j について a^*b^* 成分から ΔC_{ij} が生成される．式 (14) において $|\Delta L_{ij}^*| \leq \Phi_\alpha(\|\Delta C_{ij}\|)$ である場合， $\Phi_\alpha(\|\Delta C_{ij}\|)$ に基づいて δ_{ij} が決まる．しかし， $\Phi_\alpha(\|\Delta C_{ij}\|)$ は非負の値であり，画素 i と j のどちらを明るくするか（ δ_{ij} の符号を正負のいずれにするか）という情報を持たない．そこで， $\text{sign}(\Delta C_{ij} \cdot v_\theta)$ により符号を決める．その様子を示したのが図6(b)である． ΔC_{ij} と v_θ のなす角が鋭角である場合，正の符号が割り当てられる． a^*b^* 平面では，色相角 h が 0 から $\pi/2$ の辺りに暖色⁽¹⁾⁽²⁾が分布している．したがって， θ をその範囲の値に設定すると，モノクロ変換において暖色を明るくする効果がある．

最小化問題：Color2Gray では，式 (13) の目的関数 E を最小化することで出力モノクロ画像 $\tilde{f}$ を得る．具体的には，

$$\tilde{f} = \arg \min_{f_i \in \mathbb{R}} E(f) \quad (18)$$

とする．ここで， $\mathbb{R}$ は実数の集合である．ただし，式 (13) から分かるように，全ての要素が等しいベクトル $c = (c, c, \dots, c)$ に対して $E(f + c) = E(f)$ であるので，式 (18) を満たす $\tilde{f}$ は無数にある．Color2Gray では，式 (18) の最小化問題を共役勾配法⁽²⁸⁾で解き，得られた解 f' に対して

$$F(c) = \sum_{i=1}^n ((f'_i + c) - L_i^*)^2 \quad (19)$$

を最小にするシフト量 c を求め， $\tilde{f}_i = f'_i + c$ により出力モノクロ画像を得る⁽¹³⁾．また，共役勾配法の初期値 $f^{(0)}$ は，入力画像の明度成分とする．

近傍 Color2Gray における最小化問題は共役勾配法により数値的に解くことになるが，全域 Color2Gray の場合は解析的に解くことができる．その解 $\tilde{f}$ の第 i 成分 $\tilde{f}_i$ は，

$$\tilde{f}_i = \langle L^* \rangle + \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \delta_{ij} \quad (20)$$

となることが証明されている⁽¹⁴⁾．ここで， $\langle L^* \rangle$ は入力画像全体の平均明度である．

パラメータの効果： α や θ の値が出力モノクロ画像に与える影響について，全域 Color2Gray の場合を例にとり述べる．

図7は，図1(a)を入力画像とし， α を変化させた場合のモノ

図 7 全域 Color2Gray における α の効果 ($\theta = \pi/4$) (a) $\alpha = 5$, (b) $\alpha = 15$, (c) $\alpha = 25$.

図 8 全域 Color2Gray における θ の効果 ($\alpha = 15$) (a) $\theta = 0$, (b) $\theta = \pi/3$, (c) $\theta = 2\pi/3$, (d) $\theta = \pi$, (e) $\theta = 4\pi/3$, (f) $\theta = 5\pi/3$.

クロ変換結果である。ただし、 θ は $\pi/4$ としている。 α の最適値の判断については主観による部分が大きいが、本稿では $\alpha = 15$ とした。基本的に α を大きくすれば高コントラストになるが、それがいつも自然な結果を与えるとは限らないことに注意しなければならない。

図 8 は、 $\alpha = 15$ として θ を変化させた場合の結果である。図に示されているように、 a^*b^* 平面において v_θ が暖色方向を向いているときは暖色が明るくなり、寒色⁽¹⁾⁽²⁾方向を向いているときは逆の結果となる。暖色が明るくなった方が自然であることが多く、 $\pi/4$ 程度にすることが妥当である場合が多い。

ただし、図 8(f) に見られるように、 θ の設定が不適切であると、色の違いの反映が不十分なことがある。また、画像によってはどの色を明るくしてもよく、単に高コントラストな結果が望ましい場合もある。同じ α でも、 θ を適切に設定することで高コントラストな結果を得られることが分かっている⁽²⁶⁾。

表 1 の評価項目について：式 (20) から、全域 Color2Gray では入力カラー画像における同じ色が等しいグレーレベルに変換されることが分かる。なぜなら、画素 i と i' が同じ色であった場合、 $\sum_{j=1}^n \delta_{ij}$ と $\sum_{j=1}^n \delta_{i'j}$ は等しいからである。この“入力カラー画像における同じ色が等しいグレーレベルに変換されること”を本稿では“全域整合性”と呼ぶ(表 1)。良好なモノクロ画像を得るためにはこの性質を持つことが望ましい。

全域 Color2Gray は全域整合性を持つという長所を有するが、短所もある。全域 Color2Gray では、入力画像における全ての画素の組合せを考慮してグレーレベルを決定するので、非隣接領域の色同士も考慮することになる。このことは、高コントラストなモノクロ画像を得るためには妨げとなる。すなわち、表 1 の高コントラスト性について、全域 Color2Gray は最良ではない。

図 9 近傍 Color2Gray の効果 (ρ の効果) (a) カラー画像 Blocks, (b) 明度成分, (c) 全域 Color2Gray, (d) 近傍 Color2Gray ($\rho = 2$) .

その例を図 9 に示す。図 9(a) が入力カラー画像ブロックであり、画像の大きさは 150×150 画素である。ここでは説明のために画像中に数字を書いたが、実際の入力画像に数字は書かれていない。図 9(b) は明度成分によるモノクロ変換結果である。この場合、領域 2~4 の判別が難しい。図 9(c) は全域 Color2Gray によるモノクロ変換結果である。領域 2~4 の判別はできるようになっているが、代わりに領域 2 と 5 が似たグレーレベルになってしまっている。一方、図 9(d) に示した近傍 Color2Gray ($\rho = 2$) による結果は高コントラストであるといえる。 $\rho = 2$ とした近傍 Color2Gray では、領域 4 と 5 のように、離れた位置にある色の対は考えないので、グレーレベルの割当ての自由度が高い。したがって、高コントラストなモノクロ画像を得やすい。しかし、その代償として、近傍 Color2Gray には全域整合性がないという短所がある。すなわち、離れた位置にある同色の画素が等しいグレーレベルになる保証はない。更に、連続した同色の領域についても、モノクロ画像ではグラデーション状の灰色が割当てられる場合がある。実際、図 9(d) では同色である領域 1 と 6 が異なるグレーレベルに変換されている上に、領域 1 などにおいてグラデーションが発生している。

入力画像内の全画素対を考慮する全域 Color2Gray には、計算量が大いという問題もある。ただし、解析解(式 (20))が分かっており、それを利用した高速化も可能である⁽¹⁴⁾。表 1 の低計算量性について、“ $-/+$ ”の $-$ は元々の全域 Color2Gray⁽¹³⁾, $+$ は高速化した Color2Gray⁽¹⁴⁾を意味する。また、近傍 Color2Gray の計算量は近傍範囲の大きさにもよるが、いずれにしても反復処理を必要とし、低計算量であるとはいえない。

表 1 の平均明度保存について述べる。平均明度保存とは、入力カラー画像の平均明度と出力モノクロ画像の平均明度が等しいことを意味する。全域・近傍 Color2Gray は共にこの性質を完全に満たす。なぜなら、式 (19) を最小化する c について、

$$\frac{dF}{dc} = 2 \sum_{i=1}^n ((f'_i + c) - L_i^*) = 0 \quad (21)$$

であり、これは

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f'_i + c) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L_i^* \quad (22)$$

と同値だからである．ここで，式 (20) で得られた出力モノクロ画像 $\tilde{f}$ が平均明度保存を満たしていることを確認する．実際に， $\tilde{f}$ について平均明度を計算してみると，

$$\begin{aligned} \langle \tilde{f} \rangle &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tilde{f}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\langle \tilde{L}^* \rangle + \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \delta_{ij} \right) \\ &= \langle L^* \rangle + \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \delta_{ij} \end{aligned} \quad (23)$$

であるが， δ_{ij} の定義 (式 (14) ~ (17)) から，

$$\delta_{ij} + \delta_{ji} = 0, \quad (24)$$

$$\delta_{ii} = 0 \quad (25)$$

であるので， $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \delta_{ij} = 0$ であることが分かる．すなわち，式 (23) の右辺第 2 項は 0 であり， $\langle \tilde{f} \rangle = \langle L^* \rangle$ であることが分かる．

最後に，表 1 のグレースケール保存について説明する．グレースケール保存とは，入力カラー画像においてグレースケール (無彩色) であった画素については，その明度がそのままグレースケールになることである⁽¹⁸⁾．グレースケール保存が実現されていた方が自然な画像が得られる場合が多い．特に，入力カラー画像に白があった場合，それは出力モノクロ画像でも (灰色ではなく) 白であった方が自然であるといえる．Color2Gray では，グレースケール保存は考慮されていない．

(b) Decolorize

Decolorize は，色成分の射影によりモノクロ画像を得る手法である．Color2Gray のような画素ごとにグレースケールを決定する手法とは異なり，射影に基づく手法では，近傍の画素対しか考慮しなかったとしても全域整合性が保証される．また，近傍の画素対しか考慮しないことは低計算量性にも通じる．一方で，変換の自由度が射影係数の数だけしかなく，変換能力に限界があるともいえる．Decolorize の処理手続は煩雑であるので，概要のみを以下に説明する．なお，Decolorize には三つのパラメータ η_o ， η_e ， η_n があるが，それぞれの意味は以下の説明の中で了解されるであろう．

YPQ 色空間：Decolorize では，まず YPQ 色空間を定義する．YPQ 値は， $[0, 1]$ に規格化した RGB 値を用いて，

$$\begin{pmatrix} Y^\dagger \\ P \\ Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ 0.500 & 0.500 & -1.000 \\ 1.000 & -1.000 & 0.000 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad (26)$$

で定義される． $Y^\dagger$ は NTSC 規格⁽¹⁾⁽²⁾における明度と等しい．また，式 (26) の変換係数より， P は黄-青成分， Q は赤-緑成分であることが分かる．等量の R と G の混合で得られる色は黄色であり， R または G が大きな値のときに P は大きな値となる．逆に， B が大きな値の場合， P は小さな値となる．したがって， P が大きいときは黄色，小さいときは青であることを意味する． Q についても同様である．また，YPQ 色空間では，

CIELAB 色空間と同様にして色相 $H^\dagger$ と彩度 $S^\dagger$ を

$$H^\dagger = \frac{1}{\pi} \arctan(Q/P), \quad (27)$$

$$S^\dagger = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (28)$$

により定義することができる．

YPQ 色空間に関して，各変数のとり得る値の範囲は次のとおりである．

$$Y^\dagger \in [Y_{\min}^\dagger, Y_{\max}^\dagger] = [0, 1], \quad (29)$$

$$P \in [P_{\min}, P_{\max}] = [-1, 1], \quad (30)$$

$$Q \in [Q_{\min}, Q_{\max}] = [-1, 1], \quad (31)$$

$$H^\dagger \in [H_{\min}^\dagger, H_{\max}^\dagger] = [-1, 1], \quad (32)$$

$$S^\dagger \in [S_{\min}^\dagger, S_{\max}^\dagger] = [0, 1.1180]. \quad (33)$$

YPQ 色空間の特徴は，各変数のとり得る値の範囲が似ている ($S_{\max}^\dagger \approx H_{\max}^\dagger = Y_{\max}^\dagger = P_{\max} = Q_{\max} = 1$) ことと，計算が簡単なことである．

射影によるモノクロ変換：Decolorize では，色の違いを考慮した暫定モノクロ画像 Y' を

$$Y'_i = Y_i^\dagger + \frac{\eta_e}{\Psi_{1-\eta_o}(|K|)} K_i, \quad (34)$$

$$K_i = c_P P_i + c_Q Q_i \quad (35)$$

で得る． c_P と c_Q は入力カラー画像ごとに決定される値であり， PQ 平面における“主要軸 (predominant axis)”の方向である．主要軸とは，明度成分によるモノクロ変換で失われてしまう色成分差を考えたときに，最も損失の大きい方向である．Grundland らは，主成分分析 (principal component analysis: PCA) に似た predominant component analysis (PDCA) を提案し，それにより (c_P, c_Q) を求める方法を提案している⁽¹⁸⁾．PDCA の詳細についてはここでは省略する． K_i は画素 i の色 (P_i, Q_i) に関する主要軸方向の成分であり，明度によるモノクロ変換における損失色情報量である． $\Psi_{1-\eta_o}(|K|)$ は，入力画像に関する全ての $|K_i|$ を昇順に並べたときに $\lfloor n(1-\eta_o) \rfloor$ 番目にある $|K|$ の値である．ここで $\lfloor x \rfloor$ は床関数であり， x を超えない最大の整数を表す．式 (34) の右辺第 2 項は明度修正量であるが，その値は損失色情報量 K を $\Psi_{1-\eta_o}(|K|)$ で割ることによりスケールリングし，更に修正量を調節するパラメータ η_e を乗じることによって得られる．

明度成分によるモノクロ変換は ($Y^\dagger, P, Q$) という色成分に対して (1, 0, 0) という射影係数を乗じて得られると考えることができるが，式 (34)，(35) はその射影係数を画像ごとに $\left(1, \frac{\eta_e}{\Psi_{1-\eta_o}(|K|)} c_P, \frac{\eta_e}{\Psi_{1-\eta_o}(|K|)} c_Q\right)$ としていると考えることができる．また，YPQ 値は RGB 値の線形射影で得られるので，Decolorize は画像ごとに式 (1) の射影係数を決定していると考えられる． Y' は暫定値であり，最終的な出力値ではないが，Decolorize ではこのような射影によりグレースケールを決定するので，全域整合性が保証される．

ガウシアンベアリング：PDCA の計算を行う際，画素の対を考えることになるが，Decolorize では近傍の画素対のみを考慮

する．カラー画像のモノクロ変換において視認性が問題となるのは，近い位置に存在する領域同士についてであり，遠く離れた領域同士が同じグレースケールに変換されたとしても，それぞれの領域を独立して判別することはできない．近傍 Color2Gray では，ある画素に対してチェス盤距離が ρ 以下である画素との対を考慮したが，この近傍の設定には問題がある．それは， ρ より離れた領域同士は全く考慮することができないので，適切な ρ が画像ごとに異なるという点である．Decolorize では，ガウシアンペアリングと呼ばれる方法が提案され，その問題を解決している．ガウシアンペアリングについて以下に述べる．

平均を 0，分散を $(2/\pi)\eta_n^2$ とした二次元のガウス分布を考える．注目画素 i に対し，対となる画素 i' を上記のガウス分布に従って一つ選び，画素対 (i, i') とする．注目画素はラスタ順に毎回更新し， n 画素の入力画像から n 個の画素対を得る．このようにして得た画素対の集合を σ'_{η_n} で表す．ガウシアンペアリングで選ばれる画素間の平均的な距離は η_n となるが，遠く離れた画素の対も低確率ながら選ばれ，近傍範囲が ρ に固定されていた近傍 Color2Gray とは異なる画素対集合となる．また，PDCA にかかる計算量は $O(n)$ となり，近傍範囲を ρ に固定することに比べて，ガウシアンペアリングは高速化のためにも効果的である．

グレースケール保存：Decolorize では， Y' に対して，突発値（アウトライア）をなくすための修正及び彩度に関する修正を加えて最終的なグレースケール $\tilde{Y}$ を得る．それらの処理の詳細は省略するが，特に彩度に関する修正により， $\tilde{Y}$ と $Y^\dagger$ の間には次の関係式が成り立つ．

$$\left| \tilde{Y}_i - Y^\dagger_i \right| \leq \eta_e \frac{Y^\dagger_{\max}}{S^\dagger_{\max}} S^\dagger_i. \quad (36)$$

左辺は画素 i に関する明度修正量を表している．式 (36) から分かるように，その画素の彩度 $S^\dagger$ が大きいほど，大きな明度修正を行うことができる．逆に， $S^\dagger = 0$ （無彩色）の場合は，明度修正量は必ず 0 になる．すなわち，無彩色の画素については，明度成分がそのままグレースケールとなる．この性質をグレースケール保存という．また，式 (36) における $Y^\dagger_{\max}/S^\dagger_{\max}$ は，彩度と明度のスケール係数であるとみなせる．

(c) 筆者らの手法

Decolorize では，PDCA に基づいた射影（グレースケールに対する色の違いの反映処理）結果 Y' に対して彩度等による修正を施して出力値 $\tilde{Y}$ を得る．したがって，後段の処理により色の違いの反映結果（コントラスト）が劣化する可能性がある．筆者らは以前，グレースケール保存（彩度による明度修正量の制御）を考慮しつつも，コントラストの劣化を防ぐモノクロ変換手法⁽¹⁹⁾を提案した．その手法を以下に説明する．

筆者らの手法では，画素 i のグレースケール L_i^* を

$$\hat{L}_i^* = L_i^* + c_a a_i^* + c_b b_i^* \quad (37)$$

で得る． c_a 及び c_b は入力カラー画像に応じて決定される射影係数であり，

$$(\tilde{c}_a, \tilde{c}_b) = \arg \min_{(c_a, c_b) \in \mathbb{R}^2} \sum_{(i, j) \in \sigma'_{\eta'_n}} ((\hat{L}_i^* - \hat{L}_j^*) - \delta_{ij})^2 \quad (38)$$

で求めた $(\tilde{c}_a, \tilde{c}_b)$ を使用する．ここで， η'_n はガウシアンペアリングのためのパラメータである．この最小化問題は，最小二乗法⁽¹⁾で解くことができる．

また， L^* は $[0, 100]$ の値である必要があるが， $\hat{L}^*$ はその範囲外の値となる可能性がある．そこで，以下のクリッピング処理により，最終的なグレースケール $\tilde{L}^*$ を得る．

$$\tilde{L}^* = \begin{cases} 0, & \hat{L}^* < 0, \\ \hat{L}^*, & 0 \leq \hat{L}^* \leq 100, \\ 100, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (39)$$

この手法は，Color2Gray の最小化問題に基づいているが，射影によるモノクロ変換であるので近傍対（ガウシアンペアリング）でも全域整合性がある．更に，式 (37) から分かるように，グレースケール保存が自発的に備わっている．すなわち，画素 i が無彩色 ($a_i^* = b_i^* = 0$) の場合， c_a, c_b の値に関わらず， $\tilde{L}_i^* = L_i^*$ となる．この手法では，グレースケール保存を考慮した条件下で最適化問題を解くので，Decolorize のように後段の処理によりコントラストを劣化させることがない．

3.2 各モノクロ変換手法の比較

3.1 で述べたモノクロ変換手法について，性能を比較する．図 10(a) と図 11(a) が入力カラー画像であり，それぞれ 172×172 画素， 125×125 画素である．各手法のパラメータはそれぞれの文献に基づいて設定した．Color2Gray に関してはパラメータの値が指定されていないが，本稿では $\alpha = 15$ ， $\theta = \pi/4$ とした．また，近傍 Color2Gray については $\rho = 2$ とし，共役勾配法においては十分な回数の反復を行った．

図 10(b) は明度成分画像であるが，島が判別できない．図 10(c) では島は判別できるが，陸部分において道と陸のコントラストが低下している．図 10(d) では近傍対だけを考慮するので，道と陸のコントラストが高い結果が得られている．また，この例では図 9(d) のときのような不都合は発生していない．Decolorize では，図 10(e) に見られるように，後段のグレースケール保存処理により，色の違いの反映結果が劣化してしまうことがある．ここには載せていないが，グレースケール保存処理を行う前の暫定画像 Y' では，島は良好に見えている．図 10(f) では，グレースケール保存も含めた最適化を行うので，コントラストの劣化が起きていないことが分かる．

図 11(b) では，黄緑の草原と緑の山の境界部分が見分けにくくなっている．図 11(c) では，その部分の視認性は改善されているが，雲の様相が入力カラー画像に忠実ではない．図 11(d) はコントラストも高く，雲の様相も適切であるが，道路を挟んだ同色の草原が異なるグレースケールに変換されてしまっている．図 11(e)，(f) は全体のバランスも良く，共に良好な画像であるといえる．特に，雲の部分が良好なのは，グレースケール保存

図 10 Map に対する実験結果 (a) 原画像, (b) 明度成分, (c) 全域 Color2Gray, (d) 近傍 Color2Gray, (e) Decolorize, (f) 筆者らの手法⁽¹⁹⁾.

図 11 Voiture に対する実験結果 (a) 原画像, (b) 明度成分, (c) 全域 Color2Gray, (d) 近傍 Color2Gray, (e) Decolorize, (f) 筆者らの手法⁽¹⁹⁾.

(彩度による修正量の制御)の効果といえる。ただし、図 11(e), (f) について、黄緑と黄色からなる草原のコントラストに関しては、図 11(f) の方が優れているといえる。

上では、表 1 における評価項目のうち、全域整合性・高コントラスト性・グレースケール保存について主観的に評価した。残りの低計算量性と平均明度保存については定量的に評価できる。それぞれを表 2, 3 に示す。近傍 Color2Gray の計算時間は反復回数に依存するが、原論文⁽¹³⁾では反復終了を判定するための方法が示されていないので、表には掲載していない。実験に用いた CPU は AMD Athlon™64 3500+ (2.2 GHz) であり、メインメモリの容量は 1.0 GByte である。

表 2 から、全域 Color2Gray 処理は非常に時間がかかることが分かる。全域 Color2Gray の計算量は理論的には $O(n^2)$ であるが、表 2 の計算時間はそれからずれている。この原因は入力画像の色分布によるものと考えられる。式 (14) から分かるように、画素 i と j の色によって δ_{ij} の計算量は異なる。Decolorize

表 2 計算時間 (単位は秒)

モノクロ変換手法	Map	Voiture
全域 Color2Gray	45.0	18.8
Decolorize	0.09	0.05
著者らの手法 ⁽¹⁹⁾	0.14	0.07

表 3 平均グレーレベル ([0, 1] に規格化)

モノクロ変換手法	Map	Voiture
L^*	0.812	0.612
全域 Color2Gray	0.815	0.612
著者らの手法 ⁽¹⁹⁾	0.820	0.591
Y^+	0.808	0.593
Decolorize	0.760	0.635

及び筆者らの手法の計算時間は同等であり、共に $O(n)$ である。両手法の計算時間の差は、画素値を YPQ 色空間に変換するか、CIELAB 色空間に変換するかの違いによるものである。

表 3 は、[0, 1] に規格化した出力画像の平均グレーレベルを示したものである。全域 Color2Gray と筆者らの手法は L^* (sRGB における Y) を明度によるモノクロ変換結果と考え、それに対して色の違いを反映させたものである。一方、Decolorize の場合は Y^+ が基準の明度成分となる。式 (23) ~ (25) で示したように、全域 Color2Gray は平均明度保存の性質を持つ。Map の場合に平均グレーレベルが僅かにずれているのは、出力値 $\tilde{f}$ を [0, 100] にクリッピングしたためである。表には載せていないが、近傍 Color2Gray についても同様である。一方、Decolorize 及び筆者らの手法は平均明度保存の性質を持たない。ただし、どちらの手法も明度成分を基準とし、色成分による修正を加えるものであるので、 L^* あるいは Y^+ に比べて平均明度が大きく異なることはない。

4. 2 色覚のための色変換

図 2 で見たように、2 色覚での色の見えは、正常色覚 (正常 3 色覚⁽²⁾) での見えと比べてかなり異なる。すなわち、色の違いによって表された情報が 2 色覚では正しく認識できないことがある。この問題を解決するための色変換について、近年、様々な手法が提案されている^{(11) (12) (29)~(38)}。本章では、筆者らが以前に提案した手法^{(34) (35)}を中心に、2 色覚のための色変換について簡単に述べる。

また、2 色覚ための色変換を考えるに先立ち、2 色覚での色の見え方を正常色覚においてシミュレーションする方法を述べる。そのような手法は幾つか提案されているが^{(5)~(9)}、本稿では、Viénot らによって提案された色覚モデル⁽⁸⁾を紹介する。

4.1 色覚モデル

正常 3 色覚を有する場合、網膜上には光刺激に対して反応が異なる 3 種類のすい体が存在している。3 種類のすい体の反応を総合して、ヒトは約 380 ~ 780 nm の光 (電磁波) を色として感じることができる^{(1) (2)}。短波長の光によく反応するすい体

を青すい体という．他に緑すい体と赤すい体がある．どちらも中波長の光に対して最もよく反応するが，より長波長側（赤側）の光にも反応できるすい体が赤すい体である．光刺激に対する赤・緑・青すい体の反応値をそれぞれ L, M, S で表す．正常 3 色覚において色を 3 要素で表現できるのは，色センサとして 3 種類のすい体が存在するからである．

3 種類のすい体のうち，いずれかを欠失した場合，2 色覚となる⁽²⁾．失ったすい体が赤すい体の場合を 1 型 2 色覚（protanopia，P 型色覚）という．同様に，緑すい体を欠失している場合を 2 型 2 色覚（deutanopia，D 型色覚），青すい体の場合を 3 型 2 色覚（tritanopia，T 型色覚）という．Viénot らの色覚モデルでは，P 型及び D 型における色の見えのシミュレーションができる．T 型のシミュレーションはできないが，2 色覚者のほとんどは P 型または D 型であり，十分有効性のある方法である．

以下では，XYZ 値で表された色について，2 色覚での見えをシミュレーションした XYZ 値を得る方法を述べる．XYZ 値を RGB 値にするには，式 (4) について逆変換をすればよい．

文献 (39)によると， (X, Y, Z) と (L, M, S) の関係は

$$\begin{pmatrix} L \\ M \\ S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.1551 & 0.5431 & -0.03286 \\ -0.1551 & 0.4568 & 0.03286 \\ 0 & 0 & 0.01608 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (40)$$

で表される．P 型色覚における LMS 値を (L_P, M_P, S_P) で表すと，

$$\begin{pmatrix} L_P \\ M_P \\ S_P \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 2.02344 & -2.52581 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L \\ M \\ S \end{pmatrix} \quad (41)$$

である⁽⁸⁾．P 型色覚における XYZ 値を (X_P, Y_P, Z_P) で表すと，式 (40)，(41) より，

$$\begin{pmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.3813 & 1.1228 & 0.1730 \\ -0.4691 & 1.3813 & 0.0587 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (42)$$

なる関係式が得られる．D 型色覚の場合，式 (42) に相当する式は以下ようになる．

$$\begin{pmatrix} X_D \\ Y_D \\ Z_D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.1884 & 0.6597 & 0.1016 \\ 0.2318 & 0.8116 & -0.0290 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (43)$$

式 (41) で表現されているように，P 型色覚の場合，赤すい体がないので L に関する係数が 0 となっている．すなわち，式 (41) は二次元平面への射影である．また， L_P は一般に 0 ではないが，これは 2 色覚における色の見えを正常色覚においてシミュレーションするための実効値であり，P 型色覚において L_P に対応するすい体があるという意味ではない．D 型色覚について，式 (41) に相当する式においては， M （緑すい体）に関する係数が 0 となっている．

4.2 2 色覚のための色変換手法

2 色覚のための色変換は，基本的に，視認性が良くなるように

表 4 最適化問題による色変換手法の特徴

色変換手法	最適化問題の解法	主な変化色成分
Rasche ⁽¹¹⁾	共役勾配法	全て
Rasche ⁽¹²⁾	線形計画法	全て
Ichikawa ⁽²⁹⁾	遺伝的アルゴリズム	全て
Ichikawa ⁽³⁰⁾	Random bit-climbing	全て
Wakita ⁽³¹⁾	シミュレーテッド・アニーリング	全て
Huang ⁽³²⁾	共役勾配法	色相
末竹 ⁽³³⁾	最小二乗法	明度
Tanaka ⁽³⁴⁾	解析的に解ける	明度
Tanaka ⁽³⁵⁾	解析的に解ける	黄-青成分

色の組合せの最適化を行う問題となる．2 色覚のための色変換では，正常 3 色覚（三次元色空間）における色の違いを 2 色覚（二次元色空間）に反映させる．多くの手法では，Color2Gray や Decolorize に類似した最適化問題を構成し，それを解くことで色変換を行う⁽¹¹⁾⁽¹²⁾⁽²⁹⁾⁻⁽³⁵⁾．ただし，最適化問題を解くにあたり，共役勾配法，遺伝的アルゴリズム⁽⁴⁰⁾，random bit-climbing⁽⁴¹⁾，シミュレーテッドアニーリング⁽⁴²⁾といった反復法を用いる手法が多い．一方，最適化問題が最小二乗法で解ける手法⁽³³⁾や，解析的に解ける手法⁽³⁴⁾⁽³⁵⁾もある．これらを表 4 にまとめる．反復法には計算量が大いという難点があり，更に，方法によっては初期値依存性や確率的な動作による非再現性もあるが，それらは好ましい性質とはいえない．また，表 4 には，色変換の際にどのような色成分が主に変更されるかも記述した．色相を変更すると，自然画像では奇妙な印象の画像になることが多い．なお，黄-青成分のみを変化させた場合も色相は変化する．一方，色相を変更しなければ，自然な印象の画像となることが期待できる．

最適化問題によらない色変換手法としては，例えばヒストグラム平坦化⁽¹⁾に基づく手法⁽³⁷⁾がある．この手法では，色相に関するヒストグラムを作成し，それに基づいて色相を変換する．

このように様々な色変換手法が提案されているが，計算量及び出力画像の自然さという観点からは，明度を修正する手法⁽³³⁾⁽³⁴⁾が好ましいといえる．それらは，3. で述べた高性能モノクロ変換手法の応用である．高性能モノクロ変換では，三次元色空間における色の違いをモノクロ画像（明度成分）に反映させたが，2 色覚のための色変換では，正常 3 色覚における色の違いを 2 色覚の明度成分に反映させる．ここで注意すべき点は，2 色覚におけるコントラストを最良にすることである．正常 3 色覚の明度成分と 2 色覚の明度成分は多くの場合似ているが，必ずしも同じではない．正常 3 色覚において十分に明度差があったとしても，2 色覚では似た明度の色かもしれない．筆者らは正常 3 色覚における明度を最適化する手法⁽³³⁾並びに 2 色覚における明度成分を最適化する手法⁽³⁴⁾を提案したが，後者の方が優れている．

また，色変換の際，必ずしも画像中の全ての色の組合せを考慮する必要はない．詳しくは後述するが，混同色線⁽⁴³⁾を用いると，2 色覚において（明度を除いて）混同する色であるかどうか判定できる．判定は xy 色度の値で行う．したがって，色変換の前後で xy 色度を不変にした上で明度のみを変換すれば，入力画像における非混同色については色変換後に混同色となる可能性

図 12 P 型色覚における混同色線群

がない．すなわち，混同色線の導入により，色変換の最適化問題において考慮する色の対を減らすことができ，不必要な色変換を抑制することができる^{(33) (34) (36)}．筆者らの手法⁽³⁴⁾では混同色線も考慮されている．その手法の概要を以下に述べる．

筆者らの手法では，Color2Gray と同様の符号付色距離や最小化問題を設定し，それを解くことで明度修正を行う．ただし，符号付色距離の定義は Color2Gray と全く同一ではない．この手法では，基本的に，変換の前後で xy 色度を不変に保つので，色変換の際に重視しなくてよい色の組合せもある．符号付色距離はそのことを考慮して定義されている．

混同色線を用いた 2 色覚における混同色の判定方法について述べる．図 12 に P 型色覚での混同色線の例を示す．混同色線とは， xy 色度図上において，混同色中心と呼ばれる点から引かれた直線である．同一混同色線上に存在する 2 点 (2 色) は，2 色覚において色相・彩度の差が極めて小さい．混同色中心は色覚の種類に固有であり，P 型色覚の場合は $(x_P, y_P) = (0.75, 0.25)$ ，D 型色覚の場合は $(x_P, y_P) = (1.00, 0.00)$ である⁽⁴³⁾．考慮対象の 2 色について，図 12 に示すように，点と直線の距離 $d_{P,ij}$ と $d_{P,ji}$ を考える．二つの d のうち小さい方を 2 色の距離 (混同の度合) とし，その値を用いて符号付色距離を定める．

上述したようにして符号付色距離を定義し，最小化問題を解くことで，2 色覚における修正明度成分が得られる．しかし，出力画像を得るためには，まだ考慮すべきことがある．一つ目の問題は，2 色覚においてある色に見える正常色覚の色は無数に存在することである．これは，例えば式 (41) の変換行列がランク落ちしていることと対応している．出力画像の画素値を唯一に定めるためには，適切な制約条件を加えればよい．筆者らの手法では，色変換の前後で xy 色度を不変に保つという条件がその役割を果たし，2 色覚における修正後の色に対応する正常色覚での色を決めることができる⁽³⁴⁾．もう一つの問題は，上記の方法で得られた正常色覚の色が色域外にある場合の対応が必要なことである．具体的な方法は省略するが，これについても対応方法は用意されている^{(34) (44)}．実は，この色域外の値への対応処理により，提案手法において xy 色度は厳密には不変ではない．ただし，その影響は小さい．また，その際に修正するのは彩度であり，色相は不変となることが保証されている．

2 色覚のための色変換例を図 13 に示す．図 13(a) は石原式色覚検査表のうちの一つであり，P 型・D 型色覚において判別が

図 13 石原式色覚検査表 (a) 原画像，(b) L_D^* 成分修正結果⁽³⁴⁾，(c) b_D^* 成分修正結果⁽³⁵⁾，(d) D 型色覚での (a) の見え，(e) D 型色覚での (b) の見え，(f) D 型色覚での (c) の見え．

難しい表である．図 13(d) は D 型色覚における見えである．図 13(b) は上で説明した筆者らの手法⁽³⁴⁾による色変換結果である．この変換では，正常色覚における色の違いが D 型色覚の明度成分 L_D^* に反映され，図 13(e) に示すように，2 色覚における視認性が向上している．また，本稿では説明していないが，筆者らは，正常色覚における色の違いを P 型あるいは D 型色覚における黄-青成分 (b^* 成分) に反映させる手法も提案している⁽³⁵⁾．その手法による D 型色覚の黄-青成分 b_D^* の修正結果を図 13(c) に示す． b_D^* を修正すると，図 13(f) から分かるように，2 色覚において異なる色 (色相・彩度) として認識できるようになる．この手法では，明度成分は修正されない．

明度を修正する手法⁽³⁴⁾の長所は色変換結果が自然であることである．一方，黄-青成分を変化させる手法⁽³⁵⁾の利点は，正常色覚において色相・彩度の異なる色を 2 色覚においても色相・彩度が異なる色として認識できるようになる点である．明度ではなく，色 (色相・彩度) 自体に意味があり，色の違いを表現しなければならない画像の場合， b^* 成分 (色相) を修正することは有意義であるといえる．

5. おわりに

本解説では，色の違いを考慮したモノクロ変換手法について詳しく述べ，それを応用した 2 色覚のための色変換についても簡単に述べた．どちらの色変換も，三次元の色分布を低次元の色空間においていかに良好に表現するかという問題に帰着される．そのような問題の性質上，解決手段としては，基本的に色の組合せに関する最適化を行うことになる．

特にモノクロ変換手法のところで詳しく述べたように，各色変換手法には一長一短がある．また，どの手法にも共通していえることであるが，入力画像内の色数が増えると，最適な組合せを求めることが難しくなる．低次元化された色域のためのカラー画像の色変換は比較的新しい研究分野であり，今後の更なる発展が望まれる．

- (1) 新編画像解析ハンドブック, 高木幹雄, 下田陽久 (監修), 東京大学出版会, 東京, 2004.
- (2) 新編色彩科学ハンドブック第3版, 日本色彩学会 (編), 東京大学出版会, 東京, 2011.
- (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.
- (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.
- (5) G.W. Mayer and D.P. Greenberg, “Color-defective vision and computer graphics displays,” IEEE Comput. Graph. Appl., vol.8, no.5, pp.28–40, Sept. 1988.
- (6) S. Kondo, “A computer simulation of anomalous color vision,” in Color Vision Deficiencies, pp.145–159, Y. Ohta, Kugler ed.& Ghedini Pub., Amsterdam, 1990.
- (7) H. Brettel, F. Viénot, 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.
- (8) F. Viénot, H. Brettel, and J.D. Mollon, “Digital video colourmaps for checking the legibility of displays by dichromats,” Color Res. Appl., vol.24, no.4, pp.243–252, Aug. 1999.
- (9) P. Capilla, M.A. Díez-Ajenjo, M.J. Luque, and J. Malo, “Corresponding-pair procedure: a new approach to simulation of dichromatic color perception,” J. Opt. Soc. Am. A, vol.21, no.2, pp.176–186, Feb. 2004.
- (10) R. Bala and K. Braun, “Color-to-grayscale conversion to maintain discriminability,” Proc. SPIE, vol.5293, pp.196–202, 2004.
- (11) K. Rasche, R. Geist, and J. Westall, “Detail preserving reproduction of color images for monochromats and dichromats,” IEEE Comput. Graph. Appl., vol.25, no.3, pp.22–30, May/June 2005.
- (12) K. Rasche, R. Geist, and J. Westall, “Re-coloring images for gamuts of lower dimension,” Comput. Graph. Forum, vol.24, no.3, pp.423–432, Sept. 2005.
- (13) A.A. Gooch, S.C. Olsen, J. Tumblin, and B. Gooch, “Color2Gray: Saliency-preserving color removal,” ACM Trans. Graph., vol.24, no.3, pp.634–639, July 2005.
- (14) G. Tanaka, N. Suetake, and E. Uchino, “Derivation of the analytical solution of Color2Gray algorithm and its application to fast color removal based on color quantization,” Opt. Rev., vol.16, no.6, pp.601–612, Nov./Dec. 2009.
- (15) 井上光平, 浦浜喜一, “色の違いに対応したカラー画像のモノクロ化,” 信学論 (A), vol.J89-A, no.1, pp.80–83, Jan. 2006.
- (16) 田中 豪, 末竹規哲, 内野英治, “色情報を考慮したカラー画像のモノクロ変換,” 信学論 (A), vol.J90-A, no.8, pp.673–676, Aug. 2007.
- (17) 松村将太郎, 熊澤逸夫, “連続境界条件を導入した画像のブロック分割によるグレースケール変換,” 信学論 (D), vol.J90-D, no.8, pp.1977–1986, Aug. 2007.
- (18) M. Grundland and N.A. Dodgson, “Decolorize: Fast, contrast enhancing, color to grayscale conversion,” Pattern Recognit., vol.40, no.1, pp.2891–2896, Nov. 2007.
- (19) 田中 豪, 末竹規哲, 内野英治, “色情報とグレースケール保存を考慮したデジタル画像のモノクロ変換,” 第9回情報科学技術フォーラム講演論文集, no.I-20, pp.287–288, Sept. 2010.
- (20) Y. Bai, S.J. Harrington, and J. Taber, “Improved algorithmic mapping of color to texture,” Proc. SPIE, vol.4300, pp.444–451, 2000.
- (21) R.L. de Queiroz and K.M. Braun, “Color to gray and back: Color embedding into textured gray images,” IEEE Trans. Image Process., vol.15, no.6, pp.1464–1470, June 2006.
- (22) R. Bala and R. Eschbach, “Spatial color-to-grayscale transformation preserving chrominance edge information,” Proc. IS&T/SID 12th Color Imaging Conf., pp.82–86, Scottsdale, AZ, USA, Nov. 2004.
- (23) K. Smith, P.-E. Landes, J. Thollot, and K. Mysowski, “Apparent greyscale: a simple and fast conversion to perceptually accurate images and video,” Comput. Graph. Forum, vol.27, no.2, pp.193–200, April 2008.
- (24) G.R. Kuhn, M.M. Oliveira, and L.A.F. Fernandes, “An improved contrast enhancing approach for color-to-grayscale mappings,” Vis. Comput., vol.24, nos.7–9, pp.505–514, July 2008.
- (25) M. Čadík, “Perceptual evaluation of color-to-grayscale image conversions,” Computer Graphics Forum, vol.27, no.7, pp.1745–1754, Oct. 2008.
- (26) 田中 豪, 末竹規哲, 内野英治, “Color2Gray アルゴリズムにおける角度パラメータに関する考察,” 信学技報, SIS2009-58, pp. 53-58, March 2010.
- (27) Y. Nayatani, “Simple estimation methods for the Helmholtz-Kohlrausch effect,” Color Res. Appl., vol.22, pp.385–401, 1997.
- (28) 名取 亮, 数値解析とその応用, コロナ社, 東京, 1990.
- (29) 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.
- (30) 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. System, Man and Cybernetics, vol.1, pp.36–41, Oct. 2004.
- (31) K. Wakita and K. Shimamura, “SmartColor: Disambiguation framework for the colorblind,” Proc. 7th Int. ACM SIGACCESS Conf. Computers and Accessibility, pp.158–165, Baltimore, MD, USA, Oct. 2005.
- (32) 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.
- (33) 末竹規哲, 田中 豪, 内野英治, “弁別困難色に対する非線形明度修正法の一提案,” 信学論 (D), vol.J91-D, no.8, pp.2192–2195, Aug. 2008.
- (34) G. Tanaka, N. Suetake, and E. Uchino, “Lightness modification of color image for protanopia and deuteranopia,” Opti. Rev., vol.17, no.1, pp.14–23, Jan./Feb. 2010.
- (35) G. Tanaka, N. Suetake, and E. Uchino, “Yellow-blue component modification of color image for protanopia or deuteranopia,” IEICE Trans. Fundamentals, vol.E94-A, no.2, pp.884–888, Feb. 2011.
- (36) M. Meguro, C. Takahashi, and T. Koga, “Simple color conversion method to perceptible images for color vision deficiencies,” Proc. SPIE, vol.6057, 2006.
- (37) 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.
- (38) N. Suetake, G. Tanaka, H. Hashii, and E. Uchino, “Simple lightness modification for color vision impaired based on Craik-O’Brien effect,” J. Franklin Inst., vol.349, no.6, pp.2093–2107, Aug. 2012.
- (39) V.C. Smith and J. Pokorny, “Spectral sensitivity of the foveal cone photopigments between 400 and 500 nm,” Visi. Res., vol.15, no.2, pp.161–171, Feb. 1975.
- (40) D.E. Goldberg, Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Addison-Wesley, Boston, 1989.
- (41) L.D. Davis, “Bit-climbing, representational bias, and test suite design,” in Proc. 4th Int. Conf. Genetic Algorithms, R.K. Belew and L.B. Booker eds., pp.18–23, Morgan Kaufmann Pub., San Mateo, CA, 1991.

- (42) S. Kirkpatrick, C.D. Gelatt, Jr., and M.P. Vecchi, "Optimization by simulated annealing," Science, vol.220, no.4598, pp.671–680, May 1983.
- (43) D.B. Judd, "Fundamental studies of color vision from 1860 to 1960," Proc. Natl. Acad. Sci. USA, vol.55, no.6, pp.1313–1330, June 1966.
- (44) 田中 豪, 末竹規哲, 内野英治, "CIELAB 色空間における二分法を用いた色域把握法とその画像強調への応用," 信学論 (A), vol.J92-A, no.4, pp.258–262, April 2009.

(SIS 研究会提案, 平成 24 年 6 月 8 日受付 7 月 18 日最終受付)

末竹規哲 (正員)

1992 九工大・情報工・制御システム卒. 1994 同大学院情報工学研究科修士課程了. 1994~1997 沖電気工業株式会社電子通信システム研究所. 2000 九工大大学院情報工学研究科博士後期課程了. 同年, 日本学術振興会研究員. 2001 筑波大・機能工学系・講師. 2003 山口大・理・講師. 2005 同大学助教授を経て, 2007 同大学准教授. デジタル画像処理の研究に従事. 博士 (情報工学). IEEE 会員.

田中 豪 (正員)

2004 東北大・理・物理卒. 2010 山口大大学院理工学研究科博士後期課程了. 同年日本学術振興会特別研究員. 2011 名古屋市大大学院システム自然科学研究科講師. デジタル画像処理の研究に従事. 博士 (理学). 平 23 年度本会学術奨励賞受賞. 情報処理学会会員.