一般社団法人　電子情報通信学会
THE INSTITUTE OF ELECTRONICS,
INFORMATION AND COMMUNICATION ENGINEERS

信学技報
IEICE Technical Report
SIS2020-12(2020-10)

照明光の影響軽減のためのマルチカラーバランスに基づく特定色補正法

赤澤　輝昭†　木下　裕磨†　貴家　仁志†

† 東京都立大学システムデザイン学部情報通信システムコース　〒191–0065 東京都日野市旭ケ丘 6–6
E-mail: †akazawa-teruaki@ed.tmu.ac.jp, ††{ykinoshita,kiya}@tmu.ac.jp

あらまし　本稿では，照明光による色の変化を軽減する目的で，画像中の 3 つの特定色をマルチカラーバランスに基づき補正する手法を提案する．照明光の影響を軽減するための代表的な手法であるホワイトバランス調整では，白色点のみに基づき変換行列を計算しているため，白色以外の複数の色が受ける照明光の影響を正確に補正することができない．本稿で提案するマルチカラーバランスに基づく特定色補正法は，画像中に配置した複数の物体の特定色がそれぞれに対応する目的色となるよう変換行列を定めることによって，3 つの特定色をそれぞれに対応する目的色へ厳密に一致させることができる．2 つの異なる照明条件下である特定色を持つ被写体をそれぞれ撮影した画像を用いた実験の結果，提案する色補正法により，各画像における 3 つの特定色が受けた照明の影響を軽減し，2 枚の画像間の特定色の差を減少させることができると確認される．

キーワード　カラー画像処理，色の一貫性，ホワイトバランス調整，カラーバランス調整，色補正

Target-color correction method based on multi-color balance

Teruaki AKAZAWA†, Yuma KINOSHITA†, and Hitoshi KIYA†

† Faculty of System Design, Tokyo Metropolitan University　6–6 Asahigaoka, Hino-shi, Tokyo, 191–0065 Japan
E-mail: †akazawa-teruaki@ed.tmu.ac.jp, ††{ykinoshita,kiya}@tmu.ac.jp

Abstract　In this paper, we propose a target-color correction method for reducing color changes caused by the different of lighting conditions. A typical way for reducing the influence of lighting conditions is to use a white balance adjustment. However, existing white balance adjustment methods have a limited performance of adjusting colors except white color. The proposed target-color correction method can adjust three target-colors so that each target color is the same as the corresponding destination color. For the color correction, a matrix calculated by using objects with target colors is utilized. Experimental results show that the proposed method can adjust three target-colors in images to the corresponding destination colors. In addition, target-color differences between two images captured under two different light sources can be reduced by using the proposed method.

Key words　Color Image Processing, Color Consistency, White Balance Adjustment, Color Balance Adjustment, Color Correction

1. はじめに

ディジタルカメラによって撮影される画像の画素値は，照明光の分光分布や，被写体の分光反射率，カメラ分光感度に依存する [1]．このため，分光分布が異なる照明光の下でそれぞれ同一の物体を撮影した場合，撮影される物体の色は，それぞれの画像で異なるものとなる．この照明光が画像に与える色の変化は，コンピュータビジョン分野における課題解決の妨げとなる．例えば，深層学習を用いて画像からある特定の色を持つ物体を検出する場合においては，照明光の影響を学習させるために，様々な照明条件下で撮影された画像を訓練データとして準備する必要がある．照明光が画像の色に与える影響を軽減するため，これまでに多くのホワイトバランス調整法が研究されている [2]〜[9].

ホワイトバランス調整法は，入力画像中の白色物体の色を所望の白色点と一致させる変換を用いて，照明光により色が変化した画像を補正する．これは，人間の視覚における，照明光に変化があった場合にも変化後の照明環境へ順応することにより色の見えを保つ，色順応と呼ばれる性質を模した処理である [10]．ホワイトバランス調整法として，これまでに，XYZ 色空間で直接処理を行う方法 [9]，Bradford の錐体応答モデルや von Kries の錐体応答モデルに基づく方法 [9], [11] などが提案されているが，これらの方法はすべて白色点のみに基づき変換処理を決定している．すなわち，ホワイトバランス調整による色補正では，照明光の影響を受けた白色以外の複数の色を補正することができない．

This article is a technical report without peer review, and its polished and/or extended version may be published elsewhere.
Copyright ©2020 by IEICE

このような背景から，本稿では，マルチカラーバランス調整法と，それに基づく特定色補正法を提案する．提案するマルチカラーバランス調整法は，選択した 3 つの特定色を所望の目的色へそれぞれ一致させる変換行列を用いて色を補正する方法である．一方，特定色補正は，異なる照明下で撮影された複数の画像にマルチカラーバランス調整をそれぞれ施すことで，各画像中の特定色を補正する．特定色補正におけるマルチカラーバランス調整では，特定色を持つ物体が写っている既知の領域（既知特定色領域）が各画像中に存在するという条件の下，既知特定色領域中の特定色を用いて変換行列を設計する．提案する特定色補正法により，既知特定色領域の 3 つの色をそれぞれに対応する目的色へ厳密に一致させることができる．さらに，提案法により，特定色を持つ既知特定色領域以外の領域（未知特定色領域）の色も目的色に近づけることができる．

提案法の有効性を評価するため，異なる 2 つの照明条件下で撮影した 2 組の RAW 画像を用いて，色補正された画像間の色の差を XYZ 色空間における 2 つのベクトルのなす角，および CIEDE2000 [12], [13] における ΔH の観点から評価する実験を実施した．実験の結果，提案法は，既知特定色領域の 3 つの色を厳密に一致させることができる上，未知特定色領域における色の差も軽減させることができると示される．さらに，3 つの特定色の組を変化させて特定色補正を行った実験から，マルチカラーバランス変換行列の設計に用いる特定色として，画像中に存在する任意の色を選択できることが明らかとなる．

2. 準　　備

本章では，準備として一般的なディジタルカメラによる色の取得と，取得した色を XYZ 色空間へ変換する手順を説明する．さらに，XYZ 色空間で表現される画素値を持つ画像に対してホワイトバランスの調整を施す方法を説明する．最後に，従来のホワイトバランス調整法が持つ課題と，本研究の目的を説明する．

2.1 RGB カメラによる色情報の取得

一般的な RGB ディジタルカメラによる色情報の取得の流れを図 1 に示す [1].

光の波長を λ，照明光源の分光分布を $E(\lambda)$ とし，被写体の分光反射率を $S(\lambda)$ とする．このとき，カメラにより撮影される画像 I_{RGB} の画素値 $\boldsymbol{P}_{\mathrm{RGB}} = (P_{\mathrm{R}}, P_{\mathrm{G}}, P_{\mathrm{B}})^{\top}$ は，

$$\boldsymbol{P}_{\mathrm{RGB}} = \int_{380}^{780} E(\lambda) S(\lambda) R_C(\lambda)\, d\lambda \tag{1}$$

として与えられる．ここで，R_C は色 $C \in \{\mathrm{R,G,B}\}$に対応するカメラ分光感度である．カメラ分光感度は，個々のカメラごとに異なるため，撮影される画像の RGB 値（カメラ RGB 値）は，カメラに依存するデバイスディペンデントカラーである [1]. シーンの正確な色情報を扱うためには，カメラ RGB 値を，カメラによらないデバイスインディペンデントカラーに変換する必要がある [1]．この目的のために，XYZ 色空間が一般に用いられる．次節では，XYZ 色空間について説明する．

2.2 XYZ 色空間

XYZ 色空間は，CIE（国際照明委員会）が定めた色空間であり，光の分光分布と等色関数 $x(\lambda)$，$y(\lambda)$，$z(\lambda)$ によって決定される三刺激値によって色が表現される [14]〜[16].

カメラ RGB 色空間で表現される色 $\boldsymbol{P}_{\mathrm{RGB}}$ から XYZ 色空間で表現される色 $\boldsymbol{P}_{\mathrm{XYZ}} = (P_{\mathrm{X}}, P_{\mathrm{Y}}, P_{\mathrm{Z}})^{\top}$ への変換は，

$$\begin{pmatrix} P_{\mathrm{X}} \\ P_{\mathrm{Y}} \\ P_{\mathrm{Z}} \end{pmatrix} = \mathbf{M} \begin{pmatrix} P_{\mathrm{R}} \\ P_{\mathrm{G}} \\ P_{\mathrm{B}} \end{pmatrix} \tag{2}$$

として与えられる [1]．ここで $\mathbf{M}$ は，

$$\begin{pmatrix} R_{\mathrm{R}}(\lambda) \\ R_{\mathrm{G}}(\lambda) \\ R_{\mathrm{B}}(\lambda) \end{pmatrix} = \mathbf{M}^{-1} \begin{pmatrix} x(\lambda) \\ y(\lambda) \\ z(\lambda) \end{pmatrix} \tag{3}$$

を満たす 3×3 の正方行列である．

2.3 従来のホワイトバランス調整方法

人間の視覚には，照明光の色に変化が生じた場合でも，変化した照明の環境へ時間の経過とともに順応する，色順応と呼ばれる性質がある [10]．一方，図 1 より，撮影される物体のカメラ RGB 値は，照明光の影響を受けて変化することがわかる．このカメラ RGB 値の変化を補正するために，ディジタルカメラで撮影された画像に対して，ホワイトバランスの調整を施すことが一般的である [1].

XYZ 色空間で表現された画像 I_{XYZ} に対してホワイトバランス調整を施し得られる画像 I'_{XYZ} は，

$$\boldsymbol{P}'_{\mathrm{XYZ}} = \mathbf{M}_{\mathrm{WB}} \boldsymbol{P}_{\mathrm{XYZ}} \tag{4}$$

に従い計算される [17]．ここで，$\boldsymbol{P}_{\mathrm{XYZ}}$ および $\boldsymbol{P}'_{\mathrm{XYZ}}$ は，I_{XYZ} および I'_{XYZ} の画素値である．また，式 (4) における行列 $\mathbf{M}_{\mathrm{WB}}$ は，

$$\mathbf{M}_{\mathrm{WB}} = \mathbf{M}_{\mathrm{A}}{}^{-1} \begin{pmatrix} \rho_{\mathrm{D}}/\rho_{\mathrm{S}} & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_{\mathrm{D}}/\gamma_{\mathrm{S}} & 0 \\ 0 & 0 & \beta_{\mathrm{D}}/\beta_{\mathrm{S}} \end{pmatrix} \mathbf{M}_{\mathrm{A}} \tag{5}$$

として与えられる．ただし，$(\rho_{\mathrm{S}}, \gamma_{\mathrm{S}}, \beta_{\mathrm{S}})^{\top}$ および $(\rho_{\mathrm{D}}, \gamma_{\mathrm{D}}, \beta_{\mathrm{D}})^{\top}$ は，画像 I_{XYZ} 中の白色点 $(X_{\mathrm{S}}, Y_{\mathrm{S}}, Z_{\mathrm{S}})^{\top}$ と，目的とする所望の白色点 $(X_{\mathrm{D}}, Y_{\mathrm{D}}, Z_{\mathrm{D}})^{\top}$ を用いて，

$$\begin{pmatrix} \rho_{\mathrm{S}} \\ \gamma_{\mathrm{S}} \\ \beta_{\mathrm{S}} \end{pmatrix} = \mathbf{M}_{\mathrm{A}} \begin{pmatrix} X_{\mathrm{S}} \\ Y_{\mathrm{S}} \\ Z_{\mathrm{S}} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \rho_{\mathrm{D}} \\ \gamma_{\mathrm{D}} \\ \beta_{\mathrm{D}} \end{pmatrix} = \mathbf{M}_{\mathrm{A}} \begin{pmatrix} X_{\mathrm{D}} \\ Y_{\mathrm{D}} \\ Z_{\mathrm{D}} \end{pmatrix} \tag{6}$$

と表される．

式（5）における $\mathbf{M}_{\mathrm{A}}$ は，最も単純な場合，3×3 の単位行列とすれば良い．これは，XYZ 色空間で直接ホワイトバランス調整を行うことに相当する．しかし，XYZ 色空間で直接ホワイトバランス調整を施した場合，白色点以外の色が実際の色

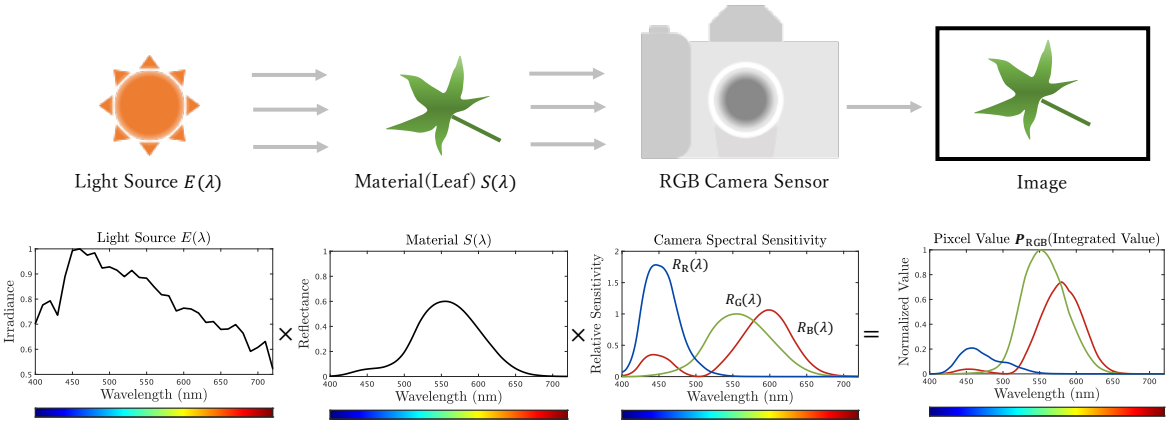


図 1　Imaging pipeline of RGB digital camera.

の見えと違うことがある．そこで，より高精度なホワイトバランス調整のために，Bradford の錐体応答モデルや von Kries の錐体応答モデルが一般に利用される [9], [10]．Bradford の錐体応答モデルに基づくホワイトバランス調整では，$\mathbf{M}_{\mathrm{A}}$ を

$$\mathbf{M}_{\mathrm{A}} = \begin{pmatrix} 0.8951 & 0.2664 & -0.1614 \\ -0.7502 & 1.7135 & 0.0367 \\ 0.0389 & -0.0685 & 1.0296 \end{pmatrix} \tag{7}$$

として与える [11].

2.4　問題設定

ホワイトバランス調整の利用により，様々な照明下で撮影されたディジタル画像を，撮影時の実際の色の見えに近づけることができる [4], [17]．しかしながら，従来のホワイトバランス調整法は，式（5）に示した通り白色点のみを用いて変換行列 $\mathbf{M}_{\mathrm{WB}}$ を求めているため，白色以外の色について照明光の影響を完全に取り除くことができない．このことは，ある特定の色を持つ物体を画像から検出したい場合に，照明光の影響を考慮する必要が生じるなどの問題を引き起こす．

そこで本稿では，複数の特定色に基づき変換行列を設計し，その変換行列を用いて画像の色を補正するマルチカラーバランス調整法を提案する．提案法を用いることにより，異なる照明下で撮影された 2 枚の画像において，それぞれの特定色を持つ既知の領域（既知特定色領域）があるという条件のもとで，この既知特定色領域の色を 2 枚の画像間で厳密に一致させ，画像中の他の特定色領域（未知特定色領域）についても，照明光の影響による色の違いを軽減することができる．

3.　提　案　法

提案するマルチカラーバランス調整法では，画像中の既知特定色領域から選択する特定の 3 色を用いて変換行列を設計する．設計される変換行列の利用により，この 3 つの特定色を所望の目的色にそれぞれ一致させることができる．提案するマルチカラーバランス調整法を，異なる照明条件の下で撮影された 2 枚の画像にそれぞれ適用することで，照明に起因する未知特定色領域の色の変化を抑制することができる（図 2 参照）．

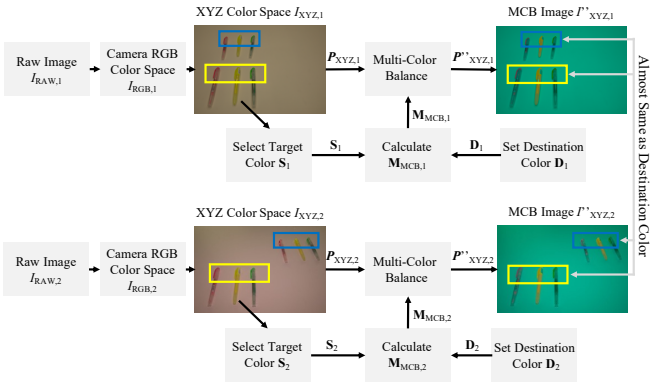


図 2　Proposed multi-color balance method.Yellow rectangle: known target-color region, blue rectangle: unknown target-color region).

3.1　マルチカラーバランス変換行列の設計

マルチカラーバランス調整法は，3 つの特定色をそれぞれある目的色へ変換する．XYZ 色空間における 3 つの特定色を $(X_{S1}, Y_{S1}, Z_{S1})^\top$，$(X_{S2}, Y_{S2}, Z_{S2})^\top$，$(X_{S3}, Y_{S3}, Z_{S3})^\top$ とし，3 つの目的色を $(X_{D1}, Y_{D1}, Z_{D1})^\top$，$(X_{D2}, Y_{D2}, Z_{D2})^\top$，$(X_{D3}, Y_{D3}, Z_{D3})^\top$ とすると，この変換は次式で与えられる．

$$\mathbf{D} = \mathbf{M}_{\mathrm{MCB}}\mathbf{S} \tag{8}$$

ここで，

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} X_{S1} & X_{S2} & X_{S3} \\ Y_{S1} & Y_{S2} & Y_{S3} \\ Z_{S1} & Z_{S2} & Z_{S3} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{D} = \begin{pmatrix} X_{D1} & X_{D2} & X_{D3} \\ Y_{D1} & Y_{D2} & Y_{D3} \\ Z_{D1} & Z_{D2} & Z_{D3} \end{pmatrix} \tag{9}$$

である．このとき，$\mathbf{S}$ と $\mathbf{D}$ がともにフルランクならば，$\mathbf{M}_{\mathrm{MCB}}$ は次式より一意に定まる．

$$\mathbf{M}_{\mathrm{MCB}} = \mathbf{D}\mathbf{S}^{-1} \tag{10}$$

となる．以上により，マルチカラーバランスのための変換行列 $\mathbf{M}_{\mathrm{MCB}}$ を求めることができる．

式（10）に従い計算した行列 $\mathbf{M}_{\mathrm{MCB}}$ を用いて，画像 I_{XYZ} の画素値 $\boldsymbol{P}_{\mathrm{XYZ}}$ を

$$\boldsymbol{P}''_{\mathrm{XYZ}} = \mathbf{M}_{\mathrm{MCB}}\boldsymbol{P}_{\mathrm{XYZ}} \tag{11}$$

として変換することにより，画像 I_{XYZ} 中に存在する 3 つの特定色を所望の目的色へそれぞれ変換できる．

3.2 実行手順

マルチカラーバランスの変換行列 $\mathbf{M}_{\mathrm{MCB}}$ を用い，ディジタルカメラによって同一の特定色を持つ被写体を撮影した 2 枚の RAW 画像 $I_{\mathrm{RAW},1}$ と $I_{\mathrm{RAW},2}$ の特定色を補正する手順を以下に示す．

(i) 3 つの特定色それぞれに対応する所望の目的色 $(X_{\mathrm{D1}}, Y_{\mathrm{D1}}, Z_{\mathrm{D1}})^{\top}$，$(X_{\mathrm{D2}}, Y_{\mathrm{D2}}, Z_{\mathrm{D2}})^{\top}$，$(X_{\mathrm{D3}}, Y_{\mathrm{D3}}, Z_{\mathrm{D3}})^{\top}$ をそれぞれ決定する．

(ii) 入力の RAW 画像 $I_{\mathrm{RAW},1}$ にデモザイク処理を施し，カメラ RGB 色空間で表現された画像 $I_{\mathrm{RGB},1}$ を得る．

(iii) $I_{\mathrm{RGB},1}$ 中で補正したい 3 つの特定色を既知特定色領域から選択し，それぞれを式 (2) に従い XYZ 色空間へ変換する．これらの変換された特定色を $(X_{\mathrm{S1},1}, Y_{\mathrm{S1},1}, Z_{\mathrm{S1},1})^{\top}$，$(X_{\mathrm{S2},1}, Y_{\mathrm{S2},1}, Z_{\mathrm{S2},1})^{\top}$，$(X_{\mathrm{S3},1}, Y_{\mathrm{S3},1}, Z_{\mathrm{S3},1})^{\top}$ とする．

(iv) 手順（i）と（iii）で設定した特定色と目的色を用いて，式（10）に従い，変換行列 $\mathbf{M}_{\mathrm{MCB},1}$ を計算する．

(v) $I_{\mathrm{RGB},1}$ の画素値 $\boldsymbol{P}_{\mathrm{RGB},1}$ を，式（2）に従い XYZ 色空間に変換することで，XYZ 色空間で表現された画像 $I_{\mathrm{XYZ},1}$ を得る．

(vi) 変換行列 $\mathbf{M}_{\mathrm{MCB},1}$ を用いて，式（11）に従い $I_{\mathrm{XYZ},1}$ の画素値 $\boldsymbol{P}_{\mathrm{XYZ},1}$ にマルチカラーバランス調整を施し，$\boldsymbol{P}''_{\mathrm{XYZ},1}$ を画素値として持つ画像 $I''_{\mathrm{XYZ},1}$ を得る．

(vii) $I_{\mathrm{RAW},2}$ についても，$I_{\mathrm{RAW},1}$ と同様に手順（ii）から（vi）の処理を行う．これにより，マルチカラーバランス調整された画像 $I''_{\mathrm{XYZ},2}$ を得る．

以上の手順によって，既知特定色領域から選択した 3 つの特定色が所望の目的色へ変換された XYZ 色空間の 2 枚の画像 $I''_{\mathrm{XYZ},1}$ と $I''_{\mathrm{XYZ},2}$ が得られる．これらの画像における既知特定色領域の色は目的色に厳密に一致する．さらに，未知特定色領域の色についても，照明光の影響を軽減し，目的色に近づけることができる（図 2 参照）．

4. 実　　験

提案法により 3 つの特定色への照明光の影響を軽減できることを，2 つの異なる照明条件下で同一シーンを撮影した 2 枚の画像を用いて確認した．

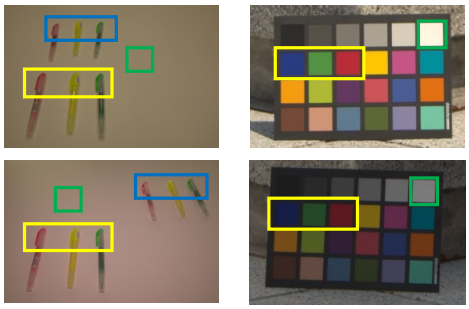
4.1 実験条件

本実験には，Canon EOS 5D Mark IV を用いて撮影した 2 組の RAW 画像"Marker pens"および"Color checker"を使用した．各組は，2 つの異なる照明条件下で同一シーンを撮影した 2 枚の画像からなる．"Marker pens"は，室内照明と赤色カラーフィルタを使ったフラッシュライトの 2 つの照明条件下で撮影した画像であり，"Color checker"は，昼間と夕刻の屋外という 2 つの照明条件下で撮影した画像である．これらの画像をそれぞれ図 3 に示す．ただし，表示のため，図 3 に示す画像は sRGB 色空間へ変換した．これらの RAW 画像に対して提案法を適用し，各組の 2 枚の画像間における特定色 $\boldsymbol{P}''_{\mathrm{XYZ},1}$ および $\boldsymbol{P}''_{\mathrm{XYZ},2}$ の違いを評価した．評価には，2 つの指標

(i) XYZ 色空間における 2 つのベクトルがなす角度

(ii) CIEDE2000 に基づく色相差 ΔH [12], [13]

を利用した．



(a) Marker pens　(b) Color checker

図 3　Input Images. (Yellow rectangle: known target-color region, blue rectangle: unknown target-color region, green rectangle: white point).

表 1　Angle between two XYZ vectors (Marker pens).

Method	White	Known region			Unkown region		
		Pink	Yellow	Green	Pink	Yellow	Green
Input	0.0640	0.0356	0.0218	0.0613	0.0366	0.0223	0.0607
WB (XYZ)	**0.0000**	0.0144	0.0125	0.0387	0.0335	0.0200	0.0344
WB (Bradford)	**0.0000**	0.0093	0.0070	0.0453	0.0262	0.0149	0.0409
Proposed	0.0945	**0.0000**	**0.0000**	**0.0000**	**0.0258**	**0.0068**	**0.0091**

表 2　CIEDE2000 hue difference ΔH (Marker pens).

Method	White	Known region			Unkown region		
		Pink	Yellow	Green	Pink	Yellow	Green
Input	9.0399	3.5961	3.4964	2.9546	1.2543	2.8202	1.3346
WB (XYZ)	**0.0000**	1.4100	0.5362	3.4439	3.1370	0.8612	2.1522
WB (Bradford)	**0.0000**	0.8194	0.2043	4.3069	2.5945	0.4597	2.9643
Proposed	3.8559	**0.0000**	**0.0000**	**0.0000**	**2.2253**	**0.1318**	**0.5731**

比較のため，XYZ 色空間においてホワイトバランス調整をする方法 [9]，および Bradford の錐体応答モデルを利用したホワイトバランス調整法 [9], [11] を，提案法と同様に評価した．ここで，ホワイトバランスに用いる行列 $\mathbf{M}_{\mathrm{WB}}$ の設計に必要とされる白色点 $(X_{\mathrm{S}}, Y_{\mathrm{S}}, Z_{\mathrm{S}})^{\top}$ は，図 3 における緑の線で囲まれた領域の平均値とし，$(X_{\mathrm{D}}, Y_{\mathrm{D}}, Z_{\mathrm{D}})^{\top}$ は CIE 標準光源 D65 とした．また，マルチカラーバランス変換行列設計に用いる特定色は既知特定色領域の平均値とし，目的色は特定色を持つ被写体の実物を観察して決定した値を使用した．

4.2 実験結果

図 4 に，"Marker pens"に色補正を施した画像を示す．ここで，マルチカラーバランス調整法の場合，3 つの特定色は既知特定色領域における 3 つのペンのキャップの色（桃・黄・緑）とした．また，桃・黄・緑に対応する 3 つの目的色は，それぞれ (0.6296, 0.6285, 0.7503)，(0.77000.92780.1385),

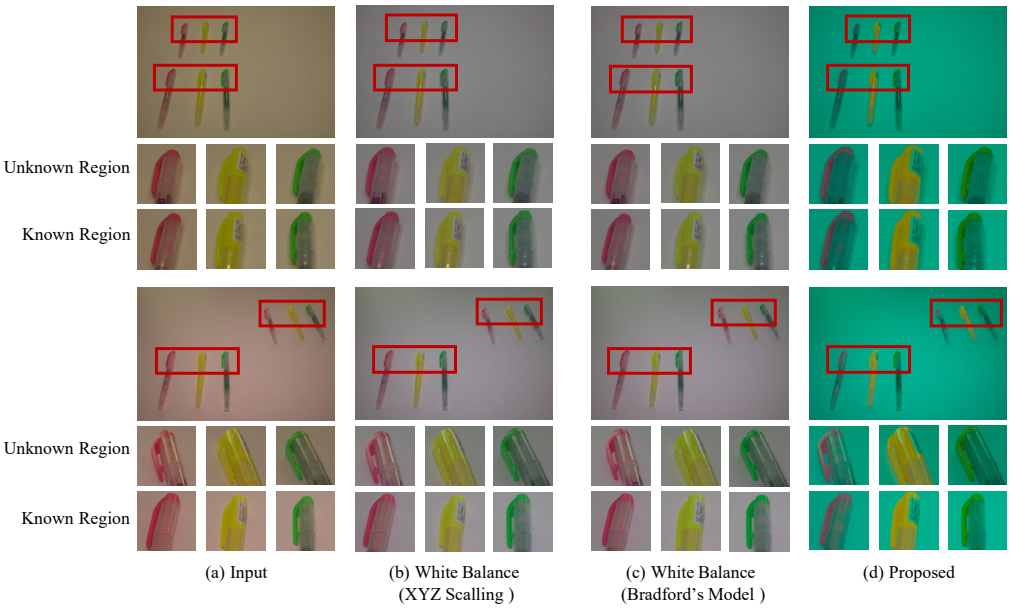


図 4　Experimental results for "Marker pens". Zoom-ins of boxed regions are shown in bottom of each image.

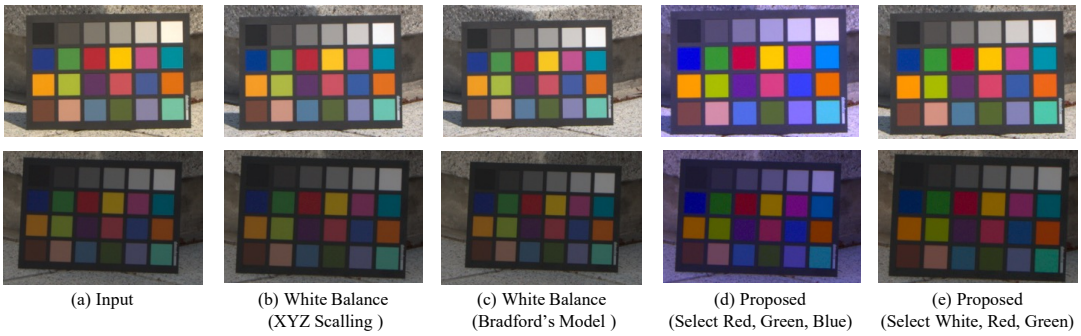


図 5　Experimental results for "Color checker".

表 3　Angle between two XYZ vectors (Color checker).

Method	White	Blue	Green	Red
Input	0.0798	0.0149	0.0917	0.0796
WB (XYZ)	**0.0000**	0.0679	0.0385	0.0497
WB (Bradford)	**0.0000**	0.0503	0.0407	0.0438
Proposed (R, G, B)	0.0481	**0.0000**	**0.0000**	**0.0000**
Proposed (W, R, G)	**0.0000**	0.0270	**0.0000**	**0.0000**

表 4　CIEDE2000 hue difference ΔH (Color checker).

Method	White	Blue	Green	Red
Input	2.7132	0.9592	4.9048	3.2240
WB (XYZ)	**0.0000**	2.9554	1.9783	0.6015
WB (Bradford)	**0.0000**	0.1868	1.4611	0.3659
Proposed (R, G, B)	1.0838	**0.0000**	**0.0000**	**0.0000**
Proposed (W, R, G)	**0.0000**	3.9246	**0.0000**	**0.0000**

$(0.3576, 0.7152, 0.1192)$ とした．

表 1，表 2 に，図 4 に示した画像を 2 つの指標で評価した結果を示す．表 1 より，従来のホワイトバランス調整法は，2 つの白色点のベクトルのなす角を 0 にすることはできるが，それ以外の色については，なす角を 0 にできていないこと分かる．一方，提案法は，既知特定色領域における 3 つの特定色のなす角を，それぞれ 0 にすることができた．さらに，未知特定色領域においても，提案法は，従来法よりなす角を小さくすることができた．表 2 より，CIEDE2000 に基づく色相差 ΔH からも，同様の傾向が見られる．従って，提案法は，既知特定色領域の色を厳密に一致させることができ，未知特定色領域の色についても，照明光の影響による色の変化を軽減することができるといえる．

図 5 に，"Color checker"に色補正を施した画像を示す．"Color checker"を用いた実験では，マルチカラーバランス調整法において，任意の色を特定色として選択できることを確認する．このため，マルチカラーバランス調整法において，3 つの特定色は赤・緑・青色および白・赤・緑色の 2 通りを選択した．また，赤・緑・青に対応する目的色は，それぞれ $(0.3893, 0.1986, 0.1124)$，$(0.3454, 0.6006, 0.1923)$，$(0.1804, 0.0722, 0.9503)$ とし，白色の目的色は，CIE 標準光源 D65 の白色点とした．

表 3，表 4 に，図 5 の画像を 2 つの指標で評価した結果を示す．表 3 より，提案法は，補正したい 3 つの特定色について，

ベクトルのなす角を 0 にできたことが分かる．この結果から，選択した特定色の選び方に関わらず，その特定色のベクトルのなす角を 0 にできたことがいえる．また，特定色のひとつとして白色点を選択した場合，提案法は，従来法と同様に白色点のなす角を 0 にすることができた．また，表 4 より，CIEDE2000 に基づく色相差 ΔH からも，同様の傾向が見られる．

以上の結果から，提案法を異なる照明条件下で撮影された 2 枚の画像に適用した場合，既知特定色領域にある 3 つの特定色について，2 枚の画像間における色の差を 0 にできることが分かった．また，2 枚の画像間における未知特定色領域中の特定色の差も軽減できることが分かった．さらに，"Color checker" を用いた実験より，画像中から特定色として選択する色の組み合わせを変更した場合でも，その選び方に関係なく，選択した特定色は必ず補正できるといえる．

5. おわりに

本稿では，照明光による被写体の色の変化を軽減するため，マルチカラーバランス調整法に基づく特定色補正法を提案した．提案法は，既知特定色領域から 3 つの特定色を選択し，色補正のための変換行列を定める．これより，既知特定色領域における色をそれぞれに対応する目的色へ厳密に一致させることができる上，未知特定色領域の色についても目的色へ近づけることができる．

異なる 2 つの照明条件下で撮影した 2 組の画像を用いた実験の結果から，提案法により，既知特定領域の 3 つの特定色を 2 枚の画像間でそれぞれ厳密に一致させ，未知特定色領域の色も近づけることができると確認できた．したがって，提案法は照明光の影響による特定色の変化を，従来のホワイトバランス調整法より正確に補正したといえる．また，提案法において，画像中に 4 つ以上の特定色がある場合，マルチカラーバランス変換行列の設計に用いる 3 つの特定色の組は，4 つ以上の特定色の中から自由に選択できることが示された．

今後は，非線形な処理の利用等によりさらなる色補正の性能向上を目指すと同時に，物体検出等に用いるデータの前処理への活用を検討する．

文　献

[1] 平井 経太，“画像処理と色空間，” 映像情報メディア学会誌，71 巻，5 号，pp.306-314，2017.

[2] Mahmoud Afifi, Brian Price, Scott Cohen and Michael S. Brown, “When Color Constancy Goes Wrong: Correcting Improperly White-Balanced Images, ” CVPR, pp. 1535-1544, 2019.

[3] Mahmoud Afifi and Michael S. Brown, “Deep White-Balance Editing, ” CVPR, pp. 1397-1406, 2020.

[4] https://jp.mathworks.com/help/images/comparison-of-auto-white-balance-algorithms.html

[5] Ebner and Marc, “White Patch Retinex, Color Constancy, ” John Wiley & Sons, 2007.

[6] Ebner and Marc, “The Gray World Assumption, Color Constancy, ” John Wiley & Sons, 2007.

[7] Cheng, Dongliang, Dilip K. Prasad, and Michael S. Brown, “Illuminant estimation for color constancy: why spatial-domain methods work and the role of the color distribution." JOSA A, vol. 31, no. 5, pp. 1049-1058, 2014.

[8] Van De Weijer, Joost, Theo Gevers, and Arjan Gijsenij, “Edge-based color constancy, ” IEEE Transactions on image processing, vol. 16, no. 9, pp. 2207-2214, 2007.

[9] http://www.brucelindbloom.com

[10] 画像電子学会，カラーマネジメント技術　拡張色空間とカラーアピアランス，東京電機大学出版局，東京，2008.

[11] Bianco, S. and Schettini, R., “Two new von Kries based chromatic adaptation transforms found by numerical optimization, ” Color Research & Application, vol. 35, pp. 184-192, 2010.

[12] ISO/CIE, “ISO/CIE 11664-6:2014 Colorimetry-Part 6: CIEDE2000 Colour-Difference Formula, ” 2014.

[13] G. Sharma, W. Wu, and E.N. Dalal, “The CIEDE2000 Color-Difference Formula: Implementation Notes, Supplementary Test Data, and Mathematical Observations, ” Color Research & Application, vol.30, no.1, pp.21 − 30, Feb. 2005.

[14] CIE, Commission internationale de l’Eclairage proceedings, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1932.

[15] 日置隆一，“表色系，” テレビジョン，23 巻，12 号，pp.975-985，1969.

[16] 谷口慶治，張小忙，デジタル色彩工学，共立出版株式会社，東京，2012.

[17] https://jp.mathworks.com/help/images/ref/chromadapt.html