記憶色に基づく色再現とその高画質化応用

Color Reproduction based on Memory Color and Its Application for Image Quality Improvement

正会員 塚田 正人^{†,††}, 正会員 大田 友一^{††}
Masato Tsukada^{†,††} and Yuichi Ohta^{††}

Abstract This paper describes a color reproduction method to improve the white-balance of a color image when no information is provided on an illuminant color in a scene and the color characteristics of the color imaging device that took the scene. Based on the assumption that human beings use colors of specific objects that we have memory colors as a key to recognize colors in an image, the illuminant color and object colors in a scene are estimated from color information of specific objects in the image. In this study, a human face is used as one of the most important objects for which we have memory colors. Color correction of the image is carried out by transposing the estimated illuminant color to an illuminant color that improves the white-balance. The illuminant color for the white-balance is determined by introducing the concept that incomplete chromatic adaptation in human color vision produces the desired results. Subjective experiments highlight the validity of the proposed method.

キーワード：画質，色再現，記憶色，カラーコンスタンシ，色順応

1. ま え が き

近年、デジタルスチルカメラ、デジタルビデオカメラ、カメラ付き携帯電話などカラー画像機器の普及は目覚しく、静止画および動画を問わず、誰でも容易にカラー画像を入手し、鑑賞することができる。カラー画像機器の普及に伴い、雑誌やインターネット等においてこれらカラー画像機器の画質性能に関する掲載記事が増えていることから、カラー画像機器の画質に対する関心の高さが伺われる。また、現在のカラー画像機器の画質に必ずしも満足しているわけではなく、さらなる高画質化に対する根強い要求があることも推察される。

デジタルカラー画像機器にとって重要なファクタである画質をさらに高めていくために、イメージセンサの多画素化やS/Nの改善、モニタの色域の拡大といったハードウェアの性能向上はもとより、カラー画像処理による高画質化手法も一層重要となっている。

本研究では、カラー画像の画質に大きな影響を与える色

再現に着目し、カラー画像処理によって色再現性を向上させることによって高画質化を実現することを目的とする。カラー画像の色再現は、画像撮影時における照明環境などの撮影条件や、カラー画像機器自身のハードウェア性能に大きく影響を受ける。そのため、色再現性向上による高画質化への一つのアプローチとして、色再現に影響を及ぼす要因を把握し、これを利用する手法が考えられる。例えば、画像の撮像時における撮影環境や撮像系の分光感度特性が利用できる場合には、情景中の光源の色や物体の色を推定し、色補正を施すことによって高画質化を実現する手法が提案されている^{1)~3)}。文献1)の方法では、デジタルカメラの分光感度特性が既知で、かつ、分光分布特性が既知である光源を補助光源として用いることを前提とした場合、補助光源なし、補助光源あり、の2種類の照明条件で撮影された2枚の画像から、撮影時の光源の色と被写体の表面反射率を推定する手法が提案されている。被写体の表面反射率が推定できれば、任意の光源下におけるカラー画像が再現できるようになり、所望の色再現が実現できる。

一方、撮影機器の色特性や撮影条件といった、画質に影響を与える情報が特定できない画像を取り扱わなければならないケースがある。この場合には、与えられた画像のみを手がかりとするような手法を用いる必要がある。画質に影響を与える情報に関する事前の知識なしに、入力画像の画質に応じて適応的に画質改善を図る手法として、画像のヒストグラム解析をベースとした高画質化手法が提案されている^{4)~7)}。ヒストグラム解析型の高画質化手法では、カ

2005年7月29日受付、2005年11月18日最終受付、2005年12月7日採録

[†] 日本電気株式会社 メディア情報研究所

(〒211-8666 川崎市中原区下沼部1753, TEL 044-431-7715)

^{††} 筑波大学大学院 システム情報工学研究科

(〒305-8573 つくば市天王台1-1-1, TEL 029-853-5515)

[†] Media and Information Research Laboratories, NEC Corporation

(1753, Shimonumabe, Nakahara-Ku, Kawasaki, Kanagawa 211-8666, Japan)

^{††} Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba

(1-1-1 Tennoudai, Tsukuba, Ibaraki 305-8573, Japan)

ラー画像が与えられると、予め設定されている評価領域に対して、輝度、彩度、色相といった色情報に関するヒストグラムを生成し、そのヒストグラムに応じてホワイトバランス、彩度、露光などの画質補正のためのパラメータが決定される。このヒストグラム解析型の高画質化手法は、カメラモジュールや画像処理ソフト等多くの場面で使用されている。

しかし、ヒストグラム解析型の高画質化手法においても課題が残されている。例えば、ヒストグラム解析型のホワイトバランスでは、情景全体の色の平均はグレイであるというグレイワールド仮説や、ハイライト領域におけるカラーシフトは光源色によるものであるとの仮定に基づいて、カラーチャネルの比率を調整することによって、ホワイトバランスを実現する。しかし、前者の場合、情景中の色に偏りがある場合には、正しいホワイトバランスが実現できない。また、後者の場合についても、一般のイメージセンサのダイナミックレンジは、実シーンにおける絶対輝度レンジよりも狭く、光源色を推定するために必要となるハイライト領域の画素値が飽和して適切なホワイトバランスが実現できないといった問題が頻繁に発生する。

本研究では、撮影条件やカラー画像機器に関する情報が少ない条件下、画像認識技術、カラーコンスタンシ理論、そして、不完全色順応の考え方を導入することで、カラー画像の安定したホワイトバランスを実現する色再現アルゴリズムを提案するとともに、カラー画像の高画質化への応用を検討する。我々は、まず、人間はカラー画像の色知覚において、人間にとって重要な意味を持ち、かつ、安定な記憶色を有する特定の対象物の色情報を手がかりに、画像全体の色を知覚するという仮説を立てる。本研究では、この仮説に基づき、人間にとって重要な意味を持ち、かつ、安定な記憶色を有する特定の対象物として顔に着目し、画像中の顔領域における色情報から、情景中の光源色と物体固有の色を分光特性の形式で推定する。そして、推定された情景中の光源の分光分布を、参照光源の分光分布へ置き換えて、再現色を再計算することによって色補正を行う。また、人間の色知覚における不完全色順応の考えを取り入れて生成した参照光源の分光分布を用いることによって、良好なホワイトバランスの取れた色再現を実現する。

本色再現アルゴリズムによるホワイトバランス補正は、画像情景中の色情報を分光特性として扱うが、この補正処理は 3×4 行列による線形変換として表わすことができるため、比較的計算コストの低いアルゴリズムと言える。また、カラー画像機器の色特性や撮影条件などの詳細な情報を必要としないため、大量でかつ、さまざまな画像データを取り扱うサーバ型の画像システムや、カメラモジュールへの組み込みなど、幅広い場面に応用できる利点がある。

2. 記憶色領域からの光源色と物体色の推定

人間の視覚機能の一つであるカラーコンスタンシ（色恒

図1 光のパスと人間のカラーコンスタンシ
Path of light and color constancy.

常性) について説明する。一般に人間は、約400nm～700nmの光を知覚することができる。この可視光領域における光の分光組成の違いによって、異なる知覚色が生み出される。人間の目への入射光の分光分布 $E(\lambda)$ は、図1のように、光源の分光分布 $I(\lambda)$ と、物体の表面反射率 $O(\lambda)$ の積で表される。したがって、同じ物体であっても光源が異なれば $E(\lambda)$ が変化し、知覚色も変化するはずであるが、我々は、同じ物体であれば異なる照明下でもほぼ同じ色として知覚することができる。このように、異なる光源下でも物体の色を安定に知覚できる人間の視覚機能は、カラーコンスタンシ（色恒常性）と呼ばれている。Kurikiらの実験において、3,400K、6,000Kの太陽光源の下で、完全なカラーコンスタンシが確認されている⁸⁾。このカラーコンスタンシ機能を、コンピュータ上で実現するための計算理論が数多く提案されている^{1) 2) 9) ~11)}。

従来のカラーコンスタンシ理論では、カラーセンサの分光感度特性を既知とし、さらに、同一情景を異なる光源色で撮影した複数枚のカラー画像を用いることによって、画像から得られる色情報のみから情景中の未知の特性である $I(\lambda)$ および $O(\lambda)$ を復元する。一方、本研究における問題設定は、カラー画像を撮影したカラーセンサの分光感度特性は未知であり、かつ、1枚のカラー画像しか利用できない場合にも対応しなければならないため、従来のカラーコンスタンシ理論をそのまま適用することはできない。

本研究では、カラーコンスタンシ理論をカラー画像の色再現問題に応用することを考える。今、CRTディスプレイ、液晶ディスプレイなどのカラー画像表示機器で画像の色を提示する場合、カラー画像表示機器のRGB蛍光体および白色の色度、ガンマに関する色特性を既知とすることができる。色特性が既知であるカラー画像表示機器で再現されたカラー画像のRGBと、それを見て人間が知覚する三刺激値XYZとの関係は次のように表わされる。

$$R' = f(R, \gamma) \quad (G, B \text{ も同様}) \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = M_{RX} \begin{pmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{pmatrix} \quad (2)$$

ここで、関数 $f(X, \gamma)$ は、 γ 補正が施されている画像データ X をリニアな信号に変換する関数を表わす。 M_{RX} は 3×3 変換行列で既知である。以上により、カラー画像の各画素について脳が知覚する三刺激値XYZが特定される。

今、カラー画像中の画素における三刺激値XYZは、図1に示された光のパスにしたがって、情景中の光源の分光分布 $I(\lambda)$ と物体の表面反射率 $O(\lambda)$ の積で表わされているとすると、三刺激値XYZと分光特性との関係は、

$$\begin{aligned} X &= \int I(\lambda)O(\lambda)x(\lambda)d\lambda \\ Y &= \int I(\lambda)O(\lambda)y(\lambda)d\lambda \\ Z &= \int I(\lambda)O(\lambda)z(\lambda)d\lambda \end{aligned} \quad (3)$$

と表わせる。積分は可視光の波長領域(400nm~700nm)で行われる。ここで、 λ は波長、 $x(\lambda)$ 、 $y(\lambda)$ 、 $z(\lambda)$ は等色関数で既知である。分光分布 $I(\lambda)$ 、表面反射率 $O(\lambda)$ は、画像から直接知ることができず、いずれも未知の関数である。

式(1)および式(2)にしたがって入力画像中の任意の色の三刺激値XYZを計算し、式(3)の左辺に代入することにより、式(3)は情景中の光源の分光分布 $I(\lambda)$ 、物体の表面反射率 $O(\lambda)$ についての観測方程式となり、カラーコンスタンシ理論で扱うのと同じ枠組みに帰着する。

分光分布 $I(\lambda)$ と表面反射率 $O(\lambda)$ は、可視光領域において無限次元のベクトルで表されるため、式(3)を数学的に解くことはできない。この問題を解決するために、カラーコンスタンシ理論では、光源の分光分布や、物体の表面反射率は基底関数の線形和で表わされると仮定し、これらの分光特性の表現に対して、有限次元線形モデルを導入する^{12) 13)}。

本研究においても、光源の分光分布については、昼光の基底ベクトルの線形和で表現し、物体の表面反射率についても、多くの異なる表面反射率を集めて得られた平均ベクトルと、その主成分分析で得られた第1主成分ベクトル~第3主成分ベクトルの線形和で表現するものとする。なお、光源の有限次元線形モデルにおいて、昼光の分光分布の基底ベクトルを使用することに関して、カラー画像表示機器に表示された情景中の色を認識する際、人間は情景中の光源の色をそれに最も近い昼光の色と見做していることに相当する。以上により、光源の分光分布および物体の表面反射率は、

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) + a_1 I_1(\lambda) + a_2 I_2(\lambda) \quad (4)$$

$$O(\lambda) = O_0(\lambda) + b_1 O_1(\lambda) + b_2 O_2(\lambda) + b_3 O_3(\lambda) \quad (5)$$

と表現される。ここで、 $I_0(\lambda)$ は、昼光の平均ベクトル、 $I_i(\lambda)$ ($i=1,2$)は昼光の基底ベクトルでいずれも既知である。 a_i ($i=1 \sim 2$)は、昼光の各基底ベクトルの重み係数で、光源の色を表現する特性パラメータとなる。 $O_0(\lambda)$ は、表面反射率の平均ベクトル、 $O_i(\lambda)$ ($i=1 \sim 3$)は、表面反射率の第1主成分ベクトル~第3主成分ベクトルを表しており、すべて既知である。 b_i ($i=1 \sim 3$)は、物体の表面反射率の各基底ベクトルの重み係数で、物体の色を表現する特性パラメー

タとなる。

式(4)、式(5)を、式(3)に代入することで、光源の色を表わす未知特性パラメータ a_i ($i=1 \sim 2$)と、物体の色を表わす未知特性パラメータ b_i ($i=1 \sim 3$)に関する観測方程式を得る。しかし、ここでは、従来のカラーコンスタンシ理論のように、同一シーンを異なる光源色で撮影された複数の画像を用いることはできず、未知パラメータ5個に対して3個の方程式が得られるのみであり、 a_i 、 b_i を一意に解くことはできない。

一般に、我々人間は、自然物を被写体としたカラー画像を提示された際、情景中の光源色などの撮影条件やカラー画像機器の色特性に関する情報が与えられなくとも、カラー画像全体のカラーバランスや色再現の良し悪しを的確に判定できる色知覚能力を有している。人間の色知覚に関して、カラーアピランスモデル(例えば、CIECAM02など)が提案されている¹⁴⁾。カラーアピランスモデルでは、提示された刺激(カラー画像など)の色の見え(Color Appearance)を、その観察条件における人間の色順応状態を考慮しながら、人間が感じるであろう色(知覚色)として算出する。しかし、現在提案されているカラーアピランスモデルは、カラー画像のコンテンツが人間の色知覚に与える影響についてまでは考慮されていないため、本論文で述べるカラー画像の色補正を実現する上で必要となる、カラー画像のカラーバランスや色再現の良し悪しを判定する際の有力な手がかりを提供するまでには至っていない。

本研究では、人間がカラー画像の色再現性に関する画質の優劣をできるのは、図2に示したように、人間にとって重要な意味を持ち、かつ、記憶色を有する特定の対象物を画像中から探し出し、その対象物の色情報を手がかりにして、情景中の光源色を推定しながら情景中の物体色を認識し、カラー画像の色再現性について判断しているからであるという、人間の色知覚メカニズムに関する一つの仮説を立てる。この人間の色知覚のメカニズムについては、残念ながら生理学的に解明されていないが、人の脳が長い年月を掛けて、さまざまな光源色の下で重要である対象物の色の見えの変化について学習し、蓄積されてきた知識を最大限に用いているとすれば、不自然な仮説ではないであろう。

図2 人間の色知覚メカニズムに関する仮説
Hypothesis on a mechanism of human color recognition.

図3 肌色（記憶色）領域を手がかりとした光源および物体の分光特性の推定
Estimation of spectral properties for illumination and objects based on a skin color region.

そこで本研究では、この仮説に基づき、人間にとって重要で、かつ、記憶色を有する特定の対象物のカラー画像における色情報を手がかりとし、情景中の光源色と物体色を推定する。ここで、記憶色を有する特定の対象物としては、画像からの自動検出に適した形状やパターンなどの特徴を有し、安定な光源色推定を実現するために色の変動が比較的小さく、人間の可視光領域（波長400nm～700nm）において分光特性を安定に有するものが望ましい。このような特徴を有する対象物として、本研究では、人間の顔を採用する。

近年、バイオメトリックス認証や映像監視において顔認識技術への期待が高まっており、研究が盛んに行われている。本研究は、色再現アルゴリズムを主眼とするものであるため、入力画像からの顔領域の自動検出については、細井らの提案手法である一般化学習ベクトル量子化を用いたImage-based型と、目検出を行うFeature-based型を組合せた顔検出法を利用する¹⁵⁾。

図3は、人間の色知覚メカニズムに関する上記仮説に基づき、情景中の顔領域を検出し、その色情報を基に光源および物体の分光特性を推定するまでの処理過程を示したものである。まず、入力画像から顔領域を検出し、その領域における三刺激値XYZを算出する。代表的な肌の表面反射率 $O_{skin}(\lambda)$ をあらかじめ求めておく。入力画像中の顔領域から得られた三刺激値XYZおよび肌の表面反射率 $O_{skin}(\lambda)$ を式(3)に代入することにより、観測方程式(3)は光源の未知の特性パラメータ a_1, a_2 に関する2元1次連立方程式となり、解くことができる。この特性パラメータ a_1, a_2 を式(4)に代入することによって、情景中の光源の分光分布 $I_{org}(\lambda)$ が得られる。

次に、画像の各画素における物体の表面反射率を求める。光源は情景中で均一であるとし、画像の各画素における三刺激値XYZおよび情景中の光源の分光分布 $I_{org}(\lambda)$ を式(3)に代入すると、式(3)は表面反射率 $O(\lambda)$ に関する観測方程式となる。観測方程式(3)に、物体の表面反射率を表わす式(5)を代入すると、未知の特性パラメータ $b_1 \sim b_3$ に関する3元1次連立方程式となり、解くことができる。

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M(x, o_1) & M(x, o_2) & M(x, o_3) \\ M(y, o_1) & M(y, o_2) & M(y, o_3) \\ M(z, o_1) & M(z, o_2) & M(z, o_3) \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$= \begin{pmatrix} M(x, o_1) & M(x, o_2) & M(x, o_3) \\ M(y, o_1) & M(y, o_2) & M(y, o_3) \\ M(z, o_1) & M(z, o_2) & M(z, o_3) \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} M(x, o_0) \\ M(y, o_0) \\ M(z, o_0) \end{pmatrix}$$

ここで、 $M(x, o_i)$ ($i=0 \sim 3$) は、 $\int I_{org}(\lambda) O_i(\lambda) x(\lambda) d\lambda$ の積分項を表わす。 $M(y, o_i)$ 、 $M(z, o_i)$ についても同様である。画像中のすべての画素に対して、上記処理を実施する。

3. 不完全色順応を考慮した色再現

画像中の肌色（記憶色）領域より、情景中の光源の分光分布 $I_{org}(\lambda)$ および物体の表面反射率 $O(\lambda)$ が一旦得られれば、推定された $I_{org}(\lambda)$ を、分光組成の異なる光源の分光分布 $I_{target}(\lambda)$ に置き換えて、カラー画像の各画素の色を再構成することによって、所望の色再現を実現することができる。

$$\begin{aligned} X' &= \int I_{target}(\lambda) O(\lambda) x(\lambda) d\lambda \\ Y' &= \int I_{target}(\lambda) O(\lambda) y(\lambda) d\lambda \\ Z' &= \int I_{target}(\lambda) O(\lambda) z(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (7)$$

今、入力画像のカラーバランスに関する色補正を実施する場合、式(7)における光源の分光分布 $I_{target}(\lambda)$ に、コンピュータモニタにおける標準色空間sRGB¹⁶⁾の基準白色である標準光源D65や、印刷物の観察照明である標準光源D50などの分光分布を設定すれば、自然なホワイトバランスが取れた色再現を得ることが予想される。しかし、カラー画像より推定された情景の光源の分光分布を、標準光源の分光分布に単純に置き換え色補正を行うことに関して、色再現の観点から以下のように検討の余地がある。

ある光源Aの下での色の見えを、色の異なる光源Bの下で同じ色の見えを実現するカラーマッチング問題において、人間の色知覚はそれぞれの光源の色には完全に色順応せず、不完全な色順応の状態では色を知覚することが報告されている^{17) 18)}。そのため、標準光源D50下で観察した印刷

物の色を、基準白色D65や相関色温度9,000Kに設定されたカラーモニタ上で色の見えを保って再現する場合には、人間の色知覚における不完全色順応を考慮した、色順応モデルやカラーアピランスモデルによって予測した対応色に補正しないと満足な結果が得られない。

カラー画像から推定された情景中の光源下の色を、適正なホワイトバランスを実現できるであろう光源下の色に補正する問題は、2種類の光源の下での色再現を扱う点で、上記カラーマッチング問題と共通する。本研究では、人間の色知覚における不完全色順応を考慮することで、カラー画像のホワイトバランスに関する色補正効果を高められると考える。

情景中の光源として推定された分光分布 $I_{org}(\lambda)$ から、実際に画像の色を補正する際に用いる光源の分光分布 $I_{target}(\lambda)$ を算出する方法について説明する。まず、補正の目標となる参照光源の分光分布 $I_{ref}(\lambda)$ を定義する。この参照光源の分光分布 $I_{ref}(\lambda)$ として、カラー画像表示機器の基準白色に設定される相関色温度に一致する分光分布を設定する¹⁹⁾。そして、人間の色知覚における不完全色順応の考えを取り入れ、参照光源の分光分布 $I_{ref}(\lambda)$ までは色順応は進まずに、 $I_{org}(\lambda)$ と $I_{ref}(\lambda)$ の中間的な分光分布を有する光源に順応するとして、色補正に用いる光源の分光分布 $I_{target}(\lambda)$ を、以下の式で定義する。

$$I_{target}(\lambda) = (1-adj) \times I_{org}(\lambda) + adj \times I_{ref}(\lambda) \quad (8)$$

ここで、 adj は、色順応度を表わす色順応係数であり、 $adj=1.0$ のときは、 $I_{ref}(\lambda)$ に、 $adj=0.0$ は $I_{org}(\lambda)$ にそれぞれ完全に色順応した状態となり、 $0 < adj < 1.0$ のときは不完全色順応状態を表わす。

図4は、本提案手法による色再現の処理過程をまとめたものである。入力画像の顔領域から情景中の光源の分光分布 $I_{org}(\lambda)$ を復元し、情景中の物体の表面反射率を算出する。次に、情景中の光源の分光分布 $I_{org}(\lambda)$ とあらかじめ設定されている参照光源の分光分布 $I_{ref}(\lambda)$ とから、色補正に使用する光源の分光分布 $I_{target}(\lambda)$ を算出する。そして、入力画像の全画素について、 $I_{target}(\lambda)$ および各画素における表面反射率 $O(\lambda)$ を、式(7)に代入することにより、色補正後の三刺激値 $X' Y' Z'$ を得る。

4. 実験

4.1 色順応係数とホワイトバランス補正の効果に関する評価実験

3章において、不完全色順応を考慮した色再現アルゴリズムについて説明した。本色再現アルゴリズムにおいて、色補正に用いる光源の分光分布 $I_{target}(\lambda)$ を算出する際、色順応の度合いを表す色順応係数 adj を導入している。色順応係数 adj は、ユーザが補正結果を見ながら自由に設定できるようにしてもよいが、色補正処理の自動化を実現する場合には、色順応係数をあらかじめ設定する必要がある。そこで、本手法における色順応係数と、カラー画像のホワ

イトバランス補正の効果との関係を把握するために主観評価実験を実施した。

この実験では、ホワイトバランスの崩れたカラー画像に対して、色順応係数を変化させながら本手法による色補正を施した画像を主観評価することにより、色順応係数と色補正の効果の関係を得る。実験は、正常色覚の20名の被験者に対して実施した。評価画像は、インターネットから取得したり、デジタルカメラで撮影した画像など、我々がごく一般的に接する人物画像を対象とし、ホワイトバランスが崩れている10種類の画像を素材として利用した。図5は、実験に使用した画像の一部であり、図5(a)は青被り、図5(b)は赤被り、図5(c)は黄被りとなっている画像(色補正前)である。評価画像の周辺は20%グレイを背景として提示した。

図4の処理過程にしたがって、10種類の画像に対して、色順応係数を0.5から0.9まで0.1刻みで変化させて色補正を適用し、色補正の程度が異なる5枚の評価画像を作成した。顔検出には文献15)の技術を利用し、10種類の素材画像すべてについて顔領域が正しく検出されていることを確認した。

図6は、顔検出結果(左図)と顔領域からの肌色抽出結果(右図)の例を表したものである。顔検出では、画像中の右目および左目の位置座標が得られる。検出された両目の座標を結んだ線分の長さを1としたとき、この線分より上位(頭部方向)が0.4、下位(顎報告)が0.8の距離となる長方形の領域を、肌色を抽出するための顔領域とした。なお、この顔領域には、瞳、眉毛、影など肌色でない色が含まれる。肌色でない色を排除するために、顔領域内の色の色相(H)、彩度(S)、明度(V)のそれぞれの成分について、さまざまな照明環境で撮影された多くの人物画像(日本人)から得られた肌色分布を考慮して設定された閾値による肌色の選択処理を施した。図6の右図は、顔領域における肌色の抽出結果を表したものである。ここで、肌色と判断された色は赤、肌色ではないと判断された色は青で示されている。顔領域の三刺激値XYZは、肌色と判断された色のみを用いて計算した。

観察環境は、典型的なオフィス環境を想定し、蛍光灯(NEC 3波長昼白色FLR40SEX 色温度5,000K)点灯下で、外光の影響を受けない環境とした。カラーモニタには、ナノ製液晶モニタCG21を使用し、白色をD65の色度、ガンマ特性を2.2に設定した。

本提案手法にて必要となる光源の分光分布を表現する基底ベクトルには、CIE昼光の基底ベクトル¹⁹⁾を使用し、物体の表面反射率のための基底ベクトルには、昇華型プリンタ(NEC PC-PR810)で出力された2,763色のカラーパッチの表面反射率を主成分分析して得た基底ベクトルを使用した。肌色の代表的な表面反射率は、色再現評価用標準物体色分光データベース(SOCS)を利用し、日本人男女の顔(素肌)4,407個の表面反射率から計算した平均表面反射率を利用した²⁰⁾。図7～図9に、CIE昼光の基底ベクトル、物体の表面反射率の基底ベクトル、肌色の平均表面反射率をそ

図4 提案手法による色再現処理過程
Process of color reproduction by the proposed method.

(a) 青被り画像

(b) 赤被り画像

(c) 黄被り画像

図5 評価実験に使用した画像の例
Samples of images used in the subjective experiments.

図6 顔検出結果と顔領域からの肌色抽出
Results of face detection and skin color extraction from the face area.

原画像

従来法

提案手法

図11 ホワイトバランス補正の比較
Comparison of white-balance correction.

図7 CIE昼光の基底ベクトル
Basis vectors for CIE daylight illumination.

図8 物体の表面反射率の基底ベクトル
Basis vectors for surface reflectance of objects.

図9 日本人の顔領域(素肌)の平均的な表面反射率(SOCSから算出)
Average of surface reflectances of Japanese face skin regions (from SOCS).

れぞれ示した。また、参照光源の分光分布 $I_{ref}(\lambda)$ には、使用したモニタの白色の相関色温度6,500Kの分光分布に設定した。

評価方法は一対比較法を採用した。具体的には、色順応係数を変化させて作成した5枚の評価画像から2枚を選択し、その2枚をモニタ上に表示する。このとき、2枚同時に表示するのではなく、被験者は、マウスのクリック操作によって、2枚の画像を交互に1枚ずつ表示するようにした。そして、この2枚の画像のうち、自然なホワイトバランスが取れていると判断された画像を選択する。以上の操作を5枚の評価画像から2枚を選択するすべての組合せ(10通り)

について行わせた。1名の被験者について、10種類の素材画像に対して、各3回の実験を行わせた。

被験者には、カラー画像が撮影された実際の情景における光源の色、撮影機材に関する情報、色補正前のカラー画像のホワイトバランスが、どのように崩れていたのかといった評価画像の色に関する情報は一切与えないこととした。したがって被験者は、提示された画像の色情報のみを見て、カラー画像のホワイトバランスを判断した。

評価結果について分散分析を行った結果、色順応係数がホワイトバランス補正に与える主効果が、有意水準1%で有意であることが確認された($F(4,294) : 5.79, P < 0.01$)。被験者20名による一対比較法で得られた比較評価の結果を、Thurstoneの比較判断の法則を用いて、間隔尺度に変換した²¹⁾。確率では、各モデルの性能の順序(大小)関係が定義されるだけであるのに対し、間隔尺度は尺度値の差が知覚の差に対応している。つまり、色順応係数に対するホワイトバランス補正の効果について、順序を表わすだけでなく、その効果の差まで表現できる尺度である。

図10は、図5に示した3種類の画像および評価に用いた10種類の画像全体に対する色順応係数と、ホワイトバランス補正の効果に関する間隔尺度を表したものである。本実験の結果から、色順応係数とホワイトバランス補正の効果の関係は、入力画像のホワイトバランスが崩れる方向によって若干の偏りが見られるものの、補正効果が安定して良好となる色順応係数は0.7であることが確認できる。

入力画像のホワイトバランスを補正する際、本手法では、入力画像中の肌色領域から推定された光源の分光分布 $I_{org}(\lambda)$ を、あらかじめ設定された参照光源の分光分布 $I_{ref}(\lambda)$ に単純に置き換えるのではなく、人間の色知覚における不完全色順応を考慮して、 $I_{org}(\lambda)$ と $I_{ref}(\lambda)$ の中間的な分光分布を有する光源を用いて色補正することにより、ホワイトバランス補正の効果を高められると予想した。本実験により、この予想どおり、 $I_{org}(\lambda)$ と $I_{ref}(\lambda)$ の中間的な分光分布(色順応係数 $adj=0.7$)を有する光源を使用することによって、ホワイトバランス補正の効果を高められることが確認された。

4.2 従来法との比較実験

本色再現アルゴリズムの有効性を示すために、従来のホワイトバランス補正法との比較評価実験を実施した。

評価対象とする従来のホワイトバランス補正には、文献4)で紹介されているヒストグラム解析型の基本的なアルゴリズムを採用した。この従来法は、画像処理応用において広く一般的に使われている手法である。本実験では、評価画像に対する効果的な結果が得られるように、従来法における補正パラメータの調整を実施した。

提案手法である色再現アルゴリズムにおける色順応係数は、前節の色順応係数とホワイトバランス補正の効果を把握する主観評価実験にて得られた色順応係数の最適値0.7を使用した。

実験に使用したモニタおよび観察環境は前節の評価実験

図10 色順応係数とホワイトバランス補正の効果の関係
Average of surface reflectances of Japanese face skin regions (from SOCS) .

図12 ホワイトバランスに関する主観評価実験の結果 (間隔尺度による性能比較)
Results for subjective experiments on white-balance of images (Comparison of performance by interval scales) .

と同じである。素材画像は、ホワイトバランスの崩れた30種類の人物画像を用意し、各画像について、原画像(色補正なし)、従来法による補正画像、本手法による補正画像の三つの評価画像に対して、ホワイトバランスに関する評価を一对比較法にて行った。正常色覚の被験者20名に対して、前節の実験と同じ評価方法にしたがって、30種類の素材画像に対するホワイトバランス補正の効果について評価した。図11は、実験に使用した素材画像に対するホワイト

バランス補正の効果を示した例である。これは、蛍光灯下の室内で撮影された画像であり、原画像は蛍光灯の影響により若干の緑かぶりが確認される。

評価結果について分散分析を行った結果、「原画像」、「従来法」、「提案手法」による三つの刺激の差、すなわちホワイトバランス補正の効果の差が、有意水準1%で有意であることが確認された ($F(2,59) : 10.07, P < 0.01$)。図12は、図11を含めた30種類のすべての画像に対するホワイトバ

図13 提案手法と従来法を併用した色補正処理

Color correction combined the proposed method with an existing method.

ンス補正の効果の評価結果を間隔尺度で表し、従来法および本提案手法におけるホワイトバランス補正の効果を比較したものである。ホワイトバランスの崩れた人物画像に対して、従来法および本手法を適用することにより、いずれもホワイトバランスが改善されている結果となっている。さらに、本提案手法は、従来法と比べて効果的なホワイトバランス補正が得られることが確認された。

5. 考察およびむすび

本論文で提案した色再現アルゴリズムでは、画像中で人間が記憶色を有する顔領域の肌色情報を手がかりとして、情景の光源色および物体色を推定し、推定された光源色を別の光源色に置き換えることによって、入力画像のホワイトバランス補正を実現する。ここで、入力画像中の肌色領域から推定された光源の分光分布 $I_{org}(\lambda)$ を、あらかじめ設定された参照光源の分光分布 $I_{ref}(\lambda)$ に単純に置き換えるのではなく、人間の色知覚における不完全色順応を考慮して、 $I_{org}(\lambda)$ と $I_{ref}(\lambda)$ の中間的な分光分布を有する光源を用いて色補正することにより、ホワイトバランス補正の効果を高められると考えた。4.1節の色順応度とホワイトバランス補正の効果の関係を把握する主観評価実験では、 $I_{org}(\lambda)$ と $I_{ref}(\lambda)$ の中間的な分光分布(色順応係数 $adj=0.7$)を有する光源を使用することによって、ホワイトバランス補正の効果を高められることが確認された。

ホワイトバランスの崩れた実際の人物画像に対する従来法、および本提案手法によるホワイトバランス補正の効果を確認する評価実験では、従来手法および本提案手法ともにホワイトバランス補正の効果が確認され、特に、本提案手法のホワイトバランスの補正効果は、従来法を大きく上回る結果となった。

提案手法は、画像中の顔領域の肌色情報に基づいているため、顔検出技術を用いて検出される顔領域が入力画像に含まれる場合に効果がある。したがって、さまざまな入力画像を扱う場合には、従来のヒストグラム解析型の従来手法との併用が必要になる。ここで、提案手法による色再現アルゴリズムについて再考する。本色再現アルゴリズムは、入力画像の顔領域における色情報から推定される情景中の光源の仮想分光分布 $I_{org}(\lambda)$ と、色補正する際に用いる光源の分光分布 $I_{target}(\lambda)$ が決まれば、入力画像の全画素に対する色補正は、式(6)および式(7)を統合して得られる 3×4 行列による線形変換で表わすことができる。すなわち、ヒ

ストグラム解析型の従来法と提案手法を併用する際、色補正処理を共有させることが可能になる。

図13は、提案手法と従来法を併用する場合の処理フローを示したものである。入力画像に対して顔検出を実施し、顔が検出された場合には提案手法によるパラメータ解析を実施する。ここでパラメータとは、色補正処理で使用する行列である。そして、色補正処理において、提案手法あるいは従来手法によるパラメータ解析によって得られた行列を使用して、入力画像の全画素に対する色補正を実施する。このように、一つのシステムに提案手法と従来法を効率よく併用することが可能である。

以上により、提案手法は人物画像に対するホワイトバランス補正の効果が従来法に比べて大きく上回るとともに、従来法と本提案手法の色補正処理を共有でき、両者の併載が容易に実現できることから、提案手法は、大量でかつ、さまざまな画像データを取り扱うサーバ型の画像システムや、カメラモジュールへの組み込みなど、幅広い場面に応用できると考える。

最後に、本研究において、主観評価実験にご協力頂いた筑波大学画像情報研究室、NECメディア情報研究所およびR&Dサポートセンタの皆様には感謝いたします。

〔文 献〕

- 1) 竹部, 伊藤, 中内, 臼井: “色恒常性を有するデジタルカラーイメージング”, 信学論, J83-D-II, 8, pp.1753-1762 (2000)
- 2) 富永, 石田, B.A.Wandell: “センサ相関法によるシーン照明の色温度推定”, 信学論, J85-D-II, 5, pp.886-897 (2002)
- 3) Y.Tsin, R.T. Collins and T. Kanade: "Bayesian Color Constancy for Outdoor Object Recognition", IEEE Conf. On Comput. Vision & Pattern Recognition (CVPR2001), pp.L1132-L1139 (2001)
- 4) 塚田, 鈴木, 井上: “デジタル画像処理技術による自動高画質化処理”, 日本画像学会誌, 43, 2, pp.90-97 (2004)
- 5) Y. Cheng, W. Chan and Y. Chen: "Automatic White Balance for Digital Still Camera", IEEE Trans Consumer Electronics, 41, 3, (1995)
- 6) S.N. Yendrikhovskij, F.J.J. Blommaert and H.de Ridder: "Optimizing Color Reproduction of Natural Images", 6th Color Imaging Conference, pp.140-145 (1998)
- 7) M.Tsukada, C. Funayama and J. Tajima: "Automatic Color Preference Correction for Color Reproduction", Proc.SPIE, 4300, pp.216-223 (2001)
- 8) I. Kuriki and K. Uchikawa: "Limitations of Surface-color and Apparent-color Constancy", J. Opt. Soc. Am. A, 13, 8, pp.1622-1636 (1996)
- 9) L.T. Maloney and B.A. Wandell: "Color Constancy: A Method for Recovering Surface Spectral Reflectance", J. Opt. Soc. Am. A, 3,

- pp.29-33 (1986)
- 10) R. Gershon, A. D. Jepson and J.K. Tsotsos: "From R, G, B to Surface Reflectance: Computing Color Constancy Descriptors in Images", Proc. 10th Int. Joint Conf. On Artificial Intelligence, pp.755-758 (1987)
- 11) M. Tsukada and Y. Ohta: "An Approach to Color Constancy Using Multiple Images", Proc. IEEE 3rd Int. Conf. On Computer Vision, pp.385-389 (1990)
- 12) D.B. Judd, D.L. MacAdam, G. Wyszecki: "Spectral Distribution of Typical Daylight as a Function of Correlated Color Temperature", J. Opt. Soc. Am. 54, pp. 1031-1040 (1964)
- 13) J.P.S. Parkkainen, J. Hallikainen and T. Jaaslainen: "Characteristic Spectra of Munsell Color Chips", J. Opt. Soc. Am. A, 6, 2, pp.318-322 (1989)
- 14) CIE: "A Colour Appearance Model for Colour Management Systems: CIECAM02", 159 (2004)
- 15) 細井, 佐藤: "一般化学習ベクトル量子化による顔検出", 信学技法, 102, 651, pp.47-52 (2003)
- 16) IEC 61966 Part2-1: "Colour Management - Default RGB Colour Space sRGB"
- 17) 加藤: "ソフトコピーとハードコピーの見えの一致 (III)", カラーフォーラムJAPAN '95論文集, pp.33-36 (1995)
- 18) M. Tsukada, J. Tajima and H. Yaguchi: "Evaluation of Color

Matching Performances for SPEM and other Models", Color Res. And Appl, 28, 6, pp.445-453 (2003)

- 19) 日本色彩学会編: "色彩科学ハンドブック (第2版)", 東京大学出版, pp.69-71 (1998)
- 20) ISO/TR 16066:2003: "Graphic Technology --Standard Object Colour Spectra Database for Colour Reproduction Evaluation (SOCS) " (2003)
- 21) 日本色彩学会編: "画質と音質の評価技術", 昭晃堂 (1991)

つかだ まさと
塚田 正人 1989年, 筑波大学第三学群情報学類卒業. 1991年, 同大学院博士課程工学研究科修士取得退学. 同年, NEC入社. 現在, 中央研究所メディア情報研究所勤務, ならびに筑波大学大学院システム情報工学研究科博士課程に在籍. 正会員.

おおた ゆういち
大田 友一 1977年, 京都大学大学院博士課程修了. 京都大学情報工学科助手, 筑波大学電子・情報工学系講師, カーネギーメロン大学計算機科学科客員研究員, 筑波大学電子・情報工学系助教授を経て, 1992年, 同教授. 2004年より, 同大学大学院システム情報工学研究科教授. 工学博士. 正会員.