

機関番号：23903
 研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2008～2010
 課題番号：20500160
 研究課題名（和文） 情景及び異種メディア間の対応する色再現の自動的実現手法の研究
 研究課題名（英文） A Study on the Automatic Realization of Corresponding Color Reproduction between a Scene and Various media.
 研究代表者
 田島 譲二（TAJIMA JOHJI）
 名古屋市立大学・大学院システム自然科学研究科・教授
 研究者番号：50381900

研究成果の概要（和文）：

照明条件等が異なる媒体間の“対応する色再現”を自動的に実現するための二つの技術について、研究を行なった。

第一に、画像に対し、不完全なセグメンテーションと二色性反射モデルとを用いて、ロバストに光源の色度を推定することに成功した。この技術は、画像が人工的な物体を撮像したものであるとき特に有効である。

第二に、異なる白色に調整された二つのディスプレイ間での、画像に対する色覚の不完全順応係数の一定性・対称性について実験を行なった。8種類の白色の組み合わせについての実験では、不完全順応係数は一定でも対称でもなく、両者の色温度の低い方に近く順応するという興味ある結果が得られた。

研究成果の概要（英文）：

Two technologies for the automatic realization of “corresponding color reproduction” between a scene and media under various illumination conditions were studied.

First, we succeeded in developing a new robust illumination chromaticity estimation method, which is based on the incomplete image segmentation and the di-chromatic reflection model. This method works especially well for the images of artifacts.

Second, we conducted experiments on incomplete chromatic adaptation of human color vision between color images on two displays, whose white points are not the same. The experiments for eight white chromaticity pairs showed interesting results that the obtained incomplete adaptation coefficients are neither constant nor symmetric, and the human color vision adapts to the color temperature that is near the lower one of the two white points.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・知覚情報処理・知能ロボティクス・

キーワード：画像情報処理、カラー画像処理

1. 研究開始当初の背景

(1) 画像からの光源色の自動推定

カラー画像からの光源色の推定に関しては、グレイワールド仮説及び画像中の色の分布を利用する研究が進められてきた。それに対し、二色性反射モデルを利用する手法も従来知られていた。しかし、この手法を利用するには、一定の反射率の部分が画像中でセグメンテーションされている必要があり、実用できなかった。

この研究とは別に、筆者らは以前フルカラー画像（各画素の色を 24 ビットで表わした画像）を、例えば 256 色のような少数色でほぼ原画と見分けがつかないように表現する、“限定色表現”の手法を開発していた。これは、画像をセグメンテーションする手法ではないが、色の近い部分を教師なしでグルーピングする手法であるために、“不完全なセグメンテーション手法”として利用できる可能性があった。

(2) 不完全順応係数

対応する色再現のための、色覚の不完全順応については、カラーアピランスモデルを利用するよりも良い結果が得られる、計算論的カラーコンスタンシーモデルを利用するものが知られていた。この理論は、「人の視覚が画像中の対象の分光反射率を推定する」という一見して現実的でない仮説に基づく。これを改善するために、筆者らは、これをより現実的な「人の視覚は画像の光源色温度を推定する」との仮説で説明できることを示すとともに、色温度をその逆数で表現すると、不完全順応係数がどの色温度間でも一定なら、対称性が成立する理論が構築できることを示していた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、

- (1) 二色性反射モデルとカラー画像の限定色表現を利用した、カラー画像からの自動的な光源色推定の実現
- (2) 対応する色再現における不完全順応係数を、上記の「人の視覚が画像の光源色温度を推定する」モデルと被験者を用いた主観評価実験で実測し、モデル検証することであった。

3. 研究の方法

(1) 光源色推定

二色性反射モデルは、金属以外の物体の一定の表面色について成り立つと言われている次式のようなモデルである。

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \alpha \begin{pmatrix} R_o \\ G_o \\ B_o \end{pmatrix} + \beta \begin{pmatrix} R_w \\ G_w \\ B_w \end{pmatrix} \quad (1)$$

これは、各画素の色(R, G, B)が、三次元の色空間の中の光源色(R_w, G_w, B_w)と物体色(R_o, G_o, B_o)のベクトルの張る平面上に分布することを示す。更にこの式から、画像中に二つの異なる一定色の物体が存在すれば、二つの平面の交線を求めることにより、光源のベクトルが求まることを示す。

通常、求まる必要があるのは、光源のベクトルというより光源の色度である。式(1)は、表面色の色度(x, y)について、同様の式(式(2))で表わされることも知られており、これを利用すると一定色の物体の表面色度は色度図上の直線上に分布する。

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \alpha \begin{pmatrix} x_o \\ y_o \end{pmatrix} + \beta \begin{pmatrix} x_w \\ y_w \end{pmatrix} \quad (2)$$

そして、二つの一定色の物体が存在すれば、光源色度は二つの直線の交点として求まる。

この手法により光源色を自動的に求めるための問題点は、上記のように画像中から一定色物体が切り出されていることが前提となっていた。式(1)の三次元のモデルは、それぞれの色領域の色が分布する平面を安定して求めなければならない。それには、各色領域は、物体色に近い拡散反射部分から光源色に近い鏡面反射部分まで広い範囲の色分布が望まれる。それに比して色度分布を用いる式(2)の二次元のモデルは、それぞれの色領域の色分布が必ずしも広範囲でなくても、多くの色領域から得られる多くの直線があれば、ロバストに光源の推定が可能になると期待される。

また、実際には撮像装置のノイズ等によって、一つの色領域の色度分布が完全に直線上に分布する訳ではない。そこで、実用的には次のように考えた。まずその領域に含まれる画素の色度について、第 1 及び第 2 主成分を求める。それぞれの方向への分散 σ_1^2, σ_2^2 ($\sigma_1 \geq \sigma_2$) について $\sigma_1 \gg \sigma_2$ が成り立つ場合には、各画素の色度は第 1 主成分方向の直線に分布していると考えていだろうか。また、ノイズのある実画像では複数の直線が 1 点で交わることは期待できないので、多くの直線からロバストに尤もらしい推定値を得るために、直線からの距離の自乗を最小化する位置を光源色度と推定することとした。

式(3)で表わされる直線 i から点(x, y)への距離 d_i は式(4)で表される。

$$a_i x + b_i y + c_i = 0 \quad (3)$$

$$d_i = \frac{|a_i x + b_i y + c_i|}{\sqrt{a_i^2 + b_i^2}} \quad (4)$$

$$F(x, y) = \sum_i w_i d_i^2 \quad (5)$$

よって、式(5)を最小化する関数として最小

自乗法を実行すれば、解析的に光源色度(x,y)を求めることが可能である。ここで、 w_i はその直線の信頼性の重みであり、ここではその色領域の有効な画素数とした。

以上のように、色度を求める部分をロバスト化し、不完全ではあるが、画像の分割手法として限定色表現を用いた。これは、色空間を対象のカラー画像が含む色分布に応じて分割し、カラー画像を限定された数の代表色で表現するものであり、フルカラー画像を256色でカラーマップ表示するような場合に利用されてきた。

処理の手順は以下のものである。

- ① 各画素の色の三次元色空間中の分布を調べる。まず、全体を一つのクラスタとする。
- ② クラスタ中の最も分散の大きな主軸を見つける。
- ③ その主軸に画素値を投影し、判別分析の閾値により二つのクラスタに分割する。各クラスタの平均色を代表色とする。
- ④ 分割されたクラスタのサイズが大きく、平均色間の色差が大ききときは、分割されたクラスタについて②から繰り返す。
- ⑤ 最終的に得られた色空間中のクラスタ毎に、同じクラスタに属する画素のかたまりを個々の物体の部分として画像を分割する。

通常人工物の画像では、平均色間の色差が10程度で画像は異なる物体に分離され、拡散反射から鏡面反射まで広く色が分布する色領域は、複数の領域に過分割される。しかし、過分割されても、それぞれの領域での色度分布を解析し直線が得られれば、光源色度の推定は可能である。

(2) 不完全順応の主観評価

対応する色再現を実現する不完全順応係数を求める主観評価実験を次のように行なう。暗室中に二つの色評価用ディスプレイを設置し、左右のディスプレイの白色を異なる色温度 T_1 及び T_2 に設定する。そして、画面の周囲にその色温度のグレイを表示し、中央にカラー画像を表示する。カラー画像は、原画像を、光源の色温度が T_1 から T_2 の間の昼光である場合の色に、物体の反射率を考慮して変換したものを用いる。左に T_1 の画像を、右に T_2 の画像を表示したときに画像が同じ色に見えるならば、視覚は完全順応である。通常、右に T_1 から T_2 の間のどこかの色温度で照明した画像を表示したとき、最も近い色に見える。この程度を不完全順応係数として求める。

実験は次の手順で行なった。

① ディスプレイの較正

購入したミノルタの分光輝度計 CS-2000 を用い、各ディスプレイの原色及び白色の色

度を正確に測定し、較正を行なった。ディスプレイは、ハードウェアの較正機能を持つ色再現評価用の sRGB モニタを購入した。

② テスト画像の作成

原画像としては色再現評価用画像 CMYK-SCID の4種を用いた。原画像は5,000Kの昼光下のためのものであるので、これを3,000K~9,000Kの光源下の画像に変換する。この変換には、標準画像がハードコピーであると考え、Standard object colour spectra database for colour reproduction evaluation (SOCS) の代表的なデータを利用して各画素値からその分光反射率を推定し、それぞれの光源下の画像に変換する。なお、4,000K以下ではCIE昼光は定義されていないので、黒体輻射の値を使用した。

また、その変換操作の際に、画像中の彩度の高い部分の画素値がディスプレイの表現範囲を超えてしまうことがある。そのため、本来の標準画像に対し、対象とするすべての光源の範囲内でディスプレイの再現範囲外になる色がないように、実験用の原画像の色域を狭く修正した。

③ 評価システムの作成

評価システムは、Windows PC上で作成した。次のような特徴が必要である。

- ・ 左右のモニタに複数の種類のテスト画像を表示し、被験者が自分でPCを操作しながら、比較結果が自動的に記録される。
- ・ 比較対象の五つの画像が、ランダムな順序に表示されるようにプログラムできること。
- ・ 画像は、順応したグレイの中に表示される。グレイの周囲の外にWindows標準のウィンドウのフレームが見えてはならない。

このような特徴を持つシステムを開発するためのプラットフォームとして幾つかを試み、最終的にMicrosoft PowerPoint®の上に、Visual Basic for Application (VBA)を用いてシステムを開発した。

④ 主観評価実験

色覚正常の被験者14名(男10名、女4名、追加実験では男9名、女5名)を募集し、5,000K-3,000K、5,000K-4,000K、5,000K-6,500K、5,000K-9,000K、3,000K-5,000K、4,000K-5,000K、6,500K-5,000K、9,000K-5,000Kについて主観評価実験を実行した。

暗室中に二つの色評価用モニタを設置し、左右の順応色温度をそれぞれ T_1 及び T_2 とする。まず、左右の目が一方のモニタのみを観察するように配置し、5分間順応する。そして、左の画面には順応グレイの中に T_1 の画像を、右の画面に同じく T_1 ~ T_2 の光源に対応する画像を提示し、どの画像の色が左の画像に最も近く見えるかを被験者により選ばせる、

という主観評価を行なった。

4. 研究成果 (1) 光源色推定



図1 原画像

光源色推定の D65 光源下の画像に対する実行例を示す。図1の原画像は、図2では54色の限定色表示がされている。画像は、7297の色領域に分解された。



図2 限定色画像

この主要な領域について、色度分布の主軸を直線として色度図上に表示したものが図3である。これらから最小自乗法により、最も近い点の色度を求めたところ、本来の値との誤差は(-0.009, -0.006)であり、この条件で画像を再構成したところ、ほぼ正常な色再現が得られた。

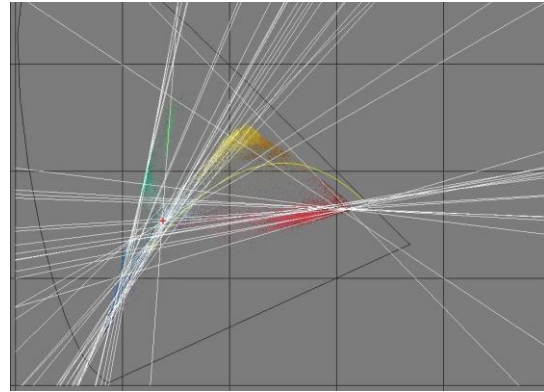


図3 光源色度推定

しかし、A光源下の画像に対しては、誤差が(+0.027, +0.001)となり、この条件で再構成された画像の色再現は不十分であった。

今後、条件への依存性などを解決する必要がある。また、図1のような人工物の画像は、この手法になじみが良いと考えられるが、この手法を自動的に画像に適用するには、自然物への適用、又は、自動的に自然物は適用範囲から除くことが必要である。

現在のところ、この手法を自然物画像に適用した場合の振る舞いは未知であり、その検討が必要である。

(2) 不完全順応の主観評価

3(2)で説明した主観評価実験を行なった結果、次の事実が明らかとなった。不完全順応係数を、

- (a) 光源色温度の変化率
- (b) 光源色温度を mired で表わした変化率
- (c) カラーコンスタンシー理論に基づく分光反射率の変化率

の3つの単位で計算したが、従来の研究で期待されていた不完全順応係数の一定性、あるいは、対称性は見られなかった。表1は、光源の色温度を単位として不完全順応係数を求めた結果である。

表1 光源色温度を単位とした
不完全順応係数

T1 (K)	T2 (K)	不完全順応の色温度 (K)	不完全順応係数
5000	3000	3752	0.62
5000	4000	4227	0.77
5000	6500	5405	0.27
5000	9000	5862	0.22
3000	5000	3427	0.21
4000	5000	4186	0.19
6500	5000	5487	0.68
9000	5000	6645	0.59

実験の結果として、

- ① 最もよく対応する画像の照明色温度は、
二つの色温度の低い方に近いこと、
また、
- ② 四つの画像で評価したが、画像への依存
性は低く、どの画像でも結果は大きくは
変わらない。

という貴重な事実が得られた。

今後、対応する色再現を実現するには、新
たなモデルを検討する必要があると考えら
れる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者に
は下線)

[雑誌論文] (計2件)

- ① 田島讓二、Color constancy と画像から
の光源推定、画像電子学会誌、招待(査読
無)、Vol.38, No.4, 2009, pp.503-511
- ② Tajima J., Illumination Chromaticity
Estimation Based on Dichromatic
Reflection Model and Imperfect
Segmentation, Lecture Notes in Computer
Science (Springer), Vol. 5646, 2009, 査読
有, pp.51-61

[学会発表] (計2件)

- ① 石宝、田島讓二、異なる色温度の対応す
る色再現における不完全順応の非対称
性について、日本色彩学会視覚情報基礎
研究会、2011.3.5、pp.13-16、産業技術総
合研究所臨海副都心センター別館
- ② 田島讓二、Color constancy と画像から
の光源推定、画像電子学会第240回研究
会、2008.10.24、名古屋市立大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田島 讓二 (TAJIMA JOHJI)

名古屋市立大学・大学院システム自然科学
研究科・教授

研究者番号：50381900

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：