

## Color Constancy と画像からの光源色推定

田島 譲二 (正会員)

名古屋市立大学

### 1. ま え が き

Color Constancy とは、本来人の“色恒常性”のことである。これは、人が物体の色を照明光源の色にかかわらず同じ色として認識できる能力を指している。この能力は不完全ではあるが、人が外界を認識して生きていくのに大きく貢献している。

ロボット・ビジョンの分野でも、ロボットが屋外や様々な照明の下で活動を行う場合、視覚センサが対象物を色により同定できることが望ましく、この研究を上記になぞらえ Color Constancy の研究と呼ぶ。しかし、ここで開発される手法は、必ずしも人の視覚を意識している訳ではないので Computational Color Constancy (計算論的色恒常性) と呼ばれることも多い。

Computational Color Constancy は次のように定式化される<sup>1)</sup>。分光反射率  $\beta(\lambda)$  の物体を分光強度  $S(\lambda)$  の光源で照明し、 $\bar{r}(\lambda)$ ,  $\bar{g}(\lambda)$ ,  $\bar{b}(\lambda)$  の分光感度のセンサで撮像したときのカメラの出力  $(R, G, B)$  は、式 (1) で表される。

$$\begin{cases} R = \sum_{\lambda} S(\lambda)\beta(\lambda)\bar{r}(\lambda)d\lambda \\ G = \sum_{\lambda} S(\lambda)\beta(\lambda)\bar{g}(\lambda)d\lambda \\ B = \sum_{\lambda} S(\lambda)\beta(\lambda)\bar{b}(\lambda)d\lambda \end{cases} \quad (1)$$

このカメラから得られる出力  $(R, G, B)$  から、分光反射率  $\beta(\lambda)$  を求められれば、任意の光源  $S'(\lambda)$  に対するカメラの出力  $(R', G', B')$  を式 (2) のように計算することができることから、標準の光源に対する物体色を復元することにより、Color Constancy が実現できる。それにより、色による物体の同定も可能となる。

$$\begin{cases} R' = \sum_{\lambda} S'(\lambda)\beta(\lambda)\bar{r}(\lambda)d\lambda \\ G' = \sum_{\lambda} S'(\lambda)\beta(\lambda)\bar{g}(\lambda)d\lambda \\ B' = \sum_{\lambda} S'(\lambda)\beta(\lambda)\bar{b}(\lambda)d\lambda \end{cases} \quad (2)$$

分光特性は、標準的には 380 ~ 780 nm の可視光の波長範囲において 5 nm 間隔で測定されるので、物体の分光反射率、光源の分光強度、センサの分光感度は 81 次元のベクトルで表される。しかし、カメラから得られるのは、 $(R, G, B)$  の三つの値であり、これから  $\beta(\lambda)$  を求められるのが問題となる。センサの分光感度も通常は知られていないが、これを既知としても、未知数は、分光強度  $S(\lambda)$  の 81 個と分光反射率  $\beta(\lambda)$  の 81 個となる。なお、分光反射率は画像の画素ごとに異なっているが、光源の分光強度は通常は画像全体について一定であると考えられる。

上記からわかるように、この Color Constancy の問題は一般的には不良設定問題で解くことができない。しかしこれまで、 $S(\lambda)$  と  $\beta(\lambda)$  に対して拘束を与えることによって、Color Constancy 問題を解く試みが行われてきた。

また、先にも述べたように、この Computational Color Constancy の手法では、物体の分光反射率を推定するのが目標となっており、元々 3 種の分光感度で物体を認識している人の視覚が近似的に実現している本来の Color Constancy とは機構が異なっていると考えられてきた。

しかし、人の視覚が実現する‘対応する色再現’ (異なる観察条件の下での同じ‘色見え’を一致させる色再現) の問題にも、この Computational Color Constancy の手法によって良い結果が得られることが示された<sup>2)</sup>。そのため、計算論的な手法にも人の視覚と何らかの関係があるとも考えられる。

本稿では、まずその問題について論ずると共に、Computational Color Constancy の中心的課題である画像からの光源推定の問題について、著者らの研究を交えて紹介する。

<sup>1)</sup>“Color Constancy and Illumination Color Estimation in an Image”

Johji TAJIMA (Member)  
Nagoya City University

## 2. 分光反射率に関する近似

ある物体を A なる光源下で観察したときと、B なる光源下で観察したときとは、CIE-XYZ 三刺激値は、一般的には異なっている。これは人の網膜に与える刺激が異なっていることを表している。しかし、脳内の処理によって、人はそれが近い色であるように感じる。それは視覚の色順応による。完全に同じ色に見える場合は、完全順応といわれるが、A と B の光源がかなり異なっている場合には、それは困難で、視覚は両者の中間の状態になり、これは不完全順応といわれる。

Tsukada ら<sup>2)</sup> は、この問題を人の視覚が Computational Color Constancy と同じ処理を行っているとは仮定し実験を行った。まず、プリンタで全色域をカバーする  $n$  色のカラーパッチを出力し、その分光反射率  $\beta_i(\lambda)$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) を測定する。この多数の分光反射率データについて主成分分析を行い、平均  $\mathbf{o}_0(\lambda)$  と分散の大きい方から三つの主成分  $\mathbf{o}_1(\lambda)$ ,  $\mathbf{o}_2(\lambda)$ ,  $\mathbf{o}_3(\lambda)$  を求める。すると任意の分光反射率は、次のように近似される。

$$\beta(\lambda) = \mathbf{o}_0(\lambda) + a_1\mathbf{o}_1(\lambda) + a_2\mathbf{o}_2(\lambda) + a_3\mathbf{o}_3(\lambda) \quad (3)$$

この近似によると、ある物体色について、光源  $S(\lambda)$  の下で三刺激値  $(X, Y, Z)$  が得られたとき、 $a_1, a_2, a_3$  は次のように求められる。

$$\begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_1 & X_2 & X_3 \\ Y_1 & Y_2 & Y_3 \\ Z_1 & Z_2 & Z_3 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

ここで、 $X_i = \sum_{\lambda} S(\lambda)\mathbf{o}_i(\lambda)\bar{x}(\lambda)d\lambda$  であり、 $\bar{x}(\lambda)$  は CIE-XYZ 系の等色関数である。 $Y_i, Z_i$  についても同様である。

すると、ある三刺激値  $(X, Y, Z)$  が得られたとき、物体の分光反射率は式 (4) により、光源ごとに異なる値が得られる。これは、視覚が順応している光源によって、異なる分光反射率を知覚していることを示す。Tsukada らは、不完全順応の状態では、分光反射率がこの二つの光源に対する分光反射率の中間のものとして知覚されると仮定して画像を発生し、画像のカラーマッチング実験を行った。その結果、このモデルにより生成した画像が、従来知られているモデル以上の“対応する色再現”を実現することを示した。

しかしこのモデルは、人が次元の高い分光反射率を認識していることを前提としている。それは、人の色知覚が元々三種の分光感度を持つ錐体によっているという事実と矛盾する。Tsukada らの実験では、分光反射率を、プリンタ出力の分光反射率データの主成分  $\mathbf{o}_i(\lambda)$  の線形

和として近似している。しかし、この主成分は集めたカラーパッチの種類によって異なる可能性がある。すると、複数の物体が第一の光源下で同じ XYZ 値を示していても、物体によって主成分が異なるため、第二の光源下ではメタメリズムにより異なった XYZ 値を示すことがありと考えられ、予測される色が異なることが予想される。この例を、実在する物体色を自然色素、人工色素を問わず広く収集した分光データのデータベース SOCS<sup>3)</sup> を用いた実験により示す。例えば、D50 の照明下での一組の三刺激値  $(X, Y, Z) = (10.101, 7.851, 17.835)$  から推定される分光反射率は、印刷物 (of05\_g)、塗料 (paint)、昇華型プリンタ (pr.ds.4) の三つのセットによる基底では、図 1 のようになりかなり異なっている。

しかしこの問題は、メタマーに関する次の実験により、ほぼ解決可能であることがわかった<sup>4)</sup>。SOCS から下の代表的な八つのカテゴリを選び、それぞれの分光反射率 (又は透過率—以下同じ) を主成分分析し、上記の基底ベクトル  $\mathbf{o}_i(\lambda)$  を求めた。

- ① オフセット印刷機で出力したもの (of05\_g)
- ② ペンキなどの塗料 (paint)
- ③ 写真材の反射プリント (ph01.r)
- ④ 写真材の透過フィルム (ph01.t)
- ⑤ ポリエステルの布 (poly)
- ⑥ 昇華型プリンタ (pr.ds.4)
- ⑦ 静電気式プリンタ (pr.es.3)
- ⑧ インクジェットプリンタ (pr.ij.1)

そして、それぞれの基底ベクトルを用いて、D50 光源下でメタマーとなる 320 色の分光反射率を復元した。

次に、その分光反射率の 9,300 K の昼光下での XYZ 値を比較した。その結果、各カテゴリ間の色の差は、XYZ 三次元空間でのユークリッド距離で、平均 1 程度、最大でも 2 を超えないことがわかった。XYZ 空間では、黒と白の間の距離が 100 であり、1~2 の距離はほとんど視

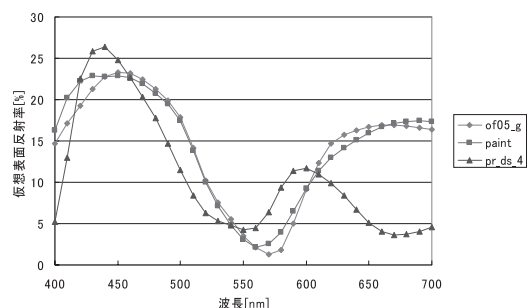


図 1 同じ三刺激値から推定される三種の分光反射率  
Fig. 1 Spectral reflectance estimated from a set of tristimulus values and three object categories

覚的に感知できないものである。すなわち、「実際に存在する物体と昼光の性質から、ある昼光下での色がわかれば、別の昼光下での色はどの基底を使っても、かなり精密に推定することができる」ことがわかった。この再現色の物体カテゴリに対する安定性が、人の視覚の Color Constancy の基礎となっていると予想できる。

いくつかの物体色で確かめることによって、上記の不完全順応も「人は二つの色温度  $T_1$  と  $T_2$  で推定された分光反射率の間の分光反射率を推定する」と考える代わりに「人は二つの色温度  $T_1$  と  $T_2$  で再現される色の間の色温度  $T_3$  の色を推定する」と合理的に考えることができることもわかった。その結果、Computational Color Constancy は、人の Color Constancy のモデルとしても利用できる可能性があることになる。

以上により、ある物体の光源  $S(\lambda)$  の下での三刺激値  $(X, Y, Z)$  と別の光源  $S'(\lambda)$  の下での三刺激値  $(X', Y', Z')$  は、(不完全順応を含めても) 次の関係で書けることになる。

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X'_0 \\ Y'_0 \\ Z'_0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X'_1 & X'_2 & X'_3 \\ Y'_1 & Y'_2 & Y'_3 \\ Z'_1 & Z'_2 & Z'_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1 & X_2 & X_3 \\ Y_1 & Y_2 & Y_3 \\ Z_1 & Z_2 & Z_3 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

ここで、 $X'_i = \sum_{\lambda} S'(\lambda) \mathbf{o}_i(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda$  であり、 $S'(\lambda)$  は  $S(\lambda)$  とは別の光源、あるいは、視覚が不完全順応した二つの光源の間の色温度を持つ光源である。

通常、カメラの中などで行われる光源色の補正としてホワイトバランスの補正があるが、これは、式 (5) の補正をセンサの RGB 空間において式 (6) の形に簡易化した補正と考えることができる。

$$\begin{pmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/R_w & 0 & 0 \\ 0 & 1/G_w & 0 \\ 0 & 0 & 1/B_w \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad (6)$$

ここで、 $(R_w, G_w, B_w)$  は光源色 (白) に対するセンサ出力である。

### 3. 光源色の推定

以上により、Color Constancy を実現するには、画像から光源色を推定する技術が最も重要であることがわかる。カラー画像の光源色が推定できれば、

- 自動ホワイトバランス
- 異なる光源下で撮影された画像への変換
- 色による画像からの物体などの認識

などが可能となる。

光源色推定は、Color Constancy の中心的課題であり、従来からいくつかの技法が知られている。また近年、多くの新しい研究がある。しかし、どの手法も適用対象に制約があり、万能ではない。本稿では、これらの手法を概観すると共に、手法の選択肢を増やすことができる著者の提案を紹介する。

#### 3.1 昼光と完全放射体

前述したように、画像から得られるのは  $(R, G, B)$  の三つのセンサ出力である。そのため、通常 81 次元となる光源の分光強度を求める問題はやはり不良設定である。

人のような陸上の生物の視覚は太陽光の下で進化してきた。そのため、Color Constancy のような機能はその条件で獲得されてきたであろう。そこで、Computational Color Constancy でも、原則的には次の仮定をすることが多い。

- 「光源は CIE 昼光である。」または、「プランクの輻射式に従う完全放射体である。」

その場合、画像から  $(R_w, G_w, B_w)$  が白色であると推定されると、その CIE XYZ 三刺激値  $(X_w, Y_w, Z_w)$  に変換され、更に色度  $(x_w, y_w)$  が求められた後、その色度に近い CIE 昼光あるいは完全放射体の分光放射強度を持つ光源であると仮定される。

よく知られるように、色度が  $(x_D, y_D)$  の CIE 昼光の分光強度は、 $\lambda$  を波長として式 (7) のように書かれる。

$$S(\lambda) = S_0(\lambda) + M_1 S_1(\lambda) + M_2 S_2(\lambda) \quad (7)$$

$$\begin{cases} M_1 = \frac{-1.3515 - 1.7703x_D + 5.9114y_D}{0.0241 + 0.2562x_D - 0.7341y_D} \\ M_2 = \frac{0.0300 - 31.4424x_D + 30.0717y_D}{0.0241 + 0.2562x_D - 0.7341y_D} \end{cases}$$

また、絶対温度  $T$  の完全放射体の分光強度は、式 (8) のように書かれる。

$$S(\lambda) = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} \text{ W} \cdot \text{m}^{-3} \quad (8)$$

ここで、 $c_1 = 3.74150 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$

$$c_2 = 1.4388 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$$

$T = 5,000 \text{ K}$  と  $T = 9,300 \text{ K}$  の CIE 昼光と完全放射体の分光放射強度を図 2 に比較して示す。両者はいく分ずれているが、可視帯域の重要な部分で大きな差はないことがわかる。また、色温度に対する色度図上の軌跡を図 3 に示す。両者の軌跡はほぼ一致している。光源色推定の目標は、カラー画像が与えられたときに、光源がこの軌跡のどこにあるかを推定することである。

なお、これらの手法は蛍光灯や最近普及しつつある LED による照明下での色を、正確に扱うことはできない。実際、人もこれらの光源下で、色を正しく認識できない。これらの光源に対する Color Constancy の機能が発達し

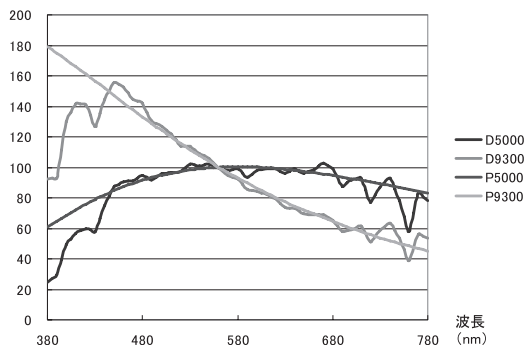


図 2 昼光 (D5000, D9300) と完全放射体 (P5000, P9300) の分光放射強度

Fig. 2 Relative spectral power distributions of CIE illuminants D (D5000, D9300) and Planckian radiators (P5000, P9300)

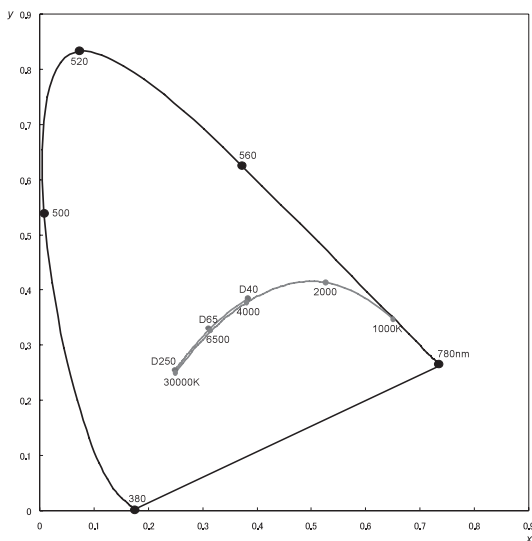


図 3 完全放射体 (1,000 K ~ 30,000 K) と CIE 昼光 (D40 ~ D250) の色度

Fig. 3 Chromaticities of Planckian radiator (1,000 K ~ 30,000 K), and CIE illuminants (D40 ~ D250)

ていないためであろう。蛍光灯などの輝線スペクトルをもつ光源の推定に関しては、富永ら<sup>5)</sup>により分光画像センサによる手法が研究されているが、本解説では詳しく述べない。

### 3.2 光源色推定の手法

光源色の推定は、3.2.1 節に述べる伝統的な手法に対して、いくつかの新しい手法が提案されている。

#### 3.2.1 伝統的な手法

##### (i) 最明色仮説

一番単純な手法である。画像中の最も明るい画素は「白色 ( $R_w, G_w, B_w$ )」であると仮定する。この値を利用し

てホワイトバランスの調整 (式 (6)) が行われることが多い。

この変形として、それぞれのコンポーネントの画像中の最大値を、 $R_w = \max_{x,y} R(x,y)$  のように別々に求め、 $(R_w, G_w, B_w)$  を白色と仮定することも行われる。

多くの場合に、この手法で自然な画像が得られる。しかし、容易にわかるように、この手法の問題点は、画像中に白色 (あるいはコンポーネント毎の最明色) が写っている必要があることである。また、光源源のものが写っている場合には、値が飽和している場合も多い。その場合には、ホワイトバランスの調整は不可能である。

##### (ii) グレイワールド仮説

この手法は、「情景中の色は平均するとグレイになる」という仮定に基づいて色修正を行う。古くから写真のプリントなどで用いられてきた。これによると、

$$R_w = \frac{c}{N} \sum_{x,y} R(x,y) \quad (9)$$

(ここで  $N$  は画素数、 $c$  は適当な定数)

のように  $(R_w, G_w, B_w)$  が求められる。多くの場合、この手法でも自然な画像が得られる。そのため、上記の仮定はほぼ正しいと信じられているが、それは通常の画像には余り彩度の高い物体が含まれていないことにも関係しているであろう。常に正しいとはいえない仮説であることは明らかである。

#### 3.2.2 画像中のグレイを利用する手法

上記グレイワールド仮説を用いるのと考え方は似ているが、手法としてはまったく異なる。ここでは、Computational Color Constancy の一つの手法を利用している。代表的な Xiong らの手法<sup>6)</sup> につき紹介する。

この手法は、Finlayson らの Color Constancy の論文<sup>7)</sup> に基づいている。文献<sup>7)</sup> では、理想的な条件として、光源が完全放射体であり、センサは狭帯域であると仮定する。すると、各センサの出力  $R, G, B$  から次のような色度 ( $p'_R, p'_B$ ) が得られる。

$$\begin{pmatrix} p'_R \\ p'_B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \beta_R - \beta_G \\ \beta_B - \beta_G \end{pmatrix} + \frac{1}{T} \begin{pmatrix} E_R - E_G \\ E_B - E_G \end{pmatrix} \quad (10)$$

ここで、 $\beta_k = \ln[\beta(\lambda_k)\lambda_k^{-5}c_1]$ 、 $E_k = -c_2/\lambda_k$  ( $k = R, G, B$ )、 $\beta(\lambda_k)$ : 分光反射率、 $\lambda_k$ : センサの波長、 $c_1$ 、 $c_2$ : 定数

である。この色度のグラフを書くと、各色は光源の色温度  $T$  の変化につれて、一つの方向に直線状に変化する。よって、この座標系を回転すると、 $T$  による成分とよらない成分 (Color Constant な成分) とに分解できる。Color Constant な成分がグレイと等しい画素について平均をとることで、光源の色度を求める手法である。

この手法では、その原理上、

- 実際のセンサはデルタ関数のように狭帯域な感度を持っていないので、グレイの色度も完全な直線にはならない。
- カメラの感度を三つの波長における感度で近似することになるが、その最適な波長はカメラにより異なる。そのため、撮像環境が既知である必要がある。
- 本来各色の色度は二次元であり、完全放射体の軌跡がとる色度はすべてグレイと判断される。例えば元々黄色い物体は色温度の高い照明下で、色温度の低い完全放射体光源下のグレイと同じ色度に見えるため、必ずしもグレイだけが平均される訳ではない。

のような問題点が挙げられる。

### 3.2.3 色域を比較する方法

光源の色によって、物体色の色域が変化することを利用する手法も研究されている。

ある光源下ですべての物体が取りうる色域 (Gamut) をあらかじめ調べておく。そして得られた画像の色域と相関を調べ、その画像が撮られた際の光源を推定するというものである。

色域は、マンセル色票など 354 色の分光反射率を測定し、それが種々の色温度を持つ完全放射体で照明されたときの、分光感度が既知の CCD カメラのセンサ出力を計算し、作成されている。Finlayson ら<sup>8)</sup> は色度  $(x, y)$  で色域を表わしているが、Tominaga ら<sup>9)</sup> は、出力の  $R, G, B$  値の  $R$  と  $B$  を使うと図 4 のように色域が分離することを見いだした。この図では、相関色温度が 2,500 K から 8,500 K の光源で得られる色域が、500 K 間隔で示されている。

撮像された画像についても、これと同様に色域を表現する (図 4 の黒部分)。色域が最も高い相関を示す色温度の光源が、その画像の光源と推定される。

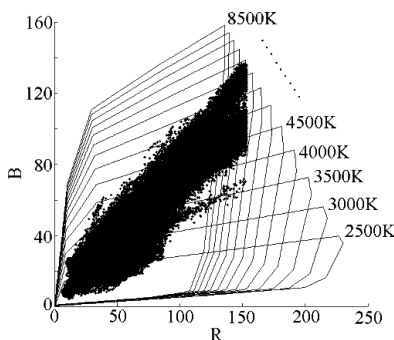


図 4 R-B 空間における、光源の色温度による色の分布の変化<sup>9)</sup>

Fig. 4 Variation of color gamut in the R-B color space, caused by illumination color temperature variation

この手法は、得られた画像が、多くの色を含んでいることが前提となっている。対象の画像が鮮やかな色を色相に満遍なく含んでいる場合にはうまく働くと考えられる。しかし、画像が少数の色しか含んでいない場合、その色分布はどの色温度の色域にも含まれてしまうので、光源の判別は困難となる。

### 3.2.4 色度分布からのパターン認識

ここで利用される特徴は、前節のものと似ている。各画素のセンサ出力  $(R, G, B)$  から色度  $(r, g)$  を計算し、色度面における分布を計算する。この色度面を  $r, g$  の両軸について、例えば 50 のビンに分割しておく。一つの画像について、それぞれのビンに色度が存在するかどうかを “1”, “0” のヒストグラムで表現し特徴とする。

前節の手法では、この色度の分布を基準の色域と比較していた。これに対して Barnard<sup>10)</sup> は、この二値画像を入力とし、光源の色度の二つの値  $(r, g)$  を出力とするニューラル・ネットを構成し、多くの画像を用いてこのニューラル・ネットに学習を行わせ、その後、テスト画像により推定実験を行った。また、同じ問題設定を Support Vector Regression で行った研究<sup>11)</sup> も報告されている。

これらの手法は、それなりに良い結果が得られているが、多くの画像によって学習を行わなければならないという問題がある。また、これは前節の手法とも共通の問題であるが、良い結果が得られるには画像に多くの色が含まれていることを必要とすることが示されている。

### 3.3 二色性反射モデルによる手法

前節までに述べた手法は、画像から自動的に光源色を求めることができる手法であり、画像によっては良い結果が得られる。しかし、それぞれの手法がうまく働くには、画像に対する条件があることがわかる。特に、

- 画像が多くの色を含んでいる。
- 画像で光源の色は飽和していない。

というような条件は実用上適用できる対象を狭めている。このような元々不良設定である問題は、一つの手法ですべての場合に対処できる解決策を期待するよりも、それぞれの場合に応じて最良の手法を適用して解決していくのが現実的であるように思われる。

さて、光源色推定の手法としては、上記のものと別に二色性反射モデルを基礎とする光源色の推定方法が知られている<sup>12), 13)</sup>。この原理は、次のようなものである。

金属以外の物体の表面色は、式 (11) に示すように、拡散反射成分と鏡面反射成分の線形和として表すことができることが知られている。コンピュータ・グラフィクスで用いられる反射モデルである Phong のモデル<sup>14)</sup> や Torrance-Sparrow のモデル<sup>15)</sup> は、この形式に従っている。

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \alpha \begin{pmatrix} R_o \\ G_o \\ B_o \end{pmatrix} + \beta \begin{pmatrix} R_w \\ G_w \\ B_w \end{pmatrix} \quad (11)$$

ここで、 $(R_o, G_o, B_o)^t$  は拡散反射の色であり、物体固有のものである。また、 $(R_w, G_w, B_w)^t$  は鏡面反射の色であり、通常、照明光源の色である。例えば、Phong のモデルでは、 $\alpha = \cos \theta$  ( $\theta$  は、物体表面への光の入射角)、 $\beta = \cos^n \phi$  ( $\phi$  は、鏡面反射光と観測方向のなす角) である。画像中に別の色を持つ物体が存在する場合、拡散反射の色は  $(R'_o, G'_o, B'_o)^t$  のように異なるが、光源の色は一定であるので、画像中の色の分布は、RGB 色空間 (XYZ 色空間でも同様) 中では図 5 のようになる。すなわち、複数の色を持つ物体領域が撮像されている場合には、それぞれの領域の色の分布は領域ごとに平面を形成し、それらの平面の交線は照明光源の色のベクトルを示す。

この場合原理的には、色領域は、画像中に無彩色以外に二色存在すればよく、これまで述べてきた手法に比して、画像中の色数が少なくてもよいという利点がある。

逆に、この手法の問題点は、画像全体に存在する色を調べればよいのではなく、撮像されている物体の本来一定の色領域を認識して切り出さなければならないという点である。その困難さのために、このモデルによる手法は実用に至っていない<sup>16), 17)</sup>。

最近、著者はこの制限を取り払い、二色性反射モデルを用いてより実用的な光源色推定手法を提案した<sup>18)</sup>。勿論、この提案手法でも、画像中に二色以上の物体が存在するという条件は必要とされる。しかし、その条件が満たされていないことが画像から推定できれば、他の手法 (例えば、グレイワールド仮説) を使うようにできるため、実用面での光源推定の応用の可能性が広がると考え

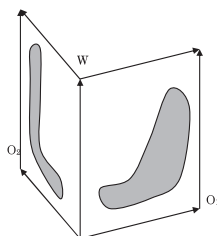


図 5 二色性反射モデルによる光源色推定。二つの物体色 ( $O_1$  と  $O_2$ ) が光源色と張る分布平面の交線に光源色を推定する

Fig. 5 Illumination color estimation based on the dichromatic reflection model. The common line shared by two planes, which are spanned by two object colors ( $O_1$  and  $O_2$ ) and the illumination color, is estimated to be the illumination color

ている。次章では、この手法について解説する。

#### 4. 光源色度推定と限定色表現

##### 4.1 二色性反射モデルによる光源色度推定

二色性反射モデル (式 (11)) は、表面反射の色が物体色と光源色の混合色であることを示しているが、二つの色光の混合色の色度  $(x, y)^t$  ( $(r, g)^t$  でも同様) は、色度図上ではそれぞれの色光の色度 ( $x_o, y_o)^t$  および  $(x_w, y_w)^t$  を結ぶ直線上に位置することが知られている。よって、画像中に物体色が複数存在する場合には、図 6 のように、それぞれの色領域の反射光の色度は、光源色度に向かう線分上に分布する。そのため、色領域ごとの色度の分布を表す直線を求め、その交点を求めることで、光源色度を求めることができる<sup>19)</sup>。

この二次元のモデルを利用した光源色度の推定は、これまでにも試みられている<sup>20) - 22)</sup>。しかし、上記の色領域の切り出しの問題は残されたままであった。

式 (11) に述べた三次元のモデルは、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こ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直線から光源の推定が可能になると期待される。

実際には撮像装置のノイズなどによって、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、まずその領域に含まれる画素の色度について、第 1 および第 2 主成分を求める。それぞれの方向への分散  $\sigma_1^2, \sigma_2^2$  ( $\sigma_1 \geq \sigma_2$ ) について  $\sigma_1 \gg \sigma_2$  が成り立つ場合には、第 1 主成分方向の直線に分布していると考えていいだろう。また、ノイズによって複数の直線が 1 点で交わることは期待できないので、多くの直線

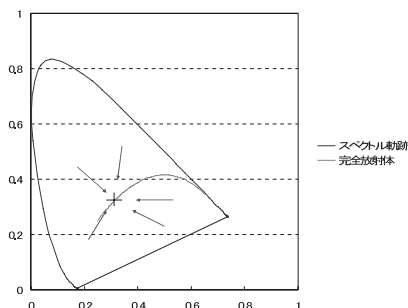


図 6 二色性反射分布は、色度図上では線分になる

Fig. 6 Chromaticity of dichromatically reflected light lies on straight lines

からロバストにもっと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。

よく知られているように、式 (12) で表わされる直線  $i$  から点  $(x, y)$  への距離  $d_i$  は式 (13) で表される。

$$a_i x + b_i y + c_i = 0 \quad (12)$$

$$d_i = \frac{|a_i x + b_i y + c_i|}{\sqrt{a_i^2 + b_i^2}} \quad (13)$$

$F(x, y) = \sum_i w_i d_i^2$  を最小化する関数として最小 2 乗法を式 (14) により実行すれば、解析的に光源色度  $(x, y)$  を求めることが可能である。

$$\frac{\partial F(x, y)}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial F(x, y)}{\partial y} = 0 \quad (14)$$

ここで、 $w_i$  はその直線が得られた色領域ごとの重みであり、その直線の信頼度に応じた重みを与えるのが望ましい。その色領域の含む有効な画素数などを用いればよいだろう。

さて、問題は、色領域の切り出しである。ここで注意すべきは、この色領域は完全に切り出され、物体上の一つの色領域は一つの領域として認識されているのが望ましいが、上記のロバスト化により、色度分布の直線が安定して得られれば、ある程度不完全な切り出しであっても許容されることが期待できることである。多くの色が存在する場合には、画像分割（セグメンテーション）による切り出し結果にはある程度の誤りが許されると考えられる。

#### 4.2 限定色表現による不完全な画像分割

この不完全な画像分割の手法として、限定色表現の技術を利用する<sup>23), 24)</sup>。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。

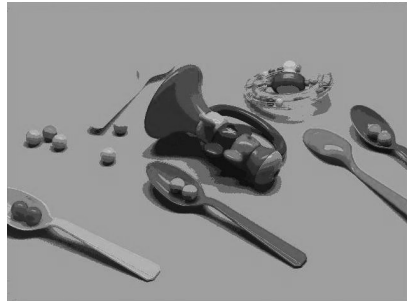
特に文献<sup>24)</sup>の手法は、代表色の数を対象の画像の色分布の複雑さに応じて変化させることができるので、対象を識別するのに必要な色差により分割するのに便利である。通常、色差 10 程度で画像を限定色表現すると、異なる物体間とは分離され、拡散反射から鏡面反射まで広く色が分布する色領域は、複数の領域に過分割される。しかし、過分割されても、それぞれの領域での色度分布を解析し、図 6 のように線分が得られれば、光源色度の推定は可能である。

#### 4.3 実験結果

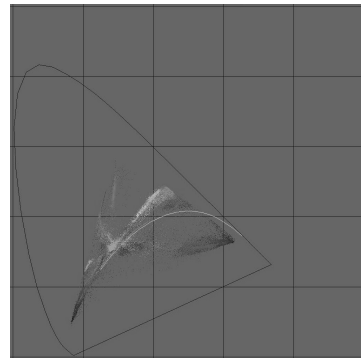
図 7 (a) の画像は、何種類もの鮮やかな色のプラスチックの玩具の D65 シミュレータ光源下の情景であり、画素数は  $640 \times 480$  である。この画像に対し、代表色間の色



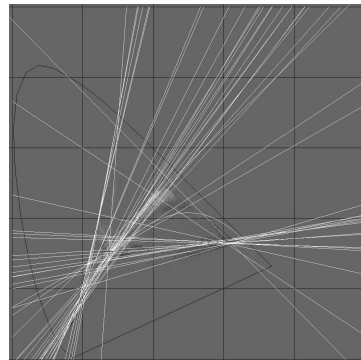
(a) 原画像



(b) 54 色による限定色表現



(c) 連結領域の色度分布



(d) 光源色度の推定．白い線が各色領域の色度分布の方向を示し、赤い十字が推定された光源色度を示す

図 7 実画像に対する光源色度の実験結果

Fig. 7 Illumination chromaticity estimation experiment on an image



差 10, また各色領域の最小画素数を 256 画素として文献24) のアルゴリズムを適用し, 限定色画像を作成した. 結果として, 54 色で表現されている (図 7(b)). 色の異なる部分はほぼ別の色が選ばれているが, 本来一つの色である領域で鏡面反射と拡散反射の混合具合で滑らかに色が変化している部分は, フルカラー画像に比して滑らかな変化が失われ, いくつかの領域に分割される.

更に, それぞれの色領域を二値画像とし, その連結領域をラベル付けすることにより, 画像は, 7297 の連結領域に分割された. それらの色領域の色度を色度図上に表示したのが図 7(c) である. 図 7(d) には, 各領域の色度分布の方向に引いた直線と推定された光源色度位置 (+マーク) が重畳されている. 推定された色度の誤差は,  $x$  方向  $y$  方向共に 0.01 以下であった.

光源色推定に用いられる画素は, 色度が安定に求められるものでなければならない. この実験では, RGB 値が飽和しているもの, 逆に, RGB 値が大変小さく求められた色度の信頼性が低いものは除いている.

図 8 に, 色領域分割の様子と, その色度分布の例を示す. 図 8(a) で白く表示された部分は, おもちゃのトランプのベルの部分の一部であり, 一つの色領域とさ

れた部分である. 本来, ベルの部分は全体が赤い色であるが, 色空間の分割で複数の部分に過分割されている. 図 8(b) は, この一つの色領域の色度分布を, やはり色度図上で白く表示したものである. 確かに一直線状に分布しているのがわかる.

上記の例は, 典型的に二色性反射モデルが見られるプラスチック物体でのものである. しかし, 通常, 完全な拡散反射に近いものと思われる無光沢な Macbeth Color Checker の画像でもこの処理を試みたが, 光源色は求まり, D65 シミュレータ下の画像では, やはり誤差は  $x, y$  の両方向に 0.01 以下の精度であった. しかし, 両者とも A 光源のシミュレータ下では,  $x$  方向に大きな誤差が観測された. 今後更に研究を進め, この手法の適用範囲を明確にすることが重要であろう.

## 5. む す び

本稿では, Computational Color Constancy について述べ, それが人の視覚の持つ Color Constancy (色恒常性) の能力を説明できる可能性があることを述べた.

また, Color Constancy を実現する上でキーとなる技術である光源色の推定に関して, これまで行われている研究を紹介した. 最近研究されている, 画像中の色分布から光源色を推定する手法は, 多くの場合, 画像が多くの色を含んでいる必要がある.

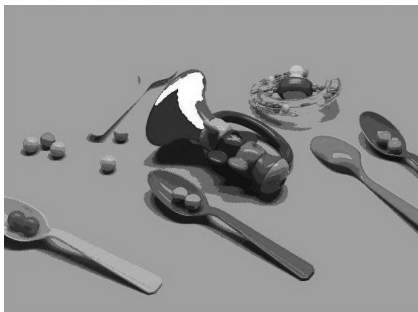
最後に, それを補完できる新しい手段として, 著者が提案した, 画像の色領域を限定色表現によって不完全分割し, ロバストな二次元の二色性反射モデルと組み合わせで光源色度を推定するという手法を実験例と共に示した.

これまでに提案されているどの手法も今のところすべての画像に適用可能ではない. このため更に新しい手法の研究を進めると共に, 今後は有効な複数の手法を組み合わせ, 総合的に信頼性を高めることも考えていく必要があるだろう.

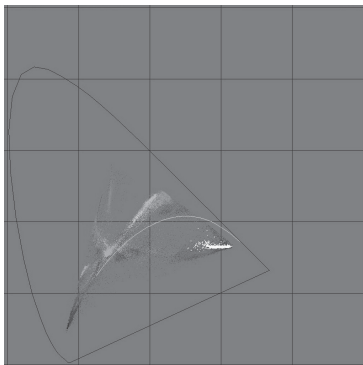
謝 辞 本研究の一部は, 科研費 20500160 の助成を受けて行われたものである.

## 参 考 文 献

- 1) L.T. Maloney and B.A. Wandell: "Color constancy: a method for recovering surface spectral reflectance", J. Opt. Soc. Am. A, Vol.3, No.1, pp.29-33, Jan. (1986).
- 2) M. Tsukada, J. Tajima, and H. Yaguchi: "Evaluation of Color Matching Performances for SPEM and Other Models", Color Research and Application, Vol.28, No.6, pp.445-453, December (2003).
- 3) "Standard Object Colour Spectra Database for Colour Reproduction Evaluation (SOCS)", ISO/TR 16066:2003.
- 4) J. Tajima and E. Niinomi: "Two Invariance Properties on Object Color Changes under Daylights", 14th Color Imaging Conference, pp.180-184, November (2006).



(a) 一つの色領域 (白い部分)



(b) 上記色領域の色度分布 (白い部分)

図 8 色領域に対する色度分布の例

Fig. 8 Typical chromaticity distribution in a color region



- 5) S. Tominaga: "Estimation of Composite Daylight- Fluorescent Light Components Based on Multi- spectral Scene Images", Proc 14<sup>th</sup> Color Imaging Conference, pp.125-130 (2006).
- 6) W. Xiong et.al.: "Automatic White Balancing via Gray Surface Identification", Proc 15<sup>th</sup> Color Imaging Conference, pp.143-146 (2007).
- 7) G.D. Finlayson and S.D.. Hordley: "Color constancy at a pixel", J. Opt. Soc. Am. A, Vol.18, No.2, pp.253-264, February (2001).
- 8) G.D. Finlayson, P.M. Hubel, and S. Hordley: "Color by Correlation", Proc. 5<sup>th</sup> Color Imaging Conference, pp.6-11 (1997).
- 9) S. Tominaga and S. Ebisui: "Color Temperature Estimation of Scene Illumination", Proc. 7<sup>th</sup> Color Imaging Conference, pp.42-47 (1999).
- 10) K. Barnard, V. Cardei, and B. Funt: "A Comparison of Computational Color Constancy Algorithms - Part I & II", IEEE Trans. on image processing, Vol1, No.9, pp.972-996 (2002).
- 11) B. Funt and W. Xiong: "Estimating Illumination Chromaticity via Support Vector Regression", Proc. 12<sup>th</sup> Color Imaging Conference, pp.47-52 (2004).
- 12) 斉藤: "カラー画像の光源色測定方法及び装置", 特願昭 63-308139 (1988).
- 13) 富永: "物体のカラー反射モデルの検討", 情処研資 CV59-5, Mar. (1989).
- 14) B.T. Phong: "Illumination for Computer Generated Pictures", Comm. ACM, Vol.18, No.6, pp.311-317, Jun. (1975).
- 15) K.E. Torrance and E.M. Sparrow: "Theory for Off- Specular Reflection From Roughened Surfaces", J. Opt. Soc. Am., Vol.57, No.9, pp.1105-1114, Sep. (1967).
- 16) J. Toro and D. Ziou: "Illumination Estimation from Dichromatic Planes", 13<sup>th</sup> Color Imaging Conference, pp.95-98 (2005).
- 17) S. Tominaga: "Multichannel vision system for estimating surface and illumination functions", J. Opt. Soc. Am A, Vol.13, No.11, pp.2163-2173, Nov. (1996).
- 18) J. Tajima: "Illumination Chromaticity Estimation Based on Dichromatic Reflection Model and Imperfect Segmentation", Proc. of the Computational Color Imaging Workshop (CCIW'09), pp.51-61, Mar. (2009).
- 19) 斉藤: "カラー画像の光源色の色度測定方法および装置", 特願 01-034805 (1989).
- 20) T.M. Lehmann and C. Palm: "Color Line Search for Illuminant Estimation in Real-World Scenes", J. Opt. Soc. Am. A, Vol.18, No.11, pp.2679-2691 (2001).
- 21) G.D. Finlayson and G. Schaefer: "Solving for Colour Constancy using a Constrained Dichromatic Reflection Model", IJCV, Vol.42, No.3, pp.127-144 (2001).
- 22) M. Ebner and C. Herrmann: "On Determining the Color of the Illuminant Using the Dichromatic Reflection Model", LNCS, Vol.3663, pp.1-8 (2005).
- 23) P. Heckbert: "Color Image Quantization for Frame Buffer Display", ACM Siggraph Computer Graphics, Vol.16, No.3, pp.297-307, Jul. (1982).
- 24) 田島, 池田: "人の視覚特性を考慮したカラー画像の高画質限定色表示", 画像電学誌, Vol.18, No.5, pp.293-301, Oct. (1989).



た じ ま じ ょ う じ  
田 島 譲 二 (正会員)

1971 年, 東京大学理学部物理学科卒, 同年, 日本電気(株)中央研究所に入所. 2000 年, 同社マルチメディア研究所主席研究員. その間, 1979~1980 ドイツ連邦共和国カールスルーエ市 FIM (情報処理パターン認識研究所) 客員研究員. 2003 年, 名古屋市立大学大学院システム自然科学研究科教授, 現在に至る. 画像処理, パターン認識システム, 特にカラー画像処理と三次元画像視覚の研究開発に従事. 理博. 電子情報通信学会, 情報処理学会, 日本色彩学会会員. IAPR (国際パターン認識学会) フェローおよび日本代表理事. 本学会編集委員.