

画像からシーン照明の色温度を推定する方法

A Method for Estimating Color Temperature of Scene Illumination from Images

富永昌二*, 田中法博**, 酒井英昭***

Abstract

In the field of image understanding and computer vision, it is important to estimate the scene illumination. The present study has performed algorithm improvements of the sensor correlation method for illuminant classification and its application to color correction. First, we use the reciprocal scale of color temperature, called “mired”, in order to obtain perceptually uniform illuminant classification, rather than physical illuminant classification. Second, we calculate correlation values between the image color gamut and the illuminant gamut, rather than between the image pixels and the illuminant gamuts. Third, we introduce an image scaling operation to adjust overall intensity differences between images and find a good fit to the illuminant gamuts. The validity of these algorithms is evaluated in detail using a real image database. Moreover our method is applied to color correction. Once we estimate the color temperature illuminating a scene, it is possible to predict an image for the same scene viewed under a different illuminant. It is shown that a method using a relationship between sensor outputs and color temperature is useful for the color correction.

1. はじめに

カラー画像からシーンを照明する光源を推定することはコンピュータビジョンや画像理解など、多くの分野において重要である。1枚のRGBカラー画像あるいはマルチバンド画像から、そのシーンを照明する光源がどのようなものであるかを推定する研究は従来から多く行われてきた。研究手法として、代表的なものである光源の分光分布を画像データから推定する手法は長い歴史がある¹⁻⁵⁾。最近はこの他に光源を白色光や昼光といった幾つかの光源に分類する手法が提案されている⁶⁻⁸⁾。前者の分光分布推定は多くの情報量を取得できる一方で数学的に複雑になり、処理が不安定になるという問題がある。後者の光源分類は獲得情報量が少なくなる反面、簡単な方法で安定した結果が得られるという特徴がある。

我々はこれまでに色温度に基づいて光源を分類する手法を提案した⁷⁻⁸⁾。原理としてFinlaysonの相関法⁶⁾の考え方を取り入れたが、不安定な色度ではなくて、センサの色空間で解析している。この方法では、センサ空間で色温度ごとにセンサ出力が占める色域をあらかじめ求めておき、獲得した画像の画素分布との相関を調べることによって色温度を推定する。この手法をセンサ相関法と呼ぶ。

本研究ではこの手法の改善と応用を目的として、センサ相関法を用いる実際的なアルゴリズムさらにカラー画像処理応用を展開した。特に推定精度や種々のシーンへの適用性を高めるために、アルゴリズムの改善を以下のような点で検討した：(1)色温度スケールと色知覚との対応、(2)相関値の計算、(3)画像の正規化。

応用として、照明光の色を推定できれば、同じシーンを異なった光源で照明した際のシーンを予測することができる。本報告では簡単な方法でこの予測が可能であることを示す。

2. 照明光と色温度

分類の対象とするシーン照明は黒体放射である。黒体放射は多くのシーン照明を近似するのでよく使用され

* 大阪電気通信大学総合情報学部情報工学科

** 大阪電気通信大学学術研究員

*** 京都大学大学院情報学研究所

る。黒体が放射する分光分布の色度と絶対温度は1対1対応する。このことから光源の色温度は黒体の絶対温度 (Kelvin, K) で定義される。任意の光源に対して、知覚的に最も近い黒体の色温度として相関色温度が定義される。シーン照明の相関色温度は測定した CIE(x, y)座標値からすでに開発されている計算法により求めることができる⁹⁾。黒体放射の分光分布は温度 $T(K)$ の関数として次式のようにかける。

$$M(\lambda) = c_1 \lambda^{-5} \{ \exp(c_2 / \lambda T) - 1 \}^{-1} \quad (1)$$

ここで c_1, c_2 は定数である。しかしながら、色温度スケールにおける差は人間の知覚スケールでの色差に対応しない。これは色温度スケールで均等に照明光を分類しても、知覚的に均等に分類したことにならないことを意味する。この問題を解決するために、我々は逆数色温度のスケールを使用する。 10^6 を色温度で割った値 ($10^6 K^{-1}$) を逆数色温度と呼ぶ。人間の視覚系には、色温度が高くなっていくと色の識別がつかなくなるが、逆数色温度ではこのようなことがなく、人間の知覚に対してほぼ均等であることが知られている。逆数色温度の単位には mired が用いられる。色温度 $T (K)$ と逆数色温度 T' (mired) は $T' = 10^6 / T$ で関係付けられる。

3. 照明色域

シーン照明を分類するために、色温度ごとにセンサ出力が占め得る色領域を色空間内に定義する。この色域を参照色域として、撮影したカラー画像の色域と比較する。そしてカラー画像の色域に最も適合する参照色域を選択し、対応する照明光の色温度を決定する。この参照色域を照明色域 (illuminant gamut) と呼ぶことにする。この色域には Vrhel らが作成した表面分光反射率データベースと Macbeth Color Checker の分光反射率を用いて作成した。また画像データの獲得には 3CCD カメラ (Minolta RD-175) を使用した。照明色域は計算機実験により求めた。カメラ出力は光源の分光分布 $M(\lambda)$, 表面分光反射率 $S(\lambda)$, カメラの分光感度 $r(\lambda), g(\lambda), b(\lambda)$ とすると以下の式で表される。

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \int_{400}^{700} M(\lambda) S(\lambda) \begin{bmatrix} r(\lambda) \\ g(\lambda) \\ b(\lambda) \end{bmatrix} d\lambda \quad (2)$$

各色温度の分光分布の下で、様々な物体表面に対するセンサ出力の RGB 値を求める。これらの RGB 値の凸包を 2 次元平面上に投影し、これらを照明色域として使用する。我々は分類の効率化のため、3次元の照明色域ではなく、分類はすべて凸包を RB 平面上に投影した 2 次元照明色域で色温度の解析をしている。図 1 は 18mired (8500K) から 400mired (2500K) の範囲で約 23.5mired 間隔の黒体放射に対する照明色域を示している。ただし、各照明色域は最大値が一定値 (255) になるように正規化している。

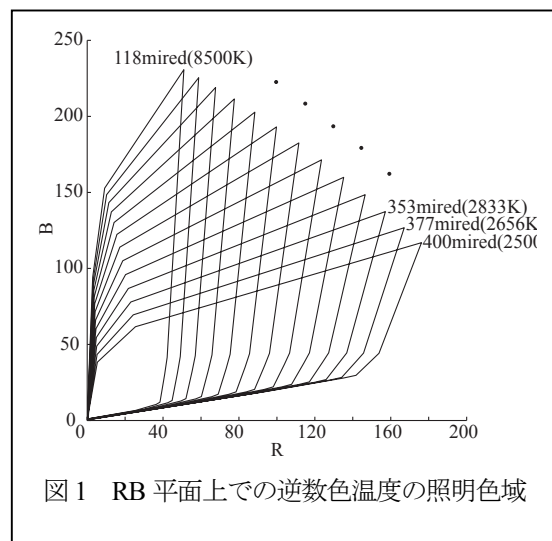


図 1 RB 平面上での逆数色温度の照明色域

4. 色温度推定の計算法

4.1 画素に基づく手法

観測画像の画素分布と各色温度ごとの照明色域との相関係数に基づいて照明光を分類する。なお、画素分布も照明色域と同様な方法で正規化を行う。ここで Macbeth Color Checker を用いた模擬実験を示す。まず Macbeth Color Checker の 24 色の分光反射率を計測した。次に 182mired (5500K) における画像データを計測した反射率と黒体放射を用いて(2)式から計算で求めた。さらに観測雑音を想定して、平均 0 で分散 1 の正規乱数を重畳した。図 2 は Macbeth Color Checker の合成画像である。図 3 には画素の (R, B) 値を照明色域と重ねてプロッ

トしている。明るい画素値が 182mired あたりの色域に適合している。相関係数が最大となる色温度は 188mire (5312K) で、これが推定値となる。上述の画素に基づいた相関は画像の色構成に大きく依存する。特に明るい無彩色がなくて、少数の有彩色の表面のみが観測されるとき、照明色域の選択にしばしば失敗することがある。いま Macbeth Color から無彩色のパッチを取り除いた画像を考える。図4は画素の(R, B)値の分布である。有彩色パッチの画素クラスタが RB 平面の異なった方向に広がって、適合する照明色域が一意に決まらない。



図2 Macbeth Checker 合成画像

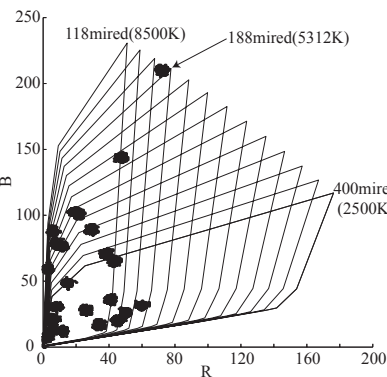


図3 (R, B)画素分布

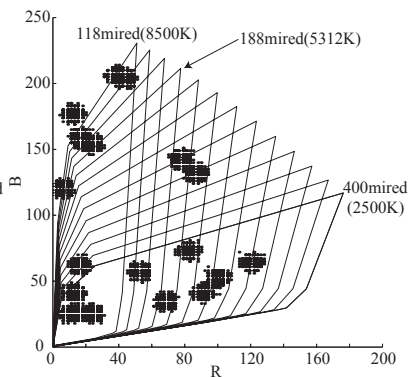


図4 有彩色の(R, B)画素分布

4.2 色域に基づく手法

画像色域の定義：

画素と照明色域間における相関の不安定性の問題を解決するために、画素分布ではなく、画像の色域を用いる手法を開発した。画像の色域は(R, B)平面上での画素分布の凸包として定義する。例えば、図4の画素分布に対する凸包は図5の $k=1.0$ の曲線である。これで囲まれた領域が画像の色域である。

相関関数は画素に基づく相関関数と異なって定義される。画像色域と照明色域間での相関計算では、照明色域の面積は色温度で変化することに注意する。また RB 平面上の画像色域の面積もシーンごとに異なる。し

たがって実際的な相関値は $r_{12} = S_{12} / \sqrt{S_1 S_2}$ のように色域の面積で正規化して定義される。なお S_1 , S_2 は画像色域と照明色域の面積, S_{12} は画像色域と照明色域間で重なり合う部分の面積とする。図6の $k=1.0$ の曲線はこのときの相関関数を示す。関数は単峰性で、色温度選択が可能であることがわかる。

画像のスケーリング：

センサ相関法では、画像間における全体的な輝度差を調整するために画像データのスケージング演算が必要である。この演算は画像色域の形や相対的な輝度情報を保存する。データを調整するために、 i 番目画素の輝度を I_i とおき、最大値を I_{\max} とおく。異なった画像間での輝度調整のために、センサ出力を RGB と最大値で次のように正規化する。

$$(R, G, B) = (R/I_{\max}, G/I_{\max}, B/I_{\max}) \quad (3)$$

さて、この正規化では原点からの最大距離が一定値になるように画素分布の正規化を行っているため、高強度の無彩色を含まないような画像では、低強度の有彩色が高強度の色として過度に拡大されて扱われてしまう。一般に暗い画像領域は照明光推定のためには、明るい領域よりも信頼性が低い。画像色域と

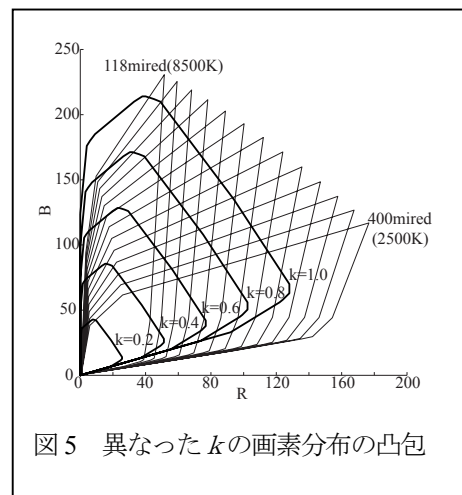


図5 異なった k の画素分布の凸包

照明色域間で最も適切な相関を求めるために、調整パラメータをもつ新しい正規化法を次式のように提案する。

$$(R, G, B) = (kR/I_{\max}, kG/I_{\max}, kB/I_{\max}) \quad (4)$$

ここで k はスケールパラメータである。

図5の画像に対してこの手法の有効性を調べる。図6はパラメータ k の異なった値で正規化した (R, B) 値の凸包を示す。これらの画像色域の集合を用いて図7に示す相関関数を算出した。図7で各曲線は異なった k 値に対する相関関数を示す。最良の k 値を選択するために、全関数にわたる最大ピークを選んだ。この例では $k=0.8$ で、逆数色温度が 212mired (4722K) のとき相関のピークが現れている。このような手続きをすべての画像に適用する。

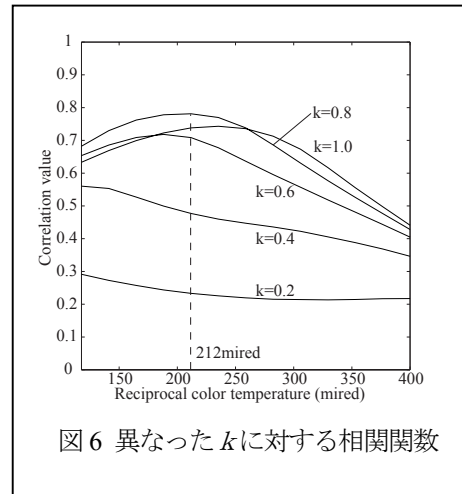


図6 異なった k に対する相関関数

5. 実画像への適用

色域に基づいた照明光分類アルゴリズムを図7(左)の画像に適用した。この画像は戸外の相関色温度 5415K の昼光下で撮影したものである。この画像の (R, B) 値の分布を図7(右)に示す。 $k=0.8$ と $k=1.0$ に対する画像色域を描いた。このシーンは高明度の色を含まないので、画素は RB 平面で大きく広がっている。相関関数の最大は $k=0.8$ に対して 188mired (5312K) の色温度であった。この推定値に対して画素データに基づく従来法では 235mired (4249K) であった。つまり 47mired の推定精度の向上がみられた。図8の実線は推定した黒体放射の分光分布を示す。点線は白色標準板と分光放射輝度計で直接計測した分光分布である。また一点鎖線は画素に基づく従来法による推定分布である。

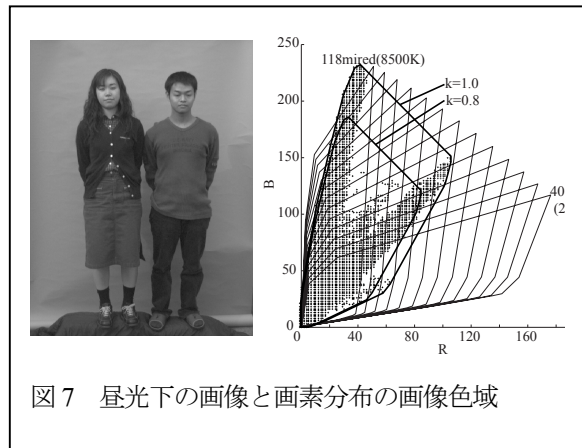


図7 昼光下の画像と画素分布の画像色域

同様に高明度色をほとんど含まないシーンの撮影画像 10 枚に適用した。同時計測した照明色温度は 185mired (5415K) から 193mired (5193K) であった。推定を行ったところ、従来法での誤差が平均 35.0mired であったのに対し、新しい方法での平均誤差は 4.5mired となった。さらに2つの画像データベースに適用した。一つはハロゲンランプ下の室内シーンの画像 12 枚で色温度は 322mired (3106K) から 328mired (3045K) である。他方は昼光下の屋外シーンの画像 27 枚で色温度 166mired (6038K) から 254mired (3941K) である。まず、前者の画像集合について従来法で平均誤差 8.5mired に対して、本提案法では平均誤差が 6.3mired となった。また、後者の昼光下での画像については従来法での誤差が 12.2mired に対して 5.9mired と大きく向上した。

6. 色補正への応用

照明光の色温度が推定されれば、異なった色温度の照明下で同一シーンを観測したときのカメラのセンサ出力を予測することが可能である。色順応予測に類似した簡

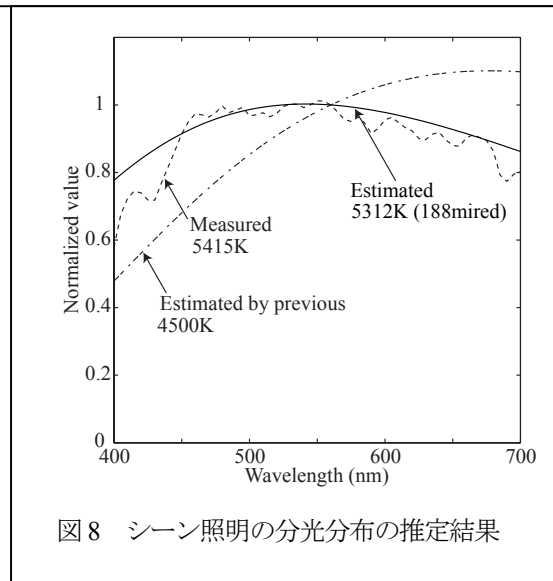


図8 シーン照明の分光分布の推定結果

単な RGB 値の変換で実施する手法を開発した。

照明光の強度と色が変化しても、人間の視覚系の機能はあまり大きく影響を受けない色恒常性が知られているが、これには眼の順応が大きく影響している。例えば、昼光で照らされた屋外から白熱電球で照明された屋内に入ると、最初はすべての物体が黄色味を帯びてみえるが、慣れてくると白色にも白色感覚が戻ってくる。色座標系では、一方の照明下での色座標値が他方の照明下での色座標値に変化する。一方の色に対して他方を対応色という。von Kries はこの対応色を予測する方法を考案した⁹⁾。照明光の分光分布が変化すると、それに応じて各受光器は基本分光感度の形は変えずに、その感度バランスを白色の見えが一定となるように調整することにより、色順応が生ずると考えている。これをカメラに置き換えると、照明光の変化に対して RGB 各色にあるバランスを付加することにより、画像予測が可能であるといえる。このような考え方を利用した簡便な画像予測法を提案する。まず白色に基づく方法と次に平均的な反射率を用いる方法である。

6.1 白色値を用いた手法

あらかじめカメラの分光感度と各色温度における黒体分光分布を用いて、色温度に対するカメラ RGB の変化を図9のように求める。基準色温度でのカメラ値と目標色温度でのカメラ値の比

$$[w_R, w_G, w_B] = [R_T/R_O, G_T/G_O, B_T/B_O] \quad (5)$$

は図10の3種類の曲線から求まる。つまり基準色温度下でのRGB値に基づいて、目標色温度下でのRGB値は比率を重みとして次式のように算出することができる。

$$[R_T, G_T, B_T] = [w_R R_O, w_G G_O, w_B B_O] \quad (6)$$

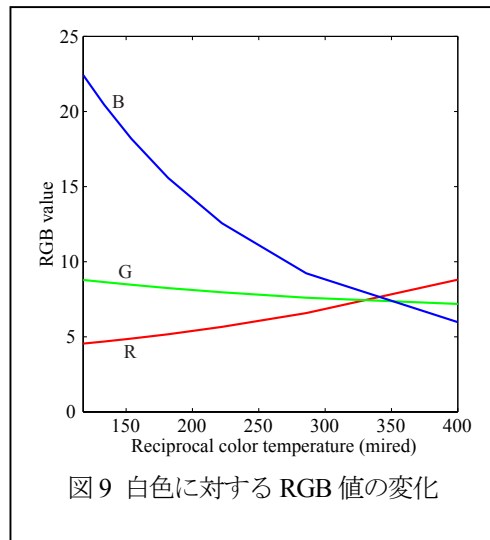


図9 白色に対するRGB値の変化

6.2 平均分光反射率を用いた手法

現実のシーンでは様々な色が存在し、シーンによってばらつきが存在する。そこで、分光反射率データベースからその平均の分光反射率を求めてこれを用いた。平均値を基準にした各色温度に対するRGB値の変化は図10と比較的類似している。また基準色温度下でのRGBデータからの画像予測は(6)式で行う。

6.3 結果

本手法を一般的な三次元物体画像に適用した。図10は白熱電球下で計測した基準画像であり、色温度は3053Kであった。図11は人工太陽光下で計測した目標画像であり、色温度は5326Kであった。先ほどと同様に白熱電球下での画像から人工太陽光下での画像を予測した。両手法とも精度よく色補正ができたが、特に黄色などの彩度の高い色において平均反射率データベース法(図12)が良好な結果が得られた。



図10 白熱電球下での画像



図11 人工太陽光下での画像



図12 平均反射率で予測した画像

7. おわりに

本研究では、カラー画像からシーン照明の色温度推定を行うセンサ相関法の改善とその応用を目的として、実際的なアルゴリズム開発と画像処理への応用を展開した。特に高明るさの色を含まないようなシーンの画像に対しても適用可能なアルゴリズムを開発した。色温度推定の実験結果から、シーンを異なった光源で照明したシーンの画像を予測することができることがわかった。さらにセンサ相関法は蛍光灯の色温度推定にも適用可能であることがわかった[6]。なお分光分布を推定する効率的なアルゴリズムについては現在検討中である。

掲載論文リスト

- [1] S. Tominaga: Natural Image Database and Illuminant Classification Research *IS&T/SPIE's Symposium on Electronic Imaging – Internet Imaging III*, pp.1-9, San Jose, Jan. 2002.
- [2] 富永昌治, 石田淳史, ブライアン A. ワンデル: センサ相関法によるシーン照明の色温度推定, 電子情報通信学会論文誌(D-II), Vol.J85-D-II, No. 5, pp.1180-1189, May 2002
- [3] S. Tominaga: Natural Image Database and Its Use For Scene Illuminant Estimation, *Journal of Electronic Imaging*, Vol. 11, No. 5, pp.434-444, Oct. 2002.
- [4] S. Tominaga and N. Tanaka: Spectral Measurement of Ambient Lighting and Its Application to Image Rendering, *Proc. IAPR Workshop on Machine Vision Applications (MVA2002)*, pp.554-557, Nara, Dec. 2002.
- [5] S. Tominaga and N. Tanaka : Spectral Measurement of Omnidirectional Light Distribution and Its Application to Image Rendering, *Proc. Eleventh Color Imaging Conference*, pp.30-35, Scottsdale, Arizona, Nov. 2003.
- [6] S. Tominaga and S. Okamoto: Color Temperature Estimation of Fluorescent Scene Illumination, *Proc. Eleventh Color Imaging Conference*, pp.82-87, Scottsdale, Arizona, Nov. 2003.
- [7] H. Sakai and S. Miyagi: Analysis of an adaptive filter algorithm for hybrid ANC system, *Proc. Int. Conf. Acoustics, Speech, Signal Processing*, vol. II, pp. 1553-1556, 2002
- [8] S. Miyagi and H. Sakai: Convergence analysis of alias-free subband adaptive filters based on a frequency domain technique, *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 52, no. 1, pp. 79-89, Jan. 2004

謝辞

本共同研究は平成 13 年度大学共同研究推進費（研究課題「画像からシーン照明を推定する方法に関する研究」）の助成により遂行された。ここに記して謝意を表します。

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, pp.29-33, 1986.
- 2) S.Tominaga and B. A. Wandell: The standard surface reflectance model and illuminant estimation, *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol.6, pp.576-584, 1989.
- 3) B.V. Funt et al.: Color constancy from mutual reflection, *Int. J. of Computer Vision*, Vol.6, pp.5-24, 1991.
- 4) S.Tominaga, Multichannel vision system for estimating surface and illumination functions, *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol.13, pp.2163-2173, 1996.
- 5) D.H. Brainard and W.T. Freeman: Bayesian color constancy, *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol.14, pp.1393-1411, 1997.
- 6) G.D. Finlayson, P.M. Hubel, and S. Hordley: Color by correlation, *Proc. Fifth Color Imaging Conf.*, pp.6-11, 1997.
- 7) 富永昌治, 戎井悟, B. A. Wandell: シーン照明の色温度推定, 信学技法, PRMU99-184, pp.51-56, 1999.
- 8) S. Tominaga, S. Ebisui, and B.A. Wandell: Scene illuminant classification -Brighter is Better-, *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol. 18, No. 1, pp. 55-64, 2001.
- 9) G.Wyszecki and W.S. Stiles: *Color science: concepts and methods*, Wiley, 1982.