

黒体放射の光源制約を用いた色恒常性

川上玲[†] 高松淳[†] 池内克史[†]

[†] 東京大学 生産技術研究所 〒 153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1 駒場第二キャンパス E 棟 405

E-mail: †{rei,j-taka,ki}@cvl.iis.u-tokyo.ac.jp

あらまし 光源に黒体放射の制約を用いた、色恒常性手法を提案する。二種類の黒体光源下での色度を入力として、それぞれの色温度を推定できることを証明する。理想的な状況下でのシミュレーション実験では非常に精密な精度での推定が可能である結果が得られた。実データでの実験では、モデル化誤差の影響で推定精度が低下した。この結果から、実環境におけるモデル化誤差の影響を考察し、手法のロバスト性について議論する。

キーワード 色恒常性, 黒体放射, ナローバンドカメラの仮定

Color Constancy using Blackbody Illumination Constraint

Rei KAWAKAMI[†], Jun TAKAMATSU[†], and Katsushi IKEUCHI[†]

[†] Institute of Industrial Science, University of Tokyo, 4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo, 153-8505, JAPAN

E-mail: †{rei,j-taka,ki}@cvl.iis.u-tokyo.ac.jp

Abstract We propose a color constancy method using blackbody illumination constraint. Inputting two chromaticities of an identical surface taken under two blackbody illuminants, we can estimate each illuminant's color temperature. From the simulation experiments conducted under ideal condition, we found that the accuracy of the estimation are extremely well, though the accuracy degraded under real condition. We discuss the effect of the modelling error and the robustness of our method.

Key words Color constancy, blackbody radiation, narrowband assumption

1. はじめに

近年文化財の保護などを目的とした現実感の高いモデルの生成が盛んであるが、照明光により変化する物体の色から物体に固有な色を推定する、いわゆる色恒常性問題が重要な課題となっている。現実を忠実にモデル化する上で、色は物体を特徴づける重要な要素である。物体の色は物体表面の分光反射率と光源の分光分布の積で決定されるため、通常、未知の反射率を推定する場合、既知の光源下で色を計測し反射率を算出する。しかし屋外などの照明が人工的に制御できない環境下では、カメラなどのセンサから得られた色からの色恒常性が実現できれば非常に有益となる。

色恒常性はコンピュータビジョンにおける多くの問題に影響を及ぼすため、これまでに数多くの手法が提案されてきている。これらの手法は、対象物体によって Dichromatic モデルに基づく手法と拡散反射を扱う手法に大別できる。前者 [8], [9] は入力画像中に金属光沢のようなハイライトが含まれる必要があるが、後者 [1] ~ [3], [7], [10], [11] は拡散反射物体を対象とする。我々の対象とする物体は拡散反射物体であるので、後者に着目する。

拡散反射物体を対象とする手法のほとんどは、均等な照明下

での単一画像を入力とする。これらの手法は対象とする物体色に強い制約がある。たとえば事前にデータベース化された物体色しか扱えない。また入力画像中に含まれる物体色の種類が少数である場合、推定が正しく行えない [10], [11]。これに代わる手法として、光源色（照明色）を変化させ色恒常性を実現する手法が提案された [1] ~ [3]。光源色の変化は強力な条件であり、色恒常性問題を解く鍵となる。D'zamura は光源の分光分布や表面の分光反射率を低次元の基底の線形和で近似し、色恒常性問題を線形に解く手法を提案した [2]。この手法の欠点の一つは実画像に対して推定が不安定になることが挙げられる。Ohtara は [2] の仮定に更に CIE 昼光の制約を加え、推定を安定化した [7]。Finlayson らは二種類の光源下で物体色を撮影し、光源色の変化が逆色度空間で直線で近似できるという仮定を用いた推定を行った [3]。Barnard らはなめらかに変化する照明下で撮影された画像に対し Retinex 理論 [6] を実装し、異なる光源下での物体色を自動的に獲得して Finlayson らの手法 [3] を用いた推定を行った [1]。

本稿では [3] や [1] と同様、センサの感度にナローバンドを仮定し色恒常性を定式化する。[3] や [1] は光源が逆色度空間で直線上を振舞うと仮定したが、筆者らは光源に黒体放射を仮定

しても光源色の推定が数値解析的に解けることを証明する．シミュレーション及び実データを用いた実験により、手法の性能を評価する．

以降の章立ては次の通りである．2章では物理法則や仮定に基づく色恒常性の定式化と光源色度の定式化について述べる．3章では提案手法を述べる．4章ではシミュレーション実験と、実画像を用いた実験結果を示す．5章では結果に基づきモデル化誤差の影響について考察する．最後に6章で本稿についてまとめる．

2. 物理的基礎

2.1 色恒常性の定式化

カメラや人間の目が観測する色とは、光源から放射された光が物体表面で反射し、それがセンサのカラーフィルタを通過して得られたものである．色恒常性は、得られた色から逆の過程を辿り、物体表面の反射率や光源の色を推定する作業である．我々はこの作業を、色度における反射率/光源の分離と帰着する．すなわち、次のような式

$$i_c = s_c e_c \quad c = \{r, g\} \quad (1)$$

において、画像色度 i_c から物体の反射率の色度 s_c と光源の色度 e_c の値を推定することに帰着する．ただし、色度とはカメラや人間の目といったカラーセンサにおける各フィルタ（例えば R, G, B ）の輝度値の比のことで、次式のように B による正規化として定義する．

$$i_r = \frac{I_R}{I_B}, \quad i_g = \frac{I_G}{I_B} \quad (2)$$

この定義の下では、式 (1) の関係が成立する．

式 (1) の導出は、物理的なカメラモデルにナローバンドの仮定^(注1)を置き、これを色度空間に変換することで行える．詳細は以下の通りである．デジタルカメラなどのデバイスで物体を撮影した場合、光源から放射された光が物体表面で反射し、カメラのカラーフィルタを通過して得られる画素値 I_c は次式 (3) のように表せる．

$$I_c = \tau \int_{\Omega} S(\lambda) E(\lambda) q_c(\lambda) d\lambda \quad c = \{R, G, B\} \quad (3)$$

$$\simeq \tau S_c E_c \quad (S_c = S(\lambda_c), E_c = E(\lambda_c)) \quad (4)$$

ただし $S(\lambda)$ は物体表面の分光反射率、 $E(\lambda)$ は光源の分光分布、 q_c はカラーフィルタの分光感度であり c はフィルタの種類を表す．積分範囲は可視光領域 (Ω) である． τ は絞り、シャッタースピード、電気的な増幅によるカメラのゲインを表す．ナローバンドの仮定から、 $q_c(\lambda) \simeq \delta(\lambda - \lambda_c)$ であるから、式 (4) が得られる．

反射率と光源の輝度の分離には、スケールの曖昧性があることが知られている．すなわち、暗い表面と明るい照明の組

み合わせなのか、その逆なのかを見た目から区別することはできない．したがって、色恒常性ではフィルタ毎の輝度値の比（色度）の推定が行えれば十分とされる．式 (4) を既に述べた色度の定義（式 (2)）に代入すると式 (1) が得られる．ただし $s_r = S_R/S_B$, $s_g = S_G/S_B$ であり、 e_c に関しても同様である．

2.2 光源色度の定式化

自然界に存在する光源は熱発光するものがほとんどである．熱発光する光源の分光分布は黒体放射で近似できる（多くの自然光源も黒体放射で近似できることが実験的に報告されている [5]）．よって、光源の色度を黒体放射を用いて定式化する．黒体放射とは黒体を熱したときに放射される光の分光分布のことで、温度の関数であるから、光源色度も温度の関数となる．本来二次元のベクトルである色度を、温度 T という単一のパラメータで扱うことができるため、非常に有用である．

光源色度の式は、黒体放射にナローバンドカメラの仮定を置き、色度に変換することで求めることができる．すなわち光源の色度 $\vec{e} = [e_r, e_g]^t$ 、黒体放射を $M(\lambda)$ とすると、

$$e_r = \frac{M(\lambda_R)}{M(\lambda_B)} = k_r \frac{(\exp(c_2/T\lambda_B) - 1)}{(\exp(c_2/T\lambda_R) - 1)} \quad (k_r = \frac{\lambda_B^5}{\lambda_R^5})$$

$$e_g = k_g \frac{(\exp(c_2/T\lambda_B) - 1)}{(\exp(c_2/T\lambda_G) - 1)} \quad (k_g = \frac{\lambda_B^5}{\lambda_G^5}) \quad (5)$$

となる．ただし、

$$M(\lambda) = c_1 \lambda^{-5} [\exp(c_2/\lambda T) - 1]^{-1} \quad (6)$$

であり、 $\lambda_R, \lambda_G, \lambda_B$ はカラーフィルタの分光感度の中心波長、 c_1, c_2 は定数で、それぞれ $3.7418 \times 10^{-16} (\text{Wm}^2)$ 、 $1.4388 \times 10^{-2} (\text{mK})$ 、 λ は波長 (m)、 T は温度 (K) である．色度は式 (2) の定義を用いた．温度 T は色温度と呼ばれる．

3. 提案手法

3.1 問題設定

色恒常性は本来、反射率の色度を推定する問題であるが、式 (1) と式 (5) の関係から、光源の色温度 T を推定することと等価となる．今、ある物体を色温度の異なる二つの光源下（そのときの色温度を T_1, T_2 とする）で撮影した画像色度から、それぞれの光源の色温度を推定することを考える．このためには、「反射率が等しい」という拘束式を用いる．この拘束式は、それぞれの画像色度を $\vec{i}_1 = [i_{r1}, i_{g1}]^t$, $\vec{i}_2 = [i_{r2}, i_{g2}]^t$ とすると、式 (1) 及び式 (5) を用いて、次のように表せる．

$$\Theta_r(T'_1, T'_2) = i_{r1} \Phi_r(T'_1) \Phi_b(T'_2) - i_{r2} \Phi_r(T'_2) \Phi_b(T'_1) = 0 \quad (7)$$

$$\Theta_g(T'_1, T'_2) = i_{g1} \Phi_g(T'_1) \Phi_b(T'_2) - i_{g2} \Phi_g(T'_2) \Phi_b(T'_1) = 0 \quad (8)$$

ただし $T' = c_2/T$ とし、

$$\Phi_r(T') = \exp(T'/\lambda_R) - 1$$

$$\Phi_g(T') = \exp(T'/\lambda_G) - 1$$

$$\Phi_b(T') = \exp(T'/\lambda_B) - 1 \quad (9)$$

(注1): センサのカラーフィルタの感度は特定の波長 λ_c を中心として非常に狭い帯域に集中していると仮定する．すなわち、 q_c は λ_c を中心としたデルタ関数で近似できるとする．

とされている．式 (7) 及び (8) の導出の詳細は付録 A を参照されたい．これら二つの式から, T'_1, T'_2 が一意に決定されれば色恒常性が解決できる．

3.2 囲い込み法を用いた解法

式 (7) 及び (8) は, 非線形最適化手法により二乗和を最小化することで解く方法もありえるが, 関数の特性上安定に収束しない．よって本論文では, 囲い込み法を用いた安定な解法を提案する．おおよそのアルゴリズムは以下ようになる．

- (1) まず, 人手によりおおよその初期解 t'_1, t'_2 を与える．
- (2) t'_1 が正しいと仮定して, 式 (7) と式 (8) を独立に解く．解をそれぞれ t'_{2r}, t'_{2g} とする．
- (3) 得られた 2 つの解が十分に近ければ $t'_1, (t'_{2r} + t'_{2g})/2$ を解として出力．
- (4) そうでなければ t'_{2r} と t'_{2g} の差が小さくなるように t'_1 を修正する．
- (5) 2 に戻る．

このアルゴリズムを実現するためには, 次の二点

- 式 (7) と式 (8) をどのように解くか
- t'_{2r} と t'_{2g} の差が減少する場合の t'_1 の決定を調査する必要がある．

3.2.1 ステップ 2 の解法

あらかじめ結論を述べれば, ある T'_1 が与えられたとき, 式 (7) もしくは式 (8) を満たす T'_2 は, 特定の条件下で必ず存在する．解は囲い込み法によっていくらかでも精度よく計算できる．囲い込むべき初期値も自動的に決定できる．これらのことは, 次の四つの命題

- (1) T'_1 を正の任意の定数であるとすると, 関数 Θ_* は下に凸である．
- (2) $\Theta_*(T'_1, 0)$ は任意の T'_1 に対して 0 となる．
- (3) T'_1 を正の任意の定数とすると, $\lim_{T'_2 \rightarrow \infty} \Theta_*(T'_1, T'_2) = +\infty$ が成り立つ．
- (4) T'_1 を正の任意の定数であるとすると, 式 (7) が $T'_2 > 0$ である解を持つための必要十分条件は,

$$i_{r2}\Phi_b(T'_1)/\lambda_R - i_{r1}\Phi_r(T'_1)/\lambda_B > 0 \quad (10)$$

である．同様に式 (8) が $T'_2 > 0$ である解を持つための必要十分条件は,

$$i_{g2}\Phi_b(T'_1)/\lambda_G - i_{g1}\Phi_g(T'_1)/\lambda_B > 0 \quad (11)$$

である．

から導出される．証明を以下に示す．

命題 1 の証明．式 Θ_r の極値での二階微分が正であることを示す． Θ_r を使って証明するが, どちらの式を使っても同様にできる． Θ_r を T'_2 で微分すると

$$\frac{\partial \Theta_r}{\partial T'_2} = \frac{i_{r1}}{\lambda_B} \Phi_r(T'_1) \exp(T'_2/\lambda_B) - \frac{i_{r2}}{\lambda_R} \exp(T'_2/\lambda_R) \Phi_b(T'_1)$$

が得られる．これより極値となる T'_2 を計算すると

$$T'_2 = \frac{\lambda_R \lambda_B}{\lambda_R - \lambda_B} \left(\log \left(\frac{i_{r2}}{\lambda_R} \Phi_b(T'_1) \right) - \log \left(\frac{i_{r1}}{\lambda_B} \Phi_r(T'_1) \right) \right) \quad (12)$$

となる．この結果は, 関数 Θ_r の極小もしくは極大点が一つしかないことを意味し, また関数 Θ_r および関数 $\partial \Theta_r / \partial T'_2$ の連続性から, 関数 Θ_r は上または下に凸の関数である．さらに T'_2 で微分すると,

$$\frac{\partial^2 \Theta_r}{\partial T'^2_2} = \left(\frac{1}{\lambda_B} - \frac{1}{\lambda_R} \right) \frac{i_{r1}}{\lambda_B} \Phi_r(T'_1) \exp(T'_2/\lambda_B) + \frac{i_{r1}}{\lambda_B} \frac{\partial \Theta_r}{\partial T'_2}$$

となる．極値の T'_2 では $\partial \Theta_r / \partial T'_2 = 0$ だから, 極値では,

$$\frac{\partial^2 \Theta_r}{\partial T'^2_2} = \left(\frac{1}{\lambda_B} - \frac{1}{\lambda_R} \right) \frac{i_{r1}}{\lambda_B} \Phi_r(T'_1) \exp(T'_2/\lambda_B) \quad (13)$$

$\lambda_B < \lambda_R$ であるから, 式 (13) > 0 となる．これよりこの関数が下に凸であることが示された． \square

命題 2 : 自明． \square

命題 3 : 自明． \square

命題 4 の証明．前半部分のみを証明する．後半部分も同様に証明できる．まず命題 1 より, Θ_r は下に凸の関数である．つまり答えはあつて高々二つである．命題 2 よりそのうち一つの解は 0 である．このことから $T'_2 > 0$ となる解が存在するためには, Θ_r が $T'_2 > 0$ で極小値を取ることである．式 (12) よりその条件は前述の式のように書くことができる．また命題 3 より, 必ずそのような解は存在する． \square

3.2.2 ステップ 4 の解法

初期解 t'_1 が与えられたときの, 式 (7) と式 (8) の解をそれぞれ t'_{2r} と t'_{2g} とする．囲い込み法により解を求める場合, t'_{2r} と t'_{2g} の差が 0 を超えるとき (すなわち真の解のまわり) の, t'_1 に対する $t'_{2r} - t'_{2g}$ の変化を調べれば十分である．よって, 真の解のまわりで式 (7) と式 (8) をテーラー展開で近似し, これを調べる．結論から述べると,

(5) 式 (7) 及び (8) の真の解を \hat{T}'_1, \hat{T}'_2 とする．この真の解の周りで, T'_1 が増加 (減少) すれば, $T'_{2r} - T'_{2g}$ は増加 (減少) する性質がある (ただし $\hat{T}'_1 > \hat{T}'_2$ の条件下) ．

という命題がほぼ成り立つ．この裏づけは以下の通り．

命題 5 の裏づけ．式 (7) を適当な (t'_1, t'_{2r}) の周りでテーラー展開する．

$$\begin{aligned} \Theta_r &= \Theta_r(t'_1, t'_{2r}) \\ &+ \left(\frac{i_{r1}\Phi_b(t'_{2r})}{\lambda_R} \exp\left(\frac{t'_1}{\lambda_R}\right) - \frac{i_{r2}\Phi_r(t'_{2r})}{\lambda_B} \exp\left(\frac{t'_1}{\lambda_B}\right) \right) \Delta t'_1 \\ &+ \left(\frac{i_{r1}\Phi_r(t'_1)}{\lambda_B} \exp\left(\frac{t'_{2r}}{\lambda_B}\right) - \frac{i_{r2}\Phi_b(t'_1)}{\lambda_R} \exp\left(\frac{t'_{2r}}{\lambda_R}\right) \right) \Delta t'_{2r} \end{aligned}$$

ただし $\Delta t'_1 = T'_1 - t'_1$, $\Delta t'_{2r} = T'_{2r} - t'_{2r}$ である．これを式 (7) を用いて整理すると,

$$\Theta_r = i_{r1}\Phi_r(t'_1)\Phi_b(t'_{2r})(H_r(t'_1)\Delta t'_1 - H_r(t'_{2r})\Delta t'_{2r}) \quad (14)$$

となる．ただし,

$$H_r(t) = \frac{\exp(t/\lambda_R)}{\lambda_R \Phi_r(t)} - \frac{\exp(t/\lambda_B)}{\lambda_B \Phi_b(t)}$$

とされている．同様に，式 (8) を (t'_1, t'_{2g}) の周りで展開し整理すると，

$$\Theta_g = i_{g1} \Phi_g(t'_1) \Phi_b(t'_{2g}) (H_g(t'_1) \Delta t'_1 - H_g(t'_{2g}) \Delta t'_{2g}) \quad (15)$$

が得られる．式 (14)(15) より， T'_1 の変化に対する T'_{2r} と T'_{2g} の差は，局所的には以下の式で表される．

$$T'_{2r} - T'_{2g} = \left(\frac{H_r(t'_1)}{H_r(t'_{2r})} - \frac{H_g(t'_1)}{H_g(t'_{2g})} \right) \Delta t'_1 + (t'_{2r} - t'_{2g})$$

いま，真の解 \hat{T}'_1, \hat{T}'_2 の周りでは上式は

$$T'_{2r} - T'_{2g} = \left(\frac{H_r(\hat{T}'_1)}{H_r(\hat{T}'_2)} - \frac{H_g(\hat{T}'_1)}{H_g(\hat{T}'_2)} \right) \Delta t'_1 \quad (16)$$

となる．ここで，次のような関数

$$I(T'_1, T'_2) = H_r(T'_1) H_g(T'_2) - H_g(T'_1) H_r(T'_2) \quad (17)$$

は明らかに $I(T'_1, T'_2) = -I(T'_2, T'_1)$ である．また， $T'_1 > T'_2$ ならば $I(T'_1, T'_2) > 0$ であることを，数値計算により 2000[K] から 10000[K] の間で，1 刻みですべての場合を計算して確認した．よって， $\hat{T}'_1 > \hat{T}'_2$ の条件下では， $\Delta t'_1$ が正(負)ならば， $T'_{2r} - T'_{2g}$ は正(負)である． □

したがって $t'_{2r} - t'_{2g} = 0$ を与える t'_1 は，3.2.1 節と同様，囲い込み法により解決することができる．

4. 実験

4.1 誤差の評価方法 (逆色温度)

提案手法による推定値と真値との誤差は，推定値の逆色温度と真値の逆色温度の差として定義する [4]．

$$err = T_{estimate}^{inv} - T_{truth}^{inv} \quad (18)$$

ただし，逆色温度とは

$$T^{inv} = 10^6 / T \quad (19)$$

として定義される．逆色温度は Judd によって提案された色変化の単位であり，mired(=10⁶ K⁻¹) と呼ばれる．経験的に，人間が気がつく最低限の色変化は 5.5[mired] であることが報告されている [4], [11]．色温度の 2500[K] から 8500[K] は，逆色温度で 400[mired] から 118[mired] に対応する．

4.2 理想的な環境下でのシミュレーション実験

シミュレーション実験では，

- 様々な反射率や光源を用いて，本手法による推定値が真値に収束するかどうか

- 初期解が推定に影響するかどうか

を調べた．これらの実験では，理想的な環境を実現するため，

カメラのフィルタは特定の波長 (赤：624[nm]，緑：548[nm]，青：480[nm]) を選択し他は全て 0 となるような関数とした．また，光源は完全な黒体放射とした．反射率は，スペクトルメータ (Photo Research PR-650) を使用して既知光源の下 GretagMacbeth 社のカラーチェッカーを測定して得たデータを用いた．

前半の実験では，反射率として，カラーチェッカーの赤，青，緑，シアン，マゼンタ，黄色を用いた．光源の色温度は，2500, 3500, 4500, 5500, 6500, 7500, 10000[K] の 7 種類を使用し，全ての組み合わせで推定を試みた．その結果，全ての場合で真値に収束し，真値との誤差はほぼ 0 となった．参考までに，平均推定誤差を表 1 に載せる．従来手法 [3] による推定結果の平均誤差も記載した．この実験から，理想的な環境下では提案手法により必ず真値が推定できることが分かった．光源の色温度ごとの推定誤差の比較結果を表 2 に載せる．二つの光源の色温度が異なるほど推定精度が向上する傾向が見られる．

表 1 6 種類の反射率，及び 7 種類の光源を用いた実験における平均推定誤差 (紙面の都合上 10⁻⁵ を E-5 と表記した)

	T_1 error [mired]	T_2 error [mired]
Our method	1.64E-5	1.74E-5
Finlayson et al.	5.11E1	5.52E1

表 2 光源の色温度 [K] ごとの推定誤差 [mired] (ただし T_1 に関する推定誤差のみ) の比較．

	3500	4500	5500	6500	7500	10000
2500	4.65E-5	1.55E-5	1.05E-5	5.33E-6	6.33E-6	3.67E-6
3500	-	1.02E-5	6.17E-6	5.00E-6	4.33E-6	3.83E-6
4500	-	-	7.67E-6	4.00E-6	2.83E-6	3.83E-6
5500	-	-	-	4.33E-6	1.23E-5	2.48E-5
6500	-	-	-	-	4.40E-5	3.27E-5
7500	-	-	-	-	-	9.12E-5

次に，初期解が推定にどのように影響するかを調べた．適当な反射率と色温度 (カラーチェッカーの赤，3500[K]，7500[K]) を用いて，初期解を真値の周りに ±1000[K] の間にランダムに分布させ，五百回推定を行った．平均推定誤差は T_1 が 3.53×10^{-6} [mired]， T_2 が 3.78×10^{-6} [mired] となり，それぞれの分散は 2.18×10^{-6} ， 2.35×10^{-6} [mired] となった．推定結果の精度は 10⁻⁶ 程度で計算機の精度の限界であり，初期解の違いによる推定結果のばらつきは，これと同程度のものであるので，推定結果は初期解にはほぼ依存しないことが分かる．ただし，真値の大小関係 (たとえば $T_1 > T_2$) が，初期解で逆転している場合 ($T_1 < T_2$)，推定結果として 2 兆 [K] といった非現実的な値が算出されることがある．真値の大小関係が初期解で保持されていればよい．

4.3 実データを用いた実験

実際のデータを使い，手法の有効性を確かめる実験を行った．光源は，Judd らによる屋外光のデータ (D48, D55, D65, D75, D100) [5] 及び，CIE 標準光源 (A,B,C) を使用した．反射率は GretagMacbeth 社のカラーチャートの赤，青，緑，シ

アン, マゼンタ, 黄色のデータを用いた。カメラの分光感度の関数として, MellesGriot 社の半値全幅が 10nm のバンドパスフィルター (03FIV119, 03FIV111, 03FIV004) の特性を使用した。それぞれの中心波長は, 赤: 620[nm], 緑: 532[nm], 青: 450[nm] である。

全ての光源, 及び反射率の組み合わせから, 提案手法により推定を行った結果の平均誤差を表 3 に示す。表 3 にあるように, 実データではモデル化誤差の影響により, 提案手法の推定精度が従来手法のそれよりも低下した。モデル化誤差には, 実際の光源が内包する黒体放射からの誤差と, カメラの分光感度が内包するデルタ関数からの誤差がある。次章ではこの二点について, 推定結果への影響を考察する。

表 3 6 種類の反射率, 及び Judd らによる屋外光と CIE 標準光源を用いた実験における平均推定誤差。

	T_1 error [mired]	T_2 error [mired]
Our method	3.67E3	1.17E4
Finlayson et al.	7.97E1	8.43E1

5. 考 察

5.1 光源のモデル化誤差の影響

黒体放射による光源の色度に, モデル化誤差 Δe_r 及び Δe_g を含ませたシミュレーション実験 (その他は全て理想的な環境とした) を行った。モデル化誤差の割合に対する, 提案手法による推定誤差の変化を図 1 に示す。図 1 の ΔT_1 が T_1 の推定誤差, ΔT_2 が T_2 の推定誤差を表す。

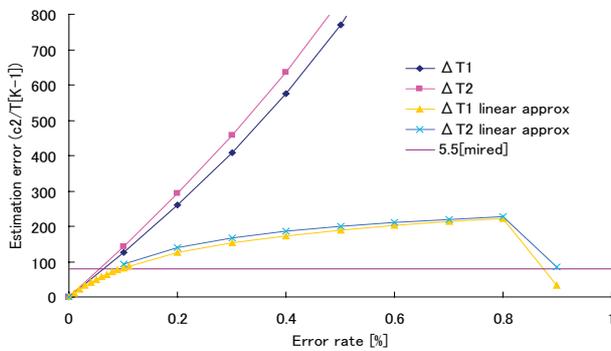


図 1 モデル化誤差の割合 [%] に対する推定誤差 [c_2K^{-1}] の変化。

横軸の単位は [%], 縦軸の単位は [c_2K^{-1}] で, c_2 は 1.44×10^7 である。図 1 には人間が最低限気が付く変化 (5.5[mired]) の線も示した。図 1 から, 5.5[mired] までの精度を出すためには, モデル化誤差は 0.1% 未満である必要があることが分かる。

光源が誤差を内包している場合の推定誤差 ΔT_1 及び ΔT_2 は, テーラー展開の線形近似を使って, 付録 B の式 (A9)(A10) のように近似できる。これらの式による ΔT_1 と ΔT_2 が図 1 の ΔT_1 linear approx, 及び ΔT_2 linear approx である。モデル化誤差の割合が増すにつれ, ΔT_1 や ΔT_2 は線形近似では不十分となってくる。図 1 にあるように, 実際にはモデル化誤差が大きくなるほど推定誤差は加速度的, つまり非線形に大きくな

る。結果として, 表 3 のような結果となる。

5.2 実際の光源が含む黒体放射からの誤差

CIE 標準光源 (A,B,C) 及び Judd らによる屋外光のデータ (D48, D55, D65, D75, D100) が, どのくらい黒体放射からの誤差を含んでいるかを調べた。各光源のデータから色度を計算し, 最も近い値を持つ黒体放射の色温度 T を求め, それらの間の誤差^(注2)を計算した。分光感度は理想的なデルタ関数とし, その中心波長は, 赤: 620[nm], 緑: 532[nm], 青: 450[nm] とした (4.3 の実験で使用したフィルタの中心波長である。)

結果を表 4 に示す。CIE 標準光源 A 以外は, 許容範囲である 0.1% を超えていることが分かる。

表 4 実際の光源が含む黒体放射からの誤差。

	Δe_r [%]	Δe_g [%]	Nearest T [K]
CIE A	0.0029	-0.0165	2856
CIE B	2.6368	-4.6126	5087
CIE C	5.5397	-6.1154	7451
Judd D48	-1.0788	2.0506	4818
Judd D55	-1.0617	1.6286	5584
Judd D65	-0.9358	1.1519	6698
Judd D75	-0.7690	0.8096	7842
Judd D100	-0.4606	0.3816	10852

5.3 ナローバンドのモデル化誤差の影響

ガウス関数を用いて, 波長帯域の可変な仮想的な分光感度を作り, 推定結果がどのように変化するかを調べた。反射率は GretagMacbeth 社のカラーチャートの茶色, 肌色, 緑のデータを用いた。光源は黒体放射の 4000[K], 9000[K] とした。分光感度の帯域幅に対する, 推定色温度の変化を図 2 に示す。図

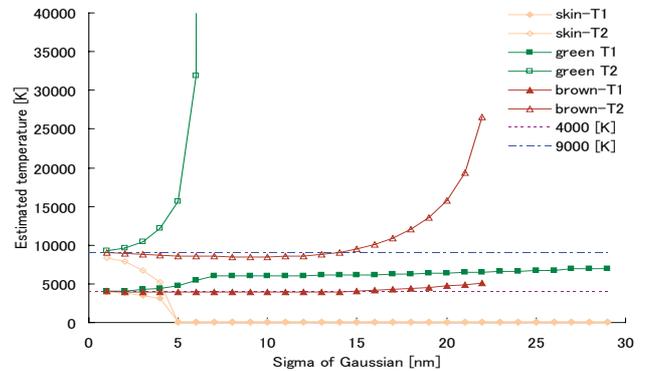


図 2 分光感度の帯域幅 (ガウス関数の標準偏差 σ) に対する推定色温度の変化。

2 にあるように, 感度の帯域幅 (ガウス関数の標準偏差 σ) が増すにつれ, 推定値は真の色温度から大きく外れる。しかし, その変化の仕方は反射率により異なる。緑や肌色の場合, 標準偏差 σ が 5[nm] で推定が正しく行えなくなるのに対し, 茶色の場合, σ が 20[nm] 位まで耐えられる。分光感度の周辺で反射率が直線的に変化する場合, 式 (3) の積分は定数倍になるのでナローバンドのモデル化誤差は無視することができる。そうで

(注 2): (測定値 - 黒体放射の最近傍点の値) / (黒体放射の最近傍点の値)

ない場合、モデル化誤差が推定結果に影響する。参考のため、実験で使用したフィルタ（半値全幅が 10[nm]）、 σ が 5[nm]、及び 20[nm] のガウス関数を図 3 に載せる。

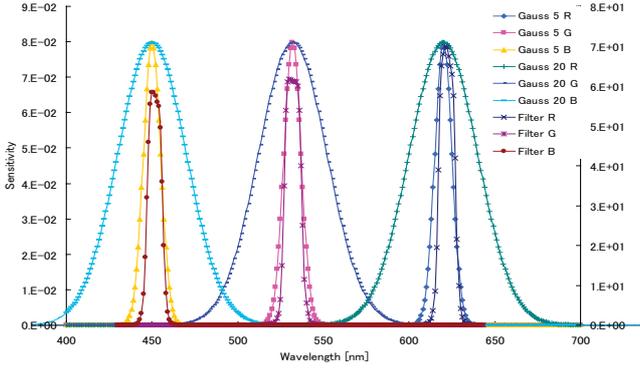


図 3 分光感度の対比。実験で使用したフィルタ、標準偏差が 5[nm], 20[nm] のガウス関数。

6. 結 論

光源に黒体放射の仮定を用いることにより、数値解析的に色恒常性問題が解けることを示し、その実装方法を提案した。シミュレーション実験で、本手法が有効に働くことを確認した。実データを用いた実験ではモデル化誤差の影響により精度が低下したため、モデル化誤差が推定に与える影響を定性的、及び定量的に考察した。今後は、モデル化誤差の軽減方法や、入力誤差にロバストになるような手法の改良が考えられる。また、黒体放射より更に実データに即した光源のモデル化が考えられる。

文 献

- [1] K. Barnard, G. Finlayson, and B. Funt. Color constancy for scenes with varying illumination. *Computer Vision and Image Understanding*, 65(2):311–321, 1997.
- [2] M. D’Zmura. Color constancy: surface color from changing illumination. *Journal of Optics Society of America A.*, 9(3):490–493, 1992.
- [3] G.D. Finlayson, B.V. Funt, and K. Barnard. Color constancy under varying illumination. in *proceeding of IEEE International Conference on Computer Vision*, pages 720–725, 1995.
- [4] D.B. Judd. Sensibility to color-temperature change as a function of temperature. *Journal of Optics Society of America*, 23:127–134, 1933.
- [5] D.B. Judd, D.L. MacAdam, and G. Wyszecky. Spectral distribution of typical daylight as a function of correlated color temperature. *Journal of Optics Society of America*, 54(8):1031–1040, 1964.
- [6] E.H. Land and J.J. McCann. Lightness and retinex theory. *Journal of Optics Society of America*, 61(1):1–11, 1971.
- [7] Y.Ohta and Y.Hayashi. Recovery of illuminant and surface colors from images based on the CIE daylight. in *proceeding of the Third European Conference on Computer Vision*, 1994.
- [8] R. T. Tan, K. Nishino, and K. Ikeuchi. Color constancy through inverse intensity-chromaticity space. *Journal of the Optical Society of America A (JOSA A)*, 21(3):321–334, 2004.
- [9] S. Tominaga, and B.A. Wandell. Standard surface-reflectance model and illuminant estimation. *Journal of*

Optics Society of America A., 6(4):576–584, 1989.

- [10] S. Tominaga, S. Ebisui, and B.A. Wandell. Scene illuminant classification: brighter is better. *Journal of Optics Society of America A.*, 18(1):55–64, 2001.
- [11] S. Tominaga and B.A. Wandell. Natural scene-illuminant estimation using the sensor correlation. *Proceedings of the IEEE*, 90(1):42–56, 2002.

付録 A: 拘束条件の導出

反射率は、色恒常性の式 (1) と光源色度の式 (5) より、

$$\begin{aligned} s_r &= i_r/e_r = i_r\Phi_R(T')/(k_r\Phi_B(T')) \\ s_g &= i_g/e_g = i_g\Phi_G(T')/(k_g\Phi_B(T')) \end{aligned} \quad (A1)$$

と表せる。したがって二つの画像色度が得られたとき反射率が等しい、という式は、

$$\begin{aligned} i_{r1}\Phi_R(T'_1)/k_r\Phi_B(T'_1) - i_{r2}\Phi_R(T'_2)/k_r\Phi_B(T'_2) &= 0 \\ i_{g1}\Phi_G(T'_1)/k_g\Phi_B(T'_1) - i_{g2}\Phi_G(T'_2)/k_g\Phi_B(T'_2) &= 0 \end{aligned} \quad (A2)$$

分母を払って整理すると式 (7)(8) が得られる。

付録 B: 光源の誤差による推定値の誤差の導出

光源が黒体放射からの誤差を内包しているとする。すなわち、

$$E(\lambda_R) = M(\lambda_R) + \Delta E_R, \quad E(\lambda_B) = M(\lambda_B) + \Delta E_B \quad (A3)$$

とする。 $M(\lambda)$ は黒体放射である (式 (6))。光源の色度は

$$1/e_r \simeq \frac{M(\lambda_B)}{M(\lambda_R)} + \Delta e_r \quad (A4)$$

と書ける。ただし $\Delta e_r = \Delta E_B/M(\lambda_R) - \Delta E_R M(\lambda_B)/M(\lambda_R)^2$ とおいた。これを用いると、式 (7)(8) と同様の拘束条件は、

$$\Theta_r^\Delta(T'_1, T'_2) = \Theta_r(T'_1, T'_2) + \alpha\Phi_b(T'_1)\Phi_b(T'_2) \quad (A5)$$

$$\Theta_g^\Delta(T'_1, T'_2) = \Theta_g(T'_1, T'_2) + \beta\Phi_b(T'_1)\Phi_b(T'_2) \quad (A6)$$

と表せる。ただし $(i_{r1}\Delta e_{r1} - i_{r2}\Delta e_{r2})/k_r = \alpha$, $(i_{g1}\Delta e_{g1} - i_{g2}\Delta e_{g2})/k_g = \beta$ とおいた。

今、モデル化誤差が無いとして解いている式 (7) 及び (8) の解を t_1, t_2 として、このまわりでの Θ_r^Δ (本来解くべき式) のテーラー展開を考える。

$$\begin{aligned} \Theta_r^\Delta &= \alpha\Phi_b(t_1)\Phi_b(t_2) \\ &+ i_{r1}\Phi_r(t_1)\Phi_b(t_2) \left(H_r(t_1) + \frac{\alpha\phi_b(t_1)}{i_{r1}\Phi_r(t_1)} \right) \Delta T_1 \\ &+ i_{r1}\Phi_r(t_1)\Phi_b(t_2) \left(-H_r(t_2) + \frac{\alpha\phi_b(t_2)}{i_{r2}\Phi_r(t_2)} \right) \Delta T_2 \end{aligned} \quad (A7)$$

が得られる。ただし $d\Phi_b/dt = \phi_b$ とおいた。同様に、

$$\begin{aligned} \Theta_g^\Delta &= \beta\Phi_b(t_1)\Phi_b(t_2) \\ &+ i_{g1}\Phi_g(t_1)\Phi_b(t_2) \left(H_g(t_1) + \frac{\beta\phi_b(t_1)}{i_{g1}\Phi_g(t_1)} \right) \Delta T_1 \\ &+ i_{g1}\Phi_g(t_1)\Phi_b(t_2) \left(-H_g(t_2) + \frac{\beta\phi_b(t_2)}{i_{g2}\Phi_g(t_2)} \right) \Delta T_2 \end{aligned} \quad (A8)$$

式 (A7) 及び (A8) を簡単のため、

$$\Theta_r^\Delta = x + A\Delta T_1 + B\Delta T_2$$

$$\Theta_g^\Delta = y + C\Delta T_1 + D\Delta T_2$$

と置き直すと、 t_1, t_2 の周りで

$$\Delta T_1 = \frac{yB - xD}{AD - BC} \quad (A9)$$

$$\Delta T_2 = \frac{xC - yA}{AD - BC} \quad (A10)$$

と近似できる。