

単一画像からの光源位置・色と表面反射特性の推定

原 健 二[†], Robby T. Tan[†] 西 野 恒^{††}
 中 澤 篤 志[†], 池 内 克 史[†]

本論文では、鏡面反射成分と拡散反射成分の明るさ分布と鏡面反射領域の色分布を利用して、1枚のカラー画像から光源の位置・色と物体表面の反射特性を推定する手法を提案する。まず、鏡面ピークとおおまかに推定した拡散反射領域の明るさ分布から光源位置と反射特性を初期推定する。次に、反射成分の分離と反射モデルのあてはめからなる反復過程に基づき、光源位置と反射特性を最終推定する。このとき得られた鏡面反射領域の色分布を用いて光源色を推定する。このようにして推定された光源の位置・色および表面反射特性を用いて、任意光源状況下における仮想物体画像の生成が可能になる。

Estimating Illumination Position, Color and Surface Reflectance Properties from a Single Image

KENJI HARA,[†] ROBBY T. TAN,[†] KO NISHINO,^{††}
 ATSUSHI NAKAZAWA[†], and KATSUSHI IKEUCHI[†]

In this paper we propose a new method for estimating a position and color of a light source, as well as reflectance properties of a real object's surface, from a single image. We use the intensity of the diffuse and specular component for estimating the light source position, while the color distribution of the specular region is for estimating the light source color. The flow of this method is basically as follows: first, an initial position of the light source is estimated from a peak location of the specular region and a rough intensity value of the diffuse region. This diffuse-to-specular intensity value is also used to determine the initial values of the object reflectance properties. After having the initial values, using iterative fitting method, the light position and reflectance properties are estimated simultaneously. Finally, the estimation process of the light source color is based on the color distribution of the specular region. By knowing the light source position, color and the object reflectance properties, we can freely generate synthetic images under arbitrary light source conditions.

1. はじめに

現実世界に仮想物体を融合させる拡張現実感では、表示された仮想物体の色艶や明るさ影といった光学条件が実シーンのものと同じになるように光学的整合性を実現しなければならない。光学的整合性を高度に達成するためには、現実世界の光源状況と現実物体の反射特性とを正しく反映した仮想物体画像を生成する必要がある。そこで、1枚の実シーン画像から、いかに

して画像内の現実空間における光源状況を推定するか、いかにして仮想化すべき実物体の表面反射特性を推定するか、の2つが重要な課題になる。しかし、従来の反射特性推定手法の多くは、光源の位置や方向を手動で入力しなければならず、1枚の画像から表面反射特性と光源状況の両方を簡便に計測できるものは少なかった^{1),2)}。

近年、IkeuchiらはTorrance-Sparrowモデル³⁾を簡略化した反射モデルに基づき明るさ分布を解析することにより、光源方向と反射特性を推定する手法を開発した⁴⁾。また、Ramamoorthiらは、球面調和関数と因子分解を用いて表面反射特性と光源方向を同時に推定する手法を提案した⁵⁾。一方、Tominagaらは、Phongモデルを採用して、1枚の実画像から表面反射特性と光源方向および光源色を推定する手法を提案した⁶⁾。しかし、これらの手法は、光源状況を無限遠の

[†] 東京大学生産技術研究所

Institute of Industrial Science, The University of Tokyo

^{††} コロンビア大学コンピュータサイエンス科

Department of Computer Science, Columbia University
 現在、福岡県工業技術センター

Presently with Fukuoka Industrial Technology Center
 現在、大阪大学サイバーメディアセンター

Presently with Cybermedia Center, Osaka University

点光源に近似した平行光源の方向を推定しており、光源が物体から近距離にある場合には適用が難しかった。

本論文では、1枚のカラー画像のみから光源の位置と物体表面の反射特性を同時に推定する手法を提案する。本手法は、1) 鏡面反射成分と光源方向、2) 拡散反射成分と鏡面ピークから光源までの距離、のそれぞれの関係を利用する。本手法には、1) 入力画像が1枚だけでよい、2) 従来の光源推定手法の多くが光源方向のみを推定していたのに対し、物体から有限距離にある点光源の3次元位置まで推定できる、といった利点がある。また、本手法は、このとき分離される鏡面反射成分を用いることで、光源色の推定も行う。

まず、鏡面ピーク点から光源方向を求め、その方向ベクトル上における光源の奥行きを拡散反射成分の数値モデルのあてはまりの良さに基づいて初期推定する。次に、この光源位置下で拡散反射パラメータを初期推定し、鏡面反射成分を分離する。そして、この鏡面反射成分と上で得られた光源位置を用いることにより、鏡面反射パラメータを初期推定する。このようにして推定された鏡面反射パラメータから拡散反射成分を再分離し、これら一連のモデルあてはめと反射成分分離とからなる手続きを繰り返すことにより、光源位置と表面反射特性のパラメータを最終的に決定する。最後に、このとき分離される鏡面反射成分に対して既存の光源色推定手法⁷⁾を適用することにより、光源色を精度良く推定することが可能になる。

本手法では、1) カメラ位置と視線方向が既知である、2) 物体の3次元形状が既知で凸である、3) 光源が単一の点光源である、4) ハイライトが観察される、5) 物体表面の材質と色が均一である、ことを仮定する。さらに、提案手法により推定された光源の位置・色と表面反射特性を用いることにより、任意の光源位置や光源色下で仮想物体画像を生成することが可能となることを示す。

本論文の構成は以下のとおりである。まず、2章で入力である実写画像から物体表面の反射特性と光源位置を同時に推定する方法、このとき推定された鏡面反射特性を用いて光源色を推定する方法について順に述べる。3章では、推定された光源位置と光源色を用いて任意光源下における仮想物体画像の生成法について説明する。4章で実験結果を紹介し、5章で結論をまとめる。

2. 光源位置・色と反射特性の推定

2色性反射モデルによれば、物体反射光は鏡面反射と拡散反射の2つの反射成分の和からなる。これらの

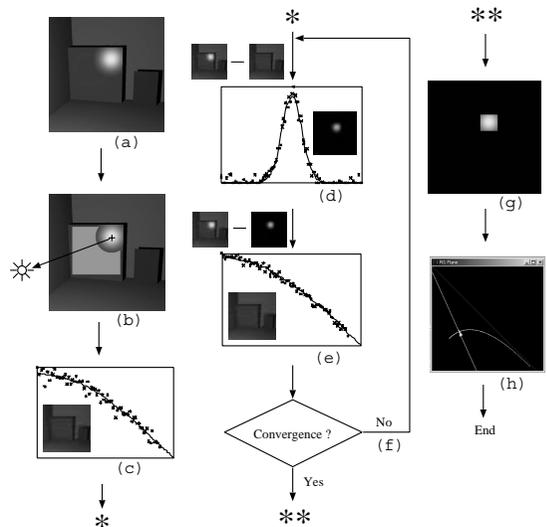


図1 提案手法の概略

Fig. 1 Outline of the overall algorithm.

性質は大きく異なっており、両者の和からなる反射モデルを一度にあてはめようとすると不適切な局所解におちいりやすい。この事態をできるだけ回避するため、鏡面反射成分と拡散反射成分の分離と各反射成分に付随するパラメータの更新とを交互に繰り返すアプローチをとる。

鏡面反射のピーク位置と光源方向、拡散反射成分の明るさ分布と物体から光源までの距離、鏡面反射領域の色分布と光源色、の間にはそれぞれ密接な関係がある。本章では、これらの性質を利用した、1) 反射モデルあてはめと反射成分分離を一体化した光源位置および表面反射特性の推定、2) 1)の結果を用いた光源色の推定、の2段階からなる手法について述べる。

2.1 提案手法の概要

提案手法による光源と反射特性の推定は以下のようにして行う。また、概略を図1に示す。

(1) 拡散反射領域と光源方向の決定

入力画像(図1(a))から鏡面反射輝度が最大となる画素(以下、鏡面ピーク)を検出し、拡散反射が鏡面反射に比べて支配的な領域(以下、拡散反射領域)と光源の方向を求める(図1(b))。

(2) 光源奥行きと拡散反射特性の初期推定

拡散反射領域における明るさ分布に対する拡散反射モデルのあてはまりやすさを基準にして、鏡面反射ピークから光源までの距離(以下、光源奥行き)と拡散反射特性を推定する(図1(c))。

(3) 鏡面反射特性の初期推定

(2)で得られた初期推定値を用いて鏡面反射成分を

分離し、鏡面反射モデルのあてはめにより鏡面反射特性を推定する(図1(d)).

(4) 光源奥行きと拡散反射, 鏡面反射特性の反復補正
拡散反射成分を分離し, 拡散反射特性と光源奥行きを再度推定する(図1(e)). 以上の一連の手続きを光源位置と反射特性の値が十分収束するまで, または決められた回数だけ繰り返す(図1(f)).

(5) 光源色の推定

上で推定された鏡面反射成分画像をもとに, 入力画像から鏡面反射が観測される領域(以下, 鏡面反射領域)を抽出し(図1(g)), この領域の色分布を r-g 空間において直線近似する. この回帰直線とブランクの放射則曲線の交点を求めることにより, 光源色が推定される(図1(h)).

2.2 反復あてはめ・分離による光源位置と反射特性の推定

本論文では, Torrance-Sparrow 反射モデル³⁾を簡略化したモデル式

$$i_c = \left[k_{d,c} \cos \theta_i + \frac{k_{s,c}}{\cos \theta_r} \exp\left[-\frac{\alpha^2}{2\sigma^2}\right] \right] \frac{L_c}{R^2} \quad (1)$$

を用いる⁴⁾. ここで, c は RGB のいずれか, i_c は画像面の明るさ, L_c は点光源の光度である. R は光源から物体表面の各点までの距離であり, 照明光強度がこの距離の 2 乗に反比例して減衰する特性を考慮して導入されたものである. $k_{d,c}$ と $k_{s,c}$ はそれぞれ拡散反射成分と鏡面反射成分に対応する反射係数, σ は表面あさを表す. また, θ_i は物体表面の点における入射角であり, 法線方向と光源方向とがなす角度, θ_r は法線方向と視線方向とがなす角度, α は光源方向と視線方向の 2 等分方向と法線方向とがなす角度である(図2).

式(1)から明らかに $k_{d,c}$, $k_{s,c}$ と L_c の分離は不可能であるため,

$$K_{d,c} = k_{d,c} L_c \quad (2)$$

$$K_{s,c} = k_{s,c} L_c \quad (3)$$

とおく. このとき, 式(1)は

$$I_c = K_{d,c} \cos \theta_i + \frac{K_{s,c}}{\cos \theta_r} \exp\left[-\frac{\alpha^2}{2\sigma^2}\right] \quad (4)$$

のように表される. ただし,

$$I_c = i_c R^2 \quad (5)$$

である. 本論文では, 式(4)におけるパラメータ $\tilde{K}_d = [K_{d,R}, K_{d,G}, K_{d,B}]^T$, $\tilde{K}_s = [K_{s,R}, K_{s,G}, K_{s,B}]^T$, σ をまとめて表面反射特性と呼び, 特に \tilde{K}_d を拡散反射パラメータ, \tilde{K}_s と σ を鏡面反射パラメータと呼ぶことにする. 式(2), (3)から明らかのように, \tilde{K}_d と \tilde{K}_s には光源の特性も含まれる.

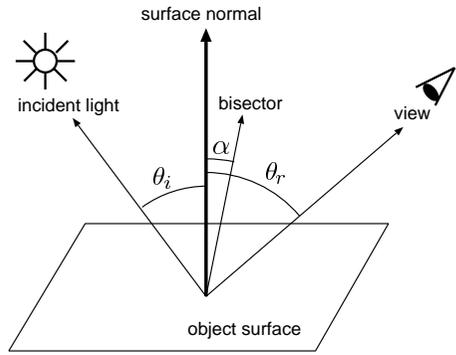


図2 幾何学モデル
Fig.2 Geometric model.

次項では, この表面反射特性と光源位置を同時に推定する方法についてさらに詳細に述べる. なお, 以下の処理は RGB 各々独立に行われるものとし, RGB を表す添字 c は省略する. また, 総和については RGB すべての和がとられるものとする.

2.2.1 拡散反射領域を用いた初期推定

N_p を鏡面ピークにおける単位法線ベクトル, L_p と V_p を鏡面ピークを始点としてそれぞれ光源および視点を向く単位ベクトルとする. このとき, 鏡面ピークでは正反射が生じていると見なせるので, L_p は N_p と V_p を用いて

$$L_p = N_p + (N_p, V_p)N_p - V_p \quad (6)$$

と表される. ここで, N_p , V_p , 実世界 3 次元位置と 2 次元画素位置の対応関係はいずれも既知であることから L_p が求まる. このとき, 光源位置 L は鏡面ピークの 3 次元位置 P , L_p と光源奥行き t を用いて

$$L = P + tL_p \quad (7)$$

となるので, L を推定するためには光源奥行き t を求めればよい.

まず, 拡散反射領域を設定する. ここでは, 画像平面上において鏡面ピークからあるしきい値以上離れたところにある画素の集合を求め, これらに対応する物体表面点の集合を拡散反射領域とする. この拡散反射領域において拡散反射のモデル(式(4)右辺の第 1 項)を最もよく成り立たせるような t を求める. そのため, 最小化すべき評価関数 f を

$$f(x_1(t), \dots, x_{N_j}(t)) = \sum_{j=1}^{N_j} \left(x_j(t) - \frac{1}{N_j} \sum_{l=1}^{N_j} x_l(t) \right)^2 \quad (8)$$

のように定める. ただし, N_j は拡散反射領域に属する画素の総数, $x_j(t)$ は

$$x_j(t) = \frac{I^{(j)}}{\cos(\theta_i^{(j)}(t))} \quad (9)$$

である。\$I^{(j)}\$ と \$\theta_i^{(j)}(t)\$ はそれぞれ、拡散反射領域における \$j\$ 番目の画素の輝度およびこの画素に対応する表面点における入射角である。

評価関数 \$f\$ を局所最小化するために、微分に基づく最適化手法を利用すると、式 (8) の偏導関数があまりにも複雑になる。そこで、光源奥行き \$t\$ の摂動を行い、\$f\$ の値が不変になるまで、またはほとんど減少しなくなるまで摂動を繰り返す。この摂動では、現在得られている \$t\$ に対し、\$t_1 = t - \Delta t\$、\$t_2 = t\$、\$t_3 = t + \Delta t\$ の3つについて \$f(x_1(t_n), \dots, x_{N_j}(t_n))\$ (\$n = 1, 2, 3\$) を求め、これらの中で \$f\$ の値を最小ならしめる \$t_n\$ を次ステップの値とする。ここで、\$\Delta t\$ はユーザが適当な値を設定するものとする。本論文では \$\Delta t = 2mm\$ とおいた。このとき得られた光源奥行きの推定値 \$t^*\$ を式 (7) に代入することにより、光源位置の推定値 \$\mathbf{L}^*\$ が得られる。

次に、\$t^*\$ のもとで拡散反射パラメータ \$K_d\$ を推定する。ここでは、次式の2乗誤差を最小化する。

$$E_1(K_d) = \sum_{j=1}^{N_j} \left(I^{(j)} - K_d \cos(\theta_i^{(j)}(t^*)) \right)^2 \quad (10)$$

この最小解 \$\tilde{K}_d^*\$ は次式で得られる。

$$K_d^* = \frac{\sum_{j=1}^{N_j} I^{(j)}}{\sum_{j=1}^{N_j} \cos(\theta_i^{(j)}(t^*))} \quad (11)$$

2.2.2 反復あてはめ・分離による推定値補正

物体表面領域に属する画素（以下、物体表面画素）が \$N_k\$ 個あるとき、その \$k\$ 番目の画素の鏡面反射成分は、前項で得られた推定値を用いて

$$I_s^{(k)*} = I^{(k)} - K_d^* \cos(\theta_i^{(k)}(t^*)) \quad (12)$$

のように反射成分を分離することで得られる。これに鏡面反射のモデル（式 (4) 右辺の第2項）をあてはめる問題は、前節の拡散反射パラメータ推定の場合とは異なり、非線形になる。そこで、まず鏡面反射のモデル式

$$I_s = \frac{K_s}{\cos \theta_r} \exp \left[-\frac{\alpha^2}{2\sigma^2} \right] \quad (13)$$

を対数変換により

$$Y = -\frac{1}{\sigma^2} X + \ln K_s \quad (14)$$

のように線形化する⁴⁾。ただし

$$X = \frac{\alpha^2}{2} \quad (15)$$

$$Y = \ln I_s + \ln \cos \theta_r \quad (16)$$

である。そこで、\$N_k\$ 個の物体表面画素に対して、変換式 (15)、(16) により \$X\$-\$Y\$ 空間にプロットした点が式 (14) で表される同一直線上にのるようにパラメータ推定を行う。具体的には、このデータ対の集合に直線の最小2乗あてはめを行って得られた回帰直線と式 (14) の係数比較により、初期推定値 \$\tilde{K}_s^+\$ と \$\sigma^+\$ を求める。

次に、\$\tilde{K}_s^+\$ と \$\sigma^+\$ をあらためて初期値とし、最小化すべき2乗誤差を

$$E_2(K_s, \sigma) = \sum_{k=1}^{N_k} \left(I_s^{(k)} - \frac{K_s}{\cos(\theta_r^{(k)})} \exp \left[-\frac{(\alpha^{(k)}(t^*))^2}{2\sigma^2} \right] \right)^2 \quad (17)$$

のように定義する。式 (17) を局所最小化するため、以下の1)と2)を交互に繰り返す。

1) 現在得られている \$\sigma\$ を固定して、\$K_s\$ を

$$K_s = \sum_{k=1}^{N_k} I_s^{(k)} \Big/ \sum_{k=1}^{N_k} \frac{1}{\cos(\theta_r^{(k)})} \exp \left[-\frac{\alpha^{(k)}(t^*)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (18)$$

のように修正する手続き。

2) 現在得られている \$K_s\$ を固定して

$$\kappa^{(n)} = \frac{1}{\sigma^{(n)}} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \kappa^{(n+1)} = \kappa^{(n)} - \gamma \sum_{k=1}^{N_k} \left(I_s^{(k)} - \frac{K_s}{\cos(\theta_r^{(k)})} \right. \\ \left. \times \exp \left[-\frac{(\alpha^{(k)}(t^*))^2 (\kappa^{(n)})^2}{2} \right] \right)^2 \frac{K_s (\alpha^{(k)}(t^*))^2 \kappa^{(n)}}{\cos(\theta_r^{(k)})} \\ \times \exp \left[-\frac{(\alpha^{(k)}(t^*))^2 (\kappa^{(n)})^2}{2} \right] \end{aligned} \quad (20)$$

$$\sigma^{(n+1)} = \frac{1}{\kappa^{(n+1)}} \quad (21)$$

の3つを順に実行する \$\sigma\$ の更新処理を収束するまで繰り返す手続き。

ここで、\$n\$ は更新ステップ、\$\gamma\$ は学習係数である。\$\gamma\$ にはユーザが適当な値を代入しなければならないが、かなり小さな値にしておかないと発散するので注意が必要である。なお、本論文では \$\gamma = 1.0 \times 10^{-7}\$ とした。

以上の手続きにより、鏡面反射パラメータの推定値 \$\tilde{K}_s^*\$ と \$\sigma^*\$ が得られる⁸⁾。しかし、このようにして得られた推定値は拡散反射成分をかなり大まかに近似した拡散反射領域を用いて得られたものであり、必ずし

も正確とはいえない．そこで， N_k 個の物体表面画素に対して，いま得られている鏡面反射パラメータと光源位置を用いて，再度，拡散反射成分を

$$I_d^{(k)*} = I^{(k)} - \frac{K_s^*}{\cos(\theta_r^{(k)})} \exp\left[-\frac{(\alpha^{(k)}(t^*))^2}{2(\sigma^*)^2}\right] \quad (22)$$

のように分離する．そして，前項とまったく同様の手続きで光源奥行きと拡散反射パラメータの推定を行う．

以上のような鏡面反射と拡散反射の各反射モデルのあてはめと反射成分分離からなる手続きを十分な近似が得られるまで繰り返す．ただし，2 回目以降の鏡面反射パラメータの推定では，十分解に近い値が得られていると仮定し，このとき得られている値を初期値として式 (17) を最小化する．式 (14) に直線あてはめを行う処理はスキップする．

2.3 鏡面反射領域を用いた光源色の推定

本節では，前節で分離された鏡面反射成分から容易に得られる鏡面反射領域を用いて，光源色推定を行う方法について述べる．

一般に，Torrance-Sparrow 反射モデルのように物体反射光が鏡面反射と拡散反射からなるモデルは 2 色性反射モデルと呼ばれ

$$I_c = w_B(\theta) \int_{\Omega} S(\lambda) E(\lambda) R_c(\lambda) d\lambda + w_I(\theta) \int_{\Omega} E(\lambda) R_c(\lambda) d\lambda \quad (23)$$

のように表される．ここで，2.2 節と同じく， e は RGB， I_c はカメラ出力の RGB 値，右辺第 1 項は拡散反射，第 2 項は鏡面反射を表す．また， λ は波長， Ω は波長の範囲 [400, 700] (単位：nm)， $w_B(\theta)$ と $w_I(\theta)$ は幾何情報に依存して決まる重み係数である．そして， $R_c(\lambda)$ はカメラ感度， $S(\lambda)$ は物体色を生成する分光反射率， $E(\lambda)$ は光源の分光分布である．

式 (23) を RGB 値で記述すると

$$(R, G, B) = w_B(\theta)(R, G, B)_B + w_I(\theta)(R, G, B)_I \quad (24)$$

となる．これに対し

$$r = \frac{R}{R+G+B}, \quad g = \frac{G}{R+G+B} \quad (25)$$

のように変数変換を行うと

$$(r, g) = w_B(\theta)(r, g)_B + w_I(\theta)(r, g)_I \quad (26)$$

となる．したがって，鏡面反射と拡散反射の両反射成分が含まれる領域の RGB 値を式 (25) のように変換し， $r-g$ 空間にプロットした点の集合は同一直線上にのることが分かる．

一方，放射輝度の RGB 値 Ψ_c と分光分布 $R_c(\lambda)$ の

間には

$$\Psi_c = \int_{\Omega} M(\lambda, T) R_c(\lambda) d\lambda \quad (27)$$

のような関係が成り立つことが知られている．ここで， $M(\lambda)$ は黒体の分光分布であり，プランクの放射則により，色温度 T (単位：Kelvin) を用いて，次式的ように表現できる．

$$M(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]} \quad (28)$$

ここで， $c_1 = 3.7418 \times 10^{-16} \text{ Wm}^2$ ， $c_2 = 1.4388 \times 10^{-2} \text{ mK}$ である．

したがって， $r-g$ 空間において式 (26) の直線と式 (28) から得られる曲線 (以下，Planckian locus) の交点を求めることにより，光源の色 (温度) が推定できる．以下，光源色 (温度) 推定の具体手順を示す．

(1) 各色温度の黒体の分光分布の決定

光源の色温度 T を定義域 $[T_{min}, T_{max}]$ において刻み Δ で変化させ，式 (28) を用いて各色温度の黒体の分光分布を求める．本論文では， $T_{min} = 1,000$ ， $T_{max} = 10,000$ ， $\Delta = 1$ とした．

(2) 各色温度に対応する rg 値の決定

上記 (1) で得られた各色温度の黒体の分光分布 $M(\lambda, T)$ ($T_{min} \leq T \leq T_{max}$) に対応する放射輝度の RGB 値を式 (27) で求め，これらを rg 値に変換する．

(3) 光源色温度の推定

上記 (2) で得られた各 rg 値を $r-g$ 空間にプロットし，線形補間により曲線近似したものと式 (26) の直線との交点を (r^*, g^*) ，その色温度を T^* と表し，これらを光源色の推定値とする．

以上に述べた色恒常性 (color constancy) 理論に基づく光源色推定手法は，Finlayson らによって提案された⁷⁾．しかし，その手法は鏡面反射がほとんど観測されない拡散反射領域も対象に含めるものであったため，拡散反射領域が鏡面反射領域に比べて広いときは，式 (26) で表される直線性が失われて誤推定を生じやすかった．これに対し，提案手法では，まず前節で分離した鏡面反射成分を利用して，鏡面反射と拡散反射の両方が観測される領域，すなわち鏡面反射領域を原画像から抽出する．次に，この鏡面反射領域における色分布を用いた交点検出により，比較的安定な推定が可能となる．図 3 (a) は Finlayson らの手法を用いたとき，図 3 (b) は本手法を用いたときの $r-g$ 平面上のプロットである．グラフの横軸は r ，縦軸は g ，曲線は Planckian locus，直線は (r, g) のプロットに対する回帰直線，破線は $g = 1 - r$ である．光源色温度

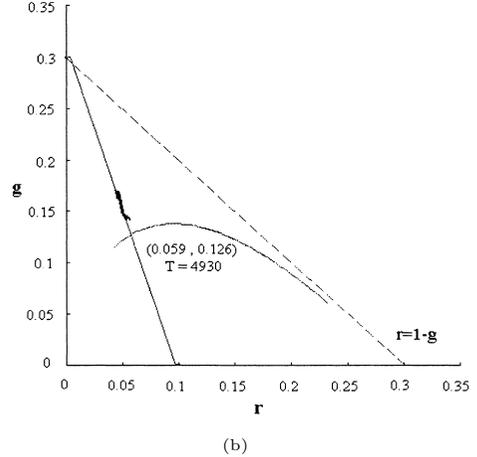
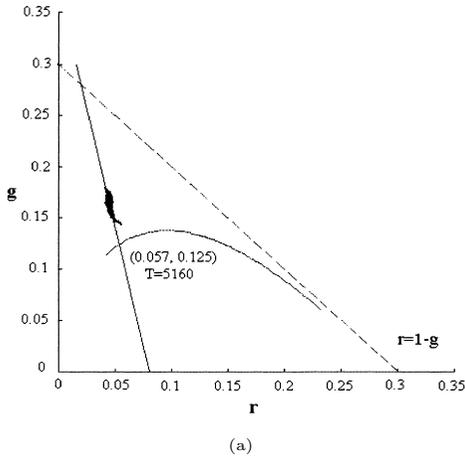


図3 光源色推定手法：(a) 従来手法，(b) 提案手法
Fig. 3 Method for estimating illumination color: (a) conventional method, (b) proposed method.

の真値は 4,700 Kelvin である．図中に示した色温度の比較により，本手法のほうが光源色を精度良く推定できていることが分かる．また，プロットの分布が，図3(a)で大きく広がっているのに対し，図3(b)ではほとんど直線上に並んでおり，安定に直線推定されていることが分かる．なお，曲線と直線の交点付近でプロットされた点が直線のにらずに右の方に曲がっているのは，物体表面の一部の領域が他の領域と異なる色をしていたためと考えられる．しかし，このような点の個数は全体の 1% 以下であり，推定精度にはほとんど影響していない．

3. 任意光源条件下における仮想物体画像の合成

3.1 任意光源位置下における画像合成

推定された光源位置と物体の表面反射特性を用いて，任意の光源位置下における画像を仮想的に合成することができる．各画素ごとに，推定された表面反射特性 ($\vec{K}_d, \vec{K}_s, \sigma$) と与えられた光源位置から得られる角度 ($\theta_i, \theta_r, \alpha$) および距離 R を式 (4) に代入することにより，任意光源位置下における仮想物体画像を生成する．

3.2 任意光源色下における画像合成

推定された光源色と物体の表面反射特性を用いて，任意の光源色下における画像を仮想的に合成することができる．

まず，光源色が正しく推定されたと仮定し，光源の分光分布 $E(\lambda)$ を光源色の推定値 T^* から得られる分光分布 $M(\lambda, T^*)$ で置き換えると，式 (23) は

$$I_c = w_B(\theta) \int_{\Omega} S(\lambda) M(\lambda, T^*) R_c(\lambda) d\lambda + w_I(\theta) \int_{\Omega} M(\lambda, T^*) R_c(\lambda) d\lambda \quad (29)$$

となる．ここで， $M(\lambda, \cdot)$ は式 (28) で定義した関数である．式 (29) の両辺に

$$W = \frac{\int_{\Omega} M(\lambda, T^{new}) R_c(\lambda) d\lambda}{\int_{\Omega} M(\lambda, T^*) R_c(\lambda) d\lambda} \quad (30)$$

をかけると次式ようになる．

$$W I_c = \frac{\int_{\Omega} S(\lambda) M(\lambda, T^*) R_c(\lambda) d\lambda \int_{\Omega} M(\lambda, T^{new}) R_c(\lambda) d\lambda}{\int_{\Omega} M(\lambda, T^*) R_c(\lambda) d\lambda} + w_I(\theta) \int_{\Omega} M(\lambda, T^{new}) R_c(\lambda) d\lambda \quad (31)$$

ここで， T^{new} は仮想画像合成のために新たに与えられた光源色温度である．

また，この光源色下におけるカメラ出力の輝度分布 I_c^{new} は

$$I_c^{new} = w_B(\theta) \int_{\Omega} S(\lambda) M(\lambda, T^{new}) R_c(\lambda) d\lambda + w_I(\theta) \int_{\Omega} M(\lambda, T^{new}) R_c(\lambda) d\lambda \quad (32)$$

のように表される．このとき，式 (31) と式 (32) は厳密には等しくないものの，カメラの分光感度特性が十分にナローバンド，すなわち $R_c(\lambda) \simeq \delta(\lambda - \lambda_k)$ のときは，どちらの右辺第 1 項も $S(\lambda_k) M(\lambda_k, T^{new})$ に等

表 1 推定結果

Table 1 Results of estimation.

	推定値	真値
光源位置 [mm]	(-400.42, -488.34, 797.65)	(-408.88, -493.59, 804.83)
光源色 [Kelvin]	4,800	4,700
$(K_{s,R}, K_{s,G}, K_{s,B})$	(0.123, 0.0258, 0.249)	-
$(K_{d,R}, K_{d,G}, K_{d,B})$	(0.494, 0.840, 0.576)	-
σ	0.0702	-

しくなるので

$$W I_c \simeq I_c^{new} \quad (33)$$

のように近似できる。ただし、 $\delta(\cdot)$ はデルタ関数を表す。以下、任意光源色下における仮想物体画像を生成するための具体手順を示す。

(1) 推定された光源色温度の黒体の分光分布の決定
2.3 節の計算手順 (3) で推定された色温度 T^* の黒体の分光分布 $M(\lambda, T^*)$ を式 (28) により求める。

(2) 新たな光源色温度の黒体の分光分布の決定
新たに与えられた光源色温度 T^{new} の黒体の分光分布 $M(\lambda, T^{new})$ を式 (28) により求める。光源色を r - g 表現で与える場合は、3.2 節の計算手順 (2) で得られた対応テーブルから、光源色 (r^{new}, g^{new}) に対応する色温度を T^{new} とする。

(3) W の決定

上記 (1), (2) で得られた値を式 (30) に代入することにより、 W を求める。

(4) 仮想物体画像の生成

式 (33) に基づき、原画像の輝度分布 I_c ($c = R, G, B$) と W の積をとったものを仮想物体画像の輝度分布とする。

4. 実験結果

図 4 (a) に示す実画像を入力として、光源の位置、色と物体反射特性の推定を行った。カメラには SONY DXC-9000、点光源にはハロゲンランプを用い、光線パターン投影型レンジファインダを利用して同一アングルの透視投影画像と距離画像を取得した。

提案手法を用いて推定された光源位置と表面反射特性の妥当性を評価するため、光源位置と表面反射特性の推定値を用いて合成した仮想物体画像を図 4 (b) に示す。仮想物体画像と実画像の差分画像を誤差マップとして図 4 (c) に示す。

次に、提案手法を用いて推定された光源色の妥当性を評価するため、白色光源下における実画像を図 5 (a) に示す。ただし、真の白色光源は実際には存在しないことから、入力画像に対して白色ボードを用いてホワイトバランスをとったものである。推定された光源色

を用いて合成した白色光源下の仮想物体画像を図 5 (b) に示す。これらの画像の誤差マップを図 5 (c) に示す。

推定された光源位置と光源色および表面反射特性とこれらの真値を表 1 にまとめる。なお、表面反射特性の真値を知ることができなかったため空欄にしている。なお、表中の光源位置の真値は三角測量の原理を用いて求めた値である。まず、対象シーン中に 4 つほどマーカを貼り、これらの 3 次元位置を上記の距離画像から決定する。次に、別の視線方向から、マーカと点光源の両方が含まれるような距離画像を取得し、各マーカから点光源 (重心) までの 2 点間距離を求める。そして、各マーカの位置を中心、光源までの距離を半径とする、4 つの球面の交点を計算する。

ここで誤差がゼロにならない理由としては、入力幾何形状に誤差があること、対象表面の反射特性が一樣ではないこと、実際には大きさを持つ光源を点光源と近似していることによる影響が考えられる。

また、上の推定値を用いて異なる光源条件下で画像を合成した結果を図 6、図 7 に示す。まず、異なる光源位置下で観測した実画像を図 6 (a) に示す。光源位置と表面反射特性の推定値を用いて合成した仮想物体画像を図 6 (b) に示す。これらの推定値は図 6 (a) に示す画像を入力として用いていないことに注意する。両者の誤差マップを図 6 (c) に示す。次に、異なる光源色下 (5,860 Kelvin) で観測した実画像を図 7 (a) に示す。光源色の推定値を用いて合成した仮想物体画像を図 7 (b) に示す。これらの誤差マップを図 7 (c) に示す。いずれの仮想画像も良好に復元されていることが分かる。

さらに、ユーザが初期の段階で設定する拡散反射領域の与え方が光源位置と表面反射特性の推定結果にどのような影響を及ぼすかについて調べた。これらの解析結果を図 8 と図 9 に示す。図 8 において、横軸は鏡面反射ピークからある距離以上離れた領域を拡散反射領域とする際のしきい値 (画素数)、左縦軸は拡散反射パラメータ、右縦軸は鏡面反射パラメータの推定値をそれぞれ表している。グラフ中央に挿入している画像は、横軸の値が 20, 60, 100 画素のときの各々の

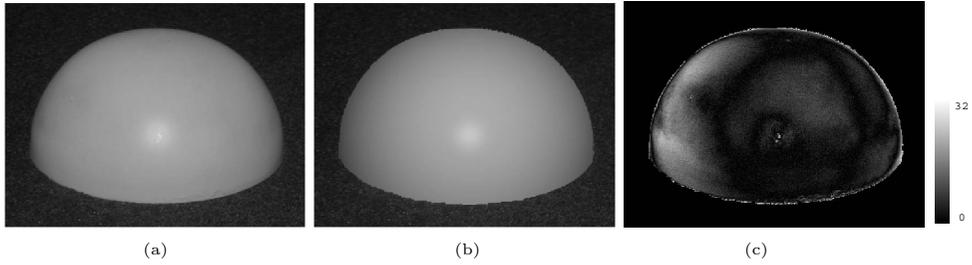


図 4 合成結果：(a) 実画像，(b) 仮想物体画像，(c) 誤差マップ
 Fig. 4 Synthetic image: (a) real image, (b) virtual object image, (c) error map.

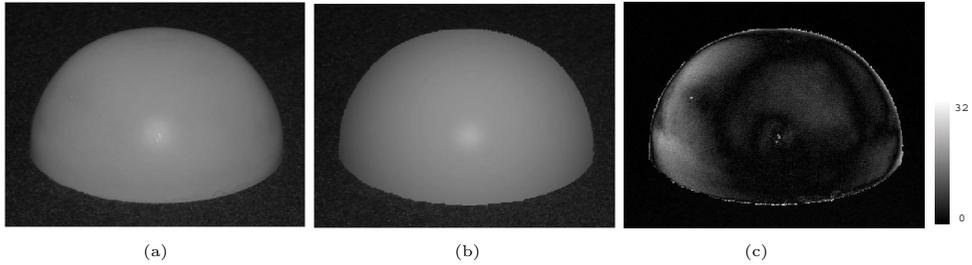


図 5 合成結果：(a) 実画像，(b) 仮想物体画像，(c) 誤差マップ
 Fig. 5 Synthetic image: (a) real image, (b) virtual object image, (c) error map.

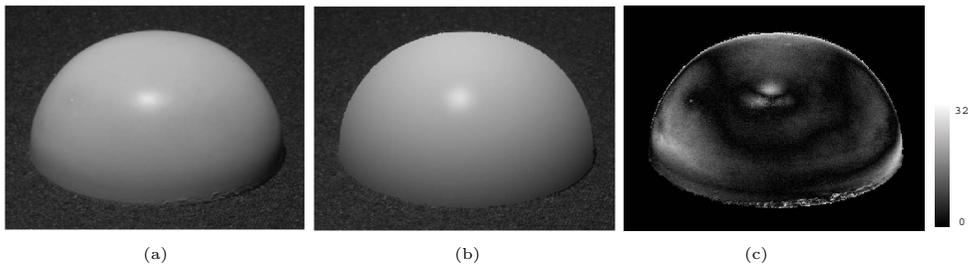


図 6 合成結果：(a) 実画像，(b) 新たな光源位置下における仮想物体画像，(c) 誤差マップ
 Fig. 6 Synthetic image: (a) real image, (b) virtual object image under new illumination position, (c) error map.

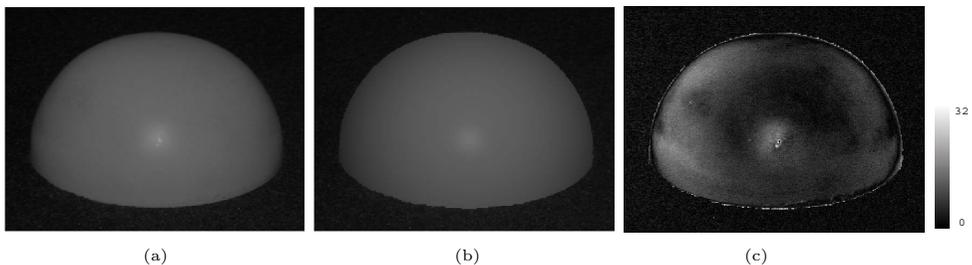


図 7 合成結果：(a) 実画像，(b) 新たな光源色下における仮想物体画像，(c) 誤差マップ
 Fig. 7 Synthetic image: (a) real image, (b) virtual object image under new illumination color, (c) error map.

拡散反射領域を濃い灰色で示したものである。また、図 9 において、横軸や挿入している画像は図 8 と同じであるが、左縦軸は推定された光源位置の z 座標値、右縦軸は光源位置の推定値の誤差を表している（単

位：cm）。これらの解析結果により、ユーザが設定する拡散反射領域の範囲が多少変動しても、推定値はそれほど変わらず、安定な推定が行われていることが分かる。

さらに、平面形状の物体を対象として、提案手法のロバスト性を検証した。先の半球形状の物体では表面の法線ベクトルがほぼ全体にわたって分布するのに対し、平面形状の場合は法線ベクトルの分布に偏りがある点で性質が異なる。図 10 (a) は入力画像であり、シーン中のブックエンドが対象物体である。光源位置と表面反射特性の推定値を用いて合成した仮想物体画像を図 10 (b) に示す。この結果から、平面形状の物体

に対しても、光源位置や表面反射特性が良好に推定できていることが分かる。これらの推定値を用いて異なる光源位置下で合成した仮想物体画像を図 10 (c) に示す。また、図 10 (a) の入力画像に対して白色ボードを用いてホワイトバランスをとった画像を図 11 (a) に示す。推定された光源色を用いて合成した白色光源下の仮想物体画像を図 11 (b) に示す。この結果から、光

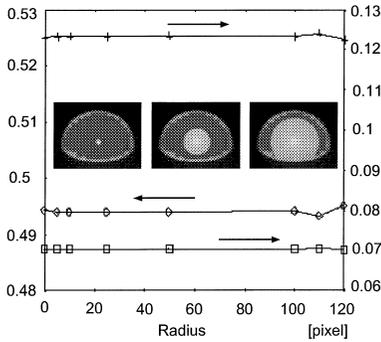


図 8 ロバスト性解析 (表面反射特性)

Fig. 8 Robustness analysis (surface reflection property).

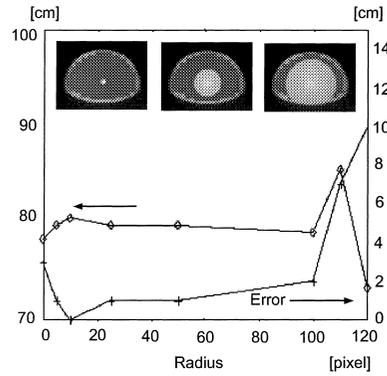


図 9 ロバスト性解析 (光源位置)

Fig. 9 Robustness analysis (illumination position).

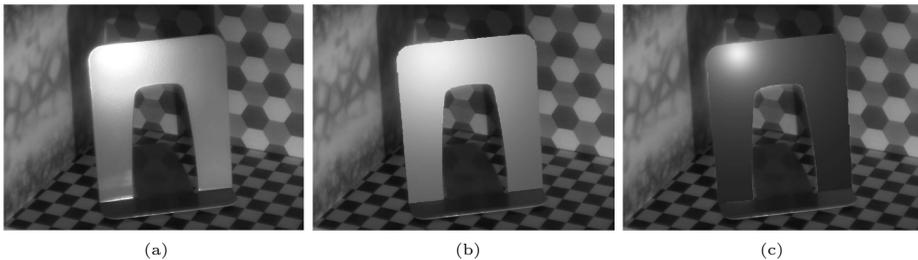


図 10 合成結果：(a) 実画像，(b) 光源位置と反射特性の推定により得られた仮想物体画像，(c) 新たな光源位置下における仮想物体画像

Fig. 10 Synthetic image: (a) real image, (b) virtual object image under the estimated illumination position and reflection parameters, (c) virtual object image under new illumination position.

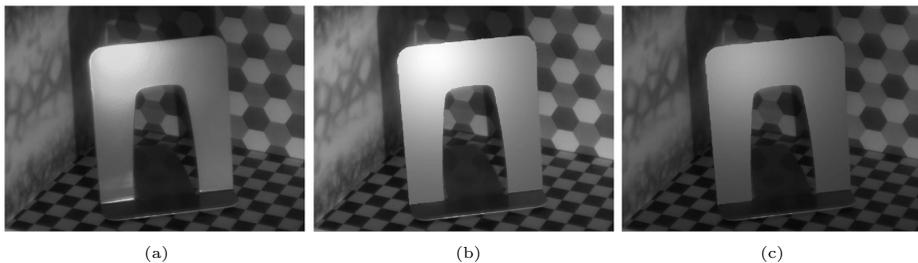


図 11 合成結果：(a) ホワイトバランス画像，(b) 光源色の推定により得られた仮想物体画像，(c) 新たな光源色下における仮想物体画像

Fig. 11 Synthetic image: (a) white-balanced image, (b) virtual object image under the estimated illumination color, (c) virtual object image under new illumination color.

原色も良好に推定できていることが分かる。図 11 (c) は、この光源色の推定値を用いて異なる光源色下で合成した仮想物体画像である。

5. 結 び

反射モデルあてはめと反射成分分離を一体化した反復計算と色恒常性理論を用いて、1 枚のカラー画像と幾何モデルのみから光源位置、光源色および物体の表面反射特性を推定する方法について述べた。これらの推定値を用いて非常にリアルな仮想物体画像を生成する方法を示した。

提案している手法は、反射光の拡散反射成分が Lambertian モデル、鏡面反射成分が Torrance-Sparrow 反射モデルに従うという仮定を同時に満足するような反射パラメータと光源位置を探索する逐次的緩和法と見なすことができる。このような緩和法では必ずしも正しい解が得られる理論的保証はないが、初期条件の影響や誤差を解析する実験の結果から、妥当な解が得られることが示された。この理由として、単光源の方向を固定していること、すべての反射パラメータを物体表面上で同一としていること、などから探索空間が限定されて不適切な解が回避されやすくなっていることが考えられる。

今後の課題として、不正確な入力幾何モデルや複数光源に適用可能な光源推定手法について検討していく予定である。

謝辞 本研究は経済産業省新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) からの委託を受けて行われた。

参 考 文 献

- 1) Boivin, S. and Gagalowicz, A.: Image-based rendering of diffuse, specular and glossy surfaces from a single image, *Computer Graphics Proceedings, SIGGRAPH2001*, pp.107-116 (2001).
- 2) 田中法博, 富永昌治: 3 次元反射モデルの解析と推定, 情報処理学会論文誌: コンピュータビジョンとイメージメディア, Vol.41, No.SIG 10(CVIM 1), pp.1-11 (2000).
- 3) Torrance, K.E. and Sparrow, E.M.: Theory of off-specular reflection from roughened surfaces, *Journal of the Optical Society of America*, Vol.57, pp.1105-1114 (1967).
- 4) Ikeuchi, K. and Sato, K.: Determining reflectance properties of an object using range and brightness images, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.13, No.11, pp.1139-1153 (1991).
- 5) Ramamoorthi, R. and Hanrahan, P.: A sig-

nal processing framework for inverse rendering, *Computer Graphics Proceedings, SIGGRAPH2001*, pp.117-128 (2001).

- 6) Tominaga, S. and Tanaka, N.: Estimating reflection parameters from a single color image, *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol.20, No.5, pp.58-66 (2000).
- 7) Finlayson, G.D. and Schaefer, G.: Solving for color constancy using constrained dichromatic reflection model, *Inter. J. Computer Vision*, Vol.42, No.3, pp.127-144 (2001).
- 8) Chan, T.F. and Wong, C.K.: Convergence of the alternating minimization algorithm for blind deconvolution, *Linear Algebra and its Applications*, Vol.316, 1-3, Sep. 2000, pp.259-285 (2000).
- 9) <http://radsite.lbl.gov/radiance/HOME.html>

(平成 14 年 9 月 6 日受付)

(平成 15 年 3 月 28 日採録)

(担当編集委員 向川 康博)



原 健二 (正会員)

1988 年京都大学工学部数理工学科卒業。1990 年同大学院工学研究科数理工学専攻修士課程修了。同年武田薬品工業 (株) 入社。1992 年福岡県工業技術センター入所。1999 年九州大学大学院システム情報科学研究科知能システム学専攻博士課程修了。工学博士。2001 年 4 月より東京大学生産技術研究所協力研究員。現在、福岡県工業技術センター研究員。コンピュータビジョン、コンピュータグラフィックスに関する研究に従事。電子情報通信学会、IEEE 各会員。



Robby T. Tan

2001 年東京大学大学院理学系研究科情報科学専攻修士課程修了。現在、東京大学大学院情報理工学系研究科コンピュータ科学専攻博士課程在籍。カラー画像理解と物理ベースビジョンの研究に従事。



西野 恒 (正会員)

1997年東京大学工学部電子情報工学科卒業。1999年同大学院工学系研究科電子情報工学専攻修士課程修了。2002年同大学院理学系研究科情報科学専攻博士課程修了。理学博士。2002年より科学技術振興事業団研究員、東京大学生産技術研究所博士研究員を経てコロンビア大学リサーチサイエンティスト。コンピュータビジョン、コンピュータグラフィックの分野における研究に従事し、特に physics-based vision, image-based rendering 等の研究に興味を持っている。最優秀論文賞(日本バーチャルリアリティ学会:1999)、最優秀論文賞(VSMM:2000)等を受賞。日本バーチャルリアリティ学会、電子情報通信学会、IEEE 各会員。



中澤 篤志 (正会員)

1974年生。1997年大阪大学基礎工学部システム工学科卒業。1999年同大学院基礎工学研究科修士課程、2001年同大学院博士課程修了。同年より2003年3月まで科学技術振興事業団研究員(東京大学生産技術研究所)。現在大阪大学サイバーメディアセンター講師。博士(工学)。画像計測、分散視覚システム、動作解析の研究に従事。日本ロボット学会、ヒューマンインタフェース学会、IEEE 各会員。



池内 克史 (正会員)

1973年京都大学工学部機械工学科卒業。1978年東京大学大学院工学研究科情報工学専攻博士課程修了。工学博士。MIT人工知能研究所、電総研、CMU 計算機科学部を経て、1996年より東京大学生産技術研究所教授。人間の視覚機能、明るさ解析、物体認識、人間による組み立て作業の自動認識等の研究に従事。論文賞(ICCV-90, CVPR-91, AIJ-92, ロボット学会誌-97, IEEE R&A 誌-98, MIRU2000, 平成11年度日本バーチャルリアリティ学会論文誌)受賞。電子情報通信学会、人工知能学会、日本ロボット学会、日本バーチャルリアリティ学会、OSA 各会員、IEEE 会員(Fellow)。