

透視投影と点光源下の鏡面反射からの光源位置と反射特性の推定

原 健^{†,††} 西野 恒^{†,†††} 池内 克史[†]

カメラ画像から反射パラメータや光源状況を推定する方法がいくつか提案されているが、無限遠の視点や光源を仮定したものが多く、本論文では、このような仮定が適用できない近距離にある視点と単一点光源のもとで、偏光特性を用いて成分分離された1枚の鏡面反射成分画像のみから、反射パラメータと光源位置を同時に推定する手法を提案する。まず、変数変換により線形化した反射モデルに基づいて光源位置の推定と鏡面反射パラメータの初期推定を行う。次に、元の反射モデルに基づいて光源位置と鏡面反射パラメータの推定値を決定する。

Illuminant Position and Surface Reflectance from Specular Reflection under Perspective Projection and Point Light Source

KENJI HARA,^{†,††} KO NISHINO^{†,†††} and KATSUSHI IKEUCHI[†]

In this paper, we propose a new method for estimating specular reflection parameters of a real object's surface from a single image, as well as the position of the light source. We use polarization filters to separate the specular reflection component from the diffuse one. Different from previous approaches, which heavily assumed both distant viewpoint and light source position, our method can work even under short distance of them. Given a specular reflection component, the method start with estimating the position of the light source. At the same time, the initial values of reflectance parameters are also estimated by linearizing the reflection model with a variable transformation. The estimated reflection parameters and position of the light source are then refined based on the original reflection model.

1. はじめに

表面反射モデルは物体表面を構成する材質の反射特性をモデル化したものであり、一般に物体の色、ハイライトの見えや幾何形状に関するパラメータを用いて記述される。このように反射モデルは材質に依存することから、コンピュータビジョンにおける物体認識やインスペクションに利用されている。また、コンピュータグラフィックス(以下、CG)の分野では、任意の視点や光源状況下における物体の見えをリアルに合成することへの応用が期待されている。

反射モデルを用いる際の問題点の1つとして、現実の物体のパラメータの値を正確に求めることが容易でないことがあげられる。そのため、現状ではユーザが試行錯誤しながら適当と判断した値を選択することが

多い。そこで近年、この反射パラメータを画像解析により簡便に推定する研究がさかんに行われている。反射モデルを推定する手法は2つに大別することができる。

1つは複数枚の画像を入力として画素ごとに異なる反射パラメータを推定するもので、光源方向を変化させた連続画像セットを用いて反射パラメータを推定する手法¹⁾や、曲面物体に対して視線方向を変化させながら取得した少数枚の画像から反射パラメータと複数光源分布を同時推定する手法²⁾などがあげられる。

もう1つは、テクスチャのない物体表面で同一のパラメータ値となる反射モデルが成り立つことを仮定して、1枚のみの画像からパラメータ推定を行う方法である。特に、光源状況も同時に推定できる簡便なものとして、Torrance-Sparrowモデル^{3),10)}を簡略化した反射モデルを用いる手法⁴⁾や、球面調和関数と因子分解を用いる手法⁵⁾、Phongモデルに基づく方法⁶⁾などが提案されてきた。しかし、これらの手法はいずれも、無限遠の視点と点光源にそれぞれ対応する平行投影モデルと平行光源(図1(a))を仮定しており、物体から近距離にある視点や光源(図1(b))の条件下で撮

† 東京大学生産技術研究所

Institute of Industrial Science, The University of Tokyo

†† 福岡県東京事務所

Fukuoka Prefectural Government Office in Tokyo

††† コロンビア大学

Columbia University

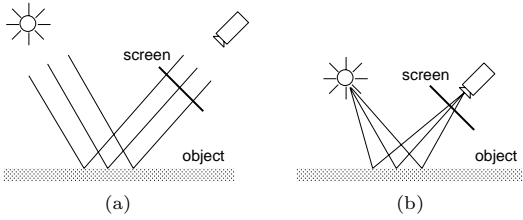


図1 透視投影モデル
Fig.1 Perspective model.

影された画像には適用できないという制限があった。

本論文では、文献4)の手法を透視投影モデルと有限距離の点光源下に拡張し、視点や光源が物体から近くにあるときでも、1枚のみの画像から反射パラメータと光源位置を同時に推定する手法を提案する。2色性反射モデルにより、反射光は拡散反射成分と鏡面反射成分の和からなることが知られている⁷⁾。拡散反射パラメータが誤差の影響に対しても比較的安定に推定できるのに対し、鏡面反射パラメータの推定は不安定になることが多い。そこで本論文では、鏡面反射成分の輝度分布と光源位置および鏡面反射パラメータの関係を解析することにより、鏡面反射パラメータを推定する。

これまで提案されてきた反射パラメータ推定手法の多くは、物体から遠く離れた視点と光源に適用範囲が限られるだけでなく、たとえば平面物体に対してパラメータ推定に必要な光線・物体間の角度情報が縮退し(図1(a))、推定そのものが困難になるという問題も存在した。これに対し、本手法では、1枚の画像と幾何データから得られた複数の異なる角度と輝度の情報を用いて反射パラメータと光源位置を同時に推定することが可能である(図1(b))。

本手法では、1)カメラ位置、視点方向、物体形状がともに既知である、2)単一で白色に近い点光源を用いる、3)凸形状の物体を対象とし、影や相互反射は生じない、4)物体表面の色や材質は一樣で、どの表面点での反射も同一パラメータの Torrance-Sparrow 反射モデル^{3),10)}に従う、ことを仮定する。また入力には、偏光フィルタを用いて原画像から成分分離した鏡面反射成分画像を用いる。

本手法ではまず、1枚の鏡面反射成分画像から、変数変換により線形化された反射モデルに基づき、光源位置の推定と鏡面反射パラメータの初期推定とを順に行う。次に、本来の Torrance-Sparrow 反射モデルに基づいて光源位置と鏡面反射パラメータの推定値を最終的に決定する。また、このようにして推定された光源位置と反射パラメータを用いて CG 画像を生成し、

実画像との比較により本手法の妥当性を検証する。

本論文の構成は以下のとおりである。まず、2章では可視光領域における反射と偏光の原理について簡単に述べ、本報告で採用した反射成分分離の原理を示す。3章では、入力であるカラー画像から反射モデルのパラメータと光源位置を推定する方法を説明する。4章で実験結果を紹介し、5章では結論をまとめる。

2. 反射成分の分離

本章では、物体表面における光反射のしくみを簡単に説明したうえで、偏光を用いて反射成分を分離する原理について述べる。

2.1 物体表面反射

物体からの反射光は一樣ではなく、物体の材質、形状によって様々な成分がある。不均質な誘電体を考えた場合、反射光は拡散反射と鏡面反射の2つの成分からなることが知られている⁷⁾。拡散反射は物体表面を透過し、内部の色素(pigment)と衝突を繰り返して再度空気中に透過してきた光であり、diffuse lobeとも呼ばれる。鏡面反射は入射光の波長よりも十分大きな平らな面から正反射方向に直接反射される光である。拡散反射が物体中で反射や屈折、吸収を繰り返し、物体の色を認識させる光となるのに対し、鏡面反射は1回で反射するためにエネルギーが最も大きく、光源色とほぼ同じ色になる。さらに、鏡面反射光は specular lobe と specular spike に分けられるが、このうち specular spike は正反射方向付近の非常に限られた方向でしか観測されない。そこで、鏡面反射をモデル化するときには、specular spike を無視して specular lobe のみを扱うことが多い。

本論文では、このような反射モデルの1つとして、Torrance-Sparrow 反射モデル^{3),10)}を簡略化したモデルを用いる⁴⁾。このモデルは次式で与えられる。

$$\frac{L_m}{I_m} = E_{d,m} + E_{s,m} \quad m = R, G, B \quad (1)$$

ここで、 L_m は観測された画素の輝度である。 I_m は点光源から物体表面点までの距離 r と光源の光度 $I_{q,m}$ を用いて

$$I_m = \frac{I_{q,m}}{r^2} \quad (2)$$

のように表される。 $I_{q,m}$ には一定の値を用いることが多く、ここではその値を1とする。また、 $E_{d,m}$ と $E_{s,m}$ はそれぞれ拡散反射成分と鏡面反射成分であり、

$$E_{d,m} = K_{d,m} \cos \theta_i \quad (3)$$

$$E_{s,m} = \frac{K_{s,m}}{\cos \theta_r} \exp \left[-\frac{\alpha^2}{2\sigma^2} \right] \quad (4)$$

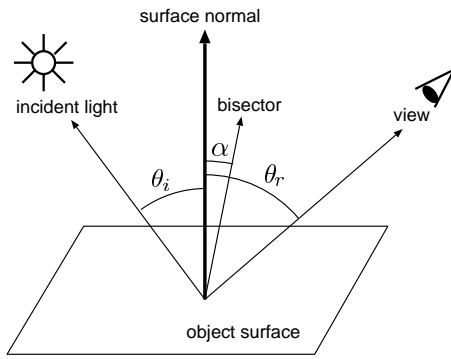


図2 反射の幾何学モデル

Fig. 2 Geometric model of reflection.

のように表される．ここで， $K_{d,m}$ と $K_{s,m}$ は各々の反射成分に対応する反射係数， σ は表面あらさである．本論文では， $\tilde{K}_s = [K_{s,R}, K_{s,G}, K_{s,B}]^T$ と σ をまとめて鏡面反射パラメータと呼ぶことにする．また，図2に示すように， θ_i は物体表面の点において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．

2.2 偏光を用いた反射成分分離^{8),9)}

一般に自然光は非偏光であり，すべての方向に対してランダムに振動している．白色光などの自然光を直線偏光子に通した場合，出射光は直線偏光となるが，自然光でも複屈折性のある結晶を透過したり，物体から反射されたりすると，偏光特性が現れてくる．このように自然光の一部が偏光された光を部分偏光と呼ぶ．

ここで，自然光を直線偏光子に通した光源を設定することを考える．このような光源により照らされた物体からの反射光は，一般の反射光の場合と同様，拡散反射と鏡面反射の和からなり，そのうち拡散反射は内部でのランダムな反射のために非偏光となる．また，入射光が直線偏光であることから，鏡面反射は直線偏光と見なせる．したがって，反射光の直線偏光成分は鏡面反射 I_s ，非偏光成分は拡散反射 I_d にそれぞれ一致する．

さらに，レンズの前に取りつけたもう一方の偏光子を回しながら反射光を観察する．このとき，強度反射率は振動方向に依存するため，明るさに変化が現れる．偏光子の方向が入射面に対して垂直なときに光強度の最大値 I_{max} ，入射面に平行なときに光強度の最小値 I_{min} が観測される．ここで， I_{min} は反射光における非偏光成分に相当しており，非偏光成分の光強度の1/2となる．一方，偏光成分は偏光子を回転した際に観察される透過光強度の変化として観察され，偏光

成分の光強度は $I_{max} - I_{min}$ で表される．

以上により，次式のように，観測値 I_{max} と I_{min} を用いて反射光の反射成分を分離することができる．

$$I_d = 2I_{min} \quad (5)$$

$$I_s = I_{max} - I_{min} \quad (6)$$

3. 光源位置と反射パラメータの推定

反射モデルの式(1)に基づき，前節で分離した1枚の鏡面反射成分画像と物体の幾何形状を入力として，光源位置 $L = (x_l, y_l, z_l)^T$ と鏡面反射パラメータ (\tilde{K}_s, σ) を推定する．

提案手法における推定手順は2段階からなる．まず，鏡面反射のモデル式を対数変換した関係式を用いて，光源位置と鏡面反射パラメータの初期推定を行う．次に，本来の鏡面反射のモデルに基づいて，鏡面反射パラメータと光源位置の推定値補正を行う．

3.1 光源位置の推定と反射パラメータの初期推定

鏡面反射輝度が最大になる表面点(以下，鏡面ピーク)における単位法線ベクトルを N_p ，鏡面ピークを始点として点光源の方向に向かう単位ベクトルを L_p ，視点方向に向かう単位ベクトルを V_p でそれぞれ表す．このとき，鏡面ピークでは正反射が起きていると見なせるので， L_p は N_p と V_p を用いて

$$L_p = N_p + (N_p, V_p)N_p - V_p \quad (7)$$

のように表される．このとき，点光源の位置ベクトル L は，鏡面ピークの位置ベクトル P ， L_p ，鏡面ピークから点光源までの距離 l_p を用いて

$$L = P + l_p L_p \quad (8)$$

のように表される．ここで， P は鏡面ピークに属する表面点の画素位置 $(x_p, y_p)^T$ から求めるので，光源位置 L を推定する問題は $\langle x_p, y_p, l_p \rangle$ を推定する問題に帰着する．以下，この推定値 $\langle x_p^*, y_p^*, l_p^* \rangle$ を求める方法を説明する．

まず，式(4)の両辺の対数をとると

$$\ln E_{s,m} = \ln K_{s,m} - \frac{\alpha^2}{2\sigma^2} - \ln \cos \theta_r \quad (9)$$

$m = R, G, B$

ようになる．ここで

$$X = \frac{\alpha^2}{2} \quad (10)$$

$$Y = \ln E_{s,m} + \ln \cos \theta_r \quad (11)$$

$m = R, G, B$

のように定義すると，式(9)は

$$Y = -\frac{1}{\sigma^2} X + \ln K_{s,m} \quad m = R, G, B \quad (12)$$

のようになり，線形な鏡面反射のモデル式が得られる．

式 (12) により, (X, Y) 平面上のデータ対の点はすべて同一直線上にあることが分かる. そこで, まずこのデータ対の集合に直線あてはめを行い, 次にこれらの係数を比較することで, 鏡面反射パラメータ (\tilde{K}_s, σ) の推定値を得ることができる. しかし, 光源位置が未知の現時点では, 式 (10) に現れる角度 $\alpha = \alpha(L)$ が求まらず, (X, Y) 平面にデータ対をプロットすることもできない. そこで, 真値に近い光源位置下ほど, (X, Y) 平面にプロットされるデータ対の集合が直線状をなすと仮定し, この直線関係を評価する統計量として相関係数を導入する.

(X, Y) 平面上の n 対の測定値 $(X_1, Y_1), \dots, (X_n, Y_n)$ に対し, 相関係数 r_{XY} は

$$r_{XY} = \frac{\sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (13)$$

で与えられる. ただし, 上の \sum は $i=1$ から $i=n$ までの総和, \bar{X} と \bar{Y} はそれぞれ, $\sum_{i=1}^n X_i = n\bar{X}$, $\sum_{i=1}^n Y_i = n\bar{Y}$ である. また, r_{XY} はつねに $-1 \leq r_{XY} \leq 1$ であり, その絶対値が大きいほど (X, Y) 平面上の点の集合の間に直線関係が成り立つことが知られている.

ここで, 式 (10), (11) で定義された X と Y は, 式 (12) より明らかに負の相関が成り立たなければならないことから, 相関係数 $r_{XY} = r_{XY}(x_p, y_p, l_p)$ を評価関数とし, これを最小にする $\langle x_p, y_p, l_p \rangle$ の値を推定値として採用する. ただし, 相関係数を適用するためには, 外れ値がなく, データ数も十分多くなければならない. 上の (X, Y) もこれらの条件を満足していると仮定する.

ところで, r_{XY} を最小化する $\langle x_p, y_p, l_p \rangle$ の組を解析的に求めることは困難なので, ここでは近似解を離散的に全探索するアプローチをとる. まず, 最大輝度を持つ画素からなる領域 $\Omega_{x,y}$ と適当に与えた l_p の定義域 $\Omega_l = [l_{p,min}, l_{p,max}]$ の積集合 $\Omega_{x,y} \times \Omega_l$ を用いて, 光源位置 $\langle x_p, y_p, l_p \rangle$ の探索範囲 Ω を定義する. 次に, Ω において $\langle x_p, y_p, l_p \rangle$ を刻み幅 $\Delta x_p, \Delta y_p, \Delta l_p$ で変化させながら $r_{XY}(x_p, y_p, l_p)$ の値をすべて調べあげて, r_{XY} の最小解を近似的に求める. これと同様の手続きを RGB ごとに独立して行い, 得られた値の平均をとったパラメータの値 x_p^*, y_p^*, l_p^* から光源位置の推定値 L^* が求まる.

次に, このようにして得られた L^* のもとで, 鏡面反射パラメータ (\tilde{K}_s, σ) を以下のように推定する. 各 RGB チャネルごとに式 (10), (11) により求めたデータ対を (X, Y) 平面上にプロットし, 最小 2 乗法によ

る直線あてはめを行う. この回帰直線と式 (12) の係数を RGB ごとに比較した次式に従って, 推定値 \tilde{K}_s^* と σ_m^* を求める.

$$K_{s,m}^* = \exp(b_m) \quad (14)$$

$$\sigma_m^* = \sqrt{-\frac{1}{a_m}} \quad m = R, G, B \quad (15)$$

ここで, $a_m < 0$ と b_m はそれぞれ, 回帰直線の傾きと切片を表す. また, σ は本来 RGB の影響を受けない量であるが, 誤差のために式 (15) の σ_m^* は m ごとに異なる値となることが多い. そこで, σ_m^* の平均値を σ の推定値 σ^* とする.

3.2 推定値の補正

前節で反射パラメータを推定する際に用いた最小 2 乗法が厳密な意味で有効となるのは, あてはめ誤差が正規分布に従う独立なランダム変数のときである. これは式 (10), (11) の変数変換の前の本来の推定誤差が正規分布に従わないことを意味する. したがって, 式 (12) の直線あてはめにおける残差は, パラメータの近似度を正確に反映しているとはいえない. そこで, より適切なパラメータを求めるため, 本来の反射モデルの式 (4) に基づき, 前節で得られた初期推定値の近傍で推定値の探索を再度行う.

このパラメータ補正は, パラメータ値のもとで復元される鏡面反射成分の CG 画像と, 入力である鏡面反射成分の実画像との間の誤差の最小化により行われる. このとき用いる誤差評価関数を

$$E_{energy}(\tilde{K}_s, \sigma, l_p) = \sum_{m \in \{R, G, B\}} \sum_{k=1}^{N_k} \left(E_{s,m}^{(k)} - \frac{K_{s,m}}{\cos(\theta_r^{(k)})} \exp\left[-\frac{(\alpha^{(k)}(L))^2}{2\sigma^2}\right] \right)^2 \quad (16)$$

のように定義する. ここで, N_k は物体表面に対応する画素の個数, $E_{s,m}^{(k)}$ はその k 番目の画素の鏡面反射成分輝度, $\theta_r^{(k)}$ と $\alpha^{(k)}$ はそれぞれ, k 番目の画素に対応する表面点における角度 θ_r と α である. 前節で求めた $\langle \tilde{K}_s^*, \sigma^*, l_p^* \rangle$ を初期値として非線形関数 E_{energy} を局所最小化するパラメータの値を最終的な推定値とし, これを $\langle \tilde{K}_s^{**}, \sigma^{**}, l_p^{**} \rangle$ で表す.

この最小化の手続きとして, 1) \tilde{K}_s を 1 回更新する処理, 2) σ を収束するまで反復更新する処理, 3) l_p を 1 回更新する処理, の 3 つを交互に繰り返す方法を採用する¹¹⁾.

1) では, 現在得られている σ と l_p を固定して \tilde{K}_s を

$$K_{s,m} = \sum_{k=1}^{N_k} E_{s,m}^{(k)} / \sum_{k=1}^{N_k} \frac{1}{\cos(\theta_r^{(k)})} \exp\left[-\frac{\alpha^{(k)}(\mathbf{L})^2}{2\sigma^2}\right]$$

$$m = R, G, B \quad (17)$$

により修正する．ここで，式(17)は式(16)の右辺を $K_{s,m}$ について微分し，その微係数がゼロになるように $K_{s,m}$ について解いた式である．

2) では，現在得られている \tilde{K}_s と l_p を固定して

$$\sigma^{(t+1)} = \sigma^{(t)} - \gamma \left. \frac{\partial E_{energy}}{\partial \sigma} \right|_{\sigma=\sigma^{(t)}} \quad (18)$$

による手続きを $\sigma^{(t)}$ が収束するまで繰り返す．ここで，式(18)は最急降下法の更新則であり， t は更新ステップ， γ は学習係数である．

3) では，現在得られている \tilde{K}_s と σ を固定し， l_p について摂動を行う．すなわち，現在得られている l_p に対し， $l_p^1 = l_p - \Delta l'_p$ ， $l_p^2 = l_p$ ， $l_p^3 = l_p + \Delta l'_p$

の中で $E_{energy}(\tilde{K}_s, \sigma, l_p^n)$ ($n = 1, 2, 3$) が最小となる l_p^n を選び，これを l_p の次の値とする．本論文では， $\Delta l'_p = \Delta l_p$ とした．

図3に提案手法の概要を示す．

4. 実験結果

4.1 合成画像を用いた実験

本節では，提案手法を合成画像に適用した例を示す．パラメータ推定の対象となる物体は，図4(a)に示すシーン中の直方体の大きな方である．入力画像はRADIANCEと呼ばれるレンダリングソフトで作成したものである¹²⁾．RADIANCEではWard反射モデル¹³⁾が採用されており，Torrance-Sparrow反射モデルの鏡面反射パラメータの真値を正確に知ることは困難である．しかし，Wardモデルの式はTorrance-Sparrow反射モデルに非常によく似た形をしており，本手法の光源位置推定の妥当性の検証に用いることは可能と考えられる．なお，提案手法の入力は偏光を用いて分離された鏡面反射成分画像であることから，対象物体には鏡面反射のみを生じるような表面反射特性が与えられている．

提案手法を適用した結果，光源位置の真値 [13, 2, 3] に対して $L^{**} = [12.8, 1.99, 3.01]$ のような推定値が得られ，比較的良好な推定結果が得られたといえ

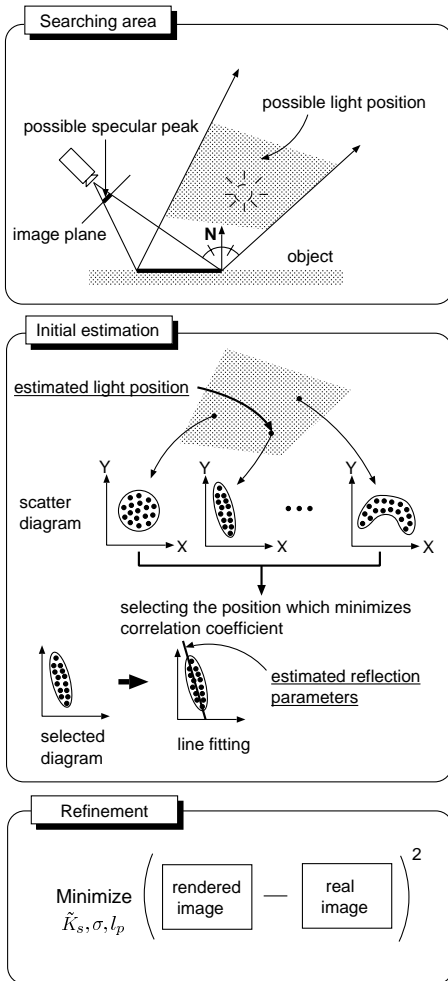


図3 提案手法の手順

Fig. 3 Basic steps of the proposed method.

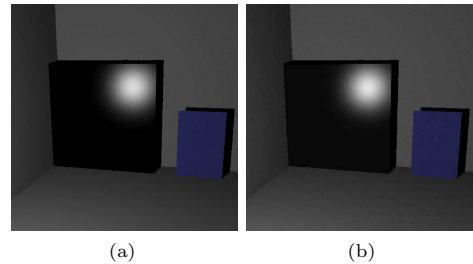


図4 生成結果：(a)入力画像，(b)生成画像

Fig. 4 Synthesized image: (a) input image, (b) synthesized image.

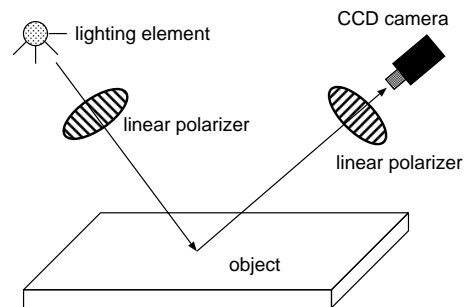


図5 実験装置図

Fig. 5 Experimental setup.

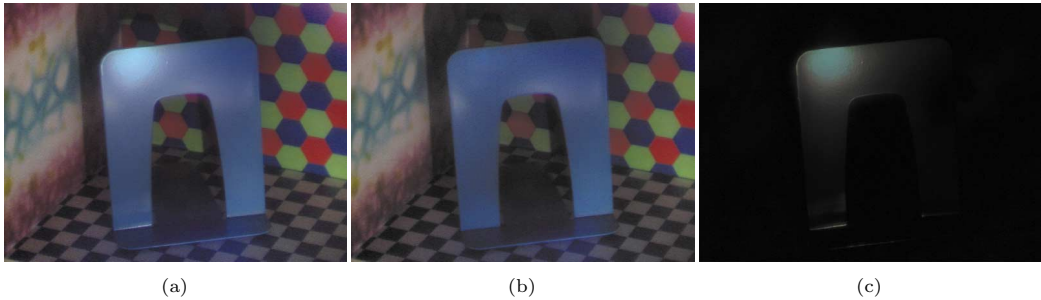


図 6 反射成分の分離：(a) 入力画像，(b) 拡散反射，(c) 鏡面反射

Fig. 6 Decomposition of reflection components: (a) input image, (b) decomposed diffuse component, (c) decomposed specular component.

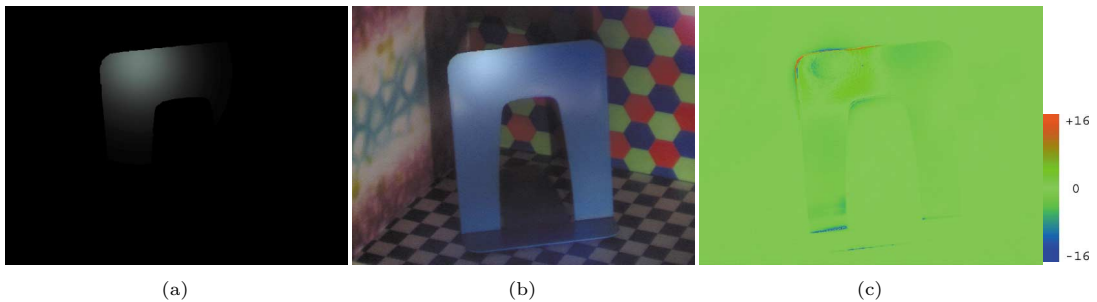


図 7 合成結果：(a) 鏡面反射成分の CG 画像，(b) CG 画像，(c) 誤差画像

Fig. 7 Synthesized images: (a) synthesized specular component, (b) synthesized image, (c) error colormap.

る．鏡面反射パラメータの推定値は， $\sigma^{**} = 0.051$ ， $\vec{K}_s^{**} = [36.9, 36.9, 36.9]^T$ であった．これらの推定値を用いて CG 画像を生成したものを図 4 (b) に示す．入力画像にかなり近い CG 画像が得られていることが分かる．

4.2 実験環境

実画像を入力としたときの実験結果を紹介する前に，その際の実験環境について簡単に説明しておく．

図 5 に示す実験装置図のように，カメラ側の偏光子を回して 2 枚の画像 I_{max} ， I_{min} を取得し，これらの差より得られた鏡面反射成分画像を入力とする推定実験を行った．ハロゲンランプの点光源から直線偏光子を通過して入射する直線偏光以外の影響を避けるため，撮影は暗室で行った．偏光子を通して撮影された画像は，そのままでは偏光子とカメラレンズの光の干渉による影響を強く受ける．そこで，光源色が白色に近いことを仮定して，白色のキャリブレーションボードを偏光子を通して撮影し，ボード画像における各画素の RGB のチャンネル間の相対的な強度の比を利用して光学的キャリブレーションを行った．また，カラー画像と同じアングルで距離計測が可能な光線パターン投影型レンジファインダを用いて，物体表面の距離画

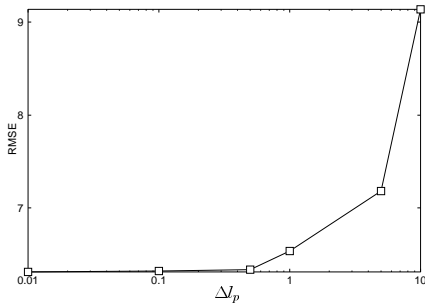
像データを取得し，これに平面や 2 次曲面をあてはめたものを入力幾何データとして用いた．

4.3 実画像を用いた実験結果

入力に用いた実カラー画像を図 6 (a)，偏光フィルタを用いて分離された拡散反射成分画像を図 6 (b)，鏡面反射成分画像を図 6 (c) にそれぞれ示す．

本手法を適用する際， x_p ， y_p ， l_p の定義域をそれぞれ $[100, 120]$ ， $[254, 270]$ ， $[1, 25]$ ，これらの刻み幅をそれぞれ 1，1，0.5 とした．このとき得られた光源位置の推定値は $L^{**} = (-8.88, 8.14, 15.62)^T$ ，鏡面反射パラメータの推定値は $\sigma^{**} = 0.0189$ ， $\vec{K}_s^{**} = [11.9, 14.9, 13.8]^T$ であった．これらの推定値を用いて生成した鏡面反射成分画像を図 7 (a)，CG 画像を図 7 (b) にそれぞれ示す．ただし，図 7 (b) に示す CG 画像は，図 6 (b) に示す拡散反射成分画像と図 7 (a) に示す鏡面反射成分画像の和をとった画像である．この復元結果がどのくらい実測値に適合しているかを視覚化するため，図 6 (c) と図 7 (a) の差分をとった画像を図 7 (c) に示す．ここでは，CG 画像が入力画像と比べて明るいところほど赤く，暗いところほど青く，また誤差がゼロに近いほど緑になるように表示している．

次に，光源位置推定の際に設定した刻み幅がパラ

図8 Δl_p と誤差の関係Fig. 8 Relationship between Δl_p and the error-of-fitting.

メータ推定の安定性にどの程度影響するかについて調べた。図8のグラフの横軸は光源の奥行き l_p を探索する際の刻み幅 Δl_p を対数スケール表示したもの (x_p と y_p はピーク画素位置に固定), 縦軸は実画像とCG画像の物体領域における画素値の平均二乗誤差である。図8により, Δl_p の値が小さくなるほど精度が向上することが分かる。約0.5以下でほとんど誤差に変化が見られないのは, 画像の濃度分解能の制約によるものと考えられる。

最後に, 曲面物体への適用可能性について検証した結果を紹介する。このときの入力実画像を図9(a)に示す。この実験で対象とする物体は凸の形状をしており, 相互反射は無視できる。図9(b)は偏光フィルタを用いて分離された拡散反射成分, 図9(c)は鏡面反射成分である。図9(d)は, 本手法で推定された光源位置と反射パラメータの値を用いて合成されたCG画像である。このとき得られた推定値は, $L^{**} = [4.98, 3.95, 10.8]^T$, $\sigma^{**} = 0.159$, $\tilde{K}_s^{**} = [31.7, 32.3, 34.5]^T$ であった。

5. 結 び

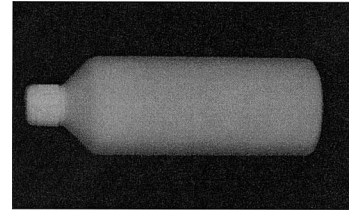
本論文では, 偏光フィルタを用いて分離された1枚の鏡面反射成分画像の輝度分布を解析し, 物体から近距離にある視点と単一点光源下に適応して鏡面反射パラメータと光源位置を推定する手法を提案した。

提案手法では, 対数変換を用いて線形化した反射モデルと元の反射モデルを段階的に用いて最適な反射パラメータの値を探索するというアプローチがとられているが, これで正しい値が得られることが理論的に保証されているわけではない。しかし, 合成画像や実画像を用いた実験例では, ほぼ正しく推定できていることが確認された。

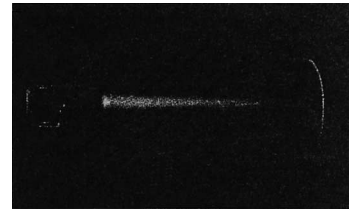
物体から十分離れた光源条件下に適応が限定されることの多かった従来の推定手法に対し, 本手法の利点は有限距離にある視点と単一点光源下において反射パラメータと光源位置を簡便に推定することが可能なこ



(a)



(b)



(c)



(d)

図9 反射成分の分離: (a) 入力画像, (b) 拡散反射, (c) 鏡面反射, (d) CG画像

Fig. 9 Curved object: (a) input image, (b) decomposed diffuse component, (c) decomposed specular component, (d) synthesized image.

とである。

本論文では鏡面ピークから光源までの距離と表面粗さを同時に求めているが, いずれにも鏡面反射成分の広がりに影響を与える性質があり, これらの解が一意にかつ安定に得られるかどうか問題となる。これらの問題に対し, 我々は一意性が保証されることを数値シミュレーションにより確認しているが, 解が安定に得られる保証はない。安定性を向上するために拡散反射成分を併用する手法などが考えられる¹⁴⁾。

また, 現在の手法では既知である幾何情報に含まれる誤差が大きくなることもない, 推定精度も悪化することはさげられない。そこで, 今後の課題として, あ

る程度不正確な幾何情報の入力にも適応できる光学モデル化手法の開発があげられる。

謝辞 本研究は経済産業省新工ネルギー・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) Sato, Y. and Ikeuchi, K.: Temporal-color space analysis of reflection, *Journal of the Optical Society of America A*, Vol.11, No.11, pp.2990-3002 (1994).
- 2) Nishino, K., Zhang, Z. and Ikeuchi, K.: Determining Reflectance Parameters and Illumination Distribution from a Sparse Set of Images for View-dependent Image Synthesis, *Proc. IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV'01)*, Vol.1, pp.599-606 (2001).
- 3) Torrance, K.E. and Sparrow, E.M.: Theory for 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 signal processing framework for inverse rendering, *Computer Graphics Proceedings, SIGGRAPH'01*, 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) Shafer, S.A.: Using color to separate reflection components, *Color Research and Application*, Vol.10, No.4, pp.210-218 (1985).
- 8) 斉藤めぐみ, 佐藤洋一, 池内克史: 赤外光の偏光解析とその透明物体形状モデリングへの応用, 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「Physics-based Vision とコンピュータグラフィックスの接点」特集号, Vol.41, No.SIG 10 (CVIM 1), pp.12-18 (2000).
- 9) Wolff, L.B. and Boult, T.E.: Constraining object features using a polarization reflectance model, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.13, No.6, pp.167-189 (1991).
- 10) Nayar, S.K., Ikeuchi, K. and Kanade, T.: Surface reflection: physical and geometrical perspectives, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.13, No.7, pp.611-634 (1991).
- 11) 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).

- 12) <http://radsite.lbl.gov/radiance/HOME.html>
- 13) Ward, G.J.: Measuring and modeling anisotropic reflection, *Computer Graphics Proceedings, SIGGRAPH'92*, pp.265-272 (1992).
- 14) 原 健二, Robby T. Tan, 西野 恒, 中澤篤志, 池内克史: 単一カラー画像からの光源位置と光源色の推定, *Proc. MIRU2002*, Vol.I, pp.477-482 (2002).

(平成 14 年 3 月 1 日受付)

(平成 14 年 9 月 12 日採録)

(担当編集委員 太田 直哉)



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 年より東京大学生産技術研究所協力研究員。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。電子情報通信学会会員, IEEE 会員。



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ス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 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，電子技術総合研究所，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各会員。OSA会員，IEEE会員（Fellow）。
