

複数の不均質物体に対するカラー画像の解析

富永昌治† 今村淳志†

プラスチックのように表面が滑らかな不均質物体が接近して存在するとき、マットな物体色以外にハイライトや鏡のような相互反射の現象がしばしば観測される。本論文では、このような複数の不均質物体の画像をカラー反射モデルに基づいて解析する方法を示す。不均質物体表面の反射は拡散成分と鏡面成分からなる標準の2色性反射モデルで記述できる。まず、鏡面反射成分は照明光と同じ色成分をもつことから、画像のハイライト領域から光源色の推定が可能である。このためにハイライト領域を抽出して、その一次独立な領域の数に応じて光源の色ベクトルを算出するアルゴリズムを示す。次に、計測画像の色度分布から物体色を推定する。相互反射を考慮に入れた不均質物体の観測色ベクトルは光源色と2つの物体色の線形結合として近似できることを示す。これに基づいて画像の色度を表す相対的な座標系として色度球面を提案する。この上で色度分布から代表色度点を抽出し、球面三角形の頂点を探索することにより物体色の色度を決定する手法を示す。最後に、CGのレンダリングによる合成画像とプラスチックの実測画像を用いた実験で解析法の妥当性を検討する。いずれの場合も光源色と物体色の正確な推定ができ、本来の物体色のみからなる画像が得られることを示す。

Analysis of Color Images for Multiple Inhomogeneous Object

SHOJI TOMINAGA† and ATSUSI IMAMURA†

Highlights and mirror-like interreflections are often observed from the smooth surfaces of multiple inhomogeneous objects like plastics. This paper presents an analysis method of an image for multiple inhomogeneous objects based on a color reflection model. First, light-source color can be estimated from highlights, since the specular reflection component has the same color component as the illumination. We show an algorithm for detecting the highlight regions in a measured image, and computing the color vector of a light source from the linearly independent regions. Next, object color is estimated from the chromaticity distribution of an image. It is shown that, when there is interreflection between two surfaces, the observed color vectors can be approximated as a linear combination of the light-source color and two object colors. A chromaticity sphere is then proposed as a relative coordinate system to represent the chromaticity distribution. We show a procedure for extracting representative chromaticity points, and determining the vertices of a spherical triangle. Finally, the feasibility of our analysis method is demonstrated in experiments using a synthetic image and a measured image. Accurate estimation of the color components is performed, and an image consisting of object colors only is obtained.

1. はじめに

反射物体の色は照明光源の分光分布、物体表面の反射率、視覚系の分光感度およびそれらの幾何学的配置で定まる。しかし自然環境で現実に観測される画像は物体色のみならず、鏡面反射によるハイライトや物体間の相互反射の影響が含まれることが多い。これらの影響は物体表面を形成する材料に大きく依存する。例えば紙のようなマットな表面であれば、ハイライトが生ずることは少なく、接近した紙の間では拡散反射成

分に基づく相互反射の効果が大きい。

他方、プラスチックのように表面が滑らかな不均質物体では、鏡面反射を起こしやすく、強いハイライトが生じることがある。また拡散反射成分による相互反射よりも、鏡面反射成分による相互反射の効果が顕著になる。実際この効果によって、周辺に存在する他の物体の姿が、表面に映り込む現象が生じる。

これまでの伝統的なカラー画像解析は物体色のみからなる理想的な画像を対象とし、上述のようなハイライトや相互反射を考慮することはあまりなかった。Klinker と Shafer らは不均質物体の画像解析に反射モデルを初めて導入し、ハイライトの検出や画像分割に有用であることを示した¹⁾⁻³⁾。その後反射モデルを用いたカラー画像解析はいくつか発表されており、相

† 大阪電気通信大学工学部精密工学科
Department of Precision Engineering, Faculty of
Engineering, Osaka Electro-Communication Uni-
versity

互反射に関連して Bajcsy ら⁴⁾, 橋本ら⁵⁾, Funt ら⁶⁾の研究があげられる. 筆者ら⁷⁾もマットな表面間の拡散相互反射に対して, カラー反射モデルに基づいたスペクトル解析法を提案し, カラー画像に適用した. カラー画像は各表面に固有の物体色と表面に共通の相互反射成分の2つの色成分に展開することができた.

本論文では, 表面が滑らかで鏡面反射成分を有する複数の不均質物体の画像に対して, カラー反射モデルに基づいた解析法を提案する. 不均質物体の表面は上述のようにマットな表面とは全く異なった反射特性をもつ. このような物体に対してハイライトや相互反射を考慮した総合的な画像解析は見あたらない.

不均質物体の光反射は拡散成分と鏡面成分からなる標準の2色性反射モデルで記述できる. 拡散成分は物体色を生成するが, 鏡面成分によるハイライトや相互反射は物体認識からみれば, 物体色に対する一種の外乱である. しかし不均質物体から観測された高輝度のハイライトは照明光が表面で直接反射したもので, その色は照明光の色と一致する. そこで計測画像のハイライト領域を検出すれば, そこから光源色が推定できることになる. 光源色の情報は大変重要で, 画像計測における白色基準がこれで定まる. 本論文では, 2つの不均質物体が接近して存在し, 計測画像にはマットな物体色領域とハイライト領域, さらに相互反射の影響が含まれることを想定している. まず画像のハイライト領域を検出して光源色の推定を行う. 次にこの光源色を基準にした相対的な色度座標系を定める. この上で画像の色度分布から拡散反射による物体色の推定を行う. 計測画像はこのとき光源色と物体色の各色成分に分解することができる.

以下では, まず第2章でハイライトを検出するための画像計測を述べる. 第3章でハイライト領域の検出と光源色の推定方法を示す. 第4章で相互反射を考慮したカラー反射をモデル化し, 色度座標系として色度球面を定義する. 画像をこの上に写像して物体色を推定する方法を提案する. 第5章で合成画像と実測画像を用いた実験結果を示す. 第6章はまとめである.

2. 画像の計測

カメラのダイナミックレンジは, 人間の視覚系に比べて非常に狭い. このためハイライトを含むシーンを計測する場合, いくつかの問題点が生じる¹⁾.

いま CCD カメラの色信号が RGB 各8ビットで表現されているとする. カメラの絞りを固定していると

きハイライトのように部分的に輝度の高い光が入射すれば, 対応する画素の RGB のいずれかの値が255を超えてしまい, 計測値はクリップされる. このクリッピングは, 計測した高輝度の色分布が RGB 空間の壁に沿って折れ曲がる現象として現れる. またこれは CCD 素子に対して電荷のあふれ (ブルーミング) を引き起こし, 近傍の画素の計測値を変えてしまう. このような画素はもはや2色性反射の性質を満たさなくなる. クリッピングやブルーミングを避けるには, ハイライトを RGB 値のレンジ内で計測する必要がある. しかしこのとき低輝度の物体色の色信号レベルが相対的に小さくなって, ハイライト以外のマット部の画素は荒く量子化されることになる.

本研究では物体色からハイライトまで輝度が大きく異なる画像を計測するため, カメラのダイナミックレンジを擬似的に拡張する. 同様な手法は文献 5) で実施されており, また文献 8) とも関係している. 同一シーンをカメラの絞りを変えて撮影し, 複数枚の画像を結合する. この結合操作のために標準の白色板を使用した. まず絞りを変えても白色板の色度が変化しないことを確認する. 標準白色板は完全拡散体であるので, これを対象とするシーンの中に置き, 物体色の最大レベルの255とする. 次に絞りを変えて, ハイライトを8ビットのレンジ内で計測する. そして白色板を基準にして結合し, ダイナミックレンジを拡張した画像を生成する.

図1にハイライトを含むシーンの一例として, 2つのプラスチック物体を計測した画像の色分布を示す. RGB 空間の色分布で原点からの直線的なクラスタは拡散反射による物体色の領域を表し, 折れ点から255の範囲を超えて直線的に伸びているのはハイライトの

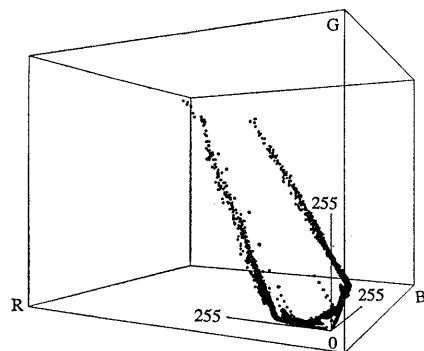


図1 2つのプラスチック物体の計測画像の色分布
Fig. 1 Color distribution of the measured image for two plastic objects.

領域である。これは3枚の画像を合成したもので、最も輝度の高いハイライトの色座標は $(R, G, B) = (826, 656, 701)$ である。

3. 光源色の推定

3.1 ハイライト領域の抽出

不均質物体の表面から反射する光は物理的に異なった2つの経路で反射しており、界面で反射した鏡面反射成分と内部散乱による拡散反射成分とに分かれる。反射光はこれら2つの成分の線形結合で記述できる⁹⁾。ハイライトは鏡面反射成分が強く、光源の情報 が最も得やすい部分である。そこまでハイライト領域の抽出法を述べる。

ハイライト領域は図1のように物体色に比べて輝度が高い。また光源として通常日光や白色光が使用されるので、ハイライトは白っぽくなる。これらをハイライト領域を抽出する手がかりにする。具体的には、明度や色相といった知覚属性が定義された均等色空間を利用し、色分類に基づいた画像の領域分割法¹⁰⁾でハイライト領域を抽出する。なお均等色空間としては、基準白色が未知であるので CIE- $L^*a^*b^*$ のような厳密な表色系は利用できない。そこで RGB から簡便に定義できる近似的均等色空間として、HSV 表色系を使用した。特にここでは阿部ら¹¹⁾が提案したモデルを採用した。

いま8ビットの255レベルで標準化したRGB値およびそれらの最大値、最小値を

$$r = R/255, g = G/255, b = B/255 \quad (1)$$

$$\text{Max} = \max\{r, g, b\}, \text{Min} = \min\{r, g, b\} \quad (2)$$

で記す。このとき色相(H)、彩度(S)、明度(V)の3属性を次式で定義する。

$$H = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{3}(g-b)}{(r-g) + (r-b)} \right) \quad (3)$$

$$S = \text{Max} - \text{Min} \quad (4)$$

$$V = \frac{r+g+b}{3} \quad (5)$$

ただし色相 H の取りうる範囲は $[0, 2\pi]$ である。彩度 S と明度 V の範囲は、拡散反射による物体色についてはともに $[0, 1]$ である。しかし鏡面反射によるハイライトがあれば V の範囲は $[0, 1]$ を越えることがある。図2は図1の計測画像の色分布をHSV空間で表示したものである。彩度と明度の最大値は $S_{\max} = 0.887$ と $V_{\max} = 2.86$ である。ハイライトはこの空間でほぼ垂直方向に分布していることがわかる。

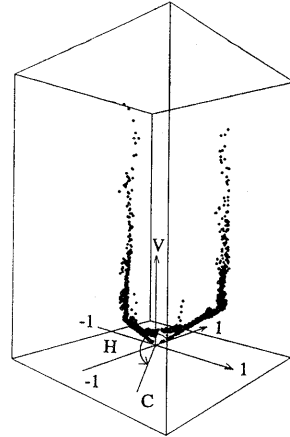


図2 HSV色空間での計測画像の色分布
Fig. 2 Color distribution of the measured image in the HSV color space.

さて、計測画像をこのようなHSV表色系に写像し、明度の高い画素の領域を色分類処理によって抽出する。このとき抽出した領域が一定の面積をもたなければ、光源色推定の信頼性が低くなる。この場合は抽出した領域の近傍に対して、色相を用いて領域融合を行い、ハイライト領域の面積を拡大する。すなわち隣接領域の色相が一致するとき、これらは同一の表面に属するとみなすことができる。

なおハイライト領域は、拡散反射成分に比べて鏡面反射成分が強いけれども、やはり2色性であることに注意すべきである。そこで2色性を試験するために、抽出した各ハイライト候補領域について原画像のRGB値に基づいて主成分分析を行う。主成分展開したときの寄与率に基づいて主成分の数を判定する。第1主成分のみの寄与率が十分大きい(例えば99.5%以上)ならば、主成分の数と1つとみなす。このような領域は不安定な領域とみなして、ハイライト候補領域から除去する。また第1と第2の主成分による寄与率が十分大きければ、主成分の数は2つとみなし、このような領域のみをハイライト領域とする。

ハイライト領域の抽出手順を以下にまとめる。

1. 計測画像をHSV表色系で表色する。
2. 低明度領域をあらかじめ除去する。
3. 色分類に基づいた領域分割により、高明度の画素をもつ領域を抽出する。
4. 抽出した領域の面積がしきい値以下ならば、近傍領域に対して色相による領域融合を行い、ハイライト候補領域の面積を拡大させる。

5. 各ハイライト候補領域について原画像の RGB 値を用いて主成分分析を行う。寄与率に基づいて主成分の数を判定し、主成分の数が2つの領域のみをハイライト領域とする。

3.2 光源色の推定法

(A) 1つのハイライト領域の使用

画像中にハイライト領域がただ1つしか存在しない場合、この領域のみから光源の色ベクトルを推定する。これは RGB 空間における色分布から、2色性反射の性質に基づいて鏡面反射成分の色ベクトルを直接検出することになる。また複数のハイライト領域が存在しても、2つの主成分ベクトルが互いに一次従属の関係にあれば、ハイライトは同一表面にあるか、あるいは同一物体色をもつ表面に存在する可能性がある。ともかく一次独立なハイライト領域が1つしか存在しなければ、以下の直接的な手法で色ベクトルを抽出することができる。

さて色画素の色ベクトルは鏡面反射と拡散反射の2つの成分ベクトルの線形結合で記述され、鏡面ベクトルが光源の色ベクトルに一致する。いま RGB 空間で光源の正規化ベクトルを e 、拡散反射成分による物体色の正規化ベクトルを ρ_D と記す。このとき画素 x で観測された色ベクトル $\rho(x)$ は、相互反射の影響がないとき、

$$\rho(x) = w_D(x)\rho_D + w_S(x)e \quad (6)$$

と表される。ただし x は位置を表すパラメータで、 $w_D(x)$ と $w_S(x)$ は拡散反射と鏡面反射の重み係数である。ベクトル ρ_D と e は RGB 空間で平面（色信号平面）を定義し、すべての色ベクトル $\rho(x)$ はこの平面上にある。

しかし現実の画像について画素の色分布が平面的に分布することは少なく、多くの場合櫛（comb）形になることが知られている²⁾。特にハイライト領域に限定すれば、図1からもわかるように、色分布は折れ線の形をする。図3にこの色分布を詳細に描く。丸印が各画素の色座標を表し、色分布は直線的な2つの画素集合から形成されている。すなわち鏡面反射成分の強いハイライトの画素集合と拡散反射のみからなるマットの画素集合である。ハイライト集合の骨格をなす線分はマット集合の線分の終点から始まる。画素の色分布がこのような2つの線分に分かれることを考慮して、光源の色のベクトルを求めた。

まず色分布の第1主成分軸を求める（図3参照）。次にこの主成分軸を等間隔の区間に分割する。各画素

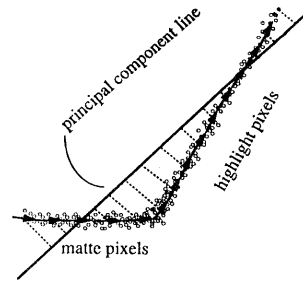


図3 ハイライト領域の色分布
Fig. 3 Color distribution of a highlight area.

の色座標を主成分軸に投影することにより、色分布のヒストグラムを適当な数（例えば100）に分割する。そして区分された色分布を平均して、中心の座標を決める。色分布全体についてこれらの中心座標は1次元的な配列となり、連続した前後の座標から色の方向ベクトルが定まる。さらに、この方向ベクトルが大きく変動する点を線分の折れ点として検出する。最後に、ハイライト集合の方向ベクトルの平均値を光源の色度ベクトルの推定値とする。

(B) 複数のハイライト領域の使用

ハイライトの画素集合が図3のように直線的で密なクラスタを形成せず、疎らになる場合がある。このとき単独のハイライト領域を用いる(A)の方法では大きな誤差を生じることになる。1次独立なハイライト領域が少なくとも2つ存在すれば、単独の場合と比べて、かなり安定で高精度の光源色推定が可能である。

いま同一光源の照明下で異なった物体色をもつ2つの表面を考える。(6)式と同様に RGB 空間での光源の色ベクトルを e 、2つの表面AとBの色ベクトルを $\rho^A(x)$ と $\rho^B(x)$ で記す。このとき2枚の色信号平面が RGB 空間に形成される。

$$\rho^A(x) = w_B^A(x)\rho_B^A + w_S^A(x)e \quad (7)$$

$$\rho^B(x) = w_B^B(x)\rho_B^B + w_S^B(x)e \quad (8)$$

ただし $w_B^A(x)$ 、 $w_S^A(x)$ および $w_B^B(x)$ 、 $w_S^B(x)$ は表面AとBの重み係数で画素の位置 x に依存する。各表面のすべての画素の色ベクトルは対応する色信号平面上に分布し、両平面にはベクトル e が共通に含まれている。したがって図4のように色信号平面が RGB 空間内で交差し、その交線が光源の色ベクトル e である。このように光源色は一次独立な2つのハイライト領域から形成される色信号平面の交線として推定できる。2平面の交線を求めるアルゴリズムは文献12)に示されている。

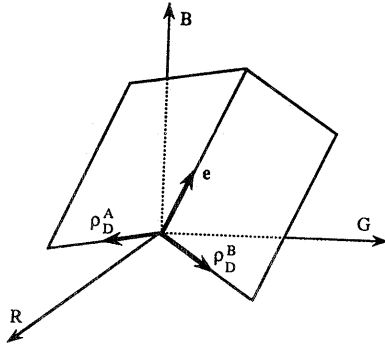


図 4 RGB 空間における色信号平面の交差
Fig. 4 Intersection of color signal planes in a RGB space.

4. 物体色の推定

相互反射の影響がない場合は、標準の2色性反射モデルの(6)式に基づいて拡散反射成分による物体色ベクトル ρ_D を求めることになる。この推定には四分円解析法^{7),13)}が適用可能である。四分円上の観測点で光源の色ベクトル e を基準にして、これと対極する観測ベクトルから ρ_D の推定値が選択される。

しかし一般に2つの不均質物体が近接しているとき、表面が滑らかであれば、他の物体の姿が容易に映り込む。以下では、このような一般的なシーンを取り扱う。

4.1 相互反射を考慮したカラー反射モデル

図5に不均質物体の2表面間の相互反射現象を例示している。表面Bが光源で照明され、これからの反射光が表面Aの一部を照明し、Bの姿が映り込んでいる。この現象は拡散成分による相互反射の可能性は少なく、むしろ鏡面反射成分に基づくと考えられる。すなわち表面Bからの色光がAで鏡面反射し、この2次の反射成分がA本来の1次反射光と重畳して観測されるのである。

さて相互反射は2表面間での1回の跳ね返りのみによると仮定し、多重反射は無視する。表面Aからの反射光 Y^A は波長 λ と場所のパラメータ x の関数として

$$Y^A(x, \lambda) = w_D^A(x) S^A(\lambda) E(\lambda) + w_S^A(x) E(\lambda) + Y^{AB}(x, \lambda) \quad (9)$$

のように書ける。(9)式の右辺第1項と第2項が光源からの直接光による表面Aの2色性反射成分を表す。 $S^A(\lambda)$ は表面Aの分光反射率、 $E(\lambda)$ は光源の分光分布で、 $w_D^A(x)$ と $w_S^A(x)$ は場所 x における拡散反射と

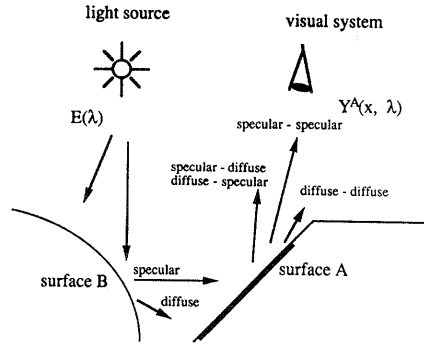


図 5 不均質物体間の相互反射
Fig. 5 Interreflection between inhomogeneous objects.

鏡面反射の重み係数である。次に第3項 $Y^{AB}(x, \lambda)$ は表面Bからの相互反射の成分を表す。この成分は2色性反射モデルで記述される2つの表面間の反射であるから、合計4つの反射成分で構成される。

図5を参照すれば、相互反射の項は具体的に

$$Y^{AB}(x, \lambda) = w_{DS}^{AB}(x) S^A(\lambda) E(\lambda) + w_{SD}^{AB}(x) S^B(\lambda) E(\lambda) + w_{SS}^{AB}(x) E(\lambda) + w_{DD}^{AB}(x) S^A(\lambda) S^B(\lambda) E(\lambda) \quad (10)$$

のように記述できる。右辺の各項は重み係数の添え字DS, SD, SS, DDで意味付けされている。DSは表面Bで鏡面反射のあと表面Aで拡散反射、SDは表面Bで拡散反射のあと表面Aで鏡面反射をする過程を意味する。またSSとDDは両表面でともに鏡面と拡散の反射をする過程を表す。

さて(10)式の右辺で第4項の拡散相互反射の成分は、他の3項に比べて通常小さいと考えられる。これは反射率の積で構成されることおよび散乱によって反射光が拡散されるので減衰が大きいためである。そこでこの拡散相互反射の項を無視し、(9)と(10)式を色成分ごとに整理すれば、表面Aからの反射光は次のように簡潔に表現することができる。

$$Y^A(x, \lambda) = w_{DS}^A(x) S^A(\lambda) E(\lambda) + w_{SD}^A(x) S^B(\lambda) E(\lambda) + w_{SS}^A(x) E(\lambda) \quad (11)$$

ただし

$$w_{DS}^A(x) = w_D^A(x) + w_{DS}^{AB}(x),$$

$$w_{SS}^A(x) = w_S^A(x) + w_{SS}^{AB}(x).$$

(11)式より反射光は3つの色成分からなることがわかる。まず右辺第1項は表面Aの物体色を表す成分で、これがA自身の拡散反射およびDSの反射過程によっても生じることがわかる。第2項は表面Bの物体色の映り込みの成分である。第3項は光源色の成分で、これ

はA自身の鏡面反射のみならず、場所によってSSの過程による映り込みによって生じることがありうる。

次にカメラ出力のRGB値で反射をモデル化する。いま表面AとBの物体色の色ベクトルおよび光源の色ベクトルを

$$\rho^A = \begin{bmatrix} \rho_R^A \\ \rho_G^A \\ \rho_B^A \end{bmatrix}, \quad \rho^B = \begin{bmatrix} \rho_R^B \\ \rho_G^B \\ \rho_B^B \end{bmatrix}, \quad e = \begin{bmatrix} e_R \\ e_G \\ e_B \end{bmatrix} \quad (12)$$

と記す。このとき(11)式をRGB値に置き換えれば、画素 x における色ベクトル $\rho(x) = [\rho_R(x), \rho_G(x), \rho_B(x)]^t$ (t はベクトルの転置)を次式で記述することができる。

$$\rho^A(x) = w_{\hat{a}_2}(x)\rho^A + w_{\hat{a}_B}(x)\rho^B + w_{\hat{a}_L}(x)e \quad (13)$$

すなわち観測される表面Aの色ベクトルは表面A, Bの2つの物体色と光源色の合計3つの色ベクトルの線形結合として記述される。

なお表面Bからの反射光 $Y^B(x, \lambda)$ と色ベクトル $\rho^B(x)$ についても、全く同様な式が成立するので省略する。

4.2 色度球面の定義

鏡面反射や相互反射の影響を受けた物体の観測色ベクトルは3つの色成分の加法混色になり、その分布はRGB空間で光源色ベクトルと2つの物体色ベクトルで形成される平行六面体の内部に分布することになる。物体色の復元には、このように分布する観測ベクトルから色成分ベクトル ρ^A, ρ^B を推定することが問題となる。光源色ベクトル e については、3章で述べたように一次反射光によるハイライト領域を抽出し、一次独立なハイライト領域の数に従って光源の色度を推定する。

色ベクトルはすべて単位ベクトルに正規化しているので、3次元空間の単位球面上で物体色の色度を解析することにする。特に光源の色度を基準にした相対的な球面色度座標系を提案する。図6にこの色度球面を描く。この系は、まずRGB空間で画像の色ベクトルを正規化して単位球面上に写像し、さらに光源の色ベクトルが常に頂点に一致するように回転したものとみることができる。この球面上では、光源の絶対の色度に関係なく、鏡面反射や相互反射を含む画像の色度分布が特徴的に現れる。

色度球面は相対的な座標系である。画像データを色度球面上で表示するために次のような手続きをとる。まず、観測した各画素の色ベクトルを長さ1に正規化する。ただし画像の背景領域などで輝度のごく低い

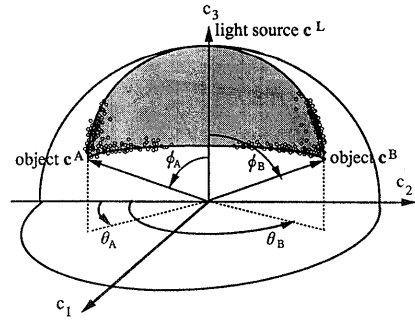


図6 色度球面
Fig. 6 Chromaticity sphere.

領域をあらかじめ取り除いておく。次に、このデータに対して主成分分析を行い、3つの主成分ベクトル $\{u_1, u_2, u_3\}$ を決定する。光源の色ベクトル e は、これらの線形結合 ($e = k_1u_1 + k_2u_2 + k_3u_3$) の形で記述される。そこで e を z 軸に、 e に直交する2つのベクトルを x, y 軸に対応させる正規直交系 $\{v_1, v_2, v_3\}$ を求める。このために Gram-Schmidt の正規直交法を使用する¹⁴⁾。具体的には $v_3 = e$ として、以下のように $\{v_1, v_2, v_3\}$ を作る。

$$\begin{aligned} v_3 &= e \\ v_2 &= u_2 - (e \cdot u_2)e \\ v_1 &= u_3 - (e \cdot u_3)e - (v_2 \cdot u_3)v_2 \end{aligned} \quad (14)$$

ただし、 $\{v_1, v_2, v_3\}$ は正規直交基底となるように、 $v_i / \|v_i\|$ で正規化しておく。なお記法 $(a \cdot b)$ と $\|a\|$ はベクトルの内積とノルムを表す。最後に、画像データをRGB空間から色度球面に写像する。正規化した色ベクトルを $\rho = [\rho_R, \rho_G, \rho_B]^t$ で記し、変換行列を $T = [v_1, v_2, v_3]$ で定義する。新しい座標系での色度をベクトル $c = [c_1, c_2, c_3]^t$ で表すとき、これは $c^t = \rho^t T$ で算出される。

この色度座標系で光源の色度は $c^L = [0, 0, 1]^t$ である。これと物体色の色度座標 c^A, c^B の3点で球面三角形が形成される(図6参照)。任意の色ベクトルの色度はこの球面三角形の内部に置点されることになる。

4.3 色度球面の性質

色度球面の性質を容易に理解するために、代表的な色の組合せについてその色度座標を示す。

(1) 光源を白色とし、2つの物体を3原色, R,

G, Bから選択する。すなわち3通り

$$\begin{aligned} \{\rho^A = [1, 0, 0]^t, \rho^B = [0, 1, 0]^t, \\ e = [1/\sqrt{3}, 1/\sqrt{3}, 1/\sqrt{3}]^t\} \\ \{\rho^A = [1, 0, 0]^t, \rho^B = [0, 0, 1]^t, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} e &= [1/\sqrt{3}, 1/\sqrt{3}, 1/\sqrt{3}]^t \\ \{\rho^A &= [0, 1, 0]^t, \rho^B = [0, 0, 1]^t, \\ e &= [1/\sqrt{3}, 1/\sqrt{3}, 1/\sqrt{3}]^t \end{aligned}$$

の組合せがある。いずれの場合も色度球面における3つの色成分の座標は

$$\begin{aligned} c^A &= [1/\sqrt{6}, 1/\sqrt{2}, 1/\sqrt{3}]^t, \\ c^B &= [1/\sqrt{6}, -1/\sqrt{2}, 1/\sqrt{3}]^t, \quad c^L = [0, 0, 1]^t \end{aligned}$$

に一致する。加法混色により観測される色度はこれらで張る球面三角形の内部に置点される。

(2) 光源を白色とし、2つの物体を互いに反対色とする。例えば、赤と青緑を選択する。

$$\begin{aligned} \rho^A &= [1, 0, 0]^t, \quad \rho^B = [0, 1/\sqrt{2}, 1/\sqrt{2}]^t, \\ e &= [1/\sqrt{3}, 1/\sqrt{3}, 1/\sqrt{3}]^t \end{aligned}$$

このとき色度球面における3色の座標は

$$\begin{aligned} c^A &= [0, \sqrt{2/3}, 1/\sqrt{3}]^t, \\ c^B &= [0, -1/\sqrt{3}, \sqrt{2/3}]^t, \quad c^L = [0, 0, 1]^t \end{aligned}$$

となる。すなわち常に $c_1=0$ で、観測される色度は (c_2, c_3) 平面内の単位円弧上を動くことになる。

このようなことから白色光源下で異なった色相をもつ2物体を観測するとき、色度球面は以下のような構造的性質をもつと考えられる。

(1) 色度座標は光源色と2つの物体色相互の関係で定まる相対的な座標である。

(2) 色度球面は $0 \leq c_1 \leq 1$, $-1 \leq c_2 \leq 1$, $0 \leq c_3 \leq 1$ の四分球面上に限定される。3つの色成分によって定まる球面三角形の内部に対象物体のすべての色度が存在する。

(3) 2つの物体色が互いに反対色の場合、 c_1 の座標が $c_1=0$ となる。すなわち図6の球面座標系 (ϕ, θ) において、角度 θ の差 $\theta_A - \theta_B$ が最大値 π となる。逆に類似色の場合は $\theta_A - \theta_B$ が小さくなる。したがって θ は色相角に対応することがわかる。

さらに鏡面反射や相互反射の影響によって分布に特徴があるので、それらを次にまとめる。

(1) 表面A, Bの物体色の色度は座標 c^A, c^B で鏡面反射や相互反射の影響がないとき、画像の色度分布はこの2点でクラスタを成す。

(2) 鏡面反射が存在すれば、色度は c^A と c^L (あるいは c^B と c^L) を結ぶ円弧上を c^L に向かって延びる。特に強いハイライトが存在するとき、ハイライト領域の色度は座標 $[0, 0, 1]^t$ の近傍に分布する。

(3) 映り込みの相互反射が存在すれば c^A と c^B を結ぶ円弧上に色度は存在する。表面AにBが映り込めば、色度は c^A から c^B 方向に分布は広がり、逆に

表面BにAが映り込めば c^B から c^A 方向に分布は広がる。

4.4 色度の推定法

色度球面上の色度分布データから物体色の色度ベクトル c^A と c^B を推定する。いま計測画像に物体色のマット領域、ハイライト領域、さらに相互反射が含まれていると仮定する。最も直観的な方法は色度分布の端点を求めることである。すなわち図6において c^A と c^B は、互いに最も離れた座標点で、かつ光源色の座標 $[0, 0, 1]^t$ から最も遠い点である。そこで画像の色度データの中からこのような点を物体色の推定色度として探索する。座標系 (ϕ, θ) を用いて色度ベクトルを c_3 軸とのなす角度 ϕ と c_3 軸回りの回転角 θ で表す。このときデータ点 (ϕ_i, θ_i) の中から抽出した c^A, c^B の推定値の座標 (ϕ^A, θ^A) , (ϕ^B, θ^B) は次のように表現できる。

$$(\phi^A, \theta^A) = \max_i \min_j (\phi_i, \theta_j) \quad (15)$$

$$(\phi^B, \theta^B) = \max_i \max_j (\phi_i, \theta_j) \quad (16)$$

ただしこれらのアルゴリズムでは、シーン中に物体色が2種類しか存在しないことを想定していることに注意すべきである。3種類以上の物体がある場合は、相互反射が発生する可能性のある隣接した2物体ごとに、上記のような色度球面の解析を行うものとする。

なお現実には計測誤差を考慮する必要がある。図6において、○印は各画素の色度を表す。画像計測における雑音で観測色度がばらつき、図のように○印が存在範囲を超えて置点されることがある。光源色に近い色度で、このようなばらつきがあれば、(15), (16)式から過大な推定誤差が生じる。

本論文では、安定した物体色の推定のために、色度分布のヒストグラム解析を行う。この基本的な考え方は以下のとおりである。すなわち物体表面が一定色度であっても画像の計測色度は雑音によって分散している。この分散が一樣とすれば、画像の色度ヒストグラムからクラスタを抽出することができ、その中心の座標は対象物体の色度と一致するはずである。つまり画像の色度ヒストグラムから稠密なクラスタを検出し、その中心の色度を求めることによって、雑音の影響を取り除く。なお鏡面反射や相互反射の影響をもつときもこの方法が有効で、図6のような色度分布においてヒストグラム解析によって色度の代表点を抽出する。後述の実験においてヒストグラム解析が有用であることがわかる。

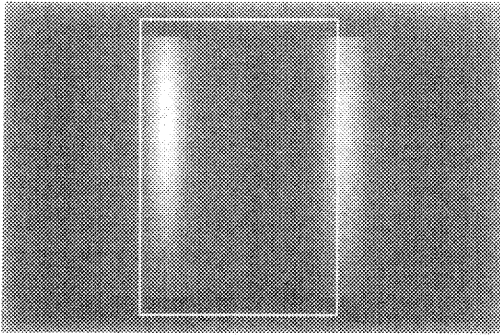


図 7 2つの円筒の合成画像
Fig. 7 Synthetic image of two cylinders.

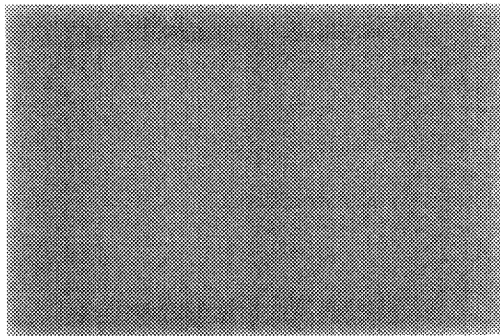


図 13 2つの円筒の拡散反射成分画像
Fig. 13 Diffused reflection-component image of the two cylinders.

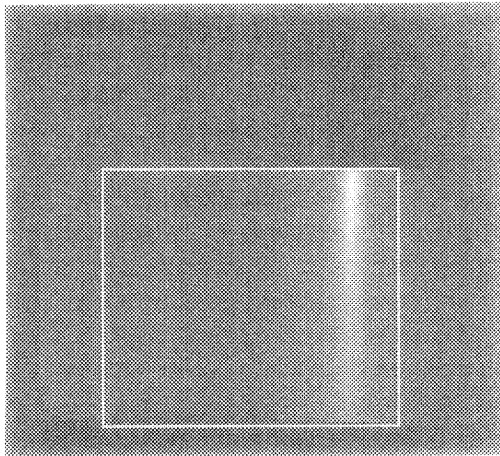


図 14 プラスチックの平板と円筒の計測画像
Fig. 14 Measured image of a plastic plane and a cylinder.

解析手順を以下にまとめる。画像の色度データに対して、常に主成分軸上でヒストグラムを作る。この理由は第1主成分軸上でヒストグラムを作れば、色度分

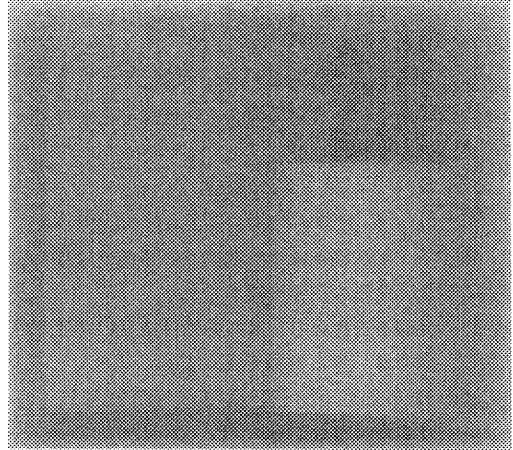


図 19 2つのプラスチックの拡散反射成分画像
Fig. 19 Diffuse reflection component image of the two plastics.

布の特徴が詳細に抽出できるからである¹⁰⁾。このようなヒストグラムのピーク領域を取り出し、これを反復することにより稠密なクラスタを抽出する。この操作を色度データに繰り返せば、複数個のクラスタが順次抽出される。各クラスタで分布密度の高い(ヒストグラムのピーク)色度座標を算出する。これらの要約された色度データに対して、(15)と(16)式を適用して物体色の色度 e^A と e^B の推定値を求める。最後に $\rho' = e \cdot T'$ の逆変換によって、色度球面から RGB 空間での色度を得る。

4.5 画像の色成分展開

以上の過程によって光源色 e および物体色 ρ^A と ρ^B の色度ベクトルが推定された。そこで計測画像をこれら3つの色成分に分解することができる。各画素の観測色ベクトル $\rho(x)$ は、(13)式のモデルに従って ρ^A , ρ^B , e の線形結合で記述できると仮定し、各色成分の重み係数を算出する。すなわち画素 x において、

$$\|\rho^A(x) - w_{\rho_2^A}(x)\rho^A - w_{\rho_2^B}(x)\rho^B - w_{\rho_2^e}(x)e\|^2 \tag{17}$$

を最小化する係数 $w_{\rho_2^A}(x)$, $w_{\rho_2^B}(x)$, $w_{\rho_2^e}(x)$ を求める。このとき表面Aにおいて、 $w_{\rho_2^A}(x)\rho^A$ が拡散反射の物体色のみを表す。ただしこれは光源からの直接光のみならず、表面Bで鏡面反射した光が表面Aを照明して、拡散反射を起こす DS 成分も含むことに注意する。両者を区別することは現在できない。また $w_{\rho_2^B}(x)\rho^B$ と $w_{\rho_2^e}(x)e$ はそれぞれ、表面Bからの映り込み成分と鏡面反射成分を表す。最後の鏡面反射成

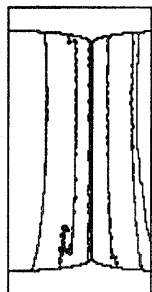


図 8 合成画像の切り出し部分に対する領域分割結果
Fig. 8 Region segmentation result for the cut-out part of the synthetic image.

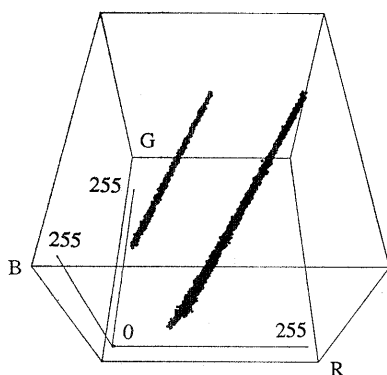


図 9 合成画像の2つのハイライト領域の色分布
Fig. 9 Color distribution of the two highlight regions in the synthetic image.

分にも、直接光によるもの以外に表面Bで跳ね返った光によるSS成分が含まれる可能性がある。

なお同様な色分解は表面Bについても実施することができる。

5. 実験結果

5.1 合成画像の使用

(A) 画像生成

提案した解析法の妥当性を調べるために、コンピュータグラフィックスのレイトレーシング法で合成画像を作成した。図7は青(左)と赤(右)の2つの円筒の合成画像である。不均質物体を生成するための光反射モデルとして、次のようなPhongのモデルを使用し、分光的な輝度計算でレンダリングを行った(文献15)参照)。

$$I(\lambda) = 0.5E(\lambda) + (\cos \vartheta)S(\lambda)E(\lambda) + 3(\cos \varphi)^{11}E(\lambda) \quad (18)$$

上式右辺の第1項から第3項は、それぞれ、環境光成分、拡散反射成分、鏡面反射成分である。 ϑ は入射角、 φ は鏡面反射方向からのずれ角、指数11はハイライトの鋭さを表している。第1項と第3項は同じ色成分であるので、(18)式は2色性反射モデルである。

図7の光源としては、正面前方のやや上方に点光源として昼光用フラッドランプが存在すると仮定している。表面間の映り込みを作るために反射の回数を2回まで許した。このようなレンダリングによる分光輝度計算から3刺激値XYZを求め、さらにこれをRGB値に変換した。このときカラーモニタへの画像表示の都合で、マットな物体色部分のRGBの最大値を200程度に設定した。このときハイライト部のピーク値は350程度であった。最後に、計測雑音を考慮して、標準偏差1.5の正規乱数を各画素のRGB値に重畳させて計測画像とした。

得られた画像では、各円筒の側面に1次反射光による帯状の強いハイライトがみられる。また接合部付近において隣接物体の映り込みが発生している。ここではDS過程による物体色の映り込みとSS過程による2次反射によるハイライトがみられる。なおSD過程はレイトレーシング法で作り出すことができないので、合成画像には含まれていない。

(B) 画像解析

ハイライトや相互反射の影響を詳細に調べるために、黄色の枠の内部を切り出し、この部分画像を用いて光源色や物体色の推定を行った。

まず部分画像をRGBからHSV表色系に変換して領域分割を行った。図8に分割結果で、2つの円筒のハイライト領域が左右に抽出されている。なお2次反射による弱いハイライトは領域として抽出されなかった。図9にRGB空間における2つのハイライト領域の色分布を描く。これらのRGBデータの集合から、3.2節(B)のアルゴリズムで光源色を推定した。推定値は正規化したRGB値で $e = [0.698, 0.550, 0.458]^t$ であり、CIEの xy 色度で表せば $(x, y) = (0.364, 0.369)$ であった。使用したランプの本来のRGB値は $e = [0.698, 0.550, 0.459]^t$ で、色度は $(x, y) = (0.364, 0.369)$ であるので、光源の推定はかなり良好といえる。

次に円筒の物体色推定のために、部分画像を4.2節の手続きで色度球面に写像した。図10に色度球面上での色分布を3次的に描く。頂点 $[0, 0, 1]^t$ が光源に対応している。この色度データからヒストグラム分

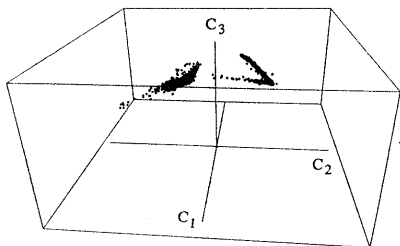


図 10 合成画像の切り出し部分に対する色度球面上の色分布

Fig. 10 Color distribution on the chromaticity sphere for the cut-out part of the synthetic image.

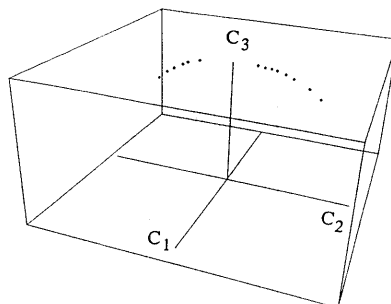


図 12 合成画像から抽出した色度データの代表点
Fig. 12 Representatives of the chromaticity data extracted from the synthetic image.

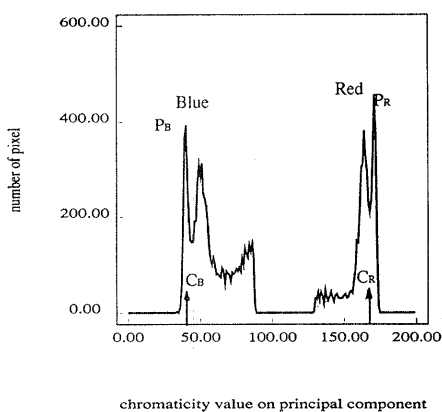


図 11 主成分軸上での色度ヒストグラム
Fig. 11 Chromaticity histogram on the principal component axis.

析によって少数の要約された色度データを抽出した。このために主成分軸上でヒストグラムを作り、ピークの座標を反復操作によって取り出す。なお図 10 において、色の分布が c_2 軸に沿って広がって見えるが、実際この分布の第 1 主成分軸は c_2 軸にほぼ一致する。図 11 にこの第 1 主成分軸上でのヒストグラムを示す。

2つの物体色がはっきり分かれているのがわかる。横軸は相対的な色度座標で、縦軸は画素数である。ヒストグラムの両端に存在する大きなピーク P_R と P_B は赤と青の物体色に対応している。その内側の比較的大きなピークは相互反射の影響を受けたものである。その他の小さなピークや連続体は鏡面反射、相互反射あるいは雑音の影響による。ピーク P_R と P_B の位置が物体色の正しい色度値 C_R と C_B にほぼ一致していることに注目される。すなわち主要ピークの位置は外乱の影響をほとんど受けていないことがわかった。

図 12 にヒストグラムのクラスタとピーク検出によって抽出された色度の代表点を描いている。図 10 の色度データが 14 点の集合に要約されている。

これらの要約データに対して 4.4 節で物体色の色度を決定した。推定値を RGB と xy 色度で表せば、赤の筒に対して $\rho^R = [0.999, 0.045, 0.024]^t$, $(x^R, y^R) = (0.660, 0.330)$ 。青の筒に対して $\rho^B = [0.095, 0.477, 0.874]^t$, $(x^B, y^B) = (0.176, 0.243)$ となる。本来の物体色は $\rho^R = [0.998, 0.051, 0.034]^t$, $(x^R, y^R) = (0.651, 0.329)$ および $\rho^B = [0.088, 0.473, 0.877]^t$, $(x^B, y^B) = (0.174, 0.241)$ で、ほぼ正確な推定ができています。最後に推定した 3つの色ベクトル ρ^A, ρ^B, e 最小 2 乗法で原面に適合させて、色成分に展開した。図 13 は 2つの円筒の拡散反射成分のみからなる画像である。マットな表面の形状が復元できている。

5.2 実測画像の使用

図 14 は緑の平板と青の円筒を計測した画像である。2つのプラスチック物体を垂直に接触させて置き、前方約 1 m 距離から昼光用フラッドランプで照明した。円筒の側面に帯状の強いハイライトが存在するが、平板の上に弱い 2 次的なハイライトのみ見える。また緑の平板の上には青の筒がはっきり映り込んでいる。

さて黄色の枠の内部を切り出して、光源色と物体色の推定を行った。図 15 に領域分割の結果を示す。筒の側面のかかなり広い部分がハイライト領域として抽出されており、他にハイライト領域は検出されなかった。図 16 にこの領域の色分布を描く。3.2 節(A)の手法を用いて、この一つの色分布から鏡面反射成分の色ベクトルを抽出した。推定値は $e = [0.576, 0.543, 0.611]^t$ である。

図 17 に色度球面上の色度分布を示す。左側の分布が青の筒に対応し、これが光源に向かって分布して

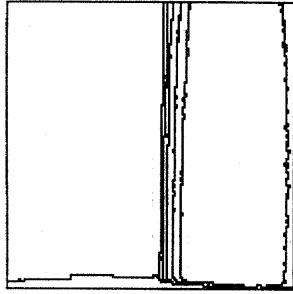


図 15 計測画像の切り出し部分に対する領域分割結果
Fig. 15 Region segmentation result for the cut-out part of the measured image.

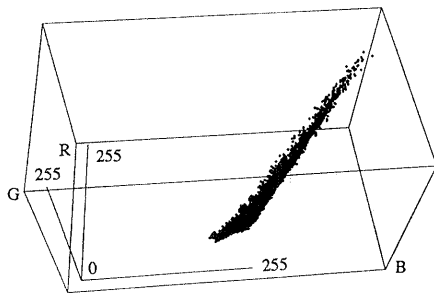


図 16 計測画像のハイライト領域の色分布
Fig. 16 Color distribution of the highlight region in the measured image.

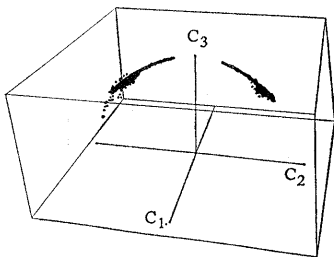


図 17 計測画像の切り出し部分に対する色度球面上での色分布
Fig. 17 Color distribution on the chromaticity sphere for the cut-out part of the measured image.

クラスタを成すので、大きなハイライトであることがわかる。中央から右側の分布は緑の板に対応し、相互反射が存在することがはっきりわかる。色度のヒストグラム分析から、色度データの代表点を抽出した。図 18 はこれらの 10 点を示す。これらの要約データから物体色の色度を、青の筒と緑の板に対してそれぞれ $\rho^B = [0.114, 0.324, 0.939]^t$ 、 $\rho^G = [0.051, 0.917, 0.395]^t$ と推定した。これらの推定値を原画に適合さ

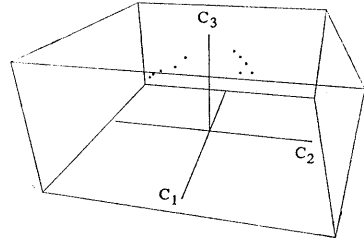


図 18 計測画像から抽出された色度データの代表点
Fig. 18 Representatives of the chromaticity data extracted from the measured image.

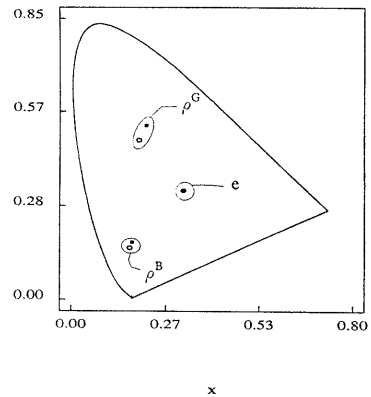


図 20 光源色と物体色に対して推定した色度の精度
■：画像よりの推定値，○：計測値。
Fig. 20 Accuracy of the estimated chromaticities for the illumination color and object color.
■：estimate from image, ○：measurement.

せた色成分画像を得た。図 19 はプラスチックの拡散反射成分のみからなる画像である。

最後に、光源色と物体色の推定値の信頼性を調べた。推定した e, ρ^B, ρ^G の xy 色度を図 20 の■印で示す。これらの座標値は、それぞれ、 $(x, y) = (0.318, 0.330)$ 、 $(x^B, y^B) = (0.171, 0.171)$ 、 $(x^G, y^G) = (0.211, 0.525)$ である。次に分光放射輝度計で光源と各物体を個別に測色したときの色度を○印で示す。これらの座標値は、それぞれ、 $(x, y) = (0.316, 0.329)$ 、 $(x^B, y^B) = (0.165, 0.154)$ 、 $(x^G, y^G) = (0.191, 0.481)$ である。光源の推定は良好であるが、緑の板に色差が見られる。実画像での推定精度が 5.1 節の合成画像での結果より劣化した原因として、まずカメラ系の計測誤差が大きな要因と考えられる。次に、ヒストグラム解析の特にピーク領域の検出が雑音の影響で誤差を生じた。さらに解析では無視したが、拡散相互反射 DD 過程の影響も考えられる。

このように実画像についても鏡面反射や相互反射の影響を含む画像から、光源色と物体色を推定し、物体色だけの画像を生成することが可能である。

6. おわりに

本論文では、鏡面反射成分を有する複数の不均質物体の画像に対して、カラー反射モデルに基づいた解析法を提案した。プラスチックのような不均質物体表面の反射は拡散成分と鏡面成分からなる標準の2色性反射モデルで記述できる。拡散成分は不均質物体の物体色を生成し、鏡面反射成分はハイライトを生じたり、周辺に存在する物体が映り込む相互反射の原因となる。ここではシーンに2つの不均質物体が接近して存在することを想定して、ハイライトや相互反射を含む計測画像から各物体の反射成分の色ベクトルを推定し、物体色のみからなる不均質物体の画像を生成した。

まず、鏡面反射成分の色は照明光と一致し、ハイライトは照明光の一次反射とみなせるので、画像のハイライト領域から光源色が推定できる。このためハイライト領域を検出し、一次独立なハイライト領域の数に応じて光源色ベクトルを推定するアルゴリズムを示した。明らかに複数のハイライト領域を使用すれば、安定で精度の高い光源色推定が可能である。

次に、物体色を推定する方法を述べた。相互反射を考慮した不均質物体間のカラー反射をモデル化し、観測色ベクトルは光源色と2つの物体色の線形結合として近似表現できることがわかった。次に画像の色度を表す相対的な座標系として、色度球面を定義した。この球面上で色度分布を表示するとき、鏡面反射や相互反射の影響が特徴的に現れることがわかった。物体色の色度を推定する手順として、まず色度分布のヒストグラム解析から色度データの代表点を定める。そして要約した色度データから球面三角形の頂点を決定する。

最後に、合成画像と実測画像を用いた実験結果を示した。合成画像では Phong モデルを用いた分光的レンダリングによって、2つの円筒を作った。ハイライト、相互反射および計測雑音を含む画像から、まず2つのハイライト領域を抽出して光源色を推定した。球面色度分布からは少数の代表色度点抽出できて、これより物体色の正確な色度ベクトルが復元できた。また実測画像では平板と円筒のプラスチックを用いた。ハイライト領域は1カ所であったが、かなり正確な光源色の色度が推定できた。色度球面上の画像の色度分

布から相互反射の影響が確認され、要約データから2つの物体色を決定してプラスチックの物体色画像を得た。

本論文では、シーン中に物体色が2種類しか存在しないことを想定した。3種類以上の物体が存在する場合、3種類以上の物体色が同時に相互反射を起こすことは現実に少ないので、相互反射の可能性のある隣接した2物体ごとに、提案した解析法を適用することになる。また、不均質物体の画像は物体色領域、ハイライト領域、相互反射領域からなるとし、物体色を色度データの中から推定した。画像にマットな物体色領域が完全に欠落しているような推定問題については今後検討の予定である。

参考文献

- 1) Klinker, G. J., Shafer, S. A. and Kanade, T.: The Measurement of Highlights in Color Images, *Int. J. Computer Vision*, Vol. 2, No. 1, pp. 7-32 (1988).
- 2) Klinker, G. J., Shafer, S. A. and Kanada, T.: A Physical Approach to Color Image Understanding, *Int. J. Computer Vision*, Vol. 4, No. 1, pp. 7-38 (1990).
- 3) Shafer, S. A. et al.: Physics-Based Models for Early Vision by Machine, *SPIE Proceedings*, Vol. 250, pp. 222-235 (1990).
- 4) Bajcsy, R., Lee, S. W. and Leonardis, A.: Color Image Segmentation with Detection of Highlights and Inter-Reflections, *SPIE/SPSS Symposium*, pp. 16-19, Santa Clara (1990).
- 5) 橋本 理, 加藤博一, 森脇耕介, 佐藤宏介, 井口征士: カラー画像を用いた材質感の判別と相互反射の検出, 電子情報通信学会論文誌, Vol. D-11, No. 6, pp. 727-735 (1991).
- 6) Funt, B. V., Drew, M. S. and Ho, J.: Color Constancy from Mutual Reflection, *Int. J. Computer Vision*, Vol. 6, No. 1, pp. 5-24 (1991).
- 7) 富永昌治: カラー反射モデルを用いた相互反射の解析, 情報処理学会論文誌, Vol. 34, No. 2, pp. 302-311 (1993).
- 8) 浅田尚紀, 松山隆司, 望月孝俊: 多重絞りカラー画像の解析, 情報処理学会論文誌, Vol. 32, No. 10, pp. 1338-1348 (1991).
- 9) 富永昌治: 物体のカラー反射モデル, 情報処理学会論文誌, Vol. 33, No. 1, pp. 37-45 (1992).
- 10) 富永昌治: カラー画像の色分類と分割, 情報処理学会論文誌, Vol. 31, No. 11, pp. 1589-1598 (1990).
- 11) 八木大亮, 阿部圭一, 中谷広正: HSV カラーモデルによりカラー航空写真の領域分割, 情報処理学会コンピュータビジョン研究会, 77-8 (1992).
- 12) Tominaga, S. and Wandell, B. A.: The Stan-

Standard Surface Reflectance Model and Illuminant Estimation, *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol. 6, No. 4, pp. 576-584 (1989).

- 13) Tominaga, S. and Wandell, B. A.: Component Estimation of Surface Spectral Reflectance, *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol. 7, No. 2, pp. 312-317 (1989).
- 14) Noble, B. and Daniel, J. W.: *Applied Linear Algebra*, p. 229, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ (1988).
- 15) 富永昌治: 3次元空間における物体色のリアルな生成とその評価, 情報処理学会論文誌, Vol. 34, No. 2, pp. 302-311 (1992).

(平成5年4月30日受付)

(平成5年10月14日採録)



富永 昌治 (正会員)

昭和22年生。昭和45年大阪大学基礎工学部電気工学科卒業。昭和50年同大学院博士課程修了。工学博士。電総研大阪支所を経て、昭和51年大阪電気通信大学講師。昭和61年教授。昭和62年より1年間スタンフォード大学心理学科客員教授。色彩情報処理、コンピュータカラービジョン、画像処理などの研究に従事。計算視覚や色覚に興味をもつ。電子情報通信学会、計測自動制御学会、日本色彩学会、テレビジョン学会、IEEE、OSA等各会員。



今村 淳志 (正会員)

昭和43年生。平成3年大阪電気通信大学工学部精密工学科卒業。平成5年同大学院工学研究科情報工学専攻修士課程修了。同年大日本スクリーン製造(株)に入社。カラー画像処理、色彩情報処理などの研究開発に従事。