

カラー反射モデルを用いた相互反射の解析

富 永 昌 治[†]

相互反射現象はシーンの見えを大きく変えることがあるのでコンピュータビジョンの分野でしばしば重要な問題となる。本論文では、拡散反射表面間の相互反射を、カラー反射モデルを用いて解析する方法を示す。まず、2つの凸物体表面からの反射光は共通の相互反射成分と表面に固有の拡散反射成分からなる2色性反射モデルで記述できる。解析の方法は、Funt-Drewの色空間解析を一般化して、厳密なスペクトル解析と実用的な画像解析に分けて記述する。最初に、2表面から計測した反射光のスペクトル分布から、共通相互反射成分と固有拡散反射成分のスペクトル分布を推定する方法を示す。そして、これらのスペクトル情報がわかれば、表面の分光反射率と照明光の分光電力分布という重要な物理量が求まることを示す。次に、画像解析のために同様な解析法を3次元色空間に適用する。特に固有物体色の絶対的な色ベクトルを推定するアルゴリズムを提案する。最後に、2枚の色紙を用いる実験で解析法の妥当性を検討する。スペクトルデータより各色紙の分光反射率と照明光の分布が得られた。計測画像より相互反射色の色度と各色紙の固有色が推定でき、原画を2つの反射成分に分離できた。さらに推定の精度も確認した。

Analysis of Interreflection Using a Color Reflection Model

SHOJI TOMINAGA[†]

This paper presents an analysis method of interreflection between two matte surfaces by using a color reflection model. The reflected light from surfaces is described as a dichromatic reflection model consisting of two components of common interreflection and inherent diffuse reflection to each surface. We generalize the color space analysis by Funt and Drew for the precise analysis of spectra and the practical analysis of images. First, a method is shown to estimate the spectral distributions of the two reflection components from the measured spectra of two surfaces. Then we can obtain the important physical quantities of surface-spectral reflectance and illuminant spectral distribution. Next, images are analyzed in a three-dimensional color space. An algorithm is proposed to estimate a color vector of inherent object color in the absolute scale. Finally, the feasibility of our analysis method is demonstrated in detail in an experiment using two color papers.

1. はじめに

相互反射の現象は日常しばしば見かけられる現象である。例えば、異なった色の2つの物体が接近して存在するとき、光源からの直接的な照明による本来の物体色は、2表面間の相互反射による間接的な照明によって影響を受け、色ずれを起こすことがある。また、なめらかなプラスチック表面に他物体が明瞭に映り込むことがあるが、これも一種の相互反射効果によるものである。物体認識にはハイライトや影などと同様に相互反射の効果も無視できず、この影響を考慮したカラー画像の解析が必要である。

これまで相互反射を考慮したコンピュータビジョン

の技法は多くない。Forsyth¹⁾は shape-from-shading に相互反射の効果を予測し、Bajcsy²⁾はカラー画像の分割問題を検討した。Nayar³⁾はモノクロ画像を対象とする形状復元問題に1つの解を示し、橋本⁴⁾はカラー画像を対象として色分布形状より相互反射領域を検出した。Funt⁵⁾は相互反射と色恒常性問題の関係を分析した。FuntとDrew⁶⁾はさらにカラー画像から相互反射の効果を取り除くアルゴリズムを提案した。

この Funt-Drew の研究は拡散反射する2つの凸物体表面間の相互反射という最も基礎的な現象を対象としている。解析の原理は、まず表面から反射する光が共通の相互反射成分と表面に固有の拡散成分から成る2色性反射モデルで近似できるとしていることである。これによって筆者らが標準の2色性反射モデルのために開発した解析アルゴリズム⁷⁾⁻⁹⁾が相互反射の解析に適用できることを見出した。すなわち、各表面

[†] 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
University

からの RGB 値は色空間で平面を構成し、2つの平面の交線から共通相互反射成分の色度が求まる。次に拡散反射成分に基づく固有物体色の色度は四分円解析法より求める。これより計測画像は相互反射成分と相互反射を含まない成分に分解できる。この解析法の利点は、物体の表面形状を考慮する必要がなくて、純粋に色空間の中だけで解析することができることである。本論文では、Funt-Drew の色空間解析の一般化を行う。まず物体表面の分光計測が可能ならば、反射成分のみならず重要な物理量が求まることを示す。すなわち、2表面からの反射光のスペクトル分布から、共通の相互反射成分と各面固有の拡散反射成分のスペクトル分布が推定できる。このとき表面の分光反射率と照明光の分光電力分布を算出することができる。特に分光反射率は物体表面の同定に有用である¹⁰⁾。

次に、カメラ計測による画像の解析は3次元色空間で行う。拡散反射による固有物体色はこれまで正規化色ベクトルとして、その色度のみが推定された。物体認識にはやはり3次元色情報が必要で、ここでは明度も含めた絶対的なスケールで色ベクトルを推定する。提案した解析法の妥当性を検証するために分光器とカメラを同時に使用した実験を行う。厳密な分光計測との比較により、推定精度は良好であることがわかる。

以下では、まず第2章で相互反射をモデル化する。第3章では一般的なスペクトル解析の方法を展開する。第4章でカラー画像を対象としてカメラデータを解析する。第5章では2枚の色紙を用いた実験結果を示す。第6章はまとめである。

2. カラー反射モデル

図1のように一様な色をした2つの凸表面を考える。両表面とも完全拡散面で、鏡面反射成分を含まないと仮定すれば、物体表面から視覚系に到達する光は2つの反射成分からなる。1つは光源からの直接的な照明による反射成分で、他方は少なくとも一度両表面間で相互反射を起こした間接的な照明による反射成分である。したがって表面Aからの反射光の分光放射輝度は

$$Y^A(x, \lambda) = Y_B^A(x, \lambda) + Y_I^A(x, \lambda) \quad (1)$$

のように書ける。ただし、波長 λ は可視域をわたり、パラメータ x は表面A上の場所を表す。また添字DとIは、それぞれ、直接的な拡散反射と間接的な相互反射を意味する。前者が表面固有の物体色を生成する。

さて表面が一様な物体色をもつとき、反射成分 Y_B^A

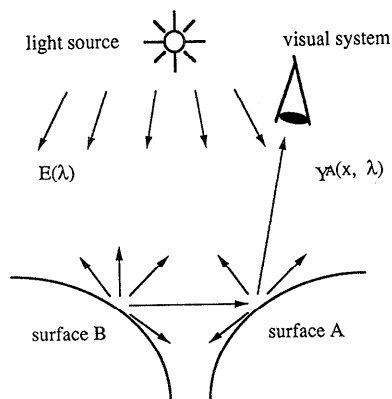


図1 拡散反射表面AとB間の相互反射
Fig. 1 Interreflection between surface A and B of diffuse reflection.

と Y_I^A は波長に依存する因子と場所に依存する因子に分割することができ、また相互反射は表面間での1回の跳ね返りのみによると仮定する。 $E(\lambda)$ を照明光の分光電力分布とし、 $S^A(\lambda)$ と $S^B(\lambda)$ を表面AとBの分光反射率とすれば、このとき表面Aからの反射光は

$$\begin{aligned} Y^A(x, \lambda) &= w^A(x) L_B^A(\lambda) + w^{AB}(x) L_I(\lambda) \\ &= w^A(x) S^A(\lambda) E(\lambda) \\ &\quad + w^{AB}(x) S^A(\lambda) S^B(\lambda) E(\lambda) \end{aligned} \quad (2)$$

と書き直すことができる。ここで $L_B^A(\lambda)$ と $L_I(\lambda)$ は各反射成分の分光電力分布で、重み係数 $w^A(x)$ と $w^{AB}(x)$ は場所 x における幾何学的なスケールファクタである。相互反射成分 $L_I(\lambda) = S^A(\lambda) S^B(\lambda) E(\lambda)$ はまず照明光が表面Bで反射し、それが表面Aで再度反射した光の成分であることを示している。すなわち1回の跳ね返りのみで、多重反射は無視している。実際、拡散反射は減衰が大きいので、一方の表面からの反射光が他方の表面で反射し、これが再び元の表面に戻って物体色に影響を与えることは少ないといえる。

なお表面Bからの反射光についても同様に式

$$\begin{aligned} Y^B(x, \lambda) &= w^B(x) L_A^B(\lambda) + w^{BA}(x) L_I(\lambda) \\ &= w^B(x) S^B(\lambda) E(\lambda) \\ &\quad + w^{BA}(x) S^B(\lambda) S^A(\lambda) E(\lambda) \end{aligned} \quad (3)$$

が成立する。 $w^B(x)$ と $w^{BA}(x)$ は重み係数である。このように、接近した2つの拡散面の反射は2色性反射モデルで近似でき、反射光は直接照明による拡散反射成分と1回の跳ね返りのみによる相互反射成分の2つの加法的成分に分解できる。

3. スペクトル解析

3.1 相互反射成分の抽出

2 表面から反射する光のスペクトル分布を観測することによって、相互反射成分のスペクトル分布が抽出可能であることを示す。図 1 で各表面のいくつかの場所から反射光のスペクトル分布を計測する。2 色性反射の性質より、計測データは 2 次元性である。反射光 $Y^A(x, \lambda)$ は成分 $L_1^A(\lambda)$ と $L_2^A(\lambda)$ の線形結合であるから、ベクトル空間でいえば、反射光は図 2 のように 2 つの成分ベクトルが張る 2 次元部分空間（色信号平面と呼ぶ） P_A に落ちる。計測点を変えたり、観測角などの幾何学的条件を変えても、表面 A からの反射光スペクトル分布は同じ 2 次元平面上に落ちるはずである。他方、表面 B からの反射光は成分ベクトル $L_1^B(\lambda)$ と $L_2^B(\lambda)$ が張る 2 次元部分空間 P_B に落ちる。

さて相互反射の成分ベクトル $L_1(\lambda)$ は両方の部分空間に含まれていることから、 P_A と P_B は交わり、その交線が成分ベクトル $L_1(\lambda)$ に一致する。したがって相互反射成分を抽出する問題は、2 つの表面の色信号平面の交線を見いだすという計算問題に帰着する。

筆者らは以前標準の 2 色性反射モデルで記述できる 2 つの不均質物体から照明光のスペクトル分布を推定するアルゴリズムを示した⁷⁾。標準 2 色性反射モデルとは、反射光が拡散反射成分と鏡面反射成分の線形結合で記述でき、鏡面反射成分は照明光と同じスペクトル組成をもつものであった。照明光推定には、2 つの物体の色信号平面に照明光スペクトル分布が共通に含まれることを利用した。したがって色信号平面の交線を求める計算手順は文献⁷⁾と同様である。

3.2 拡散反射成分の推定

表面に固有の拡散反射成分 $L_1^A(\lambda)$ を推定する ($L_2^B(\lambda)$ も同様)。この成分推定には四分円解析(Quarter-circle analysis)法⁸⁾が適用可能である。この解析法は標準反射モデルで拡散反射率を推定するために、解の存在範囲を決定するための 1 つの手法であった。本相互反射

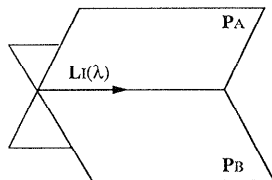


図 2 2 つの色信号平面 P_A と P_B の交差と共通相互反射成分 $L_1(\lambda)$

Fig. 2 Intersection of two color-signal planes P_A and P_B , and the interreflection component $L_1(\lambda)$.

問題への適用の仕方を以下にまとめる。

いま表面 A の m 点から反射した反射光のスペクトル分布を n 次元縦ベクトル y_i^A ($i=1, 2, \dots, m$) で表す。本スペクトル解析では絶対的な放射輝度の値は必要ないので、計測値は $\|y_i^A\|^2=1$ のように単位電力に正規化されているものとする。さて反射光の 2 次元性より、 y_i^A は 2 つの直交基底ベクトルを用いて

$$y_i^A = p_{i1}u_1^A + p_{i2}u_2^A \quad (4)$$

と書ける。ただし基底ベクトル u_i^A の要素 u_{i1} ($i=1, 2, \dots, n$) と係数 p_{i1} は非負とする。 u_1^A と u_2^A は全計測値の特異値分解の主成分ベクトルとして得られるが、観測条件に依存する。そこで u_1^A と u_2^A を相互反射成分ベクトル L_1 とそれに垂直な単位ベクトル $L_1^\perp$ による新しい基底ベクトルに変換し、この新しい座標系で計測値を表示する。この座標変換は次式で記述される。

$$[L_1, L_1^\perp] = [u_1^A, u_2^A]T \quad (5)$$

ここで T はユニタリ行列で、 u_i^A を L_1 へ回転させる。具体的には行列 T の要素は $\|L_1 - t_1 u_1^A - t_2 u_2^A\|^2$ を最小にさせる最小 2 乗解から決定することができる。

$$T = \frac{1}{(t_1^2 + t_2^2)^{1/2}} \begin{bmatrix} t_1 & t_2 \\ t_2 & -t_1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

さて元の主成分座標系 (u_1^A, u_2^A) での座標点 (p_{i1}, p_{i2}) は新しい座標系では $[c_{i1}, c_{i1}^\perp] = [p_{i1}, p_{i2}]T$ のように表される。この変換によって新しい座標点 ($c_{i1}, c_{i1}^\perp$) は図 3 のように第 1 象限の単位円上に存在することがわかる。特に計測値が 4 分円上で全順序で並んでいることに注意する。相互反射成分の寄与が大きければ、計

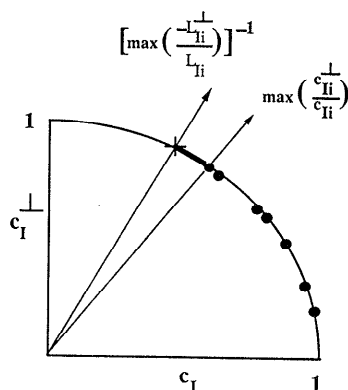


図 3 座標系 ($c_1, c_1^\perp$) の四分円とスペクトル分布の観測点
●: 観測点, +: 物理的限界点

Fig. 3 Quarter circle of the coordinate system ($c_1, c_1^\perp$), and the observation points of the spectral distributions.

●: observation point, +: physical limit.

測値の座標は (1, 0) に近く、逆に相互反射成分が減って拡散反射成分の寄与が大きければ、座標点は反時計方向に円上を移動する。座標点 (0, 1) は $L_{\dagger}$ が負の要素をとるので観測できない。したがって純粋な拡散反射成分の座標点がこの四分円上のどこかに存在することになる。

したがって拡散反射成分 $L_{\dagger}$ は

$$L_{\dagger} = c_1 L_1 + c_{\dagger}^{\dagger} L_{\dagger}^{\dagger} \quad (7)$$

と書ける。このとき係数 ($c_1, c_{\dagger}^{\dagger}$) に対する解の存在範囲は 2 種類の制約から次のように与えられる。

$$\max_{1 \leq i \leq m} \left(\frac{c_{\dagger i}^{\dagger}}{c_1} \right) \leq \frac{c_{\dagger}^{\dagger}}{c_1} \leq \left[\max_{1 \leq i \leq n} \left(\frac{-L_{\dagger i}}{L_1} \right) \right]^{-1} \quad (8)$$

係数比 $c_{\dagger}^{\dagger}/c_1$ に関する不等式で下限は相互反射成分の寄与が最も少ない観測点を表す。右辺で L_{1i} と $L_{\dagger i}$ は L_1 と $L_{\dagger}$ の要素を表す。この上限は $L_{\dagger}$ の要素が非負という制約から導出される。(8)式の存在区間は図3の四分円上で太線で描かれている。しかしこれまでの実験の結果では、拡散反射ベクトルの正解が上限の近くに存在することは少なかった。上限はあくまでも物理的制約で、むしろ下限は推定値として妥当といえる。

3.3 反射率と照明光の推定

以上の手続きによって、相互反射成分 L_1 と各表面の拡散反射成分 $L_{\dagger}$ と $L_{\dagger}^{\dagger}$ の正規化ベクトルが推定できた。これらから各表面の分光反射率と照明光のスペクトル分布が推定可能である。いま表面 A, B の分光反射率、および照明光の分光電力分布を、それぞれ、 n 次元ベクトル S^A, S^B, E で表す。このとき各反射成分の定義から関係式

$$L_{\dagger} = S^A E \quad (9)$$

$$L_{\dagger}^{\dagger} = S^B E \quad (10)$$

$$L_1 = S^A S^B E \quad (11)$$

が成立していることに注意する。これらを用いれば、得られた $L_{\dagger}$ と L_1 から分光反射率 S^A が $[L_{1i}/L_{\dagger i}]$ の形式で、また $L_{\dagger}$ と L_1 から分光反射率 S^B が $[L_{1i}/L_{\dagger i}^{\dagger}]$ の形式で求まる。さらに $L_{1i}, L_{\dagger i}, L_{\dagger i}^{\dagger}$ から分光電力分布 E が $[L_{1i}/S^A S^B]$ の形式で求まる。ただし記法 $[*/*]$ はベクトルの各要素ごとの割算を意味し、この演算にはベクトルの正規化も含まれているものとする。

4. 画像解析

4.1 色空間と色ベクトル

カメラ計測によるカラー画像を解析するために、ま

ずカメラ出力の RGB 値で反射モデルを表現する。カメラの分光感度を $R_i(\lambda)$ ($i=R, G, B$) で表すとき、画素 x におけるカメラ出力 $\rho_i(x)$ は

$$\rho_i(x) = \int Y(x, \lambda) R_i(\lambda) d\lambda \quad (i=R, G, B) \quad (12)$$

と書ける。上式の $Y(x, \lambda)$ に (2)-(3) 式を代入すれば、表面 A と B に対する反射モデルを RGB 値で記述することができる。

$$\rho_i^A(x) = w^A(x) \rho_{\dagger i}^A + w^{AB}(x) \rho_{1i} \quad (i=R, G, B) \quad (13)$$

$$\rho_i^B(x) = w^B(x) \rho_{\dagger i}^B + w^{BA}(x) \rho_{1i} \quad (i=R, G, B) \quad (14)$$

ただし

$$\rho_{\dagger i}^A = \int S^A(\lambda) E(\lambda) R_i(\lambda) d\lambda$$

$$\rho_{\dagger i}^B = \int S^B(\lambda) E(\lambda) R_i(\lambda) d\lambda$$

$$\rho_{1i} = \int S^B(\lambda) S^A(\lambda) E(\lambda) R_i(\lambda) d\lambda$$

いま 3 次元の色ベクトルを $\rho = [\rho_R, \rho_G, \rho_B]^T$ (T はベクトルの転置) で記す。表面 A から観測されるすべての 3 次元色ベクトル ρ^A は、(13) 式より拡散反射成分の色ベクトル $\rho_{\dagger}^A$ と相互反射成分の色ベクトル ρ_1 の線形結合で記述される。同様に表面 B からの色ベクトル ρ^B は $\rho_{\dagger}^B$ と ρ_1 の線形結合である。さて計測画像から 2 表面間の相互反射成分の色ベクトル ρ_1 を推定するには、あらかじめ画像データから各表面に対応する領域を抽出しておく。そして 3.1 節で述べた計算を 3 次元に置き換えるだけで ρ_1 は容易に求まる。

4.2 物体色の推定

表面 A の拡散反射成分色ベクトル $\rho_{\dagger}^A$ を求める ($\rho_{\dagger}^B$ も同様)。ここではこれを正規化ベクトルではなくて、3 次元の色ベクトルとして推定する。このため前述の四分円解析を拡張する。

さて観測データとして m 画素に対する色ベクトルが与えられているものとする。直交基底の座標変換によって、拡散反射ベクトル $\rho_{\dagger}^A$ は相互反射ベクトル ρ_1 とそれに垂直な単位ベクトル $\rho_{\dagger}^{\dagger}$ を用いて

$$\rho_{\dagger}^A = c_1 \rho_1 + c_{\dagger}^{\dagger} \rho_{\dagger}^{\dagger} \quad (15)$$

と記述できる。ただし係数は $c_1^2 + c_{\dagger}^{\dagger 2} = 1$ で、単位円上には必ずしも存在しない。係数 c_1 と $c_{\dagger}^{\dagger}$ は未知で、観測値 ($c_{1i}, c_{\dagger i}^{\dagger}$) ($i=1, 2, \dots, m$) および $\rho_1, \rho_{\dagger}^{\dagger}$ から推定する。解の存在範囲を絞るために、まず係数比 $c_{\dagger}^{\dagger}/c_1$ は不等式

$$\max_{1 \leq i \leq m} \left(\frac{c_{1i}^+}{c_{1i}} \right) \leq \frac{c_1^+}{c_1} \leq \left[\max_{1 \leq i \leq 3} \left(\frac{-L_{1i}^+}{L_{1i}} \right) \right]^{-1} \quad (16)$$

を満たす。次に最も拡散成分が大きいベクトルを推定するために、大きさに関する制約を導入する。係数 c_1 は相互反射色の重みを表し、 c_1^+ は拡散物体色自身の寄与を表す。したがって純粋な拡散物体色のもつ c_1^+ の値は観測した値 c_{1i}^+ ($i=1, 2, \dots, m$) のどの値よりも大きくなければならない。すなわち条件

$$c_1^+ \geq \max_{1 \leq i \leq m} (c_{1i}^+) \quad (17)$$

が必要である。このように(16)-(17)の不等式で制約された領域が係数の取り得る可能な範囲である。

さて係数の信頼できる推定値は、この可能領域であくまでも実測データに基づいて決められるべきである。この観点からみれば、不等式(16)の上限は単なる物理的制約であるのに対して、その下限および(17)の下限は実際の観測点に対応して存在する。そこでこの両下限で推定値を決定する。拡散物体色の1つの信頼できる推定値は、図4に示すように両下限を表す直線の交点として求まる。すなわち、原点を通り傾き (c_1^+/c_1) が最大となる直線 b_1 と c_1 軸に平行で c_{1i}^+ の最大値を通る直線 b_2 との交点である。この点の座標は

$$c_1 = \max_{1 \leq i \leq m} (c_{1i}^+) / \left(\max_{1 \leq i \leq m} (c_{1i}^+/c_{1i}) \right) \quad (18)$$

$$c_1^+ = \max_{1 \leq i \leq m} (c_{1i}^+) \quad (19)$$

で算出され、拡散成分の絶対的な色ベクトルはこれらを(15)式に代入することにより得られる。

以上の過程で相互反射成分色 ρ_1 と物体色 ρ_B が算出されたので、次に画像を2つの成分に分離抽出することが可能となる。観測値が色ベクトル ρ_1 と ρ_B の線形結合で記述できると仮定しているので、分離の処

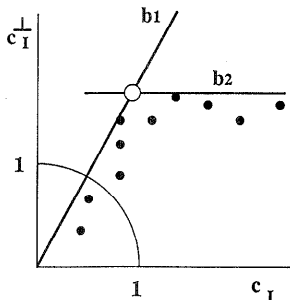


図4 拡張した座標系 (c_1, c_1^+) と画素色ベクトルの観測点
●: 観測点, ○: 拡散物体色の推定点

Fig. 4 Extended coordinate system of (c_1, c_1^+) , and the observation points of color vectors of pixels.
●: observation points, ○: estimated point of diffuse object color.

理は最小自乗法で各成分の係数を求めることに帰着する。すなわち画素ごとに

$$\|\rho^A(x) - w^A(x)\rho_B - w^{AB}(x)\rho_1\|^2 \quad (20)$$

を最小化する係数 $w^A(x)$ と $w^{AB}(x)$ を求める。このとき $w^A(x)\rho_B$ が相互反射効果を含まない本来の拡散反射物体色の項である。

5. 実験結果

5.1 計測

水色と若葉色の2枚の色紙を実験に使用した。色紙を台紙に貼りつけ、内角が45°になるように接合し、真正面の方向から照明した。光源は昼光用フラッドランプで、対象物体との距離は約0.5mである。分光計測には分光放射輝度計を用い、画像計測にはCCDカメラを使用した。計測器は対象物体から約2mのほぼ同じ位置において、同一環境で計測できるようにした。これにより画像の相互反射の解析結果を、厳密に計測した分光データに基づいて検証することができる。図5にカメラで計測した画像の写真を示す。計測画像で水色紙(左)と若葉色紙(右)の接合部付近で拡散相互反射の効果が現れているのがわかる。

5.2 スペクトル解析

まず水色紙から測定した反射光のスペクトル分布の曲線群を図6の実線で示す。表面の19点から観測したすべての分布曲線を5nmおきにサンプルして61次元ベクトルで表し、さらに単位電力に正規化している。同様に若葉色紙表面の23点から測定した反射光のスペクトル分布曲線群を図7の実線で示す。

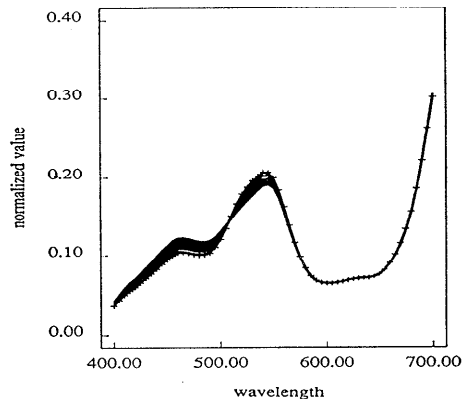


図6 水色紙から測定したスペクトル分布と推定した拡散反射成分(+印実線)

Fig. 6 Measured spectral distributions from the aqua paper, and the estimated diffuse reflection component (a solid curve with +).

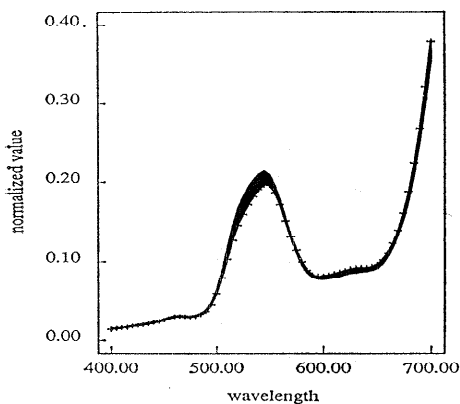


図 7 若葉色紙から測定したスペクトル分布と推定した拡散反射成分 (+印実線)
Fig. 7 Measured spectral distributions from the *Wakaba-iro* paper, and the estimated diffuse reflection component (a solid curve with +).

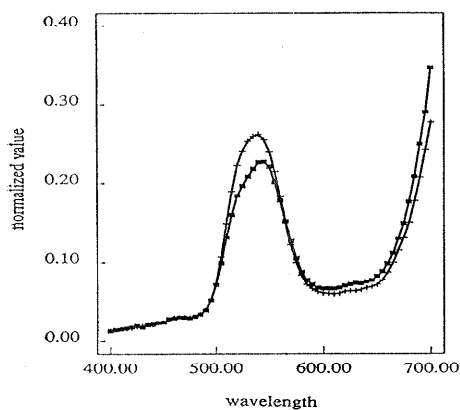


図 8 相互反射成分 $L_I(\lambda)$
+: 推定値, ■: 計算値
Fig. 8 Interreflection component $L_I(\lambda)$.
+: estimate, ■: computation.

3.1 節の手法に従って 2 つの曲線群から共通相互反射成分 L_I を抽出した。この結果を図 8 の + 印の実線で示す。なお精度を検証するために、別途光源のスペクトル分布を測定し、また色紙を相互反射を含まないように単独で計測した。このように分光反射率 S^A , S^B と照明光の分布 E をあらかじめ得ておいた。図 8 の ■ 印実線は $L_I = S^A S^B E$ による計算結果である。相互反射成分の推定は良好であることがわかる。

次に 3.2 節の四分円解析に従って各色紙の拡散反射成分を推定した。図 9 に若葉色紙の係数 ($c_I, c_I^\dagger$) を描く。+ 印は観測された単位円上の座標点を表す。■ 印

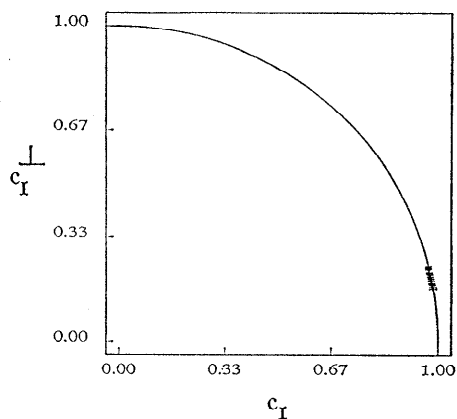


図 9 若葉色紙の係数 ($c_I, c_I^\dagger$) の分布
+: 観測点, ■: 係数比 $c_I^\dagger/c_I$ の最大点
Fig. 9 Distribution of the coefficients ($c_I, c_I^\dagger$) of the *Wakaba-iro* paper.
+: observation, ■: maximum of the coefficient ratio $c_I^\dagger/c_I$.

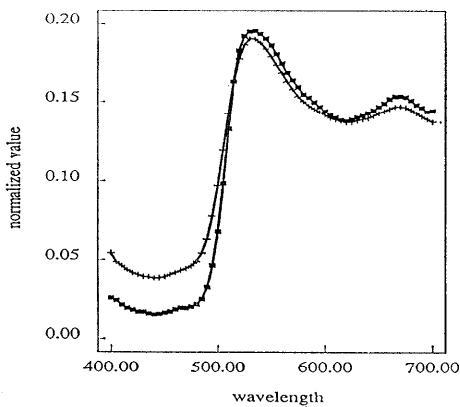


図 10 若葉色紙の分光反射率
+: 相互反射よりの推定値, ■: 直接的な計測値
Fig. 10 Spectral reflectance of the *Wakaba-iro* paper.
+: estimate from interreflection, ■: direct measurement.

は係数比 $c_I^\dagger/c_I$ が最大となる点を示す。この点を推定値として採用した。図 6 と図 7 において + 印実線は推定した拡散反射ベクトル L_I^A と L_I^B である。

さて L_I , L_I^A , L_I^B が求まったので、分光反射率と照明光の分光分布を算出した。図 10 に若葉色紙の正規化した分光反射率を示す。+ 印は相互反射よりの推定値で、■ 印は単独に計測して得られた結果である。図 11 に照明光の分布を示す。+ 印は相互反射よりの推定値で、■ 印は標準白色板による計測結果である。分光反射率と照明光ともに推定結果は良好である。

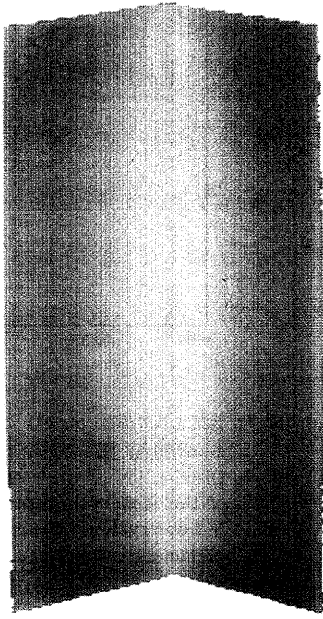


図 5 相互反射を含む色紙の計測画像
Fig. 5 Measured image of color papers including interreflection.

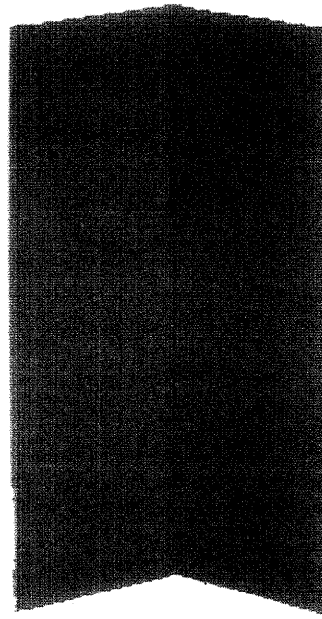


図 14 推定した固有物体色で彩色した色紙
Fig. 14 Color papers painted with the estimated inherent-object colors.

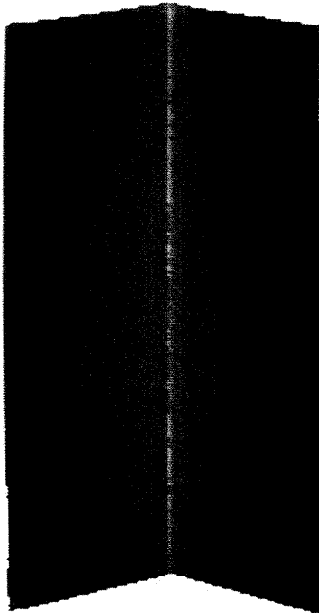


図 15 抽出した相互反射成分の画像
Fig. 15 Extracted image of interreflection component.

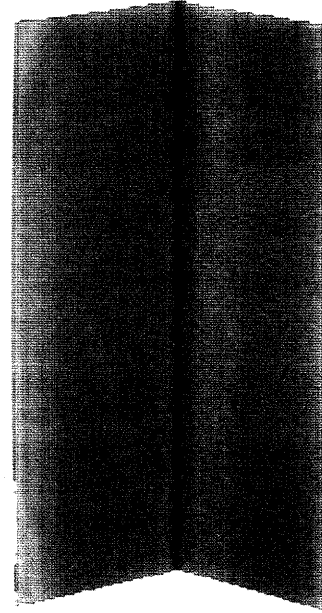


図 16 抽出した拡散反射成分の画像
Fig. 16 Extracted image of diffuse reflection component.

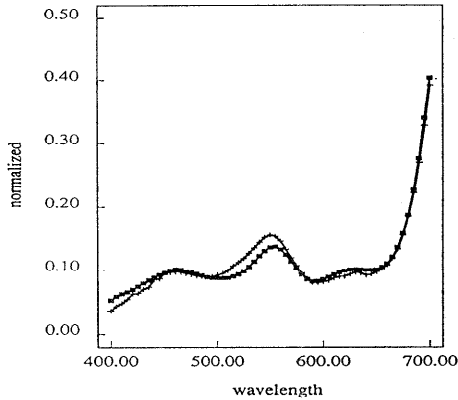


図 11 照明光の分光電力分布
 + : 相互反射よりの推定値, ■ : 計測値
 Fig. 11 Spectral power distribution of illumination.
 + : estimate from interreflection,
 ■ : measurement.

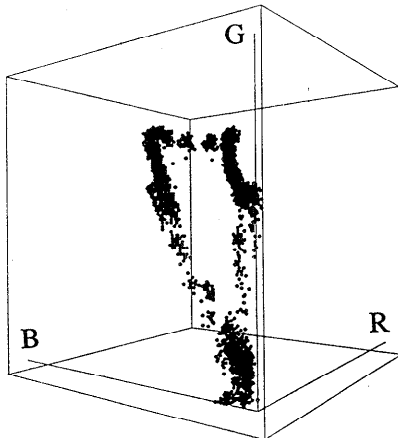


図 12 RGB 空間における原画像のヒストグラム
 Fig. 12 Histogram of the original image in an RGB space.

5.3 画像解析

まず図12にRGB色空間における原画像のヒストグラムを示す。原点から細長く伸びた2つの楕円体のクラスタと、両楕円体の間に存在するクラスタに注目される。前者が各色紙の物体色の分布で、後者が相互反射の効果を強く受けた色の分布である。次に色分類を行って、原画像をおおまかな領域に分割した。水色紙領域と若葉紙領域、さらに背景の3つの領域を得た。

各色紙領域のRGBデータを取り出して、特異値分解によって主成分ベクトルを求めた。2組の主成分ベクトルから共通の相互反射成分の正規化色ベクトルを算出し、 $\rho_1 = [0.442, 0.845, 0.301]^T$ を得た。次に拡張

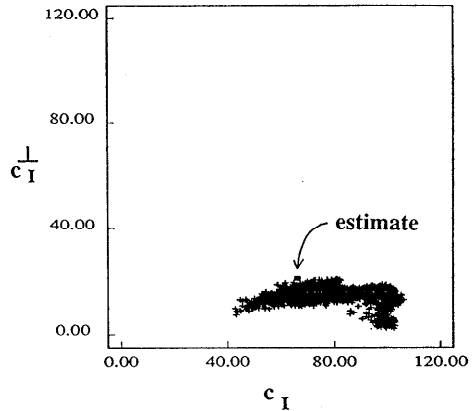


図 13 若葉色紙領域における係数 ($c_I, c_I^\dagger$) の分布
 + : 観測点, ■ : 拡散成分の推定値
 Fig. 13 Distribution of the coefficients ($c_I, c_I^\dagger$) in the region of the Wakaba-iro paper.
 + : observation, ■ : estimate point of diffuse reflection component.

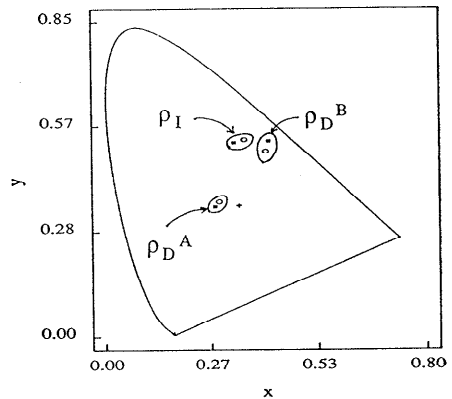


図 17 推定した成分の色度の比較
 ■ : 画像よりの推定値, ○ : スペクトル分布の計測値
 Fig. 17 Comparisons of chromaticity for the estimate components.
 ■ : estimate from image, ○ : measurement of spectral distribution.

四分円解析法に従って、各領域固有の拡散成分を予測した。若葉色紙領域について、 $(c_I, c_I^\dagger)$ の座標系における係数の分布を図13に示す。+印は観測した各画素の色ベクトルに対する係数で、■印は提案した手法による拡散成分の最も強い色ベクトルに対する推定値を表す。これより固有物体色のベクトルはRGB各8ビットのスケールで $\rho_B = [47.0, 50.1, 10.3]^T$ として求めた。同様に水色紙領域については $\rho_A = [36.3, 55.0, 60.9]^T$ であった。

図 14 に推定した物体色で各領域を彩色した結果を示す。この画像は照明や観測の幾何学的要因による変動が一切含まれていない均一な物体色である。さらに 3 種類の色ベクトル ρ_1 , ρ_R , ρ_B を最小 2 乗法で原図に適合させて、計測画像の成分展開を行った。まず図 15 は相互反射成分のみの画像で、図 16 は拡散反射成分のみの画像である。相互反射成分の色は水色と若葉色の中間色である。2 枚の色紙の接合部付近や中央部において相互反射の効果が強く、新たな物体色が生成されることがわかる。なお図 16 の画像は相互反射の影響は取り除かれているが、明るさの変動は含む。

最後に、相互反射を含む画像データより推定した各色成分の信頼性を調べた。求めた色ベクトル ρ_1 , ρ_R , ρ_B の xy 色度を図 17 の ■印で示す。次に分光放射輝度計で直接測色した物体色の色度および計算した相互反射色の色度を○印で示す。計測系は両者で全く異なるが、ほぼ対応した結果が得られている。このように簡便なカラー画像計測で相互反射の解析が可能である。

6. おわりに

本論文では、拡散反射表面間の相互反射を、2 色性のカラー反射モデルを用いて解析する方法を示した。相互反射現象を厳密にモデル化するには、積分方程式を解いたり、あるいは CG のラジオシティ法を用いるなど、複雑な数値計算を伴う。しかし表面からの反射光の色成分のみに着目し、しかも相互反射の跳ね返りを 1 回のみに限定すれば、簡単な 2 色性反射モデルで相互反射現象を記述することができる。

ここでは特にこの反射モデルを用いる Funt-Drew の色空間解析の一般化を行った。まずスペクトル解析に対しては、2 表面から反射するスペクトル分布から、2 表面間の相互反射のスペクトル分布を抽出する方法、および各表面の拡散反射成分のスペクトル分布を推定する四分円解析法を示した。そして、これらのスペクトル情報から、各表面の分光反射率と照明光の分光電力分布という重要な物理量が求まって、色恒常性が分光計測によって実現できることを示した。

次に、3 次元色空間でカメラ計測による画像を解析した。反射成分の色推定にはスペクトル解析と同様なアルゴリズムが適用可能である。ここでは特に表面の固有物体色を色度のみとして正規化色ベクトルで推定するのではなく、明度も含めた絶対的なスケールで色ベクトルを推定するアルゴリズムを示した。

スペクトルと画像について、それぞれ提案した解析法の妥当性を 2 枚の色紙を用いる実験で詳細に調べた。まずスペクトルデータより各色紙の分光反射率と照明光の分布が得られた。また計測画像より相互反射の色度と色紙の固有色が推定できて、これより相互反射の効果を全く含まない物体の画像を抽出した。厳密な分光計測との比較により、画像解析の結果は信頼できることを示した。

本論文では拡散反射表面間の相互反射を取り扱った。鏡面反射成分を含む相互反射現象については今後検討する予定である。

謝辞 本研究の推進にあたりご協力いただいた元本学大学院生（現シャープ(株)）の大橋伸一郎君に感謝します。

参 考 文 献

- 1) Forsyth, D. and Zisserman, A.: Shape from Shading in the Light of Mutual Illumination, *Image and Vision Computing*, Vol. 8, pp. 42-49 (1990).
- 2) Bajcsy, R., Lee, S.W. and Leonardis, A.: Color Image Segmentation and Color Constancy, *SPIE/SPSS Symposium*, Santa Clara, pp. 245-255 (1990).
- 3) Nayar, S. K., Ikeuchi, K. and Kanade, T.: Shape from Interreflections, *Proc. Int. Conf. on Computer Vision*, Osaka, pp. 2-11, IEEE (1990).
- 4) 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, pp. 727-735 (1991).
- 5) Funt, B. V., Drew, M. S. and Ho, J.: Color Constancy from Mutual Reflection, *Int. J. Computer Vision*, Vol. 6, pp. 5-24 (1991).
- 6) Funt, B. V. and Drew, M. S.: Color Space Analysis of Mutual Illumination, Technical Report CSS/LCCR TR 91-03, Simon Fraser Univ. (1991).
- 7) Tominaga, S. and Wandell, B. A.: The Standard Surface Reflectance Model and Illuminant Estimation, *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol. 6, pp. 576-584 (1989).
- 8) Tominaga, S. and Wandell, B. A.: Component Estimation of Surface Spectral Reflectance, *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol. 7, pp. 312-317 (1989).
- 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, pp. 37-45 (1992).
- 10) Tominaga, S.: Surface Identification Using the Dichromatic Reflection Model, *IEEE Trans. on PAMI*, Vol. 13, pp. 658-670 (1991).

(平成 4 年 8 月 5 日受付)

(平成 4 年 11 月 12 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.
