

物体のカラー反射モデルの検討

富永昌治
大阪電気通信大学工学部

内容概説 不均質物体に対する標準反射モデルは光が2つの独立な過程によって反射することを仮定している。一つの成分は物体と空気の境界で反射する。この過程による反射光は物体表面層の色素粒子と相互作用を起こさず、そのスペクトル組成は入射光のものと等しいと仮定される。第2の成分は物体表面に入射後、物質の内部構造との相互作用を起こして反射される。この相互作用が光のスペクトル成分を実質的に変えて、物体そのものの色を形成する。本論文では標準反射モデルの妥当性を検討するための計測と解析の方法を述べている。また、観測スペクトルから照明光のスペクトル分布を推定するための計算法を提案する。モデルの正確さや方法の正当性をプラスチック物体を用いた実験で評価する。

Consideration on a Color Reflection Model for Object Surfaces

Shoji TOMINAGA
Faculty of Engineering, Osaka Electro-Communication University
Neyagawa, Osaka 572, Japan

Abstract The standard reflectance model for inhomogeneous materials assumes that light is reflected by two independent mechanisms. One component is reflected at the interface of the material and air. Light reflected by this mechanism does not interact with surface colorant and its spectral composition is assumed to equal that of the incident light. The second component is reflected after entering and interacting with the subsurface structure of the material. This interaction substantially changes the spectral composition of the reflected light.

We describe a method for testing the standard reflectance model. Further, we propose a computational method to obtain an estimate of the illuminant from the observed spectra. The accuracy of the standard model and the feasibility of the illuminant estimation are evaluated using plastic objects.

1. はじめに

最近コンピュータグラフィックスやコンピュータビジョンの分野で、物体の光反射モデルがよく使用されるようになってきた。前者の分野では物体の見えの正確なレンダリングには光の反射モデルが重要な役割を演じる¹⁾。後者の分野では、例えばハイライトを含むカラー画像を認識するには、物体色のみならずハイライトによる色の変動も考慮した解析が必要である²⁾。

光の反射の仕方は当然物体の表面状態と表面を形成する材質に依存する。自然界の多くの物体の表面近くの層は不均質物質(inhomogeneous substance)のような構造で近似できるといわれている。これは、表面層における媒体(vehicle)と着色層に埋め込まれた色素(pigment)のような異なった成分材料から構成される物質である。例えばプラスチックやペンキなどは不均質な物質である。これとは逆に、均質物質の典型的な例は金属やガラスである。均質物体に対して、入射光は内部散乱をほとんど受けず、スネルの法則に従って反射する³⁾。しかし、その反射光のスペクトル組成を簡単な反射モデルで表現することはできない。

ほとんどの反射モデルは、物体からの反射光が2つの物理的に異なった経路で反射することを仮定している。すなわち一部の光は物体表面と空気層の間の境界で反射する。このタイプの反射は鏡面からの反射のようになり、反射光は視角の狭い範囲のみ観測される。この反射を鏡面反射あるいはインターフェイス(interface)反射と呼ぶ。

第2の反射経路は物体の表面を通過した光について生じる。光が着色層に入射すれば、色素粒子との間で光の散乱が起こる。この光は境界面を逆方向に通過して空気中に戻った場合のみ観測される。このタイプの反射を拡散反射またはサブサーフェイス(subsurface)反射、内部(body)反射などと呼んじられる。

反射光をこのような少数の加法成分で特徴づけることはすでに多くの研究者が暗黙に仮定していることである。Shaferはさらにコンピュータビジョンのためにはいくつかの近似が役立つとしている⁴⁾。この近似とは不均質物体の反射光の加法成分を、入射・反射の角度に依存しない波長の関数として表現できると仮定することである。彼はこのモデルを2色性反射モデル(Dichromatic reflection model)と呼んでいる。本論文ではこれを標準反射モデル(Standard reflectance model)と呼ぶことにする。

標準反射モデルは反射光データの経験的な性質を記

述するために広く使用されてきたが、モデルの妥当性を評価する実験結果は比較的少ない。最近 Klinker、Shafer、Kanade²⁾ はハイライトを含むカラー画像を解析するためにこのモデルを使った。彼らの計測はRGBのカラーカメラからの3次元データに基づいていた。Lee、Breneman、Schule⁵⁾ は標準反射モデルがいくつかの物体について妥当であることをスペクトル(分光)データを用いて示した。

今日標準反射モデルが多くの物体に適用されようとしているので、このモデルを詳細に評価して、適用範囲を明かにすることは価値あると考えられる。

本論文では、物体からの反射光のスペクトル分布を、観測の種々の条件のもとで計測する新しい方法を述べる。我々は標準反射モデルの妥当性を調べるためにこれらの観測スペクトルを主成分展開する方法を述べる。従来からプラスチックのような不均質物体からの鏡面反射は、入射光と同じスペクトル組成をもつものと考えられてきた。もし標準反射モデルにおいてこの仮定が正しいならば、反射光の計測データから照明光のスペクトル分布を推定することが可能となる。例えばLee⁵⁾ はハイライトから、照明光の色度を推定するアルゴリズムを提案している。本論文では、2つの物体表面を用いて照明光のスペクトル分布を推定するアルゴリズムを提案する。すなわち、標準反射モデルを仮定すれば、照明光のスペクトルを推定する問題は、複数の表面による反射光の全測定データから、共通のスペクトル情報を抽出することに帰着できることを示す。

第2章は標準反射モデルの定式化である。第3章では、カラー反射問題に対する本スペクトル解析法の基本的原理を述べる。計算法を第4章で展開し、実験結果を第5章で示す。第6章はまとめである。

2. 標準反射モデル

一般的に物体表面から反射される光は、インターフェイス反射(鏡面反射)とサブサーフェイス反射(拡散反射)の2つの加法的成分に分解することができる(図1参照)。このとき反射光の放射輝度(radiance) Y は波長と観測の幾何学的パラメータの関数として

$$Y(\theta, \lambda) = Y_1(\theta, \lambda) + Y_2(\theta, \lambda) \quad (1)$$

と書ける。ここで、波長 λ は可視領域をわたり、パラメータ θ は入射角、位相角、視線角などの反射を記述するのに必要なすべての角度を含むものとする。添字

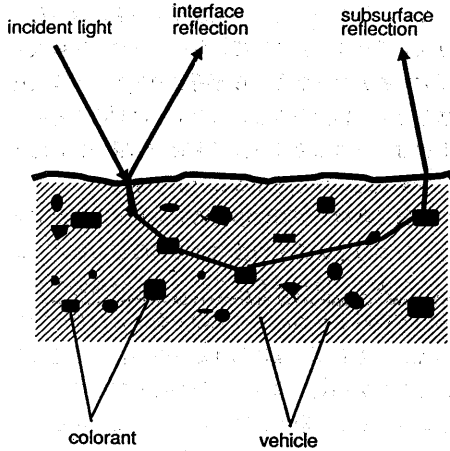


図1 不均質物体に対する光の反射過程

IとSはそれぞれインターフェイスとサブサーフェスの成分を表わす。さて標準反射モデルの第1の重要な仮定は、波長成分と幾何学的条件の間が分離可能なことである。

【加法性と分離可能性】：各反射光成分のスペクトル組成は幾何学的条件に依存しない。すなわち、分光放射輝度の各成分 Y_i と Y_s は次のように波長と幾何学的パラメータの因子に分割することができる。

$$Y(\theta, \lambda) = C_i(\theta)L_i(\lambda) + C_s(\theta)L_s(\lambda) \quad (2)$$

ここで $L_i(\lambda)$ と $L_s(\lambda)$ の項はそれぞれインターフェイスとサブサーフェス反射成分のスペクトル分布である。また $C_i(\theta)$ と $C_s(\theta)$ の項は幾何学的パラメータによるスケールファクタである。

(2)式は不均質物体からのカラー信号は2つのスペクトル分布の線形結合として記述できることを示している。結合の重み係数が幾何学的スケールファクタである。この仮定の要点は、各反射成分のスペクトル組成は観測の角度が変動しても不変であることである。

我々は反射モデルを解析するうえで、物体の表面反射率の知識も必要である、このとき反射光は物体の表面反射率と入射光のスペクトル分布の積で表現される。いま $S_i(\lambda)$ と $S_s(\lambda)$ を2成分の各分光表面反射率とし、 $E(\lambda)$ を入射光のスペクトル分布とする。反射光はこのとき

$$Y(\theta, \lambda) = C_i(\theta)S_i(\lambda)E(\lambda) + C_s(\theta)S_s(\lambda)E(\lambda) \quad (3)$$

と書ける。ここで反射率のインターフェイス成分 $S_i(\lambda)$ はフレネルの法則によって決まる。もし表面の屈折率が可視域で一定ならば、インターフェイス成分は波長に依存しなくなる。不均質物質の媒体として使用される多くの材料は油のようなもので、屈折率が一定であることが報告されている⁵⁾。これらの表面では、鏡面反射は照明光と同じ色を持つように見える。多くの材料についてもこの性質が近似的に成立する。したがって以下が仮定される。

【一定鏡面反射率】：表面の分光反射率のインターフェイス成分は可視領域で $S_i(\lambda) = \text{constant}$ と一定である。

光計測の立場からは通常反射率や反射光には単位と次元が与えられている。しかし本論文の解析はすべて相対値で行っており、物理的な単位や次元は重要性をもたない。

3. 標準反射モデルの分析

標準反射モデルは、カラー信号 $Y(\theta, \lambda)$ が反射光の2つの成分ベクトル $L_i(\lambda)$ と $L_s(\lambda)$ の線形結合として表現できることを仮定している。2つのベクトル $L_i(\lambda)$ と $L_s(\lambda)$ はベクトル空間の中で部分空間として2次元平面を張る。不均質物体表面から観測されるすべてのカラー信号は部分空間のこの平面に落ちるはずである。我々はこの平面をカラー信号平面と呼ぶことにする。図2では平面を平行四辺形として描いている。すべてのカラー信号は平行四辺形の内部に位置しなければならない。カラー信号平面は物体の表面反射率と照明光のスペクトル分布で定義されることに注意する必要がある。すなわちカラー信号平面は照明光が異なれば変動するはずである。このように、標準反射モデルについて最初に吟味することは、不均質物体から観測されるカラー信号が、2次元部分空間に落ちるかどうかが調べることである。

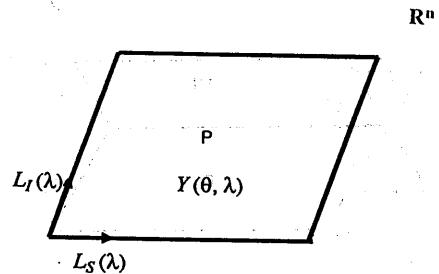


図2 カラー信号平面

標準反射モデルの第1必要条件(すなわち加法性と分理性)が満たされれば、次に一定鏡面反射率の第2条件を試験する。この仮定から導かれる重要な結論は、物体から反射してくるカラー信号の情報を照明光のスペクトル分布を推定するために使用できるということである。逆に、この事実は一定鏡面反射の仮定を試験するために使用することができる。すなわち照明光のスペクトル分布が推定できれば、第2の条件を満たしていることになる。ここではこの方式を採用している。

いま同一光源の下で、2つの異なった不均質物体の表面から反射したカラー信号を計測したと仮定する。異なった観測幾何学的条件で反射光を計測すれば、第1の仮定より計測データは空間内で2つの異なったカラー信号平面P(1)とP(2)を形成する。もし一定鏡面反射の仮定が真ならば、カラー信号のスペクトル分布は、各平面について次のように記述できる。

$$Y_1(\theta, \lambda) = C_{11}(\theta)E(\lambda) + C_{s1}(\theta)S_{s1}E(\lambda) \quad (4)$$

$$Y_2(\theta, \lambda) = C_{12}(\theta)E(\lambda) + C_{s2}(\theta)S_{s2}E(\lambda) \quad (5)$$

ここで平面P(i) (i=1,2)は2つのベクトルの集合(E(λ)、S_{s1}(λ)E(λ))で構成される。このとき照明光のベクトルE(λ)が両方の平面に含まれていることに注目すべきである。このベクトルは光源からの共通のスペクトル情報である。つまり2つの平面は図3のようにこのベクトルで交差するはずである。

一定鏡面反射率の仮定を以下のように調べる。もしこの仮定が真ならば、同一照明下の物体からの2つのカラー信号平面は交差しなければならない。また、交線のベクトルは照明光を示すベクトルの方向になければ

ならない。したがって、一定鏡面反射率の仮定をもつ標準反射モデルに基づいて、我々は2つの物体表面から反射するカラー信号から照明光のスペクトルを推定できるという結論を得る。このように照明光を推定する問題は、2つのカラー信号平面の交線を見出すという計算問題に帰着させることができる。

この性質は多数の表面の場合に拡張することができる。もし3つ以上の不均質物体の表面があれば、その数だけのカラー信号平面がスペクトル分布のベクトル空間内で構成される。すべての平面は、ただ一つの共通直線の上で交差しなければならない。そしてこの直線が照明光の相対スペクトル分布に対応する。

以上のスペクトル解析の要点を以下にまとめる。

(1) 反射モデルの加法性と分離性が真ならば、スペクトルデータは2次元部分空間を形成するはずである。

(2) 一定反射率の仮定が真ならば、異なった物体表面からのカラー信号は交差し、共通交線は照明光のスペクトル分布を表わすベクトルに一致するはずである。

これらの検討に基づいて標準反射モデルを評価する。カラー信号の観測値を得るために2つの不均質物体からの反射光スペクトル分布を、種々の観測角で計測する。まず、各物体表面について、カラー信号が平面によって十分記述できることを調べる。次に、2つの物体によるカラー信号平面が交差し、交線が照明光の方向に存在することを調べる。本解析ではカラー信号平面を決定するのに強いハイライトは必要でない。

4. 計算法

4.1 カラー信号平面の決定

一定の照明の下で、一つの物体表面から反射したm個のカラー信号を、観測の幾何学的条件を変化させて測定したと仮定する。連続的な各スペクトル分布を可視波長域のn点の波長でサンプルし、カラー信号をn次元縦ベクトルy_i (i=1,2,...,m)で表わす。これらのデータベクトルの集合が部分空間に落ちるならば、それらの正規化したものも同じ空間に落ちるはずである。したがって絶対的な放射輝度の値は本解析に必要でない。ここでは正規化したスペクトル分布を用いてすべての計算を実施している。すなわち、計測値は||y_i||² = 1のように単位電力に正規化されているものとする。記法 ||y||² はベクトルの内積を示す。すべての正規化されたスペクトル分布をn×m行列Yにまとめる。

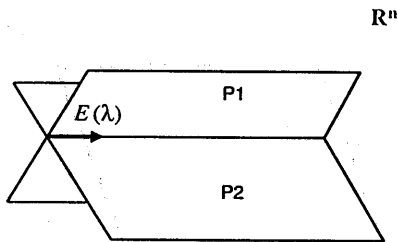


図3 2つのカラー信号平面の交差

$$Y = [y_1, y_2, \dots, y_m] \quad (6)$$

観測スペクトルからカラー信号平面を決定するのに特異値分解を使用する。特異値分解は行列の直交成分展開の有用な手段として知られている。行列Yの特異値分解は以下のような形で与えられる。

$$Y = U \Sigma V^T \quad (7)$$

または等価的に

$$Y = \sigma_1 u_1 v_1^T + \sigma_2 u_2 v_2^T + \dots + \sigma_n u_n v_n^T \quad (8)$$

ここで $U = [u_1, u_2, \dots, u_n]$ と $V = [v_1, v_2, \dots, v_n]$ は、それぞれ $n \times m$ 左特異行列と $m \times n$ 右特異行列であり、 Σ は特異値 $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$ を要素とする $m \times m$ 対角行列である。なお記号Tは行列(ベクトル)の転置を表わす。n次左特異値ベクトル u_1, u_2, \dots, u_m とm次元右特異値ベクトル v_1, v_2, \dots, v_m は、それぞれ $Y Y^T$ と $Y^T Y$ の正規直交固有ベクトルである。いま特異値は降順 ($\sigma_i \geq \sigma_{i+1}$) に並んでいるものとする。

計測したカラー信号によって張られる空間の次元は行列Yのランクによって推定することができる。記号 R^n でn次元ベクトル空間を記す。このときYのランクが2ならば、計測したカラー信号は R^n の2次元部分空間に落ちる。これは $\sigma_1 \geq \sigma_2 > 0$ で $\sigma_3 = \sigma_4 = \dots = \sigma_n = 0$ のとき起こる。実際は、計測雑音や計算機の丸め誤差があるから、零でない特異値が現れ、このような厳密な式は満足されない。ランクを推定する一つの手法は次のような評価指数を用いて特異値を比較することである。

$$I(K) = \sum_{i=1}^K \sigma_i^2 / m \quad (9)$$

仮定により $I(2) = 1.0$ が期待される。もし $I(1) = 1.0$ ならば、測定データは1次元である。この場合インターフェイスとサブサーフェイス反射のうち一つの成分だけを物体から観測したことになる。もし $I(2) \ll 1$ ならば、データは3以上の高次元になる。この場合対象物体の性質についての根本的な再検討が必要になる。物体は均質材質かもしれないし、あるいは標準反射モデルがこの物体に対して適用できない可能性もある。

左特異ベクトル u_1 と u_2 は R^n の2次元部分空間を張

る基底ベクトルの組である。 $I(2) = 1$ のとき観測されたすべてのスペクトル分布は u_1 と u_2 の線形結合で記述される。

$$y_i = c_{i1} u_1 + c_{i2} u_2 \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (10)$$

ただし $c_{ij} = \sigma_j u_{ij}$, ($j=1, 2$)。したがって対象物体表面のカラー信号平面は

$$P = \{y \mid y = c_1 u_1 + c_2 u_2, c_i \in R\} \quad (11)$$

から決定することができる。Rはyが非負で物理的に実現可能となるような実数の集合である。

4.2 照明光スペクトル分布の推定

いま2つの物体表面を同一光源で観測したと仮定する。2つのカラー信号平面はそれぞれのデータ集合の特異値分解より決定される。ベクトル u_1 と u_2 はカラー信号平面を定義する直交基底である。このベクトルは数学的に定められるもので物理的に定義される反射成分 $L_1(\lambda)$ と $L_2(\lambda)$ には一致しない。

ここで $(u_1(1), u_2(1))$ と $(u_1(2), u_2(2))$ をカラー信号平面 $P(1)$ と $P(2)$ の基底ベクトルとする。交線は $P(1)$ と $P(2)$ の両平面上に存在しなければならないことから、次の関係式が得られる。

$$c_1 u_1(1) + c_2 u_2(1) = c_1' u_1(2) + c_2' u_2(2) \quad (12)$$

この関係式は同次方程式

$$[u_1(1), u_2(1), u_1(2), u_2(2)] \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ -c_1' \\ -c_2' \end{bmatrix} = 0 \quad (13)$$

と等価である。(13)式の自明でない解が平面の交線を定義する。一つの信頼できるこの解法は、上の $n \times 4$ 行列に特異値分解を再び適用することである。

$$[u_1(1), u_2(1), u_1(2), u_2(2)]$$

$$= [a_1, a_2, a_3, a_4] \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_4 \\ - & - & - & - \end{bmatrix}$$

$$\cdot [b_1, b_2, b_3, b_4] \quad (14)$$

ここで $a_i, b_i, \lambda_i (i=1,2,3,4)$ の定義は(8)式における u_i, v_i, σ_i にそれぞれ対応する。もし $\lambda_4=0$ かつ $\lambda_3>0$ (すなわちランク3) ならば、平面 $P(1)$ と $P(2)$ は n 次元空間 R^n 内の一本の直線で交差する。ベクトル b_4 は交線ベクトルに対する解となる。交線は b_4 の要素を用いて次のように表わされる。

$$e_1 = \sqrt{2(b_{41}u_1(1) + b_{42}u_1(1))} \quad (15)$$

あるいは

$$e_2 = \sqrt{2(b_{43}u_1(2) + b_{44}u_1(2))} \quad (16)$$

ここで交線ベクトルは $\|e_1\|^2 = \|e_2\|^2 = 1$ のように正規化されているものとする。係数 b_{4i} の符号は、照明光ベクトル e_1 と e_2 が共に正になるように選択されているものとする。例えば、(15)式の右辺が負ならば b_{41} と b_{42} の両符号を反転する。

実際の計測では、 λ_4 の値は正確に零にはならないようである。しかし第2の仮定(一定鏡面反射率)が満足されれば、この値は十分小さい。以前と同じ評価指数 $I(K)$ がこの仮定を評価するために同様に使用できる。求めたベクトル e_1 と e_2 は、各平面 $P(1)$ と $P(2)$ におけるスペクトル分布 $E(\lambda)$ の推定値である。したがって照明光の信頼できる推定値はこれらの平均値として得られる。

$$e = (e_1 + e_2) / 2 \quad (17)$$

以上の手続きは3つ以上の物体表面についても直ちに拡張することができる。推定値を得る計算手順は、この2つの物体表面のすべての組について、ここで示した処理を繰り返すことが基本になる。

5. 実験

標準反射モデルを実験的に調べ、また提案した計算法の正確さを評価するために、プラスチックから反射する光を計測した。

5.1 計測

照明光源は屋光写真撮影用のフラッドランプである。物体を暗室で黒い布でおおわれたテーブルの上に置いた。水平方向から照明するために、光源を物体と同じ

高さにおいた。図4は計測に使用した赤のプラスチックのコップと緑のプラスチックの灰皿で、光源からの距離は約80cmである。ハイライトが表面のいくつかの箇所ではっきり見られる。我々は反射光のスペクトル分布を測定するために分光放射計(Spectroradiometer)を使用し、これを物体から130cm離し、ほぼ同じ高さに置いた。位相角(光源と計測器間の方向角)は約30度であった。

各プラスチック物体の表面は一樣で非常にめらめらである。我々は放射計の観測角をわずかつつ変化させて、表面の多数の箇所から反射する分光放射輝度を計測した。ハイライトの強さはマット領域の光の強さに比べて桁違いに大きいので、反射光の強度は観測角に大きく依存する。このため輝度計のダイナミックレンジは、固定したアパーチャサイズですべての計測ができる程、大きくない。異なった計測箇所を測るたびに、アパーチャサイズを6分から1度まで変化させた。観測点の約半分はハイライト領域近くから選んだ。他の観測点はマット領域からで、そのため鏡面反射の寄与は非常にわずかであるか、あるいは全く含まれていない状態であった。また物体上のすべての観測点を、あらかじめ、鏡面反射しない通常の照明条件で視覚で観察し、一樣な同じ色の見えであることを確認した。したがって計測値の変動は観測の幾何学的要因にのみ依存していると考えられる。

図5は赤いコップの表面の9箇所から測定したスペクトル分布の正規化した曲線である。図の中で一つだけ分離した曲線は最も強いハイライトのスペクトルに対応する。図6は緑の灰皿の表面の8箇所から測定した反射光の正規化した曲線である。なお、これらのデータは物体間の相互反射の影響をなくするため各々に計測して得られたものである。

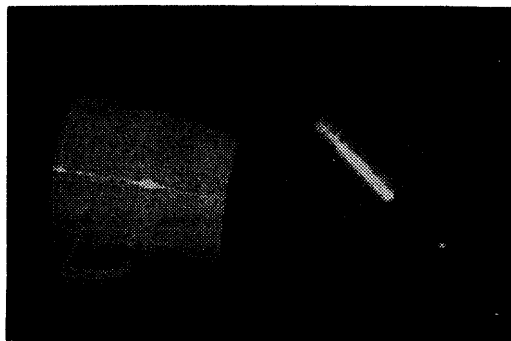


図4 プラスチックの赤のコップと緑の灰皿

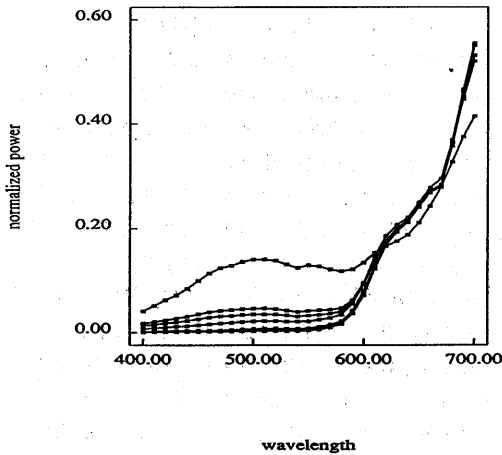


図5 赤のコップから測定されたスペクトル

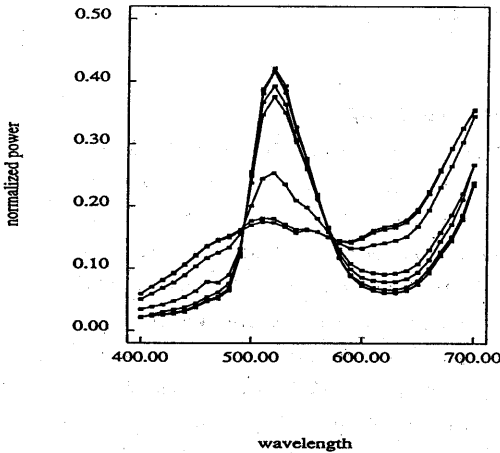


図6 緑の灰皿から測定されたスペクトル

5.2 結果

計測したスペクトル分布を前章で述べた計算手順にしたがって解析した。

スペクトル分布を400~700nmの範囲で10nmごとにサンプルして、まず正規化した曲線 $y_1 - y_9$ から、赤いコップの観測行列 Y を作った。 Y の特異値分解より $\sigma_1 = 2.9627, \sigma_2 = 0.4698, \sigma_3 = 0.0389, \dots$ の特異値が得られた。評価指数は第1成分だけで $I(1) = 0.9753$ となり第2成分まで含めると $I(2) = 0.9998$ となった。残りの7成分の寄与は無視できるほど小さかった。こ

の結果より、赤のコップから計測されたカラー信号空間は3次元ベクトル空間で2次元空間を張ることが認められた。図7は基底ベクトル u_1 と u_2 である。これらの曲線は計測したスペクトル曲線に対する主成分曲線であり、したがって図5のすべての曲線は u_1 と u_2 の線形結合で十分近似できる。これらのベクトルが平面 $P(1)$ を決定する。

次に緑の灰皿に対する 3×8 行列 Y を主成分に分解した。上と同様に平面 $P(2)$ を決定する2つの基底ベクトルを求めた。図8はこれらのベクトルを描いている。この場合 $I(1) = 0.9288, I(2) = 0.9999$ であった。

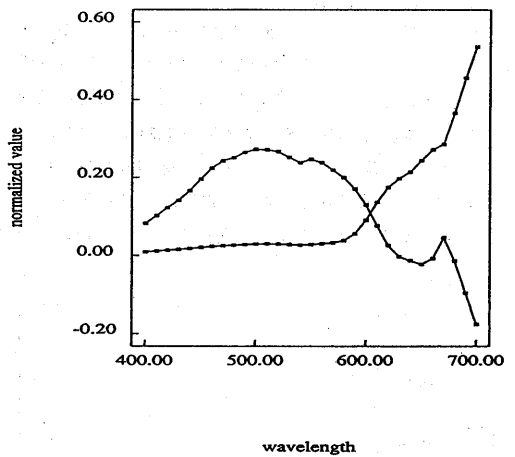


図7 赤のコップの成分スペクトル曲線

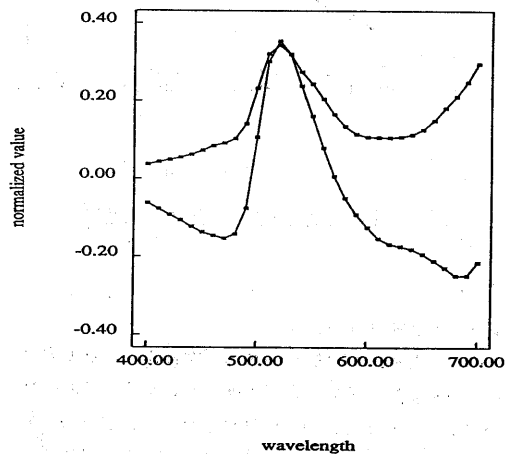


図8 緑の灰皿の成分スペクトル曲線

曲線のこれらの2つの集合からP(1)とP(2)の交線を計算した。結合行列 $[u_1(1), u_2(1), u_1(2), u_2(2)]$ を特異値分解し、特異値 $\lambda_1=1.414, \lambda_2=1.2404, \lambda_3=0.6792, \lambda_4=0.0162$ を得た。我々は結合行列のランクは3で、平面P(1)とP(2)は交差すると結論した。4番目の右特異値ベクトル b_4 は交線の座標を定める。この直線の単位ベクトルは次のように求まった。

$$e = 0.4207 u_1(1) + 0.2702 u_2(1) + 0.4567 u_2(2) + 0.2036 u_2(2) \quad (18)$$

この方程式は使用したフラッドランプのスペクトル分布の推定値を表わす。この推定値は図9で黒い四角をもつ曲線で描かれている。最後に推定の精度を調べるために、この推定値と光源のスペクトル分布を直接測定した結果を比較した。通常照明光のスペクトル分布を知るために標準白色物体が使用される。ここでは標準白色として、酸化マグネシウム(MgO)の固形状粉末を用いた。これを対象物体と同じ場所に置いた。この測定より予測されたスペクトル分布が図9で白い丸をもつ曲線で示されている。両曲線は、中波長から長波長にかけて、かなりよく一致していることがわかる。

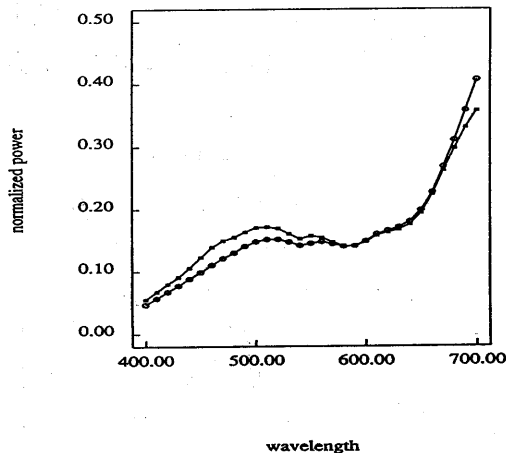


図9 照明光のスペクトル分布の推定結果

6. おわりに

標準反射モデルはいくつかの不均質物体からのカラー信号を記述するのに妥当であるといえる。計測したスペクトル分布は2つの成分からなり、2次元の部分空間で記述できた。またハイライト中のデータはインターフェイス成分と一致し、入射光のスペクトル組成をそのまま変えずに反射していることがわかった。

次に標準反射モデルに基づいて照明光のスペクトル分布を推定するための計算法を示した。この推定法の特徴は校正された標準白色物体が必要でないことである。2つの物体表面が不均質であることさえわかれば、たとえそれらの反射率が全くわからなくても、アルゴリズムは正確に照明光のスペクトルを推定する。

ここで展開した計測と解析の方法は、標準反射モデルで記述できる物体を選別するのに有用である。実際物体からの反射光を計測するには分光放射計のみ必要である。開発した解析法では、純粋なスペキュラーハイライトを観測するような厳密な計測系を構築する必要がない。このような観測条件を実際構築することは全く困難である。本手法は弱いハイライトや光沢からも解析可能と思われる。現在他の物体について解析を進めている。

最後に本研究は米国スタンフォード大学心理学科に滞在中行なった。

参考文献

- 1) R.L. Cook and K.E. Torrance, "A reflectance model for computer graphics," *Computer Graphics*, vol.15, no.3, pp.307-316, 1981.
- 2) G.J. Klinker, S.A. Shafer, and T. Kanade, "The measurement of highlights in color images," *Int. J. Computer Vision*, vol.2, no.1, pp.7-32, 1988.
- 3) M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics*, Pergamon Press, Oxford, 1983.
- 4) S.A. Shafer, "Using color to separate reflection components," *Color Res. Appl.*, vol.10, no.4, pp.210-218, 1985.
- 5) H. Lee, E.J. Breneman, and C.P. Schulte, "An experimental study of a color reflection model," *Kodak Tech. Re.*, no.229507A, 1986.
- 6) H. Lee, "Method for computing the scene-illuminant chromaticity from specular highlights," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol.3, No.10, pp.1694-1699, 1986.