

物体のカラー反射モデル†

富永 昌治** 大橋 伸一郎**

各種物体に対して、物体表面からの反射光スペクトルと反射率の解析に基づいて、適切で簡便なカラー反射モデルを提案する。まず標準の2色性反射モデルを示す。このモデルは反射光を鏡面と拡散の2成分で記述し、しかもこのうち鏡面の分光反射率は波長に関して一定と仮定している。現実の物体について標準反射モデルの妥当性を試験する方法を示す。この試験を日常生活で見かけられる物体について実施し、多くの物体について標準モデルが妥当であることを示す。しかし、金属は鏡面反射のみからなり、また布や紙の中にも標準モデルで記述が困難なものが存在することがわかった。このような物体について分光反射率を詳細に分析し、より適切なモデルを提示する。布や紙などは有彩色の鏡面反射をもつ一般化した2色性反射モデルで近似できることがわかった。また銅などの金属については、2つの鏡面反射成分からなる2色性反射モデルで近似できることがわかった。これより、ほとんどの物体の反射が3種類の2色性反射モデルで表現できることになる。最後に、色度図を用いて反射の性質を簡便に推測できることを示す。

1. はじめに

カラー反射モデルはコンピュータ・グラフィックスの分野で、リアルな画像を生成するために以前から使用されてきた¹⁾。また最近ではコンピュータ・ビジョンの分野で、画像の解析や物体の認識のためにカラー反射モデルが必要になってきた。例えば、Klinkerらは鏡面反射成分を拡散反射成分から分離することを提案し²⁾、画像分割への応用に発展させた³⁾。Healey⁴⁾や Bajcsyら⁵⁾もカラー反射を考慮した画像分割法を提案した。Ikeuchiら⁶⁾は実際の画像から反射モデルのパラメータを推定する方法を提案した。

カラー反射モデルとしては Shafer⁷⁾の2色性反射モデル(dichromatic reflection model)がよく使用される。このモデルはコンピュータ・グラフィックスにおける Phongのモデルに対応するもので、別名標準反射モデル⁸⁾や NIR(neutral-interface-reflection)モデル⁹⁾などとも呼ばれたりする。2色性反射モデルは物体の表面層が不均質物質(inhomogeneous material)から構成されるものを想定して提案されたモデルである。不均質物体とは表面近くの層が媒体と色素のような異なった成分材料から構成される物体で、プラスチックはその代表である。2色性反射モデルは、このような物体からの反射光が2つの異なった反射成分の線形結合で記述できることを仮定している。第1の成分は物体表面から反射する成分で、鏡面(specular)反射

あるいは界面(interface)反射と呼ばれる。第2の成分は色素粒子との光散乱によるもので、拡散(diffuse)反射あるいは内部(body)反射などと呼ばれる。色知覚としては、第1の成分光が照明光の色を、第2の成分光が物体色そのものを知覚させる。

今日、このような簡単な2色性反射モデルが標準反射モデルとして多くの物体の画像生成や分析に適用されつつあるので、このモデルの妥当性を評価して、適用範囲を明らかにすることは価値あることと考えられる。筆者らは標準の2色性反射モデルの妥当性を調べるための方式を提案した^{8),10)}。この方法は照明や観測の幾何学的条件を変えて計測した反射光のスペクトル解析に基づいている。同様な手法は Leeらにより提案されているが⁹⁾、解析法は異なる。さて、現実に存在する多種多様な物体についてモデルの適用可能性を調べることは計測実験を伴うために、調査結果の報告は少ない。プラスチックは妥当であっても、例えば、金属は均質物質(homogeneous material)で内部散乱をもたない構造なので、標準反射モデルで記述できないはずである。

一般に光の反射の仕方を厳密に記述しようとするれば、多くの光学的パラメータや幾何学的パラメータを含む複雑なモデルを構築しなければならず、実用的でない。本論文では、現実の各種物体について、適切かつ簡便なカラー反射モデルの提案を行う。このために、まず対象物体が標準の2色性反射モデルで記述できるかどうかを試験する。これは物体表面からの反射光のスペクトル解析に基づいている。日常生活で見かけられる物体について適用範囲を明らかにする。次に標準モデルで記述できない物体については、分光反射

† A Color Reflection Model for Object Surfaces by SHOJI TOMINAGA and SHIN-ICHIRO OHASHI (Department of Precision Engineering, Faculty of Engineering, Osaka Electro-Communication University).

** 大阪電気通信大学工学部精密工学科

率を詳細に調べて適切なモデルを提示する。なお反射モデルは波長の関数として表現されるので、モデルの検証は本来高次元のベクトル空間で行われる。しかし、もし3次元の色空間で反射の性質を調べることができれば、非常に便利である。ここでは、最後に物体の反射の性質を色度図を用いて推測することが可能であることを示す。

以下では、まず第2章で標準2色性反射モデルを説明し、第3章でこの反射モデルを試験する方法を概説する。各種物体に対する適用結果を第4章で示す。第5章では適用できなかった場合について、反射モデルの再検討を行う。第6章では色度図による解析法を述べる。第7章はまとめである。

2. 標準2色性反射モデル

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のような構造で近似できるといわれている(図1参照)。これは表面層における媒体と着色層に埋め込まれた色素のように異なった成分材料から構成される物質である。この場合、物体からの反射光は2つの物理的に異なった経路で反射することになる。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、反射光は観測角の狭い範囲でのみ観測される。第2の反射経路は、物体表面で通過して着色層に入射した光が色素粒子との間で引き起こす光の散乱による。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拡散反射光として観測される。

さて、物体表面から反射される光は鏡面反射と拡散

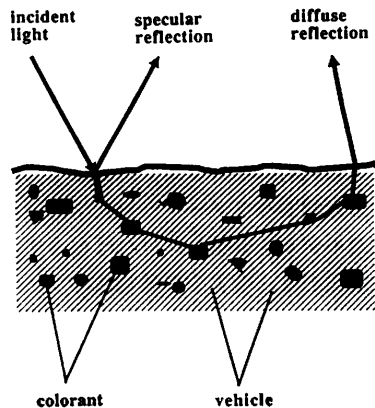


図1 不均質物質に対する光の反射過程
Fig. 1 Light reflection process for an inhomogeneous material.

反射の2つの加法的成分に分解することができる。このとき、反射光の放射輝度 Y は波長と角度パラメータの関数として

$$Y(\theta, \lambda) = Y_s(\theta, \lambda) + Y_D(\theta, \lambda) \quad (1)$$

と書ける。ここで、波長 λ は可視域をわたり、パラメータ θ は入射角、位相角、観測角などの光反射を記述するのに必要なすべての幾何学的なパラメータを含むものとする。添字SとDは、それぞれ、鏡面と拡散成分を表す。

標準反射モデルの第1の重要な仮定は、波長と幾何学的パラメータが分離可能なことである。すなわち反射光成分 Y_s と Y_D は次のように波長と幾何学的因子に分割することができる。

$$Y(\theta, \lambda) = c_s(\theta)L_s(\lambda) + c_D(\theta)L_D(\lambda) \quad (2)$$

ここで $L_s(\lambda)$ と $L_D(\lambda)$ の項は、それぞれ、鏡面と拡散反射成分の放射輝度の電力スペクトル分布である。これらの成分は角度が変化しても一定である。重み係数 $c_s(\theta)$ と $c_D(\theta)$ は幾何学的パラメータによるスケールファクタを意味する。次に、反射モデルを物体表面の分光反射率を用いて記述する。反射光はこのとき分光反射率と入射光の電力スペクトル分布との積で表される。いま $S_s(\lambda)$ と $S_D(\lambda)$ を各成分の分光反射率とし、 $E(\lambda)$ を入射光のスペクトル分布とすれば、反射光は

$$Y(\theta, \lambda) = c_s(\theta)S_s(\lambda)E(\lambda) + c_D(\theta)S_D(\lambda)E(\lambda) \quad (3)$$

と書ける。また等価的に、総合反射率は次式で記述される。

$$S(\theta, \lambda) = c_s(\theta)S_s(\lambda) + c_D(\theta)S_D(\lambda) \quad (4)$$

反射率の鏡面反射成分 $S_s(\lambda)$ は物理的にはフレネルの法則によって決まる¹¹⁾。

実際には、不均質物体の表面層で媒体として使用される物質の多くは油のようなもので、光の屈折率が波長に関して一定であることが報告されている⁹⁾。屈折率が可視域で一定ならば、鏡面成分は波長に依存しなくなる。これらの物体表面では、鏡面反射は照明光と同じ色をもつように見える。多くの物体についてこの性質は近似的に成立するようである。すなわち、標準反射モデルの第2の重要な仮定は分光反射率の鏡面成分が可視域で

$$S_s(\lambda) = \text{constant} \quad (5)$$

と一定値をとることである。

3. 妥当性試験の原理

標準の2色性反射モデルが現実の物体に対して適用できるかどうかを調べる方法を述べる。この手法は物

体からの反射光を観測条件を変えて測定し、それらのスペクトル分布を解析することに基づいている。Leeら⁹⁾の解析法はスペクトル分布曲線相互の線形関係を調べる単純なものであるが、本手法はスペクトル分布曲線の主成分分析と部分空間論に基づいている。

標準反射モデルは2つの重要な仮定、すなわち、1) 2次元線形性、と 2) 一定鏡面反射率の仮定から成り立っている。そこで、任意の物体に対して、これら2点に関する試験を行うことにより、その物体の反射が標準反射モデルで記述できるかどうかを判定する。基本的な手続きを以下にまとめる(詳細は文献 8), 10) 参照)。

1) 反射光 $Y(\theta, \lambda)$ は(2)式のように2つの成分ベクトル $L_s(\lambda)$ と $L_D(\lambda)$ の線形結合として表現できる。これらの2つのベクトル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。ここではこれをカラー信号平面と呼ぶが、図2ではこの平面を平行四辺形として描いている。すべての反射光ベクトルはこの平行四辺形の内部に位置する。カラー信号平面は物体の分光反射率と照明光のスペクトル分布で定まるので、光源の種類(例えば、日光、ハロゲン、蛍光灯等)が異なれば平面は変化することになる。しかし光源が定まれば、同一物体表面からの反射光は上記のような平面に落ちるはずである。したがってまず最初に、物体から観測された反射光が2次元部分空間を形成するかどうかを調べる。

2) いま同一光源の下で、2つの異なった不均質物体の表面を計測したと仮定する。観測の幾何学的条件を変えて反射光スペクトルを計測すれば、第1の仮定より計測データはベクトル空間内で2つの異なったカラー信号平面 P1 と P2 を形成する。ここで、もし一定鏡面反射の仮定が真ならば、反射光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。

$$Y1(\theta, \lambda) = c_{s1}(\theta)E(\lambda) + c_{D1}(\theta)S_{D1}(\lambda)E(\lambda) \quad (6)$$

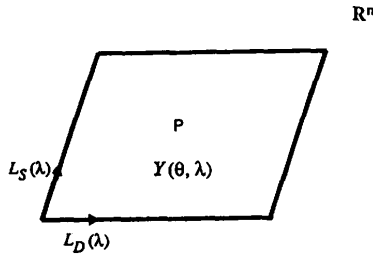


図2 2つの反射成分の線形結合によるカラー信号平面
Fig. 2 Color-signal plane by a linear combination of two reflection components.

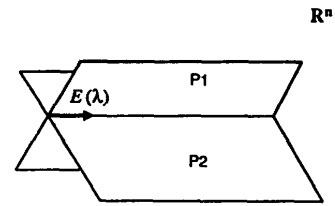


図3 2つのカラー信号平面の交差
Fig. 3 Intersection of two color-signal planes.

$$Y2(\theta, \lambda) = c_{s2}(\theta)E(\lambda) + c_{D2}(\theta)S_{D2}(\lambda)E(\lambda) \quad (7)$$

ここで平面 P1 と P2 は2つのベクトルの集合 $(E(\lambda), S_{Di}(\lambda)E(\lambda)) (i=1, 2)$ で構成される。このとき照明光のベクトル $E(\lambda)$ が両方の平面に含まれている。つまり2つのカラー信号平面は図3のように交差しなければならない。そして交線ベクトルが照明光のベクトルの方向と一致しなければならない。

このように一定鏡面反射の仮定が成立すれば、2つの物体表面から照明光のスペクトル分布を推定することができる。この推定の具体的な計算は、2つのカラー信号平面の交線を見いだすという計算問題に帰着する。さて、求めた照明光 $E(\lambda)$ の推定結果から、逆に測定した物体が一定鏡面反射率の性質をもつことがわかる。すなわち照明光のスペクトル分布の推定精度が良好ならば、使用した2つの物体とも第2の仮定を満足していることになる。

4. 試験結果

多くの物体材料について標準2色性反射モデルの妥当性を調べた。試験に使用した物体のほとんどはわれわれが日常生活でよく見かけるものから選んだ。計測器として、物体からの反射光の電力スペクトル分布を計測するために分光放射輝度計を用いた。計測環境としては、可搬性のあるものは暗室で、それ以外のは自然環境のままに計測した。例えば、室内の椅子、ロッカー、フロアタイル等は天井の蛍光灯の照明下で計測した。本試験法の利点の1つは、厳密な計測システムは必要でなく、自然環境下で調べることができることである。ただし、物体表面が光源からの直接光で照明されていることを確認し、間接光や相互反射による影響をさげなければならない。

照明光源にはタングステン・ハロゲンランプ、日光写真撮影用フラッドランプ、スライドプロジェクタ、および蛍光灯を使用した。各物体に対して、観測条件をいろいろ変えて反射光の電力スペクトル(分光放射輝度)分布を計測した。そして、まず反射スペクトル

の多次元ベクトルが平面として記述できるかどうかを調べた。この解析に特異値分解を利用した。計測したスペクトル分布の集合を成分に展開し、主成分の項数が2つであれば、多次元カラー信号が2次元の部分空間に落ちることになる。

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た。交差判定には、2物体から2つずつ抽出した計4個の主成分ベクトルで結合行列をつくり、この行列のランクを調べることにより判定した。交差するとき、その交線は4つの主成分ベクトルの線形結合で記述される。なお、部分空間の決定や交線の解析には、絶対的な放射輝度の値は必要でない。ここではスペクトル分布が単位電力になるように正規化した値を用いて計算処理を行った。最後に、推定した照明光のスペクトル分布の信頼性を調べるために、推定値を直接測定した結果と比較した。直接測定には標準白色物体のタイルや酸化マグネシウムの固形状粉末を用いた。

以下に、一例として、プラスチックの物体について計測と処理の結果を示す。スライドプロジェクタのランプの照明下で、青と黄の異なるプラスチックのコップからの反射光スペクトルを計測した。両物体の表面状態は一樣になめらかである。われわれは輝度計の視角をわずかなずつ変化させて、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。通常、安定した解析結果を得るために、測定点を各物体10箇所以上選択するようにした。約半数はハイライトとそれに近い領域から選び、これらは鏡面反射成分を十分含んでいる。残りの約半数の位置は鏡面反射をあまり含んでいないマットな部分から選んだ。なお、すべての測定箇所が拡散照明下で同一物体色に見えることをあらかじめ確認した。

図4は青のコップの表面11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。低い波長でピークをもつ曲線は青の色味の強い部分で、ゆるやかな曲線はハイライトに近い部分に対応する。図5は黄のコップの表面12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4、5の2つの曲線の集合おのおのについて主成分を計算したところ、第1と第2主成分をあわせた寄与率はいずれも99.9%以上であった。図6に2つの曲線集合から推定した照明光のスペクトル分布を示す。推定値は黒い四角の付いた曲線で描かれており、直接測定の結果は十字の付いた曲線で示されている。両曲線は区別できないほど、よく一致

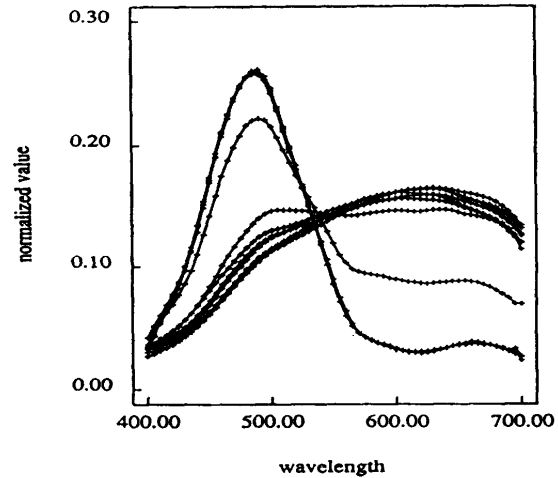


図4 青のプラスチックのコップから測定したスペクトル分布

Fig. 4 Measured spectral distributions of a blue plastic cup.

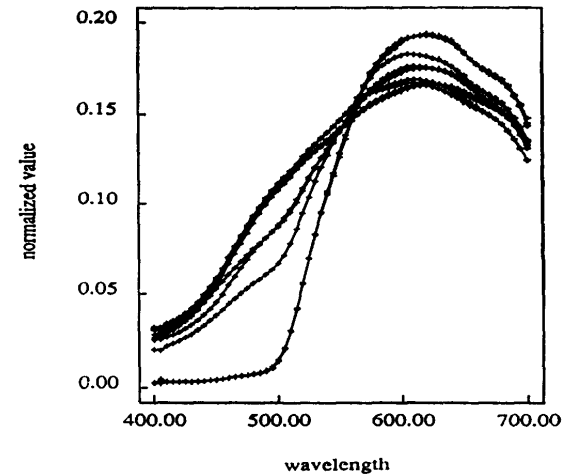


図5 黄のプラスチックのコップから測定したスペクトル分布

Fig. 5 Measured spectral distributions of a yellow plastic cup.

していることがわかる。すなわち、これらプラスチック物体は標準反射モデルで記述できると判定される。

同様な手順で他の物体を試験した。表1は判定結果の一覧表である。各材料に対する具体的な物体として実際に測定した物体名をあげた。これらはすべてハイライト、つや、あるいは光沢の現れる物体である。鏡面現象をまったく示さない物体は拡散成分のみと判定し、試験しなかった。また色模様、テクスチャを含む物体は計測対象から除外している。同様に異なる糸で織られた布も除外した。なお、表面がでこぼこして

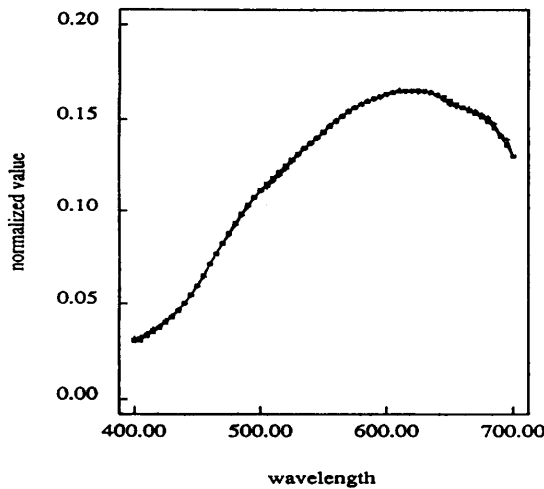


図6 照明光の電力スペクトル分布の推定結果
Fig. 6 Estimation result of the illuminant spectral power distribution.

いる物体、あるいはざらざらして滑らかでない物体を、鏡面反射成分のない物体とみなすことはできない。図1に示したように、鏡面反射とはあくまでも空気と物体の境界面での界面反射成分の意味で、なめらかな表面による反射を意味しているのではない。すなわちカラー反射モデルの検討においては、表面形状や反射光の指向性にとらわれる必要がない。

適用可能性欄の記号○、△、×はほれぞれ可、一部不可、不可を表す。これらの判断は、主成分分析の際の寄与率が99.9%程度以上あり、かつ鏡面成分を含む反射光から照明光のスペクトル分布が推定可能であるという条件に基づいている。△は判断が分かれて、条件を満たさない試験物体が存在したことを表す。この表より、多くの材料について標準2色性反射モデル

表1 各種物体に対する標準反射モデルの適用性

Table 1 Applicability of the standard reflection model for various objects.

材料名	具体的な物体	適用可能性
プラスチック	プラスチック製品	○
ペンキ, 絵具	色票, 塗装物体	○
陶器	皿, タイル	○
ビニール	シート, カバー	○
果物の表皮	リンゴ, レモン	○
植物の葉	レモン, ゆり	○
木	ヒノキの板	○
紙	本, カタログ	△
布	絹, ウール, レーヨン サテン, ポリエステル サテン	△
金属	銅, 金属メッキ, 真鍮	×

が妥当であることがわかる。紙や繊維の布については、たとえ光沢があっても、標準モデルで記述できないものが存在する。なお、最後の金属類については、鏡面反射成分のみによる反射であるから、本標準モデルで記述することはできない。

5. 検 討

ここでは、照明光の影響を取り除いた表面の分光反射率の解析を行う。特に、標準反射モデルで記述が困難な物体について、新たな反射モデルを検討する。

5.1 分光反射率の観測

対象物体の分光反射率は、その反射率の定義から、計測した反射光スペクトル分布と入射光スペクトル分布の比として求まる。

$$S(\theta, \lambda) = Y(\theta, \lambda) / E(\lambda) \quad (8)$$

ただし、実際にこのようにして観測される反射率は拡散反射の成分のみならず、鏡面反射成分も含んだ総合的な反射率であることに注意する必要がある。標準2色性反射モデルを仮定すれば、この総合反射率は(4)式と(5)式より

$$S(\theta, \lambda) = c_D(\lambda) S_D(\lambda) + c_S(\theta) \quad (9)$$

のように記述される。(9)式の右辺第2項は波長に依存しない定数で、(9)式は $S_D(\lambda)$ の一種のアフィン変換式とみなすことができる。すなわち物体表面に固有の拡散反射率のアフィン変換したものが観測される。

図7~図9に3つの代表的な物体から観測した分光反射率の曲線群を示す。これらの物体は表1で○、△、×の各代表である。まず、図7は標準反射モデルで記述できるプラスチックの青いコップの分光反射率 $S(\theta, \lambda)$ である。図4の測定スペクトル分布 $Y(\theta, \lambda)$ と図6の照明光スペクトル分布 $E(\lambda)$ から算出したものの中から、主要なものを実線で描いた。曲線はすべて単位長になるように正規化している。観測の幾何学的条件によって分光反射率は大きく変化することがわかる。特に図中で直線的な太い線は鏡面反射成分が顕著なハイライトを表している。鏡面反射率は期待どおり波長に関して、一定値をとることがわかる。逆に低波長側にピークをもつ曲線は拡散反射成分を表す。ハイライトから鏡面成分が順次減少、相対的に拡散反射成分の比重が増大していく様子がわかる。

次に、図8は緑のレーヨン・サテンの布から観測された分光反射率を示す。計測にはレーザ光と試料を固定した回転台を使用して、正確な角度パラメータを設定した。まず照明光の入射角を45度に固定して、観

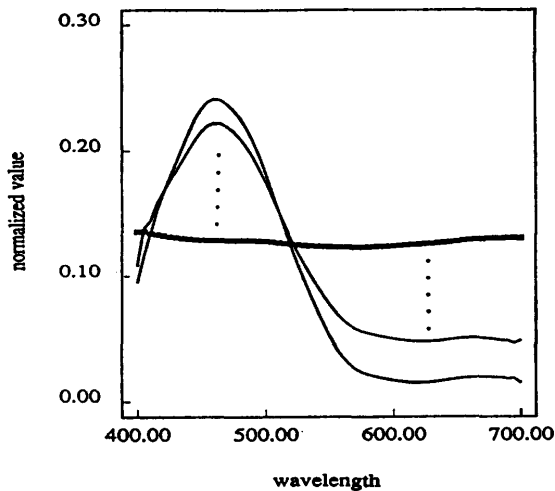


図7 青のコップの分光反射率の正規化曲線
Fig. 7 Normalized curves of the spectral reflectances of the blue cup.

観測角を5度から45度まで変化させた。ただし、観測角5~35度は5度おきに、35~45度は1度おきに細かく計測した。図8では5度と45度の曲線のみを描いているが、45度は鏡面反射が最も強い場合で、対称的に5度は拡散成分が最も顕著になる場合に対応する。観測角45度の正反射のとき、布の表面から強い光沢が観測されたにもかかわらず、その反射率は図のように波長に関して一定値をとらない。すなわち一定鏡面反射率の条件が満足されない。なお入射角を変化させても、正反射の状態はほとんど変わらなかった。

最後に、図9は銅板から観測された分光反射率曲線

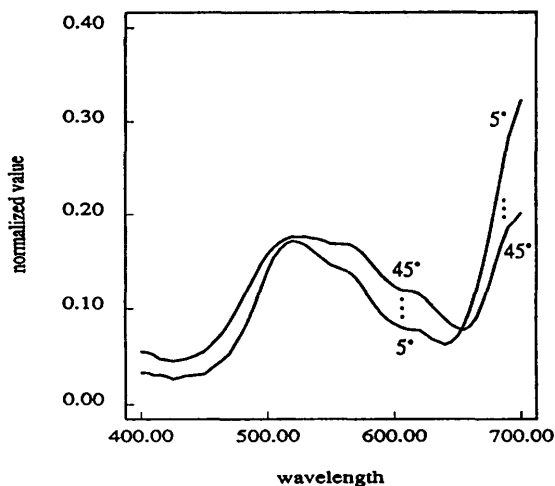


図8 緑のレーヨン・サテン布の分光反射率
Fig. 8 Normalized curves of the spectral reflectances of a rayon satin.

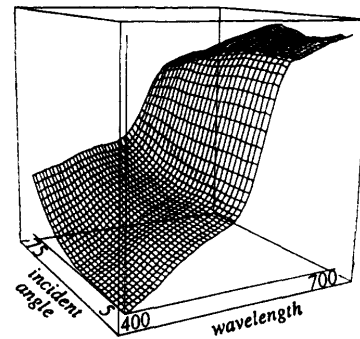


図9 銅板の分光反射率の3次元透視図
Fig. 9 3D perspective view of the spectral reflectances of a copper plate.

を示す。銅板は不均質物体とは全く異なった反射特性をもつ。反射は鏡面反射のみで、表面の汚れがない限り、拡散反射は無視できるくらい小さい。一般に鏡面反射による分光反射率は入射角に依存する。そこでこの特性を市販の銅板を用いて厳密に調べた。図9では入射角を5度から75度まで2.5度おきに变化させている。入射角と観測角を常に一致させて、正反射の場合のみを計測した。そして分光反射率曲線の入射角による変動を透視図で描いた。計測した入射角の範囲では、銅板の分光反射率は波長に関して一定ではない。入射角に関する分光反射率の変動は、60度以内ならば非常に小さい。すなわちほとんど一定の色度をもつ。しかし、入射角が90度、すなわち水平入射に近づくとつれて、分光反射率の姿はなめらかな白色性の分布に近づいてゆく傾向がみられる。

5.2 分光反射率のモデル化

標準2色性反射モデルの妥当性を分光反射率の観測データから調べる場合は、次の手順による。まず、分光反射率データの主成分展開を行い、2つの主成分パターンのみですべての分光反射率曲線が表現できることを調べる。次に、一定反射率の直線(単位ベクトル)が同じ2つの主成分パターンで表現できるかどうか調べる。例えば、2つの主成分パターンをベクトル p_1 , p_2 で、単位ベクトルを u で記すことにすれば、 $u = ap_1 + bp_2$ が表現可能であるかどうかを調べることになる。ただし、 a と b は係数である。具体的には最小2乗法で p_1 と p_2 を u に適合させ、残差が十分小さいことを確認する。これらが可能ならば、分光反射率は(9)式のように2つの成分で書いて、一定反射率の鏡面成分をもつことになる。

さて、図7~図9の異なった反射特性をもつ代表的な物体について、分光反射率を調べた。図7のプラス

チックのコップについては、明らかに2つの条件を満足した。次に図8のレーヨン・サテンについては第2主成分までの寄与率が99.9%以上で条件の1つが満たされていたが、一定反射率の直線の成分は含まれていなかった。したがって2色性の反射ではあるが、鏡面反射成分は無彩色でなくて有彩色になる。さらに図9の銅板についても興味ある結果が得られた。分光反射率は鏡面反射成分のみからなり、しかも入射角に依存する。これらの曲線群を分析したところ、2つの主成分のみで記述できることがわかった。しかも一定直線もこれで正確に表現できることがわかった。銅板は均質物体で光学的な反射の過程は不均質物体とは全く異質である。しかしその反射光は2つの鏡面成分で記述できることになり、しかも1つの成分は一定反射率をもつ成分である。

これらの解析結果を定式化して、反射モデルを分類すれば以下ようになる。

(1) 表1のように自然界の多くの物体の反射は標準の2色性反射モデルで記述できる。すなわち、

$$S(\theta, \lambda) = c_D(\theta)S_D(\lambda) + c_S(\theta) \quad (10)$$

(2) 布や紙の一部(例えば、レーヨン・サテン、ベロア)は標準反射モデルで記述できない。実際、布などは極細い繊維で作られているため、入射光の複雑な散乱や吸収が内部で生じていると考えられる。これらの物体についても次式のような一般的な2色性反射モデルで近似することができる。

$$S(\theta, \lambda) = c_D(\theta)S_D(\lambda) + c_S(\theta)S_S(\lambda) \quad (11)$$

ただし鏡面反射成分 $S_S(\lambda)$ は一定値ではない。

(3) 金属は鏡面反射成分のみをもち、水平入射に近づくと反射光は白色化してくる。この場合、鏡面反射に関する2色性の標準モデルが適用できる。すなわち分光反射率は2つの鏡面反射成分によって

$$S(\theta, \lambda) = c_{S1}(\theta)S_{S1}(\lambda) + c_{S2}(\theta) \quad (12)$$

と近似できる。上式の右辺第1項と第2項はそれぞれ、垂直入射と水平入射に対応する両極端の鏡面反射成分を意味している。第2の鏡面反射成分は定数である。例えば、真鍮などに利用できる。

6. 色空間による解析

カラー反射モデルは波長の関数として表現されるので、モデルの検証にはスペクトル計測器を使用する高次元のベクトル解析が必要であった。高次元ベクトルの空間での反射の性質は低次元の空間でも成立する。3次元色空間であれば、カメラデータの利用も可能

で、しかも物体色の色知覚として取り扱うことができるので、現実的で理解しやすいと思われる。ここでは、反射光のスペクトル分布を色空間に写像して、反射の性質を物体色の色度座標の変化から調べることにする。色空間としては等色性が厳密に保証されるCIE-XYZ表色系を用いる。2色性反射モデルの2次元線形性や一定鏡面反射の性質は、3次元色空間でも保存されることが容易にわかる。前者の2次元線形性は、標準反射モデルで記述される物体表面の色が色空間の中でやはり2次元の平面を張ることを意味する。一定鏡面反射の性質は一方の基底ベクトルが照明光の色度をもつことに対応する。

これまでの解析では、計測した輝度値を正規化して、相対的なスペクトル分布を取り扱った。このため色空間では同様に輝度(明度)が正規化されて、色度座標のみを扱うことになる。反射物体の色度は次のステップで算出される。まず、幾何学的パラメータ θ に依存する三刺激値 $X(\theta)$, $Y(\theta)$, $Z(\theta)$ は等色関数 $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ を用いて

$$X(\theta) = \int Y(\theta, \lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \quad (13)$$

$$Y(\theta) = \int Y(\theta, \lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \quad (14)$$

$$Z(\theta) = \int Y(\theta, \lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \quad (15)$$

として求まる。次に三刺激値の正規化

$$x(\theta) = X(\theta)/(X(\theta) + Y(\theta) + Z(\theta)) \quad (16)$$

$$y(\theta) = Y(\theta)/(X(\theta) + Y(\theta) + Z(\theta)) \quad (17)$$

より2次元色度座標 $(x(\theta), y(\theta))$ が決まる。

さて2色性反射モデルの(2)式あるいは(3)式から、反射物体の色度座標は次式で記述される。

$$(x(\theta), y(\theta)) = c_S(\theta)(x_S, y_S) + c_D(\theta)(x_D, y_D) \quad (18)$$

ここで (x_S, y_S) は鏡面反射成分の色度座標で (x_D, y_D) は拡散反射成分の色度座標である。重み係数 $c_S(\theta)$ と $c_D(\theta)$ は物理的には1を越えない正数である。したがって観測される物体色の色度座標は、 xy 色度図上で、鏡面反射成分の色度点と拡散反射成分の色度点を結ぶ直線上に位置することになる。ここで物体が標準の2色性反射モデルで記述されるならば、座標 (x_S, y_S) は照明光(光源)の色度座標に一致する。

色知覚の観点からいえば、物体色の色の見えが、観測の条件によって、光源色から物体そのものの色まで順次変化することを意味している。次に具体的な応用例を示す。図10に3種類の物体について色度の軌跡

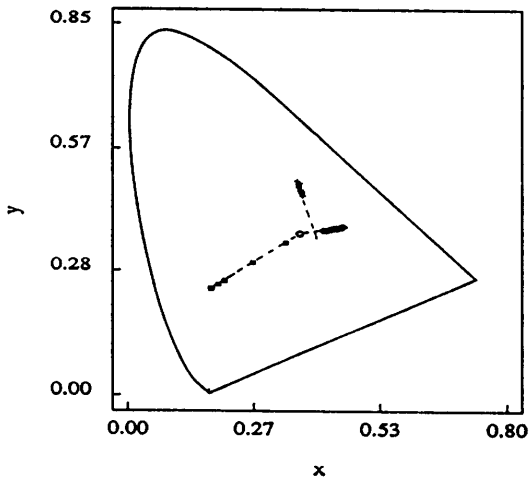


図 10 3種類の物体に対する xy 色度図上での色度軌跡

Fig. 10 Chromaticity loci of three objects on the xy chromaticity diagram.

を描いている。これらの軌跡は光源として昼光用フラッドランプを用いて、種々の角度から観測したときの色度の変化を示している。いずれも、実際の物体から得られた分光反射率に基づいた三刺激値計算による。まず黒い四角の軌跡は図7に示した青のプラスチックのコップの色度変化である。また十字と黒い菱形の軌跡は、それぞれ、図8の緑のレーヨン・サテンの布と図9の銅板の色度変化を示す。中央部の丸印は光源フラッドランプの色度座標を表す。3つの物体は2色性反射であるので、色度の軌跡は直線的である。特に標準反射モデルで記述できるプラスチックの色度は光源の色度を通る直線上に存在することがわかる。同様に銅板の軌跡も光源を通る。このとき光源とは反対側の端点で、その物体のもつ純粋な色度を表す。しかし、布の色度軌跡は直線的であるが、その延長線上に光源は存在しない。すなわち、2色性であるが、標準でないことが直ちに知れる。なお光源を変えても、上述と同様な特徴をもった色度の軌跡が得られる。

このように反射物体の色度変化を調べることによって、その物体の反射特性を容易に推測することができる。まず色度図上で軌跡が直線的でないものは2色性反射モデルで記述できない。逆に軌跡が直線的であれば、使用した光源のもとで2色性反射であるといえる。なお低次元での解析であるので、不均質物体と金属の色度が同様な直線的軌跡となる可能性がある。しかし両者は計測の仕方が異なり、特に後者は入射角に依存して色度点に変化する特徴をもつ。

一般に色度図上で満たした条件が、高次元のレベルで条件を満足しているとは必ずしも断定できない。この場合は、種類の異なった光源を用いて、それらの軌跡を検証することにより、波長レベルでの反射モデルの妥当性を推測することができる。このような観点から、色度図を用いた解析は、計測が簡便でしかも有用といえる。

7. おわりに

各種物体に対して、反射光スペクトルと分光反射率の解析に基づいて、適切で簡便なカラー反射モデルの提案を行った。まず標準の2色性反射モデルについて説明し、この反射モデルが現実の物体に対して妥当かどうかを調べる方法を述べた。標準反射モデルは鏡面と拡散の2つの反射成分からなり、このうち鏡面の反射率は波長に関して一定であると仮定している。これの試験法は反射光のスペクトル分布が2つの成分で表現できること、および2つの物体から照明光のスペクトル分布が推定可能であることに基づいている。日常生活で普段見かけられる物体について試験したところ、多くの物体は標準反射モデルで記述できることがわかった。

しかし布や紙の中には、標準モデルで記述が十分でないものが存在した。これらについては鏡面反射を有彩色とする一般化した2色性反射モデルで近似できることがわかった。さらに銅板等の金属については鏡面反射成分のみからなるが、鏡面反射を対象とする標準の2色性鏡面反射モデルを定義することができた。現実の物体はだいたい3種類の2色性反射モデルで表現できると結論できる。

物体の反射の性質を、色度図上で物体色の軌跡として解析することは簡便である。特にスペクトル計測器がなくても、高精度のカラー画像入力装置で観測データが得られるため、適用範囲は広いと思われる。

参考文献

- 1) Cook, R. L. and Torrance, K. E.: A Reflectance Model for Computer Graphics, *Comput. Gr.*, Vol. 15, pp. 307-316 (1981).
- 2) Klinker, G. J., Shafer, S. A. and Kanade, T.: The Measurement of Highlights in Color Images, *Int. J. Comput. Vision*, Vol. 2, pp. 7-32 (1988).
- 3) Klinker, G. J., Shafer, S. A. and Kanade, T.: Image Segmentation and Reflectance Analysis through Color, *SPIE*, Vol. 937 Application

- of Artificial Intelligence VI, pp. 229-244 (1988).
- 4) Healey, G.: Using Color for Geometry-insensitive Segmentation, *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol. 6, pp. 920-937 (1989).
 - 5) Bajcsy, R., Lee, S. W. and Leonardis, A.: Color Image Segmentation with Detection of Highlights and Inter-reflections, *SPIE/SPSS Symposium*, pp. 245-255, Santa Clara (1990).
 - 6) Ikeuchi, K. and Sato, K.: Determining Reflectance Parameters Using Range and Brightness Images, *Int. Conf. Comput. Vision*, pp. 12-20, Osaka (1990).
 - 7) Shafer, S. A.: Using Color to Separate Reflection Components, *Color Res. Appl.*, Vol. 10, pp. 210-218 (1985).
 - 8) 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).
 - 9) Lee, H. C., Breneman, E. J. and Schulte, C.: Modeling Light Reflection for Computer Color Vision, *IEEE Trans. on PAMI*, Vol. 12, pp. 402-409 (1990).
 - 10) 富永昌治: 物体のカラー反射モデルの検討, 情報処理学会コンピュータビジョン研究会報告, CV 59-5, pp. 1-8 (1989).
 - 11) Born, M. and Wolf, E.: *Principles of Optics*, Pergamon Press, Oxford (1983).

(平成3年4月24日受付)

(平成3年11月5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。



大橋伸一郎 (学生会員)

昭和 42 年生。平成 2 年大阪電気通信大学工学部精密工学科卒業。同年同大学院工学研究科情報工学専攻に入学、現在に至る。物体のカラー反射モデルおよび、カラー画像解析の研究に従事。