

物体の分光反射率と反射モデル

富永昌治

大阪電気通信大学工学部

内容概説 物体表面からの反射光のスペクトル解析に基づいて、物体のカラー反射モデルを提案し、種々の物体について妥当性を調べた。物体材料としては、不均質物体のみならず金属のような均質物体も解析の対象とした。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反射率は波長に関して一定と仮定している。実際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。実験結果より多数の物体が標準反射モデルで記述できることがわかった。しかし、布、紙、金属については適用が困難な場合が存在した。このような物体について分光反射率を詳細に分析し、新しいモデル化を行なう。

Spectral Reflectance and Reflection Model for Object Surfaces

Shoji TOMINAGA

Faculty of Engineering, Osaka Electro-Communication University

Neyagawa, Osaka 572, Japan

Abstract A color reflection model for object surfaces is proposed based on the spectral analysis of the reflected light, and the validity of the model is examined on various objects. As the materials, we use not only inhomogeneous substances but also homogeneous ones like metals. First, the standard Dichromatic Reflection Model is described. The model assumes that the reflected light is composed of two components of specular and diffuse reflections, and then the specular reflectance is constant over the visible wavelength. We give a method for testing the validity of the reflection model on real objects. The experiments show that many kinds of object can be described by the model, but difficulty occurs to cloths, papers, and metals. The surface-spectral reflectances of these objects are analyzed in detail.

1. はじめに

物体の表面分光反射率は、物体表面に固有の光学的性質を定める。分光反射率は、通常物体に入射した光と反射した光の強度の比を、波長ごとに求めたものとして定義される。この反射率が物体色の知覚の物理的基礎になるとともに、その特性が照明や観測の条件とともに変わることから、物体のカラー反射モデルが構築される。

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 (standard reflectance model) ⁸⁾ やNIRモデル (neutral-interface-reflection model) 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から構成されるものを想定して提案された単純なモデルである。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) 反射などと呼んだりする。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。筆者らはこれまでに標準2色性反射モデルの妥当性を調べるための計測と解析の方法を提案した^{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、現実には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、金属は均質物体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。

本論文では、現実の各種物体について、その反射光と分光反射率の解析に基づいてカラー反射モデルの提案と分類を行う。このために、まず対象物体が2色性の標準反射モデルで記述できるかどうかの試験法を述べる。そして日常生活で見かけられる物体について実験を行ない、妥当性を分類する。次に記述できない物体については、分光反射率を分析して別のモデル化を試みる。

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が

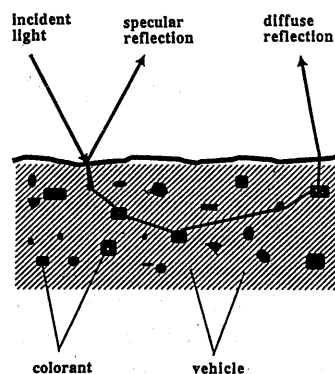


図1 不均質物体に対する光の反射過程

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、物体表面を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わす。

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わされる。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持つように見える。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。したがって、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、筆者らはスペクトル分布曲線の集合の主成分分析及び数学的な部分空間論に基づいた解析法を提案している⁹⁾。

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、任意の物体からの実測データに対して、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しているかどうかを判定することが出来る。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) (2)式のように反射光 $Y(\theta, \lambda)$ は反射の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。我々はこれをカラー信号平面と呼ぶ。全ての反射光ベクトルはこの平面の内部に位置する。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、昼光、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、同一不均質物体からの全ての反射光は上記のような部分空間に落ちるはずである。このように最初に吟味することは、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ことである。

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。

$$Y_1(\theta, \lambda) = c_{s1}(\theta)E(\lambda) + c_{D1}(\theta)S_{D1}(\lambda)E(\lambda) \quad (6)$$

$$Y_2(\theta, \lambda) = c_{s2}(\theta)E(\lambda) + c_{D2}(\theta)S_{D2}(\lambda)E(\lambda) \quad (7)$$

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交差しなければならない。そして交線のベクトルが照明光のベクトルの方向になければならない。

このように一定鏡面反射の仮定が成立すれば、我々は2つの物体表面から照明光のスペクトル分布を推定できるという結論を得る。この推定問題は、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させることができる。したがって、照明光の推定の信頼性が両物体の一定鏡面反射率の仮定を試験するために利用できる。すなわち照明光のスペクトル分布に関して良好な推定値が得られたならば、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. 試馬糸吉果

多種類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我々が日常生活でよく見かけるものから選んだ。計測器とし、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、可搬性のものは暗室で、それ以外のは自然環境のままに計測を行った。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。本試験法の利点の一つは、厳密な実験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、このときは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。

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。昼光写真撮影用のフラッドランプの照明下で、赤のプラスチックのコップと緑のプラスチックの灰皿の反射光スペクトルを計測した。両物体の表面は一樣な状態になめらかである。我々は輝度計の視角をわずかずつ変化させて、表面の多数の個所から反射する分光放射輝度を計測した。

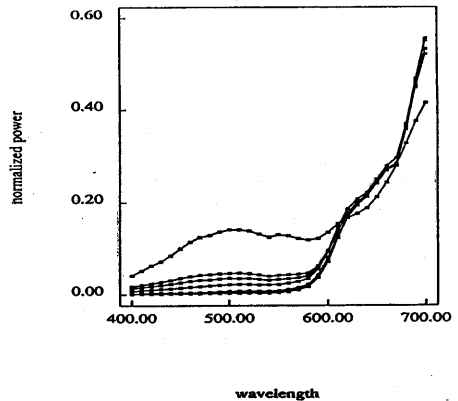


図2 赤のコップからの測定スペクトル分布

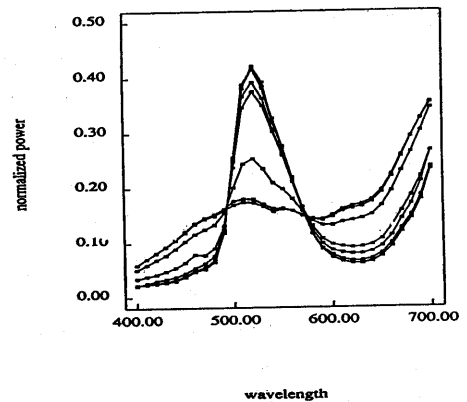


図3 緑の灰皿からの測定スペクトル分布

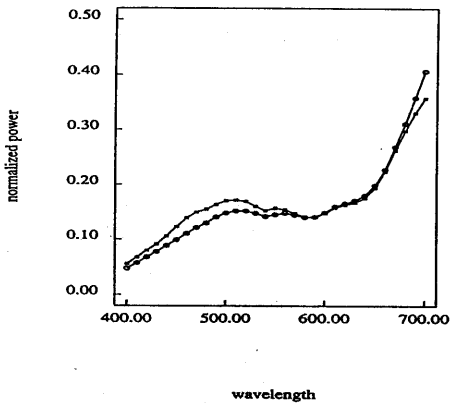


図4 照明光スペクトル分布の推定結果

図2は赤のコップの表面8個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分布に対応する。図3は緑の灰皿の表面8個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。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%であった。図4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、直接測定の結果は白い丸の付いた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、よく一致していることがよくわかる。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。このような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。なお、表面がでこぼこしている物体、あるいはざらざらして滑らかでない物体を、鏡面反射成分をもたない拡散成分のみからなる物体と見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、表面形状や反射光の指向性にとられる必要がない。

適用可能性欄の記号○、△、×はそれぞれ可、一部不可、不可を表わす。これより、多くの材料について2色性標準反射モデル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、標準反射モデルで記述できないものが存在した。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出来ない。

表1 各種物体に対する標準反射モデルの適用性

材料名	具体的な物体	適用可能性
プラスチック	コップ、灰皿等のプラスチック製品	○
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	○
果実の表皮	リンゴ、レモン	○
植物の葉	レモン、ゆり	○
木	ヒノキ	○
紙	本、カタログ	△
布	絹、ウール、レーシヨン・サテン、ポリエチレン・サテン	△
金属	銅、金属メッキ	×

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なう。そして標準反射モデルで記述が困難な物体について、簡便な反射モデルの再構築を試みる。

5.1 分光反射率の観測

物体の分光反射率は、原理的に、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。

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

しかし、この観測でき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。2色性標準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

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

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5-図7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5は標準反射モデルで記述できるプラスチックの灰皿の分光反射率 $S(\theta, \lambda)$ である。曲線はすべて単位長になるように正規化されており、図3の測定スペクトル分布 $Y(\theta, \lambda)$ と図4の照明光スペクトル分布 $E(\lambda)$ から算出されたものである。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。特に図中の直線は鏡面反射成分が最も顕著なハイライトを表わしている。鏡面反射率は期待どおり一定値をとることがわかる。逆に高周波の曲線は拡散反射成分を表わす。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6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。計測にはレーザー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6で45度の曲線が鏡面反射が最も強い場合で、対称的に5度の曲線が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。したがって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。

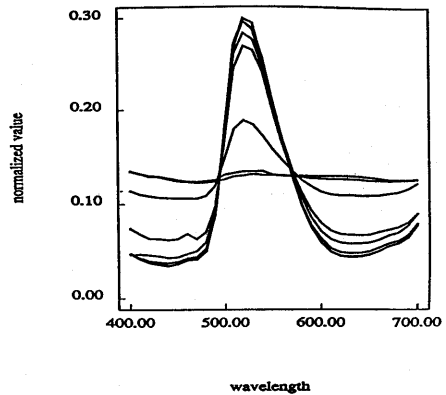


図5 緑の灰皿の分光反射率曲線

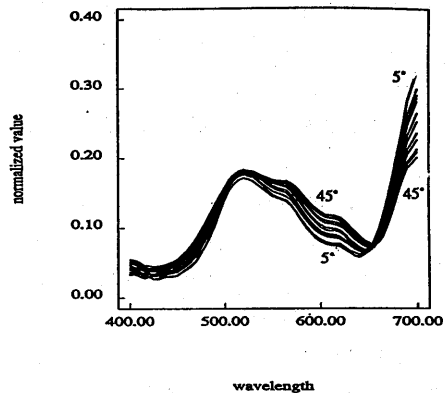


図6 緑の布の分光反射率曲線

最後に、図7は銅板から観測された分光反射率曲線を示す。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7では入射角を5度から75度まで5度おきに変化させている。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予測できた。

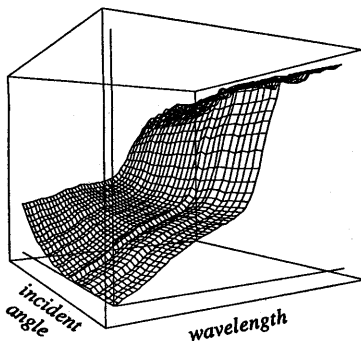


図7 銅板の分光反射率曲線

5.2 反射モデルの分類

分光反射率の観測データに基づいて2色性標準反射モデルの妥当性を調べる場合は、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。これらが可能ならば、分光反射率は2

色性で(9)式のように一定反射率の鏡面成分を持つことになる。

さて、図5-図7の代表的な物体からの分光反射率について調べたところ、図5のプラスチックの灰皿については、明らかに2つの条件を満足した。しかし図6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%以上で条件の一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、鏡面反射成分も有彩色であることになる。さらに図7の銅板については興味ある結果が得られた。分光反射率は鏡面反射のみからなり、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つの主成分のみが記述できることがわかった。しかも単位ベクトルの直線もこれら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全く異質で、不均質物体と比べて複雑といえる。しかしそのカラー反射特性に限定すれば、やはり2色性の反射特性をもっているといえる。

以上の解析結果を定式化して、反射モデルを分類する。

(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。

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

(2) 布や紙の一部（例えば、レーヨン・サテン、ペロア）について標準反射モデルでは記述できない。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。しかし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 $S_S(\lambda)$ は一定値をとるとは限らない。

(3) 銅などの金属は鏡面反射成分のみをもち、水平入射に近づくとつれて反射光は白色化してくる。このような反射は鏡面反射に関して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

$$S(\theta, \lambda) = c_{11}(\theta)S_{S1}(\lambda) + c_{12}(\theta) \quad (12)$$

で表現できる。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。

6. おわりに

各種物体について、その反射光と分光反射率のスペクトル解析に基づいて、カラー反射モデルの提案と分類を行った。

物体の材料としては、プラスチックのような不均質物体のみならず金属のような均質物体も対象とした。まず標準の2色性反射モデルについて説明し、この反射モデルが具体的な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、そのうち鏡面の反射率は波長に関して一定である。この試験法の原理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、反射光のスペクトル計測を行ない、妥当性の試験を実施した。この実験結果で大多数の物体は標準反射モデルで記述できることがわかった。次に、繊維の布や紙の中には、標準モデルで記述が十分でないものが存在し、これらについては一般的な2色性反射モデルで近似できることがわかった。さらに銅板については鏡面反射のみであるが、やはり標準の2色性反射モデルで記述できることがわかった。以上をまとめると、現実には存在する物体はほとんど2色性反射モデルで記述できると結論できる。

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) G.J. Klinker, S.A. Shafer, and T. Kanada, "Image segmentation and reflectance analysis through color," SPIE, vol.937 Application of Artificial Intelligence VI, pp.229-244, 1988.
- 4) G. Healey, "Using color for geometry-insensitive segmentation," J. Opt. Soc. Am. A, vol.6, pp.920-937, 1989.
- 5) R. Bajcsy, S. W. Lee and A. Leonardis, "Color image sagmentation with detection of highlights and inter-reflections," SPIE/SPSS Symposium, Santa Clara, 1990.
- 6) K. Ikeuchi, K. Sato, "Determining reflectance parameters using range and brightness images," Int. Conf. Computer Vision, Osaka, 1990.
- 7) S. A. Shafer, "Using color to separate reflection components," Color Res. Appl., vol.10, no.4, pp.210-218, 1985.
- 8) S. Tominaga and B. A. Wandell, "The standard surface reflectance model and illuminant estimation," J. Opt. Soc. Am. A, vol.6, no.4, pp.576-584, 1989.
- 9) H. C. Lee, E. J. Breneman, and C. Schulte, "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) M. Born and E. Wolf, Principles of Optics, Pergamon Press, Oxford, 1983.