

# コンピュータビジョンと分光反射率推定

富永昌治

最近コンピュータビジョン研究では、人間の色知覚を考慮して、これの一部を機械で実現するためのアルゴリズムやシステムの研究が盛んになってきた。この流れに沿った代表的な研究が、カラーコンスタンシー（色恒常性）の実現の研究である。人間の色知覚の重要な性質として、照明光源が変動しても色の見えは大きく変わらないという色恒常性がある。例えば、木々の葉は、昼光の青空のもとでも、夕方の赤い空のもとでも緑に見える。しかし視覚系に到達する色信号のスペクトル組成は大きく変化しているはずである。一般のカメラ出力からは、青味の物体色と赤味の物体色というように、明らかに異なった判定がなされる。屋外シーンでの物体認識にはカラーコンスタンシーの性質を無視することができない。

カラーコンスタンシーの実現問題は、しばしば、シーンにおける物体表面の分光反射率を推定する問題として取り扱われる<sup>1-7)</sup>。これは分光反射率が物体表面に固有の物理情報で、分光反射率がわかれば、正確な物体色を作り出すことができるからである。反射率の推定は容易でない。なぜなら分光関数は多次元であるのに、カメラ出力は3次元情報にすぎないからである。そこでこのような推定問題を解決するための方策として、

- (1) 物体表面からのカラー反射モデルを利用する。
  - (2) 光源と表面反射率の分光関数について制約を設ける。
  - (3) 専用のカメラシステムを構築する。
- があげられる。

本稿では、このような方策に基づいて筆者らが開発してきたアルゴリズムとシステムを中心に、分光反射率推定の手法を解説する。まず物体の反射モデルと分光関数の線形モデルを述べる。次に、推定問題を定式化し、光源と反射率の推定アルゴリズムを示す。さらに実験例として、具体的な計測系と推定結果を示す。

## 1. カラー反射モデル

### 1.1 2色性反射モデル

コンピュータビジョンのカラー解析に最も広く実用されているモデルは、Shafer<sup>8)</sup>が提案した2色性反射モデル(dichromatic reflection model)と呼ばれるモデルである。このモデルでは、物体の表面層を図1のような不均質物質と想定し、物体からの反射光を鏡面と拡散の2つの反射成分の組み合わせで記述する。

つまり2色性反射モデルでは反射光の放射輝度  $Y$  は

$$Y(\theta, \lambda) = Y_S(\theta, \lambda) + Y_D(\theta, \lambda) \\ = c_S(\theta)L_S(\lambda) + c_D(\theta)L_D(\lambda) \quad (1)$$

と書ける。ここで  $\lambda$  は波長で、 $\theta$  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。添字の  $S$  と  $D$  は鏡面と拡散成分を表す。 $\lambda$  と  $\theta$  が分離可能であることに注意する。 $L_S(\lambda)$  と  $L_D(\lambda)$  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。 $c_S(\theta)$  と  $c_D(\theta)$  はスケールファクターを意味する。

また反射モデルを分光反射率を用いて記述すれば、

$$Y(\theta, \lambda) = c_S(\theta)S_S(\lambda)E(\lambda) + c_D(\theta)S_D(\lambda)E(\lambda) \quad (2)$$

で表される。 $S_S(\lambda)$  と  $S_D(\lambda)$  は各成分に対する表面の分光反射率で、 $E(\lambda)$  は入射光の分光分布である。2色性反射モデルの重要な仮定は、 $S_S(\lambda)$  が可視域で  $\lambda$  によら

大阪電気通信大学情報工学部情報工学科 (〒567 寝屋川市初町 18-8)  
E-mail: shoji@tmlab.osakac.ac.jp

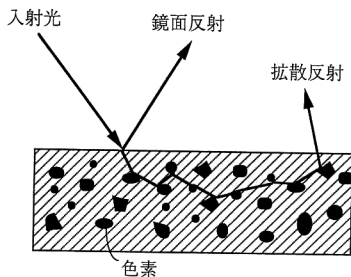


図1 2色性反射モデルの概念図。

ず一定値をとる，つまり鏡面反射は照明光と同じ分光組成をもつと仮定する．このとき反射光は次式のような形式で表現できる．

$$Y(\theta, \lambda) = c_s(\theta)E(\lambda) + c_b(\theta)S_b(\lambda)E(\lambda) \quad (3)$$

このような2色性反射モデルの妥当性は文献9)~12)において詳細に調べられている．これらの研究によればプラスチックやペンキをはじめ自然界の多くの物体について2色性反射モデルが妥当であるといえる．

## 1.2 相互反射のモデル

複数の物体が接近して存在するとき，それらの表面間で相互反射現象が起こる．このとき表面は光源からの直接光のみならず，近くに存在する他の物体表面から反射してきた光で照明されている．鏡面反射成分の強い不均質物体間や類似した物体色間では，相互反射の影響を無視できないことがある．

図2は2色性反射モデルで記述できるような2物体間の相互反射を想定している．表面Bからの反射光が表面Aを照明している．この照明光による2次的な反射成分が，A自身の1次反射と重畳して観測される．相互反射が2物体間でただ1回の光の跳ね返りに基づくとするとき，表面Aの場所  $x$  からの反射光は

$$Y^A(x, \lambda) = w_b^A(x)S^A(\lambda)E(\lambda) + w_s^A(x)E(\lambda) + Y^{AB}(x, \lambda) \quad (4)$$

と記述できる<sup>13,14)</sup>．ここで  $x$  は場所を表すパラメーターで，式(1)の  $\theta$  に対応する．式(4)右辺の最初の2項は直接照明による2色性反射成分を表す． $S^A(\lambda)$  は表面Aの分光反射率である． $w_b^A(x)$  と  $w_s^A(x)$  は2つの反射成分に対する重み係数である．第3項  $Y^{AB}(x, \lambda)$  は表面Bからの照明による相互反射成分を表す．この相互反射項は2色性反射の積によって，図2のように拡散-鏡面，鏡面-拡散，拡散-拡散，鏡面-鏡面の4項の和からなる．

スペクトル成分ごとに整理すれば，反射光は次式のように4つのスペクトル組成にまとめることができる．

$$Y^A(x, \lambda) = w_{bb}^A(x)S^A(\lambda)E(\lambda) + w_{ss}^A(x)S^B(\lambda)E(\lambda)$$

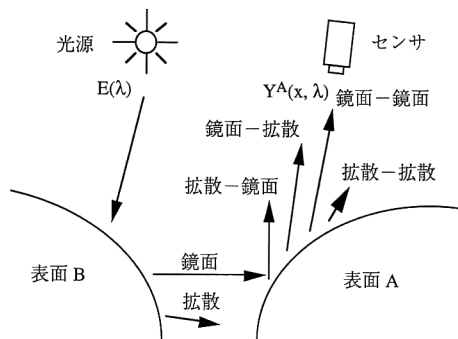


図2 接近した物体間での相互反射。

$$+ w_{ss}^A(x)E(\lambda) + w_{bb}^B(x)S^B(\lambda)E(\lambda) \quad (5)$$

ここで下付きの添え字は反射の過程を示す．例えば，D2は直接照明と2次照明による拡散反射成分の和で，DDは両表面で拡散反射を起こす過程である．

このように表面Aから観測される色ベクトルは，AとBの物体色，光源色，および物体AB間の拡散相互反射色の合計4つの色ベクトルの線形結合として記述される．なおこのような相互反射モデルを利用したカラー画像解析は文献14)~17)で示されている．

以下本論では相互反射がない場合について説明していく．

## 2. 分光関数の線形モデル

照明光の分光分布  $E(\lambda)$  や物体表面の反射率  $S(\lambda)$  といった分光データを効率よく表現するために，分光関数を有限個の基底関数を用いて展開することが行われる．つまり  $E(\lambda)$  や  $S(\lambda)$  を少数の基底関数の線形結合として表現することにより，複雑な関数の次元を減少させるのである．このような表現を有限次元線形モデル (finite-dimensional linear model) と呼ぶ<sup>18)</sup>．

いま照明光の分光分布を  $m$  個の基底関数を用いて

$$E(\lambda) = \sum_{i=1}^m \varepsilon_i E_i(\lambda) \quad (6)$$

のように表現する．ここで  $\{E_i(\lambda), i=1, 2, \dots, m\}$  は照明光に対して統計的に決定される基底関数の集合で， $\{\varepsilon_i\}$  はそれらに対する重み係数の集合である．数  $m$  はモデルの複雑さ，すなわち次元を意味する．また，物体の分光反射率関数は  $n$  個の基底関数で

$$S(\lambda) = \sum_{j=1}^n \sigma_j S_j(\lambda) \quad (7)$$

と表現する． $\{S_j(\lambda), j=1, 2, \dots, n\}$  は反射率に対する基底関数の集合で， $\{\sigma_j\}$  は重みの集合である．

現実に得られる分光データがどの程度の線形モデルで記述できるかを知ることは、分光分布や分光反射率を推定する上できわめて重大である。実際 Judd らは典型的な昼光の分光分布が少数の基底関数で記述できることを示した<sup>19)</sup>。また物体の分光反射率についてはマンセル色票をはじめ各種物体の線形モデルが検討されている<sup>20-22)</sup>。

### 3. 分光関数の推定

カメラデータからシーンにおける物体表面の分光反射率および光源の分光分布を推定するための手法を述べる。これらの推定アルゴリズムでは上述の有限次元線形モデルが利用されている。

#### 3.1 問題の定式化

物体表面の反射が拡散反射成分のみからなる場合について、Maloney らはひとつの解法を提案した<sup>1)</sup>。ここでは分光反射率、光源分光分布、センサー出力の3つのパラメータ空間を想定している。そしてパラメータ空間の間の写像に注目し、未知パラメータの推定を部分空間の決定問題に帰着させた。しかしそのアルゴリズムは不安定になることがあることが指摘されている。

ここでは2色性反射モデルに基づいた手法を紹介する。鏡面反射やハイライトを積極的に利用して、光源および分光反射率の推定を容易にしようとする。いま物体  $o$  の表面上の場所  $x$  からのカメラに入射する反射光(色信号と呼ぶ)を  $Y^o(x, \lambda)$  と記す。2色性反射モデルの式(3)から色信号は

$$Y^o(x, \lambda) = \alpha(x)S^o(\lambda)E(\lambda) + \beta(x)E(\lambda) \quad (8)$$

の形式で表現できる。 $S^o(\lambda)$  は物体  $o$  の分光反射率、係数  $\alpha(x)$  と  $\beta(x)$  は反射成分の重み係数である。

またイメージセンサーの数を  $p$  個と仮定し、物体  $o$  からのセンサー出力を  $\rho_k^o(x)$  ( $k=1, 2, \dots, p$ ) と記す。センサー出力値は次式で表現される。

$$\rho_k^o(x) = \int Y^o(x, \lambda) R_k(\lambda) d\lambda \quad (k=1, 2, \dots, p) \quad (9)$$

ここで  $R_k(\lambda)$  は  $k$  番目のセンサーの分光感度関数を表す。

さて行列表現を用いてセンサー出力とシーンのパラメータを関係づける。まず照明光の各基底に対するセンサーの応答を表す  $p$  次元ベクトルを  $\mathbf{h}_i$  ( $i=1, 2, \dots, m$ ) とおき、これらを  $p \times m$  行列  $\mathbf{H}$  にまとめる。

$$\mathbf{H} = [\mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2, \dots, \mathbf{h}_m] \quad (10)$$

ただし  $\mathbf{H}$  の  $(i, j)$  要素は次式で示される。

$$\int E_j(\lambda) R_i(\lambda) d\lambda \quad (11)$$

次に色基底に対するセンサーの応答を表す  $p \times n$  行列  $\bar{\mathbf{L}}_e$  を定める。ただし  $\bar{\mathbf{L}}_e$  の  $(i, j)$  要素は

$$\sum_{i=1}^m \epsilon_i \int E_i(\lambda) S_j(\lambda) R_i(\lambda) d\lambda \quad (12)$$

と定義する。 $E(\lambda)$  と  $S^o(\lambda)$  に対する線形モデルを式(9)に代入すれば、センサー出力とシーンのパラメータの間の関係はベクトル方程式

$$\bar{\rho}^o(x) = \alpha(x) \bar{\mathbf{L}}_e \bar{\sigma}^o + \beta(x) \mathbf{H} \bar{\epsilon} \quad (13)$$

で表現できることがわかる。ここで  $\bar{\rho}^o(x)$  は出力値  $\rho_k^o(x)$  ( $k=1, 2, \dots, p$ ) を要素とする縦ベクトルである。

ベクトル  $\bar{\sigma}^o$  と  $\bar{\epsilon}$  は、それぞれ、表面反射と照明光に対する重みベクトルを表し、次元  $n$  と  $m$  をもつ。つまりセンサー出力  $\bar{\rho}^o(x)$  から光源ベクトル  $\bar{\epsilon}$  と反射率ベクトル  $\bar{\sigma}^o$  を推定することが問題となる。

#### 3.2 推定法

2種類のシーンパラメータ  $\bar{\epsilon}$  と  $\bar{\sigma}^o$  を同時に求めることは複雑であるが、2段階でこの推定問題を解くことが可能であることを示す。最初に、光源ベクトルは複数の物体表面の観測値に共通の色成分として推定する。次に、推定した光源ベクトルを用いて、各物体に分割した画像データから反射率ベクトルを推定する。

##### 3.2.1 照明光の推定

2色性反射に対する式(13)の有限次元モデルから、センサー出力  $\bar{\rho}^o(x)$  は2つのベクトル  $\bar{\mathbf{L}}_e \bar{\sigma}^o$  と  $\mathbf{H} \bar{\epsilon}$  の線形結合として表される。これらの2つのベクトルはセンサー出力における拡散反射と鏡面反射の2成分を表す。したがって、2つのベクトルは  $p$  次元ベクトル空間で2次元の部分空間(平面)を張り、同一表面から観測されるすべてのセンサー出力はこの部分空間に落ちる。これを画像信号平面と呼び、 $Q^{(o)}$  と記す。 $o$  は物体(番号)を表す。

いま同一光源のもとで  $M$  個の物体を観測したとする。このときベクトル  $\mathbf{H} \bar{\epsilon}$  は  $Q^{(1)}$ ,  $Q^{(2)}$ ,  $\dots$ ,  $Q^{(M)}$  のすべての平面に含まれているので、図3のように  $M$  個の画像信号平面は交差する。この交線の方向がベクトル  $\mathbf{H} \bar{\epsilon}$  の方向に一致する。それゆえ、もし交線  $\mathbf{H} \bar{\epsilon}$  が見いだされると、光源ベクトルは擬似逆行列を適用することにより推定することができる。

平面の交線を求める方法について、2つの不均質誘電体から観測される2平面の交線の算出法は文献9)で与えられている。この算法はプラスチックのような強い鏡面反射を有する滑らかな表面に有効である。また3つ以上の物体表面を想定した一般的な場合について、アルゴリズムが文献5)で示されている。いま  $M$  個のベクトル

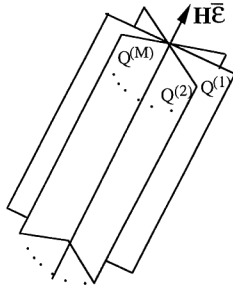


図3 画像信号平面の交差.

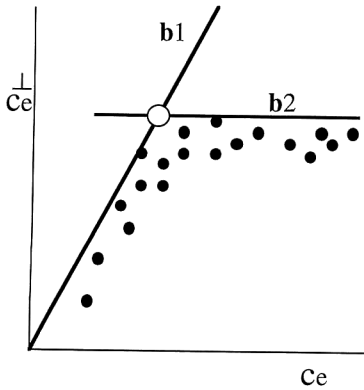


図4 画像信号平面上での2色性係数の分布.

対  $[u_1^{(1)}, u_2^{(1)}], [u_1^{(2)}, u_2^{(2)}], \dots, [u_1^{(M)}, u_2^{(M)}]$  を各画像信号平面  $Q^{(1)}, Q^{(2)}, \dots, Q^{(M)}$  の直交基底とする。これらの基底ベクトルは、各物体からのセンサー出力データを特異値分解したときの特異ベクトルとして求めることができる。交線は各平面の基底ベクトルの線形結合として記述できる。交線ベクトル  $i$  は

$$i = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (c_1^{(i)} u_1^{(i)} + c_2^{(i)} u_2^{(i)}) \quad (14)$$

のような形式で推定できる。ここで係数  $c_1^{(i)}, c_2^{(i)}$  は拘束条件を満たす連立方程式の解である。

### 3.2.2 反射率の推定

もし観測した表面が、鏡面反射を含まず、拡散反射成分のみからなるならば、反射率の推定値はかなり直接的に求まる。まず、推定した照明光パラメータ  $\hat{\epsilon}$  を式(12)に代入して、行列  $\bar{A}_\epsilon$  を算出する。反射率パラメータベクトルの推定値はセンサー出力から

$$\bar{\sigma}^0 = \bar{A}_\epsilon^+ \bar{\rho}^0(x) \quad (15)$$

で与えられる。ここで  $\bar{A}_\epsilon^+$  は  $\bar{A}_\epsilon$  の  $n \times p$  擬似逆行列である。

プラスチックのような不均質誘電体の反射は2色性で、表面には多少とも鏡面反射成分を含む。この場合観

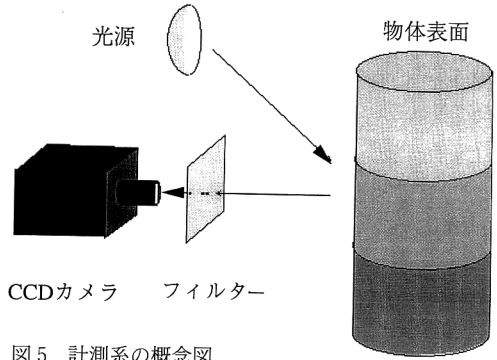


図5 計測系の概念図.

測データを画像信号平面に射影し、そこで分光反射率関数の推定を行う。画像信号平面は2次元であるから、拡散反射ベクトル  $\bar{A}_\epsilon \bar{\sigma}^0$  は2つの直交ベクトル  $[H\bar{\epsilon}]$  と  $[H\bar{\epsilon}]^\perp$  とを用いて

$$\bar{A}_\epsilon \bar{\sigma}^0 = c_e [H\bar{\epsilon}] + c_e^\perp [H\bar{\epsilon}]^\perp \quad (16)$$

のように表現できる。ここで、 $[H\bar{\epsilon}]$  はすでに前節で与えられており、 $[H\bar{\epsilon}]^\perp$  は平面上で  $[H\bar{\epsilon}]$  に直交する単位ベクトルである。 $c_e$  と  $c_e^\perp$  はそれぞれの重み係数である。この係数を決定するには、四分円解析法<sup>6,7)</sup> を拡張すれば、推定値を予測することができる。例えば図4は係数 ( $c_e, c_e^\perp$ ) の座標系を示している。各ドットは、場所  $x$  における観測点を、この変換した座標系上で示している。 $c_e$  軸は鏡面反射、すなわち照明光ベクトルに対する重みを表し、 $c_e^\perp$  軸は拡散反射による寄与を表す。したがって、ベクトル  $\bar{A}_\epsilon \bar{\sigma}^0$  の信頼できる推定値は光源ベクトル  $[H\bar{\epsilon}]$  から最も離れた平面上的データ点として求まる。計測系の雑音が少ない場合、図4のように境界線  $b_1$  と  $b_2$  の交点がひとつの推定値となる。最後に、係数の推定値 ( $\hat{c}_e, \hat{c}_e^\perp$ ) から、反射率パラメータの推定値は次式で算出される。

$$\bar{\sigma}^0 = \bar{A}_\epsilon^+ (\hat{c}_e [H\bar{\epsilon}] + \hat{c}_e^\perp [H\bar{\epsilon}]^\perp) \quad (17)$$

## 4. 具 体 例

### 4.1 計 測 系

モノクロ CCD カメラと6組のカラーフィルターを組み合わせて、可視スペクトルを6つの波長帯で構成するマルチバンド視覚システムを試作した。図5にこの計測系の概念図を示す。カメラシステムはモノクロ CCD カメラ、写真レンズ、および数枚のフィルターからなる。モノクロ CCD カメラは Sony モデル TK-66 で、レンズは焦点距離 50 mm と 35 mm の Nikon 標準レンズである。またシャッタースピードを容易に変えられるよう

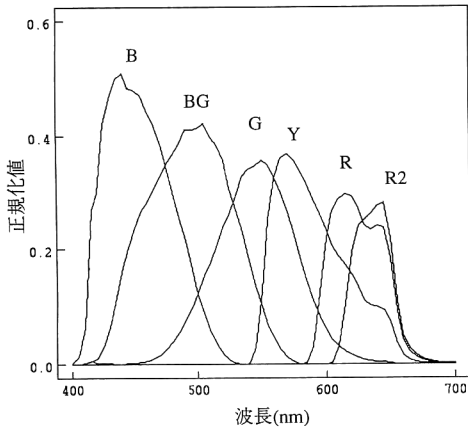


図6 マルチバンドカメラの総合分光感度.

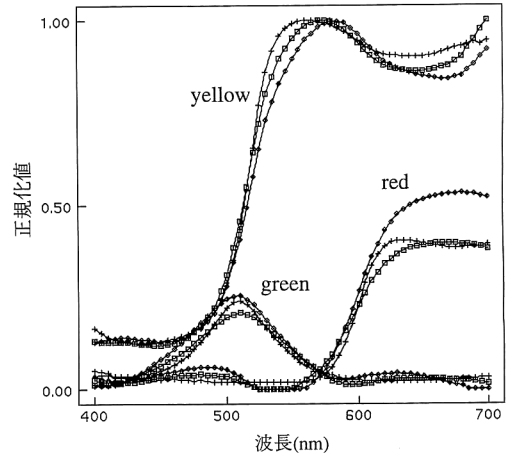


図7 分光反射率の推定結果.

に、外部スイッチを作った。

必要なカメラキャリブレーションは入出力関係と分光感度についてである。特にカメラの分光感度関数の知識は照明光と分光反射率を推定する際絶対に必要である。まず、カメラ入出力の線形性を校正したCRTモニターを用いてこれを確認した。次に、モノクロCCDカメラ本体の分光感度を計測するために多数の干渉フィルターを用いた。光源からの連続スペクトルを31個の干渉フィルター単色光の集合に変換する。各単色光を拡散板に照射し、カメラと輝度計両方で計測する。このとき、各波長点においてカメラ出力値と計測した輝度値の比が分光感度関数を決める。図6はこのようにして求めた6センサーに対する総合分光感度である。

#### 4.2 線形モデルのデータ

照明光の基底関数を決めるために、9つの代表的な光源からのスペクトルを解析した。これらの光源はCIEの標準の光A, B, Cと昼光D55, D65, D75で、さらに筆者らが計測した太陽光、スライドプロジェクター、ハロゲンランプからのスペクトルである。これらのスペクトルを特異値分解して主成分パターンを抽出し、照明光の基底関数とした。推定には最初の3つの関数のみを使用した。

次に反射率の基底関数のためにEastman Kodak社から提供された表面分光反射率のデータベースを用いた。このデータベースはマンセル色票と各種の物体から集めた354の分光反射率曲線群からなる。筆者らはこれらの主成分パターンから主要5成分を抽出し、反射率の基底関数として用いた。

#### 4.3 推定結果

赤、黄、緑の3つのプラスチックの筒を図5のようにハロゲンランプの照明下で計測した。この場合は筒の側面に強いハイライトが現れた。上述の手続きに従って、照明光とプラスチックの分光反射率をカメラデータから推定した。図7に赤、黄、緑の各表面に対する分光反射率の推定結果を示す。図中では各表面について3本の曲線が描かれている。ダイヤモンド記号の曲線は推定値を表し、四角は実測結果である。さらに×印の曲線は5つの基底関数による5次元線形モデルで分光反射率を近似したものである。第1と第3の曲線が十分接近しており、良好な推定結果が得られていることがわかる。

#### 5. 今後の展望

コンピュータービジョンではカラーカメラからの3次元情報にとらわれず、分光情報の利用が今後ますます盛んになると思われる。このとき、計測面では分光画像をいかにして獲得するか、いかに高速化できるかが問題となる。また処理面では多次元画像情報をいかに圧縮して高速処理できるかが重大な問題である。

本稿では、人間の視覚系に特有のカラーコンスタンシーを機械システムで実現するために、カメラデータから物体表面の分光反射率を推定する問題を述べた。具体的なシステムとして筆者らが試作したマルチバンドカメラを紹介した。分光データの低次元表現のために有限次元線形モデルを使用し、光源と反射率の推定に2色性反射の特性を利用した。

今後このような分光情報の推定法の実用化研究を進めたいと考えている。

## 文 献

- 1) L. T. Maloney and B. A. Wandell: "Color constancy: A method for recovering surface spectral reflectance," J. Opt. Soc. Am. A, **3** (1986) 29-33.
- 2) M. D'Zmura and P. Lennie: "Mechanisms of color constancy," J. Opt. Soc. Am. A, **3** (1986) 1662-1672.
- 3) 大田友一, 塚田正人, 林 泰博: "複数枚のカラー画像からの照明色と物体色の復元", 電子通信学会論文誌, **J76-A** (1993) 1778-1786.
- 4) M. D'Zmura and G. Iverson: "Color constancy. I Basic theory of two-stage linear recovery of spectral descriptions for lights and surfaces," J. Opt. Soc. Am. A, **10** (1993) 2148-2165.
- 5) S. Tominaga and B. A. Wandell: "Component estimation of surface spectral reflectance," J. Opt. Soc. Am. A, **7** (1990) 312-317.
- 6) S. Tominaga: "Surface identification using the dichromatic reflection model," IEEE Trans., **PAMI-13** (1991) 658-670.
- 7) S. Tominaga: "Multichannel vision system for estimating surface and illumination functions," J. Opt. Soc. Am. A, **13** (1996) 2163-2173.
- 8) S. A. Shafer: "Using color to separate reflection components," Color Res. Appl., **10** (1985) 210-218.
- 9) S. Tominaga and B. A. Wandell: "The standard surface reflectance model and illuminant estimation," J. Opt. Soc. Am. A, **6** (1989) 576-584.
- 10) H. C. Lee, E. J. Breneman and C. Schulte: "Modeling light reflection for computer color vision," IEEE Trans. on PAMI, **12** (1990) 402-409.
- 11) 富永昌治, 大橋伸一郎: "物体のカラー反射モデル", 情報処理学会論文誌, **33** (1992) 37-45.
- 12) S. Tominaga: "Dichromatic reflection models for a variety of materials," Color Res. Appl., **19** (1994) 277-285.
- 13) S. Tominaga: "Surface reflectance estimation by the dichromatic model," Color Res. Appl., **21** (1996) 104-114.
- 14) 富永昌治, 西辻順一: "物体間の相互反射の色解析", 日本色彩学会誌, **20** (1996) 104-113.
- 15) 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, **33** (1992) 37-45.
- 16) S. Tominaga: "Analysis of object color images using a reflection model," テレビジョン学会誌, **50** (1996) 575-585.
- 17) 富永昌治, 岡山敏之: "ハイライトや相互反射の影響を含むカラー画像の解析法", 電子情報通信学会論文誌, **80-DII** (1997) 1360-1369.
- 18) B. A. Wandell: *Foundations of Vision* (Sinauer Associates, Sunderland, MA, 1995).
- 19) D. B. Judd, D. L. MacAdam and G. W. Wyszecki: "Spectral distribution of typical daylight as a function of correlated color temperature," J. Opt. Soc. Am., **54** (1964) 1031-1040.
- 20) 御垣博明, 高浜幸太郎, 納谷嘉信: "マンセル色票の分光反射率分布の解析", 日本色彩学会誌, **7** (1983) 167-174.
- 21) L. T. Maloney: "Evaluation of linear models of surface spectral reflectance with small numbers of parameters," J. Opt. Soc. Am. A, **10** (1986) 1673-1683.
- 22) M. J. Vrhel, R. Gershon and L. S. Iwan: "Measurement and analysis of object reflectance spectral," Color Res. Appl., **19** (1994) 4-9.

(1997年9月5日受理)