

カラーメディア光学

羽 石 秀 昭

Color Media Optics

Hideaki HANEISHI

Color reproduction based on spectral reflectance estimation is reviewed. First, several processes of color reproduction depending on situations are described. Multiband imaging system and spectral reflectance estimation techniques are then introduced. Next a gonio-spectral imaging method for glossiness reproduction is presented. Some examples of spectral reflectance and image reproduction are also presented.

Key words: color reproduction, spectral reflectance, multiband imaging, Wiener estimation, gonio-spectral imaging

画像を用いた情報の伝達においてカラーの情報が有効であることは論を待たない。とくに近年ではマルチメディアとネットワークの急速な普及から、カラーメディアが扱われる機会が増えてきている。そこでは、カラー情報の取得、伝送、分析、表示が、赤 (R)、緑 (G)、青 (B) の三原色を用いて行われている。そして、CRT (cathode ray tube) はもちろんのこと、液晶ディスプレイ、カラープリンター等においてもフルカラー表示が実現されている。では、その技術はほぼ完成といえるだろうか。答えは否である。フルカラー表示が実現されているといっても、オリジナルの色が忠実に再現されているかという点でみれば、決して十分ではない。たとえば、電子商取引引きでは、ネットワークを通じて商品の画像を伝送しリモートで取り引きを行う場合があるが、商品の選定を適切に行うために正確な色再現が求められる。また遠隔医療では、撮影側の照明と観察側の照明とが異なる場合でも誤りなく診断を下すために、やはり正確な色再現が求められる。たとえば、白熱灯下にいる遠隔地の患者の映像を、蛍光灯下にいる医師がCRT上に表示して観察するとき、表示される画像は白熱灯下の赤みがかかった色であってはならない。現状のシステムではこれらの要求に十分応えられていない。

このような背景から、RGB 3 バンドにとらわれず、バン

ド数を増やしてカラー画像を取得し、その画像群から分光反射率を推定する研究が近年活発に行われている¹⁻¹¹⁾。また、分光反射率に加えて、その入射角・反射角依存性までも取得する研究も行われ始めている¹²⁻¹⁵⁾。これが可能になれば、物体に対して、照明の色を変えるだけでなく、照明の方向や大きさなども変えた画像再現が可能になり、色だけでなく、光沢感を含めた質感もリアルに再現できるようになる。

このように、物体の色に関する属性をより厳密に得ようとする、その容量は膨大となり、その取得、伝送、保存には困難を伴う。ネットワークのブロードバンド化が進む中、コンテンツの容量が増えていく傾向は続くと考えられるが、豊富な情報をいかにコンパクトに取得、伝送、保存するかはやはり重要な技術課題である。そこでは、より少ないパラメーターで物体の分光反射特性を記述することが求められる。この要求に対して、分光推定の研究では、対象の分光特性の統計量を用い、また、適当なモデルを導入することにより対応している。

本講義では、カラーメディアの正確な色再現、とくに測色的色再現および分光の色再現に関して、まず問題を整理分類したうえで、分光反射特性を表すパラメーターの推定方法を示す。以下、1章では、色再現について整理分類し、

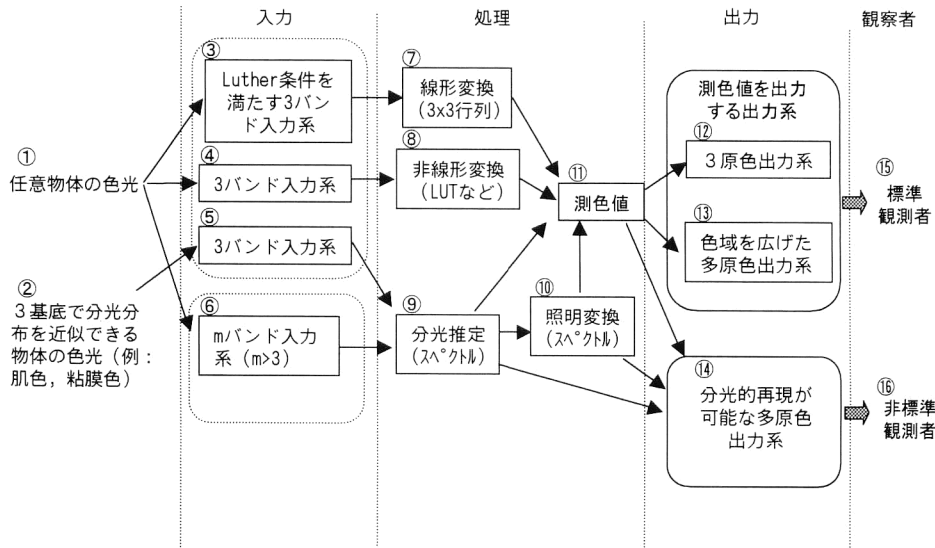


図1 カラー情報の流れと処理。

分光推定の必要性を示す。2章では、分光反射率推定の統計的手法を述べ、マルチバンド撮影からの分光画像の推定例を示す。3章では、光沢再現をめざす偏角分光イメージングのアプローチを紹介する。

1. 色再現の定式化と分光推定の必要性

本章では、色光の色知覚および画像入力系によるイメージングを定式化する。また、どのような場合に、分光的な入力、処理、出力が必要になるのかを整理する。この目的のために、図1に色情報の流れを示し、図中の各パーツに番号を付け、以下の説明の中で適宜この番号を引用することにする。

1.1 一般的な測色的色再現の方法

非蛍光性の反射物体の場合、物体からの反射光強度分布は以下のように定式化できる。

$$f_0(\mathbf{p}, \lambda) = e(\mathbf{p}, \lambda) r(\mathbf{p}, \lambda) \quad (1)$$

ここで \mathbf{p} は空間座標を、 λ は波長を表し、また、 $e(\mathbf{p}, \lambda)$ は照明光の分光エネルギー分布を、 $r(\mathbf{p}, \lambda)$ は原物体の分光反射率を表す。以下では、とくに明記したい場合を除いて空間座標は省略する。また、後に行う分光推定の定式化のために、各分光特性を波長方向に離散化して定式化し直す。たとえば、 $f_0(\lambda)$ を列ベクトルで $\mathbf{f}_0 = [f_{01} \ f_{02} \ \dots \ f_{0l}]^t$ と表す。ここで、 l は波長方向のサンプル数を表し、 $[\]^t$ は行列の転置を表す。分光反射率も同様に列ベクトル \mathbf{r} で表す。照明については $l \times l$ の対角行列 \mathbf{E} で与え、その行列の対角成分に照明の分光エネルギー分布を入れる。これにより、式(1)は $\mathbf{f}_0 = \mathbf{E}\mathbf{r}$ と書ける (図1, ①)。

物体からの色光 $f_0(\lambda)$ に対して、3バンドカラー入力系

あるいは人間の目の応答は

$$v_i = \int f_0(\lambda) s_i(\lambda) d\lambda \quad i=1, 2, 3 \quad (2)$$

と書ける。ここで $s_i(\lambda)$, $i=1, 2, 3$ はセンサーの分光感度特性である。国際照明委員会 (CIE: International Commission of Illumination) では人間の視覚の標準的な色感度特性を等色関数、 $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ として規定している。すなわち、センサーの分光感度特性が、 $s_1(\lambda) = \bar{x}(\lambda)$, $s_2(\lambda) = \bar{y}(\lambda)$, $s_3(\lambda) = \bar{z}(\lambda)$ となる。このような観測者を標準観測者とよぶ。

センサーの分光感度特性も離散化して、 $3 \times l$ の行列で $\mathbf{S} = [\mathbf{s}_1 \ \mathbf{s}_2 \ \mathbf{s}_3]^t$ と書くことにすると、式(2)は

$$\mathbf{v} = \mathbf{S}\mathbf{f}_0 = \mathbf{S}\mathbf{E}\mathbf{r} \quad (3)$$

と書ける (図1, ③, ④)。とくに標準観測者の場合、添え字 SO をつけて、 \mathbf{S}_{SO} と記すことにし、その出力を、

$$\mathbf{v}_{SO} = \mathbf{S}_{SO}\mathbf{f}_0$$

と書く。この値をとくに、三刺激値あるいは測色値とよぶ。3バンドカラー入力系が標準観測者の等色関数と同じ分光特性をもっているか、または等色関数の線形変換で表されるものならば、取得した信号値 \mathbf{v} から、三刺激値 \mathbf{v}_{SO} を得ることができる。このような条件を Luther 条件とよぶ (図1, ③→⑦→⑩)。

一般的なカメラやスキャナーなどの3バンド入力系ではこの条件を満たさないため、信号値に対する線形変換では精度の高い測色値を出力できない。そこで高次の多項式やルックアップテーブル (LUT) が用いられる (図1, ④→⑧→⑪)^{16,17)}。

一方、CRT など発光色を用いた出力系で表示される色

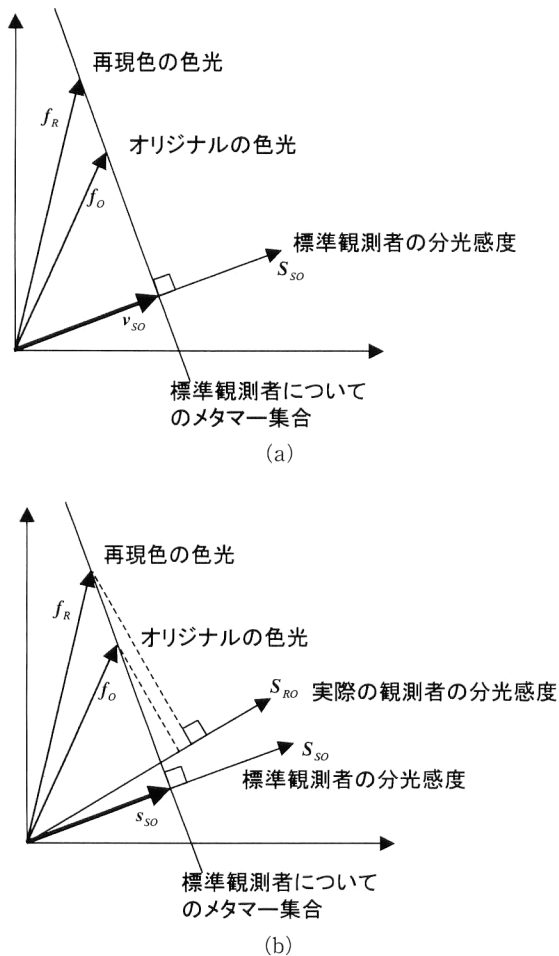


図2 分光放射輝度から観測者の応答へのマッピング。(a) 標準観測者の場合におけるメタマー集合の概念図、(b) 実際の観測者の特性が標準観測者の特性からずれている場合。

光を f_R と書くことにする。この出力系が適切にキャリブレーションされていて、

$$v_{so} = S_{so} f_R \quad (4)$$

となる f_R を表示できれば、測色的色再現が実現できることになる (図1, ⑫)。このような f_R は、式(4)で表される連立方程式の解であり、必ずしも f_o に等しい必要はなく、一般に表示系の適切な三原色でその色光をつくることができる。この解集合 $\{f_R\}$ をメタマー集合とよぶ。この概念を図2(a)に示す。ここでは説明のために次元を落として描いている。図において、標準観測者の分光感度と直交する方向に広がった色がメタマー集合である。

1.2 照明変換への対応

実際に対象を撮影したときの照明 E とは異なる照明 E' の下での色光を再現したい場合がある。先に述べた電子商取引引きや遠隔医療の場合などである。しかし、いったん三刺激値にしてしまったものから、光源を替えたときの分光放射輝度を正確に推定することは一般に不可能である。

そこで、撮影のバンド数を増やして物体の分光反射率を推定する必要が生じる (図1, ①→⑥→⑨)。推定により分光反射率 \hat{r} が得られれば、再現用の照明を計算機内で掛けて

$$f' = E' \hat{r} \quad (5)$$

により分光放射輝度を得、さらに三刺激値を計算して表示することで照明変換が実現される (図1, ⑨→⑩→⑪→⑫)。

任意の照明下での画像再現が要求されるとき、CRTのようにリアルタイムに画像出力が変更できる場合はそのつど三刺激値を計算し、出力色を変更すればよい。一方、表示系がプリンターなどの場合、リアルタイムな変更は困難なため、任意の照明変換に対応するためには、ハードコピーの分光反射率をオリジナルに合わせる必要がある。この目的のために、インクの種類や描画の工夫で可能なかぎり分光的色再現に近づける研究も行われている^{18,19)}。

ところで、3バンド入力でも分光反射率が推定できる場合もある。これは撮影対象が非常に限定されていて、3つの基底で分光反射率を表現できる場合である。この場合の分光反射率推定については2章2節で述べる (図1, ②→⑤→⑨)。

1.3 標準観測者と異なる視覚特性をもつ観測者の場合

Luther条件を満たす入力系により、あるいはそうでない入力系でも適当な変換処理により測色値を得、それを表示系で正しく再現できたとする。しかし、実際の観測者が標準観測者の分光感度特性をもたない場合には (図1, ⑬)、再現された色はオリジナルの色と一致しないという問題が生じる。このことを図2(b)に示す。実際の観測者がもつ分光感度特性の方向ベクトルが標準観測者のそれからずれている場合、オリジナルと再現光は異なる刺激値を与えることがわかる。分光的色再現を行えば、すなわち $f_R = f_o$ であれば、明らかに、等色関数にかかわらず $v = v_{so}$ が成り立つ (図1, ⑭→⑯)。

発光色による表示系で分光放射輝度を完全に一致させるようなデバイスはいまのところ存在しないが、3原色に比べて分光的一致の度合いが向上する6原色を用いた表示装置については現在研究開発が進められている^{20,21)}。

1.4 表示系における色域の拡大

上記1章3節のケースでは、入力系で分光情報の取得が必要なと同時に、表示系でもまた分光的再現が必要になる。これ以外に、表示系の改良が望まれる点として、色再現範囲 (色域) の拡大がある。標準観測者を仮定でき、かつ、入力系で測色値が取得されたとしても、その色が表示系の表示範囲外るときには、測色的色再現が実現されない。

図3は色域の例をCIE-u'v'色度図を用いて表したものである。馬蹄形をした最外郭はスペクトル軌跡、すなわち

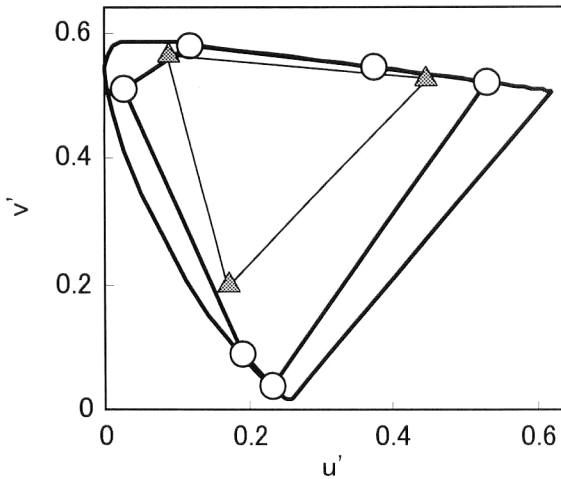


図3 CIE-u'v' 色度図を用いた色域の表現。最外郭は人間が知覚する色の範囲を表している。また、最も内側にある△印を頂点とする三角形はNTSC 準拠CRTの色再現範囲を、○印を頂点とする六角形は、原色DLPを用いたプロジェクターの色再現範囲を示している。

各波長の単色光を表し、最も彩度が高い。このスペクトル軌跡の内側が人が知覚する色の範囲であり、内側に入るほど彩度の低下した色となる。最も内側にある三角形はNTSC (National Television Standards Committee) 準拠CRTの色再現範囲を表し、頂点の△印はCRTの3つの原色(R, G, B)を表している。一方、○印を頂点とする六角形は、6原色を用いたプロジェクターの色再現範囲を示している²²⁾。このように、原色点を高彩度側に設定することによって、3原色のCRTに比べて色域を拡大することが可能であり、現在、その研究開発が進められている(図1, ⑬, ⑭)²²⁻²⁴⁾。

2. 分光反射率推定

2.1 最小平均二乗誤差規範に基づく分光反射率推定

分光情報を取得する際、入力対象の分光特性についての統計情報を利用すれば、比較的少ないバンド数で、精度よく推定することが可能になる。ここではまず、最小平均二乗誤差規範に基づく分光反射率推定の定式化について述べる。これは、推定対象のサンプル集合を用いて、真の分光反射率と推定分光反射率との二乗誤差の集合平均が最小になるように推定のオペレーターを求める方法であり、ウィナー推定ともよばれる。

マルチバンド撮影の方法として、図4に示すように、モノクロ CCD (charge coupled device) カメラの前にカラーフィルターを置いて画像を取得するものとする。いま、 i 番目のカラーフィルターを用いた場合の、ある画素位置 \mathbf{p} におけるカメラ応答を $g_i(\mathbf{p})$ とし、以下のように表す。

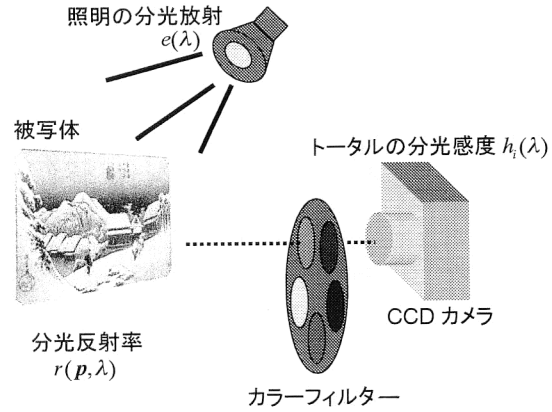


図4 マルチバンド撮影システム。

$$g_i(\mathbf{p}) = \int h_i(\lambda) e(\lambda) r(\mathbf{p}, \lambda) d\lambda + n_i(\mathbf{p}) \quad (6)$$

$i = 1, \dots, m$

ここで $h_i(\lambda)$ は、CCDカメラの分光感度とレンズの透過率および i 番目のフィルターの分光透過率との分光積によるトータルの分光感度特性を表している。 $n_i(\mathbf{p})$ は i 番目のバンド画像に加わる加法性のノイズを表す。 m はバンド数を表す。ここで、空間的な照明むらを考えれば、照明の分光スペクトルは位置の関数になるが、ここでは位置に依存しないような定式化を行い、そのかわり物体の分光反射率に照明むらの特性を受けもたせることにする。

前述同様、各分光特性を離散系で表すことにすれば、式(6)は以下のように書くことができる。

$$\mathbf{g} = \mathbf{H}\mathbf{E}\mathbf{r} + \mathbf{n} \quad (7)$$

ここで、 \mathbf{g} および \mathbf{n} はそれぞれ観測データおよびノイズを成分とする列ベクトルである。また、 \mathbf{H} は $\{h_i\}$ を行要素としてもつ行列である。

ウィナー推定 $\hat{\mathbf{r}}$ は \mathbf{g} に対して推定のオペレーターを作用させて得ることができる。

$$\hat{\mathbf{r}} = \mathbf{W}\mathbf{g} \quad (8)$$

ここで用いる推定オペレーター \mathbf{W} は、真の分光反射率と推定分光反射率との2乗誤差の集合平均を最小にするように決定される。

$$\langle \|\mathbf{r} - \hat{\mathbf{r}}\|^2 \rangle = \langle \|\mathbf{r} - \mathbf{W}\mathbf{g}\|^2 \rangle \rightarrow \min \quad (9)$$

ここで $\langle \rangle$ は集合平均を表す。 \mathbf{W} を明示的に表せば以下のようなになる²⁵⁾。

$$\mathbf{W} = \mathbf{R}_{rr} \mathbf{E} \mathbf{H} (\mathbf{H} \mathbf{E} \mathbf{R}_{rr} \mathbf{E} \mathbf{H}^t + \mathbf{R}_{nn})^{-1} \quad (10)$$

ここで \mathbf{R}_{rr} および \mathbf{R}_{nn} はそれぞれ以下で表される相関行列である。

$$\mathbf{R}_{rr} = \langle \mathbf{r} \mathbf{r}^t \rangle \quad \mathbf{R}_{nn} = \langle \mathbf{n} \mathbf{n}^t \rangle$$

すなわちウィナー推定には、システム行列 $\mathbf{H}\mathbf{E}$ のほかに、推定対象の分光反射率およびノイズについてそれぞれ二次

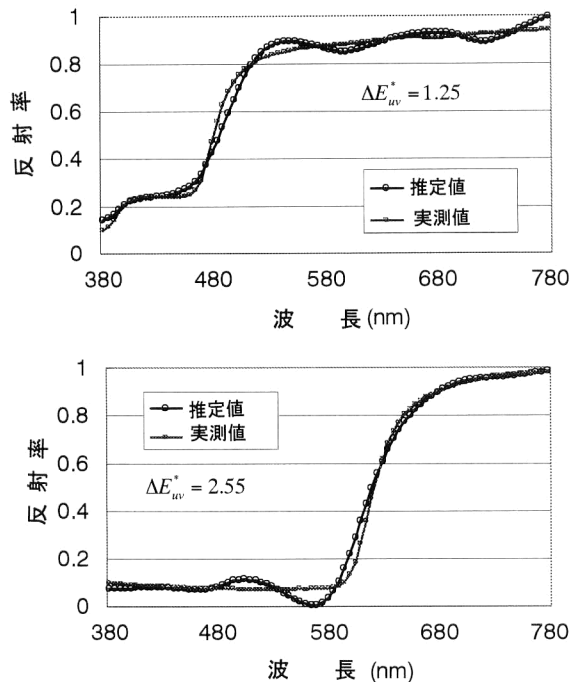


図6 分光反射率推定例.

の統計量が必要であることがわかる。

推定対象の分光反射率の相関行列 R_{rr} は、実際に推定対象のカテゴリーに属するサンプルを多数集め、それらの分光反射率を測定して相関行列を得ることになる。たとえば、絵画が対象なら、絵の具のサンプルの分光反射率を多数測定する、あるいは、絵画上の点の分光反射率を測定するなどにより、統計量を得る。ノイズの統計量 R_{nn} については、一様な光強度分布を撮影したマルチバンド画像に現れるばらつきをノイズとみなし、その相関行列をとることによってノイズの統計量とみなせばよい。

マルチバンド撮影とウィナー推定に基づいた、画像の色再現例を示す。図5は、水彩画を色再現性評価用カラーチャートおよび標準白色板とともに5バンドで撮影し、上記の方法で画素ごとに分光反射率推定を行い、さらに、CIE-D65 標準光および白熱灯下での再現色を予測したものである。標準白色板は照明の分光エネルギー分布の測定に用いている。適切に色管理されたカラー CRT への表示を想定した画像であるため、本誌のカラー印刷は正確ではないが、2つの画像の比較から照明の色みが反映された色再現になっていることがわかるであろう。

次に、分光反射率の推定例を示す。まず、145枚の油絵の具の小片(パッチとよぶ)を用意し、その分光反射率を実測した。このデータと、仮定したマルチバンド撮影システムのシステム行列とからウィナー推定のオペレーターを求めた。次に、マルチバンド撮影システムの出力から推定さ

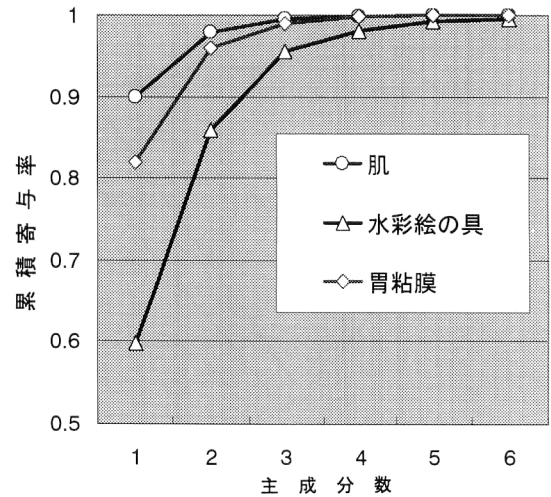


図7 分光反射率のサンプル集合から算出した累積寄与率.

れた分光反射率と実測値とを比較した。典型的な2例を図6に示す。このように5バンドからでも比較的正確に分光反射率の推定が可能であることがわかる。図中に ΔE_{uv}^* として示した値は、推定と実測の分光反射率をもつ物体を CIE-D65 標準光源下で観察したときの色差である。この色差がおよそ3以下であれば、人の目には区別がつかないとされており、良好な色再現が可能になることがわかる。

2.2 主成分分析を用いた分光反射率推定

撮影対象が限定されていてその色に著しい偏りがある場合、3バンド入力系からでも分光反射率の推定が可能である。十分な数の撮影対象サンプルを集め、その分光反射率の集合に対して主成分分析 (PCA: principal component analysis) を行えば、分布を無相関にする基底ベクトルを次元数だけみつけることができる。このとき、分散の大きい順に選んだ3つの基底ベクトルを使って、分光反射率 r が十分正確に近似できるとする。すなわち、

$$r \cong \sum_{i=1}^3 a_i u_i = Ua \quad (11)$$

ここで、 $\{u_i\}$ は r を展開する基底ベクトルであり、 $\{a_i\}$ は対応する展開係数である。また U は列ベクトル $\{u_i\}$ を並べた行列であり、 a は展開係数 $\{a_i\}$ を要素とする列ベクトルである。これを式(3)に代入すれば、

$$v = SEr = SEUa \quad (12)$$

が得られる。ここで、センサーの分光感度 S 、照明の分光放射 E 、および基底ベクトルの集合 U がそれぞれ事前にわかっているならば、 3×3 の行列である SEU を計算し、その逆行列 $(SEU)^{-1}$ を観測値ベクトル v に掛けることによって、 a を得ることができる。これにより、分光反射率が推定できることになる。

これまでの研究で、肌の色や、粘膜面の色などは、3つの

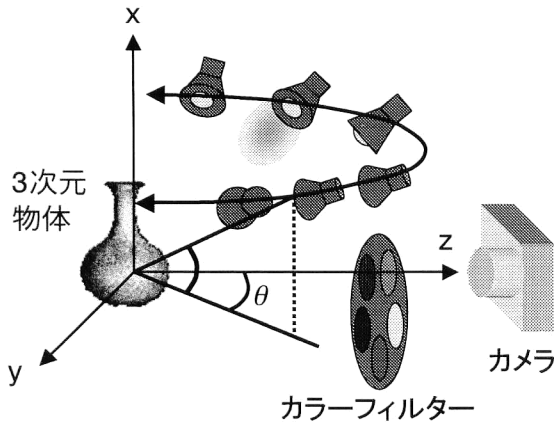


図8 多方向照明マルチバンド撮影システム。

基底ベクトルでよく近似できることがわかっている^{26,27}。低次元での近似のよさをみる累積寄与率 (cumulative contribution ratio) の例を示す。図7は、肌、胃粘膜、および水彩絵の具データベースのそれぞれに対して主成分分析を行って得られた累積寄与率のグラフである。肌、胃粘膜では3つの主成分 (PC) で99.5%以上の寄与率があり、3主成分でよい近似が可能であることがわかる。一方、水彩絵の具では、分光反射率の分布が多様であるため累積度は高くなく、3バンドを超えたマルチバンド撮影が必要となる。

3. 偏角分光イメージング

図4で示したマルチバンド撮影システムにより、物体の分光反射率分布が得られ、照明の分光特性を変更したときの色の再現が可能になる。しかしこの方法では、照明の空間的な配置は固定としているため、つねに撮影した照明位置の下での物体の画像再現が可能になるだけである。このため、物体の光沢・陰影情報が乏しく質感の把握が難しい。そこで、照明位置を種々変えてマルチバンド画像撮影を行い、この画像群から物体の偏角分光特性を得ることにより、任意の空間配置をもつ照明光源下における画像を再現する手法が提案されている¹²⁻¹⁵。

3.1 二色性反射モデル²⁸⁾

多くの自然界に存在する物体あるいは人工の物体は、不均質誘電物質とみなすことができる。このような物体から反射された光は、物体表面と空気層の間の境界で反射する表面反射光 (specular component) と、物体表面を通過して色素粒子により散乱される内部反射光 (diffuse component) との和で表すことができる。このとき、表面反射光は照明光源と同一の分光特性をもち、内部反射光は色素粒子などで吸収されるため物体固有の分光反射率を反映した色をもつ。このようなモデルを二色性反射モデルとよぶ。

このモデルは、以下のように定式化できる。すなわち、

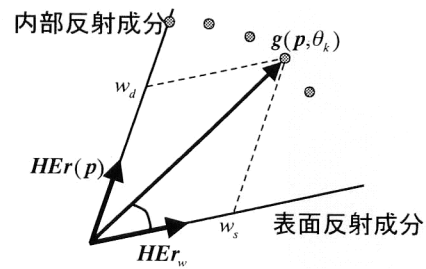


図9 二色性反射モデルに従うマルチバンド画像の画素値ベクトルの振る舞い。

分光エネルギー分布 E をもつ光源が、 θ で表されるジオメトリーにあるとき、物体上の位置 p における分光放射輝度 $f(p, \theta)$ は以下の式で表される。

$$f(p, \theta) = w_s(p, \theta) Er_w + w_d(p, \theta) Er(p) \quad (13)$$

ただし、 $r_w = [1 \ 1 \ \dots \ 1]^t$ であり、完全拡散物体の分光反射率を意味する。これにより Er_w は光源の分光スペクトルそのものを表し、一方、 $Er(p)$ は内部反射光の分光特性を表す。また、 $w_s(p, \theta)$ 、 $w_d(p, \theta)$ は各反射成分の強度が、位置 p および照明ジオメトリー θ に依存してどのように変化するかを表すスカラー量である。

各因子すなわち、 $w_s(p, \theta)$ 、 $w_d(p, \theta)$ 、 $r(p)$ が推定できれば、それを用いて任意の空間分布 $E'(\theta)$ をもつ照明光源下における物体を再現することができる。一般的な再現画像は以下のように定式化される。

$$f'(p, \theta) = \int [w_s(p, \theta) E'(\theta) r_w + w_d(p, \theta) E'(\theta) r(p)] d\theta \quad (14)$$

この式は、 $r(p)$ が推定でき、 $w_s(p, \theta)$ 、 $w_d(p, \theta)$ が θ に対して連続的に推定できていれば、白熱灯のような局在した光源にも、また蛍光灯や複数光源など空間的に広がりをもつ光源にも対応できることを表している。

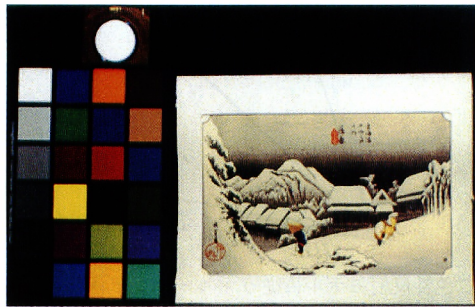
3.2 多方向照明マルチバンド撮影とパラメーター推定

上記の因子を得る撮影方法の模式図を図8に示す。照明ジオメトリーが θ_k のときに得られるマルチバンド画像 $g(p, \theta_k)$ は、ノイズフリーを仮定すると、以下のように表すことができる。

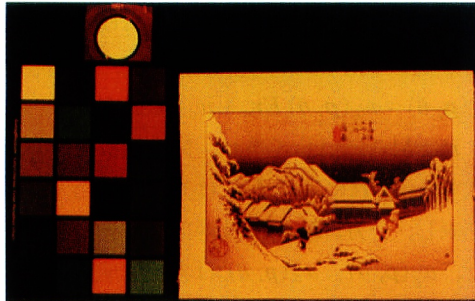
$$\begin{aligned} g(p, \theta_k) &= Hf(p, \theta_k) \\ &= w_s(p, \theta_k) HEr_w + w_d(p, \theta_k) HEr(p) \\ k &= 1, \dots, K \end{aligned} \quad (15)$$

このモデルに基づいてパラメーター推定を以下の手順で行う。

まず、得られた各マルチバンド画像を2成分に分解する。表面反射光の色は光源の色と等しい。そこで撮影の際標準白色板を写し込んでおき、画像からその画素値ベクトルを求め HEr_w とする。一方、このモデルに従う分光放射

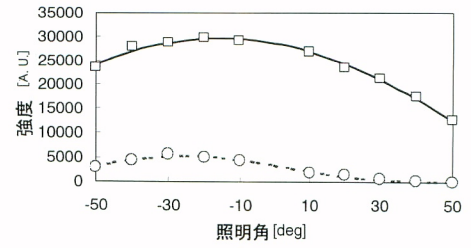


D65標準照明

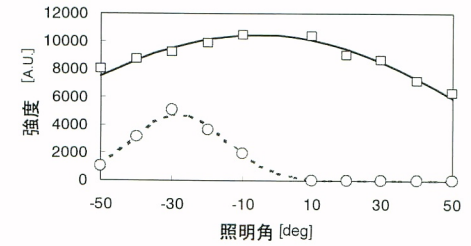


白熱灯

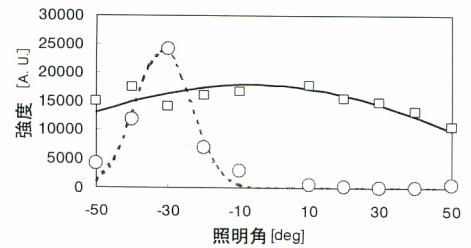
図5 分光反射率推定に基づく画像再現の例。左側が色再現評価用カラーチャート。その上の円形物体は標準白色板である。



(a)

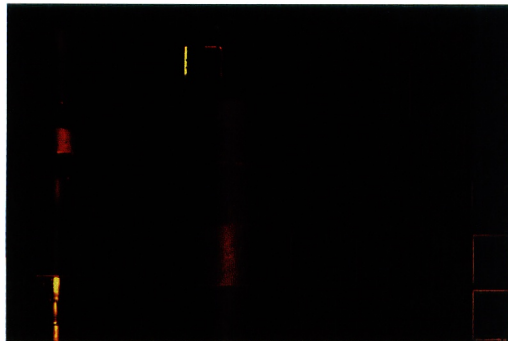


(b)

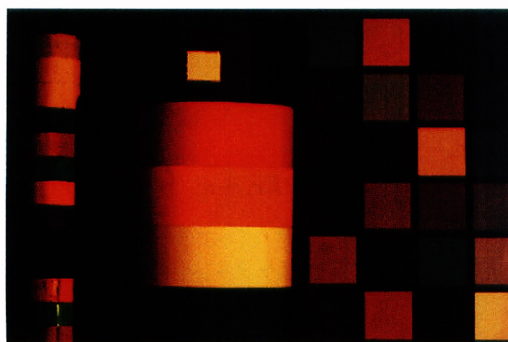


(c)

図11 反射成分強度の照明角依存性。

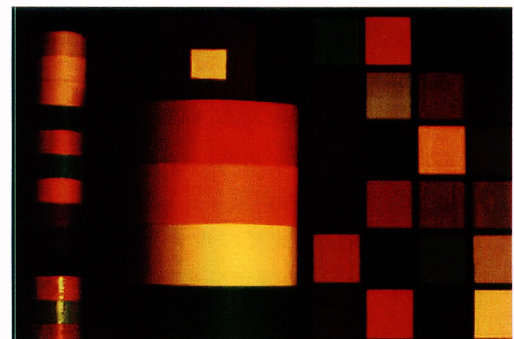


(a)

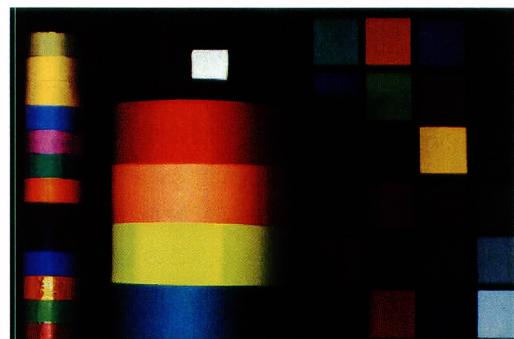


(b)

図10 表面反射成分と内部反射成分の分離画像。中央および左側が円筒物体。中央の円筒物体の上に標準白色板を置いている。右側は色再現評価用チャート。(a) 表面反射成分、(b) 内部反射成分。



(a)



(b)

図12 偏角分光イメージングに基づく再現画像。(a) 白熱灯, -35 deg, (b) D65, 0~50 deg.

輝度のベクトルは、照明ジオメトリーを種々替えていったとき、図9に示すように、2つのベクトル HEr_w , $HEr(p)$ がつくる平面上を動く。照明角度を広く振ることによって表面反射成分をほとんど含まない成分が得られるとすれば、 $HEr(p)$ は照明のベクトル HEr_w と最も大きな角度をなすベクトルを抽出することで得ることができる。これにより、 $HEr(p)$ が決定する。

2つのベクトルの方向 $HEr(p)$, HEr_w が定まったので、合成ベクトル $g(p, \theta_k)$ から2つの係数 $w_s(p, \theta_k)$, $w_d(p, \theta_k)$ も求まる。ただし、ここで得られる係数は、照明ジオメトリー θ_k , $k=1, \dots, K$ における値のみである。先に述べたように、さまざまな角度から照明したときの画像を再現して、光沢感を得たい。このためには、係数 $w_s(p, \theta_k)$, $w_d(p, \theta_k)$ を θ の連続関数で表す必要がある。このための1つの方法として、重み関数を適当な解析的な関数でモデル化し、そのパラメーターを求める方法が考えられる。比較的簡単なモデルの例として、Phongモデルがあげられる²⁹⁾。このモデルでは、上記の2つの係数はそれぞれ次のような式で与えられる。

$$w_s(p, \theta) = A_s(p) \cos^q(\theta - \theta_s(p)) \quad (16a)$$

$$w_d(p, \theta) = A_d(p) \cos(\theta - \theta_d(p)) \quad (16b)$$

A_s , q , θ_s および A_d , θ_d がそれぞれ、 $w_s(p, \theta_k)$, $w_d(p, \theta_k)$ の特性を決めるモデルパラメーターになっており、 K 個の実データからフィッティングによって求めることになる。

簡単な三次元物体を用いた画像再現例を示す。ここでは、色や光沢特性の異なる紙を巻いた2つの円筒物体、色再現評価用チャートおよび標準白色板を対象とし、 $-45 \sim 45$ 度の15度間隔で照明し、5バンドで撮影をした。図10は、マルチバンド画像を各成分に分離した結果を示している。表面反射画像は光沢のみが、また内部反射画像は内部色のみが現れているのがわかる。とくに左側の細い円筒物体には、下部に光沢の強い紙が巻かれているが、表面反射成分画像でそれらが明瞭に認められる。図11は、円筒に巻いた3つの異なる光沢特性をもつ紙に対して行った、Phongモデルによる反射光強度 $w_s(\theta)$, $w_d(\theta)$ の近似結果を示している。(a)が最も光沢の少ない紙であり、(c)が最も光沢の多い紙である。グラフ中のプロットは実際に画像を入力した角度での係数値を示している。また実線(□印)は内部反射光の、点線(○印)は表面反射光の近似曲線をそれぞれ表している。各成分の反射光強度がPhongモデルによりほぼ近似できることがわかる。

得られたパラメーターを用いて再現した画像例を図12に示す。図12(a)では、白熱灯を -35 度(右側)の方向か

ら照明したときの予測画像であり、図12(b)は、 $0 \sim 50$ 度の範囲に空間的な広がりをもつD65標準光で照明したときの予測画像である。さらに照明光を移動させていったときの予測画像を動画として作成して再現すると、物体の光沢感がより把握しやすくなる。

近年活発になりつつある分光反射率推定に基づく色再現の高精度化について概観した。また、光沢感再現を実現するための偏角分光イメージングのアプローチも紹介した。オーディオの分野では十分Hi-Fiな音を楽しむことができ、音質に不満を感じることはほとんどなくなった。一方、カラーメディアの分野では、フルカラー化は進んだものの、オリジナルに対する忠実性という点では、いまだ発展途上である。高精細・高臨場感の表示システムと合わせて、色の忠実性が今後ますます期待される。

文 献

- 1) F. H. Imai and R. S. Berns: "High-resolution multispectral image archives: A hybrid approach," *Proc. 6th Color Imaging Conference* (Scottsdale, AZ, 1998) pp. 224-227.
- 2) P. D. Burns and R. S. Berns: "Analysis of multispectral image capture," *Proc. 4th Color Imaging Conference* (Scottsdale, AZ, 1996) pp. 19-22.
- 3) H. Maitre, F. Schmitt, J. Crettez, Y. Wu and Y. Hardeberg: "Spectrophotometric image analysis of fine art paintings," *Proc. 4th Color Imaging Conference* (Scottsdale, AZ, 1996) pp. 50-53.
- 4) D. Saunders and J. Cupitt: "Image processing at the national gallery: The VASARI project," *Natl. Gallery Tech. Bull.*, **14** (1993) 72-85.
- 5) 中野恵一, 小宮康宏: "マルチスペクトルカメラを用いた物体識別," *応用物理*, **65** (1996) 496-499.
- 6) F. Konig: "Reconstruction of natural spectra from color sensor using nonlinear estimation methods," *IS&T's 50th Annual Conference* (Boston, MA, 1997) pp. 454-458.
- 7) Y. Murakami, T. Obi, M. Yamaguchi, N. Ohyama and Y. Komiya: "Spectral reflectance estimation from multi-band image using color chart," *Opt. Commun.*, **188** (2001) 47-54.
- 8) 津村徳道, 羽石秀昭, 三宅洋一: "重回帰分析によるマルチバンド画像からの分光反射率の推定," *光学*, **27** (1998) 384-391.
- 9) 横山康明, 長谷川隆行, 津村徳道, 羽石秀昭, 三宅洋一: "絵画の記録・再現を目的とした高精細カラーマネージメントシステムに関する研究(第一報)ー画像入力システムの設計ー," *日本写真学会誌*, **60** (1998) 343-355.
- 10) H. Haneishi, T. Hasegawa, A. Hosoi, Y. Yokoyama, N. Tsumura and Y. Miyake: "System design for accurately estimating spectral reflectance of art paintings," *Appl. Opt.*, **39** (2000) 6621-6632.
- 11) Y. Sato and K. Ikeuchi: "Reflectance analysis for 3D computer graphics model generation," *Graph. Mod. Im. Proc.*, **58** (1996) 437-451.
- 12) H. Haneishi, T. Iwanami, T. Honma, N. Tsumura and Y. Miyake: "Goniospectral imaging of 3D objects," *IS&T/*

- SID's 6th Color Imaging Conference* (Scottsdale, AZ, 1998) pp. 173-176.
- 13) H. Haneishi, T. Iwanami, T. Honma, N. Tsumura and Y. Miyake: "Goniospectral imaging of three-dimensional objects," *J. Imag. Sci. Technol.*, **45** (2001) 451-483.
 - 14) M. Tsuchida, Y. Murakami, T. Obi, M. Yamaguchi and N. Ohya: "High fidelity image reproduction using angular distribution of reflected spectral intensity," *Opt. Rev.*, **8** (2001) 444-450.
 - 15) S. Tominaga, T. Matsumoto and N. Tanaka: "3D recording and rendering of art paintings," *IS&T/SID's 9th Color Imaging Conference* (Scottsdale, AZ, 2001) pp. 337-341.
 - 16) H. Haneishi, K. Miyata, H. Yaguchi and Y. Miyake: "A new method for color correction in hardcopy from CRT images," *J. Imag. Sci. Technol.*, **37** (1993) 30-36.
 - 17) P. C. Hung: "Colorimetric calibration in electronic imaging devices using a look-up-table model and interpolations," *J. Electronic Imaging*, **2** (1993) 53-61.
 - 18) T. Kawaguchi, N. Tsumura, H. Haneishi, M. Kouzaki and Y. Miyake: "Vector error diffusion method for spectral color reproduction," *Proc. IS&T PICS 99 Conference* (Savannah, GA, 1999) pp. 394-397.
 - 19) M. R. Rosen, L. A. Taplin, F. H. Imai, R. S. Berns and N. Ohta: "Answering Hunt's web shopping challenge: Spectral color management for a *Virtual Swatch*," *IS&T/SID's 9th Color Imaging Conference* (Scottsdale, AZ, 2001) pp. 267-273.
 - 20) 石井順一郎, 村上百合, 小尾高史, 山口雅浩, 大山永昭: "多原色表示における分光的色再現を目的とした色変換手法", *Optics Japan 2001 講演予稿集* (東京, 2001) pp. 45-46.
 - 21) K. Ohsawa, F. Konig, M. Yamaguchi and N. Ohya: "Multi-primary display optimized for CIE1931 and CIE1964 color matching functions," *Proc. SPIE*, **4421** (2001) 939-942.
 - 22) M. Yamaguchi, T. Teraji, K. Ohsawa, T. Uchiyama, H. Motomura, Y. Murakami and N. Ohya: "Color image reproduction based on multispectral and multiprimary imaging: Experimental evaluation," *Proc. SPIE*, **4663** (2002) 15-26.
 - 23) T. Ajito, T. Obi, M. Yamaguchi and N. Ohya: "Multi-primary color display for liquid crystal display projectors using diffraction grating," *Opt. Eng.*, **38** (1999) 1883-1888.
 - 24) T. Ajito, K. Ohsawa, T. Obi, M. Yamaguchi and N. Ohya: "Color conversion method for multiprimary display using matrix switching," *Opt. Rev.*, **8** (2001) 191-197.
 - 25) W. K. Pratt: "Point and spectral image restoration techniques," *Digital Image Processing*, Chapter 13 (Wiley Interscience, 1991) pp. 404-406.
 - 26) T. Shiobara, S. Zhou, H. Haneishi, N. Tsumura and Y. Miyake: "Improved color reproduction of electronic endoscopes," *J. Imag. Sci. Technol.*, **40** (1996) 494-501.
 - 27) F. H. Imai, N. Tsumura, H. Haneishi and Y. Miyake: "Principal component analysis of skin color and its application to colorimetric color reproduction on CRT display and hardcopy," *J. Imag. Sci. Technol.*, **40** (1996) 422-430.
 - 28) S. Shafer: "Using color to separate reflection components," *Color Res. App.*, **10** (1985) 210-218.
 - 29) B.-T. Phong: "Illumination for computer generated pictures," *Commun. ACM*, **18** (1975) 311-317.

(2002年8月6日受理)