

分光情報に基づいた美術品の記録と再現

富永昌治 岡島良介 松本敏範
大阪電気通信大学 情報工学科

概要

美術品を映像として記録保存する手段として、RGB センサによるカラー情報よりも分光情報は有用である。本論文では、マルチバンドカメラシステムを用いて絵画の表面分光反射率を推定し、反射率データに基づいて画像を再現する手法を述べる。分光反射率は物体表面に固有の物体情報である。まず、適当な照明光源のもとで絵画を6色カメラで撮影する。次に、基準物体から求めた光源分光分布とカメラ出力から分光反射率を推定する。このとき分光分布と分光反射率の表現には線形モデルを用いる。そして、校正したディスプレイを用いて希望する照明下での絵画の映像を再現する。

キーワード デジタルアーカイブ、分光画像、マルチバンドカメラ、分光反射率

Record and Reproduction of Fine Art Based on Spectral Information

Shoji TOMINAGA, Ryouzuke OKAJIMA, and Toshinori MATSUMOTO

Department of Engineering Informatics

Osaka Electro Communication University

Abstract

Spectral information for recoding a variety of fine art as image data is useful rather than color information by RGB sensors. The present paper describes a method for estimating surface-spectral reflectance of a painted picture by using a multi-band camera system and reproducing the image based on the reflectance data. Surface-spectral reflectance is an inherent physical information to the surface. First, a painted picture is photographed with a six-color camera under a proper illumination. Next, the surface-spectral reflectance is estimated by the illuminant-spectral distribution from a reference object and the camera outputs. We use the infinite-dimensional linear model for illuminant and reflectance spectral representations. Moreover, an image of the painted picture under an desired illumination reproduced on a calibrated display device.

1. まえがき

近年、デジタルアーカイブの必要性が叫ばれているが、美術工芸作品を映像として記録保存する手段としてカラー画像よりも分光情報の利用が注目される。これは、通常の3チャンネルRGBのカメラによる映像記録ではいくつかの制約が存在するからである。第一に、対象美術作品（例えば絵画）のカラー画像は特定の

照明環境と観測条件でのみ有効である。例えば、ルノワールの絵画を室内の電球光で撮影すれば、これから屋外でみる絵画を予測することができない。第二に、撮影したカラー画像は機器依存、つまり使用したカメラに依存するので、絵画の普遍的な画像情報になり得ない。

この問題の一つの解法は、美術作品の映像よりもむしろ作品表面の分光反射率の集合を記

録保存することである。分光反射率は物体表面に固有の物体情報で、これが知れると任意の照明条件とカメラ感度での映像が生成できる。つまり照明光源とカメラに依存しない固有データとして保存できる。

さて、通常の RGB カラーカメラでは分光反射率の推定は困難である。これは本来分光反射率は波長の関数で、分光的に高次元であるからである。ただし、可視光の範囲 [400-700nm] では多くの物体の表面分光反射率はいくつかの基底関数の線形結合で表現できる。したがって、適当なセンサ数のマルチバンドカメラを用いれば、このような分光情報を獲得することが可能である。

我々は以前、照明光源の分光分布や物体表面の分光反射率といった分光情報の推定のために 6 色カメラシステムを構築した [1]-[3]。これは可視光の範囲を 6 つの波長帯に分割する 6 枚のカラーフィルタとモノクロ CCD カメラを組み合わせたもので、6 次元の分光画像データを得る。本論文では、この 6 色カメラシステムを用いて絵画を撮影し、分光画像から各画素の分光反射率データを保存することにより、光源に依存しない物理情報として保存が可能であることを示す。また保存した物理情報を基に再現する方法を実験結果とともに述べる。

2. カメラシステム

2.1 システム構成

図 1 に本論文で用いたカメラシステムを示す。本カメラシステムはモノクロ CCD カメラ (SONY model XC-75), 標準レンズ (Nikon Nikkor 35mm F1.4S), カラーフィルタ (Kodak ラッテンゼラチンフィルタ) 及びパソコン (NEC PC-9821XA16/W16) からなる。

カメラのダイナミックレンジを拡張するために、絞りを変えずに、シャッタースピードを変化させる。このためパソコンからカメラのシャッタースピードが設定できるような制御機能がある。しかし本研究では、物体からの鏡面反射を仮定しないため、絞りとシャッタースピードは一定にした。またビット分解能を向上させるめ

ために 10 ビットのフレームグラバーをパソコンに実装し、カメラからのモノクロ映像信号を 10 ビットで A-D 変換後、1024 レベルのデジタル信号として獲得している。

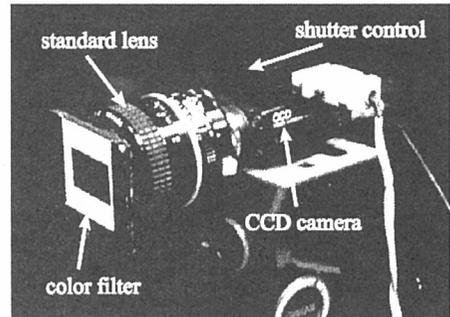


図 1 カメラシステム

2.2 カメラシステムの特徴

(1) 分光感度

分光反射率を推定の際にカメラの分光感度の正確な知識が必要である。我々はモノクロメータを用いてより厳密な分光感度の計測を行った。総合的な分光感度はモノクロ CCD カメラの分光感度、赤外線カットフィルタ及び 6 種類のカラーフィルタの分光透過率を組み合わせた分光感度関数となる。2 種類のフィルタの透過率は分光光度計を用いて計測した。カラーフィルタの選択法については後述する。

(2) ノイズ除去

電子的なランダム雑音の影響を除去するために、同一シーンを 8 回撮影し、これらをフレームグラバー上で平均して計測画像としている。また暗電流を除去するために、シャッタを閉じて撮影したオフセット画像を作り、計測画像から差し引いている。

2.3 フィルタの選択

どのようなフィルタを使用するかは、6 色カメラの色域と分光感度の決定から大変重要である。本研究では 6 色カメラの色域を青 (B), 青緑 (BG), 緑 (G), 黄 (Y), 短波長の赤 (B), 長波長の赤 (B2) としている。赤領域は波長の長短で 2 つのフィルタで分光することにした。本カメラシステムでの最適なフィルタを選択する手順は図 2 の流れで行った。

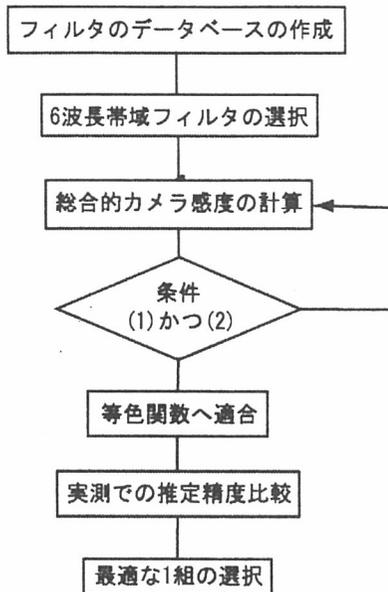


図2 フィルタ選択のフローチャート

(1) フィルタのデータベースの作成

フィルタ選択の際に用いたフィルタのデータベースは Kodak 社のフィルタ (150 種類) と富士フィルム社のフィルタ (176 種類) を用いて定めた. このデータベースから 6 つの色領域 (B,BG,G,Y,R,R2) に対応するフィルタを抽出し, 使用可能なフィルタとして振り分けを行った. 6 つのカテゴリから各一枚取り出して, 6 色フィルタの 1 組を作る. この組み合わせ方は約 200 億通り存在した.

(2) フィルタの選択方法

このような極めて多くの組み合わせパターンからフィルタを選択するためのプログラムを作成した. まずフィルタをひとつずつ交換し組み合わせを作成するための 6 重ループを作り, ループ中で総合的カメラ感度を計算する. このとき選択基準として 2 つ条件を設定した.

[1] 6 つの波長帯域に対応する分光感度のピーク波長が極端に接近していない.

[2] 分光感度 (帯域透過率) が極端に低くない.

(3) 等色関数への適合

本カメラシステムは分光計測とともに測色,

色再現にも使用している. そこで 6 つのフィルタの候補それぞれについて, 最小 2 乗法で等色関数への適合を行った. 測色にはカメラ系の総合的な分光感度 $R_k(\lambda)$ ($k=1, 2, \dots, 6$) を CIE (国際照明委員会) の等色関数 $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ に適合する必要がある. 等色関数とカメラ分光感度を, 波長 [400, 700nm] の間 5nm おきにサンプルして, 61 次元縦ベクトルで表す. このとき x, y, z 等色関数と分光感度関数を記号 $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6$ と記す. 等色関数への適合は次のようになる.

$$[\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}] = [R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6] \mathbf{M} \quad (1)$$

ここで \mathbf{M} は最小二乗法によって決まる 3×6 の変換行列である. この適合の平均 2 乗誤差が小さいものでフィルタの候補をさらに絞った.

(4) 実測での比較

候補フィルタについては実際のフィルタを用いて実験を行った. 昇華型プリンタで 45 色のカラーパッチを作成した. これをフィルタを装着したカメラで撮影して, 測色の精度を調べた. 光源として白熱電球, 蛍光灯 (三波形), 人工太陽光, 写真撮影用フラッド光電球, スライドプロジェクタを使用した.

カメラ出力から各カラーパッチの三刺激値 XYZ を推定し, これを分光光度計で直接計測した三刺激値と比較する. このような比較でもっとも測色精度のよいものを選択した. 最適のフィルタの組み合わせは以下のようなものである.

B	BPB-45
BG	NO44A
G	NO102+CC50G+CC50G
Y	NO21+CC50G+CC30G
R	BPB-60
R2	NO29+CC10G

ただし, Kodak フィルタ (NO44A, NO102, NO21, NO29), 富士フィルムフィルタ (BPB-45, BPB-60, CC10G, CC30G, CC50G)

図 3 はここで決定したフィルタによる総合的なカメラ分光関数である.

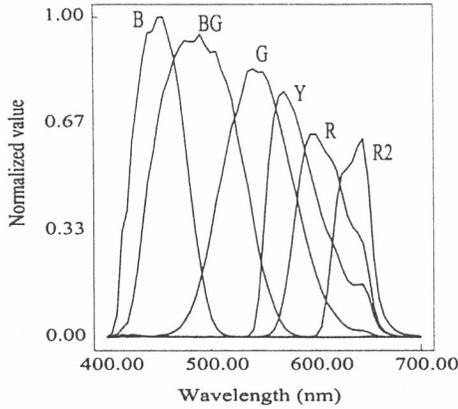


図3 カメラの総合分光感度関数

3. 分光関数とカメラ出力のモデル化

3.1 色信号と分光関数

物体表面で反射してカメラに入射する光を色信号と呼び、 $C(x, \lambda)$ と記す。色信号は波長 λ と位置のパラメータ x の関数である。物体表面の材質を不均質誘電体と仮定すれば、表面の反射率を2色性反射モデルで記述できる。つまり反射光は拡散反射と鏡面反射の二つの加法成分からなる。このとき色信号は次式のように表現できる。

$$C(x, \lambda) = \alpha(x)S(\lambda)E(\lambda) + \beta(x)E(\lambda) \quad (2)$$

ここで $S(\lambda)$ は物体の表面分光反射率、 $E(\lambda)$ は照明光の分光エネルギー分布である。(1)式の右辺の第1項と第2項は、それぞれ拡散と鏡面の反射成分を表し、係数 $\alpha(x)$ と $\beta(x)$ はそれぞれの重み係数である。

次に分光反射率を有限次元線形モデル (finite-dimensional linear model) で記述する。このモデル化は連続的な波長関数を少数の基底関数の線形結合によって近似することにより、推定する際の未知数を減らそうとするものである。表面分光反射率 $S(\lambda)$ は n 個の基底関数を用いて次式のように表現する。

$$S(\lambda) = \sum_{j=1}^n \sigma_j S_j(\lambda) \quad (3)$$

ただし $\{S_j(\lambda), j=1, 2, \dots, n\}$ は物体表面の分光反射率に対する基底関数の集合で、 σ_j は重

み係数の集合である。 n がモデルの次元を意味する。 $n \leq 6$ である。基底関数は既知であるので、このようなモデル化によって、分光反射率の推定は、カメラ出力から重み係数の集合 $\{\sigma_j\}$ を求める問題に帰着する。

3.2 基底関数

基底関数の作成には Kodak 社の反射率データと中川ケミカルの塩化ビニールサンプルを実測した反射率データをデータベースとした。前者は354色で、後者は153色の計507色の反射率データである。これを主成分展開し、寄与率の高い方から順に基底関数として採用した。図4に基底関数の最初の5つのパターンを描く。

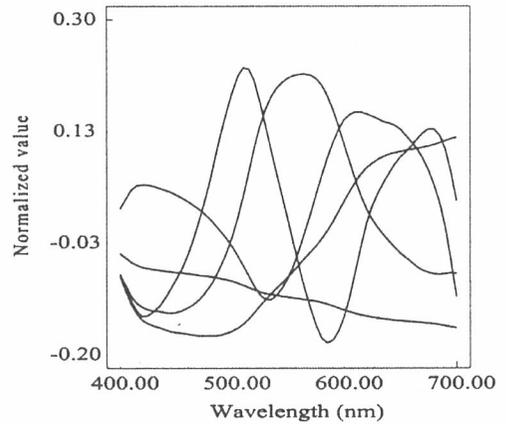


図4 基底関数 (最初の5つ)

3.3 カメラ出力

分光画像は空間位置 x において6つのセンサの出力からなり、出力は次式で与えられる。

$$\rho_k(x) = \int C(x, y) R_k(\lambda) d\lambda \quad (k=1, 2, \dots, 6) \quad (4)$$

ただし、積分区間は $[400, 700\text{nm}]$ で、 $R_k(\lambda)$ は図3のように分光関数を表わす。いま色信号に鏡面反射成分を含まないと仮定する。このときカメラ出力は次式となる。

$$\rho_k = \int E(\lambda) S(\lambda) R_k(\lambda) d\lambda \quad (k=1, 2, \dots, 6) \quad (5)$$

カメラ出力を反射率パラメータと結び付ける。まず線形モデルの(3)式を(5)式に代入すれば、

$$\rho_k = \sum_{i=1}^n \sigma_i \int E(\lambda) S_i(\lambda) R_k(\lambda) d\lambda \quad (6)$$

となり、つぎに $6 \times n$ 行列 \mathbf{H} を定義する。

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \int E(\lambda) S_1(\lambda) R_1(\lambda) d\lambda & \cdots & \int E(\lambda) S_n(\lambda) R_1(\lambda) d\lambda \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \int E(\lambda) S_1(\lambda) R_6(\lambda) d\lambda & \cdots & \int E(\lambda) S_n(\lambda) R_6(\lambda) d\lambda \end{bmatrix} \quad (7)$$

センサの出力 ρ_k ($k=1, 2, \dots, 6$) を縦ベクトル $\boldsymbol{\rho}$ で表現する。このとき出力ベクトルは

$$\boldsymbol{\rho} = \mathbf{H}\boldsymbol{\sigma} \quad (8)$$

でまとめられる。 $\boldsymbol{\sigma}$ は σ_i ($i=1, 2, \dots, n$) の縦ベクトルである。

4. 分光反射率の推定

各画素点におけるセンサ出力から分光反射率の推定は、(8)式において $\boldsymbol{\rho}$ から $\boldsymbol{\sigma}$ を求めることになる。この解は次式で与えられる。

$$\hat{\boldsymbol{\sigma}} = \mathbf{H}^+ \boldsymbol{\rho} \quad (9)$$

で求まる。 \mathbf{H}^+ は \mathbf{H} の一般化逆行列である。これより分光反射率の推定値は

$$\hat{S}(\lambda) = \hat{\sigma}_1 S_1(\lambda) + \hat{\sigma}_2 S_2(\lambda) + \cdots + \hat{\sigma}_n S_n(\lambda) \quad (10)$$

となる。

なおデータ量については、分光情報であっても大きく増大しない。例えば、分光反射率は 5nm ごとにサンプルされて、61 次元データであったとしても、線形モデルの次元でデータ量が決まる。我々は実験的に $n=5$ がもっとも効率よい記述であることを示している。このときの各画素は 5 次元の実数データで記述されることになる。カラーカメラの 3 次元の整数データを比べても、大きく増大していない。すなわち、前者は画素あたり 20 バイトで、後者は 3 バイトになる。

5. 画像の再現

絵画の反射率データが記録されているとし

て、これより任意の光源下における絵画の画像を生成することを考える。表示デバイスはカラーモニタを想定している。

5.1 反射率データから三刺激値への変換

ある照明光 $E(\lambda)$ での表面の三刺激値 XYZ は、記録された分光反射率 $\hat{S}(\lambda)$ から次式で求まる。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \int E(\lambda) \hat{S}(\lambda) \begin{bmatrix} \bar{x}(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) \\ \bar{z}(\lambda) \end{bmatrix} d\lambda \quad (11)$$

また、再現画像の画質を原画像と比較することがある。6つのカメラセンサの分光感度関数と等色関数の間に、(1)式の関係があると仮定する。このときカメラ出力から三刺激値の変換は次式のようになる。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \mathbf{M} \boldsymbol{\rho} \quad (12)$$

この \mathbf{M} は(1)式で最小二乗法によって決まる 3×6 変換行列である。なお、ここで得られた輝度を表す Y 値は相対的な値である。

5.2 三刺激値をモニタ上に表示

三刺激値 XYZ からモニタの RGB 値に変換する際に、輝度値 Y をモニタに会わせて決定する必要がある。再現する光源下で撮影した白色基準物体の輝度値の最大値を Y_w 、表示用モニタの白色の輝度値の最大値を Y_{\max} とすると、 $Y_w = Y_{\max}$ となるように変換する。

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \times Y_{\max} / Y_w \quad (13)$$

Y_{\max} はモニタによって異なり、また Y_w も再現する光源によって変化することに注意する。

三刺激値からの色再現の手順は図 5 のように色座標変換とガンマ補正の 2 段階からなる。三刺激値 $X'Y'Z'$ を行列で座標変換し、次にルックアップテーブルでモニタの RGB デジタル値に変換すればよい。

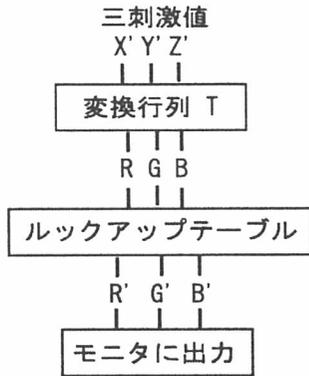


図5 色再現の手順

(1) 第一ステップの色座標変換の処理は以下ようになる。いまモニタの蛍光体色度 (x, y) と輝度 L を

$$\begin{aligned}
 R &: (x_R, y_R), L_R, \\
 G &: (x_G, y_G), L_G, \\
 B &: (x_B, y_B), L_B
 \end{aligned}$$

と記す。輝度 L は刺激値 Y に対応する。三刺激値 $X'Y'Z'$ からモニタ RGB への変換を

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} \quad (14)$$

で定義する。ここで \mathbf{T} は 3×3 の変換行列で、このとき RGB の各値の区間 $[0, 255]$ のアナログ値として算出される。これは最終的にはデジタル値に変換される。変換行列 \mathbf{T} は等色性の条件から次のように決まる[4]。

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \frac{255}{L_{R_{\max}}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{255}{L_{G_{\max}}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{255}{L_{B_{\max}}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{x_R}{y_R} & \frac{x_G}{y_G} & \frac{x_B}{y_B} \\ 1 & 1 & 1 \\ \frac{1-x_R-y_R}{y_R} & \frac{1-x_G-y_G}{y_G} & \frac{1-x_B-y_B}{y_B} \end{bmatrix}^{-1} \quad (15)$$

ここで $L_{R_{\max}}, L_{G_{\max}}, L_{B_{\max}}$ はモニタの各原色の最大輝度値である。

(2) 第二ステップはモニタの入出力の非線形性を補正である。このためのルックアップテーブルは RGB の各原色の入出力特性の逆特性を作ることになる(文献[4]参照)。このような 1 次元ルックアップテーブルを用いて、第一ステップで求めた RGB 値に対して、補正したモニタ $R'G'B'$ デジタル値に変換する。

6. 実験結果

6.1 マクベスカラーチャートを用いた実験

マクベスカラーチャートを 6 色カメラで計測し 6 枚の分光画像を獲得した。対象物の前方約 2m の距離に白熱電球(500W)を設置した。左右両方から 2 灯で対象物全体が均一照明されるようにした。カメラは物体に対して真正面から約 2.5m 離れたところに配置した。画像サイズは 389×629 である。

図 6 はマクベスカラーチャートの原画像である。計測された分光画像に対して(12)式の変換行列を用いて、三刺激値 XYZ に変換した。この画像データを前述の色再現の手順で SUN SPARC Station のモニタ (21 inch) 上で表示した。

さて、計測された分光画像の各画素について分光反射率の重み係数を推定した。また(10)式より 5 次元モデルを用いて分光反射率の連続分布を求めた。画像の再現は以下のである。まず、各画素の分光反射率(61次元)と指定した光源の分光分布から(11)式に基づいて、三刺激値 XYZ 値を算出する。つぎに、モニタ上に表示するために XYZ 値から RGB 値に変換する。光源は計測に用いた白熱電球と昼光 D65 光を仮定した。それぞれの分光分布関数を図 7 に示す。図 8 は白熱電球で生成した画像、図 9 は昼光 D65 の照明を仮定して再現した画像を示している。

図 8 は図 6 の原画とほぼ一致した。また D65 を仮定した図 9 についての精度は、検査用 D65

の昼光色の蛍光灯でマクベスカラーチャートを照射して調べた。蛍光灯の分光分布は図7とは異なるが、演色性はよいものと仮定して使った。各パッチの三刺激値 XYZ 値を分光光度計で計測し、 $L^*a^*b^*$ 値に変換した。同様に図9の XYZ 値から $L^*a^*b^*$ 値と比較を行った。両者間の $L^*a^*b^*$ の色差で最大はパッチ番号 18 (Cyan) であった。なおモニタ上の視覚実験では、両者はほぼ一致した色見を与えた。

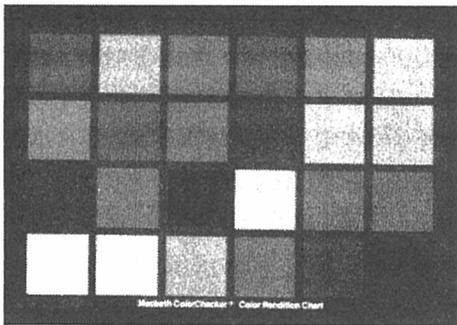


図6 原画像 (光源：白熱電球)

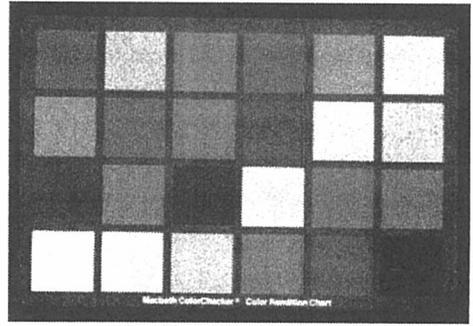


図8 再現画像 (光源：白熱電球)

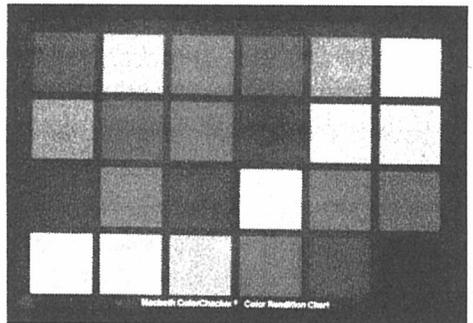


図9 再現画像 (光源：D65)

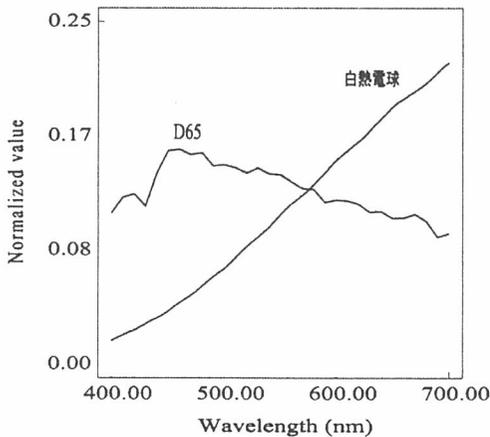


図7 再現に用いた光源の分光分布

6.2 実際の絵画を用いた実験

図10は絵画の原画で、風景を描いた油絵である。上述の実験と同様な計測条件である。カメラは約3m離れたところに配置した。鏡面反射はほとんど観測されない。画像サイズは324×526である。図10は分光画像を XYZ 値に変換してからモニタに表示した画像を示す。

図11はカメラデータから分光反射率を求め、同一の白熱電球の照明で再現した画像である。また図12は光源を D65 と仮定して生成した画像を示す。

図11の再現画像は図10の原画とほぼ一致していることがわかる。また図12の妥当性は視覚実験で確認した。これらの実験より、反射率推定に線形モデルを適用し、推定した重み係数の約5Mバイトを保存しておけば、カメラの分光感度、基底関数、光源の分光分布はすべて既知であるから、任意の照明条件での画像の再現が可能である。



図10 絵画の原画（光源：白熱電球）



図11 再現画像（光源：白熱電球）



図12 再現画像（光源：D65）

7. むすび

本論文では、マルチバンドの6色カメラを用いて絵画を撮影し、分光画像から分光反射率の推定を行い、画像の保存・再現する手法を述べ

た。カメラシステムはモノクロ CCD カメラ、標準レンズ、6種類のカラーフィルタ及びパソコンからなる。

本研究では美術品、特に絵画を対象物体とした。一般にデジタルカメラで撮影した画像を保存するということが考えられるが、これらは撮影時の照明光源の影響を受けている。一方、分光画像から各画素に対応する物体表面の反射率を求めることにより、光源に依存しない物理情報の保存が可能である。しかし、そのまま反射率データを保存すると、各画素あたり 61次元のデータが必要になり、容量的には膨大になる。線形モデルを用いれば、5次元の重み係数を倍精度実数（8バイト）あるいは単精度（4バイト）で記録するときことにより、保存データの容量を軽減できる。この係数データのみから任意の照明下での物体画像の生成が可能である。

本論文では、光反射について拡散反射のみ仮定し、鏡面反射の影響は考慮に入れていない。特に表面に凹凸のある絵画や油彩には鏡面成分を考慮すれば質感がさらに向上する。この推定問題は今後の重要な課題である。

文 献

- [1] S. Tominaga, "Multichannel vision system for estimating surface and illumination functions," J. Opt. Soc. Am. A, vol. 13, no. 11, pp. 2163-2173, 1996.
- [2] 富永昌治, 高橋悦史, "6色カメラによる分光情報推定", 電子情報通信学会論文誌, vol. J82-D II, no. 7, pp. 1180-1189, 1999.
- [3] S. Tominaga, "Multi-channel cameras and spectral image processing," Proc. Int. Symp. on Multispectral Imaging and Color Reproduction for Digital Archives, pp. 18-25, 1999
- [4] 富永昌治, "3次元空間における物体色のリアルな生成とその評価," 情報処理学会論文誌, vol. 34, no. 2, pp. 289-301, 1993