

油彩画の分光的レンダリングと分光反射率の圧縮

田中 法博†

富永昌治‡

長野大学 産業社会学部産業情報学科†

大阪電気通信大学 情報通信工学部情報工学科‡

要旨

油彩画をデジタルデータとして分光的に記録・映像生成するための効率的な手法を提案する。我々は画像の品質を落とさずに大幅な分光データの圧縮が可能であることを示す。まず、マルチバンドカメラを用いた計測系を述べる。油彩画の表面は、(1)表面形状、(2)分光反射率、(3)光沢パラメータの3種類の情報として獲得される。これらの表面の性質をカメラデータから推定する方法を示す。次に、実際の油彩画から推定した分光反射率を統計的に解析する。このとき抽出した主成分ベクトルを基底関数に用いれば、全ての分光反射率を効率よく表現できる。この線形モデルを用いれば、分光画像データの大幅な圧縮が可能で、画像に品質も劣化しないことを示す。最後に、画像のレンダリング結果について信頼性を実験的に調べる。

Spectral Rendering of Oil paintings and Compression of Spectral Reflectance

Norihiro Tanaka† and Shoji Tominaga‡

Department of Industry Information Science
Nagano University†

Department of Engineering Informatics
Osaka Electro Communication University ‡

Abstract

An effective method is proposed for spectral recording and image rendering of oil paintings as digital data. It is shown that spectral data are significantly compressed without degradation of image quality. First, we show a measuring system using a multi-band camera. The surface of an oil painting is acquired as three kind of information of (1) surface shape, (2) spectral reflectance, and (3) gloss parameters. We show how to estimate these surface properties from the camera data. Next, the spectral reflectances estimated from real oil paintings are analyzed statistically. All spectral reflectances are effectively represented using the extracted principal component vectors as basis functions. Moreover it is shown that the linear model provides a significant compression of spectral image data without quality degradation. Finally, the reliability of the proposed method is investigated experimentally based on the rendered images of oil paintings.

1. はじめに

高い質感で油彩画を映像化するためには、3次元コンピュータグラフィックス(3DCG)によるレンダリングが最も有効である。油彩画の質感は、絵の具のタッチによる凹凸感や絵の具の表面の光沢に大きく影響を受ける。このような質感は照明光、物体表面、視覚系の幾何的な位置関係により、その見えが異なるため3次元情報の獲得と3DCGによる映像化が求められる。

油彩画のレンダリングは通常のRGBカラー情報に基づいた表現では、異なった視環境における絵画の見えを高精度な画像として生成ができない。例えば油彩画のデジタルアーカイブでは、絵画表面を適当な光源の下、カメラで観測するが、このとき得られる色情報は、照明環境やカメラの感度特性に依存する。美術絵画の

保存にはこういった環境への依存性は大きな問題で、できるだけ独立することが望ましい。

我々はこれまでに3次元光反射モデル推定[1]に基づいて、油彩画表面の形状や光沢特性を含めて分光的に油彩画を記録・映像再現する方法を提案した[2-3]。また分光反射率の推定精度を向上させるためにマルチバンドカメラによるシステムを提案した[4]。

しかしながら分光データによる画像記録は、一般的なRGBカラー情報による画像記録よりも遥かに多くの記憶容量を必要とする。例えば、一画素あたりカラーであれば3バイトで表現されるが、分光反射率を400-700nmの可視域において5nmでサンプルすれば、一画素あたり61個の数値データが必要となる。

さて多くの自然物体と人工物体の表面分光反射率は全く独立した物理量ではなくて、統計的な特徴を持っていることが知られている。すな

わち、すべての分光反射率データを解析すれば、幾つかの基底関数の線形結合で近似表現できる。実際 Cohen[5]はマンセル色票の分光反射率が3つの主成分パターンで表現できることを示した。また Maloney[6], Parkkinen[7], Vrhel[8]らは実際の物体表面を調べて、少数の基底関数で物体表面の分光反射率を表現できることを示した。

本稿では、対象を油彩画に限定し、その表面特性を(1)表面形状,(2)分光反射率,(3)光沢パラメータの3種類の情報として獲得する。次に、実際の油彩画から推定した分光反射率を統計的に解析する。このとき抽出した主成分ベクトルを基底関数に用いれば、全ての分光反射率を効率よく表現できる。この線形モデルを用いれば、分光画像データの大幅な圧縮が可能で、画像に品質も劣化しないことを示す。最後に、画像のレンダリング結果について再現精度と信頼性を実験的に調べる。

2. 計測系

分光反射率の計測精度を向上させるため、通常の RGB3 チャンネルのカメラではなく、6つのチャンネルを持つマルチバンドカメラシステムを用いて油彩画を記録する。図1は油彩画の計測シーンを示す。計測に用いたシステムはモノクロ CCD カメラ(東京電子 CS3920)とスライドプロジェクターと6枚のカラーフィルタである。カメラは200万画素の解像度を持つ。この6枚のカラーフィルタは光源側に取り付ける。絵画の各種表面特性を推定するために、図1のように照明方向を変えながら複数枚撮影した。図2はカラーフィルタの透過率を含めたカメラ系の総合的な分光感度である。

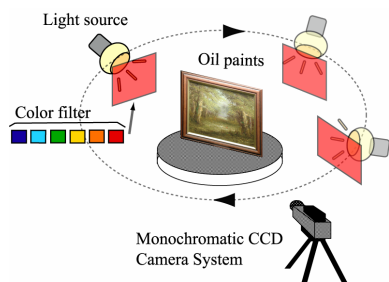


図1. 絵画の計測シーン

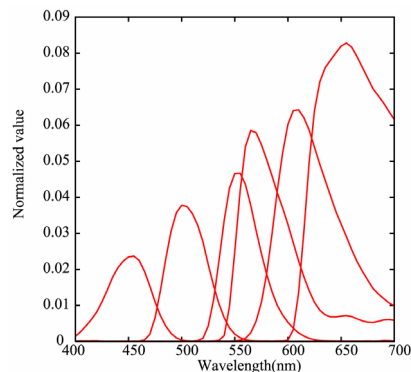


図2. カメラ系の総合分光感度

3. 3次元分光反射モデル

油彩画表面の色は環境に依存しないように分光的な3次元光反射モデルに基づいて記録・画像再現を行う。油彩画の具は、プラスチックなどと同様に不均質誘電体と仮定することができる。すなわち油彩画表面は拡散反射と鏡面反射から成る2色性反射特性をもつと仮定した。これを Torrance-Sparrow モデルで記述する[9]。

図3はこの幾何モデルである。物体表面は微小面で構成されると仮定し、この微小面の法線ベクトルの分布により物体表面の粗さ(ハイライトの鋭さ)が決まる。ここで表面の粗さは絵の具の盛り上がりによる凹凸より細かく、また画素サイズよりも十分に小さい微小な凹凸を想定している。表面からの反射光の分光放射輝度は関数で次式のように記述できる。

$$Y(\lambda) = (\mathbf{N} \cdot \mathbf{L}) S'(\lambda) E(\lambda) + \beta \frac{D(\phi, \gamma) F(\theta_0) G(\mathbf{N}, \mathbf{V}, \mathbf{L})}{\mathbf{N} \cdot \mathbf{V}} E(\lambda) \quad (1)$$

右辺第1項は拡散反射成分で、第2項は鏡面反射成分である。 \mathbf{L} と \mathbf{V} はそれぞれ光源と視覚系を向く単位方向ベクトルである。 $E(\lambda)$ は光源の分光分布であり、 $S'(\lambda)$ はシェーディングの影響を補正した分光反射率である。分布関数 D はガウス分布を仮定した。 θ_0 は法線 \mathbf{N} と微小面の面法線 \mathbf{H} (\mathbf{L} と \mathbf{V} の2等分線)のなす角、 γ は表面粗さのパラメータである。 G は幾何学的な減衰因子、 F は不均質誘電体のフレネル関数である。ただし、屈折率は既知で定数とした。拡散反射成分は分光反射率 $S'(\lambda)$ から推定し、鏡面反射成分は β, γ から推定する。

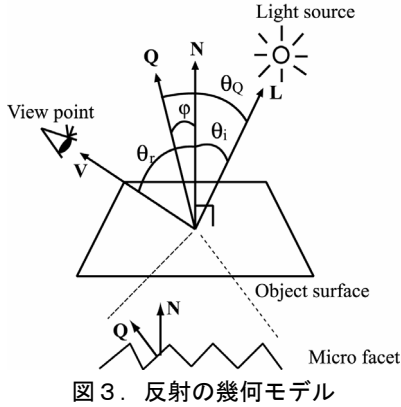


図3. 反射の幾何モデル

4. 表面反射特性の推定

油彩画の表面特性をデジタル化して記録する。この記録される情報は(1)油彩画表面形状、(2)分光反射率、(3)鏡面反射パラメータの3種類である。まずカメラ出力を拡散反射成分と鏡面反射成分に分離し、拡散反射成分から物体表面の面法線ベクトルと分光反射率を推定する。次に鏡面反射成分から反射モデルの鏡面関数のパラメータを推定する。

4. 1. 表面形状の推定

油彩画の表面の凹凸は、直接3次元的な形状を推定せずに、法線ベクトルの集合として近似する。この法線ベクトルの集合は拡散反射成分のみの画像から照度差ステレオ法を用いて推定する。まず光源の照度分布を補正するために、絵画と同条件で白色板を計測し、カメラ出力をこの照度で割る。ここで9枚の計測画像の中で拡散に基づく画像がk枚あったとする。各画素におけるk個の画像強度をk次元横ベクトルYで表わす。次にYに対応したk種類の光源方向ベクトルの集合を3×k行列Lで表わす。さらに3×1縦ベクトルNを物体の面法線ベクトルとする。このとき三者の関係は Lambert の余弦則より次式のようになる。

$$Y = \alpha(N \cdot L) \quad (2)$$

ここでαは拡散反射の強さを表わす係数である。

Lの一般化逆行列をL⁺、N' = αNとして、

$$N' = Y \cdot L^+ \quad (3)$$

が得られる。法線は N = N' / ||N'|| から求まる。

4. 2. 分光反射率の推定

分光反射率も拡散反射成分から推定する。このときカメラ出力は次式のように記述できる。

$$\rho_k = \int_{400}^{700} S'(\lambda) E_k(\lambda) R(\lambda) d\lambda \quad (k=1,2,\dots,6) \quad (4)$$

ここでR(λ)はモノクロ CCD カメラの分光感度である。E_k(λ)はカラーフィルタを用いた6つの照明光の分光分布である。6次元カメラデー

タから、可視域[400-700(nm)]にわたる分光反射率を推定する。ここでカメラ系のノイズ成分を考慮するために、Wiener 推定を採用する。いま分光反射率をn次元ベクトルで表現し、そのn×n相関行列をS_{SS}、カメラ感度と照明光からなる6×n行列をRとおく。観測ノイズ分散をσ²とする。このとき分光反射率の推定値Ŝは次式で求まる。

$$\hat{S} = S_{SS} R^T [R S_{SS} R^T + \sigma^2 I]^{-1} \rho \quad (5)$$

ここでノイズ分散は信号電力に対して0.01-0.1程度が適切であることが実験的にわかった。

4. 3. 反射モデルパラメータの推定

計測した画像の鏡面反射成分から反射モデルパラメータを抽出する。各画素点において、9方向からのカメラ出力を調べると、鏡面反射を含むのは一回の可能性のみである。すなわち可能性が大きいのはカメラ出力が最大となるときだけ考慮すればよい。そこで画素毎に鏡面反射成分は計測した9枚の画像から抽出できる。このとき9枚の画像のうち鏡面反射成分は、分光反射率値が最大となる分光反射率S_p(λ)を選び、それから次式のように推定した分光反射率S'(λ)を引くことにより抽出する。

$$P = \int_{400}^{700} \{S_p(\lambda) - S'(\lambda)\} d\lambda \quad (6)$$

このように抽出した鏡面反射成分を(1)式の反射モデルの鏡面関数に適合させる。ここでは未知のモデルパラメータは(1)式のβとγの2つの未知パラメータであり、これらを推定した。絵画の表面は不均質誘電体であると仮定すると、鏡面反射成分は画素の位置に依存せずと同じ色であると考えられる。この仮定の基に鏡面反射成分は画像から統計的に解析した。特に反射パラメータのβとγは次式の最小化により選択した。

$$e = \min \sum_j \left\{ \left\| P_j \frac{(N_j \cdot V_j)(N_j \cdot L)}{G(N_j, V_j, L) F(\theta_{Q_j})} - \beta D(\varphi_j, \gamma) \right\|^2 \right\} \quad (7)$$

5. 分光反射率データの解析と圧縮

油彩画表面の分光反射率データを分析して、その圧縮を検討する。本研究で扱う分光反射率は400nmから700nmまでの可視波長域における連続関数である。分光反射率の形状は統計的にみれば幾つかの特徴をもち、その性質を利用すればデータの圧縮が可能である。

5. 1. 分光反射率の統計的解析

文献[5-8]の指摘を拡張すれば、油彩画の分光反射率は少数の基底関数の線形結合で表すことができると思うことができる。このとき分光

反射率 $S'(\lambda)$ は n 個の基底関数 $S_i(\lambda)$ を用いて、次式で記述できる。

$$S'(\lambda) = \sum_i^n w_i S_i(\lambda) \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (8)$$

ここで w_i は基底関数の重み係数である。もし基底関数 $S_i(\lambda)$ が既知の共通データであれば、絵画表面の分光反射率の全データは、 n 個の重み係数 w_i のみを記録するだけでよいことになる。

本研究では分光反射率を可視域において 5nm 間隔でサンプリングし、61 次元ベクトルで表す。また油彩画の画素数を m とする。このとき分光反射率の集合を $m \times 61$ の行列 \mathbf{M} で表す。

行列 \mathbf{M} に対して主成分分析を行い、得られた主成分ベクトルを絵画分光反射率の基底ベクトルとする。

次に、油彩画の分光反射率を記述するために必要な主成分ベクトルの数を決定する。ここでは第 1 主成分ベクトルから順に寄与率を調べていき、これらの累積寄与率に基づいて主成分ベクトルの数 n を決定する。基底関数の数 n が決まれば、油彩画の分光データの記録は、 n 個の重み係数（スカラー値）のみを保存すればよい。

5. 2. 基底関数の重み係数の推定

油彩画の分光反射率の再計算を行う。この計算は基底関数の重み係数推定に帰着する。

n 個の基底関数からなる $n \times 61$ の行列 \mathbf{s} 、 $n \times 1$ の基底関数の重み係数行列 \mathbf{w} とする。そして各画素の分光反射率 $S'(\lambda)$ をサンプリングし 61×1 の縦ベクトルで表したものを \mathbf{S} とする。これらの関係は次式のように記述できる。

$$\mathbf{s} = \mathbf{S}\mathbf{w} \quad (9)$$

ここで重み係数ベクトル \mathbf{w} は基底関数と元画像の分光反射率から最小二乗法により求める。

6. 油彩画のレンダリング

図 4 は、計測からレンダリングまでの過程を示したものである。前節までに画像計測から分光反射率を推定し、分光反射率データを主成分分析に基づいて計算するところまで述べた。

ここでは再計算した分光反射率 $S'(\lambda)$ を用いて出力デバイスの色特性に依存しない油彩画のレンダリング方法を述べる。 $S'(\lambda)$ は、(9)式により再計算し、先に推定した法線情報、反射モデルパラメータを併せてレンダリングに用いる。レンダリングには 2 枚の三角ポリゴンで長方形を作成し、このポリゴン上に分光反射率と法線情報をマッピングする。このマッピングしたポリゴンをレンダリングする。ここでは (1) 式の分光モデルに基づいて次式のように三刺激値 $[X, Y, Z]$ を算出する。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \int_{400}^{700} Y(\lambda) \begin{bmatrix} \bar{x}(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) \\ \bar{z}(\lambda) \end{bmatrix} d\lambda \quad (10)$$

ここで $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ は等色関数である。三刺激値は、出力用カラーデバイスに依存しないため、正確に物体色の見えを決定できる。

三刺激値から表示デバイスの RGB 値への変換は、出力デバイスの色特性を分光放射輝度計で計測し、そこから得られた変換マトリックスとルックアップテーブルを用いて変換する。

7. 実験

2 枚の油彩画を計測し、その分光反射率の特性を調べた。まず各油彩画の分光反射率、表面形状、反射モデルパラメータを推定した。これらの推定した情報を用いて、任意の照明・観測環境における油彩画の見えをコンピュータグラフィックスで再現した。図 5 と図 6 は推定した分光反射率データを圧縮せずに再現した 2 種類の油彩画の CG 画像である。図 5 は日光 D65 照明を想定し、図 6 は電球光照明を想定している。

次に、推定した分光反射率データを主成分分析した。第 1 主成分ベクトルから寄与率に基づいて順に、分光反射率の基底関数を決めた。図 7 は得られた基底関数のうち、最初の 5 つを示す。図 7 において、第 1 主成分から第 5 主成分までの累積寄与率は、順に 0.9772、0.999、1.000、1.000、1.0000 となる。

基底関数の数と油彩画の再現精度を調べた。図 8 では、基底関数を 3 つから順に増やしていき、元画像と提案手法で再現した画像間での色差を示す。横軸は基底関数の数で、縦軸は CIE $L^*a^*b^*$ 空間での平均色差である。一般的に $L^*a^*b^*$ 誤差は、2.0 以下であれば、色の識別は難しいといわれていることから、3 つの基底関数で、ある程度実用的な色再現精度を持っているといえる。図 9 は分光反射率データを、3 つの基底関数に圧縮して画像再現した結果である。3 つの基底関数を用いる場合、記録すべき情報は、3 つの重み係数だけでよい。つまり、この方法では、3 つの色成分を持つ RGB カラー画像と同程度の記憶容量で分光画像を記録できるといえる。なお採用する基底関数の数を増加させれば、画像の再現精度を確実に向上させることができる。しかし、基底関数を 5 つ以上にしても、精度の大きな向上は望めないこともわかった。図 10 (a) は、提案手法を用いて 3 つの基底関数で生成した画像と元画像の差分画像である。また図 10 (b) は基底関数を 4 つに増やした場合の、差分画像である。基底関数が 4 つになれば、ほとんど元画像と視差はなくなっていることがわかった。なお、図 10 の 2 つの画像は、

画像間の輝度差を分かりやすくするために、画素値の倍率を上げて表示した。

8. おわりに

本論文では、分光的に油彩画を記録・画像再現する手法を提案した。この方法の特徴は、照明環境や計測系に依存しない油彩画のデジタルアーカイブが行えることである。このとき分光情報は、RGBカラー情報と比較して、多くの記憶容量を必要とするが、本稿では分光反射率の統計的特徴を用いて、記録データを圧縮する方法を提案した。分光反射率は、少数の基底関数で近似表現できることが知られているが、こういった方法では、実際に記録する情報は基底関数の重み係数だけなので、分光データの記録容量を直接記録するよりも大幅に節約できる。本研究では特に油彩画独自の基底関数を用いることにより、分光反射率の記録精度を向上させた。

参考文献

[1] 田中法博, 富永昌治: 3次元反射モデルの解析と推定, 情報処理学会論文誌 CVIM, Vol.41, No.10, pp.1-11, 2000.

[2] 富永昌治, 田中法博: カラーカメラを用いた美術絵画の計測とレンダリング, 情報処理学会論文誌, Vol.45, No.1, pp.350-361, 2004.

[3] S. Tominaga and N. Tanaka: "Measuring and Rendering Art Paintings Using an RGB Camera", Proc. of EUROGRAPHICS 2002, pp.299-306, 2002.

[4] 田中法博, 駒田隆之, 富永昌治: マルチバンドカメラを用いた油彩画の計測とレンダリング, Visual Computing/グラフィックスと CAD 合同シンポジウム 2003, pp. 165-170, 2003.

[5] J. Cohen, Dependency of the spectral reflectance curves of the Munsell color chips, *Psychonomical Science*, Vol. 1, pp.369-370, 1964.

[6] L. T. Maloney: Evaluation of linear models of surface spectral reflectance with small numbers of parameters, *J. of Optical Society of America A*, Vol. 10, pp.1673-1683, 1986.

[7] J. P. S. Parkkinen, J. Hallikainen, and T. Jaaskelainen: Characteristic spectra of Munsell colors, *J. of Optical Society of America A*, Vol. 6, No. 2, pp.318-322, 1989.

[8] M. J. Vrhel, et al.: Measurement and analysis of object reflectance spectra, *Color Research and Application*, Vol.19, pp.4-9, 1994.

[9] K. E. Torrance and E. M. Sparrow: Theory for off-specular reflection from roughened surfaces, *J. of Optical Society of America A*, Vol.57, No.9, pp.1105-1114, 1967.

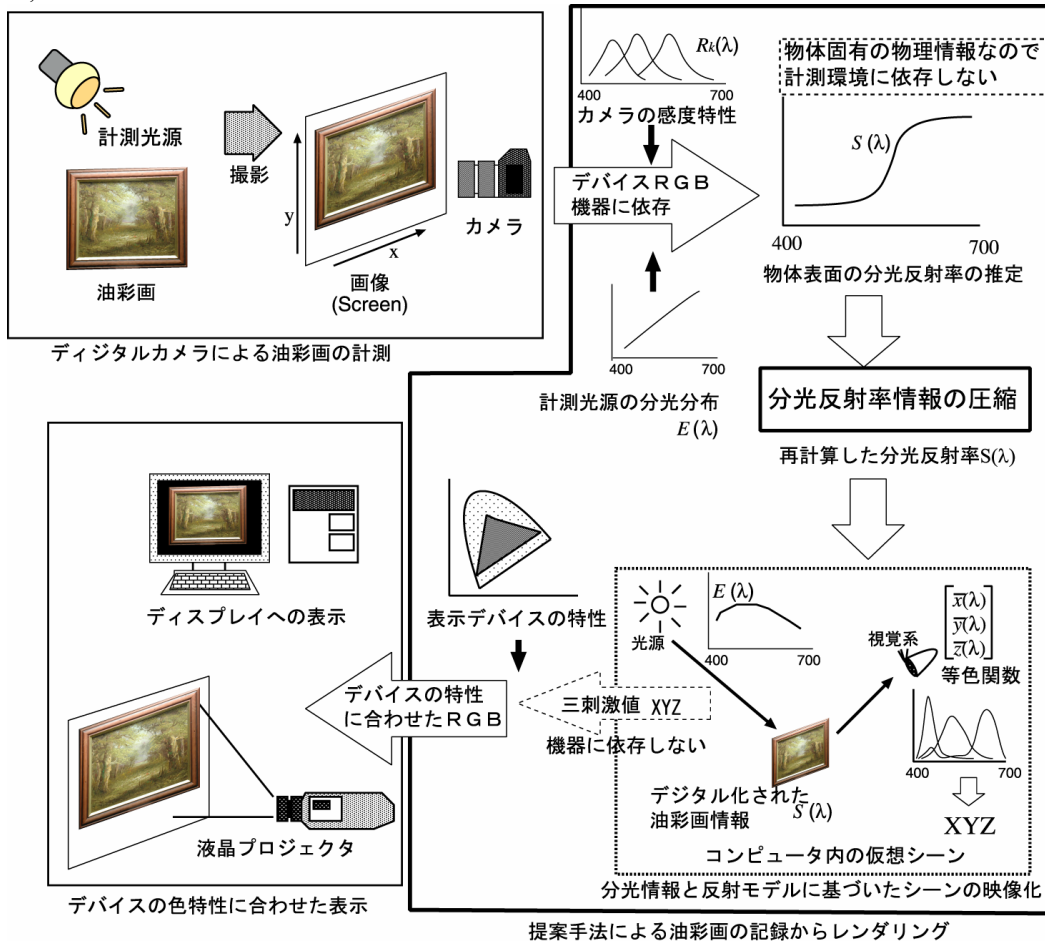


図4. 油彩画の計測からレンダリングまでの過程



図 5. 屋光下でレンダリングした油彩画
(無圧縮)



図 9. 油彩画 1 を 3 つの基底関数で再現した画像



図 6. 電球光下でレンダリングした油彩画
(無圧縮)



(a) 基底関数 3



(b) 基底関数 4

図 10. 元画像と近似画像の差分画像

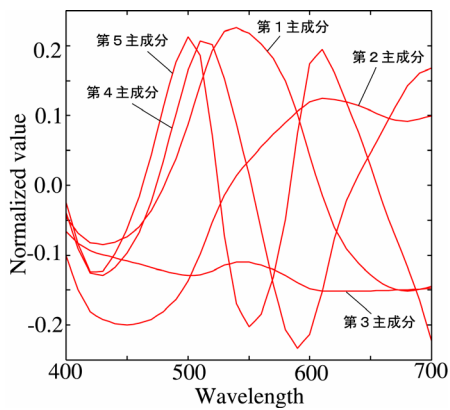


図 7. 油彩画分光反射率の基底関数

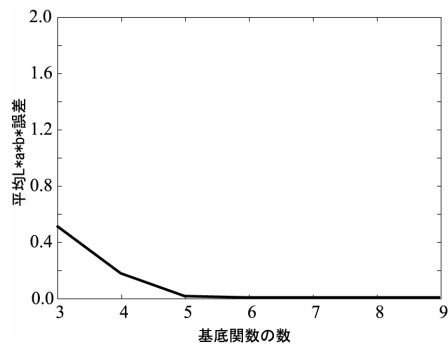


図 8. 基底の数と画像再現における色差の関係