

カラーカメラを用いた美術絵画の計測とレンダリング

富永昌治[†] 田中法博[†]

汎用のカラーカメラと照明光源を用いる簡単な撮像系で美術絵画を計測し、それを希望する照明と観測条件でコンピュータグラフィックス画像として再現する方法を提案する。絵画の表面形状は、3次元自由曲面よりも、むしろ平面のキャンバスに絵の具を塗った凹凸の浅い面として考える。その表面材質は拡散反射成分と鏡面反射成分からなる2色性反射の性質を持つ不均質誘電体と見なせる。我々は光源の位置を移動して、絵画表面を異なった方向から照明し、複数の画像を撮影する。これによって各画素において拡散反射成分のみからなる観測データを分離して獲得することができる。まず、これらの拡散反射成分の輝度値を用いて、形状情報として各画素における面法線を、レンジファインダを用いずに照度差ステレオ法に基づいて推定する。次に、分光反射率を拡散反射成分のカメラ出力のRGB値に3次元線形モデルを適用して推定する。さらに、画像生成のための3次元光反射モデルとして Torrance-Sparrow モデルを採用し、観測データの鏡面反射成分に鏡面反射関数をあてはめて反射モデルのパラメータを推定する。最後に、油彩画を用いた実験で提案した手法の実用性を示す。

Measuring and Rendering Art Paintings Using a Color Camera

SHOJI TOMINAGA[†] and NORIHIRO TANAKA[†]

A method is proposed for measuring an art painting by using the simple imaging system of an RGB camera and a light source, and rendering the painting as computer graphics images under any conditions of illumination and viewing. The surface shape of an art painting is considered as the rough plane with paints on a flat canvas, rather than a 3D curved surface. The surface material is an inhomogeneous dielectric with the dichromatic reflection property that is described in terms of the diffuse reflection component and specular reflection component. We capture some images of the same painting under different illumination directions, so that the diffuse reflection component at each pixel is extracted from the observed data. First, the surface normal of shape information is estimated from the diffuse component, based on a photometric stereo without using a rangefinder. Next, the surface-spectral reflectance is estimated from the RGB values for the diffuse component based on the 3Dlinear model. Moreover, the Torrance-Sparrow model is used for image rendering. The specular function is fitted to the observed specular reflection data for estimating reflection parameters. Finally, an experiment using an oil painting is executed for demonstrating the feasibility of the proposed method.

1. はじめに

美術絵画のデジタルアーカイブは、絵画をデジタル画像として取り込んで映像再現する技術を基本とする。このためデジタルカメラを入力装置として絵画の高品質なカラー画像が獲得されてきた。たとえば、英国国立美術館の VASARI (Visual Arts System for Archiving and Retrieval of Images) システムは、絵画表面の高分解能で正確な測色を実現するために、7つの色バンドを持つ照明・撮像系を絵画に沿って細かく走査する大がかりなものであった¹⁾。最近ではカメ

ラの性能向上にともなって RGB カラーセンサを持つ高分解能のデジタルカメラが一般に使用されている。

しかし三原色 RGB のカラー画像は使用デバイスに依存し、照明や観測は撮影時の条件でのみ有効であるという制約を持つ。たとえば、室内の電球光の下で撮影した絵画を、異なった昼光照明の下で鑑賞する絵画として生成することはできない。このため色情報よりもむしろ絵画表面の分光反射率情報を利用する方法が検討され始めた^{2)~5)}。分光反射率は物理情報として重要で、絵画表面の全点における分光反射率が獲得できれば、任意の光源分光分布を持つ照明下で絵画の物体色を生成できる。

しかしながら、油絵のような絵画の質感を再現するためには、分光反射率のみでは十分とはいえない。こ

[†] 大阪電気通信大学
Osaka Electro-Communication University

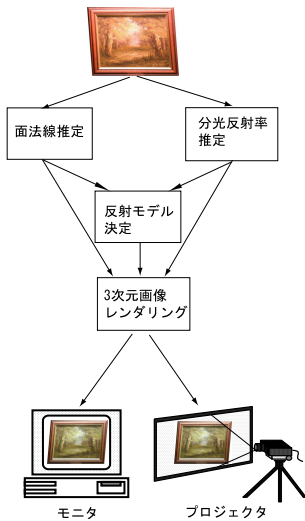


図 1 美術絵画の計測から画像生成までの流れ

Fig. 1 Flow from measurement to image rendering for an art painting.

のような絵画の表面材料は厚い油膜層からなり、表面は粗いけれども光沢やハイライトが観察される。したがって絵画を拡散反射する平面体ではなくて、光沢のある凹凸物体と見なすべきで、絵画の映像生成には物体表面の何らかの形状情報が必要となる。我々はこの考え方にに基づき、分光データと形状データ両方を用いた美術絵画の記録生成法を提案した⁶⁾。我々はこのとき三次元形状データをレーザレンジファインダで獲得し、可視光の分光データをマルチバンドカメラで取得した。しかしレンジファインダとマルチバンドカメラはともに特殊な計測器といえる。特に、レーザレンジファインダは光沢のある細かい凹凸面を精度良く計測できないことがあり、またレーザ光を照射することによる絵画表面への影響も懸念される。

本論文では、汎用の RGB カラーカメラのみを用いる簡単な撮像系で美術絵画を計測し、希望する環境下でのその絵画をコンピュータグラフィックス画像として映像化する方法を述べる⁷⁾。図 1 は美術絵画のデジタルアーカイブのために計測から画像生成に至る提案手法の流れを示す。

まず、分光反射率の推定は重要なステップである。絵画の表面は 2 色性反射の性質を持ち、反射光は拡散（内部）成分と鏡面（界面）成分の 2 つの加法成分に分かれる。分光反射率関数はこのうち拡散成分から推定される。ここでは光源の照明方向を変えながら観測したカメラの RGB 出力から、各画素における分光反射率が比較的良く推定できることを示す。なお、分光反射率は波長に関する無限次元データであるが、多く

の分光反射率データから統計的に得られた 3 次元線形モデルにあてはめることができる。これにより RGB の 3 次元データから分光反射率の推定が可能になる。

次に、絵画の表面形状をキャンバスに絵の具を塗り付けた凸凹の浅い面と見なせば、デジタルアーカイブのために完全な 3 次元曲面を構築する必要はない。ここでは各画素点における面法線を形状情報として獲得する。このために照明方向を変えて撮影したカメラデータから照度差ステレオ法に基づいて法線を推定する。レンジファインダは使用しない。

推定した分光反射率と面法線のデータは反射モデルを決定するために使用される。我々は画像生成のための 3 次元光反射モデルとして Phong モデル⁸⁾ よりも詳細な Torrance-Sparrow モデル⁹⁾ を採用した。この反射モデルの鏡面関数を鏡面データに適合して反射モデルパラメータを決定する。

最後に、すべての分光反射率と面法線データは 3 次元反射モデルを介して結合され、希望する照明と観察の条件での絵画がコンピュータグラフィックス画像として映像化される。画像表示装置としてはモニターやプロジェクタが想定されるが、本論文ではこのような表示装置へ測色的な色再現でカラー画像を表示する。なお、照明条件は環境光を含むような任意の条件で、しかも任意の分光分布を想定することができる。

以下では、まず 2 章で汎用カラーカメラと照明光源を用いた計測系の概要を示す。3 章で面法線の推定法を、4 章で分光反射率関数の推定法を述べる。5 章で絵画の反射モデルを記述し、モデルパラメータを決める方法を示す。6 章では、実際の油絵を用いた実験を行う。まず分光反射率と面法線の推定精度を調べ、観察環境を変えた絵画のレンダリング結果から提案法の実用性を示す。

2. 計測系

図 2 は絵画を計測するための撮影環境を描いている。カメラはつねに絵画面に対して垂直の方向に位置しており、光源の位置は移動する。RGB デジタルカメラ (Canon D30) を用いて、 2160×1440 画素の分解能と各チャンネル 12 ビットの量子化で、絵画の画像を獲得した。分光反射率の推定にはカメラのキャリブレーションが必要である。まず、我々はカメラ入出力の線形性を試験した。表面が均質で反射率の異なる色票をカメラで撮影し、同時に色票を輝度計で計測した。このとき計測した輝度値とカメラ出力値が比例し、カメラが線形性を持つと判定した。次に、カメラの分光感度関数はモノクロメータを用いて計測した。すな

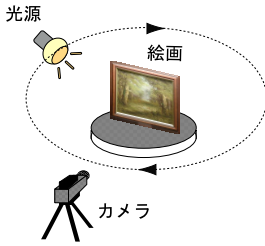


図 2 絵画の計測系

Fig. 2 Measuring system for an art painting.

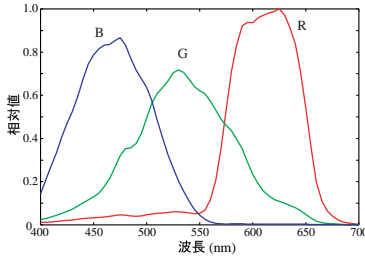


図 3 使用したカラーカメラの分光感度

Fig. 3 Spectral sensitivities of the color camera used.

わち単一波長の光を一定強度カメラに入射して RGB 出力を記録し、波長を可視光域 400 nm から 700 nm まで変えてこれを繰り返した。図 3 は使用したカメラの RGB チャンルの分光感度を示す。

このとき拡散反射物体を撮影した際のカメラ出力は次式で記述される。

$$\rho_i(x) = \int_{400}^{700} E(\lambda)S(x, \lambda)R_i(\lambda)d\lambda \quad (1)$$

$(i = 1, 2, 3)$

ここで $\rho_i(x)$ は物体上の位置 x に対する i 番目のセンサ出力を表し、 $i = 1, 2, 3$ は R, G, B チャンルに対応するものとする。 $E(\lambda)$ は照明光の分光エネルギー分布、 $S(\lambda)$ は x における表面分光反射率、そして $R_i(\lambda)$ は i 番目のセンサの分光感度関数である。

さて、同じ絵画表面を図 4 のように異なった照明方向のもとで撮影を繰り返した。複数の照明を使うことには 2 つの利点がある。まず、カメラ出力の集合から鏡面反射や影といった効果を含まない拡散反射成分を選択することができる。次に、各画素点での面法線ベクトルを照明方向が変わる際の陰影の変化から推定することができる。図 4 において絵画平面への入射角はおおよそ 45 度である。ただし TOP は光源が物体に対して垂直方向にあることを意味している。

光源は八口ゲンランプ (150 W) を用いたスライドプロジェクタである。このとき絵画表面を照射する光の強さは必ずしも均一ではない。照明の空間的な不均

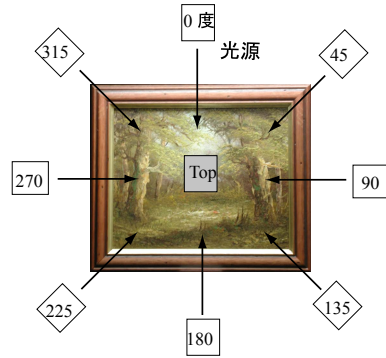


図 4 異なった照明方向における撮影

Fig. 4 Imaging at different illumination directions.

一性を補正するために、絵画と同じ大きさの標準白色板を用いた。すなわち標準白色板を絵画と重ねて撮影し、各画素点において、絵画に対するカメラ出力を白色板に対する出力で基準化した。照明光源の分光分布は実測により決定した。すなわち標準白色板からの反射光を分光放射輝度計で計測し、これを絵画に入射する光源の分光分布とした。

このように 9 光源という少ない光源数を用いて、拡散反射のみを示す明るさを、絵画表面のすべての点で観察できると仮定することは以下の点で妥当といえる。まず、絵画は塗装物体であるので、その光反射は不均質誘電体の反射則に従い、拡散反射成分と鏡面反射成分の線形和で記述される。このとき油絵のように光沢を持たば、鏡面反射は拡散反射と比べて強く、シャープなハイライトとして観察される。次に、絵具で塗布した表面はざらつきが少なく、エッジや孤立ピークはできにくい。凹凸も大きくない。このような物体表面に対して図 4 のように上方 9 方向から照明すれば、各画素点における 9 個の観測データの中で鏡面ハイライトはせいぜい 1 個である。陰影については 6 章で述べるように、光の当たらない陰面と水平入射でできるような影に分かれるが、実験結果より本計測系ではほとんど発生しなかった。ただ、陰影が発生すれば 3 方向のデータが影響を受ける可能性がある。したがって、各点で少なくとも 5 個の観測データが拡散反射に基づくと思われ、これらを拡散反射の推定に使うことができる。

以上の性質はシミュレーション実験で具体的に確認することができる。図 5 はナチュラルシーンを描いた油絵で、本論文の実験に使用した。図 5 で白く囲んだ領域 1 は木の幹を含む絵画の一部で、絵具による凹凸が比較的是っきり現れている。この領域を絵画の解析に使用した。まず、3 次元レーザ顕微鏡を用いて表面



図 5 ナチュラルシーンの油絵と解析領域

Fig. 5 Oil painting of a natural scene and the analysis area.

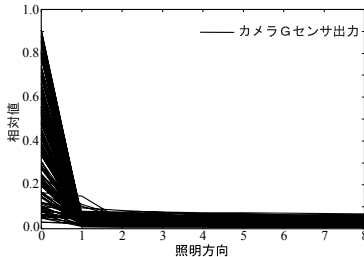


図 6 異なった照明方向について計算で求めたセンサ出力

Fig. 6 Sensor outputs computed for different illumination directions.

の詳細な形状を計測した．次に，後述する分光反射率の推定結果および反射モデルを用いて，領域 1 の表面の 3 次元的な光反射を計算で求めた．このとき照明方向は図 4 の 9 方向を，センサは図 3 の G チャンネルを想定し，各画素点において 9 個の G センサ出力と算出した．

図 6 は，領域 1 でランダムに選択した 150 点におけるセンサ出力と照明方向の関係を描いている．ただし，センサ出力は相対値で，照明方向の番号は特定の方向を指すのではなく，出力の大きさの順に並べ替えて 0, 1, 2, ... と付けている．さて図より，カメラ出力値が高い鏡面反射は 0 方向のみに集中しており，残り 1~8 方向はほとんど拡散成分からなることが分かる．次に，陰影を全点について調べたところ，本シミュレーションでは陰の発生はきわめて少なく，確率的に 0.01% 以下であり，影についてはさらに少なく 0.003% 以下であることが分かった．

3. 面法線の推定

3.1 原理

絵画の各画素点で面法線ベクトルを計算するために照度差ステレオ法を用いた．照度差ステレオ法は，物体のエッジに限らず各画素で法線の推定値が得られるため，2 眼ステレオ法と比べて，一般に与えられたカメラ分解能で物体形状をより細かく記述できる^{10)~12)}．

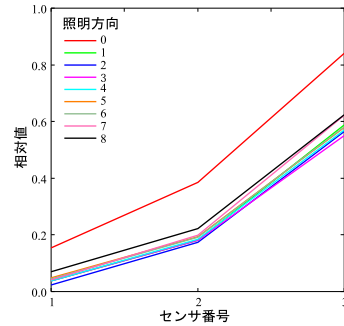


図 7 異なった照明方向に対するカメラ出力の例

Fig. 7 Example of camera outputs for different illumination directions.

物体表面が完全拡散体 (Lambertian) であるとき，光源からの照明光によって反射した放射輝度 (Radiance) は次式で記述される．

$$I_j = \alpha n^t l_j \tag{2}$$

ここで I_j は j 番目の光源による輝度値， n は面法線の向きを表す 3 次元縦ベクトル， l_j は j 番目の光源の方向ベクトル， α は拡散反射の強さを表す係数である．なお記号 t は行列の転置を表す．したがって 3 次元ベクトル n を推定する問題は，少なくとも 3 つの異なった照明方向 l_1, l_2, l_3, \dots における放射輝度値 I_1, I_2, I_3, \dots を獲得すれば解くことができる．

3.2 データ選択

一般に異なった照明方向で絵画を撮影すれば，各画素点での反射は拡散反射のみとは限らず，強い鏡面反射を含んだり，照明が遮られて陰影になったりすることもある．このため対象画素が光源によって適切に照明されたかどうかを観測データについて判定する必要がある．もし鏡面ハイライトや陰影に属するならば，そのカメラ出力を観測データ集合の中から取り除く．

図 7 は実際の絵画において，異なった照明方向から得られた 1 画素に対するカメラ出力を例示している．センサ番号 1, 2, 3 は，それぞれ，RGB チャンネルに対応する．照明方向の番号 0, 1, ..., 8 は，それぞれ TOP, 0, ..., 315 度に対応する．図 7 において番号 0 の出力曲線が大きく分離しており，TOP 方向から照明するとき鏡面反射になることを意味している．図 8 は RGB センサ出力の平均値を照明方向の関数として描いている．緑の直線は全方向にわたるそれらの平均値を示す．

このように鏡面ハイライトのセンサ出力は他のデータよりも大きい方に分離し，陰影は小さい方に分離するはずである．この性質を利用して，データ選択の判

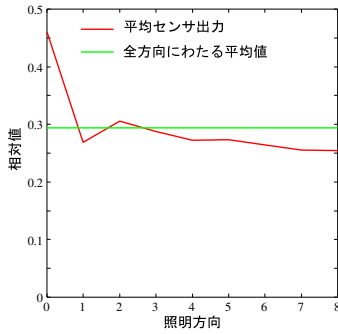


図 8 照明方向の関数として描いた平均センサ出力

Fig. 8 Plot of the averaged sensor outputs as a function of illumination direction.

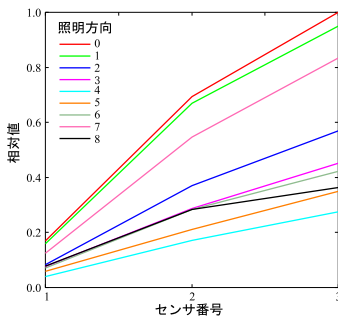


図 9 異なった照明方向に対するカメラ出力の例 2

Fig. 9 Second example of camera outputs for different illumination directions.

定条件を下のように定めた． \bar{p}_j を j 番目の照明方向によるセンサ出力の平均値， \bar{p} を全方向にわたる平均値とおく．このときもし $\bar{p}_j > w_1 \bar{p}$ ならば鏡面ハイライトに属する可能性があるとして判断し， $\bar{p}_j < w_2 \bar{p}$ ならば陰影になると判断する．その他ならば適切に拡散照明されていると見なす．重み係数 w_1 と w_2 は閾値定数を表す．

この判定は，観測データから鏡面ハイライトと陰影を取り除いて，拡散反射データのみを残そうとするもので，鏡面反射と拡散反射を厳密に分離しようとするものでない．前章で述べたように鏡面ハイライトが観測されるのは 1 つの方向のみで，このとき図 7 のように 1 つのセンサ出力曲線が他より分離するので，これを容易に除去することができる．一方，鏡面成分をまったく含まない拡散反射のみの場合でも，法線方向と照明方向の関係でセンサ出力が大きければつくことがある．図 9 は実際の絵画に対するカメラ出力例で，面法線が鉛直方向から大きく傾いている表面からの観測データである．このように照明方向によって大きく変動する場合，出力値の大きいものが判定で除去されることがある．つまり本手法は，鏡面成分を含む可能

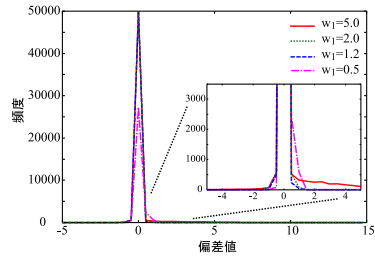


図 10 重み係数 w_1 の異なった値で抽出したデータのばらつき
Fig. 10 Variation of the extracted data by different values of the weighting coefficient w_1 .

性があれば，拡散反射のデータを一部犠牲にしても，拡散反射データを確実に抽出しようとする方式である．

さて判定の手続きは，全照明方向に対する出力平均を基準に閾値を設定し，センサ出力が閾値以下のものを選択するという単純なものである．このとき選択の信頼性は重み係数 w_1 に大きく依存する．実際 w_1 が大きくなりすぎれば，鏡面成分が取りきれない．逆に w_1 が小さくなりすぎれば，拡散反射データの数が増減し，結果として拡散成分推定の精度が劣化する危険がある．

我々は対象画像を実験的に調べて， $w_1 = 1.2$ ， $w_2 = 0.1$ とおいた．まず各照明方向で撮影した絵画の画像を人の視覚によって，鏡面ハイライト領域，鏡面を含まない拡散領域，陰影に分類した．次に拡散領域がほぼ抽出できるように w_1 を決定した．次に本計測系では陰影ができにくいので，特別に光源を大きく傾けて陰影を調べ， w_2 を決めた．

このような重み係数の妥当性は前章と同様なシミュレーション実験で確認できる．図 10 は w_1 の異なった値で抽出したデータについて偏差値のヒストグラムを描いている．これは以下の手順で得られたものである．まず，レーザ顕微鏡の形状データに基づいて領域 1 の 800×600 画素点で，9 光源方向に対する G センサ出力を得た．次に (平均値) $\times w_1$ 以上のセンサ出力を除外し，残りの出力データについて，その平均からの偏差値を算出した．最後に，全画素にわたって偏差値を累積した．

さて図 10 で偏差値 0 を中心とする鋭いピークは拡散反射成分によるものである．図 10 の部分拡大図は w_1 の値による抽出データの特徴を示している．すなわち重み係数が $w_1 = 5.0$ と大きくなれば，偏差値の大きな画素が現れて，抽出データの中に鏡面が含まれることが分かる．次に $w_1 = 0.5$ と小さくなれば，ピークの高さが急激に低下し，拡散反射データの抽出数が大幅に減少した．また偏差値のばらつきも部分的

に拡大することがありうる．これに対して $w_1 = 1.2$ の場合, 0 を中心とする高く鋭いヒストグラムとなり, 拡散反射データのみを効率良く抽出できていることが分かる．

3.3 推定計算

まず $\mathbf{I} = [I_1, I_2, \dots, I_n]$ を鏡面ハイライトと陰影の影響を除いた輝度値の $1 \times n$ 行列とする．次に標準白色板で基準化するために, 同じ照明方向による白色板の輝度値を $I_{W1}, I_{W2}, \dots, I_{Wn}$ とおく．また白色板への入射角を $\theta_{W1}, \theta_{W2}, \dots, \theta_{Wn}$ とおき, $1 \times n$ 行列

$$\mathbf{I}_W = [I_{W1}/\cos(\theta_{W1}), I_{W2}/\cos(\theta_{W2}), \dots, I_{Wn}/\cos(\theta_{Wn})] \quad (3)$$

を定義する．これは照明光が垂直に入射した際の白色板の輝度に対応する．したがって標準白色板で基準化した絵画の観測値は, \mathbf{I} を \mathbf{I}_W で要素ごとに割り算することで得られる．この基準化した観測値を \mathbf{I}' とする．

一方, 拡散反射の仮定より次式の関係式が成立する．

$$\mathbf{I}' = \alpha \mathbf{n}^t \mathbf{L} \quad (4)$$

ここで \mathbf{L} は n 種類の照明方向ベクトルの集合 $[I_1, I_2, \dots, I_n]$ を表す $3 \times n$ 行列である．したがって法線ベクトルの推定値 $\hat{\mathbf{n}}$ は式 (4) の最小二乗解として $\hat{\mathbf{n}} = \mathbf{L}^+ \mathbf{I}'^t / \alpha$ で求まる．ただし \mathbf{L}^+ は \mathbf{L} の一般化逆行列である．なお面法線の実際の推定計算では \mathbf{G} のセンサ出力を輝度値として使っている．

4. 分光反射率の推定

4.1 分光反射率の記述

有限次元線形モデルで分光反射率を記述した．このモデル化は連続的な波長の関数を少数の基底関数の線形結合で近似することにより, 推定の未知数を減らそうとするものである．絵画上の x における分光反射率 $S(x, \lambda)$ は一般に基底関数を用いて,

$$S(x, \lambda) = \sum_{k=1}^n \sigma_k(x) S_k(\lambda) \quad (5)$$

と表現できる．ここで $\{S_k(\lambda), k = 1, 2, \dots, n\}$ は分光反射率に対して統計的に決定される基底関数の集合で, $\{\sigma_k(x)\}$ はそれらに対する重み係数の集合である．

本論文では RGB カラーカメラを使うので, $n = 3$ のモデルに限定した．基底関数は後述のように多くの物体の分光反射率データから統計的に得られる．このとき分光反射率の推定問題はカメラ出力から重み係数 $\{\sigma_k(x), k = 1, 2, 3\}$ を推測する問題に帰着する．基底関数を決定するために, 我々は塗装物体を中心に約

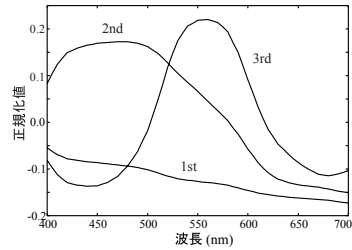


図 11 表面分光反射率の基底関数

Fig. 11 Basis functions for surface-spectral reflectances.

500 種類の物体表面からなる分光反射率のデータベースを使用した．このデータベースは Vrhel らによる分光反射率の集合^{13),14)} と我々が塗装物体を実測した 153 種類の分光反射率からなる．このような分光反射率データから主成分分析によって, 寄与率の最も高い 3 つの主成分パターンを抽出した．このようにして決定した基底関数 $\{S_k(\lambda), k = 1, 2, 3\}$ を図 11 に描く．

このような 3 つの基底関数で, 多くの物体の分光反射率をおおよそ近似することが可能である．分光反射率に関する我々のこれまでの研究から, 自然界に存在する物体および人工物のほとんどすべての表面分光反射率は 5, 6 個の基底関数の線形結合で記述できることが分かっている^{6),15)}．また色味が強くない物体色の分光反射率曲線は波長に関して滑らかな曲線になるので, その分光反射率は図 11 のような 3 つの基底関数で記述することができる．いい換えれば, 高彩度の物体色については近似誤差が存在するものの, それ以外の物体色についてはこれで記述することが可能である．

4.2 推定計算

複数の照明方向によるカメラ出力から $\{\sigma_i(x)\}$ を推定するための手続きを述べる．第 1 ステップは観測データの補正で, まず, 3 章と同様な手順で異なった照明に対する観測データからハイライトと陰影の影響を含むものを取り除く．次に, 残りの観測データを標準白色板の出力で基準化し, さらに面法線の傾きの影響を補正する．この基準化と補正は次式のように記述できる．

$$\rho'_{ij} = (\rho_{ij} / \cos(\theta_j)) / (\rho_{Wj} / \cos(\theta_{Wj})) \quad (6)$$

$$(i = 1, 2, 3)(j = 1, 2, \dots, n)$$

ここで添え字 i は R, G, B に対応し, j は照明方向を示す．記述を簡潔にするために位置のパラメータ x を省略している． θ_j は絵画表面への入射角で法線と照明方向ベクトルから算出できる． θ_{Wj} は白色板への入射角である．最後に, 補正後のカメラ出力を照明方向 j に関して平均化する．

第 2 ステップは分光反射率の復元である．分光反射率の 3 次元線形モデルを用いてカメラ出力は次式で表現できる．

$$\rho'_i = \sum_{k=1}^3 \sigma_k(x) \int_{400}^{700} E(\lambda) S_k(\lambda) R_i(\lambda) d\lambda \quad (7)$$

(i = 1, 2, 3)

ここでいくつかの行列を定義する． $\rho (\equiv [\rho_i])$ はカメラ出力を表す 3 次元縦ベクトル， $\sigma (\equiv [\sigma_i(x)])$ は反射率係数を表す 3 次元縦ベクトル，さらに $\mathbf{H} (\equiv [h_{ij}])$ は要素として $h_{ij} = \int E(\lambda) S_j(\lambda) R_i(\lambda) d\lambda$ を持つ 3×3 行列である．このときカメラ出力は行列式 $\rho = \mathbf{H}\sigma$ としてまとめることができる．ここで \mathbf{H} の要素は，照明光の分光分布，分光反射率の基底関数，カメラの分光感度関数を用いてあらかじめ計算されるので，各要素の値は既知である．したがって各画素における反射率ベクトルの推定値は

$$\hat{\sigma} = \mathbf{H}^{-1} \rho \quad (8)$$

で得られる．最後に，この推定値を式 (5) に代入することによって分光反射率を復元することができる．

$$\hat{S}(x, \lambda) = \hat{\sigma}_1(x) S_1(\lambda) + \hat{\sigma}_2(x) S_2(\lambda) + \hat{\sigma}_3(x) S_3(\lambda) \quad (9)$$

5. 反射モデルの決定

5.1 反射モデルの記述

絵画の表面材料は塗料で，反射物体の材質としては不均質誘電体に分類される．このような物体は 2 色性反射の特性を持ち^{16),17)}，それを記述する 3 次元光反射モデルとして，一般に Phong モデル⁸⁾ や Torrance-Sparrow モデル⁹⁾ が知られている．本論文では絵画表面の反射モデル記述と画像生成のために Torrance-Sparrow モデルを採用した．このモデルは Phong モデルと比べて鏡面反射成分の記述がより詳細である¹⁸⁾．

図 12 に Torrance-Sparrow モデルで使用される反射の幾何学モデルを示す．このモデルでは鏡面反射成分は不規則な方向を向いた鏡のような微小面で構成されていると仮定している． \mathbf{v} は視線ベクトル， \mathbf{q} は微小鏡面の法線ベクトルで \mathbf{v} と \mathbf{l} の 2 等分ベクトルとして与えられ，さらに φ は \mathbf{n} と \mathbf{q} のなす角である．Torrance-Sparrow モデルに基づいて，絵画からの反射光の分光放射輝度を位置 x と波長 λ の関数として次式のように記述する．

$$Y(x, \lambda) = \cos(\theta_l) S(x, \lambda) E(\lambda) + \beta \frac{D(\varphi, \gamma) F(\theta_q, n) G(\mathbf{n}, \mathbf{v}, \mathbf{l})}{\cos(\theta_v)} E(\lambda) \quad (10)$$

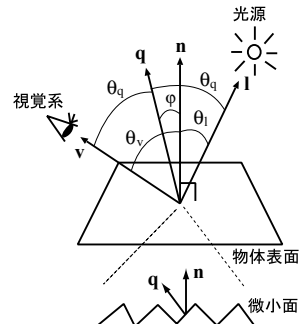


図 12 反射の幾何モデル
Fig. 12 Geometric model of reflection.

ここで右辺第 1 項と第 2 項は，それぞれ，拡散反射成分と鏡面反射成分を表す．前章で推定した分光反射率は拡散反射成分における $S(x, \lambda)$ として使用する．第 2 項の鏡面反射成分はいくつかの関数からなる．

まず， D は鏡面の微小面の向きを表す分布関数で， \mathbf{q} の方向を向く微小面の割合が定まる．この分布関数としてグローバルな面法線 \mathbf{n} を中心とする次式のガウス関数を仮定した．

$$D(\varphi, \gamma) = \exp\{-\ln(2)\varphi^2/\gamma^2\} \quad (11)$$

ここで γ は表面の粗さを表す指標となる．次に， F はフレネル反射率で，不均質誘電体の場合は，入射角 θ_q と屈折率 n の関数として次式のように記述できる¹⁹⁾．

$$F(\theta_q, n) = \frac{1}{2} \frac{(g - \cos(\theta_q))^2}{(g + \cos(\theta_q))^2} \left\{ 1 + \frac{[\cos(\theta_q)(g + \cos(\theta_q)) - 1]^2}{[\cos(\theta_q)(g - \cos(\theta_q)) + 1]^2} \right\} \quad (12)$$

ただし $g^2 = n^2 + \cos(\theta_q) - 1$ である．さらに， G は鏡面の微小面が互いをマスクする遮蔽係数である．微小面は傾きを持って分布しているため，隣接する微小面が互いに他をマスクしたり，光の当たらない陰ができたりする．このような入射光や反射光のさざぎりは具体的には次式で与えられる．

$$G(\mathbf{n}, \mathbf{v}, \mathbf{l}) = \min \left\{ 1, \frac{2 \cos \varphi \cdot \cos \theta_v}{\cos \theta_q}, \frac{2 \cos \varphi \cdot \cos \theta_l}{\cos \theta_q} \right\} \quad (13)$$

最後に， β は鏡面反射成分の強さを表す係数である．

5.2 モデルパラメータの推定

分光反射率 $S(x, \lambda)$ と面法線ベクトル \mathbf{n} はすでに推定し，照明光の分光分布は別途計測できるので既知である．したがって，式 (10) の反射モデルで未知パラメータは鏡面項の表面粗さ γ ，屈折率 n ，および鏡面反射係数 β である．本論文では，1 枚の絵画で使用される絵具の顔料は類似の材質とし，絵画表面の場

所に関係なく反射特性は同じで、 γ, n, β は一定値をとると仮定した。ここで屈折率については、不均質誘電体の屈折率はおおよそ 1.3~1.7 の間で、物質によって大きく変わらないことが分かっている²⁰⁾。そこで我々が以前推定した屈折率の値 $n = 1.45$ を使用した¹⁸⁾。そして未知の表面粗さ γ と係数 β は、絵画の観測データから鏡面反射成分を算出し、その統計的な分布に基づいて推定する。

なお厳密にいえば、顔料が異なると鏡面反射成分も異なる。実際、我々は異なった顔料の油絵具を別々に塗布して調べたところ、鏡面反射特性にばらつきが見られた。ところで、油絵画の貴重な美術絵画には表面を保護するためにニス塗りをしている。このとき顔料が異なっても、塗布したニスの効果で鏡面反射特性がかなり均一化される。我々はこの性質を実験的に確認した。本論文で用いた絵画にもニスが塗られており、このため絵画表面の場所に関係なく、一致した鏡面特性を持つといえる。

パラメータ推定で、特に表面粗さ γ の推定には、面法線の推定精度が大きく影響するといえる。この推定に用いた照度差ステレオ法はある程度の形状誤差を含む。そこでパラメータ推定の精度向上のために次の 2 点を実施した。まず、表面の急傾斜部あるいはエッジ部では推定の誤差が大きいため、面法線が 50 度以上傾いているような面は除外し、比較的緩やかな傾きを持つ面のみを採用した。次に、このような面集合に対して、2 次元的なスムージング演算により雑音成分を軽減させた。

なお γ は微小鏡面のばらつきを指標であるが、この微小面はカメラ画像の画素には直接対応しないことに注意すべきである。照度差ステレオ法で求めた各画素の法線はあくまでもグローバルな面法線 \mathbf{n} である。Torrance-Sparrow モデルでは鏡面反射の強さを微小な完全鏡面の分布でモデル化しており、各画素における鏡面反射は多数の微小鏡面の集合で記述されると考えている。このため個々の微小鏡面は直接観察できるものでなく、観測した鏡面反射強度の変化割合からパラメータ γ を推定することになる。つまり鏡面強度と位相角 φ の関係を表す分布から γ を推定できることになる。

各画素で鏡面成分を求めるために、まず RGB カメラ出力の拡散成分を分光反射率の推定値 $\hat{S}(x, \lambda)$ を用いて次のように算出する。

$$\rho_{D_i} = \int_{400}^{700} \hat{S}(x, \lambda) E(\lambda) R_i(\lambda) d\lambda, \quad (14)$$

$(i = 1, 2, 3)$

これは照明の垂直入射における拡散成分を予測する。一方、実際の観測は 9 方向から入射するので、全方向について式 (6) と同様に面の傾きと標準白色に関して基準化する。

$$\rho'_{ij} = (\rho_{ij} / \cos(\theta_{1j})) / (\rho_{W_{ij}} / \cos(\theta_{W_j})) \quad (15)$$

$(i = 1, 2, 3)(j = 1, 2, \dots, 9)$

そして 9 つの観測値の中で最高輝度のもを選び、拡散成分との差を次式で定義する。

$$\rho_{S_i} = \max_j \{\rho'_{ij}\} - \rho_{D_i} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (16)$$

上式右辺第 1 項はハイライトが含まれる可能性のある観測値で、第 2 項は推定した拡散項である。鏡面反射は照明光の入射角と視覚系の受光角が一致するという狭い範囲でのみ観測されるので、9 方向の観測で鏡面反射が必ずしも獲得できるわけでない。すなわち、 ρ_{S_i} がつねに鏡面反射成分を意味するのではなく、その値が比較的大きいとき、信頼できる鏡面反射成分が得られているといえる。

次に、このような鏡面反射成分を絵画の異なった画素から収集し、得られた鏡面データに対して式 (10) の鏡面関数を用いて適合を行う。まず鏡面成分の強度を $\sqrt{\rho_{S_1}^2 + \rho_{S_2}^2 + \rho_{S_3}^2}$ で定義し、未知数 γ と β を推定しやすいように

$$\rho_S = \sqrt{\rho_{S_1}^2 + \rho_{S_2}^2 + \rho_{S_3}^2} \frac{\cos(\theta_l) \cos(\theta_v)}{G(\mathbf{n}, \mathbf{v}, \mathbf{l}) F(\theta_q)} \quad (17)$$

と変換しておく。そして次式のような適合誤差の自乗和の最小化を図る。

$$e = \sum_x \{\rho_{S_x} - \beta D(\varphi_x, \gamma)\}^2 \quad (18)$$

ここで ρ_{S_x} や φ_x は絵画の異なった場所でのデータを表す。適合誤差 e は γ と β の線形関数ではないことに注意する。そこで e を最小化する γ と β を非線形の関数適合問題の最小自乗解として求めることにした。本論文では特に Levenberg-Marquardt 法を用いてこの解を算出した²¹⁾。

6. レンダリング

これまで推定した分光反射率と面法線の全データ、および決定した 3 次元反射モデルに基づいて、希望する照明と観察の条件で美術絵画の画像を生成する。このレンダリングのためにレイトレーシング法で、視点からの光線の放射を 1 回に限定したレイキャスティングの手法を使用した。レイトレーシング法ではスクリーンを通して絵画を観測するので、スクリーン上の画素ごとに分光的な輝度計算を行う。絵画キャンパスを 2 枚の三角ポリゴンで表し、この上に法線ベクトル

と分光反射率データを射影する．なお照明条件は環境光を含むような任意の照明条件を想定し，それらの分光分布も任意である．

絵画データを分光で記録すれば膨大になるので，分光情報は 3 次元線形モデルの係数のみを記録するようにした．法線ベクトルは 2 次元ベクトルで記述される．結局，絵画の分光反射率と形状情報は各画素点 5 つの実数で保存できることになり，データ量の大幅な軽減が可能である．ただし，法線のみを使用するレンダリングの場合，絵の具の盛り上がりによって光が当たらない面 ($n \cdot l < 0$ の場合) と見えない面 ($n \cdot v < 0$ の場合) といった陰 (セルフシャドウ) は生成できる．しかし盛り上がった部分を水平方向から照明した際にできるような影 (キャストシャドウ) は生成することができない．しかし通常の視点と照明方向では，このような影はほとんど発生しないことが分かった．

分光輝度の計算はすべて波長ごとであるが，計算量を軽減し，かつ蛍光灯のような輝線スペクトルを含む光源にも適用できるように，可視領域 [400,700] を 5 nm おきにサンプルした．したがって各画素の最終的な分光データは 61 次元ベクトルとして表されることになる．これを色刺激におおしてカラー画像として出力するには，分光輝度を三刺激値 XYZ に変換し，さらに表示装置の RGB 値に変換する．三刺激値 XYZ を次のような形式で算出する．

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \int_{400}^{700} Y(x, \lambda) \begin{bmatrix} \bar{x}(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) \\ \bar{z}(\lambda) \end{bmatrix} d\lambda \quad (19)$$

ここで $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ は CIE の等色関数である²²⁾．三刺激値 XYZ のディスプレイへの測色的色再現の手法はたとえば文献 23) に示されている．

画像生成の具体的な手順を以下にまとめる．

- (1) 3 次元空間上に絵画の大きさを合わせて 2 枚の三角板を配置し，四角ポリゴンを作成する．絵画の位置座標はこのポリゴンの 3 次元座標と見なす．
- (2) 絵画ポリゴン上の各座標点に推定した法線ベクトルと分光反射率を割り付ける．ここで法線は 2 次元ベクトルで，分光反射率は 61 次元ベクトルで表している．
- (3) 各座標点の輝度をレイトレーシング法で求める．つまり視点位置と照明条件を設定し，さらに反射パラメータを式 (10) に代入して絵画表面の各点において分光放射輝度を算出する．ただし環境光を考慮する場合は，式 (10) においてその項を追加する．

- (4) 四角ポリゴンの各座標点で色を決定し，絵画を映像化する．具体的には各画素で分光放射輝度を三刺激値に変換する．最後に，較正されたディスプレイ装置を用いて，デバイスの RGB 値に変換し，絵画のフルカラー表示を行う．

7. 実験結果

図 5 の油絵で実験を実施した．油絵のサイズは約 20 cm × 25 cm である．スライドプロジェクタで 9 方向から照明し，RGB デジタルカメラで画像を獲得した．このとき 1 画素は約 0.2 mm × 0.2 mm に対応し，絵画の詳細な特徴を観測できる精度である．

まず，観測した絵画の全画素点で面法線を推定した．図 13 に領域 1 に対する面法線の推定結果を画像として表示する．すなわち推定した面法線を用いて，おおよそ右上方 45 度方向から照明した際の絵画表面をシェーディングしている．絵具の盛り上がりを確認することができる．さらに図 14 は提案法による面法線推定と 3 次元レーザ顕微鏡による計測との比較を示す．後者については，図 13 の黒枠の領域についてレーザ顕微鏡で計測し，高精度の 3 次元データを用いて同様にシェーディングを施したものである．高さが急激に変化するエッジ部で，推定画像は丸みを持つように見え，法線推定の精度がやや低下しているが，大まかな形状は正しく得られている．

次に，分光反射率を全画素点にわたって推定した．得られた分光反射率の推定精度を試験するために，直接計測の結果と比較した．図 15 における Area1 - Area4

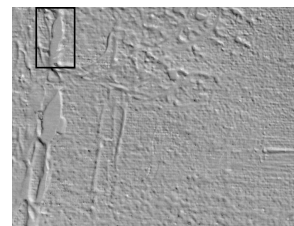


図 13 推定した面法線の画像表示

Fig. 13 Image of the estimated surface normals.

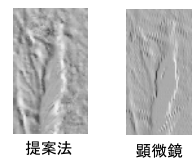


図 14 提案法による面法線推定と 3 次元レーザ顕微鏡による計測との比較

Fig. 14 Comparison between the surface normal estimates by the proposed method and the measurements by a 3D laser microscope.

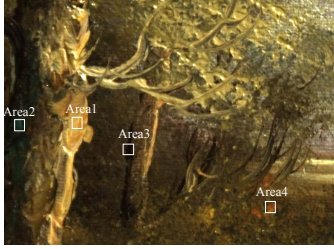


図 15 分光反射率推定の精度試験に用いた領域

Fig. 15 Areas used for examining accuracy of the spectral reflectance estimates.

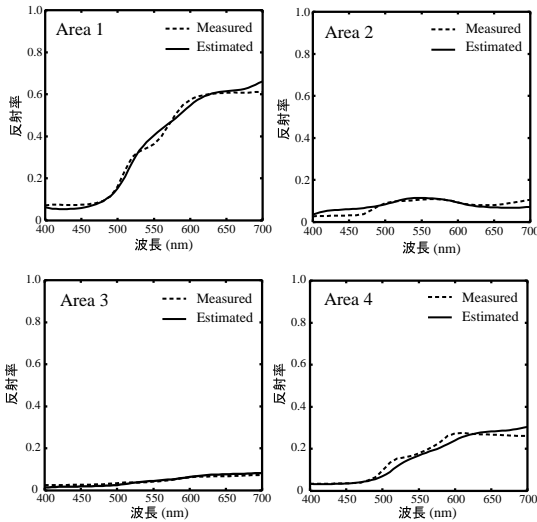


図 16 表面分光反射率の推定結果

Fig. 16 Estimation results of surface-spectral reflectances.



図 17 鏡面成分の画像

Fig. 17 Specular component image.

は試験に使用した領域で、それぞれ分光反射率の推定結果を図 16 に示す。実線は推定した分光反射率のその領域における平均曲線を表し、破線は分光光度計を用いて直接測定した分光反射率を表す。4 領域で 2 種類の分光曲線がおおよそ一致しており、分光反射率推定が妥当であることが分かる。

さらに、3次元反射モデルを決定した。まず図 5 の領域 1 に対して抽出した鏡面反射成分を画像として図 17 に示す。図 18 は鏡面反射成分の強度分布である。す

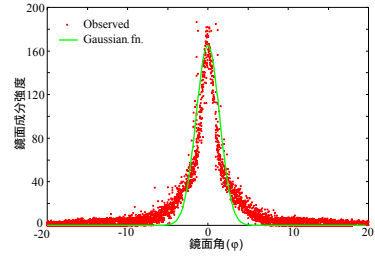


図 18 角度 φ の関数として描いた鏡面成分の強度分布

Fig. 18 Intensity distribution of specular component as a function of angel φ .

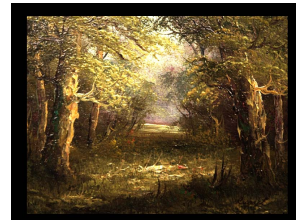


図 19 D65 の色温度を持つ昼光蛍光灯照明を想定してレンダリングした画像

Fig. 19 Image rendering result on the assumption of illumination of a daylight fluorescent lamp with the color temperature of D65.

なわち各画素の強度 ρ_s を鏡面角 φ の関数として赤点でプロットしている。次にこの画素の強度分布全体に対して関数適合を実施した。ただし適切な関数適合ができるように、画素のプロットをサンプルして密集度を一定にした。図 18 で緑の曲線は適合結果のガウス関数を表す。このときパラメータとして $\gamma = 0.070$ (radian), $\beta = 164$ の推定値を得た。なお図 18 で赤点の画素のプロットとガウス曲線には、ずれが見られる。これは Torrance-Sparrow モデルで鏡面関数としてガウス関数を用いたことによるもので、この反射モデルでの記述の限界と考えられる。

以上で得られた分光反射率と法線の全画素における推定値、および決定した 3次元反射モデルを用いて、対象油絵のコンピュータグラフィックス画像を生成した。絵画鑑賞用の照明光源として昼光と電球光を想定した。まず図 19 は昼光の蛍光灯下でレンダリングした画像で、 $E(\lambda)$ として D65 の色温度を持つ蛍光灯の分光分布を用いた。照明方向は図 4 で 0 度方向、45 度上方に対応し、観測方向は絵画の正面である。絵画の上部に弱い光沢を含んでいることが分かる。比較として、図 20 に実際の D65 蛍光灯下で観測された油絵の実画像を示す。2 つの画像の見えは非常に近いといえる。同様に、図 21 の左図は白熱電球の照明を想定してレンダリングした結果で、図 21 の右図は実際



図 20 実際の D65 蛍光灯下で観測される油絵の実画像
Fig. 20 Observed image of the oil painting under a real D65 fluorescent lamp.



図 21 白熱電球の照明を想定した油絵の画像 (左: レンダリング結果, 右: 油絵の実画像)
Fig. 21 Images on the assumption of illumination of an incandescent lamp (Left: Image rendering result, Right: real image of the oil painting).



図 22 視点と照明方向を変えてレンダリングした油絵の画像
Fig. 22 Image rendering results of the oil painting with different view points and illumination directions.

の白熱電球下で観測された実画像である。

さらに観測者が視点を変えたり、照明方向が変わったりした際の油絵の 3 次元的な見えの変化を生成した。図 22 の左右は昼光下で視点と照明方向を変えてレンダリングした画像の例で、油絵特有の絵の具の盛り上がりや光沢が観察できる。最後に、視点や照明を連続的に変化させた動画を生成することにより、油絵の 3 次元的な質感の変動の様子が実現できることを確認した。

8. おわりに

本論文では、汎用の RGB カラーカメラと照明光源を用いる簡単な撮像系で美術絵画を計測し、希望の環境下でのその絵画を鑑賞するためにコンピュータグラフィックス画像として映像化する方法を述べた。ここでは美術絵画の表面形状は 3 次元自由曲面ではなく、

むしろ平面のキャンバスに絵の具を塗り付けた凹凸の浅い面と見なした。絵画の表面材質は水彩や油彩の絵の具であり、油絵の光沢が再現できるように、拡散反射成分と鏡面反射成分からなる 2 色性反射の性質を持つ不均質誘電体と見なした。

計測方法は、光源の位置を移動して、異なった照明方向で複数の画像を獲得する方式であった。これによって拡散反射のみからなる観測データを選択することができた。観測データのカリブレーションのために標準白色板を使用して、照明の空間的不均一性や表面の傾きを補正した。

まず、形状情報として各画素における面法線を異なった入射角による拡散反射の輝度値から推定した。次に、分光反射率を拡散反射成分のカメラ出力の RGB 値に 3 次元線形モデルを適用して推定した。さらに、Torrance-Sparrow モデルを画像生成のための 3 次元光反射モデルとして採用した。絵画の観測データから鏡面反射成分を求め、これに鏡面反射関数をあてはめることにより、反射モデルのパラメータを推定した。

最後に、油絵画を用いた実験を実施して提案法の実用性を示した。画像計測から生成までのいくつかのステップで推定結果を確認し、得られた推定値と反射モデルから照明と観察の条件を変えて絵画のレンダリングを行った。

今後の課題として、まず表面分光反射率の精度の向上があげられる。色味の強い油絵の具にはシャープな分光曲線を持つものがあり、3 つの基底関数で精度良く表現することが難しい。分光反射率のより詳細な推定には、RGB カメラ系に替えてマルチバンドによる撮像系を使用する必要がある^{6),23)}。次に、カラー画像をディスプレイで表示する際の色再現の精度向上があげられる。本論文では測色的な色再現に限定したが、モニタ等でのカラー表示には、色順応効果により色見えが変化する。実際に使用する表示装置について、色見えの効果調べ、美術絵画のデジタルアーカイブのシステムに組み込むことが今後の課題として重要といえる。

参考文献

- 1) Martinez, K., et al.: Ten years of art imaging research, *Proc. IEEE*, Vol.90, No.1, pp.28-41 (2002).
- 2) Maitre, H., et al.: Spectrophotometric image analysis of fine art paintings, *Proc. 4th Color Imaging Conf.: Color Science, Systems, and Applications*, pp.50-53 (1996).
- 3) Miyake, Y., et al.: Development of multi-

- band color imaging systems for recording of art paintings, *Proc. SPIE: Color Imaging: Device-Independent Color, Color Hardcopy, and Graphic Arts IV*, Vol.3648, pp.218–225 (1999).
- 4) Schmitt, F., et al.: Multispectral Imaging Development at ENST, *Proc. Int. Sym. Multispectral Imaging and Color Reproduction for Digital Archives*, pp.50–57 (1999).
 - 5) IS&T (Ed.): Multispectral, Library and Museum Imaging I-III, *Proc. Image Processing, Image Quality, Image Capture Systems (PICS) Conf*, pp.160–218 (2001).
 - 6) Tominaga, S., et al.: 3D recording and rendering of art paintings, *Proc. 4th Color Imaging Conf.: Color Science, Systems and Applications*, pp.337–341 (2001).
 - 7) Tominaga, S. and Tanaka, N.: Measuring and rendering of art paintings using an RGB camera, *Proc. EUROGRAPHICS 2002*, pp.299–306 (2002).
 - 8) Phong, B.T.: Illumination for computer-generated pictures, *Comm. ACM*, Vol.18, No.6, pp.311–317 (1975).
 - 9) Torrance, K.E. and Sparrow, E.M.: Theory for off-specular reflection from roughened surfaces, *J. of Optical Society of America A*, Vol.57, No.9, pp.1105–1114 (1967).
 - 10) Ikeuchi, K.: Determining a depth map using dual photometric stereo, *Int. J. of Robotics Research*, Vol.6, No.1, pp.15–37 (1987).
 - 11) Rushmeier, H., et al.: Applying shape from lighting variation to bump map capture, *Proc. 8th Eurographics Rendering Workshop*, pp.35–44 (1997).
 - 12) Rushmeier, H., et al.: Acquiring input for rendering at appropriate levels of detail: Digitizing a Pieta, *Proc. 9th Eurographics Rendering Workshop*, pp.81–92 (1998).
 - 13) Vrhel, M.J., et al.: Measurement and analysis of object reflectance spectra, *Color Research and Application*, Vol.19, pp.4–9 (1994).
 - 14) Tominaga, S.: Multichannel vision system for estimating surface and illumination functions, *J. of Optical Society of America A*, Vol.7, No.2, pp.2163–2173 (1996).
 - 15) 富永昌治, 高橋悦史: 6色カメラによる分光情報の推定, *信学論 (D-II)*, Vol.J82, No.7, pp.1180–1189 (1999).
 - 16) Tominaga, S. and Wandell, B.: The standard surface reflectance model and illuminant estimation, *J. of Optical Society of America A*, Vol.6, No.4, pp.576–584 (1989).
 - 17) Tominaga, S. and Tanaka, N.: Estimation of Reflection Parameters from a Single Color Image, *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol.20, No.5, pp.58–66 (2000).
 - 18) 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: コンピュータビジョンとイメージメディア*, Vol.41, No.SIG10(CVIM1), pp.1–11 (2000).
 - 19) Cook, R.L. and Torrance, K.E.: A reflection model for computer graphics, *Computer Graphics*, Vol.15, pp.307–315 (1981).
 - 20) 国立天文台 (編): *理科年表*, 丸善 (1992).
 - 21) Press, W.H., et al.: *Numerical Recipes in C*, Cambridge Univ. Press (1988).
 - 22) Cowan, W.B.: An inexpensive scheme for calibration of a colour monitor in terms of CIE standard coordinates, *Computer Graphics*, Vol.17, pp.315–321 (1983).
 - 23) 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).

(平成 15 年 1 月 21 日受付)

(平成 15 年 10 月 16 日採録)



富永 昌治 (正会員)

昭和 45 年大阪大学基礎工学部電気工学科卒業。昭和 50 年同大学院博士課程修了。工学博士。電総研大阪支所を経て、昭和 51 年大阪電気通信大学講師。昭和 61 年教授。昭和 62 年より 1 年間スタンフォード大学心理学科客員教授。現在総合情報学部長。視覚情報学、色彩情報処理、コンピュータカラービジョン等の研究に従事。電子情報通信学会、画像電子学会、日本色彩学会、IEEE (Senior Member), OSA 等各会員。



田中 法博 (正会員)

平成 7 年大阪電気通信大学経営工学科卒業。平成 9 年同大学院工学研究科情報工学専攻博士前期課程修了。平成 12 年同博士後期課程単位取得後退学。平成 13 年博士 (工学)。平成 12 年大阪電気通信大学客員研究員。平成 14 年より大阪電気通信大学博士研究員。コンピュータグラフィックス、コンピュータビジョン、特に光反射モデル推定の研究に従事。電子情報通信学会、画像電子学会、日本色彩学会各会員。