

# 総説

## コンピュータビジョンによるリアルな画像再現

### Realistic Image Reproduction by Computer Vision

Shoji TOMINAGA\*

\*Department of Engineering Informatics, Osaka Electro-Communication University  
18-8, Hatsu-cho, Neyagawa, Osaka, 572-8530 JAPAN

富永昌治\*

#### 1. はじめに

人間の視覚系の機能をカメラ系とコンピュータを用いて実現するコンピュータビジョンの技法は今日映像やロボットを含む実に多くの分野で利用されつつある。コンピュータビジョンの重要なテーマはシーンに存在する物体を認識することで、このため物体表面の反射特性や形状特性をカメラ系を用いて推測する研究が盛んである。最近では、これらの基礎研究を物体認識のみならず、コンピュータグラフィックスでの映像生成への応用が広がってきている。

本稿では、カメラ系を用いた物体表面の推定法を、美術絵画のデジタルアーカイブへ応用する技法を展開する。一般にデジタルアーカイブは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。美術絵画のデジタルアーカイブは、表面分光反射率に基づいて行われることが多い<sup>1)</sup>。これに関する初期の技法は、拡散光源のもとであらかじめ決めた視点からのカラー画像を再現する方式であった。しかしこれでは照明や観測位置が固定される。

一例として、図1に油彩画の異なった見えを示す。上の写真は正面から観察したときの見えを表し、下の写真は同じ絵画を少し傾けて光沢が入るようにした見えを表す。油彩画の表面には独特の表面特性、つまり絵具のタッチによる凹凸や油膜層による光沢があり、これらが油彩画のリアルな質感を与えるために重要な要素となる。図1では上よりも下の写真がこのような質感を与える。物体表面の分光反射率の情報のみではこのようなリアルな質感の再現は難しい。

絵画の映像のリアリティを高めるために必要な情報は絵



図1 油彩画の異なった見え

1970年大阪大学基礎工学部電気工学科卒業。  
1975年同大学院博士課程修了。工学博士。  
1976年大阪電気通信大学講師。1986年教授。  
現在総合情報学部長。視覚情報学、コンピュータカラービジョンなどの研究に従事。

富永昌治

Profile



\*大阪電気通信大学 総合情報学部情報工学科  
(〒572-8530 大阪府寝屋川市初町18-8)

画表面の分光反射特性と表面の凹凸を表現する形状特性である。また映像生成においては、希望する環境照明と観察条件下での絵画の見えを実現する必要がある。実際、照明光源を電球光や昼光に変えたり、光源の位置を移動させたり、さらには観測者の視点を自由に変えたりした際の絵画の見えを画像として再現したいのである。

筆者らは、このような考え方で一般的なカメラを用いて絵画を計測し、表面反射特性と表面形状を推定する手法を開発してきた<sup>2,3)</sup>。またコンピュータグラフィックスの技法を組み込むことによって、油彩画を含む多くの絵画のリアルな画像やアニメーションを生成することを可能とした。以下では、カメラによる絵画の計測と表面推定の方法を説明し、実際の油絵を用いた具体的な処理結果を示す。

## 2. 処理の流れ

図2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我々の手法の流れを示す。

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、反射光は拡散成分と鏡面成分の2つの加法成分からなると仮定する。分光反射率関数はこのうち拡散成分から推定される。

次に、絵画の表面形状はキャンバスに絵具を塗り付けた凸凹の浅い面とみなせる。これにより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くなる。

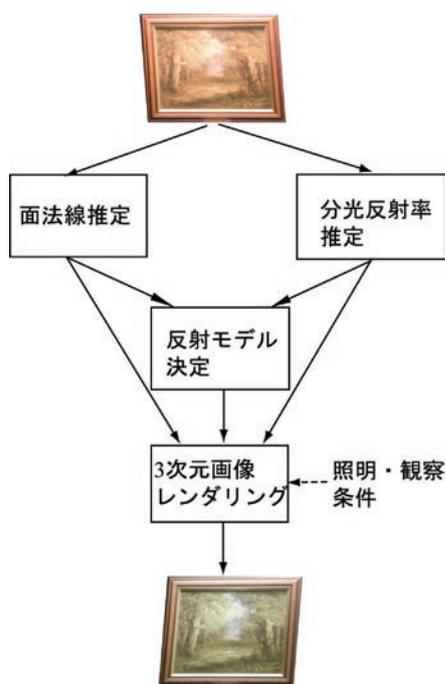


図2 絵画の計測から画像生成までの流れ

我々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絵画を複数回撮影する。

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詳細な3次元光反射モデルを仮定して、モデルパラメータを推定する。

最後に、全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やプロジェクタを想定する。

## 3. 計測系

図3は絵画を計測するための撮影環境である。カメラは常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。我々はまず一般のRGBデジタルカメラを用いて、2160×1440分解能と12ビットの量子化で、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。図4は使用したカメラのRGBチャンネ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。

$$\rho_i(x) = \int_{400}^{700} E(\lambda) S(x, \lambda) R_i(\lambda) d\lambda \quad (i = 1, 2, 3) \quad (1)$$

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わし、 $i$ はR, G, Bチャンネ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、 $S(x, \lambda)$ 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。

マルチバンドカメラは、RGBにとらわれずに、400-700nmに4つ以上の多くのチャンネル数を有する撮像系である。このようなカメラ系を使えば、分光反射率の推定精度はRGBカメラよりも向上する。我々はモノクロ

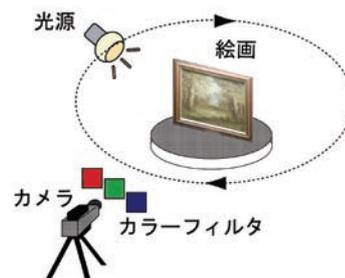


図3 絵画の計測系

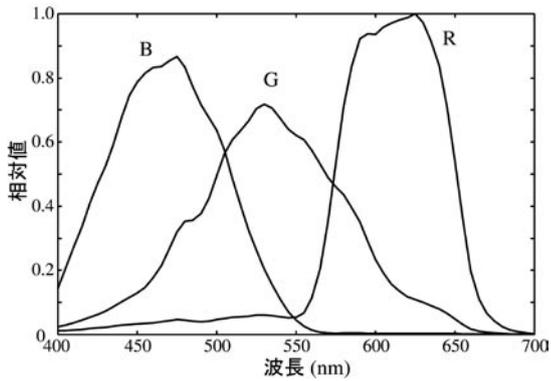


図4 使用したRGBカラーカメラの分光感度

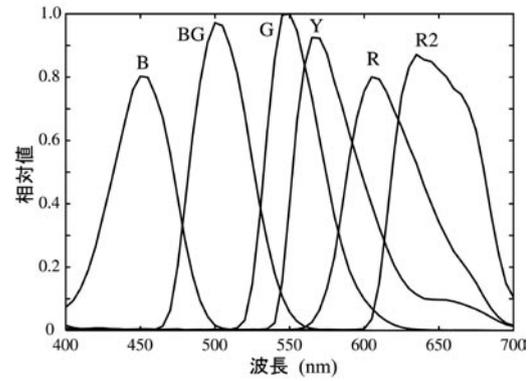


図5 使用したマルチバンドカメラの分光感度

CCDカメラ、標準写真用レンズ、6種類のカラーフィルタ、パソコンから成る6色カメラを提案した<sup>4)</sup>。図5に分光感度関数を示す。可視光の波長域が6つの波長帯(赤, 朱, 黄, 緑, シアン, 青)に分割され、各バンドに対応する分光画像がカメラシステムで観測される。

さて、同じ絵画表面を図6のように9つの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。

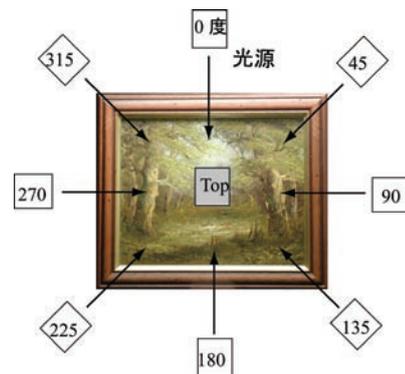


図6 異なった照明方向からの撮影

## 4. 物体の反射モデル

油彩画の表面の見えはその絵具顔料による物体色のみならず、絵具の凹凸による陰影や表面からのハイライトや光沢を含む。我々は油彩画の材質を塗料のような不均質誘電体とみなして、図7のような2色性反射の特性をもつと仮定した。このモデルでは物体表面を照明して反射する光は2成分からなり、物体の境界面で反射する鏡面反射成分と物体内部で顔料と乱反射を繰り返して、再び空中に戻る拡散反射成分からなる。このとき絵画の物体色(絵具の色)は拡散反射成分で、表面の光沢は鏡面反射成分で引き起こされる。

次に、このような反射を数学的に記述するための3次元光反射モデルとしてTorrance-Sparrowモデルを採用した<sup>5)</sup>。図8にこのモデルで使用す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 $\varphi$ は $\mathbf{n}$ と $\mathbf{q}$ のなす角である。絵画からの反射光の分光放射輝度を位置 $x$ と波長 $\lambda$ の関数として次式のように記述する。

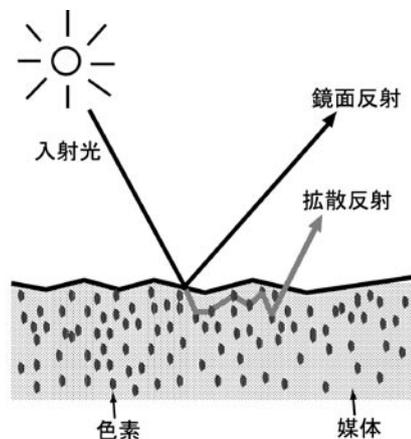


図7 2色性反射の概念

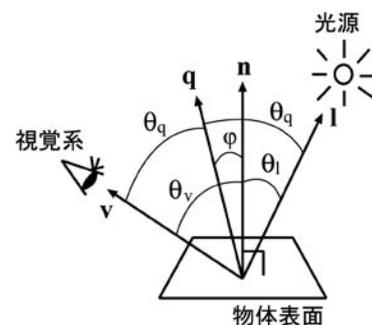


図8 反射の幾何モデル

$$Y(x, \lambda) = \cos(\theta_1) S(x, \lambda) E(\lambda) + \beta \frac{D(\varphi, \gamma) F(\theta_q, n) G(\mathbf{n}, \mathbf{v}, \mathbf{l})}{\cos(\theta_v)} E(\lambda) \quad (2)$$

右辺第1項と第2項は拡散反射成分と鏡面反射成分を表わす。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 $\mathbf{n}$ を中心とするガウス関数を仮定した。

$$D(\varphi, \gamma) = \exp\{-\ln(2) \varphi^2 / \gamma^2\} \quad (3)$$

ここで $\gamma$ は表面の粗さを表わす指標となる。

次に、 $F$ はフレネル反射率である。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。通常は $G=1$ を仮定できる。最後に、 $\alpha$ は鏡面反射成分の強さを表わす係数である。

## 5. 表面特性の推定

### 5.1 拡散と鏡面成分の分離

油彩画表面の解析には、拡散反射と鏡面反射成分に分離する必要がある(図9参照)。前者から油彩画の分光反射率と表面形状を推定し、後者から光沢を推定する。

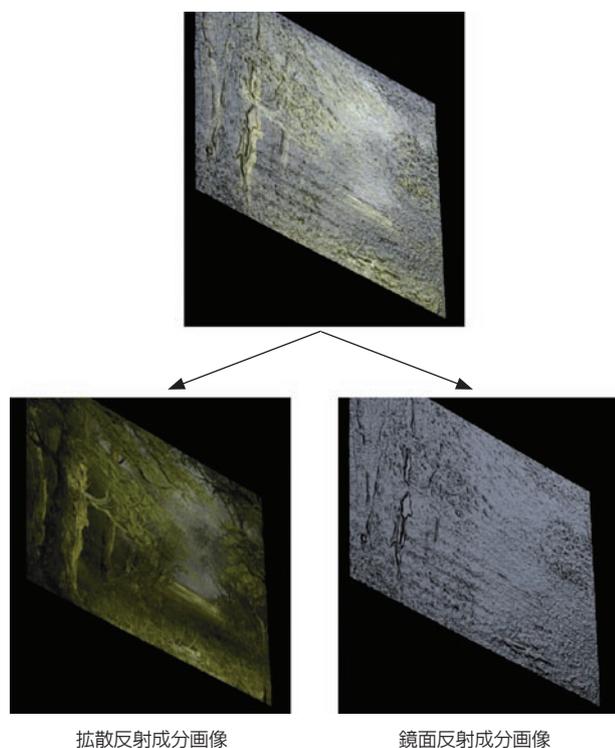


図9 拡散と鏡面成分の分離

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。まず図6に示した照明方向による9枚の画像から、画素毎に閾値を用いて拡散反射成分を選び出す。この閾値は実験的に決定した。このとき鏡面成分と影が含まれる画像は除去する。次に計測画像から推定した拡散反射成分を除去することにより鏡面反射成分を抽出した。

### 5.2 表面形状の推定

物体表面の3次元形状を計測する装置として一般にレーザーレンジファインダが知られており、さらに詳細な形状計測にはレーザー顕微鏡が知られている。図10にレーザーレンジファインダで得られた油彩画表面の形状の一部分を示す。3次元透視図として描かれており、 $Z$ が高さを表す。絵具による盛り上がりがよくわかる。しかし3次元形状計測装置はあくまでも特殊な装置である。レンジファインダは最近よく利用されるが、油彩画の場合、光沢のある細かい凹凸面を精度よく計測できない。

一方、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みなせば、デジタルアーカイブのために完全な3次元形状を構築する必要はない。我々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した。

いま物体表面が完全拡散体であるとするれば、光源からの照明光によって反射した放射輝度は次式で記述される。

$$I_j = \alpha \mathbf{n}^t \mathbf{l}_j \quad (4)$$

ここで $I_j$ は $j$ 番目の光源による輝度値、 $\mathbf{n}$ は面法線の向

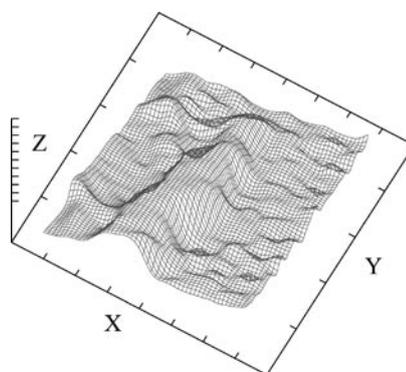


図10 レーザーレンジファインダで得られた絵画表面の一部分形状

きを表わす3次元縦ベクトル,  $\mathbf{l}_j$  は  $j$  番目の光源の方向ベクトル,  $\alpha$  は拡散反射の強さを表す係数である. なお記号  $t$  は行列の転置を表わす. したがって3次元ベクトル  $\mathbf{n}$  を推定する問題は, 少なくとも3つの異なった照明方向  $\mathbf{l}_1, \mathbf{l}_2, \mathbf{l}_3, \dots$  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. 図11はこのようにして推定した法線ベクトルのニードルマップを描いている.

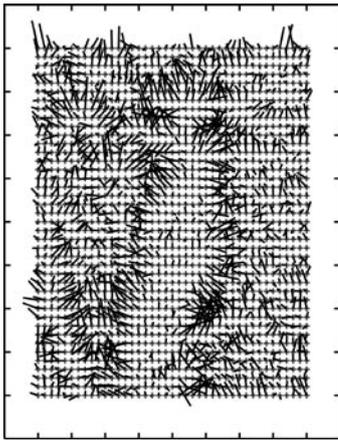


図11 推定した面法線のニードルマップ

### 5.3 表面反射率の推定

有限次元線形モデルで分光反射率を記述した. 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,

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

のように表現できる. ここで  $\{S_k(\lambda)\}$  は基底関数の集合で,  $\{\sigma_k(x)\}$  はそれらに対する重み係数の集合である. RGB カラーカメラを使う場合は  $n=3$  である. 基底関数は多くの物体の分光反射率データから統計的に得られる. 図12は我々が使用した基底関数である.

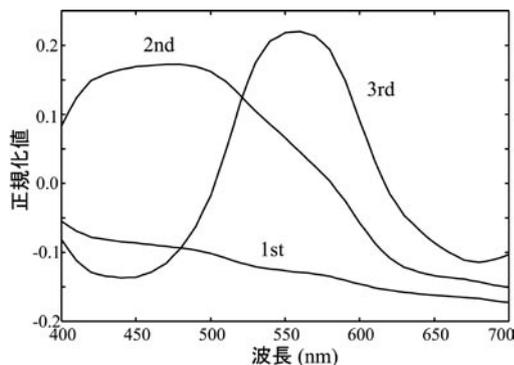


図12 表面分光反射率の基底関数

さて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.  $\rho (\equiv [\rho_i])$  はカメラ出力を表わす3次元縦ベクトル,  $\sigma (\equiv [\sigma_i(x)])$  は反射率係数を表わす3次元縦ベクトル, さらに  $\mathbf{H} (\equiv [h_{ij}])$  は  $h_{ij} = \int E(\lambda) S_j(\lambda) R_i(\lambda) d\lambda$  を要素とする  $3 \times 3$  行列として, それぞれ定義する. 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の推定値は

$$\hat{\sigma} = \mathbf{H}^{-1}\rho \quad (6)$$

で得られる. 最後に, この推定値を (5) 式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.

なおここでは基底関数に基づく分光反射率推定の手法を述べたが, 観測データにノイズを含むときには, Wiener法が有効である.

### 5.4 モデルパラメータの推定

反射モデルで未知パラメータは鏡面項の表面粗さ  $\gamma$ , 屈折率  $n$ , および鏡面反射係数  $\beta$  である. ただし屈折率についてはおおよそ  $n=1.45$  と仮定できる. また絵具は類似の材質とし, 絵画表面の場所に関係なく  $\gamma$  と  $\beta$  は一定値をとると仮定する.

各画素で鏡面成分を求めるために, まず, カメラ出力の拡散成分を算出する. そして9つの観測値の中で最高輝度のものを選び, 拡散成分との差分を計算する. この差分は鏡面反射が含まれる可能性のある観測値といえる. 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 (2) 式の鏡面関数を用いて適合をおこなう. そして適合誤差を最小にするパラメータ  $\gamma$  と  $\beta$  を求める.

## 6. 画像レンダリング

これまでに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 (図13参照). このレンダリングのために光線の放射を一回に限定した光線追跡法を使用した.

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.
- (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次元ベクトルで表わしている.

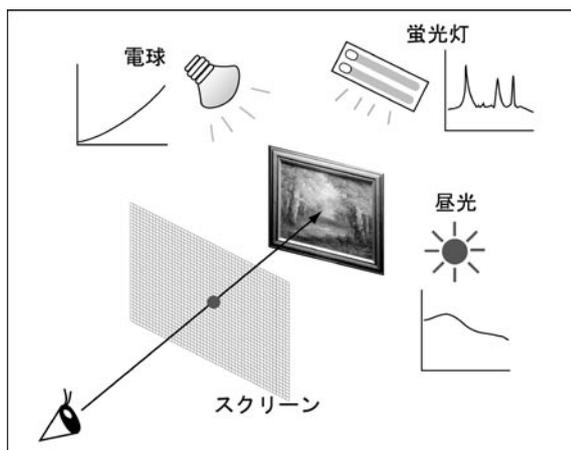


図 13 絵画レンダリングの概念図

- (3) 各座標点の輝度を光線追跡で求める。つまり視点位置と照明条件を設定し、(2) 式から絵画表面の各点において分光放射輝度を算出する。
- (4) 四角ポリゴンの各座標点で色（三刺激値）を決定し、絵画を映像化する。最後に、較正されたディスプレイ装置を用いて、絵画のフルカラー表示を行う。

## 7. 実験結果

図 1 の油絵を用いた実験結果を示す。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。まず、絵画の全画素点で面法線を推定した。次に、分光反射率を全点にわたって推定した。分光反射率の推定精度を試験するために、分光反射率計測装置による直接計測値と比較した。図 14 に結果の二例を示す。図 14 の上図は RGB カメラデータから得た赤い絵具に対する推定結果である。カメラデータからの推定値と直接計測値はよく一致している。下図は絵画中央の空に対する結果である。この場合、起伏のある分光反射率曲線は滑らかな曲線として推定されている。このような複雑な分光反射率の推定にはマルチバンドカメラが有用である。図 14 下図の一点鎖線は前述の 6 色カメラを用いて推定した結果である。

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日光と電球光を想定した。図 15 に対象とした油彩画の左上部のレンダリング結果を拡大して示す。油絵特有の凹凸による陰影と光沢が、電球と日光照明の下で再現できていることがわかる。

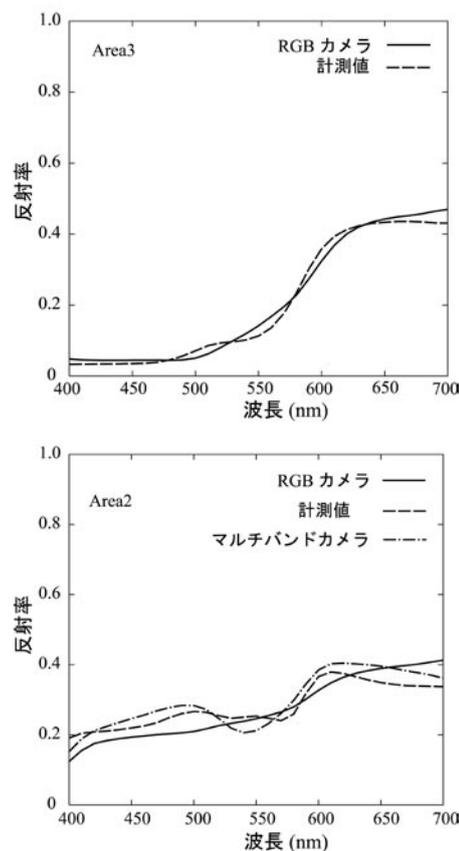


図 14 絵画の分光反射率の推定結果

上：赤い絵具部、下：中央の空部分

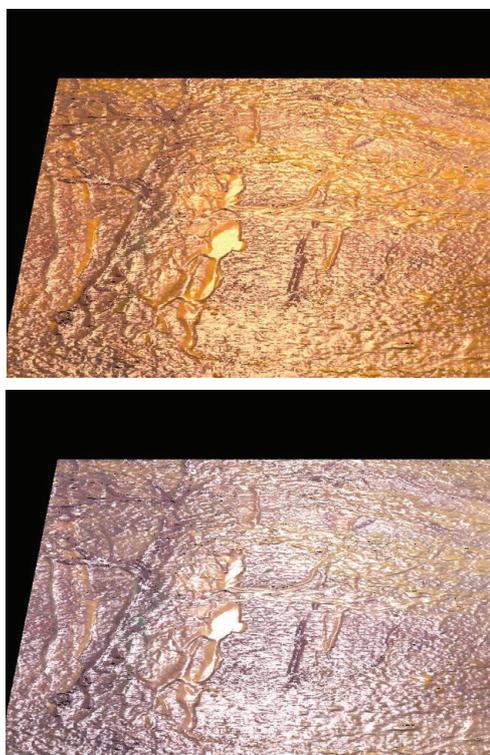


図 15 異なった照明下でのレンダリング画像

上：白熱電球、下：日光

## 8. おわりに

カメラによる簡単なコンピュータビジョンシステムで美術絵画を計測し、希望する環境照明と観察条件下で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た。ここでは絵画の表面形状は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みなした。絵画の表面材質は水彩や油彩の絵具であり、拡散反射成分と鏡面反射成分からなる2色性反射の性質をもつ不均質誘電体とした。

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。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。実際に使用する表示装置について、色の見えの効果を調べ、デジタルアーカイブのシステムに組み込むことが重要といえる。

### 参考文献

- 1) Y. Miyake, et al.: *Proc. SPIE: Color Imaging*, **3648**, 218 (1999).
- 2) S. Tominaga and N. Tanaka: *Proc. of EUROGRAPHICS*, 299 (2002).
- 3) 富永昌治, 田中法博: 情報処理学会論文誌, **45**, 350 (2004).
- 4) S. Tominaga: *J. Opt. Soc. Am. A*, **13**, 2163 (1996).
- 5) K. E. Torrance and E. M. Sparrow: *J. Opt. Soc. Am.*, **57**, 1105 (1967).