

マルチバンドイメージングの最近の技術と認識への応用

富永昌治

大阪電気通信大学 総合情報学部 情報工学科
〒572-8530 寝屋川市初町 18 - 8
shoji@tmlab.osakac.ac.jp

マルチバンドイメージングの最近の技法とその分光画像解析への応用を述べる。マルチバンドイメージングは、RGBにとらわれずに、400-700nmの可視域に4つ以上のセンサを有する多チャンネル撮像系をもつ。シーンを認識するために、照明光の分光エネルギー分布や物体表面の分光反射率を推定する問題があるが、このような連続関数をカラーカメラから推測することは容易でない。本稿では、まずマルチバンドイメージングで多次元画像を獲得するシステムとシーンの分光情報を推定する技法について述べる。さらにシーンの領域分割と絵画のデジタルアーカイブへの応用について述べる。カラーイメージングによる結果と比較して、マルチバンドイメージングの優位性を示す。

Recent Technology of Multi-band Imaging and its Application to Recognition

Shoji Tominaga

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

This paper describes a recent technique for multi-band imaging and its application to the spectral image analysis. The multi-band imaging has a multi-channel system with more than three sensors in the visible region of 400-700nm. It is difficult to estimate the spectral functions of illuminant-spectral distribution and surface-spectral reflectance from three-dimensional RGB camera data. In this paper, we first describe a system for acquiring multi-dimensional images and a method for estimating the spectral functions in a natural scene. Next, the multi-band imaging technique is applied to image segmentation and digital archiving of art paintings. The advantage of multi-band imaging is demonstrated in comparison with color imaging.

1, はじめに

色情報はコンピュータビジョンや画像処理において欠くことのできないシーンからの入力情報である。昨今のデジタルカラーカメラの普及とともにカラー画像の利用は盛んになった。人間の視覚系は400-700nmの可視の波長域で3種類の分光応答関数をもつ。これらは入射した光を3つの色チャンネルに変換する。カラーカメラの構造はこれと同様で、入射した光をR,G,Bの3波長帯に分光する。

このため人間の色覚の機能を機械で実現しようとするコンピュータビジョン研究が1980年代後半から盛んになった。色情報を利用した物体認識研究やカラーコンスタンシー(色恒常性)研究はその代表的なビジョン研究といえる。照明光の色が変化しても人間にとって色の見えは大きく変わらないというカラーコンスタンシーの性質が実現できれば、屋内外シーンでの物体認識が極めて容易になるのは明らかである。

しかし従来のカラーカメラによる手法には限

界があることが指摘されている。一つは、人間の等色性を満足させることができないことである。例えば、人間が二つの物体は同じ色をもつと判断してもカメラ出力が異なったり、違うと判断してもカメラ出力が一致したりすることがある。

二つ目はカラーカメラではカラーコンスタンシーの実現が困難なことである。カラーコンスタンシーの物理的な解釈は、色信号を観測して表面反射率関数と照明光分光分布に無意識のうちに分離する能力といえる[1]-[2]。これまで物体表面と照明光成分を分離するためのアルゴリズムが数多く提案されてきた(例えば[3]-[4]参照)。しかし反射率関数と分光分布は可視光域で定義される波長の連続関数であるから、3次元のカラーカメラ出力から連続関数を推測することは本質的に困難といえる。実際、分光関数に厳しい制約条件をつけて問題を解くことが多かった。

さてマルチバンドイメージングは、RGBにとらわれずに、400-700nmに4つ以上のチャンネル

数を有する撮像系をもつ。このような撮像系を使えば上記の問題点の解決に役立つ。まずカメラ出力が多チャンネルになることにより、カメラの色分解能を人間以上に高めることができる。すなわち二つの物体色は違うと人間が判断すれば、カメラ出力が異なるようにできる。また分光関数に過度な制約が必要でなく、可視光域を帯域に分割することにより、分光情報が獲得し易くなる。

このようなことから筆者らは可視域を対象とするマルチバンドカメラや分光カメラシステムを開発してきた。マルチバンドイメージングの基本構成は帯域フィルタ、モノクロデジタルカメラ、パソコンからなる。本稿では、マルチバンドイメージングで多次元画像を獲得する方法及びシーンの分光情報を推定する最近の技法について述べる。さらに分光情報の利用が有効な物体識別やデジタルアーカイブへの応用について述べる。

2. マルチバンドイメージングシステム

2.1 6色カメラ

図1はモノクロ 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色カメラである。センサの数は照明光と反射率分光関数を表現するために必要なモデル次元から決定した。つまり分光関数の推定精度を考慮して、6つの波長帯(赤, 朱, 黄, 緑, シアン, 青)を使用する。図2は総合分光感度を示す。可視光の波長域が6つの帯域に分割され、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。

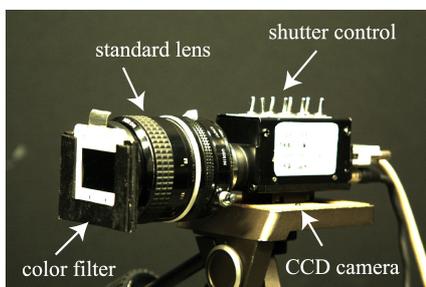


図1 6色カメラ

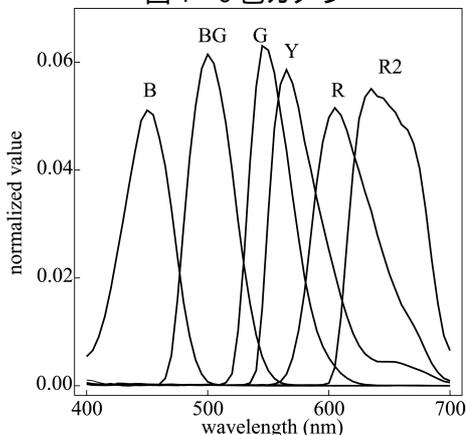


図2 6色カメラの総合分光感度

2.2 スペルトルカメラ

このカメラシステムは液晶フィルタによる分光を利用している [5]。液晶チューナブルフィルタは電子的に制御可能なフィルタで、構造は偏光干渉フィルタの一種でリオ (Lyot) フィルタの設計に基づく。図3は我々の分光カメラシステムである。この液晶チューナブルフィルタの波長帯域は可視域の 450-650 nm で、この範囲で中心透過波長を変えることができる。透過帯域幅(半値幅)はおおよそ 50 nm である。カメラ部は固定で、回転ステージを回転させることによりフィルタの軸を任意の角度に設定できる。図4にこの分光カメラの総合的な分光感度関数を示す。

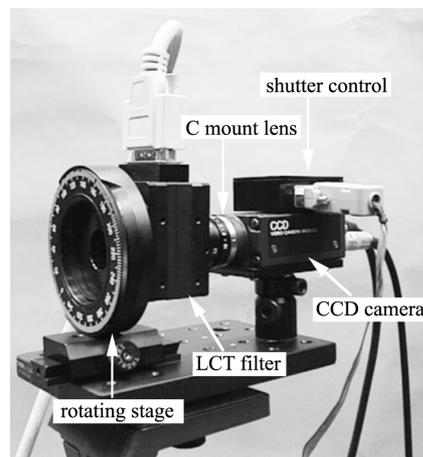


図3 分光カメラシステム

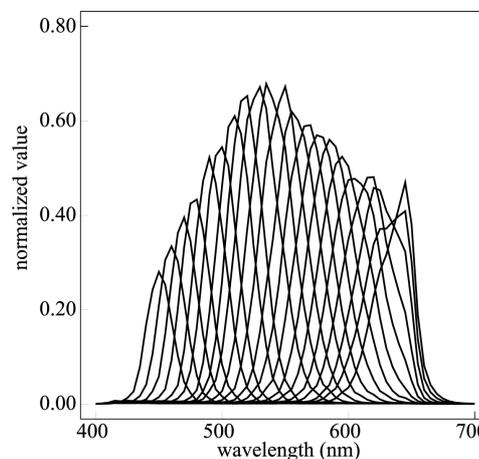


図4 スペルトルカメラの総合分光感度

3. 分光関数の推定

3.1 モデル

照明光分布と表面反射率の分光関数を記述するために有限次元線形モデルが使用される。連続スペクトルの分光関数をいくつかの基底関数を用いて表現するとき、このモデルは分光関数推定

における未知数の数を大幅に減少させることができるので、非常に有用である。

まず照明光の分光分布 $E(\lambda)$ は m 個の基底関数の線形結合で表現できると仮定する。

$$E(\lambda) = \sum_{i=1}^m \varepsilon_i E_i(\lambda), \quad i=1,2,\dots,6 \quad (1)$$

ここで $E_i(\lambda)$ は照明光に対する基底関数の集合で、 ε_i はそれらの重み係数である。次に空間位置 x における分光反射率関数は n 個の基底関数の線形結合として表現できると仮定する。

$$S(x, \lambda) = \sum_{i=1}^n \sigma_i(x) S_i(\lambda), \quad i=1,2,\dots,6 \quad (2)$$

ここで $S_i(\lambda)$ は反射率の基底関数の集合であり σ_i はそれらの重み係数である。

我々はシーン照明を記述する基底関数を決定するために、CIE の標準光源や実際の光源からの分光分布を解析した。さらに分光反射率の基底関数を求めるために分光反射率データベースを利用した。このデータベースは Macbeth Color Checker や Vrhel ら[6]のデータに基づいている。得られた分光反射率の基底関数を図5に示す。

(1)-(2)式で基底関数はあらかじめ既知であるので、推定問題はカメラ出力から重み係数 $\{\varepsilon_i\}$ と $\{\sigma_i\}$ の2つの集合を推測する問題に帰着する。

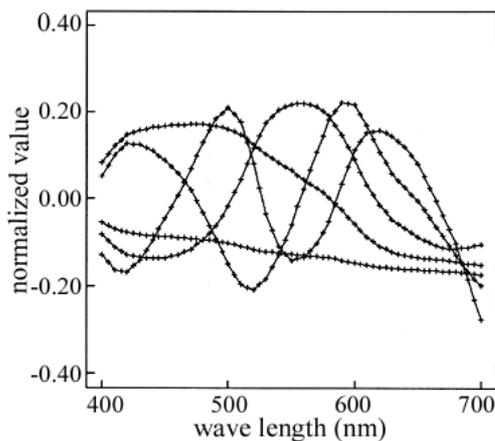


図5 分光反射率の5つの基底関数

3.2 推定アルゴリズム

いまマルチバンドカメラのセンサ数を f とする。画像は空間位置 x における f 個のセンサ出力から成る。色信号 $C(x, \lambda)$ とセンサの分光感度 $R_i(\lambda)$ は出力 $\rho_i(x)$ に次のように関係付けられる。

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

いま物体表面は不均質誘電体物質から成ると仮定しよう。このとき2色性反射モデルから色信号は拡散反射成分と鏡面反射成分の2つの加法成分から成る。センサ出力と照明・反射関数の間の関係を次式のようにマトリクス形式でまとめることができる。

$$\rho(x) = \alpha(x) \Lambda_\varepsilon \sigma + \beta(x) \mathbf{H} \varepsilon \quad (4)$$

ここで、ベクトル $\rho(x)$ は f 個のセンサ出力からなる縦ベクトルである。ベクトル σ と ε は m と n の次元をもち、反射率と照明光に対する重みベクトルを表す。 \mathbf{H} は $f \times m$ 行列で、その (i, j) 成分は

$$\left[\sum_{k=1}^m \varepsilon_k \int E_k(\lambda) S_i(\lambda) R_j(\lambda) d\lambda \right]$$

である。 Λ_ε は $f \times n$ 行列で、その (i, j) 成分は

$$\left[\int E_j(\lambda) R_i(\lambda) d\lambda \right]$$

である。それゆえ推定問題はセンサ出力からシーンパラメータ σ と ε を推定することに帰着する。

パラメータ推定は2段階で達成される。まず、照明パラメータ ε を推定し、次に反射パラメータ σ を推定する。 f 次元のセンサ出力ベクトルは2つのベクトル $\Lambda_\varepsilon \sigma$ と $\mathbf{H} \varepsilon$ の線形結合である。これら2つのベクトルは f 次元ベクトル空間で2次元の部分空間を張る。

図6は一つの光沢あるいはハイライトを有する物体表面に対して観測された画像のヒストグラムを示す。ヒストグラムはマットクラスタとハイライトクラスタの2つから成る。ハイライトクラスタの方向はベクトル $\mathbf{H} \varepsilon$ に一致する。それゆえ照明光はハイライトクラスタの方向ベクトルから推定することができ、反射率パラメータ $\Lambda_\varepsilon \sigma$ はマットクラスタの方向ベクトルから推定することができる ([7]参照)。

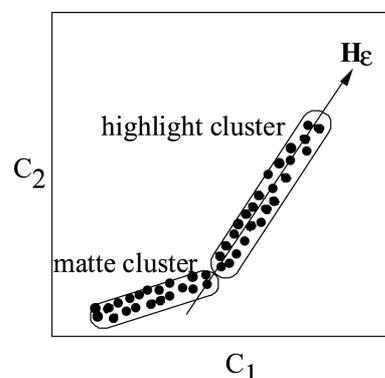


図6 光沢物体の画像ヒストグラム例

4. 領域分割・物体認識への応用

4.1 原理

これまで画像分割は RGB, HLS, CIE-L*a*b* といった色空間を用いて実施されてきた[8]-[9]. HLS 空間は色相, 明度, 彩度の項で定義され, RGB センサ出力から変換できる. CIE-L*a*b* は三刺激値で定義され, この空間は RGB センサ出力と RGB 分光感度関数を用いて近似的に計算できる. カラー画像を領域分割するほとんどのアルゴリズムは 3次元空間における色クラスタの検出に基づいている.

色空間で領域分割が容易でない理由として, 色空間での画素の分布が照明光の色に依存することがあげられる. このためカラーコンスタンシーが必要である. しかし色空間でカラーコンスタンシーの試みはあるものの, 完全な実現は難しい.

マルチバンドイメージングに基づく照明光に不変な空間は画像分割を改善させることができる[10]. 実際, 図3のスペクトルカメラを 450-650nm の範囲で 10nm おきに動作させれば, 照明光に不変な 21次元空間をセンサ出力と推定した分光分布を用いて生成することができる. しかしクラスタの分類をそのような高次元空間で実施することは計算コストが極めて高いといえる. このため我々は比較的少数の物体からなるシーンに対して簡便で有効な手法を開発した.

まず, センサ出力から照明光の影響を取り除く.

$$\rho''_i(x) = \rho_i(x) / \int_{400}^{700} \hat{E}(\lambda) R_i(\lambda) d\lambda \quad (5)$$

ここで $\hat{E}(\lambda)$ は照明光スペクトルの $H\epsilon$ の推定値である. 分光感度 $R_i(\lambda)$ は狭帯域であるので正規化ベクトル $\rho''(x) \equiv [\rho''_1(x), \rho''_2(x), \dots, \rho''_f(x)]^T$ は照明光に依存しない. このベクトルはフラットなスペクトルをもつ白色照明に対するセンサ出力である.

次に, 各センサ出力と物体色の対応関係に注目する. 可視領域 450-650nm は (赤, 黄赤, 黄, 黄緑, ...) といった波長帯域の系列に分割することができる. センサ出力 ρ''_i は観測した物体表面の色(スペクトルカラー)に対応する波長帯において最大値をとる. 例えば, センサ ρ''_{19} は黄の表面に対して選択的に応答する. それゆえ均一な物体色をもつ領域は 3段階で抽出できる. まずセンサ出力の最大を各画素で見出し, 次にその最大となるセンサ番号を画素に割り当て, 最後に同じセンサ番号をもつ隣接画素の集合を検出する.

ここで波長帯域 (赤, 黄赤, 黄, 黄緑, ...) の系列は色知覚の三属性の色相成分を表すことに注意する. このように領域分割処理が最大値センサ番号についての簡単な 1次元処理に帰着さ

せることができる. この手法はまた強いハイライトを含む表面に対しても有効である.

4.2 適用結果

材質は異なるが類似した物体色をもつシーンに適用した. 図7は直方体, 円筒, 曲面物体のシーンで, スライドプロジェクタで照明されている. これらの物体の表面材料はプラスチックや塗料といった不均質誘電体としてみなせる. 図7で赤い物体 3, 4, 9 の色彩値はお互い類似している. 他方これらの物体の分光反射率は互いに異なっている. さらに物体 1 と 6 は黄の, 物体 2 と 8 は緑の, 物体 5 と 7 は青の類似した色彩値をとる. これらの表面分光反射率はそれぞれ異なっている. つまり物体は色彩値によって識別することができず, 分光反射率によって同定が可能となる.

マルチバンド画像の暗い領域を除く全画素について分割を実施した. 各画素で照明光と雑音の影響を取り除いた後, 最大出力のセンサ番号に基づいて画素を分類した. 分類された画素の番号配列を 3×3 のメジアンフィルタで平滑化した. 図8は画像分割の結果を示す. 物体表面は 6つの異なった色を持つ 9つの領域に分割されている. 例えば, 赤領域 3, 4, 9 は同じセンサ番号をもつ. これらの領域に対する分光反射曲線はお互い異なっているが, 各領域の正規化した分光反射率曲線は類似している. したがって同じ材質かもしれない.

上の分割結果を従来法と比較した. 図9と図10は RGB カラー画像と 6チャンネル画像を用いて処理した結果である. 図9, 10では K-MEANS クラスタリングを使用した. 11個のクラスタが抽出された. 両分割結果は近いけれども, 画像がうまく分割されていないし, 陰影やハイライトの影響が両方に残ったままである.

最後に図11は図8の各領域に対して推定された分光反射率である. ここで印と+印の記号は, それぞれ, 推定した反射率と計測した分光反射率を示す. 推定した分光反射率曲線は物体表面の材質を同定するために使うことができる.

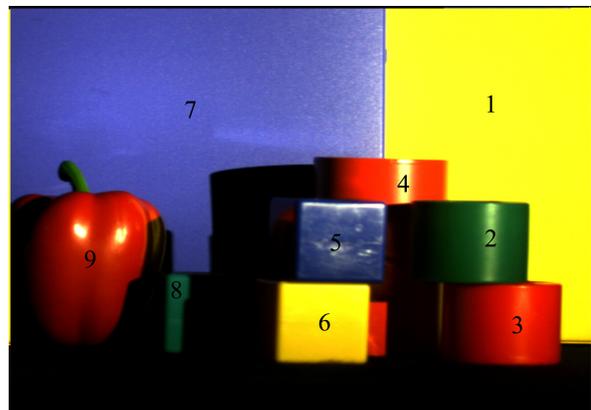


図7 異なった材質で類似した物体色のシーン

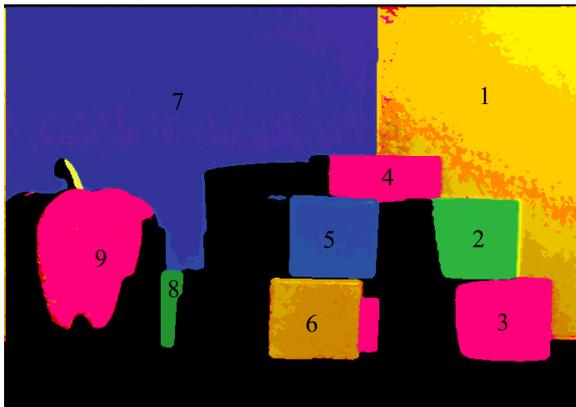


図 8 最大値センサ番号での分割結果



図 9 RGB 画像のクラスタリングによる結果



図 10 6 バンドのクラスタリングによる結果

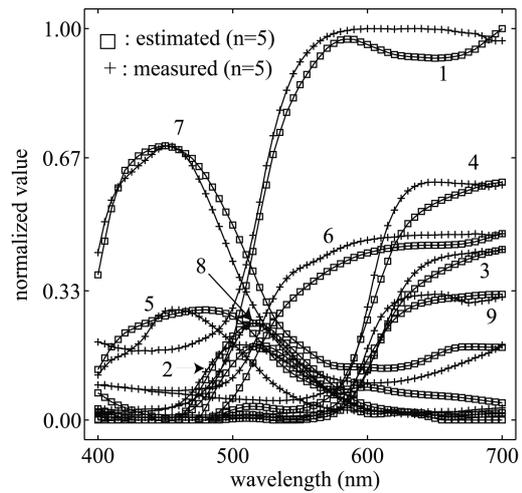


図 11 表面分光反射率の推定結果

5. 絵画のデジタルアーカイブへの応用

筆者らは美術絵画を対象としたデジタルアーカイブに興味を持っている。この手法はデジタル画像として取り込んで映像再現するもので、分光反射率に基づくことが多い[11]-[12]。これに関する初期の技法は、拡散光源のもとで特定の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。しかも油彩画表面には、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、これらは油彩画のリアルな質感を表現するために重要な要素となる。このため分光反射率情報のみではリアルな質感の再現は難しい。

そこで我々はまず一般的な RGB カラーカメラで油彩画を計測し、その表面反射特性と表面形状を推定する手法を開発した[13]。一般に油絵の具は、彩度が高く深み感のある物体色がある。RGB センサから分光反射率を推定すれば、高周波成分をもつ分光反射率曲線の推定では精度が落ちる。そこでこのような油彩画に対してマルチバンドカメラを使用する。

このカメラシステムで照明方向を変えながら複数の画像を計測する。まず、画像データから拡散成分と鏡面成分の分離を行う。次に、表面特性として形状情報と分光反射率を推定する。さらに反射モデルを決定してそのモデルパラメータを推定する。そしてこれら記録データに基づいて、任意の照明視環境における絵画のレンダリングを実施する。

5.1 計測

図 12 は計測系で、油彩画に対してカメラを垂直に配置する。我々は 6 色のマルチバンドカメラを使用した。この場合マルチバンドのカラーフィルタはカメラではなくて、光源側に装着する。計測には、照明方向を、絵画に対して垂直方向と周

図8方向,合計9方向に変化させながら画像計測する。光源は点光源を仮定し,照明方向は鏡面球を用いて計測する。絵画平面上での照度むらを補正するために,絵画と同一場所に標準白色板を置き,その照度分布が均一になるように補正した。

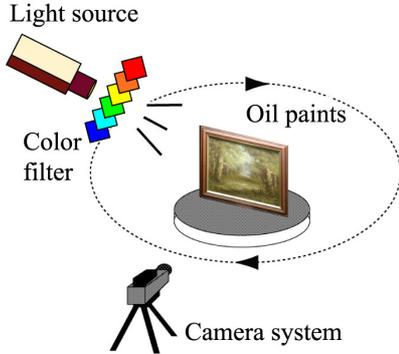


図12 絵画のマルチバンド計測シーン

5.2 較正と分離

照明方向:

光源は平行光よりも点光源に近い特性をもつ。この場合,計測した画像上の画素ごとに照明方向ベクトルが異なる。本研究では照明光の位置はあらかじめ計測しており,視線ベクトル V と油彩画表面に置いた鏡面球から油彩画の位置を推定し,図13のように各画素における照明方向ベクトル L を推定した。

鏡面・拡散分離:

油彩画表面の推定には,拡散反射と鏡面反射成分に分離する必要がある(図14参照)。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。まず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。

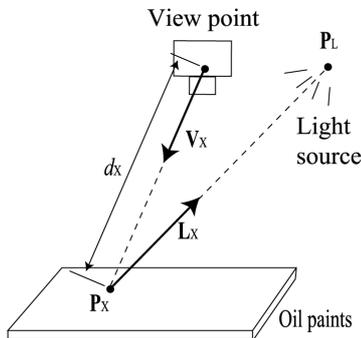


図13 照明方向の推定

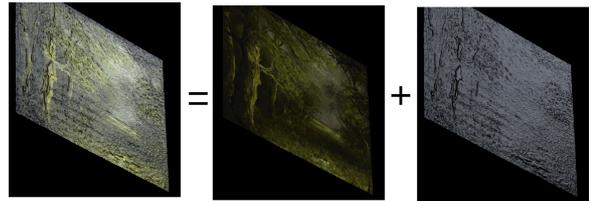


図14 拡散成分と鏡面成分の分離

5.3 表面特性の推定

面法線:

油彩画表面形状を法線ベクトルの集合として推定する。法線ベクトルの推定するために照度差ステレオ法を用いた。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,カメラ出力をこの輝度値で基準化する。

物体が完全拡散体であるとき,光源照明光によって反射した放射輝度は次式で記述される。

$$I_j = \alpha n^t L_j \quad (6)$$

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が,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における放射輝度値を獲得すれば解くことができる。

分光反射率:

分光反射率は抽出した拡散反射成分から推定する。単一光源下での拡散反射成分のみのカメラ出力は次式のように記述できる。

$$\rho_k = \int_{400}^{700} S'(\lambda) E_k(\lambda) R(\lambda) d\lambda \quad (7)$$

ここで $R(\lambda)$ はモノクロ CCD カメラの分光感度である。 $E_k(\lambda)$ 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分光反射率の連続関数を推定する。これには3章で述べた基底関数を用いる手法が従来よく適用されてきたが,カメラ系のノイズ成分を考慮するならば, Wiener 法が適している。

いま分光反射率を n 次元ベクトル s で表現し,その相関行列を S_{SS} ,カメラ感度と照明光からなる $6 \times n$ 行列を R とおく。観測ノイズの分散を σ^2 とする。分光反射率の推定値 \hat{s} は次式で求まる。

$$\hat{s} = S_{SS} R^T \left[R S_{SS} R^T + \sigma^2 I \right]^{-1} \rho \quad (8)$$

5.4 反射モデルの推定

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。このとき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。

$$Y(x, \lambda) = \cos(\theta_i) S(x, \lambda) E(\lambda) + \beta \frac{D(\varphi, \gamma) F(\theta_q, n) G(\mathbf{n}, \mathbf{v}, \mathbf{l})}{\cos(\theta_v)} E(\lambda) \quad (9)$$

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。 D は鏡面の微小面の向きを表す分布関数で、表面の粗さを表わす指標 γ を含む。 F はフレネル反射率で、さらに G はマスク遮蔽係数である。最後に β は鏡面反射成分の強さを表す。

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。これらは一枚の絵画で一定値をとると仮定した。屈折率については $n=1.45$ を使用した。パラメータを推定するために、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(9)式の鏡面関数を適合した[13]-[14]。

5.5 レンダリング

油彩画のレンダリングは、推定した3種類の情報、分光反射率、法線情報、反射モデルパラメータを用いて行う。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(9)式の分光モデルに基づいて次式のように三刺激値 $[X, Y, Z]^T$ を算出し、正確に物体色の見えを決定する。ここでは一度各種パラメータが求まれば、レンダリングの際には、任意の照明環境と視環境の設定が可能である。つまり、蛍光灯、電球光、昼光といった異なった分光エネルギー分布をもつ複数の照明光源が任意の場所で同時照明するような環境が設定できる。

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

ここで $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ は等色関数である。油彩画の映像化アルゴリズムはレイキャスティング法を用いた。また三刺激値から表示デバイスのRGB値への変換は、変換マトリックスとルックアップテーブルを用いた。

5.6 適用結果

油絵の具の分光反射率：

まず油絵の具の単色サンプルを用いて分光反射率の推定精度を調べた。図15は計測したカラーサンプルで、ホルベイン製油絵の具19色を用いた。これらのカラーサンプルをマルチバンドカ

メラとカラーカメラそれぞれで計測した。推定結果は、分光放射輝度計による計測値と比較した。図16に permanent green light の結果を示す。実線はマルチバンドカメラ、破線はカラーカメラによる推定値で、一点鎖線は分光放射輝度計による計測値である。マルチバンドカメラの推定精度が高いことがわかる。



図15 油絵の具のサンプル

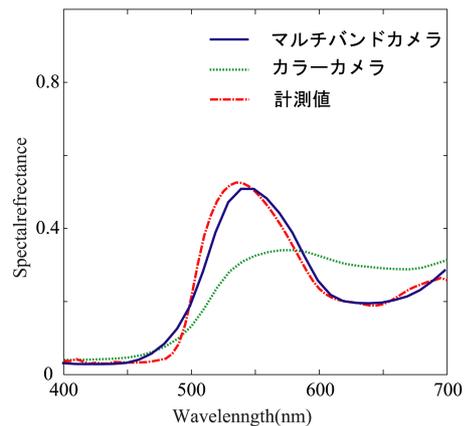


図16 Permanent Green Light に対する推定結果

油彩画の推定結果と映像化：

図17は実験に使用した美術絵画の油彩画である。図中で指定している24箇所について、カラーカメラとマルチバンドカメラの推定精度を比較した。図18はこのうち一箇所を取り出したものである。実線はマルチバンドカメラ、破線はカラーカメラによる推定値で、一点鎖線は分光放射輝度計による計測値である。

次に法線ベクトルの推定精度を検証した。最後に推定パラメータを用いて油彩画のCG画像を生成した。図19はD65での油彩画の見えを示す。

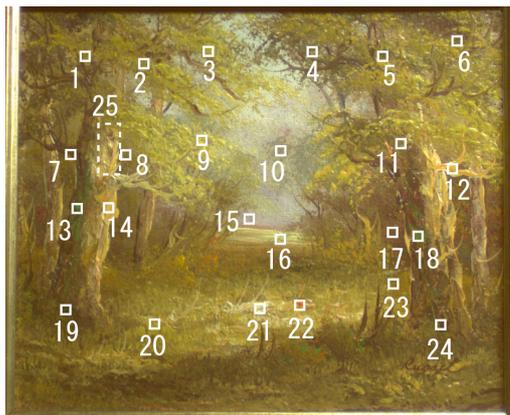


図 17 解析対象の油彩画

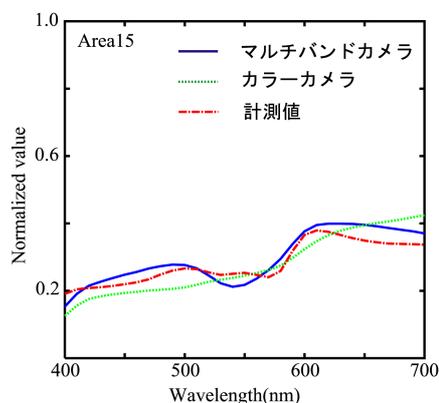


図 18 油彩画の分光反射率推定結果の例

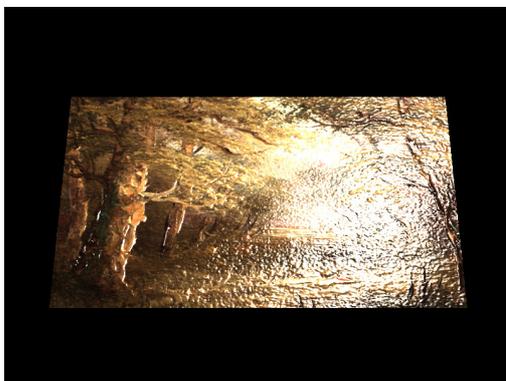


図 19 油彩画の画像生成結果の例

6. おわりに

本稿ではマルチバンドイメージングの最近の技法とその画像解析への応用を述べた。マルチバンドイメージングは、RGBにとらわれずに、400-700nmの可視域に4つ以上のセンサを有する多チャンネル撮像系をもつ。コンピュータビジョンや画像解析において、物体や環境を認識するために基本課題として、照明光の分光エネルギー分布や物体表面の分光反射率を推定する問題がある。表面反射率関数と照明光分光分布は、400-700nmの可視光域で定義される波長の連続

関数で、3次元のカラーカメラ出力からこのような連続関数を推定するには難しかった。

マルチバンド撮像系の基本構成は帯域フィルタ、モノクロデジタルカメラ、パソコンからなる。ここでは、まずマルチバンドイメージングで多次元画像を獲得する方法及びシーンの分光情報を推定する最近の技法について述べた。さらにシーンの領域分割と絵画のデジタルアーカイブへの応用について述べた。いずれの場合もカラーイメージングによる結果と比較して、マルチバンドイメージングの優位性を示した。

参考文献

- [1] B.A. Wandell. *Foundations of Vision*, Sinauer Associates, Sunderland, MA, 1995.
- [2] 富永昌治, "色知覚と色彩メディア処理(V・完)," 電子情報通信学会誌, vol.82, no.1, pp.62-69, 1999
- [3] 松山隆司, 他編, コンピュータビジョン: 技術評論と将来展望, 新技術コミュニケーションズ, 1998.
- [4] 富永昌治, "カメラを用いた分光情報の計測と推定," 日本色彩学会誌, Vol.24, No.1, pp.24-28, 2000
- [5] 富永昌治, 岡島良介, "液晶フィルタによる分光画像システムの改良," 映像情報メディア学会誌, vol.54, no.2, pp.268-276, 2000
- [6] M.J. Vrhel et al., "Measurement and analysis of object reflectance spectra," *Color Research and Application*, vol.19, pp.4-9, 1994.
- [7] S. Tominaga, "Multichannel vision system for estimating surface and illumination functions," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 13, pp. 2163-2173, 1996.
- [8] S. Tominaga, "Color Classification of Natural Color Images," *Color Res. and Appl.*, Vol.17, pp. 230-239, 1992.
- [9] R. Bajcsy, et al., "Detection of diffuse and specular interface reflections and inter-reflections by color image segmentation," *Int. J. of Computer Vision*, Vol. 17, pp. 241-272, 1996.
- [10] S. Tominaga, "Object recognition using a multi-spectral imaging System," *Machine Graphics & Vision*, Vol.11, No.2/3, pp.221-240, 2002
- [11] Y. Miyake, et al., "Development of multiband color imaging systems for recording of art paintings," Proc. SPIE: Color Imaging, Vol.3648, pp.218-225, 1999.
- [12] S. Tominaga and N. Tanaka, "Measuring and Rendering Art Paintings Using an RGB Camera", Proc. of EUROGRAPHICS 2002, pp.299-306, 2002.
- [13] 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, Jan. 2004.
- [14] 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 グラフィクスと CAD 合同シンポジウム* 2003, pp.165-170, 2003.