

マルチバンドイメージング技術とビジョン応用

富 永 昌 治†

本論文ではマルチバンドイメージングの技法とそのビジョン問題への応用を述べる。マルチバンドイメージングは、RGBの3チャンネルに固定した撮像系と異なり、400–700 nmの可視域に4つ以上のチャンネル数を有する撮像系である。これによりいくつかのビジョン問題の解決につながる。まずカメラ系の色分解能を大きく改善することができる。次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といった分光関数の推定が容易になる。マルチバンド撮像系の基本構成は狭帯域フィルタ、モノクロデジタルカメラ、パソコンからなる。本論文では、まずマルチバンドイメージングのシステムと分光情報を推定するアルゴリズムを述べる。応用問題としては、物体の識別と絵画のデジタルアーカイブを取り上げる。前者では、まずナチュラルシーンでの効率的な物体識別法を提案し、次にプリント回路基板上の材質の識別法を提案する。絵画のデジタルアーカイブは油彩画を対象とし、物体表面の性質として分光反射率、面法線、反射モデルを推定する。これらの推定値から任意の視環境における絵画の画像を生成することができる。実験結果で、カラーイメージングと比較して、マルチバンドイメージングの優位性を示す。

A Technique for Multi-band Imaging and Its Application to Vision

SHOJI TOMINAGA†

This paper describes a technique for multi-band imaging and its application to vision problems. The multi-band imaging system has more than three channels in the visible range of 400–700 nm, different from the fixed system with three channels of RGB. This system is useful for solving several vision problems. First, it improves color resolution of the camera system. Second, the system makes it easy to estimate spectral functions such as spectral-energy distribution of a light source and spectral reflectance of an object surface. The basic system of multi-band imaging consists of narrowband filters, a monochrome digital camera, and a personal computer. In this paper, we first describe systems for multi-band imaging and algorithms for estimating the spectral information. Next, we discuss the applications to the problems of object recognition and digital archiving of art paintings. Concerning object recognition, we propose an effective method for identifying objects in a natural scene and a method for classifying object materials on a raw circuit board. Concerning digital archiving of oil paintings, we estimate the surface properties of spectral reflectances, surface normals, and a reflection model. Images of the paintings under arbitrary viewing conditions can be rendered using these estimates. The superiority of multi-band imaging to color imaging is shown in experimental results.

1. はじめに

色情報は人間の視覚系がそうであるように、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画像色彩の利用はますますさかんになった。人間の視覚系は400–700 nmの可視の波長域で、短波長、中波長、長波長と3種類の分光応答関数を持っている。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、カメラに入射した光をR, G, B 3つの波長帯に分光する。そこで我々は3種類の分光画像からシーンを理解しようとする。

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は1980年代後半からさかんになった。特に色情報による物体認識やカラーコンスタンシー（色恒常性）はその代表的なビジョン研究といえる。色の知覚の重要な性質として、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性質があり、これが実現できれば屋内外のシーンで物体認識がきわめて容易になる。

さて従来のカラーカメラによるビジョン研究には一定の限界があることが指摘されている。その理由の1

† 大阪電気通信大学情報通信工学部情報工学科
Department of Engineering Informatics, Osaka Electro-Communication University

つは、3バンドカメラでは人間の等色性を現実に満足させることができないことである。たとえば、人間が2つの物体色を等色と判断してもカメラ出力が異なったり、異なる色と判断してもカメラ出力が一致したりすることがある。等色性を満足するセンサの条件をルーラ条件と呼び、色彩計ではこの条件は必須である。つまりカラーカメラは色彩計にならないのである。

2つ目の理由は、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1つの解釈は、視覚系に入射した色信号から物体表面の分光反射率と照明光の分光分布を無意識のうちに分離する能力といえる^{1)~2)}。そのため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^{3)~13)}。しかし表面分光反射率と照明光分光分布は、400~700 nmの可視光域で定義される波長の連続関数である。したがって3次元のカラーカメラ出力から複雑な連続関数を推測するには本質的な難しさがある。このため問題の解決にあたって分光関数にかなり厳しい物理的制約条件を課する必要があった。

3つ目の理由は、分光画像そのものを獲得・処理する必要性が出てきたことである。たとえば、蛍光物体や蛍光灯照明下でのシーンの認識は本質的に分光解析を必要とする。また画像の生成過程はそもそも分光で、分光エネルギー分布、分光反射率、分光透過率といった物理量の波長計算に基づく。つまり異なった視環境での物体の見えは分光計算で生成できる。

さてマルチバンドイメージングは、RGBにとらわれずに、400~700 nmに4つ以上のチャネル数を有する撮像系である。このようなマルチバンド撮像系を使えば、上記の課題に対処することができる。まずカメラ出力が多チャネルになることにより、カメラ系の色分解能を飛躍的に高めることができる。すなわち異なった物体色には、カメラ出力が異なるようにできるし、たとえ等色であっても分光レベルで区別することも可能である。次に分光関数に過度な制約が必要でなく、分光情報の獲得がより直接的になることによって推定精度も高くすることができる。

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狭帯域フィルタ、モノクロデジタルカメラ、パソコンからなる。本論文では、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とシーンの分光情報を推定するアルゴリズムを述べ、さらに、(1) 物体の識別と、(2) 絵画のデジタルアーカイブへの応用を述べる。

ビジョン応用として最も根元的な問題の1つは物体

の識別である。分光情報の使用はカラー情報よりも物体識別に有利である。この場合、照明環境について2つの異なった状況がある。1つはナチュラルシーンのように照明光源を制御できない環境での物体識別である。人間はこのような環境で物体を識別している。他方は、あらかじめ既知の光源を用いて、照明系を適切に制御できる環境である。たとえば、産業界での製品検査はこれにあたる。照明光の分光分布が既知であれば、物体表面の分光反射率をカメラデータから比較的精度良く推定することができる。

さて、分光反射率は物体表面に固有の物理量で、これが分かれば任意の照明光での映像を再現することが可能となる。しかし物体の質感をリアルに再現するには、物体のより詳細な反射特性が必要である。たとえば、油絵の具で描いた絵画(油彩画)の表面には、光沢やハイライト、さらに凹凸が見られる。これらの見えを映像で再現するには、分光反射率に加えて物体表面の光反射をモデル化したり、表面形状の情報を推測したりする必要である。絵画のデジタルアーカイブは、絵の具の識別だけでなく、絵画のリアルな映像再現まで含む包括的なビジョン問題である。

以下では、2章でマルチバンドイメージングの具体的なシステムについて述べる。3章で照明光の分光分布や物体表面の分光反射率を推定するアルゴリズムを述べる。応用問題として、4章でナチュラルシーンを想定して、効率的な識別法を提案する。5章で製品検査への応用として回路基板の材質識別法を提案する。6章は絵画のデジタルアーカイブで、絵画表面の推定と画像の高機能レンダリング法を提案する。

2. マルチバンドイメージングシステム

マルチバンドイメージングを実現するために様々な手法が考えられるが、現実に使用されるシステムとして以下のような方式があげられる。

(1) 一般のカラーカメラにフィルタを外付けする方式

最も簡単なマルチバンドイメージングで、カラーカメラのレンズにカラーフィルタを1枚装着すれば、カメラの分光感度は波長のずれを起こす。これを元の分光感度を組み合わせれば、6バンドのイメージング系となる。このような方式は簡単であるが、各バンドの分離独立性は悪いといえる。

(2) カラーフィルタとモノクロカメラを組み合わせる方式

複数のカラーフィルタの分光透過率を適切に選択することによって、400~700 nmの可視光域をいくつか

の帯域に分割することができる．フィルタにはラッテンゼラチンフィルタや干渉フィルタを利用する¹⁹⁾．

(3) プリズム分光とモノクロカメラを組み合わせた方式

プリズムを使って分光した各波長の単色光を一次元アレイセンサで受光すれば、かなり高波長分解能のスペクトル情報が得られる．イメージングには一定方向の走査が必要で画像取得に時間がかかる．最近、プリズム分光の代わりに干渉フィルタアレイを使ったシステムも提案されている¹⁴⁾．

(4) 液晶フィルタとモノクロカメラを組み合わせた方式

液晶の偏光特性を多段にしてうまく組み合わせれば、帯域フィルタとなる．この偏光特性を電子的に制御可能にしたものは液晶チューナブルフィルタとして開発されている²⁵⁾．

(5) 3色カメラを2台使う方式

1つのレンズ系を通過した光をビームスプリッタで2経路に分け、2台の3色カメラで撮影すれば、6バンドのスペクトルカメラを構成することができる¹⁵⁾．このシステムの特徴は動画の取得が可能なことである．

さて本論文では(2)と(4)の方式に基づくマルチバンドイメージングシステムを実現している．2.1節では6つのカラーフィルタとモノクロカメラを組み合わせた具体的なシステムを述べる．2.2節では液晶フィルタとの組合せで、より詳細な分光情報を獲得するシステムを述べる．

2.1 6色カメラ

可視域を6つの帯域に分割し、各帯域に対応した単色画像を計測するシステムを6色カメラと呼ぶ．筆者らは初期システム¹⁰⁾から改善を加えつつも¹³⁾、一貫してこの方式のシステムを採用してきた．図1に現在の6色カメラシステムを示す．これはモノクロCCDカメラ(東京電子, CS3920), 標準レンズ(Nikon Nikkor 35 mm F2S), 6種類のカラーフィルタ(ラッテンゼラチンフィルタ), およびパソコンからなる．各単色画像は画素数1236×1636, 10ビット(1024階調)で獲得している．ただしハイダイナミックレンジ画像に対応するため、シャッタースピードを変化させて画像を合成するレンジ拡張を行っている．

バンドの数(センサ数)は照明光分光分布と表面分光反射率を表現するために必要なモデル次元から決定している．つまり分光関数は、後述するような線形モデルを使えば、3-5次元モデルで表現することができることから、6つの波長帯(赤, 朱, 黄, 緑, シアン, 青)を使用している．図2はモノクロカメラとフィル

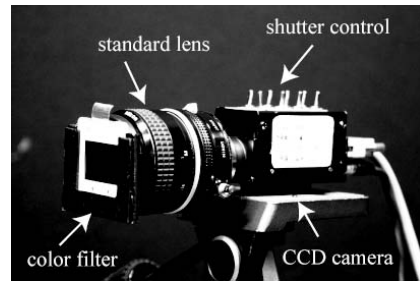


図1 6色カメラシステム

Fig. 1 Six-color camera system.

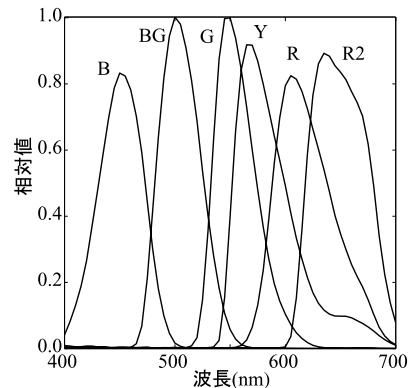


図2 6色カメラシステムの総合分光感度関数

Fig. 2 Overall spectral sensitivity functions of the six-color camera system.

タを組み合わせた総合的分光感度関数を示す．可視光の波長域が6つの帯域に分割され、各バンドに対応した分光画像が獲得される．このシステムの特長は構造が単純で、分光特性がつねに安定していることである．

2.2 スペクトルカメラ

液晶チューナブルフィルタは分光特性が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のリオフィルタ¹⁶⁾の設計に基づいている．このときリオフィルタは液晶チューナブル素子の波長板と複屈折結晶素子を組み込んだ数段で構成される．チューナブル素子は透過波長を電子的に調整することが可能で、段数を増大すれば、より狭帯域の透過特性となる．

図3は筆者らの分光カメラシステムの1つで、液晶チューナブルフィルタはCRI社のVISIモデルを使用している．フィルタの波長域は可視域の450-650 nmで、この範囲で中心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、フィルタの光軸を任意の角度に設定できるようにしている．図4にこのスペクトルカメラの総合分光感度関数を示す．フィルタの特性として短波長側の感度が

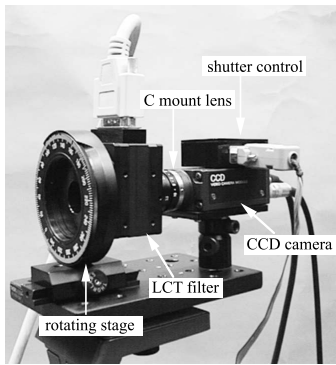


図 3 スペクトルカメラシステム
Fig. 3 Spectral camera system.

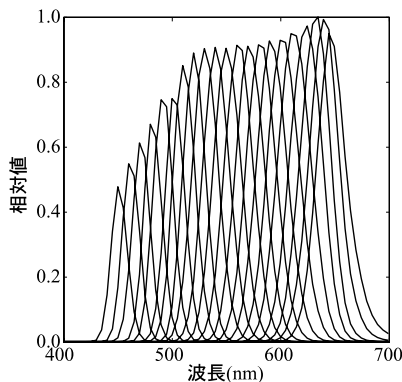


図 4 スペクトルカメラシステムの総合分光感度関数
Fig. 4 Overall spectral sensitivity functions of the spectral camera system.

低いことに注意する必要がある．筆者らはこのほかに、帯域幅 20 nm、全可視域 400–700 nm で動作可能なシステムや後述のような微小領域撮影用のシステムを使用目的に合わせて構築している．しかし原理は上記と同様である．

3. 分光関数の推定

3.1 分光関数のモデル

一般に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³⁾．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．

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

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

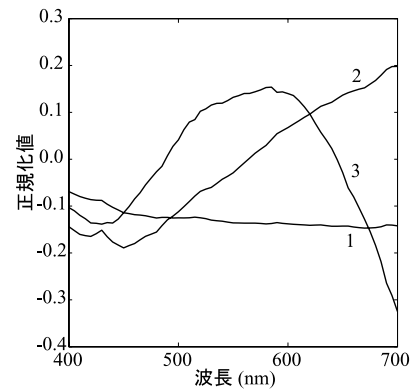


図 5 光源分光分布の基底関数
Fig. 5 Basis functions for illuminant spectral distributions.

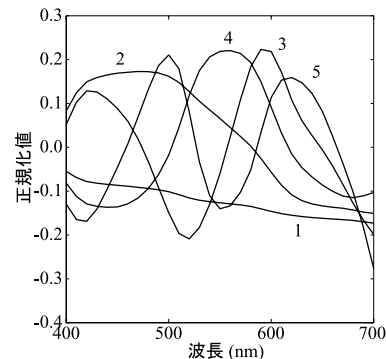


図 6 表面分光反射率の基底関数
Fig. 6 Basis functions for surface spectral reflectances.

ここで $\{E_i(\lambda)\}$ は照明光に対する基底関数の集合で、 $\{\varepsilon_i\}$ 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．

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

ここで $\{S_i(\lambda)\}$ は反射率の基底関数の集合であり、 $\{\sigma_i\}$ はそれらの重み係数である．筆者らはシーン照明を記述する基底関数を決定するために、CIE の標準光源やいくつかの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¹⁷⁾ のデータに基づいている．これから得られた分光分布と分光反射率の基底関数を図 5、図 6 に示す．図中の曲線は各データ集合の主成分ベクトルに対応する．図 5 の光源分光分布については、最初の 2 成分で寄与率は 96.96% で、3 成分で寄与率は 99.89% となる．つまり照明光源の分

光分布は3つの基底関数で記述できる．図6の表面分光反射率については，最初の4成分で寄与率99.64%，5成分で99.80%となり，すべての物体表面の分光反射率はおおよそ5つの基底関数で記述できることになる．このような結果より，分光関数を推定するためにマルチバンドカメラは5つ以上のバンドが必要となる．

式(1)，(2)で，基底関数は既知であるので，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．

3.2 分光関数の推定アルゴリズム

3.2.1 照明光を直接推定する場合

(A) 光源

スペクトロラジオメータと標準白色物体が使用できれば，照明光源の分光分布を直接計測することができる．また標準白色物体のみ使用できるなら，マルチバンドカメラ出力と基底関数から分光分布を推定できる．

いまマルチバンドカメラのバンド数を f とする．標準白色物体に対するカメラ出力は

$$\begin{aligned} \rho_i(x) &= \int_{400}^{700} E(\lambda)R_i(\lambda)d\lambda \\ &= \sum_{j=1}^m \varepsilon_j \int_{400}^{700} E_j(\lambda)R_i(\lambda)d\lambda \quad (3) \end{aligned} \quad (i = 1, 2, \dots, f)$$

と書ける．ここで $\{R_i(\lambda)\}$ は各センサの分光感度である．上式を行列で表現すれば

$$\rho = H\varepsilon \quad (4)$$

となる．ベクトル ρ は f 個のセンサ出力からなる縦ベクトル， ε は m 次元係数ベクトル， H は $f \times m$ 行列で，その (i, j) 成分は $[\int E_j(\lambda)R_i(\lambda)d\lambda]$ である．このとき係数ベクトル ε は一般化逆行列 H^+ から， $\hat{\varepsilon} = H^+\rho$ の形式で推定できる．これを式(1)に代入すればよい．

(B) 反射率

(1) 分光分布を既知とし，まず狭帯域スペクトルカメラを想定して，分光反射率を推定する．いま各バンドの中心波長を $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_f$ とする．バンドが狭帯域ならば，空間位置 x に対するセンサ出力は

$$\begin{aligned} \rho_i(x) &= \int_{400}^{700} S(x, \lambda)E(\lambda)R_i(\lambda)d\lambda \\ &= S(x, \lambda_i) \int_{400}^{700} E(\lambda)R_i(\lambda)d\lambda \quad (5) \end{aligned}$$

と記述できる．したがって分光反射率は次式のように推定できる．

$$\hat{S}(x, \lambda_i) = \frac{\rho_i(x)}{\int_{400}^{700} E(\lambda)R_i(\lambda)d\lambda} \quad (6) \quad (i = 1, 2, \dots, f)$$

(2) 次に，バンドが必ずしも狭帯域でないマルチバンドカメラを想定する．このとき線形モデルを利用して式(2)を式(5)のセンサ出力に代入して，行列で表現すれば，

$$\rho(x) = \Lambda\sigma(x) \quad (7)$$

と書ける． $\sigma(x)$ は分光反射率の n 次元ベクトル， Λ は $f \times n$ 行列で， (i, j) 成分は $[\int E(\lambda)S_j(\lambda)R_i(\lambda)d\lambda]$ である．このとき反射率は $\hat{\sigma}(x) = \Lambda^+\rho(x)$ から推定できる．

(3) これまで分光反射率の推定には基底関数で展開した線形モデルを用いたが，カメラ系のノイズ成分を考慮すれば Wiener 法が適している．このときセンサ出力は

$$\rho_i(x) = \int_{400}^{700} S(x, \lambda)E(\lambda)R_i(\lambda)d\lambda + n_i \quad (8) \quad (i = 1, 2, \dots, f)$$

と書けるが，この連続表現を離散的に表現するために， $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_l (l \geq f)$ でサンプルすると次式となる．

$$\rho_i(x) = \sum_{k=1}^l S(x, \lambda_k)E(\lambda_k)R_i(\lambda_k)\Delta\lambda + n_i \quad (9) \quad (i = 1, 2, \dots, f)$$

さらに行列表現すれば次のようにまとめられる．

$$\rho(x) = \Lambda's(x) + n \quad (10)$$

ここで $s(x)$ は分光反射率を表す l 次元ベクトル， n は f 次元ノイズベクトル， Λ' は $f \times l$ 行列で (i, j) 要素は $[E(\lambda_j)R_i(\lambda)\Delta\lambda]$ となる．

s に関する推定誤差を最小にする解は線形システム論でこれまでに研究されており，信号成分 s とノイズ成分 n が無相関であるとき，Wiener 推定が1つの最適解を与えることが知られている¹⁸⁾．

$$\hat{s}(x) = C_{ss}\Lambda'^t [\Lambda' C_{ss} \Lambda'^t + \sigma^2 I]^{-1} \rho(x) \quad (11)$$

ここで C_{ss} は分光反射率間の相関を表す $l \times l$ 行列， σ^2 はノイズの分散を表す．

3.2.2 照明光をシーンから推定する場合

自然界に存在する物体あるいは人工物体の多くの表面は不均質誘電体物質からなる．不均質誘電体の光反射は2色性反射モデルに従うことが知られており，信号は拡散反射成分と鏡面反射成分の2つの加法成分からなる．このときセンサ出力は線形モデルを使えば次式のように書ける．

$$\rho(x) = \alpha\Lambda\sigma(x) + \beta H\varepsilon \quad (12)$$

上式右辺第1項は拡散成分,第2項は鏡面成分である.

2色性反射モデルの重要な性質の1つとして,鏡面反射は照明光のスペルトル成分を持つことが分かっている.したがってシーンから光沢あるいはハイライトを抽出すれば,そこから照明光源の分光分布が推定できる.つまり分光関数の推定は2段階で達成される.まず,マルチバンド画像からハイライトベクトルを抽出すれば,その方向は H_e に一致する.これより $E(\lambda)$ が推定できる.次に,分光反射率 $S(x, \lambda)$ は鏡面成分を含まない画素クラスタの方向ベクトルが物体色ベクトル $\Lambda\sigma(x)$ に一致することから推定できる.この手法の原理と計算はたとえば文献 19) で詳述している.

4. ナチュラルシーンでの物体識別への応用

4.1 原 理

物体の識別は一般に画像の分割をとまなう.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ることが多かった²⁰⁾⁻²³⁾. 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手法の多くは3次元空間における色クラスタの検出に基づいている.

このような色空間による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を実現する試みはあるものの²⁴⁾, 完全なカラーコンスタンシーは3次元色空間で実現することはできない.

マルチバンドイメージングで照明光分光分布が推定できれば, 照明光に不変な空間ができ, 確かに画像分割を改善させることができる²⁵⁾. 実際, 図3のスペクトルカメラを450-650 nmの範囲で10 nm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 ($i = 1, 2, \dots, 21$) と推定した分光分布 $E(\lambda)$ を用いて作ることができる. しかしながらクラスタの分類を21次元空間で実施することは計算コストがきわめて高いといえる. このため筆者らは比較的少数の物体からなるシーンに対して, スペクトル色に基づく有効な手法を開発した²⁶⁾.

まず, センサ出力から照明光の影響を次式のように取り除く

$$\rho'_i(x) = \frac{\rho_i(x)}{\int_{400}^{700} E(\lambda)R_i(\lambda)d\lambda} \quad (13)$$

このときバンドが狭帯域であれば, $\rho'_i(x)$ は x における分光反射率を $\hat{S}(x, \lambda_i) = \rho'_i$ と近似する. またこの正規化したセンサ出力系列 $\rho'_1(x), \rho'_2(x), \dots, \rho'_{21}(x)$ をフラットな分光分布を持つ白色照明に対するセンサ出力と見なすことができる.

いま各センサ出力と物体色の対応関係に注目する. 可視領域450-650 nmは(赤, 黄赤, 黄, 黄緑, ...) といった狭い波長帯域の色系列に分割することができる. これは一般にスペルトル色と呼ばれる. このときセンサ出力 ρ'_i は観測した物体表面の色(スペクトル色)に対応する波長帯において最大値をとる. たとえば, 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持つ領域は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バンドの番号(センサの番号)を画素に割り当て, 最後に同じバンド番号を持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3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バンド番号についての簡単な一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持つ複雑なシーンに提案手法を適用した. 図7は直方体, 円筒, 曲面物体を含むシーンで, 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見なせる. 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お互い異なっている. 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. したがって物体は色彩値によって識別することができず, 表面分光反射率によ

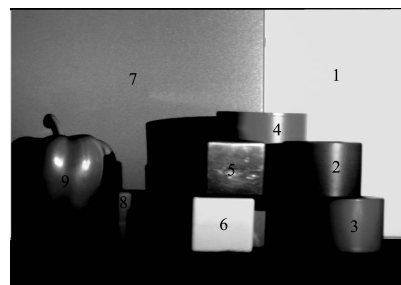


図7 異なった材質で類似した物体色を含む複雑なシーン
Fig.7 Complex scene including different materials with similar object colors.

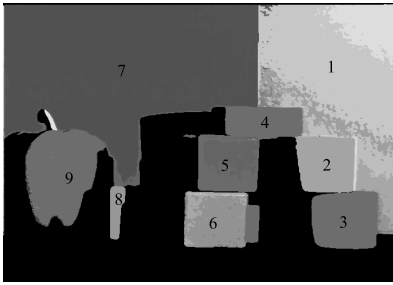


図 8 分光画像のバンド番号による画像分割結果
Fig. 8 Image segmentation based on the band numbers of the spectral image.

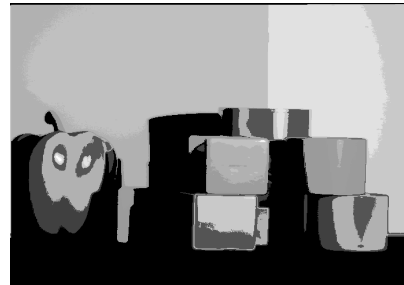


図 10 6チャンネルの画像のクラスタリングによる画像分割結果
Fig. 10 Image segmentation based on the clustering of the image with six channels.

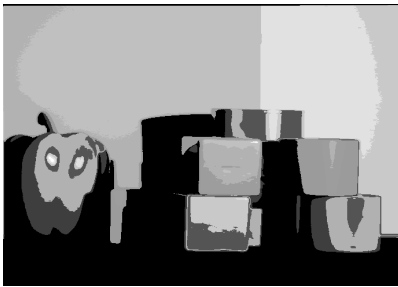


図 9 RGB 画像のクラスタリングによる画像分割結果
Fig. 9 Image segmentation based on the clustering of the original RGB image.

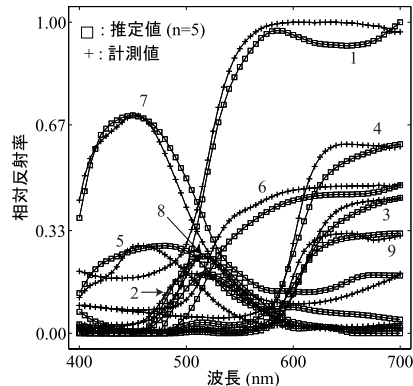


図 11 各領域に対する表面分光反射率の推定結果
Fig. 11 Estimation results for surface-spectral reflectances in the respective regions.

て同定が可能となる。

まず、21 個のセンサ出力からなるマルチバンド画像からりんごのハイライト領域を抽出し、線形モデルを用いて分光分布を推定した。次に、画像の暗い領域を除く全画素について、式 (13) から照明光の影響を取り除いてスペクトル色 $\rho'_1, \rho'_2, \dots, \rho'_{21}$ を求めた。このとき 21 波長帯の中で最大値をとるバンド番号を i_{max} とすれば、高次元の観測画像は番号 i_{max} を要素とする 2 次元配列に置き換えられる。この配列要素には雑音によってばらつきがみられたので、 3×3 のメジアンフィルタで平滑化した。図 8 は画像分割の結果で、同じ番号を持つ画素を領域としてまとめることにより得られた。物体表面はおおよそ 6 つの異なった色を持つ 9 つの領域に分割されている。たとえば、赤領域 3, 4, 9 は同じバンド番号を持つ。また緑領域 2, 8 も同じ番号を持つ。

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。これらには K-means クラスタリングアルゴリズムを使用し、11 個のクラスが抽出された。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されたままである。

最後に図 11 は図 8 の各領域に対して基底関数を用いて分光反射率を推定した結果である。ただし各物体表面で鏡面ハイライトを含まない比較的明るい個所を推定した。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。分光反射率は良好に推定されている。領域 3, 4, 9 の分光反射率曲線は互いに異なっていることに注意する。このような分光反射率曲線は最終的に物体表面を同定するために使うことができる。

5. 製品検査への応用——回路基板の材質識別

産業界で使われているプリント回路基板はカラー画像から識別することが困難な物体の 1 つといえる。これは 3 チャンネルのカラーカメラでは色空間が小さくて、物体色の特徴をうまく抽出できないことや、ハイライトやシェーディングといった照明の影響を受けるからである。プリント回路基板の表面層は種々の要素からなり、これらはレジスト、金属板、金属線、ハンダ、塗料といったような異なった材料である。しかも各要素の大きさは、金属線の幅で 100 ミクロン以下である。これらの特徴が画像を用いた回路基板の検査開

題を難しくしている。

コンピュータビジョンやロボット工学の分野で電子回路基板の自動検査が提案されて以来、検査の部位や目的に応じて様々な手法が研究されてきた。画像を用いた研究例としては、文献 27) ではプリント回路基板特有の問題点として、金属線の断線、ショート、ピンホールといった欠陥を見つける問題を、2 値画像処理の問題として扱った。また基板要素としてハンダは重要で、自動検査も提案された。ハンダは立体形状で金属光沢を持っており、画像からの特徴抽出が難しいとされている。ハンダ部分の検査には、文献 28) のような面法線による形状推定の技法が必要と思われる。さらに、文献 29) ではカラーリングライトを多段に配置・照明し、正反射する光の画像からハンダ付けの良否を判定する手法を発表している。

本論文では分光情報に基づいた基板要素の識別法を提案する。マルチバンドスペクトルカメラを用いてプリント回路基板の微細領域のスペクトル画像を獲得し、これより回路基板上の異なった材料の部品要素を同定するための方法を以下展開する。

5.1 基板の計測と反射率推定

5.1.1 基板計測

図 12 に対象とするプリント回路基板の例を示す。図 13 は一部分の拡大画像である。基板表面の要素は

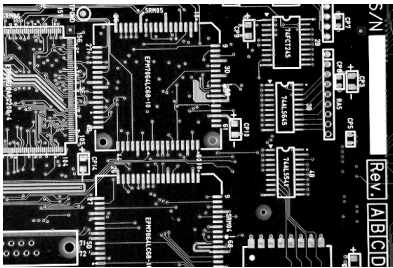


図 12 プリント回路基板の例

Fig. 12 Example of printed circuit boards.

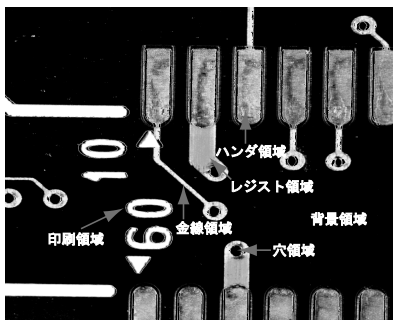


図 13 基板上の主な構成要素

Fig. 13 Main elements on the board surface.

大きく分けて以下の 6 要素からなる。

- (1) 印刷部 : シルク印刷部分 (白色)
- (2) 金線部 : 金属線の上にレジストがごく薄くかかっている部分 (黄色)
- (3) レジスト部 : 金属線の上にレジストが濃くかかっている部分 (緑色)
- (4) ハンダ部 : ハンダ部分 (灰色)
- (5) 背景部分 : 基板の地, 部材 (濃緑色)
- (6) 穴部 : 基板を貫通する穴部分

図 14 は回路基板の断面を描いている。基板表面の材質は上の (1)–(5) の 5 要素に分けられるが、これらは基板表面からの反射光を観測したマルチバンド画像で推定する。また (6) 穴部の検出には透過光を利用する。

カメラシステムは図 3 のスペルトルカメラシステムで、高倍率のマクロレンズを組み合わせたものを使用した。液晶チューナブルフィルタの透過波長を 450 nm から 650 nm まで 10 nm 間隔に変化させ、21 の波長帯を持つ 21 次元カメラとして使用した。

図 15 に計測照明系を示す。プリント回路基板に対して垂直にカメラを配置し、光源方向を 3 方向に変化させて基板を撮影した。光源には 500 W の白熱電球を使用している。撮影時の光源の高さはカメラとほぼ同じで、基板とカメラシステムの最前面との距離は数センチ程度となっている。以下の順に 3 回撮影して画像を獲得した。

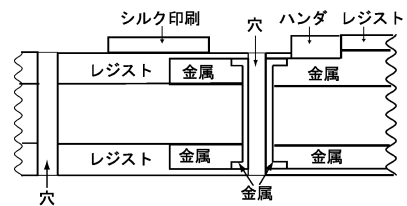


図 14 基板の断面

Fig. 14 Cross section of the board.

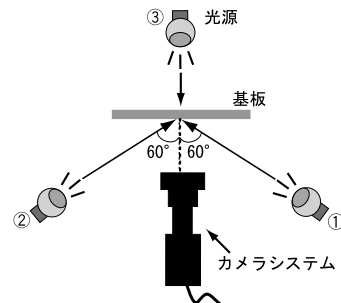


図 15 異なる照明方向による回路基板の撮影

Fig. 15 Imaging a circuit board with different illumination directions.

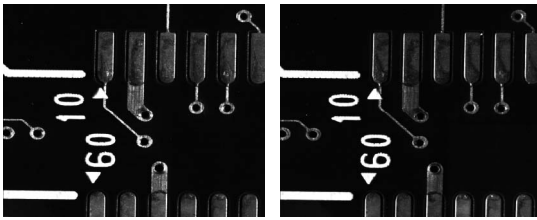


図 16 2つの照明方向で得られた分光反射率の画像
(左:左光源②,右:右光源①)

Fig. 16 16 Images of surface-spectral reflectances obtained under two illumination directions.
(Left: left light source ②, Right: right light source ①).

- ① 右から入射角 60° で照明し, 21 次元画像を得る.
- ② 左から入射角 60° で照明し, 21 次元画像を得る.
- ③ 基板の裏側から照明し, 透過光による RGB3 次元画像を得る.

なお, 左右照明による計測は次のような利点がある. すなわち 1 方向からの画像計測ではハイライト等の影響で反射率推定の精度が劣化するため, 左右照明により画像中の鏡面反射を除去できる. また ③ は穴領域を検出するために用いる.

5.1.2 ハイライト除去と反射率推定

物体の表面分光反射率の推定には, 狭帯域センサを仮定した式 (7) の直接法を用いた. この直接法によって得られた反射率は物体の材質だけでなく, 形状や観測条件にも依存する. たとえば, ハンダの表面は粗く, 強い鏡面ハイライトが, カメラと光源の位置関係によって現れる. 図 16 はプリント基板の対象領域について計測 ① と ② から得られた分光反射率データを画像化したものである. 金属線やハンダ部分に鏡面ハイライトが含まれていることが分かる.

筆者らは基板表面の分光反射率を鏡面反射成分ではなく, 拡散反射成分に基づいて推定し, これでは材質の判別を行う. 鏡面反射成分は光源・観測方向に強く依存するので, 光源方向の制御により鏡面ハイライトの除去を考えた.

さて, 図 16 の画像からも分かるように, 強いハイライト部の反射率はシルク印刷の白い反射率と比べて, 同程度かあるいは見かけ上高くなる. そこでハイライトと白い印刷領域を区別するために, 以下の手順を採用した. このために各画素における分光反射率の合計を特に輝度 $y(x)$ と呼び, 次式で定義する.

$$y(x) = \sum_{i=1}^{21} S(x, \lambda_i) \quad (14)$$

まず, 左右画像で分光反射率が大きく変動しない高

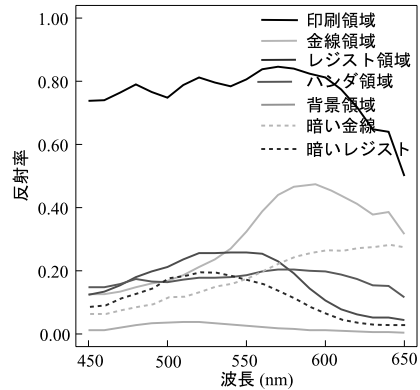


図 17 異なった材質に対して推定した分光反射率の平均曲線
Fig. 17 Average curves of the estimated spectral reflectances for different materials.

輝度 (白い) 領域を抽出する. この具体的な抽出方法は次節で述べる. 次に, 両画像でともに高輝度領域として抽出された画素は印刷領域であると判定し, 元の反射率画像から輝度値の高い方の画素を採用する. 一方のみが高輝度領域として抽出された画素は金属ハイライトであると判定し, 輝度値の低い方の画素, つまり, 高輝度領域として抽出されなかった画素を採用する. それ以外, とともに高輝度領域として抽出されなかった画素については, 輝度値の高い方の画素を採用する. このようにして各画素において 2 つの画素値の一方を選択して, 1 枚の画像として合成する. 要素の説明に用いた図 13 の画像はこのようにして合成した分光反射率の画像である.

5.2 材質判定のアルゴリズム

図 17 は異なった材質に対して得られた分光反射率の平均曲線を描いている. この情報をもとに材質判定条件を作成し, 各画素の分光反射率データを用いて判定を行っていく. 凹凸やレジストの微妙な厚みによって, 同じ素材であっても反射率が大きくばらつくことがあり, これらが判定を困難にする.

(1) 印刷部分の抽出

印刷領域の特徴は白色で全波長において反射率が非常に高いことである. そこで, 各波長点 i における画像全体の平均反射率 \bar{S}_i を求め, 21 次元の条件 $S_1(x) > \bar{S}_1, S_2(x) > \bar{S}_2, \dots, S_{21}(x) > \bar{S}_{21}$ をすべて満たす画素の集合を印刷領域とする.

(2) 金線部の抽出

図 17 から, 金線領域の反射率のピークは 570 nm から 620 nm の間にあり, その波長帯の反射率が比較的高いことが分かる. そこで, 上で抽出した印刷領域を除く全画素において平均反射率 \bar{S}_i を求め直し, 条件 $S_{13}(x) > \bar{S}_{13}, S_{14}(x) > \bar{S}_{14}, \dots, S_{18}(x) > \bar{S}_{18}$ を

すべて満たす画素を金線領域とする。

(3) レジストの抽出

レジスト領域の反射率ピークは 490 nm から 570 nm の間にある。そこで、上で抽出された領域を除く全画素において平均反射率 \bar{S}_i を求め直し、条件 $S_5(x) > \bar{S}_5, S_6(x) > \bar{S}_6, \dots, S_{13}(x) > \bar{S}_{13}$ をすべて満たす画素をレジスト領域とする。

(4) 反射率の低い金線とレジスト部の抽出と分類

金線領域とレジスト領域はともに金属部分にレジストが被覆する同じ構造をしており(図 14 参照), レジストの微妙な厚みの変化や凹凸によって反射率が違っている。ここで、これまでに抽出されなかった反射率の低い金線, レジスト領域を追加抽出する。これらの領域の特徴は, まだ抽出されていない残りの領域中で明確な反射率ピークを持つことである。さらに, 両極の反射率 $S_1(x)$ と $S_{21}(x)$ を比較することにより, 両領域の違いが分かる。そこで, $S_1(x) < S_{21}(x)$ ならば金線領域とし, $S_1(x) \geq S_{21}(x)$ ならばレジスト領域とする。

(5) 背景部の抽出

背景領域の反射率は低い, 470 nm から 530 nm の間に反射率ピークを持つ。そこで, すでに抽出された領域を除く全画素において平均反射率 \bar{S}_i を求め直し, $S_3(x) > \bar{S}_3, S_4(x) > \bar{S}_4, \dots, S_8(x) > \bar{S}_8$ をすべて満たす画素を背景領域とする。ただし, 反射率がきわめて低く, 計測時のカメラ出力値が不安定なもの等はここでは抽出されない。

(6) ハンダ部の抽出

ハンダ領域は凹凸や色むらが多く, 輝度情報以外に利用可能な特徴が見られない。しかし, 残された画素の中では輝度が高いと考えられる。そこで, すでに抽出された領域を除く画像全体の平均輝度 \bar{y} を求め, $y(x) > \bar{y}$ を満たす画素をハンダ領域とする。

(7) 残された画素の処理

これまでに各要素領域を抽出し終えているが, 雑音等の影響により抽出漏れが存在する。これらの大部分は背景で, 反射率が非常に低く, 計測時の画素値が安定しなかったものである。本研究ではこれらすべてを背景領域とした。

(8) 穴部の決定

穴領域は背景照明(図 15 の ③)による画像を用いて独自に決定する。この画像を明るい部分と暗い部分とに 2 値化し, 明るい部分を穴領域とする。

5.3 実験結果

解析の対象とした図 13 の分光画像サイズは 804 × 991 pixel で, 実際のプリント回路基板上での面積は

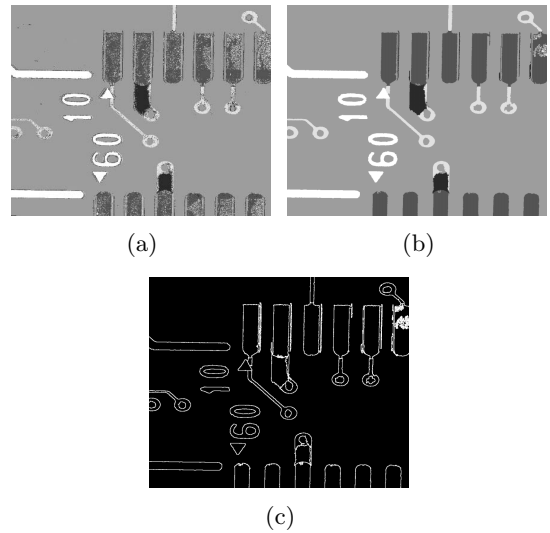


図 18 材質判定の後処理 (a): 判定の一次結果, (b): 小領域削除, (c): エッジ検出)

Fig. 18 Post-processing for material classification. ((a): First-stage classification results, (b): Elimination of small areas, (c): Edge detection).

約 9 × 11 mm である。図 18 (a) は前述のアルゴリズムによる材質判定直後の状態である。材質別に 6 つの色で彩色している。雑音や色むらによって, 微視的に見れば判定にバラツキが現れている。金属線の断線や短絡のような欠陥を検出するには, もっと領域をまとめる必要がある。

そこで小領域に対して以下のような後処理を実施した^{30)~31)}。まず孤立点や画素数の少ない領域は連結数を使って消去した。図 18 (b) は小領域削除の結果である。ここでハンダの付いた金属部(赤い領域)の左右のエッジあたりに, 色むら(青くて細い筋)が残っていることが分かる。現実には金属部の周辺に溝があり, 基板が 1 段低くなっている部分に対応する。現在の計測システムでは, 回路基板の正面にカメラがあり, 左右から照明しているため, このような溝や盛り上がりの境界は陰となって, 判定が正しく実施できないことになる。このような不具合はエッジ部に限定される。図 18 (c) に (b) の画像に対してマスク処理によって検出したエッジを示す。そこで各エッジの上下左右方向を探索して, エッジの線分を直近の大きな領域に統合した。その後, 再度小領域を統合し, さらに穴領域を重ね合わせた。この最終的な領域分割結果を図 19 に示す。ハンダ部の両側や印刷部周辺において材質判定が改善され, 図 13 と見比べても良好な判定結果が得られていることが分かる。

比較のために, RGB 画像に基づく手法を同じプリ

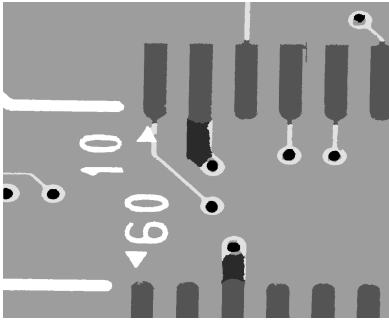


図 19 材質判定の最終結果と領域分割

Fig. 19 Final results of material classification and region segmentation.

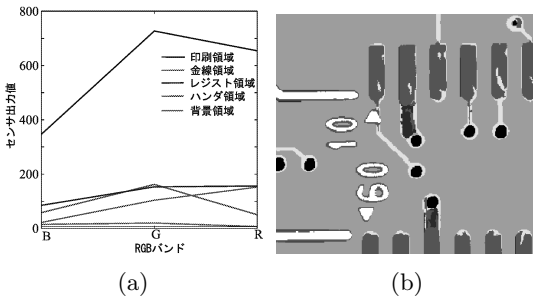


図 20 RGB 値に基づく判定結果 ((a): 異なった材質に対する平均 RGB 値の変化, (b): 最終判定結果と領域分割)

Fig. 20 Classification results based on RGB values. ((a): Variation of the mean RGB value for different materials, (b): Final classification results and region segmentation).

ント回路基板の識別に適用した．図 13 と同じ部分を汎用のカラーカメラ (Canon D30) で計測した．照明系は前と同様である．2 方向からの計測画像は標準白色板で基準化して，5.1.2 項と同じ手続きで 1 つの画像に結合した．図 20 (a) は各要素における RGB の平均値の変動を表す．これに基づいて以下のような判定条件を設定することができた．

1. 条件 $R(x) > \bar{R}$, $G(x) > \bar{G}$, $B(x) > \bar{B}$ をすべて満たす画素を印刷部とする．
2. 平均 RGB 値を求め直し, $R(x) > \bar{R}$ かつ $B(x) > \bar{B}$ の場合, ハンダ部とする．
3. 平均 RGB 値を求め, $R(x) > \bar{R}$, $G(x) > \bar{G}$, $B(x) > \bar{B}$ の場合, レジスト部とする．
4. 平均輝度値 $y(x) = (R(x) + G(x) + B(x))/3$ を求め, $y(x) > \bar{y}$ かつ $R(x) > G(x)$ の場合, 金線部とする．また, $y(x) > \bar{y}$ かつ $R(x) < G(x)$ の場合, レジスト部とする．
5. 残りの画素はすべて背景領域とする．

図 20 (b) は材質判定の最終結果である．図 19 と比較すれば, やはり分光反射率の利用が有利であること

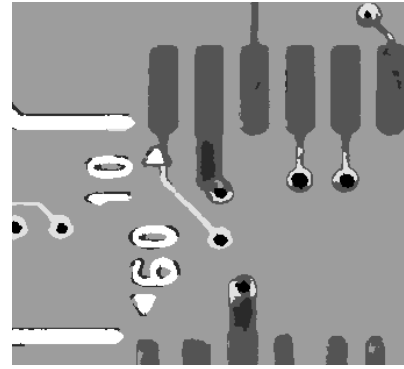


図 21 3次元 K-means を適用した判定結果

Fig. 21 Classification results by the 3D K-means.

が分かる．

さらに RGB の 3 次元色空間で K-means アルゴリズムを適用してクラスタ分割を行った．図 21 は RGB 画像に対する判定結果である．このように RGB データでは主として金属要素の判定に著しい誤りがあり, 領域分割の信頼性は劣るといえる．

6. 絵画のデジタルアーカイブへの応用

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で, 異なった視環境で絵画の画像を生成するには特に分光情報が必要とされる．また油彩画のように, 絵の具のタッチによる凹凸や油膜層による光沢がある場合は, 分光反射率情報のみでは油彩画のリアルな質感の再現は難しく, 表面反射特性とともに表面形状の情報も必要となる．

筆者らは, これまでに一般的な RGB カラーカメラを用いて油彩画の表面特性を推定し, 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した^{32) - 33)}．この手法の原理はおおよそ次のとおりである．まず, 絵画の表面形状は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, その表面材質は 2 色性反射の性質を持つ不均質誘電体と見なす．次に, 異なった照明方向から複数の画像を撮影し, 拡散反射成分のみからなる観測データを獲得する．これらの輝度値を用いて, 形状情報として面法線を照度差ステレオ法で推定する．また分光反射率をカメラ出力に 3 次元線形モデルを適用して推定する．さらに観測データの鏡面反射成分から反射モデルを決定する．

さて油彩画の色再現は RGB カラー情報だけでは難しいといえる．一般に油絵の具は, 彩度が高く深み感のある物体色が多い．RGB センサから分光反射率を推定すれば, 高周波成分を持つ分光反射率曲線の推

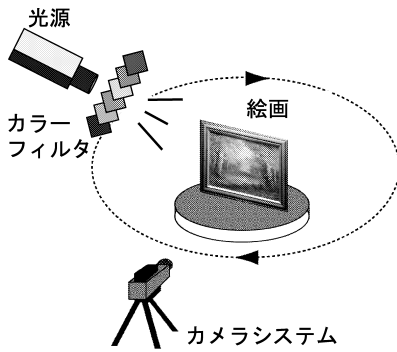


図 22 絵画のマルチバンド画像計測のシーン

Fig. 22 Scene of multi-band imaging for a painting.

定で精度が落ちる．そこでこのような油絵画に対してマルチバンドカメラシステムを使用することにした．

6.1 計測系

図 22 は計測系で，光源の位置を変えながら複数のマルチバンド画像を獲得している．まず，絵画に対してカメラを垂直に配置する．筆者らは 6 色のマルチバンドカメラシステムを採用したが，マルチバンドのカラーフィルタはカメラ側ではなくて，光源側に装着していることに注意する．これはフィルタ取り替えの際のレジストレーション誤差を軽減するためで，カメラ系としては 2.1 節と等価である．次に，照明方向を，絵画に対して垂直方向と周囲 8 方向，合計 9 方向に変化させながら画像計測する．

システムの較正は従来よりも厳密にしている．絵画平面上では照明光の照度むらが生じ，また各画素点において照明方向ベクトルが異なるので，これらは表面特性や反射モデルの推定精度に影響を与える．まず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．次に，光源は平行光よりも，むしろ点光源に近い特性を持つので，画素ごとに照明方向ベクトルが異なる．本研究では光源の位置をあらかじめ計測しており，カメラからの視線ベクトルと絵画表面に置いた鏡面球から絵画の位置を決定し，各画素における照明方向ベクトルを詳細に推定した（文献 34）参照）．

6.2 表面特性の推定

計測したマルチバンド画像から拡散反射と鏡面反射成分を抽出して，前者から油絵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 枚の画像から画素ごと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．この一連の手順は前報³³⁾と同様で

ある．

油絵画の表面形状を法線ベクトルの集合で表し，これを照度差ステレオ法を用いて推定した．このとき各画素における輝度値を 6 次元カメラ出力の平均値とした．各画素で拡散反射データのみについて白色基準からの相対輝度値を算出し，これと上述した照明方向ベクトルから各画素点での面法線を推定した．

次に 6 次元カメラデータの拡散反射成分から分光反射率の連続関数を推定した．このときカメラ出力は次のように記述できる．

$$\rho_i(x) = \int_{400}^{700} S(x, \lambda) E_i(\lambda) R(\lambda) d\lambda + n_i \quad (15)$$

$$(i = 1, 2, \dots, 6)$$

ここで $R(x)$ はモノクロ CCD カメラの分光感度である．これに対して $E_i(\lambda)$ はカラーフィルタを透過した 6 つの照明光の分光分布である．これらは別途計測できて既知であるので，分光反射率推定に関して式 (15) は式 (8) と等価である．そこで Wiener 法 (式 (11)) を適用した． 61×61 相関行列 C_{ss} は約 500 の異なった物体に対する表面分光反射率のデータベースを用いて決めた．このデータベースは Vrhel ら¹⁷⁾ による 354 種類の反射率および筆者らが異なった塗料を計測した 153 種類の反射率のデータ集合からなる³⁵⁾．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経験的に分かった．

反射モデルとしては Torrance-Sparrow モデル³⁵⁾ を使用した．このとき鏡面関数の表面粗さ，屈折率，および鏡面反射係数は未知パラメータとなる．これらは 1 枚の絵画で一定値をとると仮定し，屈折率については誘電体の $n = 1.45$ を使用した．他のパラメータ推定のために，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鏡面関数を適合した．

6.3 画像レンダリング

油絵画のレンダリングは推定した 3 種類の情報，すなわち分光反射率，法線情報，反射モデルパラメータを用いて行う．各種パラメータが求めれば，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持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．

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．ポリゴン上の各座標点では Torrance-Sparrow モデルの分光モデルに基づいて，まず任意の位置 x に対する分光輝度 $Y(x, \lambda)$ を計算し，次に三

刺激値 (X, Y, Z) を算出して正確な物体色の見えを決定する。

$$Y(x, \lambda) = \sum_{i=1}^M \{ (N(x) \cdot L_i(x)) S(x, \lambda) + f(\beta, n, \gamma, N(x), L_i(x)) E_i(\lambda) \} E_i(\lambda) \quad (16)$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \int_{400}^{700} Y(x, \lambda) \begin{bmatrix} \bar{x}(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) \\ \bar{z}(\lambda) \end{bmatrix} d\lambda \quad (17)$$

ここで照明光源の分光分布は $\{E_1(\lambda), E_2(\lambda), \dots, E_M(\lambda)\}$ で、関数 f は Torrance-Sparrow モデルの鏡面関数である。パラメータ N, L, β, n, γ は、それぞれ、面法線ベクトル、照明方向ベクトル、鏡面反射係数、屈折率、表面粗さを表す。さらに $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ 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。最後に、三刺激値からディスプレイといった表示デバイスの 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。

6.4 適用結果

図 23 は実験に使用した油彩画で、そのサイズは約 20 cm × 25 cm である。これを 9 方向から照明し、6 チャンネルのマルチバンドカメラで撮影した。画像サイズは 1150 × 1550 pixel である。まず絵画の全画素点で面法線を推定した。次に分光反射率を推定した。このときノイズ分散を信号電力に対して 0.1 になるように設定した。

得られた分光反射率の推定精度を試験するために、従来法および直接計測の結果と比較した。図 23 における白い四角形 Area 1, Area 2 は試験に使用した領域を表し、それぞれの分光反射率の推定結果を図 24 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。また一点鎖線はカラーカメラを用いた従来法による結果である。マルチバンドカメラによる推定値は、直接計測値を近似しており、従来法と比べて分光反射率推定が良好であることが分かる。たとえば、Area 1 は緑の絵の具で塗られており、カラーカメラでは分光反射率の曲線形状が復元できないことが分かる。分光反射率推定の数値精度を、推定値と計測値との 2 乗平均誤差で表せば、カラーカメラが 9.8×10^{-4} であったのに対して、マルチバンドカメラの使用によって 5.4×10^{-4} と大きく改善された。最後に、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



図 23 実験に使用した油彩画

Fig. 23 Oil painting used in experiments.

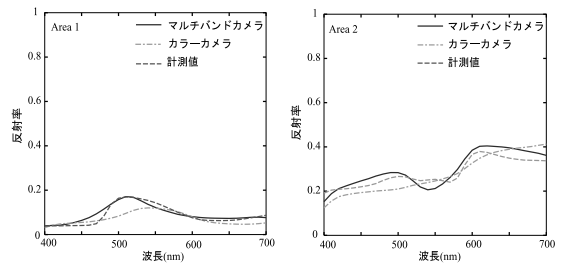


図 24 表面分光反射率の推定結果

Fig. 24 Estimation results of surface-spectral reflectances.

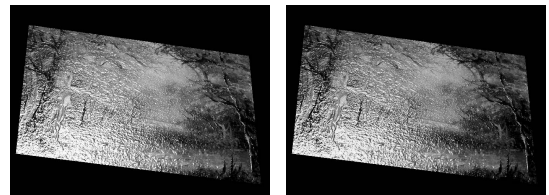


図 25 D65 昼光 (左) と白熱電球 (右) のもとでレンダリングした油彩画

Fig. 25 Oil paintings rendered under D65 daylight (left) and incandescent light (right).

光を想定した。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彩画の 3 次元的な見えの変化を生成した。図 25 の左右は D65 昼光下と白熱電球光下でレンダリングした画像の例で、油彩画特有の絵の具の盛り上がりや光沢を観察することができる。

7. おわりに

本論文ではマルチバンドイメージングの技法とそのビジョン問題への応用を述べた。マルチバンドイメージングは、RGB の 3 チャンネルに固定した撮像系と異なり、400–700 nm の可視域に 4 つ以上のチャンネル数を有する撮像系である。このようなマルチバンド撮像系を使えば、いくつかのビジョン問題の解決につなが

る．まずカメラ出力が多チャンネルになることより，カメラ系の色分解能を大きく改善することができる．次に分光情報の獲得が容易になる．ビジョン問題の解決には，照明光の分光エネルギー分布や物体表面の分光反射率といった分光関数が必要となることが多い．これらの分光関数は 400–700 nm で定義される波長の連続関数で，カラーカメラ出力からこのような関数を推測することは困難であった．

マルチバンド撮像系の基本構成は狭帯域フィルタ，モノクロデジタルカメラ，パソコンからなる．本論文では，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とシーンの分光情報を推定するアルゴリズムを述べた．応用問題としては，物体の識別と絵画のデジタルアーカイブを取り上げた．

前者では，まずナチュラルシーンにおいてスペルトル色を用いた物体識別法を提案した．これの特長は，識別が照明光に依存しないこと，および最大値のバンドのみを使うので一次元処理で高速であることである．次に検査への応用としてプリント回路基板上の材質の識別法を提案した．ここでは回路基板上の微細領域のスペルトル画像を獲得して，異なった材料の部品要素を同定する方法を述べた．絵画のデジタルアーカイブでは，光源方向を変えて複数のマルチバンド画像を獲得する計測系を示した．油彩画を解析対象として，分光反射率だけでなく，面法線や反射モデルを推定する方法を述べた．これらの推定データを用いて，任意の視環境における絵画の画像生成が可能となる．

マルチバンドイメージングの技術はまだ成熟しておらず，これからシステム開発が進むにつれて新しい技法が生まれる可能性が高い．それらの技法は視覚情報処理に関するあらゆる分野に適用できるはずである．

最後に，本研究の遂行にご協力いただいた研究室の元院生，田中法博，太田 敦，岡本幸子，および現院生の中島卓也の各氏に謝意を表します．

参 考 文 献

- 1) Wandell, B.A.: *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) Maloney, L.T. and Wandell, B.A.: Color constancy: a method for recovering surface spectral reflectance, *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol.3, pp.29–33 (1986).
- 4) Lee, H.C.: Method for computing the scene-illuminant chromaticity from specular highlights, *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol.3, pp.1694–1699 (1986).
- 5) Tominaga, S. and Wandell, B.A.: The standard surface reflectance model and illuminant estimation, *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol.6, pp.576–584 (1989).
- 6) Ho, J. et al.: Separating a color signal into illumination and surface reflectance components, *IEEE Trans. PAMI*, Vol.12, No.10, pp.966–977 (1990).
- 7) Healey, G.: Estimating spectral reflectance using highlights, *Image and Vision Computing*, Vol.9, pp.333–337 (1991).
- 8) Tominaga, S.: Surface identification using the dichromatic reflection model, *IEEE Trans. PAMI*, Vol.13, pp.658–670 (1991).
- 9) Tsukada, M. and Ohta, Y.: An approach to color constancy using multiple images, *Proc. 3rd Int. Conf. Computer Vision*, Vol.3, pp.385–389 (1990).
- 10) Tominaga, S.: Multichannel vision system for estimating surface and illumination functions, *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol.13, pp.2163–2173 (1996).
- 11) Brainard, D.H. and Freeman, W.T.: Bayesian color constancy, *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol.14, pp.1393–1411 (1997).
- 12) 松山隆司ほか (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).
- 13) 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).
- 14) Schmitt, F. et al.: CRISATEL multispectral imaging system, *Proc. AIC Colour 05 — 10th Congress of the International Colour Association*, pp.463–467 (2005).
- 15) Yamaguchi, M.: Real-time video reproduction using six-band HDTV camera and six-primary display, *12th Color Imaging Conference*, Late Breaking News Session (2004).
- 16) Foukal, P. et al.: Liquid crystal tunable light filters for surveillance and remote sensing applications, *Proc. SPIE*, Vol.1952, pp.168–177 (1993).
- 17) Vrhel, M.J. et al.: Measurement and analysis of object reflectance spectra, *Color Research and Application*, Vol.19, pp.4–9 (1994).
- 18) Pratt, W.K.: *Digital Image Processing*, Wiley, (1991).
- 19) 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-D-II, No.7, pp.1180–1189 (1999).
- 20) Ohlander, R. et al.: Picture segmentation us-

- ing a recursive region splitting method, *Computer Graphics and Image Processing*, Vol.8, pp.313–333 (1978).
- 21) Bajcsy, R. et al.: Image segmentation with detection of highlights and inter-reflections using color, *Proc. Image Understanding and Machine Vision Topical Meeting*, pp.12–14 (1989).
- 22) Tominaga, S.: Color Classification of Natural Color Images, *Color Res. and Appl.*, Vol.17, pp.230–239 (1992).
- 23) Bajcsy, R. 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).
- 24) Swain, M.J. and Ballard, D.H.: Color indexing, *Int. J. of Computer Vision*, Vol.7, No.1, pp.11–32 (1991).
- 25) Tominaga, S.: Spectral imaging by a multi-band camera, *J. of Electronic Imaging*, Vol.8, pp.332–341 (1999).
- 26) Tominaga, S. and Okajima, R.: Object Recognition by Multi-Spectral Imaging with a Liquid Crystal Filter, *Proc. 15th Int. Conf. on Pattern Recognition*, Vol.1, pp.708–711 (2000).
- 27) Thibadeau, P.H.: Printed Circuit Board Inspection, Tech. report CMU-RI-TR-81-08, Robotics Institute, CMU (1981).
- 28) Ikeuchi, K.: Determining surface orientations of specular surfaces by using the photometric stereo method, *IEEE Trans. Pattern Anal. & Machine Intell.*, Vol.PAMI-3, No.6, pp.661–669 (1981).
- 29) Capson, D.W. and End, S-K.: A tiered-color illumination approach for visual inspection of solder joints, *Proc. of Vision '86 Conf.*, pp.3-57–72 (1986).
- 30) 岡本幸子, 富永昌治: スペクトルカメラを用いた材質判定と回路基板への応用, 画像センシングシンポジウム, pp.543–548 (2003).
- 31) Tominaga, S. and Okamoto, S.: Reflectance-Based Material Classification for Printed Circuit Boards, *Proc. 12th Int. Conf. on Image Analysis and Processing*, pp.238–243 (2003).
- 32) Tominaga, S. and Tanaka, N.: Measuring and rendering art paintings using an RGB camera, *Proc. EUROGRAPHICS 2002*, pp.299–306 (2002).
- 33) 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).
- 34) 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表面特性の推定と画像生成, カラーフォーラム JAPAN, pp.45–48 (2003).
- 35) Tominaga, S. et al.: Estimation of surface properties of art paintings using a multi-band camera, *Proc. 17th Int. Conf. on Pattern Recognition*, Vol.1, pp.92–95 (2004).
- 36) Torrance, K.E. and Sparrow, E.M.: Theory for off-specular reflection from roughened surfaces, *J. of Optical Society of America*, Vol.57, pp.1105–1114 (1967).
- (平成 17 年 5 月 27 日受付)
(平成 17 年 11 月 18 日採録)
- (担当編集委員 池内 克史)



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。平成 15～17 年大阪電気通信大学総合情報学部長。現在情報通信工学部情報工学科教授。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。平成 14 年スガウエザリング技術振興財団科学技術賞を受賞。現在日本色彩学会副会長、IEEE Fellow。