

## 分光イメージングによる質感の計測・解析

堀内隆彦<sup>†</sup>

実在物体の質感を解析するにあたって、物体の光反射・吸収・透過・散乱などの特性を獲得することは重要である。そのためには、カラー信号ではなく、分光信号として特性を捉えることが重要となる。本稿では、種々の計測器を用いた分光計測方法を総括した後、物体による分光特性の違いと質感との関連性を概観する。さらに、CVの観点から、カメラによって獲得された画像のみを用いて分光特性を推定する技術として、最近注目されているアクティブ分光照明を活用した分光イメージングシステムを紹介する。

### Acquisition and Analysis of SHITSUKAN by Spectral Imaging

Takahiko Horiuchi<sup>†</sup>

For analyzing the SHITSUKAN of a real object, it is important to acquire the light reflection, absorption, transmission, and scattering properties of the object. For the purpose of this analysis, these properties should be acquired not as a color signal, but as a spectral signal. This report summarizes spectral acquisition methods that involve the use of a few measurement devices. Then, we discuss the differences in the spectral characteristics depending on the objects and the relevance of the SHITSUKAN to an object. Moreover, from the view-point of CV, this report discusses techniques for estimating the spectral characteristics using only images captured with a camera, and it describes a new imaging system having an active illuminant.

### 1. はじめに

我々は、五感を通じて、実世界に存在する物体の様々な質感を知覚している。中でも、視覚による情報は、質感の認知に関する重要な手がかりとなる。主に芸術や産業界において、質感の認知や表現に関する経験的な取り組みは昔からなされてきたが、質感認知のメカニズムの理解に関する学際的な取り組みは始まったばかりである[1]。

実在物体の質感を工学的に解析するにあたって、対象物体の光反射・吸収・透過・散乱などの特性を計測して獲得することは重要である。人間の視覚系が、短波長、中波長、長波長の色に関する3種類の分光応答関数を持っていることに基づいて、一般に、入射した光をR, G, Bの3種類の波長帯に分光するカラーカメラが計測に用いられてきた。しかしながら、カラーカメラは実際には人間の視覚系の等色性を満足させられないため、知覚する色を正しく計測することができない。そのため、より正確に質感を解析するためには、カラー信号ではなく、分光信号として特性を捉えることが重要となる。分光信号として光特性を獲得することによって、色分解能を飛躍的に高めることができ、等色であっても分光レベルで区別することも可能となる。また、任意の照明環境や観察条件に応じた見えのシミュレーションなどができ、有用な解析が実現できる。

本稿では、種々の計測器を用いた分光計測方法を総括した後、物体による分光特性の違いと質感との関連性を概観する。さらに、CVの観点から、カメラによって獲得された画像のみを用いて分光特性を推定する技術として、最近注目されているアクティブ分光照明を活用した分光イメージングシステムを紹介する。

### 2. 分光画像計測方法

#### 2.1 分光画像の表現

我々が色として知覚する「可視光」は、一般に400nmから700nmの波長の電磁波である。照明光源の分光分布を $E(\lambda)$ 、物体の空間位置 $x$ の分光反射率を $S(x, \lambda)$ 、視覚のLMS錐体の分光感度を $R_i(\lambda)$ とすると、ある時刻の視覚系のセンサ出力 $\rho_i(x)$ は、

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

で表わされる。すなわち、我々は、 $\rho_i(x)$ の情報から質感を判断していると考えられる(実際には、時間軸の情報も用いられるが、本稿では扱わない)。人間への入力情報である $\rho_i(t; x)$ と質感との関係を解析するためには、式(1)に示される分光情報を、高い精度で計測・推定することが重要である。次節では、それらの計測方法について概観する。

<sup>†</sup> 千葉大学大学院 融合科学研究科  
Graduate School of Advanced Integration Science, Chiba University

## 2.2 分光器を用いた計測

分光器を用いることによって、ある特定の光を波長ごとに分解して計測することが可能である。分光器には、分光光度計や分光放射輝度計などがある。

分光光度計は、単色光を作り出してこれを試料に照射し、反射や透過した光の量を測定することによって、その波長における分光反射率や分光透過率を求めることができる。分光光度計には、45/0度(0/45度)型、積分球型、変角型などがある。例えば、45/0度型は、45度リング照明/0度受光の光学系を持つ分光光度計である。この光学系は最も人の視覚に近いといわれ、サンプルの表面光沢成分を高い精度で測定できる。このため、エンボスや織り、漉きなどの表面光沢成分の質感の違いが、明るさの差として測定できる。逆に、表面光沢成分の影響を受けずに、ペイント、樹脂、染色、化粧品等を高精度で計測したい場合には、積分球型が用いられる。また、パールメタリックなどの異方性の反射物体などを計測する場合には、変角分光光度計(ゴニオメータ)を用いて、幾何的な光学条件を連続的に変化させることによって、計測物体の反射特性を計測すれば良い。このシステムは、任意の入射角 $\theta_i$ と受光角 $\theta_r$ において、計測試料と標準白色板の分光放射輝度を別々に計測し、その比を分光放射輝度率として可視光の波長域で観測することができる。図1に計測の原理図を示す。本システムを用いて分光特性を計測した例は、3章で後述する。

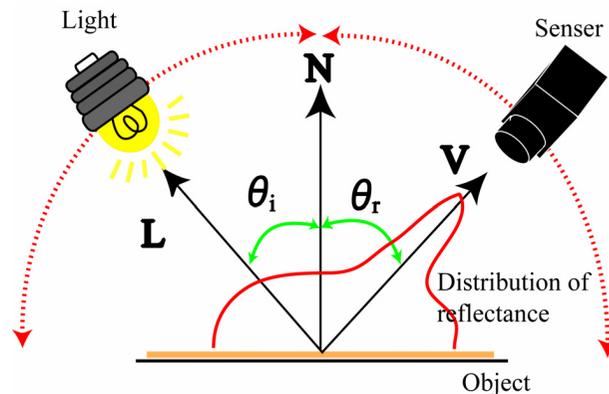


図1. ゴニオメータの計測原理

## 2.3 イメージングシステムを用いた計測

2.2で述べた分光器による方法は、精度良く分光特性を計測することが可能だが、計測箇所は視野角数度のアパーチャ領域となる。したがって、質感解析のための対象

物体が均一な材質のときには有効であるが、空間的に分光特性が異なるような物体の質感を計測することには不向きである。そこで、カメラを用いたマルチバンドイメージングシステムを用いることによって、一般に分光器より計測精度は劣るが、空間的に分光特性を求めることができる。

式(1)で示される視覚系のセンサ出力をカメラ系で実現するためのモデルとして、

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

が一般的に用いられる。ここで、 $R_i(\lambda)$ はカメラセンサの分光感度、 $f$ はカメラのチャンネル数、 $n_i$ はカメラの各チャンネルのノイズ成分を表わす。実際には、多チャンネルのカメラセンサを空間的に密に配置することは困難なため、このマルチバンドイメージングを実現するためにはフィルタやプリズム分光などによって、異なるセンサ感度 $R_i(\lambda)$ を実現する。現実に使用される方式として、以下のシステムが考えられる[2]。

### (1) カラーカメラにフィルタを外付けする方式

カラーカメラのレンズにカラーフィルタを装着することによって、カメラの分光感度は波長のずれを生じる。これを、当初の分光感度と組み合わせることによって、6バンドのイメージング系となる。簡易な方式であるが、各バンドの分離独立性は悪い。

### (2) カラーフィルタとモノクロカメラを組み合わせた方式

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、可視光域を複数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が一般に利用される。

### (3) プリズム分光とモノクロカメラを組み合わせた方式

プリズムまたは干渉フィルタアレイ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、高波長分解能の分光情報が得られる。イメージングには一定方向の走査が必要なため、画像取得に時間がかかる欠点がある。

### (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液晶チューナブルフィルタが、一般に利用される。著者の研究室で利用しているシステムを図2に示す。

### (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色カメラで撮影することによって、6バンドのスペクトルカメラを構成することができる。このシステムの特徴は、動画の取得が可能なことである。

### (6) アクティブ分光照明と高速モノクロカメラを組み合わせた方式

近年、プログラマブルな照明光源の分光特性を工夫することによって、マルチバンドイメージングを実現する方式が提案されてきている。このシステムを用いた計測の詳細は、4章で述べる。

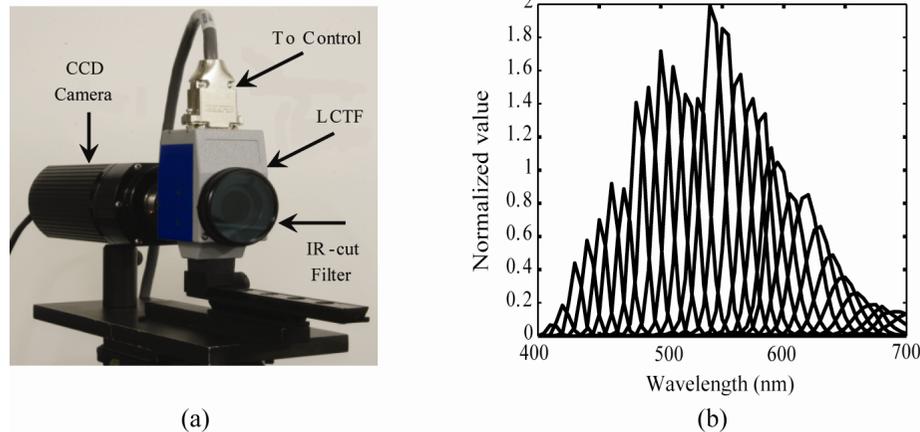


図 2. 液晶チューナブルフィルタを利用したマルチバンドイメージング  
(a) カメラシステム, (b) 総合分光感度

### 3. 分光特性と質感

本章では、対象物体表面の光反射特性が、質感の解析に有用である例を紹介する。物体表面の反射の仕方を数学的に記述したものが、光反射モデルである。物体の表面反射特性は、誘電体と金属物体の2つに大別することができる。自然界に存在する多くの物体は不均質誘電体の構造によって近似でき、物体表面からの反射光は2色性反射の特性を持つ。これらの反射特性を表現するための光反射モデルとして、PhongモデルやCook-Torranceモデルなどが用いられてきた。これらのモデルはCGのために開発された数学モデルであり、少数のパラメータで光反射を記述するので、利用価値が高い。しかしながら、自然界に存在する物質には、このような光反射モデルで記述することが困難な物質が数多く存在し、それらは独特な質感を有する。本章では、複雑な光学特性をもつ素材の例として、布素材のメガネ拭きに着目する[3]。この布には、ポリエステルやナイロンなどの超極細繊維がきめ細かく織り込まれているため、複雑な光学特性を示し、独特な質感をもたらす。

本研究で用いた布のサンプル素材を図3に示す。比較対象のために、単純な光学特性をもつグラビア印刷紙を用いた。両者は、視覚的に明らかに質感が異なる。グラビア紙は、照明光源の入射角と視覚またはセンサの受光角が近いときに、強い鏡面反射

を生じ、光沢感のある質感が得られる。これに対して、布は光沢感がないのに加えて、入射角や受光角の変化によって、見えが複雑に変化する布独特の質感が観測される。両サンプルともに空間的に一様な反射特性を有し、加えて布は視覚的に異方性を有するため、これらのサンプルの計測には、2.2で述べた変角分光光度計を用いた。計測によって得られたグラビア紙と布の反射特性を、図4にそれぞれ示す。図は、入射角を30度に固定し、受光角を-80度から+80度まで変化させた場合の変角分光反射率を示している。ここで、縦軸は変角分光光度計から得られる放射輝度率(以後では単に反射率と呼ぶ)であり、完全拡散物体に対して1になるように正規化している。2つの物体の反射特性を比較すると、かなり異なった特徴を持つことがわかる。グラビア紙の分光反射特性は、拡散反射成分と鏡面反射成分の2色性反射の典型的な特性を示しており、拡散成分はフラットで、鏡面成分は鋭いピークをもつ。しかし、図4に示されるように、布は2つの反射成分が明瞭に分かれていない。

グラビア紙および布に対するCook-Torranceモデルによる適合結果を、図5に示す。図は、400nmから700nmの範囲での放射輝度率の平均値から、入射角、受光角ごとに適合させた結果である。点線部は、変角分光光度計より得られた反射率データであり、実線部はCook-Torranceモデルを適合させた結果である。図5左に示されるように、2色性反射の素材であるグラビア紙は、ピークの高さに多少のずれが見られるものの、2章で想定したとおり、この光反射モデルである程度きれいに適合できていることがわかる。これに対して、布は図5右に示されるように、受光角が40度以上での反射特性の増加の傾きが一致せず、受光角20度付近で各入射角の反射率が重なっている部分も再現できていない。また、受光角が負の部分での入射角ごとのばらつきも再現されていない。これらのことから、布はモデル式での適合結果が十分でなく、誤差が大きいことがわかる。これは、詳細な光反射を記述できるCook-Torranceモデルを用いても、布は適合しないことを意味している。このように、物体の質感と表面反射特性は大きく関連しており、質感の解析およびレンダリングモデルの構築において、分光特性の利用が有効であることを示している。



図 3. 計測サンプル(メガネ拭き)

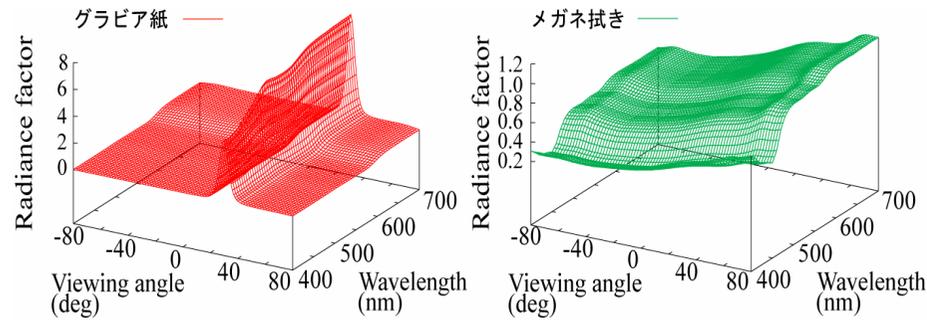


図 4. グラビア紙(左)と布(右)の反射特性

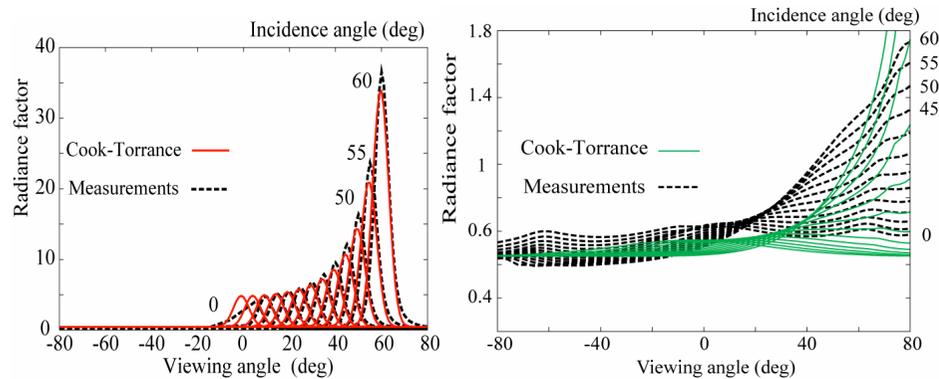


図 5. グラビア紙(左)と布(右)の Cook-Torrance モデルによる適合結果

#### 4. アクティブ分光照明による分光画像計測

2.3 で述べたように、分光イメージング技術は視覚情報に関するあらゆる分野で有用であり、種々のマルチバンドイメージングシステムがこれまで提案されてきた。しかしながら従来のマルチバンドイメージングシステムには次のような問題があった。

- (1) フィルタを交換して画像取得するのに時間がかかる。
  - (2) 適切な分光特性を持つフィルタを設計することが容易でない。
  - (3) スペクトル推定の精度はスペクトロメータの使用に比べて劣る。
- 著者らは、このような問題を解決して効果的な応用を展開するために、アクティブ

分光照明を用いる高速分光イメージングシステムを開発した。使用する光源はプログラム可能な分光光源[4]であり、高速に任意のスペクトルを放射することができる。本章では、分光特性に関するいくつかの応用例を紹介する[5]-[10]。

##### 4.1 分光反射率の推定

本節では、アクティブ分光照明を利用した3種類の分光反射率推定方法[5]を紹介する。

###### 4.1.1 イメージングシステム

図6は、アクティブ分光照明によるイメージングシステムの例を示している。システムは、高速モノクロカメラ、プログラマブル光源 (Optronic Laboratories OL490, リキッドガイド, および制御用のパソコンから構成される。プログラマブル光源の原理はキセノンランプ, グレーティング, DMD チップから構成されており, 1024×768 画素のチップが使われている。制御用パソコンによって, 各基底照明の強度を決定し, 生成された照明光はリキッドライトガイドを通じて照射される。照射タイミングと同期して, カメラは物体の反射光を獲得する。本研究で使用するカメラは, モノクロ CMOS カメラ (EPIX SV642M) であり, 分解能は 320×240, 10bit の量子化レベルで使用している。

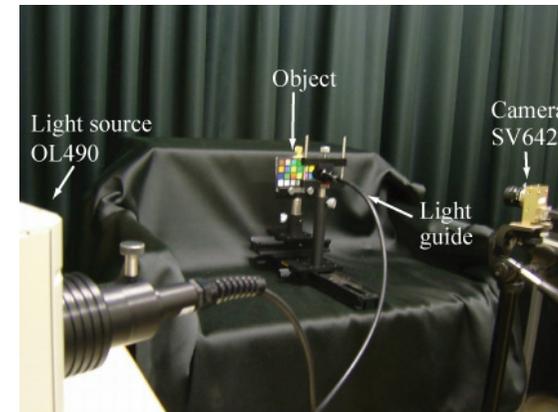


図 6. アクティブ分光照明によるイメージングシステム

###### 4.1.2 狭帯域波形の照射

物体表面が  $E(\lambda, t)$  の分光分布を有する光源で照明されるとき, 時刻  $t_i$  におけるカメラ出力  $\rho(x, t_i)$  は, 式(2)より次式で記述できる。

$$\rho(x, t_i) = \int E(\lambda, t_i) S(x, \lambda) R(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

ただし、カメラノイズは無視できるものとする。我々は、物体表面に依存しない項を、あらかじめ次式のように計算することができる。

$$c_i = \int E_{\lambda_i}(\lambda, t_i) R(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

いま、表面が狭帯域スペクトルで時系列的に照明される場合、表面分光反射率  $(S(x, \lambda_1), S(x, \lambda_2), \dots, S(x, \lambda_n))$  はカメラ出力  $(\rho(x, t_1), \rho(x, t_2), \dots, \rho(x, t_n))$  の時系列から次式のように推定することができる[6],[7]。

$$S(x, \lambda_i) = \rho(x, t_i) / c_i, \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

#### 4.1.3 基底波形とオフセットの照射

分光反射率を表現する  $m$  番目の直交基底  $\psi_m(x, \lambda)$  を考える。すなわち、任意の分光反射率  $S(x, \lambda)$  が、

$$S(x, \lambda) = \sum_{m=1}^M w_m(x) \psi_m(\lambda), \quad (m=1, 2, \dots, M) \quad (6)$$

で表現できると仮定する。このとき、 $m$  番目のカメラ出力  $\rho(x, t_m)$  は、次式で記述できる。

$$\begin{aligned} \rho(x, t_m) &= \int E(\lambda, t_m) S(x, \lambda) R(\lambda) d\lambda \\ &= w_m(x) \int \psi_m(\lambda) E(\lambda, t_m) R(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、照明光源を

$$E_m(\lambda, t) = \psi_m(\lambda) / R(\lambda) \quad (8)$$

と設計することにより、 $\rho(x, t_m) = w_m(x)$  となり、カメラ出力  $(\rho(t_1), \rho(t_2), \dots, \rho(t_n))$  の時系列から次式のように推定することができる

$$S(x, \lambda) = \sum_{m=1}^M \rho(x, t_m) \psi_m(\lambda), \quad (m=1, 2, \dots, M) \quad (9)$$

ここで、一般に直交基底  $\psi_m(\lambda)$  は負値を生じ得るため、式(8)によって設計された光源を照射できない。そこで、照明光源に負値が生じないように、あらかじめ基底  $\psi_m(\lambda)$  にオフセット値  $k$  を加算した基底を構築する。

$$\psi_m^*(\lambda) = \psi_m(\lambda) + k, \quad (m=1, 2, \dots, M) \quad (10)$$

ここで、 $E_{offset}(\lambda, t) = k/R(\lambda)$  を照射したときのカメラ出力  $\rho(x, t_{offset})$  を求め、 $w_m(x) = \rho(x, t_m) - \rho(x, t_{offset})$  とすることによって式(6)で推定する[11]。

#### 4.1.4 基底波形とオフセットの照射

本稿では、4.1.3 で述べた直交基底  $\psi_m(\lambda)$  を

$$\psi_m(\lambda) = \psi_m^+(\lambda) - \psi_m^-(\lambda) \quad (11)$$

によって正負の要素  $\psi_m^+(\lambda), \psi_m^-(\lambda)$  にそれぞれ分解し、式(9)の  $\psi_m(\lambda)$  に代入して設計された照明光源を照射してカメラ出力  $\rho^+(x, t_m), \rho^-(x, t_m)$  を求め、 $w_m(x) = \rho^+(x, t_m) - \rho^-(x, t_m)$  とすることによって式(6)で推定する[5]。

#### 4.1.5 実験結果

4.1.2~4.1.4 で述べた3種類の方法を用いて、X-Rite ColorChecker を対象として分光反射率推定を行った。4.1.2の方法では、 $n=31$  とした。4.1.3 および 4.1.4 の推定方法で用いる直交基底は、507本の分光反射率データベースを構築し、その主成分5本を用いた。5本の直交基底を図7に示す。4.1.3の方法はオフセットとあわせて6種類の照明光源を照射し、4.1.4の方法は負値をとる第2~5主成分はそれぞれ2種類の照明光源を必要とすることから、合計9種類の照明光源を照射した。

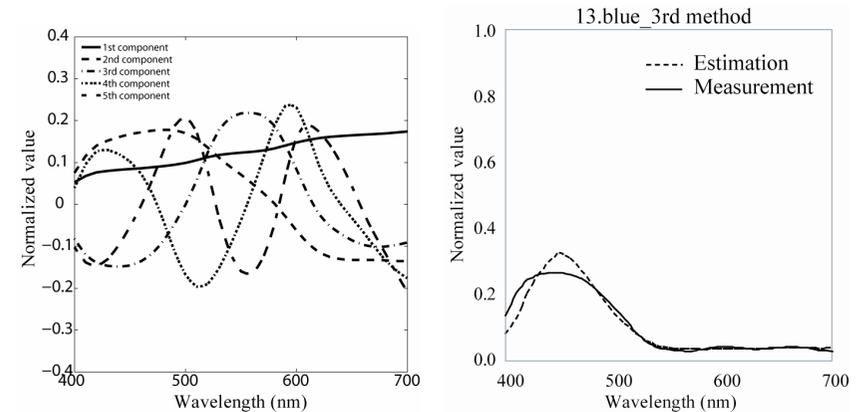


図7. 実験に用いた直交基底(5本) 図8. 青パッチに対する提案手法の推定結果

推定結果を分光反射率のRMSE値として表1にまとめる。4.1.4章で提案した方法が、24パッチの平均誤差および最大誤差ともに、最良の推定結果を得た。また、4.1.3の方法は最小の照射回数であるが、4.1.2とほぼ同程度の推定精度を得られることがわかった。図8に4.1.4章の方法による推定結果例を示す。

表 1 推定結果(RMSE 誤差)

手法	平均誤差	最大誤差	照射数
4.1.2 章[6],[7]	0.0227	0.0463	31
4.1.3 章[11]	0.0228	0.0475	6
4.1.4 章[5]	0.0190	0.0349	9

## 4.2 XYZ 画像表示システム

シーン中の物体色をディスプレイ上に正しく表示する方法として、次の2つが考えられる。(1) 所望の光源を実際に物体に照射し、それをカメラで獲得してディスプレイ表示する方法、(2) 物体全表面の分光反射率を獲得し、光源の分光分布から計算で三刺激値 XYZ を計算して表示する方法である。前者は、実時間で画像表示できるが、使用できる照明光源は限定され、またカメラは測色計でないため色再現精度は悪い。後者は、色再現精度は高いが、表面全点の分光反射率の獲得は容易でないため、実時間表示には適さない。加えて、両手法ともカメラやディスプレイ特性に基づく色補正処理を必要とする。

本節では、(1),(2)の両手法の長所をもつ、任意の分光分布の照明光源での物体の色見えを、正確に実時間でディスプレイに表示することを可能とする全く新しい概念の「XYZ ディスプレイシステム」を紹介する[9],[10]。すなわち、対象物体にアクティブ分光照明で照射し、想定した照明光源下での物体全点の三刺激値 XYZ を、実時間でディスプレイ上に表示することを可能にする。

### 4.2.1 イメージングシステム

本システムは、アクティブ分光照明装置 (Optronic Laboratories OL490)、高速 CMOS モノクロカメラ (EPIX SV642M)、ディスプレイ (EIZO ColorEdge CG221)、制御用計算機から構成される。照明装置は任意の分光分布をもつ照明光を設計でき、高速に切り替え可能である。我々は、3種類の光源を物体に繰り返し照射してモノクロカメラで同期獲得し、連続した3つのカメラ出力値をディスプレイの RGB 値として直接出力する。システム全体の信号の流れを図9に示す。カメラ出力に、色信号変換処理を全く行わないことに注意する。このため、ディスプレイ特性、カメラ感度、想定照明の分光分布を考慮した照明光源を設計する必要がある。

### 4.2.2 光源設計の原理

想定光源下における三刺激値を表示するためのアクティブ分光照明は、次式で設計される(詳細な導出は、文献[9]を参照のこと)。

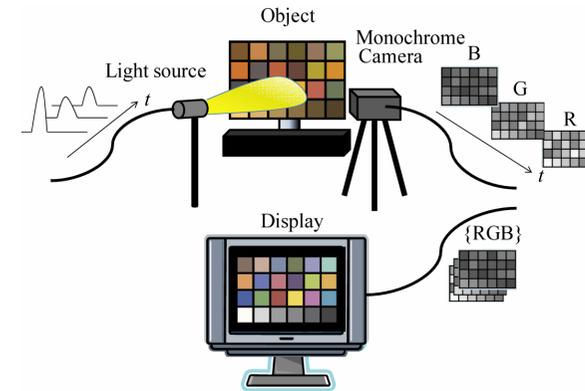


図 9. XYZ ディスプレイシステムの処理の流れ

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_X \\ \mathbf{I}_Y \\ \mathbf{I}_Z \end{bmatrix} = \mathbf{M}^{-1} \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{x}} \\ \bar{\mathbf{y}} \\ \bar{\mathbf{z}} \end{bmatrix} [\mathit{diag}\mathbf{E}][\mathit{diag}\mathbf{R}]^{-1} \quad (12)$$

ここで、 $\mathbf{I}_X, \mathbf{I}_Y, \mathbf{I}_Z$  はアクティブ分光照明、 $\mathbf{M}$  は CIE 等色関数とディスプレイ発光体の分光分布の相関行列、 $\bar{\mathbf{x}}, \bar{\mathbf{y}}, \bar{\mathbf{z}}$  は CIE 等色関数、 $\mathit{diag}\mathbf{E}$  は想定光源の分光分布からなる対角行列、 $\mathit{diag}\mathbf{R}$  はカメラ感度の対角行列を示す。注目すべきは、設計された照明光源は物体表面反射率によらず、カメラ感度とディスプレイ発光体の分光分布のみに依存することである。

### 4.2.3 照明光源の設計

本システムのアクティブ分光照明は、全てのデバイス特性を含んだ式(12)によって設計される。モノクロカメラおよびディスプレイの特性を用いて設計された照明光源  $\mathbf{I}_X, \mathbf{I}_Y, \mathbf{I}_Z$  の例として、D65 について図10に示す。図10において、設計された両光源ともに、斜線で示される負値を持った部分があることがわかる。この負値をもった照明スペクトルは、アクティブ分光照明システムでは物理的に再現できない。この問題を解決するために、負値を補償した照明スペクトルを設計する必要がある。著者らは、(1) Epstein 近似に基づく方法、(2) 一定値のオフセットを加えて照射する方法、(3)  $\mathbf{I}_X, \mathbf{I}_Y, \mathbf{I}_Z$  の線形結合のオフセットを加えて照射する方法を検討した。(2)および(3)に関しては、4番めの波形としてオフセットのみの波形を追加照射して、3つのカメラ出力値から4番めのオフセット出力値をディスプレイに送る前に減算する補償法と、3つのカメラ出力値から、計算によってオフセットを減算する補償法の2種類を検討した。その結果、(3)の方法が最も良好であった[9],[10]。

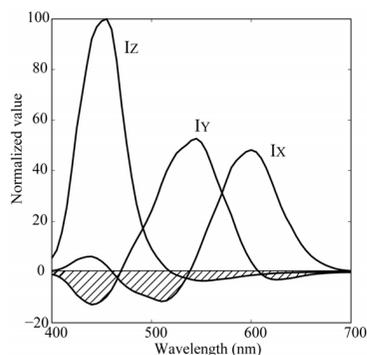


図 10. 設計された照明光源の分光分布(D65).

表 2. ColorChecker の色再現誤差(24 パッチ平均).

	照射数	A	D65
オフセットなし	3 波形	11.8	9.90
オフセットあり(方法(3))	3 波形	8.36	4.71
	4 波形	6.68	4.32

#### 4.2.4 実験結果

設計した光源がアクティブ照明光源からリキッドガイドを通して、物体に照射される。実験では色再現性を確認するために、X-Rite Mini ColorChecker を用いた。実際の計測環境の画像を示す。反射光は照明光源と同期した高速モノクロカメラによって獲得され、ディスプレイに表示される。実験は暗室で行った。なお、アクティブ照明の照射速度は、ディスプレイの描画速度を 30fps で実現するために、3 波形の場合約 90ps, 4 波形の場合約 120fps と設定し、物体をステップモーターで移動させながら表示することにより、実時間で描画できることを確認した。

表 2 に、ColorChecker 24 色の CIELab 色差の平均を示す。色差は、正解値を分光光度計(Gretag Machbeth Spectrolino)を用いて計測し、再現値はディスプレイに表示された、ColorChecker を分光放射輝度計(Photo Research PR-650)を用いて計測して求めた。表 2 の「オフセットなし」とは、図 10 の負値の部分をも 0 として照射した場合である。オフセットを照射して補償することにより、大幅に色再現精度が改善されていることが確認できる。色再現精度は、オフセット波形を独立に照射する 4 波形照射の方が良好であった。再現色差も、D65 では 4 程度と良好な結果が得られた。本実験では、120fps の獲得でも再現可能であったが、長い露光時間を必要とする対象物体の場合に

は、3 波形照射が有効である。

## 5. おわりに

本稿では、種々の計測器を用いた分光計測方法を総括した後、布とグラビア紙を対象として、物体による分光特性の違いと質感との関連性を概観した。さらに、CV の観点から、カメラによって獲得された画像のみを用いて分光特性を推定する技術として、アクティブ分光照明を活用した分光イメージングシステムを紹介した。

質感の工学的解析への取り組みは始まったばかりである。分光イメージングによる質感へのアプローチは、種々の問題の解決に役立つものと信じている。

**謝辞** 日頃より討論いただく千葉大学大学院融合科学研究科 富永昌治教授、同 平井経太助教、および本研究の遂行にご協力いただく同 富永・堀内研究室学生諸氏に対して、感謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) 文部科学省科学研究費補助金新学術領域研究(研究領域提案型): 質感認知の脳神経メカニズムと高度質感情報処理技術の融合的研究, 平成 22 年度~平成 26 年度.
- 2) 富永昌治: マルチバンドイメージング技術とビジョン応用, 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.47, No.SIG 5 (CVIM13), pp.20-34, (2006).
- 3) 木村佳希, 森内優介, 堀内隆彦, 富永昌治: 複雑な光学特性をもつ素材の光反射モデルの検討, 第 3 回色彩情報シンポジウム in 長野論文集, pp.15-18, (2009).
- 4) Fong, A., Bronson, B. and Wachman, E.: Advanced Photonic Tools for Hyperspectral Imaging in the Life Sciences, SPIE Newsroom, (2008).
- 5) 吉村昭彦, 堀内隆彦, 富永昌治: アクティブ分光照明を用いた分光反射率推定法の検討, 日本色彩学会誌, Vol. 35, Supplement, pp.22-23, (2011).
- 6) 富永昌治, 堀内隆彦, 柿沼弘員: プログラマブル光源を用いた分光イメージング, 日本色彩学会視覚情報基礎研究会, SIG-FVI-2009-9, pp.29-32, (2009).
- 7) Tominaga, S., Horiuchi, T. and Yoshimura, A.: Real-time Color Measurement using Active Illuminant, Proc. IS&T/SPIE Symposium on Electronic Imaging, Vol.7528, pp.752809-752809-8, (2010).
- 8) Horiuchi, T., Kakinuma, H. and Tominaga, S.: Effective Illumination Control for an Active Spectral Imaging System", Proc. International Symposium on Multispectral Color Science, pp.529-534, (2010).
- 9) Tominaga, S., Horiuchi, T. and Yoshimura, A.: An Active Illumination Method for Tristimulus Image Display, Proc. IS&T/SID's Color Imaging Conference, pp.160-165, (2010).
- 10) 西岡大輔, 堀内隆彦, 富永昌治: アクティブ分光照明を用いた XYZ 画像表示システム, 第 17 回画像センシングシンポジウム(SSII2011) 論文集, IS4-23, (2011).
- 11) 佐藤いまり, Art Subpa-Asa, 韓帥, 岡部孝弘, 佐藤洋一: 分光基底光源を利用した分光反射率計測, 第 16 回画像センシングシンポジウム (SSII2010) 論文集, IS1-16, (2010).