

5.6.3 スペクトル画像計測法の進展

(1)はじめに

一般に，物体の分光反射率を測定するためには分光光度計や分光放射輝度計が利用される。しかし，これらの装置では物体におけるスポット部分の平均分光情報が得られるのみである。物体各点での分光反射率を求める方法として，狭帯域の干渉フィルターを多数用いたマルチバンド撮影法がある^{1,2)}。しかし，この手法は大量のデータを保存・処理する必要がある。そこで近年，ディスプレイやハードコピーの色再現の分野から，少数の広帯域色フィルターで撮影されたマルチバンド画像から事前に得られている分光反射率サンプルをもとに各点の分光反射率を推定する手法³⁻¹⁷⁾が提案されている。これらの手法は，市販のデジタルカメラ等を用いて容易にスペクトル画像が得られるため，光計測の分野でも注目されている。本報告では，スペクトル画像計測法の新たな進展であるマルチバンド画像からの分光反射率の推定法とその展開，応用例について述べる。

(2)スペクトル情報処理

(a)分光反射率の推定逆問題

デジタルカメラで図 5.6.3.1 に示すように物体をマルチバンド撮影した場合^{1,2)}，画像の画素値は，その画素位置に対応する C C D (Charge Coupled Device) 素子に入射する光強度や分光分布によって決定される。モノクロデジタルカメラで i 番目の広帯域フィルターを通して物体を撮影した場合，画素位置 (x, y) に対応する C C D 素子に入射する光の分光分布は， $t_i(\lambda)E(\lambda)r(x, y; \lambda)$ で与えられる。ここで $r(x, y; \lambda)$ は，画像座標 (x, y) における物体の分光反射率， $E(\lambda)$ ， $t_i(\lambda)$ はそれぞれ，照明の分光放射輝度， i 番目のフィルターの分光透過率を表すとする。レンズの分光透過率や C C D の分光感度などを合わせた総合的な分光積を $S(\lambda)$ とすると，各素子において得られるセンサー応答 $v_i(x, y)$ は，入射光 $t_i(\lambda)E(\lambda)r(x, y; \lambda)$ と分光積 $S(\lambda)$ を波長領域で積分したものと与えられるため， m をマルチバンド画像のバンド数とした時，センサー応答は式 (1) で表される。

$$v_i(x, y) = \int_{400}^{700} t_i(\lambda)E(\lambda)S(\lambda)r(x, y; \lambda)d\lambda, \quad i = 1, \dots, m \quad (1)$$

この時，分光積 $S(\lambda)$ は波長 400nm から 700nm の可視領域以外では 0 であるとする。次に数学的な取り扱いを簡単にするために，分光分布を離散化し，ベクトルや行列を用いて表す。 v を m 個のバンドのセンサー応答を表した m 個の要素を持つ行ベクトル， r を物体の分光反射率を表す l 個の要素で構成される行ベクトルを表すとした場合，式 (1) は以下のようにベクトルと行列を用いて表される。

$$v = Fr \quad (2)$$

ここで，座標 (x, y) は省略する。また，行列 F は， i 番目のフィルターの分光透過率を表す行ベクトル t_i をまとめた行列 T

$$T = [t_1, t_2, \dots, t_m]^T \quad (3)$$

と，照明とカメラの分光感度に対応する $l \times l$ の対角行列である行列 E, S を用いて，以下のように定義される。

$$F = TES \quad (4)$$

式 (3) で， $[]^T$ は，転置を示す。式 (2) は，1 次元の分光反射率ベクトル r を，行列 F により m 次元のセ

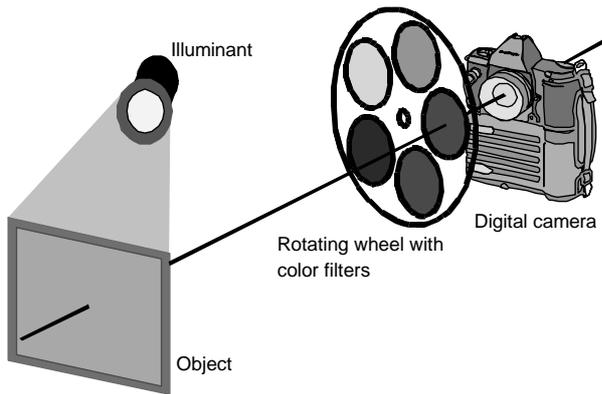


図 5.6.3.1 マルチバンド撮影

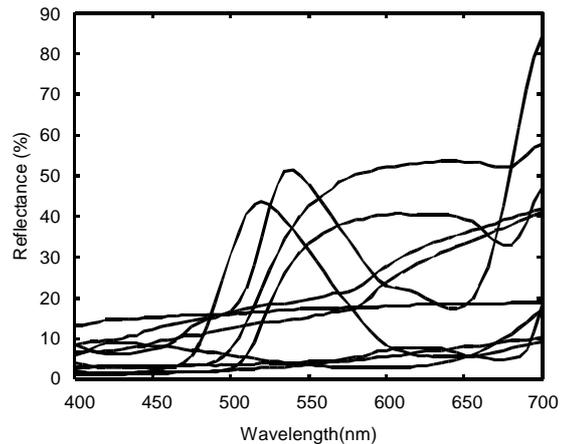


図 5.6.3.2 自然界の分光反射率サンプルの例

ンサ応答ベクトル r に線形射影している。ここで、マルチバンド画像からの分光反射率の推定とは、式 (1) を分光反射率ベクトル r に関して解くことである。しかし、行列 F は正則でないため逆行列を持たず、この問題は不良設定問題となる。また、一般に正則でない行列に対する擬似的な逆行列として一般化逆行列¹⁸⁾ が知られているが、分光分布の離散化数 l は、バンド数 m よりかなり大きいため精度の高い推定が行えない。次から示す手法は、既知の分光反射率サンプルをもとに未知の分光反射率を高い精度で推定する手法である。

(b)主成分分析に基づく低次元線形近似推定法⁴⁾

Vrhe1 らの測定した自然界や人工物に存在する代表的な 170 個の分光反射率サンプル¹⁹⁾のうち 10 サンプルを図 5.6.3.2 に示す。ここで、分光反射率データは、400nm から 700nm の間を 5nm 間隔で離散化した 61 次元のデータである。図 5.6.3.2 から、これらの分光反射率の曲線はなめらかであることが分かる。これは、分光反射率を表す 61 次元のデータは冗長であり、分光反射率ベクトルは 61 次元ベクトル空間の一部に局在していることを意味する²⁰⁾。分光反射率サンプルを主成分分析することにより、この冗長性を取り除くことができる。主成分分析は、次式に示すサンプルの共分散行列の固有分解により行われる。

$$C_{rr} = \langle (r - \bar{r})(r - \bar{r})^t \rangle = \sum_{i=1}^K \lambda_i b_i b_i^t \quad (5)$$

ここで、 \bar{r} は分光反射率サンプルの平均値、 $\langle \rangle$ はサンプルに関する平均、 λ_i 、 b_i はそれぞれ i 番目の固有値、固有ベクトルである。固有値の大きい順に番号を付け、固有ベクトルは b_i 、第 i 主成分ベクトルと呼ばれる。任意の分光反射率 r は、主成分ベクトルを直交基底として次式のように展開することができる。

$$r = \sum_{i=1}^K w_i b_i \quad (6)$$

ここで、 w_i は各主成分ベクトルに対する得点または重みと呼ぶ。式 (6) において、全ての基底を用いず少数の基底で式 (7) に示すように近似することができる。このように小数の基底でベクトルを近似することを低次元線形近似という。ここでは特に基底の数をマルチバンド画像のバンド数 m に合わせる。

$$r \cong \hat{r} = \sum_{i=1}^m w_i b_i = Bw \quad (7)$$

$$w = [w_1, w_2, \dots, w_m]^t \quad (8)$$

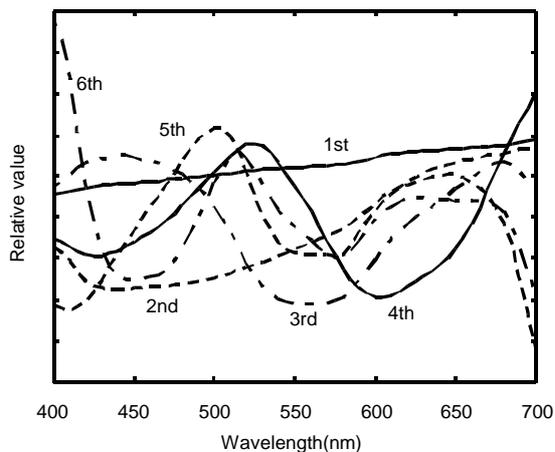


図 5.6.3.3 主成分

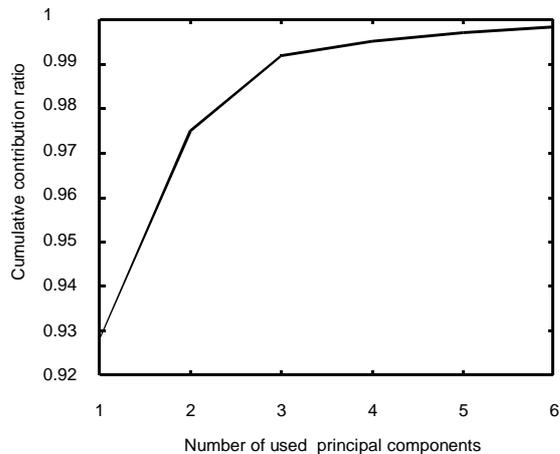


図 5.6.3.4 寄与率

$$B = [b_1, b_2, \dots, b_m]$$

この近似の精度は、式(9)で示される累積寄与率により評価することが出来る。

$$\chi_m = \frac{\sum_{j=1}^m \lambda_j}{\sum_{j=1}^K \lambda_j} \quad (9)$$

図 5.6.3.3 と図 5.6.3.4 に Vrhel からのサンプルの第 6 番目までの主成分ベクトルと、使用した主成分数 m を変えた時の累積寄与率の変化を示す。低次元にもかかわらず高い精度で分光反射率の近似が実現されていることが分かる。式(7)を式(2)に代入し、式(10)が得られる。

$$v \cong FBw \quad (10)$$

ここで、FB は正方形行列であり、行列 F の基底が独立であるとする、FB は正則になり逆行列を持つ。よって、式(10)を w について解いて次式が得られる。

$$w \cong (FB)^{-1}v \quad (11)$$

式(11)を式(7)に代入し、分光反射率の推定値 \tilde{r}

$$\tilde{r} = B(FB)^{-1}v \quad (12)$$

を得る。式(12)は、センサー応答ベクトル v が与えられた時に、推定行列 $B(FB)^{-1}$ を用いて、分光反射率を推定する式であり、マルチバンド画像の全画素に適用することにより、物体各点での分光反射率を求めることができる。

(c) その他の推定法

サンプルの分光反射率と、式(7)による主成分ベクトルを基底として低次元線形近似された分光反射率との間の平均二乗誤差は、他のベクトルを基底とした場合に比べて最も小さい。しかし式(12)を用いた推定では、総合的な分光積 F が影響し、平均二乗誤差が最小となる推定解を与えない。サンプルの分光反射率と推定された分光反射率の間の平均二乗誤差を最小とする手法として、Wiener 推定法(最小平均二乗誤差推定法)を用いることも出来る^{5,11)}。また、カメラのガンマ特性等の非線形性や分光反射率サンプルの分布

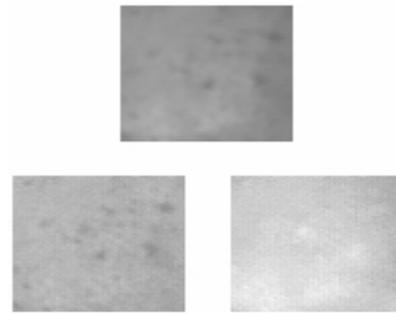
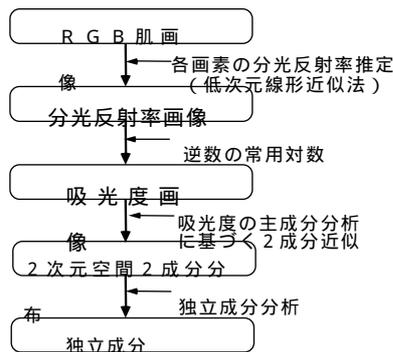


図 5.6.3.5 肌画像の独立成分析の手順

図 5.6.3.6 (上図) オリジナル肌画像

(左下図) ヘモグロビン分布, (右下図) メラニン分布

自体の非線形性等を考慮した非線形な推定法として、ニューラルネットワーク¹⁰⁾、重回帰^{12, 15)}等を用いた手法が提案されている。

(3) スペクトル画像処理の展開

(a) カラー画像マネージメント

コンピュータネットワークの急速な普及により、美術品や商品やなど様々な物体が、ネットワークを通して画像として鑑賞・観察されている。そこで、デジタルカメラ、CRT、プリンタ等各デバイスの入出力特性をカラープロファイルとして保持しデバイス間の測色値を合わせるカラーマネージメントが行われている^{21, 22)}。しかし、物体の測色値は撮影時の照明光源の特性に大きく依存するため、撮影光源と異なる照明下で画像を観察する場合、物体の色を正確に伝えることは出来ない。この問題は、電子美術館、遠隔医療やインターネットショッピング等において安全性、信頼性などの観点から重要な問題である。そのため、現在、画像を撮影時の照明光源に依存しない分光反射率データとして保存、伝送することが求められている。受け取った分光反射率データに観察照明光の分光分布データを与えることにより、その照明光源下での正確な色再現を行うことができる。

(b) 画像計測

観測した画像を分析し、その画像を構成する物質を特定する定性情報や構成物質の空間的な分布を与える定量情報を抽出することが、医用診断、リモートセンシング²³⁾、ロボットビジョン²⁵⁾等で求められている²⁶⁾。物質を特定する定性情報として、古くから機器分析で用いられてきた分光的特徴は非常に有効であり、観測画像として各画素における分光データを情報として持つ分光画像を用いる手法(画像分光法)が古くから提案されている²⁶⁾。

(4) スペクトル画像処理の応用例

マルチバンド画像から分光反射率を推定するタイプのスペクトル画像計測法の生体光計測への応用例として、肌画像の解析によるヘモグロビン分布とメラニン分布の抽出例を示す²⁷⁾。図 5.6.3.5 にその手順を示す。デジタルカメラで撮影された R G B 画像は、上で述べた主成分分析に基づく低次元線形近似推定法により

分光反射率画像に変換される。得られた分光反射率画像の画素値に対して、逆数の常用対数をとることにより、吸光度画像が得られる。ここで、肌を構成する色素は、主にヘモグロビンとメラニンであるとする近似から、主成分分析に基づき、2つの色素のみから構成される2つの主成分を抽出する。しかし、抽出された主成分は、各色素の吸光特性に直接的に対応したものではない。そこで、ヘモグロビンとメラニンは空間的に独立に分布するとする仮定から、因子分析法の一種である独立成分分析法を、抽出された主成分に適用することにより、ヘモグロビンとメラニンに対応した吸光度を抽出することが出来る。図5.6.3.6に対象とする肌画像、抽出されたヘモグロビン分布とメラニン分布を示す。ヘモグロビン分布においてニキビの成分が抽出されていることからこの手法の有効性が確認できる。この手法の応用は、肌の疾患解析、肌色の色変換など多岐にわたると期待されている。

(5)まとめ

スペクトル画像計測法の新たな進展であるマルチバンド画像からの分光反射率の推定法とその展開、応用例について述べた。少数のフィルタによるマルチバンド画像を用いたスペクトル画像計測法は、市販のデジタルカメラを用いて容易に実現できることから、様々の分野へ広がることが期待される。生体計測においては、遠隔医療における環境照明の影響の除去や分光情報に基づく患者の状態のモニタリング、肌疾患分布の解析、電子内視鏡による腫瘍分布の解析などへの応用が進むであろう。

(津村 徳道)

参考文献

- (1)佐藤嘉伸, 河合秀夫, 田村進一, CCD撮像素子を用いたマルチスペクトル画像入力装置, 画像電子学会誌 第14巻 第2号(1985) 112-120.
- (2)中野恵一, 小宮康宏, マルチスペクトルカメラを用いた物体識別, 応用物理 65 (1996)496-499.
- (3)L. T. Maloney and B. A. Wandell, Color constancy: a method for recovering surface spectral reflectance, Journal of the Optical Society of America A 3 (1986) 29-33.
- (4)M. J. Vrhel and H. J. Trussell, Color Correction Using Principal Components, Color Res. Appl. 17 (1992) 328-338.
- (5)M. J. Vrhel and H. J. Trussell, Filter Considerations in Color Correction, IEEE Trans. Image Processing 3 (1994) 147-161.
- (6)N. Hayasaka, S. Toyooka, T. Jaaskelainen, Iterative feedback method to make a spatial filter on a liquid crystal spatial light modulator for 2D spectroscopic pattern recognition, Optics Communications 119(1995)643-651.
- (7)Tatsuya Shiobara, Shixin Zhou, Hideaki Haneishi, Norimichi Tsumura and Yoichi Miyake, Improved color reproduction of electronic endoscopes, J. Imag. Sci. and Tech. 40 (1996)494-501.
- (8)H. Maitre, F. Schmitt, J. -P. Crettez, Y. Wu and J. Y. Hardeberg, Spectrophotometric Image Analysis of Fine Art Paintings, Proc. of the Fourth Color Imaging Conference: Color Science, Systems and Applications (Scottsdale, Arizona, 1996) pp. 50-53.

- (9) M. Wolski, C.A. Bouman, J.P. Allebach and E. Walowitz, Optimization of Sensor Response Functions for Colorimetry of Reflective and Emissive Objects, IEEE Trans. Image Processing 5 (1996)507-517.
- (10) 荒井佳文, 中内茂樹, 臼井支朗, 分光反射率推定に基づく光源変動による色ずれの修正法, 電子情報通信学会誌 D-II, J80-D-II (1997)558-568.
- (11) H. Haneishi, T. Hasegawa, N. Tsumura and Y. Miyake, Design of color filters for recording art works, Proc. of IS&T's 50th Annual Conference (Boston, 1997)369-372
- (12) Friedhelm Koig, Reconstruction of Natural Spectra from Color Sensor Using Nonlinear Estimation Methods," Proc. of IS&T's 50th Annual Conference (Boston,1997)454-458.
- (13) G. Wyszecki and W. S. Stiles, Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae, 2nd ed. (John Wiley & Sons, Inc., 1982), Chap. 3, p. 167.
- (14) 富永昌治, コンピュータビジョンと分光反射率推定, 光学 26(1997)671-676.
- (15) 津村徳道, 羽石秀昭, 三宅洋一, 重回帰分析によるマルチバンド画像からの分光反射率の推定, 光学 第27巻 7号 pp. 384-391 (1998).
- (16) 横山康明, 津村徳道, 羽石秀昭, 三宅洋一, 林純一郎, 斎藤雅行, ヒューマンパーセプションに基づく高精細カラーマネジメントシステム -その美術館, 博物館収蔵品の記録再現への応用に関する研究 - " カラーフォーラム JAPAN '97 論文集 (東京,1997) 45-48.
- (17) 大谷百合, 小尾高史, 山口雅浩, 大山永昭, 小宮康宏, 遠隔画像表示システムにおける正確な色再現手法, カラーフォーラム JAPAN '97 論文集 (東京,1997) pp. 49-52.
- (18) 岡本良夫, 逆問題とその解き方 (オーム社, 東京, 1992年).
- (19) M.J. Vrhel, R. Gershon and L.S. Iwan, Measurement and Analysis of Object Reflectance Spectra, Color Res. Appl. 19(1994) 4-9.
- (20) L.T. Maloney, Evaluation of linear models of surface spectral reflectance with small numbers of parameters, Journal of the Optical Society of America A 3(1986)1673-1683.
- (21) Michael Stokes, The History of the ICC, Proceeding of IS&T/SID The Fifth Color Imaging Conference, Color Science, Systems, and Applications (Scottsdale, Arizona, 1997) pp. 266-269.
- (22) 田島譲二, カラー画像複製論 カラーマネジメントの基礎 (丸善株式会社, 東京, 1996).
- (23) 高木幹雄, 下田陽久 監修, 画像解析ハンドブック, 東京大学出版会(1991).
- (24) 真鍋佳嗣, 佐藤宏介, 井口征士, 物体認識のためのスペクトル画像による材質の判別, 電子情報通信学会論文誌 D-II No. 1 pp. 36-44(1996).
- (25) 河田聡, 南茂夫 編著, 科学計測のための画像データ処理, CQ 出版(1994).
- (26) 南茂夫, 合志陽一 編集, 分光技術ハンドブック, 朝倉書店(1990).
- (27) 津村徳道, 羽石秀昭, 三宅洋一, 肌の2次元分光反射率分布に対する独立成分分析 " 第4回画像センシングシンポジウム講演論文集 (横浜, 1998.5.29) 225-228.