2章 マルチスペクトル技術の進展

2-1 アクティブスペクトルイメージング

[正会員] 富永昌治†

キーワード：アクティブイメージング、マルチスペクトルイメージング、パッシブイメージング、プログラマブル光源、測色、XYZイメージャ

1. まえがき

シーンから分光情報を獲得するために、これまでにさまざまなマルチスペクトルイメージング系が提案されてきたが、ほとんどはパッシブ照明を想定して、センサ側に分光メカニズムをもたすシステムで構築されてきた。このタイプのシステムは照明光に制約がないため、われわれが生活する自然環境におけるイメージングに適しているといえる。一方、分光メカニズムを光源側にもたしたり、あらかじめ照明光の分光分布をデザインしたりして、既知の光を照射するアクティブ照明を利用するイメージングが近年注目を集めている。例えば、物体表面の分光反射率は、アクティブ照明を用いて効率的に推定することができる。

アクティブ照明を用いるスペクトルイメージング技術は、従来のパッシブイメージングで不得意とする問題を解決したり、新たな応用技術が提案されたりして、色彩工学、CV、イメージング産業を含むいろいろな分野の応用展開が期待される。本稿では、アクティブスペクトルイメージングの基本的技法と幾つかの応用技術について述べる。

2. 固定原色光源を用いる手法

アクティブ照明の光源として、電球光のような連続スペクトル光をカラーフィルタで分光した光源¹⁾、カラーLEDアレー²⁾³⁾、キセノンフラッシュ電球⁴⁾⁵⁾、DLPプロジェクタ⁶⁾といったものを利用した手法がこれまでに提案されている。このような光源を利用する代表的なマルチスペクトル技法として、物体表面の分光反射率の推定問題を取り上げる。

いま m 個の帯域フィルタを用いるマルチスペクトルイメージング系を想定する。 $F_i(\lambda)$ ($i=1, 2, \dots, m$) をフィルタ i の分光透過率、 $S(\lambda)$ を物体表面の分光反射率、 $V(\lambda)$ をイメージセンサの分光感度、 $E(\lambda)$ を光源から放射される光の分光エネルギー分布とする。このとき i チャンネルのイメー

ジセンサ出力は、センサノイズを無視すれば、次式のように記述できる。

$$o_i = \int_{400}^{700} S(\lambda) F_i(\lambda) E(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

ここで、各分光関数を可視波長域 [400, 700 nm] で n 個の等波長間隔 $\Delta\lambda$ でサンプルして離散的に表現する。まず、 $\mathbf{s}$ を分光反射率の n 次元縦ベクトル、 $\mathbf{H}$ を要素 $h_{ij} = E(\lambda_j) F_i(\lambda_j) V(\lambda_j) \Delta\lambda$ をもつ $m \times n$ 行列、 $\mathbf{o}$ をセンサ出力の n 次元縦ベクトルとする。このとき分光反射率とセンサ出力の関係は簡単な行列式にまとめられる。

$$\mathbf{o} = \mathbf{H}\mathbf{s} \quad (2)$$

さてパッシブイメージング系では、フィルタはセンサ側にあり、つまり $F_i(\lambda) V(\lambda)$ が一体となり、一方アクティブイメージング系では、フィルタは光源側にあるから、 $F_i(\lambda) E(\lambda)$ が一体となる。しかし、式 (1) から明らかなように、フィルタの場所が異なるだけで、パッシブとアクティブはイメージング入出力において等価である。なお式 (2) で $\mathbf{s}$ を求めるために、Wiener 推定法をはじめ、多くの解法がすでに提案されている。

しかしながら、実シーンにおける照明環境は複雑で、物体表面は光源からの直接光のみならず、周辺に存在する物体からの反射光も間接照明光をして作用する。パッシブイメージング系では、このように物体間の相互反射による影響もセンサ出力に含まれるので、対象物体の分光反射率推定は容易でなくなる。

アクティブイメージング系では、照明光の照射エリアを選択できるので、推定の精度は向上する。シーン全体を照明する環境光の分光分布を $E_0(\lambda)$ とするとき、センサ出力は

$$o_i = \int_{400}^{700} S(\lambda) V(\lambda) [F_i(\lambda) E(\lambda) + E_0(\lambda)] d\lambda \quad (3)$$

と表せる。ここで二つの異なったフィルタ i と k を用いたセンサ出力の差を求めれば、

$$o_i - o_k = \int_{400}^{700} S(\lambda) V(\lambda) [F_i(\lambda) - F_k(\lambda)] E(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

を得る。つまり環境光の影響を簡単に除去することができる。これは式 (2) と同様な行列方程式に帰着する。ここで推定精度は、光源の分光分布とフィルタ特性に大きく依存

† 千葉大学 大学院融合科学研究科

"Fusional Advancement in Multispectral Technology: Active Spectral Imaging" by Shoji Tominaga (Graduate School of Advanced Integration Science, Chiba University, Chiba)

することに注意する。通常の光源は広帯域のものが多い。光源とフィルタを適切に選択することは重要である。

従来のパッシブイメージングでの広帯域の光源は、固定した分光分布をもつ幾つかの原色光源の線形結合から作られていることが多い。このため、処理時間と推定精度の両方にメリットをもつイメージング系を実現することは容易でないといえる。

3. プログラマブル光源を用いる手法

筆者らは、プログラム可能な光源と高速のモノクロカメラを同期させることによって、アクティブスペクトルイメージング系を構築している⁷⁾。光源は高速で任意のスペクトルを発することができるので⁸⁾、高いフレームレートでフィルタを動作させることなく、スペクトル画像を獲得できるという大きな利点がある。結果として、シーンからスペクトル情報を高速かつ正確に得ることができる。

3.1 イメージング系

図1は、スペクトルイメージング系の構成図で、高速モノクロカメラ (Epix SV643 M)、プログラマブル光源 (Optronic Laboratories OL490)、およびカメラと光源を制御するためのパソコン (PC) からなる。光源にはDMD (digital micromirror device) が使われ、分光的に制御可能な光を実現している。図2は、プログラマブル光源の原理図で、キセノン光源、回折格子、DMDチップと液体ライトガイドで構成される。このシステムでは、キセノン光が回折格子で分光され、2次元のDMDチップで波長と強度の情報が別々に組み立てられる。DMDはスイッチングが高速なので、液晶ディスプレイといった他の光源よりも、高速に出力スペクトル光を切り替えることができるのが長所である。

3.2 照明光制御

光源システムは、単一波長からなる光の放射と広帯域スペクトルの光の放射を可能にしている。このために、われわれは時間不変と時間変動の二つの時系列モードでスペクトル関数を設計している。時間不変モードでは、同じスペクトルを常時発生させ、他方、時間変動モードでは、各時刻において異なるスペクトルを発生させる。いま $E_{\lambda_i}(\lambda)$ を中心波長 λ_i における狭帯域の分光エネルギー分布とし、 $(E_{\lambda_1}(\lambda), E_{\lambda_2}(\lambda), \dots, E_{\lambda_n}(\lambda))$ をその時系列とする。図3は時系列で発生する分光エネルギー分布の例である。狭帯域のスペクトル関数の集合が可視域において等しい波長間隔で生成される。図3 (a) は時間変動モードで、異なるスペクトル関数が時系列 $E_{\lambda_1}(\lambda, t_1), E_{\lambda_2}(\lambda, t_2), \dots, E_{\lambda_n}(\lambda, t_n)$ として表されている。図3 (b) は時間不変モードで、同じスペクトル関数が常に $E_{\lambda_1}(\lambda, t) + E_{\lambda_2}(\lambda, t) + \dots + E_{\lambda_n}(\lambda, t)$ の形式で表されている。

3.3 スペクトルレンダリング

従来の光源システムでは、分光エネルギー分布を広帯域の基底光源の組合せで作成するので、任意形状の分光エネ

図1 スペクトルイメージングシステム

図2 プログラマブル光源の原理図

図3 分光エネルギー分布の時系列

ルギー分布を発生させることは本質的に困難である。これとは対照的に、提案されたイメージングシステムでは、任意形状の分光エネルギー分布をもつ照明光を生成できて、対象物体の表面に照射してその見えを観察することができる。見えを調べる視感評価実験では、CIEの標準の光AやD65がよく用いられる。図4は、筆者らが開発した照明システムで生成した標準の光AとD65の分光エネルギー分布である。生成したスペクトルはCIEの定める目標スペクトルにほとんど一致している。

図4 照明光の分光エネルギー分布例

(a) 白色LEDの分光エネルギー分布 (b) RGB混合LEDの分光エネルギー分布

(c) 白色LED下での見え (d) RGB混合LED下での見え

図5 約6500 kの二つのLED照明光の下での花籠の見え
(口絵カラー参照)

本システムで任意の分光エネルギー分布をもつ照明光を発生させることによって、実シーンにおけ3次元物体のスペクトルレンダリングが可能となる。つまり人による忠実な視感評価が可能となる。図5は、約6500 kの同じ色温度をもつ二つのLED照明で、花籠を照射したときの見えの実験を例示する。図5(a)と図5(b)は、それぞれ、白色LEDとRGB混合白色LEDの生成した分光エネルギー分布を示す。これらの光源で同じ物体を照明した。同じ色温度をもつにもかかわらず、カラフルな花籠の見えは、図5(c)と図5(d)のように二つの照明光のもとで大きく違うことに注目される。色の見えは照明光のスペクトル分布形状に大きく影響を受けるのである。このような光源システムは、実物体のスペクトルレンダリングやColor Rendering Indexを含む各種見えの調査に有用である。

4. 応用

4.1 反射率推定

物体表面の分光反射率の推定問題は、アクティブスペク

トルイメージング系を用いて効率よく解決することができる。プログラム光源は、狭帯域のスペクトル光を高速に発生させることができるので、カメラの分光感度の逆関数を物体表面にスペクトル光の時系列として照射すれば、分光反射率はカメラ出力から、ピクセルの空間解像度で直接得ることができる。

いま、物体を分光エネルギー分布 $I(\lambda, t)$ の光源で照明し、時刻 t_i におけるカメラ出力を

$$O(t_i) = \int S(\lambda) I(\lambda, t_i) V(\lambda) d\lambda \quad (5)$$

で記述する。分光反射率が滑らかで、光源が狭帯域スペクトル光 $E_{\lambda_i}(\lambda, t)$ とすれば、カメラ出力は次のように書き換えられる。

$$\begin{aligned} O(t_i) &= \int S(\lambda) E_{\lambda_i}(\lambda, t_i) V(\lambda) d\lambda \\ &= S(\lambda_i) \left(\int E_{\lambda_i}(\lambda, t_i) V(\lambda) d\lambda \right) \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、照明光が狭帯域なので、センサの分光感度関数 $V(\lambda)$ は必ずしも狭帯域(シャープ)である必要はないことに注意する。上式右の括弧内は物体表面とは独立して、システムに固有なのであらかじめ計算できる。

$$c_i = \int E_{\lambda_i}(\lambda, t_i) V(\lambda) d\lambda \quad (7)$$

物体表面が図3(a)のような狭帯域照明で連続的に照明されるとき、表面分光反射率 $(S(\lambda_1), S(\lambda_2), \dots, S(\lambda_n))$ はカメラ出力の時系列 $(O(t_1), O(t_2), \dots, O(t_n))$ から

$$S(\lambda_i) = O(t_i) / c_i \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

として直接推定することができる。もし $E_{\lambda_i}(\lambda, t_i)$ を $V(\lambda)$ の逆関数になるよう設計すれば、式(8)右辺の計算は不要で、分光反射率はカメラ出力系列 $(O(t_1), O(t_2), \dots, O(t_n))$ から直接得られることになる。

図6は逆関数 $1/V(\lambda)$ の実現結果で、可視域[400, 700 nm]

図6 逆関数を表現するための61狭帯域照明光源

図7 等色関数を物体表面に時系列で投影

を5 nmの等間隔で分割し、61個の狭帯域スペクトル関数を生成して近似している。この場合、照明光を61回照射することになる。照明光の照射回数を減少して反射率推定をさらに高速化することは可能で、分光反射率の有限次元線形モデルを利用することが考えられる(文献7) 参照)。

4.2 三刺激値イメージャ

測色は、人間の色知覚を数量的に評価するために必要な科学技術である。このためにCIEの三刺激値XYZがもっぱら使用されている。しかし測色計や分光器に基づく従来の測色法では画素レベルで三刺激値を求めることはできず、表面上である程度広い領域での三刺激値を決めることになる。しかも正確な測色値を得るには時間がかかる。

アクティブ照明に基づくスペクトルイメージング系を利用すれば、高速かつ高解像の測色が可能となる。この技法は三刺激値イメージャ(Tristimulus Imager)と呼ばれ、等色関数を照明光として物体表面に投影することに基づく。いま図7のように三つの等色関数を物体表面に時系列で投影すれば、照明された表面の三刺激値XYZは、カメラ出力からカメラピクセルの空間解像度で得ることができる。

物体表面の三刺激値XYZは次式で計算される。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \int S(\lambda) E_T(\lambda) \begin{bmatrix} \bar{x}(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) \\ \bar{z}(\lambda) \end{bmatrix} d\lambda \quad (9)$$

ここで $E_T(\lambda)$ は標準の光AやD65のように観測する目標光源で、 $(\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda))$ はCIEの等色関数である。

いま3種類の照明光($I_x(\lambda), I_y(\lambda), I_z(\lambda)$)を、 $I_x(\lambda) = E_T(\lambda) \bar{x}(\lambda)/V(\lambda)$, $I_y(\lambda) = E_T(\lambda) \bar{y}(\lambda)/V(\lambda)$, $I_z(\lambda) = E_T(\lambda) \bar{z}(\lambda)/V(\lambda)$ を満たすように設計し、3回の分けて($I_x(\lambda), I_y(\lambda), I_z(\lambda)$)を物体表面に照射する。この照明光のスペクトルは、等色関数を目標光源とカメラ感度で変調したものである。このときのカメラの入出力関係は式(9)に一致する。すなわち、モノクロカメラからの3回にわたる時系列カメラ出力($O(t_1), O(t_2), O(t_3)$)は三刺激値XYZに一致するのである。図8は、標準の光D65とAの下で三刺激値を求めるために、筆者らのシステムで生成した照明光($I_x(\lambda), I_y(\lambda), I_z(\lambda)$)を示す。破線が目標スペクトルで、実線は生成した照明光を実測した結果である。筆者らのシステムでは、現在約50 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ の分解能、約200 fpsの速度での測色が可能である。

図8 三刺激値を求めるために生成した照明光スペクトル

5. むすび

アクティブスペクトルイメージングの基本的技法と幾つかの応用技術について述べた。光源としてプログラマブル光源を用いれば、任意の分光エネルギー分布を高速に生成することができるので、これと高速カメラを同期させることによって、有用なアクティブスペクトルイメージング系を構築することができる。本稿では、筆者らの提案したアクティブスペクトルイメージング系の基本原理と幾つかの応用技術を述べた。今後、輝度の高い光源の開発とともに、このようなアクティブスペクトルイメージング技術はさまざまな分野で新たな応用が展開することが期待される。

(2014年1月12日受付)

〔文 献〕

- 1) S. Tominaga and N. Tanaka: "Spectral image acquisition, analysis and rendering for art paintings", J. Electronic Imaging, 17, 4, pp.043022.1-13 (2008)
- 2) F. Xiao, J.M. DiCarlo, P.B. Catrysse and B.A. Wandell: "Image analysis using modulated light sources", Proc. SPIE, 4306, pp.22-30. (2001)
- 3) J.-I. Park, M.-H. Lee, M.D. Grossberg and S.K. Nayar: "Multispectral imaging using multiplexed illumination", Proc. IEEE Int. Conf. On Computer Vision, pp.1-8 (2007)
- 4) J.M. DiCarlo, F. Xiao and B.A. Wandell: "Illuminating illumination: "Proc. 9th Color Imaging Conf., pp.27-34 (2001)
- 5) C. Chi, H. Yoo and M. Ben-Ezra: "Multi-spectral imaging by optimized wide band illumination", Int.J. Computer Visions, 86, pp.140-151 (2010)
- 6) S. Han, I. Sato, T. Okabe and Y. Sato: "Fast spectral reflectance-recovery using DLP projector", Proc. IEEE Asian Conf. On Computer Vision, pp.323-335 (2010)
- 7) S. Tominaga and T. Horiuchi: "Spectral imaging by synchronizing capture and illumination", J Optical Society of America A, 29, 9, pp.1764-1775 (2012)
- 8) A. Fong, B. Bronson and E. Wachman: "Advanced photonic tools for hyperspectral imaging in the life sciences", SPIE Newsroom (2008)

とみなが しやうじ
富永 昌治 1970年、大阪大学基礎工学部電気工学科卒業。1975年、同大学院大学院博士課程修了。1976年、大阪電気通信大学講師。1986年～2006年、同教授。2006年より、千葉大学工学部教授。同大学院融合科学研究科教授、研究科長を経て、現在、同特任研究員。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。工学博士。IEEE Life Fellow。正会員。