

特別－3. マルチスペクトラルイメージングの挑戦

千葉大学フロンティアメディカル工学研究開発センター

羽石 秀昭

1. はじめに

近年、デジタル映像の、遠隔医療、電子商取引、電子美術館等への利用が期待されている。それらの利用においては、利用者は被写体の色をありのままに正確に観察したい、という場合が多い。しかし従来の映像システムでは、利用者にとって好ましい色を再現することに主眼が置かれていたため、再現された被写体は色の正確性の点で十分でない。印刷など特定の分野では、RGBの3原色を基本にしたカラーマネジメント技術も開発されているが、3原色という制限から、要求される色再現が達成されていない場合も多い。

上記の問題に対するブレイクスルーは、3原色にとらわれず、必要に応じて多原色を基本にして、スペクトルをベースにしたシステムを構築していくことである。実際、入力では取得するバンド数を増やして、また出力では表示する原色数を増やして、正確なあるいは高彩度な色再現を可能にしようとする研究開発が活発化している[1-11]。

しかしながら、多くの研究は個別の問題に対する研究にとどまっている。これに対し、総務省下のプロジェクトとして、スペクトルの情報に基づいた映像の入力、伝送、保存・分析、表示を行うシステムの研究開発が行われてきた。本稿では、ナチュラルビジョンと呼ばれるこのプロジェクトの研究開発内容の一部を紹介しながら、マルチスペクトラルイメージングの挑戦を述べる[12]。

2. ナチュラルビジョンの目標

ナチュラルビジョンプロジェクトは忠実な色再現を実現する映像システムの研究開発を目標として、1999～2005年度の期間、通信・放送機構の直轄研究、さらに独立行政法人情報通信研究機構の拠点研究として実施された。筆者もこのプロジェクトに携わってきた。

ナチュラルビジョンの基本的なコンセプトは、被写体の色の情報を物理量（分光反射率や分光放射輝度など）あるいは心理物理量（測色値）として正確に「計測」し、それに基づいて、被写体の忠実な色再現を実現することにある。具体的には以下のような映像の再現を目標としている。

(a) ありのままの世界を画像によって再現する

撮影時の測色値を正確に記録し、それを、たとえばプロジェクタによってスクリーン上に再現する。あるいは撮影時の分光エネルギー分布の近似値を多原色ディスプレイによって再現する。

(b) 実物が目の前にあるかのように再現する
被写体の撮影時と観察時で照明光が異なる場合、従来のRGB系では正確な色再現が困難であった。被写体の分光反射率分布を画像として取得し、観察時の照明分光エネルギー分布を掛けて分光放射輝度を計算機内で求め、その色を表示することで、観察時照明光下での画像再現が可能になる。なお、この処理のことを、以下では照明変換と呼ぶことにする。

S-3. Challenge of multispectral imaging

Hideaki HANEISHI

Chiba University, 1-33, Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba

Keywords: spectral-based color reproduction, multispectral imaging, multi-primary display

その他に、

- (c) 色を劣化なく長期間保存する
- (d) 色を精密に計測し活用する
- (e) 鮮やかな色を使った映像表現を可能にする

なども、目標として掲げており、これらは、デジタルアーカイブや医療、CG等への応用を想定している。

入力では、マルチスペクトルカメラ等を用いて画像取得を行う。取得した画像には、入力機器の特性や撮影時照明光のスペクトル等を付帯して記録する。保存や伝送においては、画像情報と付帯情報をセットで扱う。出力においては、3原色または多原色の表示装置に対し、その特性や画像再現時に想定する照明光のスペクトル等の情報をもとに測色値または分光放射輝度の画像を求め、画像を再現する。

本システムでは映像入力の原色数（バンド数）と表示の原色数は独立であり、入出力とも任意の原色数の機器を用いることができる。なお、3原色の映像機器も機能や精度の点で制約はあるが、その特性を正確にモデル化することによって利用可能である。

3. ナチュラルビジョンの色再現技術

ナチュラルビジョンシステムの要素技術となる、入力、伝送、保存・分析、表示の研究開発のうち、特に入力、表示技術に関する研究開発について紹介する。

3.1 マルチスペクトル画像入力

スペクトルベース色再現の入力部では、可能な限り高精度のスペクトル推定が求められる。一方、現実的な画像入力のためには、入力のバンド数は制約を受けることになる。ここでは、スペクトル推定の精度および、開発したマルチバンドカメラを紹介する。

スペクトル推定

入力部分では、カメラ信号から被写体の分光放射輝度あるいは分光反射率を推定する必要がある。しかし、光量や撮影時間の制約から、少ないバンド数で画像を取得し、そこからスペクトル画像を推定したい。実は、自然界に存在する反射物の分光反射率は一般になめらかな形状をしていることが多く[13, 14]、その知見を利用して少ないバンド数から高精度に分光推定を行うことが可能である。

撮影に必要なバンド数は、被写体の特性、色再現精度の要求レベルなどに依存して決まるものであり、一般論として特定の数字を挙げることは難しい。ここでは、自然反射物体を被写体とし、その統計情報を用いて分光推定した場合の、バンド数とCIELAB色差との関係をシミュレーションで調べた結果を示す。図1は横軸にバンド数を、縦軸に色差（平均色差および最大色差）をとって、その関係を見たものである。バンド数を3を超えて増やしていくことによって色差は現象していく。この結果によれば、バンド数が6以上なら平均色差が1以下となり、まだバンド数が10以上なら最大色差が2以下となる。知覚限界のCIELAB色差が2～3と言われており、少なくとも、そのような限界以上の色再現精度が得られるかがひとつの判断基準となる。

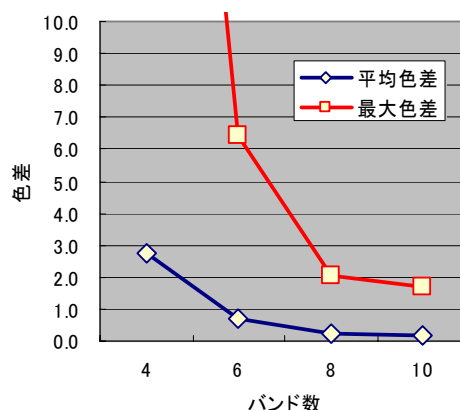


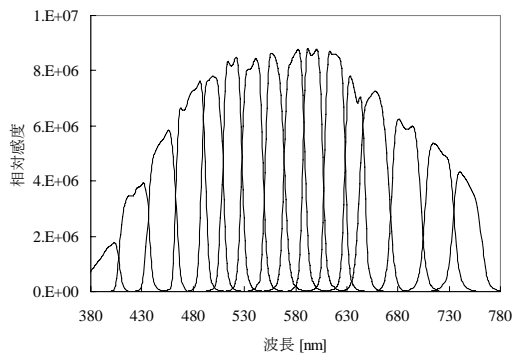
図1 自然反射物体を対象としたときの撮影バンド数と色差の関係

16 バンドカメラ

図 2 (a)はカメラの概観を示している。回転する円盤に狭帯域の干渉フィルタを取り付け、この円盤を回転させながらモノクロの CCD エリアセンサで画像を取得する。このカメラの、オーバーオール分光感度特性を図 2 (b) に示す。



(a)カメラの概観 (右下はフィルタ部分)



(b) 各バンドの分光感度特性

図 2 回転フィルタ式 16 バンドカメラ

6 バンドHDTVカメラ [15]

図 3 に、動画用 6 バンドカメラの外観、分光感度特性を示す。このカメラでは、2 台の 3 バンド HDTV カメラと特殊な干渉フィルタを用いている。被写体からの光はハーフミラーで 2 方向に分割され、その各光路に挿入された特殊な色フィルタを透過後に、3 バンドセンサに入射する。これによって 3 バンドカメラの RGB センサと各色フィルタの分光特性の積により 6 バンドの分光感度が得られる。

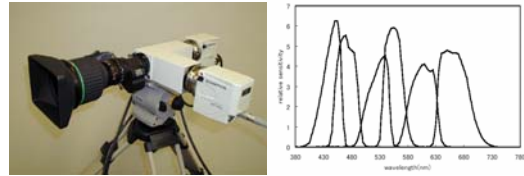


図 3 6 バンド動画カメラ (a)カメラの概観 (b) 各バンドの分光感度特性

各カメラの色再現性

カメラの色再現性として、マクベスカラーチェッカー 24 色を用い、撮影時の照明光下での三刺激値での誤差を CIELAB 空間の色差により評価してみた。結果を表 1 に示す。16 バンド静止画カメラでは、平均色差 0.5、最大色差 0.8 となり、非常に高い色推定精度を実現できることが確認できた。なお、この誤差は、画像中央部での評価であるが、空間的均一性の結果においても、中心とそれ以外の位置での色差の最大が 1.5 以下に抑えられている。一方、6 B カメラでも平均 1.4、最大 4.2 と、ほぼ知覚限界以下に抑制できることが示されている。

表 1 マルチスペクトルカメラの色再現精度

	平均	最大
16 バンド静止画カメラ	0.5	0.8
6 バンド動画カメラ	1.4	4.2

3.2 多原色ディスプレイ

本プロジェクトでは、表示装置の原色数を増やし、色域が広く色再現精度の高いディスプレイを開発した [16]。ここでは投影型ディスプレイシステムとその色再現性能について述べる。

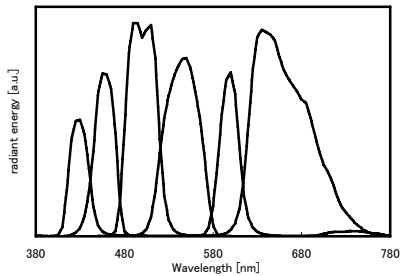
6 原色ディスプレイ装置

図 4(a)は プロジェクトで開発された 6 原色フロント投影型 DLP ディスプレイシステムである [17]。DLP プロジェクタを 2 台使い、それぞれ色分解プリズムを改造して、上記と同様に異なる 3 原色を生成するようにし、スタック方式でスクリーン上に投影像を重ね合

わせることで6原色表示を行う。図4(b)にこのプロジェクトの各原色の分光特性を示す。



(a) DLP プロジェクタ



(b) DLP プロジェクタの原色の分光特性

図4 多原色ディスプレイシステム

色再現性の評価

①目標色に対する再現精度

6原色DLPプロジェクトの色再現精度の評価を行った。210色の目標色をLAB値で設定し、それに対して実際に表示された色の測色値との色差を調べた。ただし、目標色がディスプレイに色域に入らない一部の目標色については、色差の計算から除外した。その結果色差は平均1.2、最大で2.5となった。画面の周辺部での色再現精度は若干劣るものの、概ね良好な色再現性が達成されている。

②色域特性

多原色化によって色域が拡大する様子を示す。図5は、6原色DLPディスプレイ、3原色DLPディスプレイと、自然反射物体の色域を、 $L^*=50$ の等明度面と $H=315^\circ$ の等色相面で比較した結果である。6原色表示により、色域が拡大しているのがわかる。色域の体積を計算したところ、3原色DLPに対して6原色DLPは体積比約1.8倍となり、自然反射物体の色域をほぼカバーしている。

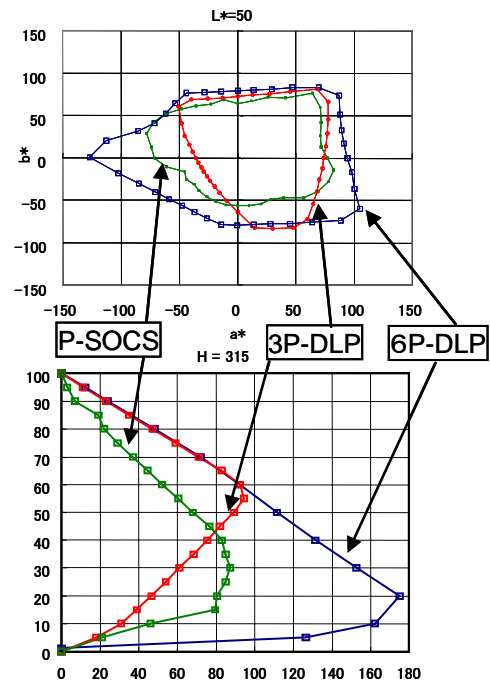


図5 6原色DLP(6P-DLP)、3原色DLPディスプレイ(3P-DLP)と、自然反射物体の色域(P-SOCS)の等明度スライス面(上)、等色相スライス面(下)での表示

4. 応用研究

筆者らは、千葉大において、マルチバンド画像を用いた岩絵の具絵画のデジタルアーカイブおよび解析に関する研究を行っている[18, 19]。この研究では、マルチスペクトルカメラを用いた画像収集を行い、さらにその撮影画像より、絵画内で同種の顔料を用いて描かれている領域を分類・抽出することを目的としたセグメンテーション方法を開発している。結果として、従来の3バンド収集に比べて分類精度が向上するなど、良好な結果が得られている。図6は、仏画中の一部の色に注目し、類似色のセグメンテーションを行った例である。ここでは矢印で示す花部分を対象にしている。RGBでは誤抽出が発生しているのに対し、16バンド画像を用いた場合は、正確にセグメンテーションが行えている。このことは抽出部分の分光反射率の分布からも確認できる。

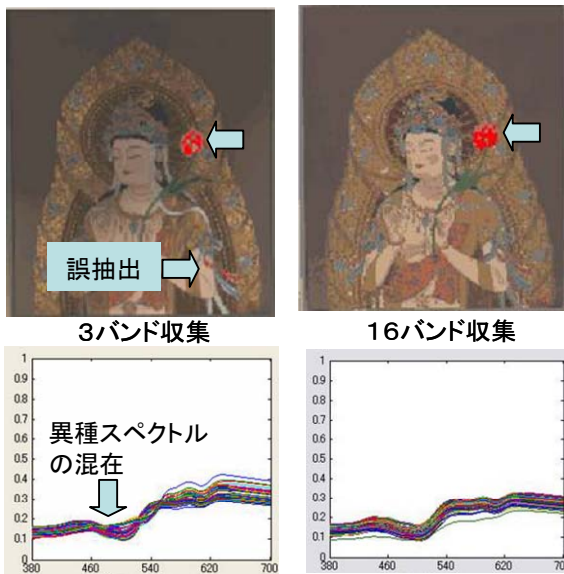


図6 岩絵の具仏画のセグメンテーション。
左：3バンド収集， 右：16バンド収集。

5. 最近の研究開発動向

ナチュラルビジョンプロジェクトからの多数の研究成果は、他の研究者・技術者あるいは今後の研究開発に有用な知見を与えるものと考え、本格的な実用化までを目標とするならば、まだ研究開発は道半ばと言わざるを得ない。このような経緯から（独）情報通信研究機構の委託研究として「マルチスペクトル映像収集・伝送技術に関する研究開発」が2006年9月より開始され、受託者であるNTTデータ、オリンパス、東工大、千葉大が、普及に向けたシステムのコンパクト化を第一義として取り組んでいる。

分光画像の実利用のために必要な作業のひとつは標準化である。CIE TC8-07にて議論されている分光画像の標準化に関しては、研究用途のデータ交換を期待する研究者と商用化をイメージする企業関係者とは、思惑が一致しないこともあり進展が見られていない。国内からはナチュラルビジョンプロジェクトのメンバーが中心となり標準化に向けた活動を継続している。標準化関連では、<http://www.multispectral.org/> にデータ

ベースなどが公開されている。

一方、企業からも、マルチバンドカメラ、多原色ディスプレイの開発や商品化の動きが現れている。たとえば入力では、ソニーがいち早く2003年にRGBに“エメラルド”バンドを加えた4バンドデジカメを発売している。最近では、オリンパスが歯科分野で、7バンドLED光源を採用し高精度な測色が可能なカメラを製品化している。またオリンパス韓国では、ネットショッピングの画像を6バンド収集し実用的に利用している。一方出力では、三菱電機が6原色LEDバックライトを用いた広色域ディスプレイを開発し、また6原色のDLPリアプロジェクションディスプレイを北米で発売している。

6. おわりに

スペクトルに基づいた色再現システムの研究開発プロジェクトを紹介した。「入力バンド数を増やす、スペクトル推定を行う、原色数を増やして再現する」というコンセプトは、意義は理解しても、その実現にはハードルが高く、なおチャレンジングである。しかし、多くの分野で、この付加価値が役に立つことは間違いない。ぜひ、システムがコンパクト・簡便・廉価なものになり、普及することを願っている。

謝辞

本稿で紹介した内容のほとんどは情報通信研究機構・赤坂ナチュラルビジョンリサーチセンターの연구원および特別연구원によって行われたものである。また岩絵の具画像のセグメンテーションに関しては、千葉大学大学院河野宏志君（現NTTデータ）が中心的に研究を進めた。プロジェクト関係者および研究室の関係各位に謝意を表す。

参考文献

1. F. H. Imai and R. S. Berns: "High-resolution multispectral image archives: a hybrid approach," Proc. Sixth Color Imaging Conference (Scottsdale, AZ, 1998) pp. 224-227.
2. P. D. Burns and R. S. Berns: "Analysis of multispectral image capture," Proc. 4th Color Imaging Conference (1996) pp. 19-22.
3. H. Maitre, F. Schmitt, J. Crettez, Y. Wu, and Y. Hardeberg: "Spectrophotometric image analysis of fine art paintings," Proc. 4th Color Imaging Conference (Scottsdale, AZ, 1996) Scottsdale, pp. 50-53.
4. D. Saunders and J. Cupitt: "Image processing at the National Gallery: The VASARI project," National Gallery Technical Bulletin, 14, (1993) 72-85.
5. 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.
6. F. Konig: "Reconstruction of natural spectra from color sensor using nonlinear estimation methods," IS&T's 50th Annual Conference (Boston, MA, 1997) pp. 454-458.
7. Y. Murakami, T. Obi, M. Yamaguchi, N. Ohya and Y. Komiya: "Spectral reflectance estimation from multi-band image using color chart," Optics Communications, 188 (2001) 47-54.
8. 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, 27 (1998) 384-391.
9. 横山康明, 長谷川隆行, 津村徳道, 羽石秀昭, 三宅洋一: "絵画の記録・再現を目的とした高精細カラーマネージメントシステムに関する研究 (第一報) -画像入力システムの設計-, " 日本写真学会誌, 60 (1998) 343-355.
10. H. Haneishi, T. Hasegawa, A. Hosoi, Y. Yokoyama, N. Tsumura, and Y. Miyake: "System design for accurately estimating spectral reflectance of art paintings," Applied Optics, 39 (2000) 6621-6632.
11. Y. Sato and K. Ikeuchi: "Reflectance analysis for 3D computer graphics model generation," Graph. Mod. and Im. Proc., 58 (1996) 437-451.
12. 平成 11 年度～平成 15 年度「ナチュラルビジョンの研究開発プロジェクト」成果報告書, 通信・放送機構 (2000-2004)
13. L. T. Maloney, "Evaluation of linear models of surface spectral reflectance with small number of parameters," J. Opt. Soc. Am. A, 10, 1673-1683 (1986)
14. J. P. S. Parkkinen, J. Hallikainen, and T. Jaaskelainen, "Characteristic spectra of Munsell color," J. Opt. Soc. Am, 6, 318-322 (1989)
15. K. Ohsawa, T. Ajito, H. Fukuda, Y. Komiya, H. Haneishi, M. Yamaguchi, and N. Ohya, "Six-band HDTV camera system for spectrum-based color reproduction," J. Imaging Science and Technology, Vol.48, No.2; 85-92 (2004)
16. Shinichi Komura, Ikuo Hiyama, and Nagaaki Ohya, "Four-Primary-Color LCD for Natural Vision," Information Display, 8/03 (2003) 18-21
17. H. Motomura, N. Ohya, M. Yamaguchi, H. Haneishi, K. Kanamori, S. Sannohe, "Development of Six-Primary HDTV display system," Proc. Int. Display Research Conference, 563-566 (2002. 7)
18. Hiroshi Kouno, Hideaki Haneishi, Masaru Tsuchida : Multispectral Image Acquisition of Paintings Drawn With Natural Mineral Pigments and Its Application, ICIS ' 06, pp.614-616, Rochester, New York, USA, (2006.5.7-11)
19. 河野宏志, 大谷亮介, 土田勝, 羽石秀昭: "天然鉱物顔料を用いた絵画のマルチスペクトル画像収集とセグメンテーション", カラーフォーラム JAPAN2006, 113-1116 (2006. 12)

羽石 秀昭

住所 〒263-8522 千葉県稲毛区弥生町 1-33

千葉大学フロンティアメディカル工学研究開発センター