

特集「色彩科学と情報技術の融合による文化財研究」

Special Issue: The fusion of color science and information technology for research on cultural properties

文化財の分光画像撮影とその応用

Spectral image capturing of cultural properties and its applications

土田 勝

Masaru Tsuchida

日本電信電話株式会社

NTT corporation

キーワード：色再現, 可視化, マルチスペクトル画像, ハイパースペクトル画像, デジタルアーカイブ

Keywords: color reproduction, visualization, multispectral image, hyperspectral image, digital archive

1. はじめに

文化財の画像計測の目的には、対象の形状、構造、色彩、素材、質感等の記録・分析などがある。本稿では色彩情報、分光情報の記録技術に関して述べていく。

世の中の大半の画像機器では色を赤 (Red)、緑 (Green)、青 (Blue) の3色で表現し、被写体の色彩情報を記録・処理・表示している (以降、この3色で色を記録するカメラをRGBカメラと呼ぶ)。しかし、通常のRGBカメラでは、カメラと人間の目の分光感度特性は一致していないため実物と画像を比較すると「色の見え」が一致しない場合が多い。この問題を解消するため各カメラメーカーは色信号処理などで様々な工夫を行っている。一方でカメラに取り付けるフィルタを工夫することで、人間の目の感度に近づける工夫も試みられてきた。これらの技術の発展により高いレベルでの「色の見え」の再現が実現されており、文化財のデジタルアーカイブでもRGBカメラが使用されている。

一方で「色の見え」は、対象を観察する照明環境に大きく依存している。具体的には、物体表面に入射する照明光の分光スペクトル (以下、照明光スペクトル) が「色の見え」に影響を与えている。照明光スペクトルの影響を受けない色に関する成分、すなわち正確な分光反射率 (波長毎の反射率の分布) を得ることができれば、任意の照明環境下での「色の見え」を高い精度で再現することが可能となる。文化財の画像撮影現場では使用可能な照明光源が限定されることも多く、観察に適した照明光下での色の見えが再現できることは非常に価値がある。さらに分光反射率は素材固有の物理特性であることから、対象物を構成する素材 (絵画の場合は使用されている絵の具の種類など) の特定や、劣化レベル等の状態が推定できる可能性がある。

この分光反射率の推定 / 計測を目的の一つとして開発が進められているのがマルチスペクトル / ハイパースペクトル画像技術である。1990年代にデジタルデー

タとしての分光画像計測^{1,2)}が始まり30年余り、まだ高価ではあるものの、技術者でなくても比較的容易にマルチスペクトル (マルチバンド) / ハイパースペクトル画像が撮影でき分析も可能な市販品が世の中に出始めている。ワンショットでのスナップ撮影のみならず動画撮影が可能なものもある。現状、大半のマルチスペクトル / ハイパースペクトル画像撮影方式に共通する課題の1つに、RGB画像の撮影と比較して大光量の照明が必要なことが挙げられる。強い照明光の照射は、文化財に与えるダメージのリスク管理の観点から好ましくないと考えられる場合が多い。加えて現状のマルチスペクトル / ハイパースペクトルカメラの画素数は、文化財の撮影に用いられるRGBカメラより一桁以上少ない。文化財の画像撮影においてマルチスペクトル / ハイパースペクトル画像の収集を普及させるためには、現行のRGBカメラを用いた画像撮影に準じた照明環境で、同等のスペックの画像が得られる必要がある。

筆者らの研究グループでは、RGBカメラにより得られる画像品質は担保しつつ、更に分光情報の取得が可能な2ショット型6バンド画像撮影方式³⁾を用いて文化財のデジタルアーカイブを進めてきた^{4,5)}。この方式では、カメラの赤外カットフィルタを取り外し、代わりに赤外透過フィルタ (可視光カットフィルタ) を取り付けることで、画角と画素数が可視光と同じ赤外画像を3ショット目で撮影することも可能である。

今回、堺市および堺アルフォンス・ミュシャ館 (堺市立文化館) の協力により、堺市が所蔵するアルフォンス・ミュシャ作品のコレクションの一部を3ショット7バンド撮影方式により1億画素以上の高精細画像として記録する機会を得たので報告する。その際に低解像度ではあるがハイパースペクトルカメラでの撮影も行った。堺市が所蔵するミュシャとその関連作家の作品約500点は、株式会社ドイの創業者、土居君雄氏 (1926-1990) が収集したもので、ポスターや油彩画、

素描や宝飾品など多彩な作品で構成されている。堺アルフォンス・ミュシャ館では、ミュシャの初期から晩年期にまでわたる作品が展示され、様々なテーマでその創作活動が紹介されている。

2.2 ショット型6バンド画像撮影方式

2.1. 原理

2ショット型6バンド画像撮影方式の概略を図1に示す。最初に通常のRGB画像を撮影する。次に楕型の分光透過特性を有す多層膜フィルタをレンズの前に取り付け2枚目の画像を撮影する。この多層膜フィルタにより、カメラの画像センサについているR, G, Bフィルタの、Bの長波長側、Gの短波長側、Rの長波長側の半分の波長帯域に相当する分光画像が記録される。これら特性が異なる2枚の3バンドを組み合わせることで、画像センサが感度を持つ波長領域を6分割した6バンドに相当する情報が得られたことになる。カメラの感度特性、撮影時の照明光スペクトル等を用いてWiener推定法に基づき分光反射率推定行列を生成し⁶⁾、6バンドの画素値と掛け合わせることで各画素に相当する被写体表面の1点に関する分光反射率が算出される。分光反射率に再現したい観察環境での照明光スペクトルを掛け合わせることで反射スペクトルが得られ、さらに等色関数、モニタ（もしくは使用する色空間）の各原色の測色値と入出力関数（ガンマ値やトーンカーブ）を用いることでRGB値へ変換される。

2.2. 撮影システム

照明光源には可視光波長域から赤外まで連続したスペクトルをもつ人工太陽灯照明 (SOLAX XC-100AF, SERIC) を使用した。赤外撮影も行うため、画像センサの前に取り付けられている赤外カットフィルタは外した。また作品への照明光直射を避けるため、撮影用アンブレラを取り付け、そこでの拡散光を照明光として使用した。図2に分光放射輝度計 (SR-2, TOPCON) で計測した照明光スペクトルを示す。

画像センサには約1億画素のデジタルカメラバック (IQ3 100MB Trichromatic, PhaseOne) の赤外カットフィルタ無しモデルを使用した。可視光の6バンド画像撮影時にはカメラレンズの前に赤外カットフィルタを取り付け、赤外画像撮影時には赤外カットフィルタの代わりに赤外透過フィルタ (IR-94, FUJIFILM) を取り付け、可視光をカットする。図3に赤外カットフィルタを付けた状態で、多層膜フィルタ有りとなしとの状態でのセンサの分光感度を示す。

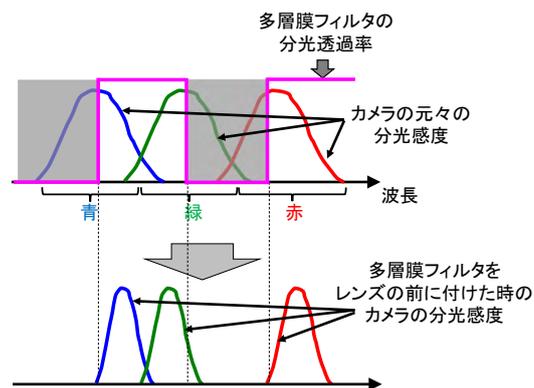


図1 2ショット型6バンド撮影の原理図

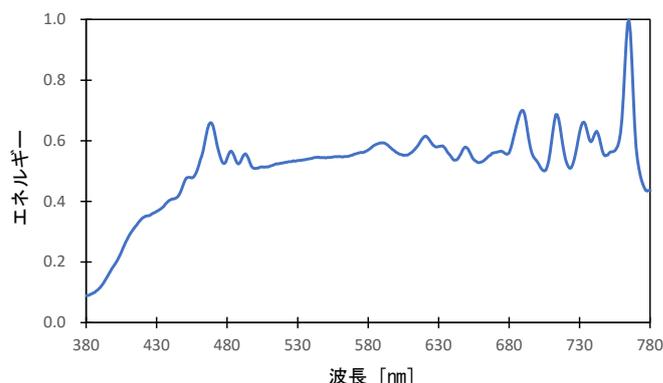


図2 撮影時の照明光スペクトル

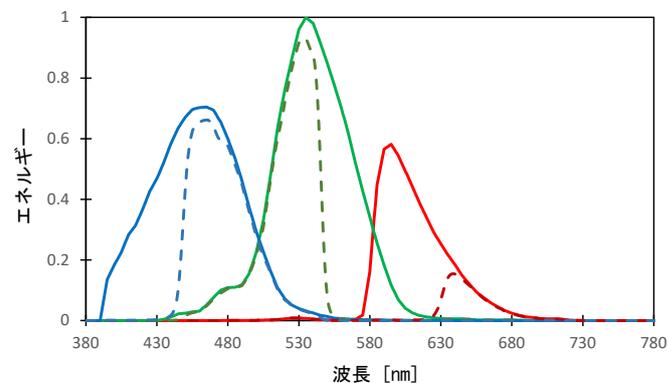


図3 カメラの分光感度
実線：フィルタ無し、破線：フィルタ有り

画像センサを取り付けるカメラには4×5サイズの大判カメラ (TOYO VIEW 45G II, SAKAI MACHINE TOOL) を使用した。フィルムの装着部にデジタルカメラバックを取り付け、カメラのシフト機構を使いデジタルカメラバックを上下左右に平行移動させ、フィルム面上に結像した被写体全体をいくつかの領域に分割して順次撮影した。分割撮影された各画像はパノラマ画像合成の要領で貼り合わせ処理が行われ、数億画素の高精細画像が生成される。

ハイパースペクトル画像の撮影では、作業スペースに余裕がないことを考慮し、PC接続なしでも撮影、画

像の確認が可能な (SPECIM IQ, SPECIM) を使用した。CMOS センサによるスキャナー方式のハイパースペクトルカメラで、出力される画像サイズは 512×512 pixel, 計測可能な波長範囲は 400 ~ 1,000 nm (半値幅: 7nm) でバンド数は 204 である。

3. 撮影結果

堺アルフォンス・ミュシャ館で展示されていた6作品の撮影を行った。作品名とサイズ、処理後の合成画像の画素数を以下に示す。各作品は壁に設置された状態のまま、通路や鑑賞スペースに撮影機材を設置した。今回は目標とする解像度は設定せず、機材の設置スペースと作業可能時間で大まかな画素数を決めた。

- 「椿姫」リトグラフ, 76×207cm (4,300×11,900pixel)
- 「ポエジー」油絵, 64×45cm (22,600×31,100pixel)
- 「瞑想」油絵, 89×140cm (22,100×15,000pixel)
- 「クオ・ヴァディス」油絵, 237×218cm (24,300×26,300pixel)
- 「ハーモニー」油絵, 145×448cm (48,300×15,500pixel)
- 「ウミロフ・ミラー」油絵, 270×340cm (41,000×32,000pixel)

なおハーモニーは非常に大きくかつ横長であり、作品正面の1か所からの撮影だけでは画像の解像度が下がってしまう。そのため撮影範囲を3分割し、カメラと照明を3回移動させて撮影を行い、最終的に1枚の画像に合成した。本実験では見た目には十分な色再現性が確認できたが紙面上での評価が難しいため、以下の節では、撮影した作品の中から特に赤外撮影の効果が分かり易い2作品の撮影結果を紹介する。

3.1. 可視光画像と赤外画像

赤外線は表面の絵具の層が薄い場合にはそれを通り抜け、その下にある下絵などを可視化することができる。図4は「ポエジー」の可視光画像と赤外画像の比較で、表層の絵具の下に肉眼で観察しているものとは異なる絵柄が存在していることが確認できる。

図5は「クオ・ヴァディス」の可視光画像と赤外画像の比較で、赤外画像の左上部に見られる黒い部分が修復箇所である。図6は一部を拡大したものだが、赤外画像を見ると、ほぼ等間隔で縦方向にはしる模様のようなものがある。これはかつて折り畳んだ状態で保管されていた事の痕跡と言われている。図7は赤外画像の別の箇所を拡大したもので、下書きの状態が良くわかる。手前の人物の顔は細かく書き込まれている一方で、奥の人物の輪郭線ははっきりしない。筆者が過去に撮影したミレーの「落ち穂拾い」(山梨県立美術館



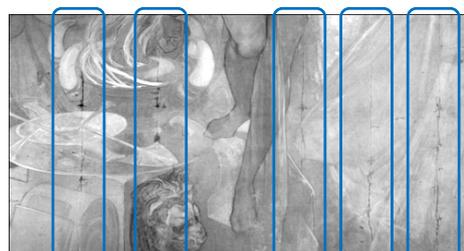
(a) 可視光画像 (b) 赤外画像

図4 可視光画像と赤外画像で絵柄が異なる例



(a) 可視光画像 (b) 赤外画像

図5 修復箇所の可視化



折り畳まれていた時にできた跡

図6 過去の保存状態を示す痕跡



図7 下絵(赤外画像)

所蔵)⁷⁾でも見られたが、同じ作品の中でも輪郭線を細かく描かれている箇所や、大まかな配置のみで抽象的に描かれている箇所が確認され、製作当時の作者のこだわりなどを知ることができる。

3.2. ハイパースペクトル画像

図4で示した「ポエジー」のハイパースペクトル画像(分光反射率画像)に対し、波長方向での主成分分析を行った。累積寄与率0.999に到達するのに76本の主成分を要したが、第5主成分以降は非常にピーキーな波形であった。図8に第1～第4主成分を示す。第1, 第2主成分は700nm以上の赤外波長域が可視光波長域より値が相対的に大きく、逆に第3, 第4主成分は可視光波長域の値が相対的に大きくなっている。この波形の意味は図9に示した各主成分画像と併せて比較するとよく分かる。なお第4主成分画像の左下部を見て、撮影機材(三脚とカメラ)が映りこんでいたことに気づいた。

4. おわりに

今回、アルフォンス・ミュシャの作品に対し高精細マルチバンド画像とハイパースペクトル画像の撮影を行った。分光スペクトルの解析に関しては既に様々な手法が提案されており、それらを適用し得られた結果と学芸員が持つ知見との照合が重要である。

謝辞

作品の撮影および画像の使用を許可して頂いた堺市および堺アルフォンス・ミュシャ館には感謝いたします。

参考文献

- 1) P. D. Burns and R. S. Berns, "Analysis of multispectral image capture," in Proc. 4th Color Imaging Conf. (CIC4), Scottsdale, Arizona, pp. 19-22, 1996.
- 2) S. Tominaga, "Multichannel vision system for estimating surface and illuminant functions," J. Opt. Soc. Am. A 13 (11), 2163-2173, 1996.
- 3) M. Hashimoto, "Two-shot type 6-band still image capturing system using commercial digital camera and custom color filter," in Proc. Fourth European Conference on Colour in Graphics, Imaging, and Vision (CGIV), Terrassa, Barcelona, España, pp.538-541, 2008.
- 4) M. Tsuchida, K. Yano, and H. Tanaka,

"Development of a High-definition and Multispectral Image Capturing System for Digital archiving of Early Modern Tapestries of Kyoto Gion Festival," Proc. ICPR2010, pp.2828-2831, 2010.

- 5) M. Tsuchida, K. Yano, K. Hiramatsu, and K. Kashino, "Visualizing Lost Designs in Degraded Early Modern Tapestry using Infra-Red Image," CCIW2017, Springer LNCS vol. 10213, pp.144-149, 2017.
- 6) 村上百合, "分光反射率の推定理論", 日本写真学会誌, 65巻4号, pp.234-239, 2002.
- 7) <http://www.kecl.ntt.co.jp/people/tsuchida.masaru/images/millet/index.html>

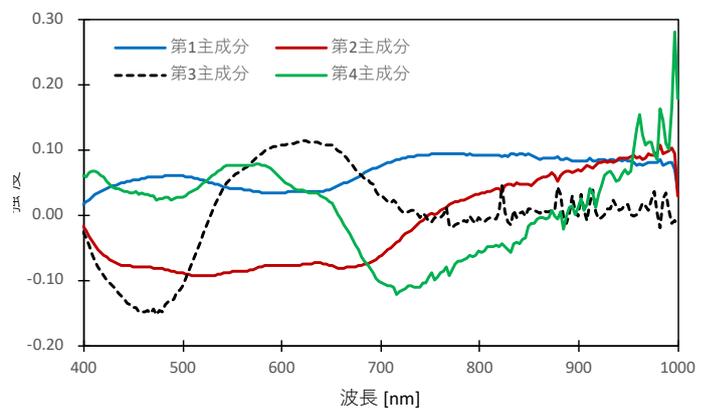


図8 「ポエジー」の主成分

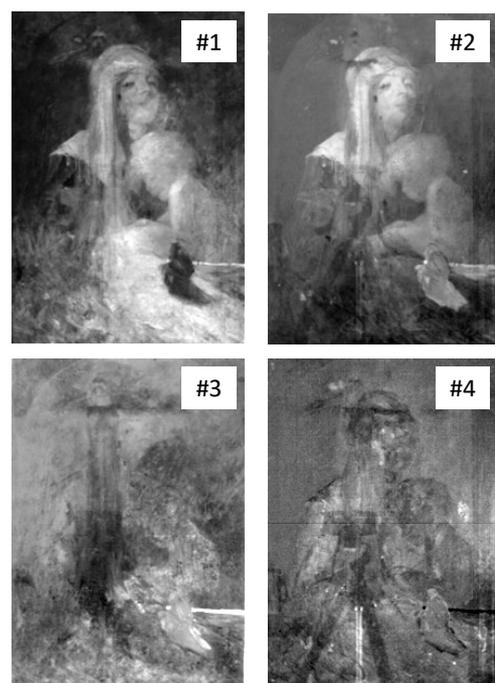


図9 「ポエジー」の主成分画像