

## デジタル展示に向けた写真プリント画像生成に関する検討

楊 雨晨<sup>\*1</sup> 田村 徹<sup>\*2</sup> 東 吉彦<sup>\*3</sup>

## A Study on Photographic Print Image Generation for Digital Exhibition

Yuchen YANG<sup>\*1</sup> Tohru TAMURA<sup>\*2</sup> Yoshihiko AZUMA<sup>\*3</sup>

There are over 10,000 valuable photographic print works created by famous photographers in the SHADAI gallery of Tokyo Polytechnic University. Some works are open to the public, however, many works can not be open because the space of the exhibition hall is limited. Therefore, digital exhibition are expected to provide a new means of displaying the works. It is required in digital exhibition that the digital images should have accurate color reproduction. We report a generation method of the digital photographic print image that considers both the observation lighting environment and the monitor characteristic.

## 1. まえがき

東京工芸大学は、1923年に「写真技術と写真表現」の教育のために創立された小西写真専門学校をその前身として、これまでに多くの人材を育成してきた。1975年に創設された東京工芸大学写大ギャラリーは、国内外の優れた10000点余りの貴重な写真プリント作品を所蔵し、写真作品を展示・収集・研究する常設施設として重要な役割を担っている<sup>1)</sup>。これらの作品は年数回の企画展等で公開しているが、スペース的に展示可能な点数には限度がある。そこで、モニタを用いたデジタル展示が新たな公開手段として期待される。その際、本来の写真プリントが持つ色合いを忠実に再現することが重要である。しかし、デジタルカメラを用いて撮影されたデータによる一般的なデジタル展示では、写真プリントのカラー情報を正確に取得し、展示環境に応じて写真プリントの色合いを忠実に再現することはできない。

そこで、本研究ではハイパースペクトルカメラを用いて写真プリントの分光放射輝度を測定し、展示光および展示用モニタの色再現特性を考慮した再現画像の生成を行うこととした。本研究の成果は高い色再現性をもつデジタル展示を実現するための基礎的な手法を提供するとともに、文化財や芸術作品、歴史資料の高品質なデジタルアーカイブの基礎的な手法となることが期待できる。

## 2. デジタル展示

デジタル展示とは、写真プリントをデジタルカメラ等によって撮影し、その画像データを再現画像として

モニタ上に表示する。この時、写真プリントの色合いは、画像データの各画素の画素値RGBとして記録される。その際、画素値は撮影光とカメラの3原色、ホワイトバランスと階調特性に依存する。また、この画像データをモニタ上に表示すると、再現画像の色合いは

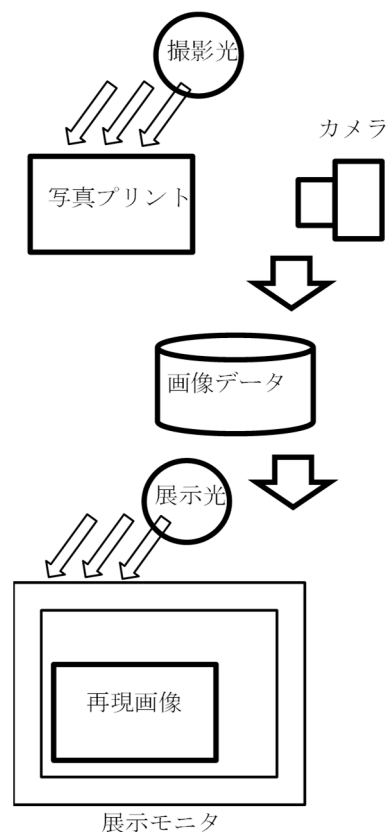


図1 デジタル展示

\*1 東京工芸大学工学部研究科メディア工学専攻 \*2 東京工芸大学工学部工学科 教授 \*3 東京工芸大学工学部工学科 准教授  
2019年9月24日 受理

モニタの3原色とホワイトバランス、階調特性に依存することになる(図1)。

デジタル展示に求められる重要な要件の一つは、展示光のもとで、写真プリントの色合いと再現画像の色合いが一致することである<sup>2)</sup>。

理想的な色再現とは、写真プリントと再現画像の分光特性が完全に一致することである。しかし、モニタの色再現は3原色による加法混色によって実現されており、写真プリントの分光特性を忠実に再現することは不可能である。そこで、一般的には「ある条件下」で写真プリントと再現画像の三刺激値(XYZ)と、場合によっては輝度が一致する条件等色をもって色再現を行う。三刺激値が一致する場合を測色的色再現、三刺激値と輝度が一致する場合を正確な色再現と呼ぶ<sup>3)</sup>。

本研究では、ある展示光の下で写真プリントと再現画像の三刺激値(XYZ)が一致する測色的色再現を達成することを目標とする(図2)。

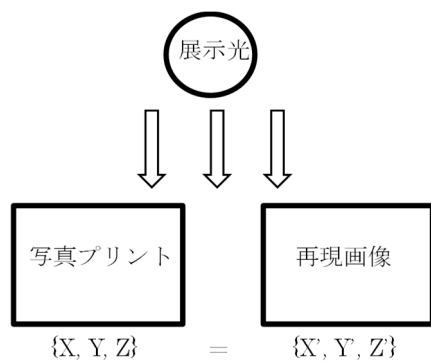


図2 測色的色再現

図2に示すように、写真プリントを撮影した画像データをモニタ上に表示した再現画像と展示光の下に置かれた写真プリントの間で測色的色再現を実現するためには、撮影光と展示光を同じ分光特性をもつ光とする必要がある。その上で、撮影用カメラと展示用モニタの3原色とホワイトバランスや階調特性を考慮した変換をおこなうことが一般的である<sup>4)</sup>。この際に用いられる標準規格として、ITU-R BT.709-6<sup>5)</sup>やsRGB、AdobeRGBといった標準色空間などがある。

しかし、実際のデジタル展示では、展示場所や展示作品によって会場の照明が変化するため展示光と、あらかじめ写真プリントを撮影する撮影光を等しくするためには、展示会場に合わせて写真プリントを撮影し直す必要がある。また、デジタル展示に使用するモニタの特性も実際の展示ごとに異なるため、その都度、再現画像データの変換を行う必要がある。仮に、1つの決まった撮影光の下で写真プリントを撮影したデータから、展示会場の様々な照明環境とモニタ特性にあわせた画像データを作成することができれば、デジタル展示用画像データの作成にかかる手間を大きく削減

することができる。

そこで、本研究では分光測光ができるハイパースペクトルカメラを用いて写真プリントの分光撮影を行い、この分光データから様々な展示環境に対応し、かつ測色的色再現を実現する再現画像データを作成する。

### 3. ハイパースペクトルカメラ

ハイパースペクトルカメラとは、画像の各画素を分光測光することができるカメラである。通常のデジタルカメラで撮影した場合は、RGBの3バンドのデータ構造となるが(図3上)、ハイパースペクトルカメラで撮影したデータは波長方向に多数のバンドを持ち(x, y, band)といった3次元のデータ構造となる(図3下)。

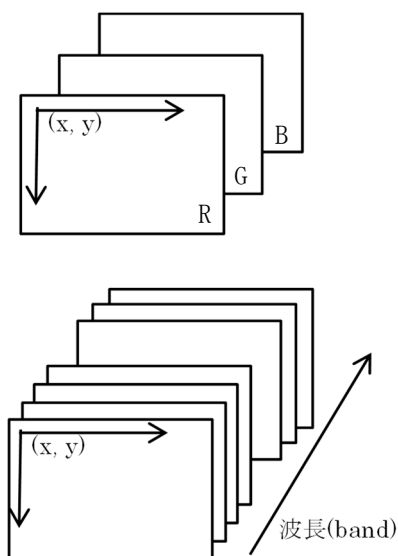


図3 デジタルカメラ(上)とハイパースペクトルカメラ(下)のデータ構造

### 4. 画像データの作成方法

ここでは、デジタル展示用画像データの作成方法について述べる。

#### 4.1 ハイパースペクトルデータの測定

ハイパースペクトルカメラで写真プリントを撮影する際には、カメラを固定してサンプルを移動しながら撮影する場合と、サンプルを固定してカメラを移動しながら撮影する方法がある。本研究では、写真プリントを固定して、カメラを移動させて撮影する方法とした。本研究で使用したハイパースペクトルカメラは北海道衛星社のHSC1804-CL2である。

写真プリントとして、日本画像学会テストチャートNo.5-1<sup>6)</sup>、基準となる白色板として日本色彩研究所の測定値付き色票B2サイズを撮影した。撮影時の解像度は、1920pixels(H)×1080pixels(V)とし、350nm~1050nmまで5nmごとに141バンドを各10ビットにて撮影した。

撮影に使用した撮影光は、京セラ アクアリウム LED Natural White(CSL-S50B0000)で、太陽光を近似的に再現した光源である。

4.2 写真プリントの三刺激値

本研究では、デジタル展示された再現画像と写真プリントとの間で三刺激値が一致する測色的色再現を目指している。ここでは、ある展示光を仮定した時の写真プリントがもつ三刺激値の計算方法について述べる。

三刺激値 XYZ は写真プリントの分光反射率、展示光の分光放射輝度、等色関数から式(1)によって求めることができる。

$$\begin{aligned}
 X &= \int S_{\lambda} R_{\lambda} \bar{x}_{\lambda} d\lambda \\
 Y &= \int S_{\lambda} R_{\lambda} \bar{y}_{\lambda} d\lambda \dots\dots\dots (1) \\
 Z &= \int S_{\lambda} R_{\lambda} \bar{z}_{\lambda} d\lambda
 \end{aligned}$$

X, Y, Z: 三刺激値、 $\bar{x}_{\lambda}, \bar{y}_{\lambda}, \bar{z}_{\lambda}$ : 等色関数

$S_{\lambda}$ : 展示光の分光放射輝度

$R_{\lambda}$ : 写真プリントの分光反射率

ここで、各記号の添え字  $\lambda$  は波長を表す。写真プリントの反射率  $R_{\lambda}$  は写真プリントを撮影したデータ  $I_{Photo}$  を白色板を撮影したデータ  $I_{White}$  と白色板の分光反射率  $R_{White}$  から式(2)によって求めた。

$$R_{\lambda} = R_{White} * I_{Photo} / I_{White} \dots\dots\dots (2)$$

展示光の分光放射輝度  $S_{\lambda}$  は、標準の光 A (色温度 2856K) と D65 (色温度 6504K) の2つを仮定した<sup>7)</sup>。

4.3 再現画像の三刺激値

展示モニタ上に表示される再現画像の三刺激値は展示に使用するモニタの色再現特性、すなわち、3原色、ホワイトバランス、階調特性に依存する。再現画像の三刺激値が 4.2 で述べた写真プリントの三刺激値と一致するようにモニタ特性をもとに画像データを作成する必要がある。本研究では、展示用モニタとして、sRGB と AdobeRGB モニタを仮定した。

4.3.1 sRGB モニタ

パソコン用モニタの標準規格として国際電気標準会議 (International Electrotechnical Commission : IEC) が定めたもので、表1に3原色と白色の色度点、階調特性 (ガンマ特性) を示す<sup>8)</sup>。

4.3.2 AdobeRGB モニタ

AdobeRGB モニタは Adobe Systems 社が制定した色空間

をサポートするモニタである。AdobeRGB モニタは sRGB モニタより広い色再現域をもち、DTP の分野で標準モニタとして用いられている。AdobeRGB モニタの3原色と白色の色度点、階調特性 (ガンマ特性) を表1に示す<sup>9)</sup>。

表1 sRGB と AdobeRGB の色再現特性

	sRGB	AdobeRGB
原色 R	(0.640, 0.330)	(0.640, 0.330)
G	(0.300, 0.600)	(0.210, 0.710)
B	(0.150, 0.060)	(0.150, 0.060)
白色点 W	(0.3127, 0.3290)	(0.3127, 0.3290)
ガンマ特性	2.2	2.2

4.3.3 XYZ/RGB 変換行列

3原色 RGB と白色点 W から三刺激値 XYZ への変換を規定する変換行列の求め方について述べる。

最大輝度における白色点と3原色の三刺激値との間には式(3)の関係がある。X、Y、Z は三刺激値で添え字 W は白色点、RGB はそれぞれ3原色を意味する。

$$\begin{aligned}
 X_W &= X_R + X_G + X_B \\
 Y_W &= Y_R + Y_G + Y_B \dots\dots\dots (3) \\
 Z_W &= Z_R + Z_G + Z_B
 \end{aligned}$$

白色点と3原色の色度座標 (x, y) を使って式(3)を書き直すと式(4)となる。

$$\begin{aligned}
 \frac{X_W}{Y_W} Y_W &= \frac{X_R}{Y_R} Y_R + \frac{X_G}{Y_G} Y_G + \frac{X_B}{Y_B} Y_B \\
 Y_W &= Y_R + Y_G + Y_B \dots\dots\dots (4) \\
 \frac{Z_W}{Y_W} Y_W &= \frac{Z_R}{Y_R} Y_R + \frac{Z_G}{Y_G} Y_G + \frac{Z_B}{Y_B} Y_B
 \end{aligned}$$

ただし、色度点の z 座標は、 $z=1-x-y$  である。ここで、3原色の最大輝度を r, g, b とし、 $r+g+b=1$ 、つまり白色点の最大輝度を1とすると、式(4)は行列を用いて以下のように書き直すことができる

$$\begin{bmatrix} \frac{X_R}{Y_R} & \frac{X_G}{Y_G} & \frac{X_B}{Y_B} \\ 1 & 1 & 1 \\ \frac{Z_R}{Y_R} & \frac{Z_G}{Y_G} & \frac{Z_B}{Y_B} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ g \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{X_W}{Y_W} \\ 1 \\ \frac{Z_W}{Y_W} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (5)$$

一方、3原色の信号強度を RGB ( $0 \leq RGB \leq 1$ ) とすると、任意の色の三刺激値 XYZ は式(6)となる

$$\begin{bmatrix} \frac{x_R}{y_R} r & \frac{x_G}{y_G} g & \frac{x_B}{y_B} b \\ r & g & b \\ \frac{z_R}{y_R} r & \frac{z_G}{y_G} g & \frac{z_B}{y_B} b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \dots\dots\dots (6)$$

以上より、式(5)を解いて rgb を求め、式(6)に代入することで、ある白色点と3原色を有するディスプレイの信号強度 RGB から三刺激値 XYZ に変換する変換行列を得ることができる。本研究では写真プリントの三刺激値 XYZ となるように再現画像のデジタル信号値 RGB を求めるため、式(6)の変換行列の逆行列を使用した (式(7))。

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x_R}{y_R} r & \frac{x_G}{y_G} g & \frac{x_B}{y_B} b \\ r & g & b \\ \frac{z_R}{y_R} r & \frac{z_G}{y_G} g & \frac{z_B}{y_B} b \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \dots\dots\dots (7)$$

4.3.3 ガンマ補正

式(7)によって求めた3原色の信号強度 RGB を再現画像の画素値 R'G'B'に変換するためにモニタの入出力関係(ガンマ特性)による補正を行う。本研究で展示用モニタとして想定した sRGB、AdobeRGB モニタはともにガンマ値が 2.2 と規定されている。そこで、RGB 値を R'G'B'に変換するためには、RGB 値を 1/2.2 乗することになる。しかし、この変換は、RGB 値が 0 に近い時の傾きが大きくなるため、画像の暗い部分のノイズを強調してしまう。そこで、本研究では、sRGB 規格をもとに式(8)のように補正することとした<sup>10)</sup>。式(8)では、RGB の値が小さい場合には、線形の補正をかけるようにしている。

RGB ≤ 0.0031308 の場合

$$\begin{aligned} R' &= 12.92 \times R \\ G' &= 12.92 \times G \\ B' &= 12.92 \times B \end{aligned}$$

RGB > 0.0031308 の場合

$$\begin{aligned} R' &= 1.055 \times R^{1/2.4} - 0.055 \\ G' &= 1.055 \times G^{1/2.4} - 0.055 \\ B' &= 1.055 \times B^{1/2.4} - 0.055 \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

5. デジタル展示用再現画像データ

再現画像の画素値を8ビットとしたため、R'G'B'に255を掛けて小数点以下を切り捨てた値を展示用の再現画像データとした。図4は上から展示照明と展示モニタの組み合わせが、それぞれ (D65, sRGB)、(D65, AdobeRGB)、(A, sRGB)、(A, AdobeRGB) の再現画像である。

標準の光 A (色温度 2856K) は D65 (色温度 6504K) に

比べ色温度が低く、D65 に比べ赤い光である。そのために、写真プリントの色は全体的に赤みを帯びることになり、図4に示した再現画像の上2枚(展示照明が D65)に比べ、下の2枚の再現画像(展示照明が A)は、画像全体が赤みを帯びる結果となる。AdobeRGB モニタは sRGB モニタに比べ3原色のうち G が高彩度となっている。このため、AdobeRGB モニタ用の再現画像の緑や黄の部分の彩度が sRGB モニタ用の再現画像に比べて低くなることになる。

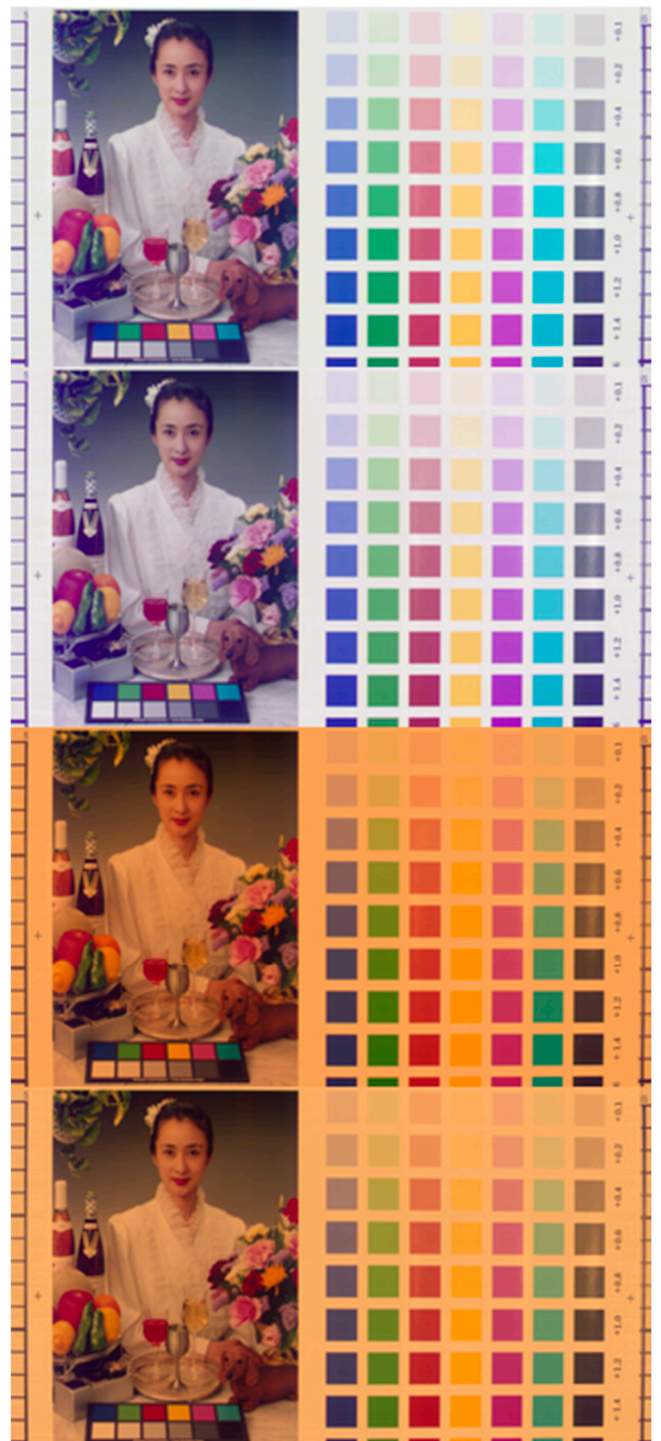


図4 再現画像。上から (D65, sRGB)、(D65, AdobeRGB)、(A, sRGB)、(A, AdobeRGB)



これは、図4の上から1枚目と2枚目を比較した時、画像右側の緑と黄のカラーパッチにおいて高彩度の部分を比較すると AdobeRGB モニタ用再現画像 (2 番目) は sRGB モニタ用再現画像 (一番上) に比べて彩度が低くなっていることで確認できる。同様に、図4の上から3枚目と4枚目の画像についても彩度の違いを確認することができる。

## 6. まとめと今後の課題

本研究では、高品質なデジタル展示に向けた再現画像データの作成方法について検討した。ハイパースペクトルカメラで写真プリントを撮影し、得られたハイパースペクトルデータをもとに、展示光源と展示モニタの特性を考慮することで、写真プリントと同じ三刺激値をもつ再現画像データを作成することができた。この手法を活用することで、展示光に合わせて写真プリントを撮影し直す必要をなくすることができる。また、展示光の分光特性と展示モニタの特性として3原色とホワイトバランス、およびガンマ特性を考慮することで展示環境における写真プリントと同じ3刺激値をもつ再現画像データを簡単に作成することができるようになる。

一方で、ハイパースペクトルデータには、撮影時のノイズが含まれ、写真プリントの反射率が1を超えると評価される場合があることがわかった。本報告では、反射率が1を超えた場合には、反射率を1とすることで対応した。しかし、現実には反射率が1を超えることはなく、測色的色再現めざす上で望ましくない。そこで、今後の課題としては、再現画像の画質を低下させることなく撮影時のノイズを軽減する方法を検討することがあげられる。

また、本研究では、標準の光と標準モニタを仮定して再現画像を作成した。今後は実際の展示光と展示モニタの特性を測定するなどして、写真プリントと再現画像との色合いの一致度を評価することを行う必要があると考えている。

## 謝辞

本研究は「平成28年度文部科学省私立大学研究ブランディング事業」の助成を受けたものです。

## 参考文献

- 1) “写大ギャラリーについて”. 東京工芸大学について. <http://www.shadai.t-kougei.ac.jp/about.html>, (参照2019年9月)
- 2) Yoshihiko Azuma, Tohru Tamura, Masao Inui, and Keiji Uchikawa, “Appearance Reproduction of Photographic Prints by Display Monitor”, Proceedings of 1st International Symposium for Color Science and Art, pp.14-15, (2019)
- 3) 太田 登, “色再現工学の基礎、第5章色再現の原理”, コロナ社, (1997)
- 4) 卜部 仁, “デジタルスチルカメラからプリンタまでの色

- 再現”, 日本印刷学会誌, Vol.38, No.2, pp.13-20, (2001)
- 5) ITU-R709-6, “Parameter values for the HDTV standards for production and international programme exchange.”, (2015)
- 6) 日本画像学会・技術委員会・画像評価技術部会, 日本画像学会テストチャート No. 5 2008 説明書, (2009)
- 7) 日本色彩学会, “色彩科学ハンドブック、付録1 測色用の標準の光および標準光源”, 東京大学出版会, (1991)
- 8) 谷口慶治、張 小忙, “デジタル色彩工学、3.6 マルチメディア・デフォルト色空間 sRGB”, 共立出版, (2012)
- 9) Adobe Systems, “Adobe® RGB (1998) color image encoding”, Ver2005-5, (2005)
- 10) 河村尚登、杉浦博明, “sRGB 色空間と国際標準化”, 画像電子学会誌, Vol.35, No.6, pp.935-943, (2006)