

デジタル展示に向けた高色再現画像生成用ハイパースペクトルデータの ノイズ処理条件の検討

田村 徹^{*1}

A study of noise processing conditions of hyperspectral data for generating high color reproduction images for digital exhibition

Tohru Tamura^{*1}

There are over 10,000 valuable photographic print works stored in the SHADAI gallery of Tokyo Polytechnic University. The number of artworks that can be displayed in the gallery at a time is a small part of the collection due to the limited space of the exhibition hall. Therefore, digital technology is expected to provide a new means of displaying the works. Our research aimed at generating digital images that faithfully reproduced the colors of photographic prints for digital exhibition. The study used hyperspectral data measured by a hyperspectral camera to reproduce the colors of photographic prints. However, the data measured by the hyperspectral camera was found to have noise on it. As a result, the estimated reflectance of the photographic prints image showed erroneous values. In this report, I discuss appropriate noise processing conditions with respect to three points: 1) reduction rate of erroneous reflectance, 2) shape of hyperspectral signal after noise processing, and 3) hue distribution of the generated image.

1. はじめに

東京工芸大学は、「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、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10,000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写真プリントの保存、公開等、重要な役割を担っている¹⁾。写大ギャラリーでは、年数回の企画展等で作品を公開しているが、展示会場の広さの関係で展示可能な点数には限度がある。そこで、写真プリントをデジタルデータ化し、モニタを用いたデジタル展示を行うことが公開手段として期待される。このようなデジタル展示では、一台のモニタ上で多数の作品を展示することができ、小規模な展示会場で多くの作品を鑑賞することが可能となる。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、展示環境や展示モニタの特性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難しい。

筆者は、写真プリントの色合いを忠実に再現するために、波長を5nmごとに分解して測定できるハイパースペクトルカメラによって測定したデータを、本論文では、ハイパースペクトルカメラによって測定した分光強度データをハイパースペクトルデータと呼ぶことにする、(以下、ハイパースペクトルデータ)、用いたデジタル展示用画像の

生成に取り組んできた²⁾³⁾。その過程で、ハイパースペクトルデータをもとに計算した写真プリントの反射率が、本来は0から1の間の値をとるべきところ、1を超える現象が見つかり、原因としてハイパースペクトルカメラの測定ノイズと考えた。

本論文では、ハイパースペクトルデータにノイズ処理を施すことで、本来あつてはならない反射率が1を超えるデータを大幅に削減することができたことを示す。また、デジタル展示に向けた高色再現画像を生成する過程におけるハイパースペクトルデータのノイズ処理条件について検討した結果について述べる。本研究の成果は、文化財や芸術作品、歴史資料の高品質なデジタル展示用画像生成の過程に組み込むことで、より完成度の高い生成過程の構築に寄与する。

2. ハイパースペクトルデータ

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つのプレーンからなるデータ構造となるが(図1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1下)。

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. 5-1⁴⁾、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。

^{*1} 東京工芸大学 工学部 工学科 教授
2024年9月19日 受理

撮影時の解像度は、1,920pixels(H)×1,080pixels(V)とし、350nm～1,050nm 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。

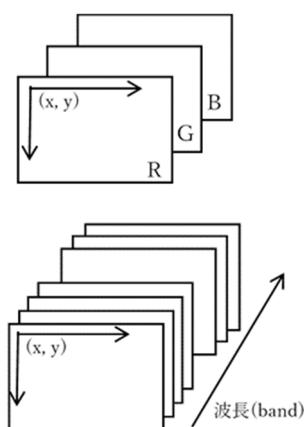


図1 デジタルカメラ（上）とハイパースペクトルカメラ（下）のデータ構造

3. ハイパースペクトルデータのノイズ

本研究では、写真プリントの色を忠実に再現したデジタル展示に向けた画像生成を行ってきた²³⁾。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）が一致する場合を測色的色再現と呼び⁵⁾、本研究では、写真プリントを観察する光源とデジタル画像を表示するモニタを仮定した。

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}_{λ} , \bar{y}_{λ} , \bar{z}_{λ} : 等色関数
 S_{λ} : 展示光の分光放射輝度
 R_{λ} : 写真プリントの分光反射率

式(1)から分かるように、三刺激値を求めるためには写真プリントの分光反射率を計算する必要がある。写真プリントの分光反射率 R_{λ} 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。

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

この写真プリントの分光反射率が 1 を超えるデータが見られ、ハイパースペクトルデータを測定した際のノイズに

起因すると考えた。図2に写真プリントの白色部分を測定したハイパースペクトルデータの例を示す。図2をみると、450nm 付近から 550nm 付近で測定強度に急激な変動が見られる。写真プリントのような反射物体の分光スペクトルを測定すると、波長に対する強度は滑らかに変化する。したがって、このような急激な強度変化はハイパースペクトルデータを測定した際に生じたノイズと考えられる。

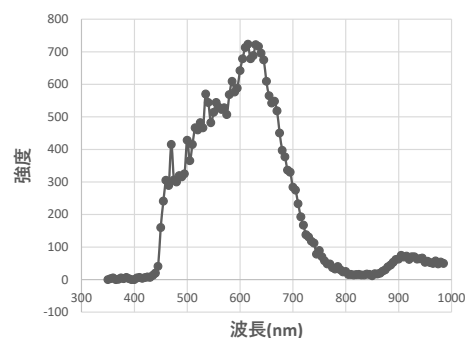


図2 ハイパースペクトルデータの例
横軸が波長、縦軸が強度

いわゆる可視光と呼ばれる 380nm から 750nm の範囲の外では三刺激値の計算に必要な等色関数がほぼゼロとなり、三刺激値を計算する際に影響しない。可視域に限ったデータ数は、1,980×1,080×75、つまり 160,380,000 である。このデータのうち反射率が 1 を超えるデータは、260,087 であり、割合にして 1.62%であった。

4. ノイズ処理の方法と条件

4.1 ノイズ除去のためのフィルタ処理

ノイズ処理の手法として、ハイパースペクトルデータに低域通過フィルタを適用した。高速フーリエ変換に使用したデータは 350nm から可視域を含む、985nm までの 128 とした。これを反射率をもとめるために必要となる、写真プリントおよび白色板を測定したハイパースペクトルデータに対して行った。カットオフの条件は、32、16、8、4 の 4 条件で実験を行った。

4.2 平均化処理

ハイパースペクトルデータを波長ごとに測定画素間で平均する平均化処理を行った。平均化処理は画像の解像度を下げることとなり、生成画像がぼけた画像となるため、写真プリントのハイパースペクトルデータの処理は行わず、白色板のデータのみ処理することとした。平均化処理は水平方向 3 画素×垂直方向 3 画素に対して平均化を行った。

5. ノイズ処理の結果と考察

5.1 ノイズ処理の条件と効果

ここでは、ノイズ処理の条件と反射率が 1 を超えるデータ数の関係について述べる。本研究の目的は、本来あって

はならない反射率が 1 を超えるデータをノイズ処理によって削減することであった。

図 3 に結果を示す。ノイズ処理をしない時の反射率が 1 を超えるデータ数を 1 として、それぞれの条件で処理を行った際の反射率が 1 を超えるデータ数の割合を示している。△が 3×3 の平均化処理を白色板のハイパースペクトルデータに施した際の結果で 0.85 となった。○は、白色板と写真プリントにフィルタ処理を行った結果である。横軸の COF はカットオフを表している。カットオフを 8 とした条件が最も反射率が 1 を超えるデータ数を削減することができ、処理しない時に比べて 0.29 となった。□は、白色板に平均化処理を行い、さらに、写真プリントと白色版のハイパースペクトルデータにフィルタ処理を行った条件の結果である。この条件でも、カットオフが 8 の条件が最も反射率が 1 を超えるデータ数を減らすことができ、0.32 となった。

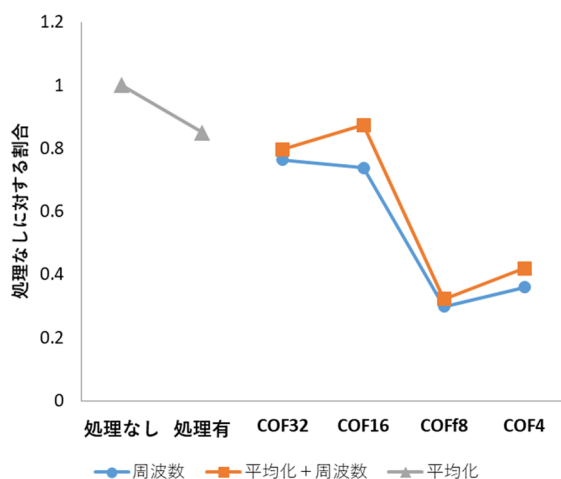


図 3 ノイズ処理条件と反射率が 1 を超えるデータ数
処理有：平均化ファイルのみ適用
COF：フィルタ処理におけるカットオフ

反射率が 1 を超えるデータ数を削減するといった目的に対しては、カットオフを 8 とした条件でフィルタ処理を行うことが望ましいことが分かった。また、平均化処理に関しては、フィルタ処理とともに行ったとしても、大きな効果は得られない結果となった。平均化処理にかかるコストを考えると、白色板のデータに平均化処理を行うことなく、フィルタ処理だけを行う条件が最適であると考えられる。

5.2 ハイパースペクトルデータの検討

ここでは、フィルタ処理を行った後のハイパースペクトルデータについて検討する。図 4 に写真プリントの白色部分のハイパースペクトルデータ（処理なし●）と、異なるカットオフに対するフィルタ処理の結果（実線）を示す。

図 4 をみると、いずれの COF においても、処理なしのハイパースペクトルデータを再現できており、フィルタ処理は正しく行われたことが確認できる。

カットオフの条件をみると、COF32 の場合、450nm から

550nm 付近でみられる、ハイパースペクトルデータの上下の変動（ノイズ成分）を取り切れておらず、その部分の処理後の結果が上下に変動している様子が見える。COF16 の条件では、COF32 の条件と比較すれば、450nm から 550nm 付近でみられる、上下の変動は小さくなっているが、まだ、上下の変動が残っている。COF8 の条件では、450nm から 550nm 付近で見られた上下の変動は見られず、処理なしのハイパースペクトルデータの形状を滑らかに再現している様子がわかる。最後に、COF4 の条件であるが、処理なしのハイパースペクトルデータがもつ上下の変動を除去し、滑らかに再現しているように見える。ただし、ハイパースペクトルデータの 650nm 付近のピーク部分が実際のデータより低くなっていることが分かった。

5.3 生成画像の確認

ここでは、ノイズ処理による生成画像への影響を明らかにするために、いくつかの条件でノイズ処理を行ったハイパースペクトルデータから画像生成を行った結果を示す。

ハイパースペクトル画像を生成するためには、式(1)に示すように、展示光の分光スペクトルを仮定する必要がある。本検討では、展示光の分光放射輝度 S_λ は、標準の光 A（色温度 2856K）を仮定した。この標準の光 A はやや赤みがかかった色で電球色のような光であり、展示が室内で行われることを想定して選択した⁶⁾。

次に、展示に使用するモニタを仮定する必要がある。代表的なモニタとしては、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 sRGB モニタ⁷⁾と Adobe Systems 社が制定した Adobe RGB モニタがある⁸⁾。Adobe RGB 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。ここでは、展示会での使用を想定して、より広い色再現範囲をもつ Adobe RGB モニタを仮定することにした。

表 1 に sRGB モニタと Adobe RGB モニタの三原色、白色点の色度座標とガンマ補正值を示す。両者はほぼ同じ特性を持っているが、緑色の原色(G)の色度座標が異なり、Adobe RGB モニタの方が sRGB モニタよりも広い色再現範囲を有することが分かる。

表 1 sRGB と Adobe RGB の色再現特性

	sRGB	Adobe RGB
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	(0.3127, 0.3290)	(0.3127, 0.3290)
ガンマ特性	2.2	2.2

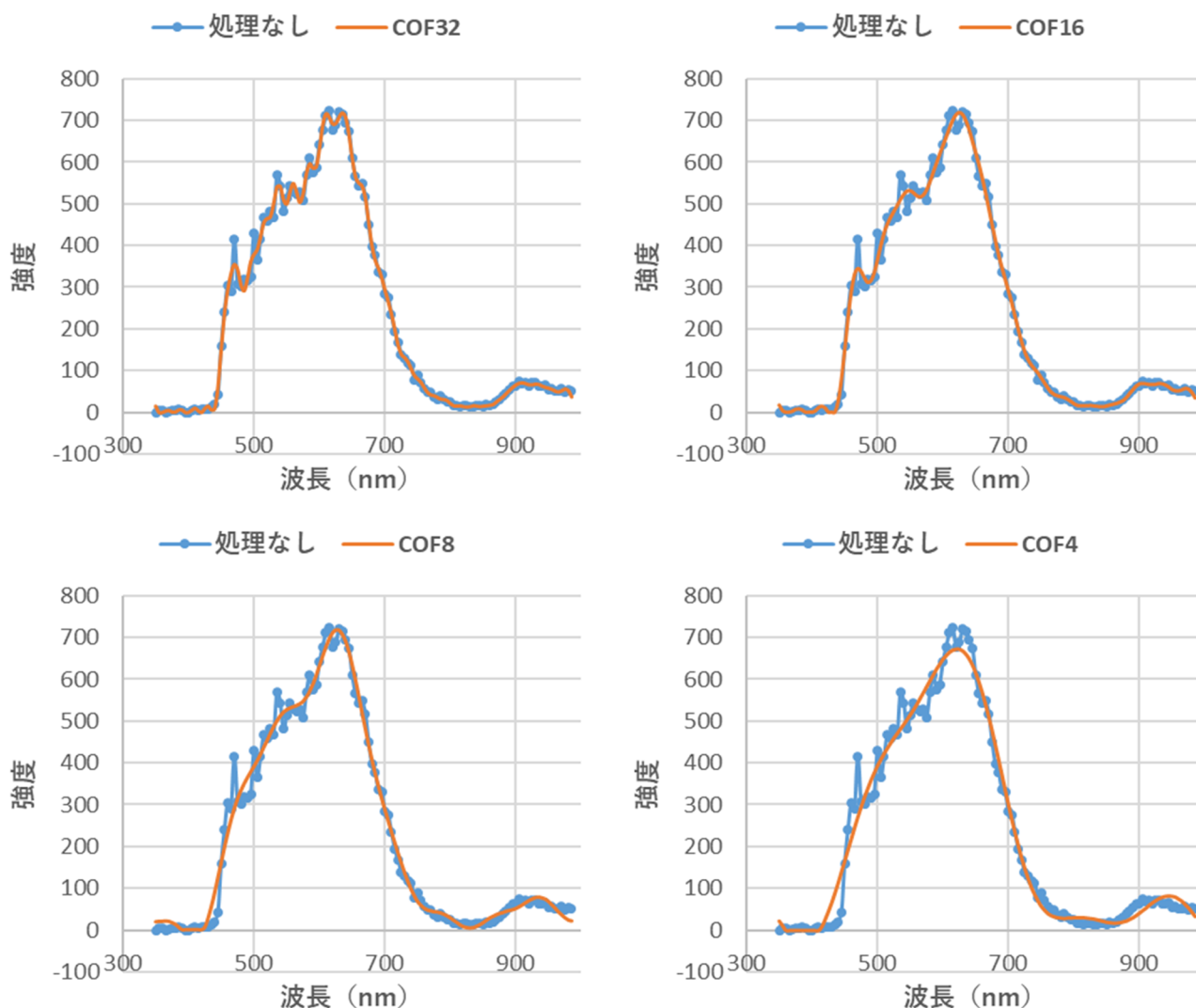


図4 異なるカットオフに対するフィルタ処理の結果

図5に展示光を標準光A、展示用モニタをAdobe RGB モニタとした条件で、ノイズ処理をしていないハイパースペクトルデータより生成した画像を示す。標準光Aを仮定したため、画像全体にやや赤みがかかっているが、問題なく画像が生成されたことが確認できる。

次に、ノイズ処理を行ったハイパースペクトルデータを使って画像を生成し、生成画像の色合いに関してノイズ処理の影響を確認する。

図6にハイパースペクトルデータにフィルタ処理を行った後、画像生成した生成画像を示す。カットオフを32から4とした条件で処理した生成画像にほとんど色合いの変化はないことが確認された。また、ノイズ処理をしていないハイパースペクトルデータによって生成された画像(図5)と比べても色合いの変化は確認されなかった。

6. まとめと今後の課題

写真プリントの色合いを忠実に再現したデジタル画像の生成を目指した研究の一環として、ハイパースペクト



図5 標準光A、Adobe RGB、ノイズ処理なしでの生成画像

ルデータのノイズ処理について検討した。本研究の目的はハイパースペクトルデータから得られる写真プリントの分光反射率が1を超えるデータを削減するために適切なノイズ処理条件を見出すことである。本研究をとおして確認できたことは以下の3点にまとめることができる

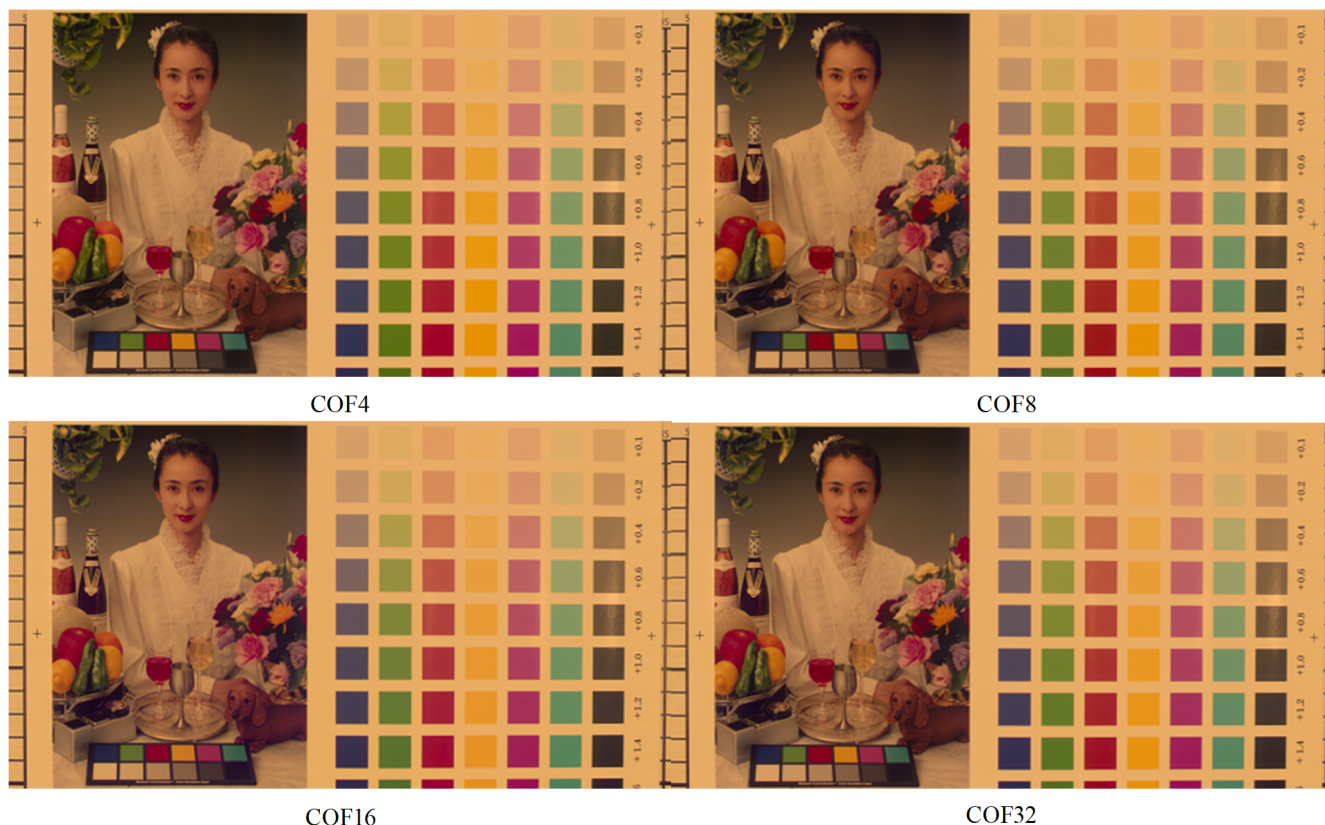


図6 異なるカットオフによるノイズ処理後の生成画像

1) ノイズ処理手法として、平均化処理、フィルタ処理、平均化処理+フィルタ処理の条件で実験を行ったところ、カットオフを 8 としてフィルタ処理を行った場合がもっとも反射率が 1 を超えるデータ数を削減できることがわかった。

2) フィルタ処理を行う前後でハイパースペクトルデータを確認したところ、カットオフが 32、16 では、ハイパースペクトルデータの上下の変動（ノイズ成分）が取り切れておらず、また、カットオフが 4 となるとピーク部分のデータが低くなり、ハイパースペクトルデータの形状が変わってしまうことが確認された。一方でカットオフが 8 の条件では、ノイズ成分が除去されており、かつ、データ形状が再現されていることが確認された。

3) カットオフを 4、8、16、32 の条件でノイズ処理を施したハイパースペクトルデータをもとに実際に画像生成を行い、生成画像を確認したが、色合いの変化は確認されなかった

本研究では、ハイパースペクトルデータのノイズ処理の条件について検討し、適切な処理条件を見出すことであるが、上記 3 点をもとに、結論として、カットオフを 8 とした条件でノイズ処理をハイパースペクトルデータに行った後、画像生成を行うことが適切な条件であると考えられる。

今後の課題としては、ノイズ処理が生成画像に与える影響について詳しく調べることでありと考えている。本研究では、画質つまり生成画像の色合いに関しては目視による

評価にとどまっており、客観的、主観的に画質評価実験を実施するなど、さらに検討を行う必要があると考えている。

参考文献

- 1) “写大ギャラリー”、<http://www.shadai.t-kougei.ac.jp/index.html>、(参照 2024 年 8 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) 楊 雨晨、田村 徹、東 吉彦、“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”、東京工芸大学工学部紀要、Vol. 42, No. 1, pp. 9-13, (2019)
- 4) 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)
- 5) 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)
- 6) 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)
- 7) 谷口慶治、張 小忙, “デジタル色彩工学、3.6 マルチメディア・ディフォルト色空間 sRGB”, 共立出版, (2012)
- 8) Adobe Systems, “Adobe® RGB (1998) color image encoding”, Ver2005-5, (2005)