

## 論文 Article

## 砂面への投影画像の色再現性に関する検討（第1報）

原稿受付 2021年8月4日

ものづくり大学紀要 第11号 (2021) 17~24

鈴木郁宣<sup>\*1</sup>, 土田勝<sup>\*2</sup>, 菅谷諭<sup>\*3</sup>, 木村昭悟<sup>\*2</sup>, 原田登<sup>\*2</sup><sup>\*1</sup>ものづくり大学 技能工学学部 総合機械学科 学生<sup>\*2</sup>日本電信電話株式会社 NTTコミュニケーション科学基礎研究所<sup>\*3</sup>ものづくり大学 技能工学学部 総合機械学科

**概要** 砂面のような有彩色の投影面上における投影画像の色再現性向上を目的に、プロジェクタへの入力画像の色補正手法の検討を行った。実験では人工砂を木板に貼り付けて作成したスクリーンに、24色のカラーパッチからなる色票の投影画像の色再現性を評価した。その結果、プロジェクタにおける各原色が独立でない場合でも良好な色再現結果が得られることを確認した。

**キーワード**: プロジェクタ, 色補正, 色再現, 砂面, 原色, 入出力カーブ

## Color reproduction of images projected on sand surface (Part 1)

Ikunori SUZUKI<sup>\*1</sup>, Masaru TSUCHIDA<sup>\*2</sup>, Satoshi SUGAYA<sup>\*3</sup>, Akisato KIMURA<sup>\*2</sup> and Noboru HARADA<sup>\*2</sup><sup>\*1</sup> Student, Dept. of Manufacturing Technologists, Institute of Technologists<sup>\*2</sup> NTT Communication Science Laboratories, NTT Corporation<sup>\*3</sup> Dept. of Manufacturing Technologists, Institute of Technologists

**Abstract** We discussed and conducted experiments of color correction for projecting images to a sand surface. In experiments, we used a flat-screen made of a wooden board and artificial sand. Color reproduction accuracy was evaluated using a color chart and its image captured by a digital camera. Experimental results show that the colors of each patch on the color chart were well reproduced, and our method could be applied to a case where the primary colors of the projector were not independent of each other.

**Key Words**: projector, color correction, color reproduction, sand surface, primary colors, input-output curve

### 1. はじめに

プロジェクションマッピングは立体形状を持つ物体に対し、液晶プロジェクタ等の映写機器を用いて画像を投影する技術である。筆者らは現在、筆者らが開発した流動床インタフェース<sup>1,2)</sup>とプロジェクションマッピングを組み合わせた、新しいコミュニケーションシステムを開発中である。流動床とは、砂を入れた容器の底から空気を送り液体の様な振る舞いをする状態にしたものである。一

般に用いられているプロジェクタスクリーンとは異なり、砂は白色でなく黄色味がかかった色を有している。そのため通常の手順で作成された実写映像やコンピュータグラフィックス (CG) をそのまま投影すると、その色は観察者にとって不自然に感じる事が多く、何らかの色補正処理が必要である。これまでも液晶モニターや液晶プロジェクタを画像出力装置とした場合の様々な色補正処理技

術が既に開発されているが、砂面の様な有彩色のスクリーンを対象とした場合に関する色再現性の評価結果はほとんど公開されていない。

本研究での最終目的は、動く砂面に対して、その形状の変化や偏角反射特性を考慮した、動的かつ自然な映像投影の実現である。本稿ではその目的達成への第一歩として、平面状の砂面に対して投影した画像の色再現手法の検討を行い、その精度の評価を実験により実施したので報告する。

## 2. 画像表示システムの特性計測

画像表示装置(システム)の代表的な特性として、その原色と、輝度に関する入出力特性が挙げられる。原色とは R, G, B などシステムにハードウェアとして組み込まれている単色を指し、各原色のスペクトルもしくは測色値が用いられる。輝度に関する入出力特性とは入力した信号と実際に観察される輝度の関係を指し、入出力カーブ、トーンカーブ等と呼ばれる。入力画像が想定する色空間 (sRGB や Adobe RGB など) の原色点とプロジェクタの原色が一致しない場合には、入力画像をそのまま出力すると想定と異なる色の画像が表示される。輝度に関しても同様に、入出力カーブが sRGB や Adobe RGB 等の規格と異なる場合には補正が必要となる。特に原色毎に入出力特性が異なる場合には注意が必要で、それぞれの入出力カーブに合わせて入力画像の画素値を補正しなければ、観察される明るさだけでなく色にも影響が出る。正しい色を表示するためには、プロジェクタの各原色とそれぞれの輝度に関する入出力カーブを計測し、その結果に基づき入力画像の信号値を変換する必要がある。

### 2.1 原色の計測

本稿で対象とする画像表示システムは、画像入力装置(例: PC)、プロジェクタ、画像を投影するスクリーンで構成される(図1)。一般的に用いられているプロジェクタのほとんどは、赤 (Red)、緑 (Green)、青 (Blue) の3原色 (R,G,B) で画像の色を表現している。多くの場合、光源を出た光は各色に対応するカラーフィルタを透過した後、液晶パネルや DMD パネル等の空間変調素子にて

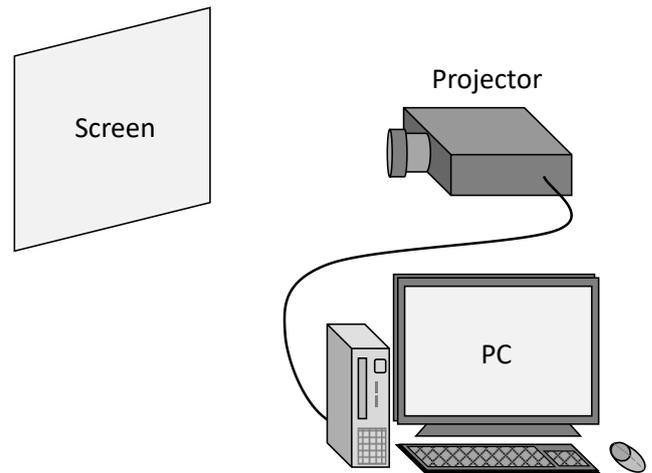


Fig. 1 Image projection system

強度情報が付加され、レンズなどの投影光学系を経てスクリーン上で結像する。反射型スクリーンを使用する場合には、スクリーン表面で反射した光を観察することになる。そのため観察される画像の色は、プロジェクタの特性だけではなく、スクリーンの反射特性(スクリーンの色)にも影響される。本稿では、R, G, B の各色を単独で、最大輝度にて出力した場合に観察されるスクリーンからの反射光を、画像表示システムの原色と呼ぶ。

各原色が独立、すなわち、ある原色の入力信号が他の原色の出力結果に影響を与えない(例えば、R の入力信号を変化させた時に G, B の出力結果は変化しない)場合には、各原色を単独で表示し計測したスペクトルを足し合わせた結果と、全ての原色を同時に表示した際のスペクトルの形状が一致する。また特定の原色の明るさを変えた場合でも、計測される色(例えば XYZ 測色値の構成比率を示す xy 値など)は変化しない。

### 2.2 輝度の入出力特性の計測

プロジェクタへの入力信号(入力画像の画素値)と、実際に観察される輝度との関係を計測する。具体的には、R, G, B の原色毎に、画素値 0 から 255 (プロジェクタへの入力信号が 8bit の場合) の画像信号をそれぞれプロジェクタに入力した際にスクリーン上で観測される画像の輝度を計測する。一般には入出力特性が非線形なため、入力する画素値の間隔をある程度細かくした方が、後に実施する補正処理結果の精度が向上する。

### 3. 画像の色の補正方法

#### 3.1 色空間の変換

ここでは、国際照明委員会 (CIE) により規定されているデバイスに依存しない XYZ 測色値 (以下、XYZ 値と略す) を経由させる。各原色が独立かつ線形な関係にある場合、入力信号 $[r, g, b]$ から XYZ 値への変換は、各色空間で規定された 3 原色点の値を用いて、次式の行列演算にて行う。Cは 3 原色点から求められた 3x3 行列である。

$$[X, Y, Z]^T = \mathbf{C}[r, g, b]^T \quad (1)$$

次に XYZ 値からプロジェクタへの入力信号 $[r', g', b']$ の算出方法について述べる。プロジェクタでの表示において各原色が互いに独立で、輝度の入出力関係が線形の場合には、 $[X, Y, Z]$ と $[r', g', b']$ の関係は次式で表すことができる。

$$[X, Y, Z]^T = \mathbf{M}[r', g', b']^T \quad (2)$$

$\mathbf{M} = [\mathbf{m}_r, \mathbf{m}_g, \mathbf{m}_b]$ は 3x3 行列で各列要素はそれぞれ、R, G, B を単色で最大輝度にて表示した際に計測される XYZ 値で、 $\mathbf{m}_r = [X_r, Y_r, Z_r]^T$ ,  $\mathbf{m}_g = [X_g, Y_g, Z_g]^T$ ,  $\mathbf{m}_b = [X_b, Y_b, Z_b]^T$ である。この行列 $\mathbf{M}$ の逆行列を求めることで、 $[X, Y, Z]$ から $[r', g', b']$ を算出できる。

$$[r', g', b']^T = \mathbf{M}^{-1}[X, Y, Z]^T \quad (3)$$

#### 3.2 輝度の補正

はじめに輝度に関する入出力の計測データをそれぞれ 0 から 1 の範囲になるよう正規化を行う。正規化後の入力信号を $p$ 、出力信号を $q$ とすると輝度に関する入出力関係は、次式で表すことができる。

$$q = f(p) \quad (4)$$

関数 $f(\ )$ が既知もしくは推定可能な場合には、その逆関数 $f^{-1}(\ )$ を各原色について求めればよい。関数 $f^{-1}(\ )$ の算出が困難な場合には $p$ と、 $p$ を細か

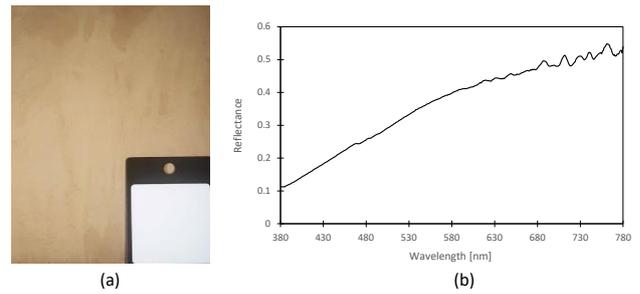


Fig. 2 Projection screen made of artificial

く変化させながら計測した $q$ から、入力値 $p' = q$ となる変換テーブルを作成する。この作業を全ての原色に対し実施する。

#### 3.3 各原色が非独立な場合

ある原色の入力信号が他の原色の出力結果に影響を与え、かつその信号変換モデルが不明な場合、その画像表示システムの入出力関係を厳密に求めるためには、全ての原色の組合せについて計測した $p$ と $q$ のデータが必要となる。しかし、その組合せ数は膨大なものであるから非現実的である。そこで、画像の見た目に大きく影響する白色および灰色 (無彩色系の色) に注目し、それらに関する入出力関係が線形となる $p$ と $q$ の関係を探し、入力値 $p' = q$ となる変換テーブルを作成する。色空間の変換方法を含めた色補正方法はいくつか考えられるが、今回は以下で述べる手法を採用する。

最初に、再現したい観察環境における照明光の XYZ 値 (標準白色板を計測した値。以下、白色と呼ぶ) を、3.1 節の方法で RGB 値に変換する。そしてその RGB 値をもつ画像をプロジェクタに入力し、表示された画像のスペクトルを計測する。また、RGB 値の比率は維持しつつ、白色の明るさを何段階かに変化させた時の画像 (明るさが異なる灰色の画像) に関しても同様にスペクトルを計測する。

次に、上記で得られた各明るさのスペクトルにおける、各原色の含有量を推定する。その推定にはスペクトル形状に関する最小二乗法を用いる。得られた白色の明るさと各原色の値 (R, G, B それぞれの値) との分布を用いて、原色および輝度の補正を行う。

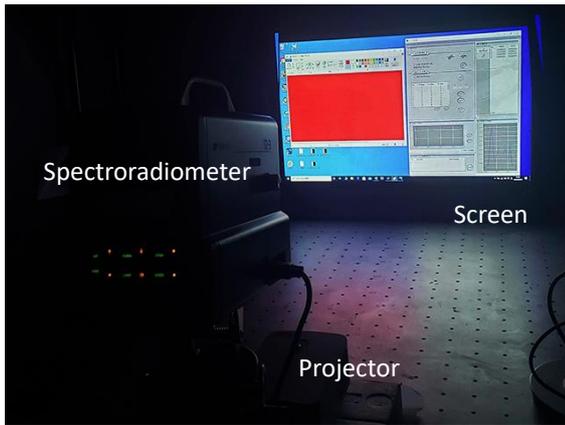


Fig. 3 Layout of experimental equipments

#### 4. 実験

本実験では流動床の砂面の代用として、主となる粒子径が  $75\mu\text{m}$  の人工砂 (ナイガイセラビーズ® 60 #1450, 伊藤忠セラテック) をベニヤ板に厚く貼り付け平面状にしたものをスクリーンとして使用する。その見た目を図 2(a) に示す。画像中には標準白色板も含まれており、比較すると、いわゆる白色よりも黄色味を帯びていることが分かる。また図 2(b) に示す分光反射率を見ると、短波長になるほど反射率が低下しており、色の見た目とも整合性が取れている。なお今回は人工砂によるスクリーンの反射率の角度依存性については考慮しない。プロジェクタには各原色の光源に赤色、緑色、青色の3種類のLEDを使用しているRGB-LEDプロジェクタ (HF60LS, LG) を使用した。空間変調には単板のDMDパネルが使われている。またプロジェクタの原色や輝度の計測、砂面スクリーンへの表示結果の色およびスペクトルの計測には分光放射輝度計 (SR-3, トプコン) を使用した。なお、計測作業は全て暗室環境下で行った。各装置のレイアウトを図 3 に示す。分光放射輝度計はプロジェクタの後ろ上方に配置した。

今回の実験では被写体として、24色のカラーパッチで構成される色票 (ColorChecker®, x-rite) を用いた。照明光源には人工太陽灯照明 (SOLAX 100W, セリック) を使用し、空間的な明るさの分布を均一にするため、光源と被写体の間にトレーシングペーパーを配置した。

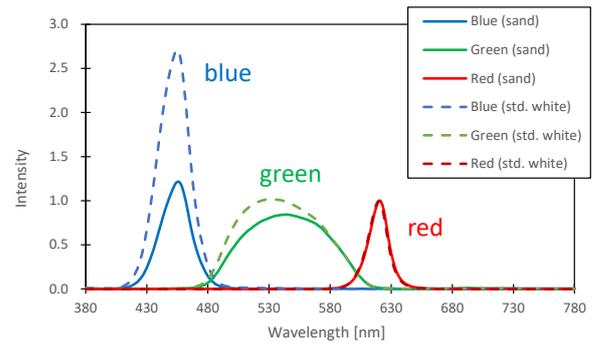


Fig. 4 Spectral distributions of primary colors

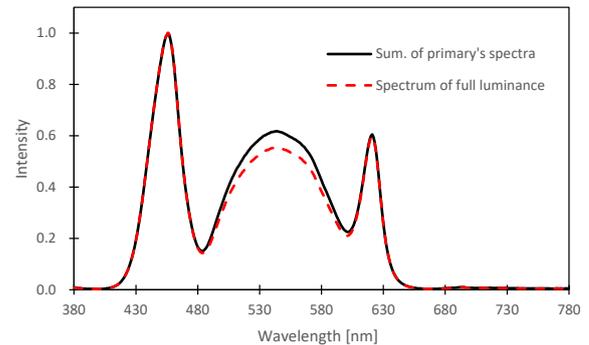


Fig. 5 Spectral distributions of sum of primary colors

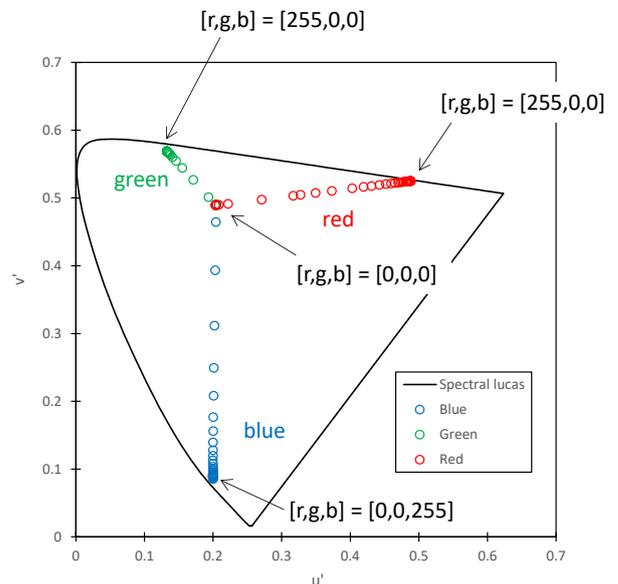


Fig. 6 Independency of each primary color

##### 4.1 原色の計測

図 4 に示しているのは砂面スクリーン上で計測したプロジェクタの各原色のスペクトルである。このグラフでは参考として、標準白色板上にて計測した各原色についても破線で重ねて示している。比較しやすいように、それぞれ赤色LEDのピーク波長  $620\text{nm}$  の値で正規化してある。人工砂の分光

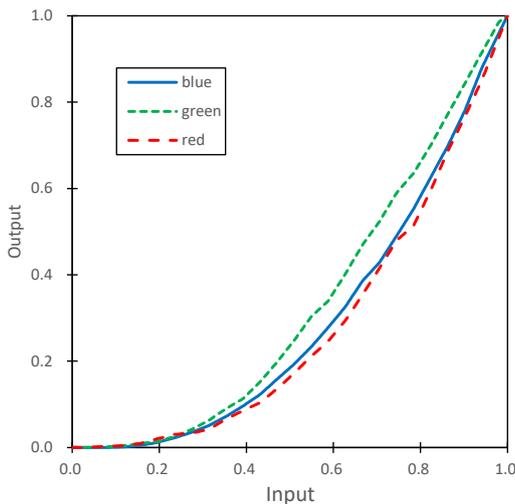


Fig. 7 In-out curves of primary colors

反射率 (図 2(b)) から推測できる通り、砂面スクリーン上での原色スペクトルは、標準白色板上のそれと比較して、緑や青といった短波長になるほどピーク値が大きく減衰している。そのため、通常のモニタ上で作成した画像をそのままプロジェクタに入力すると見た目の色が不自然となる。このことから、正確な色の画像を表示するためには人工砂の特性に合わせた色信号への変換が必要なが分かる。

図 5 には、図 4 で示した各原色のスペクトルを足し合わせた結果と、各原色を同時に最大輝度で表示した場合に計測されたスペクトルを重ねた結果である。いずれも青色 LED のピーク波長 455nm の値で正規化してある。これらと比較すると、赤色と青色に関してはいずれの結果も一致するが、緑色に関しては、各原色を同時に最大輝度で表示した場合の方が、単色で最大輝度にて表示した時よりも低くなっている。この結果はすなわち、各原色が完全には独立ではないことを示唆している。

そこで、1つの原色のみを単独で入力した場合の各原色の独立性についての確認を行った。原色毎に、入力信号値は 0 から 255 までを 35 パターン (間隔は 4 および 8) の画像を表示し、そのスペクトルを計測した (図 6)。 $[r, g, b] = [0, 0, 0]$  の場合は LED 光源の漏れ光であり、色は白色に近い。そこから原色の信号値が大きくなるにつれて原色の色が支配的になり、原色点に向かって収束していく。いずれの原色に関してもその軌跡は直線状であり、各原色は独立の関係にあると言える。したがって、

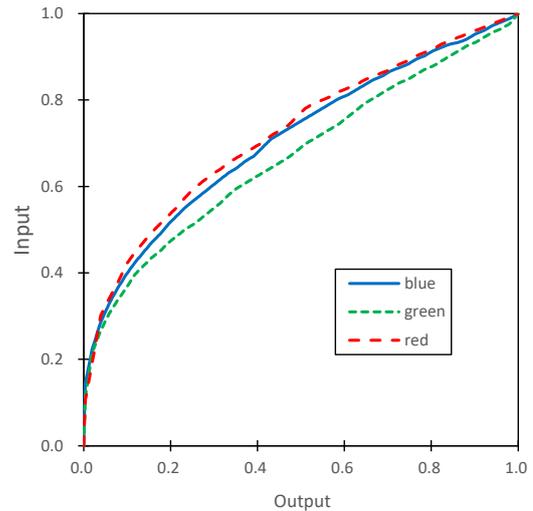


Fig. 8 Reversed in-out curves of primary

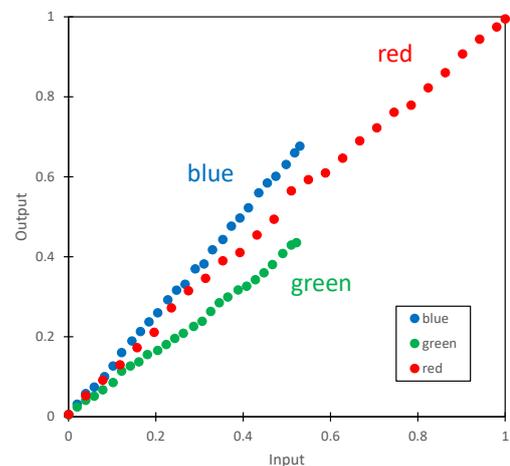


Fig. 9 Corrected in-out curves of primary

複数の原色が同時に使用される場合に、プロジェクタ内部にて何らかの信号処理が施されていると推測できる。ここでは各原色を単独で表示した際に得られたスペクトル (図 4) を用いて、式(3)で用いている行列  $\mathbf{M}^{-1}$  を算出した。

#### 4.2 入出力関係の計測と補正

各原色に関する、入力信号値と実際に表示される画像の輝度の関係を図 7 に示す。各原色ともに 0 から 255 までを信号値を、信号値が低い場合には 4 間隔、それ以外では 8 間隔にて計 35 サンプルについて計測した。この結果からは、赤と青に関しては類似した入出力関係であり、緑のみ異なる特性を持つことが分かった。この図 7 の関係から、図 8 に示す出力結果と入力信号の関係を導き出し、入力信号の変換テーブルを作成した。データが不足している箇所については、前後の値を用いて線形的

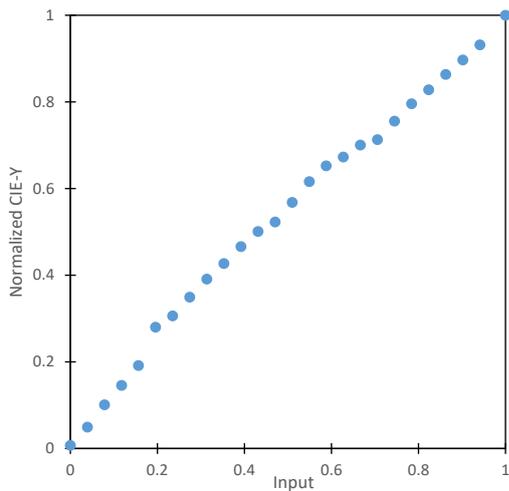


Fig.10 Corrected in-out curves of

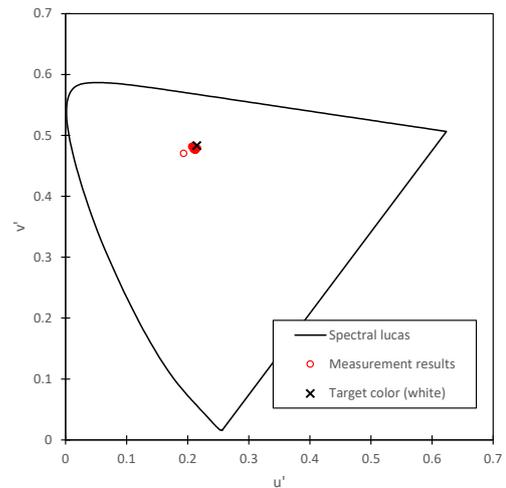


Fig.11 Results of color measurement

に補間した。

次に3.3節で述べたように、白色の明るさを何段階かに変化させた時の画像（明るさが異なる灰色の画像）に関するスペクトルを計測する。ここでは人工太陽灯照明下の環境を想定し、4.1節で求めた行列 $M^{-1}$ を用いて白色に相当するRGB値を算出した。得られたRGB値のうちR値が最も大きかったので、まずその値で白色のRGB値を正規化し、R値を255とした。次にRの画素値が10間隔で0から250までと255の画像を作成し、それぞれを入力するRGB値とする。スクリーン上での表示画像のスペクトルを計測し、得られた各スペクトルにおける各原色スペクトルの含有比率を求め、その結果を出力結果のRGB値とした。図9に前述の処理で得られた入出力関係を示す（入出力共にRの最大値が1になるように正規化してある）。この結果からR、G、Bのいずれの入出力関係も直線状に分布していることが分かる。一次関数にフィッティングし傾きを求めたところ、R、G、Bそれぞれの値は1.02、0.82、1.27であった。これらの逆数を図4に示す原色スペクトルに掛け、改めて色空間の変換、輝度の補正を行ったところ、入力値と表示画像の測色値Y（明るさに相当）の関係は図10に示すように概ね、傾き1の直線に一致した。また表示画像の色を $u'$ - $v'$ 色度図上にプロットした結果(図11)では、目標とした白色にほぼ一致していることが分かる。1点はずれ値が確認されるが、これは入力値0（すなわち黒を表示した時）における計測結果である。



Fig.12 Input image to projector

#### 4.3 色票の各カラーパッチの色再現

前節までで定まった各種色補正パラメータを用いて、色票のカラーパッチ24色の色再現を行った。色票の画像はデジタル一眼レフカメラ(D700, ニコン)を使用してRAW画像として記録したものを使用した。RAW画像からの色再現処理は画素毎に、以下の手順に従いプロジェクタへ入力するRGB値を算出する。初めに、分光反射率のスペクトル形状に関する一次マルコフ性の仮定のもと、Wiener推定法<sup>3)</sup>により分光反射率を推定した。次に、推定した分光反射率と照明光スペクトル、等色関数を用いてXYZ値を算出し、その後、前述の色補正方法を経てよりRGB値を得た。図12にプロジェクタへの入力画像を示す。そして図13に、目標とする色の画像（計算機上で作成）と、実際にスクリーン上で観察された画像をカメラで撮影したものを図13に示す。これらを比較すると、本稿における色



Fig.13 Target color image (left) and photo of displayed image (right)



Fig.14 Displayed image without color correction

補正手法による結果は、鮮やかさが目標よりやや増しているように見えるものの、概ね正しく色が再現出来ていることが確認できる。参考として、Adobe RGB 対応モニタ上で確認して生成した後に色補正処理を行わずにプロジェクタへ入力し表示された結果を図 14 に示す。こちらは全体的に青みがかかり、コントラストも強調されたような印象を受ける。

次に、スクリーン上に表示された色票の画像の各カラーパッチ (#1 から#18) の色を分光放射輝度計で計測し、 $a^*b^*$ 色空間上にてその色再現性を評価した (図 15) 。青色の丸が色票の実測値、赤色のバツ印がスクリーン上の画像での計測結果である。目立つところでは黄色からオレンジ色にかけて (#12, #13) , また青色を成分に含む色 (#10, #13, #17, #18) にやや誤差があるものの、概ね良好な結果が得られたといえる。 $a^*b^*$ 色差は 3.3, 最大 8.5, 最小 0.7, 平均 3.3 であった (表 1) 。なお、色差 3 以下で見た目の色の差が分からず、色差 1 以下で対象同士を接した状態で比較したときでも色の差が識別できない。

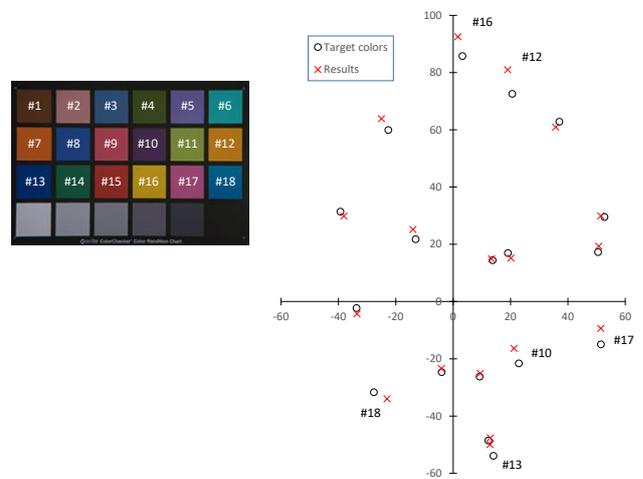


Fig.15 Displayed colors plotted on a  $a^*b^*$  color space

Table 1  $a^*b^*$  color difference

#1	#2	#3	#4	#5	#6
0.7	2.0	1.3	3.5	1.1	2.1
#7	#8	#9	#10	#11	#12
2.3	1.2	2.1	5.5	4.7	8.6
#13	#14	#15	#16	#17	#18
4.1	2.0	1.4	6.9	5.5	5.1

## 5. まとめ

本稿では、砂面への投影画像における正確な色再現を目的に、色補正方法の検討を行った。まず初めに、プロジェクタの各原色が非独立な関係にある場合でも適用可能な、画像の色補正手法の検討を行った。実験では色票を被写体に、色補正手法の有効性検証と色再現性の評価を行い、良好な結果が得られた。一方で、プロジェクタのモデル化が完

全とは言えず、今後さらなる検討を行う予定である。また今回は平面状のスクリーンを使用して実験を行ったが、流動床インタフェースシステムのように表面が波打っている対象に投影する場合には、色再現において砂の分光反射率の角度依存性の影響が出ると考えられる。その程度の確認と補正手法の検討を進めていきたい。

## 文 献

- 1) 的場・菅谷：流動床インタフェース：液体のようにふるまう砂を用いたインタラクションシステム，情報処理学会インタラクション 2017, 2-510-28, (2017)476-479.
- 2) Y. Matoba & S. Sugaya: Fluidized Bed interface, International Display Workshops 2018, (2018).
- 3) 村上：分光反射率の推定理論，日本写真学会誌 65(4), (2002), 234-239.