



# ハイパースペクトルカメラを用いたプロジェクタ色補償の ユーザ調査による色知覚評価

前田恵照<sup>1)</sup>, 岩井大輔<sup>1)</sup>

1) 大阪大学 大学院基礎工学研究科 (〒 560-8531 大阪府豊中市待兼山町 1-3,  
maeda.yoshiaki.286@ecs.osaka-u.ac.jp, daisuke.iwai.es@osaka-u.ac.jp)

**概要:** プロジェクションマッピングにおける色ずれ問題を解決する方法として, ハイパースペクトルカメラを用いて目標色と投影結果のスペクトル誤差を最小化する手法がある. しかし, RGB プロジェクタを用いたスペクトル誤差最小投影時には, RGB 誤差が最小にならない問題があり, RGB 誤差を最小にする投影とスペクトル誤差を最小にする投影のどちらが色ずれの知覚により大きな影響を与えるかが不明であった. 最小化する誤差の違いを評価するユーザ調査の結果, スペクトル誤差より RGB 誤差が色知覚に強く影響することが示唆された.

**キーワード:** プロジェクタ色補償, スペクトル画像, プロジェクションマッピング

## 1. はじめに

複合現実感技術の一種であるプロジェクションマッピングでは, 現実の物体の色や質感を変調することができる [1]. ユーザに特殊な機器を装着させることなく映像提示できることから, エンターテインメントに限らず, 医療 [2] やデザイン支援 [3], メイクアップ [4] など幅広い分野で応用されている. しかし, 投影光を直接実物体に照射することから, 投影結果の色が物体の反射特性により変化するため, 投影結果の色と所望の色がずれる問題がある.

この問題を解決するために, 様々なプロジェクタ色補償手法が提案されている. プロジェクタと RGB カメラの入出力関係を線形モデルで近似し, その逆問題を解くことで事前に投影画像を補償する手法 [5], 投影結果と目標画像の色差を最小化するように逐次処理を用いてプロジェクタへの入力画像を最適化する手法 [6] などがある. これらの手法は RGB カメラを用いて投影結果の色を補正しているが, RGB カメラは可視光スペクトルの情報を非可逆に圧縮するため, カメラで観測される色と実際の見えに差異が生じ, ユーザに色ずれを知覚させてしまう.

そこで, 我々はこれまでの研究で, ハイパースペクトルカメラ (HSC) を用いてプロジェクタとカメラの入出力関係を RGB 輝度値と可視光スペクトルの線形モデルとして推定することで, より高精度なプロジェクタ色補償を実現する手法を提案してきた. スペクトル画像を最適化に使用することで, 目標色と投影結果の可視光スペクトルの誤差を最小化することが可能になった.

しかし, RGB プロジェクタを用いてスペクトル誤差を最小化した投影を行った場合に, RGB 誤差が最小にならない問題があった. スペクトル誤差最小投影は, RGB プロジェクタのブロードな分光特性により, RGB 誤差が最小にならない. そのため, スペクトル誤差と RGB 誤差最小投影はトレードオフの関係にあり, どちらが色ずれの知覚により大

きな影響を与えるかが明らかでなかった. 本稿では, HSC を用いてプロジェクタ色補償を行う際に, 最小化する誤差の違いがユーザの色知覚に与える影響をユーザ評価実験によって調査し, 結果を報告する.

## 2. HSC を用いたプロジェクタ色補償

### 2.1 RGB 誤差に基づくプロジェクタ色補償

HSC を用いたプロジェクタ色補償を行う手法の一つとして, 目標となるスペクトル画像と投影結果を撮影したスペクトル画像の誤差をフィードバックして投影画像を最適化する方法がある [7]. ただし, 投影に RGB プロジェクタを用いる場合, スペクトル画像を直接プロジェクタに入力することはできない. そこで, スペクトル画像を等色関数 [8] を用いて RGB 画像に変換することで, プロジェクタに入力する投影画像とする. 等色関数は人間の色知覚をモデル化した関数であり, 可視光スペクトルを RGB 輝度値に変換することができる. よって, 逐次更新式は以下のように表される.

$$\mathbf{x}_{RGB}^i[t+1] = \mathbf{x}_{RGB}^i[t] + K \mathbf{f} e_{spe}^i[t]. \quad (1)$$

ここで,  $\lambda$  は HSC によって撮影されるスペクトル画像の波長数,  $i$  はピクセルのインデックス,  $\mathbf{x}_{RGB}^i[t] \in \mathbb{R}^3$  は投影画像の RGB 輝度値,  $K \in \mathbb{R}$  はゲイン,  $\mathbf{f} \in \mathbb{R}^{3 \times \lambda}$  は等色関数を離散的に表現した行列,  $e_{spe}^i[t] \in \mathbb{R}^\lambda$  は繰り返し回数  $t$  における誤差スペクトルを表す. 式 (1) で逐次処理による投影画像の最適化を行うと, スペクトル誤差を等色関数を用いて射影するときに, スペクトル誤差が残っていたとしても, 等色関数によって変換された RGB 輝度値の誤差が無くなり, 勾配が消失することがある. これは条件等色 [9] によるものである. 条件等色は 2 つのスペクトルが異なるにも関わらず同じ RGB 輝度が得られる現象であり, 高次元の情報である可視光スペクトルを低次元の 3 原色に変換し

たことに起因している。以上から、式 (1) のフィードバック処理が収束するとき RGB 誤差が最小になる。このとき、スペクトル誤差は最小化されないことに注意する必要がある。

## 2.2 スペクトル誤差に基づくプロジェクタ色補償

2.1 で述べたように、RGB 誤差に基づくプロジェクタ色補償では、条件等色により投影結果のスペクトル画像と目標のスペクトル画像の誤差を最小化することは出来ない。そこで、プロジェクタと等色関数を一つのシステムとみなしたプロジェクタシステムに対して、入力するスペクトルと投影結果として出力されるスペクトルの関係を線形モデル化し、最小二乗法でパラメータを推定する。モデル化によりスペクトル誤差に基づく目的関数の勾配が計算可能となり、スペクトル誤差を最小化するプロジェクタ色補償ができる。

投影関数  $\mathbf{p}^i$  はプロジェクタの投影光がハイパースペクトルカメラに届くまでの劣化関数であり、投影面の反射特性や光路長等に依存する。ここで、投影システム関数  $\mathbf{P}^i \in \mathbb{R}^{\lambda \times \lambda}$  を等色関数  $\mathbf{f}$  を用いて以下のように定義する。

$$\mathbf{P}^i := \mathbf{p}^i \mathbf{f}. \quad (2)$$

スペクトル誤差を最小化するために目的関数を以下のように設定する。

$$G(\mathbf{x}_{spe}) = \frac{1}{2} \sum_i \mathbf{e}_{spe}^{i\top} \mathbf{e}_{spe}^i. \quad (3)$$

式 (3) を最小化する制約付き最適化問題として、最急降下法を用いて解く。式 (3) の勾配は以下のように求められる。

$$\frac{\partial G}{\partial \mathbf{x}_{spe}^i} = -\mathbf{P}^{i\top} \mathbf{e}_{spe}^i. \quad (4)$$

学習率を正の定数  $K$  とすると、得られた勾配を基に以下のような更新式が得られる。ここで、 $t$  はイテレーションインデックスである。

$$\mathbf{x}_{spe}^i[t+1] = \mathbf{x}_{spe}^i[t] - K \frac{\partial G}{\partial \mathbf{x}_{spe}^i}[t]. \quad (5)$$

式 (5) によって、投影システムへの最適な入力スペクトル  $\mathbf{x}_{spe}^{i*} \in \mathbb{R}^\lambda$  を得られる。ただし、投影関数は線形性を仮定しているため、非線形な特性であるプロジェクタのガンマ特性などはあらかじめキャンセルしなければならないことに注意する。

## 3. ユーザ評価実験

### 3.1 実験概要

HSC と RGB プロジェクタを用いた色補償において、スペクトル誤差と RGB 誤差のどちらを最小化することがユーザの色知覚に有効かを調査するために、2 章で述べたプロジェクタ色補償手法による投影及び色補償をしていない投影の 3 条件を比較するユーザ評価実験を行い、最小化する誤差の違いが色知覚に与える影響を調査した。



図 1: 実験セットアップ。被験者はプロジェクタの上部に視点を固定するようにして、投影画像と雑誌を観察する。

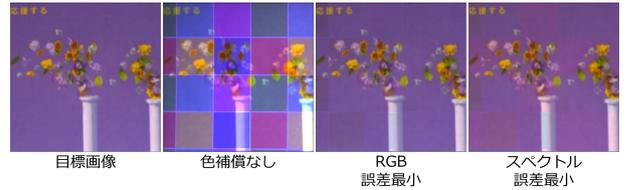


図 2: HSC で撮影した投影条件ごとの投影結果。

### 3.2 実験条件・実験環境

本実験では、プロジェクタ色補償手法の違いによる色知覚の違いを調査するために、色補償なし、RGB 誤差最小、スペクトル誤差最小の 3 条件で投影を行った。実験環境を図 1、それぞれの投影条件における投影結果を図 2 に示す。目標スペクトル画像は、雑誌にプロジェクタの白色光を当てた状態で撮影した。プロジェクタ (BENQ TH685, 解像度:1920 × 1080, ガンマ値:2.2), カラーパターンが印刷された投影面, 目標スペクトル画像の撮影に用いた雑誌で構成されている。雑誌には、目標スペクトル画像を撮影したときと同じ環境にするために、プロジェクタの白色光を照射した。実験は暗視環境下で行った。また色補償には TOPCON 社の HSC (SR-5100, 有効画素数:2448 × 2048) を用いた。

### 3.3 実験方法

参加者は、投影画像に使った色補償の 3 条件それぞれの投影画像と雑誌を直接観察し、アンケートに回答した。各条件の投影画像は、参加者の任意のタイミングで切り替え可能とし、参加者は各条件の投影画像を十分に観察した後にアンケートに回答した。観察する時の視点は、色補償に使用した HSC の位置に合わせるように指示し、投影画像と雑誌を正面から観察するようにした。参加者は、投影画像の色

評価指標	色補償なし	RGB 誤差最小	スペクトル誤差最小
MSE (スペクトル)	$33.2 \times 10^7$	$5.30 \times 10^7$	$4.79 \times 10^7$
$\Delta E (RGB)$	31.3	2.50	5.79

表 1: それぞれの投影条件における画像指標のスコア。

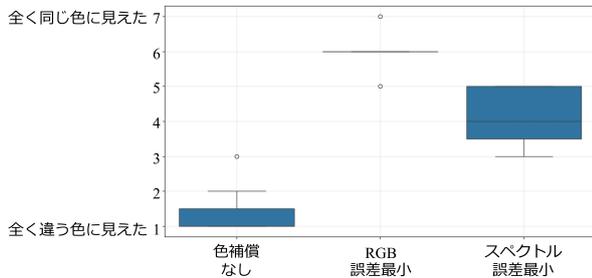


図 3: 実験結果。「投影結果の色が実物体の雑誌の色と同じように見えるか」という質問のスコア。

は実物体の雑誌の色と同じように見えるかという質問に対し、7段階のリッカート尺度（1: 全くそう思わない, ..., 4: どちらとも言えない, ..., 7: とてもそう思う）で回答した。

### 3.4 実験結果

本実験は正式実験に向けた予備実験として行ったため参加者 11 名で実施しており、統計検定は行っていない。実験の結果を図 3 に示す。スコアの数値が大きいくほど、投影画像の色が実物体の雑誌の色と同じように見えたことを示している。各条件でのスコアの平均は、色補償なしが 1.4、RGB 誤差最小が 6.0、スペクトル誤差最小が 4.1 であった。

ユーザ評価実験の結果、スペクトル誤差と比較して RGB 誤差の方が色知覚に強く影響することが示唆された。実験終了後の口頭報告からも、スペクトル誤差最小による投影に残っているタイル状の色ずれが気になったという意見が多数得られた。以上より、RGB プロジェクタを用いた色補償においては、スペクトル誤差を最小化するよりも RGB 誤差を最小化の方がユーザの色知覚に対して有効である可能性が示唆された。ただし、本実験では参加者数が少なく、統計的な検定を行っていないため、正式実験でより多くの参加者を対象にした実験を行う必要がある。

## 4. おわりに

本稿では、HSC と RGB プロジェクタの組み合わせにおける色補償において、スペクトル誤差と RGB 誤差のどちらを最小化することがユーザの色知覚に有効かを調査するためのユーザ評価実験を行った。その結果、RGB 誤差の方がスペクトル誤差よりも色知覚に強く影響し、色差として知覚されやすいことが示唆された。今後は、実験内容を洗練し、より多くの参加者を対象にした正式なユーザ評価実験を行うことで、より詳細な知見を得ることを目指す。

## 参考文献

- [1] Oliver Bimber and Ramesh Raskar. Spatial augmented reality: merging real and virtual worlds. 2005.
- [2] Hiroto Nishino, Etsuro Hatano, Satoru Seo, Takashi Nitta, Tomoyuki Saito, Masaaki Nakamura, Kayo Hattori, Muneo Takatani, Hiroaki Fuji, Kojiro Taura, and Shinji Uemoto. Real-time navigation for liver surgery using projection mapping with indocyanine green fluorescence: Development of the novel medical imaging projection system. *Annals of Surgery*, Vol. 267, pp. 1134–1140, 6 2018.
- [3] Hongbo Zhang, Pei Chen, Jingwen Yang, Yifei Wu, Zhaoqu Jiang, Xuelong Xie, Weitao You, and Lingyun Sun. Ieds: Exploring an intelli-embodied design space combining designer, ar, and gai to support industrial conceptual design. *Proceedings of the 2025 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–25, 4 2025.
- [4] Amit H. Bermano, Markus Billeter, Daisuke Iwai, and Anselm Grundhöfer. Makeup lamps: Live augmentation of human faces via projection. *Computer Graphics Forum*, Vol. 36, pp. 311–323, 5 2017.
- [5] T Yoshida, C Horii, and K Sato. A virtual color reconstruction system for real heritage with light projection. *Proceedings of VSMM*, 2003.
- [6] Jun Tsukamoto, Daisuke Iwai, and Kenji Kashima. Radiometric compensation for cooperative distributed multi-projection system through 2-dof distributed control. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 21, pp. 1221–1229, 11 2015.
- [7] 前田恵照, 佐藤宏介, 岩井大輔. ハイパースペクトルカメラを用いたプロジェクタ色補償. 第 69 回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, pp. 440–444. システム制御情報学会, 2025.
- [8] CIE. Cie 1931 colour-matching functions, 2 degree observer. Technical report, International Commission on Illumination, 2019.
- [9] G Wyszecki and WS Stiles. *Color science: concepts and methods, quantitative data and formulae*. 2000.