



# 同軸光学系を用いた可視映像と紫外線パターンの重畳による 高コントラスト映像投影の基礎検討

土佐凜斗<sup>1)</sup>, 平木剛史<sup>2,3)</sup>

1) 筑波大学 大学院人間総合科学研究院 (〒 305-8550 茨城県つくば市春日 1-2, rinto\_tosa@pml.slis.tsukuba.ac.jp)

2) クラスタール メタバース研究所 (〒 141-0031 東京都品川区西五反田 8-9-5, t.hiraki@cluster.mu)

3) 筑波大学 図書館情報メディア系 (〒 305-8550 茨城県つくば市春日 1-2)

**概要:** 紫外光を投影するプロジェクタはフォトクロミック素材と組み合わせた発色型情報提示をはじめ様々な用途で用いられているが、紫外線パターンと可視映像の双方を投影するには別々のプロジェクタとそれらの位置合わせが必要であった。本稿では投影する可視映像に重畳する形で紫外線パターンを投影することができるプロジェクタを開発し、フォトクロミック素材を塗布した投影対象に投影することで投影映像の高コントラスト化が実現可能かどうかについて検討する。結果として、可視映像のみの投影と比べて輝度コントラスト比において約 1.2 倍向上させられていることを確認した。

**キーワード:** 紫外線投影、同軸光学系、フォトクロミック、高コントラスト投影

## 1. はじめに

プロジェクションマッピング (PM) に代表される空間 AR 技術は、実世界をベースとして情報を付加することで、直感的な情報提示や、没入感のある視覚体験ができる特徴があるが、空間全体の環境光下では体験の没入感や臨場感が損なわれてしまうというコントラストの問題がある。

映像のコントラストを上げるためには、光源からの光の振幅や周波数を変調することによって映像出力のダイナミックレンジを広げることが前提となる。一般的なハイダイナミックレンジのディスプレイやプロジェクタは、光源からの光を変調フィルタに透過させることによってプロジェクタやディスプレイ内部で光の変調をおこなっている。一方でこの光の変調は、PM のような投影対象に映像を投影して映し出された映像を目にする場合、光の反射表面でも起こりうる。これを利用して写真や放射線プリントにプロジェクタで適切な映像を投影することで、環境光に影響されにくい形で投影映像のダイナミックレンジを広げられることが知られている [1]。

岩井らは、スクリーンの表面色を制御し、反射型変調を利用してプロジェクタによる投影映像のコントラストを向上させる手法を提案した [2]。これは、紫外線に反応して発色するフォトクロミックインクを様に塗布したスクリーンに対して、その背後から紫外光 LED を格子状に配置した UVLED アレイで、フォトクロミックインクの色を制御することで、スクリーン表面の反射率を時空間的に制御可能にしたスクリーンを使用する。この手法には、環境光の影響を受けにくいことや、投影映像に対して動的にスクリーンの表面色を制御できるという利点がある反面、UVLED アレイと可視光プロジェクタはそれぞれ独立しているため、位置合わせが必要であることや UVLED アレイの解像度がプ

ロジェクタの解像度に対して非常に低いこと、システムが大型化しスケールアップが容易でないなどの問題を抱えている。一方で、紫外線や赤外線など、不可視領域の波長の光をレーザーやプロジェクタで照射する試みも多く行われている [3, 4, 5, 6]。レーザーやプロジェクタを用いて選択的にフォトクロミック材料の色制御を行う方法は、色制御が容易であることや、スケールアップしやすいという利点がある。

そこで本研究では、プロジェクタとスクリーンのみの単純なプロジェクタシステムでの高コントラスト投影に向けて、可視映像に重畳する形で紫外線パターンを投影可能なプロジェクタシステムとフォトクロミック材料を用いた、高コントラストな映像投影手法を提案する。本稿では、十分な出力で同軸光学系を用いた可視映像と紫外線パターンの重畳投影が可能なプロジェクタシステムの設計とプロトタイプの実装、そして可視映像、紫外線パターン照射によるフォトクロミックスクリーンの表面色パターン、それらを重畳した映像の 3 つについて輝度を計測し評価する。

## 2. 設計と実装

本研究では、可視映像に重畳する形で紫外線パターンを投影可能なプロジェクタシステムを提案する。図 1 に提案するプロジェクタシステムの概要を示す。

### 2.1 設計

本研究では、既存の可視光 DLP プロジェクタに紫外光源を追加する形でプロトタイプを設計する。光源の追加は、筆者らが提案した手法を利用する [7]。R、G、B それぞれの LED が小型のチップ形状に集積されているフルカラー LED を使用することで、1 つの光路のみで 3 つの可視光源からの光を伝達可能な光学系を構成する。これにより、空いた残りの光路のひとつに紫外光源を追加できる。

ここで、フォトクロミック材料を発色させるほどの出力

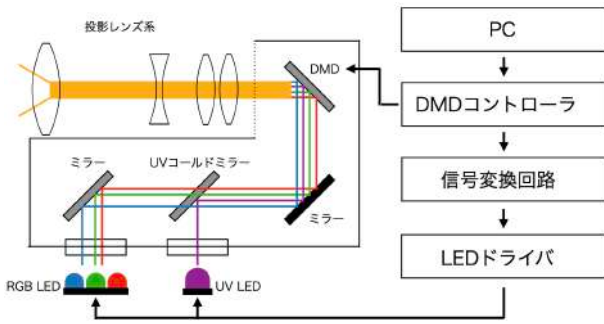


図 1: 提案プロジェクタシステムの概要

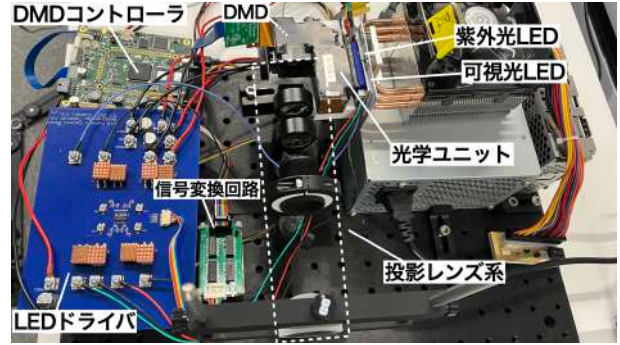


図 2: 構築したプロジェクタシステム

を得るため、紫外線の減衰が少ない光路と投影レンズ系の設計も行う。既存の可視光 DLP プロジェクタは可視光源に最適化された設計になっているため、紫外光源を追加するだけではプロジェクタ内部で紫外線が減衰してしまい、フォトクロミック材料の表面制御に十分な効果を示すことができない。特に、投影レンズ系は多くのレンズで構成されているため、紫外線の減衰率が高い。そこで、紫外領域の波長の光に対応したレンズを使用して、投影レンズ系を新たに構築する。投影レンズ系には、凸レンズ 3 枚と凹レンズ 1 枚で構成される簡易的なズームレンズ系を採用する。

次に光源を制御するシステムを検討する。提案するプロジェクタシステムでは 3 つの可視光源に加えて紫外光源を制御する必要がある。しかし、可視光 DLP プロジェクタシステムの光源制御フレームワークでは UV の信号を加えても対応できない。そこで、亀井らが提案した信号変換手法 [8] を応用する。可視光 DLP プロジェクタシステムの光源制御フレームワークでは、R、G、B それぞれ単色と、2 色ずつの組み合わせ、そして全色点灯時の白、無点灯での黒の 8 パターンの信号入力が可能である。一方で、2 色以上の組み合わせでの色表現は、光源の同時点灯ではなく、光源を高速で切り替えて再現する。よって、以上の信号の組み合わせのうち、2 色以上の組み合わせを除いた 4 通りしか信号の入力は必要とされないことがわかる。これより、空いた信号入力の 1 つを紫外光源を点灯させる信号として割り当てることで、既存の光源制御フレームワークをそのまま用いる形で可視光源に加えて紫外光源の制御を実現することができる。

2.2 実装

本稿では、既存の可視光 DLP プロジェクタとして、DLP プロジェクタ評価キット (DLP LightCrafter 4500, Texas Instruments) を使用し、これを拡張する形で提案するプロジェクタシステムのプロトタイプを構築した。図 2 にその外観を示す。プロトタイプは可視光と紫外光の 2 種類の LED とそれらを駆動する LED ドライバ、DMD を含む光学ユニット、DMD の映像を投影する投影レンズ系、光源制御フレームワークからの信号を変換する回路で構成される。

今回 RGB 光源として利用したフルカラー LED (SBM-

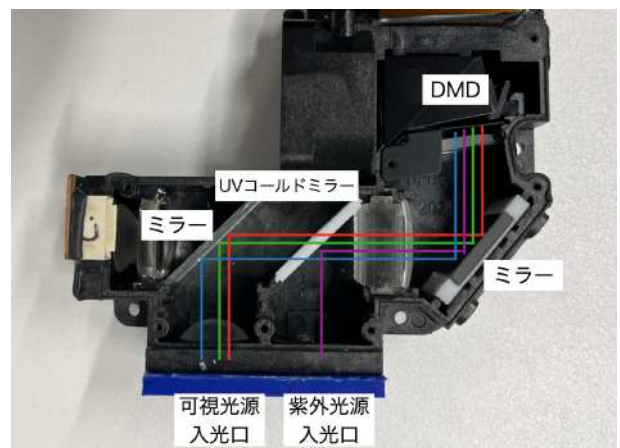


図 3: 実装した光路

40-RGBW-SC41-QD100, Luminus Devices) の明るさは、赤色光、緑色光、青色光について、それぞれ 90 lm、210 lm、210 lm であり、紫外光源にはパワーが 9.1 W、波長が 365 nm である LED、CBM-120-UV-X31-I365-22 (Luminus Devices) を使用した。また、これらの LED 光源の点灯を制御するための LED ドライバ基板を設計した。ドライバ基板においてはスイッチング素子にパワー MOSFET (SKI03021, SANKEN) を使用し、また、高出力に伴う発熱を抑えるため放熱性の良好なアルミ基板を採用した。加えて、放熱のため、アルミ基板の裏面に CPU 用クーラー (SLIM SILENCE AM4, GELID) を 2 台設置した。

光路に使用するミラーやレンズについては、紫外線の減衰を低減できるように考慮して選定した。可視光と紫外光が反射する DMD の直前のミラーには対応波長域が 250 nm から 700 nm のアルミ鏡面ミラー (TS λ/4 UV 反射強化アルミコートミラー 15 x 15, Edmund Optics) を使用した。また、可視光を透過させ、紫外光を反射させるミラーには、透過帯域が 420 nm から 1600 nm で平均透過率が 85 %、反射帯域が 350 nm から 375 nm で平均反射率が 97 % の UV コールドミラー (TS ダイクロイックロングパスフィルター 400 nm 12.5 x 17.6, Edmund Optics) を使用した。図 3 に実装した光学ユニット内部の写真を示す。

ここで、DLP LightCrafter 4500 に搭載されている DMD (DLP4500FQE, Texas Instruments) は、可視光帯域用途

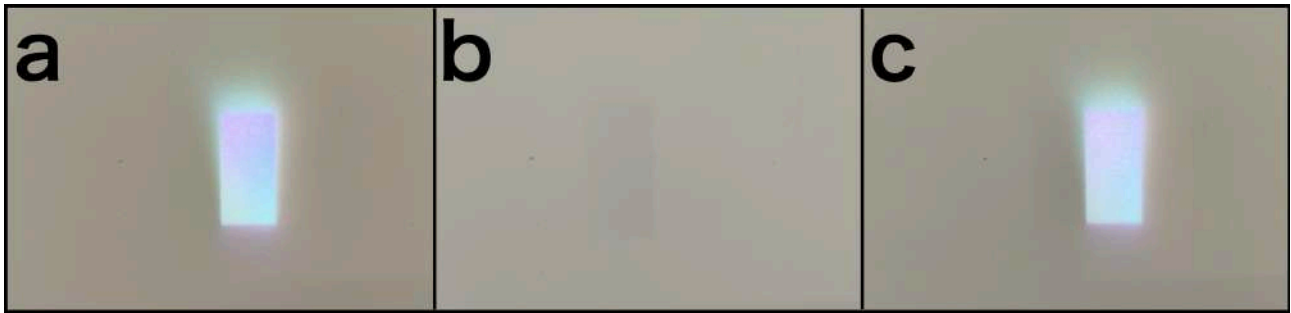


図 4: (a) 可視映像の投影 (b) 紫外線パターンの投影 (c) 可視映像と紫外線パターンの重畳投影

の DMD であるが、プロジェクタに搭載する紫外光源の波長 (365 nm) においても十分良好な特性である [9] ので、そのまま使用した。

投影レンズ系のズームレンズ系には、凹レンズのマウントにネジリングを使用し、チューブマウントと組み合わせることによって約 9 mm の可動域を確保した。これにより、投影映像の結像位置は投影レンズから 150 mm から 650 mm の距離を選択できる。また、色収差を抑えるためにリレー用凸レンズとして紫外光と可視光に対応したアクロマティックレンズ (TS 近紫外用アクロマティックレンズ 25 x 50 UV-VIS, TS 近紫外用アクロマティックレンズ 25 x 60 UV-VIS, Edmond Optics) を使用した。凹レンズと投影用の凸レンズには、365 nm の波長の光においても 97 % 以上の透過率を持つ MgF2 コーティング [10] のもの (TS ネガティブアクロマティックレンズ 25 x -150 MgF2, TS アクロマティックレンズ 40 x 50 MgF2, Edmond Optics) を使用した。

### 3. 実験

#### 3.1 計測環境と実験条件

開発したプロトタイプシステムによって投影される映像のコントラストが向上しているかを確認するため、投影映像における最大輝度と最小輝度を計測した。ここで、輝度の計測には分光放射輝度計 (SR3-AR, TOPCON) と、測定データを扱うためのソフトウェア (CS-900A, TOPCON) を使用した。輝度は、測定角  $0.2^\circ$ 、測定距離 500 mm で測定した。また、投影レンズからスクリーンまでの距離は 300 mm、スクリーンには、紙面全体が一様に黒色に発色する A4 サイズのフォトクロミック合成紙 (ソーラープリント, 株式会社 SO-KEN) を使用した。

輝度の計測は、室内照明環境下において、可視映像の投影、紫外線パターン投影によるそれぞれについて実施した。図 4 に可視映像の投影、紫外線パターン投影、そして可視映像と紫外線パターンの重畳投影の様子を示す。計測にあたり、図 5 に示す、白色部分と黒色部分が半分ずつ表示されたパターンの投影を行った。ここで、可視映像の投影では、白色部分が最大輝度、黒色の投影が行われずスクリーンの表面色が最小輝度となる。一方で紫外線パターンの照射による映像の輝度はスクリーンの表面色の明度によって変化し、最大輝度は発色しない場合の白色、小輝度は紫外

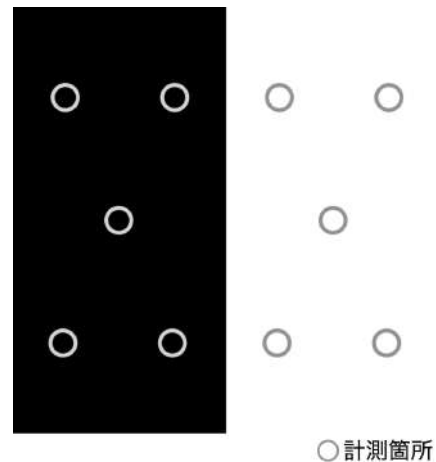


図 5: 投影するパターン

線照射時の黒色なので、図 5 を白黒反転したパターンを投影した。また、計測は図 5 に示すように、投影パターンの左半分と右半分のそれぞれ 5 点、計 10 点について行い、その平均値を算出した。

#### 3.2 結果

表 1 に輝度の測定結果を示す。紫外線パターンの照射時には、フォトクロミック材料の発色により、可視映像投影時の最小輝度値よりも低い輝度値が計測されていることがわかる。また、提案手法においては、可視光投影における最大輝度と、紫外線パターン照射時のスクリーン表面色の変化による映像の最小輝度がダイナミックレンジの範囲となる。実験の結果を用いて輝度コントラスト比を計算すると、可視映像のみの投影における値は 0.2997、提案手法における値は 0.3656 となった。これにより、提案手法によって一般的なプロジェクタによる投影よりも、コントラスト比において約 1.2 倍高コントラストな投影が可能であることがわかった。

### 4. おわりに

本稿では、プロジェクタとスクリーンのみで構成される投影環境における高コントラスト投影の実現に向けて、可視映像に重畳する形で紫外線パターンを投影可能なプロジェクタシステムを提案した。既存のプロジェクタを光源と光路、制御信号拡張することで、同軸光学系を用いた可視映



表 1: 最大輝度と最小輝度の比較

	輝度	
	最大 [cd/m <sup>2</sup> ]	最小 [cd/m <sup>2</sup> ]
可視映像	$1.2280 \times 10^2$	$0.6616 \times 10^2$
紫外線パターン	$0.6616 \times 10^2$	$0.5705 \times 10^2$
提案手法	$1.2280 \times 10^2$	$0.5705 \times 10^2$

像と紫外線パターンの重畳が可能なプロジェクタのプロトタイプを開発した。そして、フォトクロミックな性質を持つスクリーンにプロトタイプで投影することで、提案したプロジェクタシステムによる同軸上での可視映像と紫外線パターンの重畳投影により、可視映像のみの投影と比べて表現できる輝度の下限を下げ、コントラストを輝度コントラスト比において約 1.2 倍向上させられていることを確認した。

今後の展望として、現状のプロトタイプシステムでは、画角の狭さや色むらなどの問題があり、通常の可視光プロジェクタよりも性能が低いため、これを改善していく。また、白黒 2 値パターンの高コントラスト化の検討のみならず、2 ビット以上の色深度をもつ映像を高コントラスト化する際の最適な投影映像の生成アルゴリズムについても検討していきたいと考えている。

**謝辞** 本研究は、JSPS 科研費 JP19J00101, JP21H05798, JP23H04328 の助成を受けたものです。

### 参考文献

- [1] Oliver Bimber and Daisuke Iwai. Superimposing dynamic range. *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 27, No. 5, pp. 1–8, 2008.
- [2] Daisuke Iwai, Shoichi Takeda, Naoto Hino, and Kosuke Sato. Projection screen reflectance control for high contrast display using photochromic compounds and UV LEDs. *Optics Express*, Vol. 22, No. 11, pp. 13492–13506, 2014.
- [3] Daniel Saakes, Kevin Chiu, Tyler Hutchison, Biyeun M Buczyk, Naoya Koizumi, Masahiko Inami, and Ramesh Raskar. Slow display. In *ACM SIGGRAPH 2010 Emerging Technologies*, p. 22:1. 2010.
- [4] Daniel Saakes, Masahiko Inami, Takeo Igarashi, Naoya Koizumi, and Ramesh Raskar. Shader printer. In *ACM SIGGRAPH 2012 Emerging Technologies*, p. 18:1. 2012.
- [5] 橋田朋子, 西村光平, 苗村健. Hand-rewriting: 紙面上における人とコンピュータの協調的な加筆と消去. *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol. 19, No. 3, pp. 367–375, 2014.
- [6] Michael Wessely, Yuhua Jin, Cattalyya Nungensigkapiyan, Aleksei Kashapov, Isabel PS Qamar, Dzmitry Tsetserukou, and Stefanie Mueller. Chromouupdate: Fast design iteration of photochromic color textures using grayscale previews and local color updates. In *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 666:1–666:13, 2021.
- [7] 平木剛史, 岩井大輔, 川原圭博, 佐藤宏介. 同軸光学系による映像と紫外線の同時投影に向けた可視・紫外光投影プロジェクタの開発. 第 24 回 日本バーチャルリアリティ学会大会, p. 3C–2:1–4, 2019.
- [8] 亀井郁夫, 平木剛史, 福嶋政期, 苗村健. 赤外領域まで拡張した可視光通信プロジェクタの開発. 第 23 回 日本バーチャルリアリティ学会大会, p. 32B–3:1–4, 2018.
- [9] Edmund Optics. 反射防止コーティング. <https://www.edmundoptics.jp/knowledge-center/application-notes/lasers/anti-reflection-coatings/>. (Accessed on 07/04/2023).
- [10] Texas Instruments. Wavelength Transmittance Considerations for DLP DMD windows (Rev. D). <https://www.ti.com/lit/an/dlpa031e/dlpa031e.pdf>, 2018. (Accessed on 07/04/2023).