



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

RGB-UV Projector for Simultaneous Projection of Images and UV Light using a Coaxial Optical System

平木剛史^{1,2)}, 岩井大輔¹⁾, 川原圭博²⁾, 佐藤宏介¹⁾

Takefumi HIRAKI, Daisuke IWAI, Yoshihiro KAWAHARA, and Kosuke SATO

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,
hiraki@sens.sys.es.osaka-u.ac.jp, {daisuke.iwai, sato}@sys.es.osaka-u.ac.jp)

2) 東京大学 大学院工学系研究科 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, kawahara@akg.t.u-tokyo.ac.jp)

概要: 紫外光源を用いて、空間分割可能な形で紫外線を投影可能な紫外線プロジェクタは、フォトクロミック素材と組み合わせた発色型情報提示など様々な用途に使用されている。しかし、従来は紫外光投影のみが実現されており、紫外線パターンと可視映像の双方を投影する際には別々のプロジェクタとそれらのタイミング同期、位置合わせが必要であった。そこで本研究では、画素単位での映像と紫外線の同時投影の実現に向けて、可視光源と紫外光源の双方を同軸光学系で制御可能なプロジェクタを開発する。本稿ではプロジェクタの設計、実装例と、その可視映像、および紫外線パターン投影の性能について確認した結果を報告する。

キーワード: 紫外線投影、プロジェクタ、DMD、拡張現実感

1. はじめに

プロジェクタの光源に可視光源ではなく紫外光源を用いた紫外線プロジェクタは、高い空間解像度で紫外線のパターンを制御可能である。この特徴を生かして、紫外線硬化型樹脂をマテリアルとして用いる 3D プリンタにおけるリソグラフィ [1] や、紫外線照射によって発色するフォトクロミック素材と組み合わせた発色型情報提示 [2, 3, 4, 5, 6] などさまざまな形で利用されている。しかし、紫外線プロジェクタは紫外光投影の機能しか持たないため、紫外線パターンと可視映像の双方を投影する際には、紫外線プロジェクタと通常の可視光プロジェクタの 2 台を別々に用いた上で、これらの投影タイミングの同期と投影映像の位置合わせを行う必要があった。これにより、通常の可視映像と紫外線パターンの同時、同位置への投影は煩雑なものとなり、その組み合わせによる応用展開を制限する要因となっていた。

そこで、本研究では画素単位での映像と紫外線の同時投影の実現に向けて、可視光源 (RGB) と紫外光源の双方を有するプロジェクタシステムを提案する。RGB 光源と紫外光源の双方について、DMD (Digital Micromirror Device) を空間変調素子とする DLP プロジェクタに搭載することで、提案プロジェクタを同軸光学系で構築する。これにより、可視映像と紫外線パターンの幾何学的整合性 (位置ずれ) が原理的に存在しないプロジェクタシステムを実現することができる。また、DLP プロジェクタの光源制御におけるフレームワークをそのまま用いる形で、可視光源 (RGB) と紫外光源の 4 つの光源の制御することで、プロジェクタ用ファ

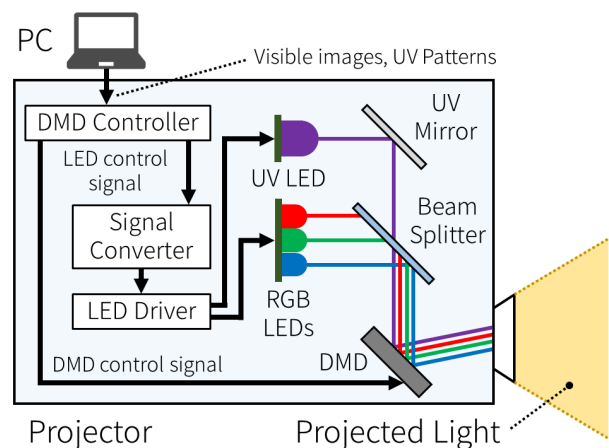


図 1: 提案する同軸光学系による可視・紫外光投影プロジェクタシステムの概要

ムウェアの仕様に沿った形での可視映像と紫外光源パターンの投影を実現する。本稿では、提案プロジェクタの設計と実装、そしてその可視映像、および紫外線パターン投影の性能について確認した結果を報告する。

2. 設計と実装

本研究では、画素単位での映像と紫外線の同時投影の実現に向けて、可視光源と紫外光源の双方を同軸光学系で制御可能なプロジェクタを開発する。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、LED を光源として用いる DLP プロジェクタとして、提案プロジェクタシステムを設計、実装する方法を検討する。LED を光源として用いる DLP プロジェクタにおいては、3 つの可視光源 (RGB) からの光が、それぞれ 3 つの光路を通過して空間変調素子である DMD に入光する光学系となっている。しかし、本研究では、この 3 つの可視光源に紫外光源を加えた 4 つの光源からの光を DMD に入光できる光学系を構築する必要がある。そこで、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、紫外光 LED を紫外光源として追加で配置しても、既存の 3 つの光路を持つ光学系に組み込む形で提案プロジェクタを実現することができる。

次に、DLP プロジェクタの光源制御におけるフレームワークに変更を加えずに光源制御を実現する方法を検討する。提案プロジェクタシステムでは、3 つの可視光源 (RGB) に紫外光源を加えた 4 つを制御する必要があるため、紫外光源を制御するための信号入力を新たに準備する必要がある。しかし、単純に信号入力を追加すると、DLP プロジェクタの光源制御フレームワークでは対応できなくなり、映像とパターンの投影が煩雑なものになってしまう。そこで、筆者らが提案した信号変換手法 [7] を応用することで、光源制御フレームワークをそのまま用いる形で、RGB の 3 光源に加えて紫外光源を制御を実現する。この信号変換手法は、DLP プロジェクタで映像を投影する際、RGB 光源を順番に切り替えて点灯させていくため、各 2 色以上を同時に点灯させることがなく、3 つの信号入力の ON / OFF の組み合わせ ($2^3 = 8$ 通り) のうち、R, G, B それぞれが点灯している状態、およびすべて点灯していない状態の計 4 通り以外は使用されないことに着目したものである。

表 1 に信号変換において実現される真理値表を示す。(1) は消灯状態であり、(2), (3), (4) は 3 つの可視光源 (RGB) の

表 1: 信号変換において実現される真理値表

	R _{in}	G _{in}	B _{in}	R _{out}	G _{out}	B _{out}	UV
(1)	F	F	F	F	F	F	F
(2)	F	F	T	F	F	T	F
(3)	F	T	F	F	T	F	F
(4)	T	F	F	T	F	F	F
(5)	F	T	T	F	F	F	F
(6)	T	F	T	F	F	F	F
(7)	T	T	F	F	F	F	T
(8)	T	T	T	T	T	T	F

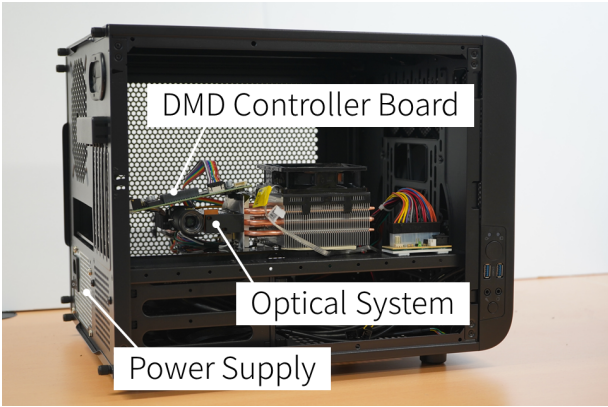


図 2: 実装した可視・紫外光投影プロジェクタシステムの外観

うちの 1 色をそれぞれ点灯させる状態で、映像の投影に使用し、(7) は紫外光源 (UV) を点灯させる状態で紫外パターンの投影に使用する。(5), (6), (8) については該当する入力状態に設定されないため使用されない。この時、プロジェクタ用ファームウェアの設定においては、赤 (R_{in}) と緑 (G_{in}) を同時点灯に設定した際の色である黄色が、紫外光源を点灯させる際に設定する色となる。

2.2 実装

本稿では、DLP プロジェクタ評価キット (DLP LightCrafter 4500, Texas Instruments) を拡張する形で提案プロジェクタシステムを実装した。図 2 に提案プロジェクタの外観を示す。DMD については、DLP LightCrafter 4500 に搭載されている DMD (DLP4500FQE, Texas Instruments) をそのまま使用した。図 3 に使用した DMD の波長帯域特性を示す。DLP4500FQE は可視光帯域用途の DMD であるが、提案プロジェクタに搭載する紫外光源の波長 (360 nm) における反射率が約 85 % と十分良好な特性を有している [8]。よって、この DMD をそのまま使用しても、可視光と紫外光の両方を空間変調可能なプロジェクタシステムを構築することができる。

DMD コントローラを搭載したプロジェクタ制御基板は DLP LightCrafter 4500 で使用されているものをそのまま使用した。また、表 1 で示した光源制御信号の変換を実現するため、ロジック IC を用いた信号変換基板を設計、実装した。

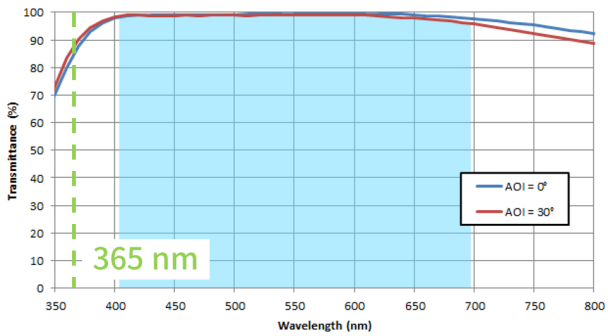


図 3: 使用した DMD の入射光反射率における波長帯域特性 (文献 [8] の図を元に作成)

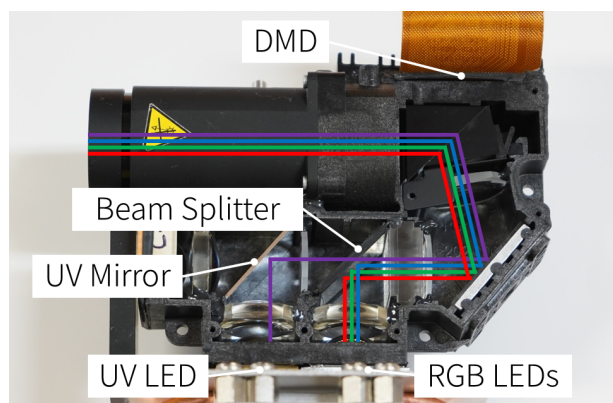


図 4: 構成した同軸光学系の様子。紫外光源からの光線は紫外光用ミラーで反射された後、可視光源からの光線とビームスプリッタで統合されて DMD に入射する。

可視光源には高輝度フルカラー LED (SBM-40-RGBW-SC41-QD100, Luminus Devices) を使用した。このフルカラー LED の光束は、赤色光、緑色光についてそれぞれ 90 lm, 210 lm であり、青色光の放射束は最小で 1 W である。紫外光源には、紫外光 LED (CBM-40-UV-X32-CB365-22, Luminus Devices) を使用した。この紫外光 LED の波長帯は 365 μm – 370 μm であり、放射束は最小で 3.3 W である。LED 光源を駆動するドライバ回路として、RGB 光源用に定格電流が 1 A のドライバ基板 (STEVAL-ILL078V1, STMicroelectronics) と紫外光源用に定格電流が 3 A のドライバ基板 (STEVAL-ILL065V1, STMicroelectronics) の 2 種類を用いた。また、可視光と紫外光を混合するためのビームスプリッタ (プレート型 B/S 75R/25T 12.5 X 17.5, Edmund Optics) を光路上に配置した。そして、光路上で紫外光を効率的に反射させるため、光学系に組み込み可能な紫外光用ミラーを作製した。DLP LightCrafter 4500 の光学系で用いられているダイクロイックミラー面に対し、紫外線反射効率の高いアルミニウムをスパッタリングにより成膜することで、紫外光用ミラーとして構成した。この時、アルミニウム膜の厚みが 200 nm となるように設定してスパッタリングを行った。図 4 にこれらの構成要素を組み込んだ光学系の様子を示す。この光学系によって、RGB 可視光源と紫外光源からの光線を 1 つの DMD に入光させることが可能となる。

また、プロジェクタの構成部品は PC ケース (Core V21, Thermaltake) 内に格納し、PC 用 400 W 電源 (KRPW-L5-400W/80+, 玄人志向) をプロジェクタの電源として使用した。

3. 実験

提案プロジェクタを用いて、可視映像と紫外線パターンの同軸光学系による同時投影が実現されているかを明らかにするために実験を行った。

3.1 概要

提案したプロジェクタシステムで、可視映像と紫外線パターンをそれぞれ投影し、撮影する実験を行った。投影の際は、フィルムスクリーン (FSf-130n, ファーストスクリーン)

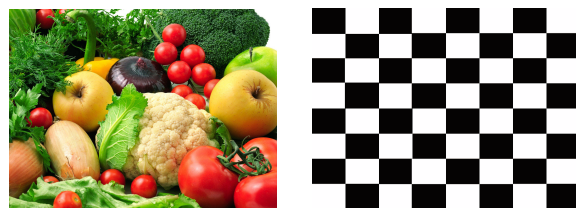


図 5: 可視映像に使用したテスト画像 図 6: 紫外線パターンに使用したテスト画像

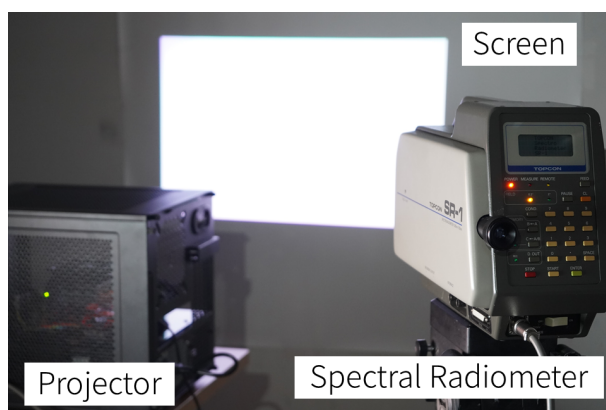


図 7: 分光放射計を用いた輝度計測実験の様子

を貼り付けた壁面を投影スクリーンとして使用し、プロジェクタとスクリーン間の距離は 80 cm であった。プロジェクタのフォーカスは、可視映像に対して合致するように調整を行った。実験は暗室内で行い、撮影にはデジタルカメラ ($\alpha 7 \text{ III}$, SONY) を用いた。カメラ撮影の際にも、フォーカスは可視映像に対して合致するように調整し、紫外線パターンについても同一のフォーカス設定で撮影した。図 5 に可視映像として使用した画像を、図 6 に紫外線パターンとして使用した画像をそれぞれ示す。

加えて、投影された可視映像の輝度を計測する実験を行った。プロジェクタとスクリーンは同様の状態で設置し、白色画像を投影した際の映像中心の輝度を分光放射計 (SR-1, トプコン) で計測した。図 7 に輝度計測実験の様子を示す。

3.2 結果

図 8 に投影された可視映像の様子を、図 9 に投影された紫外線パターンの様子を示す。可視映像、紫外線パターン共に正しく投影されている様子が見て取れる。加えて、撮影画像については双方共フォーカスが合致した状態で撮影されており、同軸光学系による投影が実現されていることがわかる。これらより、提案プロジェクタシステムを用いて可視映像と紫外線パターンを同軸光学系によって投影可能であることが確認できた。また、分光放射計で測定された白色画像の輝度は 18.73 cd/m^2 であった。

4. まとめ

本稿では、画素単位での映像と紫外線の同時投影の実現に向けて、可視光源と紫外光源の双方を同軸光学系で制御可能なプロジェクタについて提案した。既存の可視光源を

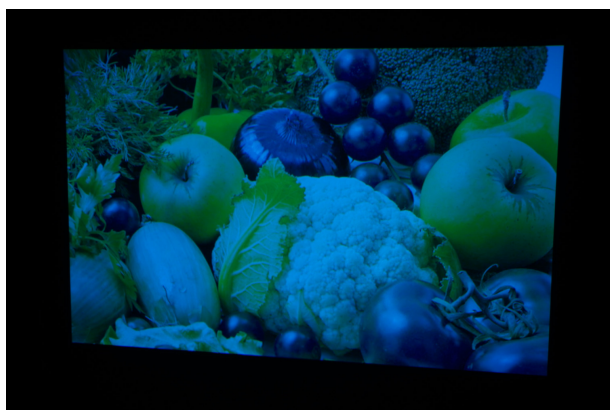


図 8: 投影された可視映像を撮影した様子

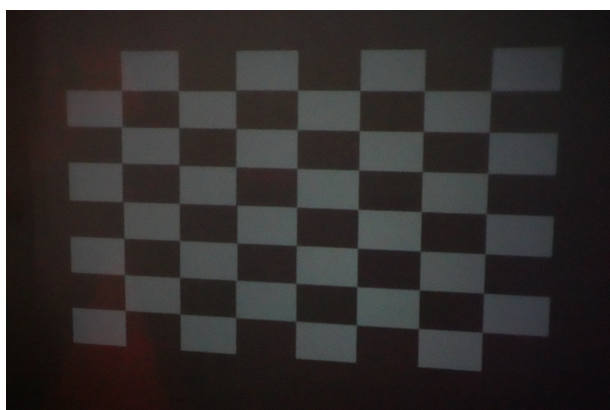


図 9: 投影された紫外線パターンを撮影した様子

持つ DLP プロジェクタを拡張する形で、カラー LED 光源と紫外 LED 光源を光学系に組み込み、同軸光学系による可視・紫外光投影プロジェクタを開発した。また、DLP プロジェクタの光源明滅制御の特徴に着目し、可視映像投影の仕様に沿った形で可視光源と紫外光源の明滅制御を実現する手法を実装した。そして、提案したプロジェクタが設計通りの性能を有していることを実験において確認した。

今後の展望としては、提案したプロジェクタシステムとフォトクロミック素材を使用した投影対象と組み合わせ、発色型情報提示と映像投影による情報提示が複合した投影型拡張現実感システムへの応用を検討していきたいと考えている。

謝辞 本研究は、JST ERATO 川原万有情報網プロジェクト (JPMJER1501)、JSPS 科研費 JP15H05925, JP19J00101 の助成を受けたものです。また、スパッタリング工程は、文部科学省 ナノテクノロジープラットフォーム 東京大学微細加工拠点の支援で実施されました。

参考文献

- [1] 萩原恒夫, “3D プリンターとその応用, 特に光造形法を中心に,” 光技術コンタクト, vol.52, no.8, pp.30–38, 2014.
- [2] D. Saakes, K. Chiu, T. Hutchison, B.M. Buczyk, N. Koizumi, M. Inami, and R. Raskar, “Slow Display,”

ACM SIGGRAPH 2010 Emerging Technologies on - SIGGRAPH '10, p.22:1, 2010.

- [3] 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.
- [4] 西村光平, 小泉直也, 橋田朋子, 苗村 健, “紙面への発色型映像投影技術の多色化,” 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.19, no.3, pp.377–385, sep 2014.
- [5] 小泉直也, 橋本悠希, 苗村 健, “紫外線制御を用いた漆器に対する文様描画手法,” ヒューマンインタフェース学会論文誌, vol.18, no.1, pp.27–34, feb 2016.
- [6] Y. Mikawa, T. Sueishi, T. Hayakawa, and M. Ishikawa, “Laser-based Photochromic Drawing Method for Rotating Objects with High-speed Visual Feedback,” Proceedings of the 26th IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces - IEEE VR '19, p.2 pages, 2019.
- [7] 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, pp.32B–3:1–4, 2018.
- [8] Texas Instruments, “Wavelength Transmittance Considerations for DLP DMD Windows (Rev. D),” 2018. <http://www.ti.com/lit/an/dlpa031d/dlpa031d.pdf>