

影抑制と焦点ぼけ補償とを動的に調整可能な 大開口同軸二重投影システム

楠山弘基¹⁾, 影山雄太¹⁾, 岩井大輔¹⁾, 佐藤宏介¹⁾

Hiroki KUSUYAMA, Yuta KAGEYAMA, Daisuke IWAI, 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, {hiroki.kusuyama, kageyama}@sens.sys.es.osaka-u.ac.jp, {daisuke.iwai.es, k.sato.es}@osaka-u.ac.jp)

概要: プロジェクションマッピングにおいて影が発生すると、投影像が欠落するため、シーンの実体感が低下する。本研究では大型フレネルレンズを用いて大開口投影を実現し、遮蔽物による影を抑制する。しかし大開口投影ではレンズ収差の影響が大きくなり、投影結果の高周波成分が大きく減衰する。そこで同一光軸上に配置した一般的なレンズ開口のプロジェクタから重畳投影する。本稿では、入力画像へのぼけ補償と、影抑制性能と高周波成分補償との動的調整方式を導入した。

キーワード: 拡張・複合現実、プロジェクションマッピング、影抑制、焦点ぼけ補償

1. はじめに

プロジェクションマッピングは、プロジェクタを用いて実物体に映像を投影することで、その色や質感を変化させる技術である。ユーザが特別な装置を装着することなく体験できることから、エンターテインメント、医療・作業支援など幅広い分野で利用されている [1]。しかし、プロジェクタからの投影光がユーザの身体の一部などの障害物で遮られることで、投影結果に影が生じるという問題がある。これは、一般的なプロジェクタに使用されるレンズの開口が小さく、プロジェクタの一画素からの出射光が障害物によって全て遮蔽されることで発生する。

プロジェクタ投影における影を抑制する最も一般的な手法は、複数台のプロジェクタを用いる手法である [2, 3]。分散配置された複数のプロジェクタから、投影領域の各点が投影されているため、全てのプロジェクタからの投影光が遮られない限り、影を抑制することが可能である。しかし、投影結果の幾何的および色の整合性を取るためには、プロジェクタの台数分の入力画像をそれぞれ補正する必要があり、計算コストが増加する。また、影領域の輝度低下が顕著な場合には、影や遮蔽物を検出して映像上の影領域の輝度を上げる処理が必要となる [4]。

これらの問題に対応するため、著者らは大開口フレネルレンズを用いて影を抑制する手法を提案した [5]。プロジェクタの一画素から出る光は放射状に広がってフレネルレンズに入射した後、投影面上の一点に集光される。このとき、開口が小さい場合よりも広い角度から集光されるため、遮蔽物による影を抑制できる。しかし大開口レンズを用いた投影（以降、大開口投影）では、レンズ収差や浅い被写界深度によって投影結果に大きなぼけが生じ、画像の高周波成分が減衰する。そこで、同一光軸上に一般的なレンズ開口

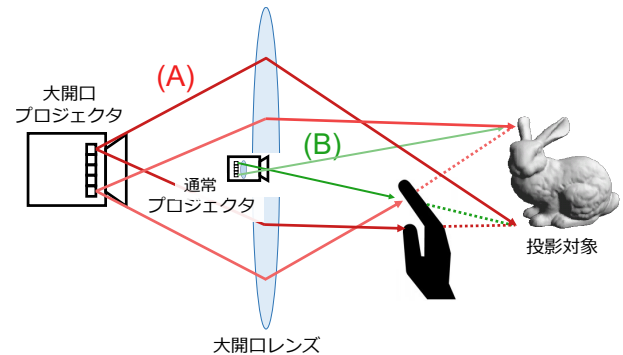


図 1: 大開口同軸二重投影システムによる影抑制

のプロジェクタをもう一台配置し、大開口投影の映像に重畳して投影する（以降、通常投影）ことで、減衰した高周波成分を補償する、大開口同軸二重投影システムを構築した (図 1)。これにより、大開口投影のみの場合と比較して高周波成分の減衰をある程度抑制できたものの、依然として投影された映像の解像度は、従来のプロジェクタよりも著しく低かった。

そこで本研究では、大開口同軸二重投影システムにおいて、各プロジェクタへの入力画像にぼけ補償を目的とした前処理を施すことで、投影結果の解像度を向上させる。また、本システムの各プロジェクタの出力光量を調整することで、影抑制性能と高周波成分補償性能を調整可能とした。本稿では、出力光量の比を変化させることで、影抑制性能や投影結果の画質がどのように変化するかを調査した。

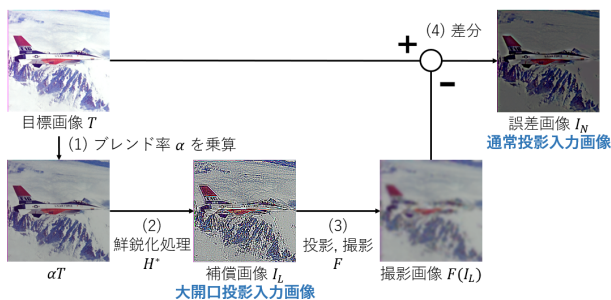


図 2: 各プロジェクタへの入力画像生成フロー

2. 提案手法

2.1 大開口同軸二重投影システム

提案システムには、大開口フレネルレンズによって影の抑制を実現する光路 (A) と、高周波成分を補償する投影を行う光路 (B) の 2 種類が存在する (図 1)。以降本稿では、大開口投影を行うプロジェクタを大開口プロジェクタ、通常投影を行うプロジェクタを通常プロジェクタと呼ぶ。光路 (A) では、大開口プロジェクタの各画素を点光源として放射される光を大開口フレネルレンズで集光する。投影結果は大開口投影によるばけで高周波成分の減衰した画像となるが、フレネルレンズ上に光が十分に拡大しているため、遮蔽物による真影の発生を抑制することができる。光路 (B) では、使用しているレンズの開口が小さいため遮蔽物によって真影が発生しやすくなるが、高周波成分の投影としては有利で鮮明な結像を得やすい。また、レンズの開口数 NA が小さいため被写界深度は深くなる。

大開口投影と通常投影を同時に行う二重投影では、光路 (A) を通る光線が全て遮蔽されることは少なく、遮蔽物による影を抑制することができる。また、通常投影が遮蔽されていない非影領域において、大開口投影で減衰した高周波成分が通常投影によって補償されるため、その減衰を抑制することができる。

2.2 入力画像生成

各プロジェクタへの入力画像の生成フローを図 2 に示す。本節では、各処理について手順を追って説明する。

2.2.1 二重投影における大開口投影の重み

大開口同軸二重投影では、2 台のプロジェクタが影抑制と高周波成分補償という異なる役割を担う。そのため、2 台のプロジェクタの出力光量の比を調整することで、利用環境や投影画像に応じて、影抑制性能と高周波成分補償性能を調整することができる。

本稿では、目標画像の輝度値のうち、大開口プロジェクタが担当する輝度値の割合を、重み α ($0 \leq \alpha \leq 1$) と定義する。 α が 1 に近いほど大開口投影の割合が高くなり、影抑制性能は高くなる。逆に、 α が 0 に近いほど通常投影の割合が高くなり、高周波成分補償性能が高くなる。

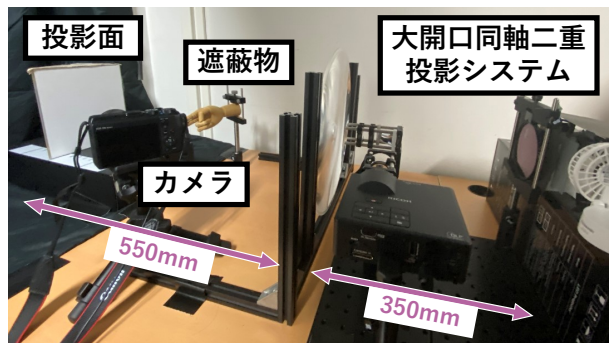


図 3: 実験環境

2.2.2 大開口プロジェクタへの入力画像

投影像に生じるばけは、焦点ぼけの生じる過程を計算モデル化し、その逆問題を解くことで鮮鋭化した補償画像を投影することで、抑制可能である。本研究では、CNN (Convolutional Neural Network) を用いた補償画像生成手法 [6] を利用して、大開口投影の入力画像を生成した。以上より前項で述べた重み α を用いて、大開口投影の入力画像 I_L は以下のように生成される。

$$I_L = H^*(\alpha T), \quad (1)$$

ここで T は目標画像、 H^* は鮮鋭化処理を表す。以降本稿では、式 1 を用いて作成された大開口投影の入力画像を補償画像と呼ぶ。

2.2.3 通常プロジェクタへの入力画像

通常投影では、目標画像中の大開口投影で実現しきれなかった高周波成分を投影する。そのため本研究では、大開口投影の投影結果を撮影し、目標画像から撮影画像の画素値の差分を取った画像を、通常投影の入力画像とした。以上より通常投影の入力画像 I_N は、以下のように生成される。

$$I_N = T - F(I_L), \quad (2)$$

ここで F は大開口プロジェクタによる投影およびカメラによる撮影処理を表す。以降本稿では、式 2 を用いて作成された通常投影の入力画像を誤差画像と呼ぶ。

3. 投影実験

2.2 節で述べた入力画像生成手法の有効性を確かめるために、投影実験を行った。また、重み α を変化させて投影を行い、提案システムの影抑制性能と投影結果の画質の変化について調査した。

3.1 実装

LCD パネルが露出するように外装を切断したプロジェクタ (DBPOWER L23, 画素数: 1920×1080)、レンズを取り外したプロジェクタ (RICOH PJWXC1110, 画素数: 1280×800)、RGB カメラ (CANON EOS M6 Mark II, 画素数: 6960×4640) を用いて、大開口同軸二重投影システムを実装した (図 3)。ここで、2 台のプロジェクタは投






				
目標画像	(a)	(b)	(c)	(d)
大開口投影入力画像	目標画像	補償画像	目標画像	補償画像
通常投影入力画像	目標画像	目標画像	誤差画像	誤差画像
PSNR	19.6	20.1	21.6	23.9
SSIM	0.736	0.756	0.836	0.848
LPIPS	0.941	0.841	0.596	0.632

図 4: $\alpha = 0.8$ としたときの入力画像の生成条件による投影結果の比較 (緑色のセルは、評価が最も高かったことを表す。)

影領域が一致するように配置した。使用したフレネルレンズは、直径 318 mm, 焦点距離 213 mm である。また、通常プロジェクタの投影光が直進するよう、フレネルレンズの中心部に直径 30 mm の穴を開けた。

3.2 実験手順

本実験は暗室環境下で行った。投影面として、白色スクリーンをフレネルレンズから 550 mm 程度離れた位置に、光軸に対して垂直に配置した。投影結果の見えを同一輝度の条件で比較するため、目標画像にガンマ補正および色補償を施してプロジェクタへの入力画像を作成した。

各プロジェクタへの入力画像について、重み α ($0 \leq \alpha \leq 1$) を 0.1 ずつ変化させて補償画像と誤差画像を生成した。補償 (誤差) 画像を投影した場合と目標画像をそのまま投影した場合で、投影結果を撮影し、撮影画像と目標画像との比較を行うことで画質を評価した。画質評価には、客観的な評価指標である Peak Signal to Noise Ratio (PSNR), Structural SIMilarity (SSIM), Learned Perceptual Image Patch Similarity (LPIPS) [7] の 3 種類を用いた。PSNR と SSIM は値が大きいほど画質が良いことを示し、LPIPS は値が小さいほど画質が良いことを示す。

また、提案システムの影抑制性能を調査するため、遮蔽あり条件では投影面から 250 mm 離れた位置に人間の指の形の遮蔽物を配置して、投影結果に生じる影を確認した。

3.3 結果と考察

$\alpha = 0.8$ における各条件の投影結果を図 4 に示す。目標画像をそのまま投影した画像 (図 4 (a)) と比較して、補償画像を使用した場合 (図 4 (b)) および誤差画像を使用した場合 (図 4 (c)) には画像中の細かい模様がより鮮明になった。また PSNR と SSIM において、補償画像と誤差画像を使用した場合 (図 4 (d)) が最も良い結果となっており、補償画像および誤差画像を使用する有効性が示された。

重み α を変化させて補償画像と誤差画像を生成し、投影した結果を図 5 に示す。遮蔽あり条件において、通常投影

のみ ($\alpha = 0$) では、全ての投影光が遮蔽物によって遮蔽され、投影結果の一部が不可視となっている。一方、二重投影 ($\alpha > 0$) では、投影結果が完全に不可視となることはなく、 α が大きくなるにつれて影抑制性能が向上した。

一方、 α を大きくするにつれて、投影結果の画質は低下した。遮蔽なし条件における投影結果について、画質評価指標の値の変化を図 6 に示す。 α が大きくなるにつれて画質の評価値が低下した。実際に図 5 において、通常投影のみ ($\alpha = 0$) で得られていた鮮明な投影結果が、 α が大きくなるにつれて、細かい模様が少しずつ不鮮明となるだけでなく、ぼけによって投影結果全体が白みがかかることで、輝度コントラストが低下した。しかし、通常投影で誤差画像を投影した場合 (図中赤、緑線) では、その他の条件と比較して画質低下が抑制されており、その有効性が示された。ここで、補償画像および誤差画像を投影した条件に着目すると、 α の変化による評価値の変化は非線形な傾向を示した。 $0 \leq \alpha \leq 0.6$ では評価値の低下が小さく、 $\alpha \geq 0.6$ において評価値が大きく低下する傾向が見られた。

4. おわりに

本研究では、大開口同軸二重投影システムについて、投影結果のぼけを補償するための前処理を検討した。また、二重投影における大開口投影の重み α を変化させて投影を行い、影抑制性能や投影結果の画質への影響について調査した。

本研究では、二次元平面を投影対象とし、投影対象が移動しない静的なシーンを想定していた。今後は、移動する三次元物体を投影対象として、物体の位置に応じた補償画像および誤差画像をリアルタイムで生成する、動的プロジェクションマッピングを実装する予定である。

参考文献

- [1] Hiroto Nishino, Etsuro Hatano, Satoru Seo, Takashi Nitta, Tomoyuki Saito, Masaaki Nakamura, Kayo Hattori, Muneo Takatani, Hiroaki Fuji, Kojiro Taura,

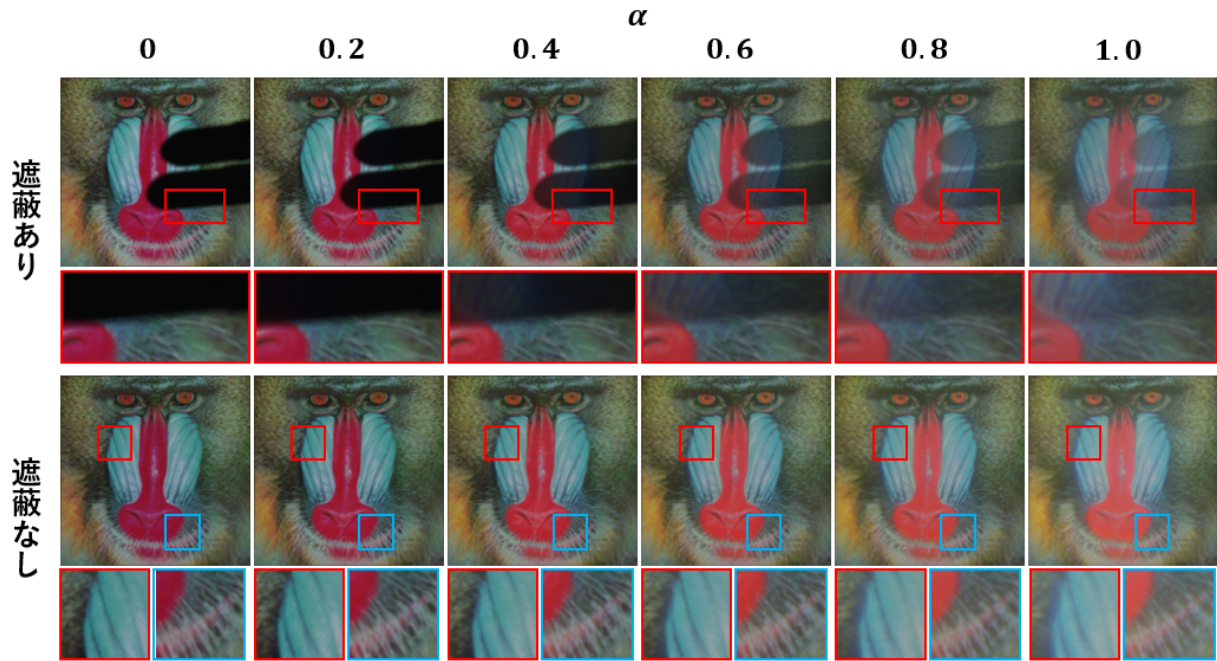


図 5: 重み α の変化による影抑制性能および投影結果の比較

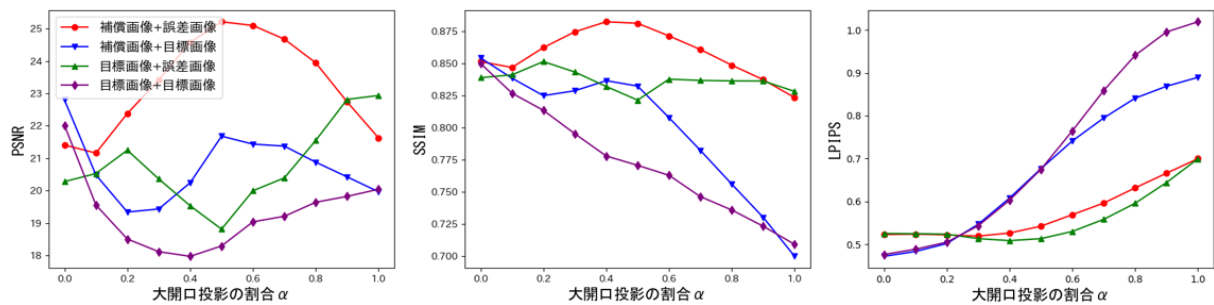


図 6: 重み α の変化による投影結果の画質の変化 (赤：補償画像と誤差画像，青：補償画像と目標画像，緑：目標画像と誤差画像，紫：目標画像と目標画像 の投影結果)

et al. 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, No. 6, pp. 1134–1140, 2018.

- [2] Christopher Jaynes, Stephen Webb, R Matt Steele, Michael Brown, and W Brent Seales. Dynamic shadow removal from front projection displays. In *Proceedings Visualization, 2001. VIS'01.*, pp. 175–555. IEEE, 2001.
- [3] Rahul Sukthankar, Tat-Jen Cham, and Gita Sukthankar. Dynamic shadow elimination for multi-projector displays. In *Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. CVPR 2001*, Vol. 2, pp. II–II. IEEE, 2001.
- [4] Jay Summet, Matthew Flagg, Tat-Jen Cham,

James M Rehg, and Rahul Sukthankar. Shadow elimination and blinding light suppression for interactive projected displays. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, Vol. 13, No. 3, pp. 508–517, 2007.

- [5] 楠山弘基, 影山雄太, 岩井大輔, 佐藤宏介. 大開口同軸二重投影システムによる影抑制. 第 67 回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集 (SCI'23), 2023.
- [6] Yuta Kageyama, Daisuke Iwai, and Kosuke Sato. Online projector deblurring using a convolutional neural network. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 28, No. 5, pp. 2223–2233, 2022.
- [7] Richard Zhang, Phillip Isola, Alexei A Efros, Eli Shechtman, and Oliver Wang. The unreasonable effectiveness of deep features as a perceptual metric. In *CVPR*, 2018.