

# 大開口フレネルレンズを用いた影なし投影システムにおけるモデルベース投影ボケ補償

楠山 弘基<sup>\*1</sup> 影山 雄太<sup>\*1</sup> 岩井 大輔<sup>\*1</sup> 佐藤 宏介<sup>\*1</sup>

Hiroki Kusuyama<sup>\*1</sup>, Yuta Kageyama<sup>\*1</sup>, Daisuke Iwai<sup>\*1</sup> and Kosuke Sato<sup>\*1</sup>

**Abstract** – プロジェクションマッピングにおいて投影光が遮蔽されると、投影結果に影が発生し、投影像の一部が欠落する。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。しかし大型フレネルレンズを用いた投影ではレンズ収差や迷光の影響により、投影結果の解像度やコントラストが低下する。そこで、大開口投影と同一の光軸上に、一般的なレンズ開口のプロジェクタを追加配置し、大開口投影で減衰した空間周波数成分を補償する。本論文では、大開口投影における画質劣化過程をモデル化し、投影結果のボケを抑制可能なプロジェクタ入力画像ペアの生成手法を提案する。

**Keywords** : 影なし投影, フレネルレンズ, 点拡がり関数, 投影ボケ補償

## 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 [1]。複数のユーザが特別な装置を装着することなく同時に体験できることから、エンターテインメント [2]、医療 [3] など幅広い分野での利用が期待されている。しかし、投影光がユーザの身体の一部などで遮られることで、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、プロジェクタの画素から出た光が全て障害物によって遮られることで発生する。

最も一般的な影抑制手法は、分散配置した複数台のプロジェクタから投影領域の各点に投影を行う手法である [4, 5]。しかし、投影結果の幾何的整合性を取るためには、各プロジェクタの入力画像を補正する必要があるため、影抑制における遅延が免れない。一方、大面積の再帰透過光学素子を用いて広い視野角から投影を行う手法では、光学的に影を抑制可能であるため、遅延のない影なし投影が実現できる [6, 7]。しかし光学素子の特性上、光源と面対称な形状でのみ結像するため、光源サイズ以上に画角を広げることができない。

そこで本研究では、光源との位置関係によって画角を変更可能である、大開口フレネルレンズを用いて、影なし投影を実現する。点光源から出た光は拡散されてフレネルレンズに入射し、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。しかし大開口フレネルレンズを用いた投影 (以降、大開口投影) では、レンズ収差に加えて、フレネルレンズ

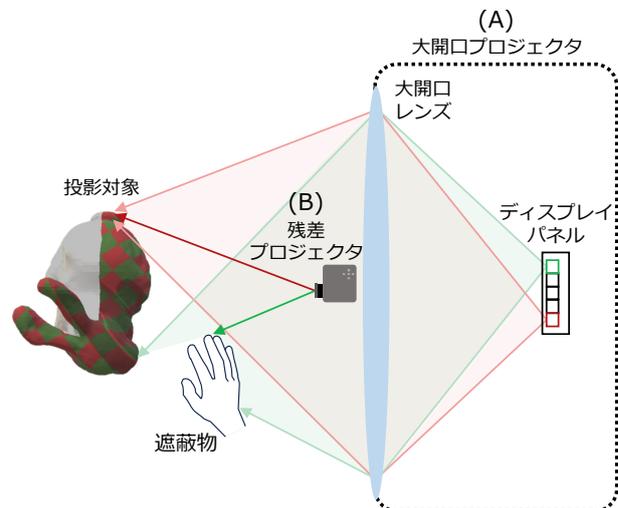


図1 大開口同軸二重投影システムによるボケ補償を伴う影抑制

Fig.1 Shadow suppression by large-aperture coaxial dual projection system

の切面面で生じる迷光や回折光の影響で投影結果に大きなボケが生じ、投影結果の解像度やコントラストが低下する [8]。そこで、一般的な開口のレンズを持つプロジェクタを、同一光軸にもう一台配置して、大開口投影では原理上投影不可能な高周波成分を補償する (以降、残差投影)。これら 2 種のプロジェクタで同じ位置に投影する、大開口同軸二重投影では、解像度・コントラストの低下を抑えながら、影なし投影を実現可能である (図 1)。

本論文では、大開口同軸二重投影システムにおいて、2 種のプロジェクタに入力する画像の生成手法を提案する。残差投影は高周波成分の投影に有利であるため、その出力輝度を向上させることで、ボケ補償性能を向上させることができる。一方で、残差投影は遮蔽物に

<sup>\*1</sup>大阪大学

<sup>\*1</sup>Osaka University

よって完全に遮蔽されるため、出力輝度が高い場合には、投影結果の影領域の輝度低下が顕著となる。そのため残差投影は、大開口投影では投影不可能な空間周波数成分のみを、効率的に投影する方が望ましい。我々は、大開口投影の劣化を正確にモデル化することで、影抑制性能を落とすことなく投影結果のボケを抑制可能な入力画像を生成した。

## 2 提案手法

### 2.1 大開口同軸二重投影

提案システムは、大開口フレネルレンズを用いて影抑制を実現する大開口プロジェクタ (A) と、高周波成分を補償する残差プロジェクタ (B) からなる (図 1)。大開口プロジェクタでは、ディスプレイパネル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。これらの光は十分に拡散してフレネルレンズに入射するため、遮蔽物による影を抑制できる。しかし、レンズ収差やフレネルレンズで発生する迷光・回折光によって、投影結果の高周波成分は減衰する。残差プロジェクタは、これらの空間周波数成分を補償する投影を行う。一般的な開口のレンズを使用しているため、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。

これら 2 種のプロジェクタを同一光軸上に配置し、その投影領域を一致させることで、幾何補正処理の必要なく、双方の利点を生かすことができる。大開口同軸二重投影では、影抑制が可能であり、かつ遮蔽されていない非影領域において、残差投影による高周波成分の補償が可能となる。

ここで残差プロジェクタは、大開口プロジェクタよりも鮮明な映像を投影できるため、その出力輝度を高くすることで、ボケ補償の効果を高めることができる。しかし、残差投影による映像には遮蔽によって影が生じるため、高輝度な映像を残差プロジェクタに入力すると、投影結果の影領域の輝度が大きく低下する。そこで、影領域の輝度低下を抑制しながら、効率的に投影結果の画質劣化を抑制可能な入力画像を生成する。

### 2.2 大開口投影における画質劣化のモデル化

投影結果の画質劣化を抑制可能な入力画像を生成するには、投影系における画質劣化過程を正確にモデル化する必要がある。一般的に投影系の画質劣化過程は、ドットパターンを投影することで取得可能な点拡がり関数 (Point Spread Function: PSF) を、ガウス分布でフィッティングすることでモデル化される [9]。これは、一般的な屈折レンズを用いた際に生じる収差などの劣化を想定している。しかし、フレネルレンズを用いる我々のシステムでは、迷光や回折光によるボケが同時に生じるため、単一のガウス分布では正確にモデ

ル化することはできない。

そこで、収差によるボケと、迷光や回折光によるボケを異なる分布で表現し、それらを混合することで PSF をモデル化する。収差によるボケは、従来通り二次元ガウス分布で表現する。迷光や回折光によるボケは、収差によるボケよりも広範囲に影響を及ぼすことから、二次元ガウス分布よりも裾の重い、自由度 3 の二次元  $t$  分布で表現する。これら二種の分布関数を、 $\alpha : 1 - \alpha$  で重み付けした以下の分布関数で、PSF のフィッティングを行った。

$$h(\mathbf{x} | \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\Sigma}_1, \boldsymbol{\Sigma}_2, \alpha) = \alpha h_g(\mathbf{x} | \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\Sigma}_1) + (1 - \alpha) h_t(\mathbf{x} | \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\Sigma}_2, 3), \quad (1)$$

ここで、 $h_g(\cdot)$  は二次元ガウス分布、 $h_t(\cdot)$  は二次元  $t$  分布であり、 $\mathbf{x}$  はピクセル座標、 $\boldsymbol{\mu}$  は平均ベクトル、 $\boldsymbol{\Sigma}_1, \boldsymbol{\Sigma}_2$  は分散共分散行列を表す。また簡単のために、二次元  $t$  分布では等方性を仮定した。

### 2.3 入力画像生成

単一プロジェクタにおける投影劣化を抑制可能な入力画像  $I^*$  は、以下の最適化問題を解くことで生成することが可能である [10]。

$$I^* = \arg \min_I \|T - FI\|^2, \quad (2a)$$

$$\text{subject to } \forall \mathbf{x}, 0 \leq I(\mathbf{x}) \leq 255, \quad (2b)$$

ここで、 $T$  は目標画像、 $\mathbf{x}$  はプロジェクタのピクセル座標、 $F$  は劣化関数を行列形式で表したものである。式 2b はプロジェクタのダイナミックレンジ制約である。

影領域の輝度低下を抑制しながら、投影結果の画質劣化を抑制可能な入力画像を生成するには、目標画像中のできる限り幅広い空間周波数成分を、大開口プロジェクタが投影する必要がある。そこで以下の最適化問題を解くことで、大開口プロジェクタ入力画像  $I_{LA}^*$  と残差プロジェクタ入力画像  $I_R^*$  を生成した。

$$I_{LA}^*, I_R^* = \arg \min_{I_{LA}, I_R} \begin{cases} \|T_{LA} - FI_{LA}\|^2, & (3a) \\ \|T - FI_{LA} - I_R\|^2 + \lambda \|I_R\|^2, & (3b) \end{cases}$$

$$\text{subject to } \forall \mathbf{x}, 0 \leq I_{LA}(\mathbf{x}), I_R(\mathbf{x}) \leq 255, \quad (3c)$$

$$FI_{LA} \leq T_{LA}, \quad (3d)$$

式 3a, 3b は最適化問題における目的関数、式 3c, 3d は制約条件である。式 3a では、劣化関数  $F$  を補償するように大開口プロジェクタの投影可能な空間周波数成分が増強される。式 3b では、2 種のプロジェクタで投影した際に、目標画像に近い投影結果が得られるように調整する。

式 3d はインコヒーレント光の投影に特有の制約であり、残差プロジェクタ入力画像  $I_R$  が負値を持たな

**Algorithm 1** Generation algorithm for input images

**Input:**  $I_{LA}(0) = T_{LA}(0) = T$ 
**Output:**  $I_{LA}^*, I_R^*$ 

```

1: for  $i = 1$  to  $k$  do
2:    $R_{negative}(i) \leftarrow \min(0, T - FI_{LA}(i-1))$ 
3:    $T_{LA}(i) \leftarrow T_{LA}(i-1) + FR_{negative}(i)$ 
4:    $G(i) \leftarrow F^T(T_{LA} - FI_{LA}(i-1))$ 
5:    $\eta_1(i) \leftarrow \|G(i)\|^2 / \|FG(i)\|^2$ 
6:    $I'_{LA}(i) \leftarrow \text{clamp}(I_{LA}(i) + \eta_1(i)G(i))$ 
7:    $I'_R(i) \leftarrow \text{clamp}(T - FI'_{LA}(i))$ 
8:    $G_{LA}(i) \leftarrow F^T(T - FI'_{LA}(i) - I'_R(i))$ 
9:    $G_R(i) \leftarrow T - FI'_{LA}(i) - (1 + \lambda)I'_R(i)$ 
10:   $\eta_2(i) \leftarrow \|G_{LA}(i)\|^2 / 2\|FG_{LA}(i)\|^2$ 
11:   $I_{LA}(i) \leftarrow \text{clamp}(I'_{LA}(i) + \eta_2(i)G_{LA}(i))$ 
12:   $I_R(i) \leftarrow \text{clamp}(I'_R(i) + \eta_2(i)G_R(i))$ 
13: end for
14: return  $I_{LA}^* = I_{LA}(10), I_R^* = I_R(10)$ 
    
```

どのような制約を課す。残差プロジェクタは、大開口投影が実現できない成分： $T - FI_{LA}$ を投影する。しかし、プロジェクタは負の輝度を出力できないため、差分処理において負の残差が生じないように補償する必要がある。そこで、真の目標画像  $T$  とは別に、大開口投影で実現させたい目標画像  $T_{LA}$  を別途導入する。負の残差が生じる画素とその周辺画素において、大開口投影目標画像  $T_{LA}$  の輝度値を目標画像  $T$  より低下させることで、負値をもたない残差プロジェクタ入力画像  $I_R$  を生成した。

式 3b では、2 種のプロジェクタで同時に投影した結果が目標画像に近づくよう最適化する。ここで、残差投影では劣化が起こらないことを仮定している。第 2 項は、残差プロジェクタの出力輝度を抑制しており、影領域の輝度低下を抑制しながら、目標画像中の大開口投影が実現できない成分を補償することができる。また、 $\lambda$  は残差プロジェクタの関与度合いを調整する定数であり、小さいほど残差プロジェクタの出力輝度が高くなり、影抑制の効果が低くなる。

初期値を  $I_{LA}(0) = T_{LA}(0) = T$  として、順に繰り返し制約付き最急降下アルゴリズムを適用することで、この最適化問題を解いた。具体的な処理の流れを Algorithm 1 に示す。今回繰返回数  $k$  は 10 とした。ここで、 $\text{clamp}(\cdot)$  は、各画素値をプロジェクタのダイナミックレンジに収めるクランプ処理である。 $R_{negative}$  は、残差プロジェクタ入力画像  $I_R$  の負値のみからなる画像を表現し、これにボケの劣化関数  $F$  を施すことで、負値画素の周辺を含めて大開口投影目標画像  $T_{LA}$  の輝度値を低下させる。

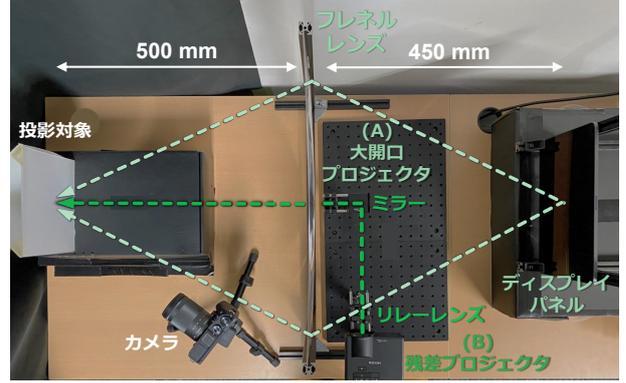


図 2 実装した大開口同軸二重投影システム  
 Fig. 2 Implemented large-aperture coaxial dual projection system

### 3 実験

#### 3.1 実装

大開口フレネルレンズ (SIGMAKOKI; FRLN-500S-250P), ディスプレイ (Apple; iPad Pro 12.9 インチ第 5 世代; 画素数: 2732×2048) を用いて大開口プロジェクタを、レンズを取り外したプロジェクタ (RICOH PJWXC1110; 画素数: 1280×800), リレーレンズ系 (Thorlabs; AC254-040-A, AC254-50-A, AC254-100-A) を用いて残差プロジェクタを実装した (図 2)。図 1 の通りに残差プロジェクタを配置すると、レンズを取り外したプロジェクタの外装によって、大開口プロジェクタの投影光が遮蔽されてしまう。そこで、フレネルレンズの中心を光学中心とし、残差プロジェクタの投影光を、光軸上に配置したミラー (Thorlabs, CCM1-PBS251/M) で反射させることで、光軸を一致させた。2 台のプロジェクタの投影領域が一致するように、各光学素子を配置した。使用したフレネルレンズは、直径 500 mm, 焦点距離 250 mm である。また、残差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。なお投影結果は、RGB カメラ (CANON EOS M6 Mark II, 画素数: 6960 × 4640) を用いて撮影した。

#### 3.2 大開口投影における画質劣化モデルの検証

2.2 節で述べた、大開口投影における画質劣化過程のモデル化について、その妥当性の検証を行った。フレネルレンズから約 500 mm 離れた位置に、投影面として白色平面スクリーンを配置した。投影面にドットパターンを投影することで、大開口プロジェクタの PSF を取得した。ドットパターン画像として、水平・垂直方向に 100 画素間隔の 4 × 4 ドットパターン (解像度: 400×400, 1 ドット: 5×5 画素) を使用した。

投影結果をカメラで撮影した画像を図 3(a) に示す。図 3(a) 中の黄色で示したブロックの  $y$  座標中心にお

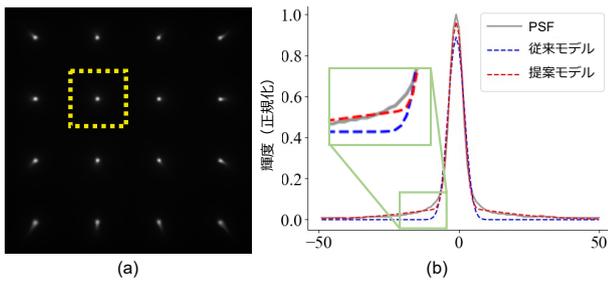


図3 取得した PSF とそのフィッティング結果  
Fig.3 Fitting results from different models  
for the acquired PSF

ける  $x$  軸方向の強度分布と、そのフィッティング結果を図 3(b) に示す。ガウス分布のみを使用した従来のモデルと比較して、提案モデルでは実際の PSF に近い分布を表現できている。特に、ピーク周辺領域において、従来モデルでは急激な減衰が見られ、実際の PSF とは大きく異なる分布となっている。一方提案モデルでは、実際の PSF の緩やかな収束に近い分布となっており、提案モデルの正当性が示された。

また、提案モデルを使用することで、大開口投影における画質劣化過程をより正確にモデル化できることを、自然画像を用いて確認した。図 4 に、実機の大開口プロジェクタで目標画像を投影した結果と、従来モデルおよび提案モデルによる劣化シミュレーション結果を示す。特にコントラストの観点において、提案モデルの方が、より実際の投影結果に近い映像が得られた。実機での投影結果と、2 種のモデルでのシミュレーション結果の類似度を、Peak Signal to Noise Ratio (PSNR), Learning Perceptual Image Patch Similarity (LPIPS) [11] を用いて客観的に評価した。なお、PSNR は値が大きいほど類似度が高いことを示し、LPIPS は値が小さいほど類似度が高いことを示す。どちらの評価指標においても、提案モデルでは従来モデルよりも実機の投影結果に対する類似度が高く、提案モデルの正当性が客観的にも示された。

### 3.3 影抑制性能と投影画質の評価

大開口投影では、軸外の物点に対して起こる収差の影響で、空間非一様なボケが発生する。そこで、目標画像の全画素における PSF を推定するために、バイキュービック補間を適用し、 $4 \times 4$  の PSF から他の画素の PSF を導出した。

2.3 節で述べた入力画像生成処理を実装し、提案システムの影抑制性能と投影画質の評価を行った。比較する投影条件は、通常投影、補償なし大開口投影、補償あり大開口投影、提案手法 (影抑制重視)、提案手法 (画質重視) の 5 条件とした。通常投影では、一般的な開口のレンズを使用している残差プロジェクタのみで



評価指標	従来モデル	提案モデル
PSNR ( $\uparrow$ )	19.2	<b>23.8</b>
LPIPS ( $\downarrow$ )	0.929	<b>0.709</b>

\* グレースケール変換した画像の Michelson コントラスト

図4 フレネルレンズ投影における画質劣化モデルの妥当性検証

Fig.4 Validation of image quality degradation model of the large-aperture projection

目標画像を投影し、補償なし大開口投影では大開口プロジェクタのみで目標画像を投影した。補償あり大開口投影では、ガウス分布を用いた従来モデルで PSF のフィッティングを行い、目標画像に対して Zhang らの手法 [10] による鮮鋭化処理を施した。提案手法では、式 3b 中の  $\lambda$  について 2 種類の値で入力画像の生成を行った。ここでは、影抑制重視型において  $\lambda = 0.5$  とし、画質重視型において  $\lambda = 0$  とした。入力画像と撮影画像間の色の整合性を取るため、各入力画像に対して色補償を施した [12]。投影面から 250 mm 離れた位置に、指幅 8 mm の人間の手を模した平面形状の遮蔽物を配置して、各条件における投影結果を撮影した。

各投影条件における入力画像と投影結果を図 5 に示す。通常投影では、鮮明な映像が得られているが、遮蔽物によって影が発生し、投影像の一部が完全に不可視となっている。補償なし大開口投影では、遮蔽物による影は抑制されたが、解像度やコントラストが大幅に低下した。補償あり大開口投影では、わずかに解像度が改善したが、コントラストや詳細な模様の視認性

	目標画像	通常投影	大開口投影 (ボケ補償なし)	大開口投影 (ボケ補償 <sup>[10]</sup> を適用)	提案手法 (影抑制重視)	提案手法 (画質重視)
大開口プロジェクト 入力画像	N/A					
残差プロジェクト 入力画像	N/A					
投影結果						
評価指標		評価値				
PSNR (↑)		16.9	15.4	15.5	16.2	<b>17.2</b>
LPIPS (↓)		<b>0.353</b>	0.825	0.722	0.436	0.387

図5 異なる投影条件での投影結果の比較  
Fig. 5 Comparison of projected results under different projection conditions

は依然低いままである。提案手法では、影が効果的に抑制され、コントラストや詳細な模様の見え方も向上した。また、2種の提案手法間でもその特徴に差異が見られ、影抑制重視型ではより影領域と非影領域の識別が困難であるのに対し、画質重視型ではよりコントラストの高い映像が得られた。

また、各投影条件で得られた投影結果の画質について、客観的な画質評価指標であるPSNRとLPIPSを用いて比較した。提案手法では、大開口投影の場合と比較して大幅に画質が改善した。通常投影では、投影結果の一部に欠損が生じているため、単純な画素値の比較を行うPSNRの値は大きく低下している。一方、提案手法では画像に欠損が生じないため、PSNRでは提案手法が通常投影を上回る評価となったと考えられる。

#### 4 おわりに

本研究では、大開口フレネルレンズを用いた影なし投影システムにおいて、その投影画質の劣化過程をモデル化し、影領域の輝度低下を抑制しながら、影領域以外の投影結果の画質劣化を抑制可能な、入力画像生

成手法を提案した。また、劣化モデルの妥当性について検証を行い、投影実験を通して、提案手法では影抑制とボケ補償とを両立させることが可能であることを示した。

今後は、投影対象を三次元物体として、奥行きに応じたPSFを取得し、投影対象形状に応じた鮮鋭化を実装する予定である。

#### 謝辞

本研究は、JSPS 科研費 20H05958 の助成を受けたものである。

#### 参考文献

- [1] Oliver Bimber and Ramesh Raskar. *Spatial augmented reality: merging real and virtual worlds*. CRC press, 2005.
- [2] Mark R Mine, Jeroen Van Baar, Anselm Grundhofer, David Rose, and Bei Yang. Projection-based augmented reality in disney theme parks. *Computer*, Vol. 45, No. 7, pp. 32–40, 2012.
- [3] Hiroto Nishino, Etsuro Hatano, Satoru Seo, Takashi Nitta, Tomoyuki Saito, Masaaki Nakamura, Kayo Hattori, Muneo Takatani, Hiroaki Fuji, Kojiro Taura, 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.
- [4] 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.
  - [5] 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.
  - [6] Kosuke Hiratani, Daisuke Iwai, Parinya Pongpongson, and Kosuke Sato. Shadowless projector: Suppressing shadows in projection mapping with micro mirror array plate. In *2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, pp. 1309–1310. IEEE, 2019.
  - [7] Masumi Kiyokawa, Shinichi Okuda, and Naoki Hashimoto. Stealth projection: Visually removing projectors from dynamic projection mapping. In *SIGGRAPH Asia 2019 Posters*, pp. 1–2. 2019.
  - [8] Ying Geng, Jacques Gollier, Brian Wheelwright, Fenglin Peng, Yusufu Sulai, Brant Lewis, Ning Chan, Wai Sze Tiffany Lam, Alexander Fix, Douglas Lanman, et al. Viewing optics for immersive near-eye displays: pupil swim/size and weight/stray light. In *Digital Optics for Immersive Displays*, Vol. 10676, pp. 19–35. SPIE, 2018.
  - [9] Michael S Brown, Peng Song, and Tat-Jen Cham. Image pre-conditioning for out-of-focus projector blur. In *2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'06)*, Vol. 2, pp. 1956–1963. IEEE, 2006.
  - [10] Li Zhang and Shree Nayar. Projection defocus analysis for scene capture and image display. In *ACM SIGGRAPH 2006 Papers*, pp. 907–915. 2006.
  - [11] 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.
  - [12] Takenobu Yoshida, Chinatsu Horii, and Kosuke Sato. A virtual color reconstruction system for real heritage with light projection. In *Proceedings of VSMM*, Vol. 3, pp. 1–7. Citeseer, 2003.