

レイトレーシングを用いた照明の光線制御における迷光の低減に関する検証

岩瀧 良太^{*1}渡辺 義浩^{*1}

Abstract – 投影対象に当たる光線を消灯し、周辺のみ光を当てるように光線制御した照明を利用することで、高コントラストなプロジェクションマッピングと明るい周辺環境を両立できる。さらに、光線制御にレイトレーシングを導入することで、リアルタイムでの高速な照明の光線制御が達成された。しかし、従来手法ではレイトレーシングの計算に利用する光線は実際の光線の拡がり表現していないため、誤って対象に光が当たる迷光が発生する問題があった。本稿では、照明用プロジェクタの投影画像の1画素の計算に複数本の光線をレイトレーシングに用いることで迷光を低減する手法を提案し、光線制御の品質を検証する。さらに、提案手法にプロジェクションマッピング用の高速カラープロジェクタを導入して、明環境下でのダイナミックプロジェクションマッピングを実現し、その評価を行った。

Keywords : ダイナミックプロジェクションマッピング, ライトフィールド, レイトレーシング

1 はじめに

プロジェクションマッピング (Projection mapping: PM) は拡張現実の表現のひとつとして、さまざまな分野で活用が進められている。そのなかでも、高速カメラ・プロジェクタを用いて動的な物体に追従して映像を投影するダイナミックプロジェクションマッピング (Dynamic projection mapping: DPM) がある [1]。DPM が生み出す新たな体験は、エンターテインメントなどの多様な分野への応用が期待されている。このような DPM の実現に向けて、投影ずれを知覚しないためにシステムの遅延を 3.87 ms から 6.02 ms までに抑えることが求められる [2][3]。

一方、一般的に PM は部屋の照明を消した暗環境で行われることが多い。これは部屋の照明を点灯させた明環境で PM を行うと、投影された PM 映像に照明光が入射することで PM 映像のコントラストが低下するためである。しかし、暗環境での PM は投影対象のみが明るく見えて、周りには PM の投影対象ではない通常物体が暗闇で見えないため、PM と通常物体を同時に見ることができない問題があった。また、暗環境での PM は投影対象自身が発光しているように見えるため、観測者に不自然な印象を与える問題があった。このような背景より、照明下の明環境と、高コントラストな PM を両立できる手法が求められている。

この問題を解決するために、光線制御可能な照明を利用することで明るい周辺環境を実現する PM が提案された [4]。同手法では、PM の投影対象に届く光線を消灯し、周辺環境のみ光を当てるように光線制御することで、明るい周辺環境と高コントラストな映像を

両立した。しかし、同手法の光線制御では投影する光線の決定に時間を要するため、動的対象へ適用できない問題があった。

この問題を解決するために、レイトレーシングを用いた照明の高速な光線制御手法が提案された [5]。同手法では、レイトレーシングにより照明から出射される光線と対象との衝突判定を高速に実行する。これによって、動的対象へリアルタイムでの光線制御が可能になった。しかし、光線制御のレイトレーシングの計算に利用する光線は、実際の光線の拡がり表現していないため、誤って対象に光が当たる迷光が発生する。そのため、迷光によって PM を投影した際に映像の品質が低下する。

そこで本稿では、明環境下での DPM に向けて従来手法 [5] で発生する迷光の低減のために、照明用プロジェクタの投影画像の1画素の計算に複数本の光線をレイトレーシングに用いることで迷光を低減する手法を提案する。また、実験より従来手法 [5] と比較して光線制御の品質が向上したことを確認した。さらに、提案手法にプロジェクションマッピング用の高速カラープロジェクタを導入することで、明環境下での DPM を達成した。

2 関連研究

2.1 明環境 PM

大口径プロジェクタと複数台のプロジェクタを用いて、室内の照明を模した明環境を再現する手法がある [6]。同手法では、大口径プロジェクタを投影対象の周辺のみを照らす照明に利用することで、投影対象の周りに発生する影を自然なソフトシャドウで表現するこ

^{*1}東京科学大学

とができる。しかし、複数台のプロジェクタで照明を再現した場所に想定外の物体が入った場合に、その物体の自然な影を完全に再現することができない。

一方、レンズアレイとプロジェクタを用いたインテグラルフォトグラフィによる光線制御可能な照明とPMを組み合わせる手法がある[4]。同手法では、PMの投影対象に届く光線を消灯しその周辺のみを光を当てるように制御することで、投影対象に光を当てずにPMの映像のみを投影する。これによって、高コントラストなPMと明るい周辺環境下に置かれた通常物体の自然な影の両立が可能である。また、光線制御可能な照明は、照明用のプロジェクタの投影画素の点灯により、さまざまな方向に飛ぶ多数の光線を制御することができる。これによって、一般的な拡散光の照明から、スポットライトのように指向性を持つ点光源の照明などさまざまな光源を再現できる。

一方、投影する光線の決定は、2分探索を用いてプロジェクタの画素を順次点灯させ、対象に届く光線をカメラで直接検出することで行う。これにより、多重反射などによってPMの投影対象に入射する照明の光線も正確に検出することができる。しかし、この投影光線の決定は1シーンの投影画像を生成するのに数十分の時間を要するため、投影対象が静止物体に限定される問題がある。

本稿では、同問題の解決手法について報告する。なお、本稿で述べる光線制御は、同手法[4]で提案された高速プロジェクタ[7]とレンズアレイを組み合わせたインテグラルフォトグラフィ型の照明システムを前提とする。このシステムでは、プロジェクタの1画素を点灯させて生じる光を制御する光線の最小単位とする。

2.2 照明の光線制御

明環境下でのDPMの実現のために、照明の光線制御の高速化が課題である。この問題を解決するために、レイトレーシングを用いた照明の高速な光線制御手法が報告された[5]。レイトレーシングは光線の反射や屈折を計算し、光線の軌跡を追跡することで写実的なComputer Graphics(CG)の映像をレンダリングする技術として利用されている。さらに、CGだけではなく、実世界の光線を用いてレイトレーシングを行う事例もある[8]。照明の高速な光線制御手法は、事前に照明用のプロジェクタの投影画像 I の1画素 $I(i, j)$ を点灯させてできる光線が実世界上のどこを通るかの位置情報を直線で表した光線情報 $R(i, j)$ を取得する。光線情報を用いてレイトレーシングを行うことにより対象と光線の衝突判定を実施し、対象と衝突する光線を消灯させる。対象の衝突判定を高速処理可能なレイトレーシングを用いて実行することで、光線制御の高速

化を達成した。

一方、実際の光線はプロジェクタの1画素の点灯のため大きさを持つ。さらに、レンズアレイを通過することでレンズの収差の影響でさらに広がるため、光線の断面は点ではなく面積を持つ。しかし、レイトレーシングの計算には直線で表現された光線が利用される。同手法では、レイトレーシングの計算に図1の赤の点で示した光線の中心を通る1本の光線を利用しているため、実際の光線の拡がりを再現していない。そのため、図1の青で示した対象の縁に当たる光線の場合、赤の点で示した光線の中心で衝突判定を実施するため、図1で表した全ての光線が対象に当たっているにもかかわらず、図1の上段一番左の光線と下段の2つの光線は、対象と衝突していないと判定されて点灯する。そのため、図1の赤の点線で囲った白色の領域のように、誤って対象に光が当たる迷光が発生する。

3 提案手法

3.1 概要

まず、本手法のシステム構成の概要図を図2に示す。本手法における照明の光線制御とは、PMの投影対象に当たる光線を消灯し、PMの投影対象の周辺のみを光を当てるように制御することを呼ぶ。本稿では、照明用のプロジェクタの1画素に対してレイトレーシングの計算に複数の光線を用いる手法を提案する。図3のように、実際の光線の拡がりに合わせて光線の縁を通る光線を利用する。光線の端を通る光線でレイトレーシングをするため、図1のように対象の縁に当たる光線の場合でも対象との衝突判定を正確に実行できる。

一方、レイトレーシングに利用する光線の数を増やすことで計算量が増えるため処理速度が低下する。し

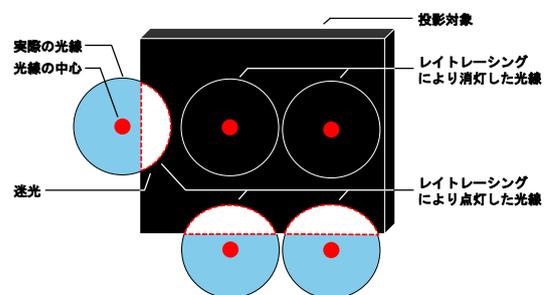


図1 迷光が発生するメカニズム。黒の直方体が対象、円が実際の光線の拡がりを表し、赤の点が光線中心を表す。

Fig.1 Mechanism of stray light generation. The black rectangle represents the target, the circle represents the actual ray spread, and the red dot represents the ray center.

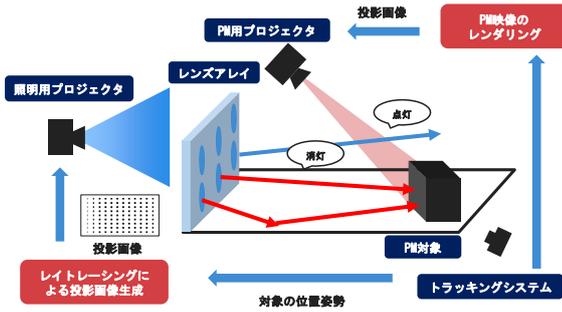


図2 提案手法を用いた明環境下でのDPMシステムの概要図
 Fig. 2 Overview diagram of the DPM system in a bright environment using the proposed method

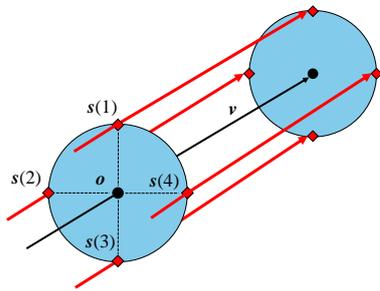


図3 複数の光線を用いた光線情報. 図の光線情報は $n = 4$ の場合を示す. 青の円が実際の光線, 黒の点が実際の光線の中心, 黒の矢印が光線の方向, 赤の矢印がレイトレーシングに用いる光線を表す.
 Fig. 3 Ray information represented by multiple rays $n = 4$. The blue circle represents the actual ray, the black dot represents the center of the actual ray, the black arrow represents the direction of the ray, and red arrows represent the ray used for ray tracing.

かし、DPMの照明として利用するには高速性が必要である。そこで、レイトレーシングによる光線制御の計算量を削減する手法を導入することで、迷光の低減と高速処理の両方を実現する。

さらに、本手法を用いて明環境下でのDPMを行うシステムを構築する。図2のように、光線制御可能な照明に加えて、DPM用に高速RGBプロジェクタを利用する。照明を運動する投影対象に光を当てないように制御し、対象にPMすることで、明環境下でのDPMを実現する。

3.2 複数の光線を用いた実際の光線の表現

まず、光線情報を取得するキャリブレーション方法について述べる。光線は直線で表されるため、3次元点が2点分必要となる。そこで、空間上に設置した2平面と光線との交点の3次元点を取得する。具体的には、レンズアレイ前方にスクリーンを設置する。その後、プロジェクタを1画素ごとに点灯させて、スクリーン

上にできる光点の3次元位置をカメラで計測する。

実際の光線を表現するために、図3に示すように同一方向の光線を複数本用いる。図3は4本の光線を用いて表現した例である。また、レイトレーシングの計算に用いる光線情報 $R(i, j, n)$ は式(1)で表現される。 v は光線の方向、 o は光線の始点、 (i, j) は投影画像の画素、 n は使用する光線の本数を表す。

$$R(i, j, n) = vt + o + s(n) \quad (1)$$

本手法では、図3の黒い矢印で示すように、2地点で計測した光線の中心を結んだベクトルを光線の方向 v として定義する。さらに、光線の中心を始点 o とする。実際の光線の中心 o から、光点の縁まで $s(n)$ だけ平行移動させた光線を用いる。 $s(n)$ の大きさは実際の光線の半径であり、表現する光線の本数に応じて移動する方向が変わる。例えば、 $n = 4$ の光線で表現する場合、図3のように、キャリブレーションで用いたスクリーンを基準の平面として、中心から上下左右にそれぞれ移動させた光線を用いる。

3.3 計算量の低減

投影画像の1画素の決定に、計算に利用する光線の本数分のレイトレーシングの処理が必要となる。図1のように対象の縁に当たるような光線は、図3のように複数の光線を用いて正確に衝突判定を実行したい一方、実際の光線が対象に確実に当たる場合、1画素内のどの光線でレイトレーシングを実行しても必ず対象と衝突する。この場合、すべての光線でレイトレーシングを実行する必要はなく、1本でも光線が当たればその画素を消灯させてよい。

そこで、対象に1本でも光線が当たった場合、残りの光線のレイトレーシングをスキップしてその画素を消灯させる。これにより、対象と衝突する光線は従来どおり1回のレイトレーシングで計算されるため、レイトレーシングの計算量を低減できる。

また、照明を構成する光線群の中には、光線情報を取得するキャリブレーションの際に、スクリーンに光線が入らずにカメラで検出できない光線がある。これらの光線は、レンズアレイのレンズとレンズの間の縁に遮られてシーン内に届かない光線、または、対象があるシーンの中心に向かわずにシーンの外側へ出射される光線がある。このような光線は、2次以上の反射が発生することを除けばシーン内の対象に当たることはない。そこで、これらの光線はあらかじめレイトレーシングの計算から除外することで計算量を低減する。除外した光線に対応する画素は、事前に点灯もしくは消灯させるかを決定して光線制御中に変更しない。

4 実験

4.1 実験条件

実験構成を図4に示す。実験にはCPUにXeon E5-2680 v4, GPUにGeforce RTX 2080 Tiを搭載した計算機を用いた。照明用のプロジェクタには、高速モノクロプロジェクタ [7]を用いた。このプロジェクタの解像度は 1024×768 pixelsである。レンズアレイは直径50 mm, 焦点距離50 mmのレンズを縦に9枚, 横に12枚と合計108枚を配置したものをを用いた。

トラッキングシステムには360 fpsで駆動するOptiTrackを用いた。トラッキングのカメラはレンズアレイのフレームに4台, 後方に2台の合計6台を設置した。光線情報取得のキャリブレーション用のカメラにはBasler acA720-520 umを用いた。このカメラの解像度は 720×540 pixelsである。PM用のプロジェクタには、高速カラープロジェクタ [9]を用いた。このプロジェクタの解像度は 1024×768 pixelsである。PM用のプロジェクタはレンズアレイの下から投影できるように設置した。

投影対象には図4の左下に示す箱を用いた。対象の位置姿勢の検出用に箱の前面の四隅に再帰性反射材のマークを貼り付けた。対象は図4の右下に示すように設置した。

4.2 光線制御の迷光の低減の実験

提案手法による迷光の低減を検証するために、投影実験を行った。レイトレーシングに使用する光線を1本, 4本に変更した場合での、光線制御の結果と処理速度を表1にて比較した。また、対象の位置姿勢を変

更した場合、対象に追従した光線制御が可能か確認した。さらに、計算量低減手法の有効性を検証するため、光線4本での処理において計算量低減手法がある場合とない場合でのそれぞれの処理速度を計測した。なお、光線1本での処理は検出されない光線の除去のみの計算量低減手法を適用した。

さらに、提案手法の定量評価を行った。従来手法 [4]の2分探索による光線制御の結果を真値として、生成された投影画像の画像品質の評価を行った。画像品質の評価にはMSE, PSNR, SSIMを用いた。

提案手法を用いた光線制御の投影結果を図5に示す。図5の1列目は室内照明下での投影対象の様子であり、図5の2列目はレイトレーシングに使用する光線1本での結果を示し、図5の3列目はレイトレーシングに使用する光線4本での結果を示す。また、図5の各行は対象の姿勢を変更した場合の結果を示す。

光線制御の結果を対象へ投影した結果、レイトレーシングに使用する光線4本の方が迷光が低減できることを確認した。また、対象の姿勢を変更した場合でも、対象の姿勢に追従した照明の制御ができることを確認した。また、各手法での処理速度を表1に示す。処理速度を計測した結果、計算量低減手法を導入した場合には、1本での計算と近い速度性能をもつことを確認した。

従来手法との投影結果の比較を図6に示す。図6の1行目は光線制御の投影結果を示し、図6の2行目は生成された投影画像を示す。図6の1列目は光線1本による光線制御の結果、図6の2列目は光線4本による光線制御の結果を示し、図6の3列目は従来手法 [4]による光線制御の結果を示す。また、図6の2行目に示す提案手法の投影画像のMSE, PSNR, SSIMによる画像品質の定量評価の結果を表2に示す。従来手法で得た投影画像との比較より、光線1本より光線4本での結果の方が従来手法の結果と近いことを確認した。

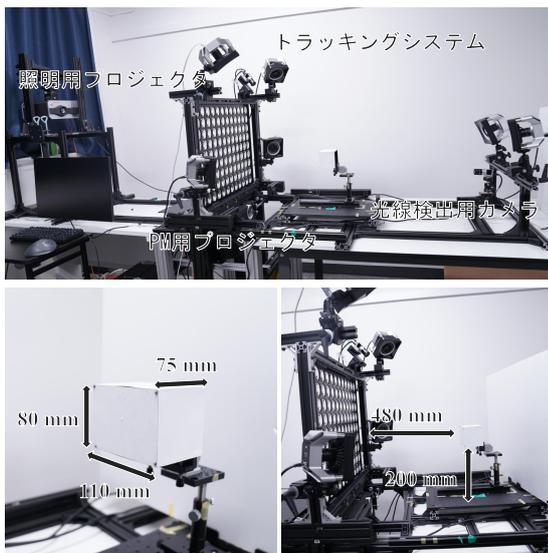


図4 実験システムの構成(上)と対象の箱(左下)と対象の配置

Fig. 4 Configuration of system (top) and target box (bottom left) and placement of target (bottom right)

表1 処理速度の比較

Table 1 Comparison of processing speeds

	光線1本	光線4本 (低減あり)	光線4本 (低減なし)
処理速度 [fps]	662	628	408

表2 画像品質の評価

Table 2 Evaluation of image quality

計算に用いた光線の本数	MSE↓	PSNR↑	SSIM↑
4本	329.8	22.94	0.976
1本	346.0	22.73	0.963

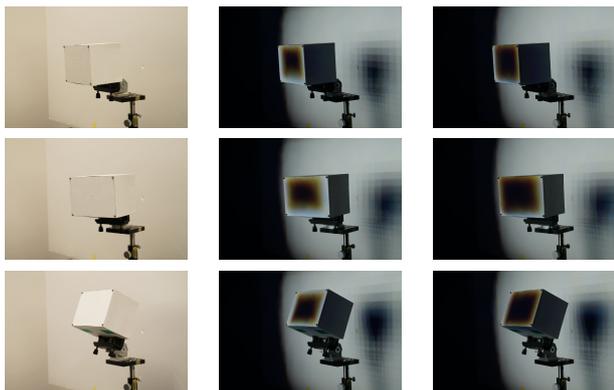


図5 提案手法による光線制御の結果. 室内照明下での投影対象 (1 列目). 光線 1 本による光線制御 (2 列目). 光線 4 本による光線制御 (3 列目)

Fig. 5 Results of ray control by the proposed method. Projected target under room illumination (first column). ray control with one ray (second column). ray control with four rays (third column).

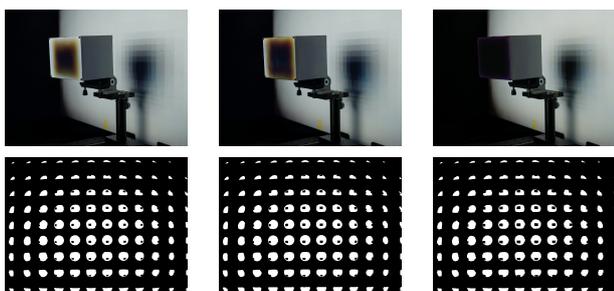


図6 従来手法による光線制御との比較. 光線制御の結果投影 (1 行目). 生成された投影画像 (2 行目). 光線 1 本による光線制御 (1 列目). 光線 4 本による光線制御 (2 列目) 従来手法 [4] による光線制御 (3 列目)

Fig. 6 Comparison with ray control by conventional methods. Result of ray control (First row). Generated projection image (Second row). ray control with one ray (First column). ray control with four rays (Second column). conventional method[4] (Third column).

4.3 明環境下での DPM の実験

さらに、提案手法を用いた明環境下での DPM システムを構築し、実験を行った。立体物を投影対象とし、対象の動きに追従して光線制御と PM が投影されることを確認した。また、照明を全点灯、消灯させた際の PM シーンを比較した。さらに、PM 映像のコントラストの比較のために、通常物体を投影対象の隣に置いて明環境下での DPM を行った。なお、明環境下での DPM の実験ではレイトレーシングに 4 本の光線を用いた。

明環境下での DPM の投影対象には白色のウサギ型の人形 (以下バンニーと呼ぶ) を用いた。また、シーン内

に通常物体としてカラープリントされたバンニーを用いた。さらに、PM の映像とプリントバンニーの明るさを一致させるために、PM 用のプロジェクタの前に ND フィルタを設置した。

提案手法を用いた明環境下での DPM を実施した様子を図 7、図 8 及び図 9 に示す。図 7 の 3 列目と図 7 の 4 列目の PM を比較すると、図 7 の 4 列目の PM は、照明光が対象に当たることで映像のコントラストが低下している。また、図 7 の 3 列目と図 7 の 5 列目の PM を比較すると、図 7 の 5 列目の PM は、図 7 の 3 列目の暗環境下の PM と同等な映像の品質を保つことを確認した。さらに、図 7 の 4 列目と図 7 の 5 列目の PM を比較すると、図 7 の 5 列目の PM は高コントラストな映像を達成しつつ、図 7 の 4 列目と同等な明るい周辺環境を実現していることを確認した。

また、図 8 に対象の位置姿勢を変えた場合の明環境下での DPM の投影結果を示す。対象の位置姿勢に追従した照明の光線制御と PM の投影ができることを確認した。さらに、図 9 にカラープリントバンニーを投影対象の右側に置いた場合での明環境下での DPM の結果を示す。図 9 の 1 列目は PM のみ投影しているため、投影対象のみが見えてカラープリントバンニーの姿は見えない。また、図 9 の 2 列目と図 9 の 3 列目の比較より、提案手法による光線制御された照明下での PM の方が、投影された映像がカラープリントバンニーと同等なコントラストを持つことを確認した。さらに、並置されたカラープリントバンニーの影が正しく再現されたことを確認した。これらの結果より、明るい周辺環境と高コントラストな DPM の映像の両立を確認した。

5 考察

本手法により、迷光の低減は達成されたが迷光は完全に除去されてはいない。その原因として、光線情報を計測する際の誤差があげられる。光線の計測誤差を低減する方法として、今まで 2 地点で計測していたものから計測地点を多くとることがあげられる。しかし、測定点を増やすことで計測に膨大な時間を要する。そのため、光線情報を正確かつ効率的に計測できる手法の確立が課題である。

また本手法は、対象に当たる光線が多いほど計算量を低減することができる。そのため、対象の形状が小さい場合、当たる光線の数が増えるため計算量の低減が難しい。今後の課題として、対象の形状に依存せずに計算量を低減できる手法の開発が求められる。

6 まとめ

1 画素の計算に複数本の光線をレイトレーシングに用いることで、照明の光線制御における迷光を低減す



図7 異なる照明環境下での PM. 照明を全点灯 (1 列目). 光線制御した照明のみ (2 列目). PM のみ (3 列目). 全点灯した照明下での PM (4 列目). 光線制御した照明下での PM (5 列目).

Fig.7 DPM in a bright environment using the proposed method. full illumination (first column). ray controlled illumination (second column). PM only (third column). PM under full illumination (4th column). PM under ray controlled illumination (5th column).



図8 対象の位置姿勢を変更させたときの明環境下での DPM
Fig.8 DPM in a bright environment with changing the position and posture of the target.



図9 カラープリントバニーを置いた明環境下での PM. PM のみ (1 列目). 全点灯した照明下での PM (2 列目). 光線制御した照明下での PM (3 列目).

Fig.9 PM in a bright environment with a color print bunny placed. PM only (first column). PM under full illumination (second column). PM under ray controlled illumination (third column).

る手法を提案した. 実験から提案手法によって迷光が低減されることを確認した. さらに, 本手法と DPM システムを組み合わせた実験より, 提案手法が明環境下での DPM に有効であることを確認した.

参考文献

- [1] 渡辺義浩. ダイナミックプロジェクションマッピングの作り方と使い方. 電子情報通信学会誌, 第 106 巻, pp. 149–154, 2023.
- [2] Albert Ng, Julian Lepinski, Daniel Wigdor, Steven Sanders, and Paul Dietz. Designing for low-latency direct-touch input. In *Proceedings of the 25th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 453–464, 2012.
- [3] Hao-Lun Peng, Shin'ya Nishida, and Yoshihiro Watanabe. Studying user perceptible misalignment in simulated dynamic facial projection mapping. In *2023 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, pp. 493–502, 2023.
- [4] Masahiko Yasui, Ryota Iwataki, Masatoshi Ishikawa, and Yoshihiro Watanabe. Projection mapping with a brightly lit surrounding using a mixed light field approach. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 30, No. 5, pp. 2217–2227, 2024.
- [5] 岩瀧良太, 渡辺義浩. ダイナミックプロジェクションマッピングのための照明の高速な光線制御に関する検証. 第 29 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 2024.
- [6] Masaki Takeuchi, Hiroki Kusuyama, Daisuke Iwai, and Kosuke Sato. Projection mapping under environmental lighting by replacing room lights with heterogeneous projectors. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 30, No. 5, pp. 2151–2161, 2024.
- [7] Yoshihiro Watanabe, Gaku Narita, Sho Tatsuno, Takeshi Yuasa, Kiwamu Sumino, and Masatoshi Ishikawa. High-speed 8-bit image projector at 1,000 fps with 3 ms delay. In *22nd International Display Workshops*, pp. 1421–1422, 2015.
- [8] Ray Asahina, Takashi Nomoto, Takatoshi Yoshida, and Yoshihiro Watanabe. Realistic 3D swept-volume display with hidden-surface removal using physical materials. In *2021 IEEE Virtual Reality and 3D User Interfaces*, pp. 113–121, 2021.
- [9] Yoshihiro Watanabe and Masatoshi Ishikawa. High-speed and high-brightness color single-chip DLP projector using high-power LED-based light sources. In *The International Display Workshops (IDW)*, 2019.