



# 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

岩瀧良太<sup>1)</sup>, 渡辺義浩<sup>1)</sup>,

1) 東京工業大学 工学院 情報通信系 (〒 226-8501 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259 G2-31, iwataki.r.aa@m.titech.ac.jp)

**概要:** 投影対象へ当たる光線を消灯し、周辺のみを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。しかし、従来手法では照射する光線の決定に時間を要するため、投影対象が静止物体に限定される問題があった。本稿では、高速処理が可能なレイトレーシングを用いた照明の光線制御手法を提案し、動的な投影対象に向けた光線制御の速度性能を検証する。

**キーワード:** 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

実世界を拡張するための表現のひとつとして、プロジェクションマッピング (PM) がある。その中に、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 (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さまざま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、投影ずれを覚え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、周りがある PM の投影対象ではない通常物体が暗闇で見えない。そのため、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。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 がある [4]。同手法では、PM の投影対象に届く光線を消灯し、周辺環境のみを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。

本稿では、従来手法 [4] を動的対象に適用可能なシステムへの拡張を目的とする。そのためには、投影遅延が発生しない照明の光線制御が課題となる。そこで、高速処理が可能なレイトレーシングを用いた照明の光線制御手法を提案する。レイトレーシングは光線の反射屈折をシミュレートする手法であり、コンピュータグラフィクス (CG) のレンダリングのために高速動作するものが開発されている。このア

プローチを用いて、提案手法による照明の光線制御の速度性能を検証する。

## 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 [5]。この手法は複数台のプロジェクタを用いて室内の照明を再現する。さらに、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に表現することができる。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。

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]。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、拡散光の照明から点光源の照明などさまざまな光源を再現できる。これを用いて、PM の投影対象に届く光線を消灯し、その周辺のみを光をあてるように制御することで、投影対象に光を当てずに、その周辺のみを光を照らす。照明の光が当たらない投影対象へ PM の映像のみを投影することで、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を達成した。

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。同手法によって、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。

## 2.2 レイトレーシングとその応用

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。しかし、レイトレーシングは高画質なレンダリングのために複雑な反射の光線の再現に必要な計算量が膨大になることが問題だった。この問題を解決するために、Graphics Processing Unit (GPU) の並列処理によりレイトレーシングの高速処理の手法が開発された。これにより、リアルタイムでのレイトレーシングが可能となった。

一般的に、レイトレーシングは視点位置を光線の始点としてCG上のスクリーンを通過する仮想的な光線を利用して計算する。他にも、実世界の光線伝搬をシミュレートするためにも応用されている。その例として、ライトフィールドディスプレイのリアルタイムレンダリング手法にレイトレーシングが利用されている [6]。この手法ではアイトラッキングとレイトレーシングを用いて、視聴者の目に入る光線のみを選択して効率的にレンダリングに利用する。これによって、クロストークによる立体視のアーティファクトの低減と映像のレンダリングコストの低減ができる。

また、ボリュメトリックディスプレイのレンダリングにもレイトレーシングが利用されている [7]。具体的には、レイトレーシングによって、視聴者の視点に応じたボリュメトリックの隠面除去を実現している。

このように、実世界の光線を用いてレイトレーシングを行う事例から、PMのための照明の光線制御にもレイトレーシングを用いることができると考えられる。一方、動的対象に遅れなく照明を制御するためには、前述の事例よりも高速な要件が求められると考えられる。

## 3. 提案手法

### 3.1 概要

本手法で高速化する光線制御について、前提と定義を下記に述べる。まず、提案する光線制御の概要図を図1に示す。本手法では、高速プロジェクタ [8] 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。さらに、投影画像の1画素が実世界へ作る光線の空間での位置情報を事前に取得する。

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。この光線制御は光線と対象の衝突判定から点灯と消灯を決定する。また、投影対象は形状が既知の剛体を用いる。本稿では、この処理の高速化を目標とする。

提案手法では、高速処理が可能なレイトレーシングを照明の制御に導入する。レイトレーシングによる対象との衝突判定を高速に処理することで、照明の光線制御の高速化を実現する。

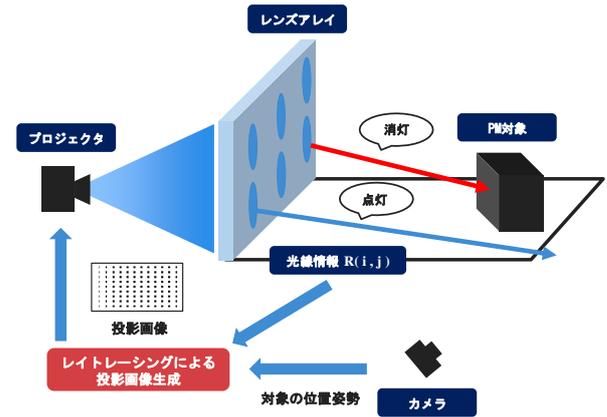


図1: 提案する光線制御の概要図。光線情報と対象の位置姿勢より、レイトレーシングによる対象と光線の衝突判定を行う。光線と対応する画素を点灯・消灯させることで投影画像を生成する。

### 3.2 光線情報の取得

本稿では、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、レンズアレイを経て実世界のどこを通るかの位置情報を直線で表したものを光線情報  $R(i, j)$  と呼ぶ。光線の表現は、式 (1) で示すように、3次元の方向のベクトル  $v$  と原点の位置  $o$  を用いた直線の式で表現される。

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

本手法では事前にプロジェクタの全画素分の光線情報を取得する。光線の保持の方法は式 (1) で示すように、直線の式で表現されるため、光線のパラメータ  $v, o$  を取得するために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。2か所の3次元の位置情報から光線の軌跡を示す直線を導出する。

### 3.3 レイトレーシングを用いた光線制御手法

まず、図1に示すようにカメラからPMの投影対象の位置姿勢を取得する。取得された位置姿勢と、事前に得られた光線情報を用いて、レイトレーシングによる対象との衝突判定を実行する。投影画像  $I$  の画素値は式 (2) で示すように、点灯か消灯のみの2値を取る。

$$I(i, j) = \begin{cases} 1 & (\text{No hit ray}) \\ 0 & (\text{Hit ray}) \end{cases} \quad (2)$$

図1の赤い矢印のように、レイトレーシングの結果、光線  $R(i, j)$  が対象と衝突した場合、光線と対応するプロジェクタの投影画像の画素  $I(i, j)$  を消灯する。また、図1の青い矢印のように、衝突しない場合は光線と対応する画素  $I(i, j)$  を点灯する。この処理によって、投影画像の全画素分の光線に衝突判定を行うことで投影画像を生成する。この光線と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実現する。

## 4. 光線制御のシミュレーション

### 4.1 実験条件

レイトレーシングによる光線制御の速度をCGによるシミュレーションを用いて計測した。シミュレーションにはCPUにXeon Gold 6136, GPUにGeforce RTX 3090を搭載した計算機を用いた。図2(a)にシミュレーションでのレンズアレイと対象の配置を示す。シミュレーションに利用する光線は、焦点距離50 mmのレンズを縦9枚、横12枚に配置したレンズアレイを想定したものをを用いた。また、光線の本数は高速プロジェクタ [8] の投影画像の画素数と同一の786,432本分用意した。

投影対象となるオブジェクトは1辺150 mmの立方体を用いた。対象はレンズアレイから350 mm離れた位置に設置した。さらに、図2(a)の赤い矢印のように、対象に水平方向に一定の速度で300 mmの距離を往復する動作を行った。

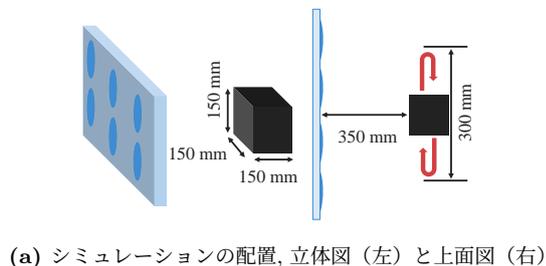
### 4.2 結果

シミュレーションより、投影画像を生成するプロセスの処理速度は470 fpsとなった。シミュレーションで生成された投影画像を図2(b)に示す。結果から、レンズアレイの枚数分の対象が現れた投影画像を確認できた。これは従来手法 [4] での結果と同等のものであり、想定通りの動作であることを確認した。さらに、対象の左右の移動に応じて、投影画像も動くことを確認した。この結果より、動的な対象への光線制御が可能であることを確認した。

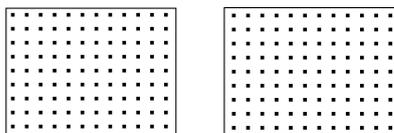
## 5. 実機システムによる投影実験

### 5.1 内容

光線制御が正しく実行できるかを検証するため、実機システムで投影の実験を行った。この実験では、提案手法の光線制御によって、対象の表面に誤って光が当たらないかを確認した。また、対象の位置姿勢を変更した場合、対象に追従した投影が可能か確認した。さらに、提案手法の光線制御の有効性を確認するため、従来手法の光線制御手法 [4] による光線制御の投影結果との比較を行った。



(a) シミュレーションの配置, 立体図 (左) と上面図 (右)



(b) 生成された投影画像, 対象がシーン内の左側に配置された場合 (左), 対象がシーン内の右側に配置された場合 (右)

図 2: シミュレーション結果

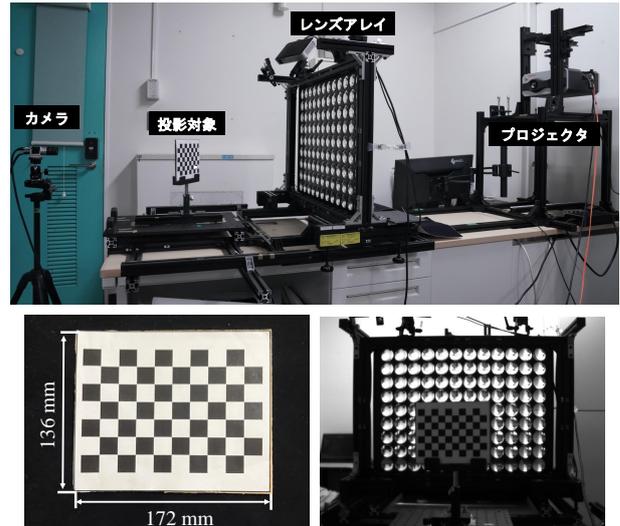


図 3: 実験システムの構成 (上) と投影対象 (左下) とカメラの撮像画像 (右下)

### 5.2 光線情報の取得のキャリブレーション

光線のパラメータと投影画像の画素を関連付けるために、スクリーンとカメラを使用したキャリブレーションを行った。まず、レンズアレイ前方にスクリーンを設置した。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位置をカメラで計測した。スクリーンの位置を変更して2地点での計測を行うことで、3次元点を2つ取得した。また、光線情報取得用のスクリーンはレンズアレイから350 mm, 520 mmの位置にそれぞれ設置した。

### 5.3 実験条件

実験構成を図3に示す。プロジェクタには、高速プロジェクタ DynaFlash [8] 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。プロジェクタとレンズアレイの間が1150 mmになるように設置し、両者の焦点距離が合うように調整した。

投影対象には図3の縦136 mm, 横172 mmの平板を用いた。対象の位置姿勢の検出用に平板の両面にチェッカーボードを貼り付けた。対象はレンズアレイから500 mm離れた位置に設置した。

光線検出及び対象の位置姿勢検出用のカメラにはBasler acA720-520umを用いた。このカメラの解像度は720 × 540 pixelsである。カメラのレンズは焦点距離6 mmのものをを用いた。カメラはレンズアレイから1300 mm離れた場所に、図3のように投影対象が収まる画角になるようにカメラの位置と角度を調整した。さらに、光線制御の結果を明確にするため、結果の撮影時には対象とカメラの間に背景として白色のボードを設置した。

### 5.4 結果

投影結果を図4に示す。図4の1行目は室内照明下での投影対象の様子であり、図4の2行目は光線制御の結果を

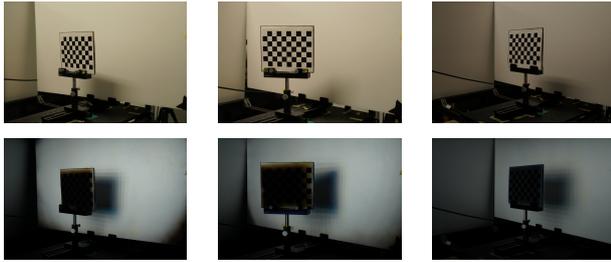


図 4: 室内照明下での投影対象 (1 行目) . 光線制御の結果 (2 行目) . 提案手法による対象の姿勢を変えた結果 (1, 2 列目) . 従来手法 [4] による結果 (3 列目) .

示す. 1, 2 列目は提案手法による光線制御の結果を示す. 1 列目と 2 列目では投影対象の姿勢を変えている. 3 列目は従来手法 [4] による光線制御の結果を示す.

対象に光を当てない光線制御により, 対象の表面が暗くなり, 周辺は明るく見えることが確認できた. また, 対象の姿勢を変更した場合でも, 対象の姿勢に合わせて対象に当てない照明の制御ができることを確認した. さらに, 従来手法 [4] の光線制御を, 1 列目と同じ位置姿勢の対象に対して適用した場合の結果を示す.

## 6. 考察

シミュレーションによる投影画像の生成の処理速度は 470 fps となった. これは, DPM の処理工程の 1 ステップとして, 許容可能なスループットであると考えられる.

また, 図 4 より, 本手法では従来手法での投影結果と比較して対象の縁へ入る迷光が現れた. これは実際の光線は線ではなく, レンズの収差によって拡がりをもつためであると考えられる. しかし, 本手法は光線を直線で表現しているため, 拡がりを持った実際の光線の振る舞いを完全に再現できない. そのため, 実光線を正確に再現する光線情報の表現方法の確立が課題である.

## 7. まとめ

本稿では, 明るい周辺環境下でのダイナミックプロジェクションマッピングの実現のために, レイトレーシングを用いた照明の光線制御の高速化を提案した. シミュレーションでは本手法が明環境の DPM へ応用できる速度性能があることを示した. さらに, 投影実験より, 本手法の光線制御の有効性を示した.

今後の課題として, PM 投影用のプロジェクタと高速トラッキングシステムを利用した DPM システムに本手法を組み合わせることで, 明るい周辺環境下での DPM システムの完成を目指す.

## 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] 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.

[6] Koji Aoyama, Kazuki Yokoyama, Tomoya Yano, and Yuji Nakahata. Eye-sensing light field display for spatial reality reproduction. In *SID Symposium Digest of Technical Papers*, Vol. 52, pp. 669–672, 2021.

[7] 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.

[8] 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.