



# 再帰透過光学素子を用いた光学系設計のための レイトレーシング法によるシミュレーションの応用検討

Application of Ray Tracing Based Simulation for the Design of Retrotransmission optical system

木内舜司<sup>1)</sup>, 小泉直也<sup>1)</sup>

Shunji KIUCHI and Naoya KOIZUMI

1) 電気通信大学 (〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1)

**概要:** 再帰透過光学素子の活用は、視域や迷光、光源サイズなどの検討のため、実際の光学系を組み立てる必要があり、多くの労力を要する。そこで、レイトレーシング法によるシミュレーションを検討する。再帰透過光学素子を用いた既存の光学系を再現し、その性質に対する追試をシミュレーション内で行った。実験の結果、シミュレーションの応用可能な場面と限界が判明した。

**キーワード:** 空中像, 再帰透過光学系, レイトレーシング

## 1. はじめに

再帰透過光学素子は光源の光を反射・屈折させ、実空間上に裸眼で観察可能な CG 映像を空中像として表示できる。これは拡張現実感 (AR) や非接触インタラクションの実現に有用な手法である。AR や非接触インタラクションを実現する手法としては、AR グラスやレンズを用いた空中像表示手法も存在するが、再帰透過光学素子は AR グラスのようにユーザが装置を装着する必要がなく、レンズのように収差や歪みが生じないという利点がある。本稿では ASKA3D プレート<sup>1)</sup>のような 2 層構造を持つ再帰透過光学素子について考え、以下ではそのような光学素子を MMAPs (Micro-mirror array plates) とする。

MMAPs は光源からの光を MMAPs に対して面対称な位置に空中像として結像させる。この面対称性を利用し、透明物体内に歪みのない映像を表示する光学系 [1] や、実物体による遮蔽の影響を低減させるプロジェクション光学系 [2] などが提案されてきた。しかし、MMAPs には面対称性以外に観察者にとって邪魔になる迷光の発生、空中像の視認可能範囲の制限、輝度の減衰などの特性がある。これらの特性を光学系設計時に検討するには、実際に光学系を組み立てたり、複雑な計算を行う必要があり労力を必要とする。また、光学系を組み立てた後では、構造などの変更が容易でないため、光学系設計を繰り返し検討することが困難である。

本稿では、再帰透過光学系設計をシミュレーションにより検討することを目的として、レイトレーシング法によるシミュレーションの設計への応用を検討する。シミュレーションとして、Kiuchi ら [3] が提案した Blender を用いたシミュレーション手法を用いた。本稿では、鏡における複数

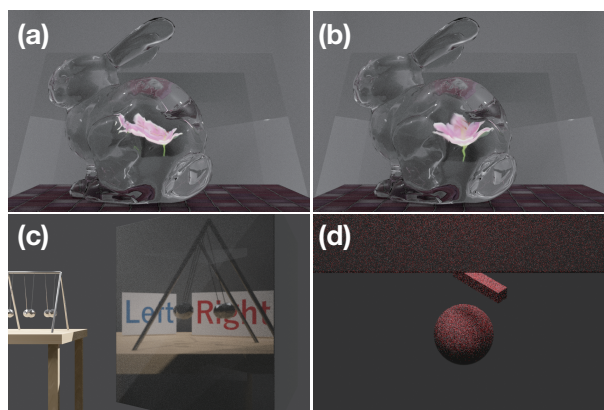


図 1: シミュレーションした光学系の様子。(a) 補償なしの InFloasion[1], (b) 補償ありの InFloasion, (c) 反射を利用した奥行き反転解消光学系 [4], (d) ShadowlessProjector[2]

回反射を利用する光学系 [4], 屈折の効果を利用する光学系 [1], 拡散素材にプロジェクションする光学系 [2] の 3 つの光学系の追試をシミュレーションで行い、その評価を行った。

## 2. 関連研究

### 2.1 再帰透過光学系

再帰透過光学系とは、光源の光を MMAPs を用いて面対称位置に結像させて、空中像を表示したりプロジェクション光学系を実現する光学系である。これまで様々な再帰透過光学系が提案されてきており、光学系の用途によってしばしば MMAPs 以外の素子で発生する反射・屈折・拡散が利用されている。屈折を利用した例として InFloasion[1] がある。この光学系では透明物体内に歪みのない映像を表示するために、光源側にも映像表示対象となる透明物体と同形

<sup>1)</sup><https://aska3d.com/ja/>

状の透明物体を配置することで、映像の歪みを補償している。反射を利用した例として、松村ら [4] の光学系では鏡の複数回反射を利用することで MMAPs を用いた光学系で発生する奥行き反転を解消している。拡散を利用した例として ShadowlessProjector[2] がある。この光学系はプロジェクション光学系であり、拡散物体に投影した映像を MMAPs を用いて面对称位置に置かれた物体に再投影することで、遮蔽のないプロジェクションシステムを実現するものである。

このように再帰透過光学系では、種々の光学素子と組み合わせで空中像にとどまらない多様な映像表現を実現できる。しかし、光学系に含まれる素子が増えるほど、最適な映像表示を探究するための光源サイズや結像位置、迷光や視域など考慮すべき設計パラメータが増加する。本研究ではこれらの複雑な光学設計を実際に光学系を組み立てずに実現するために、屈折・反射・拡散の特性を含んだ光学系に対するシミュレーションの活用を検討する。

## 2.2 光学シミュレーション

これまで MMAPs に対する光学的なシミュレーションとして複数の手法が用いられてきた。Otao ら [5] は MMAPs を用いた光学シースルー型 HMD (Head Mounted Display) の開発に、光線の経路を描画する手法でレンズ位置と像の結像位置のシミュレーションを用いている。Maekawa ら [6] は MMAPs と似た性質を持つ DCRA (Dihedral Corner Reflector Array) 内での反射回数によって空中像や迷光を生成する光の強度をヒートマップ表示している。これらの手法では像の結像位置や強度のシミュレーションが可能だが、像や迷光の形状や色など見た目を再現することは難しい。そこで、本稿ではレイトレーシング法を用いた CG により空中像の見た目を再現できるシミュレーションを扱う。

## 3. 実装

MMAPs を Blender<sup>2</sup>を用いてモデリングし、Cycles<sup>3</sup>を用いて光学系をレンダリングした。以下では、そのモデリング手法とレンダリング設定を述べる。

### 3.1 モデリング

現実における ASKA3D プレートのような 2 層構造を持つ MMAPs を参考に Blender を用いてモデリングした。MMAPs はソーダライムガラスの両面にミラー蒸着を施したミラーアレイが 2 層直交して重なる構造を持つ。Kiuchi ら [3] はこのガラスを無視して MMAPs のモデリングをしていた。この時空中像をシミュレーションできたが、生成された像には線状のノイズが発生していた。そこでガラスを追加で配置し、さらに MMAPs を構成する素材の材質も現実の MMAPs を参考に設定した。

MMAPs を構成する素材の配置方法と材質の設定は以下の通りである。各層のミラーアレイの間隔は 0.5 mm とし、各ミラーの高さは鏡間隔の 2.5 倍である 1.25 mm とした。ガラスは全てのミラーアレイをちょうど覆うように配

置した。鏡の反射率はアルミ蒸着ミラーを参考に 87% とし、ガラスの屈折率は 1.52 とした。モデリングは Blender 内の単位距離 1 を 1 cm と仮定して行った。

### 3.2 レンダリング

この章ではレンダリングの設定について述べる。レンダリングアルゴリズムとして Path tracer を指定し、計算は GPU を用いて行った。各ピクセルでのサンプリング数は 1024 とした。全てのレンダリングは CPU に Intel Core i9-9900XE (3.0 GHz)、GPU に GeForce RTX 2080 Ti を搭載した計算機を用いて行った。この時、解像度 512 × 512 ピクセル、最大バウンス数 12 で光源と MMAPs だけを配置しレンダリングした時の計算時間は 35 秒程度であった。

## 4. 光学系設計

レイトレーシング法を用いたシミュレーションにより、物体の反射・屈折・拡散を利用する既存の光学系を再現した。シミュレーションが光学系を再現できるか確認するために、実際の光学系とシミュレーションによる光学系の性質を比較する実験を行った。

### 4.1 奥行き反転を解消する光学系

松村ら [4] の、2 枚の鏡を利用し MMAPs を用いた際に発生する奥行き反転を解消する光学系をシミュレーションを用いて設計した。この光学系では鏡の複数回反射を利用し、擬似的に 2 枚の MMAPs が直交する状態を作り出し、空中像の奥行き反転を解消している。この光学系の模式図を図 2(a) に示す。MMAPs は一片が 48.8 cm のものをモデリングして用いた。実験は 2 つの鏡の頂角  $\theta$  を 22.5° と 45° の 2 通りで実験を行った。

#### 4.1.1 実験: 結像位置

この光学系が再現できていることを確認するために、まずは空中像の光学系からの飛び出し距離を計測した。レンダリングの出力は 2 次元画像となるため、直接空中像の飛び出し距離を測ることはできない。そこで、計測は左右のカメラから撮影した 2 枚の画像の視差から奥行き位置を算出する方法で行った。光源から MMAPs までの距離  $X$  は 0 cm – 60 cm まで 10 cm ずつ変化させて奥行き位置を計測した。光源は正方形の白色光源を使用した。

計測した飛び出し距離と理論値の比較を図 3 に示す。理論値と実測値の絶対誤差の平均は頂角が 22.5° の時に 1.19 cm、45° の時に 0.88 cm であった。したがって実測値は理論値とほぼ同じ値を取り、空中像の飛び出し位置は再現できていることがわかった。

### 4.2 InFloasion

光の屈折を利用し、透明物体内に歪みのない映像を表示する光学系 InFloasion[1] をシミュレーションを用いて再現した。この光学系では、映像表示対象となる透明物体の鏡像体を光源側に配置することで、透明物体内の映像の歪みを補正している。この光学系の模式図を図 2(b) に示す。MMAPs は一辺 35 cm でモデリングしたものをを用いた。 $D_1$  及び  $D_2$  は、それぞれ  $D_1 = 14.9\text{cm}$ 、 $D_2 = 20.7\text{cm}$  とした。

<sup>2</sup><https://www.blender.org/>

<sup>3</sup><https://www.cycles-renderer.org/>

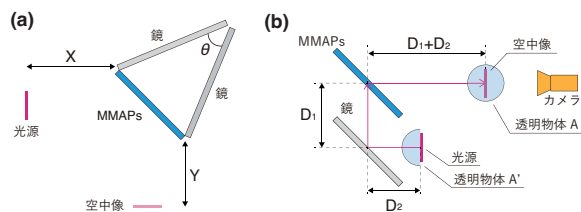


図 2: (a) 松村らによる空中像の奥行き反転を解消する光学系 [4] の模式図。 (b) InFloasion[1] の光学系の模式図

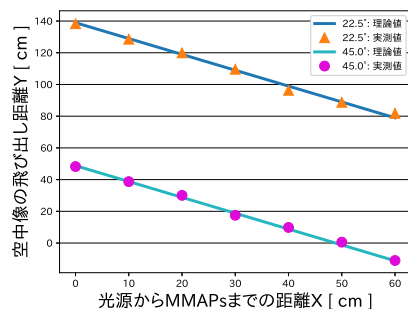


図 3: 空中像の飛び出し距離

#### 4.2.1 実験: 補償による効果

光源側に補償用の透明物体を置いた際の効果を、所望の映像と結像光とのズレを計測し評価した。映像表示対象となる透明物体 A には、一辺 5 cm で屈折率 1.52 の透明な立方体を用いた。映像をレンダリングする際は、立方体を鉛直方向を回転軸として  $15.8^\circ$  の回転を施した状態で映像提示位置に配置した。また、補償用の透明物体 A' は透明物体 A と同じ材質で、映像提示位置で透明物体 A を切断したような形状の四角柱を使用した。また、レンダリングする画像の解像度は  $1080 \times 720$  ピクセルとした。

以下の 3 条件で透明物体内に表示された映像を撮影し、透明物体 A' による補償の効果を検証した。

- 所望の映像：透明物体 A の内部に埋め込む代わりに、透明物体 A' を用いて透明物体 A' 内に表示された映像を撮影した。
- 補償なしの映像：図 4 に示す光学系において補償用の透明物体 A' を取り除いて、透明物体 A の内部に表示された映像を撮影した。
- 補償ありの映像：図 4 に示すように、補償用の透明物体 A' を配置して映像を撮影した。

3 条件でレンダリングした映像の画像内での位置を比較した。比較には図 4 で示す格子点のレンダリング画像内での位置を用いた。計測は各列ごとに線分の交点の水平位置を求め記録した。交点の記録が完了した後、

- 所望の映像と補償なしの映像
- 所望の映像と補償ありの映像

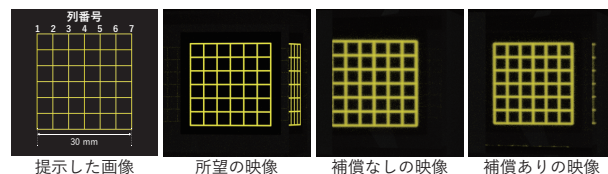


図 4: 提示された映像の様子

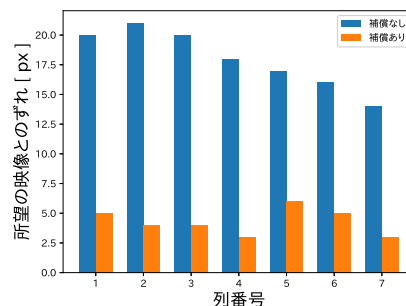


図 5: 映像提示位置の変化

の 2通りの組み合わせについて、各画像の対応する格子点の座標の差分を求め、補償用物体の有無による映像表示位置の変化について調査した。

図 4 に 3 条件の方法でレンダリングされた透明物体内の映像の様子を示す。所望の映像とのズレは、補償なしの場合の平均で 18.00 ピクセル、補償ありの場合の平均で 4.29 ピクセルであった、この結果から、補償なしの場合は所望の映像から映像の位置が大きく変位しているのに対して、補償ありの映像では変位が小さいことがわかった。これにより補償の効果が確認でき、InFloasion の光学系の性質が再現できたことがわかった。

#### 4.2.2 実験: 光源の大きさ

屈折の影響により透明物体内に表示できる空中像の大きさには限りがある。球体の透明物体を対象に光学系をシミュレーションし、透明物体内に像が欠けることなく空中像を表示するための光源の大きさを調査した。透明物体は屈折率 1.52 で半径が 5 cm の球とした。光源には正方形の白色光源を用い、一辺の長さを 0.25 cm - 5.0 cm まで 0.25 cm 間隔で変化させて透明物体内の映像をレンダリングした。

所望の映像と補償ありの映像において表示された像の大きさを比較した。レンダリングした映像を設定した閾値で 2 値化し、映像部分のピクセル数を計測した。所望の映像と補償ありの映像におけるピクセル数の比を測定値とした。この時、映像と迷光が重なってしまい、画像処理でピクセル数を算出する際に 2 つの像が 1 つの塊として検出されてしまったものは、正確な面積が計測できないため測定値を 0 とした。表示された映像の様子と測定の結果を図 6 に示す。結果より光源の一辺の長さが 3 cm を超えたあたりから表示される映像が徐々に歪み、所望の映像よりも像の面積が小さくなることがわかった。また、4.5 cm を超えたあた

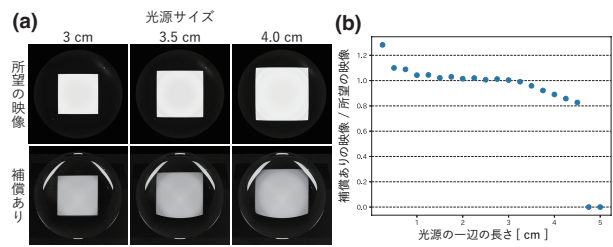


図 6: (a) 光源サイズに応じて変化する映像の様子, (b) 所望の映像に対する補償ありの映像の大きさの比

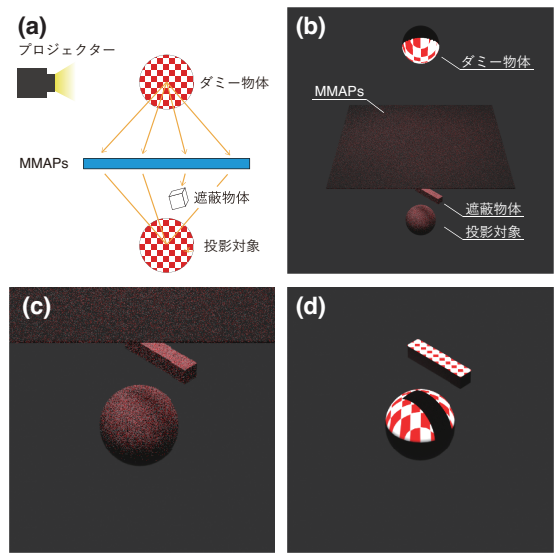


図 7: (a) ShadowlessProjector[2] の光学系の模式図, (b) シミュレーションの様子, (c) 投影された像の様子, (d) 単に上から映像を投影した時の様子

りから迷光と映像が重なってしまうことがわかった。

### 4.3 ShadowlessProjector

Hiratani ら [2] の実物体による投影映像の遮蔽を MMAPs を用いて解決する光学系を, シミュレーションを用いて設計した。この光学系では, 投影対象となる物体の鏡像体に投影した映像を MMAPs を用いて面对称位置に配置された投影対象物体に転送することで, 実物体による遮蔽のないプロジェクション光学系を実現している。この光学系の模式図を図 7(a) に示す。MMAPs は一辺が 48.8 cm でモデリングしたものを用いた。また投影対象となる物体の素材を理想的な完全拡散素材とするため, 素材の拡散度を表すパラメータ *Roughness* を 1.0 とした (0.0 – 1.0)。

シミュレーションを用いてレンダリングした光学系の様子を図 7(b), (c), (d) に示す。図 7(c) と図 7(d) のように上から映像を投影した場合を比較すると, 遮蔽物体による影が低減されていることがわかる。しかし, 本来投影されるべき映像は図 7(d) のようなチェック模様であるのに対し, 図 7(c) ではチェック模様が見られず薄い赤の映像が投影されたのみであった。したがっての本シミュレーションでは, 拡散物体への映像の投影が難しいことがわかった。

表 1: 材質による光学系の特性

素材の性質	反射 [4]	屈折 [1]	拡散 [2]
光の転送	○	○	○
映像の転送	○	○	×

### 5. 考察

本研究により判明した, 再帰透過光学系に含まれる MMAPs 以外の素子の素材のシミュレーションにおける挙動についてまとめると表 1 のようになる。反射や屈折を含む光学系に関しては, 奥行き反転を解消したり映像の提示位置を補償したり, 光学系の性質が再現されていることがわかった。また, 光源サイズなどの検討に本手法を用いることが確認できた。拡散を含む光学系に関しては, 光を一度拡散させても MMAPs を介して面对称位置に光が転送されることがわかったが, 拡散物体に対する映像の投影は実現できないことがわかった。

### 6. むすび

本論文では再帰透過光学系のシミュレーションによる再現を目的に, 既存光学系の追試をシミュレーションを用いて行い, その性質について調査した。MMAPs 以外に反射・屈折・拡散素材を含んだ光学系をシミュレーションにて再現し, その光学系の性質が再現されているか評価した。その結果, 反射・屈折素材を含んだ光学系に関しては, 光学系の性質の再現と映像の結像が確認できた。しかし拡散素材を含んだ光学系に関しては, 光学系の性質は再現できるが映像が正しく拡散物体上に投影されないことがわかった。謝辞 本研究はキャノン財団の助成を受けたものです。ここに記して謝意を表す。

### 参考文献

[1] 横瀬ら. Infloasion:透明物体内に映像を結像させる光学系. 信学技報, 第 118 巻, pp. 89 – 94, 2018.

[2] Hiratani et al. Shadowless projector: Suppressing shadows in projection mapping with micro mirror array plate. In *IEEE VR Poster*, pp. 1309–1310, 2019.

[3] Kiuchi et al. Micro-mirror array-plates simulation using ray tracing for mid-air imaging. In *IEEE VR Poster*, pp. 768–769, 2020.

[4] 松村ら. 単一の再帰透過光学素子による空中像の奥行き反転を解消する光学系. *IPSJ 研究報告 EC*, No. 10, pp. 1 – 6, 2020.

[5] Otao et al. Air mounted eyepiece: Optical see-through hmd design with aerial optical functions. *AH '18*, pp. 1:1–1:7, 2018.

[6] Maekawa et al. Transmissive optical imaging device with micromirror array. Vol. 6392, pp. 63920E:1–63920E:8, 2006.