



レイトレーシング法を用いた 再帰透過光学系の再現のための基礎検討

Preliminary study for (reproduction of) retroreflective optical system using ray tracing method

木内舜司¹⁾, 佐野文香¹⁾, 小泉直也^{1),2)}

Shunji KIUCHI, Ayaka SANNO, and Naoya KOIZUMI

1) 電気通信大学 (〒182-0025 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, {kiuchi, sano}@media.lab.ucc.ac.jp, koizumi.naoya@uoc.ac.jp)

2) JST, さきがけ(〒332-0012 独立行政法人科学技術振興機構さきがけ川口市本町 4-1-8)

概要 : 本研究では, 再帰透過光学素子により結像される空中像をレイトレーシング法によりシミュレーションし, その評価を行った. 再帰透過光学素子は空中に実像を結像できるが, 高価かつ破損しやすいため, その挙動を確認することが容易でない. そこで再帰透過光学素子を用いた空中像表示環境の再現を目的として, レイトレーシング法を用いたシミュレーション手法を提案する. 本稿では, ミラーアレイによる反射の様子を, PBRT を用いてレンダリングしステレオアルゴリズムを用いて 3 次元位置を計算した.

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

再帰透過光学系とは, 光源の光を反射・屈折させることによって空中に像を結像する光学系である. これは空中像が組み込まれた, デジタルサイネージやインタラクティブシステムなどに利用される. 本稿では, 再帰透過光学系として, ASKA3D プレート[1]のような 2 層構造を持つ再帰透過光学系について考える. 図 1 に再帰透過光学系をレイトレーシング法でシミュレーションした様子を示す.

再帰透過光学系は光源からの光を光学素子に対して面対称な位置に結像させるという特徴を持つ. しかし, 光学素子は高価かつガラス製で薄いため破損しやすく, 挙動を確認することが容易でない. また, 再帰透過光学系では, 図 2 のように再帰透過する結像光のほかに, 2 種類の迷光が発生する. そのため空中像とは別に迷光の見え方や, 迷光を表示しない方法を考える必要がある. これらの要因から光学的知識を備えていない人による, 再帰透過光学系により表示した空中像を用いた空間デザインやインタラクティブシステムの設計が困難となっている.

本稿では再帰透過光学素子を用いた空中像表示環境の再現を目的として, レイトレーシング法を用いたシミュレーション手法を提案する. 再帰透過光学系は, 光源からの光を再帰透過光学素子に対して面対称な位置に結像させること, 迷光が発生すること, 光源の光の輝度が空中像として結像される際に減少すること, 及び空中像を観察できる視野範囲が限られていることといった特性を持つ. そこで

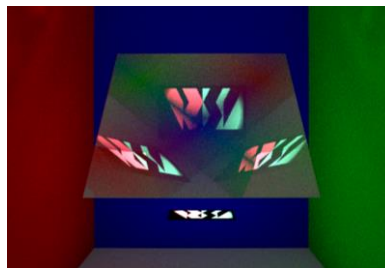


図 1 レイトレーシング法による再帰透過光学系

それらの特性のうち, 本稿では光源と空中像の面対称性について評価した. 評価方法として, レンダリングされた画像に対してステレオアルゴリズムを用いて, 結像された像の 3 次元位置を計算した.

2. 関連研究

2.1 再帰透過光学系

再帰透過光学素子として ASKA3D プレートのほかに, Dihedral corner reflector array (DCRA) [2], Radially arranged DCRA[3]などが挙げられる. 本稿では ASKA3D プレートのような 2 層式再帰透過光学系についてのみ考え, 以下では 2 層構造を持った再帰透過光学素子を (Micro Mirror Array Plates, MMAPs) とする.

MMAPs の各層は図 3 のように, 2 枚の Slit Mirror Array (SMA) が直行した構造を持つ. このような MMAPs は, 入射光を各層の SMA で 1 回ずつ反射することで正しく再

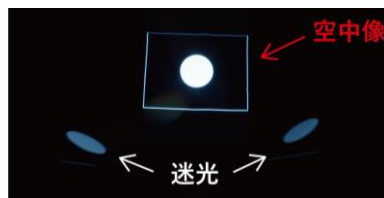


図 2 再帰透過光学系での迷光

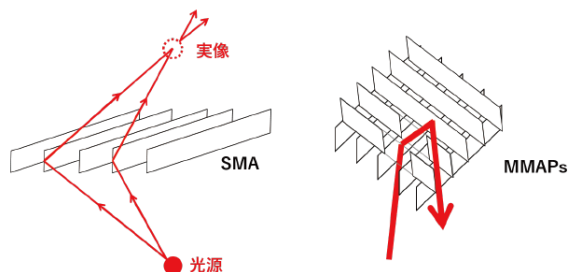


図 3 SMA の構造 (左) と結像の原理 (右)

帰透過させる。これにより光源から出射した光は MMAPs と面对称な位置に空中像として結像する。しかし、各層の SMA への入射光が必ず 1 回ずつ反射するとは限らず 0 回や 2 回ずつ反射する場合もある。この光は図 2 に示すように迷光として現れる。このような迷光は、視点位置や光源の特性によって性質が異なる。しかし光学系を組み立てる前に、迷光の見え方をシミュレーションすることができなかった。そこで、事前に空中像表示のシミュレーションができれば、空中像を用いた最適なデザインやデジタルサインエージを設計する際の有用な手がかりとなる。

2.2 シミュレーション

空中像と迷光のシミュレーションとしては、MMAPs の反射回数を等高線図で表現する手法がある[4]。しかし、迷光の具体的な見え方はシミュレーションされておらず、設計段階での応用には適していない。

光線の挙動をシミュレーションする方法として、レイトレーシング法がある。レイトレーシング法は、視点から光源への光線を追跡することにより、写実的な CG を生成するための手法である[5]。レイトレーシング法における光線は幾何光学の考え方を採用しており、回折や偏光といった波動光学的な考え方は用いていない。しかし、物体表面上の反射・屈折・拡散といった特性は、現実の特性を忠実に計算している。このことから、光線の挙動が重要になる空中像のシミュレーションに有用であると考えられる。

3. 提案手法

3.1 目的

本研究では再帰透過光学系の挙動をレイトレーシング法により再現することを目的とする。そのために現実の MMAPs の挙動が忠実に再現されるような設計をする。

3.2 モデリング

モデリングする MMAPs を MMAPs' とし、MMAPs' のス

リット間隔やスリット数は MMAPs と等しくなるように設計する。これは、シミュレーション結果と実際の MMAPs による挙動を比較しやすくするためである。MMAPs' をモデリングする際に参考にした MMAPs は ASUKANET 製の光学結像デバイス (TRG-0002) であり、スリット数は $1360 \times 2 = 2720$ 個で、スリット間隔は 0.5mm である。モデリングは Blender を用いて行い、現実の 1mm を Blender 内の距離 0.1 と考えてモデリングをした。

3.3 レンダリング

画像のレンダリングには PBRT-v3 を使用し、MMAPs' の材質設定や、光源の設定などはすべて PBRT-v3 内で設定した。また、MMAPs' のミラーレイの反射率は 100% とした。現実の鏡の反射率は $90\sim 95\%$ 程度だが、反射による光の挙動のみを調べるため 100% とした。

4. 実験

4.1 目的

本稿では 2 層式再帰透過光学系が再現できていることを確認するために、光源から出射した光が MMAPs' に対して面对称な位置に結像するか評価する。そこで、レンダリングされた画像に対してステレオアルゴリズムを適用し、結像された像の 3 次元位置を計測した。

4.2 実験条件

PBRT-v3 の空間内において MMAPs' - 光源間距離を変化させ、各条件での結像された像の 3 次元位置を調べた。シミュレーション実験の概要を図 4 に示す。PBRT-v3 での距離 1 を 1cm とした。MMAPs' - 光源間距離を L_A 、カメラ - MMAPs' 間距離を L_B と表記する。 L_A は光源から MMAPs' の中心までの距離を指し、 L_B は PBRT-v3 におけるカメラから MMAPs' の中心までの距離を指す。 L_A は $10\sim 75\text{cm}$ の 5 間隔の 14 点、 L_B は 120cm とした。光源は表面の半球面上のあらゆる方向に均一に拡散光を出射する球とした。この球の直径は 1.33cm であり、図 5 のような 4×4 のグリッド状に球の中心間距離が 2.66cm となるように配置した。この時、グリッドの四隅の点 $G_1 \sim G_4$ による平面 $G_1 G_2 G_3 G_4$ が、Y 軸に対して垂直になるように配置した。MMAPs' は平面 $G_1 G_2 G_3 G_4$ の中心から Y 軸方向に正の位置に配置した。また、水平方向から空中像を観察できるようにするために、XZ 平面と MMAPs' の平面のなす角が 45° になるようにした。画像はステレオアルゴリズムの計算のために、カメラ

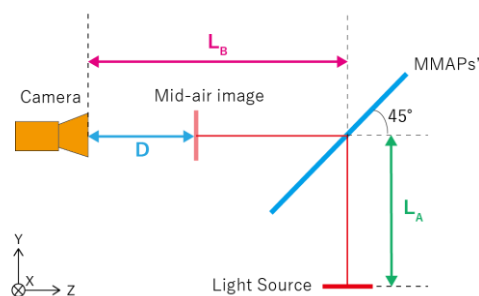


図 4 実験概要図

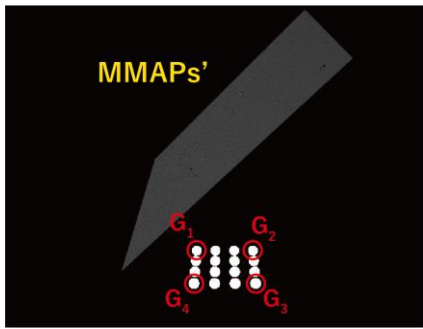


図 5 光源を MMAPs' の真下に配置した様子

を MMAPs' の正面から左右に 2.5cm だけずらし左右画像 2 枚を各条件においてレンダリングした。したがって 2 カメラ間の距離は 5cm になっている。カメラの画角は 76° に設定し、レンダリングする画像の解像度は 1080×720 pixel とした。レンダリングアルゴリズムは PBRT-v3 で用意されている "path" を指定し、ピクセルごとの光線サンプル数は 128 とした。

4.3 ステレオアルゴリズム

グリッド上に配置した 16 点の左右画像によって求めた視差から 3 次元位置を計算した。計算方法として、図 6 のように左右のカメラの画像平面が正確に同一平面上にあり、正確に平行な光軸を持ち、同じ焦点距離 f を持つカメラを考える。 h は 2 カメラ間の距離であり、 D は 2 カメラの midpoint から 3 次元空間上の点 P までの距離である。光軸とはレンズの中央を通り、レンズ面と直行する Z 軸のことである。この時、点 P はそれぞれ左右の画像上の位置 x_l , x_r に投影され、左右画像での視差 d は $d = x_l - x_r$ で求められる。ここで三角形の相似より以下の式が得られる。

$$\frac{h-d}{D-f} = \frac{h}{D} \quad (1)$$

(1)式を D について解くと、

$$D = \frac{fh}{d} \quad (2)$$

となる。したがって、左右画像の視差 d 、焦点距離 f 、2 カメラ間の距離 h から点 P までの距離 D が求められる。

今回のレイトレーシング法によるシミュレーションでは、レンズ歪みなどは発生せず、図 6 のような理想的な状態でレンダリングすることができる。したがって、空中像の 3 次元位置は、(2)式によって求めることができる。今回

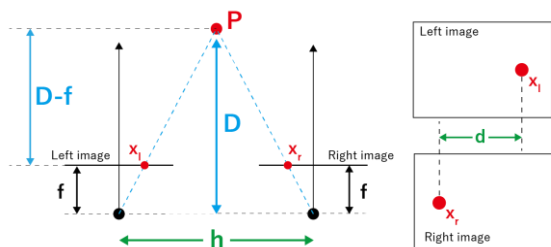


図 6 完全に平行化された 2 カメラ間の関係

レンダリングする際に使用したカメラには焦点距離の設定がなかった。しかし、画角を θ 、画像面の対角線の長さを s とすると、以下の式から焦点距離を求めることができる。

$$f = \frac{s}{2 \tan\left(\frac{\theta \times \pi}{360}\right)} \quad (3)$$

したがって画角と画像面の大きさから(3)式によって求められた値を焦点距離として測定値を算出した。

4.4 実験手順

実験手順は以下のとおりである。図 7 のように

1. MMAPs' は配置せずに、MMAPs' と面対称な位置に比較用の光源を直接配置した場合
2. 光源を MMAPs' の真下に配置した場合

の 2 通りの組み合わせについて、各 L_A に対して左右画像 2 枚をレンダリングした。左右画像の 16 個の球に対する視差は、それぞれ対応点を各球の中心として実験者がマウスで指定し求めた。求められた視差と計算した焦点距離 f 、2 カメラ間の距離 h から(2)式より、カメラ-空中像間距離 D を求め、 $L_B - D$ を測定値とした。

4.5 結果

実験の結果を図 8 に示す。プロットした点は 16 点の視差から計算された測定値の平均であり、エラーバーは標準偏差を表す。点線で引かれた直線は最小二乗法により算出した直線を引いたものである。

5. 考察

4.5 より、比較用物体を光源から MMAPs' に対して面対称な位置に置いた時と、光源を MMAPs' の真下に配置したときの 3 次元位置はほぼ等しくなった。これにより、レイトレーシング法により MMAPs' の挙動をシミュレーション



図 7 比較用の光源を配置した場合 (左) と MMAPs' を配置した場合 (右)

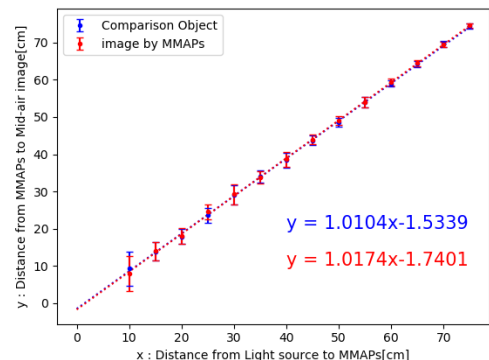


図 8 実験結果

すると、光源から出射した光は $MMAPs'$ に対して面対称な位置に像を結んでいると考えられる。また、測定値の標準偏差が L_A が大きくなるにつれて小さくなっている。これはステレオアルゴリズムの計算過程によるものである。ステレオアルゴリズムでは、点 P がカメラから遠ざかるほど、左右画像における対応点の視差は小さくなる。(2)式より、 D は視差に反比例するので、点 P が遠い時に測定した視差の誤差が D に与える影響は大きくなる。これにより Z が大きいほどデータの範囲が大きくなり、標準偏差が大きくなったと考えられる。

今回のシミュレーションでは、図9のようにモアレのような周期的なノイズが発生した。この現象の要因として2点考えられる。1点目はレイトレーシング法のアルゴリズムによるものである。レイトレーシング法では、カメラから物体表面に向けて光線を放ち、物体表面で反射、屈折した光線が光源に到達するまで光線を追跡する。これにより光源から出射した光がカメラに結像の様子をピクセルごとに算出し、画像をレンダリングする。しかし、光線追跡において途中で遮蔽物などに衝突し、光源に到達しなかった光線はカメラに到達しない光とみなされ、ピクセルの色に加算されない。したがって、モアレが生じている部分では、 SMA とカメラから追跡される光線の角度が2回反射により光源に到達する角度として適しておらず、ピクセルの色が算出できなかったと考える。2点目として、 $MMAPs'$ の反射特性を完全な鏡面反射としてシミュレーションしたことによるものである。今回は反射による光の挙動に注目するために、鏡に入射した光はすべて鏡面反射方向に出射するものとした。しかし、現実の鏡は表面が完全に滑らかではなく、一部の光が表面の粗さによって散乱する。したがって、現実の $MMAPs$ では鏡表面での光の散乱成分によってモアレ部分が補償されているとすると、散乱特性も忠実に再現することでモアレ解消につながると考える。

今後の展望として、モアレの解消、迷光・輝度減少のシミュレーション、設計への応用が考えられる。前述のようにモアレの発生により空中像の正確なシミュレーションが困難である可能性が考えられるため、 $MMAPs'$ のモデリング方法やレイトレーシング法のアルゴリズムによる影

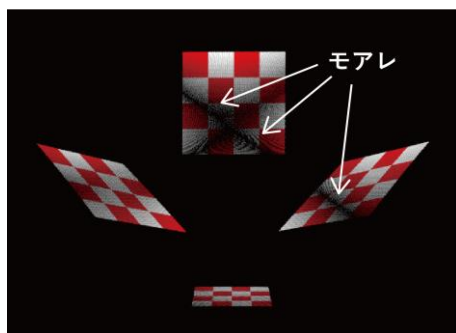


図9 モアレの様子

響を調査し、シミュレーション手法の向上を目指す。また、今回は光源と空中像の $MMAPs$ に対する面対称性についてのみ評価だったが、再帰透過光学系のシミュレーションとしては、迷光や輝度減少といった現象を再現する必要がある。そこで、迷光の結像位置や輝度減少率を現実の再帰透過光学系と比較することで評価する。さらに $EnchanTable$ [6]や $InFloasion$ [7]といった、物体の表面上や物体内に像を結像する設計をシミュレーションすることで、空間設計への応用の可能性を検討する。

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を目的に、レイトレーシング法による手法を提案した。 $MMAPs$ をモデリングし、光源から出射した光線が $MMAPs'$ によって像を結像の様子をシミュレーションした。本システムによって $MMAPs$ の光源からの光を $MMAPs$ と面対称な位置に結像する特性がシミュレーション可能か検討するため、ステレオアルゴリズムによる3次元位置の計算を行った。その結果、面対称な位置に像が結像されるが、同時にモアレのようなノイズが生じ、光源の形状や色を正確に把握できないことが分かった。

謝辞 本研究は、科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業(さきがけ, JPMJPR16D5)によるものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] 株式会社アスカネット: 光学結像装置特開 2012155345(P2012-155345S)
- [2] Satoshi Maekawa, Kouichi Nitta, Osamu Matoba: Transmissive Optical Imaging Device with Micromirror Array, Proc, SPIE, Vol. 6392, 63920E, 2006.
- [3] Yuta Yoshimizu and Eiji Iwase, Radially arranged dihedral corner reflector array for wide viewing angle of floating image without virtual image, Optics Express 27, pp. 918-927, 2019
- [4] 山本裕紹 他: "空中ディスプレイの開発と応用展開", シーエムシー出版, p.35-55 (2018)
- [5] James T. Kajiya: The Rendering Equation, SIGGRAPH'86 Proceeding of the 13th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, pp. 143-150, 198
- [6] Hiroki Yamamoto, Hajime Kajita, Naoya Koizumi, Takeshi Naemura, EnchanTable: Displaying a Vertically Standing Mid-air Image on a Table Surface using Reflection, Interactive Tabletops & Surfaces(ITS), pp. 397-400, 2015
- [7] 横瀬哲也, 大川達也, 苗村健, InFloasion: 透明物体内に映像を結像させる光学系, Entertainment Computing, 2018