



レイトレーシング法を用いた再帰反射による空中像の CG 再現のための基礎検討

齋藤旭¹⁾, 木内舜司¹⁾, 小泉直也¹⁾

Asahi SAITO, 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, asahi, kiuchi@media.lab.uec.ac.jp, koizumi.naoya@uec.ac.jp)

概要: 本研究では, Aerial Imaging by Retro - Reflection (AIRR) 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. AIRR を利用したシステムは実現可能性が高い一方, 空中像の解像度が低いため, 実物がなければシステムの設計が困難である. そこで AIRR 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 Mitsuba 2 を用いて AIRR 光学系を設計し, レンダリングされる空中像を実物と比較して評価した.

キーワード: レイトレーシング, 空中ディスプレイ, AIRR, Micro facet

1. はじめに

空中像とは空中に結像される実像のことを指す. 光の反射・屈折を利用して光学的に表示できる. 空中像を結像するための光学素子は複数開発されており, Roof mirror array (RMA)[1], Dihedral corner reflector array (DCRA)[2], ASKA3D プレート [9] などが挙げられる.

空中像光学系の 1 つに再帰反射を利用したものがあり, AIRR と呼ばれている [3]. AIRR は光源, ハーフミラーなどのビームスプリッター, 再帰性反射材から構成される光学素子である. まず, 光源から出た光がビームスプリッターで鏡面反射し, 再帰性反射材へ向かう. 次に, 再帰性反射材へ入射した光は入射方向へ再帰反射する. その後, 再帰性反射材から戻ってきた光がビームスプリッターを透過すると空中像を結ぶ. これにより光源の光は, ビームスプリッターを基準とした平面对称な位置に空中像を結像する.

AIRR の主な課題として, 空中像がボケてしまうことがあげられる. 再帰性反射材では理想的な再帰反射が行われず, 入射方向を中心とする拡散光として反射されるように設計されている. 再帰反射光の拡散を抑える再帰性反射材の開発も行われているが, 理想的な再帰反射が行われずに再帰反射光が拡散してしまう. また再帰性反射材は構造上の理由から再帰反射だけでなく鏡面反射も発生し, 空中像とは別に不要光を生じる. 鏡面反射による不要光は再帰性反射材を傾けることで制御可能だが, 再帰反射光は常に拡散するため AIRR を用いたシステムの設計には空中像のボケを考慮する必要がある.

本稿では AIRR による空中像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を提案する. 物理ベースのレンダラー Mitsuba 2 に AIRR の各種光学素子を実装し, レンダリング結果と実際の測定結果を比較した.

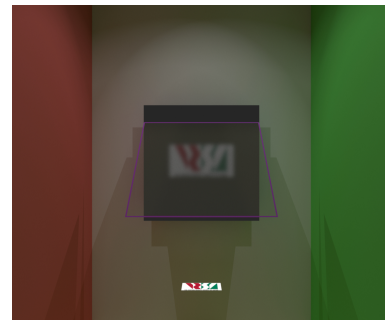


図 1: レイトレーシング法による AIRR 光学系

AIRR の特性は空中像がボケること, 空中像の輝度が低下すること, 再帰性反射材の鏡面反射成分やビームスプリッターの反射・透過により不要な光が現れること, ビームスプリッターを基準として平面对称な位置に結像することなどが挙げられる. それらの特性のうち, 本稿では空中像のボケに焦点を当て, 鮮明度を用いて評価した.

2. 関連研究

2.1 AIRR

AIRR は簡単に設置でき, 大規模なシステムにも応用可能な空中像光学系である [3]. AIRR はハーフミラーなどのビームスプリッターと再帰性反射材から構成される空中像光学系で, いずれも比較的安価に入手できる. また AIRR による空中像は, ビームスプリッターを基準とした光源と面対象な位置に結像され, 再帰性反射材の厳密な位置調整を行う必要がない. これらの理由から AIRR を用いた空中像のシステムは容易に設計でき, 実現可能性が高い. 一方で, AIRR により結像される空中像は, 再帰性反射材の反射光が拡散することにより, 飛び出し距離が長くなるとボ

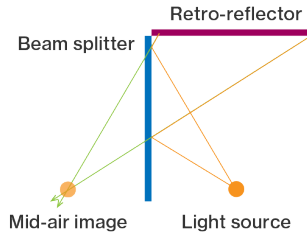


図 2: AIRR の概要図

ケも大きくなることが知られている。

2.2 シミュレーション

AIRR を用いたシステムの設計において、光線をシミュレーションする手法は有益である。千葉らは AIRR の多層化における輝度向上方法の研究をするうえでシミュレーションを行い、空中像の結像位置や輝度を概算し、提案する光学系の実現可能性を調査した [8]。藤井らは AIRR に用いる再帰性反射材の使用面積の削減を目的とした研究をするうえでシミュレーションを行い、再帰性反射材に入射する光の範囲の形状や結像する像の形状を概算し、提案する光学系が目的を達成していることを説明づけた [10]。ただし、これらの先行事例では空中像の外観をシミュレートしていない。

空中像の外観をシミュレートした例として、Micro mirror array plates (MMAPs) による空中像のシミュレーションを行い、実際の光学系と比較・評価した手法がある [6]。空中像の面対称性、輝度の減衰など MMAPs による空中結像技術の特性を挙げ、それぞれの特性に対して実物とシミュレーション結果を比較・評価することで実際の再帰透過光学素子による空中像の外観がシミュレートできていることを示した。

本稿の目的は AIRR 光学系における空中像の外観をシミュレートすることである。AIRR のシミュレーションが可能になれば MMAPs のシミュレーションと併せてデザインに応じた適切な空中像光学系の選択ができるようになる。また AIRR を構成する光学素子は安価で実現可能性が高いため、空中像光学系を利用した、テーマパークのアトラクションのような大規模なシステムを設計する際の有用な手掛かりとなる。

3. 提案手法

3.1 目的

本研究では AIRR 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 AIRR の挙動が忠実に再現されるような設計をする。

3.2 基本設計

本稿では Mitsuba 2 [4] を用いて、AIRR を構成する再帰性反射材とビームスプリッター、および光源の 3 つのオブジェクトをモデリングした。再帰性反射材オブジェクトは、3.2.1 節に述べるようにカスタム BSDF を定義してモデリングした。ビームスプリッターオブジェクトはアクリル板を仮定し、屈折率 1.49 の thinconductor を BSDF に設定

してモデリングした。光源オブジェクトは放射輝度 5 のエリアライトを設定してモデリングした。

3.2.1 再帰反射 BSDF

Mitsuba 2 では表面の粗い物体を仮定した BSDF がいくつか実装されており、これを利用することで拡散する反射光の成分を実装できる。拡散する反射光を持つ BSDF として、roughconductor が挙げられる。roughconductor は表面の粗い金属材質をモデル化した BSDF で、Microfacet モデルに基づいて実装されている。これにより鏡面反射方向を中心とする拡散光として反射光を計算する。

ここで鏡面反射を 2 回行うことを考えると、反射光は入射光の光路に向かう。まず、鏡面反射する物体に光が入射することを考える。 \vec{N} は物体の法線、 \vec{F} は入射方向のベクトル、 \vec{R} は出射方向のベクトル、 a は $-\vec{F} \cdot \vec{N}$ とする。 \vec{F} 、 \vec{N} は既知であるとする、 \vec{R} は以下のように求まる。

$$\vec{R} = \vec{F} + 2a\vec{N} \quad (1)$$

ここで、 $-\vec{R}$ を入射方向とした場合の鏡面反射を考える。 \vec{R}' を出射方向のベクトル、 b を $\vec{R} \cdot \vec{N}$ とすると、 $a = b$ であることから

$$\vec{R}' = -\vec{R} + 2b\vec{N} \quad (2)$$

$$= -(\vec{F} + 2a\vec{N}) + 2a\vec{N} \quad (3)$$

$$= -\vec{F} \quad (4)$$

と計算できる。したがって、2 回鏡面反射処理を入れることで再帰反射の実装ができる。

これらを踏まえて、本稿では表面の粗い金属の材質を仮定した BSDF に、2 回反射処理を入れることで反射光の拡散する再帰反射 BSDF を実装した。

4. 実験

4.1 目的

AIRR による空中像のボケが提案手法で再現できているか確認するため、レンダリングされた結果と実際に AIRR で表示した空中像を撮影した結果に対して鮮明度を測定した。

4.2 実験条件

実験における各種光学素子の配置は統一した。ハーフミラーと空中像の距離を L_A 、カメラと空中像の距離を L_B と表記する。 L_A は 100–600 mm の 100 mm 間隔の 6 点、 L_B は 700 mm とした。光源は横幅 15 mm の、垂直バーの画像を用いた。図 3 に実験の概要を示す。

実際の空中像を撮影して鮮明度を計測するため、予備検討から適切な撮影ができるようにカメラを設定した。カメラは Sony α ii、レンズはタムロン Di III RX0(焦点距離 28–75 mm)を用いた。レンズの焦点距離は 28 mm、ISO 感度は 50、F 値は 2.8、シャッタースピードは 0.4 秒に設定した。

レンダリングは実測の写真と同様に鮮明度の評価ができるように距離とカメラを設定した。Mitsuba 2 の距離 1 を 1 mm として設定し、レンダリングの解像度は 7952×300

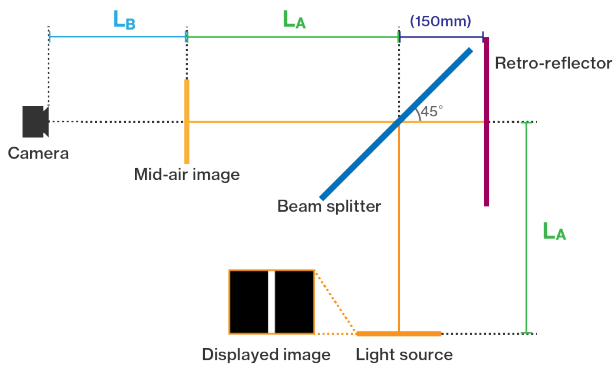


図 3: 実験の概要図

px, 焦点距離 28 mm, ピクセルの光線サンプル数は 2048 個とした。

実空間における測定では用いる再帰性反射材, シミュレーションによる測定では再帰反射 BSDF の粗さのパラメータをいくつか設定した. 実際の AIRR の測定では日本カーバイド工業 RF-Ax, RF-Ay, RF-AN, および Mipox Ref-Lite 9301 を用いた. シミュレーションによる測定では BSDF の粗さのパラメータを $\alpha = 0.001\text{--}0.010$ の範囲で, 0.001 ずつ変更して設定した.

また文献 [7] と鮮明度の比較ができるように, 予備検討を踏まえ粗さのパラメータを $\alpha = 0.0045$, L_A を 100–1500 mm の 100 mm 間隔の 15 点に設定して測定した.

4.3 鮮明度

鮮明度の評価に関しては AIRR のボケを計測した例 [7] で実施された手法を採用した. 評価方法として, まず垂直バー画像を光源とした空中像を撮影した. 次に垂直バー画像の撮像結果を水平方向に走査し, 輝度グラフを作成した. その後輝度グラフを正規化し, ピークの半分の値となる点の傾斜を計算し, これを測定値とした.

撮影された画像には空中像の他, 再帰性反射材の鏡面反射成分による不要光が含まれる場合がある. 従って実際の測定では不要光の含まれない部分のみを用いて画像解析した.

輝度グラフの作成にあたり, 画像解析結果の画素値と輝度を対応づけた. 実際の AIRR における空中像の撮影では輝度計の結果とカメラの撮影結果の画素値の結果から, 画素値が輝度と線形の関係を持つようにガンマ補正を行って輝度グラフを作成した. レンダリング時はガンマ補正は行わず, 光源輝度の設定と画素値を比較して対応づけた.

5. 結果

実際の AIRR とシミュレーションの結果を図 4 に示す. グラフの実線は実際の AIRR に対する測定結果, 破線はシミュレーションによる測定結果を表す. グラフの横軸は空中像の飛び出し距離 L_A , 縦軸は鮮明度の測定値を表す. いずれも空中像の浮遊距離 L_A が大きくなるにつれ傾きが単調減少していることがわかる. 実際に測定した結果はいずれも $\alpha = 0.002$ と $\alpha = 0.010$ の結果の間にプロットされた.

また実際の AIRR に対する測定では RF-Ax, RF-Ay,

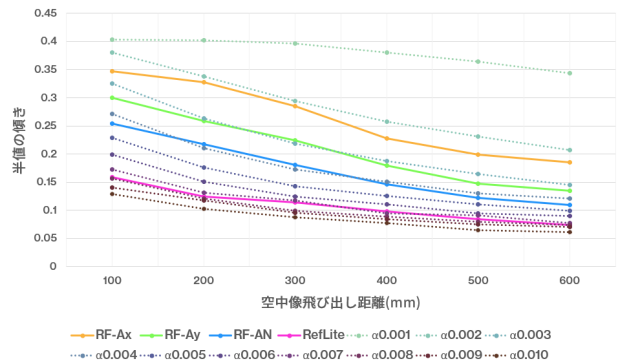
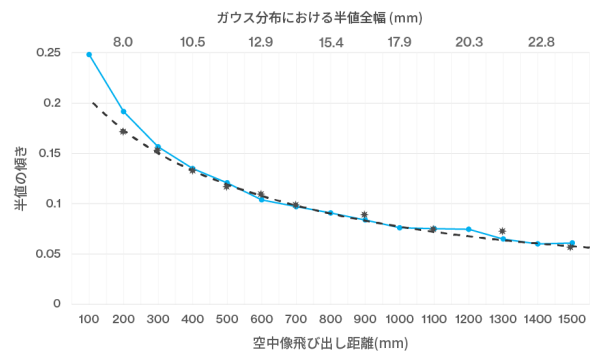


図 4: 実際の測定結果とシミュレーションの測定結果

図 5: $\alpha = 0.0045$ におけるシミュレーション結果 (青線) と文献 [7] の結果 (黒い破線と点)

RF-AN, Ref-Lite 9301 の順に鮮明度が高い結果になった. シミュレーションによる測定では粗さのパラメータ α の値が小さいほど鮮明度が高い結果になった.

粗さのパラメータを $\alpha = 0.0045$ に設定したときのシミュレーション結果と, 文献 [7] の鮮明度の結果を図 5 に示す. グラフの青線はシミュレーション結果を表す. 黒い破線とプロット点は文献 [7] の結果で, プロット点は実測データ, 黒い破線は理想的なガウス関数における半値の傾きと半値全幅の関係を表す. シミュレーション結果, 及び文献 [7] の実測データに関して, グラフの横軸は空中像の飛び出し距離 L_A , 縦軸は半値の傾きを表す. 文献 [7] の半値の傾きと半値全幅の関係に関して, 横軸は半値全幅, 縦軸は半値の傾きを表す.

6. 考察

結果から, 表面の粗い物体を仮定した BSDF に反射処理を 2 回入れた本提案において, 粗さのパラメータを $\alpha = 0.002\text{--}0.010$ の範囲で設定した場合に, 測定に用いた再帰性反射材と同程度の鮮明度を持つ AIRR の再現ができることがわかった. 特に Ref-Lite 9301 は $\alpha = 0.007$, RF-AN は $\alpha = 0.006$, RF-Ay は $\alpha = 0.005$ に設定しシミュレーションすることで空中像のボケに近いレンダリング結果の得られる可能性がある. しかし, RF-Ay および RF-AN の結果に関して空中像飛び出し距離が 100 mm でこれらの粗さパラメータの結果に一致せず, 像のボケが少ない場合にうまく再現できなかった. 考えられる原因として, 実装

した再帰反射 BSDF の不完全さにあると考えられる。今回実装した再帰反射 BSDF は再帰反射の拡散光にのみ着目したもので、輝度の減衰は考慮していない。そのため空中像の飛び出し距離が短く、かつ精度の良い再帰性反射材を使った場合は空中像のボケが少なく、光源の輝度減衰が半値の位置決め強い影響を及ぼすようになる。そのためシミュレーションの結果と実測の結果がずれたと考えられる。

実際の AIRR 光学系の測定結果のうち RF-Ax は、横軸に対して単調減少しているものの空中像の飛び出し距離が 200–300 mm の地点で少し盛り上がったような形状をしていた。その他の再帰性反射材の結果も 200–300 mm の地点で傾きが緩やかになっている。この現象に対して考えられる理由として、現状の再帰反射 BSDF で再現できない要素が実際の再帰性反射材に含まれている可能性と、装置の配置ミスなどによる人為的な測定誤差が考えられる。

シミュレーション結果のうち粗さのパラメーターを $\alpha = 0.001$ に設定した場合、他のシミュレーションの結果とグラフの形が異なり、空中像飛び出し距離の短いところでは変化が緩やかで、飛び出し距離が大きくなると変化も急になった。これは粗さのパラメーター α が極端に小さく、空中像の飛び出し距離も短いと像のボケも少なくなり、正常に鮮明度の変化が計算できなくなると考えられる。

文献 [7] の結果と粗さのパラメーターを $\alpha = 0.0045$ に設定したシミュレーション結果では、空中像の飛び出し距離 L_A が 300 mm 以上の範囲でほぼ等しくなった。ガウス関数の半値全幅と半値傾きの関係を表す曲線とシミュレーション結果が同様の軌跡を描くことから、実際の AIRR の空中像と同様に、シミュレーション結果による AIRR の空中像も飛び出し距離の増加で半値全幅が線形増加すると考えられる。しかし、空中像飛び出し距離が 200 mm 以下で逸れたことから、実装した再帰反射 BSDF は空中像の飛び出し距離が短い場合に再現できないと考えられる。

今後の展望として、再帰性反射材の鏡面反射や AIRR による輝度減衰も考慮した BSDF モデルの改良、空中像や不要光の結像位置の評価、AIRR 光学系を用いた設計への応用が考えられる。本稿の実装は像のボケのみに着目しており、輝度の減衰や再帰性反射材の鏡面反射成分などは考慮していない。再帰反射の拡散に関しても、表面の粗い物体による拡散反射を仮定して実装しているため、物理特性を考慮しモデルの改良を検討する。また、今回は AIRR のボケについてのみ評価したが、AIRR のシミュレーションとしては空中像や不要光の結像位置、輝度減衰といった他の特性も再現する必要がある。そこで、これらの特性についても実際の AIRR 光学系と比較することで評価する。

7. むすび

本稿では AIRR 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。AIRR の光学素子をモデリングし、空中像のボケが生じる様子をシミュレーションした。本システムにより AIRR の像のボケの再現性を検討し

た。実空間の AIRR と提案するシステムの空中像でそれぞれ鮮明度を測定し、ハーフミラーと空中像間の距離と輝度グラフの半値の傾きの変化に関して比較した。結果、実装した再帰反射 BSDF の粗さのパラメーターを $\alpha = 0.002\text{--}0.010$ の範囲で調整することにより実際の AIRR による空中像光学系再現の可能性が示唆された。

謝辞 本研究は、キャノン財団の助成を受けたものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] Yuki Maeda, Daisuke Miyazaki, and Satoshi Maekawa: Aerial imaging display based on a heterogeneous imaging system consisting of roof mirror arrays, 2014 IEEE 3rd Global Conference on Consumer Electronics (GCCE), pp. 211–215, 2014.
- [2] Satoshi Maekawa, Kouichi Nitta, and Osamu Matoba: Transmissive optical imaging device with micromirror array, *Three-Dimensional TV, Video, and Display V*, Vol. 6392, pp. 130–137, 2006.
- [3] Hirotugu Yamamoto, Yuka Tomiyama, and Shiro Suyama: Floating aerial LED signage based on aerial imaging by retro-reflection (AIRR), *Optics Express*, Vol. 22, Issue 22, pp. 26919–26924, 2014.
- [4] Merlin Nimier-David, Delio Vicini, Tizian Zeltner, and Wenzel Jakob: Mitsuba 2: A Retargetable Forward and Inverse Renderer, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 38, Issue 6, pp. 1–17, 2019.
- [5] Ryota Kakinuma, Norikazu Kawagishi, Masaki Yasugi, and Hirotugu Yamamoto: Influence of incident angle, anisotropy, and floating distance on aerial imaging resolution, *OSA Continuum*, Vol. 4, Issue 3, pp. 865–878, 2021.
- [6] Shunji Kiuchi and Naoya Koizumi: Simulating the appearance of mid-air imaging with micro-mirror array plates, *Computers & Graphics*, Vol. 96, pp. 14–23, 2021.
- [7] 山本裕紹 (監修): 操作・検査のタッチレス化/非接触化のための設計ポイントと最新動向, 技術情報協会, pp.312–319. 2020.
- [8] Kazunari Chiba, Masaki Yasugi, and Hirotugu Yamamoto: Multiple aerial imaging by use of infinity mirror and oblique retro-reflector, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 59, Number SO, pp. S00D08, 2020.
- [9] 株式会社アスカネット: 光学結像装置特開 2012155345 (P2012-155345S).
- [10] Kengo Fujii, Masaki Yasugi, Satoshi Maekawa, and Hirotugu Yamamoto: Reduction of retro-reflector and expansion of the viewpoint of an aerial image by the use of AIRR with transparent spheres, *OSA Continuum*, Vol. 4, Issue 4, pp. 1207–1214, 2021.