

環境反射空中像装置において迷光を見せないための設計

Design a mid-air image system without stray light

星彩水¹⁾, 木内舜司¹⁾, 小泉直也¹⁾

Ayami HOSHI, 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, {a.hoshi, kiuchi}@media.lab.uec.ac.jp, koizumi.naoya@uec.ac.jp)

概要: 空中像装置において余計な光である迷光は空中像の視認性を下げる原因となっている。我々は再帰透過光学素子内での光の反射回数を利用し、反射回数の異なる複数のレンダリング画像を比較して迷光を検出する手法を提案する。3DCG ソフトウェアの blender を用いて、光の反射回数の調整により迷光を検出することで空中像が迷光無しで見える範囲を求めた。この手法を用いて、既存の再帰透過光学素子の設置位置による空中像が迷光無しで観察可能な範囲の拡大を検討した。

キーワード: 空中像, 迷光, 再帰透過光学系

1. はじめに

空中像とは、あたかも実空間に物体が浮いているように映像を結像させる技術である。空中像を観察する際、観察者はヘッドマウントディスプレイなどの特殊な装置を身につける必要が無く、裸眼で観察できる。

本研究では、背景を光沢面とした環境反射型空中像を扱う。光学素子をのぞき込んで観察する空中像では、視点高さの調整が必要であり、背景に光学系が見えてしまう。対して光沢面に一回多く反射させて結像させる環境反射型空中像は、視点高さの制限が小さく、背景が机や地面の環境に馴染んだ像の観察を可能にする。また、この空中像ではキャラクターが地面もしくは机上で立つ、歩くなどの行動、物体が置かれているなどの表現が可能である。

この光学系設計で空中像を表示したとき、同時に不要光が見えてしまうという問題がある。不要光とは、空中像として現れる結像光の他に観察者の目に届いてしまう透過光や、反射・屈折が不十分で生じる迷光のことを指す。これは空中像における正確な情報提示の妨げとなってしまう。例えば、空中像は景観を損ねず、必要な人だけにのみ見せることが可能という点から、標識や案内に利用できる。しかし、不要光があることで視認がしづらく、誤った情報を提示する危険性がある。このような不要光の内、特に迷光は空中像と違い見える範囲を予想しにくく、視認性の高い空中像装置の設計を困難にしている。

本稿では、レンダリングと画像処理を組み合わせることで、空中像を迷光なしに観察可能な範囲を求める手法を提案する。また、この手法を用いて再帰透過光学素子を装置下部から離すことによる迷光の見える範囲削減について検討した。

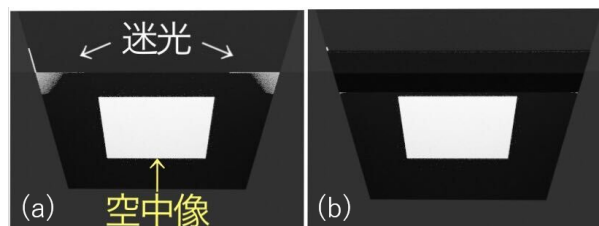


図 1: (a) 従来設計で見えてしまう迷光 (b) 光学素子の配置を変更し迷光を除去

2. 関連研究

2.1 環境反射型空中像光学系

空中像光学系には様々な種類があるが、本稿では環境反射型の光学系について扱う。環境反射型空中像を表示する研究として EnchanTable[1] や PortOn[2] が挙げられる。いずれも光沢面を背景に、テーブル面に直立した空中像を観察できる装置である。EnchanTable はテーブルの奥側に装置を設置するため、既存のテーブルにも適用できる一方で、テーブルの下側にディスプレイを置く必要がある。PortOn は装置内に鏡を用いることで、ディスプレイをテーブル面より上に配置し、可搬型の空中像装置を実現している。

2.2 不要光の除去

空中像の視認性を悪化させる不要光には種類があるが、本稿では図 1 のように、空中像の左右に現れる迷光について扱う。また、ディスプレイから出た光が再帰透過光学素子を透過して届く光を透過光という。これらの光は再帰透過光学素子での反射回数に依存して現れる [3][4]。他にも PortOn では、装置内に鏡を配置したことで空中像下部に現れてしまう像を地中像としている。

空中像の視認性を向上するため、視野制御フィルムや、偏

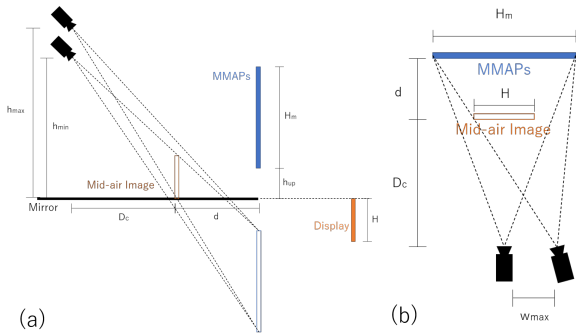


図 2: レンダリング範囲の設定 (a) 側面図 (b) 上面図

光板を用いた不要光の除去が提案されている。EnchanTable や PortOn, HoVerTable[5] では視野制御フィルムを再帰透過光学素子前に設置し、ディスプレイからの透過光を遮蔽している。また、Zhang らは、このフィルムをディスプレイ前に設置することで迷光を除去する手法を提案している [7]。PortOn では装置内に偏光板を組み込むことで地中像を除去している。他にも偏光板を用いた手法として大川らの研究がある [4]。偏光板と再帰透過光学素子を組み合わせることで、透過光と迷光の減衰を可能にしている。さらに、Choi らはレンズを用いて、再帰透過光学素子に対する光の入射角を調整することで迷光を除去する手法を提案している [8]。

2.3 空中像装置のシミュレーション

Kiuchi らは空中像と迷光の具体的な見え方をシミュレーションする手法を提案している [6]。この手法により、光学系を組み立てた際の空中像や迷光の見た目や出現位置をシミュレーションできる。しかし、観察者の各視点位置において迷光が見えてしまう位置を網羅することは困難であった。そこで、自動で迷光を検出し、範囲を出力できれば、さらに光学系の設計に役立つと考えられる。

3. 提案手法

本稿では、レンダリングした画像をコンピュータビジョンで画像処理し、自動で迷光を検出する手法を提案する。レンダリングするカメラ位置の範囲を空中像が欠けずに見える範囲に設定し、その範囲内で光の反射回数設定値による像の見え方の違いを用いて迷光を検出する。以下レンダリングする際の光の反射回数の設定値をバウンス数とする。

3.1 レンダリング範囲の設定

今回 EnchanTable を参考に図 2 の設計を利用する。本稿では ASKA3D プレート [9] のような 2 層構造を持った再帰透過光学素子のみ扱い、以下では Micro Mirror Array Plates(MMAPs) とする。MMAPs の大きさ $H_m = 488$ mm, ディスプレイの大きさ $H = 175$ mm, 空中像とカメラの水平距離 $D_c = 500$ mm とし、空中像と MMAPs の距離及びディスプレイと MMAPs の距離を d , MMAPs と鏡の距離を h_{up} と表記する。

レンダリング範囲は空中像が欠けることなく観察可能なカ

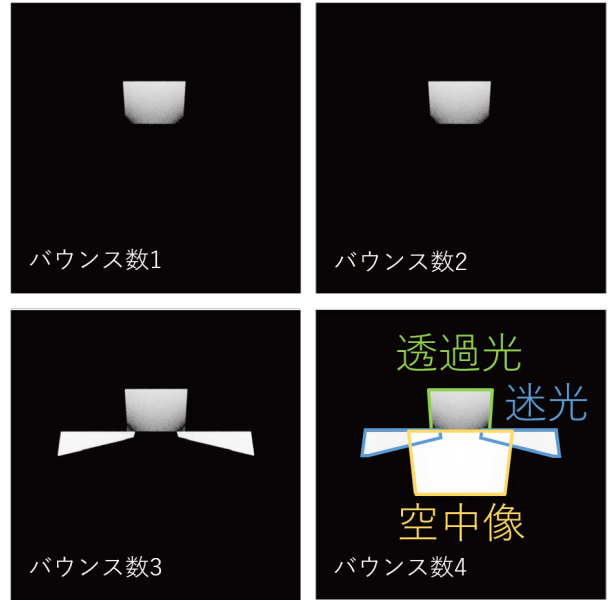


図 3: 各バウンス数によるレンダリング結果

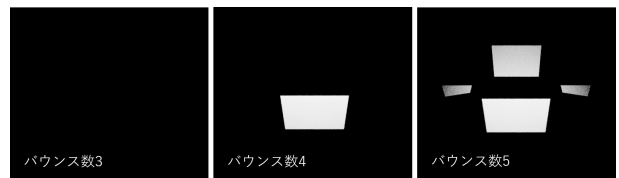


図 4: d が小さい場合のレンダリング結果

メラ位置の範囲とする。カメラの高さは h_{min} から h_{max} , 横は空中像正面を基準に $\pm w_{max}$ がこの範囲にあたる。 h_{min} , h_{max} 及び w_{max} は以下で求められる。

$$h_{min} = \frac{H_m - H}{2} \frac{d + D_c}{d} - \frac{H_m}{2} \quad (1)$$

$$h_{max} = (h_{up} + H_m) \frac{D_c}{D} \quad (2)$$

$$w_{max} = (H + h_{up}) \frac{d + D_c}{d} - h_{up} \quad (3)$$

カメラは常に空中像の中心を向いているものとする。

3.2 迷光検出

迷光の検出には MMAPs 内での光の反射回数とレンダリングにおけるバウンス数の関係を利用した。MMAPs に入射した光は、各層での反射回数によって出射方向が決定される [4]。各層奇数回反射した場合は正しく再帰透過され、空中像として観察可能である。しかし、各層偶数回反射した場合は透過光、その他の場合迷光として観察される。バウンス数は、視点から光源への光線を追跡する際に、反射や屈折で光線を分岐させる回数のことである。つまり、バウンス数 0 のときは直接光のみ観察可能である。

迷光のみの検出にあたり、光のバウンス数を変更してレンダリングすることで空中像を除去する。今回使用する MMAPs のモデルは各層の鏡に加えてガラスを挿入することで、より実物に近い光学系の再現を可能にしている。このことから、各層 0 回反射時の透過光は図 3 のようにパウ

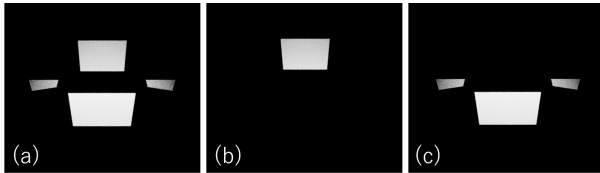


図 5: (a) 空中像の表示面に鏡を用いた場合 (b) 吸光シートを用いた場合 (c) a と b の差分

ンス数 1 で観察される。また迷光は、反射面、MMAPs の一層、ガラスでのバウンス数 3、空中像はもう一つの層を加えたバウンス数 4 で観察可能である。しかし、図 2 の光学系では d の値が小さい場合、MMAPs に対するディスプレイからの光の入射角が大きくなり、カメラに届くまでに MMAPs 内各層での反射回数が多くなる。そのため図 4 に示すように、小さいバウンス数では本来あるはずの迷光が観察できない。したがって、迷光のみを検出するにあたり以下の手順を踏む。最初にバウンス数 3 で迷光を調べる。このとき迷光無しと判断された場合、バウンス数不足による未検出を防ぐため、バウンス数 5 とバウンス数 4 のレンダリング結果の差分を取る。そうすることで空中像のみを除去して迷光を調べる。

透過光は、各バウンス数について空中像の表示面を鏡と吸光シートの二通りでレンダリングし差分を取ることで除去する。今回の設計において、空中像と迷光は図 5 に示すように表示面が鏡などの光を反射する素材の場合にのみ観察可能である。透過光は表示面奥から届く光であるため表示面の材質によらずに観察される。これを利用し、鏡を用いた場合のレンダリング画像と吸光シートを用いた場合のレンダリング画像の差分を取ることで図 5(c) のように透過光を除去する。

レンダリングした画像について画像処理をし、迷光検出を行う。画像処理についてまず、空中像、迷光、透過光が白、その他は黒となるよう 2 値化処理する。次に白いピクセルを数える。上記に従って空中像や透過光がある場合はその分のピクセル数分を引くことで迷光のみのピクセル数を算出する。最後に求められた値が 0 より大きい場合迷光が存在すると判断する。

4. 評価

4.1 目的

提案手法により自動で迷光を検出し、迷光が見えず、かつ空中像が欠けずに見える範囲を求めることを目的とする。以下この範囲を完全可視範囲とする。

4.2 実物との比較検証

シミュレーションを行うにあたり、実機での空中像観察結果とレンダリング結果を比較した。図 6 に比較検証の結果を示す。空中像や迷光、透過光の位置が現実と同じようにシミュレーションできた。

その後、再帰透過光学素子を装置下部から離すことで迷

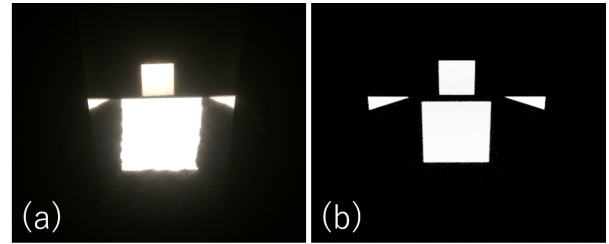


図 6: 実物画像 (a) とシミュレーション画像 (b) の比較

光除去可能かをシミュレーションで検討した。ディスプレイからの光が MMAPs に入射するときの角度が小さい場合、迷光となって観察される。図 2 の設計において、再帰透過光学素子下部は特に入射角が小さくなる部分である。このことから、再帰透過光学素子を持ち上げて迷光が除去可能だと考えた。

4.3 実験方法

今回、3D ソフトウェアの blender を利用し、図 2 の設計を再現することで実験を行った。MMAPs の再現に Kiuchi らの手法を改善したものを用いた [6]。現実での 1 mm を blender 内の距離 0.01 とした。迷光が存在するかを正しく検出するため、ディスプレイは十分な明るさに設定した。

4.4 実験

図 2 において、 d と h_{up} の値を変え、各完全可視範囲を求める実験を行った。 d は 100–400 mm まで 25 mm 毎に 13 点、 h_{up} は 0–300 mm まで 20 mm 毎に 16 点とし、各条件におけるレンダリング範囲内で迷光が見えたカメラ位置を記録した。

各値の範囲は、装置を床に置いた場合の観察者における観察範囲を網羅できるように決定した。 d の最大値は図 2 における w_{max} を少なくとも 100 mm 確保することとし、 $d = 400$ mm と決定した。 d が小さいときは高い視点、大きいときは低い視点でレンダリング範囲になる。このことからまず、 d の最小値は、子供から大人が立って観察することを想定し決定した。 $h_{up} = 0$ であるとき、図 2 における h_{min} を子供が立った時の目線の高さ約 1000 mm とし、 $d = 100$ mm と決定した。次に h_{up} の最大値は、 $d = 400$ mm において大人がしゃがんで観察する高さから子供が立って観察する高さまでを想定し、 h_{max} を子供が立った時の目線の高さ約 1000 mm とし、 $h_{up} = 300$ mm と決定した。

4.5 実験結果

各値での完全可視範囲を図 7 に示す。空中像が見える範囲の特に低い視点において迷光が観察されやすいことがわかった。また、各 d において h_{up} を大きくすることで徐々に迷光が見えなくなり完全可視範囲が広がっていることがわかった。レンダリング範囲内で迷光が見えなくなって以降完全可視範囲は大きさが変わることなく、位置が高くなっていくだけであった。この範囲は特に $d = 100$ mm、 $h_{up} = 160$ mm 以上のとき最も大きくなった。

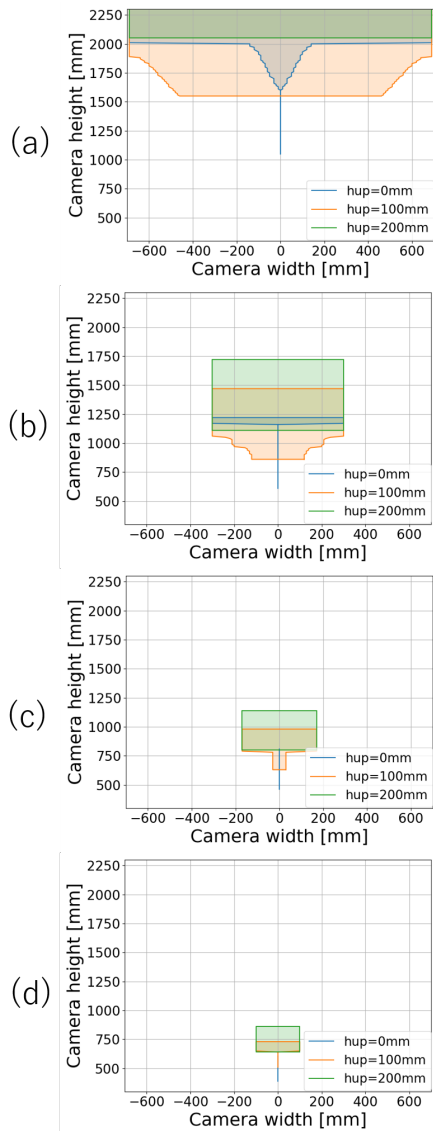


図 7: 各 d における完全可視範囲 (a) $d = 100$ mm (b) $d = 200$ mm (c) $d = 300$ mm (d) $d = 400$ mm

5. 考察

今回の提案手法により、再帰透過光学素子を装置下部から離すことによる完全可視範囲拡大が検討できた。同時に、 $d = 100$ mm で迷光を除去した設計のとき、完全可視範囲は他よりも広がるが、空中像を約 2 m 上方から見下ろす必要があるというこの迷光除去方法における問題点を可視化できた。これは新たな空中像装置の設計に利用できる。装置の設置位置や、想定される人と空中像のインタラクションから、最適な設計を検討することが可能である。

本手法のリミテーションはディスプレイの再現が不十分な点である。ディスプレイは本来横方向に広がる光は弱くなる。そのため、特に MMAPs への光の入射角が大きい場合、現在のシミュレーション結果より低い輝度の空中像や迷光が観察されることが予想される。ディスプレイから広がる光を、さらに現実に近い表現で実現したい。

今後の展望として、現実に忠実なシミュレーションにお

いて、空中像が観察できる範囲の推定が考えられる。理想的な空中像の視認可能な範囲は計算で求めることができる。しかし、輝度の減衰を考慮した空中像の視認可能範囲を求めるには正確な輝度のシミュレーションが必要不可欠である。そのために、先述したディスプレイの再現とともに、人が空中像を観察する上で十分な輝度の決定と、それを満たした空中像の検出が必要である。

6. むすび

本論文では、レンダリングと画像処理を組み合わせることで迷光を自動で検出する手法を紹介した。検出には、空中像、透過光と迷光が観察されるまでの光の反射回数の違いを利用した。迷光のみの検出にあたり、レンダリング結果を比較して空中像と透過光を除去するフローを作成した。また、この手法により完全可視範囲を求め、範囲拡大の検討が可能であることを確認した。

謝辞 本研究の迷光検出方法に関して、法政大学の小池先生にご助言頂いた。本研究はキャノン財団の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] 山本紘暉 他 : EnchanTable: テーブル面の反射を用いた直立空中像ディスプレイ, バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 21, No. 3, pp. 401–410, 2016.
- [2] 佐野文香 他 : Porton: 光沢のある水平面上に直立空中像を表示する持ち運び可能な光学系の設計, 情報処理学会インタラクション 2019 論文集, pp. 940–944, 2019.
- [3] Satoshi Maekawa et al. : Transmissive Optical Imaging Device with Micromirror Array, Proc. SPIE, Vol. 6392, 63920E, 2006.
- [4] 大川達也 他 : 2 層式再帰透過光学系における偏光を利用した迷光の遮蔽, 第 21 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 33C-02, 2016.
- [5] 勝元甫 他 : テーブル型対面環境における直立空中像の移動に伴う透過光の遮蔽, 3 次元画像コンファレンス 2016 講演論文集, pp. 51–54, 2016.
- [6] Shunji Kiuchi et al. : Micro-mirror array-plates simulation using ray tracing for mid-air imaging, 2020 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces, pp. 768–769, 2020.
- [7] Han-Le Zhang et al. : Method to eliminate pseudoscopic issue in an integral imaging 3D display by using a transmissive mirror device and light filter, Optics Letters, Vol. 45, Issue 2, pp. 351–354, 2020.
- [8] Sungwon Choi et al. : Design of ghost-free floating 3D display with narrow thickness using offset lens and dihedral corner reflector arrays”, Optics Express, Vol. 28, Issue 10, pp. 15691–15705, 2020.
- [9] 株式会社アスカネット : 光学結像装置特開 2012155345(P2012-155345S)