

再帰反射による空中結像における飛び出し距離の拡張

古谷 佳輝^{1,a)} 福嶋 政期^{2,b)}

概要: 本稿ではフレネルレンズによって像の飛び出し距離を拡張した空中映像ディスプレイを提案する。再帰反射による空中結像光学系で長い飛び出し距離を実現するためには、飛び出し距離と同じ長さの光源-ビームスプリッタ間距離が必要である。そこで既存の光学系にフレネルレンズを挿入することで飛び出し距離の拡張を実現した。さらに飛び出し距離別にレンズの有無による輝度の変化を検証した。

1. はじめに

空中像とは光源から発せられた光線を光学系によって反射、屈折させることで空中に実像を出現させたものである。この空中ディスプレイ技術は衛生的なインタフェースや臨場感のある映像表現を実現する。空中像を結する方式の一つに再帰反射による空中結像 [1] (AIRR と呼ぶ) がある。既存の空中像光学系は結像素子の近くで空中像を提示することが多く、可動範囲が狭いことから鑑賞者に対してインパクトが足りないように思える。このような背景から本稿では AIRR 光学系において空中像の飛び出し距離を拡張することで迫力のある空中像の提示を目指す。

レンズを含まない AIRR 光学系ではビームスプリッタを対称面として光源と空中像が面対称な位置関係となる特性がある。この特性から、空中像の飛び出し距離を延ばすためには光源とビームスプリッタの距離を等距離延ばす必要があり、デバイスが大きくなる傾向がある。そこで本稿では AIRR 光学系にフレネルレンズを挿入し、光源の虚像を空中像提示の光源とすることで短い光源-ビームスプリッタ間距離でも長い飛び出し距離を実現する。さらに、提案光学系と既存光学系のそれぞれにおいて等しい飛び出し距離で空中像を提示したときの明度を測定する。

2. 関連研究

2.1 レンズを用いた空中像光学系

レンズを用いた空中像光学系は数多く発表されている。Nii らが提案した Fuwa-Vision[2] は鑑賞者の眼球の位置に応じてディスプレイとレンズ間に配置されたピンホールの位置を動的に制御し、鑑賞者の左右の目に異なる映像を投



図 1 提案光学系を使用する様子

影することで視差を生み出している。既存の空中像光学系にレンズを挿入することで性能を改善した事例として大川らの研究 [3] が挙げられる。この研究では再帰透過型光学系の結像素子に対して対称にフレネルレンズを挿入することで歪みがなく結像素子より大きな空中像の提示が可能な光学系を提案している。

2.2 再帰反射による空中結像に関する研究

AIRR はビームスプリッタと再帰反射材からなる光学系であり、再帰透過型光学系と比べて製造難易度が低いことや迷光が少ないことが利点である。この光学系を改善した事例として Fujii らの研究 [4] が挙げられる。この研究では AIRR 光学系に 2 つの透明球を挿入することで再帰性反射材の面積を削減することに成功している。また、この光学系では MTF が改善されることが Takiyama らの研究によって示されている [5]。AIRR を応用した事例として Tsuchiya らの研究 [6] が挙げられる。この研究では AIRR 光学系をカメラの視点移動に使うことでより広い範囲を撮影できる宙づりカメラを実現している。

¹ 九州大学 工学部 電気情報工学科

² 九州大学 大学院 システム情報科学研究院

^{a)} furuya.yoshiki.317@s.kyushu-u.ac.jp

^{b)} shogo@ait.kyushu-u.ac.jp

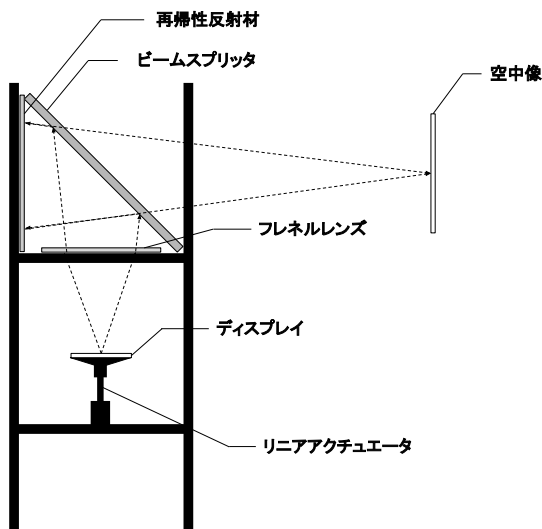


図 2 システム構成図

3. 提案システム

本研究では既存の AIRR 光学系にフレネルレンズとリニアアクチュエータを追加した光学系を提案する。

3.1 システム構成

提案システムはアルミフレーム、ビームスプリッタ、再帰性反射材、フレネルレンズ、ディスプレイ、リニアアクチュエータから構成され、図 2 のように組み立てられる。アルミフレームは設計の自由度と組み立てやすさからミスミ社製 6 シリーズを選択した。ビームスプリッタ及び再帰性反射材はそれぞれ日本カーバイド工業社製の PBS と RF-Ax である。再帰反射材は反射素子の密度が高いほど空中像の解像度が上がるので、密度が高いものを使用した。フレネルレンズは日本特殊光学樹脂社製の CF300 であり、焦点距離は 300mm、有効径 300mm である。フレネルレンズの焦点距離が長ければ拡大率を抑えながら飛び出し距離を長くすることができるため、解像度の劣化を抑えることができる。しかしデバイスサイズが大きくなってしまふほか、最低限必要な拡大率を実現する飛び出し距離が長くなってしまい、光学系に近い領域における表現の幅が狭くなってしまふ。焦点距離が短いと、ディスプレイ-フレネルレンズ間の距離の変化に対して虚像の位置変化が大きくなってしまふのでアクチュエータの制御精度がより求められる。このように、必要な拡大率を実現できる最短飛び出し距離を重視するのか、解像度とアクチュエータの制御精度の補うことを重視するかによってフレネルレンズの焦点距離を選ぶ。今回はアクチュエータの制御精度を補うことを優先してカタログの中で焦点距離が比較的長めのレンズを選択した。ディスプレイは FEELWORLD 社製 LUT6S であり、画面解像度は 1920 × 1080 ピクセル、最大輝度は 2600nit である。空中像光学系は高輝度な光源が

必要なので、ディスプレイはできるだけ高輝度なものを選ぶ必要がある。また、フレネルレンズでディスプレイを拡大して表示することから可能な限り高解像度のディスプレイが推奨される。リニアアクチュエータは Actuonix 社製 L16-100-35-12-P であり、ストローク長が 100mm である。リニアアクチュエータは希望の最大、最小飛び出し距離を実現できるストローク長の製品を選ぶ。

3.2 設計

空中像提示はフレネルレンズで形成されたディスプレイの虚像を空中に結像することで行っている。光線を追うと、ディスプレイから発せられフレネルレンズを通過した光はビームスプリッタに到達する。ビームスプリッタでは光が反射成分と透過成分に分解され、反射成分のみ再帰反射材に向かう。再帰反射材に入射した光は入射軌道を逆行するように反射される。この反射光がビームスプリッタを透過し、空中像を形成する。飛び出し距離の調整のためにはフレネルレンズ-ディスプレイ間距離を調整する必要があるが、その調整はリニアアクチュエータが行っている。実装時、リニアアクチュエータの可動範囲は部品干渉の関係で 87mm に設定した。リニアアクチュエータが最も縮んだ時のフレネルレンズとディスプレイの距離は、ディスプレイの対角線 152mm をフレネルレンズの有効径 300mm に拡大できるように 148mm に設定した。実際にリニアアクチュエータを動作させると、フレネルレンズとディスプレイの距離は 148mm から 235mm まで変化し、空中像のデバイスからの飛び出し距離は 292mm から 1084mm まで変化する。飛び出し距離が変化するようにしてフレネルレンズによるディスプレイの拡大率も変化するのので映像を小さくすることで拡大率の変化を打ち消している。

3.3 空中像の位置と大きさ

提案光学系はディスプレイの虚像を用いて空中像を提示していることから飛び出し距離と空中像の拡大率はレンズの公式に従う。そして拡大率が大きくなるにしたがってディスプレイの虚像の大きさがフレネルレンズや再帰性反射材の大きさを超えてしまふ、空中像が見切れてしまふ。どの飛び出し距離においても同じ大きさの空中像を実現したい場合はアクチュエータのストローク量を変化させると同時にディスプレイ上で映像の大きさを補正する必要がある。

3.4 プロトタイプコンテンツ

本研究では提案光学系の長い飛び出し距離を活用できるように、後述する応用例で示すアプリケーションを実装した。映像はリニアアクチュエータのストローク量に応じて大きさを調整し、どの飛び出し距離においても同じ大きさで空中像を提示した。

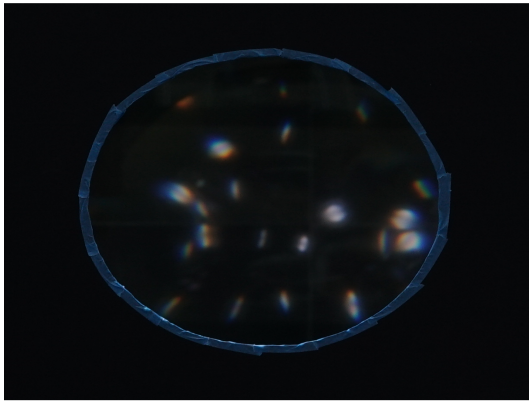


図 3 窓から吹き込む桜の花びら

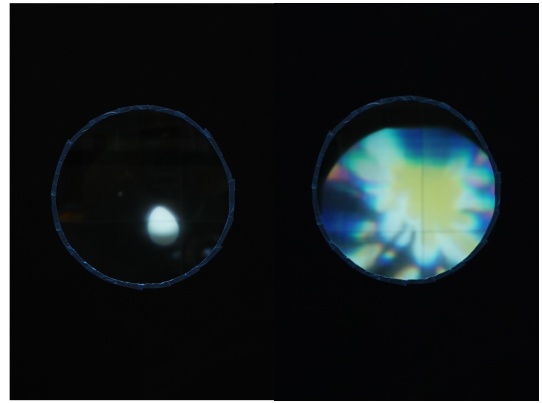


図 4 卵の投射

4. 応用例

提案光学系は従来の光学系と同じ体積のデバイスを製作した場合により長い飛び出し距離を確保でき、リニアアクチュエータの動作速度を超える空中像の移動速度を実現できる。この特性から、奥行き方向に移動する表現をより迫力のあるものにできる。しかし、空中像は運動視差を認識しにくいと実物体に張り付いてしまうという性質がある [7]。そこで、空中像の迫力を高め、提案光学系を活用できる応用例を 2 種類挙げる。

4.1 窓から吹き込む桜の花びら

1 つ目は光学系と鑑賞者の間に実物体を置くことで意図的に空中像を実物体に張り付けるアプローチである。例として光学系と鑑賞者の間に窓枠を設置し、その窓枠から空中像で桜の花びらを飛び出させるというコンテンツを提案する図 3。窓枠を光学系の前に配置することで窓枠に空中像を張り付けつつ、窓から桜の花びらが入ってくる平面ディスプレイでは実現できない表現を提示する。空中像と光学系の距離を十分に確保できる提案光学系ならば、意図的に配置した実物体への張り付きをより期待できると予測する。さらに距離感があいまいになりやすい空中像の性質から、遠近感のある映像を投影することで鑑賞者に立体感を感じてもらえるのではないかと考える。この窓枠にジェスチャー認識カメラを組み合わせることで手で花びらを払う表現も可能であると考えられる。

4.2 卵の投射

2 つ目は提案光学系が得意である奥行き方向の移動を大きく伴ったアプローチである。例として鑑賞者に向かって卵が飛んでいき、あるところで壁にぶつかって割れるようなコンテンツを提案する図 4。物が飛んでくるという表現は提案光学系が得意な表現である。また、特定の場所で卵が割れることで本来は何もない空間に壁があるような感覚を鑑賞者に提供でき、錯視のような表現も試すことができ

ると考える。

5. 評価

本研究では空中像ディスプレイにおいて最も大切な性能の一つである明度について、提案光学系と既存光学系の性能を比較する。提案光学系は光路上にレンズが挿入されていることに加え、拡大率が大きい領域では空中像において、単位面積当たりのピクセル数が大きく減少することから明度の低下が予測される。これらの要因による輝度への影響を調査するためにデジタルカメラを用いて画像の明度を得ることで、簡易的な明度測定を行った。

5.1 評価条件

実験構成図は図 5 である。さらに図 5 からフレネルレンズを抜くことで既存の光学系とする。この実験系の X を調整して Y を 300mm から 900mm まで 100mm 刻みで変更しながら各条件で 5 枚写真撮る。写真を撮る際はディスプレイ全面に白色画像を表示させた。使用したカメラは PENTAX 社製 K-70、レンズはシグマ社製 17-50mm EX DC HSM である。撮影条件は焦点距離：50mm、シャッタースピード：1/30 秒、絞り値：F8.0、ISO 感度：400 であり、暗い部屋で撮影した。撮影された 5 枚の写真はノイズを抑制するために各ピクセルを平均化して 1 枚の写真とする。そして平均化した 1 枚の写真の中心 50 ピクセル四

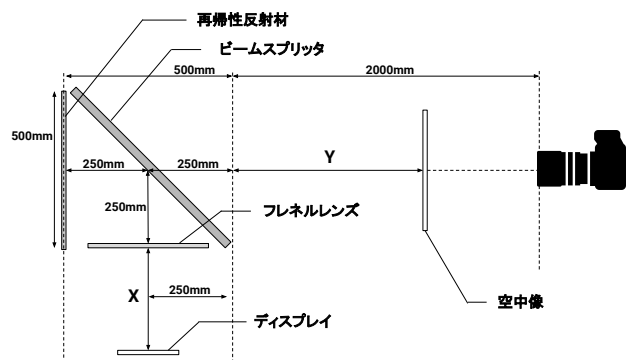


図 5 実験構成図

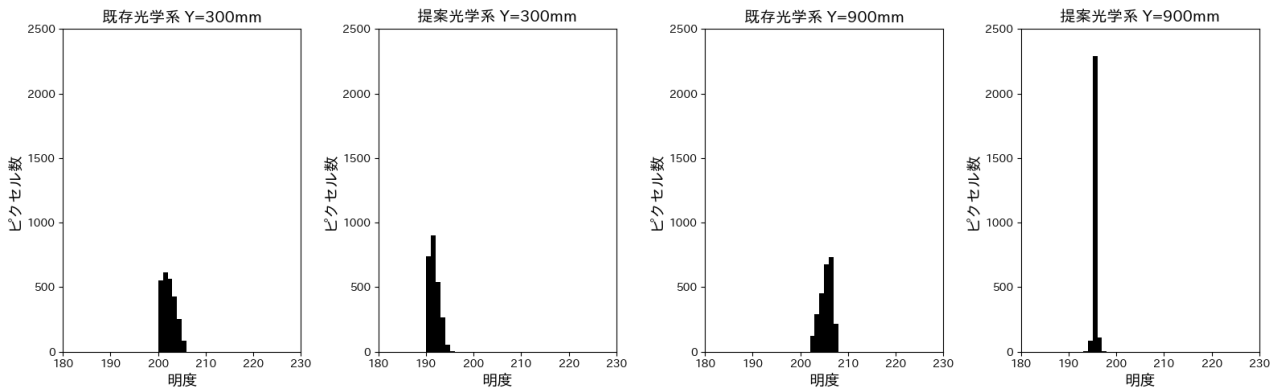


図 6 既存光学系および提案光学系における飛び出し距離が 300mm, 900mm のときの明度分布

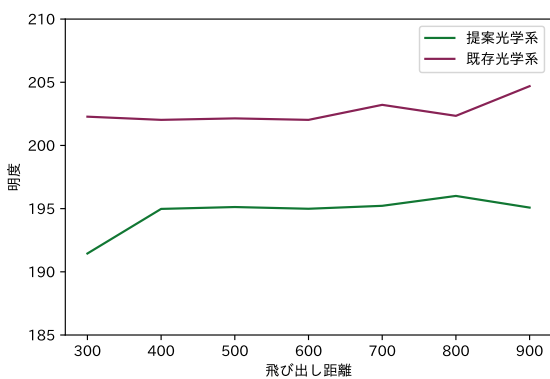


図 7 300mm から 900mm における ROI 内明度の平均

方の領域を ROI とし、その領域の明度のヒストグラムを作成し比較する。

5.2 評価結果

実験結果は図 6, 図 7 の通りである。いずれの条件でも提案光学系の平均明度は既存の光学系の明度よりも低かった。しかし、明度が大きく減少していないことから提案光学系は既存光学系と比較して実用的な明度性能を維持していると考えられる。さらに図 6 に着目すると、提案光学系は既存光学系と比べて度数分布の幅が狭いことから空中像内の明度ムラは少ないと言える。

6. まとめと展望

本論文では短い光源-ビームスプリッタ間距離でも長い飛び出し距離を実現する光学系を提案し、簡易的な明度評価を行った。従来の AIRR 光学系にフレネルレンズを挿入することでより長い飛び出し距離および高い飛び出し速度を実現できることを述べた。さらに提案光学系が既存光学系に対して大きな輝度劣化がないことを検証した。提案光学系で懸念されている点は輝度のほかにも像の歪みや解像度がある。今後の研究ではそれらを既存光学系と比較し、補正手法を検討したいと考えている。

謝辞 宇都宮大学山本研究室の皆様には、温かいご指導ご鞭撻を賜りました。心より感謝申し上げます。

本研究の一部は JSPS 科研費 JP20K19936 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] Yamamoto, H., Tomiyama, Y. and Suyama, S.: Floating aerial LED signage based on aerial imaging by retro-reflection (AIRR), *Optics express*, Vol. 22, No. 22, pp. 26919–26924 (2014).
- [2] Nii, H., Zhu, K., Yoshikawa, H., Htat, N. L., Aigner, R. and Nakatsu, R.: Fuwa-Vision: an auto-stereoscopic floating-image display, *SIGGRAPH Asia 2012 Emerging Technologies*, pp. 1–4 (2012).
- [3] 大川達也, 横瀬哲也, 苗村健: 結像素子より大きな空中像を表示する対称光学系の提案, 第 23 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集 (2018).
- [4] Fujii, K., Yasugi, M., Maekawa, S. and Yamamoto, H.: Reduction of retro-reflector and expansion of the view-point of an aerial image by the use of AIRR with transparent spheres, *OSA Continuum*, Vol. 4, No. 4, pp. 1207–1214 (2021).
- [5] Takiyama, K., Guo, H., Fujii, K., Yasugi, M., Suyama, S. and Yamamoto, H.: P-57: Student Poster: Improved Modulation Transfer Function (MTF) for Aerial Image Formed with AIRR by Use of Two Transparent Spheres, *SID Symposium Digest of Technical Papers*, Vol. 53, No. 1, Wiley Online Library, pp. 1257–1260 (2022).
- [6] Tsuchiya, K. and Koizumi, N.: Aerial Imaging by Retro-Reflection for Mid-Air Image Display and Camera Viewpoint Transfer, *IEEE Access*, Vol. 9, pp. 25110–25117 (2021).
- [7] Nakano, K., Yoshida, T., Mizushina, H. and Suyama, S.: Perceived Depth in Arc 3D Display Can Penetrate into Behind Real Object by Moving Arc 3D Images in Contrast to Unpenetrated Perceived Depth in Stereoscopic Display, *ITE Technical Report; ITE Tech. Rep.*, Vol. 45, No. 2, pp. 73–76 (2021).