



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

大川達也¹⁾, 横瀬哲也¹⁾, 苗村健¹⁾

1) 東京大学 大学院 学際情報学府 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, {okawa, yokose, naemura}@nae-lab.org)

概要: 本稿では, 空中像結像素子よりも大きな空中像を表示できる光学系を提案する. レンズを用いず線形素子のみで結像した再帰透過型の空中像は色収差や歪みが生じない利点があるが, 素子サイズの制約から大型化が難しい. そこで再帰透過型の光学系にレンズを追加して空中像を大型化し, さらにレンズの配置を対称にすることでレンズの非線形性を打ち消す. 実験の結果, 色収差や歪みが生じることなく大きな空中像を結像できた.

キーワード: 空中像, 大型化, 再帰透過光学系, レンズ, AR/MR

1. はじめに

空中像は, 光学系により光線を反射・屈折させることで実像を空中に結像させたものである. 映像と実物体をひとつの空間に混在させることができ, ミュージアムでの展示品説明 [1] などへの応用が期待されている. 本稿では大きな展示品を想定し, 大きな空中像を表示することを目指す.

明るく歪みのない空中像を結像できる素子, “実像鏡” は, 製造が難しく大きさが限られており, 空中像の大きさも制限される. そこで本稿では, 実像鏡にレンズを組み合わせることで, 小さな実像鏡でも大きな空中像を表示可能にする. さらに光学系を対称化し, レンズの屈折に起因する像の歪みや色収差を打ち消すことを提案する. 提案光学系を実装し, 実像鏡よりも大きな空中像を表示できること, および, レンズによる歪みや色収差がみられないことを検証する.

2. 関連技術・研究

2.1 空中像に必要な素子サイズ

空中像は, 空中に作られた実像である. 光線は空中では直進するため, 視点位置から見て空中像の背後には常に光学素子が必要である. 空中像を見かけの幅 θ_w , 高さ θ_h の視野で観察したいときには, 背後の光学素子も見かけの幅 θ_w , 高さ θ_h 以上が必要となる. 視点位置から空中像までの距離を v , 空中像の光学素子からの飛び出し距離を p とおいて実際の大きさを考えると, 空中像の幅・高さは $v \cdot 2 \tan \frac{\theta_w}{2}$, $v \cdot 2 \tan \frac{\theta_h}{2}$, 光学素子の幅・高さは $(v+p) \cdot 2 \tan \frac{\theta_w}{2}$, $(v+p) \cdot 2 \tan \frac{\theta_h}{2}$ となる. すなわち幅・高さともに空中像サイズの $\frac{v+p}{v}$ 倍以上の光学素子が必要となる. これに加え光学素子が斜入射である場合は, 入射角 ϕ に応じて入射面内方向にさらに $1/\cos \phi$ 倍以上大きなサイズが必要になる. このように空中像は, 背後に空中像より大きなサイズの光学素子を要求する.

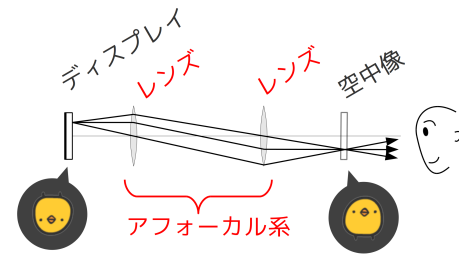


図 1: アフォーカル系による空中結像.

2.2 アフォーカル系による空中結像

大型の結像素子を用いれば大きな空中像を得られると考えられる. そこで, 空中像を結像できる大型素子であるフレネルレンズを用いた手法について検討を行った.

フレネルレンズ 1 枚でも, レンズの公式に従う実像を結像可能である. しかしながらディスプレイ上の位置と空中結像位置の対応が非線形となり, 歪みが生じる.

結像位置が線形になる光学系としてはアフォーカル系が知られている. これは図 1 のように 2 枚のレンズをそれらの焦点距離の和だけ離して配置した光学系であり, 最大 $2f$ までの飛び出し距離が実現できる. しかしながらアフォーカル系で表示した空中像には, レンズの収差に起因する歪み・色収差が生じる [2]. アフォーカル系による結像は, 近軸光線のみを扱う近軸論に基づいている. 実際の光線にはここからのズレがあり, 収差と呼ぶ. 収差は現実の全てのレンズ系で存在し, 光線が 1 点に集まらなかったり, 結像した像が歪むことになる. また, 物質の屈折率は波長に依存し, 光線の進行方向が色ごとに分かれる. これを色収差という.

2.3 再帰透過光学系に関する研究

光軸のない素子を用いた空中結像の方法として再帰透過が挙げられる. ある面に入射した光線を, その面に関して面対称な方向に曲げることを“再帰透過”[3]という. 再帰透過を行うと, 光源からの光線はその面に関して光源と対称

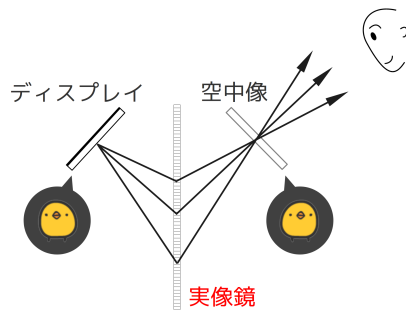


図 2: 実像鏡による空中結像.

な位置に集まり、実像を結ぶ [1]. 「再帰透過を行う板状の素子」としては DCRA や ASKA3D プレート (旧: AI プレート) などが知られており、本稿ではこれらをまとめて “実像鏡” と呼ぶことにする.

実像鏡を用いた空中結像を図 2 に示す. 実像鏡は光軸を持たないため光軸から離れることに由来する歪みが無く、また屈折現象ではなく反射現象を用いるため色収差も生じないという利点がある. 欠点としては、正しく再帰透過できる入射角に限られることが挙げられる. また、製造誤差による細かいゆらぎや切れ目が生じることもある.

実像鏡は微細構造を持つ板であり、大型化が難しい. これに対し beyooooonD[4] では、ミラーを用いて実像鏡を 2 通りの光路で使用した. 一方、複数素子の組み合わせで再帰透過性をもたせた AIRR[5] は、大型化が容易だが暗い.

2.4 光軸のある素子とない素子の組み合わせ

光軸のあるレンズや曲面鏡による結像は、像の大きさを自在に変えることができる. しかしながら近軸近似を前提とした結像であり、近軸領域以外では像の歪みが発生する. 一方、光軸のない実像鏡などの再帰透過光学系では、像のサイズは常に等倍に限られるが、光軸や近軸領域に縛られない、歪みのない結像が可能となる.

これら光軸のある素子とない素子を組み合わせた空中結像は可能である [6] が、一般に収差により歪むので、光軸のない素子の利点が損なわれてしまう. これに対し本稿では InFloasion[7] での屈折補償原理を応用してこれらの両立を図る. 提案する光学系では、光学系内部ではレンズによる効果で必要な素子サイズを縮小しつつ、光学系外部に対しては実像鏡による効果で歪みのない等倍の結像を実現する.

3. 提案

まず、空中像に必要な光線を小さな実像鏡へ集約する方法について述べる. レンズによる光線集約では、見通しを立てるために近軸近似を用いる. 次に、このときに生じる歪みを解消して結像させる、提案光学系について述べる. 歪みのない結像では、近軸近似を用いず実光線で議論する.

3.1 レンズを用いた光線群の集約

図 3 のように実像鏡と空中像の間に大きな凸レンズを置くことで、空中像表示に必要な光線群を集約し、小さな実像鏡で取扱い可能にすることを検討する.

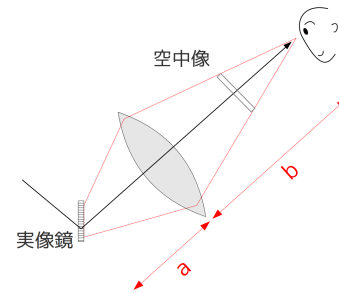


図 3: 光線群の集約.

実像鏡とレンズと視点の距離について考える. 実像鏡とレンズの距離を a 、レンズと視点位置の距離を b とおく. 空中像表示に必要な光線群は視点位置を頂点とした錘状に分布する. そこでこれらを小さな実像鏡に集約させるため、視点位置と実像鏡がレンズに関しておよそ共役な位置になるようにする. すなわち a, b はおよそレンズの公式 $1/a + 1/b = 1/f$ に従うようにする. なおここでは光線群が実像鏡へ集まればよく、一点に結像する必要はない.

この a, b は有効な視点位置の範囲、いわゆる視域にも影響する. 光線群が集まる位置は視点位置の移動に伴って動き、その移動量の横倍率は a/b と近似される. この移動で必要な光線群が実像鏡から外れると空中像が欠けるため、視域の確保にはこの横倍率 a/b を小さくする必要がある.

実像鏡はおよそ 45° の斜入射で有効に働くため、光軸に対して斜めに配置する. このとき、実像鏡での入射角の幅は (空中像の見かけの角度) \times (単レンズの角倍率) となる. ヘルムホルツ・ラグランジュの不変式によれば角倍率は横倍率の逆数で表され、およそ b/a である. これが大きすぎると必要な光線が実像鏡の有効な範囲を外れ、空中像の特に周辺部が暗くなることが考えられる.

このような光線集約を行うことにより、結像素子である実像鏡を従来手法よりも小さくすることが可能である. このときレンズについては従来手法での結像素子と同等の大きさが必要になるが、正確に結像する必要はない.

この光線集約における問題点は、ディスプレイ上の位置と空中結像位置の対応が非線形となり歪みが生じる、レンズの収差によって歪みと色収差が生じるなど、実像鏡の利点が著しく損なわれることである. そこでここからは、このような非線形性や収差を解消することを目指す.

3.2 屈折による攪乱を打ち消し結像させる対称光学系

結像光学系全体を実像鏡に関して対称とすることで、屈折による歪み・色収差がない空中像を表示する光学系を提案する.

透明物体を対称配置することで屈折の結像への影響を無くすという InFloasion での考え方を応用し、図 4 のように同じ凸レンズをもう 1 枚、実像鏡に関して対称な位置に追加する. こうして全ての屈折に関わる物体が、実像鏡に関して面対称に置かれているようにする.

この光学系により光線が面対称な位置に結像することを述べる. 入射した光線はレンズで屈折し、実像鏡に到達す

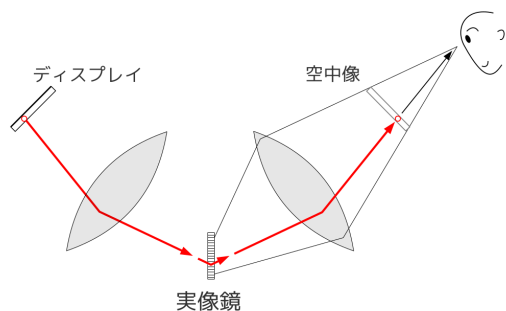


図 4: 対称光学系の構造と原理.

る。ここまでの経路を R とする。実像鏡を通った光線は、実像鏡に関して面対称な方向へ折り返される。そこから先の空間はここまでと対称に作られているため、以降の経路も経路 R と対称となる。つまり光線はレンズで屈折したのち、光源と面対称な点に到達する。このようにして、光源から出た光は収差と無関係に面対称な 1 点に集まる。

色収差についても、入射光線はレンズで各波長ごとに分かれて別々に進むにもかかわらず、実像鏡で折り返されると集まってゆき、レンズを通ると 1 本の光線に復元される。したがって結像位置では色収差の影響はない。

以上の議論から、提案光学系により歪みのない空中像を得ることができ、その位置はディスプレイと面対称、サイズはディスプレイ上の映像と同じになる。これは通常の実像鏡と全く同じである。すなわち、レンズ-実像鏡-レンズの系は全体として大きな仮想の実像鏡として機能する。

提案光学系での空中結像原理では、レンズによる正確な結像を利用していない。むしろレンズの屈折が影響する範囲を 2 枚のレンズの間に限定させることで、歪みや色収差のない空中結像を可能にしている。

アフォーカル系・実像鏡・AIRR とした空中像光学系では空中像は背後に空中結像素子を要求し、そのサイズは空中像より大きい必要があった。しかし提案光学系では空中像の背後のレンズが大きければよく、空中結像素子である実像鏡のサイズは小さくて済む。さらにこれにより、空中結像素子より大きなサイズの空中像を表示することも可能と考えられる。

4. 評価

4.1 大きさの評価

本実験では結像素子よりも大きな空中像を表示できることを示す。図 5 に示す機材を用いて図 6 のように提案光学系を組み立てた。実像鏡は ASKA3D プレートを用いた。フレネルレンズの焦点距離は 750 mm であり、以降は $f = 750$ mm で表す。光軸と実像鏡のなす角は 45° とした。レンズの位置 a, b については実像鏡中心からの距離 $a = 1.5f$ 、基準の視点位置までの距離 $b = 3.0f$ とした。

空中像の飛び出し距離 p は大きいほどサイズの制約が厳しくなるが、空中像の用途を踏まえ、観察者の手が届く視点から $v = 750$ mm の位置まで飛び出した。すなわち



図 5: 使用機材と寸法.



図 6: 大きさ評価実験系.

$p = b - v = 2.0f$ である。光学系の対称性により、これで全ての位置が定まる。すなわちディスプレイからレンズまでは p と同じ $2.0f$ 、レンズから実像鏡中心までは a と同じ $1.5f$ となる。

ディスプレイには実像鏡より大きい長方形の映像を表示し、空中像として欠けずに表示されるかを確認した。

本実験で表示しようとしている空中像のサイズは、実像鏡をそのまま使った場合の限界と比べて何倍であるかを検討しておく。横 155 mm、縦 185 mm の実像鏡を $\phi = 45^\circ$ で配置し $p = 2.0f$ の飛び出しをさせたときに、 $v = 1.0f$ の位置から欠けずに見える最大の空中像サイズはおよそ横 $155 \text{ mm} / \frac{v+p}{v} \cdot \cos \phi = 37 \text{ mm}$ 、縦 $185 \text{ mm} / \frac{v+p}{v} = 62 \text{ mm}$ である。よって約 4 倍である。



図 7: 大きさ評価実験の結果.

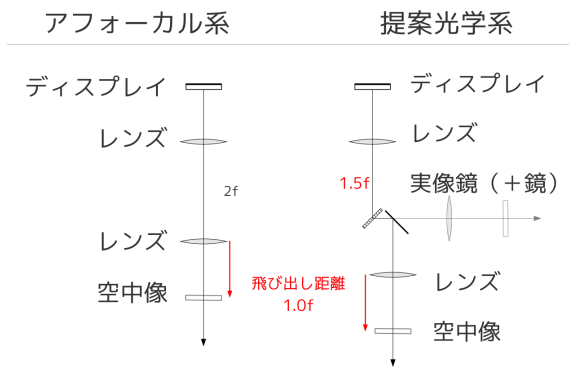


図 8: 実験光学系。図中右方向が鉛直上向き。

結果を図 7 に示す。空中像は端まで欠けずに表示された。すなわち、線分比で通常の限界の約 4 倍の大きさの空中像を表示できた。

4.2 歪みの評価

提案光学系ではレンズを使っているにも関わらず、レンズによる歪みは打ち消され、空中像に影響しないと考えられる。これを確かめるため、同じレンズを用いたアフォーカル系との比較を行い、レンズによる歪みが無いことを示す。

近軸論に従わないレンズでの歪みを観察しやすくするためには、空中像をレンズの寸法いっぱいまで表示したい。そこで本実験では、実像鏡と表示する映像はどちらも大きなものを用いた。これに伴い、本実験では空中像はレンズにより欠けて表示されることになる。

レンズは $650 \times 550 \text{ mm}$, $f=750 \text{ mm}$ のものを、実像鏡は $340 \times 340 \text{ mm}$ の ASKA3D プレートを用いた。映像は $518 \times 324 \text{ mm}$ を 16×10 マスに区切った正方格子を用いた。

実験光学系を図 8 に示す。提案光学系のパラメータは大きさについての評価実験と同一とした。空中像の飛び出し距離については、アフォーカル系では原理上 0 から $2f$ までに限定されることを踏まえ、その中央の $1.0f$ とした。空中像の観察は、空中像からおよそ $2.0f$ の遠距離と $1.0f$ の近距離の 2 箇所から行った。

提案光学系は L 字型の光学系であるが、直線的に配置するために途中に鏡を追加することができる。今回は実像鏡の直後に鏡を追加した光学系で歪みの評価を行った。

結果を図 9 に示す。アフォーカル系では遠距離・近距離ともに中央部が膨らむ歪みが見られた一方、提案光学系ではこのような歪みは見られなかった。また、アフォーカル系で色収差が目立つ近距離であっても提案光学系では色収差が見られなかった。すなわち、レンズ特有の歪みや色収差は無かったといえる。

5. おわりに

本稿では、実像鏡よりも大きな空中像を表示する光学系を提案した。大型だが収差のあるレンズと小型だが収差のない実像鏡を組み合わせ、さらに光学系を実像鏡に関して対称に作ることにより、大型かつ収差のない空中像を表示

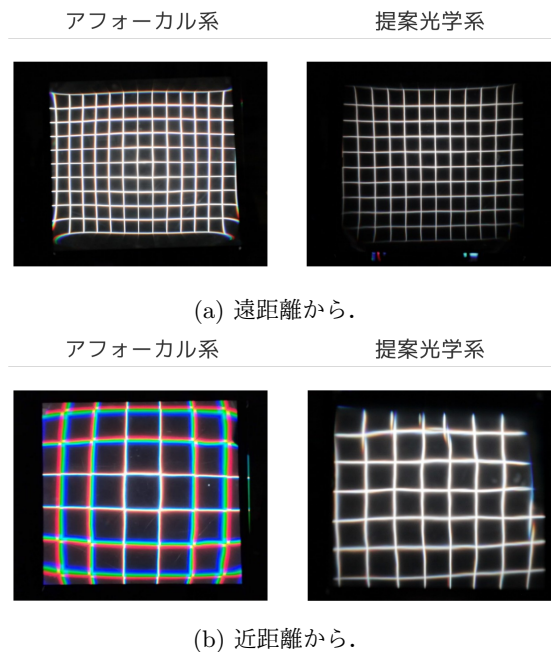


図 9: 歪み評価実験の結果。

できることを述べた。

提案光学系を実装し、実像鏡より大きな空中像を表示できることを確認した。さらにアフォーカル系との比較を行い、空中像にはレンズによる歪みが生じていないことを確認した。

参考文献

- [1] Hanyuool Kim, Shun Nagao, Satoshi Maekawa, and Takeshi Naemura: MRsionCase: A Glasses-free Mixed Reality Showcase for Surrounding Multiple Viewers, ACM SIGGRAPH ASIA 2012, Technical Briefs, Article No. 10, 2012.
- [2] Hiromi Ikeda, Takeshi Naemura, Hiroshi Harashima and Jun Ishikawa: i-ball: Interactive Information Display like a Crystal Ball, Conference Abstracts and Applications of ACM SIGGRAPH 2001, p. 122, 2001.
- [3] 木島竜吾, 渡邊純哉, 近藤大祐: 再帰透過性素材を用いた虚像投影式頭部搭載型プロジェクト: 動作原理と初期実装, 映像情報メディア学会技術報告, Vol. 32, No. 22, pp. 7-12, 2008.
- [4] 梶田創, 小泉直也, 苗村健: beyooooonD: テーブルトップ直立空中像ディスプレイの視域・視野角の拡大, 第 21 回日本 VR 学会大会論文集, 34C-03, 2016.
- [5] Hirosugu Yamamoto and Yuka Tomiyama and Shiro Suyama: Floating aerial LED signage based on aerial imaging by retro-reflection (AIRR), Optics Express, No. 22, Issue 22, pp. 26919-26924, 2014.
- [6] パイオニア株式会社, 橋川広和: 表示装置, 特許第 5385080 号, 2014.
- [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, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 118, No. 95, MVE2018-6, pp. 89-94, 2018.