



片側性直交鏡型再帰透過光学素子の結像メカニズムとその性能

Imaging Mechanism of unilateral orthogonal mirror-type retroreflective transmissive optical element and its performance

伊藤賢矢¹⁾, 虫鹿剛瑠¹⁾, 木島竜吾²⁾

Kenya ITO, Takeru MUSHIKA, and Ryugo KIJIMA

1) 岐阜大学 自然科学研究科 (〒 501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1, a4525076@edu.gifu-u.ac.jp)

2) 岐阜大学 工学部 (〒 501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1, kijima@gifu-u.ac.jp)

概要: アスカネット社の AIP のような片側性直交鏡型再帰透過光学素子 (片側性 RAM) は, 空中実像ディスプレイや筆者らの虚像プロジェクタ型 HMD におけるキーデバイスであるが, 重要な性能である解像度を設計できていない. 本研究ではこの両者を構成し, 結像のボケの形状とサイズ・結像までの光線の動きを観察する実験からボケが生成されるメカニズムとその量を把握し, 理論値と比較することで, ボケ量ひいては解像度の算出方法を得た.

キーワード: 視覚ディスプレイ, 再帰透過材, AIP, 光学

1. はじめに

光学シースルー HMD (Head Mounted Display) を念頭に筆者らは, 虚像プロジェクタと称する光学系を提案している. これは, 入射光の光学素子面に平行な成分のみを折り返す性質を持つ再帰透過素子により, プロジェクタから投影された実像を素子面に対象な位置の虚像に転換するものである. これを実際に試作してみると, プロジェクタそのものよりも巻撮像の解像度が低下する.

本研究では, 再帰透過材としてアスカネット社の Aerial Imaging Plate (以下 AIP) を用い, 空中ディスプレイと虚像プロジェクタの両方を構成し, それらの結像メカニズムを明らかにし, ボケ量の理論モデルを実測により確認する.

2. 虚像プロジェクタと研究の目的

2.1 再帰透過材

鏡は入射光を素材面の法線方向に折り返し, 再帰反射材は入射光を入射方向にそのまま折り返す性質を持つ. 再帰透過材は, 入射光を素材面の水平成分のみを反転させる性質を持つ. そのため, 開散光を同じレートの収束光に転換し, 同様に収束光を開散光に転換する.

2.2 片側性直交鏡型再帰透過材 (片側性 RAM)

再帰透過材はさまざまな光学素子を単位として製作できる. 鏡を 2 枚直交に配置した直交鏡 (Right Angle Mirror: 以下 RAM) もその一つである. これは 2 回の鏡面反射により光を再帰透過させる. 両側性 RAM (図 1 左) はどちらの鏡が先に使われてもよいため, 直交精度が完全でないと射出光が 2 手に分かれ副像を生む. 片側性 RAM (図 1 右) は鏡の使用順序が決まっているため, 直交精度が悪くても像品質が低下しにくい. AIP は多数の片側性 RAM からなる再帰

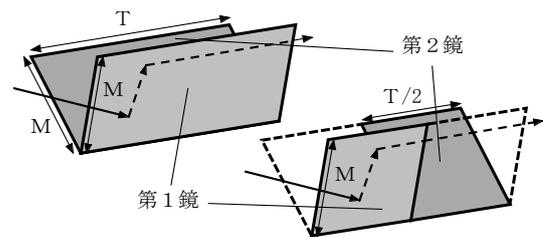


図 1: 両側性 RAM (左) と片側性 RAM (右)

透過材である.

2.3 虚像プロジェクタ

再帰透過材には, 収束光を開散光に変換する性質があるため, 投影実像は虚像に, 投影瞳は観察瞳に変換される. そのため, プロジェクタで再帰透過材の方向に実像を投影し, 観察瞳とプロジェクタを再帰透過面に対して面対象になる位置に配置すると, 投影実像と, 再帰透過面に対して面対象な位置に虚像を確認できる. このシステムを虚像プロジェクタと呼ぶ (図 2) [1]. 微細な再帰透過素子が離散的に存在すれば全体として再帰透過材を構成でき, 光透過性を持たせることができ, 光学シースルー型 HMD につながる. また, レンズが入射角の小さな視野中央で精度や効率が良いのに対し, RAM 型の再帰透過材は入射角の大きな視野周辺部分で使えるため, 広角化にも向いていると考えている. しかし, 先行研究において様々な要因で解像度の低下が起こると示されているが, 理論的な検討はされていない.

2.4 再帰透過材によるボケ要因

再帰透過材によるボケの要因は主に 3 つである.

第一に, 実際の再帰透過材の形状は, 直交精度や鏡面の平面精度が不十分なため, 純再帰透過光の周りに角度誤差を持つ

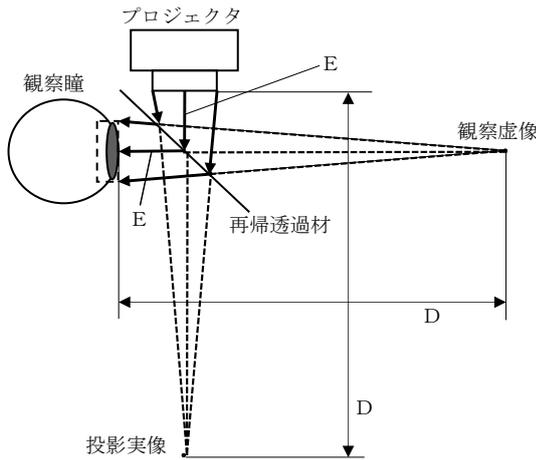


図 2: 再帰透過材を用いた虚像プロジェクタ

た乱れ光が生じることで、結像点周りにボケを生むことである。これを乱れ光ボケという [1, 2].

第二に、再帰透過材をミクロな視点で見た場合、素子は有限の大きさを持つ。理想的な再帰透過がされるのは、素子の中心を通る光のみであり、それ以外の周りの光は、理想とは異なる位置で透過されるため、位置誤差を持つ光が射出される。この光線群は、それぞれ射出位置が異なるため、結像点周りにボケを生む。これを開口ボケという [1].

第三に、光の性質上、再帰透過材の素子が微小で規則的な配置をしている場合、光の回折・干渉が起き、結像点で干渉縞が発生する。これを、回折・干渉によるボケと呼ぶ。これは、素子ピッチが小さくなるほど、無視できない大きくなる。

開口と乱れ光によるボケの発生メカニズムとその分量についての理論的なモデルは示されている [1, 2] が、離散的な光学構造から離散的に発せられた光がこのようなボケモデルに従って振る舞うという直接的な証拠は得られていない。

2.5 研究の目的

片側性 RAM 群により構成されている AIP を用いて、実像を結像する空中ディスプレイと虚像プロジェクタを構成する。それぞれの結像までの光線の動きをカメラの焦点面を移動させながら観察することで、片側性 RAM 群による結像の様子を確認し、また、像位置でのボケ量を計測して理論モデルがどの程度実際のボケ量を予測できるかを定量的に示す。なお、本研究で使用する AIP の素子ピッチでは、回折・干渉によるボケは十分小さいとし、無視して考える。また、空中ディスプレイと虚像プロジェクタのどちらにおいても、入射光は再帰透過面に対して入射角が 45 度であるとする。

3. 片側性 RAM による虚像プロジェクタ

3.1 乱れ光ボケ

観察瞳から純再帰透過光を逆に延長すると、虚像結像点において乱れ角 α 分広がった乱れ光ボケを生む (図 3)。この時、乱れ光ボケの全幅 b は、

$$b = (D - E) \tan \alpha \text{ [mm]} \quad (1)$$

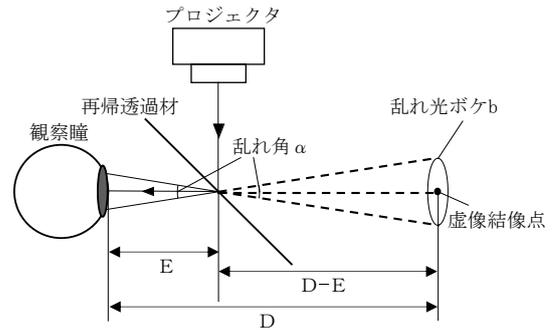


図 3: 虚像プロジェクタにおける乱れ光ボケ

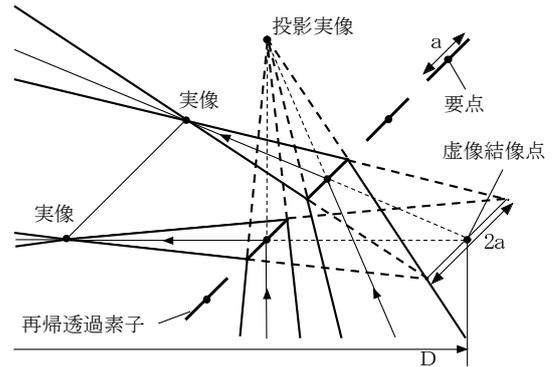


図 4: 虚像プロジェクタにおける開口ボケ

となる。また、乱れ角 α が十分小さいため、結像点から D 離れた観察瞳からのボケ視角 β は、

$$\beta \approx \frac{(D - E) \alpha}{D} \text{ [rad]} \quad (2)$$

と近似することができる。

3.2 開口ボケ

虚像プロジェクタをミクロに見た様子を図 4 に示す。再帰透過材の各素子から射出される中心光は、純再帰透過光となり、逆に延長した時の交点が虚像結像点となる。しかし、1つの素子に注目すると、入射光は直交鏡の交点を軸 (要軸) に軸対象の位置に移動して射出される。そのため、収束光を投影すると、それと同じ広がりを持つ収束光として射出され、実像を結ぶ。また、虚像から再帰透過材の距離と再帰透過材から実像までの距離が等しいため、距離 E に関わらず再帰透過窓サイズを 2 倍に拡大した開口ボケを生む。この時、再帰透過窓の全幅を a とすると、結像面は観察瞳から 45 度傾いて見えるため、開口ボケの全幅 b は、

$$b = 2a \cos 45^\circ \text{ [mm]} \quad (3)$$

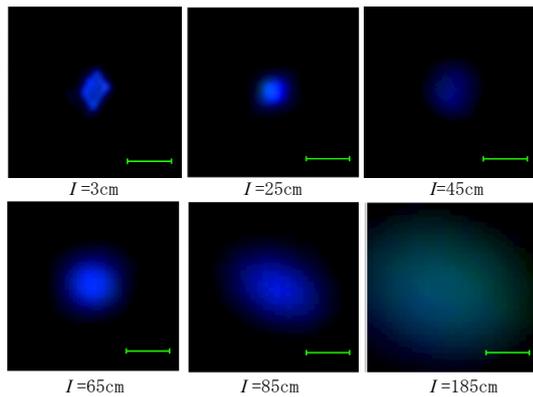
となる。また、窓の全幅 a が十分小さいため、結像点から D 離れた観察瞳からのボケ視角 ϕ は、

$$\phi \approx \frac{\sqrt{2}a}{D} \text{ [rad]} \quad (4)$$

と近似することができる。

3.3 乱れ角計測実験

レーザーポインターから平行光を AIP に入射し、射出される再帰透過光を AIP から 9000[mm] の距離に設置したス



図中の緑線が1[mm]

図 5: 虚像プロジェクタの距離 I に対する観察像

クリーン上で観察した。AIP の構造の乱れを考慮し複数の入射位置でボケ幅を計測したところ、その平均は 25.24[mm]であった。従って乱れ角 α は、

$$\begin{aligned} \alpha &= 25.24[\text{mm}] / (\tan(1[\text{deg}]) \times 9900[\text{mm}]) \\ &\doteq 0.146[\text{deg}] \end{aligned} \quad (5)$$

である。以下、理論式ではこの値を使用する。

4. 虚像プロジェクタの解像性能計測実験

本節では虚像プロジェクタを構成し、カメラを用いて虚像のボケを計測してこの実験値と理論値を比較する。プロジェクタからの投影には微小な点を用いたのであるが、観察輝度を確保するため、画面中央の 4×4 画素のみを白とした画像を用いた。API 表面から結像点までの距離 I (素子像面距離) を変化させつつ、結像点をカメラで観察した。プロジェクタおよびカメラから AIP 表面までの距離を 15[cm] とした場合の観察像の例を図 5 に示す。

距離 I が小さな場合には像は菱形であった。これは再帰透過材の開口形状が拡大されたものであり、開口ボケそのものである。距離 I が大きくなるにつれ、乱れ光ボケが支配的になり、菱形形状は消失した。

4.1 距離 I に対する虚像のボケ幅 c

図 6 は、距離 I に対して理論ボケ幅と実測値をプロットしたグラフである。乱れ光ボケ理論値を a 、開口ボケ理論値を b とすると、理論ボケ幅 c は、

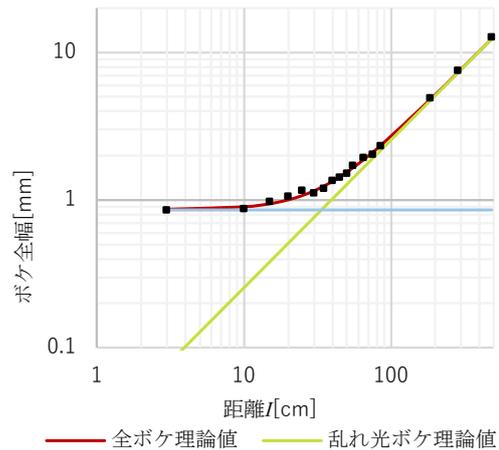
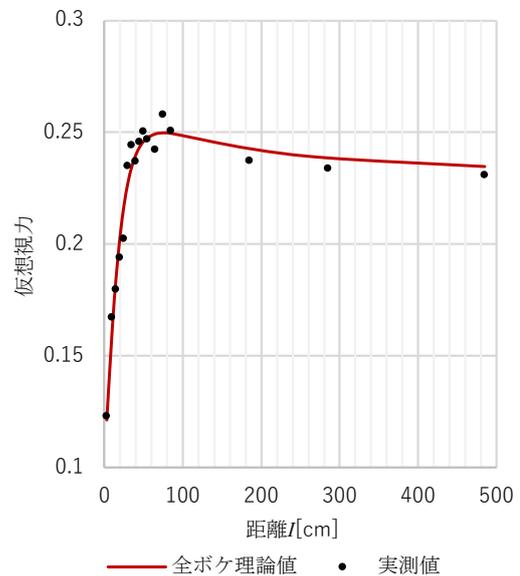
$$c = \sqrt{a^2 + b^2}[\text{mm}] \quad (6)$$

である。実験値は理論値によく一致しており、理論式の正しさを裏付けている。

4.2 仮想視力

ディスプレイの解像度を表す指標として仮想視力 [3] を用いる。濃淡画像を表示したときの視認限界空間周波数を $F_{max}[\text{cpd}]$ とすると、仮想視力 V は、

$$V = \frac{F_{max}}{30} [1/\text{deg}] \quad (7)$$

図 6: 距離 I に対するボケ幅 (虚像プロジェクタ)図 7: 距離 I に対する仮想視力

であり、分単位で表したボケの視角を $r'[\text{min}]$ とすれば、

$$V = \frac{1}{r'} [1/\text{min}] \quad (8)$$

である。図 7 は図 6 に示した結果を仮想視力 V に換算したものである。

距離が近い部分では開口ボケの視角が大きく効いて視力は低いが約 40[cm] を超えればその影響は小さく、距離によらず一定の視角を持つ乱れ光ボケが視力を支配するため、仮想視力は概ね一定となることがわかる。仮想視力の理論値が最大となるのは距離 $I=75[\text{cm}]$ のときであり、仮想視力は 0.258 であった。

5. 片側性 RAM による空中ディスプレイ

空中ディスプレイを構成した場合の、ボケ幅の理論値と実測値をプロットしたものが図 8 である。 $I=40[\text{cm}]$ までは理論値とよく一致しているが、 $I=50[\text{cm}]$ 以上では何らかの原因で理論値を大きく上回っている。

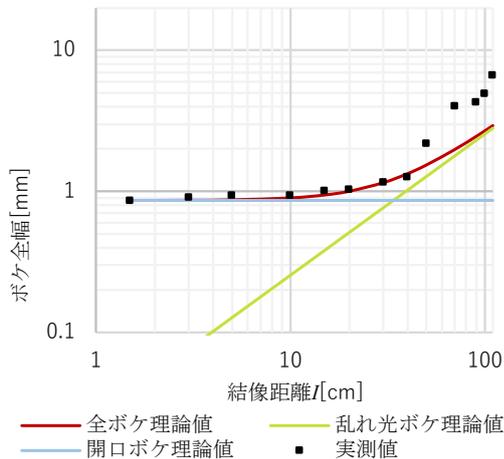


図 8: 距離 I に対するボケ幅 (空中ディスプレイ)

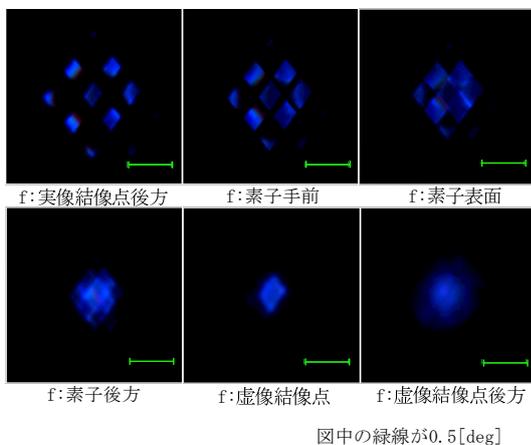


図 9: 虚像プロジェクタの像をカメラの焦点を変えて撮影した結果

6. 片側性 RAM の結像メカニズム

6.1 虚像プロジェクタの結像動作

3章で説明した虚像プロジェクタの動作を確認するため、結像距離 $I=3.0$ [cm] の場合にカメラの視焦点距離を変化させて撮影を行なった (図 9)。空間中の光線群をカメラの視焦点面で切断した様子が見えているわけである。視焦点がもっとも近いのは図 9 上段左であり、多数の RAM で再帰透過した光線が各 RAM の開口形状を保ったままに見える。上段中、右、下段左と視焦点を遠くしてゆくと、各 RAM から発せられた光線は集まってゆき、下段中の虚像結像点で最もよく重なる。これが生成された虚像である。その後下段右では再び光線が広がっている。上段右の素子表面では、動作している RAM がそのまま見えているため、各形状はピッタリと隣接している。この開口形状の見かけの横幅は約 0.42 [mm] であった。これに対し虚像結像点に現れる形状の横幅は約 0.85 [mm] であった。これは再帰透過窓サイズの約 2 倍であり、開口ボケ理論どおりの結果である。

6.2 再帰透過窓の動作

図 9 に現れる窓のうち、特に周辺のものでは菱形形状の一部がかけている場合があった (図 10)。図 11 に虚像プロ

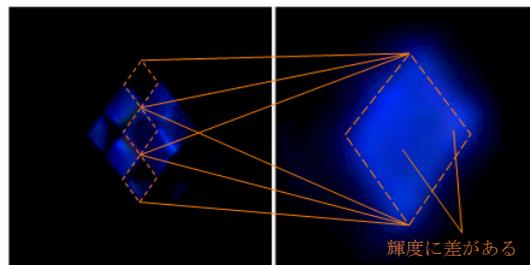


図 10: 虚像プロジェクタの再帰透過窓の結像動作

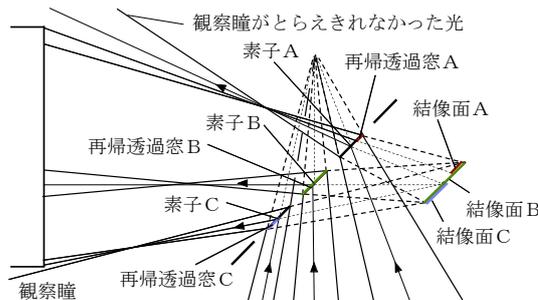


図 11: 虚像プロジェクタの再帰透過窓の見える範囲

ジェクタをマイクロにみたときの再帰透過窓の見える範囲を示す。周辺の動作窓では、窓からの光線の一部のみが観察瞳に入る場合があり、この瞳によるケラレが菱形形状の欠けを生じる。結像点ではこれらの形状が合成されるため、中心よりエッジ部分の輝度値が高くなる場合がみられた。

7. 結論・まとめ

AIP を用いて虚像プロジェクタと空中ディスプレイを構成する場合の結像メカニズムの解明と、解像度を低下させる主な原因である開口ボケと乱れ光ボケのボケ量の理論モデルを確立できた。しかし、鏡ピッチを小さくすると、開口ボケは比例して小さくなるが、回折ボケが無視できない分量となる可能性がある。そのため、回折ボケの理論値を求め、ボケが最小となる鏡ピッチを確定させる必要がある。また空中ディスプレイにおいて、素子像間距離が 50 [cm] 以上で理論値以上のボケが発生する機序を解明すれば、真に設計段階でボケ量の推定が可能であると言える。

参考文献

- [1] 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タ, ヒューマンインタフェース学会研究報告集, vol.10, no2, pp.7-12, ヒューマンインタフェース学会, 2008.
- [2] 森本慶吾, 木島竜吾: 焦点からオフセットしたビーズ型再帰反射スクリーンによる提示解像度の理論的算出, 第 23 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, Vol. 1, No. 2, pp. 201-206, 2018.
- [3] 木島竜吾, 小山凌太: 仮想空間におけるユーザの視力の算出方法, 第 23 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 23(3), 2018.