



回折を考慮した片側性直角鏡型再帰透過光学素子の解像性能

Resolution Performance of Unilateral Right Angle Mirror Array Type Retrotransmitter Considering Diffraction

虫鹿剛瑠, 谷口和優¹⁾, 木島竜吾²⁾

Takeru MUSHIKA, Kazumasa Taniguchi, and Ryugo KIJIMA

1) 岐阜大学 自然科学技術研究科 (〒 501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1, taniguchi.kazumasa.i2@s.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.ryugo.n4@f.gifu-u.ac.jp)

概要: アスカネット社の AIP ないし Aska3D や、パリティ・イノベーションズのパリティミラーは、直交する微小鏡を並べて再帰透過性を実現したものである、筆者らはこういった微小分散光学系では像のボケを生むメカニズムは開口ボケと乱れ光ボケであることを理論的に示し実験により確認している、本稿では波動光学を用いて乱れ光ボケは製造精度ではなく概ね回折によるものであることを示す、

キーワード: 立体・空中ディスプレイ、再帰透過材、AIP、波動光学

1. はじめに

再帰透過性を有する素材のうち、片側性直角鏡型 (以下片側性 RAM) のものはアスカネット社により AIP/ASKA3D として [2]、両側性直角鏡型のはパリティ・イノベーションズ社によりパリティ・ミラーとして製造、販売されている。これらの主な用途は、空中実像ディスプレイであるが、筆者らが提案してきた虚像プロジェクタ型 HMD への利用も期待できる。

筆者らは、再帰透過材が結ぶ像にボケが生じるメカニズムには、結像距離によらない開口ボケと距離に比例する乱れ光ボケがあることを指摘し、AIP を用いた実測により結像距離と両ボケ量の関係を用いて確認している [3]。結像点が近距離の場合は素子サイズに比例する開口ボケが支配的なため、微細な方が有利だが、回折による乱れ光は逆に増えてしまうというトレードオフが予想され、それに対して最適な鏡ピッチがわかるはずである。また、乱れ光ボケが回折より製造精度に多く由来するのであれば、性能向上余地があることになる。そこで本研究では、回折ボケサイズを波動光学を用いたシミュレーションによって求める。

2. 概要と用語

本章ではまず、いくつかの概念や用語を説明する。

再帰透過: 鏡面反射は入射光を素材面の法線方向に折り返し、再帰反射は入射方向にそのまま折り返す。再帰透過とは入射光を素材面に並行な成分のみを反転させるものである。

片側性 RAM: 鏡を 2 枚直交に配置した直角鏡 (Right Angle Mirror: 以下 RAM) は 2 回の鏡面反射により光を再帰透過させる。両側性 RAM では直交精度が悪いと副像を生むが、片側性 RAM では像品質が低下しにくい [4]。AIP は多数の片側性 RAM からなる再帰透過材である (図 1)。

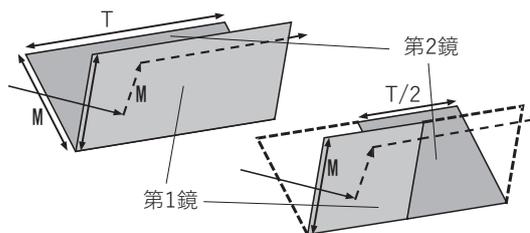


図 1: 両側性 RAM(左) と片側性 RAM(右)

再帰透過窓: 小さな再帰透過素子がならんだ構造の再帰透過材の個々の開口つまり素子サイズを再帰透過窓と呼ぶ。一般に光の入射・射出角度により見かけの開口は変化する (図 2)。

虚像プロジェクタ: 再帰透過材は、収束光と開散光を収束・開散レートを保ちつつ互いに交換する。物点からの開散光は収束して実像を結び、空中ディスプレイとして利用される。プロジェクタからの収束光は、実像を結ぶ前に再帰透過材により解散光となり、対称な位置に虚像を結ぶ。これは図 3 のような構成で虚像プロジェクタとして利用できる。(図 3)

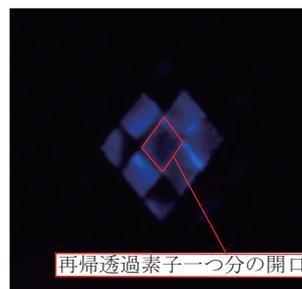


図 2: 再帰透過窓

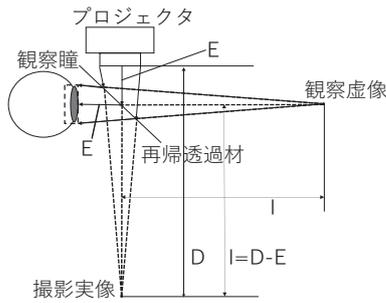


図 3: 虚像プロジェクタ

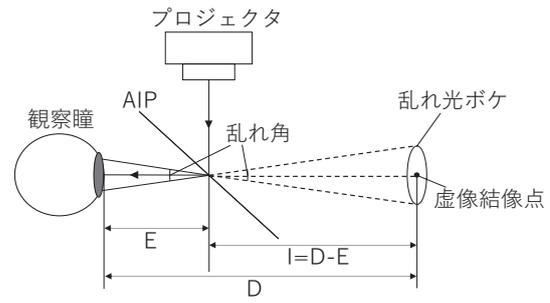


図 5: 乱れ光ボケ

3. ボケの発生メカニズム

3.1 開口ボケ (a)

個々の再帰透過素子の動作に注目する。素子開口の中心に入射した光は理想的な再帰透過の動作をするが、図 4 のようにそれ以外の光は収束光は収束光のまま、開散光は開散光のまま射出される。多数の素子群は全体としては再帰透過動作を行うので、空中ディスプレイや虚像プロジェクタが作れるのだが、どちらの場合も像点周りに開口の倍のサイズのボケが生じる (図 4)。

3.2 乱れ光ボケ (b)

例えば AIP の場合、鏡面の平面度や直交度が悪ければ、理想的な射出光の周りには乱れ光が生まれるだろう。製造が完璧であったとしても、素子が小さすぎると回折による乱れ光が無視できない量となろう。簡単のために理想射出光の周りに乱れ角 α の範囲内で様な光の分布があるとすれば、結像距離 I (再帰透過材から結像点までの距離) に比例した大きさ $I \alpha$ のボケが生じる。これを乱れ光ボケと呼ぶ (図 5)。

3.3 全ボケサイズ (c)

これらのボケは像面上の輝度分布であり、その合成サイズも正確には分布を考慮すべきであるが、本稿では全ボケサイズは 2 つのボケサイズの平方平均であるとみなす。

4. 波動光学シミュレーション

本章で使用する変数を定義しておく。 k : 波数, λ : 光の波長, A : 光源面, P : 開口面, Q : 像面, a_0 : 光源面の開口関数, a : 開口面の開口関数, t : 開口面における二次波の複素振幅, u : 像面における二次波の複素振幅

4.1 光の回折

微小な開口に光が入射した場合、射出光は回折のため不規則な像を生む [6][7]。

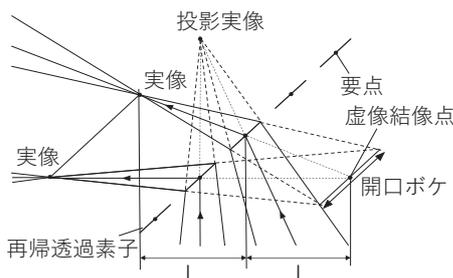


図 4: 開口ボケ

図 6 の右側部分である開口面 P から像面 Q への経路について考える。開口面 $P(x,y,0)$ に波長 λ ・波数 k の平行光が入射した場合、像面 $Q(x_q, y_q, z_q)$ における二次波の複素振幅 $u(x_q, y_q, z_q)$ を考える。このときの座標系を図 6 に示す。

開口の形を表す開口関数 $a(x,y,0)$ は、

$$a(x, y, z) = \begin{cases} 1 & \text{: 開口内} \\ 0 & \text{: 開口外} \end{cases} \quad (1)$$

と表される。開口面 P の任意の座標から射出される光線は、角度 θ の傾きで光路 r を通り像面上の任意の点 Q に到達する。この時、光路 r は、

$$r = \sqrt{(x_q - x)^2 + (y_q - y)^2 + z_q^2} \quad (2)$$

と表すことができ、この光線の複素振幅は、

$$\frac{1}{i\lambda} \frac{e^{ikr}}{r} a(x, y, 0) \cos\theta \quad (3)$$

と表される。これを開口面 P 全体で積分すると、像面 Q 上の点 $Q(x_q, y_q, z_q)$ での複素振幅 $u(x_q, y_q, z_q)$ は、

$$u(x_q, y_q, z_q) = \frac{1}{i\lambda} \iint_P a(x, y, 0) \frac{e^{ikr}}{r} \cos\theta dx dy \quad (4)$$

と表される。

4.2 フレネル近似

式 4 を python で実行するのは時間的に現実的でない。そのため、フレネル近似を用いて式を簡単化する [8][9]。

$$u(x_q, y_q, z_q) = \frac{1}{i\lambda z_a} e^{ikz_q} \times U \quad (5)$$

$$(\because U = \iint_P a(x, y, 0) e^{ik \frac{(x_q - x)^2 + (y_q - y)^2}{2z_q}} dx dy) \quad (6)$$

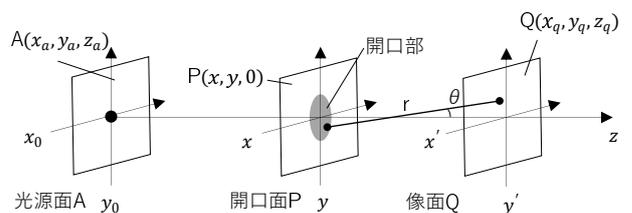
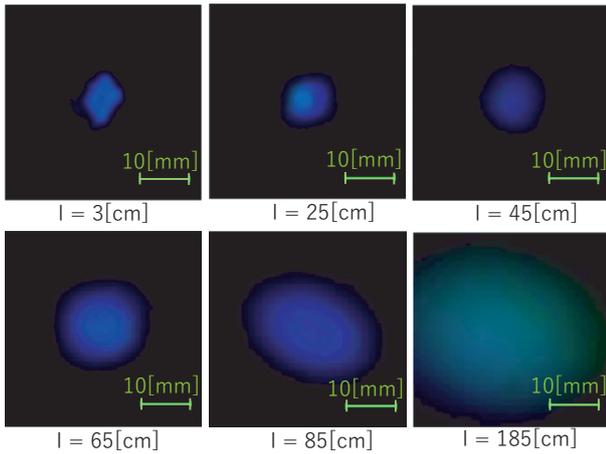


図 6: 計算の座標系

図 7: 結像距離 I における評価面上で実測された虚像

計算高速化のため、これに高速フーリエ変換を適用すると、

$$u(x_q, y_q, z_q) = \frac{1}{i\lambda z_a} e^{ikz_q} e^{ik \frac{x_q^2 + y_q^2}{2z_q}} \times \mathcal{F}\{f(x, y, 0)\} \quad (7)$$

$$(\because f(x, y, 0) = a(x, y, 0) e^{ik \frac{x^2 + y^2}{2z_a}}) \quad (8)$$

となる。

4.3 光源から開口面までの計算

ここまでで開口面から像面までの計算ができるようになった。本節では空中ディスプレイを念頭に、光源から開口面までの計算を合わせて考える。

$$a_0(x_a, y_a, z_a) = \begin{cases} 1 & : (0, 0, z_a) \text{ のとき} \\ 0 & : \text{それ以外} \end{cases} \quad (9)$$

$$t(x, y, 0) = \frac{1}{i\lambda z_a} e^{ikz_a} e^{ik \frac{x^2 + y^2}{2z_a}} \quad (10)$$

$$u(x_q, y_q, z_q) = \frac{1}{i\lambda z_a} e^{ikz_q} \times U \quad (11)$$

$$(\because U = \iint_P t(x, y, 0) a(x, y, 0) e^{ik \frac{(x_q - x)^2 + (y_q - y)^2}{2z_q}} dx dy) \quad (12)$$

$$u(x_q, y_q, z_q) = \frac{1}{i\lambda z_a} e^{ikz_a} \frac{1}{i\lambda z_q} e^{ikz_q} e^{ik \frac{x_q^2 + y_q^2}{2z_q}} \times \mathcal{F}\{f(x, y, 0)\} \quad (13)$$

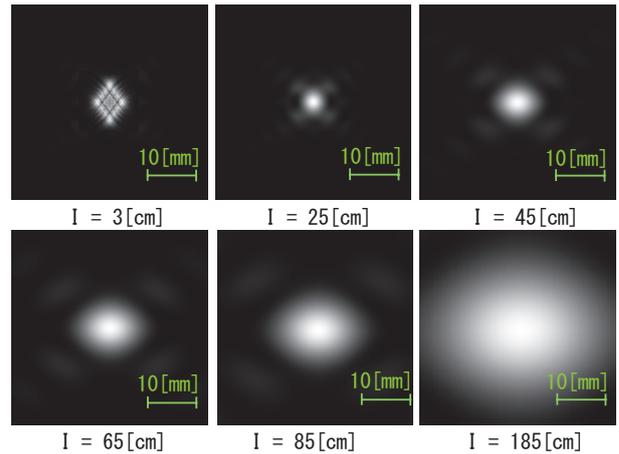
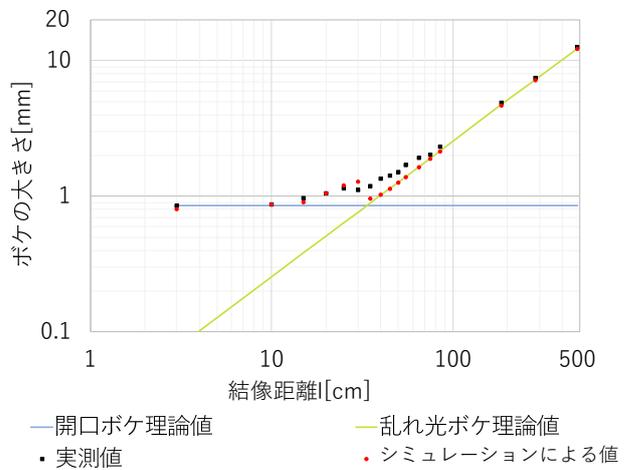
$$(\because f(x, y, 0) = a(x, y, 0) e^{ik \frac{(z_a + z_q)x^2 + (z_a + z_q)y^2}{2z_a z_q}}) \quad (14)$$

これで点光源から発する光が一つの再帰透過素子を通って像面に達するまでの計算ができる。各素子からの光は像面の同じ場所に達するので、再帰透過材全体が動作しても輝度分布は変わらない。さらに、これは空中ディスプレイが結ぶ実像の場合の計算ではあるが、位相共役波を考えれば、虚像プロジェクタが結ぶ虚像の場合も同じである。

4.4 シミュレーションによるボケ像とその大きさ

解析式を用いて結像距離 I を変化させながらボケの様子をシミュレーションした結果を図 8 に示す。シミュレーション画像は、先行研究 [3] の実測画像である図 7 とよく似ていた。

結像距離に対するボケの大きさを図 9 に示す。結像距離が小さいときは開口ボケが支配的であり、結像距離が大きいと

図 8: 結像距離 I における評価面上でのボケのシミュレーション画像図 9: 結像距離 I に対するボケの大きさ (乱れ光ボケ理論値は乱れ角実測値から求めた)

きは乱れ光ボケが支配的であることを示す。理論値と実測値、計算値は概ね一致しており、全体として本シミュレーションは妥当であることがわかる。結像距離 $I > 40$ [cm] では、ボケサイズは乱れ光ボケ理論値とほぼ一致し、結像距離 $I > 100$ [cm] の乱れ光ボケが支配的な部分では実測値ともよくあっている。従って乱れ光ボケのほとんどは回折によるもので、AIP の製作精度はすでに十分に高く乱れ光ボケに寄与していないと考えられる。なお、乱れ光ボケと開口ボケが拮抗する結像距離 40 [cm] 付近ではシミュレーション結果に波打ちがみられた。これは、図 8 のようにボケの輝度は理想像点から単調に減少してゆくわけではなく、「大きさ」という単純な量に評価する際に生じたものである。

4.5 AIP の最適素子サイズ

再帰透過窓サイズを変更してシミュレーションを行うことで、ある結像距離に対してボケサイズが最小となる素子サイズを求めた (図 11)。結像距離が大きくなるほど最適素子サイズも大きくなった。これは結像距離の増大に連れて回折ボケの寄与割合が大きくなり、より大きな開口ボケが許容されるためであろう。AIP/Aska3D のピッチ 0.4/0.5 [mm] に最適な結像距離は 25cm/35cm であろう。

4.6 虚像プロジェクタの仮想視力

虚像プロジェクタ構成において、結像距離に対して最適な素子サイズを用いた時の仮想視力 $=2/\text{ボケサイズの視覚}[\text{arcmin}]$ [10]を算出した(図10)。ここまではボケの物理的な大きさを用いてきたが、仮想視力を用いることで、はっきりした像をその仮想視力をもつ人と同じ視力をもつ人と同等の見え方をするという意味で人間にとっての解像度を評価できる。

5. 結論

再帰透過材により結ばれた像はボケる。これは発生機序の違う開口ボケと乱れ光ボケが合わさったものである。前者の大きさは、個々の再帰透過素子の大きさに比例する開口の2倍であり、結像距離によらない。後者の大きさは、製造精度が完全でないことや回折により生じる乱れ光の広がりつまり乱れ角と結像距離の積である。筆者らの興味は、第1に、乱れ光の原因が製造精度であるのか回折であるのかということである。製造精度が支配的な原因であればこれを向上させることでボケを減らすことができるが、回折が支配的であれば改良の余地がない。第2の興味は、後者の場合に重要であるのだが、再帰透過素子を大きくすれば回折が減り開口ボケが増えるというトレードオフを解いて最適な素子サイズを求めることである。

本研究では、波動光学をもちいて開口ボケと回折による乱れ光ボケをいちどきに求めるシミュレーションを用いた。第1の興味：回折ボケの大きさは乱れ光ボケサイズの理論値とほとんど一致しているため、回折がその主因である。AIPの製造精度はすでに十分高く、その改良によってはボケを抑制できない。第2の興味：ボケの大きさが最小となる再帰透過素子サイズは結像距離によって決まる。結像距離ごとに再帰透過窓サイズを変えてシミュレーションを行い、最適な再帰透過窓サイズを求めるとともに、その際の虚像プロジェクタ構成での仮想視力を求めた。結像距離の距離が遠いほど、最適な窓サイズは大きくなり、仮想視力は高くなった。紙面の制約のため割愛したが、開口形状とその大きさは、再帰透過材への光の入射角(=射出角)により変化する。これも同じ

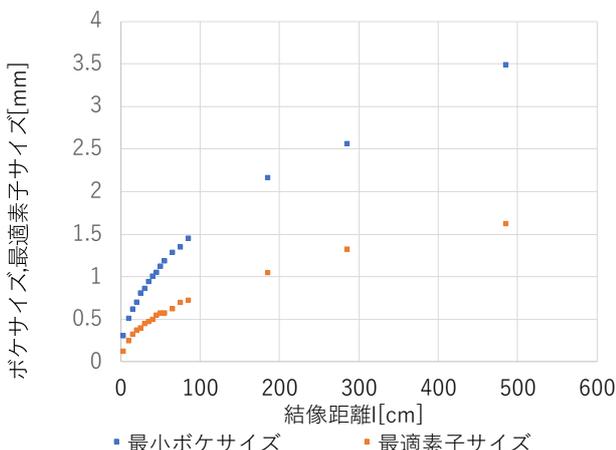


図10: 結像距離 I ごとに求めた最適な素子サイズ

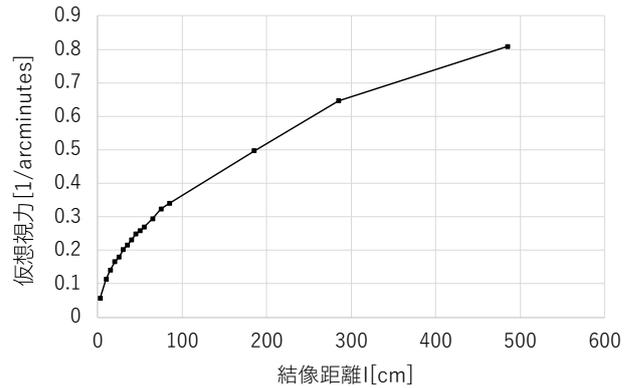


図11: 結像距離 I ごとに最適化した素子サイズを用いた場合の仮想視力

シミュレーションコードを用いて評価することができた。なお、本稿での説明は主に虚像プロジェクタ構成を念頭に行っているが、実像を結ぶ空中ディスプレイ構成でも結果は全く同じである。以上のことから、AIPの主たる解像性能は完全に把握できるようになったと考える。

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. 2008. ヒューマンインタフェース学会研究報告集, ヒューマンインタフェース学会.
- [2] (株)アスカネット, 藤島智彦, 大坪誠: 光学結像装置; 特開 2012-014194, 2012.
- [3] 伊藤賢矢, 虫鹿剛瑠, 木島竜吾: 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. 日本バーチャルリアリティ学会第28回論文集, 1D3-2.pdf, VRSJ, 2022.
- [4] 三宅晃暉, 木島竜吾: 平行短冊鏡列による片側再帰透過材の試作と評価. 日本バーチャルリアリティ学会第18回大会論文集, 11C-3.pdf, VRSJ, 2013.
- [5] 伊藤賢矢, 木島竜吾: 測定による再帰光学素子の解像性能評価. 日本バーチャルリアリティ学会第24回大会論文集, 3C-08.pdf, VRSJ, 2019.
- [6] Eugene Hecht: ヘクト光学: 波動光学; (尾崎義治・朝倉利光訳) 丸善株式会社, 2003.
- [7] Max Born, Emil Wolf: 光学の原理; (草川徹訳) 東海大学出版会, 2006.
- [8] 大津元一, 田所利康: 光学入門: 光の性質を知ろう. 株式会社朝倉書店, 2008.
- [9] 谷田貝豊彦: 光とフーリエ変換. 株式会社朝倉書店, 1992.
- [10] 木島竜吾: 仮想空間における視力. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.23, No.3, 2018.