



測定による再帰光学素子の解像性能評価

Evaluation of Resolution Performance of Retro-Optical Element by Measurement

伊藤賢矢¹⁾, 木島竜吾²⁾

Kenya ITO, 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, y4525005@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: プロジェクタによる実像結像の途中に再帰透過素子を挿入すると元の実像の対称位置に虚像が観察される(虚像プロジェクタ)。しかし解像度を制約する光学素子の性能を計測した例はない。本論文では元の実像とこの虚像をカメラで観察し、両者の MTF を計測、比較することで再帰光学素子の解像性能を評価した。直交鏡型の再帰透過素子であるエアリアルイメージングプレート (AIP) は、45 度入射の場合、26cycle/deg 程度まで視認可能であった。

キーワード: 虚像プロジェクタ, 再帰透過素子, エアリアルイメージングプレート, 解像性能

1. はじめに

頭部搭載型ディスプレイ (Head Mounted Display:HMD) とは、仮想現実 (Virtual Reality:VR) を提示するデバイスである。筆者らは、光線ベクトルのうち素材面に対する水平方向成分を反射させ、法線方向成分を透過させる再帰透過素子を用いた虚像プロジェクタというシステムを構成することで、広角、シースルー、小型、高解像度の全てを満たす光学シースルー HMD の開発を目指している。

本稿では、ユーザが日常で使用できる程度の十分な解像度を持つ光学シースルー HMD の実現のために、光学シースルー HMD の解像度を制約する再帰光学素子の解像性能を実測、評価する。

2. 再帰光学素子と虚像プロジェクタ

2.1 再帰光学素子

鏡は入射光を素材面に対して法線方向にのみ反射し、再帰反射材は入射光を光源方向に折り返す性質を持つ。再帰透過材は入射光を素材面に対して水平方向に反射させ、法線方向には透過する性質を持つ。再帰反射材と再帰透過材を合わせて再帰光学素子と呼ぶこととする。

2.2 直交鏡型再帰透過材 (RAM)

再帰透過材は様々な光学素子を用いることで製作が可能であり、筆者が所属する研究室で試作されたものとして、再帰反射材とハーフミラーを用いた再帰透過材や、直交鏡型再帰透過材 (Right Angle Mirror:RAM) などが挙げられる。再帰反射材とハーフミラーを用いた再帰透過材は、入射光を再帰反射材で折り返し、ハーフミラーで反射させることで再帰透過性を持つ。RAM は直交するように配置された鏡によって入射光を 2 回反射させることで再帰透過性を持つ。RAM には両側性 RAM と片側性 RAM の二種類が存在し、鏡を

直交するように配置された両側性 RAM と、両側性 RAM から鏡を半分ずつ取り除いた片側性 RAM がある (図 1)。長所として RAM は構造が単純なため比較的試作が容易であり、片側性 RAM には直交精度が画像品質に影響しにくい特徴がある。本研究では片側性 RAM の構造をとるアスカネット社のエアリアルイメージングプレート (Aerial Imaging Plate:AIP) を再帰透過材として用いる。

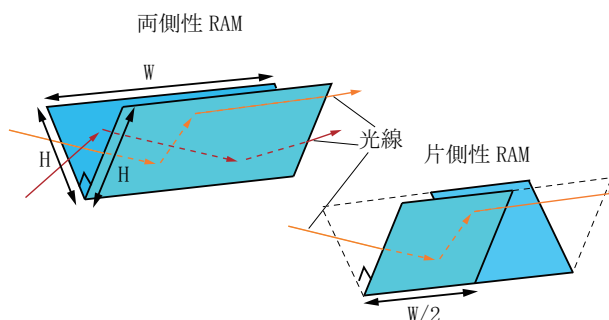


図 1: 両側性 RAM と片側性 RAM の構造

2.3 虚像プロジェクタ

1.1 節で述べた通り、再帰透過材に向けて焦点距離より近い位置からプロジェクタで投影することで、投影実像は虚像へと転換し、投影実像の再帰透過材に面対象な位置に虚像が結ばれる。よって、プロジェクタと光学共役な位置に瞳を置くことで、ユーザに虚像を知覚させることができる (図 2)。このシステムを虚像プロジェクタと呼ぶ [1]。

虚像プロジェクタの長所は再帰透過材の性質により透過性を持つこと、投影プロジェクタの広角化と小型化ができれば虚像プロジェクタの広角化、小型化が望めることである。しかし、虚像プロジェクタの重要な性能の 1 つである解像度に関しては、先行研究で様々な要因で解像度の低下が

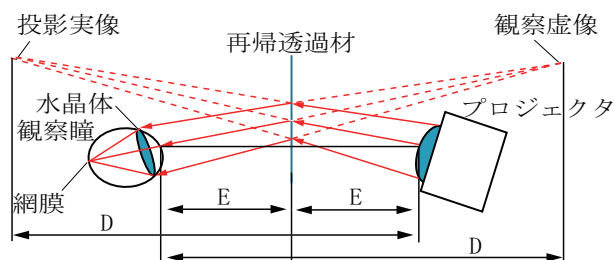


図 2: 虚像プロジェクタの原理

起こることは示されているが、ユーザが日常で使用できるほど十分な解像度を得るための理論的な検討はいまだになされていない。

2.3.1 虚像プロジェクタの解像度を支配する要因

虚像プロジェクタの解像度を支配する要因は主に3つである。

第1の要因は、実際の再帰光学素子の形状は、理想的な再帰光学素子と比べて不完全なため、再帰光学素子を通った光線は円錐状に広がりを持ち、乱れ光が生じることで結像点まわりにボケを生むというものである。これを乱れ光ボケという [2]。

第2の要因は、再帰光学素子をマイクロな視点で見た場合、素子は有限の大きさを持つため、入射光は開口の範囲で理想とは異なる位置で反射・透過されることで位置誤差を持つ光線が射出されるというものである。射出された光線群はそれぞれ射出位置が異なるため、結像点まわりにボケを生む。これを開口ボケという [1]。

第3の要因は、光の性質上、再帰光学素子が微細でかつ規則的な並びをしていると、透過する際に光の波の干渉が起き、結像点に干渉縞が発生してしまうというものである。この回折によって起こるボケを回折ボケという。

いずれの要因も、先行研究により確かに虚像プロジェクタの解像度を低下させる要因のひとつであることが実証された。しかし、十分な解像度を得るために再帰光学素子の性能がどれだけ必要か、また、再帰光学素子の性能以外に解像度低下の要因があるかといった理論的な検討はいまだになされていない。

2.3.2 目的

本研究の最終目標は、ユーザが日常で使用できる程度の十分な解像度を持つ光学シースルー HMD を実現するために、より正確な再帰光学素子の解像性能を調べることである。本稿では、再帰光学素子である AIP を用いた虚像プロジェクタを作製し、スクリーンに投影した実像と再帰光学素子を通して見える虚像のそれぞれのボケの広がり具合を基に、解像度の指標である変調伝達関数 (Modulation Transfer Function: MTF) [3] をそれぞれ算出し、比較することで再帰光学素子の性能を推定する。

3. AIP の解像性能計測

3.1 入射角度別解像性能

3.1.1 プロジェクタの解像性能

入射角度別の計測実験において、より正確な解像性能を測るために、焦点距離が短く画素ピッチが小さいプロジェクタを作製した。プロジェクタ解像性能計測の実験環境を図3に示す。

本稿では、プロジェクタの解像性能を評価する方法として、様々な周期を持つ矩形波縞の入出力コントラスト比を求めるコントラスト法 [4] を用いる。プロジェクタでスクリーンに様々な周期の縦縞模様 (矩形波縞) を投影し、Pixelink カメラでスクリーンを観察する。得られた観察像のコントラスト比を各周期で求め、コルトマン補正をかけたものを MTF に用いる最終的なコントラストとして用い、縦軸をコントラスト、横軸をコントラストに対応する空間周波数 [cycles/deg] としたグラフをプロットする。得られた実験結果を図4に示す。

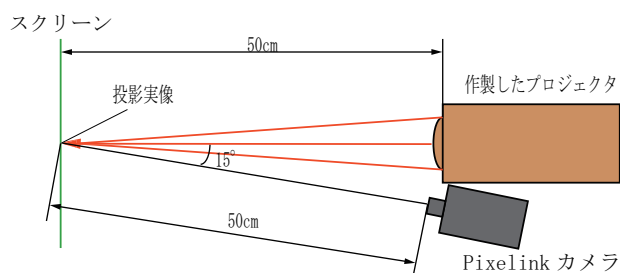


図 3: スクリーン投影実験

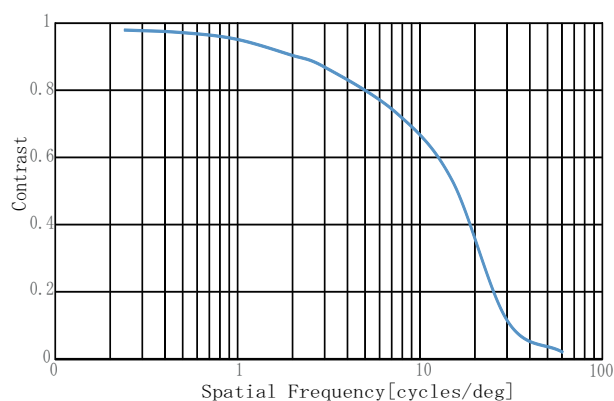


図 4: プロジェクタの MTF

3.1.2 虚像プロジェクタと AIP の解像性能

実験環境を図5に示す。3.1節で計測したプロジェクタと、片側性 RAM の構造をとるアスカネット社の AIP を用いて虚像プロジェクタを構築し、プロジェクタから AIP への入射角度 (α) を変化させて虚像を観察する。観察したそれぞれの虚像から、前節と同様にコントラスト法を用いて入射角度別に MTF を算出する。

算出した MTF は虚像プロジェクタの解像性能、つまりプロジェクタと AIP を合わせた解像性能を表している。よって、AIP 単体の解像性能を求めるには、プロジェクタと AIP の

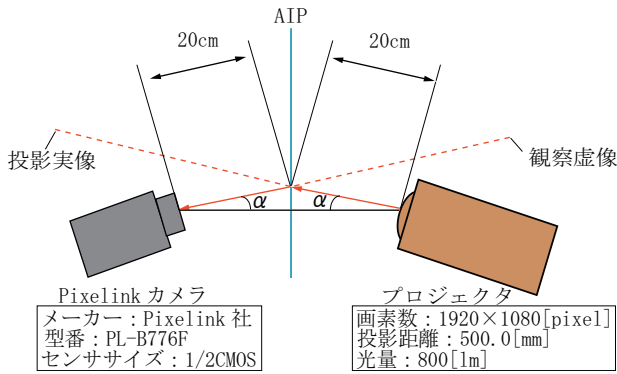


図 5: 入射角度別計測の実験環境

MTF(虚像プロジェクタの MTF) をプロジェクタの MTF で除算すればよい。この場合、得られる AIP 単体の解像性能とは、投影するプロジェクタのレンズの性能が、解像性能に影響しないほど高いとしたときの虚像プロジェクタの解像性能と同義である。虚像プロジェクタの MTF と除算して求めた AIP の MTF を図 6 に示す。

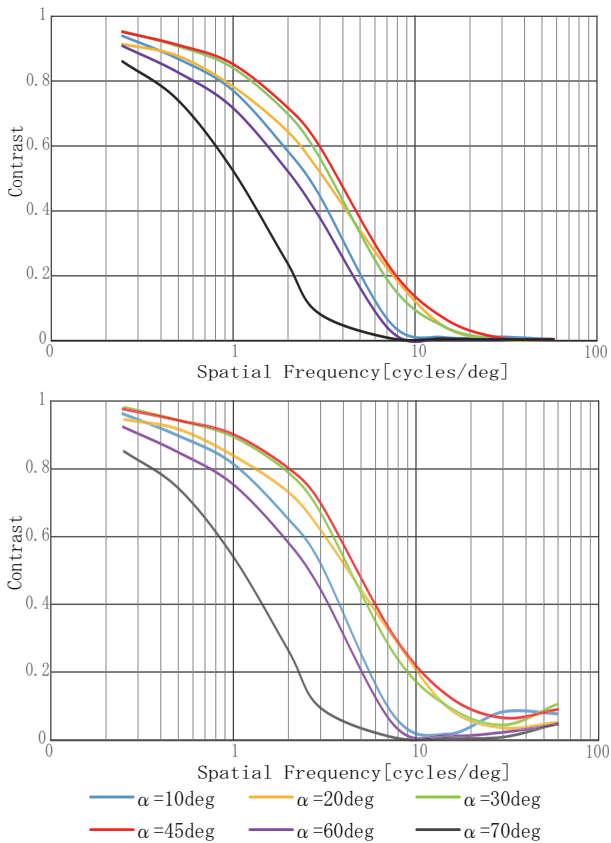


図 6: 上図: 虚像プロジェクタの入射角度別 MTF 下図: AIP の入射角度別 MTF

3.2 投影距離別解像性能

3.2.1 プロジェクタの解像性能

投影距離別の計測実験においては、投影距離を十分に換えられるプロジェクタが必要なため、Acer 社のプロジェクタを用い、自作プロジェクタと同様に MTF を算出する (図 7)。

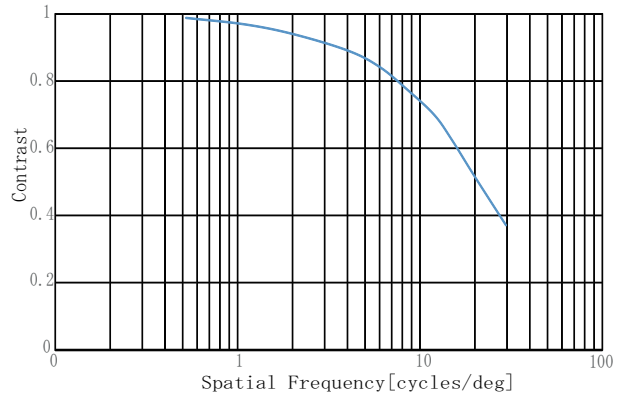


図 7: Acer H6810 の MTF

3.2.2 虚像プロジェクタと AIP の解像性能

計測したプロジェクタと AIP を用いて虚像プロジェクタを構築し、図 8 に示す投影距離 D を変化させ、それぞれの虚像を観察する。求めた虚像プロジェクタと AIP の投影距離別の MTF を図 9 に示す。

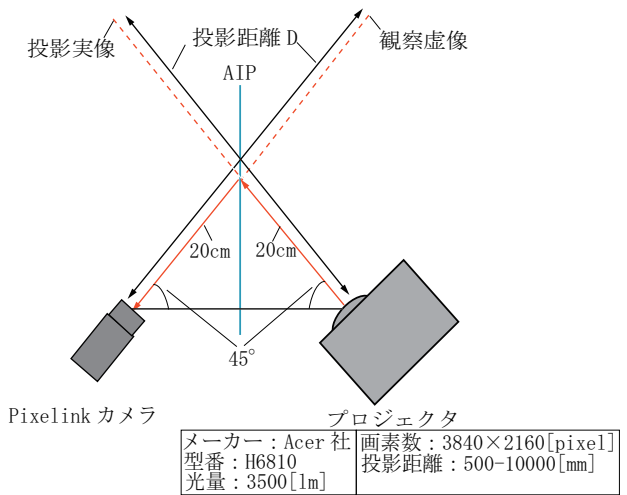


図 8: 投影距離別計測の実験環境

4. 仮想視力

本論文では、虚像プロジェクタを用いて光学シースルー HMD を作製した際に、どれほどの視力が得られるかを仮想視力とし、再帰光学素子の解像性能の評価基準のひとつとして扱う。

前章で求めた AIP の MTF から、人間コントラスト感度特性 (Contrast Sensitivity Function: CSF)[5] を用いて、人間が視認可能な限界周波数を算出する (CSF は年齢によって変化するが、本論文では年齢 40 の CSF を各年齢の平均に近い CSF として用いる)。限界周波数が 30[cycles/deg] としたときの仮想視力を 1.0 と定義することで、仮想視力は限界周波数 F_{max} を用いて、

$$\text{仮想視力} = \frac{F_{max}}{30} \tag{1}$$

と求めることができる [6]。

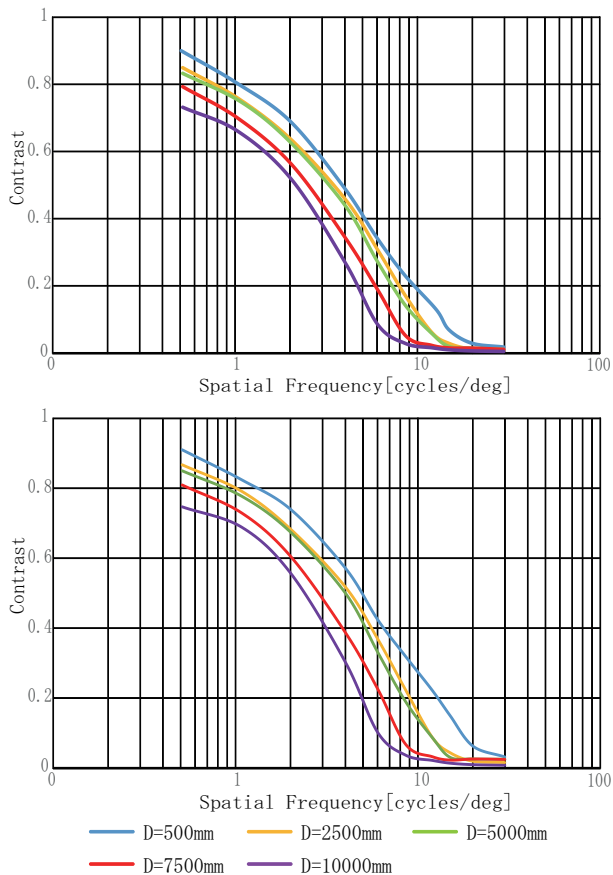


図 9: 上図: 虚像プロジェクタの投影距離別 MTF 下図: AIP の投影距離別 MTF

以上の方法を用いて、AIP の入射角度別及び投影距離別の解像性能を評価したものを表 1, 2 に示す。

表 1: AIP の入射角度別の限界周波数 [cycles/deg] と仮想視力

入射角度 [deg]	限界周波数 [cycles/deg]	仮想視力
10	12	0.4
20	19	0.63
30	19.5	0.65
45	26	0.87
60	11	0.37
70	6	0.2

AIP の入射角度別の解像性能は、表 1 が示すように入射角度が 45° のときに最も解像性能が高く、入射角度が 45° から変わるほど解像性能が低くなった。これは、角度を浅くしたときのボケは、入射光が鏡面に対して平行に近い場合有効な再帰透過窓が微細になり、回折ボケが生じることによるものだと考えられる。また、入射光が鏡面に対し浅く入射されることで鏡面上の歪みによる影響が顕著になりやすいことも考えられる。角度を深くしたときのボケは、角度が急なため AIP 内で理想的に反射されなかった光

表 2: AIP の投影距離別の限界周波数 [cycles/deg] と仮想視力

投影距離 [mm]	限界周波数 [cycles/deg]	仮想視力
500	26	0.87
2500	19	0.63
5000	16.5	0.55
7500	14.5	0.48
10000	13	0.43

線 (迷光) が観察瞳に入ることや、入射角度が急になることでもまた、有効的な再帰透過窓がより微細になるため、回折ボケが生じることによるものだと考えられる。

投影距離別の解像性能は、投影距離が大きいほど解像性能が低くなった。この原因は现阶段では解明できておらず、考えられる要因として、ひとつの収束光に着目したときに、投影距離の長い収束光は投影距離の短い収束光と比べて光学素子に広く当たるため、その面積の大きさが虚像のボケ具合に関わってきている可能性がある。

5. 結論

再帰光学素子として、直交鏡型の再帰透過素子であるエアリアルイメージングプレート (AIP) に着目し、虚像プロジェクタを構築する際に投影プロジェクタにおける AIP に対しての入射角度や投影距離を変化させ、AIP の入射角度別の解像性能と投影距離別の解像性能を評価した。AIP の解像性能は入射角度が 45° のとき最も高く、26[cycles/deg] まで視認可能であり、投影距離が長くなるほど解像性能が落ちることを示した。

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, 1996.
- [3] 畑川政勝, 井上誠: 矩形波チャートを用いたデジタル系の MTF 測定の検討, 日本放射線技術学会雑誌, 53(11), 1683-1690, 1997.
- [4] 小島克之: シミュレーションを用いたコルトマン補正の考察, 医用画像情報学会雑誌, Vol.8, No.2, 1991.
- [5] 行田尚義, 大頭仁: 視覚神経系と視覚特性の年齢による変化, 照明学会誌, 72(10), 20-24.
- [6] 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.