

2 層式再帰透過光学系における 偏光を利用した迷光の遮蔽

大川達也¹⁾, 勝元甫¹⁾, 梶田創¹⁾, 小泉直也²⁾, 苗村健¹⁾

1) 東京大学 (〒 113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1, {okawa, katsumoto, kajita, naemura}@nae-lab.org)

2) 電気通信大学 (〒 182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, koizumi.naoya@uec.ac.jp)

概要: 再帰透過光学系は空中像の表示に使用される。本稿ではその中でも Aerial Imaging Plate などの 2 層式再帰透過光学系を取り扱う。2 層式再帰透過光学系の問題は結像光以外にも迷光が見える点であった。そこで本稿では鏡での反射回数により偏光状態が変わることを利用し、結像光以外の迷光の遮蔽を行う手法を提案する。各光線の光路を再現する光学系を試作し、提案手法による透過率を計測することで遮蔽原理を確認した。

キーワード: 空中像, 再帰透過光学系, 偏光, 迷光

1. はじめに

映像を空中に表示すると映像情報と実物体と一緒に提示することができるため、ミュージアムでの展示品の説明などへの応用が期待されている。空中映像を結像する光学系の 1 つとして再帰透過光学系が挙げられる [1]。本稿では、再帰透過光学系として比較的入手しやすい Aerial Imaging Plate (AIP) [2] をはじめとした 2 層構造を持つ光学系について考える。

2 層式再帰透過光学系の各層は、図 1 (左) のように短冊状の微小な反射面を並べて配置した Slit Mirror Array (SMA) の構造をもつ。2 層式再帰透過光学系は、この SMA を 2 層、直交するように重ねたプレートであり、図 1 (右) のような構造を持つ。入射光は各層で反射するため、このプレートは入射光に対し「法線方向の折り返しをせず、面内の折り返しのみを行う」[1] という再帰透過性を有する。再帰透過された光線は、プレートに関して光源と面对称の位置に実像を結像するため、実像型の空中像の表示に使われる。

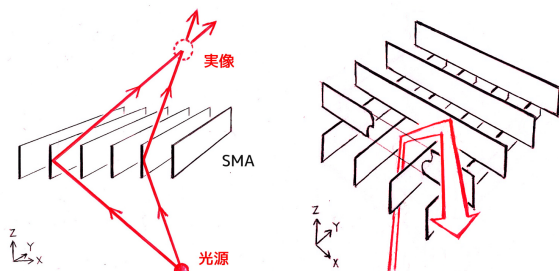


図 1: (左) SMA の構造と結像の原理。(右) 2 層式再帰透過光学系の構造と結像光。

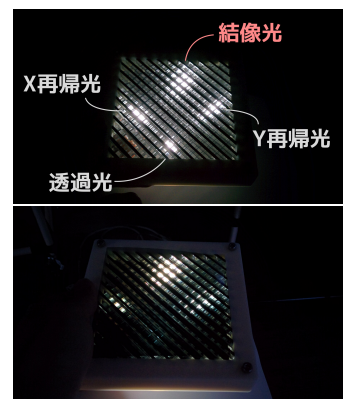


図 2: 試作した 2 層式再帰透過光学系での迷光 (上) と提案手法による遮蔽の結果 (下)。

しかし従来の 2 層式再帰透過光学系では図 2 (上) のように、再帰透過する結像光のほかに 3 種類の迷光が発生する。これらの迷光があると意図しない位置にも映像が見えてしまうため、ユーザにとって紛らわしいばかりでなく、空中像と迷光が重なり、視認性を悪化させることもある。

本稿では、2 層式再帰透過光学系での迷光を偏光を利用して減衰させる手法を提案する。SMA 内での光路を模した実験光学系を用いて本手法での遮蔽効率を測定した。また図 2 に示すように、提案手法の光学系を試作した。

2. 関連研究

2.1 再帰透過光学系

再帰透過光学系は AIP の他にも Dihedral Corner Reflector Array (DCRA) [3], Crossed-Mirror Array (CMA) [4] が提案されている。しかし、ここでは AIP のように 2 層が独立して機能する再帰透過光学系についてのみ考える。

2 層式再帰透過光学系は 1 章で述べたように、2 枚の SMA が直交した構造をもつ。このような 2 層式再帰透過光学系



図 3: SMA における光線の反射回数と向き。

表 1: 各 SMA での反射回数の偶奇と出射光線。

SMA1 (法線 X 方向)	SMA2 (法線 Y 方向)	
	奇数回反射	偶数回反射
奇数回反射	結像光 (XY 再帰)	迷光 (X 再帰)
偶数回反射	迷光 (Y 再帰)	迷光 (透過光)

は、入射光が各層の SMA で 1 回ずつ反射されると正しく再帰透過する。しかし、各層の SMA への入射光が必ず 1 回ずつ反射するとは限らない。図 3 に示すように、0 回や 2 回反射する場合もある。このように反射回数の偶奇によって出射光線の方向が変わる。

表 1 に示すように、2 層式再帰透過光学系では各層の SMA での反射回数によって、出射する光の方向と性質が異なる。空中像を表示するにあたり、結像光以外の迷光は不要である。各層において、奇数回反射した光のみを抽出することができれば、2 層式再帰透過光学系における迷光が除去可能であると考えられる。

2.2 迷光の遮蔽方法

結像光を残しつつ迷光のみを遮蔽するにあたり、両光線を分離する手段としては主に光線の進行方向の違いが利用されてきた [5][6][7]。遮蔽のために使用されたのは、視野角制御フィルムや拡散制御フィルムなどである。これらの方法を用いると、フィルムの配置が空中像や視点の位置を規定することになるが、迷光を遮蔽できることが知られている。

空中像や視点の位置が規定されない方法としては、偏光を用いた光線分離がある。勝元ら [5] は、2 層式再帰透過光学系である AIP に偏光板を組み合わせることで、その迷光を遮蔽することを検討したが、それは不可能であると結論付けている。しかし、AIP と偏光板という設計ではなく、AIP の構造を 2 層の SMA として捉え、その SMA 間に偏光素子を追加することも含めて設計を見直すことで、迷光の遮蔽も可能になると考えられる。偏光板を用い、各層の SMA において奇数回反射の光線のみを通すようにできれば、迷光のない 2 層再帰透過光学系が可能になると考えられる。

3. 提案手法

3.1 目的

提案手法の目的は、偏光の特性を用いて 2 層式再帰透過光学系における結像光以外の迷光を除去することである。

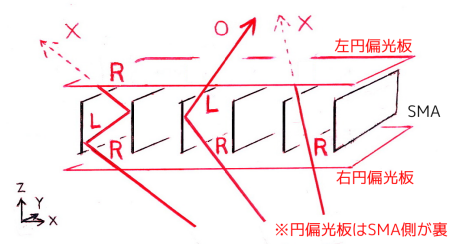


図 4: 光線の反射回数と偏光状態。図中で R・L を付した光線はそれぞれ右・左円偏光である。

3.2 遮蔽手法

本稿の方針は次のとおりである。まず、2 層式再帰透過光学系は 2 層の SMA として考える。結像光になるのはそれぞれの層で奇数回反射する場合のみである [2]。よって、結像光以外の迷光を除去するため、各 SMA が偶数回反射する光を出射しないように設計する。この遮蔽を偏光板で SMA を挟むことで実現する。

本稿では、円偏光による遮蔽を行う。円偏光には回転方向があって、右円偏光と左円偏光が存在し、鏡に反射すると回転方向がおおよそ逆転することを利用する。

また本稿では、円偏光を取り扱うのに円偏光板を用いる。円偏光板は直線偏光子と位相板を貼り合わせたもので、これに由来する表裏があり、本稿では便宜上、偏光子側を表、位相板側を裏と呼ぶことにする。円偏光板は、円偏光の生成と選択という 2 つの機能をもつが、これには表裏を使い分ける必要があり、光線を変換して特定の向きの円偏光を生成するには表から入射、特定の向きの円偏光を選択して遮蔽または透過するには裏から入射させる。円偏光板には右円偏光板と左円偏光板が存在して、例えば右円偏光板は、表から無偏光の光線を入射させると右円偏光が得られる。また裏から円偏光の光線を入射したとき、右円偏光なら透過し、左円偏光なら遮蔽することができる。

図 4 に入射側に右円偏光板を、出射側に左円偏光板を、どちらも裏を SMA 側にして置いた時に偶数反射光線が遮蔽される原理を示す。まず入射光は右円偏光板の表に入射し、右円偏光となる。次いで、鏡はおおよそ入射した円偏光の回転方向を逆にするので、SMA 出射時には奇数反射光線は左円偏光、偶数反射光線は右円偏光となっている。出射時には左円偏光板に裏から入射し、これが左円偏光を通し右円偏光を遮蔽するので、偶数反射光線のみ遮蔽することができる。

以上の手法を 2 層の SMA のそれぞれに施すことによって、2 層式再帰透過光学系の迷光を除去することができる。上の例に従った構成例を図 5 に示す。このような構成によって、結像光以外の 3 通りの迷光全てを遮蔽することができる。

両方の SMA に本手法を適用すると、SMA の間で円偏光板が連続する。ここでの 2 枚の円偏光板は表同士、すなわち直線偏光子同士が向かい合っており、これら直線偏光子の片方を省略して円偏光板と位相板という構造にするのが望ましい。

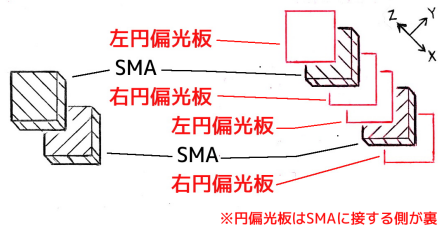


図 5: 従来の 2 層式再帰透過光学系の構造 (左) と提案手法による構成例 (右)。

このほか、光源に液晶ディスプレイを用いるなど、入射光がすでに偏光されている場合には最初に入射する円偏光板での影響を考慮する必要がある。

4. 偶数反射光線の除去に関する実験

4.1 目的・方法

SMA での偶数反射光線を遮蔽する提案の効果を確認するため、SMA 内の一組のスリットミラーを模した光学系を図 6 のように製作し、0 から 2 回反射光までのそれぞれについて本手法を用いない場合を基準にした相対的な輝度を測定する。SMA 内での光路を再現するため、反射回数と同じ枚数の鏡を向かい合わせに平行に設置した。1 回反射ではミラー 1 を使い、輝度計は写真奥側に移動し、出射側の偏光板も平行に移動した。光源は無偏光な白色 LED を用いた。LED を白い紙で覆い光を拡散させることで、輝度計の光軸の微小変動に対する輝度変化を減らした。

偏光の方向は入射側を右円偏光板とした。これには左円偏光板を用いることもできるが、遮蔽効果は同じと考えられるので省略した。円偏光板の向きは、入射側の円偏光板の偏光子を入射光の方位に向け、出射側は入射側と偏光子が直交するように設置した場合 (偏光子 0°) と、その向きを基準とし、両方の偏光板を面内で光線から見て左に 45° 回転させた場合 (偏光子 45°) の 2 通りの条件で測定した。これは、直交させた 2 枚の直線偏光子では斜入射での光漏れ

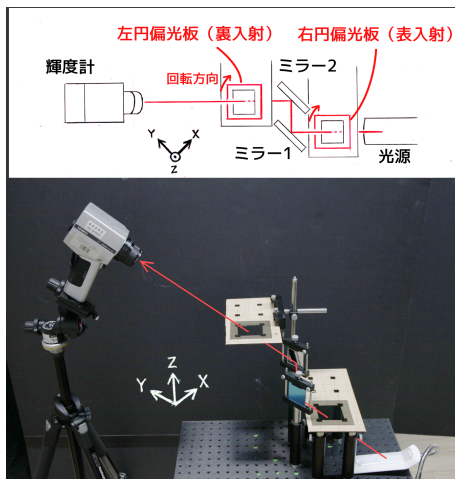


図 6: 2 回反射, 偏光子 0° のときの実験光学系。(上) 上から見た配置図。(下) 正面からの様子。

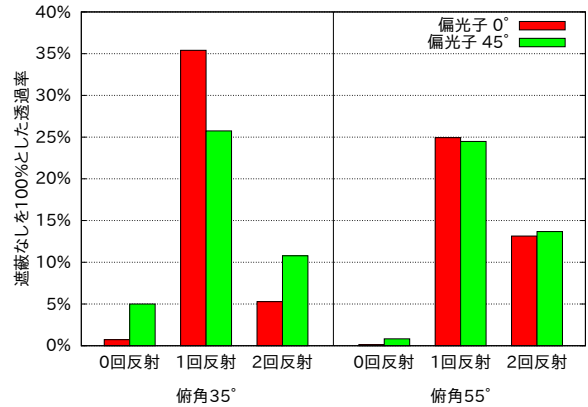


図 7: 遮蔽なしを 100%とした光線の透過率。

表 2: 1 回反射と比較した透過率。

俯角	35°		55°	
偏光子	0°	45°	0°	45°
0 回反射	0.021 倍	0.19 倍	0.0054 倍	0.034 倍
2 回反射	0.15 倍	0.42 倍	0.53 倍	0.56 倍

が方位角 90° ごとに起きることから、円偏光板でも 45° 回転させると異なる性能が得られることが予想されたためである。

2 層式再帰透過光学系での基本的な使用条件を踏まえ、入射光の方位角は 1 枚目の鏡の法線方向から反時計周りに 45° とし、計測時の俯角は $35, 55^\circ$ とした。

鏡と円偏光板はエドモンド・オプティクス・ジャパン製の金属膜表面鏡「69250: 4-6 λ 平面ミラー」と「88093, 86187: 円偏光板 フィルム」を、輝度計はコニカミノルタ製の「CS-100A: 色彩輝度計」を用いた。本実験では円偏光板を斜入射で使用するが、斜入射で設計された円偏光板を入手できなかったため、垂直入射設計の円偏光板を用いた。

4.2 結果

遮蔽なしを基準とした透過率を図 7 に示す。どちらの偏光方式においても、本提案手法によって 1 回反射光線と比べて 0, 2 回反射光線をより減衰させることができた。1 回反射光線の透過率は、俯角 35° では偏光子 0° のとき 35%, 偏光子 45° のとき 26%であり、俯角 55° では同様に、それぞれ 25%, 24%であった。この透過率に関して、1 回反射に対する 0, 2 回反射の透過率を比較した (表 2)。

4.3 考察

どちらの偏光方式においても主な偶数回反射である 0, 2 回反射光線の相対輝度が主な奇数回反射である 1 回反射光線を下回ったので、偶数回反射光線を減衰させる効果はあるといえる。

0 回反射では相対輝度が 0.13%~5.0%だったものが 2 回反射では 5.3%~14%となっており、遮蔽が十分に機能していない。これは鏡での反射回数が増えるに従って偏光状態が

円偏光で無くなっていくためと考えられる。光線が反射面に斜入射した場合、その反射特性は偏光特性をもつ。偏光状態の変化は入射光や法線を含む面内の p 偏光成分と、これと垂直な面内の s 偏光成分に分けて考えることができ、本実験で用いた金属面での反射では p 偏光と s 偏光に位相ずれが生じる。このため、入射が完全な円偏光であっても反射光は楕円偏光となり、円偏光板での遮蔽で一部が漏れてしまうと考えられる。また、2 回反射での鏡面は互いに平行であるため両反射面での p 偏光や s 偏光の向きが変わらず、2 度の反射で偏光状態の歪みが足されていくことが遮蔽性能を低くしていると考えられる。

この金属面反射での位相ずれは入射角が大きくなるほど広がるため、俯角 55° ではより強まったと説明できる。ただし、SMA においては、俯角が大きいと幾何的に 2 回反射の光量が減るため、このように遮蔽不良が大きくなることによる影響は少ないと考えられる。

1 回反射光線での輝度は提案前の 25%~35% に減衰した。本提案手法では、どの光線も 2 枚の偏光板を通っている。偏光板を用いた理想的なシステムを考えたとしても、入射光を偏光させる 1 枚目のフィルタでは偏光による選別を行うため、光量の半分がここで失われて輝度は最大でも 50% となるはずである。今回用いた円偏光板を取り上げると、この製品は垂直入射設計であって仕様書通りの特性は保証されないが、仕様書通りを仮定して計算することにする。入射光は非偏光であり、1 枚目の円偏光板の透過率は仕様書より 42% である。これが理想的なフィルタでの透過率 50% の 0.84 倍になっていることから、円偏光板内では現実的な損失があって、透過率を 0.84 倍ほどに下げてしまうと考えられる。これを 2 枚目の円偏光板にも当てはめると、円偏光板への入射光が完全に透過するような偏光状態であったとしても、透過率は 100% の 0.84 倍で 84% 程度になると考えられる。2 枚合わせると、全体の輝度は提案前の $42\% \times 84\% = 35\%$ 程度となる。したがって今回の実験結果に合致する。俯角 55° での輝度減少は前述の偏光状態の歪みが考えられる。

偏光子 0° と偏光子 45° の比較を行う。偏光子 45° の方式は、俯角 35° では遮光性能と透過性能がともに悪い。俯角 55° でも性能の差は僅かであるが傾向は同じであった。偏光子 45° の方式での全性能低下は、入射側と出射側の円偏光板で直交していた偏光子が、斜入射では見かけ上直交しなくなることで起こると考えられる。これが俯角 35° で顕著なのは、2 つの偏光子の見かけ上のなす角は俯角が小さいときほど 90° から離れていくからだと考えられる。また偏光子 0° の方式では、偏光子は光線から見て入射面内かそれと垂直なので、俯角によらず見かけ上常に直交が保たれ、この性能低下が起こらないと考えられる。

結論として、偶数反射光線をより選択的に遮蔽するという観点と、奇数反射光線の輝度をより高く保つという観点において、本条件下では偏光子 45° の方式より偏光子 0° の方式が全面的に性能が良く、本提案に適していた。ただし俯角が大きくなるとその差は顕著ではなかった。

5. 試験の実装

提案光学系を試験的に実装した。今回 SMA としては短冊状の亚克力ミラーを空气中に等間隔に並べたものを用い、偏光板としては前章の実験でも用いた垂直入射設計の円偏光フィルムを用い、実験で適していると判断された偏光子 0° の向きで設置した。

実装時の問題として、これまで扱ってきた 3 種類の迷光の他にも、亚克力ミラーの断面に入射して亚克力中を透過し断面から出る光線など、この模型に特有の別の迷光がある。これを抑えるためにミラーの片側の断面にはアブゾーバを貼り付けた。

この模型の奥に LED 光源をおいて観察した結果が図 2 である。結像光以外の迷光が減衰していることが分かる。Y 再帰光が X 再帰光より明るく見えるが、これはアブゾーバを貼らなかった写真奥側の SMA での亚克力ミラー断面が明るく光っているためと考えられる。

6. まとめ

本稿では、迷光の少ない再帰透過光学系を実現するため、2 層式再帰透過光学系を構成する各 SMA のそれぞれを偏光素子で挟み込むことで迷光を選択遮蔽することを提案した。遮蔽のための偏光素子としては円偏光板が利用できることを確認した。また、再帰透過光学系での基本的な使用に相当する方位角から見るという条件では、入射側の円偏光板の偏光子は入射光の方位角と同じ向きになるよう配置するのが遮蔽に適していることが分かった。

謝辞 本研究は、JST-CREST の支援を受けた。

参考文献

- [1] 木島 竜吾 他: “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: 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).
- [2] 株式会社アスカネット: “光学結像装置”, 特開 2012-155345(P2012-155345S).
- [3] Satoshi Maekawa et.al.: “Transmissive optical imaging device with micromirror array”, Proc. SPIE 6392, Three-Dimensional TV, Video, and Display V, 63920E, (2006).
- [4] Hirotsugu Yamamoto et.al.: “Aerial LED signage by use of crossed-mirror array”, Proc. SPIE 8643, Advances in Display Technologies III, 864302 (2013).
- [5] 勝元 甫 他: “テーブル型対面環境における直立空中像の移動に伴う透過光の遮蔽”, 3 次元画像コンファレンス, 4-2 (2016).
- [6] 山本 紘暉 他: “AriCE: 鏡の前後に水平・垂直の空中像を提示する複合現実感システム”, 3 次元画像コンファレンス 2015, pp. 23 – 26 (2015).
- [7] 山本 紘暉 他: “EnchanTable: テーブル面の反射を用いた直立空中像ディスプレイ”, バーチャルリアリティ学会論文誌, vol. 21, no. 3 (2016).