



# 異方性光拡散フィルムを用いた 空中像ディスプレイのゴースト低減

Reduction of Ghost Image in Aerial Display with Anisotropic Diffusion Film

片桐麦<sup>1)</sup>, 草間健太郎<sup>1)</sup>, 小泉直也<sup>2)</sup>

Baku KATAGIRI, Kentaro KUSAMA and Naoya KOIZUMI

1) リンテック株式会社 (〒335-0005 埼玉県蕨市錦町 5-14-42, b-katagiri@post.lintec.co.jp)

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

**概要:** 再帰性透過素子を用いた空中像ディスプレイは、光利用効率の高さ、画像の鮮明さから注目を集めているが、空中像の左右にゴースト像が発生し、視認性を低下させるという問題がある。本研究では空中像を形成する光、およびゴースト像を発生させる迷光の再帰性透過素子への入射角度の違いに着目し、入射光の拡散/透過を角度により制御する異方性光拡散フィルム (ADF: anisotropic diffusion film) を用いた。これにより空中像を形成する光を直進透過/ゴースト像を発生させる迷光のみを散乱させ、空中像の明るさを損なわずにゴースト像を低減させるシステムとした。

**キーワード:** 空中像ディスプレイ、再帰性透過素子、ゴースト像、異方性光拡散フィルム

## 1. はじめに

空中像ディスプレイは非接触性と高いアイキャッチ性から広く注目を集めている。非接触性に関しては新型コロナウイルス感染拡大で非常に大きな需要を得たが、コロナ禍が収まりつつある現在でも、公衆衛生の観点から引き続き高いメリットとなっている。アイキャッチ性は様々な情報があふれる現代において、他との差別化を図るために必要不可欠な要素であり、今後ますますニーズが高まるものと考えられる。空中像ディスプレイの中でも再帰性透過素子を用いたものは光利用効率が高く、画像が鮮明であるため、種々応用が検討されている[1]。

再帰性透過素子を用いた空中像ディスプレイの問題として、ゴースト像の発生があり、例えば[2]ではレイトレーシングによって迷光の様子を再現している。再帰性透過素子での迷光が観察者方向へ出射し、ゆがんだゴースト像を形成するため、空中像の視認性を大きく阻害する。ゴースト像を低減する方法としては一般に、視野角制御フィルムが広く用いられている。空中像を形成する光 (空中像光) と、ゴースト像を発生させる迷光 (ゴースト像光) の、再帰性透過素子への入射角度の違いを利用し、空中像光を透過させ、ゴースト像光を吸収することで、大きな効果を発揮する。しかし、視野角制御フィルムの構造上、空中像光の一部まで吸収してしまうため、空中像が暗くなるという問題がある。

本研究では透過/吸収の切り替え[3]ではなく、直進透過/拡散透過の切り替えを再帰性透過素子の面上でおこなうことで、空中像の明るさを損なわない空中像ディスプレイの構築を目指し検討をおこなった。

## 2. 空中像光とゴースト像光

### 2.1 空中像とゴースト像の関係

再帰性透過素子 (アスカネット社製、ASKA3D-200NT、縦 200 mm×横 200 mm×6.3 mm) とノートブックパソコン

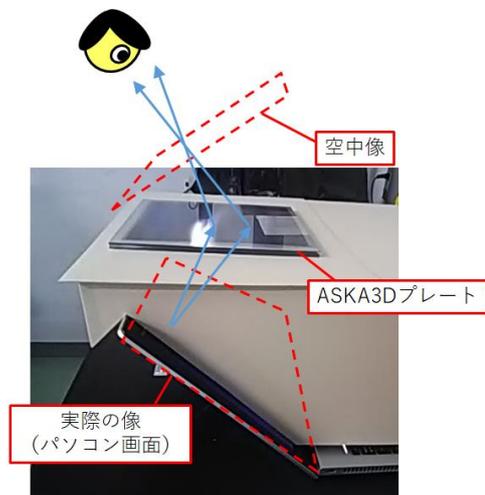


図 1: 作製した空中ディスプレイ側面画像



図 2: 空中像ディスプレイ観察画像

のディスプレイ（白輝度 130 cd/m<sup>2</sup>、KONICA MINOLTA Luminance meter LS-110 にて測定）を用い、両者の角度が 45°である空中像ディスプレイを作製した（図 1）。空中像は再帰性透過素子に対して、実際の像と対象の位置の空中に浮かぶように現れる。200 lx の明環境下（HIOKI LUX HiTESTER 3423 にて測定）において、観察者方向から見た空中像ディスプレイを図 2 に示す。空中像は鮮明に見えるものの、左右手前側にゴースト像が現れ、空中像の視

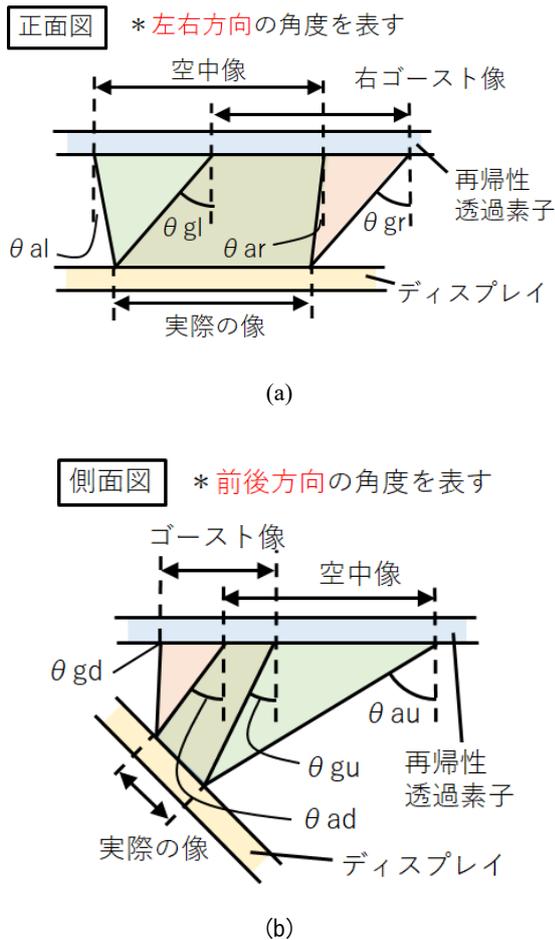


図 3: 空中像光とゴースト像光の入射角度  
(a). 正面図  
(b). 側面図

認性を阻害していることがわかる。

2.2 空中像光とゴースト像光の入射角度

空中像とゴースト像の再帰性透過素子上での位置、およびディスプレイ上での位置を計測し、空中像光とゴースト像光の、再帰性透過素子に対する入射角度を導出した。図 3(a)は作製した空中像ディスプレイを正面から見た際（再帰性透過素子と同じ面内で無限遠から見た状態）の、ディスプレイと再帰性透過素子の位置関係、さらには再帰性透過素子上の空中像と右ゴースト像の位置関係を表した図である（左ゴースト像は省略）。図に示す通り、再帰性透過素子に対して空中像光が入射する角度を  $\theta_{al}$  および  $\theta_{ar}$ 、ゴースト像光が入射する角度を  $\theta_{gl}$  および  $\theta_{gr}$  とする。図 3(b)は空中像ディスプレイを側面から見た際（再帰性透過素子と同じ面内で無限遠から見た状態）の、ディスプレイと再帰性透過素子の位置関係、さらには再帰性透過素子上の空中像とゴースト像の位置関係を表した図である（左右ゴースト像は重なった状態にある）。図に示す通り、再帰性透過素子に対して空中像光が入射する角度を  $\theta_{ad}$  および  $\theta_{au}$ 、ゴースト像光が入射する角度を  $\theta_{gd}$  および  $\theta_{gu}$  とする。

それぞれ導出した入射角度の値を表 1 に示す。左右方向において、空中像光は  $-8.4^{\circ} \sim 8.4^{\circ}$  の角度で再帰性透過素子に入射し、右ゴースト像光は  $-36.6^{\circ}$  で入射する。対称性から考えて、左ゴースト像光は  $36.6^{\circ}$  で入射する。左右方向での直進透過／拡散透過の切り替えをおこなうためには、入射角度  $-36.6^{\circ}$  の光を拡散透過させ、 $-8.4^{\circ} \sim 8.4^{\circ}$  の光を直進透過させ、 $36.6^{\circ}$  の光を拡散透過させる異方性光拡散素子を用いる必要がある。一方、前後方向において空中像光は  $-41.9^{\circ} \sim -37.1^{\circ}$  の角度で再帰性透過素子に入射し、ゴースト像光は  $-4.9^{\circ} \sim -3.1^{\circ}$  で入射する。前後方向での直進透過／拡散透過の切り替えをおこなうためには、入射角度  $-41.9^{\circ} \sim -37.1^{\circ}$  の光を直進透過させ、 $-4.9^{\circ} \sim -3.1^{\circ}$  の光を拡散透過させる異方性光拡散素子を用いる必要がある。

以上を考えると、左右方向での切り替えのためには角度変化に応じて直進透過／拡散透過の変化が 2 度必要であるのに対して、前後方向での切り替えは直進透過／拡散透過の変化が 1 度だけで済む。このため、前後方向での直進透過／拡散透過の切り替えの方がシステムを簡便にでき

表 1: 空中像光とゴースト像光の入射角度

	入射角度	数値 [°]
左右方向	$\theta_{al}$	8.4
	$\theta_{ar}$	-8.4
	$\theta_{gl}$	-36.6
	$\theta_{gr}$	-36.6
前後方向	$\theta_{au}$	-41.9
	$\theta_{ad}$	-37.1
	$\theta_{gu}$	-4.9
	$\theta_{gd}$	-3.1

ると考え、前後方向での切り替えを検討することとした。

### 3. 異方性光拡散フィルム ADF

#### 3.1 ADF の基本特性

図 4(a)に異方性光拡散フィルム (ADF : anisotropic diffusion film) の構造と拡散特性の模式図を示す[4]。ADF は低屈折率媒体中に高屈折率媒体がルーバー状に並んだ、周期的な屈折率分布構造を有しており、一般的な微粒子拡散フィルムや表面形状拡散フィルムとは異なる特異的な光学特性を実現するものである。ADF はルーバー構造に対して平行 (空気中で約±15°の範囲を許容する) に入射した光をルーバーと直交する面内で拡散透過させる (図 4(a)の赤い光)。一方、ルーバー構造に対して平行ではない角度で入射した光は直進透過させる (図 4(a)の青い光)。

図 4(b)はルーバー構造が方位角  $\phi=90^\circ$  方向に延びる垂直ルーバーADF の、垂直入射光に対する拡散光分布である (RADIANT 社製イメージング輝度計 (FPD Conoscope Lens) にて測定)。図中の黄色い部分が拡散光の強い角度方向、青い部分が拡散光の弱い角度方向、黒い部分が拡散光

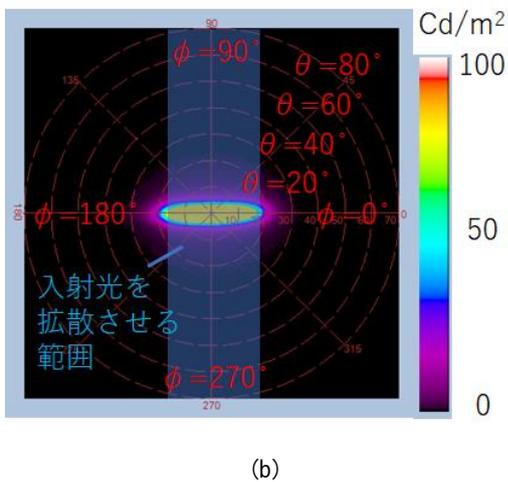
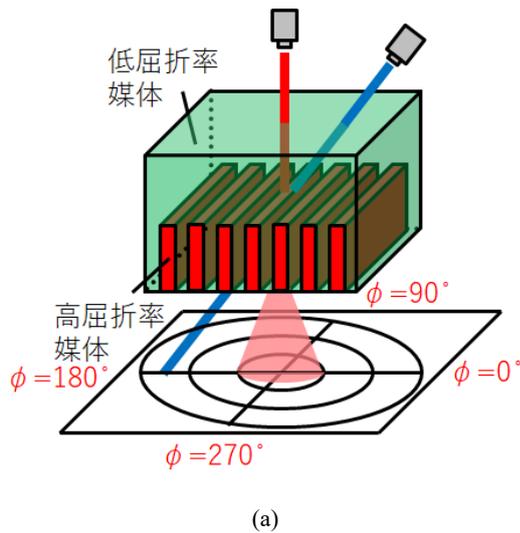


図 4: 空中像光とゴースト像光の入射角度  
(a). 構造と拡散特性模式図

のない角度方向を表す (カラーバー参照)。ADF が入射光  $\phi=0^\circ$  方向に異方性拡散させており、その範囲が極角  $\theta=\pm 15^\circ$  程度であることがわかる。「ルーバー構造に対して平行に入射した光をルーバーと直交する面内で拡散透過させる」という性質を考えると、垂直ルーバーADF が入射光を拡散させる範囲 (拡散角度領域) は図 4(b)の青い部分であると推測され、この推測は実験結果とよく合うことが確認されている。

#### 3.2 ADF の拡散角度領域

ADF の直進透過/拡散透過を切り替える挙動を表すには、前述の拡散光分布とあわせて、ヘイズ特性から拡散角度領域を求める方法が適している。拡散角度領域測定には株式会社村上色彩技術研究所製自動回転試料台付きヘイズメータ HM-150 を用いた。この装置は通常のヘイズメータとは異なり、積分球開口から離れた位置にサンプルを設置し、サンプルへの測定光入射角度を可変としたものである (図 5(a))。

先ほど導出した空中像ディスプレイ前後方向における空中像光とゴースト像光の、再帰性透過素子への入射角度範囲に合わせて、空中像光を直浸透させ、ゴースト像光を拡散透過させる異方性光拡散フィルムとして 5°傾斜ルーバーADF140  $\mu\text{m}$  を選定した。図 5(b)にルーバーと直交す

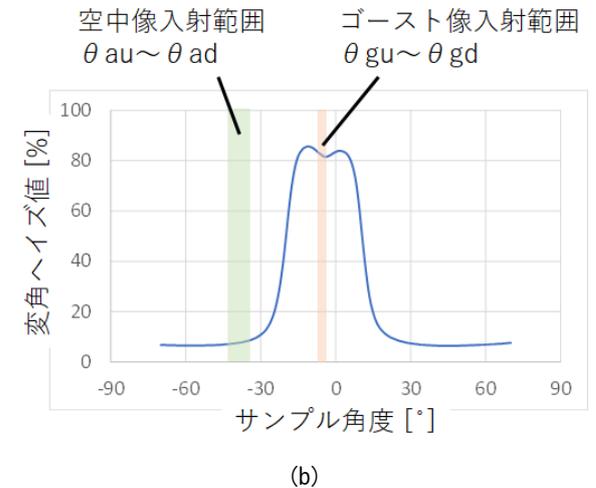
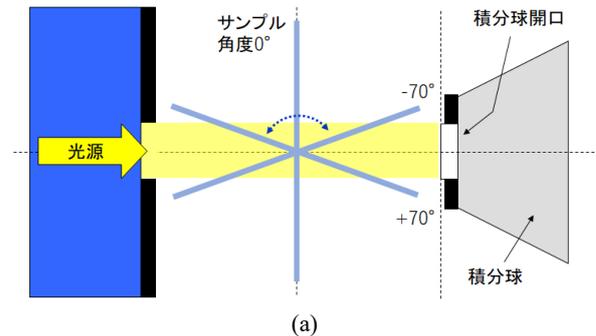


図 5: ADF の変角ヘイズ特性  
(a). 変角ヘイズメータ測定系  
(b). 変角ヘイズ特性と入射範囲

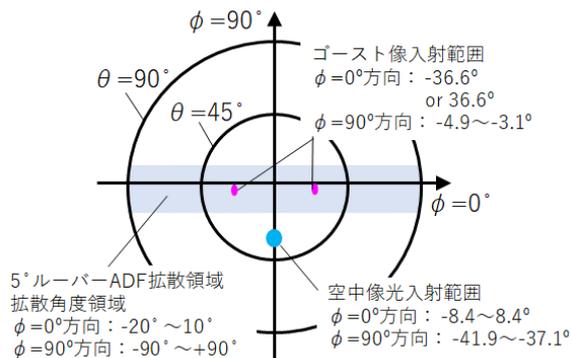


図 6: 3 次元的な角度関係

る面内での変角ヘイズ特性を示す。図から、空中像光の入射角度範囲においては変角ヘイズ値が低く、ゴースト像光の入射角度範囲においては変角ヘイズ値が高いことがわかる。したがって再帰性透過素子の裏面に貼付することで、入射角度による直進透過／拡散透過の切り替えが可能となる。

このことを一つの面内だけでなく、三次元的に考えると図 6 のようになる。空中ディスプレイの右方向を  $\phi=0^\circ$ 、後ろ方向を  $\phi=90^\circ$  とすると、再帰性透過素子に対する空中像光の入射範囲は青楕円範囲、ゴースト像光の入射範囲は赤楕円範囲である。前後方向で直進透過／拡散透過を制御するためには、ルーバー延伸方向を  $\phi=0^\circ$  方向に配置する必要があり、5°傾斜ルーバーADF140 $\mu\text{m}$  の拡散領域は青長方形範囲で表される。図から三次元的に考えても、空中像光は拡散角度領域外であり直進透過、ゴースト像光は拡散角度領域内であり拡散透過することわかる。

4. ADF を用いた空中像ディスプレイ

再帰性透過素子の裏面（非観察者側）の右半分に 5°傾斜 140 $\mu\text{m}$ ADF を貼付した観察画像を図 7 に示す。図から、ADF を貼付することで効果的にゴースト像を拡散させ目立たなくすることができ、視認性の向上が可能であること



図 7: ADF を用いた空中像ディスプレイ

表 2: 空中像光とゴースト像光の入射角度

	ゴースト対策なし	ADF貼付	視野角制御フィルム貼付
白輝度 [cd/m <sup>2</sup> ]	19.02	12.44	6.43
黒輝度 [cd/m <sup>2</sup> ]	0.33	0.29	0.17
コントラスト	57.64	42.90	37.82

がわかる。

また空中像の明るさを確認するため、全白、および全黒画面での輝度測定をおこなった（200lx 環境下）。比較のため ADF を貼付しない状態（ゴースト対策なし）、と再帰性透過素子には何も貼付せずディスプレイに視野角制御フィルム（3M 社製 PF12 1WH2）を貼付した状態（視野角制御フィルム貼付）の 3 つを比較した。結果を表 2 に示す。表から、ADF 貼付は視野角制御フィルム貼付に比べ明るさを損なわないことがわかる。これにより、空中像ディスプレイシステムに合った ADF を用いることで、明るさを保ちつつ、ゴースト像の低減が可能であることが確認された。

5. 結論

再帰性透過素子を用いた空中像ディスプレイにおいて、空中像光、およびゴースト像光の再帰性透過素子への入射角度の違いを利用し、空中像光を直進透過させ、ゴースト像光を拡散透過させることにより、ゴースト像を低減可能な空中像ディスプレイを提案した。入射角度の違いを利用した吸収／透過の制御に比べ、空中像光の損失が低いため、明るさを保ちつつ、ゴースト像を低減させることが可能となる。

謝辞 株式会社アスカネット大坪誠氏には、空中像ディスプレイの作製、評価に関して適切なアドバイスをいただきました。多大なご尽力に感謝し、厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 山本紘暉, 梶田創, 小泉直也, 苗村健: Enchan Table: テーブル面の反射を用いた直立空中像ディスプレイ, TVRSJ Vol.21, No.3, pp. 401-410, 2016.
- [2] Shunji Kiuchi, Naoya Koizumi: Simulating the appearance of mid-air imaging with micro-mirror array plates, Computers & Graphics, Vol. 96, pp. 14--23, 2021.
- [3] Mizuki Takenawa, Tomoyo Kikuchi, Yuchi Yahagi, Shogo Fukushima, and Takeshi Naemura: ReQTable: Square tabletop display that provides dual-sided mid-air images to each of four users. In ACM SIGGRAPH 2022 Emerging Technologies, Article 8, 1-2, 2022.
- [4] Baku Katagiri, Kentaro Kusama, Tomoo Orui and Satoru Shoshi: Ellipsoidal Light Diffusing Film by Controlling Collimation Angle of UV Irradiation, RadTech Japan, News Letter International Edition, Vol.13 pp.10-13, 2012