



再帰反射による空中結像 (AIRR) への凸レンズ導入による 解像度の向上

滝山和晃¹⁾²⁾, 岩根透¹⁾, 陶山史朗¹⁾, 山本裕紹¹⁾

1) 宇都宮大学 (〒321-0904 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2, hirotsugu@yamamotolab.science)

2) 学振特別研究員 (〒321-0904 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2, k_takiyama@yamamotolab.science)

概要: 本研究では再帰反射を用いた空中結像 (AIRR) にレンズを組み合わせることで高解像度の空中結像を実現する。AIRR は再帰反射素子での回折と光線シフトにより、解像度が低下する課題がある。提案光学系ではレンズを光源の映像が再帰反射素子で拡大結像するように配置することで回折と光線シフトを解消する。レンズを通る光は再帰反射前後で光路が重なる時間反転光学系のため収差の影響を受けない。コントラスト伝達関数 (CTF) の測定結果から従来の AIRR と比較して大きく解像度が向上し、44lppi のフラットパネルディスプレイと同等の解像度を空中結像できることを定量的に示した。

キーワード: 空中ディスプレイ, AIRR, 高解像度, CTF

1. はじめに

ポストコロナ時代において、情報ディスプレイ、ユーザーインターフェースにも新たな価値が重要視されている。空中ディスプレイはパッシブ光学素子を用いて、広い範囲から光を集めることで特殊なハードウェアの装着を必要とすることなく視認可能な映像を空中に結像することから、物理的な接触がない非接触型のユーザーインターフェースとして注目を集めている。再帰反射による空中結像 (AIRR: aerial imaging by retro-reflection) [1], 2 面コーナーリフレクタアレイ (DCRA: dihedral corner reflector array) [2] など複数方式の空中結像手法が提案されており、国際競争力の確保のために国際電気標準会議 (IEC: international electrotechnical commission) において空中ディスプレイの国際標準化も進められている [3]。

多くの情報量、精細で高い臨場感を有する映像の表示や使用される用途においてディスプレイの解像度は需要となる。しかしながら、空中ディスプレイの解像度は通常のディスプレイと比較して大きく低下する [4]。これはパッシブ光学素子を用いることによる、光線のシフトと回折の影響である。光線シフトの影響は光学素子の開口サイズが大きくなるほど大きくなり、回折の影響は開口サイズが小さくなるほど大きくなる。そのため、この 2 つはトレードオフの関係にあり、光学素子の改良には限界があるため、空中ディスプレイの解像度向上は困難となる。

私たちはこれまで AIRR 光学系に 2 つのボールレンズを共役位置に配置することで、光線シフトの影響をレンズによって打ち消すことで高解像度の空中像を形成する手法

を提案した [5]。さらにボールレンズ 1 つのみを AIRR 光学系に組み合わせて、光学設計の難易度を下げながら、高解像度の空中像を形成することにも成功した [6]。しかしながら、これらの手法は光線シフトの影響のみを考慮しているため、回折の影響を解消することはできていない。そのため、最新のスマートフォンなどの細かいピッチをもつディスプレイの解像度を空中像で再現することは難しい。

本研究の目的は AIRR 光学系において光線シフトと回折両方の影響を低減し、高解像度の空中像を形成する光学系を提案し、解像度の測定実験を行うことで提案光学系の有効性を明らかにすることである。光源、ビームスプリッター、再帰反射素子、両凸レンズから構成される提案光学系を構築し、提案光学系の解像度をコントラスト伝達関数 (CTF: contrast transfer function) 測定法 [7] を用いて定量的に評価する。

2. 原理

2.1 AIRR の原理

AIRR の原理を以下の図 1 に示す。AIRR は光源、ビームスプリッター、再帰反射素子から構成される。光源から出射された光はビームスプリッターで反射され再帰反射素子に入射する。再帰反射素子に入射した光は再帰反射され再びビームスプリッターに入射する。ビームスプリッターにて反射された光は光路を逆向きにたどり光源に戻る。一方でビームスプリッターを透過した光は、光源の面対称の位置に空中像を形成する。

AIRR の解像度は再帰反射素子内のプリズム開口部での

光線シフトと回折広がりの影響で光源の映像と比較して大きく低下する。

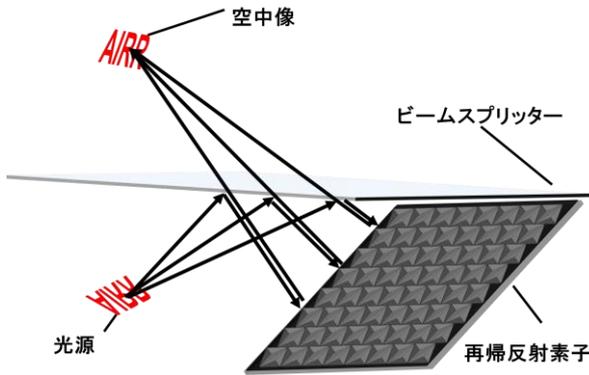


図 1: 従来の AIRR の原理

2.2 提案光学系の原理

提案光学系の原理図を図 2 に示す。提案光学系は光源、ビームスプリッター、レンズ、再帰反射素子から構成される。光源から出射された光はビームスプリッターによって反射光と透過光に分割される。反射された光はレンズによって再帰反射素子の位置で拡大結像され、再帰反射素子で同じ光路を辿るように再帰反射される。再びレンズに入射した光はレンズによって集光され、ビームスプリッターを透過後に光源と面対称の位置に空中像を形成する。

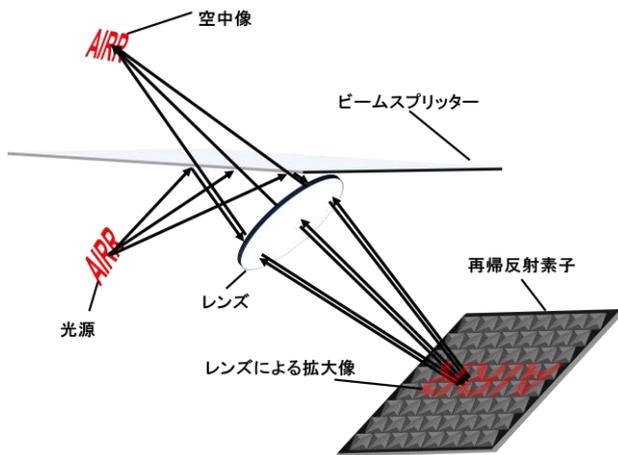
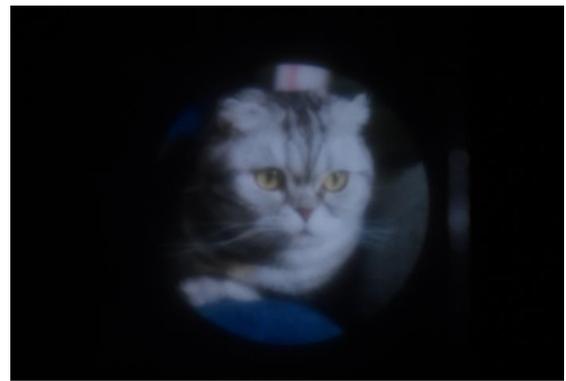


図 2: 提案光学系の原理

2.3 空中像の高解像度化

提案光学系では AIRR の解像度低下の要因である再帰反射素子での光線シフトと回折の影響が低減されるため、従来の AIRR と比較して大きく解像度を向上させることが可能となる。図 3 に空中像の比較画像を示す。従来の AIRR と比較して提案光学系では解像度が大きく向上していることが確認できる。



(a) 従来の AIRR



(b) 提案光学系

図 3: 従来 AIRR と提案光学系による空中像の比較

提案光学系による光線シフトの影響を低減する原理を図 4 に示す。光源に使用するディスプレイのサブピクセルと再帰反射素子の開口サイズの元々のサイズを図 4 (a) とすると、レンズによって再帰反射素子の位置で拡大結像された場合には図 4 (b) のように光源ディスプレイのサブピクセルは元々のサイズより大きくなる。再帰反射され再度レンズに入射した光は縮小結像され、空中像を形成するため、空中像の位置では図 4 (c) のように光源ディスプレイのサブピクセルと再帰反射素子の開口サイズの大きさの比は図 4 (a) の元々のサイズと比較して小さく見なせるため、光線のシフトの影響が低減される

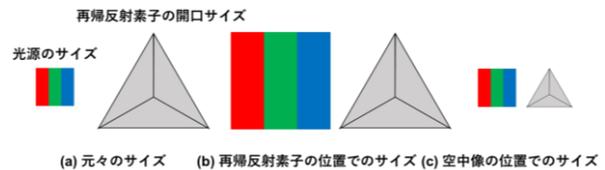


図 4: 提案光学系による光線シフトの低減

提案光学系による回折の影響を低減する原理を図 5 に示す。光源と再帰反射素子、再帰素子から空中像はレンズにおける結像位置に配置されている。そのため、レンズ面での振幅分布が再帰反射素子での出射部の振幅分布の完全なフーリエ変換となり、像面と振幅分布が等しくなるため、再帰反射素子での回折の影響を受けない。

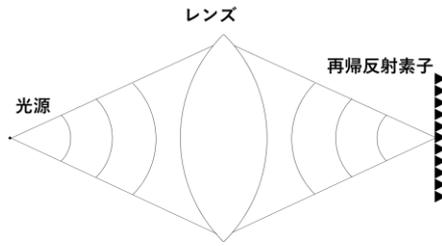
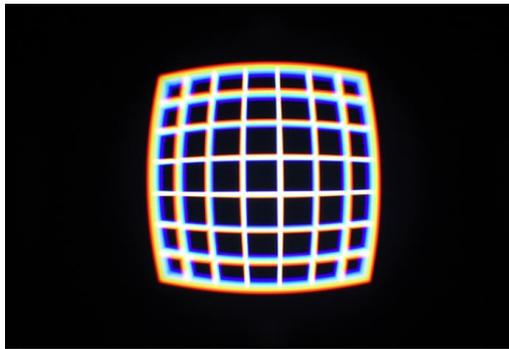


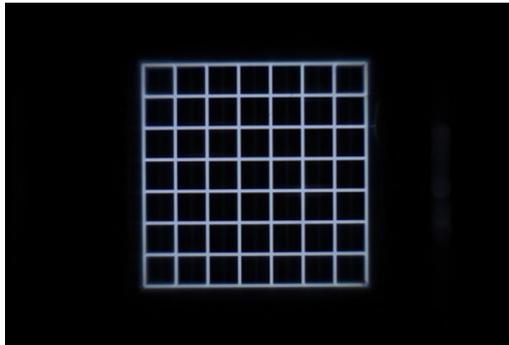
図 5: 提案光学系による回折の低減

2.4 時間反転光学系による無収差結像

通常、両凸レンズを用いて結像する場合には図 6 (a)のように収差によって像に歪みが生じる。提案光学系では、ビームスプリッターと再帰反射素子の間にレンズを配置することで、再帰反射の前後で光路が重なるため疑似的な共役系（時間反転光学系）となる。そのため、提案光学系では図 6 (b)のようにレンズの持つ収差が打ち消されることで無収差での空中結像が可能となる。



(a) 両凸レンズによる空中像



(b) 提案光学系による空中像

図 6: 提案光学系による無収差結像

3. CTF 測定実験

3.1 実験光学系

実験で用いた光学系を図 7 に示す。光源ディスプレイにはフラットパネルディスプレイ（Blackmagic design : Blackmagic Video Assist 5” 12G HDR : 441 ppi）、ビームスプリッターにはハーフミラー、再帰反射素子にはプリズムタイプの再帰反射素子（日本カーバイド工業：RF-Ax）、レンズには焦点距離 $f=200\text{ mm}$ の両凸レンズを使用した。空中像の撮影にはイメージング輝度計（Radiant Vision Systems: ProMetric Y-29）に焦点距離 100 mm のレンズ

（Canon: EF100mm F2.8L マクロ IS USM）を使用した。CTF の測定値においてディスプレイ計測の国際委員会（ICDM: International Committee for Display Metrology）では pixel ratio（ディスプレイと LMD のピクセル比）10 以上を推奨している。本研究では実験を通して、空中像から LMD までの距離である working distance を pixel ratio が 10.6 となるように配置した。光源からビームスプリッターまでの距離であり空中像が浮き上がる距離である浮遊距離は $z=150\text{ mm}$ 、ビームスプリッターからレンズまでの距離は $y=100\text{ mm}$ に設定した。ここでレンズから再帰反射素子までの距離 x は以下の式 (1)より算出される。

$$x = \frac{(z+z)f}{(y+z)-f} \tag{1}$$

よって式(1)より本研究では $x=1000\text{ mm}$ に設定した。光源の映像の再帰反射素子面での拡大倍率 β は式(2)から、

$$\beta = \frac{x}{y+z} \tag{2}$$

$\beta=4$ 倍となるため、空中像の形成位置での再帰反射素子の開口比 α は式(3)から、

$$\alpha = \frac{1}{\beta} \tag{3}$$

$\alpha=1/4$ 倍となる。

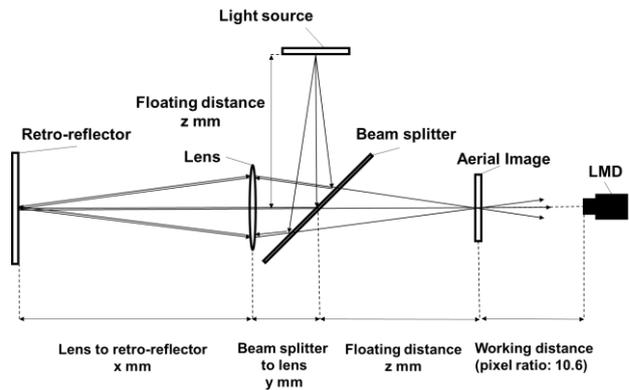


図 7: 実験光学系

実験では光源ディスプレイに空間周波数がそれぞれ 8.62, 4.31, 2.87, 2.16, 1.72, 1.43, 1.08, 0.51 (lp/mm) のテストチャートを表示し、イメージング輝度計で空中像の輝度を測定する。測定した空中像の各空間周波数 ν において、最大輝度 $I_{max}(\nu)$ および最小輝度 $I_{min}(\nu)$ から空間周波数 ν のコントラスト $C(\nu)$ を式(4)より導出する。その後、CTF(ν)を各空間周波数で得られたコントラスト $C(\nu)$ を $C(0)$ で正規化することで導出する。

$$C(\nu) = \frac{I_{max}(\nu)-I_{min}(\nu)}{I_{max}(\nu)+I_{min}(\nu)} \tag{4}$$

$$CTF(\nu) = \frac{C(\nu)}{C(0)} \tag{5}$$

3.2 実験結果

測定したテストチャートの例(1.43 lp/mm)を図8に示す。空中像から従来のAIRRと比較して提案光学系では解像度が大幅に向上していることが確認できる。

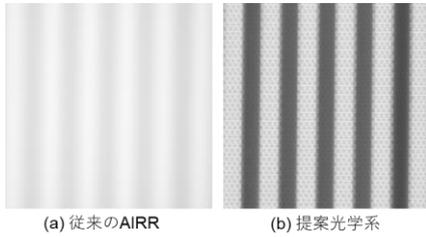


図8: 1.43 lp/mmの空中像

導出したCTFを図9に示す。ICDMでは詳細な画像や文字を表示するにはCTF50%をディスプレイの解像度の定義としている[8]。従来のAIRRでは1.08 lp/mmでCTFの値が50%を下回っているのに対して、提案光学系では今回表示した最大の空間周波数8.62 lp/mmでもCTFの値が50%以上となった。これにより提案光学系での解像度向上が定量的に示された。

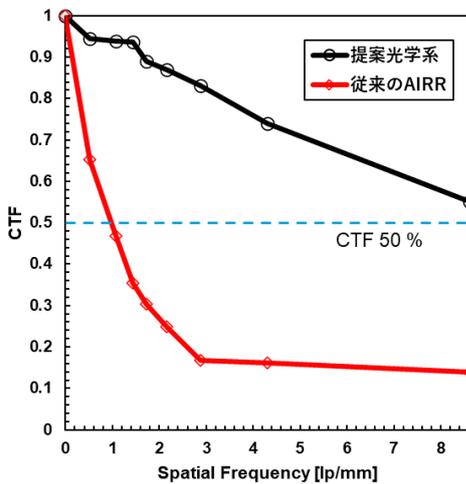


図9: 導出したCTF

4. 考察

実験結果から従来のAIRRと比較して提案光学系で大幅に解像度が向上することを確認した。今回表示した最大の空間周波数8.62 lp/mmは441 ppiのディスプレイで表示可能な最大の空間周波数テストパターンであり、CTFの値が50%を超えているため提案光学系は441 ppiのフラットパネルディスプレイと同等の解像度を表示可能であると言える。この解像度は最新のスマートフォンとほぼ同等であるが、空中インターフェースとして使用する場合には視距離が離れるためこの解像度は過剰であると考えられる。そのため、提案光学系ではレンズの結像性能を下げたプラスチックレンズやフレネルレンズを用いることで安価かつ大型化が可能となると考えられる。

今回の実験ではレンズの結像倍率を4倍としたため、レンズから再帰反射素子までの距離が1000 mmとなり光学系が非常に大きくなっているため、光学系の小型化のために、結像倍率を下げる必要がある。提案光学系は再帰反射

素子の回折の影響を受けないため、再帰反射素子の開口サイズが小さいものを使用することで結像倍率を考えるとなく高解像度の空中像を形成できると考えられる。

5. むすび

本研究ではAIRR光学系に凸レンズを導入することで、光線シフトと回折両方の影響を低減し、高解像度の空中像を形成する光学系を提案し、提案光学系の解像度をCTFの測定実験によって明らかにした。提案光学系は収差のない空中像を形成可能であり、従来のAIRRと比較して大きく解像度が向上し、441 ppiのフラットパネルディスプレイと同等の解像度を表示可能であることが分かった。

これによって空中ディスプレイにおける解像度が低いという課題が解決され、新たな空中ユーザーインターフェースなどさらなる応用が期待できる。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 20H05702, 24KJ0518 及び JST 未来社会創造事業 JPMJMI24H1 の支援を受けたものである。

参考文献

- [1] H. Yamamoto, Y. Tomiyama, and S. Suyama, "Floating aerial LED signage based on aerial imaging by retro-reflection (AIRR)," *Opt. Express* 22, 26919–26924 (2014).
- [2] S. Maekawa, K. Nitta, and O. Matoba, "Transmissive optical imaging device with micromirror array." *SPIE* 6392, 130-137 (2006).
- [3] B. Javidi, A. Carnicer, J. Arai, T. Fujii, H. Hua, H. Liao, M. Martínez-Corral, F. Pla, A. Stern, L. Waller, Q. Wang, G. Wetzstein, M. Yamaguchi, H. Yamamoto: "Roadmap on 3D integral imaging: sensing, processing, and display," *Opt. Express* 28, pp. 32266-32293 (2020)
- [4] K. Takiyama, M. Yasugi, S. Suyama, K. Masaoka, and H. Yamamoto, "Line-Based Modulation Transfer Function Measurement of Aerial Display by Use of Arrayed Optical Elements," *SID Display Week 2023 Digest*, 10-2 (2023).
- [5] N. Kawagishi, K. Onuki, and H. Yamamoto, "Comparison of divergence angle of retro-reflectors and sharpness with aerial imaging by retro-reflection (AIRR)," *IEICE Trans. Electron.*, vol. E100, pp. 958–964 (2017).
- [6] K. Takiyama, S. Suyama, K. Masaoka, and H. Yamamoto, "High-Resolution Aerial Image by Placing a Ball Lens at a Virtually Conjugate Position in AIRR Optical System," *Proc. IDW'23*, pp. 361-364 (2023).
- [7] K. Takiyama, M. Yasugi, S. Suyama, K. Masaoka, and H. Yamamoto, "Line-Based Modulation Transfer Function Measurement of Aerial Display by Use of Arrayed Optical Elements," *SID Display Week 2023 Digest*, 10-2 (2023).
- [8] International Committee for Display Metrology (ICDM). *Information Display Measurements Standard (IDMS)*, version 1.2, (2023).