



# 再帰性反射光の広がりによる空中結像を利用した ディスプレイ空間拡張手法

Display Space Expansion Method using Aerial Imaging based on Expansion of Retroreflective Light

早川智彦<sup>1)</sup>, 柯毓珊<sup>1)</sup>, 石川正俊<sup>1)</sup>

Tomohiko HAYAKAWA, Yushan KE, and Masatoshi ISHIKAWA

1) 東京大学 情報基盤センター (〒 113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1, hayakawa@ds.itc.u-tokyo.ac.jp)

**概要:** 本研究では, 再帰性反射材に対する点光源の反射光が広がりを持つことを利用し, スマートフォン等の 2 次元ディスプレイの背面に LED 光源を並べることで空中像を生じさせ, 再帰性反射材上におけるディスプレイの空間拡張手法を提案する. LED 光源と再帰性反射材間の距離及び LED 光源の角度をパラメータとした実験を行い, 150 度で最も大きく空中像を生じさせることが可能だとわかった. その知見を利用し, スマートフォンでも空中像が生じさせ, ディスプレイ空間の外側での情報提示を実現した. 今後の応用として, 交通案内やエンターテイメント表現等への活用が期待される.

**キーワード:** 再帰性反射光, 空中結像, ディスプレイ空間拡張, 間接照明

## 1. はじめに

テレビやスマートフォン等の二次元映像情報提示デバイスにおいて, 限られたディスプレイ領域での効率的な情報提示方法は, 装置のサイズと提示情報量とのトレードオフを打破するために重要な課題である. 例えば, Sejin らはベゼル部を光ファイバーガイドで覆うことで, ベゼルレスの映像表現を実現するだけでなく, 側方部への情報提示をも可能とした [1]. 他にも, スマートフォンのメーカー各社はベゼルレスを特徴とした製品を投入している.

これに対し, スマートフォン元来のディスプレイ領域に限らず, 周辺機器を活用してディスプレイ領域を「拡張」することで提示情報量及びユーザビリティを向上させる試みとして, 松下らのシースルー型 HMD にディスプレイの拡張部を仮想的に提示する手法 [2] や, Urushiyama らの周囲に存在する別のディスプレイに拡張部を提示する手法 [3] が挙げられる. また, Sang らはレンズアレイを利用した三次元ディスプレイを実現しており [4], 三次元空間中での任意情報提示だけでなく, この空間中でスマートフォンを把持することで, ディスプレイ領域の拡張表現も可能になると考えられる. しかしながら, いずれの手法でも別途映像提示装置が必要となるだけでなく, 松下ら及び Sang らの手法では, 身体や把持デバイスの位置を認識する必要があり, 装置構成として簡素化の余地がある.

本研究では, スマートフォンにおける情報提示手法の制約解消を目指し, 図 1 のように, スマートフォン単体に装着可能でディスプレイ領域を拡張可能な手法として, 再帰性反射光の広がりによる点光源周囲の空中結像を利用した情報提示手法を提案する. そのために, 再帰性反射材と LED 光源間の距離や角度による空中像への影響を調査し, 最適

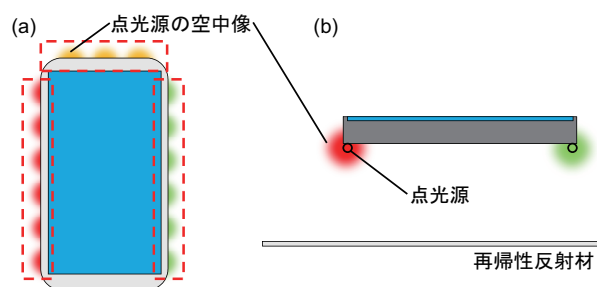


図 1: (a) 再帰性反射光の広がりによる点光源の空中結像により, ディスプレイ空間を拡張されたスマートフォンの模式図 (赤い点線部は, 点光源の空中結像によって拡張されたディスプレイ表示領域を表す). (b) (a) の断面図を表し, 再帰性反射材によって点光源が立体的に空中結像していることが示されている.

な条件を明らかにしていく. また, 二次元空間に留まらず, 立体的に情報提示可能な手法であり目立つことから, 再帰性反射材を敷設可能な空間における行き先案内やエンターテイメントでの応用や, 照明装置としての活用が今後期待される.

## 2. 再帰性反射光の広がりによる空中結像

再帰性反射材は図 2(a) のガラスマイクロビーズやコーナーキューブ等によって実現され, 入射光の方向に光を反射させることから, 道路標識や安全ベスト等に用いられている. しかしながら, 図 2(a) のように, 完全に入射方向に戻る再帰性反射では, 反射光は光源に戻ってしまい, 人が観察できなくなる. そのため, 用途に応じて光源の周りである程度拡散反射するように設計されている. 特にガラスマ

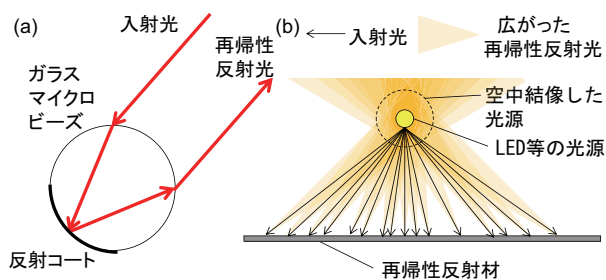


図 2: (a) ガラスマイクロビーズにおいて入射光が再帰性反射する様子, (b) 点光源の入射光が再帰性反射材によって広がりを持って反射をすることで, 点光源が空中結像する様子 (図中では再帰性反射光の減衰の表現は省略).

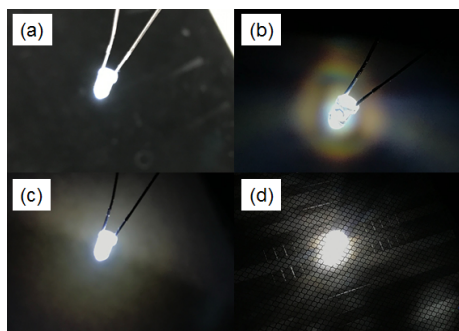


図 3: (a) 黒い背景の上で下方向に向けた白色 LED を点灯させた様子, (b) 再帰性反射材 (Mipox 社 Ref-lite 9301) の上で下方向に向けた白色 LED を点灯させた様子, (c) 再帰性反射材 (トラスコ中山社 HS4522F-W) の上で下方向に向けた白色 LED を点灯させた様子, (d) 再帰性反射材 (トラスコ中山社 HS-4522P-W) の上で下方向に向けた白色 LED を点灯させた様子.

マイクロビーズの再帰性反射材では, 球面収差や焦点層の厚みの不完全性等により, 反射光の経路がばらまき, 再帰性反射光には広がる. そのため, 再帰性反射材に対して点光源を一定距離を置いて設置する場合は, 各再帰性反射光が重なり合うことで図 2(b) 及び図 3(b)-(d) のように空中結像が生じる. 元々の LED のサイズを表す図 3(a) と比べると, 図 3(b)-(d) には LED の周囲が光で包まれ, 点光源のサイズが拡張されて見えることがわかる. また, 定性的には図 3(b) の Mipox 社 Ref-lite における空中像が一番輪郭がはっきりし, 球形となっていることから, 視認性の観点で以降の実験で主としてこの再帰性反射材を用いるものとする.

なお, 再帰性反射材による空中結像を利用した映像提示手法として, 山本らの研究も挙げられるが [5], ハーフミラーやビームスプリッターを用いて, それらから見て線対称の位置に存在するディスプレイの映像を提示しているのに対し, 本研究では光源自体の周囲に空中結像を生じさせる点, さらに二次元映像を提示するため点光源が一箇所で結像することを理想とする点などにおいて目的や手法が異なる.

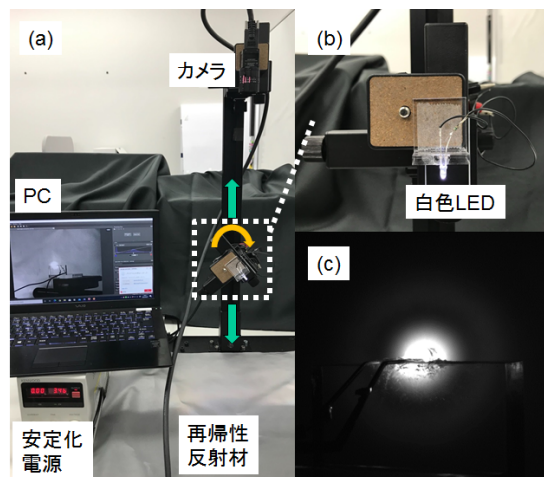


図 4: (a) 実験装置の全体像, (b) 稼働ユニット部のみのズーム画像, (c) Ref-lite 9301 で角度 150 度, 距離 414mm にて撮像した様子.

### 3. 実験: 再帰性反射材・点光源間の距離と角度の影響

2. 章において, これまで再帰性反射光の広がりによって空中像が生じることを定性的に述べたが, スマートフォンに手法を実装するためには, 一定条件に沿った定量的な比較が必要となる. そこで, 本章では図 3(b) に使用した再帰性反射材を用い, LED と再帰性反射材間の距離及び LED の角度を変更し比較することで, 空中結像への影響を検討した.

#### 3.1 実験条件

実験には, 図 4(a) 及び (b) のように, 点光源として白色 LED (日亜化学工業社 NSPW300DS, 指向角 20 度, 光度 12.9cd), カメラ (Ximea 社 MQ013MG-ON, 露光時間 100ms, 解像度 1254\*1016 ピクセル), レンズ (Edmund Optics 社 59870, C マウント, 焦点距離 16mm, F1.4), 再帰性反射材 (Mipox 社 Ref-lite 9301, ガラスビーズ) からなるシステムを用いた. また, 図 4(b) の稼働ユニット部を高さ方向に 6 段階 (稼働ユニット下部から再帰性反射材までの距離はそれぞれ 414mm, 364mm, 314mm, 264, 21.4, 16.4mm), 回転方向に 7 段階設定し (LED の上方向を 0 度とし, 反時計回りの回転を正方向とし, 0 度から 180 度まで), 画像撮影を行った. 撮影画像の一例として図 4(c) は距離 414mm, 角度 150 度の条件で撮像された.

#### 3.2 実験結果

撮像された画像を各条件で分布させた結果, 図 5 が得られた. このとき, 0 度の条件では LED が直接カメラの方を向いていることから, CMOS カメラにおけるブルーミングによって明るく撮影された結果, 白飛びが発生したものと考えられる. 実際に肉眼で確認すると, 空中像は発生していなかった. また, 180 度の条件では空中像は発生しているものの, 再帰性反射材の正面を向いた LED の光が再帰性反射材表面で拡散反射を起こした結果, 広い範囲で白飛びした画像が得られた. そのため, 0 度と 180 度の条件は除外して解析を行った.

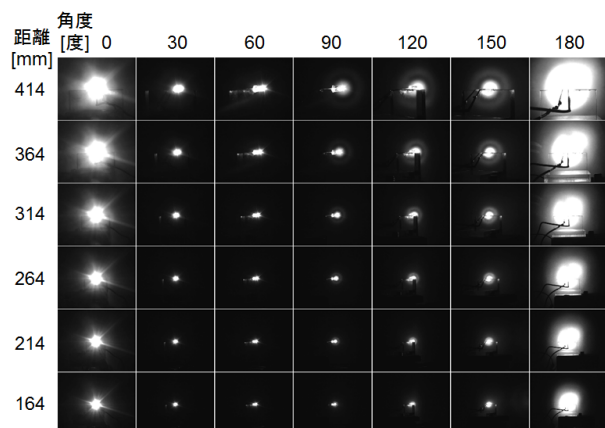


図 5: 距離と角度の条件毎に撮像結果を分布させた様子。

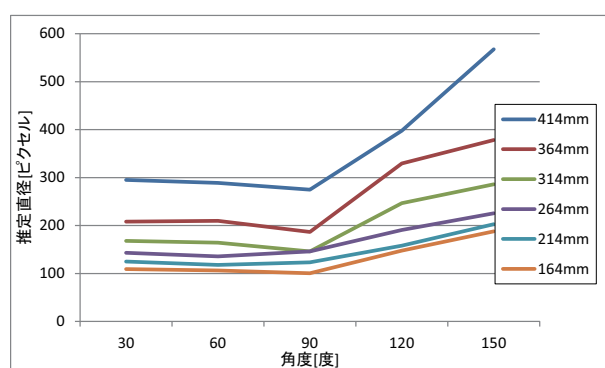


図 6: 画像処理のしきい値を輝度値 20 にして距離及び角度毎に空中像の直径を推定した結果。

図 6 にしきい値として輝度値 20 以上のピクセル数の平方根を取った値を縦軸に取るグラフを示す。空中像が球状だと推定すると、この値が空中像の直径を表すと考えられる。その結果、LED の設置角度 150 度、かつ再帰性反射材と LED の距離が 414mm の状況において最も空中像が大きくなることがわかった。また、30 度から 90 度まではほぼ変化がないことから、これらの角度において空中像は発生しておらず、LED そのものの直径を表しているものと考えられる。このとき、LED の直径は距離に応じて異なるピクセル値として計測されるため、各距離に応じて大小が見られた。

一方、しきい値を輝度値 255 にして直径を推定したグラフを図 7 に示す。この図では先程と異なり、150 度が最も大きな空中像を生じると判断できない結果が得られた。これは、輝度値の条件を厳しくすることにより、一定以上の明るさを持つ空中像のみ検出しているためと考えられる。このことにより、空中像の大きさと明るさには一定のトレードオフが存在することがわかった。

#### 4. スマートフォンへの実装 (プロトタイプ)

以上の結果より、空中像をより大きく表示するためには角度 150 度にし、距離 414mm が最適な条件だとわかったため、スマートフォンに LED をアレイ状に 8 個、150 度付近の取付角となるように設置し、再帰性反射材 Mipox 社 Ref-lite 9301 から 441mm 程度離してかざしたところ、図

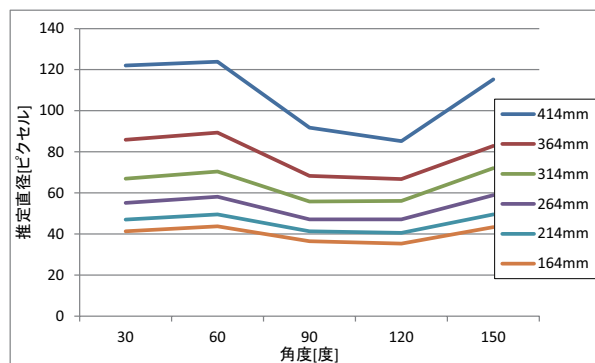


図 7: 画像処理のしきい値を輝度値 255 にして距離及び角度毎に空中像の直径を推定した結果。

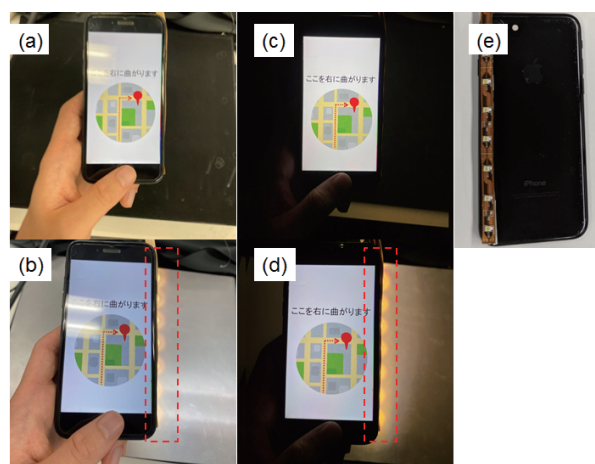


図 8: スマートフォン (Apple 社 iPhone 7) に LED を貼り付け、ガイドアプリに合わせて空中像を発生させた様子。(a) 再帰性反射材無し・部屋の照明あり, (b) 再帰性反射材あり・部屋の照明あり, (c) 再帰性反射材無し・部屋の照明無し, (d) 再帰性反射材あり・部屋の照明無し, (e) 背面に LED アレイを貼り付けたスマートフォン,

8 が得られた。この図に示すように、行き先案内の画面と連動してガイドとして活用することで、誘導効果が上昇することが期待される。

#### 5. 考察

実験により、空中像の明るさと大きさにはトレードオフが存在することがわかったため、特に大きさは空間分解能にも直結し、大きい場合には空間分解能の低下も招いてしまうことから、利用する用途に応じて最適解を検討する必要があると考えられる。その際、人間の見え方を測定するため心理物理実験を行うことも有効である。また、今回の実験では明るさはカメラの輝度値で代替し、空中像のサイズはピクセル値で計算を行ったため、正確な検討を実施するためには輝度計や定規等の物理パラメータを算出することが望ましい。それだけでなく、実験条件として再帰性反射材と LED の距離については、164mm より小さい範囲と 414mm より大きい範囲で計測していないため、応用用途に応じて距離を設定し、同様の計測を行う必要がある。

本手法では再帰性反射材の利用が必須であるため、再帰性反射材を敷設可能な場所でのみ有効である。そのため、入り組んだ屋内空間やエンターテインメント興業会場等、本手法が有効な場面を検討する必要がある。同時に、応用範囲を広げるため、今回用いた LED の個数や列を増やすことで、二次元ディスプレイとして拡張を可能とすることが重要であると考えられるため、取り組んでいく方針である。一方、予め再帰性反射材を設置可能な条件として、照明装置への応用が有効であると考えられる。本手法は照明を見る角度や距離に応じて、見え方が変わるコンテンツを作り出すことも可能だといえるため、今後応用を検討する予定である。空中結像自体、光源の二次的な存在であり、既に新たな間接照明手法を提案することができたと考えられる。

## 6. むすび

本研究は、従来映像表現用途としては敬遠される再帰性反射光の広がりによって生じる空中結像を利用し、ディスプレイ空間を拡張する手法を提案した。実験の結果、LED を用いる場合は角度 150 度でスマートフォンの背面に設置することがわかっただけでなく、空中像の大きさと明るさにはトレードオフがあることもわかった。本手法はモバイル端末等、ディスプレイのサイズと情報量でトレードオフが存在する場合に有効であり、ユーザビリティの向上に寄与可能であると考えられる。また、今後はスマートフォンにおける案内アプリと連動した情報提示や、照明装置への応用等が期待される。

## 参考文献

- [1] Sejin Lee, Jeongmin Moon, SeungSoo Yang, Jussang Rhim, Bora Kim, YongSeok Lee, SeungJun Han, SooYoung Yoon, InByeong Kang : Development of Zero-bezel Display Utilizing a Waveguide Image Transformation Element, SID Symposium Digest of Technical Papers, Vol. 48, pp. 612–614, 2017.
- [2] 松下光範, 篠木良 : Off Screen: 枠認識に基づく表示領域の拡張, 研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI) , Vol. 2014-HCI-160, No. 24, pp. 1–8, 2014.
- [3] Yuta Urushiyama, Buntarou Shizuki, and Shin Takahashi : Preliminary Study of Screen Extension for Smartphone Using External Display, Symposium on Spatial User Interaction (SUI '19), pp. 29:1–29:2, 2019.
- [4] Xinzhu Sang, Xin Gao, Xunbo Yu, Shujun Xing, Yuanhang Li, and Yongle Wu : Interactive floating full-parallax digital three-dimensional light-field display based on wavefront recomposing, Opt. Express, Vol. 26, No. 7, pp. 8883–8889, 2018.
- [5] 山本 裕紹 : 再帰反射による空中結像 (AIRR) による空中ディスプレイ, 日本画像学会誌, Vol. 56, No. 4, pp. 341–351, 2017.