



光源を頭部上方に設置し垂直空中像を正面に表示する光学系

佐野文香¹⁾, 小泉直也^{1),2)}

1) 電気通信大学 (〒182-0035 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, {sano, koizumi.naoya}@media.lab.uec.ac.jp)

2) JST, さきがけ (〒332-0012 独立行政法人科学技術振興機構さきがけ川口市本町 4-1-8)

概要: 空中映像は複数人でみられるため裸眼複合現実感システムの実現において有効である。公共空間に光学系を設置する際、従来の設計では光学系が露出しているため、景観を悪化させる可能性がある。本論文では、頭上に光学系を設置することにより光学系を人から見えにくくし、人から見やすい垂直な空中像を正面に出すことができる光学設計を提案し、その視野範囲を設計した。輝度、解像度を評価し、提案手法に適した素材の選定を行った。

キーワード: 空中像, 公共空間, ディスプレイ

1. はじめに

空中像とは、光源からの光が反射・屈折し、空中に結像された実像のことであり、映像と実物体を同時に見ることが可能な情報提示手法である。空中像はヘッドマウントディスプレイを着用する必要がなく、一度に複数人で見ることができるため、裸眼複合現実感システムの実現において有効な手段である。

従来の空中像の光学設計では、光学系が露出した状態で設置されるため、像と同時に光学素子が見えてしまう。そのため、従来の設計のまま公共空間に設置した場合、光学素子により景観を悪化させる可能性がある。

本論文では、光源を頭上に設置し、光を複数回反射させることで、光学系を視界に入れることなく空中像を正面に表示することができる光学設計を提案する。提案システムにより結像された空中像の輝度、解像度を評価した。また、提案手法に適した素材の選定を行った。

2. 関連研究

2.1 空中像

本研究では、光源の光が反射や屈折をすることで結ばれた光の像を空中像とする。空中像は映像と実物体の両方を複数人が裸眼で同時に見ることが可能とした情報提示手法である。空中像を結像する手法として、Dihedral Corner Reflector Array (DCRA) [1], roof mirror array (RMA) [2], Aerial Imaging Plate (AIP) [3], Aerial Imaging by Retro-Reflection (AIRR) [4]などがある。本研究では簡単に入手

Ayaka SANO, and Naoya KOIZUMI



図 1 本システムで表示した空中像

することができる AIP を利用した。

AIP と反射素材を用いて結像させる空中像の研究としては EnchanTable[5] や SkyAnchor[6] などがある。EnchanTable はテーブル面の反射を使ってテーブル上に直立した空中像を表示することができるシステムである。視界制御フィルムを用いることでテーブルの奥に設置した光学系が見えない設計をした。また、実物体と空中像を同時に見ることが可能にした。しかし、視野範囲は斜め下向きに限定される。SkyAnchor は高速移動する実物体に対して空中像を固定表示する光学設計である。光源を搭載した台の上に実物体を載せて一緒に動かす。これにより、空中像を常に物体に隣接した位置に表示することが可能になった。また、物体の位置計測や光源の制御を行わずに時間的整合性を解決した。また、空中像の解像度により評価を行っている。

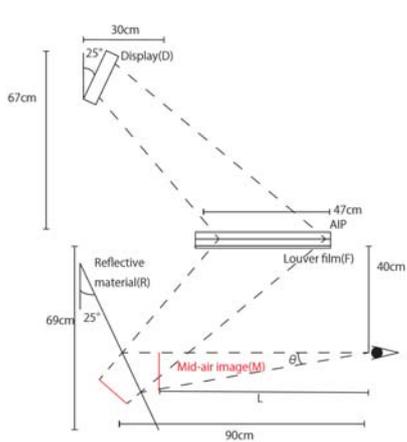


図 2 光学設計と可視範囲

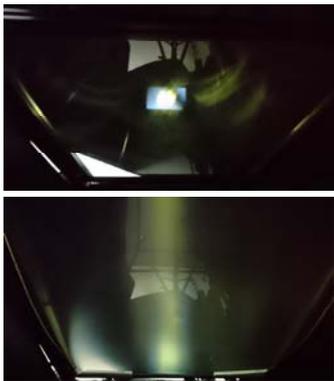


図 3 視界制御フィルムなし（上）とあり（下）

2.2 デジタルサイネージ

現在、デジタルサイネージを用いて様々な情報が発信されている。設置場所や時間帯によって変わるターゲットに向けて適切なコンテンツを配信することができるため次世代の広告媒体として注目を集めている。デジタルサイネージの市場規模は年々拡大しており、空間アートとして景観を向上させるために利用されることも増えた。また、2016年度の国内市場規模が前年度比 116.2%であることが分かった[7]。しかし、まだデジタルサイネージの有効的な利用方法についての研究が十分に行われていない。

パブリックディスプレイにおいて、ディスプレイの傾きにより人に与える影響は異なる。市野ら[8]の研究でディスプレイの角度が垂直に近い場合、離れたところからでもディスプレイのコンテンツを視認できることが明らかになっている。また、先人の背後に立ってディスプレイを一緒に見る人が多くいるという結果が出ている。これより、垂直な空中像を提示することで視認性が向上するだけでなく、周囲の人に影響を与えることができると考えられる。

3. 提案

3.1 目的

本研究では、公共空間に空中像の光学系を設置することを目的とする。そのために光源が視界に入らないような設計をし、視認性のよい空中像を正面に表示すること

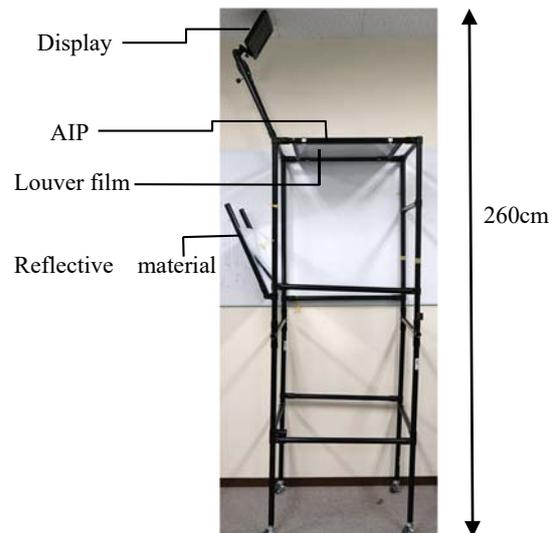


図 4 実装

を実現する。

3.2 設計方針

光学設計を決めるときに考慮すべき点が3点ある。まず光源とAIPを頭上に設置することである。これは、人から光源を見えないようにするためである。また、もし床面に設置した場合、光路が足により遮られてしまうため、頭上に設置することとした。次に、空中像を正面に出すことである。そうすることで自然に空中像を視界に入れることができる。最後に直立した状態で空中像を見られるように高い位置に空中像を表示することである。

3.3 光学設計

目的および設計方針を満たす提案システムを図2に示す。ディスプレイ(D)、反射板(R)、AIP、視界制御フィルム(F)からなる。

本光学系が正面に空中像が提示する手法は、Dから出た光がAIPを通過する。AIPを通過するとき光が反射・屈折し、Rで反射することにより空中像が結像する。

Fは頭上に設置したAIP、Dを見せない役割を果たす。本システムでは、奥方向に進む光線を拡散し、手前方向に進む光線を透過する特性を持つFを、AIPの下に設置する。図3に示すように、空中像を結像するための光を透過させ、必要のない光を遮蔽できる。ディスプレイの表面の偏光板をはがし、Rで反射した後はがした偏光板を設置する方法もある。しかし、この方法だとAIPを通過した光が偏光板を通り、Rで反射した後再び偏光板を通る設計になる。これにより輝度が減衰してしまうため本システムではFを用いる設計にした。

本システム全体の高さは260cmである。ディスプレイはAIPより67cm高いところに設置した。DとRは25°に傾けた。この結果、垂直な空中像は地面から147cm高いところに結像することができ、立ったまま空中像を正面に見ることを可能にした。空中像の大きさをM、視点位置から空中像までの距離をL、視野角を θ とする。視野角を求めるとは次の式を用いる。

$$\theta = \tan^{-1} \frac{M}{L} \quad (1)$$

3.4 可視範囲の設計

視野範囲を図 2 にまとめた。(1)より, R から 90cm 離れ, AIP から 40cm 低い位置に視点を合わせると 15cm の空中像が見えることが分かる。視点位置が遠くなるほど表示できる空中像の大きさ M が大きくなる。

3.5 実装

本システムを実装した様子を図 4 に示す。今回使用したディスプレイはサンテックス・ダイレクト製 1022YH (輝度: 1000cd/m², 1 pixel = 0.116mm) である。また, マイクロミラーアレイとして AIP を, 視界制御フィルムはリンテック製のウインコスビジョンコントロールフィルム Y-2555 を用いた。AIP に入り込む光は 40°~140°であり, 視界に入れたくない光は 40°~50°である。そこで, 25°~55°の光を拡散する Y-2555 を利用した。

4. 評価

4.1 輝度の評価

4.1.1 方法・手順

輝度計を用いて空中像の輝度を測定した。輝度計の高さは空中像の中央の高さと水平になるように設定した。R として用いた素材は 11 種類あり, 透明のアクリル板 (反射率 38%), 白のアクリル板 (反射率 5%), 黒のアクリル板 (反射率 5%), 鏡 (鏡面反射), ハーフミラー (反射率 50%), ホワイトボード (盤面: スチール), タッチディスプレイ, 高光沢タイプのスマートフォン用フィルム, ミラータイプのスマートフォン用フィルム, タイル, 化粧板である。2 種類のスマートフォン用フィルムはディスプレイに貼って測定を行った。

測定の条件を図 5 に示す。空中像の測定に用いた角度は $\theta = 0^\circ \sim 20^\circ$ であり 10°刻みである。30°以降だと空中像を見ることができなかつたため, 20°までとした。また, 求められた輝度から, 解像度の実験で用いる素材の選定を行った。

4.1.2 結果

実験の結果を図 6 に示す。反射率が一番高い鏡で結像したときの空中像の輝度が最も高く, 化粧板で結像した空中像の輝度が一番低い結果となった。

鏡, ハーフミラー, ミラータイプのスマートフォン用フィルムは他の素材と比較すると輝度が高い空中像を結像することが分かる。しかし, 反射率が高いため環境光を反射し, 光学機器が反射素材に映りこんでしまった。ユーザーに光学装置を見せないようにするため, 除外した。

この結果より, 0°のときの空中像の輝度が 10cd/m² 以上であることを条件とした。そして次の実験で用いる 3 種類の素材を選んだ。一つ目は透明のアクリル板である。窓などに用いられる透明な素材としてアクリル板を選択した。二つ目はタッチディスプレイである。今後, 本システムを

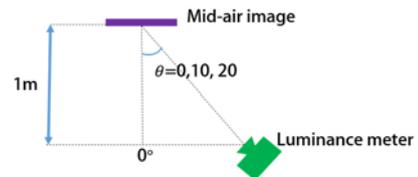


図 5 輝度測定の条件

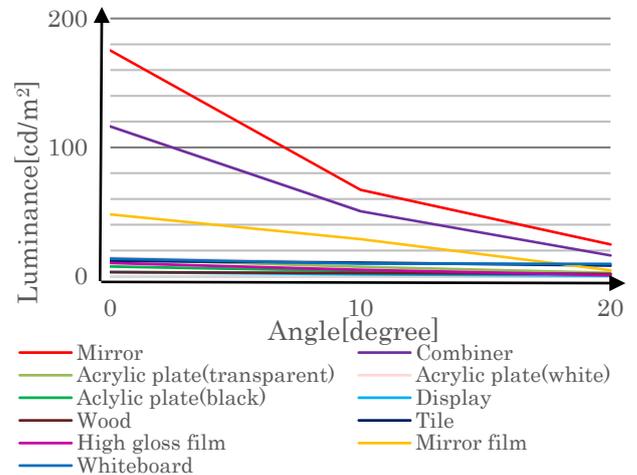


図 6 空中像の輝度

用いてアプリケーションを作成するとなったとき, タッチディスプレイを用いることでインタラクティブなコンテンツを作成できると考えたからである。三つ目はタイルである。タイルにより結像された空中像の輝度は高くないが, よく壁面で使われている素材であり, タイルと空中像を組み合わせることで意外性のあるコンテンツを作ることができると考えたため, 選択した。

4.2 解像度の評価

4.2.1 目的

空中像において, 輝度と同様に解像度が重要な要素である。素材の反射特性により空中像の解像度が異なる。そのため, 解像度を測定することにより視認性のよい空中像を結像する素材を求めた。

4.2.2 方法・手順

20 代の男女 8 人に実験の参加を依頼した。参加者の視力は両眼で 0.7, 片眼で 0.3 以上であることを条件とした。

空中像は図 7 のような黒と白の縞模様を表示した。黒線と白線の幅は 1:1 である。縞間隔を調整し, どの間隔まで縞模様が判別可能であるかによって, 解像度を測定した。

測定は 18 試行を行った。提示する空中像は 3 種類あり, 縦縞, 横縞, 斜め縞の模様である。空中像を結像する素材として 4.1.2 で選んだ 3 種類を利用した。以上を用いて極限法により実験を行った。上昇系列は 1pixel から 1pixel ごと増加していき, 下降系列は 75pixel から 1pixel ごと減少していくようにした。

実験の手順は以下のとおりである。実験中の様子を図 8 に示す。空中像から 90cm 離れたところに参加者の目を合わせるため, 顎の位置を固定した。各試行において, 参加



図 7 提示した空中像

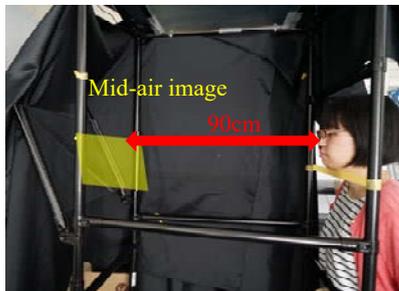


図 8 実験の様子

者に見える、見えないのどちらかを回答してもらった。測定順序はランダムに行った。

4.2.3 結果

測定結果を図 9 に示す。エラーバーは標準偏差を表す。グラフ中の数字は結果を視力変換した値である。タイルで結像した空中像の解像度が最も悪い結果となった。

5. 考察

4.2.3 より、透明なアクリル板とタッチディスプレイでは、視力換算すると 0.1 相当の解像度の空中像を結像することができる。よって、大きな文字や色の境目、物体の形を認識することができる。そのため、空中像で看板に文字や絵を表示することができる。一方で、タイルは視力換算すると 0.05 相当の解像度の空中像を結像する。線の太さが 5mm あれば認識することができる。よって、丸や三角などの単純な形や、デジタル時計のような数字と英語の表示が可能である。

本システムにおいて輝度の高い空中像を結像することができない。理由は 2 点ある。1 点目は、環境光を反射しないように、反射率が低い反射素材を選ぶ必要があるからである。2 点目は、ディスプレイの輝度が低いからである。高輝度のディスプレイを用いれば輝度の高い空中像を結像できる。しかし、現在販売されているディスプレイは輝度に限界がある。そのため、現状では屋外に設置することができない。

今後はタッチディスプレイを用いたインタラクティブなコンテンツを作成していきたいと考えている。

6. むすび

本論文では公共空間に設置するための空中像光学設計を提案した。光学素子を頭上に設置することで光学系を視界に入れず、空中像を正面に提示することができるようになった。提案手法の評価のため、空中像の輝度と解像度の

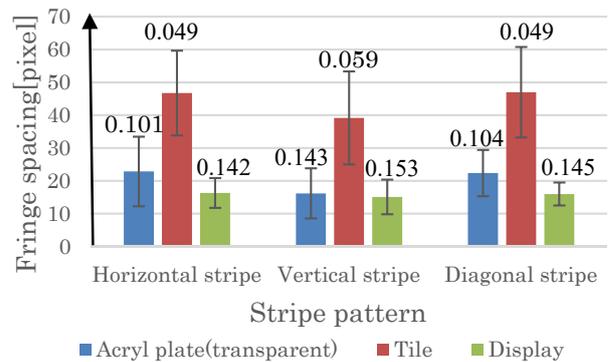


図 9 解像度の測定結果

測定を行った。実験の結果、タッチディスプレイと透明なアクリル板を用いたとき、視認性のよい空中像を結像することができた。

謝辞 本研究は、科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業(さきがけ, JPMJP16D5)によるものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] Satoshi Maekawa, Kouichi Nitta, Osamu Matoba: Transmissive Optical Imageing Device with Micromirror Array, Proc. SPIE, Vol. 6392, 63920E, 2006
- [2] Yuki Maeda, Daisuke Miyazaki, Satoshi Maekawa: Aerial Imaging Display Based on a Heterogeneous Imaging System Consisting of Roof Mirror Arrays, IEEE 3rd Global Conference on Consumer Electronics (GCCE), IEEE, pp.211-215, 2014
- [3] 株式会社アスカネット: 光学結像装置特開 2012-155345(P2012-155345S)
- [4] Yutaka Tokuda, Atsushi Hiyama, Michitaka Hirose, Hirosugu Yamamoto: R2D2 w/ AIRR: Real time & Real space Double-Layered Display with Aerial Imaging by Retro-Reflection, SA'15 Emerging Technologies, November 02 - 06, 2015, Kobe, Japan
- [5] 山本紘暉, 梶田創, 小泉直也, 苗村健: EnchanTable: 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, Mo.3, pp.401-410, 2016
- [6] Hajime Kajita, Naoya Koizumi, Takeshi Naemura: SkyAnchor: Optical Design for Anchoring Mid-air Images onto Physical Objects, UIST, pp.415-423, UIST, 2016
- [7] 株式会社矢野経済研究所: デジタルサイネージ使用に関する調査を実施(2017年), <http://www.yano.co.jp/press/pdf/1698.pdf>, 2017年6月6日
- [8] 市野順子, 磯田和夫, 上田哲也, 佐藤玲美: インタラクティブディスプレイの角度がソーシャルインタラクティブに与える影響: ミュージアムにおけるフィールドスタディ, 情報処理学会論文誌, Vol.56, No.4, pp.1162-1173, Apr. 2015