

# 研 究 報 告 書

## 環境光採光型空中像による行動誘発型情報提示の公共空間への展開

研究タイプ: 通常型

研究期間: 2016 年 12 月 ～ 2020 年 3 月

研 究 者: 小泉 直也

### 1. 研究のねらい

情報技術の発展に伴い、個々人が情報端末を携帯し、常に情報空間において人々がつながる時代になってきている。一方で情報の入手手段が個別化する中で情報の分断によって新しい問題が生まれている。そこで、公共空間における新しい情報提示手法として、皆が一緒に集まって見る情報技術のかたちを追求する。

本研究では、現実環境に情報空間を融合させる情報提示技術として、環境採光型の空中像光学系技術を提案する。実環境には人やモビリティなど様々な動く物体が存在している。そういった実物と映像情報を合わせて提示するには、映像提示手段と提示される映像とが空間的に離れることが必要となる。これを公共空間において、特殊な機器の装着なしに行うには、空中像提示の技術が適している。空中像とは光学的手法を用いて空間上に光を結像させる手法であり、様々な空中像光学系が提案されている。しかしいずれの手法も、光源からの光を反射し結像する過程で生じる輝度の減衰が課題となっており、実環境との情報環境の共存を実現できていない。そこで、環境の光を効率的に採光し、提示する手法を提案する。そのためには、おもに3つの研究を行う必要がある。第一に光学系の改善による視認性の向上である。第二に空中像の操作手法の開発である。第三に空中像による人の行動への影響の調査である。研究項目を下記に示す。

#### ■ 光学設計

主に採光設計と遮蔽設計を行う。採光設計とは、空中像を適切に表示するために十分に輝度を 高めることである。遮蔽設計とは、空中像光学装置そのものを見えないように適切に装置そのものを遮蔽し、公共空間にふさわしい審美性を目指す設計手法である。

#### ■ インタラクションデザイン

空中像の操作手法を設計する。空中像に対して最適な入力手法を検討する。

#### ■ 行動誘導

空中像を用いた行動誘導の効果を確認する。

### 2. 研究成果

#### (1) 概要

本研究では環境に調和した映像提示技術によって、新しい公共空間に調和する情報提示技術の構築として、環境光採光型空中像を提案し、その設計を進めた。

今回の成果として、従来の空中像より明るい像を表示することのできる技術(図1左)を実現した。これは空中像の光源として、太陽光などの環境の光を採光する手法であり、バックライトが不要なため、表示にかかるエネルギーが少なくなることが期待される。太陽光を用い

て最大  $355 \text{ cd/m}^2$  の輝度で空中像を表示することができた。

また、空中像を設置しやすくするための研究として、図1(中央)に示す空中像表示光学系を設計した。これは、机や床などの光沢のある平面上に置くだけで、その平面上に直立する裸眼で視認可能な空中像を表示することができる手法である。光源に用いるディスプレイの偏光特性に応じて内部に設置する反射鏡の偏光特性を変えることで、平面上に空中像を表示することができる。

さらに、空中像とのインタラクションに関する研究として、水面の上に空中像を表示しすくい上げるインタラクションを実現する技術(図1左)も実現した。これは、水面などの外部環境の反射素材に空中像を表示し、その外部環境の状態に合わせて空中像の表示位置を調整することで、像の表示箇所の幾何的整合性をとる手法である。



図 1 空中映像表示技術

(左: Sunny Day Display, 太陽光などの外部の明るい光を取り込むことで明るい空中像を表示する技術。中央: PortOn 持ち運び可能で光沢面におくだけでそこに空中映像を表示する技術。右: Scoopirit, 水面の反射を利用して空中映像を表示する技術。)

一方、基礎的な研究としては、空中像視点からのユーザー計測技術を開発した。人が人を観察するように、空中像を見る人の表情などの細かな情報を正面から計測するためには、空中像の視点から映像を得ることが望ましいと考え、空中像の光源ディスプレイと撮影用のカメラを光学的に共役な位置に設置する手法である。装置の設計を図2(左)に示す。さらにこの技術を応用し、空中像視点から2眼カメラでの撮影した映像を Head Mounted

Display(HMD)に送り、ユーザーが空中像になりきって操作することのできるデバイスも実現した(図2(右))。これによって空中像を Wizard Of Oz の方法で操作する仕組みを実現できた。

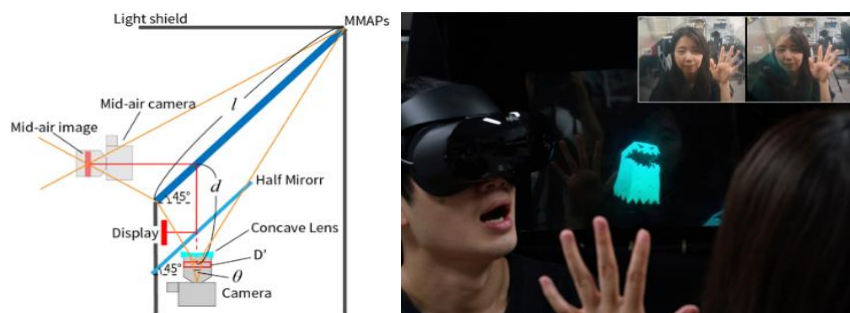


図 2 空中像視点からの撮影技術(左)とその応用例としての空中像操作技術(右)

以上のように、本プロジェクトでは、空中像に関する研究を、低消費エネルギーな高輝度化、設置不便性の解消、環境に適応したインタラクション、撮影技術との融合など、幅広く展開することができた。

## (2) 詳細

### 【光学設計】

明所で視認可能な空中像を実現する手法として環境光採光型空中像の原理を提案し、その性能を計測した。図3にその実例、原理図、試作を示す。試作機を用いて太陽光採光によってできる空中像の輝度を計測したところ、一般の LCD モニターとの最大輝度と同様の輝度 ( $300\text{cd}/\text{m}^2$  程度) の明るさを実現できることを確認できた。

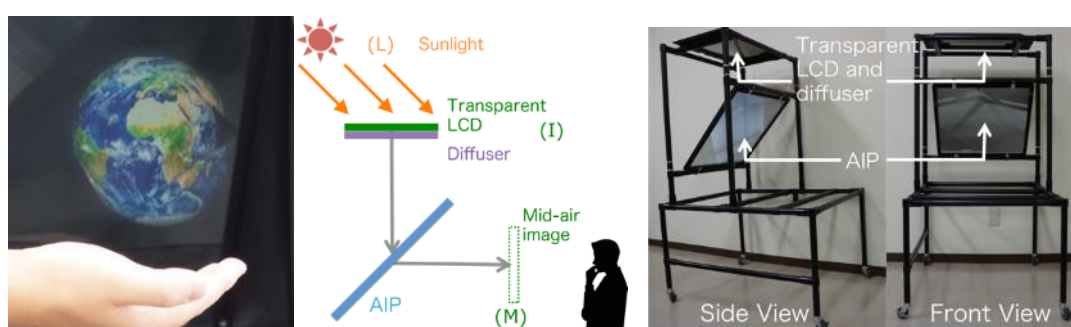


図 3 環境光採光型空中像の実施例(左), 原理(中央), 試作(右)

空中像光学系を環境に調和させる光学設計にも取り組んだ。建築物と空中像光学系の光源を頭部上方に設置し、空中像を結像するための光を壁面素材によって反射させることで、垂直空中像を正面に表示する光学系を提案し、光源 D と反射素材 R の角度を設計し、それに合わせて光源遮蔽のためのルーバフィルム F の選定を行った。設計した光学系における視野範囲は図 4 の青色部分である。反射素材で反射したのちに結像した空中像の輝度・解像度を評価し、提案手法に適した素材の選定を行った。反射素材と

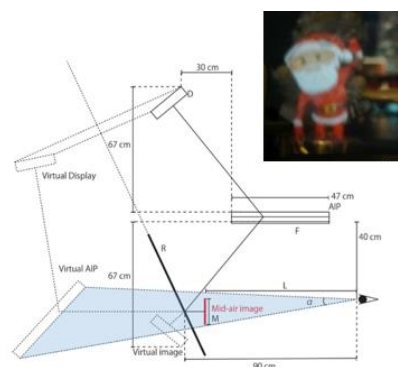


図 4 Deco-Wall の設計

して 11 種類の素材を評価した。その結果、透明のアクリル板、タイル、タッチディスプレイが提案手法に適した素材であることが分かった。そこでこれらの素材を使用し解像度の評価を行った。透明なアクリル板とタッチディスプレイでは、空中像から 90cm 離れたところから、視力換算 0.1 相当の空中像を結像できることが分かった。この場合、空中像で看板に文字や絵を表示することができると考えている。図 4 右上に、サンタクロースの CG を表示した様子を示す。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した。この場合、線の太さが 5mm 程度の表示などが可能になる。またエッジ法を用いて Modulation Transfer Function (MTF) を測定することで空中像の解像度を評価した。実験の結果、透明

の亚克力板やタッチディスプレイでの反射を経て結像した空中像は解像度の高い空中像を結像することが分かった。また、タイルと白の大理石では解像度の高い空中像を表示することが難しいことが分かった。

さらに空中像を公共空間に調和させるために、床などの水平面に置くだけで空中像を提示でき、かつ余計な光が見えにくくなる持ち運び可能な光学系の設計に取り組んだ。この設計を図5に示す。ディスプレイ(D)、鏡(M)、再帰透過光学素子(MMAPs)、視界制御フィルム(LF)、反射面(R)により構成される。R以外は全て箱(BOX)内にあるため持ち運ぶことが可能である。まずDがMに写り込むことで、D'が生じる。これにより、水平面の中にDがある状態を作り出すことができる。そして、D'からの光がMMAPs、LFを通過し、Rで反射することで水平面上に垂直空中像(Mid-air image)が表示される。しかし、この設計では図1に示す通りDから直接MMAPsに入射する光によって水平面の中に像(Mid-air image')が表示する。そこで、Dの偏光特性を利用して水平面の中の像を除去することとした。この除去方法は光源の偏光特性によって異なり、TN液晶等の斜偏光光源を用いる際は図2(a)のようにMMAPsとLFの間に偏光板(P)を設置する。プロジェクタとスクリーンの組み合わせなどの偏光特性のない光源を用いる場合は、(c)のようにDの前にPを配置し(a)と等しい状況にすることで対応する。縦や横の偏光の場合は、図5(b)のように1/4波長板を内部ミラーの上に貼り付けることで不要光と空中像結像光の偏光特性を切り分けて除去することができた。

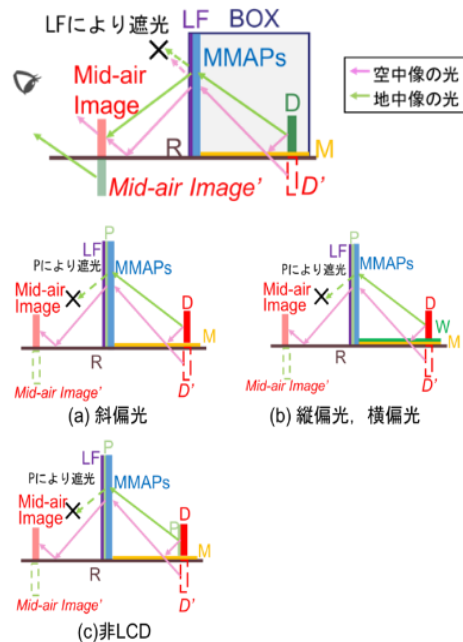


図5 光沢面に置くだけで空中像を表示できる光学系

### 【インタラクティブデザイン】

環境反射による空中像提示とインタラクティブデザインを組み合わせた手法として、水面反射を用いて空中像を水上および水中に結像する光学系 Scoopirit を提案・実装した(図6)。システムによる輝度減衰を評価し、本手法の有用性を検証し、正面から仰角 $10^{\circ}$ から $25^{\circ}$ の範囲において観察した場合、空中像の輝度がスマートフォンの最低輝度より少し明るい $6.46\text{cd}/\text{m}^2$ の輝度になることがわかった。このとき使用したディスプレイは $315\text{cd}/\text{m}^2$ だったため、おおよそ光源輝度の2%に減衰すると計算できる。さらに、水位の変動に対して超音波センサを用いたトラッキングを行い、空中像を水ごとすくい上げるインタラクティブを実現した。これは、環境に合わせて空中像の表示位置をコントロールすることで幾何学的整合性を保つことによるインタラクティブ手法であり、触覚手がかりのない空中像とのインタラクティブに実体操作を活用する点で独創的となっている。



e

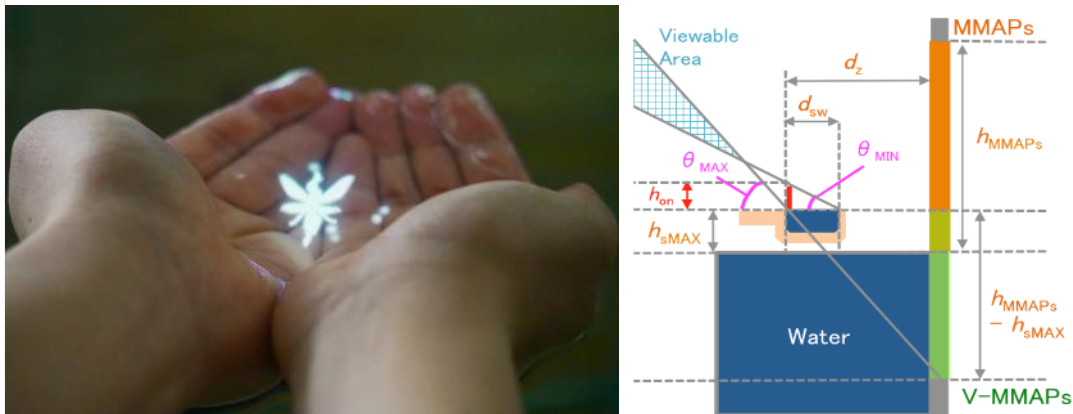


図 6 水面に浮かぶ空中像をすくい上げるインタラクションのデザイン

#### 【行動誘導】

ユーザーの空中像に対する行動を観察するため、様々な場で展示を行った※<sup>1</sup>。定性的な観察結果によれば、空中像への働きかけが増えるのは、随意性の有無が重要だと思われる。同じものを表示した際でも、赤外線センサによる人の位置検出に応じた表示の切り替えを行った際のときのほうが、観覧者が空中像に注目する時間が長くなることが観察されている。一方で、手の動きに応じた空中像の動きをデザインしたにも関わらず、観覧者が手を出さなかった場合、最初の入力がないためにインタラクションが生じないことがあった。また空中像のコントラスト比が低いときはユーザーの行動が低い場合が多い点も観察されている。

研究の過程で行動誘発の不確実性の大きさを確認した。空中像として表示するコンテンツの輝度・位置・大きさ・相手など様々な要因で、ユーザーの行動が変わってしまうため、被験者実験をスムーズに実施するためのプラットフォーム装置が必要であることがわかった。

そのため、人間の行動誘発のための研究の基盤技術として、空中像の視点でユーザーを撮影可能な撮影技術を制作した。具体的には、空中像光源と撮像系光学系の2つをハーフミラーに対して共役な位置に配置した、空中像の表示撮像一体型光学系である。図 7 にその設計を示す。

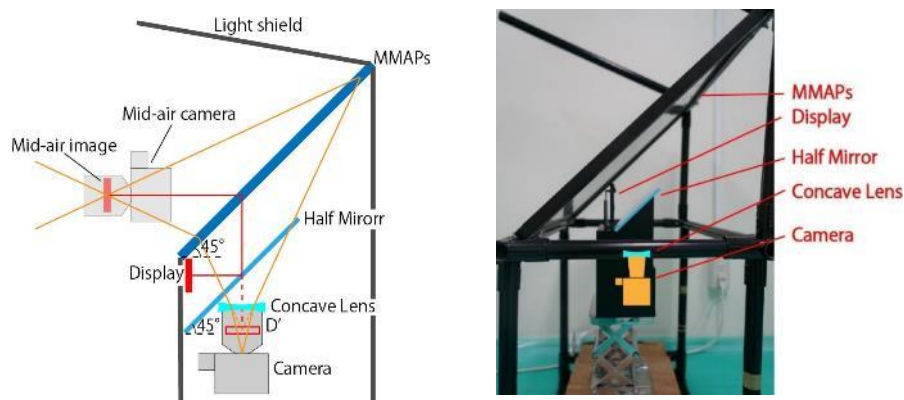


図 7 空中像の視点からの撮影技術

また、行動を誘発するための空中像の高速移動を実現するための新規提示手法の研究も開始した。具体的には、ディスプレイとミラーを回転させることで、空中像の結像位置を前後に移動させることのできる光学系を試作し、その原理を確認した。

さらに空中像視点から被験者を撮影することのできる装置や、その時の視点映像を Head Mounted Display(HMD)に送りユーザーが空中像になりきって操作することのできるデバイスを実験プラットフォームとして製作した。

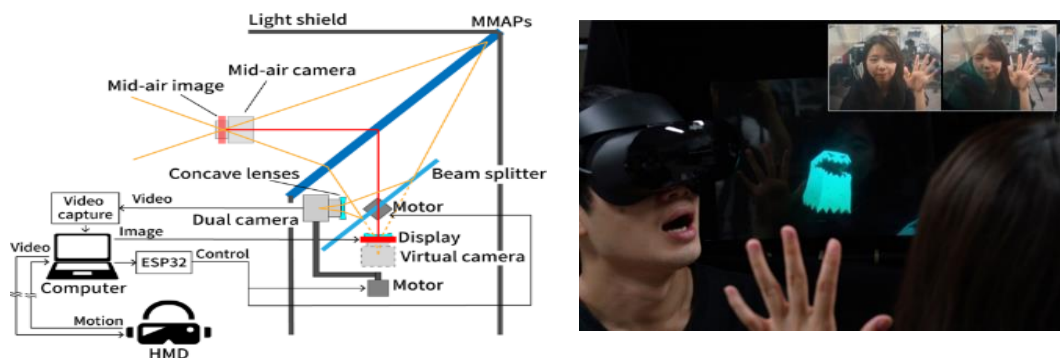


図 8 空中像操作インターフェース

#### ※1 展示実績

1. イノベーション・ジャパン. 東京ビックサイト. 2017.08.31 - 2017.09.01
2. ビジュアルメディア Expo. パシフィコ横浜. 2017.12.06 - 2017.12.08
3. Open for the Public、Social Innovation Week Shibuya. Edgeof. 2018.09.15、16
4. 電通大展 in たづくり. 調布市たづくり. 2018.10.14 - 16.
5. FLOWERS BY NAKED 2019 一東京・日本橋一. 日本橋三井ホール COREDO 室町 1・5F. 2019.01.29 - 03.03.(技術協力)
6. JAPAN SHOP 2019. 東京ビックサイト. 2019.03.05 - 2019.03.08

### 3. 今後の展開

本プロジェクトでは、空中像の表示技術に関して大きな進展があったと考えている。本プロジェクトの目的であった明るい空間で映像を装置から実空間に飛び出たせ、人に働きかける技術を実現できた。今後はこの性能を向上していき、実用化につなげたいと考えている。

一方、本プロジェクトの中で発見した新しい課題は、空中像の装置が大きくて目立ちすぎるため、公共空間への設置にはそぐわないという点であった。これに対して、環境に調和するように光学系の遮蔽設計を進めることができた。今後はこの設計論を洗練させ、実際に設置する際に、どの程度の明るさ・解像度になるのかを、表面素材の像鮮明度(写像性)や光沢度から算出できるようにモデル化を進める。また、光学素子そのもののモデル化も進め、設計者がその見え方をシミュレーションによって再現できるようにする予定である。

さらに、人への働きかけの部分に関して、今の課題は空中像のコンテンツデザインに関する指標が欠けている点であると考えている。何を・どこに・どう表示すれば空中像の魅力を引き立てることができるのか、心理物理実験を通して定量的な評価を進め、行動誘発型情報提示の実現に向けて研究を進めていく。

#### 4. 自己評価

##### ■ 研究目的の達成状況

本研究では、環境光採光型空中像を提案し、空中像研究を進めた。目的は大きく3つに分けられる。第一に光学系の改善による視認性の向上である。第二に空中像の操作手法の開発である。第三に空中像による人の行動への影響の調査である。

第一の目的に関しては、太陽光採光型空中像を実装し、性能を確認することができた。この原理に基づきシステムの改善を進めていくことでさらなる高視認性のシステムが実現できると考えている。

第2の目的に関して、環境に調和する情報提示手法として、水面空中像をテーマに研究を行い、実空間のセンシングとそれに適応した画像源の制御による空中像提示を実現することができた。本研究は Innovative Technologies 2018 に採択されるなど高い評価を得ることができた。

第3の目的に関して、研究の過程で行動誘発の不確実性の大きさを確認した。空中像として表示するコンテンツの輝度・位置・大きさ・相手など様々な要因で、ユーザーの行動が変わってしまう。そこでまずは被験者実験をスムーズに実施するためのプラットフォーム装置が必要であることがわかった。そのため、空中像視点から被験者を撮影することのできる装置や、その時の視点映像を Head Mounted Display(HMD)に送りユーザーが空中像になりきって操作することのできるプラットフォームを開発することができた。また持ち運びが容易で光沢面に置くだけでそこに空中像が表示できる光学系の実現もしており、今後の心理実験等への活用の枠組みを広げることができた。

さらに研究の過程で、空中像装置そのものを覗き込む設計ではなく、空中像を設置する空間の表面素材に反射させることで、環境の中に情報が調和して表示される環境調和型情報提示手法という考えに至り、その実現に向かって設計を進めた。その成果はグッドデザイン賞を受賞するなど、高い評価を得ることができた。

##### ■ 研究成果の科学技術及び社会・経済への波及効果

本研究の遂行によって、環境調和型視覚情報提示の考えに至った。既存の視覚提示技術においては、ディスプレイそのものに関する研究が主であり、それが設置される空間との調和に関する議論が不十分であったと考えている。本研究の遂行の過程で空中像の装置を覗き込むのではなく、環境に調和的に表現されるものとして表示する技術を進め、学術研究としての発表にとどまらず、Innovative Technologies やグッドデザイン賞の受賞に至った。

##### ■ その他領域独自の評価項目

本研究領域では、社会課題に対するシナリオとその解決案としての研究を重視している。本研究の当初の目的はデジタル・デバイドという情報入手の装置や手段の不平等を、公共空間に活用しやすい空中像表現を実現することで、情報提供方法の新しいやり方を提案することであった。

情報の選択可能性が意見の対立を加速する中で、情報の公共的な表示技術が今後更に必要とされることが考えられる。本研究では、現実空間における情報提示技術として空中像研究をし、公共空間に設置可能な光学系などの設計を実現した点で、当初の目的は達成できたと考えている。さらに、「情報の公共的提示」という研究課題の面白さと必要性を意識することで、今後あるべき研究の方向性を見出すことができた。

## 5. 主な研究成果リスト

### (1)論文(原著論文)発表

- |   |
|---|
| 1. 佐野 文香, 小泉 直也. Deco-Wall: 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. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌. 2019, 24 巻1号, 113-123 |
| 2. 松浦 悠, 小泉 直也. Scoopirit: 水面反射を用いた空中像とのインタラクション. 情報処理学会論文誌, 2019. 60 巻 2 号, 318-327              |

### (2)特許出願

研究期間累積件数:3 件

発 明 者: 小泉 直也  
発明の名称 : 太陽光採光型空中像光学系  
出 願 人: 電気通信大学  
出 願 日: 2017/08/25  
出 願 番 号 : 特願 2017-162612

### (2)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

#### 主要な学会発表

1. Ayaka Sano and Naoya Koizumi. 2019. PortOn: Portable mid-air imaging optical system on glossy materials. In Proceedings of SA '19 Emerging Technologies, 2 pages.
2. Yu Matsuura and Naoya Koizumi. 2018. Scoopirit: A Method of Scooping Mid-Air Images on Water Surface. In Proceedings of the 2018 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces. 227-235.

#### 受賞

1. Best Short Paper-Runner Up, 25th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, 12-15 November 2019
2. グッドデザイン賞, 公益財団法人日本デザイン振興会, 2019.10.02
3. インタラクティブ発表賞 (一般投票)(PC 推薦), 情報処理学会 インタラクション 2019, 2019.03.08

#### 著作物

1. 小泉直也. マイクロミラーアレイ素子を用いた空中ディスプレイ. 月刊 OPTRONICS, vol 38, No. 6, pp.67-71. 2019.

以上