

# AIR-range Plus：テーブル上を動き回る複数の空中像とのインタラクション

余合 彩子<sup>1,a)</sup> 倉本 大資<sup>2,b)</sup> 韓 燦教<sup>2,c)</sup> 苗村 健<sup>2,d)</sup>

**概要：**筆者らは以前、ユーザがテーブル上を独立して動き回る複数の空中像とインタラクション可能なシステム「AIR-range Plus」の提案と実装を行った。AIR-range Plusでは実物体と光源の駆動装置、両方に自己位置を検出できる小型ロボットを用いており、ユーザはテーブル上に置かれた実物体を介して空中像とインタラクションすることができる。本稿では、ユーザがテーブル上の空中像キャラクターとともに背景の空中像を生成していくアプリケーションを実装し、展示と考察を行った。

## 1. はじめに

実空間上を動き回る複数のキャラクターと共に、ユーザ自身が映像を生成するといったインタラクションはこれまでにない体験である。本研究では、ユーザが手を伸ばせる日常の生活空間に立体的な映像を提示できる手法として空中像に着目する。空中像は、その鑑賞のためにユーザが特別な装置を用意したり、事前の準備を行う必要がないという特長を持つ。既存の平面、例えばテーブル上に空中像を出現させ、空中像を生成する装置を背後に配置することで、ユーザは装置の存在を直接意識せずに自然に映像に集中できる。さらに、背景を空中像で構成することにより、提示可能な映像の多様性が向上し、手前の空中像キャラクターとの対話など新しいストーリーテリングな体験の実現が可能となる。

筆者らは以前、空中像の提示範囲拡大手法である対称ミラー構造を利用した光学系を用いて、テーブル上を独立に動き回る複数の空中像と中空の領域に背景となる空中像を表示可能なシステム「AIR-range Plus」 [1] の提案と実装を行った。AIR-range Plusでは実物体と光源の駆動装置の両方にプログラムで移動制御を行いやすい toio™ [2] を用いており、ユーザはテーブル上に toio が組み込まれた実物体を移動させることで空中像とインタラクションすることができる。

本稿では、AIR-range Plus のアプリケーションとして、



図 1 テーブル上を動き回る複数の空中像とのインタラクション：AIR-range Plus

テーブル上の空中像キャラクターとユーザが背景の空中像を生成していく 図 1 のようなインタラクション体験を提案する。

## 2. 関連研究

### 2.1 実物体を介した空中像とのインタラクション

空中像は実体を持たないため、実物体に隣接した表示が可能であり、空間内を自由に動かせる利点がある。実物体を介して現実空間に飛び出た空中像を操作できることは、ユーザにとって直感的なインタラクション体験となる。テーブルにカードを置くとキャラクターが飛び出し動き回る EnchanTable [3] や映像が飛び出す絵本 PicPop [4] では光沢面の反射を利用して、既存の平面上に直立した空中像を提示する。これらの研究では、反射面を背景とすることで装置の存在感を薄め、意外性のある体験を提供しているが、実物体の移動に空中像が追従する表現は実現されていない。MARIO [5] では木製ブロックを立体的に配置するこ

<sup>1</sup> 東京大学 大学院学際情報学府

<sup>2</sup> 東京大学 大学院情報学環

a) yogo@nae-lab.org

b) qramo@nae-lab.org

c) hanc@nae-lab.org

d) naemura@nae-lab.org

とで、中空を飛び回る空中像とのインタラクションを実現したが、幾何学的整合性を満たすために実物体を Kinect でトラッキングする必要があった。これに対して ToPiCo [6] では、単一の空中像をユーザーがロボット toy toio を介してインタラクションする体験デザインが提案されている。toio は赤外線センサーを搭載しており、専用のマット上で絶対座標を認識することができる。しかし、ToPiCo では光沢面としてハーフミラーを用いており、toio のセンシングが難しかった。また、上記の研究 [3]～[6] では空中像の提示範囲が中空または光沢面に限定されていた。

## 2.2 空中像の提示範囲拡大

再帰透過光学素子である dual SMAs (dual Slit-Mirror Arrays) [7] は 1 枚の素子で空中像を生成でき、光源と面対称な位置に結像するという扱いやすさと解像度に優れる。本研究では、dual SMAs としてアスカネット社の ASKA3D [8] を利用している。ASKA3D の構造上、空中像の輝度は視線とプレート面の法線とのなす角度  $\theta$  に依存し、 $\theta=45^\circ \pm 20^\circ$  であることが推奨される。

MARIO [5] では、dual SMAs を水平面に対して  $45^\circ$  で設置することで中空に浮かぶ空中像を提示した。一方で、EnchanTable [3] では、dual SMAs を水平面に対して  $90^\circ$  で設置することでテーブルの反射面上に空中像を提示した。空中像の提示範囲をテーブル上から中空まで拡大する手法として、横瀬ら [9] によって対称ミラー構造が提案されている。対称ミラー構造は dual SMAs に対して面対称に配置されたミラーの組 ( $M, M'$ ) とテーブルミラーの組 ( $TM, TM'$ ) から構成され、空中像はミラーの反射の有無によって領域毎に異なる結像光路で表示される。AIR-range [10] では対称ミラー構造を用いた光学系において、領域の境界で空中像の輝度連続性を保つための設計パラメータが提案された。

提案システム AIR-range Plus では、テーブル上の空中像と背景となる空中像の表示を両立するため、対称ミラー構造に dual SMAs を 1 枚追加した光学系を用いる。また、AIR-range では実現されていなかったインタラクティブなシステムの実現を目指した。

## 3. AIR-range Plus

筆者らが以前実装した提案システムの装置と本稿で制作したアプリケーションに分けて説明する。

### 3.1 提案システムの設計

#### 3.1.1 設計要件

提案システムは以下の要件を満たすように設計されている。

- テーブル上を複数の直立空中像が独立に移動する。
- テーブル上の空中像と人がインタラクションできる。
- テーブルの奥に背景となる空中像を表示する。

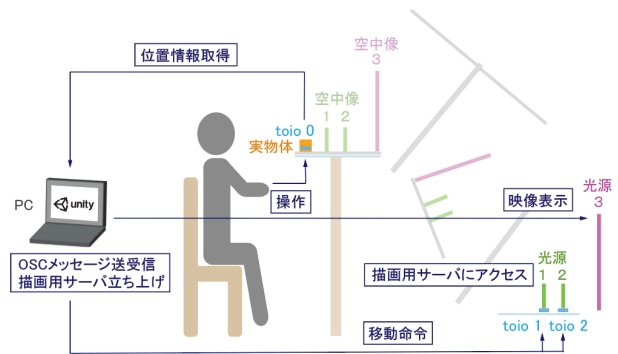


図 2 提案システムの構成



図 3 実装した光学系

- 空中像は表示位置によらず輝度が連続である。

2.2 節で述べたように、空中像の輝度はユーザの視線方向と ASKA3D のプレート面の法線とのなす角度  $\theta$  に依存し、光学系の構造上、ユーザの手が届きやすいテーブルの手前ほど空中像の輝度が低下する。これはインタラクションする際の体験の妨げとなるため、テーブル上の領域における空中像の輝度が確保できるように光学系の配置を検討する。

#### 3.1.2 システムの構成

図 2 に提案システムの構成を示す。toio の制御は Unity で行っている。制御用の PC 上に立ち上げた JavaScript ライブラリ p5.js を用いた描画用のサーバを立ち上げておき、光源 1,2 として用いるスマートフォンからアクセスして描画用のウェブページを表示させる。p5.js のサーバと Unity はネットワーク経由の OSC 通信により接続されており、実物体に対応する toio0 の位置と連携して空中像 1 と対応する光源 1 の映像を切り替える。

#### 3.1.3 光学系

次に光学系の設計パラメータについて述べる。ユーザの位置はテーブル上の実物体を操作可能な範囲内を想定する。この時、視点位置がテーブル面から離れるほど自然な体勢で体験することができる。一方で、体験を大きく妨げる透過光の影響を受けずに dual SMAs1 と TM を見込む境界 (以下、境界 1) で空中像の輝度連続性を高めるためには、

視点位置をテーブル面に近づける必要がある。鑑賞時の視点位置は  $(eyeW, eyeH) = (860\text{mm}, 195\text{mm})$  を想定し、空中像が視認可能な視点の高さにおいて像が途切れないようにテーブルの位置は  $(tW, tH) = (210\text{mm}, 80\text{mm})$  とした。上記の条件から、dual SMAs1 の水平面からの角度は  $56^\circ$  として実装した。dual SMAs1 と TM を見込む境界 (以下、境界 2) の輝度連続性を考慮して、dual SMAs1 とミラーの組  $(M, M')$  との角度は  $90^\circ$  とした。この時、テーブルからの視線の角度  $\theta$  は  $10^\circ$  である。

図 3 に実装した装置の外観を示す。実装にあたり ASKA3D(630mm × 630mm) の他に用いた機材は以下の通りである。M, M', TM' にはコダマガラス社の高透過ミラー (反射率 95%, 400mm × 630mm), TM には村上開明堂社のコールドミラー (波長領域 442~617nm: 反射率 80% 以上, 波長領域 795~930nm: 反射率 10% 以下, 299mm × 399mm), 光源 1,2 として iPhone 12(162g), 光源 3 として OLED ディスプレイ LG 27EP950-B を使用している。

### 3.2 アプリケーションの設計

#### 3.2.1 体験シナリオ

提案システムのアプリケーションとして、ユーザがテーブル上を動き回るキャラクタ (空中像 1, 空中像 2) とともに星空 (空中像 3) を生成する体験を制作する。ユーザは toio0 が組み込まれた実物体をテーブルミラー TM 上の任意の位置に移動させることで、空中像 1 との間接的なインタラクションが可能となる。体験シナリオは以下のように進行する。

- (1) ユーザが実物体を操作するまでの間、空中像 1 は白い星を持って TM の右奥で待機する。
- (2) 空中像 1 が実物体が置かれた位置まで移動して、場所に応じて星の色を変化させる。
- (3) 空中像 1 は再び右奥へ戻り、星 (空中像 3) を中空へ浮かばせる。(1)~(3) を 3 回繰り返す。
- (4) 空中像 2 が登場して星 (空中像 3) を落下させ、指定スポットまで回収する。

空中像 1 は常に表示されている一方で空中像 2 は (4) のタイミングのみ表示される。上記のような体験のループによって、ユーザのアクションによって提示される空中像の数や位置が拡張される様子を表現する。ユーザ視点におけるアプリケーションのイメージを図 4 に示す。

#### 3.2.2 インタラクションデザイン

空中像を最適な視点で鑑賞できるように、ユーザには座った状態でテーブルに手が届く位置での体験を推奨する。最適な視点とは、空中像が不要な光の影響を受けず、表示位置によらず輝度連続で良好に観察できる状態を指す。図 5 は体験時の視野角である。

#### ユーザの視点誘導

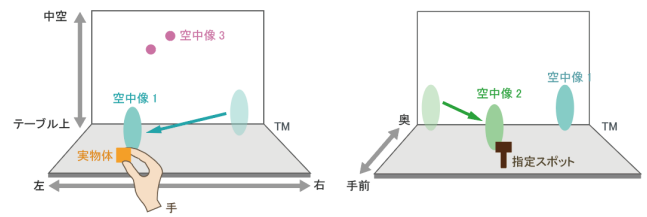


図 4 アプリケーションのイメージ

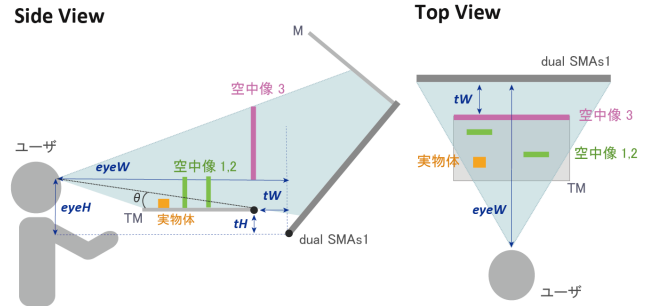


図 5 ユーザの視点位置と視野角

初期状態ではテーブルの奥に空中像 1 のみ表示し、制作者が想定するテーブルに近い視点位置にユーザを誘導する。その後、ユーザの操作によって、背景の空中像 3 やテーブル上を動く新たな空中像 2 が登場し、表示される空中像の数や位置が拡張される。これにより、テーブル上の空間をユーザ自身で彩るような体験が生まれることを目指す。

#### 空中像の動作

ユーザが実物体を置いた位置に応じて空中像 1 が持つ星の色を変化させることで、様々な位置での試行を動機付ける。さらに、ユーザが操作する実物体が 3 秒間同じ位置で静止するまでの間、空中像 1 を実物体の移動に追従させる。これは提案システムの入力と出力に同一のデバイスを使用することで制御時の移動命令が簡潔化されるという利点を生かしたインタラクションである。移動する方向によって、空中像 1 の向きを考慮する。

#### 3.2.3 アプリケーションの実装

3D プリントした台に取り付けた光源 1 および光源 2 を toio1 および toio2 で駆動することで、空中像 1 および空中像 2 の制御を行った。光源 1 および光源 2 として使用するスマートフォンの質量は toio の最大積載重量 200g を下回るように選定した。しかし、重心バランスの問題により前後移動の動作が不安定であった。そのため、光源の重量が直接 toio に掛かることがないように台の設計を行った。toio1 および toio2 の底面には薄型ネオジム磁石を貼り付け、走行時の土台となるホワイトボードへの吸着力を高めた。また、走行時の摩擦を軽減するために四隅にミニキャスターを使用した。走行パターンは、徐々に加速して中間地点以降は目標地点まで減速するように制御した。



図 6 光源 1 および光源 2 を運ぶ台の形状

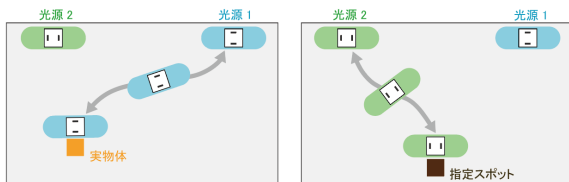


図 7 光源 1 および光源 2 の軌道イメージ

toio は二輪のロボットであるため、横向きで使用した場合はスマートフォンの表側を正面方向に維持したまま前後方向に移動することは難しい。一方で、移動時のスマートフォンの傾きが正面に対して急であるほど、観察される空中像の幅が狭くなり違和感が生じる。本アプリケーションでは上記に示した理由から、図 6 のように、空中像 1 を駆動する toio1 は左右方向の移動を行いやすいように横向きで使用し、前後方向に移動する空中像 2 を駆動する toio2 は縦向きで使用した。

toio1, 2 はそれぞれ最大速度 126mm/s, 100 mm/s になるように制御した。また、目的地方向に回転しながら前進後退を行い、目的地でスマートフォンの表側が正面方向を向くように制御を行った。図 7 は光源 1 および光源 2 の軌道イメージである。空中像 1 は指定のタイミングでのみ実物体の移動に反応するよう、ソフトウェア上でプログラムされている。一方で、空中像 2 は実物体の動きには追従せず、予め定義されたループパターンに従って動作する。空中像 3 は Unity の実行画面をディスプレイに表示することで提示される。実物体が置かれた位置に応じて空中像 1 に表示される星の色を 9 色から選択した。

### 3.2.4 実装上の工夫

空中像の奥行き方向の表示位置を知覚を向上させる一つの方法として、人工影の重畳が効果的であることが知られている [5]。しかし、提案システムではテーブル上の反射面を使用して空中像を提示するため、人工影を用いると空中像の輝度が低下する。そこで、静止した背景の空中像 3 を用いるとともに、空中像 1 の横方向の移動を増やし、運動視差を利用して奥行きを知覚を向上させることを試みた。また、実物体と同じ視差で空中像を観察できるように、テーブルミラー TM 上には複数の実物体を配置した。

アプリケーションの実装にあたり、実物体が置かれた位置と空中像 1 が表示される位置が一致するように光源側と

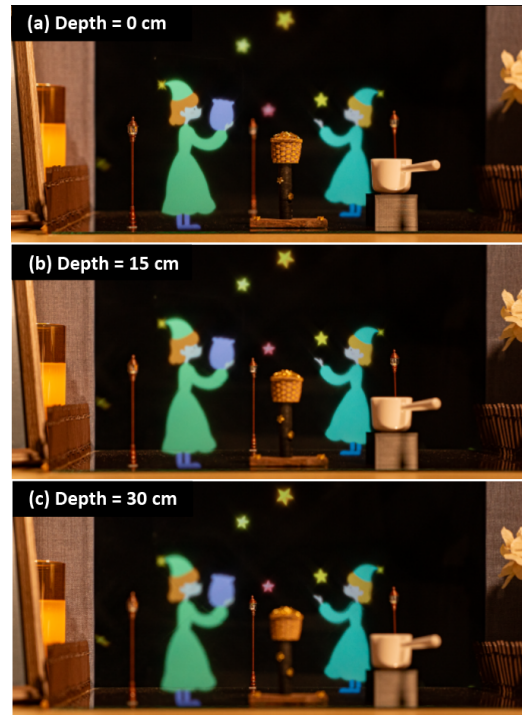


図 8 異なる奥行きに表示した空中像

テーブル側における toio マットの位置を調整している。ここで、テーブルミラー TM として使用するコールドミラーは、波長領域 795~930nm における反射率が 10% 以下であり、赤色の可視光領域で大幅に反射率が低下する。コールドミラーの反射面を見込む領域において空中像の色味が変化することを防ぐため、テーブル上に提示される空中像 1 および空中像 2 の色味を赤色成分の少ない色味に調整した。さらに、toio1 および toio2 の移動のタイミングに合わせて、足音や星の落下音などの効果音を Unity から出力した。

## 4. 評価と考察

### 4.1 空中像の表示の確認

実装システムにより、異なる奥行きに空中像を提示した様子を図 8 に示す。撮影時のカメラのピントは TM 手前を 0cm として、それぞれ奥行き 0cm, 15cm, 30cm に合わせた。図 8(a) では緑色のキャラクタ、図 8(b) では水色のキャラクタ、図 8(c) では星の空中像にピントが合っている様子が確認できる。

光学系を実装する際、インタラクション体験の妨げとならないように、境界 1 における輝度の連続性よりもテーブル上の領域における空中像の輝度の確保を優先とした。そのため、推奨する位置よりも高い視点においては、TM を見込む領域が dual SMAs1 を見込む領域よりも高い輝度で空中像が観察される。図 9 に視点の高さを変えた場合の空中像の見え方の違いを示す。目視で観察した結果、推奨の視点位置では境界 1 で色調の違いはほとんど識別でき

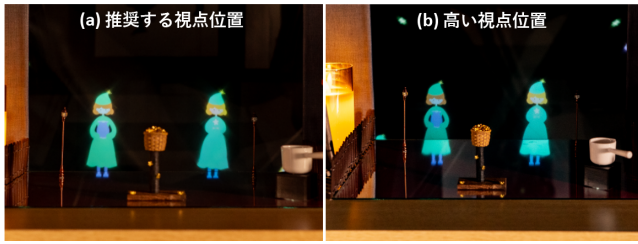


図 9 視点位置による見え方の違い

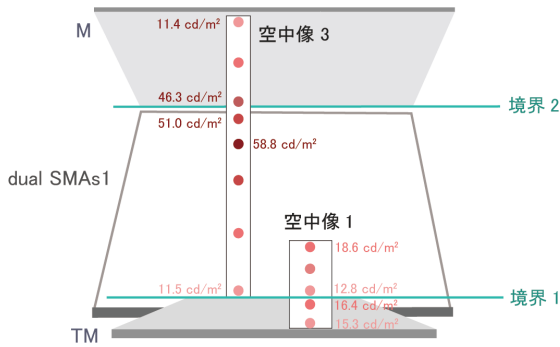


図 10 輝度測定イメージ

ず、輝度の連続性も維持されていることが確認できる。一方で、視点の高さを上げると輝度の不連続性が目立ち、周りには迷光が確認される。

次に、輝度計（コニカミノルタ製 CS-100A）を用いて、空中像の輝度を測定した。システムの実装に沿って、境界1では光源1(iPhone 12)を、境界2では光源3(LG 27EP950-B)を使用し、領域間の輝度連続性を確認した。光源は最大輝度で使用し、空中像1をTMの手前、空中像3をTMの奥に配置し、図10の丸印の位置における輝度を測定した。丸印の濃淡は大まかな輝度の変化を反映しており、濃い部分がより高い輝度を示す。ただし、体験時に想定される視点位置は測定位置よりもテーブルに近く、dual SMAsを見込む角度の変化が急になる。また、測定は暗室で行った。そのため、室内照明が存在する環境下において実際に視認できる空中像は測定値よりも暗くなる。

測定の結果、境界1および境界2ともに輝度差は $5\text{cd/m}^2$ 以下であり、この差は目視で明らかな差異としては認識されることが分かった。また、空中像1は全測定点で $15 \pm 3\text{cd/m}^2$ に収まっており、テーブル上を動き回る空中像が位置に依存せず均一な輝度を維持することが確認された。一方で、空中像3においては視野角の範囲が広くなり、輝度は $10 \sim 60\text{cd/m}^2$ の範囲にわたって変動していた。実装したアプリケーションでは $20\text{cd/m}^2$ 以上の範囲内で空中像3を表示した。

#### 4.2 動作確認

図11はアプリケーションの動作中の様子である。図11(a)では空中像1、図11(b)では空中像2がそれぞれ実

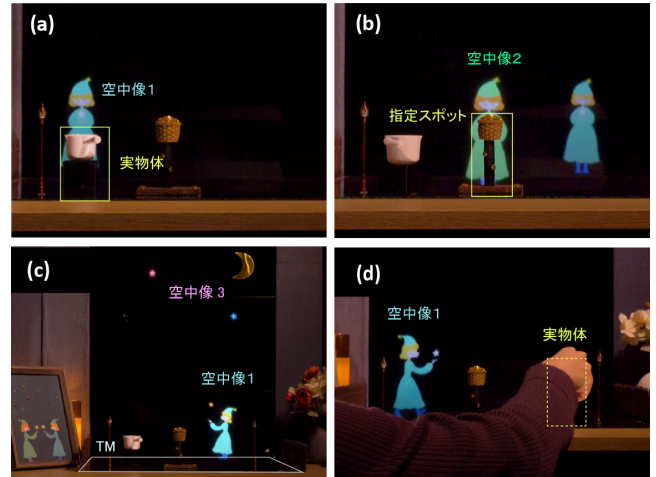


図 11 アプリケーション動作中の様子

物体の位置に表示されていることが確認できる。図11(c)からは、空中像1が空中像3と同じ奥行きまで下がってから、星を上げる動作を行う様子が確認できる。また、空中像1の移動中に実物体の位置を動かした場合、図11(d)のように空中像1が実物体の方向を向いて追従する様子が確認できる。

toioがスマートフォンを運ぶ速度の許容範囲の検証を行った。その結果、動き始める動力として最低限 $74\text{mm/s}$ の速度が必要であり、移動速度は $4\text{cm/s}$ であった。左右方向に移動するtoio1は速度 $250\text{mm/s}$ 以上において、マットから飛び出してしまう問題があった。一方で、toio2では速度 $284\text{mm/s}$ 以下であれば問題なく動作した。これは重心バランスによる移動の容易さが関係していると考えられる。ただし、速度 $180\text{mm/s}$ 以上では駆動時のモータ音が体験の妨げとなる程度に認識された。

#### 4.3 展示

アプリケーションの展示を行い、ユーザの行動観察と考察を行った。来場者は身長に合わせて、座面の高さが $42\text{cm}$ と $61\text{cm}$ の2種類のイスから選択して、座って視点で体験した。

展示全体を通して、システムの仕組みに対して興味を持つユーザが多かった。その中でも「魔法のようだ」「どこでセンシングされているか分からない」といった感想が挙がった。さらに、dual SMAsとTMの間の輝度差や色味、輪郭のずれに関する指摘がなく、「実現する上での課題を予想できない」という感想も多く見受けられた。これは、光学設計パラメータと視点位置の誘導が適切であり、ユーザに自然な映像を提示できたことを示している。テーブル上の実物体や効果音の導入により、体験の没入感が高まったとの声もあった。これは、テーブル上に空中像を表示する光学系の特性が貢献していると考えられる。移動中のスマートフォンの傾きによる空中像の違和感に関する懸念に

もかわらず、独立して動くキャラクターに対する肯定的なコメントが寄せられた。さらに、実物体を動かして空中像が追従する様子を楽しむユーザや9色全てを発見しようと試みるユーザ、様々な実物体を動かそうとするユーザの存在は、システムの仕組みを隠蔽しつつ好奇心を刺激する効果があったことを示唆している。しかし、ユーザが実物体をTMの手前端に置くと視野角を外れるため、空中像が見切れる問題が生じており、対策が必要であることが分かった。また、子どもが移動する空中像に手を伸ばして捕まえており、奥行き感を適切に認識している様子が観察できた。一方で、立体感の欠如についての意見もあり、影の付与が実在感を高めるために必要であると考えられる。

## 5. 課題と制約

### 光学系

現在の光学系では、迷光対策が行われていない。そのため、空中像の表示位置や視点位置によって迷光が視界に入り、鑑賞体験を妨げる可能性がある。対策としては、偏光板や視界制御フィルムにより迷光を遮蔽する手法が考えられる。また、本システムは光学的整合性に課題がある。3.2.4節で述べたように空中像の下に影を提示することが困難である。さらに、奥の光源が手前のスマートフォンに遮蔽されることで、空中像の重畳表示ができないという問題も存在する。この問題に対しては、梶田ら [11] によって提案されているハーフミラーを用いた光源の多層化などの方法を検討する必要がある。

### 実装

今回の実装では、toioの移動命令と効果音の出力命令、映像表示命令を順番に行っていたため、映像の切り替えに数秒程度の遅延が生じることがあった。これらの処理を並列に行うことで時間的整合性の向上が期待される。また、ユーザによる移動命令時に光源1と光源2が接触する可能性がある。対処法としては、ソフトウェア上でtoio1の移動範囲の制限を設けることや、光源2の待機場所用光源側のtoioマッドを拡張することが考えられる。

toioを用いることで生じる制約も存在する。toioのモーター音がコンテンツの効果音と混ざり合い、体験の没入を妨げる可能性がある。また、実物体が置かれた位置によって空中像の表示位置が不正確になることがあった。toioマッドの仕様ではX座標×Y座標が305×215であり、1座標が1.38mmに対応している。これに対し、各座標の誤差が15以内、角度の誤差が4度以内である場合にtoioによって目標到達とみなされることが原因として考えられる。これは、ソフトウェア上で目的地到着後の微調整を行うことで精度の向上が見込める。調整の際、表示されている空中像に違和感が生じないようにする工夫が必要である。

## 6. おわりに

本稿では、ユーザがテーブル上を独立して動き回る複数の空中像とインタラクション可能なシステム AIR-range Plus のアプリケーションの実装と展示を行った。アプリケーションでは、ユーザが実物体を介してテーブル上のキャラクターとともに背景の空中像を生成していく体験を設計した。展示を通じて、ユーザが輝度連続で明瞭な空中像を観察し、空中像の適切な表示位置を認識できたことを示すような観察結果が得られた。一部のユーザからは、立体感の欠如や実装上の制約について意見があり、実在感を高めるための課題が明らかになった。今後の課題として、光学的整合性の実現、幾何学的・時間的整合性の改善によるインタラクション性の向上が挙げられる。

**謝辞** 本研究は中山未来ファクトリーの支援を受けて行われた。

### 参考文献

- [1] 余合彩子, 倉本大資, 韓 燦教, 苗村 健: 机上を動き回る複数の空中像のインタラクティブシステム AIR-range Plus の基礎検討, 2023年映像情報メディア学会冬季大会講演予稿集, 21C-2 (2023). (発表予定).
- [2] Sony Interactive Entertainment: Toy Platform toio™, <https://www.sony.com/SonyInfo/design/stories/toio/>. 最終参照日 2022/7/20.
- [3] 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, 日本バーチャリアリティ学会論文誌, Vol. 21, No. 3, pp. 401-410 (オンライン), DOI: 10.18974/tvrsj.21.3.401 (2016).
- [4] Hoshi Ayami, Kiuchi Shunji, K. N.: PicPop: A pop-up picture book comprising mid-air images, *Extended Abstracts of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1-4 (2021).
- [5] Kim, H., Takahashi, I., Yamamoto, H., Maekawa, S. and Naemura, T.: Mario: Mid-air augmented reality interaction with objects, *Entertainment Computing*, Vol. 5, No. 4, pp. 233-241 (2014).
- [6] ToPiCo プロジェクト: ToPiCo, <https://protopedia.net/prototype/3468>. 最終参照日 2023/11/27.
- [7] Commission, I. E. et al.: 3D display devices-part 51-1: Generic introduction of aerial display, Technical report, Tech. Rep. IEC TR 62629-51-1: 2020 (2020).
- [8] ASKA3D: <https://aska3d.com/en/index.html>. 最終参照日 2023/12/8.
- [9] 横瀬哲也, 阪口紗季, 苗村 健: 対称ミラー構造を用いたテーブルトップ空中像ディスプレイ, 第24回日本VR学会大会論文集 (2019).
- [10] Kikuchi, T., Yahagi, Y., Fukushima, S., Sakaguchi, S. and Naemura, T.: [Paper] AIR-range: Designing optical systems to present a tall mid-AIR image with continuous luminance on and above a tabletop, *ITE Transactions on Media Technology and Applications*, Vol. 11, No. 2, pp. 75-87 (online), DOI: 10.3169/mta.11.75 (2023).
- [11] 梶田 創, 山本紘暉, 小泉直也, 苗村 健: 動的マスクを用いた多層空中像におけるオクルージョン表現, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. 99, No. 11, pp. 1102-1111 (2016).