

タッチパネル上に直立空中像を表示する光学系とそのインタラクションの初期検討

星 彩水^{1,a)} 巻口 誉宗^{1,b)} 佐野 文香^{1,c)} 千明 裕^{1,d)} 望月 崇由^{1,e)}

概要: 日常生活の延長線上でデジタル情報を実在感高く表示するため、テーブル上に置いたタッチパネルの上に直立した空中像を表示し、俯瞰から観察できる卓上空中像光学系とそのインタラクション手法を提案する。これまで卓上に空中像を表示する既存の光学系の多くは結像方式に再帰透過を用いていたため、空中像とは別に迷光が発生し、その除去に伴って輝度効率が低下するという課題や、水平方向の視野角が光学素子の物理的なサイズによる制約を受けるという課題がある。そこで我々は再帰反射と偏光特性を用いることで、高い輝度効率で迷光が生じない新たな光学系を提案する。また、鏡を組み込むことで水平方向の視野角を改善する。さらに空中像とのインタラクション手法について、従来の直接的な空中像のタッチとは異なるアプローチとして、タッチパネルを用いて間接的に空中像を操作する手法を提案・実装した。

1. はじめに

我々は現実世界においてバーチャルキャラクターが日常生活に溶け込んで共存する世界を実現したいと考えている。現実世界の人と人のコミュニケーションがそうであるように、人とデジタル情報のコミュニケーションにおいても、ヘッドマウントディスプレイなどの機器を装着することなく、ディスプレイ面内に縛られることのない、より自由で自然な情報表示を実現することで、新たな体験の創造や、相乗効果を期待したい。

こうした世界の実現に資する技術の一つに、実空間にあたかも映像が浮いているように見える空中像表示技術がある。空中像表示の方式として、再帰透過 [1] や再帰反射 [2][3] などの光学素子を用いて光源となるディスプレイの映像を空中に実像として結像する光学系が提案されている。結像された空中像は特別な機器を装着することなく裸眼で観察できるため、複数人で同時に視聴することも容易である。

こうした光学系の中でも、特にテーブルなどの水平面上に直立した空中像を表示し、俯瞰で観察できる卓上空中像光学系 [4][5][6] は、空中像を観察する際の背景がテーブル面となり、光学系が直接観察されない。さらに日常のテ

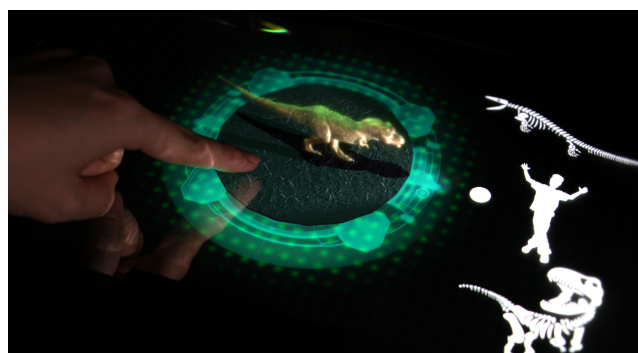


図 1 提案手法による空中像の表示と間接的なインタラクションの例。中央の恐竜のみ空中像で表示され、その他はタッチパネルに表示された映像である。

Fig. 1 Indirect interaction with aerial image using a touch panel. Only the dinosaur in the center is displayed as an aerial image, and the other images are displayed on the touch panel.

ブル上の作業の延長で空中像を視聴できるため、ユーザは空中像を日常生活に溶け込んだ自然な形で視聴できる。従来の卓上空中像光学系の多くは空中像の結像方式として再帰透過を用いている [4][5][6]。しかし、再帰透過を用いた空中結像光学系は、空中像以外の不要な光である迷光が両サイドに生じる。さらにディスプレイの光が直接透過してユーザに視認されることによる迷光も生じる。これらの対策として視域制限フィルムなどの光学素子が追加 [4][6] されることで、空中像の輝度効率が低下するという課題がある。

そこで我々は、再帰透過の代わりに再帰反射の方式を用

¹ NTT 人間情報研究所

a) ayami.hoshi@ntt.com

b) motohiro.makiguchi@ntt.com

c) ayaka.sano@ntt.com

d) hiroshi.chigira@ntt.com

e) takayoshi.mochiduki@ntt.com

いた新たな卓上空中像光学系を提案する。提案光学系は偏光特性を用いることで、理論的に空中像の輝度を低下させることなく迷光を除去できる。さらにテーブルに水平に置いたディスプレイと組み合わせ、ディスプレイの上に直立した空中像を表示し、その空中像と連動した影や地面をディスプレイに表示することで空中像の実在感を向上させることができる。我々のこれまでの検討 [7] は、上記光学系の簡易な原理提案とプロトタイプによる実現可能性の検証のみであったが、本稿では新たに鏡を光学系に組み込むことで水平方向の視野角を拡大する構成を提案するとともに、より詳細な原理と設計方法を述べる。

また、空中像の研究分野では空中像表示だけでなく空中像とのインタラクションも重要な研究要素である。情報の交換や双方向的に物理的な作用を伴うインタラクションによって、時間を共にしている臨場感を感じさせ、キャラクターが今ここに存在しているという感覚を与えることができる [8]。従来の空中像とのインタラクション手法は、ユーザの手を3次元的にセンシングし、空中像に触れる直接的なインタラクションがある [9]。

一方で、我々は例えば現実世界で壊れやすいなどの理由で触りにくいものは、空中像として表示した場合でも直接触れることなく操作できることがより自然なインタラクションにつながると考える。また、キーボード入力や描画など、もともとユーザが卓上やタッチパネルで行っているインタラクションも、必ずしも空中像を介して実現する必要はない。そこで本稿では空中像との直接的なインタラクションとは異なるアプローチとして、タッチパネル上に表示した空中像と、タッチパネルの操作を通じて間接的にインタラクションする手法を提案・実装する。

本稿の貢献は以下の通りである。

- 再帰反射を用いた卓上空中像光学系を提案・実装し、輝度効率の理論値と実測値の差分を評価した。
- 鏡を用いた水平方向の視野角拡大構成を提案・実装し、視域拡大効果を示した。
- タッチパネルによる空中像との間接的なインタラクション手法を提案し、体験可能なプロトタイプを実装した。

2. 関連研究

以下では卓上に空中像を表示する光学系と、空中像とのインタラクション手法についての関連研究をまとめる。

2.1 卓上空中像光学系

テーブルなどの水平面に直立した空中像を表示し、俯瞰から観察する卓上空中像光学系が提案されている。山本らは、机の上に置いたビームスプリッターでの反射を利用して空中像を表示する EnchanTable を提案している [4]。この光学系は机の下のディスプレイからの光を再帰性透過光学素

子に通し、机面に反射させることで空中像を表示している。Kikuchi らは、卓上空中像を含んだ複数の空中像を組み合わせることで、垂直方向にサイズの大きな空中像を表示する光学系を提案している [10]。しかし、この光学系も机の下に装置を配置する構成のため、卓上に置くだけで利用することができない。

これに対し、机上だけで装置が完結する光学系が提案されている。小泉らは、垂直に設置したディスプレイからの光を卓上に配置した鏡に反射させてから再帰性透過光学素子に通す構造とすることで、卓上に装置を置くだけで空中像を表示する光学系を提案している [6]。また、装置内のディスプレイと鏡の配置を調整することで、奥行方向のサイズを縮小したコンパクトな卓上空中像光学系も提案されている [5]。これらの光学系では、ディスプレイからの出射光は、再帰性透過光学素子にて、再帰透過して空中像になる光と、透過して迷光になる光に分けられる。そのため、ユーザからは装置内のディスプレイが見えてしまうことから、視野制御フィルムを使用した除去が必要である。しかし視野制御フィルムによって空中像として結像される光も除去されることで、輝度効率が低下する。

また、卓上空中像において空中像を観察可能な範囲は、空中像と反射面に反射した光学素子全体が視聴できる範囲に限定されるため、視野角は装置の大きさや空中像の大きさに依存し、コンパクトなサイズの装置で広い視野角を実現することができない。

我々は、机上で装置が完結しながら、光源のディスプレイの輝度を効率的に使用でき、さらに水平方向の視野角を改善する新たな卓上空中像光学系を提案する。

2.2 空中像インタラクション

空中像とのインタラクション手法として、空中像に手を伸ばし、直接インタラクションする手法がある。Chan らは、机内に仕込んだ赤外線カメラからユーザの指先をセンシングし、空中像へのタッチを検出している [9]。また、MiTAi では、赤外線センサと赤外線カメラを組み合わせたハンドトラッキングセンサを用いて指先をセンシングし、空中像が指先を追いかけるインタラクションを実装している [11]。こうしたユーザの手を用いて空中像をなでる、手の上に乗せるといった【身体的接触】や、指先を空中像が追いかけるといった【着目点の設定】などの手法以外にも、実物体を介したインタラクション手法が提案されている。例えば MARIO [12] では、実物体のブロックの位置を深度センサで認識し、その上に空中像が乗るインタラクションを実装している。また、EnchanTable [4] では、RFID センサやカメラで実物体を認識し、それを空中像が追いかけるインタラクションを実装している。

タッチパネルを用いて空中像とインタラクションする例として、EnchanTable [4] ではタッチパネル上に空中像を表

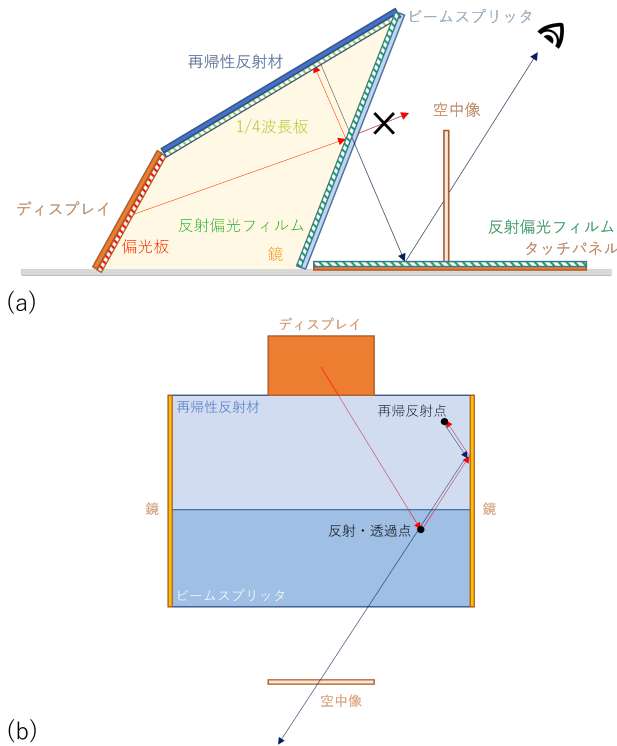


図 2 光学系設計 (a) 側面図 (b) 上面図
Fig. 2 Optics design (a) Side view (b) Top view

示し、タッチした位置を空中像が追いかけるコンテンツを提案している。また、小泉らは、EnchaTable と組み合わせるインタラクション手法として、タッチパネルを用いて実物体のカードの座標位置をタッチパネルによって取得し、空中像を表示する手法を提案している [13]。これらの研究では、タッチパネルの利用はコンテンツの一例であり、我々がめざす空中像の間接的なインタラクションとしての検討は行われていない。

3. 提案手法

以下に我々が提案する卓上空像光学系と、タッチパネルを用いて空中像との間接的なインタラクションを実現するインタラクションシステムそれぞれの詳細を述べる。

3.1 提案光学系の構成

提案光学系 (図 2) は再帰性反射材、ビームスプリッタ (入射光の一部を透過し、一部を反射する光学素子)、空中像の光源ディスプレイ、タッチパネルから構成される。本光学系の空中像の結像方式は再帰反射によるもので、ディスプレイからの光がビームスプリッタに対して面对称位置に、さらにタッチパネルの表面に対して面对称位置に結像する。

また、ディスプレイの輝度を効率的に使いながら、ディスプレイからユーザ方向へ直接向かう迷光を除去するため、偏光特性を利用する。ディスプレイに吸収偏光フィルム、

ビームスプリッタに反射偏光フィルム、再帰性反射材に $1/4$ 波長板、タッチパネルに反射偏光フィルムを貼合する (図 2(a))。ただし、ディスプレイから出射する光の偏光方向とビームスプリッタの反射偏光方向を一致させ、タッチパネルの反射偏光方向はこれらの方向と直交させる。ディスプレイから出た光 (例として p 偏光) はビームスプリッタの反射偏光によって反射され、位相差フィルム付き再帰性反射材で再帰反射されることで s 偏光に変換される。その後、ビームスプリッタの反射偏光を透過し、タッチパネルの反射偏光で反射され、空中像として結像される。ディスプレイからユーザ方向へ直接向かう光はビームスプリッタの反射偏光を透過しないことから、ユーザがディスプレイの直接光を迷光として視認することはない。

本提案光学系の理論的な輝度効率として、ディスプレイは出射光に偏光方向の偏りがなく、反射偏光は各方向の光を損失なく透過・反射させ、再帰性反射材は損失なく入射光を再帰反射すると仮定した場合、ディスプレイの出射光の 50% を空中像に使用することができる。

視野角の拡大は、再帰透過を用いた空中像光学系に対して鏡を用いる梶田ら [14] の手法と同様に、装置の側面の左右に鏡を配置することで実現する (図 2(b))。これにより壁面に当たっていた光を空中像に結像する光として使用することができるため、左右の視野角が増加する。

3.1.1 光学系の変数設計

ビームスプリッタの大きさ b 、ディスプレイの縦の大きさ d_h 、装置から空中像の飛び出し距離 l から、その他の各変数は以下のように計算で求められる。ビームスプリッタからディスプレイまでの距離 s は、

$$s = \sqrt{l^2 + d_h^2}$$

で計算できる。ビームスプリッタ、ディスプレイの傾きはそれぞれ、

$$\theta_b = \arctan \frac{l + s}{d_h}$$

$$\theta_d = 2b - 90^\circ$$

で計算できる。

また、空中像からユーザの視点までの水平距離を c としたとき、垂直方向における、空中像接地面を基準としたときのユーザの視野角 $h_{min} - h_{max}$ は以下のように計算できる。

$$h_{min} = \frac{d_h(l + c)}{l} \quad (1)$$

$$h_{max} = \frac{bc \sin \theta_b}{l - b \cos \theta_b} \quad (2)$$

さらに、ディスプレイの横の長さを d_w としたとき、左右に鏡を用いない場合の水平方向の視野角 θ'_c と、用いる場合の水平方向の視野角 θ_c は以下から計算できる。

$$A = s - d_h \cos \theta_d + l$$



図 3 実装した卓上空中像光学系の写真

Fig. 3 Photograph of mounted tabletop aerial image optics

$$B = b - d_w$$

$$C = \sqrt{4A^4 d_w^2 - (B^2 + 4A^2)(A^2 d_w^2 - c^2 B^2)}$$

$$\theta'_c = 2 \arctan \frac{B(2A^2 d_w - C)}{-B^2 A d_w - 2AC} \quad (3)$$

$$D = \sqrt{4l^4 d_w^2 - (B^2 + 4l^2)(l^2 d_w^2 - c^2 B^2)}$$

$$\theta_c = 2 \arctan \frac{B(2l^2 d_w - D)}{-B^2 l d_w - 2lD} \quad (4)$$

以上を利用して、 $b = 250 \text{ mm}$ 四方のビームスプリッタ、 $d_w = 118 \text{ mm}$ 、 $d_h = 90 \text{ mm}$ のディスプレイを用い、空中像が装置から $l = 120 \text{ mm}$ 飛び出すプロトタイプを図 3 のように作成した。空中像から視点までの距離は、先行研究 [15] では腕を伸ばして対象を操作する際の最適距離は、腕の長さを L とした際に $0.4L \sim 0.8L$ とされていることを参考に、日本人青年女性の腕の長さ $L = 673 \text{ mm}$ [16] を想定し、 $c = 0.6L = 400 \text{ mm}$ とした。この条件において、式 1, 2, 4 から $h_{min} = 393 \text{ mm}$ 、 $h_{max} = 1947 \text{ mm}$ 、 $\theta_c = 48.8^\circ$ となり、想定視点位置をカバーできることがわかる。

3.2 インタラクションシステム構成

図 4 に提案光学系を用い、タッチパネルでのタッチ操作によって空中像とのインタラクションを実現するためのシステム構成を示す。システムでは 1 台のコンピュータから空中像表示用ディスプレイとタッチパネルにそれぞれ映像を出力する。タッチパネルには RICOH 社の有機 EL モバイルモニター RICOH Portable Monitor 150 を用い、コンピュータと USB で接続することでタッチ情報と映像情報を伝送する。空中像用ディスプレイには Wisecoco 社製の高さ 120 mm 幅 60 mm の有機 EL フレキシブルディスプレイを用いた。コンピュータでは Unity3D で実装したアプリケーションを動作させる。アプリケーションは空中像で表示したいオブジェクトと床面や照明を含めた周辺環境のオブジェクトを仮想空間内に保持する。従来検討 [7] と同様に、タッチパネル上に仮想空間内の照明位置に応じた

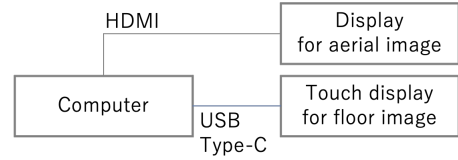


図 4 システム構成

Fig. 4 System configuration

空中像の影を表示することで実在感向上を図る。さらに、タッチパネルでのタッチ検出によって周辺環境オブジェクトを操作することでユーザの操作を空中像へ間接的に反映させる。

タッチ操作による空中像との間接的なインタラクションの種類として、コンテンツの【選択】、ステージを介した空中像の【回転】、照明の位置を変更する【環境制御】の 3 パターンを実装した。図 1 に、実装したシステムにおける空中像とのインタラクション例を示す。初期状態ではタッチパネル上に複数のコンテンツアイコンが表示されている(図 1 右側のシルエット)。ユーザは空中像として視聴したいコンテンツをタッチ操作によって選択できる。選択されたコンテンツはタッチパネル中央のステージ上に空中像で表示される(図 1 中央のティラノサウルス)。ステージは空中像と連動しているため、ユーザはステージに指先でタッチして回転させることで空中像を回転させ、所望の角度から観察できる。また、タッチパネル上のライトのアイコンをドラッグすることで、空中像に対する照明の位置をタッチパネル上で自由に変更できる。本提案システムによってユーザはコンテンツの選択、回転、環境制御といった操作を、使い慣れたタッチパネル上で実現できる。

4. 評価

以下ではプロトタイプを用いて空中像の輝度と視野角を実測し、光学系設計における理論値との差分を評価する。

4.1 空中像の輝度

提案光学系においてタッチパネルに貼合した反射偏光の効果の評価するため、光源となるディスプレイの輝度と、反射偏光フィルムを貼合したタッチパネル上に結像される空中像の輝度、タッチパネルの代わりとしてガラス表面鏡とアクリルミラーを用いた際にそれぞれ結像される空中像の輝度を測定した。輝度計はコニカミノルタ製の CS-100 輝度計を用い、空中像正面の想定視点位置である $c = 400 \text{ mm}$ 、高さ 400 mm に配置した。

測定の結果、反射偏光フィルムを貼合したタッチパネル上の空中像の輝度は、ディスプレイの輝度に対して 10.2% であった。また、表 1 に反射偏光フィルムを用いた空中像の輝度を 1 とした際の、各素材の空中像の輝度比率を示す。この表からガラス表面鏡はアクリルミラーよりも輝度の高

表 1 反射偏光フィルムを貼合したタッチパネル上の空中像の輝度に対する各反射面上の空中像の輝度比率

Table 1 Ratio of the luminance of the aerial image on each reflective surface to the luminance of the aerial image on the touch panel to which the reflective polarizing film is attached

反射面の素材	輝度比率
反射偏光フィルムを貼合したタッチパネル	1.0
ガラス表面鏡	0.90
アクリルミラー	0.74

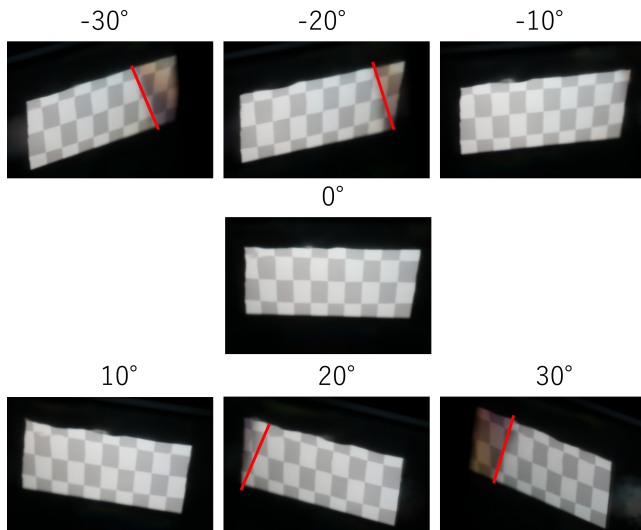


図 5 各視聴角度における空中像の様子。ただし、 $\pm 30^\circ$ の空中像は端が欠けている。

Fig. 5 View of aerial image at each viewing angles. However, the aerial image of $\pm 30^\circ$ is missing at the edges.

い空中像を表示でき、反射偏光はガラス表面鏡に対しても高い輝度の空中像を表示できることがわかる。

4.2 視野角の拡大効果

本提案光学系において式 3, 4 より、左右に鏡を配置することで視野角の理論値は $\pm 9.8^\circ$ から $\pm 24.4^\circ$ へと 2 倍以上に拡大される。視野角拡大の効果をプロトタイプを用いて確認した。想定した視点位置である $c = 400 \text{ mm}$ 、高さ 400 mm を保ち、正面を 0° として視聴角度 $-30^\circ \sim 30^\circ$ の範囲で 10° 毎に写真を撮影した。

結果の写真を図 5 に示す。写真内の赤線は左右の鏡によって反射された空中像の境目を示すために、画像編集によって追加した線である。 $\pm 10^\circ$ の範囲では左右の鏡に映る領域はないものの、 $\pm 20^\circ$ では左右の鏡によって空中像の表示範囲が拡大されていることがわかる。また、 $\pm 30^\circ$ では空中像の端が見切れており、左右の鏡による視野角の拡大範囲から外れているが、これは理論値の $\pm 24.4^\circ$ から大きく矛盾しない。

5. 考察

提案光学系の輝度評価結果について考察する。光源のディスプレイに対する空中像の輝度効率の実測値は、理論値 50% に対してその $1/5$ ほどであった。この要因として、ディスプレイの偏光の偏りや、再帰性反射材の反射効率、ビームスプリッタでの反射や透過の際の輝度減衰が考えられる。特に再帰性反射材とビームスプリッタに起因する要因は今後の各素子の改良による改善が期待される。

表 1 より、アクリルミラー、表面鏡、反射偏光フィルム付きタッチパネルの比較において、反射偏光フィルムが最も空中像の輝度が高くなった。反射率と透過率が $5:5$ の理想的なハーフミラーを想定した場合でも、空中像の輝度効率は表面鏡の 50% となることを考慮すると、提案手法は反射偏光フィルムを使うことで卓上空中像の輝度をほとんど損失することなく、タッチパネルによる底面映像やタッチ検出機能を付与できる構成と言える。

空中像の視野角について、提案光学系では装置内面の左右に鏡を入れることによる視野角拡大の効果が確認できた。図 5 では空中像の中央と、左右の鏡に反射されて拡張された像に輝度差が確認できる。この要因として今回のプロトタイプの実装に用いたアクリルミラーの反射率の低さが考えられ、今後反射率のより高い鏡の使用による改善が期待される。また、視野角をさらに拡大するためには、梶田ら [14] の手法のように空中像の側面まで鏡を延長させることが有効である。一方で、空中像の至近まで光学系が延長され光学系の存在感が強まることから、必要な視野角とのトレードオフを考慮した設計が必要である。

6. アプリケーション

提案手法のアプリケーションとして、卓上でバーチャルキャラクターを表示してバーチャルライブなどを楽しむエンターテインメント分野や、図鑑を机で読むように卓上でコンテンツが 3D で飛び出してくる教育分野が考えられる。図 6(a) は博物館での利用を想定した教育向けのコンテンツ例である。このコンテンツでは恐竜（モササウルス）の復元モデルを空中像で観察できる。タッチパネルにはモササウルスの生息環境を連想させるよう、海底を模した映像を表示した。このように提案手法では空中像だけでなく空中像と連動した背景を表示することでより多くの情報を伝えることができる。ユーザはタッチパネルの操作によって光源位置を移動させることで、より詳細に観察したい部分を照らすといった双方向の視聴体験を提供できる。

図 6(b) はバーチャルアイドルのライブ視聴を想定したエンターテインメント向けのコンテンツ例である。ユーザはステージを回転させることで空中像の角度を変更できるため、様々な角度からキャラクターのダンスを楽しむこと

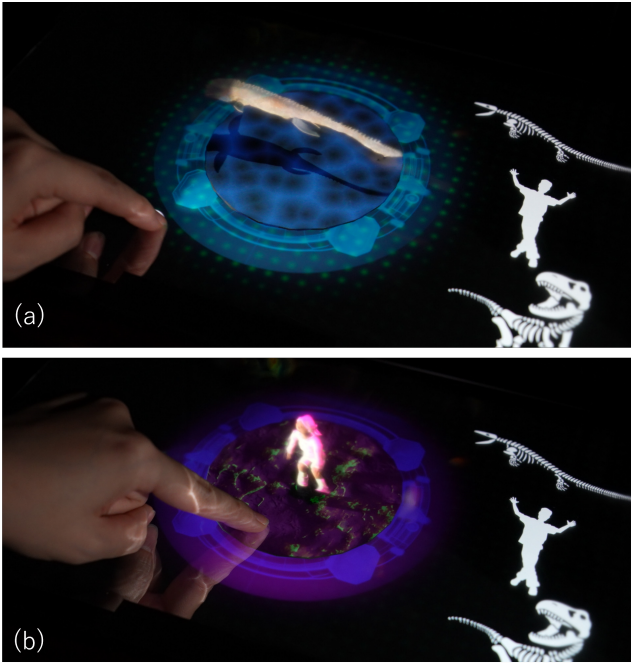


図 6 アプリケーション例
Fig. 6 Examples of the application

ができる。また、提案手法は水平方向の視域が拡張されているため、リビングテーブルに置いた本装置で家族でバーチャルライブを同時に楽しむといった体験も提供できると考えられる。

7. 結論

我々は、タッチパネル上に直立する空中像を表示する卓上空中像光学系と、タッチパネルの操作で間接的に空中像とインタラクションできるシステムを提案・実装した。プロトタイプを用いた評価の結果、提案光学系は偏光を利用することで光源のディスプレイの輝度を効率的に活用できることと、鏡を組み込むことで水平方向の視野角が2倍以上広がることを確認された。今回実装したインタラクション手法は、タッチパネルの操作によってコンテンツ選択や空中像の回転、照明位置変化を行うものであるが、空中像との間接的なインタラクションには他にもコンテンツに応じた複数のバリエーションが考えられる。今後は空中像に直接タッチする手法や実物体を介するインタラクション手法も含めて体系化し、空中像とのより自然なインタラクション手法を探求したい。

参考文献

- [1] Hirotugu Yamamoto, Yuka Tomiyama, and Shiro Suyama. Floating aerial led signage based on aerial imaging by retro-reflection (airr). *Opt. Express*, Vol. 22, No. 22, pp. 26919–26924, Nov 2014.
- [2] Satoshi Maekawa, Kouichi Nitta, and Osamu Matoba. Transmissive optical imaging device with micromirror array. In Bahram Javidi, Fumio Okano, and Jung-Young Son, editors, *Three-Dimensional TV, Video, and Dis-*

- play V*, Vol. 6392, p. 63920E. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2006.
- [3] M.Otsubo. Optical imaging method using the same, 2014. U.S. Patent No.8,702,252.
- [4] 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, 2016.
- [5] Ayami Hoshi, Shunji Kiuchi, and Naoya Koizumi. Simulation of mid-air images using combination of physically based rendering and image processing. *Optical Review*, Vol. 29, No. 2, pp. 106–117, 2022.
- [6] Naoya Koizumi and Ayaka Sano. Optical system to display mid-air images on a glossy plane and remove ground images. *Opt. Express*, Vol. 28, No. 18, pp. 26750–26763, Aug 2020.
- [7] Motohiro Makiguchi, Ayami Hoshi, Ayaka Sano, Hiroshi Chigira, and Takayoshi Mochiduki. Vertical aerial imaging on the display. In *Proceedings of the 2023 ACM Symposium on Spatial User Interaction, SUI '23*, New York, NY, USA, 2023. Association for Computing Machinery.
- [8] 竹内勇剛, 上杉繁, 寺田和憲, 片上大輔. インタラクションのミニマムデザイン. *ヒューマンインタフェース学会論文誌*, Vol. 15, No. 1, pp. 1–14, 2013.
- [9] Li-Wei Chan, Ting-Ting Hu, Jin-Yao Lin, Yi-Ping Hung, and Jane Hsu. On top of tabletop: A virtual touch panel display. In *2008 3rd IEEE International Workshop on Horizontal Interactive Human Computer Systems*, pp. 169–176, 2008.
- [10] Tomoyo Kikuchi, Yuchi Yahagi, Shogo Fukushima, Saki Sakaguchi, and Takeshi Naemura. [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, 2023.
- [11] Motohiro Makiguchi, Ayaka Sano, Takahiro Matsumoto, Hiroshi Chigira, and Takayoshi Mochiduki. Implementation of interactive mirror-transcending aerial imaging system. In *Proceedings of the 2023 ACM Symposium on Spatial User Interaction, SUI '23*, New York, NY, USA, 2023. Association for Computing Machinery.
- [12] Hanyuool Kim, Issei Takahashi, Hiroki Yamamoto, Satoshi Maekawa, and Takeshi Naemura. Mario: Mid-air augmented reality interaction with objects. *Entertainment Computing*, Vol. 5, No. 4, pp. 233–241, 2014.
- [13] 小泉直也, 簾内統賀. タッチスクリーンによる空中像インタフェースの基礎検討. *インタラクション 2017 論文集*, pp. 436–439, 2017.
- [14] Hajime Kajita, Naoya Koizumi, and Takeshi Naemura. Skyanchor: Optical design for anchoring mid-air images onto physical objects. pp. 415–423, 2016.
- [15] Dimitar Valkov, Frank Steinicke, Gerd Bruder, and Klaus Hinrichs. 2d touching of 3d stereoscopic objects. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1353–1362, 2011.
- [16] Mariko Kouchi and Masaaki Mochimaru. Japanese 3-D body shape and dimensions data 2003, H18PRO-503. <https://www.airc.aist.go.jp/dhrt/fbodydb/index.html>, 2003. [Online; accessed 22-December-2023].