

奥行き方向へ高速に移動する空中像を提示する光学系

大里 柚衣[†] 小泉 直也^{†,‡}

[†] 電気通信大学情報理工学研究科 〒183-0021 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1
[‡] 独立行政法人科学技術振興機構さきがけ 〒332-0012 埼玉県川口市本町 4-1-8
E-mail: [†] osato@media.lab.uec.ac.jp, [‡] koizumi.naoya@uec.ac.jp

あらまし デジタルサイネージは、様々な場面や時間帯に適したコンテンツを配信することができるため、広く使われてきている。デジタルサイネージの表示手法の一つとして考えられる空中像は、物理ディスプレイではなく、映像のみが3次元空間を動き回る表現を可能にする。本研究では空中像が3次元空間を移動する際の、奥行き方向の移動に着目する。奥行き方向への空中像の移動は、光源となるディスプレイの位置を動かす手法の他に、光源となるディスプレイの虚像の位置を鏡の移動によって動かす手法が考えられる。本研究では、空中像の奥行き移動の表現手法の一つである、光源の虚像を移動させる手法について検討する。提案する光学設計では、鏡を用いて光源の虚像を生成し、鏡と光源をモータで回転させて、光源の虚像を高速に移動させることで、空中像の移動を実現した。プロトタイプを製作した後、理論値通りの位置に空中像が提示できるかを確認し、空中像の奥行き方向の移動速度を計測した。

キーワード 複合現実感, 空中像, 奥行き方向の高速移動

Optical system that forms a mid-air image moving at high speed in the depth direction

Yui OSATO[†] and Naoya KOIZUMI^{†,‡}

[†] Department of Informatics, The University of Electro-Communications 1-5-1 Chofugaoka, Chofu, Tokyo, 182-8585 Japan

[‡] JST PREST, 4-1-8, Honcho, Kawaguchi, Saitama, 332-0012

E-mail: [†] osato@media.lab.uec.ac.jp, [‡] koizumi.naoya@uec.ac.jp

Abstract Mid-air imaging technology expresses how virtual images move about in the real world. A conventional mid-air image display using a retro-transmissive optical element moves a light source the distance a mid-air image is moved. In conventional mid-air image displays, the linear actuator that moves a display as a light source makes, the system large. In order to solve this problem, we designed an optical system that realizes high-speed movement of mid-air images without a linear actuator. We propose an optical system that moves the virtual image of the light source at a high speed by generating the virtual image of the light source with a rotating mirror and light source by the motor.

Keywords Augmented reality, mid-air imaging, high-speed movement in depth direction.

1. はじめに

様々なコンテンツを配信することができるデジタルサイネージは、大型ディスプレイの普及によって広く使われてきている。さらに、デジタルサイネージは、広告以外にも、公共空間を彩る手段としても用いられるようになった。デジタルサイネージの表示手法として、大型ディスプレイを設置する手法と、Spatial Augmented Reality(SAR)を実現できる技術を用いた手法に分けられる。SARでは、現実世界に情報や映像を重畳して、空間を彩ることができる。SARを実現できる、プロジェクションマッピングや透明スクリーンを用いたデジタルサイネージも増えてきている。

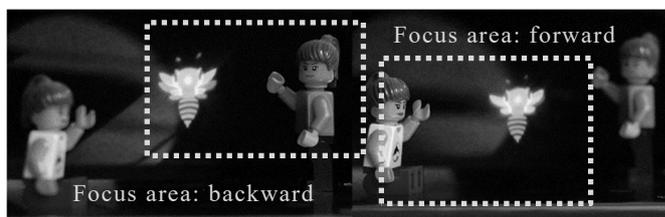


図 1: (左図) MMAPs から 155 mm の位置に結像する空中像(右図) MMAPs から 220 mm の位置に結像する空中像

SARは、現実世界に重畳した情報を見る時に、装置を身に着ける必要がない[1]ため、デジタルサイネージの表示技術として適している。

デジタルサイネージによく用いられ、SARを実現する手法には、プロジェクションマッピングが挙げられる。例えば、YOYOGI CANDLE 2020[2]では、ビルに映像を投影し、スポーツの新たなパブリックビューイングの形を提案している。実物体上に映像を投影し、実物体の表面を彩ることが可能であるが、映像は実物体の表面上にのみ表示される。プロジェクションマッピングでは、実物体の周りの空間を彩る表現が難しい。

SARを実現する手法の一つとして考えられる空中像では、物理ディスプレイではなく、映像のみが3次元空間を動き回る表現が可能である。空中像とは、光源からの光が反射・屈折し、空中に結像した実像のことである。空中像が3次元空間を移動するためには、垂直方向と水平方向への移動手法、奥行き方向の移動手法が用いられる。垂直方向と水平方向への移動は、光源となるディスプレイ内の表示位置の移動によって可能である。奥行き方向への空中像の移動は、光源となるディスプレイの位置を動かす手法の他に、光源となるディスプレイの虚像の位置を、鏡の移動によって動かす手法が考えられる。

本研究は、空中像の奥行き移動の表現手法の一つである、光源の虚像を移動させる手法について検討する。

2. 関連研究

空中像を提示させる方法として、Aerial Imaging by Retro-Reflection (AIRR) [2], Dihedral Corner Reflector Array (DCRA) [4], Micro-Mirror Array Plates (MMAPs) がある。これらの手法を用いた際、空中像が結像する位置は、光源の位置に依存するため、空中像が移動する距離は、光源が移動する距離と一致する。本研究では、簡単に手に入れることができる MMAPs であるアスカネット社製の Aska3D を利用した。

空中像の奥行き方向の移動を実現するために用いられる光源を移動させる手法には、リニアアクチュエータを用いる手法と、ユーザが光源を移動させる手法がある。従来の空中像提示手法において、空中像の移動速度は、光源の移動速度に依存している。

空中像によって、物理ディスプレイではなく、映像のみが3次元空間を動き回ることができるため、様々な表現が可能になった。Kimら[5]は MARIO を提案している。ひよこのキャラクターがブロックからブロックへ飛び移る表現を行っている。MMAPs を地面に対して $\pi/4\text{rad}$ に傾けて、光源となるディスプレイを地面と平行になるように設置している。リニアアクチュエータを用いて、ディスプレイを地面に対して垂直方向に移動させることで、空中像を奥行き方向へ移動させている。それによって、CG キャラクターが、3次元空間上を動き回っているような表現ができる。ユーザは CG

キャラクターに対して、ただの映像では示さない反応を示している。Katsumotoら[6]は、空中像を球に見立ててピンポンゲームを実現する HoverTablePONG を提案している。テーブル型のデバイスに対し垂直になるように空中像を提示し、その空中像がテーブル上を飛び回る表現を行っている。空中像結像のために、MMAPs を机面として用いて、光源となるディスプレイを地面に対し垂直に立てて設置している。空中像を移動させるために、XYプロッタを用いてディスプレイを移動させている。これによって、ボールが3次元空間上を跳ね回っている表現が可能になる。映像が3次元空間内を飛び回することは、多様な映像表現につながるため、様々なコンテンツを配信するデジタルサイネージの発展を期待できる。

梶田ら[7]は、実物体の高速移動に対して空中像を固定する光学系 SkyAnchor を提案している。物体に光源を取り付け、空中像光学系と組み合わせることで、物体及び光源を一緒に動かし、空中像を常に物体に一体化して表示する。物体の動きに対して時間遅れがないため、非常に高速な空中像移動を実現できる。ただし、空中像の移動を人力で行っており、アクチュエータの組み込みによる自動的な動きを実現できていない。

3. 提案手法

提案する光学設計では、鏡を用いて光源の虚像を生成し、鏡と光源をモータで回転させて、光源の虚像を高速に移動させることで、空中像の移動を実現した。

3.1. 光学設計

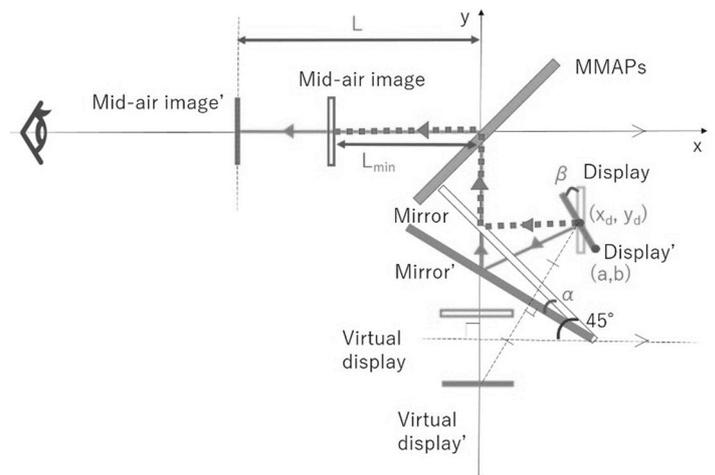


図 2: 提案する光学設計

図 2 は、本研究の提案する光学設計を示す。MMAPs を地面に対し $\pi/4\text{rad}$ に設置する。空中像 (Mid-air image) を表示するために、光源となるディスプレイ (Display) を地面に対し垂直、鏡 (Mirror) を地面に対し $\pi/4\text{rad}$ に傾けて設置する。空中像 (Mid-air image') を表示するために、鏡を地面に対し $\pi/4\text{rad}$ から α だけ傾ける (Mirror')

と同時に、光源となるディスプレイを β だけ傾ける (Display')。光源のディスプレイと鏡の回転により、光源の虚像は、地面に対して垂直に移動することが可能である。

3.2. 光源と鏡の回転角度の計算

空中像を移動する光学設計として、図 3 のようにリニアアクチュエータを用いて、光源を移動させる光学設計と、提案手法の光源の虚像を移動させる光学設計を比較する。光学系の大きさと、空中像の奥行き方向の移動速度を検討項目とした。

リニアアクチュエータを用いた光学設計で、空中像と MMAPs 間の距離が大きくなった場合、装置全体が長くなってしまふ。この光学設計では、光源となるディスプレイと MMAPs 間の距離は、空中像と MMAPs 間の距離と等しい。そのため、空中像を装置から大きく飛び出させようとする、ディスプレイを移動させるリニアアクチュエータが長くなってしまふ。提案手法では、光源の虚像と MMAPs 間の距離は、空中像と MMAPs 間の距離と等しい。そのため、鏡を回転させる分、光学系の高さは、リニアアクチュエータを用いた場合と比較して低くなる。さらに、リニアアクチュエータを用いないため、提案する光学設計の方が小型になると見込める。

空中像と MMAPs の距離の範囲を L_{\min} から L として、光源となるディスプレイと鏡の回転角度を求めた。

まず、空中像から MMAPs の距離を L_{\min} にする (Mid-air image を表示する) ときを考える。Mirror は地面に対して $\pi/4\text{rad}$ 傾ける。これは、鏡がユーザ側に飛び出す距離 (図 3 の D_m) を短く、 L と L_{\min} の差を大きくするためである。Mirror を $\pi/4\text{rad}$ に傾けるとき、Virtual Display を地面と水平にするため、Display は地面と垂直にした。

つぎに、空中像から MMAPs の距離を L にする (Mid-air image' を表示する) とき、鏡を傾ける角度を αrad とする。光源の中心の位置の座標を (x_d, y_d) とする。Mirror' を示す線分の傾きは、MMAPs の中心から地面に垂直に落とした直線と Virtual display' の交点及び、光源の中心の位置の垂直二等分線の傾きである。空中像から MMAPs の距離を L とするとき、鏡を傾ける角度は、Mirror と Mirror' のなす角である。数式(1)は、鏡を傾ける角度 α を表す。各パラメータは、図 2 によって示される。

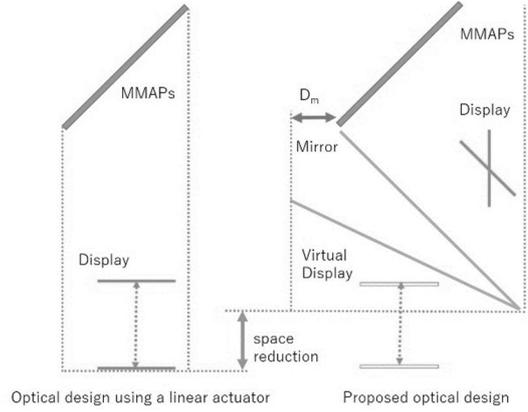


図 3: リニアアクチュエータを用いた光学設計と提案する光学設計

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{y_d + L - x_d}{y_d + L + x_d} \right) \quad (1)$$

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{a - x_d}{y_d - b} \right) \quad (2)$$

$$y_v = \frac{1}{2(k^2+1)} \left(4kx_d + 2(k^2-1)y_d + (1-k^2)L_d \cos\left(\frac{\omega\beta}{\alpha}\right) + 2L_d k \sin\left(\frac{\omega\beta}{\alpha}\right) + 4y_m - 4kx_m \right) \quad (3)$$

$$y_v' = \frac{1}{2(k^2+1)} \left(4kx_d + 2(k^2-1)y_d + (k^2-1)L_d \cos\left(\frac{\omega\beta}{\alpha}\right) - 2L_d k \sin\left(\frac{\omega\beta}{\alpha}\right) + 4y_m - 4kx_m \right) \quad (4)$$

$$y_v - y_v' = \frac{2L_d(1-k^2) \cos\left(\frac{\omega\beta}{\alpha}\right) - 4L_d k \sin\left(\frac{\omega\beta}{\alpha}\right)}{2(k^2+1)} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\tan\left(\frac{\beta}{\alpha}\right)}{\tan(2\omega)} = 1 \quad (6)$$

空中像から MMAPs の距離を L にする (Mid-air image' を表示する) とき、光源を傾ける角度を βrad とする。光源上の座標 (a, b) は、Virtual display' 上のある一点が、Mirror' で線対称移動した点の座標とする。空中像と MMAPs の距離を L にするときの光源を示す Display' は、光源の中心位置と、線対称移動した光源上の点 (a, b) を通る。光源を傾ける角度 β は、Display' と Display のなす角である。数式(2)は、光源を傾ける角度 β を表す。

さらに空中像を結像する面が、地面と垂直である状態を保ちながら移動するような、鏡の回転角度 α とディスプレイの回転角度 β の条件を求める。まず、空中像が地面に対して垂直であるとき、光源となるディスプレイの虚像が、地面と水平を保ったまま移動する必要がある。そこで、虚像の端の座標の y 座標から、もう一方の端の座標の y 座標を引いた値が 0 になる条件を求めた。ディスプレイ下端の虚像の y 座標を y_v とし、数式(3)で示される。ディスプレイ上端の虚像の y 座標を y_v' とし、数式(4)で示される。 $y_v - y_v' = 0$ となっているとき、虚像は地面と水平になり、空中像は地面と垂直になる。 L_d はディスプレイの縦の長さである。空中像

が移動する間の鏡の傾きを k とする．鏡の傾きが k のとき，鏡は $\pi/4\text{rad}$ から ωrad 傾いているとする．数式(5)は， $y_v - y'_v = 0$ を表し，数式(3)から数式(4)を引いた式を表す．数式(5)中の $\omega\beta/\alpha$ は，鏡の傾きが k のとき，ディスプレイの回転角度である．数式(6)は，数式(5)を計算した結果を示す．数式(6)より，鏡の回転角度 α とディスプレイの回転角度 β は， $\beta/\alpha = 2$ が成立するような値である必要がある．さらに，鏡を α rad，ディスプレイを β rad まで回転させる間も，ディスプレイの回転角度が，鏡の回転角度の2倍を維持する必要がある．プロトタイプでは， α を $\pi/10\text{rad}$ ， β を $\pi/5\text{rad}$ として設計した．

3.3. 実装

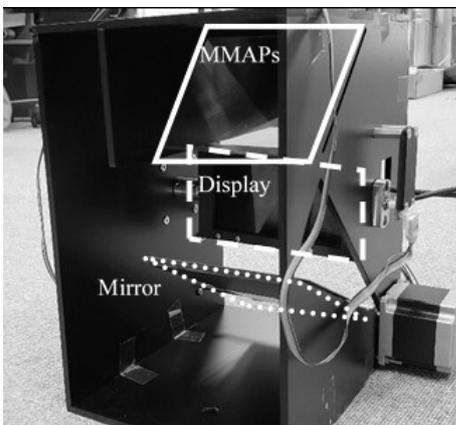


図 4: 実装したプロトタイプ

図 4 に，実装した様子を示す．MMAPs には，アスカネット社製の Aska3D（高さ 100mm，幅 125mm）を用いた．ディスプレイには，SHARP 社製の 5.5 インチ高精細 CG シリコン液晶パネルを用いた．鏡には，光社製のどこでもミラー粘着付を，5mm 厚のステンレスボードに貼り付けて用いた．アクチュエータには，STEPPERONLINE 社製の Nema 23 ステッピングモータを用いた．鏡，ディスプレイの回転角度のセンシングには，ams 社製の AS5600 を用いた．プロトタイプの大きさは，高さ 275mm，幅 290mm，奥行き 225mm である．

4. 実験

4.1. 空中像の結像位置の計測

提案する光学設計によって，理論値通りの位置に空中像が結像できるかを確認した．空中像の位置計測は，高橋ら[8]の空中像の位置計測手法を参考にした．

光源となるディスプレイの角度と鏡の角度を調整し，空中像の位置を計測した．空中像の位置と治具の位置を一致させ，治具の位置を計測することで，空中像の位置を計測した．治具内部に，和紙を拡散版として貼りつけた．空中像の表示面と和紙の面を平行にし

たとき，空中像の位置に和紙を設置すると，図 6 に示すように，和紙上に空中像が投影される．この時の位置を，空中像の位置として計測した．和紙に線の太さ 0.05mm の黒色の十字を印刷し，ディスプレイには，太さ約 0.64mm（解像度 2400×1350 ，寸法 $130\text{mm} \times 71\text{mm}$ の画面上で 10 ピクセル）の黄色い十字を表示した．

空中像の位置計測のため，治具を 1mm 方眼紙が貼られているジャッキの上に乗せた．治具の x 軸座標を 1mm 方眼紙のマス目から読み取り，治具に乗せたジャッキの高さを治具の y 軸座標として計測した．治具の土台部分に中心が分かるような印をつけ，空中像の中心とした．実験の様子を図 5 に示す．

鏡を傾ける角度とディスプレイを傾ける角度が， $(0,0)$ ， $(\pi/60, \pi/30)$ ， $(\pi/30, \pi/15)$ ， $(\pi/20, \pi/10)$ ， $(\pi/15, 2\pi/15)$ ， $(\pi/12, \pi/6)$ ， $(\pi/10, \pi/5)$ の組み合わせになるように傾け，それぞれ 5 回ずつ計測した．3.2 で述べたように，ディスプレイを傾ける角度が鏡を傾ける角度の 2 倍になるようにした．

ディスプレイの角度，鏡の角度は，磁気エンコーダによって測定した．ディスプレイ，鏡のそれぞれの回転軸に，ネオジウム磁石を取り付けた．その先に，磁気エンコーダを取り付けて，アナログ出力で角度を読み取った．

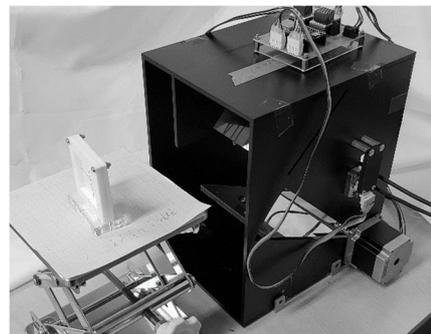


図 5: 実験の様子



図 6: 空中像が治具内部の和紙で拡散する様子

4.2. 空中像の結像位置の計測の結果, 考察

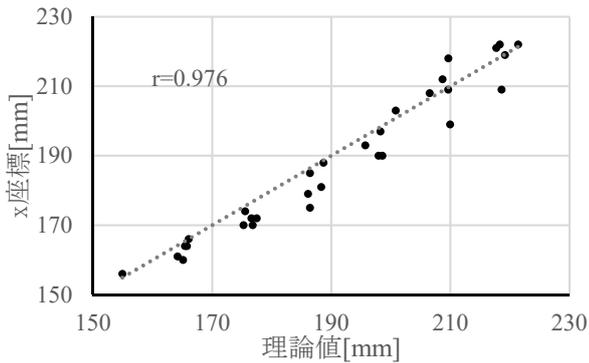


図 7: 空中像の x 座標

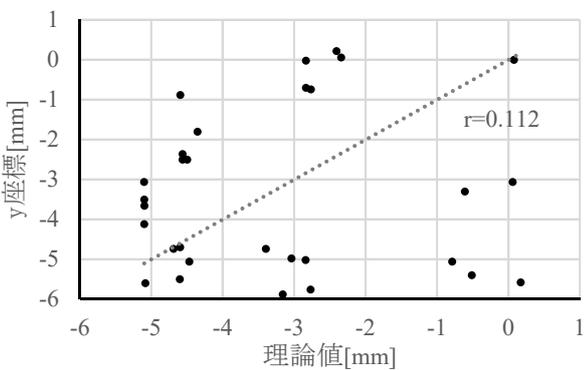


図 8: 空中像の y 座標

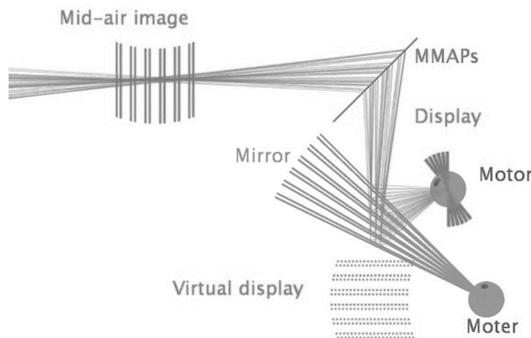


図 9: 計算によって導かれた空中像の動き

図 7 に実測した空中像の x 座標と、x 軸上の空中像結像位置の理論値との相関図を示す。横軸は、実験で測定した鏡の角度から計算した、空中像の位置の理論値を示す。縦軸は、x 座標を示す。プロットの x 座標は、実験で測定した実測値とする。点線の x 座標は、理論値の x 座標とする。点線は、仮に本プロトタイプで理論値通りの位置に結像できた時の回帰直線である。

図 8 に実測した空中像の y 座標と、y 軸上の空中像結像位置の理論値との相関図を示す。グラフの見方は図 7 と同じである。計算によって導かれる空中像の移動は、図 9 に示すように、弧を描くことが分かっている。しかし、実際には、空中像が MMAPs から遠い

位置になった場合でも、空中像の y 座標は、図 9 のように上昇することはなかった。

空中像の x 軸上の位置では、実測値と計測値の相関係数は、0.976 であり、強い相関が見られた。最大誤差は、11.4mm であった。空中像の y 軸上の位置では、実測値と計測値の相関係数は、0.119 であり、相関が見られなかった。最大誤差は、5.75mm であった。空中像の奥行き方向(x 軸方向)の移動では、計算式で導いたように、ユーザ側に空中像の結像位置を移動させることができた。しかし、y 軸方向の移動では、計算式で導いたような、空中像の結像位置の移動ができなかった。

空中像の x 軸上の位置計測の時に、空中像の結像位置が MMAPs から遠ざかるにつれて、図 7 のように空中像の x 座標のばらつきが大きくなってしまった。その原因として、空中像と MMAPs の距離が大きくなると、和紙上に結像している像がボケてしまい見えにくくなることが挙げられる。これは、空中像を MMAPs から遠い位置に結像しようとする時、空中像の解像度が低くなってしまふ。さらに、空中像と MMAPs の距離が大きくなるにつれて、空中像の輝度が低くなってしまふため、視認が難しくなってしまった。最も空中像が MMAPs から遠い時の空中像の輝度は、最も空中像が MMAPs から近い時の空中像の輝度の半分以下になることを、本プロトタイプで確認した。空中像が和紙上に結像している様子が見えにくくなってしまったことが、空中像の位置と、治具の位置との一致ができていなかった原因だと考えられる。

空中像を y 軸方向で移動させるときに、計算通りに空中像の結像位置を移動できなかった原因として、ディスプレイの角度を正確に把握することが難しいことが挙げられる。今回の実験では、鏡とディスプレイの回転軸にネオジウム磁石の中心を合わせることで及び、ネオジウム磁石と磁気エンコーダの位置を合わせることで 2 点が難しかった。そのため、エンコーダで読み取った鏡とディスプレイの回転角度が、正確な回転角度と異なってしまった可能性がある。さらに、本プロトタイプでは、鏡の角度は目視で確認できるが、ディスプレイの角度は、目視による確認が難しい。そのため、実験中にディスプレイの回転軸が、エンコーダによって回転することが確認できたが、実際にディスプレイが正確に回転していたかを確認することができなかった。鏡とディスプレイの傾きを計測するために、分度器を用いる手法が正確であると考えられる。しかし、装置の構造上、鏡やディスプレイの面に、分度器を置くことが難しい。そのため、測定誤差を小さくするためには、鏡とディスプレイの角度の正確な測定手法を用意する必要がある。

4.3. 奥行き方向へ空中像の移動速度の計測

プロトタイプを用いて、空中像の奥行き方向の移動速度を計測した。空中像が MMAPs から最も近い位置から、MMAPs から最も遠い位置までの移動距離を 4.1 の実験結果から求めた。5 回分の実験結果から平均を計算し、空中像の移動距離とした。移動速度の計測には、960fps のハイスピードカメラを用いた。空中像が、MMAPs から最も近い位置から、最も遠い位置まで移動する間のフレーム数を計測した。そのフレーム数から移動時間を計算し、移動速度を算出した。

4.1 の実験の平均移動距離は 62.6mm、フレーム数は、71 フレームだったため、移動時間は 74ms であった。これらより、プロトタイプの最高移動速度は、846mm/s と算出した。MARIO[5]では、最高速度 450mm/s のリニアアクチュエータを用いて、300mm/s で空中像を提示していた。提案手法の移動速度は、十分に速い移動速度であることを確認した。

5. まとめ

デジタルサイネージの表示手法の一つとして有望な空中像では、物理ディスプレイではなく、映像のみが 3次元空間を動き回る表現が可能である。本研究では空中像が 3次元空間を移動する際の、奥行き方向の移動に着目した。奥行き方向への空中像の移動は、光源となるディスプレイの位置を動かす手法の他に、光源となるディスプレイの虚像の位置を動かす手法が考えられる。本研究は、空中像の奥行き移動の表現手法の一つである、光源の虚像を移動させる手法について検討した。提案する光学設計では、鏡を用いて光源の虚像を生成し、鏡と光源をモータで回転させて、光源の虚像を高速に移動させた。提案する光学設計によって、理論値通りの位置に空中像が提示できるかを確認するため、計算で導き出された空中像の位置と、実測した空中像の位置を比較した。空中像の x 軸上の位置では、実測値と計測値の相関係数は、0.976 であり、強い相関が見られた。最大誤差は、11.4mm であった。空中像の y 軸上の位置では、実測値と計測値の相関係数は、0.119 であり、相関が見られなかった。空中像の奥行き方向(x 軸方向)の移動では、計算式で導いたように、ユーザ側に空中像の結像位置を移動させることができた。しかし、y 軸方向の移動では、計算式で導いたような、空中像の結像位置の移動ができなかった。空中像の x 軸上の位置計測の時に、空中像の結像位置が MMAPs から遠ざかるにつれて、空中像の x 座標のばらつきが大きくなってしまった。空中像と MMAPs の距離が大きくなると、空中像が和紙上に結像している様子が見えにくくなることや、鏡とディスプレイの角

度の正確な測定を行えなかったことが、原因であると考えた。空中像を y 軸方向で移動させるときに、計算通りに空中像の結像位置を移動できなかった原因として、ディスプレイの角度を正確に把握することが難しいことが挙げられた。プロトタイプを用いて、空中像の奥行き方向の移動速度を計測した。プロトタイプの最高移動速度は、846mm/s であった。MARIO[5]では、最高速度 450mm/s のリニアアクチュエータを用いて、300mm/s で空中像を提示していた。そのため、提案手法の移動速度は、十分に速い移動速度であることを確認した。

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。

文 献

- [1] Oliver Bimber, and Ramesh Raskar, “Spatial Augmented Reality: Merging Real and Virtual Worlds,” A. K. Peters Ltd., 2005.
- [2] KAKEZAN INC., “YOYOGI CANDLE 2020 | KAKEZAN INC.,” KAKEZAN INC., <https://kakezan.co.jp/work/yoyogi-candle2020>, (参照 2019-02-16), 2017
- [3] H. Yamamoto, Y. Tomiyama, and S. Suyama, “Floating aerial LED signage based on aerial imaging by retro-reflection (AIRR),” Optics Express Vol. 22, Issue 22, pp. 26919–26924, 2014.
- [4] S. Maekawa, K. Nitta, and O. Matoba, “Transmissive optical imaging device with micromirror array,” Optics East 2006, Boston, Massachusetts, pp. 63920E–63920E, 2016.
- [5] H. Kim, I. Takahashi, H. Yamamoto, S. Maekawa, and T. Naemura, “MARIO: Mid-air Augmented Reality Interaction with Objects,” Entertainment Computing Volume 5, Issue 4, pp. 233–241, December 2014.
- [6] H. Katsumoto, H. Kajita, N. Koizumi, and T. Naemura, “HoVerTable PONG: Playing Face-to-face Game on Horizontal Tabletop with Moving Vertical Mid-air Image,” ACE '16 Proceedings of the 13th International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology Article No. 50, Osaka, Japan, 2016.
- [7] 梶田 創, 小泉 直也, 苗村 健, “SkyAnchor: 実物体の高速移動に対して空中像を固定表示する光学系,”日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 22 巻, 3 号, pp.413-420, September, 2017, ACM, Tokyo, Japan, pp. 415–423, 2016.
- [8] 高橋一成, 金ハンヨウル, 小泉直也, 苗村健, “複合現実感システムのための空中像と実物体の位置合わせ,” IEICE Technical Report, vol. 114, no. 73, pp. 123-128, June 2014