



# 空中像表示とその視点からの撮影が可能な光学系

土谷慧<sup>1)</sup>, 佐野文香<sup>1)</sup>, 小泉直也<sup>1,2)</sup>

- 1) 電気通信大学 (〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, {tsuchiya, sano, koizumi.naoya}@media.lab.ucc.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:** 本研究では, 空中像表示とその視点からの撮影が可能な光学系を提案し, その評価を行った. 空中像光学系によって CG キャラクターを現実空間に表示させたとき, このキャラクターとのインタラクションを成立させるためにキャラクター視点からの人の行動計測が必要となる. そこで空中像表示位置からの撮影手法を提案する. 具体的には, 空中像表示用ディスプレイと撮影用カメラをハーフミラーによって共役な位置に配置し, その 2 つを再帰透過光学素子によって光学的に転送する. 提案手法の評価として空中像の可視範囲とカメラの撮影可能範囲を検討した.

**キーワード:** 空中像, 再帰透過光学系, カメラ

## 1 はじめに

本研究では空中像キャラクターとのインタラクションを目的として, 空中像の表示とその視点からの撮影を実現する. 空中像とは, 光源から出た光が反射・屈折して結像することによって空中に表示される実像を指す. 空中像表示技術を用いることで, CG キャラクターをディスプレイから飛び出した位置に表示させることができる. 空中像キャラクターの魅力は, CG 独自の多彩な表現を現実空間に持ち出すことができる点であり, キャラクターとのインタラクションが可能となればその魅力がより強調される. 空中像キャラクターとのインタラクションを成立させるにはユーザーの行動計測が必要となる. 行動計測の理想形は, 空中像キャラクター自身が五感を持つことであると考え, 本研究では空中像キャラクターに視覚を付与する設計を構築した.

本稿では, 空中像表示位置から撮影することで, ユーザーの行動計測が可能な光学系を提案する. 空中像表示とカメラ視点位置の光学的転送を組み合わせることによって, 空中像を表示しつつその視点からの撮影を実現する. その設計として, 再帰透過光学素子とハーフミラーを使用した. ハーフミラーを用いて空中像表示用ディスプレイと撮影用カメラを共役な位置に配置し, その 2 つを再帰透過光学素子によって光学的に転送する. さらに, ユーザーの行動計測として顔検出機能を導入し, その検出可能範囲を評価することで本システムにおけるインタラクションに適した設計を求めた.



図 1 ユーザーと本システムで表示した空中像

## 2 関連研究

### 2.1 再帰透過光学系

再帰透過光学系は, 光源の光を反射・屈折させることによって空中に像を形成する光学系である. これを使うことで空中像を表示することができる. 再帰透過光学素子 (Micro Mirror Array Plates, MMAPs) として, Dihedral corner reflector array (DCRA) [1], Roof mirror array (RMA) [2], ASKA3D プレート[3]などが挙げられる. 再帰透過光学系で表示される空中像は裸眼で観察することが可能であり, 表示される像に手を伸ばすことができるという特徴がある. これらの特徴から, 再帰透過光学系は空中像インタラクションへの適用が容易であると言える.

### 2.2 空中像インタラクション

ユーザーの行動計測を利用し, 空中像とのインタラクションを成立させるシステムが複数提案されている. ここでは, 空中像キャラクターとのインタラクションを行う MARIO[4]と, 高速 2 眼カメラを用いた空中像インタラクションシステム[5]について述べる.

MARIO は空中像キャラクターがブロックの最も高い場

Kei TSUCHIYA, Ayaka SANO, and Naoya KOIZUMI

所に移動するシステムであり、ユーザーがブロックを動かすことによって空中像キャラクターとのインタラクションが行われる。そのために、ユーザーの頭上に設置された深度センサーによってブロックの高さを計測している。このシステムでは、ブロックの高さ情報しか扱うことができず、直接ユーザーの行動を計測することはできない。

高速2眼カメラを用いるシステムでは、指先で操作可能な空中像ディスプレイを実現している。ユーザーの頭上から高速2眼カメラで撮影することによって、ユーザーの指先をトラッキングする。このシステムでは指先の検出は可能だが、頭上から撮影する関係上、ユーザーの顔を撮影することはできない。

### 2.3 カメラ視点位置の光学的転送

GoThro[6]では MMAPs を用いてカメラ視点位置を光学的に転送する手法が提案されている。MMAPs を用いることで、カメラの転送位置の線形性を保ちつつ、フレネルレンズを用いたときに生じる映像の歪みを抑えることができる。さらに、カメラレンズと凹レンズを組み合わせることによって被写界深度の調整を可能としている。本稿ではこの光学系を援用し、空中像表示と組み合わせた。

## 3 提案

### 3.1 光学設計

本システムでは、GoThro の設計と空中像表示設計を組み合わせる。提案する光学設計を図 2 に示す。ディスプレイ、カメラ、凹レンズ、ハーフミラー、MMAPs (ASKA3D プレート) からなる。ディスプレイから出た光がハーフミラーで反射し、D' を結像する。D' がカメラレンズと重なるようにディスプレイ、カメラ、ハーフミラーを配置し、カメラレンズに凹レンズを取り付ける。D' の光が MMAPs で再帰透過して空中像を結像すると同時にカメラ視点位置が光学的に転送される。D' とカメラは共役に配置されてい

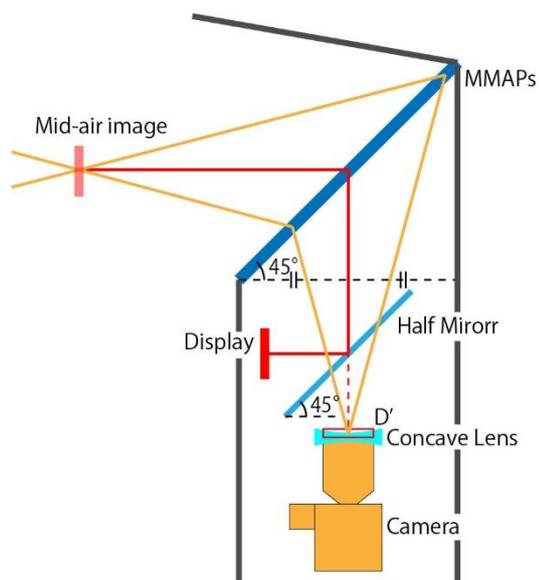


図 2 光学設計

るため、空中像表示位置とカメラ転送位置が重なり合う。こうして空中像の表示とその視点からの撮影が行われる。なお、MMAPs とハーフミラーはともに角度45°とし、MMAPs の中心とカメラレンズの中心が垂直に結ばれるようにカメラを配置した。また、外乱光の影響を抑えるために覆いを取り付けた。

### 3.2 実装

実装した様子を図 3 図 4 に示す。今回使用したディスプレイは SAMSUNG 製 Galaxy Note 8, カメラは本体が Sony 製  $\alpha$  7R II, レンズが Sony 製 SEL2470GM (焦点距離 24-70mm) である。凹レンズはケニス製 H-07 (焦点距離 250mm), ハーフミラーは Edmund Optics 製プレート型 B/S 50R/50T 127 X 178 MGF2 (透過率 50%, 反射率 50%), MMAPs は ASUKANET 製 ASKA3D プレート (サイズ 488mm×488mm, ピッチ幅 0.5mm) を使用した。カメラ映像はビデオキャプチャ (AverMedia 製 BU110) を経由して PC に取り込まれる。取り込まれた映像の解像度はフル HD (1920×1080) である。

## 4 評価

### 4.1 目的

本システムのインタラクションに適した設計を求めるため、カメラ映像を用いた顔検出が可能な範囲を検討する。

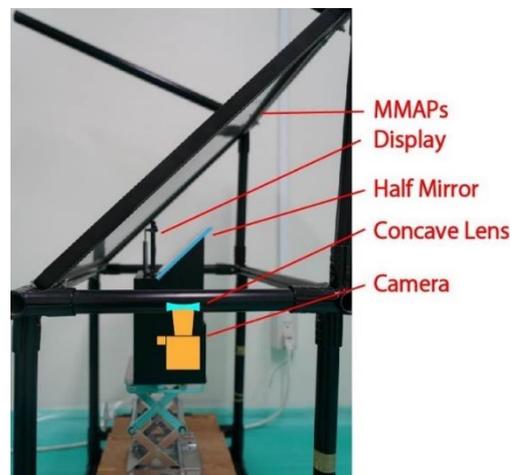


図 3 実装



図 4 カメラ・ディスプレイ部分

そこで、カメラを設置する位置および装置からユーザーまでの距離について計測を行った。

#### 4.2 方法

装置-顔写真間距離とカメラ-MMAPs 間距離を変化させ、各条件での顔検出精度を調べた。実験の概要を図 5 に示す。以下装置-顔写真間距離を $L_A$ 、カメラ-MMAPs 間距離を $L_B$ と表記する。 $L_A$ は装置の前端から顔写真までの距離を指し、 $L_B$ はカメラレンズの先から MMAPs の中心までの距離を指す。 $L_A$ 、 $L_B$ の条件をそれぞれ図 6 図 7 に示す。 $L_A$ は 20~90cm の 10cm 間隔 8 点、 $L_B$ は 15~35cm の 5cm 間隔 5 点である。顔写真は著者の写真を使用し、目の高さを転送されるカメラ視点と同じ高さである約 70cm になるように固定した。実際の顔の大きさとおおよそ等しくなるように A4 用紙に印刷した写真を使用した。顔検出には、画像処理ライブラリである OpenCV の Haar Cascade 分類器を使用した。

実験の手順は以下のとおりである。顔写真を $L_A$ が 20cm の地点から 90cm の地点まで移動させ、それぞれの地点で顔検出精度を計測した。精度の計測として、顔検出プログラム上で取得した映像 150 フレームのうち顔検出したフレーム数を測定した。測定値は、 $L_A$ が 20~90cm 地点の移動を 5 周した平均値とした。以上の試行を $L_B$ の各条件のもと行った。

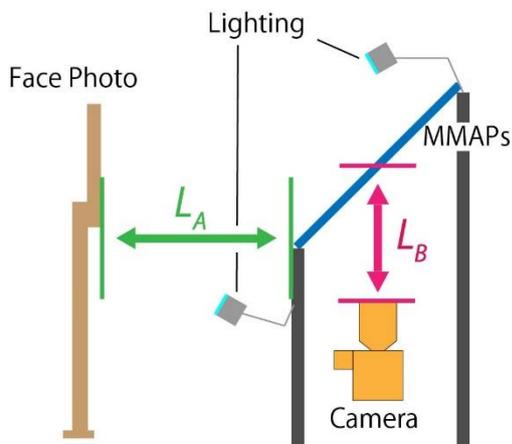


図 5 実験概要

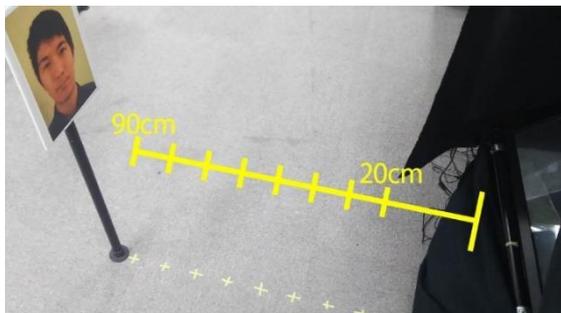


図 6 装置-顔写真間距離 ( $L_A$ )

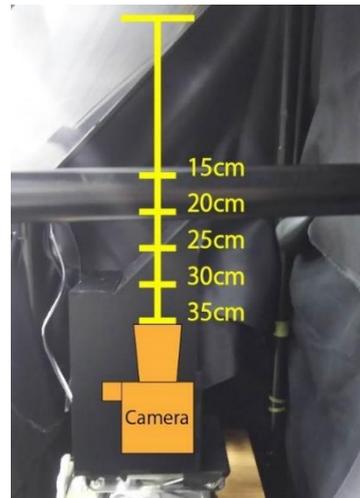


図 7 カメラ-MMAPs 間距離 ( $L_B$ )

なおカメラの設定は、各種設定を自動で調整するフルオートモードを使用した。ISO 値は自動で設定される AUTO とし、絞りは最大に開いた状態である F 値 4.0 とした。レンズのズームは行わず、画角が最も広い状態で撮影を行った。予備実験より、顔検出をするために顔写真を十分に照らす必要があると判明したため、装置に 2 つ照明を取り付け、顔写真を照らした。

#### 4.3 結果

実験の結果を図 8 に示す。縦軸の検出率は、150 フレームの測定の中で顔検出が行われた割合を表す。検出率 100% の点は、最も顔検出精度が高い点と言える。検出率 100% の範囲を見ると、 $L_B$ が 20、25cm の場合が最も広く、その範囲は装置から 30~60cm 地点であることが分かる。

#### 5 考察

顔検出可能範囲に差が生じた要因として、照明の条件と MMAPs の影響が考えられる。本実験では顔写真を照らす照明の条件が顔検出精度に影響を及ぼしていると考えられるが、今回は照明の条件を統一しなかった。そこで、顔写真付近の照度を計測することによって照明の条件を統一し、実験の精度を高める必要がある。また、MMAPs が及ぼす影響として、光線のズレと撮像素子に対するピ

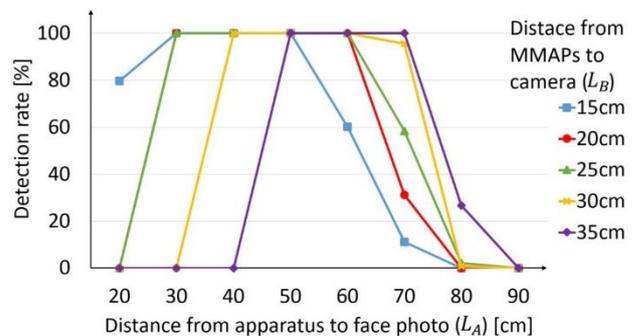


図 8 実験結果

ッチ幅の2点が挙げられる。MMAPsによる空中像では、光源とMMAPsの距離が離れると像の解像度が低くなるということが分かっている[7]。これは、MMAPsを再帰透過する光線に生じるズレによるものであり、結像位置が離れるほどその影響が大きくなるためであると考えられる。本システムでは、MMAPsで再帰透過した光線をカメラで取り込むことによって撮影を行っている。そのため、空中像同様 $L_B$ が離れると光線のズレの影響を強く受けると考えられる。もう一つは、撮像素子に対するMMAPsのピッチ幅の影響である。 $L_B$ が近い場合、撮像素子に対するMMAPsのピッチ幅が相対的に大きくなり、映像劣化の原因になると考えられる。つまり、 $L_B$ が離れている場合はMMAPsによる光線のズレの影響、 $L_B$ が近い場合は撮像素子に対するMMAPsのピッチ幅の影響が強くなると考えることができる。これらの要因によってカメラ映像が劣化するため、 $L_B$ の距離によって顔検出精度に差が生まれ、検出可能範囲が変化したと考えられる。

本システムの利点は、ユーザーの顔を正面から撮影可能であるという点と、カメラの存在をユーザーに意識させないという点である。正面から顔を撮影することによって、ユーザーの表情や視線の計測が可能である。これによって、空中像キャラクターとのインタラクションを行う際のユーザーの様子を詳細に観察することができる。さらに、ユーザーにとってカメラの存在が分かりにくい点、ユーザーは撮影されているという意識を持たずにインタラクションを行うことができる[6]。

本システムの課題として、空中像の可視範囲に対して顔検出可能範囲が狭いという点が挙げられる。実験で設定した $L_A$ の範囲内では常に空中像の観察が可能である。これに対し、実験より得られた最も広い顔検出範囲は $L_A$ が30~60cm地点である。すなわち、本システムにおいて顔検出を用いたインタラクションを行うには、装置から30~60cmの範囲にユーザーが来る必要がある。この範囲外では、ユーザーにとって空中像は見えるものの、顔検出ができないためインタラクションが不可能になってしまう。

今後の展望として、縦方向と横方向の顔検出範囲、カメラ映像の鮮鋭度の評価が考えられる。今回は奥行き方向のみの評価であったため、カメラの画角を考慮しなかったが、縦方向と横方向の撮影範囲には画角が影響する。そこで、カメラの画角を考慮したうえで縦方向と横方向の顔検出範囲を評価する。また、前述したように $L_B$ の条件に応じてカメラ映像が劣化すると考えられるため、 $L_B$ と鮮鋭度の関係について評価する。以上の2つの評価を通してカメラ設置位置の最適化を行う。

## 6 アプリケーション

本システムの顔検出機能を用いてユーザーとのインタラクションを行うアプリケーションを作成した。顔検出が行われると、CGキャラクターの動きを変化させるプログ

ラムを導入した。これによって、ユーザーが顔を隠す動作に応じて空中像キャラクターとのインタラクションが行われる。今後、顔検出だけでなく表情や瞳の検出を導入することによって、より多様なインタラクションが可能になると考えられる。

## 7 おわりに

本論文では空中像キャラクターとのインタラクションを目的に、空中像表示位置からの撮影が可能な光学系を提案した。再帰透過光学素子によって、空中像の表示とカメラ視点位置の光学的転送を同時に行うことができる光学系を設計し、ユーザーの行動計測機能として顔検出を導入した。本システムにおけるインタラクションに適した設計を求めため、カメラの設置位置と顔検出範囲について評価を行った。その結果、 $L_B$ が20、25cmの設計が最も顔検出範囲が広く、その範囲は装置から30~60cm地点であることが分かった。

**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,JPMJPR16D5)によるものである。ここに記してして謝意を表す。

## 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] Hanyuool Kim, Issei Takahash, Hiroki Yamamoto, Satoshi Maekawa, Takeshi Naemura: MARIO: Mid-air Augmented Reality Interaction with Objects, Entertainment Computing 5, pp. 233-241, 2014.
- [5] 安井雅彦, M. Sakti Alvissalim, 山本裕紹, 石川正俊: 空中映像と高速 3D ジェスチャー認識技術の統合による低遅延な立体映像作業環境の実現, 計測自動制御学会論文集, Vol. 52, No. 3, pp. 134-140, 2016.
- [6] 丹羽雄大, 梶田創, 小泉直也, 苗村健: GoThro: 障壁を光学的に通るカメラ, 第22回日本バーチャルリアリティ学会論文集, 1B3-05, 2017.
- [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集, Vol. 22, No. 3, pp. 413-420, 2017.