



## 各種再帰透過光学系を用いた空中カメラで撮影可能な範囲

安藤将平<sup>1)</sup>, 小泉直也<sup>1)</sup>

1) 電気通信大学 (〒 182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, ando@media.lab.uec.ac.jp, koizumi.naoya@uec.ac.jp)

**概要:** 再帰透過光学系を用いてカメラ視点位置を光学的に転送し、空中カメラとして扱うことができる。カメラを再帰透過光学系内部で回転し空中カメラを動かす場合、角度が大きくなるにつれて光学素子による迷光やぼけが増加する。本稿では、空中カメラを回転させたときに正常に機能する角度の限界を明らかにする。GAN でランダムに生成された顔写真を空中カメラで撮影し、OpenCV による顔検出が可能な割合によって評価を行った。

**キーワード:** 空中カメラ, 再帰透過光学系, 迷光

### 1. はじめに

本研究では、人と空中像が空中カメラを通してインタラクションできる範囲を知ることが目的とし、空中カメラが撮影可能な範囲を明らかにする。空中像とは、光源から出た光が光学素子によって複数回反射し、再び空中に結像したものである。空中カメラは、空中像と同様に光学素子によって光を反射させることで、カメラの視点を光学的に転送することができる。空中像と空中カメラを組み合わせることで、CG アバターを空中像として表示し、CG アバターの視点から映像を観察することが可能になる。空中カメラを介してユーザ同士がインタラクションすることを想定した場合、ユーザが移動可能な範囲や、一度にインタラクション可能な人数を知るためには、空中カメラが正常に撮影できる範囲を明らかにする必要がある。

空中カメラは、再帰透過光学系の内部で回転させる角度が大きくなるほど、ぼけや意図しない光(迷光)が増加してしまう。ぼけや迷光が増加すると、空中カメラに写っているものの判別が難しくなり、コミュニケーションに支障をきたす。そのため、空中カメラを回転させることのできる角度には限界があると言える。しかし、空中カメラをどの程度の角度まで回転させることができるのか、現状ではわかっていない。

本稿では、空中カメラで顔写真を撮影し、顔検出率を調査することで撮影可能な範囲の評価をした。人と人がカメラを

介してコミュニケーションを行う際には、顔を認識できる必要があると考え、撮影した画像で顔検出が可能かどうかを評価基準とした。使用する顔写真は、Generative Adversarial Networks(GAN) を使用してランダムに生成することで、顔写真の選出やデータベースの選択にあたり、検出しやすい顔のみを選ぶことや人種や年齢等の偏りが生じる等の問題を回避した。

### 2. 関連研究

#### 2.1 再帰透過光学系

再帰透過光学系は、光源から出た光を光学素子に関して面対象な位置に結像させる光学系であり、Micro Mirror Array Plates(MMAPs)を用いたものや、Aerial Imaging by Retro-Reflection (AIRR) がある。

##### 2.1.1 MMAPs

MMAPs は直行する 2 つのミラーアレイから構成される光学素子で、単体で光源からの光を面対象位置に結像させることができる。MMAPs として代表的なものに、Dihedral Corner Reflector Array(DCRA)[1] や、ASKA3D プレート [2] などがある。MMAPs に入射する光は、ミラーアレイで 2 回反射することにより 2 つの軸に関して再帰反射し、光源と面対象な位置に空中像を形成する。このとき、ミラーアレイでの反射回数が 2 回以外の光は迷光として意図しない位置に結像する。迷光は MMAPs の構造上必ず発生してしまうもので、空中カメラの撮影範囲を狭める原因の 1 つとなる。

##### 2.1.2 AIRR

AIRR はハーフミラーと再帰性反射材で構成される再帰透過光学系である [3]。光源から出た光はハーフミラーを透過し、再帰性反射材で再帰反射をする。再帰反射した光がハーフミラーで反射することにより光源と面対象な位置に空中像を形成する。光源からの光はハーフミラーで反射する光と透過する光に分かれるため、MMAPs と比べて空中像の輝度は低下する。仮にハーフミラーの透過率を 50% とすると、空中像の輝度は光源に対して 25% 程度の輝度にな

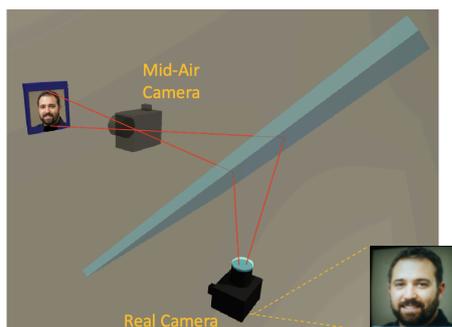


図 1: 空中カメラ

る。また、再帰性反射材への入射角が大きくなるにつれ、輝度の低下とぼけの増加が発生し、空中カメラの撮影範囲を狭める原因の1つとなる。

## 2.2 カメラ視点位置の光学的転送

カメラの視点位置を光学的に転送する手法として、Okumuraらは高速能動視のためのサックードミラーを開発した[4]。ここでは、3つのレンズから構成される瞳転送系によってカメラ視点位置が光学的に転送される。カメラの視線は、カメラ視点位置に配置された2軸の小型ミラーによって制御される。このシステムにおけるカメラ視点転送は、視線を高速に制御するために用いられており、空中像とカメラを組み合わせることを目的としていない。

Tsuchiyaらは、MMAPsによる空中カメラ光学系と空中像表示設計を組み合わせることで、ユーザがHMDを通して空中像キャラクターの視点から映像を観察できるLevitarを提案している[5]。LevitarではHMD装着者の頭の動きと同期して視点方向を制御し、まるで空中像キャラクターに成りきったような視点が観察できる。

また、MMAPsによる空中カメラよりも広範囲の撮影を目的として、AIRRを用いた空中カメラも提案されている[6]。ここでは、回転角ごとのMTFの評価や画角内のARマーカの検出率を評価することで、AIRRを用いた空中カメラがMMAPsよりも広範囲で撮影できることを示している。しかし、どの角度までカメラとして機能するかは明らかにされていない。そこで今回はMMAPsによる空中カメラと、AIRRによる空中カメラのそれぞれで評価をした。

## 3. 実験方法

実験の概要を図2、図3に、実験装置を図4に示す。実験では空中カメラの回転を簡単に行うため、アクリルミラーによる虚像のカメラを利用した。今回使用したディスプレイはiPad、カメラは本体がSony  $\alpha$  7RII、レンズがタムロンレンズDiIIRX0(焦点距離28-70mm)、凹レンズはケニス製H-07(焦点距離250mm)である。MMAPsはASUKANET製ASKA3Dプレート(サイズ500mm  $\times$  500mm、ピッチ幅0.5mm)ハーフミラーはEdmund Optics製プレート型(透過率50%、サイズ500mm  $\times$  500mm)、再帰性反射材にはRF-Ax(サイズ500mm  $\times$  500mm)を使用した。カメラの設定は、F値を5.6、シャッタースピードを1/30秒とした。また、光学素子が画角全体に映るようにレンズのズームをしたところ、垂直方向の画角が36.4度、水平方向の画角が52度であった。ISO感度はMMAPsとAIRRで撮影した画像の明るさが同程度になるように、MMAPsでは500、AIRRでは2000と設定した。機材間の距離は、凹レンズからアクリルミラーまでを $l_a$ 、アクリルミラーからハーフミラー(MMAPs)までを $l_b$ とし、 $l_a$ は175mm、 $l_b$ は200mmに設定した。また、カメラの中心を通る垂直な光線とハーフミラー(MMAPs)の交点から、ハーフミラー(MMAPs)の下端までの距離 $\alpha$ は180mmであった。

AIRRによる空中カメラの場合、カメラの回転軸によ

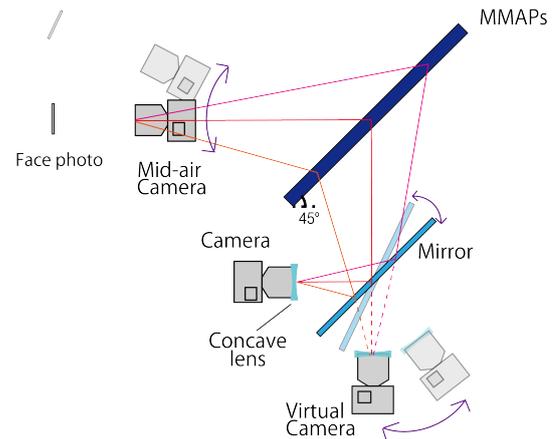


図2: 実験概要 (MMAPs)

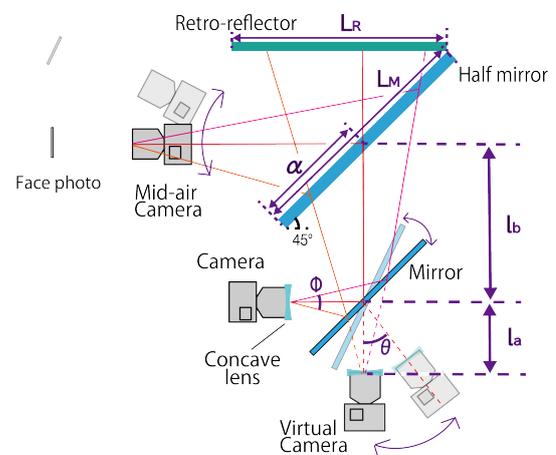


図3: 実験概要 (AIRR Pitchの回転)

て幾何的な制限や不要光の有無が異なるため、2通りの回転軸でそれぞれ撮影をした。図3はLevitarにおけるPitchの回転に対応しており、図5はYawの回転に対応している。装置設計の都合上、機材間距離が僅かに変わっており、Yawの場合には $l_a$ は150mm、 $l_b$ は220mmであった。また、図3において $L_R$ は再帰性反射材の長さ、 $L_M$ はハーフミラーの長さであり、 $\theta$ は空中カメラの回転角度、 $\phi$ は画角である。AIRRで空中カメラを図3の方向に回転させる場合、再帰性反射材がディスプレイの光を遮らないためには、 $L_R$

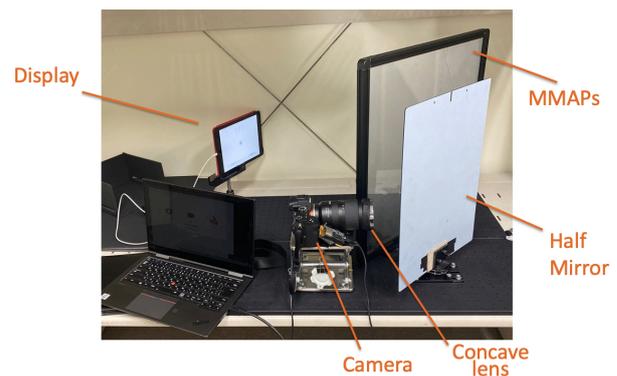


図4: 実験装置

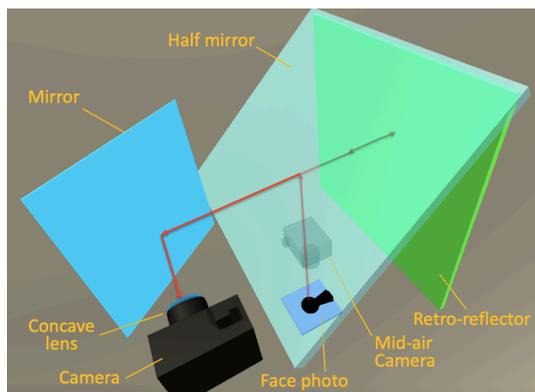


図 5: 実験概要 (AIRR\_Yaw の回転)

が一定以上短い必要があり、その限界の長さを  $L_{max}$  とする。一方で、ディスプレイからの光が実カメラに漏れなく届くためには、実カメラの画角  $\Phi$  内全てに再帰性反射材が映らなければならない。そのためには、 $L_R$  が一定以上長い必要があり、その最小の長さを  $L_{min}$  とすると、 $L_R$  は以下の式 (1) を満たす必要がある。

$$L_{min} < L_R < L_{max} \quad (1)$$

今回実験で使用した再帰性反射材の長さ  $L_R$  は式 (1) を満たしておらず、 $\theta = 45$  度付近で画面の半分程度が見えなくなってしまうという制限があった。

空中カメラを片方向に 5 度ずつ回転させ、各角度において 100 枚の画像を撮影した。回転方向によるぼけ量、輝度、迷光の量に差はないと考え、今回は片方向のみの撮影をした。回転は 0 度から 50 度まで行った。ただし AIRR の Pitch 方向の回転においては、先述のような幾何的な制限により 45 度までの撮影である。ディスプレイは角度ごとに空中カメラ方向を向くように手動で調整をした。

空中カメラで撮影した各画像に対して、OpenCV の Haar-Cascade 分類器による顔検出をした。それぞれの角度において、正しく顔を検出できている顔写真の枚数をカウントした。今回、顔以外の部分を顔と認識してしまっている誤検出に関しては、顔検出実行後に目視で取り除くものとした。

#### 4. 実験結果

実験結果を図 6 に示す。縦軸の検出率は 100 枚の顔写真の中で顔検出が行われた枚数、横軸は空中カメラを回転させた角度を表している。なお、実験の項でも述べたように、AIRR\_Pitch に関しては 45 度までしか撮影をしていない。

AIRR\_Pitch の結果を見ると、30 度のときに一度検出率が大きく下がり、35 度で再び 70% 程度まで検出率が上がっている。原因として、AIRR\_Pitch では図 7 で示すように 2 つの不要光が画像に入り込んでしまっていることが挙げられる。30 度での撮影のときには、この不要光が顔の中心に重なってしまうため、検出率が落ちている。40 度以降はいずれの条件でも輝度の減少、ぼけの増加、迷光の影響で検出率が 0% 近くになっているが、AIRR\_Yaw のみ 40 度でも

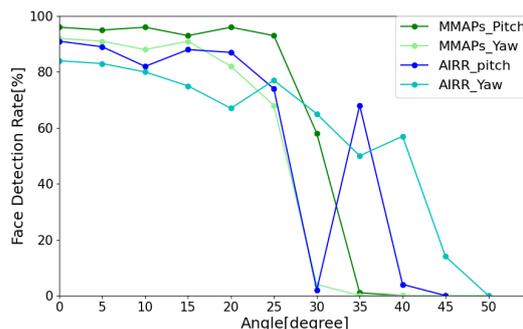


図 6: 実験結果

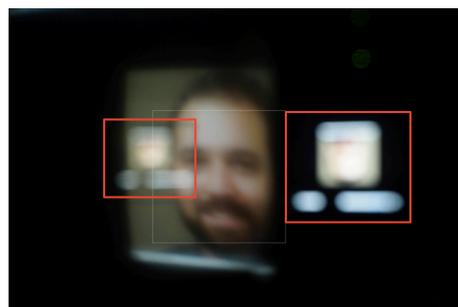


図 7: AIRR35 度の例

60% 近い検出率を保っている。

MMAPs と AIRR を比べると、AIRR の方がより広範囲で顔検出ができています。MMAPs による空中カメラの場合は、Pitch、Yaw どちらも迷光が顔の中心に重なってしまい、25 度～30 度程度までしか顔検出ができていない。一方で AIRR は、Pitch の場合に不要光で一時的に検出率が下がるものの、35 度程度まで顔検出が可能である。Yaw の場合には、不要光の影響がかなり小さく 40 度程度まで顔検出が可能であるという結果であった。

#### 5. 考察

MMAPs の角度限界は迷光の影響が強く、広範囲での撮影は難しい。カメラの回転角度が小さいときには、ぼけが少なく、高い輝度を保つため AIRR よりも高い検出率となっているが、30 度付近で迷光が画面の半分程度を覆ってしまい、カメラとして使用するのは難しい。現状、MMAPs の迷光を取り除く方法はわかっていないため、空中カメラを大きく回転させる場合、MMAPs は不向きであると言える。

AIRR で生じる 2 つの不要光は、図 8 で示す再帰性反射材における鏡面反射成分によるものと、図 9 で示すハーフミラーでの透過光によるものだと考えられる。なお、図 8、図 9 では作図簡易化のために実験で使用したアクリルミラーは省略されている。再帰性反射材に入射する光の大半は再帰反射するが、再帰性反射材の性能によっては一部の光が鏡面反射してしまう。図 7 の左側の赤枠で囲われた不要光は、再帰性反射材における鏡面反射成分によるものである。図 8 のように、ハーフミラーによる反射でディスプレイ (D) が D' の位置に虚像を作る。この D' が再帰性反射材における

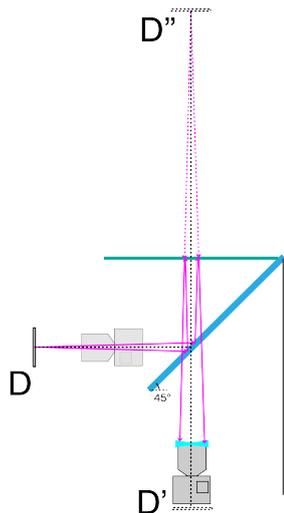


図 8: 再帰性反射材での鏡面反射

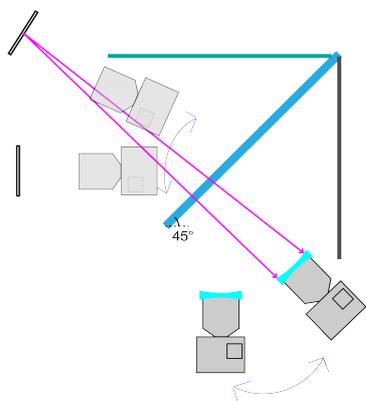


図 9: ハーフミラーの透過光

鏡面反射で  $D''$  の位置に虚像を作り、カメラに映り込む。一方、図 7 の右側の赤枠で囲われた不要光は、ハーフミラーで透過した光がカメラに映り込んだものである。図 9 のように、カメラの回転角度が一定以上大きくなるとディスプレイの光がカメラの画角に映り込んでしまう。

AIRR による空中カメラでは回転軸によって大きく検出率が異なり、回転させる方向に注意する必要がある。Pitch の回転、つまり Levitar において首を上下に振る方向の回転では、不要光でカメラとして使える角度が狭くなっている、しかし、首を左右に振る Yaw の回転では不要光による制限がなく、40 度程度までカメラとして機能する。実際に Levitar のようなアプリケーションを想定したとき、上下方向で必要になる回転角は左右方向に比べて小さくて済むと考えられるため、この制限は大きな問題にならないと言える。

実験結果から、AIRR による空中カメラを使用した場合、同時に 3 人程度とのコミュニケーションが可能であることがわかった。空中カメラが画面の中心で対象を捉えられる範囲を左右片側 40 度、つまり視野角度 80 度で映像を観察可能であるとする。カメラ位置から 1m ほどのところにコミュニケーション相手がいるとすると、およそ 3 人とのインタラクションが可能である。相手が 1 人だった場合、左

右方向に 1.6m ほど移動できる。この範囲は、空中像と 1 対 1 のインタラクションを行うのに十分な範囲であると考えられる。

なお、今回使用した OpenCV による顔検出では、ぼけた画像に対しても正常に顔検出ができていた画像がいくつかあり、ぼけに対してロバストな手法であった可能性がある。そのため、人の目による認識率とは少し異なるかもしれない。今後の展望として、実際に人の目で顔が認識できるかどうかを確認するために心理物理実験をすることが考えられる。実験の例としては、オンライン環境で空中カメラを介した映像を実験参加者に提示し、顔を認識できるかどうか判断してもらおうといったものが挙げられる。

## 6. おわりに

本稿では、人と空中像が空中カメラを通してインタラクション可能な範囲を知ることを目的に、カメラの回転角度毎の顔検出率の評価をした。AIRR を用いた空中カメラでは、回転軸によって幾何的な制限や不要光の有無が異なり、カメラとして使用できる範囲に違いがあることが判明した。MMAPs では、迷光の影響で顔検出できる範囲が 25 度から 30 度程度までである。Levitar における AIRR の Pitch 方向の回転では、顔検出できる範囲は 25 度程度までであり、Yaw 方向では 40 度程度であることがわかった。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP21K19821 の助成を受けた。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- [1] Satoshi Maekawa, Kouichi Nitta, and Osamu Matoba: Transmissive Optical Imageing Device with Micromirror Array, SPIE 6392, pp. 130–137, 2006.
- [2] 株式会社アスカネット: 光学結像装置特開 2012-155345(P2012-155345S).
- [3] Hirotugu Yamamoto, Yuka Tomiyama, and Shiro Suyama: Floating aerial LED signage based on aerial imaging by retro-reflection (AIRR), Opt. Express 22, pp. 26919–26924, 2014.
- [4] Kohei Okumura, Hiromasa Oku, and Masatoshi Ishikawa: High-speed gaze controller for millisecond-order pan/tilt camera, 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 6186–6191, 2011.
- [5] Kei Tsuchiya and Naoya Koizumi: An Optical Design for Avatar-User Co-axial Viewpoint Telepresence, 2020 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR), pp. 108–116, 2020.
- [6] Kei Tsuchiya and Naoya Koizumi: Aerial Imaging by Retro-Reflection for Mid-Air Image Display and Camera Viewpoint Transfer, IEEE Access, pp. 25110–25117, 2021.