

ホットミラーによる赤外光反射を用いた 空中像インタラクション手法の提案

安藤 将平^{1,a)} 小泉 直也^{1,b)}

概要: 本研究では、ユーザーが空中像そのものに注目し、その周辺のセンサー等を意識することなく空中像とインタラクションできる光学系の実現を目的として、ホットミラーによる赤外光反射を用いた空中像インタラクション手法を提案する。提案手法では、ホットミラーと再帰透過光学素子を組み合わせることで、空中像に影響を与えずにユーザーからカメラを見えなくすることに成功している。また提案手法の評価として、空中像タッチディスプレイの入力精度を調査し、ユーザー行動の計測が可能であることを確認した。本提案手法を用いることで、センサーを隠し、空中像キャラクター自身が視覚を持つかのようなインタラクションの設計が可能になる。

1. はじめに

Augmented-Reality(AR)は、現実のシーンに Computer Graphics(CG) によって描かれた仮想物体を重畳表示することで実空間を拡張する技術である [1]。AR における CG 映像の表示手法として、Head Mounted Display(HMD) やハンドヘルドディスプレイを用いたシースルー形式のもの、プロジェクションマッピング、空中像などが挙げられる。

本研究では CG 映像の表示手法として空中像に着目した。空中像は光源から出た光が反射・屈折することによって空中に結像した実像である。そのため空中像は、HMD などの装置を着用することなく裸眼での観察が可能であり、複数人で同時に観察ができるといった利点がある。

ここで、空中像システムにおけるセンサーの影響に関して議論をする。空中像ディスプレイはハードウェアから浮遊した位置に形成されるため、COVID-19 の感染拡大防止の観点から非接触インタフェースとしての需要が高まっている [2]。しかし、スマートフォンなどの有形ディスプレイのようにダイレクトタッチによる操作ができないため、カメラなどの非接触センサーでタッチを検出する必要がある。この時、ユーザーから見える位置にセンサーを設置してしまうと、ユーザーの意識がセンサーに向いてしまう恐れがある。Seth Hunter らは、空中像の魅力を活かすためにはインタラクションにおけるイリュージョンの連続性が重要であると指摘している [3]。このイリュージョンの連

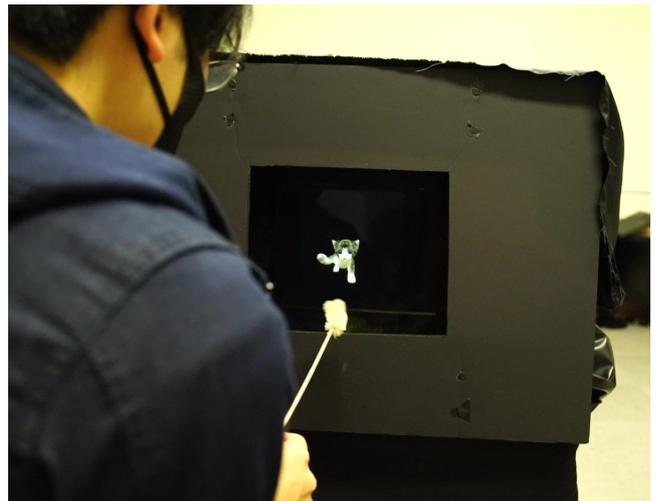


図 1 空中像キャラクターとのインタラクション

続性を保つためには、カメラなどのセンサーをユーザーが認識できない位置に配置するべきであると考えた。

本研究では、ユーザーが空中像そのものに注目し、その周辺のセンサー等を意識することなく空中像とインタラクションできる光学系の実現を目的とする。すでに述べたように、空中像とのインタラクションをより魅力的にするにはユーザーが意識しない位置にセンサーを配置する必要がある。

目的を実現する方法としては、小型のカメラを空中像光学系の周囲に配置する方法や、ユーザーから不可視の位置にカメラを配置し、鏡面に反射させて撮影する方法が考えられる。小型カメラを使用する方法では、カメラの設置位置が空中像を形成する光線路外に限定されてしまうため

¹ 電気通信大学

^{a)} ando@media.lab.uec.ac.jp

^{b)} koizumi.naoya@media.lab.uec.ac.jp

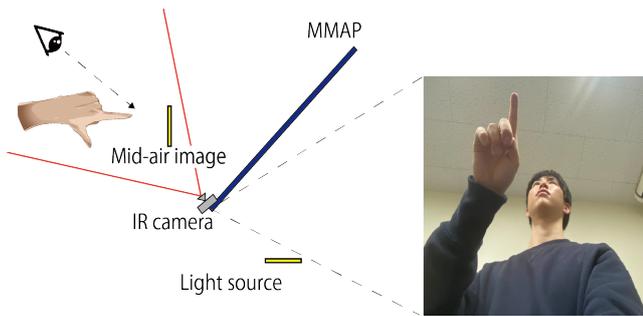


図 2 下からの撮影

ユーザーを正面から撮影できない。光学素子の下側にカメラを設置した場合、図 2 のようにユーザーを下から見上げる撮影になってしまう。

そこで、本論文ではカメラを遮蔽する方法を採用し、ホットミラーによる赤外光反射を利用した光学系を提案する。ホットミラーとは、可視光を透過し赤外光を反射させる光学素子である。ホットミラーと再帰透過光学素子を重ね合わせて配置することで、空中像の輝度を低下させずにユーザーを正面から撮影することが可能となる。

2. 先行研究

2.1 空中像結像光学素子

光源からの光を複数回反射させて空中像を結像させることのできる光学素子が複数開発されている。空中像結像光学素子として、Dihedral corner reflector array (DCRA) [4], Micro-Mirror Array Plates (MMA P) [5], Aerial Imaging by Retro-Reflection (AIRR) [6] などがある。

DCRA と MMA P は、直交する 2 つのミラーアレイで光源からの光が 2 回反射することにより、光源に対して素子と面対称な位置に空中像を結像する。このとき反射回数が 2 回以外の光は、意図しない光である迷光として表れてしまう。Min らは偏心レンズを用いることで迷光を除去したコンパクトな空中像表示装置を提案している [7]。

AIRR は再帰性反射材とハーフミラーから構成される。光源からの光がハーフミラーで反射し、再帰性反射材で再帰反射した光がハーフミラーを透過することで空中像を結像する。このとき、ハーフミラーで透過する光と反射する光に分かれるため、結像する空中像の輝度は MMA P などに比べて低下する。

本研究では、空中像結像光学素子として MMA P を採用した。MMA P は比較的入手が容易であり、単体で光学素子として機能するため配置が簡潔である。

2.2 空中像インタラクション

空中像を用いることで、HMD などの特別な装置を身につけることなく CG 映像とのインタラクションを行うことができる。実空間のオブジェクトを計測することでインタラクションを可能にしたシステムとして、MARIO[8] や SkyAn-

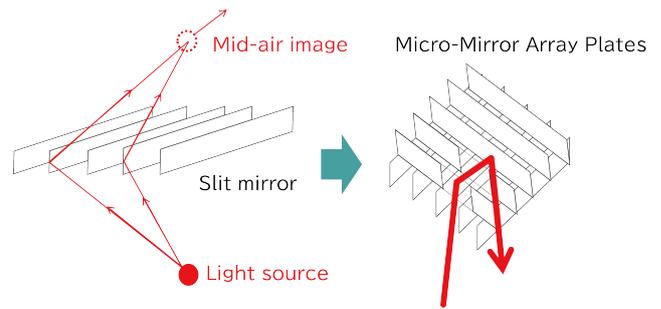


図 3 Micro-Mirror Array Plates[5]

chor[9] がある。一方で、直接ユーザーの動きを計測するシステムとして、Touching the Void[10] や Scoopirit[11]、高崎らの研究 [12] がある。

MARIO, SkyAnchor はオブジェクトを介した空中像とのインタラクションを実現している。MARIO は深度カメラによってオブジェクトの最高点を計測し、その位置に空中像キャラクターを移動させる。ユーザーはオブジェクトを動かすことで空中像とのインタラクションを楽しむことができる。SkyAnchor はタッチパネル上のオブジェクトの位置を計測し、位置に応じた空中像を表示するシステムである。しかし、これらのシステムでは直接ユーザーの行動を計測できない。

Touching the Void, Scoopirit, 高崎らの研究はユーザー行動を直接計測することで空中像とのインタラクションを実現している。Touching the Void では、赤外線カメラを用いてユーザーの指の位置を計測している。Touching the Void は計測した指の位置に応じて指の影を投影することで、空中像の奥行き知覚の手助けをする。Scoopirit, 高崎らの研究では深度カメラを用いてユーザーの手を計測する。Scoopirit では水をすくいあげるユーザーの手を計測し、水に浮かぶ空中像とのインタラクションを可能としている。高崎らはユーザーの手と空中像の位置を比較し、正しいオクルージョン提示を実現している。

本研究では以上のような空中像インタラクションの研究の中でも特に、カメラをユーザーから見づらくすることに主眼を置く。

2.3 ユーザーの計測手法

AR・VR において、CG 映像とインタラクションするためにユーザーの行動を計測する手法が多く存在する。

ユーザーが機材を装着・把持することで行動を計測する手法として、マーカー、静電容量を用いたものがある。中里ら [13] は、マーカー位置を計測することでユーザーの位置・姿勢を推定する方法を提案している。また、一般的なスマートフォンは静電容量方式によりディスプレイへのタッチを検出している。これらのユーザー計測手法は、機材を装着することなく観察可能であるという空中像の利点を失ってしまうため、空中像光学系での使用が難しい。

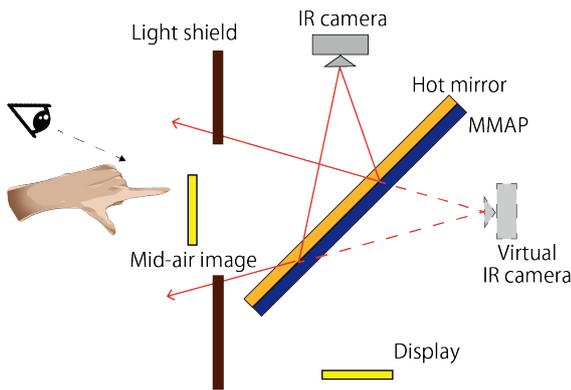


図 4 ホットミラーと MMAP の組み合わせ

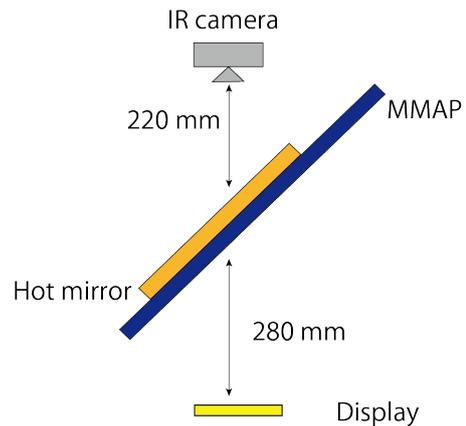


図 5 提案手法の実装 (1)

ユーザーに機材を装着・把持させることなくユーザーの行動を計測する手法として、RGB カメラや赤外線カメラ、深度カメラを用いるものがある。Gothro[14]では再帰透過光学素子を用いて RGB カメラ視点を転送することで、カメラの位置を意識させない撮影を可能にした。TsuchiyaらはGothroを応用し、空中像アバターの視点から空中像観察者を撮影可能な光学系である Levitar[15]を提案している。

本研究では、ホットミラーで反射可能な赤外線による深度推定を使用する。深度推定はその手法によって、ステレオ方式・ストラクチャードライト方式・Time of Flight(ToF)方式の3つに分類される。ステレオ方式は、ステレオ画像から得る視差情報を元に三角測量をすることで奥行きを推定する手法である。ストラクチャードライト方式は特定のパターンを物体に投影し、パターンの歪みを計測することで奥行きを推定する。ToF方式では、光源からの光が物体で反射して返ってくるまでの時間を計測することで奥行きを推定する。本論文では、ストラクチャードライト方式として Intel RealSense Depth Camera D435(以降、D435)を、ToF方式として Vzense DCAM710(以降、DCAM710)を使用し、上記の3方式それぞれに関して評価をした。

3. 提案手法

機材によって空中像の外観を損なうことなくインタラクション可能な空中像ディスプレイとして、ホットミラーと MMAP を組み合わせた光学系を提案する。提案手法により、ユーザーから見えない位置に赤外線カメラを配置し、ホットミラーに映りこむユーザーを撮影することが可能となる。本論文では、ユーザーの行動計測手法として深度推定による位置計測を選択した。

3.1 光学設計

本論文で提案するシステムは、図4のようにホットミラーと MMAP を重ね合わせた光学系である。光学系は赤外線カメラ、ディスプレイ、MMAP、ホットミラー、遮光部からなる。ディスプレイから出た光は 45° 傾けて設置された MMAP で反射し、MMAP に対して面対称な位

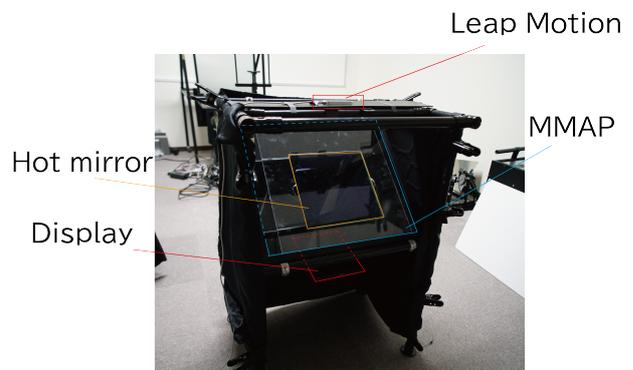


図 6 提案手法の実装 (2)

置に空中像として結像する。このとき、可視光はホットミラーを透過するためホットミラーによる影響は受けない。一方で赤外光はホットミラーで反射するため、赤外線カメラの映像内でホットミラーは鏡のように振る舞う。こうして、ホットミラー上部に下向きで配置された赤外線カメラはホットミラーに映りこむユーザーの撮影が可能となる。

3.2 実装

提案手法を実装した様子を図5, 図6に示す。ディスプレイは iPad(2048 × 1536 px), MMAP は ASUKANET 製 ASKA3D-488(488 mm × 488 mm, ピッチ幅 0.5 mm), ホットミラーは京浜光膜工業(株)製(250 mm × 250 mm, 厚さ 5 mm)を使用し、赤外線カメラには Leap Moiton, D435, DCAM710 の3つを用いた。なお Leap Motion はステレオカメラを持つため、ステレオマッチング用の左右画像を取得するために利用している。Leap Motion と D435 の赤外線波長は 850 nm, DCAM710 の赤外線波長は 940 nm であり、ホットミラーでの反射率はそれぞれ約 100% である。今回使用したホットミラーは MMAP に比べて小さかったため、アクリル板にはめ込むことで位置を調整した。アクリル板は可視光の透過率が 93% 程度であることから、ディスプレイからの光線の妨げにならず空中像の視認性を保つことができる。

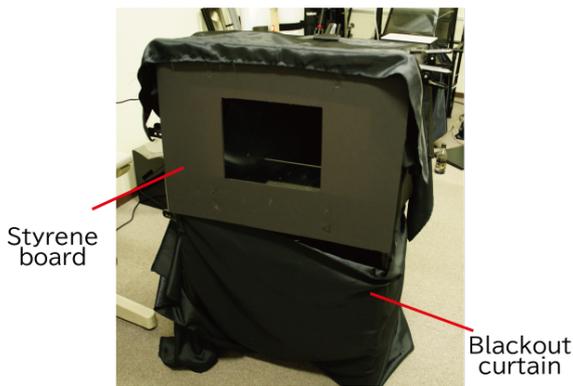


図 7 筐体を隠す暗幕・スチレンボード

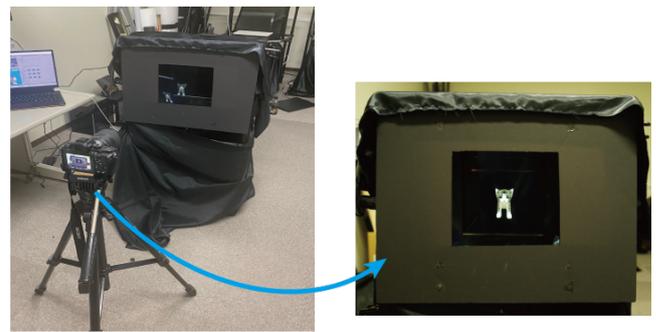


図 9 RGB カメラでの撮影

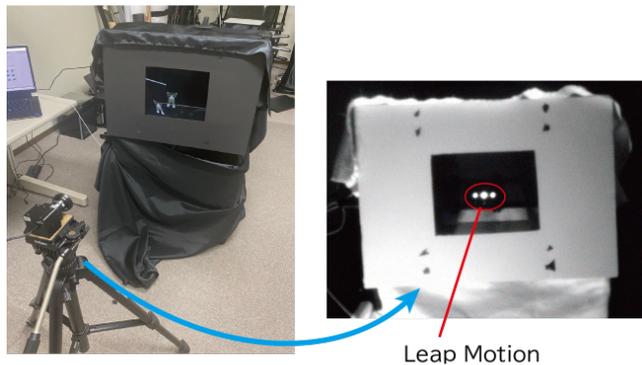


図 8 赤外線カメラでの撮影

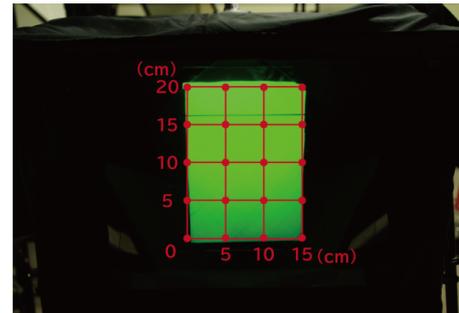


図 10 計測点

また、可能な限り空中像以外の機材がユーザーから見えないようにするため、図7のように暗幕とスチレンボードで筐体を覆った。このとき、赤外線カメラから照射される赤外光が暗幕で反射し、赤外線カメラの映像に干渉してしまう可能性がある。そこで、暗幕の内側に吸光材を配置することで赤外光の不要な反射を防いだ。

図8、図9は筐体の外観確認のために筐体を正面から撮影したものである。図8は赤外線カメラで撮影されており、ホットミラーによる反射で Leap Motion が映りこんでいるのが確認できる。図9はRGBカメラで撮影されており、Leap Motionなどの機材は見えないことが確認できる。以上のように、赤外光領域では機材がユーザーから見える位置に存在するが、可視光領域ではユーザーから見えない。これらのことから、本提案手法によりユーザーから機材を見えなくすることに成功したと言える。

4. 空中像ディスプレイの精度評価実験

4.1 実験目的

本実験は、提案手法によってユーザーの行動計測が可能であり、ディスプレイとして使用可能であることの確認を目的とする。そこで、空中像ディスプレイに対するタッチ入力の評価を行った。提案手法では赤外線カメラによる深度推定を使用しているため、空中像ディスプレイの操

作は手に限定されない。手以外のオブジェクトによる空中像とのインタラクションとして、空中像ディスプレイにペンで絵を描くアプリケーションなどが考えられる。このようなアプリケーションを想定し、本実験では著者の指とペンによるタッチで空中像ディスプレイの精度評価をした。

4.2 実験方法

3章で述べた装置を用いて、空中像ディスプレイに対する入力精度を評価した。今回光源ディスプレイとして使用したiPadのサイズ(15 cm × 20 cm)を目安とし、15 cm × 20 cmの範囲内を5 cm間隔で20点計測した。図10で示すように左下端を基準点とし、図11のようにHeight Gaugeを用いて入力位置の統制をした。

ステレオマッチング、D435, DCAM710のそれぞれにおいて、著者の指による入力とペンによる入力を4 × 5の20点ずつ行った。いずれも空中像ディスプレイに対して垂直に入力するものとし、ペンによる入力の際にはHeight Gaugeにペンを固定した。30 fpsでの運用を想定し、1秒間分の入力である30フレームにおいて、ステレオマッチング・D435・DCAM710から得られるもっともカメラに近いオブジェクトの座標を記録した。

得られる座標の単位はピクセル(px)であるため、実空間の座標と対応させるために単位をcmに変換した。ここでは空中ディスプレイ上の横軸をx軸、縦軸をy軸とし、奥行方向をz軸と定義する。x軸y軸は、図10における(0,0)と(15,20)の2点に関して計測された座標群の中央値に基づいて、1 pxあたりの距離(cm)を求めた。ステレオ

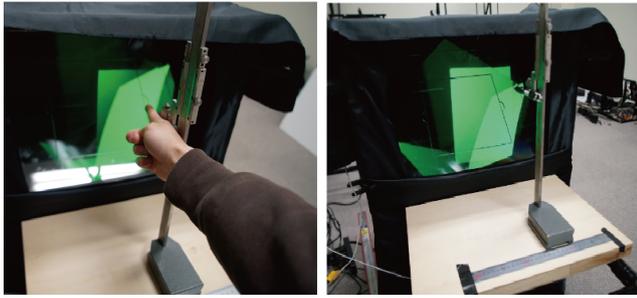


図 11 計測の様子

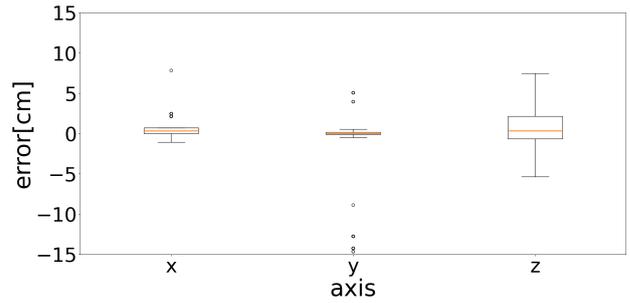


図 13 ステレオマッチングの実験結果 (ペン)

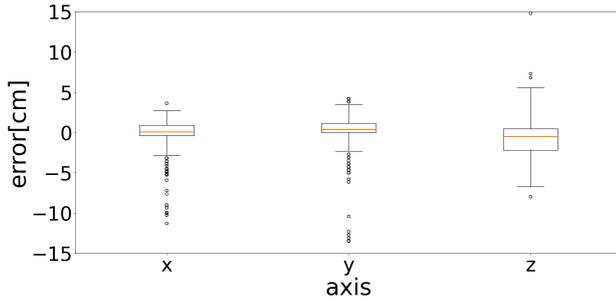


図 12 ステレオマッチングの実験結果 (指)

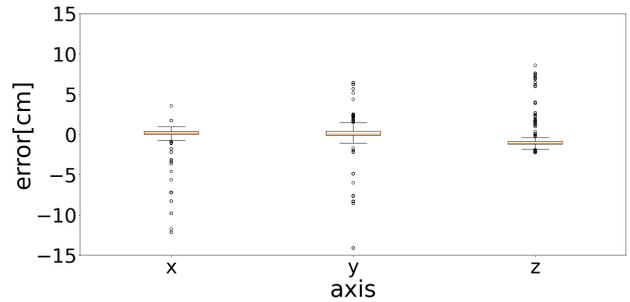


図 14 D435 の実験結果 (指)

マッチングにおいて、 z 軸はステレオカメラ間距離とカメラの解像度・視野角から、ステレオカメラによる視差 1 ピクセルあたりの奥行距離誤差が導出される。なお D435・DCAM710 では、カメラからの距離、すなわち z 軸の情報がメートル (m) 単位で出力される。

計測された座標から、実空間の座標との距離誤差 (cm) を求めた。x 軸、y 軸、z 軸それぞれの距離誤差に関して、各フレームごとのばらつきを調査するために箱ひげ図を作成した。

4.3 実験結果

図 12, 図 13 はステレオマッチング, 図 14, 図 15 は D435, 図 16, 図 17 は DCAM710 を用いた場合の、著者の人差し指とペンによる実験の結果である。x 軸、y 軸、z 軸のそれぞれに関して、計測した 20 点 × 30 フレームの結果を箱ひげ図で表しており、縦軸はタッチ入力による検出座標と実空間座標の距離誤差 (cm) を示している。○で表されているのは、Python の boxplot 関数により箱ひげ図を作るときに算出される外れ値である。第三四分位数と第一四分位数の差、すなわち箱の長さを d としたときに、第一四分位数より d 以上小さい値と第三四分位数より d 以上大きい値が外れ値となる。

4.4 考察

検出座標と実空間座標がずれてしまう原因として、指先・ペン先を検出できていないことが考えられる。ステレオマッチングにおいて、ステレオ画像間でカメラに一番近いオブジェクトの対応がうまく取れないとき、検出される座

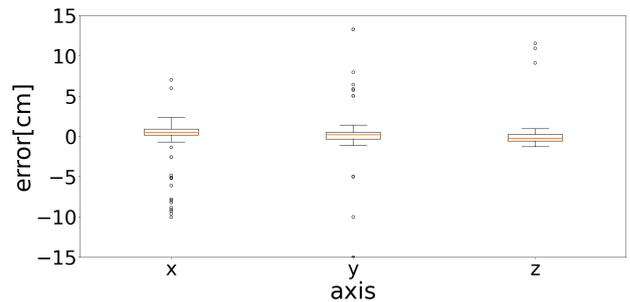


図 15 D435 の実験結果 (ペン)

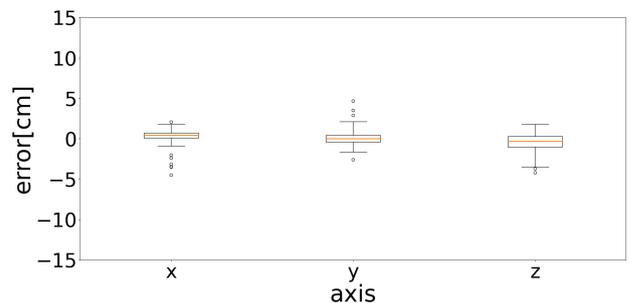


図 16 DCAM710 の実験結果 (指)

標は次点でカメラに近いオブジェクトのものになってしまう。これは D435 においても同様であり、ストラクチャードライトによるパターン認識が正常に機能していないとき、カメラにもっとも近いオブジェクトが検出できなくなる。著者の指による実験の場合では、指先が認識されずに指の付け根や Height Gauge の座標が検出されてしまった可能

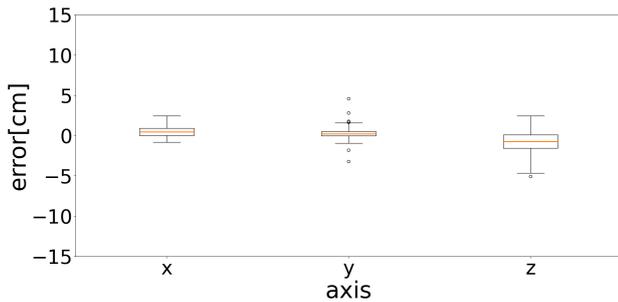


図 17 DCAM710 の実験結果 (ペン)

性がある。これらは図 12, 図 13, 図 14, 図 15 において、外れ値や箱ひげ図を縦長にする要因として表れている。

またステレオマッチングや D435 では、オブジェクトの画角内位置によって深度推定のしやすさに違いがあることが考えられる。カメラに対して垂直に指を動かすとき、カメラの光学軸に沿って動かす場合は指先のみがカメラに映る。一方で光学軸からずれた位置で指を動かす場合、指の側面までカメラに映る。この差がステレオマッチングや D435 による深度推定のしやすさに影響している可能性がある。同様の理由から、カメラに対してオブジェクトを入射する角度によって検出精度が変化すると考えられる。なお ToF カメラである DCAM710 では、光源波形と反射光波形の位相差から距離を計測しているため上記の影響は受けない。

その他の原因として、手のブレにより検出座標がずれている可能性が考えられる。スマートフォンのような有形ディスプレイとは異なり、空中像ディスプレイに入力する際には数秒間空中で指を留める必要がある。しかし、指を完全に同じ位置に固定するのは難しいため手ブレが生じ、計測位置がずれてしまった。

橙色の線で示される中央値に着目すると、検出座標と実空間座標の位置誤差はいずれも最大で 2 cm 程である。ただしそれぞれの図から、ステレオマッチングや D435 は DCAM710 と比べて外れ値が多いことがわかる。これらの外れ値はアプリケーションを作成する際の障害となるが、数フレームの時間遅延を許すならば、中央値フィルタを使用することで誤差の小さい値を選択することができる。

以上から、計測手法によっては精度が落ちる場合もあるが、提案手法を用いることにより 2 cm 程度の誤差で深度推定による位置計測が可能であると言える。

5. 考察

5.1 本手法のメリットとデメリット

本手法のメリットとして以下のようなものが挙げられる。

- 外見を損なわないように機材を隠すことができる。
- 空中像の輝度が必要以上に減少しない。

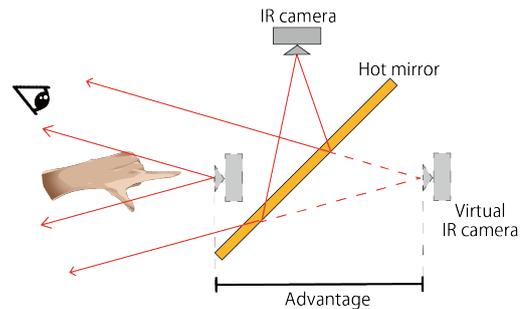


図 18 カメラ・ユーザー間の距離

- 手以外の物でもインタラクション可能である。
- ユーザーを正面から撮影できる。
- カメラ・ユーザー間の距離を広くとれる。

機材を隠すことが本研究目的であり、ユーザーは機材を意識することなく空中像に集中できる。本提案におけるホットミラーをハーフミラーに置き換えることで RGB カメラをユーザーから遮蔽できるが、ハーフミラーにより空中像の輝度は低下するという問題がある。それに対してホットミラーは可視光を約 100 % 透過するため、空中像の輝度は維持される。またステレオマッチングや深度カメラを使用しているため、特殊な装置を付けることなく観察可能という空中像の利点を保ちつつ、手以外のオブジェクトでもインタラクション可能である。さらに、ユーザーを正面から撮影できることでカメラの光学軸を考慮したキャリブレーションが不要となり、画像処理の手続きが簡易になる。それに加え、ユーザーを正面から撮影することで、ユーザーが手を伸ばし始めてから空中像に触るまでの動きを追うことができるようになる。最後に本手法では、ホットミラーで反射した映像を撮影するため、反射の分だけカメラ・ユーザー間の距離を広くとることができる。これにより、撮影対象を画角内に収めることが容易となる (図 18)。

一方で本手法のデメリットとして、ハーフミラーなどに比べてホットミラーは高価であることが挙げられる。今回使用した 25 cm 四方のホットミラーの価格は 60 万円程度であり、現状では市販されていない。そのためハーフミラーなどを用いる光学系に比べてコストパフォーマンスは悪くなってしまふ。また、蒸着による製造過程の都合で 25 cm 四方より大きいホットミラーの製造が難しく、赤外反射部分を拡大するためにはホットミラーを複数枚繋ぎ合わせる必要がある。

5.2 本手法のリミテーション

提案手法のリミテーションとして深度推定の精度限界がある。4.4 節で考察したように、指先で奥行を推定できない、カメラに映るオブジェクトの向きによって推定の精度に差がある、といった問題がある。加えて、空中像とインタラクションするオブジェクトが細すぎる場合には深度推定

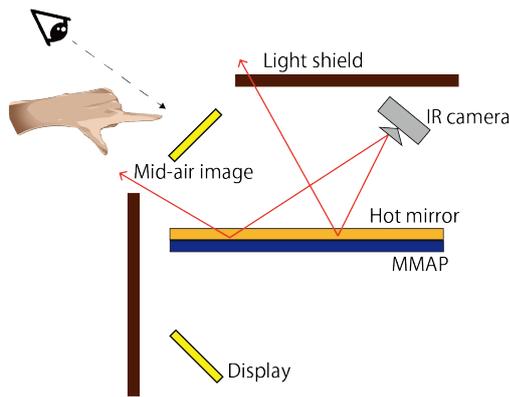


図 19 MMAP を水平に配置する場合

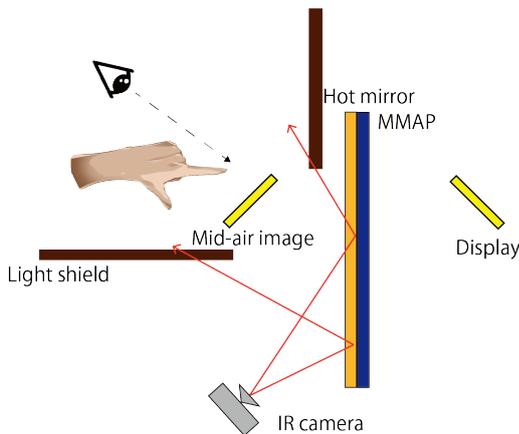


図 20 MMAP を垂直に配置する場合

が上手くできないため、オブジェクトは一定以上太い必要がある。

また、オブジェクトの色・素材によって深度推定のされやすさが異なる。白色のオブジェクトは赤外線反射率が高く、黒色のオブジェクトは赤外線を吸収しやすい傾向にあるため、黒色のオブジェクトは赤外領域で暗く映る。そのためオブジェクトの色や素材によって赤外領域での輝度に変化し、深度推定に影響が出てしまう。

MMAPを使用するリミテーションとして、迷光の出現が挙げられる。迷光はMMAPの構造上必ず発生してしまうもので、取り除くのが難しい。迷光は目的の空中像付近に出現するため、ユーザーが空中像に集中する妨げになってしまうと考えられる。

5.3 本手法の将来性や応用例

今回の実装ではホットミラーとMMAPは45°傾けて設置されていたが、図19のような水平配置のものや、図20のような垂直配置のものでも実装が可能である。光学素子の固定などのハードウェアとしての実装難易度や、設計するアプリケーションを考慮して適切な配置を選択する必要がある。

また、ホットミラーを用いた光学系は、赤外光を使用し



図 21 OpenCV による顔検出



図 22 Leap Motion の Visualizer

たセンシング手法であれば深度推定以外でも使用可能である。例として、赤外線カメラで得たグレースケール画像を用いた顔検出・目線検出などの画像処理が考えられる。

本提案手法の応用例としては、空中像CGキャラクターとのインタラクションなどが想定される。ユーザーは空中像光学系を構成する特殊な機材を意識することなく、まるで魔法のように空中に浮かぶ映像を楽しむことができる。空中像CGキャラクターに擬人化エージェントを用いることで、Human Agent Interaction(HAI)として運用することも考えられる。カメラを見せない光学系により、CGキャラクター自身が眼を持ち、意思を持っているかのように振る舞わせることが可能になる。

また、タッチパネルディスプレイとしての活躍も期待される。4.3節の結果より、D435・DCAM710では検出座標の距離誤差が最大2cmほどであった。この結果に基づき、ディスプレイに表示するボタン間の距離を適切に設定することで、ボタンが互いに干渉しない空中像タッチパネルが実現可能であると考えられる。

6. 結論

本論文では、カメラなどの計測機器により空中像の外観を損なうことなくユーザー行動を計測できる空中像光学系を提案した。提案手法では、ホットミラーとMMAPを組み合わせることでユーザーからカメラを遮蔽することに成功している。空中像インタラクションにおけるユーザー行動計測手法の一例として、ステレオマッチングや深度カメ

ラによる深度推定を実装した。

本システムの評価として、空中像ディスプレイのタッチ入力精度を調査した、様々な空中像ディスプレイの用途を想定し、著者の指とペンによるタッチで精度評価をしたところ、本手法を用いることにより2 cm程度の誤差内で深度推定による位置計測が可能であることを確認できた。

ホットミラーを用いた光学系は、顔検出など深度推定以外にも応用可能である。応用例として、空中像CGキャラクターとのインタラクションやタッチパネルディスプレイでの利用が期待される。

謝辞 本研究はJSPS 科研費JP21K19821及びキャノン財団の助成を受けた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] 神原誠之. 拡張現実感 (AR) : 1. 基礎 1 : 拡張現実感 (Augmented Reality : AR) 概論. 情報処理, Vol. 51, No. 4, pp. 367-372, apr 2010.
- [2] 山本裕紹. 総合報告: 空中ディスプレイの概要と社会実装の動向. 映像情報メディア学会誌, Vol. 75, No. 2, pp. 181-187, 2021.
- [3] Seth Hunter, Ron Azuma, Jonathan Moisant-Thompson, Dave MacLeod, and Derek Disanjh. Mid-Air Interaction with a 3D Aerial Display. In *ACM SIGGRAPH 2017 Emerging Technologies*, SIGGRAPH '17, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery.
- [4] Satoshi Maekawa, Kouichi Nitta, and Osamu Matoba. Transmissive optical imaging device with micromirror array. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, Vol. 6392, pp. 130-137, 10 2006.
- [5] 山本裕紹 (編). 操作・検査のタッチレス化/非接触化のための設計ポイントと最新動向. p. 143, 2020.
- [6] Hirotsugu Yamamoto, Masahiko Yasui, M. Alvissalim, Masashi Takahashi, Yuka Tomiyama, Shiro Suyama, and Masatoshi Ishikawa. Floating display screen formed by AIRR (aerial imaging by retro-reflection) for interaction in 3D space. *2014 International Conference on 3D Imaging, IC3D 2014 - Proceedings*, 02 2015.
- [7] Dabin Min, Myeong-Ho Choi, and Jae-Hyeung Park. Compact in-line floating display system using a dihedral corner reflector array. *Opt. Express*, Vol. 29, No. 2, pp. 1188-1209, Jan 2021.
- [8] 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.
- [9] Hajime Kajita, Naoya Koizumi, and Takeshi Naemura. SkyAnchor: Optical Design for Anchoring Mid-Air Images onto Physical Objects. In *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '16, pp. 415-423, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery.
- [10] Li-Wei Chan, Hui-Shan Kao, Mike Y. Chen, Ming-Sui Lee, Jane Hsu, and Yi-Ping Hung. Touching the Void: Direct-Touch Interaction for Intangible Displays. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '10, pp. 2625-2634, New York, NY, USA, 2010. Association for Computing Machinery.
- [11] Yu Matsuura and Naoya Koizumi. Scoopirit: A Method

- of Scooping Mid-Air Images on Water Surface. In *Proceedings of the 2018 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces*, ISS '18, pp. 227-235, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.
- [12] 高崎真由美, 水野慎士. 空中への立体視三次元CG映像の表示と正しいオクルージョンを考慮した直接インタラクション. 情報処理学会論文誌デジタルコンテンツ (DCON), Vol. 9, No. 2, pp. 9-21, aug 2021.
- [13] 中里祐介, 神原誠之, 横矢直和. 不可視マーカを用いたウェアラブルARシステムの実環境における実証実験. 信学技報, PRMU2004-135, 2004.
- [14] Yudai Niwa, Hajime Kajita, Naoya Koizumi, and Takeshi Naemura. GoThro: optical transfer of camera viewpoint using retro-transmissive optical system. pp. 1-2, 12 2018.
- [15] Kei Tsuchiya and Naoya Koizumi. Aerial imaging by retro-reflection for mid-air image display and camera viewpoint transfer. *IEEE Access*, Vol. 9, pp. 25110-25117, 2021.