

空中像結像平面にある実物体の形状情報を活かしたインタラクションの提案

安藤 将平^{1,a)} 小泉 直也^{1,b)}

概要: 本研究では、実物体の形状を利用した空中像インタラクションを提案する。空中像は実物体と並べて配置可能であり、実物体を直接操作して空中像と干渉させるようなインタラクションを実現できる。我々は情報空間と物理空間の幾何的整合性を高めるため、ホットミラーを用いて空中像結像平面とセンサーの光軸を垂直にした光学系を使用した。また、この光学系で実物体の形状を計測することにより複数の空中像インタラクションを実装した。

1. はじめに

Augmented Reality (AR) 技術の進歩により、Computer Graphics (CG) の映像はもはやディスプレイ内だけに留まらず、実空間に飛び出してユーザーと接点を持つようになった [1][2]。AR によって提示される映像は実空間と CG 空間の境界を曖昧にし、実空間だけでは成し得ない新たな体験をユーザーに提供する。実空間上の物体が持つ情報を可視化できることや、その没入感の高さから、AR は教育やエンタテインメント分野で幅広く使用されている。

AR 技術の一つである空中像を利用することで、CG 映像を実物体のすぐそばに並べて鑑賞者に提示できる。空中像は光源の光が再帰透過光学系によって空中に再結像したものである。そのため、ディスプレイ内の映像や壁面に投影された映像とは異なり、ユーザーが映像に手を伸ばして触れることができる。また、手や任意の実物体を空中像結像位置に配置することで、それらが同一空間に存在している様子が観察可能である。

実物体をセンシングすることで空中像とのインタラクションが実現されるが、センサーの位置によっては実物体の形状を計測できない、または実物体が遮蔽されてしまう可能性が生じる。空中像が実物体の影響を受けている様子を提示することで、情報空間と物理空間の結びつきを強めることができる。また、リアルタイムなインタラクションを実現することでその結びつきがさらに強まると考えられるが、そのためには実物体の位置・形状を計測するためのセンサーが必要である。しかし、空中像光学系においては



図 1 傘や手の形状を利用した空中像インタラクション

結像の原理上、空中像の背部にそういったセンサーを配置することができない。したがって通常の光学系では空中像の上部や光学素子の側部にセンサーを配置せざるを得ない。この場合、空中像インタラクションに必要な実物体の情報が十分に取得できない可能性がある。

そこで本研究では、ホットミラーにより空中像結像平面とセンサーの光軸を垂直にした光学系を用いることで、過不足ない実物体の形状を利用した空中像インタラクションを実現した。ホットミラーで赤外光を反射させることにより、赤外線センサーの光軸が空中像結像位置を通るような設計が可能になる。これにより結像位置にある実物体を空中像の背部から計測でき、空中像を正面から鑑賞するユーザーと同等の情報が得られる。すなわち、ユーザーの視点に向かう空中像生成光を遮蔽する実物体の位置・形状が計測可能となり、空中像と干渉するオブジェクトとして扱うことができるようになる。本研究ではこの光学系を利用

¹ 電気通信大学

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

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

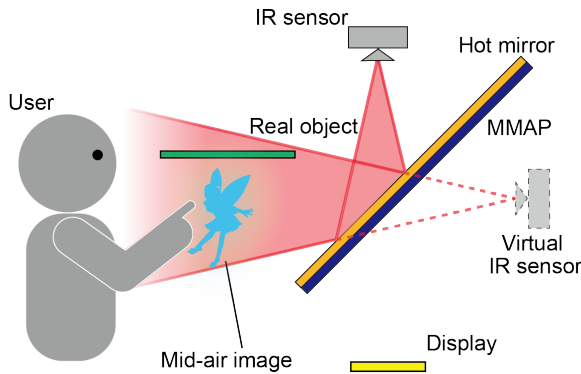


図 2 ホットミラーを用いたセンシング手法

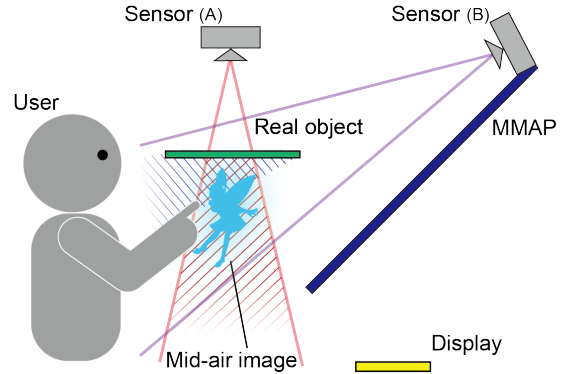


図 3 従来手法で遮蔽されてしまう領域

し、従来手法では実現が難しかった、実物体の形状を利用した空中像インタラクションを複数実装した。

2. 関連研究

2.1 空中像光学系

再帰透過光学系を用いることで CG 映像を空中に結像させることができる。再帰透過光学系として、Micro-Mirror Array Plates (MMAP), Dihedral Corner Reflector Array (DCRA)[3], Roof Mirror Array (RMA)[4], Aerial Imaging by Retro-Reflection (AIRR)[5] がある。MMAP と DCRA は、光源からの光がミラーアレイで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が結像する光学素子である。RMA は無数の小さな溝で光が反射することによって空中像を結像する。これらは素子単体で機能するため、取り扱いが容易である。AIRR は再帰性反射材とビームスプリッターから構成される光学系で、広い視域を持つ空中像を結像可能である。本研究では、構造がシンプルで設置が簡単かつ高解像度な空中像を表示可能な MMAP を使用する。

再帰透過光学系による空中像は裸眼で観察できるため、CG 空間と実空間がシームレスに合成される。Head Mounted Display (HMD) やタブレット端末などの機器を用いることで CG 映像を実空間に重畳表示可能だが、観察される映像はディスプレイを介したものに限定される。一方で再帰透過光学系を用いた空中像は、光源の光が光学的に転送されることによる実像であるため、機材を把持・装着することなく裸眼で観察可能である。そのため準備に時間や手間がかからず、立ち寄ったユーザーが即座に使うことができる。

2.2 CG 映像と実物体のインタラクション

実物体を用いて CG 映像とインタラクション可能なエンタテインメントシステムは数多く提案されている。Twinkle[6] は、プロジェクタによる映像投影面の状態をカメラで認識し、それに応じて CG キャラクターが移動するシステムである。黒崎ら [7] は没入感のあるインタラクティブな

体験として、絵本の中を CG 映像が動き回るシステムを提案した。また Eckhoff ら [8] は、ビデオスルー型 HMD を用いてユーザーの手に仮想の火を提示することでクロスモーダルな感覚を生起させている。いずれも実空間と CG 空間が融合した体験を作り出しているが、平面的な実物体でのインタラクションに限られる、または HMD が必要になるという制約がある。

空中像は実物体の近傍に提示できるため、CG 映像と実物体が同一の物理空間に存在するようなインタラクションが可能になる。MARIO[9] は、実空間にあるブロックを計測し最も高い位置にあるブロックに空中像キャラクターが移動するシステムである。水野ら [10] は、プロジェクションマッピングと空中像を組み合わせることで、空中に提示された CG 映像を直接指で触れて操作できるシステムを提案した。また MiragePrinter[11] は、実物体に空中像を重ね合わせることで 3D モデルのデザインをサポートする。しかし、これらのシステムではセンサーの配置に制限があるため、実物体の形状を十分に計測できない可能性が生じる。

3. 提案手法

3.1 光学設計

使用するのは、既に提案している、図 2 で示すようなホットミラーと MMAP を重ね合わせた光学系 [12] である。光学系は赤外線センサー、ディスプレイ、MMAP、ホットミラーで構成される。ホットミラーは赤外線のみを反射し、可視光を透過する光学素子である。ディスプレイから出た光は 45 度傾けて設置された MMAP で再帰透過し、MMAP に対して面対称な位置に空中像として結像する。

ホットミラーによる赤外光反射を利用してセンシングすることで、空中像の背部(図 2, Virtual IR sensor)から実物体形状の計測が可能になる。空中像の原理上、鑑賞者と再帰透過光学素子の間に不透明な物体があると空中像が見切れてしまう。そのため、従来の空中像インタラクションにおけるセンサーは図 3 の配置などに制限され、射線部のような遮蔽される領域が生じる。カメラ視点を光学的に転

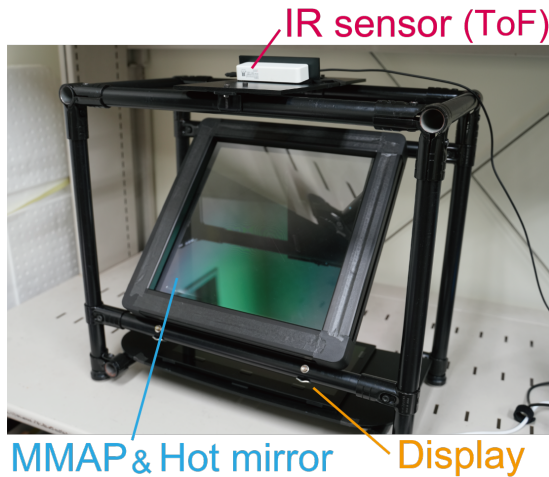


図 4 実装

送することにより空中像位置を撮影する手法 [13] も提案されているが、解像度の低下や、結像位置にある撮影対象までの距離を十分に確保できないという問題がある。本研究では、解像度を保ったまま空中像結像位置にある実物体の形状を計測する手法として、図 2 の光学系を使用する。

3.2 実装

提案手法を実装した様子を図 4 に示す。ディスプレイは Magedok PI-X3 (3840 px × 2160 px), MMAP は ASUKANET 製 ASKA3D-310 (310 mm × 310 mm, 厚さ 5 mm), ホットミラーは株式会社トーカイ製 (310 mm × 310 mm, 厚さ 3.3 mm) を使用し、赤外線センサーには Vzense 製 DCAM710 (640 px × 480 px) を用いた。DCAM710 は IR を用いた Time of Flight (ToF) センサーであり、その IR 波長は今回使用したホットミラーが反射する 940 nm 程度である。また、空中像の飛び出し距離は MMAP の下端から 10 cm とした。

ToF センサーにより取得される深度情報を基に、実物体の形状を CG 空間にマッピングすることができる。図 5 は得られた深度情報を可視化した画像であり、橙色の物はユーザーから見て奥側に、緑色の物は手前側にあることを示している。今回、空中像として表示する CG 映像の描画にはゲーム開発エンジンである Unity を使用した。センサーの各画素に対応する Cube を Unity 空間内に配置し、空中像結像位置における深度値が閾値を超える画素の Cube のみを Active 状態とする。これにより、Unity 空間内で実物体の形状情報を利用したインタラクションが実装可能となる。

4. アプリケーション

実物体の形状を利用した空中像インタラクションを複数実装した。映像の時間的変化が容易である空中像と、実体を持つため直接操作できる実物体の両者の特性を活かすこ

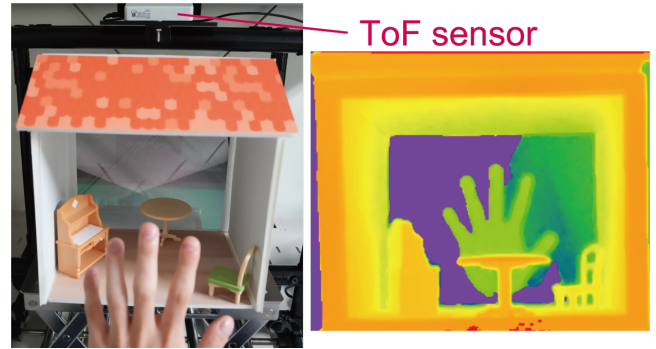


図 5 ToF センサーで取得される深度情報

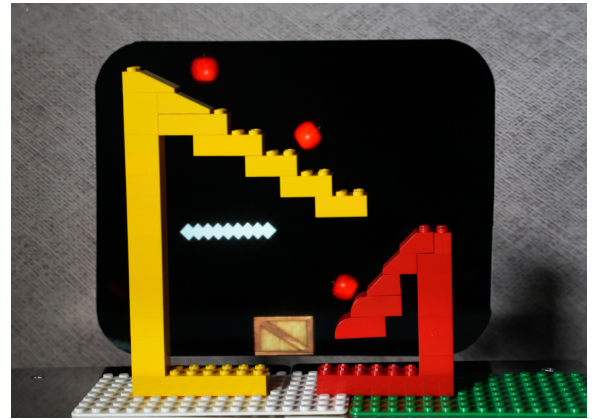


図 6 実物体に沿って転がる空中像

とで、CG 空間や実空間単体では実現し得ない体験が提供可能となる。それぞれの様子を図 1, 6, 7 に示す。

図 1 は、空中像キャラクターに降り注ぐ雨を実物体で遮ることでキャラクターを手助けするインタラクションである。ToF センサーにより空中像結像位置にある傘や手の形状が取得され、Unity 空間にマッピングされる。その後、マッピングされた実物体と雨の衝突判定を行い、衝突位置で雨が弾かれるよう描画する。このように描画された雨を空中像として表示することで、正面から空中像を鑑賞するユーザーに、実物体で雨が遮蔽される映像を提示可能となる。こうして、テレビゲームにおいてコントローラを用いるような CG 映像への間接的干渉ではなく、実物体を使用した直接的な干渉が実現される。

図 6 は、空中像のリングが転がるコースをレゴブロックで形成するインタラクションである。前述のアプリケーションと同様にレゴブロックの形状が取得され、CG 映像との衝突判定・物理演算が適用される。図 6 のように実物体が他の実物体の下方にある場合、空中像上部に配置されたセンサー (図 3, Sensor A) では形状を取得することができない。一方で、本手法のように空中像背部からセンシングする光学系であれば計測可能となる。このようなアプリケーションでは任意の物を任意の形状で使用できるため、体験者の想像力を最大限活用した自由度の高いインタラクションが期待される。



図 7 ドールハウス内での空中像インタラクション

図 7 は部屋状の空間における空中像インタラクションである。ドールハウス内部にある実物体の形状が検出され、空中像として表示される猫がその上に飛び乗る。空中像の上下左右が天井・床・壁で覆われているため、図 3 の Sensor B のように空中像に対して斜め方向からセンシングすると遮蔽されてしまう領域が生じる。本手法であれば、ユーザーが空中像を鑑賞可能な全ての領域において実物体を計測することができる。このように実物体で囲まれた空間内における空中像インタラクションは、アミューズメント施設での応用などが考えられる。例えば手前にケースなどを置いて光学素子を奥側に隠すことで、実空間にあるインタラクションの舞台・環境にアニメやゲームなどのキャラクターが存在するかのような体験を作り出すことが可能である。またこの方法は、空中像の視域の制限や迷光の問題なども壁の存在によって隠すことができるため、体験者が不自然さを感じないように CG 映像と実物体を融合した、不思議さのある体験を実現できると考えられる。

5. 考察

ホットミラーを用いて空中像背部視点からセンシングすることで、実物体と空中像の幾何学的整合性を取りやすい光学系となる。空中像結像位置に実物体が存在する場合、空中像を生成する光はそこで遮られユーザーの視点に届かなくなる。そのため、空中像と実物体のインタラクションを実現するには、ユーザーの視点に届く空中像生成光とそれを遮蔽する実物体の位置関係を明確にする必要がある。そこで空中像背部視点からセンシングすることにより、空中像生成光が遮蔽されない限界位置、すなわち空中像と実物体が接して見える位置を捉えることができる。この位置における両者の様子を適切に描画することで、実物体と空中像のインタラクションが実現される。

一方、今回使用した光学系では実物体の光学機器側の形状しか計測できないというリミテーションがある。空中像の背後視点から撮影しているため、ユーザー側に伸びる実物体の奥行やその形状を計測することはできない。これは

空中像が二次元平面内で移動する場合には問題にならないが、奥行移動を含む三次元空間を移動する場合に考慮する必要がある。

また、空中像を鑑賞する視点は一定の範囲内に限定される。ユーザーの視点が変わると実物体で遮蔽される空中像領域も変化してしまう。これにより実物体と空中像が接して見える位置も変化してしまうため、本手法におけるユーザーは正面から空中像を鑑賞する必要がある。このリミテーションは、ユーザーの視点に応じてセンサーの位置を動的に変化させることで解決する可能性がある。

今後の展望として、実物体の形状だけでなく三次元位置の情報も同時に利用したインタラクションが期待される。空中像は光源素子に対してディスプレイと面対称な位置に結像するため、アクチュエータでディスプレイの位置を変化させることで奥行方向に移動可能である。したがって、ToF センサーで取得される深度値に応じて空中像位置を変化させることで三次元的なインタラクションが実装できる。本手法は空中像背部視点からのセンシングであるため、実物体の奥行方向移動にロバストである。ただし前述したように、実物体の奥行形状を計測するためには異なるセンサーを用意する必要がある。

さらに、本手法は空中像のオクルージョン問題の解決にも利用可能である。空中像は光学系の原理上、空中像よりも奥にある物との正しいオクルージョン関係を提示できない。Hunter[14] らはハンドトラッキングによって手の位置を認識し、手と空中像が重なる部分は映像に穴を開けることでこの問題に対処した。本手法を用いることで、手だけでなく実物体とのインタラクション時にも同様の手段を取ることができる。

6. 結論

本論文では、空中像結像平面とセンサーの光軸を垂直にした光学系を用いることで、実物体の形状を不足なく利用した空中像インタラクションを実現した。ホットミラーでの赤外光反射を利用したセンシングにより、空中像の背部から結像位置にある実物体の計測が可能となる。本手法を用いることで、ユーザーの視点に届く空中像生成光とそれを遮蔽する実物体の位置関係が明確になる。またアプリケーションとしていくつかの空中像インタラクションを実装し、従来手法では実現が難しいインタラクション例を示した。今後は本手法を活かした様々な空中像インタラクションを検討する。

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ものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] Apple. Vision Pro. <https://www.apple.com/apple-vision-pro/>. Accessed: 2023-07-03.
- [2] team Lab. MORI Building DIGITAL ART MUSEUM EPSON teamLab Borderless. <https://borderless.teamlab.art/jp/>. Accessed: 2023-07-03.
- [3] Satoshi Maekawa, Kouichi Nitta, and Osamu Matoba. Transmissive optical imaging device with micromirror array. In *Three-dimensional TV, video, and display V*, Vol. 6392, pp. 130–137. SPIE, 2006.
- [4] Yuki Maeda, Daisuke Miyazaki, and Satoshi Maekawa. Aerial imaging display based on a heterogeneous imaging system consisting of roof mirror arrays. In *2014 IEEE 3rd Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)*, pp. 211–215. IEEE, 2014.
- [5] Hirotsugu 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.
- [6] Takumi Yoshida, Hideaki Nii, Naoki Kawakami, and Susumu Tachi. Twinkle: interface for using handheld projectors to interact with physical surfaces. In *ACM SIGGRAPH 2009 Emerging Technologies*, pp. 1–1. 2009.
- [7] 黒崎美聡, 須田拓也, 串山久美子. 実物体の木の特性を活かしたインタラクティブな絵本による読書体験の提案. No. 2D-63, pp. 678–679. 情報処理学会, Feb 2019.
- [8] Daniel Eckhoff, Alvaro Cassinelli, Tuo Liu, and Christian Sandor. Psychophysical effects of experiencing burning hands in augmented reality. In *International Conference on Virtual Reality and Augmented Reality*, pp. 83–95. Springer, 2020.
- [9] 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.
- [10] 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, 2021.
- [11] Junichi Yamaoka and Yasuaki Kakehi. Mirageprinter: Interactive fabrication on a 3d printer with a mid-air display. In *ACM SIGGRAPH 2016 Studio*, SIGGRAPH '16. Association for Computing Machinery, 2016.
- [12] Shohei Ando and Naoya Koizumi. Floagent: Interaction with mid-air image via hidden sensors. In *SIGGRAPH Asia 2022 Emerging Technologies*, SA '22. Association for Computing Machinery, 2022.
- [13] 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.
- [14] Seth Hunter, Ron Azuma, Jonathan Moisant-Thompson, Dave MacLeod, and Derek Disanj. Mid-air interaction with a 3d aerial display. In *ACM SIGGRAPH 2017 Emerging Technologies*, SIGGRAPH '17. Association for Computing Machinery, 2017.