

# 複合現実感システムのための 空中像に対する影の投影の提案

## A Proposal of Shadow Projection onto Mid-air Images for Mixed-Reality System

山本紘暉<sup>†</sup> 金ハンヨウル<sup>†</sup> 小泉直也<sup>‡</sup> 苗村健<sup>†‡</sup>  
Hiroki YAMAMOTO Hanyuool KIM Naoya KOIZUMI Takeshi NAEMURA

<sup>†</sup> 東京大学大学院情報理工学系研究科  
<sup>†</sup> Graduate School of Information Science  
and Technology, The University of Tokyo

<sup>‡</sup> 東京大学大学院情報学環  
<sup>‡</sup> Graduate School of Interdisciplinary  
Information Studies, The University of Tokyo

### ABSTRACT

Mixed Reality is the concept of mixing real world and virtual object seamlessly. In video see-through systems, it has been confirmed that optical consistency has the effect on the perception of spatial position, shape, and reality of virtual objects. However, there has not been a proposal or verification of optical consistency to mid-air image systems. In this paper, we proposed presenting the shadow of mid-air images with a projector for optical consistency, and we conducted an experiment that tested the effect of the proposal. The result showed that the shadow projection improved the speed and accuracy of depth perception of mid-air images.

**Keywords:** Mixed Reality, Mid-air Image, Optical Consistency, Shadow Projection, Depth Perception

### 1 はじめに

実世界とバーチャル物体を融合して扱う概念として、複合現実感[1]がある。これを実現する手法の一つに空中像を用いたシステムがある。空中像の実装方法として、レンズやミラー等で空中に実像を結像させる方法が挙げられる。この手法には、表示のためのスクリーンやディスプレイを用いずに映像を表示できるという利点がある。

バーチャル物体の実在感を上げるために、実世界と物体の光源環境を一致させることで、光学的整合性をとる必要がある。ヘッドマウントディスプレイ (HMD) や携帯端末といったビデオシースルーの環境においては、陰影情報を用いて光学的整合性を向上させることで、物体の位置や形状、実在感の知覚に効果を与えられることが確認されている [2, 3, 4]。このように物体が画面内で表示される環境では、光学的整合性の提案や効果の検証がなされているのに対して、空中像のような実世界に映像が浮かび上がる環境においては、提案や検証がなされていない。

本論文では、画面上ではなく、実世界に浮かび上がった映像に対する光学的整合性をとる手法として、プロジェクタによる影の投影を提案する。また、この効果を奥行き知覚の速度・精度の観点から評価する実験を行った。

### 2 関連研究

空中像を実現する手法の1つに結像系があげられる。結像系とは凸レンズ、凹面鏡、実像鏡などの光学素子を用いて実像を提示するシステムである (本論文における実像鏡とは、DCRA[5]や AI-Plate[6]といった2軸の再帰性反射を用いて空中実像を結像する光学デバイスを指す)。ユーザに装置をつける必要や、表示される像の周辺にスクリーンを設置する必要がなく、実世界内での表示ができる。そのため、バーチャル物体と実物の混在感の高い環境をつくり、映像に直接触れるインタラクションが可能であるという利点がある。空中像システムの例として、実像鏡を用いた MARIO[7]があげられる。このシステムでは3次元空間の任意の位置に空中像を生成し、実物によるインタラクションを可能にした。

複合現実感システムにおいて、インタラクションの質を向上させるために、幾何学的整合性・時間的整合性・光学的整合性をとる必要がある。この内、

光学的整合性とは、実世界とバーチャル物体の光源環境を一致させることを指す。両者を違和感なく重畳することで、リアリティを向上させることができ、ビデオシースルー方式のシステムにおいて、その有効性が示されている。Wanger[2]は画面内で物体と影を同時に提示することによって、位置や形状の知覚に効果を与えられることを示した。石井ら[3]はバーチャル物体を別のバーチャル物体の上に置くというタスクにおいて、影の提示には時間を短縮し、成功率を上昇させる効果があることを示した。また、Suganoら[4]はHMD環境において、影がバーチャル物体の实在感を向上させること、また、影が複数の物体の位置関係を速く、容易に知覚するための手がかりとなっていることを示した。

しかしながら、空中像のように画面上ではなく実世界に浮かび上がって表示する環境においては、光学的整合性の提案・検証がなされていない。ビデオシースルー方式においては実物とバーチャル物体がどちらも画面内で表示されるのに対して、空中像においては実物とバーチャル物体が実世界に存在する。よって、画面内での光学的整合性の効果と空中像システムにおける効果が同様であるかは定かではなく、検証が必要である。

### 3 提案手法

本論文では、光学的整合性をとる手法として、影のプロジェクトンを提案する。Fig. 1のように、プロジェクタを用いて影を提示する。また、これに伴い、バーチャル物体のシェーディングに用いる仮想光源として、プロジェクタと同じ位置に点光源を設置する。実世界に物体を設置したときと同様の光の当たり方（陰）を再現することが可能になり、物体の違和感を抑えられると考えられる。

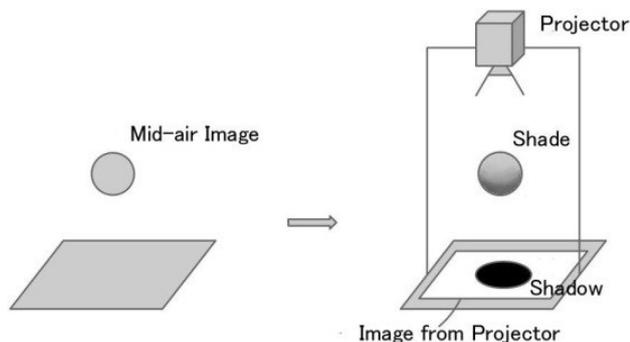


Fig. 1: Shadow Projection onto Mid-air Image

## 4 実験

### 4.1 目的

提案手法の有効性を検討するために、奥行き知覚に焦点を当て、この速度と精度を測定する実験を行った。奥行き知覚にかかる時間と精度を測定する実験を行った。また、提案手法に伴い、陰(shade)を付与したため、これによる効果の測定も同時に行った。

### 4.2 装置

本実験では実像鏡を用いて、Fig. 2に示すようなシステムを構成した。ディスプレイには飛び出し距離を設計するために偏光メガネ式の3Dディスプレイ(ZALMAN製ZM-M215W)を用いた。両眼視差により視差の異なる複数の空中像を同時に表示することができた。

被験者に提示した空中像はFig. 3のようであった。球を3D描画し、被験者の両目に対応する位置にカメラを設置し、レンダリングを行った。ユーザの両目の距離は65mmと設定した[8]。

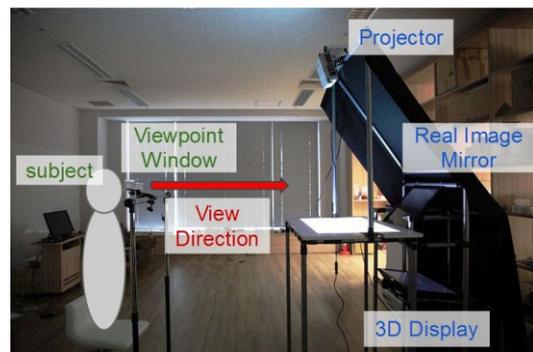


Fig. 2: Experiment Environment

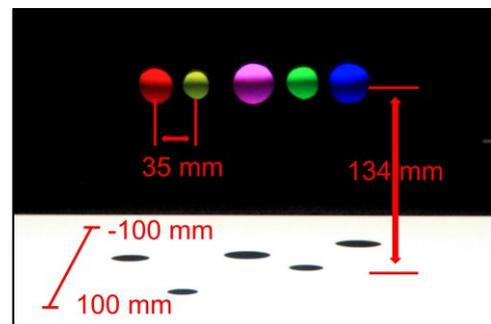
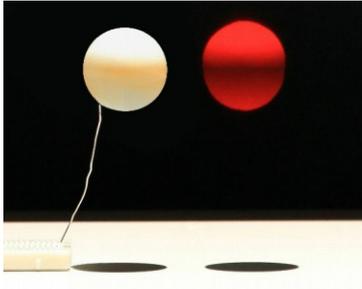


Fig. 3: Arrangement of Displayed Objects

提案手法で述べたような仮想光源のみを設置した場合、空中像の上半分のみが表示されてしまうので、テーブルからの反射光を再現するために、下からの平行光源と環境光を設置した(Fig. 4)。



**Fig. 4: Real Object (Left) and Mid-air Image with Shadow Projection (Right)**

空中像は球を 5 つ表示した。高さをテーブルから 134 mm の位置で固定し、横方向に 35 mm の等間隔で配置した。色は赤、青、緑、黄、紫を用い、色の配置はランダムにした。球の大きさは 5 mm~15 mm でランダム、奥行きは-100 mm~100 mm の 10 mm 間隔の位置の中でランダムにした。

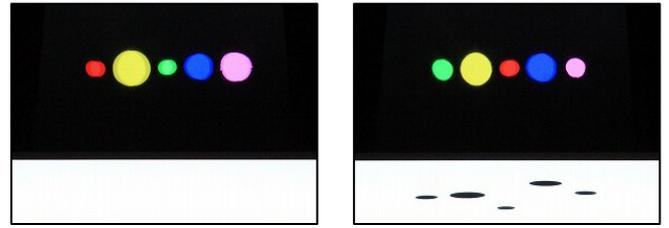
視点の位置は高さ 134 mm で表示位置から 1.2 m 離れた位置に設置した。3D ディスプレイの方式上、視点が動いてしまうと、視差による表示位置がずれてしまうので、被験者には視点固定窓から覗き込む形で観察させた(Fig. 2)。

### 4.3 手順

実験の手順は以下の通りであった。被験者を椅子に座らせ、目線が窓に合うように椅子の高さを調整させた。陰なし、影なしの球を奥行き 100 mm と -100 mm の位置に交互に 2 回ずつ提示し、立体視での奥行き知覚が可能であることを確認した。被験者に 5 つの球を提示し、奥行きの順に表示物体の色を答えさせ、回答にかかった時間、回答の色の順序を記録した。これを陰の有無、影の有無の掛けあわせ（陰影条件）の 4 条件でそれぞれ 24 回ずつ試行を行った(Fig. 5)。被験者は立体視、色の識別が可能な大学生、大学院生男女 9 名だった。

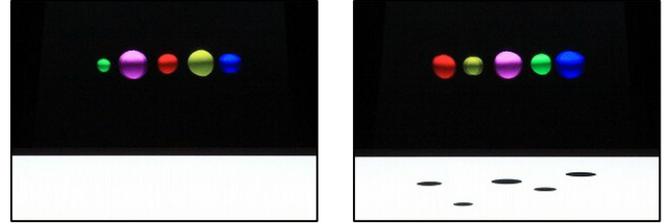
### 4.4 結果

速度の指標として回答にかかった時間を用い、精度の指標として回答の色の順序の正解の色の順序との Kendall's rank correlation coefficient を用いた。それぞれについて、各陰影条件で被験者ごとに平均したものを回答時間、回答順位相関とした。



(a) Shade-Off Shadow-Off

(b) Shade-Off Shadow-On



(c) Shade-On Shadow-Off

(d) Shade-On Shadow-On

**Fig. 5: Displayed Objects (photo taken without polarizing glasses)**

被験者 9 名の回答時間、回答順位相関について平均したものをそれぞれ Fig. 6(a), Fig. 6(b)に示す。回答時間において、影の効果による有意差 (-1.87 秒, 有意水準 1%) が有り、陰の効果による有意差は無かった。回答順位相関において、影の効果による有意差 (+0.22, 有意水準 1%) が有り、陰の効果による有意差 (-0.02, 有意水準 5%) が有った。

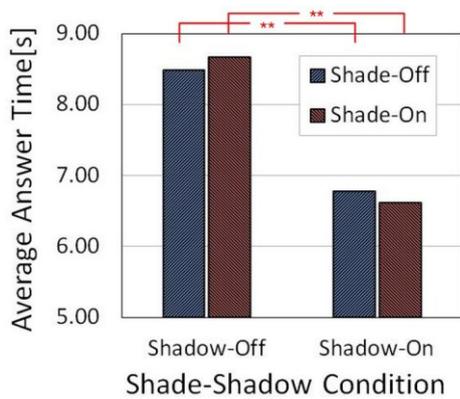
また、回答した奥行きの色が全て合っていた試行の割合は Table 1 の通りだった。影を提示した場合、陰の有無に関わらず 8 割以上の正解率が得られた。

**Table 1: Correct Answer Rate**

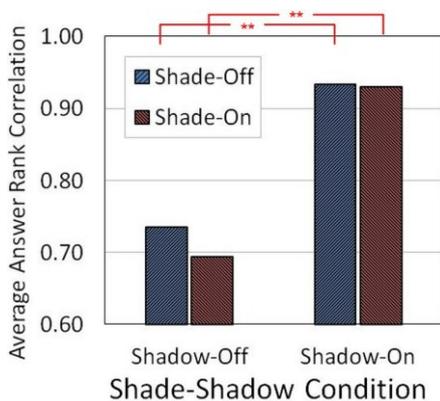
	Shadow-Off	Shadow-On
Shade-Off	0.412	0.828
Shade-On	0.365	0.842

## 5 考察

影による回答時間の減少、回答順位相関の増加から、影のプロジェクションが奥行き知覚の時間短縮、精度向上において有効であることが示された。陰による回答順位相関の減少に関しては、空中像と光源との位置関係がわかり、回答順位相関が増大すると予想された。しかし、陰により回答順位相関が下がった理由としては、明度が下がることによって立体視が難しくなったことや、陰無で平面に見えていたものが、陰有で立体に見えることによって奥行き方向の識別が難しくなっていたことが考えられる。



(a) Speed



(b) Rank Correlation

**Fig. 6: Result under each Shade-Shadow Condition**  
 (\*\* means significance difference ( $p < .01$ ))

## 6 まとめと今後の課題

本論文では、空中像をはじめとした画面から浮かび上がった映像に対して光学的整合性をとる手法として、プロジェクタによる影のプロジェクションを提案した。また、空中像に対してプロジェクタの位置に応じた陰の付与を行った。この提案を評価するため、実像鏡と3Dディスプレイを用いて空中像を表示し、奥行き知覚にかかる時間と精度を各陰影条件間で比較した。その結果、影のプロジェクションによって速度・精度の向上がみられ、提案手法の有効性が確認された。

また、今回の結果から空中像に対する影のプロジェクションはビデオシースルー方式における光学的整合性と同様の効果があることが示唆された。よって、ビデオシースルー方式で明らかだった、形状、実在感の知覚に対する効果が空中像に対しても存在すると考えられる。

今後は、これらの効果について測定し、空中像の実在感を作り出すことを可能にすることで、より高度な複合現実感を実現することが課題である。

## 謝辞

本研究の一部はJST CREST「共生社会に向けた人間調和型情報技術の構築」領域「局所性・指向性制御に基づく多人数調和型情報提示技術の構築と実践」による助成を受けた。

## 参考文献

- [1] P. Milgram, and F. Kishino, "A taxonomy of mixed reality visual displays," IEICE. TRANSACTIONS on Information and Systems, vol. 77, no. 12, pp. 1321-1329 (1994)
- [2] L. Wanger, "The Effect of Shadow Quality on the Perception of Spatial Relationships in Computer Generated Imagery," Proceedings of the 1992 symposium on Interactive 3D graphics, ACM, pp. 39-42. (1992)
- [3] 石井雅博, 関谷尊範, 唐政, 長谷川晶一, 佐藤誠, "両眼立体視とキャストシャドウの提示がVR空間におけるPick-and-Place Taskに与える影響," 光学, vol. 37, no. 7, pp. 400-405 (2008).
- [4] N. Sugano, H. Kato, and H. Tachibana, "The effects of shadow representation of virtual objects in augmented reality", Mixed and Augmented Reality, 2003. Proceedings. The Second IEEE and ACM International Symposium on. IEEE, pp. 76-83 (2003)
- [5] S. Maekawa, K. Nitta, and O. Matoba, "Transmissive Optical Imaging Device with Micromirror Array," Optics East 2006, International Society for Optics and Photonics, pp. 63920E-63920E (2006).
- [6] ASUKANET, "AERIAL IMAGING Technologies," <http://aerialimaging.tv/> (2014/05/16 アクセス).
- [7] H. Kim, I. Takahashi, H. Yamamoto, T. Kai, S. Maekawa, and T. Naemura, "MARIO: Mid-air Augmented Reality Interaction with Objects," ACE 2013 Creative Showcase, Lecture Notes in Computer Science, vol. 8253, pp. 560-563, (2013)
- [8] 独立行政法人 産業技術総合研究所 デジタルヒューマン工学研究センター, "AIST 人体寸法データベース 1991-92 A9 瞳孔間幅 Interpupillary breadth," <http://www.dh.aist.go.jp/AIST91DB/91-92/data/list.html> (2014/05/16 アクセス)