This article is a technical report without peer review, and its polished and/or extended version may be published elsewhere.

第 27 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集（2022 年 9 月）

鏡像空間と実空間の境界を自在に超える超鏡空中像光学系の提案

佐野文香 1)，巻口誉宗 1)，松元崇裕 1)，山本隆二 1)

1) NTT 人情報研究所（〒 239-0847 神奈川県横須賀市光の丘 1-1, ayaka.sano.sc@hco.ntt.co.jp）

概要: 生活に身近な鏡にデジタル情報を提示する手法はこれまで多々提案されているが，情報を表示できる範囲は鏡の中に閉じている．そこで我々は新たに，デジタル情報を鏡像空間だけでなく実空間へも自在に移動させることのできる超鏡空中像を提案する．本稿では超鏡空中像の実現手法として再帰性反射材とビームスプリッター，移動式ディスプレイからなる光学系を提案し，原理確認のためのプロトタイプの実装，および輝度測定による光学特性実験とその結果を述べる．

キーワード： 鏡像，空中像，AIRR，複合現実

1. はじめに

実在する鏡にデジタル情報を提示する光学系の代表例として，ビームスプリッター（入射光の一部を透過し，一部を反射する光学素子）の裏面にディスプレイを設置したスマートミラーが提案されている．スマートミラーは構成がシンプルなため，日常生活での手軽な情報取得手段としてのコンテキストアウェアコンピューティング [1] の分野をはじめ，鏡に映ったユーザや実物体にデジタル情報を重畳する MR(Mixed Reality)[2] や AR(Augmented Reality)[3] の分野での活用も提案されている．

しかし人は鏡像空間を奥行きも含めた 3 次元空間として認知するのに対し，スマートミラーのシンプルな光学系ではデジタル情報の奥行き方向の表示位置がミラー面に固定され，鏡に映ったユーザの虚像と同じ奥行き位置にデジタル情報を重畳するといった 3 次元的な情報提示が困難である．我々は鏡像空間におけるデジタル情報をより自然に，より実在感を持って提示するために，奥行き位置の提示が極めて重要な要素と考えている．また，本来デジタル情報は実体をもたないことから，その提示先として鏡像空間や実空間といった物理的な制約に縛られる必要はない．そこで我々は鏡像空間におけるデジタル情報の奥行き位置再現の理想形として，デジタル情報が鏡面を超えて実空間にまで自在に移動することのできる超鏡空中像（AITM: Aerial image transcending mirror）のコンセプトを提案する．

本稿では，超鏡空中像のコンセプトを実現するために，再帰反射を用いた既存の空中像光学系である AIRR(Aerial imaging by retro-reflection)[4] を拡張した新たな光学系を提案する．そしてプロトタイプの実装によって，表示される空中像が鏡像空間と実空間を相互に連続的に移動できること，および輝度測定による評価実験によって提案光学系による空中像の輝度は既存の AIRR 光学系との比較において大幅な劣化が生じないことを示す．

2. 関連研究

2.1 鏡像空間へのデジタル情報提示

スマートミラーのシンプルな光学系で奥行き位置を提示する手法として，ユーザの視点位置を取得し，ディスプレイの映像をリアルタイムに書き換えることで運動視差を再現する手法 [2] が提案されている．しかし，運動視差のみの再現では，両眼視差・輻輳・調節といった人の他の奥行き知覚をカバーできない．また，光学的な拡張としてビームスプリッターの裏に裸眼 3D ディスプレイを設置する手法 [3] が提案されているが，裸眼 3D ディスプレイは視域の増加に伴って解像度が低下することや，再現できる奥行きが融合限界によって制限されるという問題がある．こうした問題に対し，ALiSE[5] では，ディスプレイを物理的にミラーから奥行方向へ離した光学系によって鏡像空間内のデジタル情報の奥行きを自然に提示できることを示している．鏡面とディスプレイに物理的な距離をもたせるアプローチはシンプルながら人の奥行き知覚の多くの要素をカバーできる．

2.2 実空間へのデジタル情報提示

実空間へのデジタル情報提示として，レンズ [6] や Micro-mirror array plates(MMAP)[7]，再帰性反射材 [4] などの光学素子を用いてディスプレイの実像をユーザに視認させる空中像光学系が提案されている．空中像光学系における奥行き位置を提示する手法として，前述の鏡像空間での場合と同様にディスプレイから光学素子までの光路長を物理的に変化させる手法が有効であり，例としてアクチュエータを用いたディスプレイの移動による手法 [8] や，光路中に設置したミラーの回転による手法 [9] が提案されている．

2.3 実空間と鏡像空間へのデジタル情報提示

実空間と鏡像空間の両方へデジタル情報を提示する研究として，実空間に表示した空中像のキャラクタの実在感を高めるために，そのキャラクタが鏡に反射しているかのような空中像を鏡像空間内に同時に提示する手法 [10] が提案されている．この研究では実空間の空中像が主体であり，鏡

© 2022 日本バーチャルリアリティ学会

像空間と実空間の移動を含めた奥行き位置の提示については言及されていない．

3. 超鏡空中像

超鏡空中像のコンセプトは，鏡像空間と実空間のそれぞれにデジタル情報を提示できるだけでなく，奥行き位置を変化させ，鏡面を超えた移動の実現を目指している．

鏡像空間への情報提示におけるデジタル情報の奥行き位置制御の実現は，ユーザの虚像へのより自然な情報重畳に加え，対話相手をユーザの虚像と並べて表示して同室感を高める鏡越しコミュニケーションなどへの活用が期待できる．また，実空間への情報提示は，空中像との直接的なインタラクションの実現や，ボタンやキーボードなどを空中像として提示することによる操作インタフェースの提供が期待できる．さらに超鏡空中像ならではの特徴である，鏡像空間から実空間へ何かが飛び出してくる体験は我々の日常生活で触れることがないため，誘目性の高い広告の実現や，デジタル情報をユーザの手元から鏡越しの対話相手へパスしてシェアするなどの新たな鏡越しのインタラクションの創出も期待できる．

3.1 設計方針

我々は，超鏡空中像のコンセプトを実現する光学系を，以下の３点を設計方針とし，既存の空中像光学系を拡張するアプローチによって検討した．

1. 表示像が鏡像空間と実空間を連続的に移動できること
2. 表示像を等身大までスケールできること
3. 表示像の輝度・画質低下を軽減できること

１点目の連続的な移動は，鏡像空間と実空間を表示像の奥行きを制御することによって自然に行き来するコンセプト実現に不可欠の設計方針である．２点目の等身大へのスケールは，ユーザの虚像に表示像を重畳するインタラクションの実現や鏡越しコミュニケーションへの拡張を想定した場合に，表示像自体も同様の大きさが求められることによる．また，等身大へのスケールのためには光学系の省スペース化も実装において重要な要素となる．３点目の表示像の輝度低下の軽減は，既存の空中像光学系を拡張するにあたりその品質を可能な限り維持するための方針である．

3.2 提案光学系

設計方針を満たす超鏡空中像の光学系として図１の設計を提案する．我々は拡張元の空中像表示手法として，レンズ光学系や MMAP 光学系と比較して大型化が容易という観点で，再帰反射による AIRR の光学系を採用した．

提案光学系は，位相差フィルムを貼合した再帰性反射材と２枚のビームスプリッター，移動式ディスプレイから構成される．ビームスプリッターには既存の AIRR 光学系による輝度向上手法と同様に，入射光の偏光方向によって反射と透過の性質が変化する反射偏光特性を持たせる．各光学部材の配置は図１の通りである．２枚のビームスプリッターのうち，ビームスプリッター１は空中像結像に，ビームスプリッター２はユーザに対して鏡像空間を形成するために使用する．ビームスプリッター１の反射偏光の光軸方向として，以下では s 偏光を反射し，p 偏光を透過する方向で配置するものとする．ビームスプリッター２はビームスプリッター１と透過軸が平行となるよう配置する．

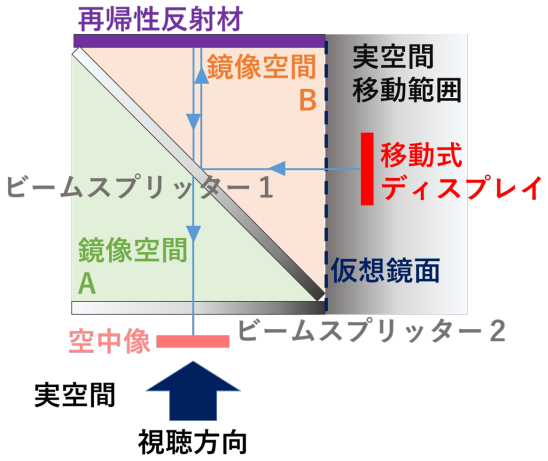

図 1: 提案光学系の上面図

移動式ディスプレイは表示したい空中像の位置によって，表示面の方向と移動領域を変化させる．以下では移動式ディスプレイの位置の説明に際し，図１のように「実空間」,「鏡像空間 A」,「鏡像空間 B」,「実空間移動範囲」を定義する．

パタン１．空中像を実空間，鏡像空間 A へ表示する場合

移動式ディスプレイを図１のように表示面が再帰性反射材に対して垂直とすることで，移動式ディスプレイから出た光はビームスプリッター１に入射する．このとき，ビームスプリッター１の反射偏光特性によって s 偏光成分は反射し，p 偏光成分は透過する．ビームスプリッター１の s 偏光成分の反射光は再帰性反射材によって反射されるが，この際に表面の位相差フィルムを透過することによって偏光方向が p 偏光に変化する．p 偏光はビームスプリッター１の透過軸のため反射光は透過し，実像の空中像が結像する．この原理は既存の AIRR 光学系と等しい．提案光学系では，鏡像空間を形成するビームスプリッター２が追加されているが，空中像は p 偏光で構成されており，ビームスプリッター２の偏光透過成分と等しいため，理想的な反射偏光特性を仮定すると輝度損失なしでユーザに空中像を視認させることができると考えられる．以降では再帰性反射によって結像する空中像を結像空中像と定義する．

また，移動式ディスプレイの位置が実空間移動範囲の場合，空中像は実空間に結像され，鏡像空間 B に位置する場合は鏡像空間 A に結像する．よって移動ディスプレイを実空間移動範囲から鏡像空間 B へ，鏡像空間 B から実空間移動範囲へ連続的に移動させることで，空中像はビームスプリッター２を超えて鏡像空間と実空間を連続的に移動できる．

パタン２．空中像を鏡像空間 B へ表示する場合

移動式ディスプレイを図２のように鏡像空間 B に配置し，表示面を再帰性反射材に対して平行に，すなわち視聴方向へ

ⓒ 2022 日本バーチャルリアリティ学会

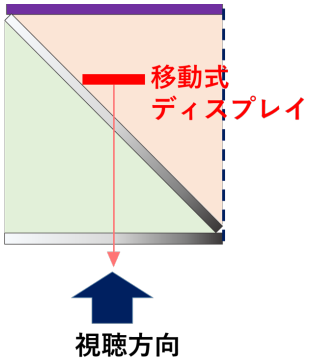

図 2: パタン２における移動式ディスプレイの配置

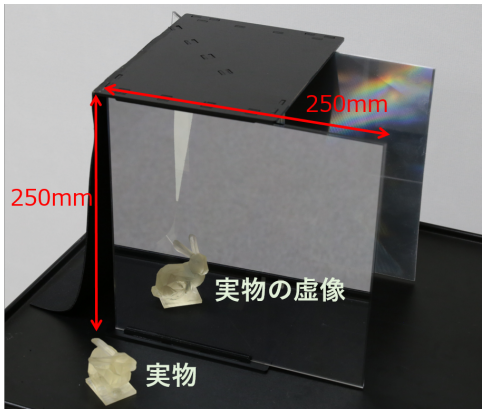

図 3: 実装したプロトタイプ

向ける．移動式ディスプレイから出た光のうち p 偏光成分はビームスプリッター 1，2 を透過するため，ユーザは鏡越しに移動式ディスプレイの表示像を空中像として視認する．以降，鏡像空間 B に表示する空中像を直視空中像とする．

4. 実装と評価

提案光学系によって各領域への空中像が表示できることの検証，および基礎的な光学特性を評価するため，簡易的なプロトタイプを実装した（図 3）．

実装にあたり，再帰性反射材として日本カーバイド工業製空中ディスプレイ用リフレクタ RF-Ay（250mm 四方，位相差フィルム貼合），ビームスプリッターとして反射偏光特性フィルムと吸収偏光特性フィルムをそれぞれ貼合した 3mm 厚透明アクリル板，移動式ディスプレイとしてスマートフォン ASUS 製 ASUS_Z01QD を用いた．移動式ディスプレイは今回の実装では手動による移動とした．

4.1 各領域への空中像表示確認

実装したプロトタイプを用いて実空間，鏡像空間 A, 鏡像空間 B の各領域に空中像を表示した写真を図 4 に示す．図中のうさぎは実空間に配置した実物体であり，青色の人型のキャラクターは空中像である．提案した光学系によって各領域それぞれに空中像が表示できることが確認できた他，鏡像空間 A に空中像を表示した状態で移動式ディスプレイを仮想鏡面を超える位置まで移動させることで，空中像が実空間へ連続的に移動してくることを目視にて確認した．

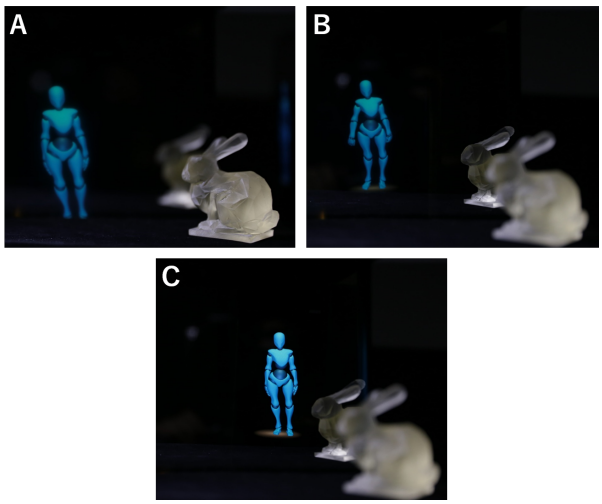

図 4: プロトタイプで表示した人型の空中像．F 値 2.8，シャッタースピード 1/400，ISO 値 1600 で撮影．A: 実空間への結像空中像．B: 鏡像空間 A への結像空中像．C: 鏡像空間 B への直視空中像

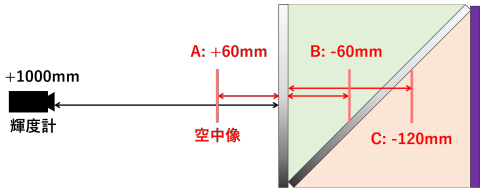

図 5: 輝度測定における空中像と輝度計の位置

4.2 光学特性評価

プロトタイプにより表示される空中像の輝度測定を行い，既存の AIRR 光学系に対する輝度特性を評価した．

図 5 に示すように，空中像を実空間，鏡像空間 A，鏡像空間 B に表示し，輝度計を用いてそれぞれの空中像の輝度を測定した．空中像の表示位置は実空間側を正，鏡像空間側を負とした座標系を設定し，位置 A: +60 mm（実空間），位置 B: -60 mm（鏡像空間 A），位置 C: -120 mm（鏡像空間 B）とした．位置 A，B に表示される空中像は結像空中像，位置 C に表示される空中像は直視空中像である．空中像として，移動式ディスプレイには黒背景に直径 65 mm の白色円（RGB[255,255,255]）を表示した．輝度計にはコニカミノルタ製 cs-100A を使用した．輝度計は三脚によって測定軸が空中像の中心と同じ高さとなるよう固定し，ビームスプリッター 2 から+1000 mm の位置に配置した．

まず，既存の AIRR 光学系と等価な光学系として，提案光学系からビームスプリッター 2 を除いた状態にて，位置 A・B・C にそれぞれ空中像を表示し，輝度を測定した．次に提案光学系であるビームスプリッター 2 を配置した状態にて，同様に位置 A・B・C に空中像を表示し，輝度を測定した．各測定で空中像の輝度はそれぞれ 3 回ずつ測定し，平均値を求めた．

測定結果を図 6 に示す．既存の AIRR 光学系と等価な，ビームスプリッター 2 を除いた構成での空中像の輝度を 100% としたとき，ビームスプリッター 2 を配置した提案光学系の

ⓒ 2022 日本バーチャルリアリティ学会

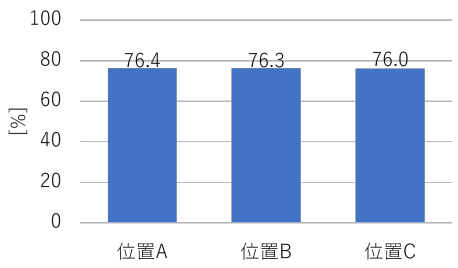

図 6: 既存の AIRR 光学系の空中像の輝度を基準とした提案光学系の空中像の輝度割合（%）

空中像の輝度の割合は，位置 A で 76.4%，位置 B で 76.3%，位置 C で 76.0%であった．このことから，提案光学系では空中像の表示位置が鏡像空間か実空間かに依らず，既存の AIRR 光学系と比較して空中像の輝度を 76%以上維持できることがわかった．

5. 考察と今後の課題

実装と評価実験の結果を踏まえ，設計した光学系が 3.1 節で述べた設計方針を満たすか検討する．１点目の表示像の連続的な移動は，空中像の表示位置に合わせて移動式ディスプレイの位置と向きを変えることで，鏡像空間と実空間それぞれに空中像を表示できること，および鏡像空間と実空間を連続的に行き来できることを，プロトタイプによって確認した．２点目の表示像の等身大へのスケールは，提案光学系で使用している光学素子はいずれもタイリングによる大型化が容易であることから，十分に実現性があると考えられる．さらに，既存の AIRR 光学系では鏡像空間 B は再帰反射の光路のため物体等を配置できない空間であるが，提案光学系では直視空中像の移動領域として活用することで，すべての表示範囲を結像空中像のみで表示する場合と比較して大幅に移動領域を縮小し，省スペースな実装が実現できると考えられる．３点目の表示像の輝度・画質低下の軽減は，提案光学系では既存の AIRR 光学系の偏光特性に着目し，鏡像空間を提示するビームスプリッター 2 に反射偏光特性をもたせたことで，空中像の輝度を 76%以上維持できることを示した．今後，反射偏光や吸収偏光の性能向上によって輝度損失を更に軽減できると考えられる．また，画質維持の観点では提案光学系で結像空中像を実空間に表示する場合における再帰性反射板から空中像までの光路長が，既存の AIRR 光学系と変わらない．さらに提案光学系で追加されたビームスプリッター 2 の反射偏光・吸収偏光フィルムはヘイズや拡散特性をもたないため，既存光学系の画質を大幅に低下させる要素は含まれないと考えられる．以上から提案光学系は 3 つの設計方針を満たす光学系であると考えられる．

今後の課題として，結像空中像表示時の迷光対策と，結像空中像と直視空中像の画質均一化が挙げられる．提案光学系では結像空中像を表示する際，ユーザから移動式ディスプレイの表示面が斜め方向から直視され，迷光として視認される．そのため，結像空中像か直視空中像かに応じてディスプレイ表示面の直視と遮断を切り替え可能な迷光対策が必要となる．また，提案光学系では結像空中像（図 4 の A，B）と直視空中像（同 C）の２パタンの空中像が混在するため，両者の比較において画質や輝度に違いが生じる．よって２パタンの空中像間で輝度や解像度，コントラストを調整するといった違和感のない表示手法の検討が必要となる．

6. むすび

本稿では鏡像空間と実空間の境を自在に移動できる超鏡空中像のコンセプトと，超鏡空中像を実現する新たな光学系を提案した．提案光学系は空中像の光源となる移動式ディスプレイの向きと位置を変えることで，省スペースな実装で空中像の奥行き位置を鏡面を超えて変化させることができる．我々はプロトタイプの実装によって，投影される空中像が鏡像空間と実空間を相互に連続的に移動できること，および評価実験によって提案光学系は既存の AIRR 光学系との比較において大幅な輝度低下が生じないことを示した．

参考文献

[1] K.Fujinami, F.Kawsar, T.Nakajima: Awaremirror: A personalized display using a mirror, International Conference on Pervasive Computing, Springer, 2005.

[2] T.Hara,M.Oda: Mixed reality mirror display, ACM SIGGRAPH Asia'12, pp.1–3,2012.

[3] G.A.Lee, H.S.Park, M.Billinghurst: Optical-Reflection Type 3D Augmented Reality Mirrors. ACM VRST'19, Article 82, pp. 1–2, 2019.

[4] M.Nakajima, Y.Tomiyama, I.Amimori, H.Yamamoto: Evaluation methods of retro-reflector for polarized aerial imaging by retro-reflection, 11th CLEO-PR, pp.1–2, 2015.

[5] H.Uchida, T.Ebihara, N.Wakatsuki, K.Zempo: ALiSE: Through the mirrored space, and what user interacts with avatars naturally, ACM ISS '21, pp. 29–32, 2021.

[6] H.Ikeda, T.Naemura, H.Harashima, J.Ishikawa: i-ball: Interactive Information Display like a Crystal Ball, ACM SIGGRAPH '01, pp. 122, 2001.

[7] M.Otsubo: Optical imaging method using the same, U.S. Patent No.8,702,252, Patent and Trademark Office, 2014.

[8] H.Yamamoto, H.Kajita, N.Koizumi, T.Naemura: EnchanTable: Displaying a Vertically Standing Mid-air Image on a Table Surface using Reflection, ACM ITS'15, pp.397–400,2015.

[9] Y.Osato, N.Koizumi: Compact optical system displaying mid-air images movable in depth by rotating light source and mirror, Computers & Graphics, vol.91, pp.290-300, 2020.

[10] N.Kato, T.Naemura: Mixed reality environment with a mirror, ACM SIGGRAPH '06, pp.155–es, 2006.

ⓒ 2022 日本バーチャルリアリティ学会