

博士論文

再帰反射による空中結像を用いた
空中ディスプレイ光学系の多機能化に関する研究

宇都宮大学大学院 工学研究科

システム創成工学専攻

藤井 賢吾

概要

空中ディスプレイを実現する技術の 1 つに、再帰反射による空中結像（AIRR: aerial imaging by retro-reflection）がある。AIRR は光源、ビームスプリッター、再帰反射素子の 3 つの要素で構成される。AIRR は他の空中ディスプレイ技術と比べて広い視野角を有しており、多人数で空中像を視認できる特徴がある。これまでに、広い視野角を生かして空中像を複数名で同時に操作できるユーザーインターフェースの実装が報告されている。一方で、個人情報扱うなどディスプレイの覗き込みを防ぎたい場面を想定して、特定の視点でのみ情報が視認できる空中セキュアディスプレイも報告されている。また、ライトフィールドディスプレイを光源に用いた AIRR による立体空中ディスプレイが報告されている。

これまでの AIRR を用いたユーザーインターフェースに関する研究は、AIRR 光学系の外部にステレオカメラや Kinect 等のセンサーを設置している。そのため、撮影系がユーザー正面に配置されず、斜め正面方向からの撮影であり、ユーザー情報の自然な取得が行えていない。また、空中ディスプレイのマルチモーダル化を目指して熱・音・触覚刺激を組み合わせた研究が報告されているが、各感覚を提示する素子が大型なため複数の感覚を同時に組み合わせることが困難な課題がある。さらに、記録済みのライトフィールドイメージの空中表示は行われているが、リアルタイムな撮影と表示はレンズアレイに合わせた取得画像の補正やリフォーカス処理にかかる時間が課題となっている。

そこで、本論文ではこれらの課題を解決する新たな光学系を提案し、空中ディスプレイの多機能化を行う。1 つ目は、AIRR 構成の内部カメラからのシースルーユーザー撮影である。偏光を用いる AIRR にカメラと偏光板を組み合わせた撮影光学系を用いて、ビームスプリッターの反射で生じる光源の映り込みを除いたユーザーの撮影を実現する。また、この手法を利用して、ビデオ通話向けのカメラ目線撮影光学系と、動物実験向けの映像提示及び撮影を行う光学系を提案する。2 つ目は、ライトフィールドイメージと AIRR によるリアルタイム立体空中ディスプレイである。記録した映像を立体表示するために計算処理が必要な課題があったが、ディスプレイ、レンズアレイ、投影レンズを組み合わせることでライトフィールドカメラの光路を逆再生する光学系で解決する。この光学系ではスクリーンがなければ立体映像を視認できないが、AIRR の光学系を組み合わせることで投影像の光路が反転し、肉眼での視認が可能になる。3 つ目は、再帰反射素子のスピーカーとして用いた空中像から音が聞こえるように感じるシステムの検討である。再帰反射素子はユーザーが空中像を見ているときに視線の再帰配置されている素子であるから、これをスピーカーとして活用することでユーザーは空中像から音が来るように感じることを期待される。さらに、既存の構成素子を活用するため、他の感覚提示手法と組み合わせが容易となる。4 つ目は、AIRR での新たな試みとして

AIRR 光学系上に実物体が配置された状態での空中結像を行う。AR の分野では実物体の情報をこれに重ねてユーザーに提示する技術がある。AIRR でも、実物体に並ぶように情報を提示することは可能だが、重ねての提示は実物体が光線をさえぎってしまうため実現できていない。本論文では、光の屈折を有する同質同形状な2つの物体をAIRRのビームスプリッターで面对称に配置することで、実物体に重ねて空中像を表示できる光学系を提案する。

本論文は7章で構成されており、各章の概要は以下のとおりである。

第1章では、研究背景について述べたのち、本研究の動機と目的を示す。

第2章では、再帰反射による空中結像と関連する他の空中ディスプレイ技術について述べ、本研究にAIRRを利用する理由を示す。また、AIRRによる空中ディスプレイを用いた先行研究について分類し、本研究の位置づけを示す。

第3章では、AIRR 内部に配置されたカメラを用いたユーザーの撮影について述べる。内部から撮影を行う場合、ビームスプリッターで反射した光源からの光が映り込むため、これを取り除く必要がある。そこで、偏光変調を用いたAIRRを基に、偏光板を用いることで映り込みを解消し、ユーザーを正面から撮影できることを明らかにする。また、空中像にユーザーが触れた際に手のひらで散乱光があることを利用して、空中像との接触を検知できる可能性を示す。そして、提案した撮影手法の活用として、視線一致型ビデオ通話を提案する。加えて、提案手法の動物実験への応用も提案する。

第4章では、ライトフィールドディスプレイとAIRRを組み合わせることで、リアルタイムに立体空中表示ができることを明らかにする。AIRRを組み合わせることで、従来のライトフィールドディスプレイに必要であった取得映像の処理計算が不要となり、映像の取得と再生の間にある遅延を減らすことができる。試作装置を用いて表示実験を行い、リアルタイムにライトフィールド映像が空中表示できることを示す。

第5章では、再帰反射素子をスピーカーに用いることで、空中像から音が来るように感じられるシステムを提案する。再帰反射素子のほか、ビームスプリッターについてもスピーカー化を検討する。光学系の構成素子を振動させるため、空中結像に影響が発生しないことを検証し、素子のスピーカー化が可能なことを明らかにする。

第6章では、透過光を屈折する透明物体を用いた空中表示について述べる。AIRRに2つの透明物体をビームスプリッターで面对称に組み合わせることで、光源から出た光の屈折を再帰反射前後で打ち消し、従来と同様に空中像が結像できることを示す。原理検証には透明球を用いて、光線追跡シミュレーションと試作装置での空中結像を行った。また、透明球を用いたときに、再帰反射素子の削減効果があることをシミュレーションによって明らかにする。最後に、水を満たした花瓶やペットボトルなどの身近な透明物体を用いた空中結像を行い、空中結像されることを確認する。

第7章では、本研究の成果をまとめ、今後の課題と展望について述べる。

目次

第1章	諸言	1
1.1.	本研究の背景	1
1.2.	本研究の目的	2
1.3.	本論文の構成	3
第2章	再帰反射による空中結像 (AIRR)	5
2.1.	はじめに	5
2.2.	AIRR の原理	5
2.3.	再帰反射素子の種類と構造	8
2.4.	他の空中ディスプレイ技術と AIRR の比較	9
2.4.1.	DCRA による空中表示	9
2.4.2.	ASKA3D による空中表示	10
2.4.3.	AIRR との比較	10
2.5.	AIRR による空中ディスプレイを用いた先行研究	10
2.6.	おわりに	11
第3章	AIRR 光学系にてユーザーを正面から観察する手法	13
3.1.	はじめに	13
3.2.	タブレットデバイスのインカメラを用いた指先位置の推定	13
3.2.1.	原理	13
3.2.2.	実験方法	13
3.2.3.	実験結果	13
3.3.	偏光変調を用いた AIRR における装置内カメラによる観察手法	18
3.3.1.	原理	18
3.3.2.	実験方法	19
3.3.3.	実験結果	19
3.4.	内部カメラを用いた空中像の散乱による接触検知	20
3.4.1.	原理	20
3.4.2.	実験方法	21
3.4.3.	実験結果	22
3.5.	シースルー型 AIRR と偏光変調によるユーザーの観察を組み合わせた視線一致型ビデオ通話デバイス	26
3.5.1.	原理	27
3.5.2.	実験方法	30
3.5.3.	実験結果	32
3.6.	視線一致型ビデオ通話システムにおける偏光状態の測定	33
3.6.1.	実験方法	33

3.6.2. 実験結果.....	35
3.7. 動物実験への応用.....	37
3.7.1. 原理.....	37
3.7.2. 実験方法.....	37
3.7.3. 実験結果.....	38
3.8. おわりに.....	41
第4章 ライトフィールドディスプレイと AIRR によるライトフィールド空中像のリ アルタイム表示.....	42
4.1. はじめに.....	42
4.2. 原理.....	42
4.3. ライトフィールド空中表示の奥行きの確認.....	43
4.4. ライトフィールドカメラで撮影した映像の空中投影.....	45
4.5. ライトフィールドカメラを用いたリアルタイム空中表示.....	46
4.6. おわりに.....	47
第5章 再帰反射素子をスピーカーに用いた AIRR による空中表示	48
5.1. はじめに.....	48
5.2. ピエゾアクチュエーターを用いたビームスプリッターに伝わる振動の測定..	48
5.2.1. 実験方法.....	48
5.2.2. 実験結果.....	49
5.3. 振動スピーカーを用いた AIRR を構成する素子のスピーカー化	51
5.3.1. 原理.....	51
5.3.2. 実験方法.....	52
5.3.3. 実験結果.....	54
5.4. 再帰反射素子をスピーカーに用いた AIRR によるシースルー空中ディスプレイ 57	
5.4.1. 原理.....	57
5.4.2. 実験結果.....	58
5.5. おわりに.....	60
第6章 透過光を屈折する透明物体を組み合わせた空中結像.....	61
6.1. はじめに.....	61
6.2. 原理.....	61
6.3. 透明球を組み合わせた AIRR による空中結像	63
6.3.1. 光線追跡シミュレーション	63
6.3.2. 試作装置を用いた空中結像	65
6.3.3. 空中像の輝度測定	68
6.4. 球以外の形状の透明物体を用いた空中結像.....	76
6.4.1. 実験方法.....	76

6.4.2. 実験結果.....	79
6.5. おわりに.....	82
第7章 結言.....	84
7.1. 本論文のまとめ.....	84
7.2. 今後の課題と展望.....	84
参考文献.....	87
謝辞.....	93
研究業績.....	96

第1章 諸言

1.1. 本研究の背景

近年、空中ディスプレイ技術[1,2]が注目されている。空中ディスプレイとは、光源から発散する光を集束させる光学系を用いて空中に実像を形成するディスプレイである。空中に映像が浮かび上がることで、ユーザーが映像により高い臨場感を感じたり、従来のディスプレイとは異なった情報提示を実現したりすることが期待されている。また、裸眼で視認ができるため、ユーザーに特殊な眼鏡等の着用を要求しない特徴がある。そして、空中像は、視覚的空間を占有するが、物理的空間には何も存在しない性質がある。昨今では、COVID-19 の感染拡大に伴い、実際のボタンで機器を操作することが衛生的に好ましくないという状況があり、空中ディスプレイを用いたタッチレス空中インターフェースなど[3-7]が提案されている。さらには、空中ディスプレイの市場の拡大のため、空中ディスプレイの国際規格が ITE/TC 110 (International Electrotechnical Commission / technical committee 110) で議論され、空中映像表示技術の標準化も進んでいる[8]。

このように、空中ディスプレイはさらなる活用を期待されるディスプレイ技術の1つである。そのためには、非接触ディスプレイとして従来のディスプレイとの置き換えとしての活用だけではなく、未来社会(Society 5.0[9])に適當するような空中ディスプレイ光学系の多機能化が必要である。Society 5.0 は内閣府によって提唱されている未来社会の科学技術政策であり、サイバー空間(仮想空間)とフィジカル空間(現実空間)を高度に融合させたシステムにより経済発展と社会的課題の解決を両立する人間中心の社会である。

Society 5.0 において空中ディスプレイに求められる機能の1つとして、人の表情や目線を自然な形で取得することがあげられる。空中ディスプレイにカメラを用いた例としては、センサーを組み合わせる空中ディスプレイのインタラクションを行っている研究[10-12]や、空港のラウンジにおける空中ディスプレイで表示されたスタッフとのビデオ通話による利用受付や案内を受けられるシステムの実証実験[13]などがある。しかし、これらの試みでは映像を見ているユーザーの目線の先にカメラを配置することができず、ずらした位置から撮影を行っている。自然な形で人の表情や目線の取得のためには、カメラやセンサーをユーザーの目線の先に配置することが求められる。

また、空中ディスプレイによる表示像は大半がフラットパネルディスプレイを光源に用いた2Dの空中像であるが、運動視差を有する3Dの映像の表示が求められる。これまでに、ライトフィールドディスプレイと空中ディスプレイ技術を組み合わせた空中立体映像の表示[49-51]が報告されている。ここで、空中ディスプレイはその原理から元画像の奥行きが空中結像時に反転する性質がある。そのため、ライトフィールドディスプレイで表示した立体映像を空中に正しく結像するためには、表示映像の奥行きを反転さ

せた状態で表示するために画像処理が必要となる．そのため、リアルタイムに撮影した映像を立体表示するためには画像処理にかかる時間が課題となっている．

さらに、より豊かな情報を提示するために、空中ディスプレイに音や熱や触覚といった情報を合わせて提示するマルチモーダル化も考えられる．空中ディスプレイのマルチモーダル化に関する研究は多数報告されており、直交ミラーアレイを用いた映像と音の空中への集束を行う研究[49]や、空中局所ヒーター技術と空中ディスプレイを組み合わせることで触ると温かい空中映像[40, 41]を形成する研究、空中超音波触覚ディスプレイと組み合わせた触れるホログラフィの実現[14]などが報告されている．一方で、これらの研究はそれぞれの感覚に対応した専用の大型素子を空中ディスプレイに組み合わせているため、複数の感覚を合わせて提示するためには素子同士の干渉による配置の制限をはじめとした課題がある．よって、マルチモーダル化のためには、空中ディスプレイ周辺に制限の少ない手法による感覚の提示手法が求められる．

最後に、実物体と空中映像が自然に合わさった表示がある．Society 5.0 ではサイバー空間とフィジカル空間を高度に融合させたシステムが求められている．AR 分野では、AR マーカーや物体の認識を通じて、ヘッドマウントディスプレイを装着したユーザーの視界に実物体を重ね合わせた表示[15]が行われている．しかし、空中ディスプレイであればユーザーにヘッドマウントディスプレイのような特殊な機器を装着することを必要としないため、ユーザーに実物体と空中映像をより自然に融合させた表示が可能になると考えられる．これまでに、ブロックの周囲を空中像のキャラクターが影を落としながら飛び回ることを可能にする光学系[16]が報告されている．しかし、空中ディスプレイはその原理から空中結像の光路を実物体に遮られれば空中像が見えなくなる．そのため、キャラクターが飛び回る範囲はブロックの周囲に限定されている．空中ディスプレイにおいても、実物体に重なるように空中像を表示することができれば、より高度な情報提示の実現が期待されるが、このような手法はまだ報告されていない．

1.2. 本研究の目的

これらの研究背景より、本研究では、未来の空中ディスプレイに求められる機能として、「①人の表情や目線の自然な形での取得、②3D 空中映像のリアルタイム表示、③他の手法と組み合わせやすいマルチモーダル化、④実物体と自然に合わさった空中表示」が可能であることを明らかにする．本研究では、空中ディスプレイの手法として再帰反射による空中結像(AIRR: Aerial Imaging by Retro-Reflection)[17, 18]を用いる．空中ディスプレイ技術の多くは視野角が限定されるものが多いのに対し、AIRR は広い視野角を有するため多人数で見る空中ディスプレイとして適性がある点が優れているためである．加えて、キーデバイスである再帰反射素子[19, 20]が道路標識など様々な用途に使用されているため、生産手法が確立されており、大量生産や大型化[21, 22]に向いているといえる．

「人の表情や目線の自然な形での取得」については、AIRR 構成の内部カメラからの

シースルーユーザー撮影手法を提案する．偏光変調を用いた AIRR[23, 24]にカメラと偏光板を組み合わせた撮影光学系を用いて，ビームスプリッターの反射で生じる光源の映り込みを除いたユーザーの撮影を実現する．また，この手法を利用して，ビデオ通話向けのカメラ視線撮影光学系と，動物実験向けの映像提示及び撮影を行う光学系を提案する．

「3D 空中映像のリアルタイム表示」については，ライトフィールドイメージと AIRR によるリアルタイム立体空中ディスプレイを提案する．記録した映像を立体表示するために計算処理が必要な課題であるが，ディスプレイ，レンズアレイ，投影レンズを組み合わせることでライトフィールドカメラの光路を逆再生する光学系で解決を試みる．この光学系ではスクリーンがなければ立体映像を十分に視認できないが，AIRR の光学系を組み合わせることで映像投影の光路が反転し，肉眼での視認が可能になる．

「他の手法と組み合わせやすいマルチモーダル化」については，本研究では空中像から音が出ているように感じられることを目指し，再帰反射素子をスピーカーとして用いた AIRR による空中表示を行う．振動スピーカーは，任意の物体面に取り付けることでその面に振動を伝え，スピーカーのように音を発生させるデバイスである．再帰反射素子は AIRR 光学系において，ユーザーから見て空中像の奥に配置される素子である．よって，この素子がスピーカーとして機能すれば，ユーザーは一見してスピーカーが配置されていることは認識できないが，音は空中像の方向から聞こえるため，あたかも空中像から音が出ているように感じられることが期待される．

「実物体と自然に合わさった空中表示」については，光の屈折を有する同質同形状で透明な2つの物体を AIRR のビームスプリッターで面对称に配置することで，実物体に重ねて空中像を表示する光学系を提案する．AIRR は空中結像の光路がビームスプリッターで面对称な光学系である．よって，光路の途中に光を屈折するような物体が配置されたならば，これを打ち消すように同質の物体を面对称に配置することで，空中結像が可能なのはである．

1.3. 本論文の構成

本論文の構成を以下に示す．

第2章では，再帰反射による空中結像と関連する他の空中ディスプレイ技術について述べ，本研究に AIRR を利用する理由を示す．また，AIRR による空中ディスプレイを用いた先行研究について分類し，本研究の位置づけを示す．

第3章では，AIRR 内部に配置されたカメラを用いたユーザーの撮影について述べる．内部から撮影を行う場合，ビームスプリッターで反射した光源からの光が映り込むため，これを取り除く必要がある．そこで，偏光変調を用いた AIRR を基に，偏光板を用いることで映り込みを解消し，ユーザーを正面から撮影できることを明らかにする．また，空中像にユーザーが触れた際に手のひらで散乱光があることを利用して，空中像との接触を検知できる可能性を示す．そして，提案した撮影手法の活用として，視線一致型ビ

デオ通話を提案する．提案手法は偏光を利用して不要な映り込みを取り除いているため，偏光カメラを用いて偏光状態を調べ，偏光板で映り込みを取り除けることを示す．さらに，試作装置を用いた視線一致型ビデオ通話を行う．加えて，提案手法の動物実験への応用も提案する．近年の動物実験では事前に撮影した動物の映像や CG で作った映像を提示する実験が行われている．ここで，映像を提示するディスプレイがあるために，映像に反応を示す動物を正面から撮影できない課題がある．提案手法を用いることで，動物に刺激映像を提示しつつ，正面から反応を撮影できることを試作装置によって示す．

第 4 章では，ライトフィールドディスプレイと AIRR を組み合わせることで，リアルタイムに立体空中表示ができることを明らかにする．AIRR を組み合わせることで，従来のライトフィールドディスプレイに必要であった取得映像の処理計算が不要となり，映像の取得と再生の間にある遅延を減らすことができる．試作装置を用いて表示実験を行い，リアルタイムにライトフィールド映像が空中表示できることを示す．

第 5 章では，再帰反射素子をスピーカーに用いることで，空中像から音が来るように感じられるシステムを提案する．再帰反射素子のほか，ビームスプリッターについてもスピーカー化を検討する．光学系の構成素子を振動させるため，空中結像に影響が発生しないことを検証し，素子のスピーカー化が可能なことを明らかにする．

第 6 章では，透過光を屈折する透明物体を用いた空中表示について述べる．AIRR に 2 つの透明物体をビームスプリッターで面対称に組み合わせることで，光源から出た光の屈折を再帰反射前後で打ち消し，従来と同様に空中像が結像できることを示す．原理検証には透明球を用いて，光線追跡シミュレーションと試作装置での空中結像を行った．また，透明球を用いたときに，再帰反射素子の削減効果があることをシミュレーションによって明らかにする．最後に，水を満たした花瓶やペットボトルなどの身近な透明物体を用いた空中結像を行い，空中結像されることを確認する．

第 7 章では，本研究の成果をまとめ，今後の課題と展望について述べる．

第2章 再帰反射による空中結像 (AIRR)

2.1. はじめに

本章では、本論文において共通の原理である再帰反射を用いた空中結像 (AIRR) について述べる。AIRR は、光の再帰反射を用いた空中ディスプレイ技術である。2.2 節では、AIRR の基本原理および偏光変調を用いた AIRR(p-AIRR)の原理について述べる。2.3 節では、AIRR の構成素子である再帰反射素子の種類と構造について述べる。2.4 節では、同様に再帰反射を用いて空中ディスプレイを実現している技術について述べ、本論文にて AIRR を用いる理由を示す。2.5 節では、AIRR による空中ディスプレイを用いた先行研究について分類を行い、本論文の位置づけを示す。

2.2. AIRR の原理

AIRR(Aerial Imaging by Retro-Reflection)とは、再帰反射を用いた空中結像技術である[17,18]。AIRR は、光源、ビームスプリッター、再帰反射素子を用いることで実現する。再帰反射素子は、この素材に入射した光が反射した後、入射方向に折り返すという特性がある。また、ビームスプリッターには、アクリル板やハーフミラーなど、光の透過と反射ができる素材を用いる。

図 1 に、AIRR の基本構成を示す。光源から出た光は、ビームスプリッターにて透過光と反射光に分かれる。このうちの反射光が再帰反射素子へと入射し、再帰反射して戻ってくる。再帰反射光は再度ビームスプリッターにて透過光と反射光に分かれる。このうちの透過光は、ビームスプリッターを透過してこれに対して光源と面対称の位置に集束する。これにより、空中に光源と面対称な像を形成する。

図 2 に、AIRR を用いて形成した空中像の写真を示す。光源に表示したキャラクターが空中に浮かび上がって表示されていることがわかる。ここで、図 1 では、光源からビームスプリッターを透過する光、再帰反射後にビームスプリッターで反射する光が存在する。これらの光は空中像の形成に関わらないため、空中像の輝度、コントラストの低下の原因となっている。

また、偏光変調を用いて AIRR の空中像の輝度を向上させた p-AIRR (polarized AIRR) がある[23, 24]。p-AIRR では、ビームスプリッターとして反射型偏光板を用いる点、また再帰反射素子の上に $\lambda/4$ 波長板を設置する点で異なっている。反射型偏光板は、自身の透過軸と直交する偏光を反射し、並行する偏光を透過する反射材である。また、 $\lambda/4$ 波長板は、これを透過した光の偏光を 45 度回転させる。ここで、光源は直線偏光のものを扱い、反射型偏光板の透過軸がディスプレイの偏光軸と直交するように配置する。

図 3 に、p-AIRR の構成図を示す。光源から出た光は、反射型偏光板の透過軸に対して、偏光軸が直交しているから反射する。反射した光は $\lambda/4$ 波長板を通過し、偏光が 45 度回転する。 $\lambda/4$ 波長板を通過した光は、再帰反射素子で再帰反射し、再度 $\lambda/4$ 波長板

を通過する．これにより，再帰反射光の偏光は 90 度回転することになる．よって，再帰反射した光の偏光軸は反射型偏光板の透過軸と平行になるため，これを透過する．透過した光は，AIRR と同じく反射型偏光板に対して光源と面対称の位置に集束し，空中像を形成する．p-AIRR では，偏光を利用することで，AIRR に比べて光の利用効率が大きく向上しており，より明るい空中像を実現している．

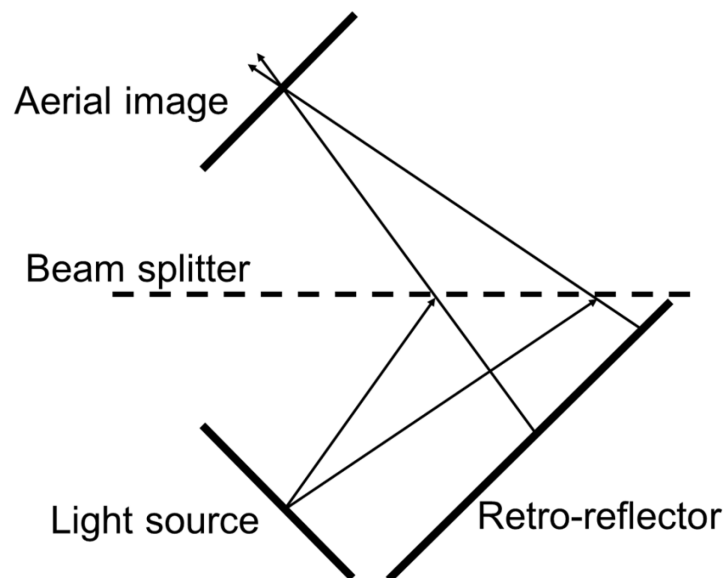


図 1 : AIRR による空中結像の基本構成.



図 2 : AIRR による空中像.

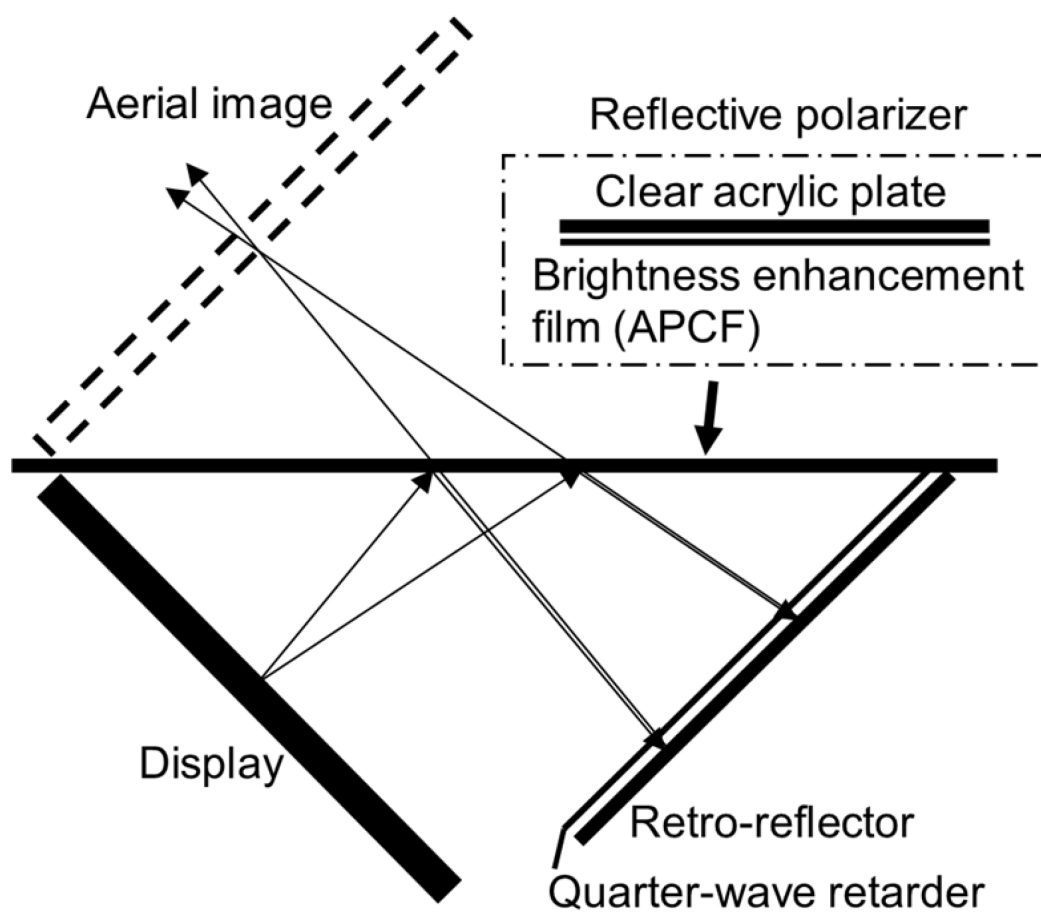


図 3 : p-AIRR による空中結像の構成.



図 4 : p-AIRR による空中像.

2.3. 再帰反射素子の種類と構造

AIRR では、装置の構成に主にシート状になっている再帰反射素子を用いる。これには、ビーズタイプとプリズムタイプの再帰反射素子が存在する。

図 5 に、ビーズタイプの再帰反射素子の顕微鏡による観察像を、図 6 にビーズタイプの再帰反射素子の原理を示す。ビーズタイプの再帰反射素子では、光がガラスビーズに入射時に屈折し、ガラスビーズの裏面にある反射フィルムによって反射される。反射した光がガラスビーズから出るときに再び屈折し、入射方向に折り返す。ビーズタイプの再帰反射素子は、あらゆる方向から入射した光に対して常に入射した方向に光を返すことができる特徴がある。一方で、入射角が大きくなるほど出射角も変化するが、ここでの変化はわずかであるので、近似が成り立ち再帰反射とみなすことができる。ビーズタイプの再帰反射素子には、ビーズを露出することで反射性能を高めている露出レンズ型、ビーズに樹脂をかぶせることでレンズの汚れを防止するが反射性能で劣る封入レンズ型、樹脂とビーズの間に空気層を設けることで露出レンズ型と封入レンズ型の双方の利点を生かしたカプレルレンズ型といった種類がある。ガラスビーズ 1 つ当たりの大きさは約 $200\text{ }\mu\text{m}$ から $300\text{ }\mu\text{m}$ ほどである。

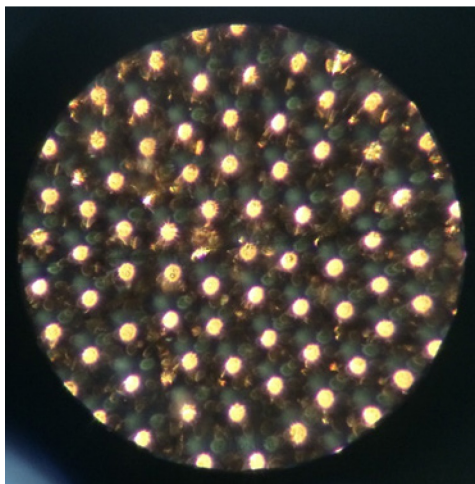


図 5：ビーズタイプの観察像。

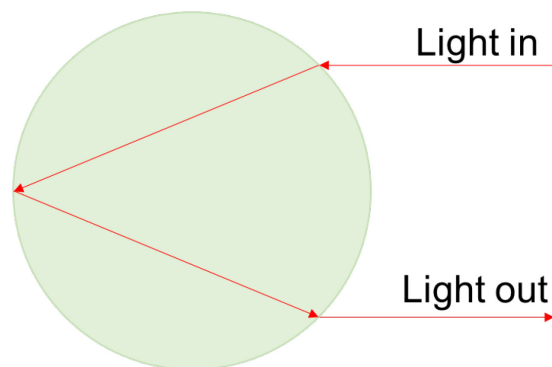


図 6：ビーズタイプの原理。

図 7 に、プリズムタイプの再帰反射素子の顕微鏡による観察像を、図 8 にプリズムタイプの再帰反射素子の原理を示す。プリズムタイプの再帰反射素子では、入射する光が垂直の直角三角形の鏡面からなる 3 面体マイクロコーナーキューブ素子による 3 面で反射され、入射方向に折り返す。プリズムタイプの再帰反射素子は、反射性能が優れていることが知られている。プリズムタイプの再帰反射素子には、通常のマイクロコーナーキューブで構成されたコーナーキューブタイプや、精密なフルキューブコーナー反射素子を利用したフルキューブコーナータイプなどが存在する。また、マイクロコーナーキューブ 1 つ当たりの大きさは約 $300\text{ }\mu\text{m}$ ほどである。

先行研究に，空中ディスプレイ用途に向けた再帰反射素子の違いによる結像特性[25, 26]の比較や，結像された空中像の解像度評価[27]に関する研究がある．これらの研究を参考に，本論文ではプリズムタイプの再帰反射素子を用いて実験を行うこととした．

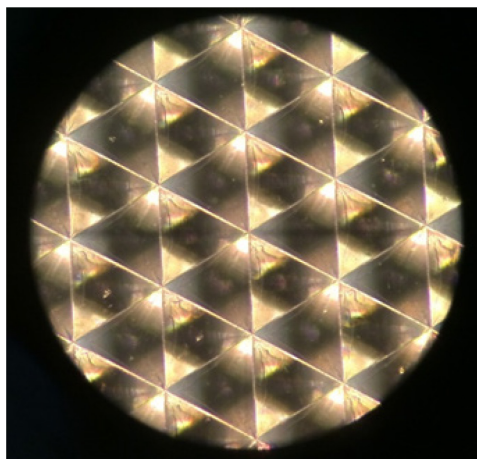


図 7：プリズムタイプの観察像.

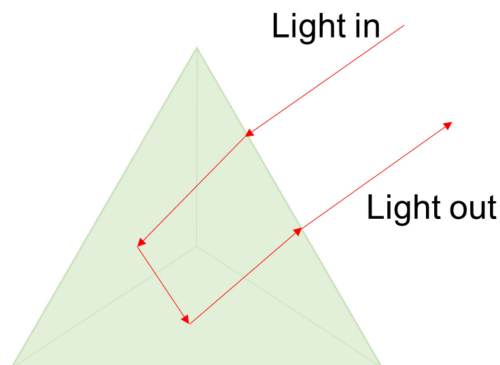


図 8：プリズムタイプの原理.

2.4. 他の空中ディスプレイ技術と AIRR の比較

2.4.1. DCRA による空中表示

DCRA(Dihedral Corner Reflector Array)とは，2 面コーナリフレクタアレイを用いて空中像を生成する素子である[28, 29]．図 9 に，DCRA の原理図を示す．2 面コーナリフレクタアレイは，隣り合う 2 つの垂直鏡面で 1 回ずつ，計 2 回の光の全反射を行う．これにより，光源から出た光が，光源と面对称の位置に集束して空中像が結像される．DCRA による空中像は，AIRR に比べて明るい特徴がある．一方で，DCRA は反射を用いた素子であるから，装置内にカメラを設置した場合，これを透過して外部の情報を観測することは困難である．

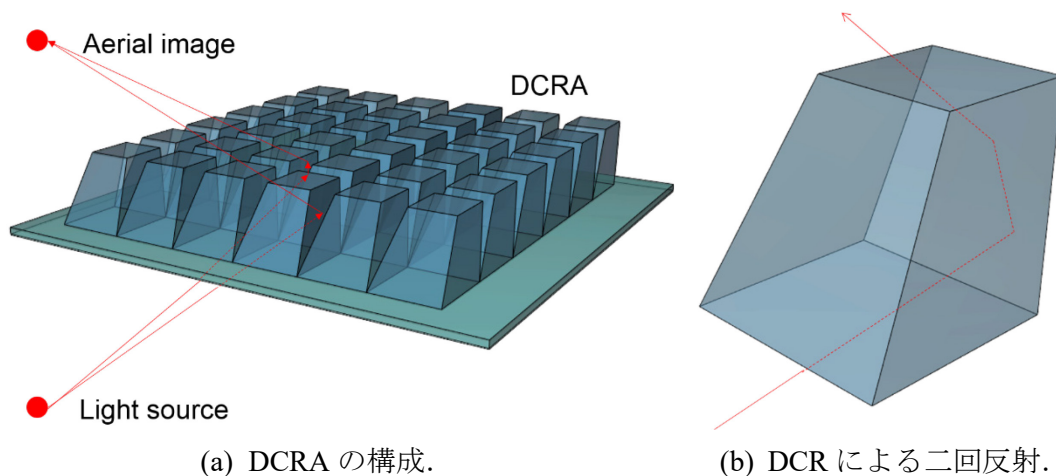


図 9：DCRA の構成と原理.

2.4.2. ASKA3D による空中表示

ASKA3D[30-31]とは、ガラスや樹脂などで作製された、光を空中に結像させるパネルである。図 10 に、ASKA3D の構成と原理を示す。ASKA3D は、透明な平板の内部に、多数かつ帯状の平行光反射プレートを一一定の間隔で並べて形成した光制御パネルで構成される。ASKA3D はこの光制御パネルを 2 層重ねることで成り立っており、1 層目及び二層目のパネルは図 10(a)のように反射プレートが直交するように重ねられている。これにより、光源から出た光は、図 10(b)のように 2 回反射をして、図 10(c)に示すように ASKA3D に対して光源と面対称の位置に集束する。ASKA3D による空中像は、AIRR に比べて像が鮮明である特徴がある。一方で、ASKA3D は光の反射を利用した素子であるから、これを透過しての装置内カメラからの外部情報の観測は困難である。

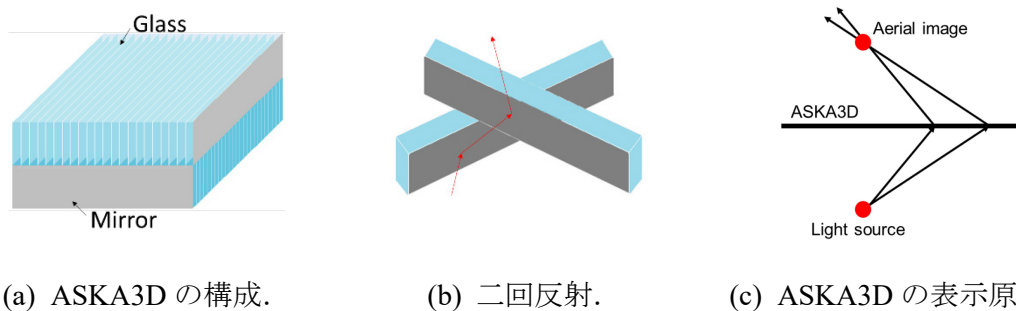


図 10 : ASKA3D の構成と原理.

2.4.3. AIRR との比較

AIRR と 2 回反射による手法を比べると、AIRR は空中ディスプレイの視野角で勝る。AIRR による空中ディスプレイは約 80 から 120 度の視野角を有し多人数での視聴が可能であるが、2 回反射による手法の視野角は約 30 度ほどである。一方で、2 回反射による手法はミラー面を用いた結像手法であるから、空中結像の光路が長くなることによる空中像のボケが小さく、AIRR に比べて高輝度・高解像度であるメリットがある。空中ディスプレイの将来の市場を検討すると、デジタルサイネージとしての活用には広い範囲から多人数が視聴可能であることが求められる。よって、本論文では AIRR による空中ディスプレイを用いて研究を行う。

2.5. AIRR による空中ディスプレイを用いた先行研究と本論文の位置付け

図 11 に、これまでに行われている AIRR に関する先行研究の分類と本論文の位置付けを示す。これまでに、大きく分けて多機能化・社会実装・空中像の改善・評価の 3 つの研究が行われており、最も多いのは多機能化に関する研究である。

多機能化について、本論文で目的とする 4 つのことに整理すると、カメラ・センサーに関する研究ではステレオカメラによる高速認識手法[32]、Kinect を用いたインタラクションを実現している研究[10, 33]などがある。そして、本論文第 3 章で述べるユーザーを正面から撮影する光学系がある。マルチモーダル化に関する研究としては、こ

れまでに触覚刺激[16, 34]・熱刺激[35, 36]・聴覚刺激[37, 38]に関する研究が行われており、これらの刺激提示手法を組み合わせたマルチモーダル化[39-41]についても報告されている。いずれも大型な素子を空中ディスプレイ光学系外部に組み合わせる形で実現しているが、本論文第 5 章で述べる構成素子のスピーカー化手法は、装置内部で完結する新しい手法である。3D 空中表示に関する先行研究は、運動視差の有無で分けられる。運動視差がない手法としては、2 つの空中ディスプレイ光学系を組み合わせた空中 DFD ディスプレイが報告されている[42, 43]。運動視差がある手法としては、空中 Arc3D ディスプレイ[44, 45]やライティングした実物体をディスプレイに用いた空中結像[46-48]、空中ライトフィールドディスプレイ[49-51]が報告されている。いずれの手法もリアルタイムの書き換えができない手法であり、本論文第 4 章ではリアルタイム空中ライトフィールドディスプレイについて述べる。最後に、特定用途向けの空中ディスプレイの応用としては、空中ディスプレイの覗き込み防止を行う空中セキュアディスプレイ[52, 53]や、生物の行動実験向けにメダカやベタに対して円筒水槽の周囲を囲む空中ディスプレイ[55-57]が報告されている。本論文第 6 章では、新たに透明物体を用いた空中表示を行う。

社会実装については、車載バーチャルエージェントへの利用[58, 59]やアミューズメントへの応用[60]が報告されている。そのほか、博物館や商業への応用や、街頭での空中ディスプレイによる宙に浮く新聞の展示などが行われている[4, 61]。

AIRR によって結像される空中像の改善に関する研究としては、偏光変調を用いた空中像の高輝度化に関する研究のほか[23, 24]、空中像のボケを低減する手法として事前の画像処理を用いる手法[62, 63]や分割加工された再帰反射素子を用いた手法[64, 65]などが報告されている。また、AIRR の光学系の薄型化に関する研究として、スリット上に加工した再帰反射素子を用いた光学系[66, 67]や、合わせ鏡光学系を応用した空中結像手法[68, 69]が提案されている。

最後に、AIRR による空中像の評価手法として、CTF を用いた定量化[70]や MTF を用いた定量化[26]に関する研究が行われている。

2.6. おわりに

本章では、初めに本論文において共通の原理である再帰反射を用いた空中結像 (AIRR) について述べた。また、ビーズタイプ及びプリズムタイプの 2 種類の再帰反射素子について解説し、本論文では空中ディスプレイ用途への適正からプリズムタイプを用いることを述べた。そして、関連する再帰反射光学系を用いた空中ディスプレイ技術として、直交するミラー面を用いた 2 回反射による空中ディスプレイ技術についてその原理を示した。そして、本論文にて AIRR を用いる理由を述べた。最後に、これまでの AIRR に関する先行研究について整理し、本論文の位置づけを示した。

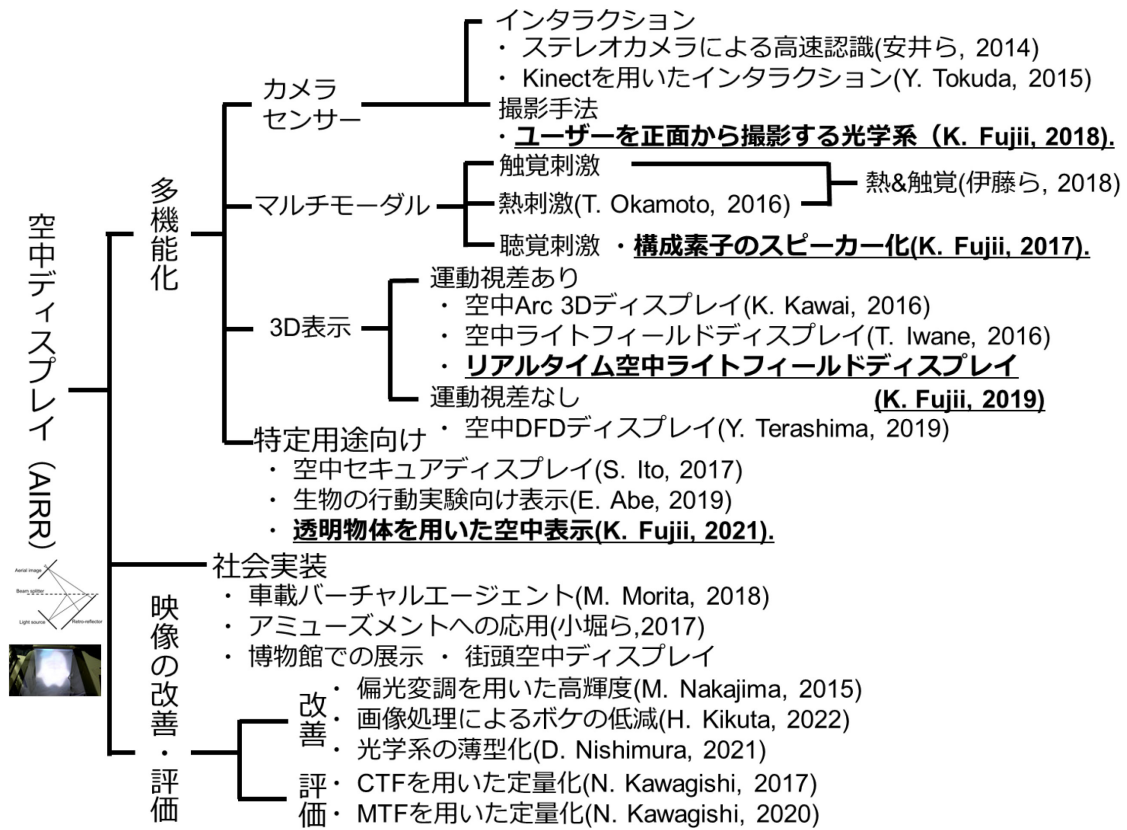


図 11 : AIRR に関する先行研究の分類と本論文の位置付け.

第3章 AIRR 光学系にてユーザーを正面から観察する手法

3.1. はじめに

第3章では、人の表情や視線の自然な形で取得を目指し、AIRR 構成の内部カメラからのシースルーユーザー撮影が可能であることを明らかにする。

3.2 節では、タブレットデバイスのインカメラを用いた従来の AIRR 構成での指先位置の推定手法について述べる。3.3 節では、偏光変調を用いた AIRR 光学系を用いて、装置内カメラと偏光板の組み合わせによる反射型偏光板を透過した内部反射によるディスプレイの映り込みのないユーザー撮影手法について述べる。3.4 節では、3.3 節の実験の結果によって示唆された、空中ディスプレイに触れる手のひらで発生する散乱光を用いた接触検知の可能性について述べる。3.5 節では、3.3 節で提案した手法を改善するとともに、ユーザーを正面から撮影できることをいかして、空中ディスプレイを用いた視線一致型ビデオ通話システムを提案する。3.6 節では、ここまでの手法が偏光を用いて映り込みの除去を行っていることから、偏光カメラを用いた偏光状態の撮影について述べる。3.7 節では、提案手法のさらなる応用として動物実験への活用を示す。

3.2. タブレットデバイスのインカメラを用いた指先位置の推定

3.2.1. 原理

図 12 に、本装置の構成図と指先位置の検出の図を示す。端末のインカメラをユーザー側に位置するようにタブレット端末の向きと傾きを調整する。これにより、タブレット端末を光源とした空中像を表示しつつ、端末のインカメラからハーフミラーの透過光よりユーザーの指先を観察することができる。このとき、カメラに写るユーザーの指先位置については、図中 X 軸方向では撮影像の横軸方向と一致する。また、Y-Z 軸方向については、撮影像の縦方向の位置と写る指の太さの変化から導出することができる。

3.2.2. 実験方法

図 13 に本実験に使用した実験装置を示す。本実験で使用したタブレットのインカメラの位置は図中の赤丸で示す点となっているため、装置は縦置きで作成した。この装置を用いて、空中像上に指先を置いたときの撮影像上での指先の座標と指の太さから、指先の位置を導出できることを確認する。撮影像上での指先の位置は、図 14 に示すように、空中像について横に 6 点、縦に 8 点に分割し、それぞれの点についてユーザーの指先がおかれた時の指を観察する。

3.2.3. 実験結果

空中像上の指先の位置と、写った指先の大きさおよび指先位置の座標を取得した。また、これらについて指先の横位置と大きさ、指先の縦位置と大きさ、指先の横位置と縦位置の 3 つの組み合わせについて、観測結果を比較した。実験結果については、それぞれの比較について特徴的な比較のできる撮影画像を示している。また、実際に取得した

数値について、それぞれの比較でグラフに示している。このとき、グラフのプロットは、図 14 に示した観測位置の縦ライン (A-F)、または横ライン (a-h) に合わせて色分けされている。また、プロットされていない点はインカメラに映り込まなかった点である。

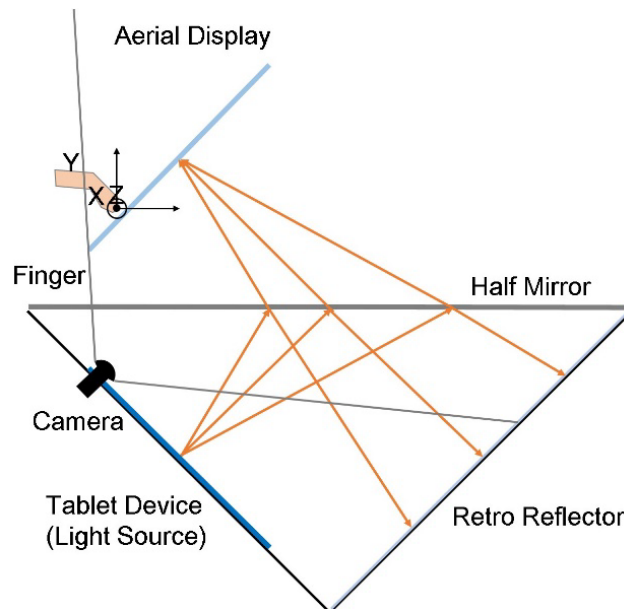


図 12：タブレットデバイスのインカメラを用いた観察系の原理図。

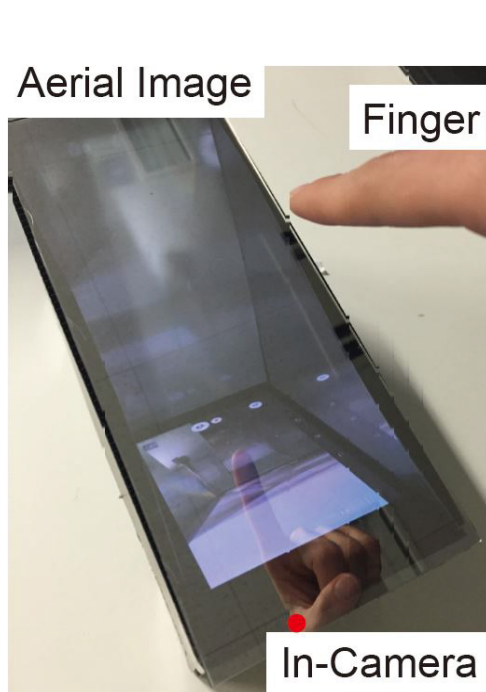


図 13：実験装置。

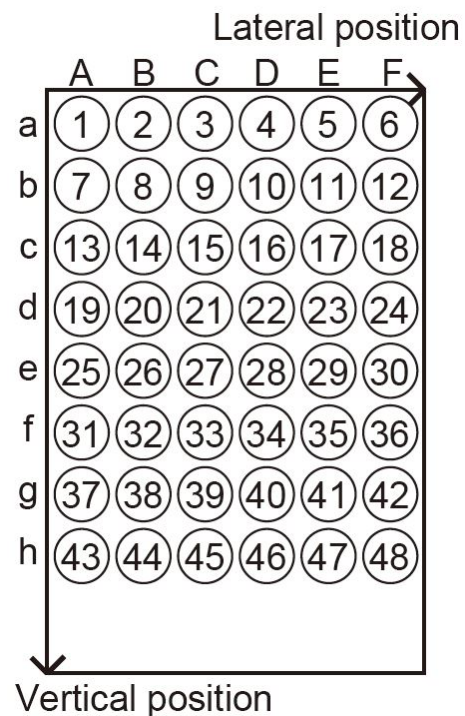
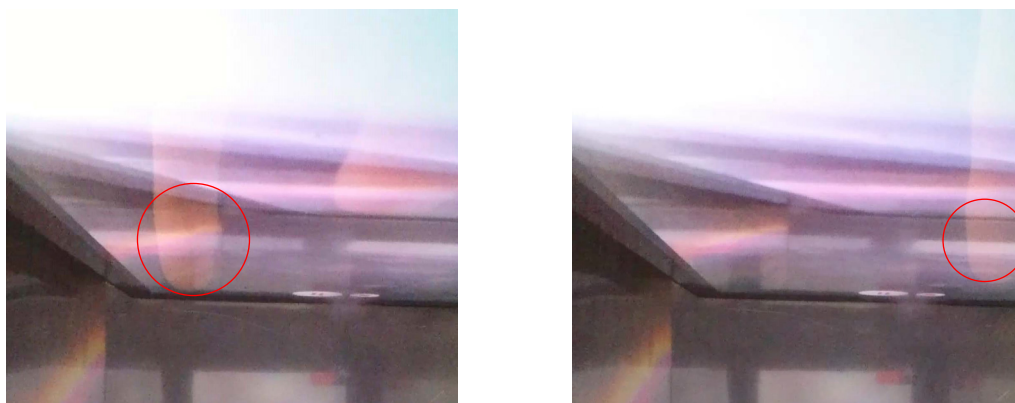


図 14：空中像上に置いた指先の検証位置。

図 15 に、位置番号 1 と 5 の撮影画像を示す。映り込んでいる指先を、図中に赤丸で囲っている。また、図 16 に観測した 48 点について縦軸に指の大きさ、横軸に横位置としたグラフを示す。ここで、横位置が同じ点は同色でプロットしている。図 15 の画像に映る指の位置を比較すると、撮影像に対する横位置は、カメラから観測した場合もはっきりと横方向にシフトしていることが確認できる。また、図 16 のグラフについて、各 A-E のラインごとに見た時に、横位置が左から右へずれるほど、漢族画像でも右から左へ同様にずれていることが確認できた。また、横位置が同じで空中上で上から下へ縦方向に移動させたとき、指先の大きさがだんだんと小さくなっていることも確認できた。このとき、指先位置がライン a では右方向、それ以外では左方向に段々とずれていることが確認できた。また、そのずれ方はラインが右によればよるほど大きくなっている。これは、タブレットインカメラの位置と歪みによるものだと考えられる。今回、タブレットのインカメラの位置は、ライン A-B 間のあたりにあることから、このように考えられる。



(a) 位置番号 1

(b) 位置番号 5

図 15：指先の横位置と大きさの撮影画像による比較。

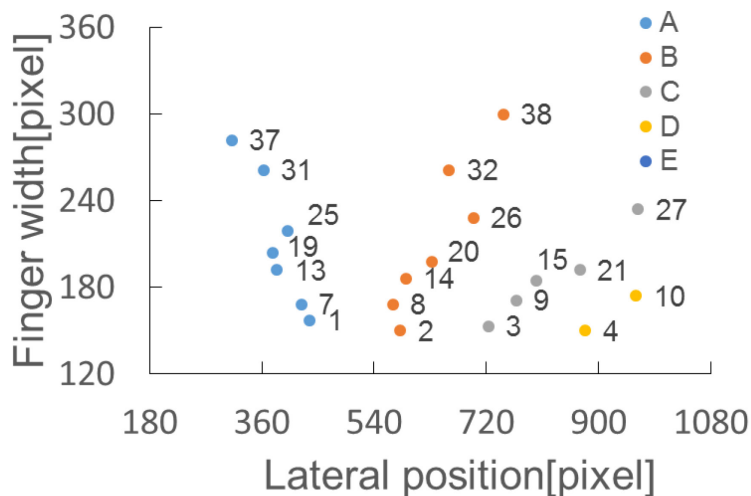
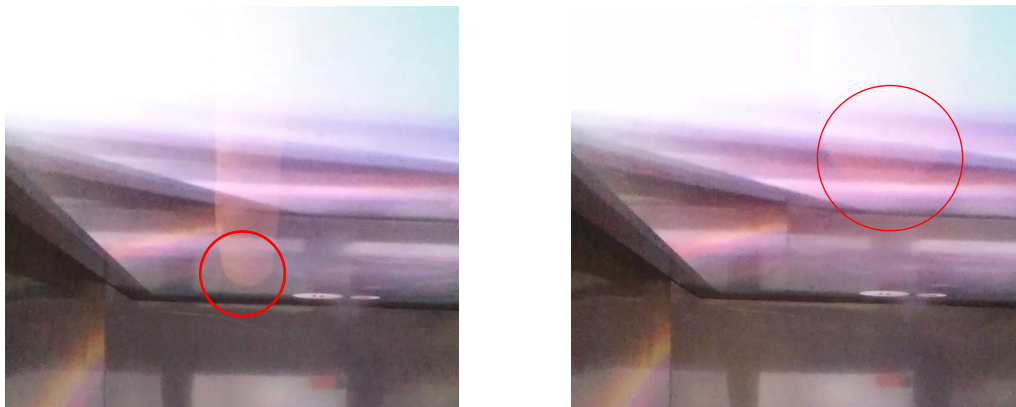


図 16：各指先位置における横位置と大きさの比較。

図 17 に、位置番号 2 と 38 の撮影画像を示す。映り込んでいる指先を、図中に赤丸で囲っている。また、図 18 に観測した 48 点について縦軸に指の大きさ、横軸に縦位置としたグラフを示す。ここで、縦位置が同じ点は同色でプロットしている。図 17 から、空中像上で指先を上下したとき、撮影画像でも指先位置が上下に変化していることを確認できた。また、図 18 のグラフより、縦座標が同じ撮影位置同士は、指先の大きさおよび縦座標位置がほぼ同じであることが、グラフ上で同色の点が近い位置にプロットされていることから確認できた。ここで、空中像は傾いていることを考えると、指先の大きさや縦位置は空中像に対して奥行き方向に指が移動した時に変化すると考えられる。よって、空中像に接触しているときの位置情報を基準に、空中像に対する指先の奥行き方向も検出できる可能性がある。



(a) 位置番号 2

(b) 位置番号 38

図 17：指先の縦位置と大きさの撮影画像による比較。

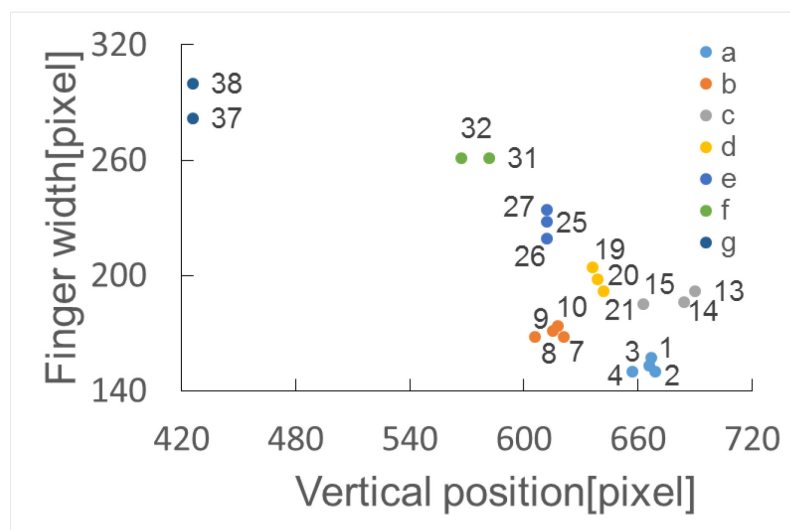
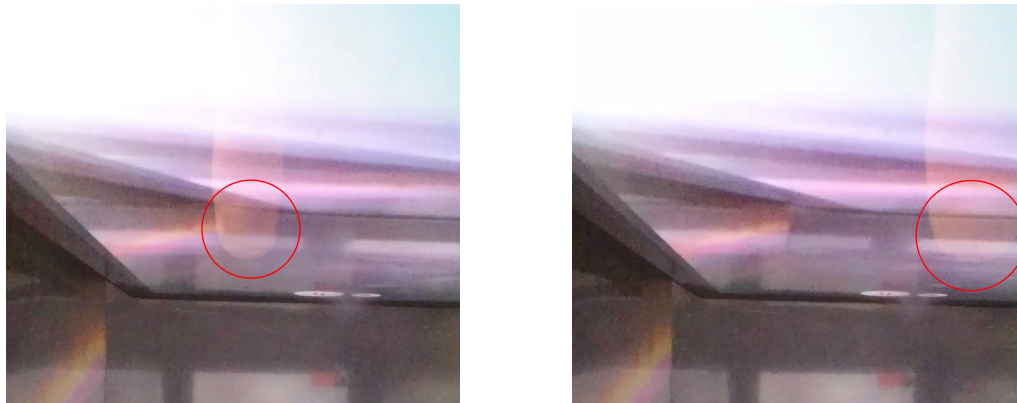


図 18：各指先位置における縦位置と大きさの比較。

図 19 に、位置番号 8 と 27 の撮影画像を示す．映り込んでいる指先を、図中に赤丸で囲っている．また、図 20 に観測した 48 点について縦軸に縦位置、横軸に横位置としたグラフを示す．ここで、縦位置が同じ点は同色でプロットしている．図 19 より、指先の位置が変化した場合に横位置、縦位置、および指の大きさが、左上から右下に行くほど、画像上でもその方向に移動しつつ、指が大きくなっていることが確認できる．



(a) 位置番号 8

(b) 位置番号 27

図 19：指先の横位置と縦位置の撮影画像による比較．

また、図 20 のグラフから、横ライン a-b と c 以降の順序がいかかわっているが、そこを除くと指先が下に行くほど、画像上でも下に移動していることがわかる．また、横方向についてはその移動がきれいに画像上でも確認できたことがわかる．この結果から、単純な検出として、画像上での指先の位置のみを利用した指先位置の検出も可能であると考えられる．一方で、奥行き方向の検出が困難となることが考えられるため、その精度は低くなる可能性が高い．

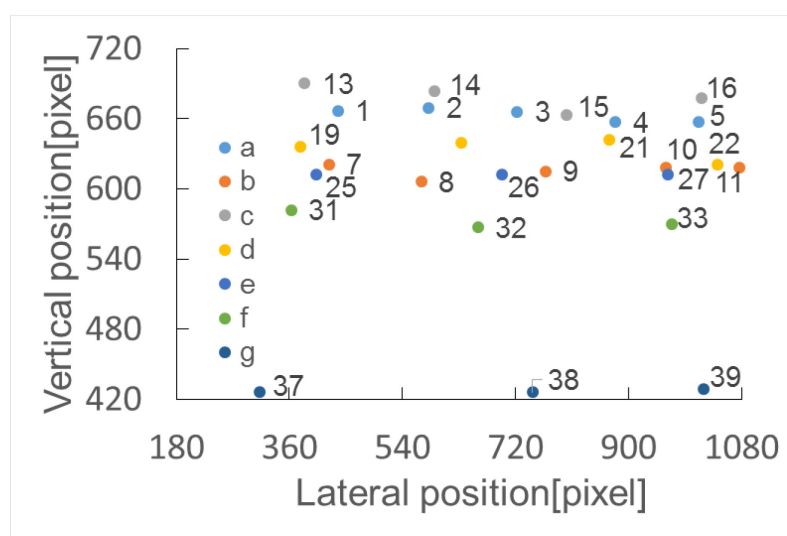


図 20：各指先位置における横位置と縦位置の比較．

3.3. 偏光変調を用いた AIRR における装置内カメラによる観察手法

本章では、偏光変調を用いた AIRR (p-AIRR) において、この偏光を利用することで装置内に設置したカメラに p-AIRR 内部のディスプレイからの反射光を観測させず、空中像に触れるユーザーの指等を観測する手法を提案する。これにより、装置内にカメラを設置したときに映りこんでしまう問題が解消される。また、これにより空中ディスプレイにおける装置内カメラを用いた指先位置の検出が容易になることが期待される。

3.3.1. 原理

図 21 に、偏光変調を用いた AIRR における装置内カメラによる観察系の構成図を示す。

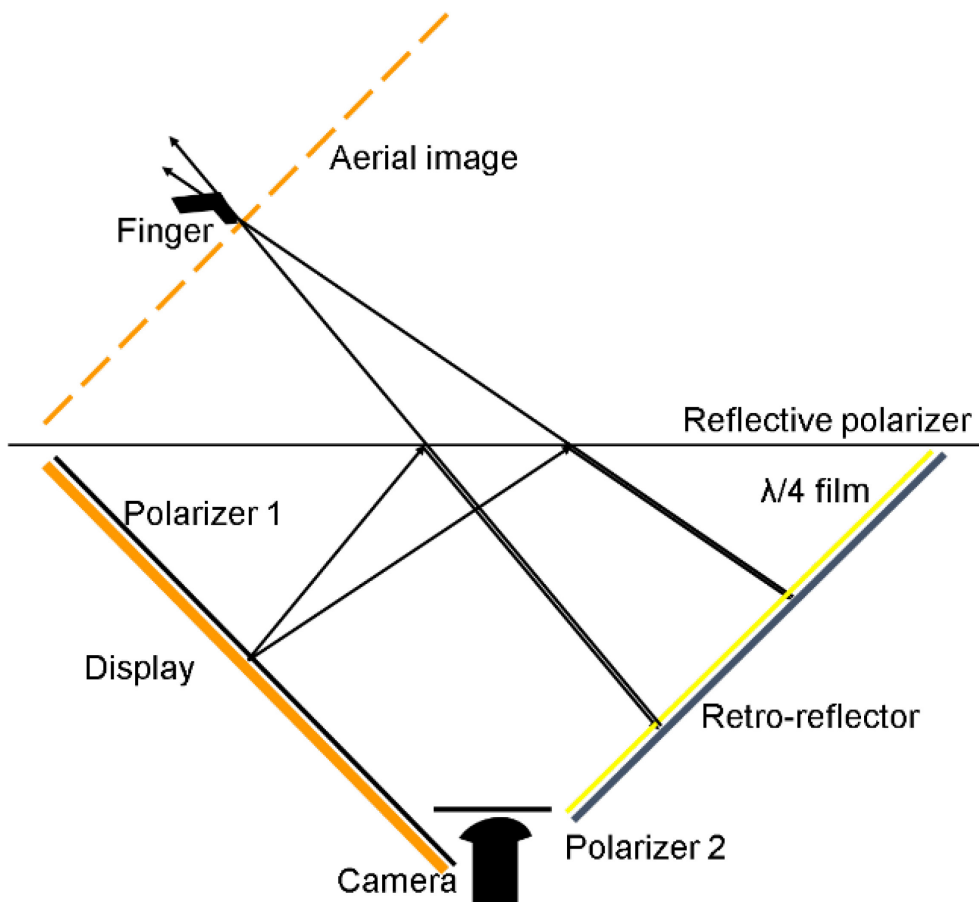


図 21：偏光変調を用いた AIRR における装置内カメラによる観察系の構成。

本実験では、p-AIRR の構成に加えて装置内部にカメラと、ディスプレイ上に偏光板 1 を、カメラ上に偏光板 2 を設置する。ここで、偏光板 1 は反射型偏光板の透過軸とクロスニコル配置に、偏光板 2 は反射型偏光板の透過軸と平行ニコル配置にする。なお、偏光板 1 は、直線偏光のディスプレイを用いている場合は省略することが可能である。

2.2 節で述べた p-AIRR の原理では、ディスプレイから出た直線偏光が反射型偏光板

ですべて反射し、再帰反射素子で再帰反射するときに $\lambda/4$ 波長シートを2回通過して偏光が90度回転することにより、再帰反射光が反射型偏光板を全て透過して空中像をより明るく見せる。ここで、内部にカメラを設置したときに観測される内部反射光は、反射型偏光板の透過軸と直交する軸を持つ偏光であるので、カメラ上に偏光板2を設置することで内部反射光の映り込みをカットすることができる。また、反射型偏光板と偏光板2の透過軸は平行ニコル配置となるため、カメラは装置外部の様子をクリアに撮影することができる。

3.3.2. 実験方法

3.3.1 節で示した観測系を実際に構築し、装置内カメラからの観測を行い、偏光変調を用いたAIRRにおける装置内カメラによる観測手法の実用性を確認した。観測は、カメラ上に配置する偏光板2がある場合とない場合の2通りについて行った。

3.3.3. 実験結果

図22に、ディスプレイ上の偏光板1と、装置内カメラ上の偏光板2がない場合の観測結果を示す。P-AIRRにおける内部反射は、ディスプレイから来る光のほとんどを反射している。観測結果からも、ディスプレイ像の内部反射がはっきり映りこんでいることを確認した。また、反射型偏光板を透過して、外部の情報がわずかに映り込んでいることも確認できた。

図23に、ディスプレイ上の偏光板1と、装置内カメラ上の偏光板2がある場合の観測結果を示す。図22と比較して、明らかに内部反射の映り込みが軽減された。



図 22：偏光変調を用いたAIRRにおける装置内カメラ上の偏光板がない場合の観測結果。



図 23：偏光変調を用いた AIRR における装置内カメラ上の偏光板がある場合の観測結果.

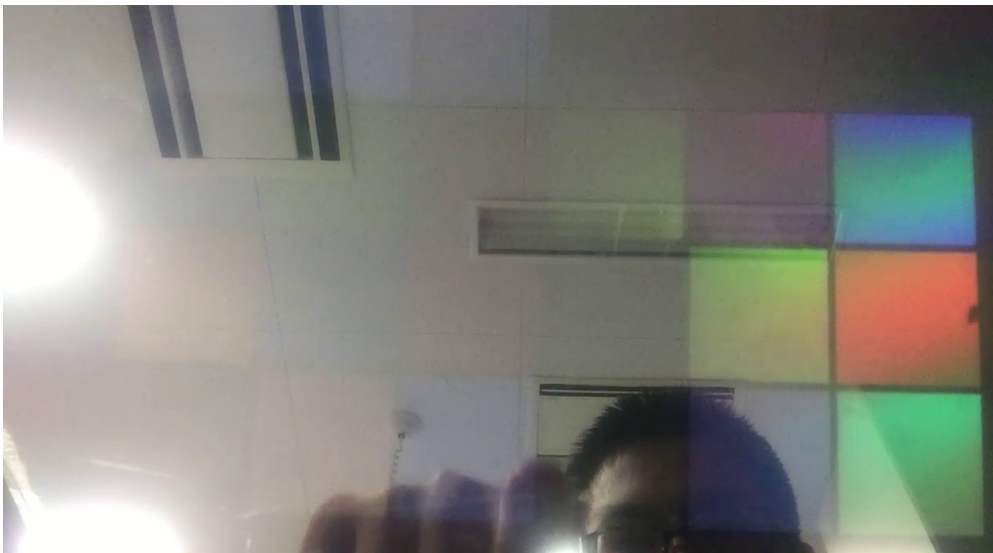


図 24：照明光の入り方を変えたときの内部カメラの観測結果.

3.4. 内部カメラを用いた空中像の散乱による接触検知

偏光変調を用いた AIRR における内部カメラによる観察手法を用いて、空中像の散乱による接触検知の可能性を述べる。本手法では、空中像に指先が接触した時に発生する散乱光を用いることにより、空中像と接触したことを検知する処理が単純になることがメリットとなる。また、コンテンツを工夫することによって、散乱光の色のみを用いるだけで接触した空中像上の位置までも検出することが可能になることが期待される。

3.4.1. 原理

図 25 に、空中像の散乱を用いた接触検知の観測系の構成を示す。本観察系の構成は、

3.3.1 節で示した構成と同じものである。ここで、結像し空中像を生成する光の偏光方向は、反射型偏光板および偏光板 2 の透過軸と平行になっている。よって、ユーザーの指先が空中像に接触した際に発生する散乱光は、カメラから観測することが可能である。これにより、散乱光で色づくユーザーの指先より、空中像との接触検知が可能である。

3.4.2. 実験方法

内部カメラを用いた空中像との接触検知の手法として、空中像との接触によって発生する散乱光を用いる手法を提案する。この手法の実現可能性を確認するため、光の三原色について手のひらでの散乱光を内部カメラによる観測系で観測した。図 26 に、本実験での実験環境の写真を示す。本実験では、直径 2cm の赤、青、緑の空中像について、手のひらでの散乱光を観測する。手のひらは、空中像から垂直方向に 8 点 (-3cm から 5cm に 1cm 刻み) にかざす。暗室および明室条件で、1 つの観測点について 300 回観測し、散乱光が検出された画素の平均値を求めた。図 27 に、内部カメラから反射型偏光板を通して撮影した画像の一例を示す。

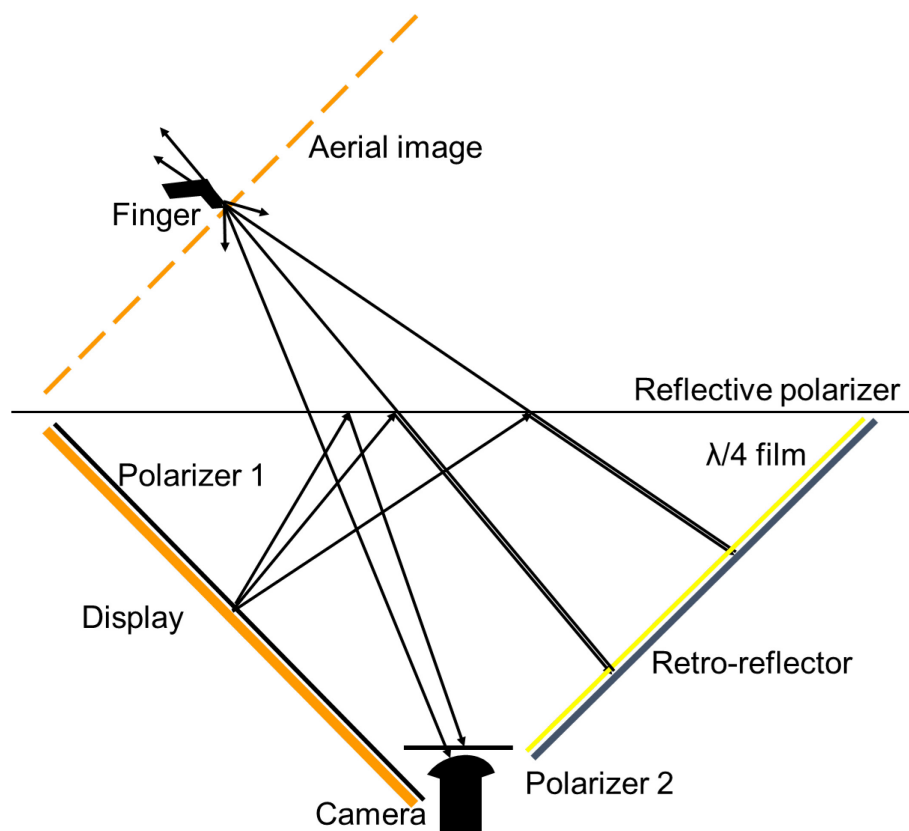


図 25：空中像の散乱を用いた接触検知の観測系の構成。

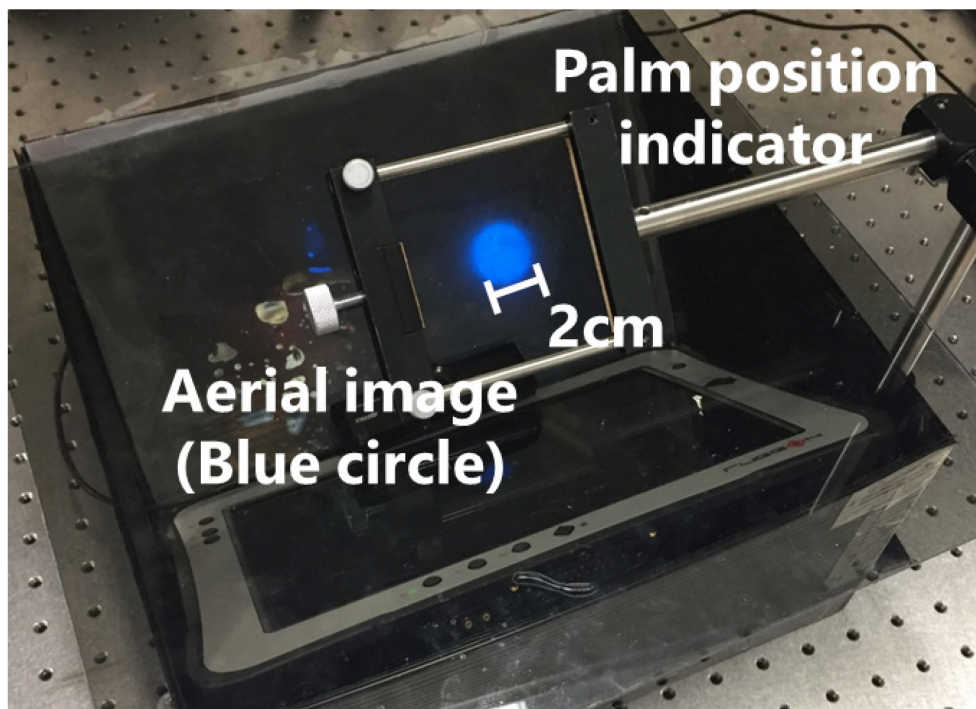


図 26：内部カメラからの手のひらでの散乱光の観測の実験環境.



図 27：内部カメラからの手のひらでの散乱光の観測.

3.4.3. 実験結果

図 28 に、暗室条件における手のひらで散乱した光の測定結果のグラフを示す。グラフの横軸は空中像の結像位置と手のひらの間の距離を、縦軸は散乱光として検出されたピクセルの数を示している。散乱光は、赤、青、緑の各色で空中像から 0cm の位置でもっとも多く検出された。これは、散乱光を用いた空中像との接触の検知が可能であることを示している。一方で、赤色の散乱光は他の色に比べてすべての距離でより多く観測された。これは、手のひらの反射率の違いによるものであると考えている。したがって、この手法では手のひらの反射率を考慮する必要がある。

図 29 に、明室条件における手のひらで散乱した光の測定結果のグラフを示す。また、

図 30, 図 31, 図 32 に, 実際の観測例として, 手のひらから空中像距離が 0cm のときの内部カメラによる観測映像を示す. 赤色光については暗室と同様に 0cm でもっとも多く散乱光が検出されたが, 他の色ではどの距離でもほぼ検出されなかった. これは, 散乱光の輝度に比べて実験環境の明るさが高いためであると考えている.

3 色に分けて実験したことで, 光の色による検出しやすさの違いがあることも確認できた. この時の被験者の手が赤みかかった手のひらであったことから, 手のひらの反射率の違いが原因ではないかと判断したが, 実際の検出において反射率の違いを考慮することは難しいと考えられる. また, 図 33 に, 手のひらから空中像の距離が+4cm のときの散乱光として検出された領域図を示す. ここで, 作成したプログラムでは, 明室環境においてはビームスプリッターで反射して手のひらを照らし出す天井照明があったために, 暗室条件のときと異なり手のひらの色味が検出の閾値を超える事態が起きたことが分かった. よって, 明室で検出を行う際には, この色味を加味して散乱光を認識するアルゴリズムが必要になる. 現時点での解決案としては, 空中像の結像位置が決まっていることから, 空中像の表示位置に相当する撮影映像中の領域のみを走査して, この部分の色味の変化から検出する手法が考えられる.

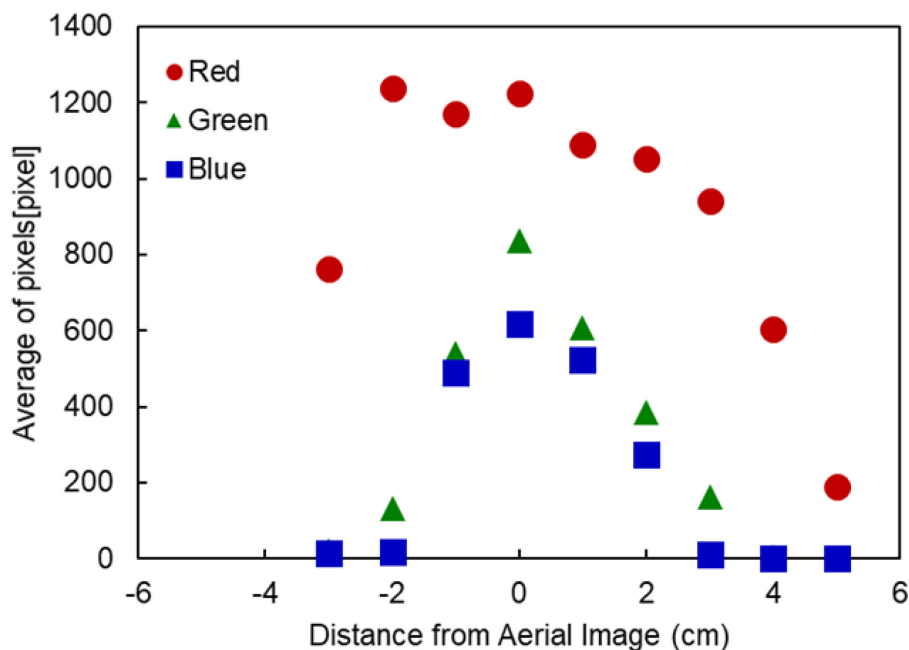


図 28：暗室条件における手のひらで散乱した光の測定結果.

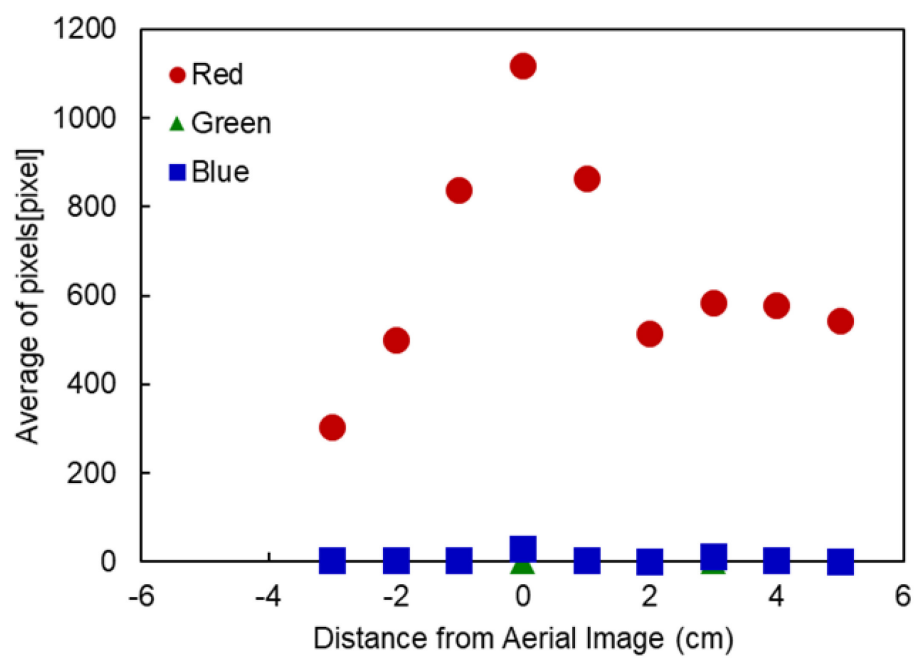


図 29：明室条件における手のひらで散乱した光の測定結果.



図 30：手のひらを空中像から 0cm の位置に置いた時の赤色光の散乱.



図 31 : 手のひらを空中像から 0cm の位置に置いた時の緑色光の散乱.



図 32 : 手のひらを空中像から 0cm の位置に置いた時の青色光の散乱.

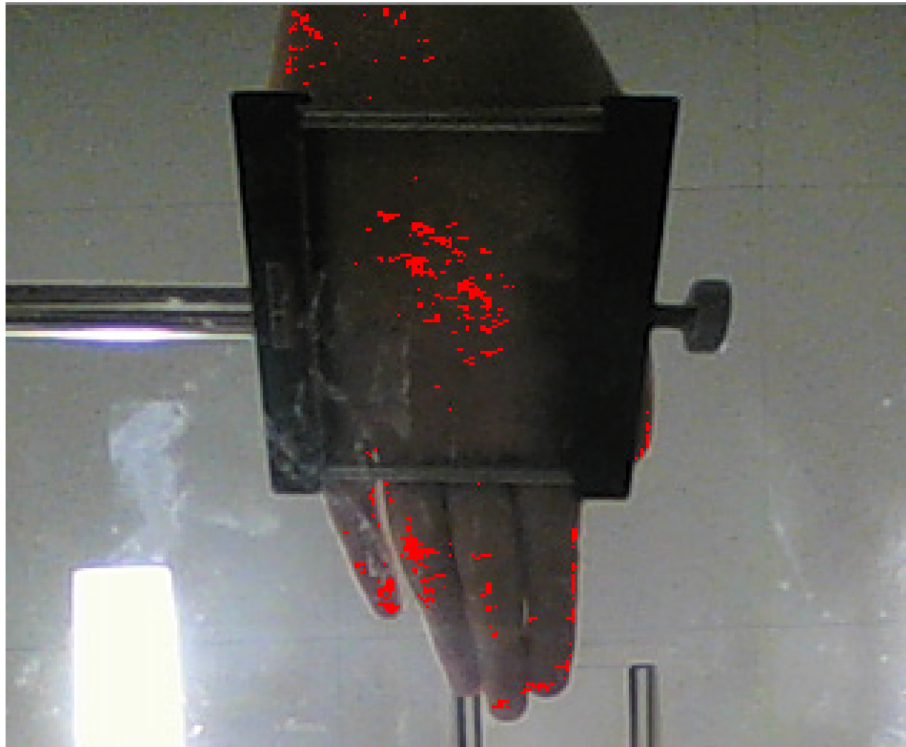


図 33：手のひらを空中像から+4cm の位置に置いた時の赤色光の散乱の検出領域。

3.5. シースルー型 AIRR と偏光変調によるユーザーの観察を組み合わせた視線一致型ビデオ通話デバイス

偏光変調を用いた AIRR における装置内カメラによる観察手法と、AIRR によるシースルー型空中ディスプレイを組み合わせ、視線一致型のビデオ通話デバイスを提案する。視線一致型のビデオ通話については様々な手法で研究がなされている。特殊なスクリーンやディスプレイを用いている手法としては、カメラが透過して撮影が可能なスクリーン[79]を用いた手法や有機 EL ディスプレイを透過して撮影することで視線一致を実現する手法[80]や、ホログラフィック導波路を用いてカメラの見かけの位置をディスプレイ上に移す手法[81]がある。また、複数のセンサーとカメラを用いて高精度なユーザートラッキングと 3D キャプチャを行い、大画面自動立体視ディスプレイを用いることで実現する対面型ビデオ通話[82]も開発されている。また、ハーフミラーによる虚像を用いている手法としては、ライトフィールドディスプレイを光源とした手法[83, 84]や、ホログラフィを光源とした手法[85, 86]などがある。これらの手法では対面する映像はフラットパネルディスプレイまたはホログラム等による虚像であることにに対し、本手法では実像を相手とした視線一致ビデオ通話となる点で大きくことなる。虚像のビデオ通話と違って、ユーザーは空中に浮かぶ実像の話し相手に触れることができることに始まり、これまで以上に多彩なコミュニケーションがビデオ通話でおこなえるようになることが期待される。

3.5.1. 原理

図 34 及び図 35 に、視線一致型ビデオ通話デバイスの構成図を示す。本節では、この 2 つの手法について実験光学系を構築し、撮影実験を行う。空中結像の原理は 2.2 節で示した p-AIRR と同じである。また、光学系の構成は、シースルー型の AIRR 光学系 [71]を用いている。

図 34 は、反射光偏光板を透過して撮影する視線一致型ビデオ通話デバイスの構成図である。反射型偏光板とカメラの前の偏光板の透過軸は平行に配置されている。ディスプレイからの光は反射型偏光板をほぼ透過するため、反射してカメラに向かう光はカメラの前の偏光板によってカットされる。一方で、ユーザーの撮影は 2 つの偏光板の透過軸が平行であるため問題なく行われる。

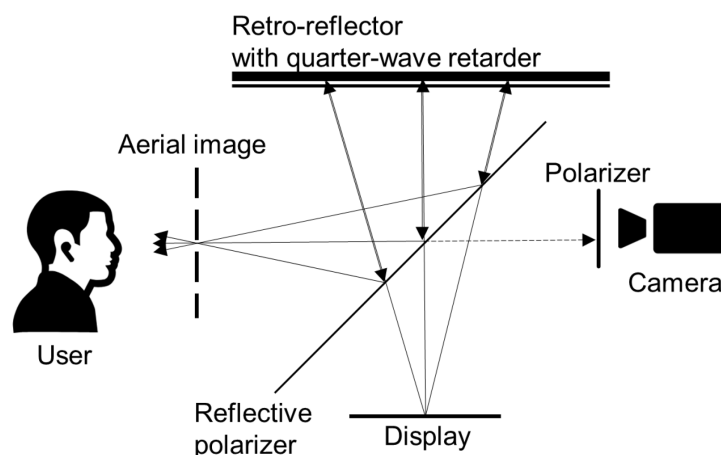


図 34：反射光偏光板を透過して撮影する視線一致型ビデオ通話デバイスの構成図。

図 35 は、反射光偏光板を反射して撮影する視線一致型ビデオ通話デバイスの構成図である。図 34 とは異なり、反射型偏光板とカメラの前の偏光板の透過軸は直交するように配置する。偏光板の直交配置によって、ディスプレイからの直接光はカメラには映り込まない。ユーザーの撮影は、反射型偏光板表面での反射を用いて実現できる。

このとき、カメラが撮影する映像を考えると、ディスプレイから出た光は反射型偏光板の透過軸と偏光軸が水平になっているため、ここでは反射せず透過する。このとき、一部反射してきた光があった場合も、カメラの前の偏光板の透過軸とは平行ではないために、これでカットされカメラには観測されない。一方で、反射型偏光板と偏光板の透過軸は平行なため、カメラからは反射型偏光板を透過してユーザーを観測することができる。

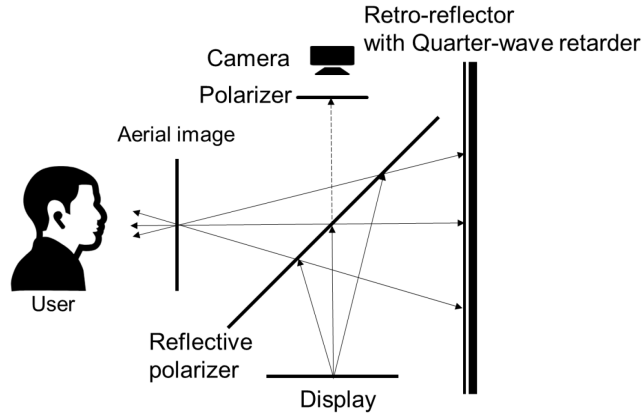


図 35：反射光偏光板を反射して撮影する視線一致型ビデオ通話デバイスの構成図。

ここで、空中像の視野角を十分に確保するためには、光学系を構成する素子の大きさや配置距離といったパラメータを決定する必要がある。図 36 に本節で用いる空中結像光学系の構造を示す。ディスプレイの高さを V_D ，空中映像の高さを V_A ，反射型偏光板の長さを H_B ，1/4 波長シート付き再帰反射素子の長さを W_{RR} とした。各素子の長さの単位は mm である。ここで、再帰反射素子の長さは少なくともディスプレイの大きさ以上である。また、光源と反射型偏光板のなす角は本論文では 45 度とした。

空中像の浮遊距離 F と視認距離 L の定義を図 37 に示す。浮遊距離 F は、ユーザーの目の位置を E ，空中像の高さの中心を E_{VA} ，この 2 点をつないだ視線の先の反射型偏光板上の点を E_H として定義する。ここで、提案する視線一致型ビデオ通話手法については、空中ディスプレイに表示される話し相手とユーザーの視線は同じ高さであることを想定する。そこで、ユーザーの目の位置と同じ高さとなる空中像上の点を E'_{VA} とし、同じ高さの反射型偏光板上の点を E'_H とする。そして、これらの点を用いた視認距離を L' ，浮遊距離を F' として定義し、以降の計算ではこれらを用いて計算を行う。 L' と F' はそれぞれ以下の式であらわされる。

$$L' = L \cos \theta_F, \quad (1)$$

$$F' = F \cos \theta_F + (L + F) \sin \theta_F. \quad (2)$$

視野角を確保するために必要なビームスプリッターの長さ H_B は、視認距離 L' ，浮遊距離 F' ，視点位置と空中像下端のなす角 θ_{E1} ，視点位置と空中像上端のなす角 θ_{E2} より算出することができる。図 38 に視線一致型ビデオ通話構成におけるそれぞれの値の定義を示す。

必要な反射型偏光板の長さを求めるために、反射型偏光板の上端を X，空中像上端と同じ高さの点を Y，視点と同じ高さを E'_H，空中像下端と同じ高さの点を Q，反射型偏光板の下端を P とし，それぞれの区間を h_{B1} から h_{B4} とする．このとき，h_{B1} から h_{B4} は以下の式であらわされる．

$$h_{B1} = h_{B2} \frac{\frac{F'}{L'} - \tan \theta_{E1}}{1 + \tan \theta_{E1}}, \quad (3)$$

$$h_{B2} = \sqrt{2}L' \tan \theta_{E1}, \quad (4)$$

$$h_{B3} = \sqrt{2}L' \tan \theta_{E2}, \quad (5)$$

$$h_{B4} = h_{B3} \frac{\frac{F'}{L'} + \tan \theta_{E2}}{1 - \tan \theta_{E2}}. \quad (6)$$

よって，必要な反射型偏光板の長さ H_B は以下の式で示される．

$$\begin{aligned} H_B &= h_{B1} + h_{B2} + h_{B3} + h_{B4} \\ &= h_{B2} \left(1 + \frac{\frac{F'}{L'} - \tan \theta_{E1}}{1 + \tan \theta_{E1}} \right) + h_{B3} \left(1 + \frac{\frac{F'}{L'} + \tan \theta_{E2}}{1 - \tan \theta_{E2}} \right) \left[0 < \theta_{E1}, \theta_{E2} < \frac{\pi}{4} \right] \\ &= \sqrt{2}L' \tan \theta_{E1} \left(1 + \frac{\frac{F'}{L'} - \tan \theta_{E1}}{1 + \tan \theta_{E1}} \right) + \sqrt{2}L' \tan \theta_{E2} \left(1 + \frac{\frac{F'}{L'} + \tan \theta_{E2}}{1 - \tan \theta_{E2}} \right). \end{aligned} \quad (7)$$

3.5.2. 実験方法

図 39 に，反射型偏光板を透過して撮影する光学系の実験系を示す．また，図 40 に反射型偏光板を反射して撮影する光学系の実験系を示す．また，図 41 に，図 40 に示した実験系の各要素の大きさ及び浮遊距離と視点距離を示す．

再帰反射素子は日本カーバイド工業製の 1/4 波長シート付きリフレクター RF-Ax[72] を用いた．反射型偏光板は，透明アクリル板に NITTO 製の APCF を張り付けたものを用いている．図 39 の実験系では，ディスプレイにタブレット端末(Samsung GALAXY SM-T820)を，撮影には CASIO 社のデジタルカメラ(EX-100F)を用いた．図 40 の実験系では，ディスプレイにはモバイルディスプレイ(UPERFECT 7inch)を，ユーザーの撮影には Web カメラ(UCAM-C750FBBK)を用いた．カメラは反射型偏光板から 85mm の高さに配置し，空中像の高さの 2/3 の位置がカメラ目線になるように配置した．ユーザーと空中映像の間の距離は各レイアウトで 300mm とした．この時， θ_{E1} は 11.3 度， θ_{E2} は 5.7 度となっている．したがって，式(7)より H_B は 181mm の長さが必要となる．本実験では 250mm の長さの反射型偏光板を用いているため，空中像の視野角が確保されている．

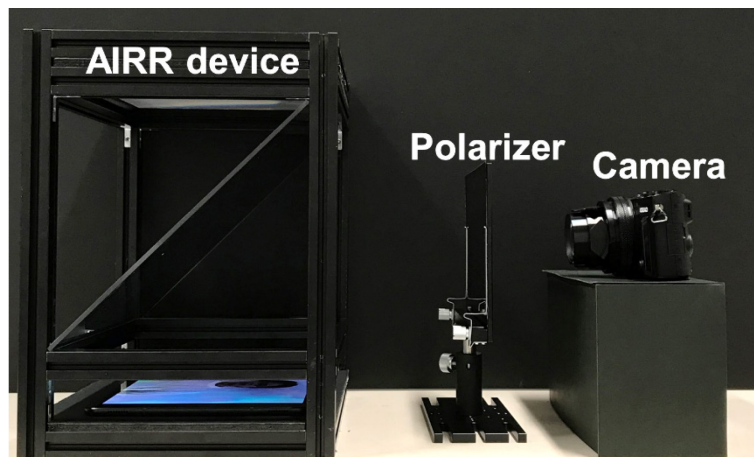


図 39：反射型偏光板を透過して撮影する光学系の実験系.

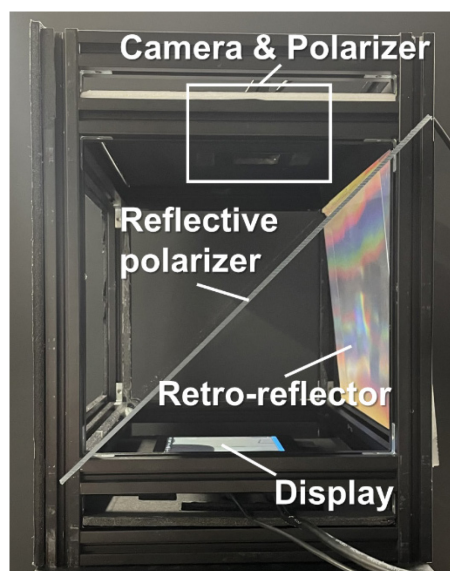


図 40：反射型偏光板を反射して撮影する光学系の実験系

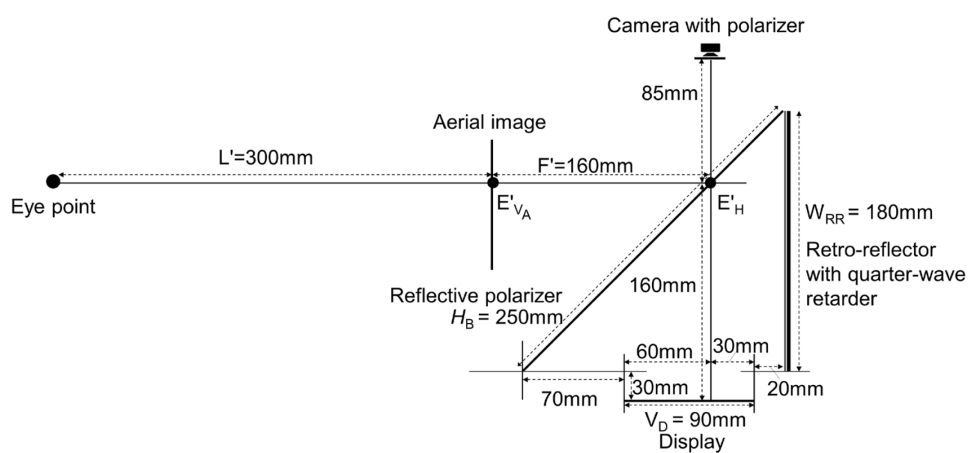


図 41：実験に用いた各素子のサイズと視認距離及び浮遊距離.

3.5.3. 実験結果

図 42 は、反射型偏光板を透過して撮影する光学系による実験結果である。偏光板を挿入することで映り込みの低減はされているが、わずかに残っていることが確認できた。この要因としては、本実験に用いた反射型偏光板の構成が考えられる。図 3 で示した p-AIRR の構成図にあるように、反射型偏光板は透明なアクリル板と APCF の張り合わせによって用いられている。反射型偏光板を透過して撮影する構成では、カメラ側にはアクリル板の面が向いており、反射型偏光板が十分に機能していないと考えられる。

図 43 は、反射型偏光板を反射して撮影する光学系による実験結果である。この光学系では、余計な映り込みなくカメラ目線でユーザーを撮影することに成功した。

そして、図 44 に反射型偏光板を反射して撮影するシステムを 2 つ用いて視線一致型ビデオ通話の実施実験を行った結果を示す。対となるデバイスに向かってコミュニケーションをとるユーザーの様子が、カメラ目線で正面のデバイスに表示されていることが確認できた。

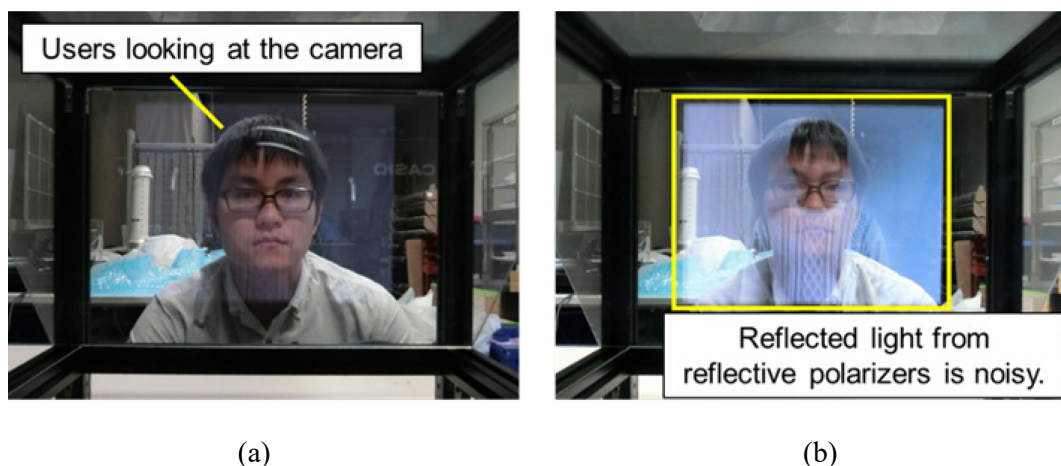


図 42：反射型偏光板を透過して撮影する光学系による撮影結果。
(a)カメラの前の偏光板を配置した場合、(b)カメラの前の偏光板がない場合。



図 43：反射型偏光板で反射して撮影する光学系による撮影結果。

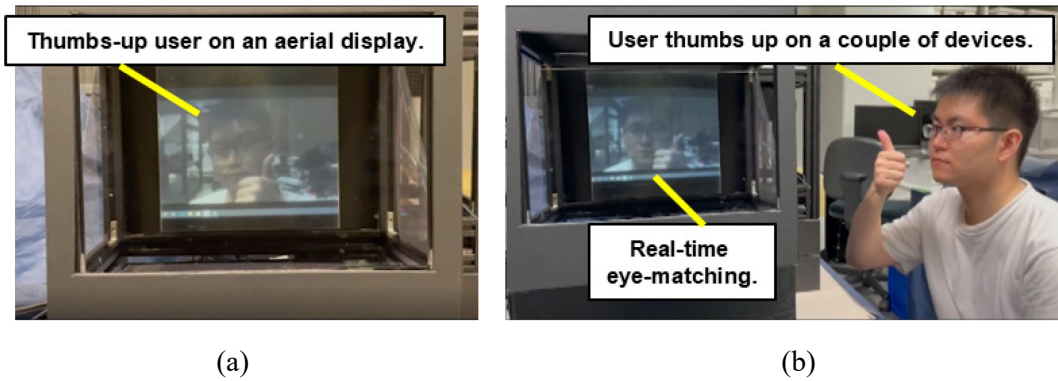


図 44：2つの提案デバイスを用いた視線一致型ビデオ通話の実施.

- (a) 空中ディスプレイに表示されているカメラ目線のユーザー,
 (b) 対となるデバイスに向かってジェスチャーをしているユーザー.

3.6. 視線一致型ビデオ通話システムにおける偏光状態の測定

ここまで、偏光変調を用いた AIRR にカメラと偏光板を組み合わせた光学系によって、視線一致型のビデオ通話を実現することにより、空中ディスプレイにおけるユーザーの自然な撮影が可能であることを明らかにした。本節では、本撮影光学系が偏光を用いて行われていることから、偏光カメラを用いた偏光状態の撮影を行い、偏光状態からも映り込みの除去ができていることを明らかにする。

3.6.1. 実験方法

偏光カメラを用いて、反射型偏光板を透過して撮影する光学系及び反射して撮影する光学系におけるディスプレイの偏光状態、カメラに入射する偏光の偏光状態、空中結像する偏光の偏光状態を撮影した[73]。撮影には、Sony IMX123M センサーアレイ (2064×1552 画素, 画素サイズ 2.35mm, 30fps) に、焦点距離 16mm のレンズ (1:1.4, $\phi 30.5$, Tamron) を取り付けたものを使用した。また、空中像の偏光状態の撮影には波長分散を調べるため可視バンドパスフィルタ (Thorlabs FKB-VIS-10) を使用した。偏光状態を示すストークスパラメータ S_0 , S_1 , S_2 は、偏光カメラで撮影した 4 つの偏光方位角での光強度 I_0 , I_{45} , I_{90} , I_{135} を用いて次の式で算出した。

$$S_0 = \frac{1}{2}(I_0 + I_{45} + I_{90} + I_{135}) \quad (8)$$

$$S_1 = I_0 - I_{90} \quad (9)$$

$$S_2 = I_{45} - I_{135} \quad (10)$$

図 45 に、反射型偏光板を透過して撮影する光学系の偏光状態の撮影の構成図を示す。また、図 46 は実際に実験を行った撮影系である。図 47 に、反射型偏光板を反射して撮影する光学系の偏光状態の撮影の構成図を示す。また、図 48 は実際に実験を行った撮影系である。

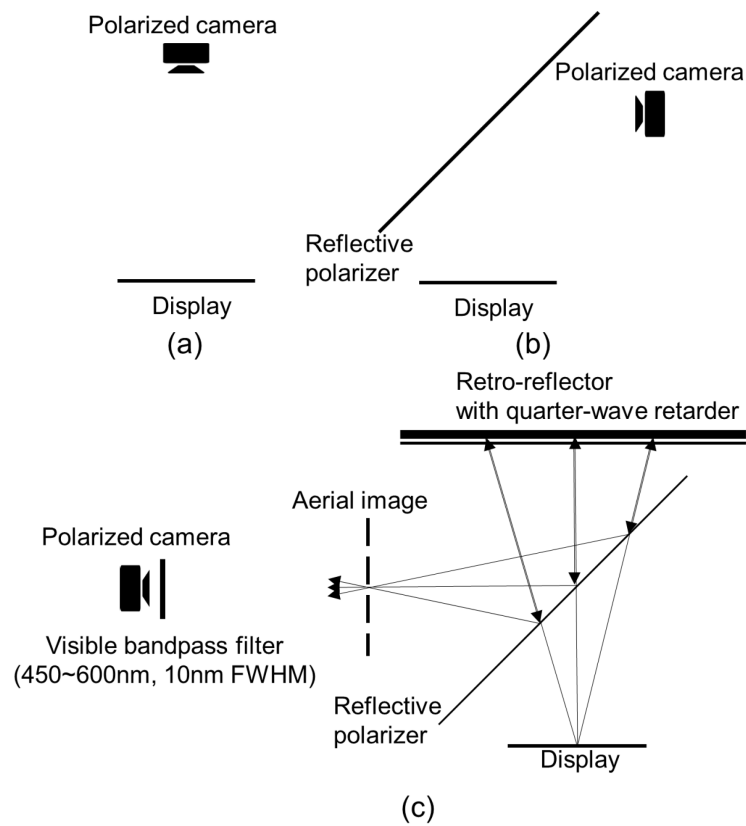


図 45：反射型偏光板を透過して撮影する光学系の偏光状態の撮影実験の構成図。
 (a)ディスプレイの偏光状態の撮影。(b)カメラに映り込む偏光の状態の撮影。
 (c)バンドパスフィルタを用いた空中結像する偏光の状態の撮影。

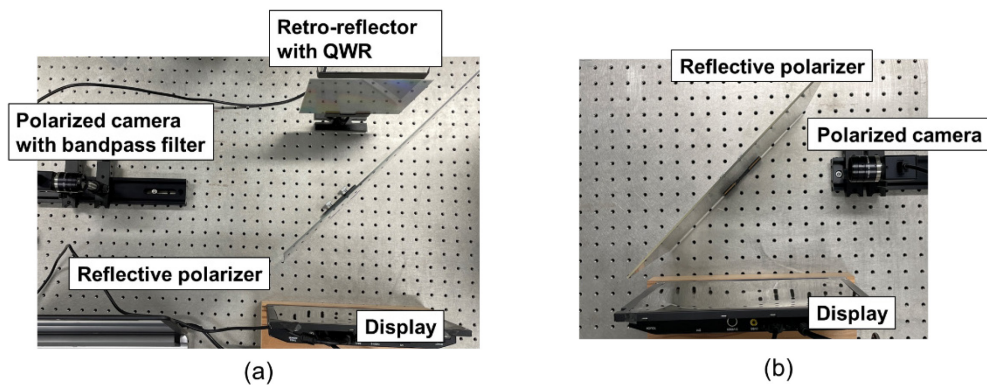


図 46：反射型偏光板を透過して撮影する光学系の偏光状態の撮影実験系。
 (a)ディスプレイの偏光状態の撮影。(b)カメラに映り込む偏光の状態の撮影。
 (c)バンドパスフィルタを用いた空中結像する偏光の状態の撮影。

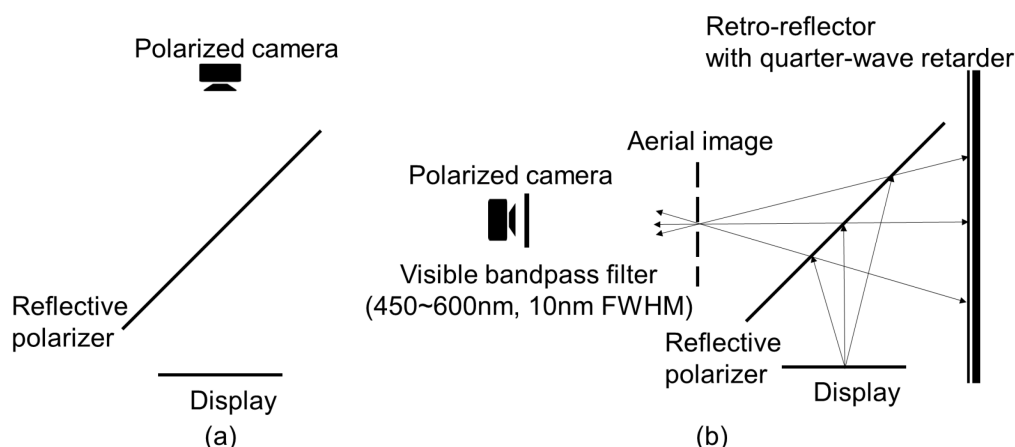


図 47：反射型偏光板を反射して撮影する光学系の偏光状態の撮影実験の構成図.

(a)カメラに映り込む偏光の状態の撮影.

(b)バンドパスフィルタを用いた空中結像する偏光の状態の撮影.

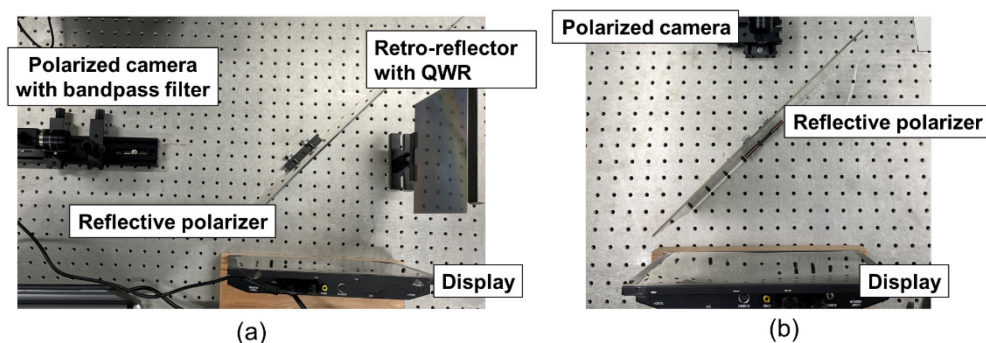


図 48：反射型偏光板を反射して撮影する光学系の偏光状態の撮影実験系.

(a)カメラに映り込む偏光の状態の撮影.

(b)バンドパスフィルタを用いた空中結像する偏光の状態の撮影.

3.6.2. 実験結果

図 49 に実験に使用したディスプレイのストークスパラメータの算出結果を示す. 画面上に白い矩形を表示し, この範囲内の値を用いて評価を行っている. また, 計算結果を正規化するため, S_1 及び S_2 はそれぞれ S_0 で割っている. 図中に赤い矩形で示された範囲の各画素での値の平均値が図中に示されている. 図 49 より, ディスプレイの S_1/S_0 の平均値は約 0.98, S_1/S_0 の平均は約-0.01 である. よって, 本実験で使用したディスプレイは 0 度の直線偏光を 98%の偏光度で発生させているとわかった.

図 50 は, 反射型偏光板を透過または反射して撮影する光学系においてカメラに向かう偏光のストークスパラメータの算出結果である. 図 50(a)は反射型偏光板を透過して撮影する光学系での算出結果であり, 反射型偏光板の亚克力板面で反射してカメラに

入射する偏光は偏光度が低く、偏光状態が直線ではなく楕円偏光であることが示された。よって、カメラの前に偏光板を配置しても十分に映り込みをなくすることができないことが分かった。一方、図 50(b)は反射型偏光板で反射して撮影する光学系でカメラに入射する偏光の撮影結果である。こちらは直線性の高い偏光であった。したがって、3.5 節で示されたように、映り込みのないきれいなユーザー撮影が行えることが示された。

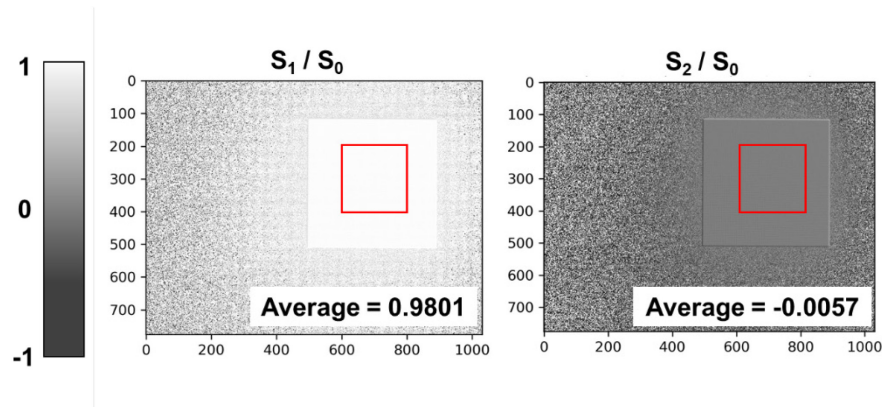


図 49：ディスプレイのストークスパラメータの算出結果。

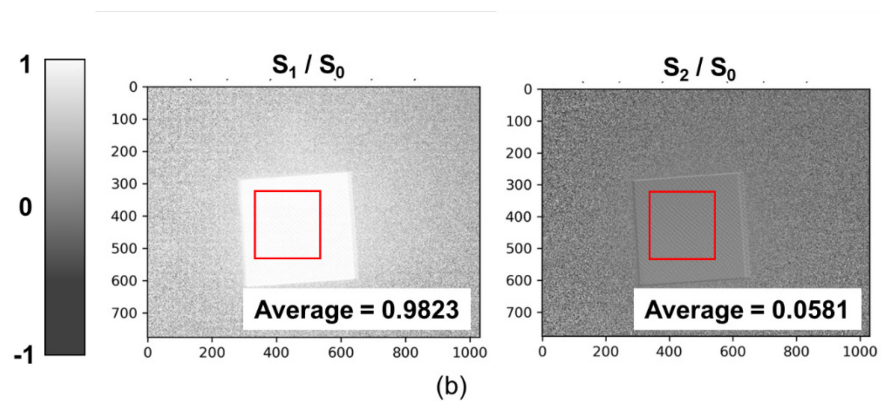
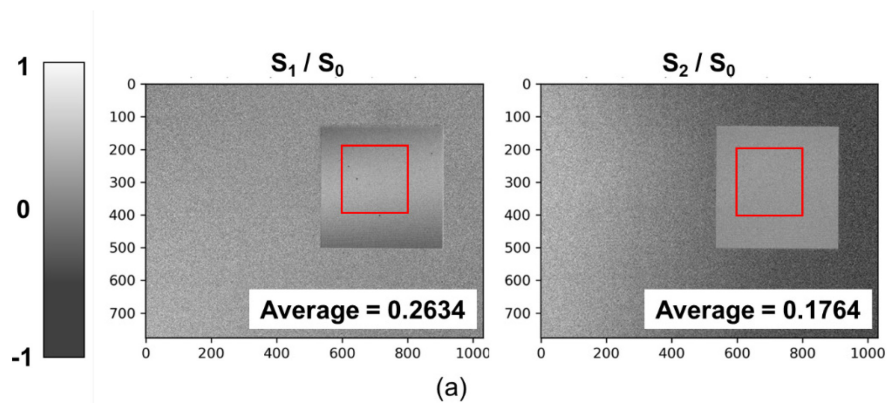


図 50：カメラに入射する偏光のストークスパラメータの算出結果。
(a)透過して撮影する光学系，(b)反射して撮影する光学系。

最後に、空中像を形成する偏光のストークスパラメータの算出を行った。反射型偏光板を透過して撮影する光学系の場合、 S_1/S_0 の平均値は約 0.97、 S_1/S_0 の平均は約 0.05 であった。また、反射して撮影する光学系の場合、 S_1/S_0 の平均値は約 0.95、 S_1/S_0 の平均は約 0.03 であった。よって、いずれの光学系でも直線偏光度の高い 90 度の直線偏光で結像していることをわかった。また、バンドパスフィルタを用いて波長 450nm、500nm、550nm、600nm での空中像のストークスパラメータを測定した。透過して撮影する光学系では、 S_1/S_0 の最大値は 450nm で約 0.98、 S_1/S_0 の最小値は 550nm で約 0.96 であり、偏光状態は最大 2%変化していた。反射して撮影する光学系では、 S_1/S_0 の最大値は 450nm で約 0.96、 S_1/S_0 の最小値は 550nm で約 0.93 であり、偏光状態は最大 3%変化していた。

3.7. 動物実験への応用

動物の相互認知について調べる研究では、実際の動物に代わり事前に撮影した動物の映像を提示する実験手法が以前より採用されている[74]。先行研究の多くでは、映像はディスプレイ上に表示される。そのため、被験者である動物のいるケージや水槽にディスプレイを隣接させる配置で映像が提示されてきたが、この手法ではディスプレイが障壁となり、映像に興味を持って接近する動物の反応を正面から撮影できなかった。また、これまでに AIRR を用いた円筒水槽を取り囲む空中ディスプレイを用いた動物実験[55-57]が行われているが、これについても装置の側面を再帰反射素子が覆うために、円筒水槽上部からの観察に限られていた。しかし、空中ディスプレイを用いたユーザー撮影光学系を応用することで、映像に反応する動物について映像を透過して正面から撮影することが可能になる。

3.7.1. 原理

提案光学系を図 51 に示す。空中表示部はディスプレイ、反射型偏光板、偏光板、1/4 波長位相差フィルム付き再帰反射素子によって構成される。偏光板を組み合わせたカメラによって撮影を行う。ディスプレイ上の偏光板とカメラ正面の偏光板の透過軸は平行に配置され、反射型偏光板の透過軸と直交する。ディスプレイからの直接光は、反射型偏光板によって反射されるためカメラに入射しない。ケージの壁面で反射した光は反射型偏光板で反射してカメラに向かうが、カメラ正面の偏光板と反射型偏光板の透過軸が直交に配置されていることで遮光される。よって、表面反射光を除いた状態で動物を正面から撮影することができる。

3.7.2. 実験方法

作成した実験装置を図 52 に示す。撮影対象は水の入ったアクリル水槽とした。ディスプレイには CG で作成されたメダカの映像を表示しており、アクリル水槽内に浮かぶように結像している。

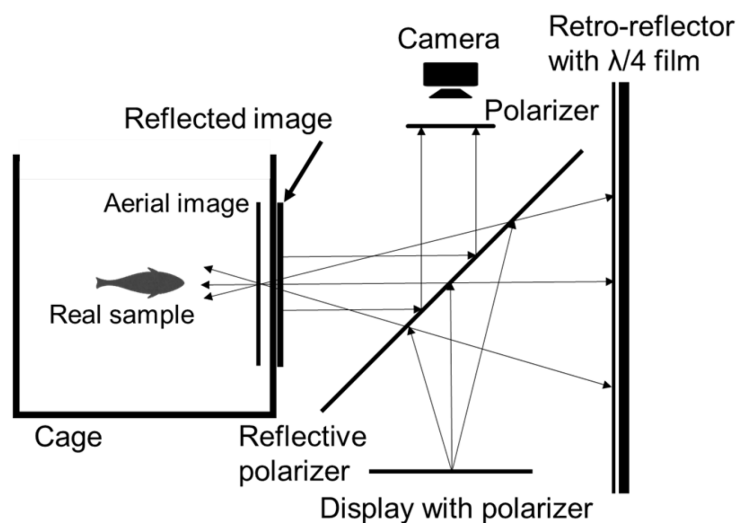


図 51：空中映像に反応する動物を正面から観察可能な光学系の構成図.

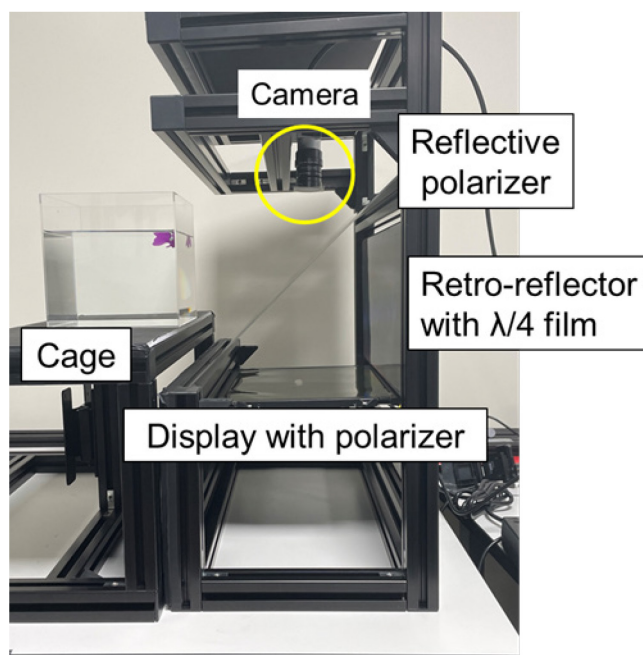


図 52：空中映像に反応する動物を正面から観察可能な光学系の試作装置

3.7.3. 実験結果

図 53 に、アクリル水槽内に表示されている空中像の撮影結果を示す．空中像は水槽内に結像しており，観測することができた．図 54 に、偏光板を用いずに撮影した結果を示す．映り込みを除くための工夫がないため，光源からの直接の映り込みと水槽壁面での反射による映り込みがどちらもくっきりと発生している．図 55 に、カメラの前の偏光板のみ取り除いた場合の撮影結果を示す．p-AIRR 光学系によってディスプレイからの直接光はほとんどカットされているが，水槽壁面での反射光が映り込んでいること

が確認できた．図 56 に，提案手法によって映り込みがカットされた撮影結果を示す．装置上部に設置されたカメラから，反射型偏光板での反射を利用して動物の模型が撮影された．

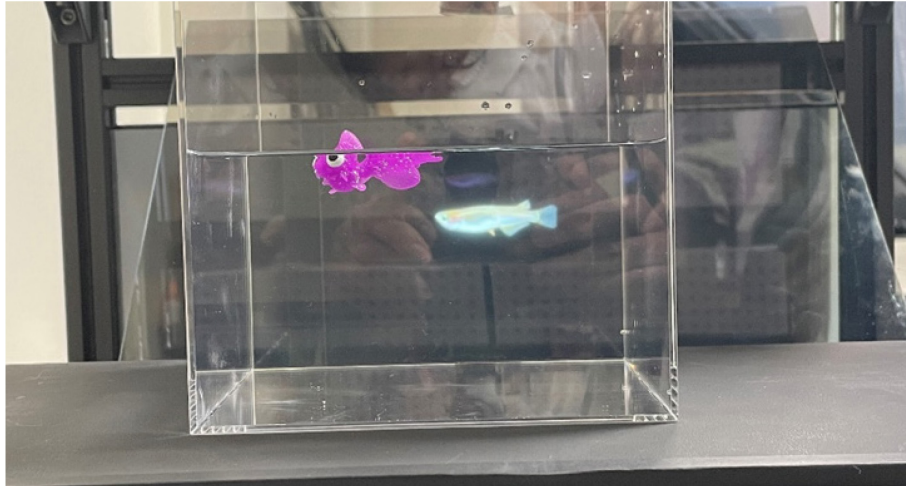


図 53：アクリル水槽内に浮かぶ空中像の撮影結果．

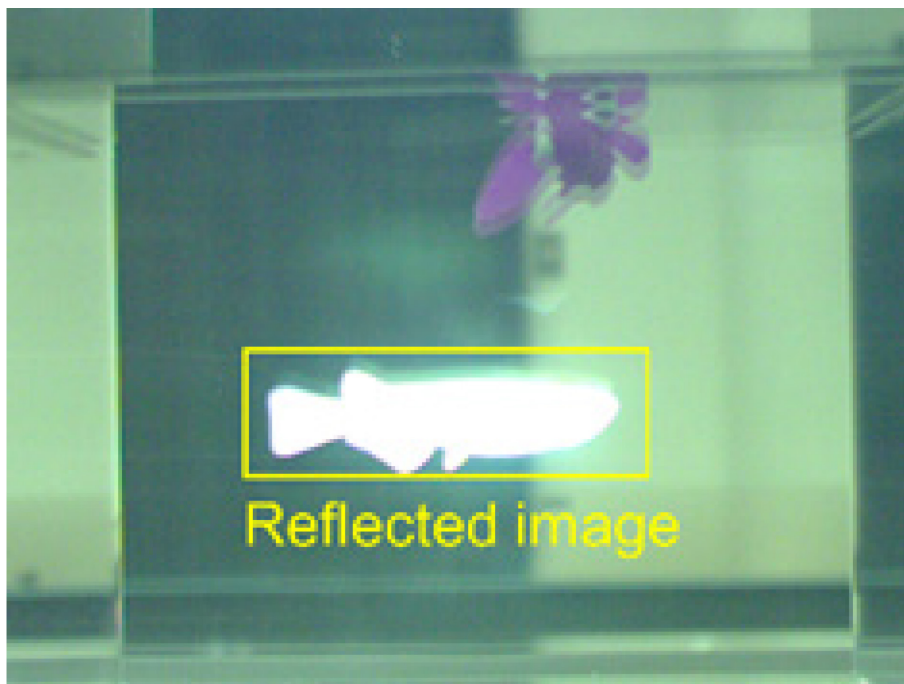


図 54：偏光変調を用いない場合の映り込みの撮影結果．

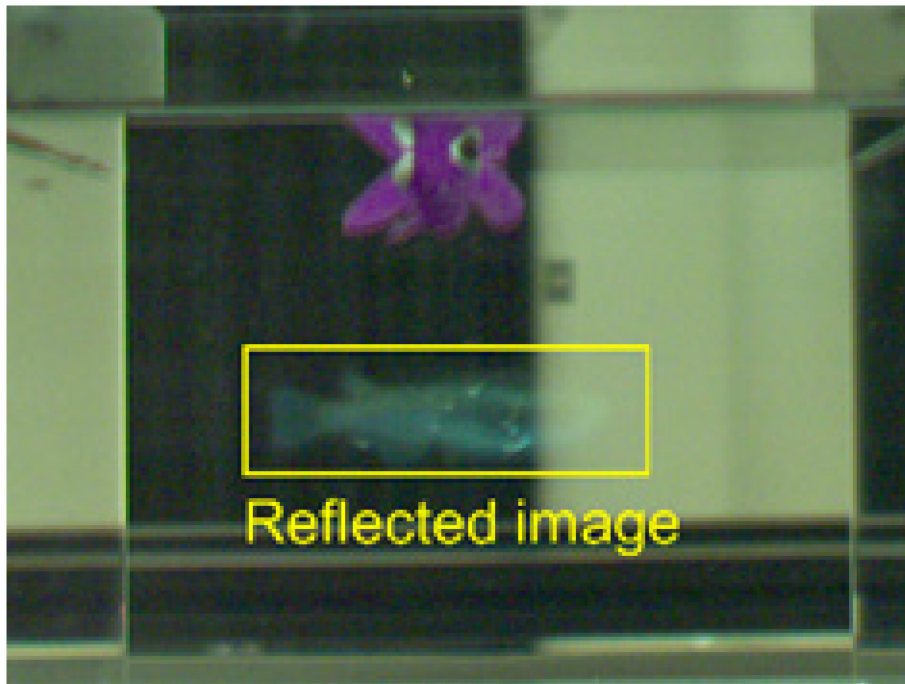
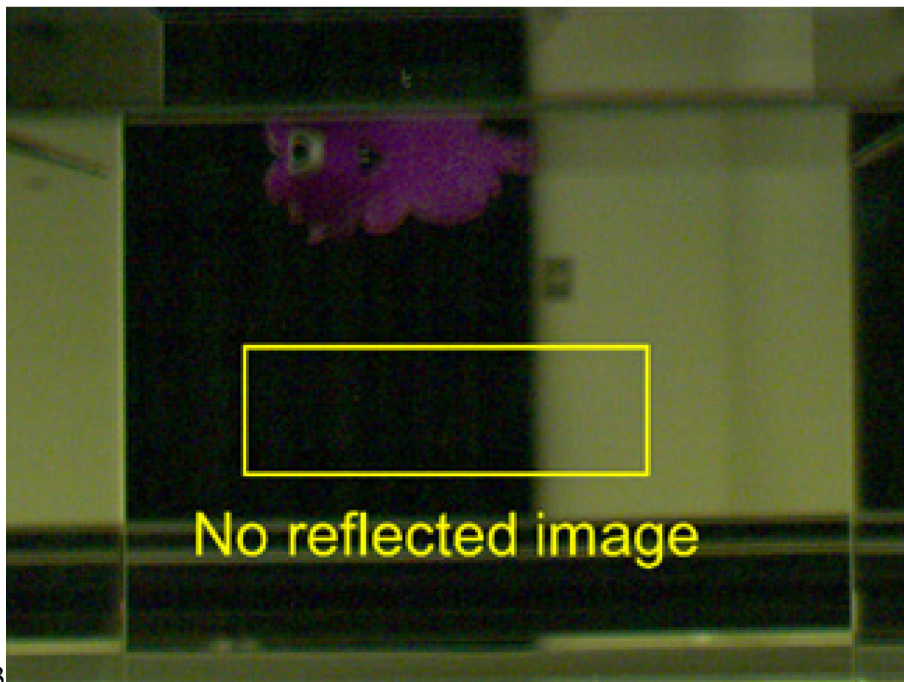


図 55 : カメラの前に偏光板が配置されていないときの映り込みの撮影結果.



3

図 56 : 提案光学系によって除去された映り込みの撮影結果.

3.8. おわりに

本章では、人の表情や目線の自然な形での取得を目指し、AIRR 構成の内部カメラからのシースルーユーザー撮影が可能であることを明らかにした。p-AIRR の光学系と偏光板を備えたカメラを組み合わせることで、映り込みの少ない状態でユーザーの撮影ができることを明らかにした。しかしながら、この手法ではユーザーを正面から撮影できていなかった。そこで、反射型偏光板を反射して撮影する光学系を、シースルー型 AIRR 光学系を基に構成し、偏光カメラを用いた撮影結果及び試作装置による実験結果から、空中ディスプレイに目線を向けたユーザーを正面から撮影することができることを示した。本論文においては一般的なカメラを用いた撮影実験を行ったが、Kinect をはじめとしたカメラが他のセンサー類を用いても同様の手法でセンシングが可能であると考えられる。また、本実験では 1 台のカメラで撮影を行ったが、カメラを 2 台用いることで正面からの撮影を行いつつステレオ視によるユーザーの立体映像としての撮影や人の目により近い形での視線一致型ビデオ通話への展望がある。

第4章 ライトフィールドディスプレイと AIRR によるライトフィールド空中像のリアルタイム表示

4.1. はじめに

本章では、ライトフィールドディスプレイと AIRR を組み合わせることで、リアルタイムに立体空中表示ができることを明らかにする。4.2 節では、AIRR を組み合わせることで、従来のライトフィールドディスプレイに必要であった取得映像の処理計算が不要となり、映像の取得と再生の間にある遅延を減らすことができることを示す。4.3 節では、ライトフィールドディスプレイを用いて形成したライトフィールド空中映像の奥行きが正しく表示されることを、試作装置を用いて確認する。4.4 節では、ライトフィールドカメラを用いて撮影したライトフィールドイメージを用いた表示実験を行い、提案手法によって正しい奥行き of ライトフィールド空中映像が運動視差を有して表示されることを確認する。4.5 節では、リアルタイムにライトフィールド映像が空中表示できることを、ライトフィールドカメラを用いたリアルタイム空中投影システムを試作して明らかにする。

4.2. 原理

ライトフィールドカメラは、カメラのレンズと撮像素子の間にマイクロレンズアレイを取り付けることで、光が入射する位置と向きを記録することができるカメラである。図 57 に、ライトフィールドカメラの原理図[75]を示す。撮影対象から向かってくる光は、カメラのレンズを通してマイクロレンズアレイの表面に結像する。この像が、マイクロレンズアレイによって符号化され、撮像素子にライトフィールドデータとして記録される。ライトフィールドデータは光の入射位置と向きを記録していることから、任意の距離にピントを合わせるリフォーカシングや、見たい向きからの画像の再構成が可能である。

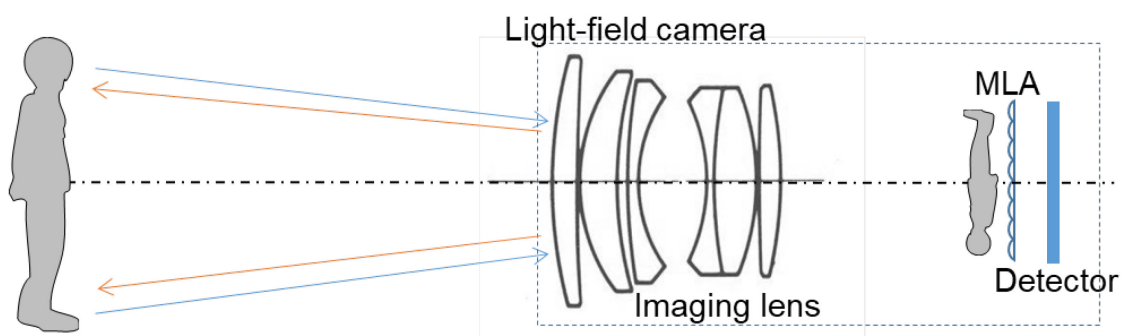


図 57 : ライトフィールドカメラの原理図.

ここで、ライトフィールドカメラを逆にする光学系を考える。カメラの撮像素子をフラットディスプレイに置き換えたならば、ライトフィールドカメラで記録された光線を逆方向に再生できることになる。しかし、このままではスクリーンなしに映像を観測することはできない。そこで、AIRR の系を組み合わせる。図 58 にこの時の原理図を示す。フラットディスプレイとマイクロレンズアレイを合わせてライトフィールドディスプレイと、結像レンズは投影レンズと置き換える。

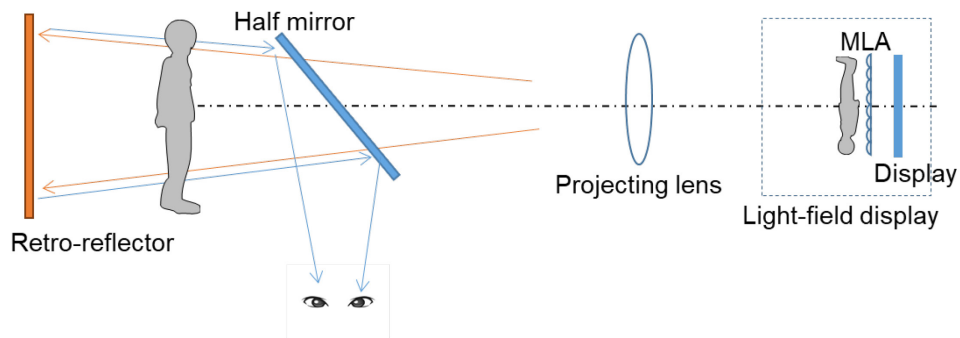


図 58：ライトフィールド映像の空中投影の原理図。

投影レンズから出た光は、ハーフミラーを透過して再帰反射素子に入射する。そして再帰反射してきた方向に折り返す。すると、この時の光の進みは図 57 に示される青色の光と同じになる。つまり、肉眼で観測することが可能である。そして、再帰反射した光はハーフミラーで反射され、ライトフィールドカメラで撮影したときの空間を再現する。

4.3. ライトフィールド空中表示の奥行きの確認

ライトフィールドディスプレイに表示した立体映像の奥行と、投影レンズ通過後および空中投影後の立体映像の奥行を、スクリーンを用いて確認した。ここで、投影レンズにはフレネルレンズを用いている。

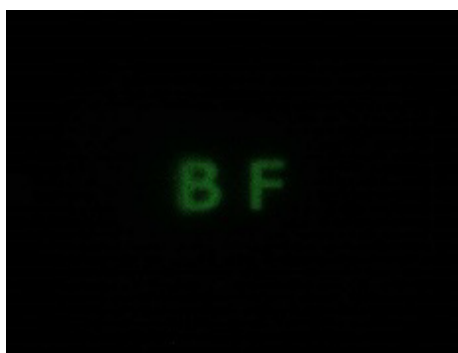
図 59 に、ライトフィールドディスプレイに表示した立体映像を示す。表示は”F”と”B”の 2 文字で、奥行き差は 4cm である。手前に”F”を、奥に”B”を表示している。

図 60 に、投影レンズを通過したあとの投影映像を、スクリーンを用いて観測した結果を示す。投影レンズを通過したことで、”F”と”B”の奥行きが反転していることが確認できた。

図 61 に、空中投影された立体映像に対して、スクリーンを用いて結像位置を確認した結果を示す。AIRR の原理によって、投影像は元の映像（ここでは投影レンズを通過した後の映像）とビームスプリッターで面对称に結像されるはずである。たしかに、奥行きが再度反転され正しい奥行きで”F”と”B”が空中投影されていること確認した。



図 59 : ライトフィールドディスプレイに写した奥行差が 4cm ある F と B の文字
(F が手前に飛び出している).



(a) F にフォーカスを合わせた状態.



(b) B にフォーカスを合わせた状態

図 60 : 投影レンズを透過したあとの投影像をスクリーンに投影して各文字の焦点位置
で観測した結果.



(a) F にフォーカスした状態.

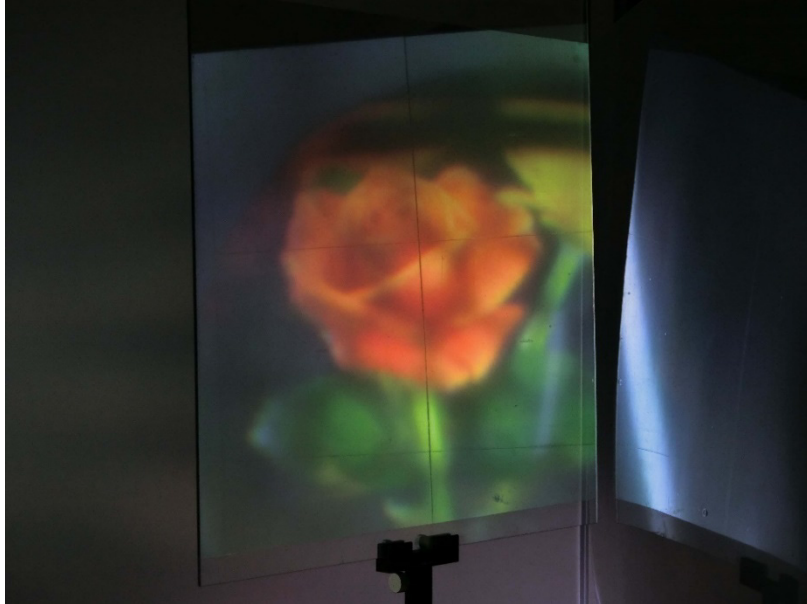


(b) B にフォーカスした状態.

図 61 : 空中投影した映像をスクリーンに投影して各文字の焦点位置で観測した結果.

4.4. ライトフィールドカメラで撮影した映像の空中投影

図 62 に、ライトフィールド映像を空中投影した結果を示す．映像は立体的に投影された．また、正面から見たときと右にずれてみたときで、見え方が変わることも確認できた．これらのことから、ライトフィールド映像の空中立体投影が正しくできていることが確認できた．



(a) 正面から見た場合．



(b) 右に寄った位置から見た場合．

図 62：空中投影したライトフィールド映像の観測結果．

4.5. ライトフィールドカメラを用いたリアルタイム空中表示

図 63 に、ライトフィールド空中映像のリアルタイム空中表示のための実験系の構成図を示す。また、図 64 に実際に実験を行った実験系を示す。投影レンズにはフレネルレンズを用いている。ライトフィールドディスプレイには、ライトフィールドカメラで撮影しているユーザーをリアルタイムに表示した。

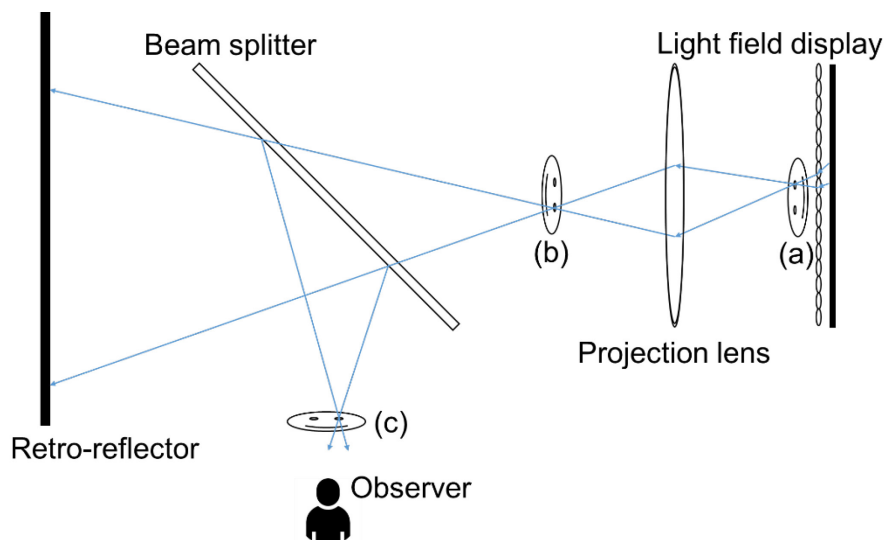


図 63：ライトフィールド空中映像のリアルタイム空中表示のための実験系の構成図。

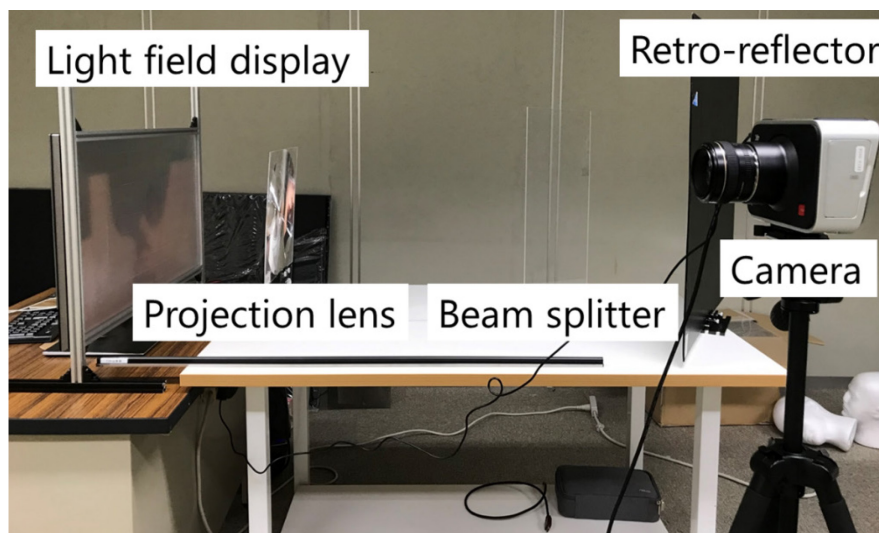


図 64：ライトフィールド空中映像のリアルタイム空中表示のための実験系。

図 65 にライトフィールド空中映像のリアルタイム空中表示の実験結果を示す。映像はリアルタイムに空中投影され、運動視差を有していた。また、投影レンズの位置を変えることで、ライトフィールド空中映像の大きさを変更することもできた。

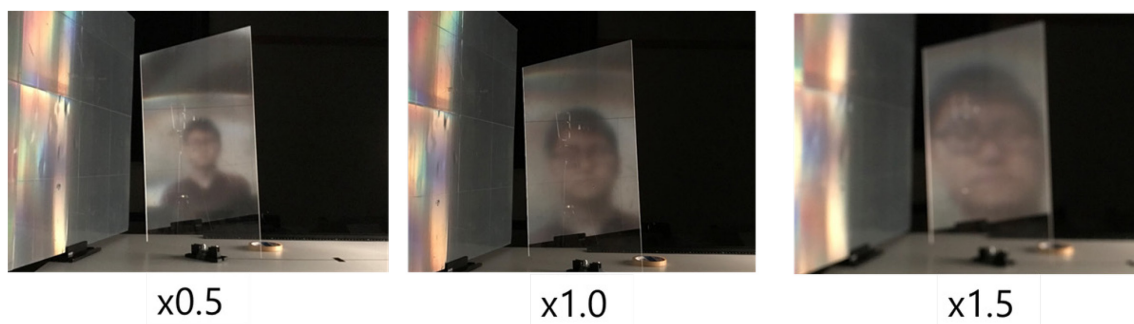


図 65：ライトフィールド空中映像のリアルタイム空中表示の実験結果.

4.6. おわりに

本章では、ライトフィールドディスプレイと AIRR を組み合わせることで、リアルタイムに立体空中表示ができることを明らかにした．AIRR を組み合わせることで、従来のライトフィールドディスプレイに必要であった取得映像の処理計算が不要となり、映像の取得と再生の間にある遅延を減らすことができた．また、試作装置を用いて表示実験を行い、リアルタイムにライトフィールド映像が空中表示できることが示された．しかしながら、本実験に用いたライトフィールドディスプレイのレンズアレイがアクリル樹脂製であったためか、複屈折の影響からか視線一致型で実験を行うことができなかった．視線一致型のビデオ通話システムとライトフィールド空中表示技術を組み合わせることができれば、より対面でのコミュニケーションに近いビデオ通話が可能になることが期待される．最後に、本手法ではライトフィールド空中映像を投影レンズの位置を変えることで拡大縮小が可能であるが、これによる映像の解像度や視野角への影響については解明されていないため、今後定量化を行う必要がある．

第5章 再帰反射素子をスピーカーに用いた AIRR による空中表示

5.1. はじめに

第5章では、再帰反射素子をスピーカーに用いることで、空中像から音が来るように感じられるシステムを提案する。再帰反射素子のほか、ビームスプリッターについてもスピーカー化を検討する。5.2 節では、素子を振動させることによる振動特性を明らかにするために、ビームスプリッターを特定の周波数で振動させたときに、ビームスプリッターに伝わる振動について振幅と周波数の測定実験を行った。5.3 節では、ビームスプリッター及び再帰反射素子のそれぞれに振動スピーカーを取り付けてスピーカー化の検証を行い、空中結像に影響が発生しないことを検証し、素子のスピーカー化が可能なことを明らかにする。5.4 節では、シースルー型 AIRR の光学系において、再帰反射素子に振動スピーカーを取り付けた装置を作成した。

5.2. ピエゾアクチュエーターを用いたビームスプリッターに伝わる振動の測定

振動スピーカーを用いた実験を行う前に、ビームスプリッターを振動させた場合にこれに伝わる振動を、振幅と周波数について測定をおこなった。

5.2.1. 実験方法

実験系を図 66、図 67 に示す。測定は、振動の起点から 0mm,50mm,100mm,150mm の4点とピエゾの振動面で合わせて5点について測定を行った。

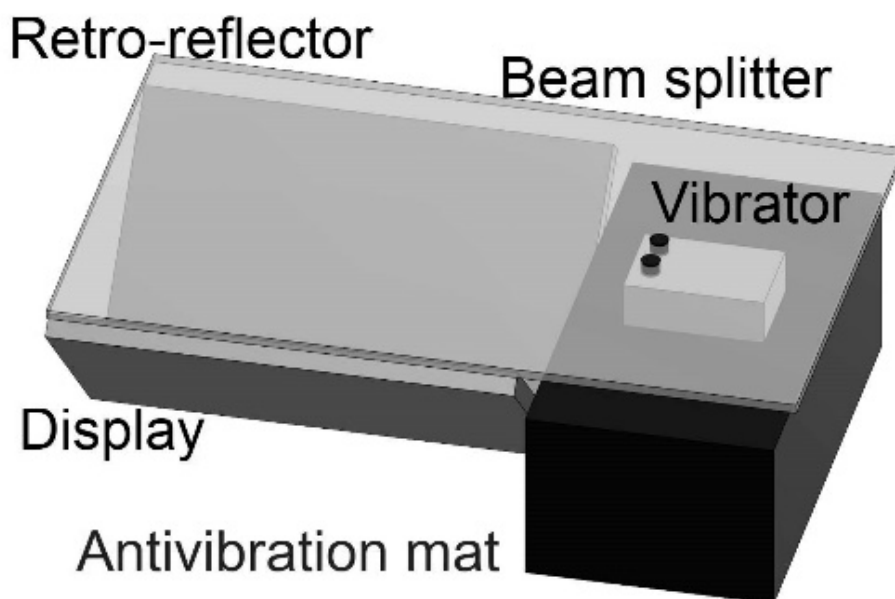


図 66：ビームスプリッターに伝わる振動の測定系の構成図。



図 67：ビームスプリッターに伝わる振動の測定実験系。

5.2.2. 実験結果

表 1 に，ビームスプリッターに伝わる振動の周波数の測定結果を示す。

表 2 に，ビームスプリッターに伝わる振動の振幅の測定結果を示す．ピエゾの特性上，ピエゾに入力した波形と実際の振動出力の振幅，周波数は一致しないため，結果はピエゾの振動面を測定した値と比較する．

表 1 の結果から，ビームスプリッターに伝わる振動の周波数についてはビームスプリッター全体で等しくなっていることが確認された．つまり，ビームスプリッターから発生される音の周波数はほぼ一定でユーザーに伝えられるといえる．

表 2 の結果から，ビームスプリッターに伝わる振動の振幅については，ビームスプリッターに伝わる振動の起点である 0mm の地点で $15.2\mu\text{m}$ の振幅に対して，50mm の地点で $36.0\mu\text{m}$ ，150mm の地点で $56.0\mu\text{m}$ の振幅が測定された．この結果から，ビームスプリッターに伝わる振動の振幅は起点よりの大きくなるため，発生する音は元よりも増幅される可能性を示している．

そして，図 68 にビームスプリッターを振動させているときの空中像の撮影結果を示す．空中像が問題なく形成されていることが確認できる．



図 68：ビームスプリッターが振動しているときの空中像の撮影結果.

表 1：ビームスプリッターに伝わる振動の周波数の測定結果.

Distance of observation point [mm]	Frequency [Hz]			
	1	2	3	Average
Surface of vibrator	29.41	30.30	29.41	29.71
0	28.57	31.25	31.25	30.36
50	30.30	30.30	29.41	30.00
100	29.41	31.25	31.25	30.64
150	30.30	30.30	29.41	30.00
Surface of vibrator	113.6	104.2	111.1	109.63
0	xxx	xxx	xxx	xxx
50	111.1	113.6	108.7	111.13
100	xxx	xxx	xxx	xxx
150	108.7	108.7	111.1	109.50

表 2：ビームスプリッターに伝わる振動の振幅の測定結果.

Distance of observation point [mm]	Amplitude [μm]
Surface of vibrator	37.6
0	15.2
50	36.0
100	12.8
150	56.0
Surface of vibrator	12.8
0	xxx
50	9.60
100	xxx
150	20.8

5.3. 振動スピーカーを用いた AIRR を構成する素子のスピーカー化

5.3.1. 原理

図 69, 図 70 に, AIRR 装置に振動スピーカーを取り付けて音を発生させる場合の構成図を示す. 本章では, ビームスプリッターを振動させる場合と, 再帰反射素子を振動させる場合, さらに再帰反射素子から出た音を閉じ込めないためのスペースを設けた場合の 3 パターンについて実験を行う. 振動スピーカーは, これを取り付けた対象に振動を伝えることで音を発生させるスピーカーである. 今回の系では, ビームスプリッターに取り付けたならビームスプリッターから, 再帰反射素子に取り付けたら再帰反射素子から音が発生するようになる. 振動スピーカーを用いる理由は, スピーカーの設置位置をユーザーから隠せることである. ステレオスピーカーを用いた場合, これは AIRR の内部に設置するには大きいため, AIRR のビームスプリッター上の左右や装置の周囲に設置することになる. この場合, ユーザーは目で見て音がこれらのスピーカーから来ていると認識する. これでは, 空中像から音が出ているという感覚を感じさせることができない. それに対して, 振動スピーカーを用いる系ではスピーカーになっていることを一見して感じさせることなく, 空中像の表示位置のすぐ奥にスピーカーとなる素子を設置することができる.

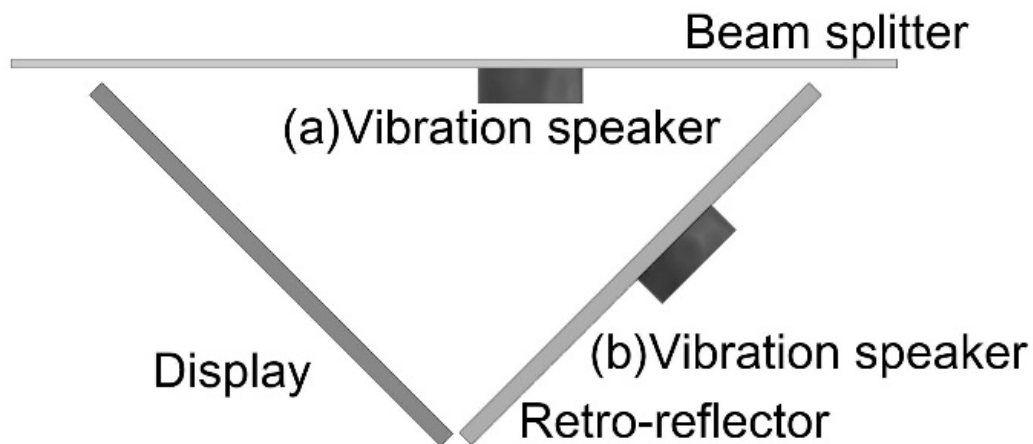


図 69 : AIRR 装置に組み合わせる振動スピーカーを取り付ける位置.

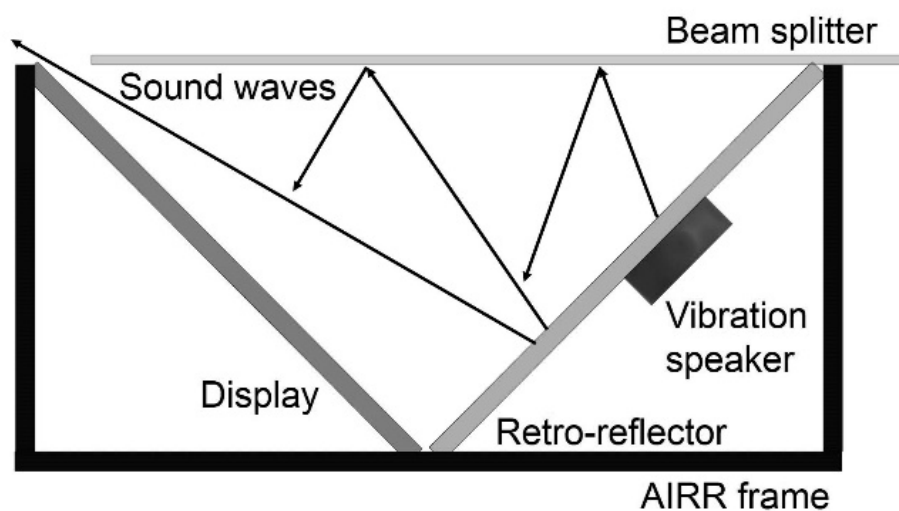


図 70 : 装置内から音が抜けるスペースを設けた系の構成図.

5.3.2. 実験方法

図 69, 図 70 に示した AIRR 装置と振動スピーカーの組み合わせの系を作成し, 実際に発生する音の音波を測定する. 図 71 は, ビームスプリッターに振動スピーカーを取り付けた場合の AIRR 装置である. 図 72 は, 再帰反射素子に振動スピーカーを取り付けた場合の AIRR 装置である. 図 73 は, 装置手前に音が抜けるスペースを設けた AIRR 装置である. 振動スピーカーから出力した音は, 1kHz の正弦波である.



図 71：ビームスプリッターに振動スピーカーを取り付けた場合の AIRR 装置.



図 72：再帰反射素子に振動スピーカーを取り付けた場合の AIRR 装置.



図 73：装置手前に音が抜けるスペースを設けた AIRR 装置.

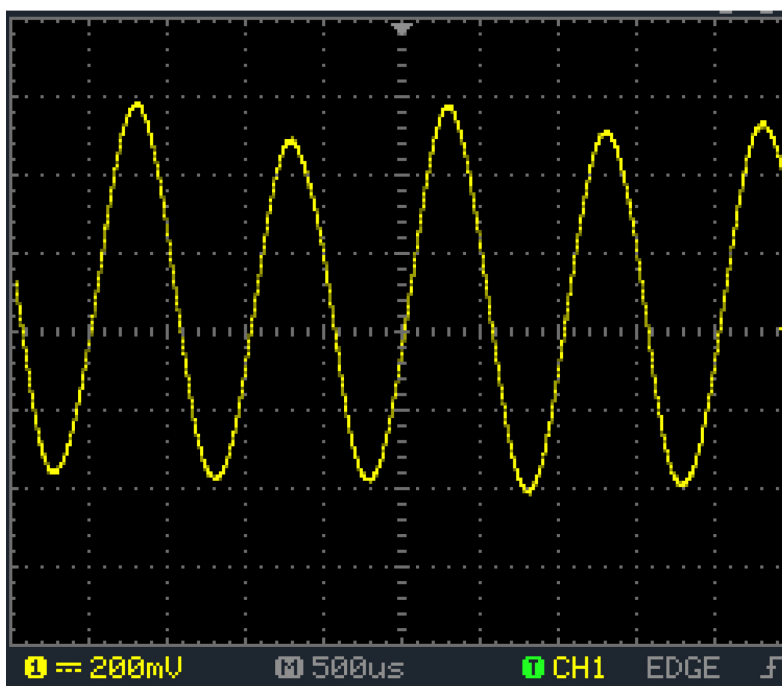
5.3.3. 実験結果

図 74 に、振動スピーカーを取り付けた場合に発生した音の波形の測定結果を示す. 図 74(a)は、振動スピーカーから発生した音の波形である. 今回は、振幅が約 1000mV_p で、周波数が 1kHz の正弦波を入力し、この波形がどのようにそれぞれの取り付け位置で測定されるかを確認した.

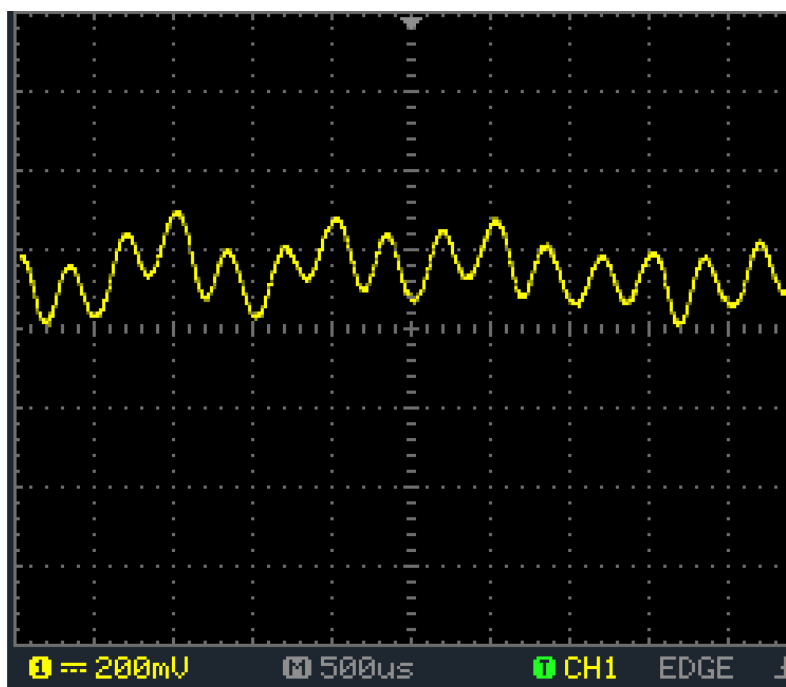
図 74(b)は、ビームスプリッターに取りつけて振動させたときに発生した音の波形である. 振幅は 624mV_{p-p} に減少しており、波形も不安定なものになっている. これは、ビームスプリッターは浮かせておらず、AIRR の装置に乗せていただけのために、自由に振動していたことが 1 つの理由と考えられる. 一方で、周波数は約 1kHz を保っていた.

図 74(c)は、再帰反射素子の裏側に振動スピーカーを取りつけて振動させたときに発生した音の波形である. この時、振幅はさらに減少して約 288mV_{p-p} になった. また、周波数についても不安定になっている. 主な周波数は 950Hz であったが、約 300Hz から 980Hz の間で変化があった. これは、ビームスプリッターが蓋となって音が外に漏れ出てくることを防いでしまっていることに起因しているのではないかと考えられる.

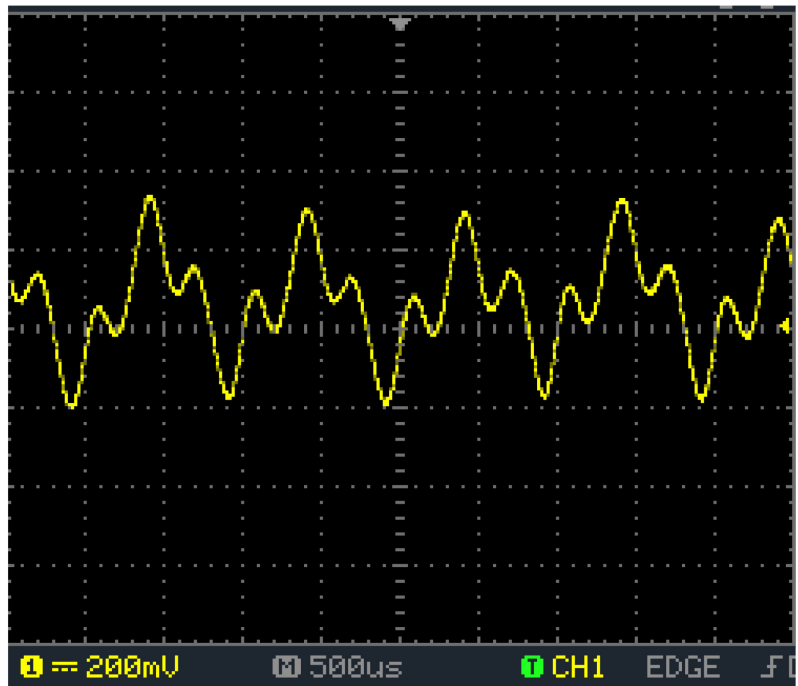
図 74(d)は、装置内から音が抜けるためのスペースを開けた構成で、再帰反射素子の裏側に振動スピーカーを取り付けたときに発生した音の波形である. このとき、振幅は 400mV_{p-p} まで増加した. 周波数については、スペースを開けなかった場合と同じく約 300Hz から 980Hz までの間で変動がみられた. 周波数の不安定性については、装置が箱状であることで、内部で音波が何度も反射されてから出力されるためと考えられる.



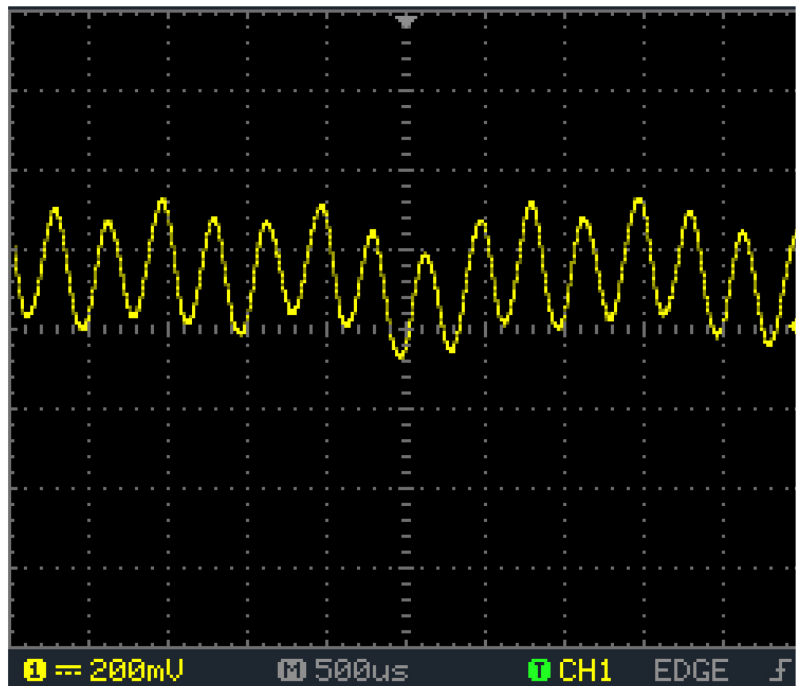
(a) 基準波形（振幅約 1V,
周波数約 1kHz の正弦波）.



(b) ビームスプリッターを振動させたとき.
図 74：発生した音の波形の測定結果.



(c) 再帰反射素子を振動させたとき.



(d) 音が抜けるスペースを設けて再帰反射素子を振動させたとき.

図 74 : 発生した音の波形の測定結果. (続き)

空中結像への影響について、ビームスプリッターをスピーカーとして用いる場合に空中像がぶれてしまうという問題が見つかった。図 75 に、ビームスプリッターの振動による空中像のぶれの原理図を示す。AIRR は、光源の表示をビームスプリッターで面対称の位置に結像する光学系である。ここで、ビームスプリッターに振動スピーカーを取り付けて振動させたとき、一例には図 75 中のビームスプリッター(a)および(b)の位置の往復を繰り返すような状況になる。すると、空中表示はビームスプリッターで面対称系であるから、形成される空中像は空中像(a)と(b)の間を往復することになる。ビームスプリッターをスピーカーとして用いる場合、これを解決することが必要不可欠になる。

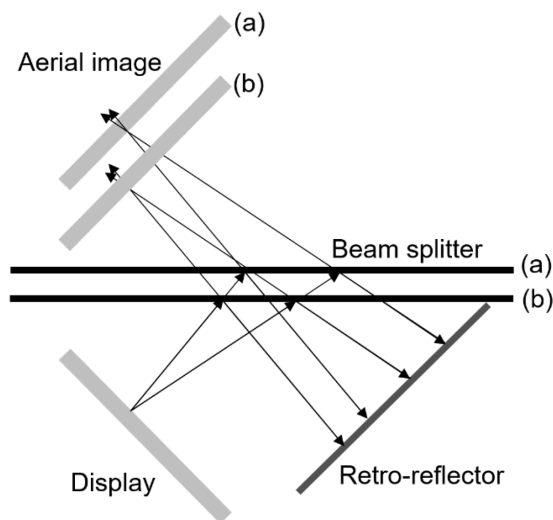


図 75：ビームスプリッターの振動による空中像のぶれの原理図。

5.4. 再帰反射素子をスピーカーに用いた AIRR によるシースルー空中ディスプレイ

AIRR に振動スピーカーを組み合わせた空中像から音が来る空中表示の手法を、シースルー型の AIRR[71]に組み合わせることを提案する。空中表示は、従来の系では装置の正面からしか空中像を見ることができない制限があった。シースルー型の AIRR は、この制限を解消して正面および反対側から空中像を観測することができる。さらに、正面のユーザーの空中像に対するジェスチャーを、反対側のユーザーが空中像とともに観測できるメリットがある。これに振動スピーカーを組み合わせることで、より臨場感のあるシースルー型空中表示インターフェースの実現が期待される。

5.4.1. 原理

再帰反射素子をスピーカーに用いたシースルー空中ディスプレイの原理を図 76 に示す。ディスプレイから出た光のうち、偏光方向が反射型偏光板とクロスニコルの光は、反射型偏光板で反射することで、空中表示の反対側のユーザー(右側)に虚像を見せる。一方で、反射型偏光板と偏光方向が平行ニコルの光は、p-AIRR の原理と同様に空中像を形成して、正面側のユーザー(左側)に実像を見せる。これにより、シースルー空

中ディスプレイとなる。また、再帰反射素子の裏面に振動スピーカーを取り付ける。これにより、再帰反射素子が振動して、音が発せられる。正面側のユーザー（左側）からは、空中像を通してすぐ奥に、反対側のユーザー（右側）からは、虚像の位置のすぐ手前に音源があることで、どちらのユーザーからも空中像および虚像から音が聞こえる空中ディスプレイとなる。

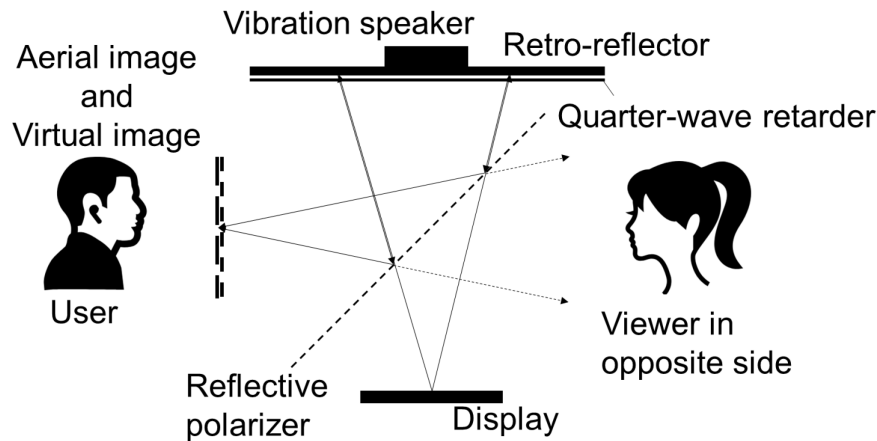


図 76：再帰反射素子をスピーカーに用いたシースルー空中ディスプレイの原理.

5.4.2. 実験結果

図 77 に、実験に用いたシースルー空中ディスプレイのプロトタイプの写真を示す。また、これを用いて空中像を正面側から観察するユーザーを撮影した写真を図 77 に示す。図 78(a)は、ユーザーの視点位置から撮影した写真である。ユーザーは空中像を確認し、2 層の空中表示の F および B の中心位置に指を固定している。図 78(b)は、ユーザーの反対側から撮影した写真である。反対側から、ユーザーが固定している指と虚像の表示がはっきりと見えた。図 78(c)は、ユーザーを右側面から撮影した写真である。ユーザーの指の位置から、空中像の深さ方向が認識できていることがわかった。

また、再帰反射素子を振動させてスピーカーとして活用した結果、これが音源として機能し、発生した音を聞き取ることができた。また、再帰反射素子が振動することによって、空中像の表示に乱れが発生することはなかった。

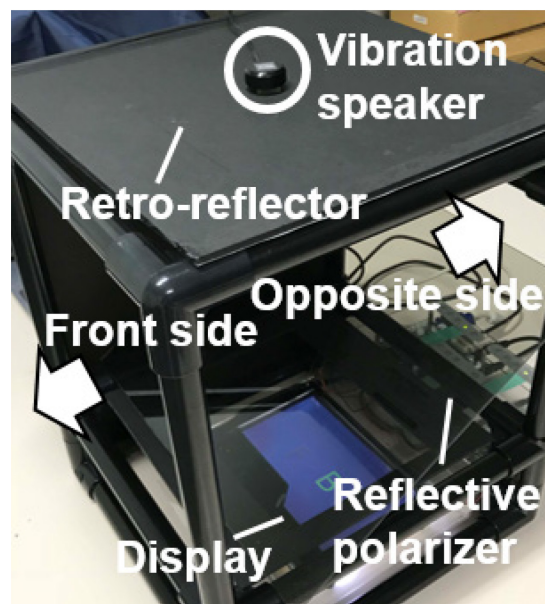
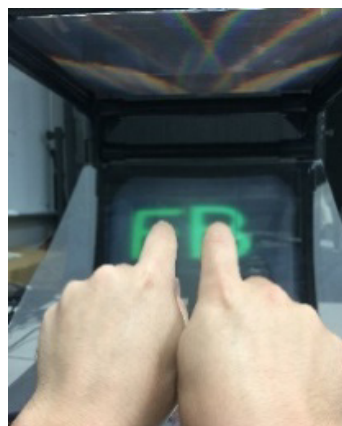
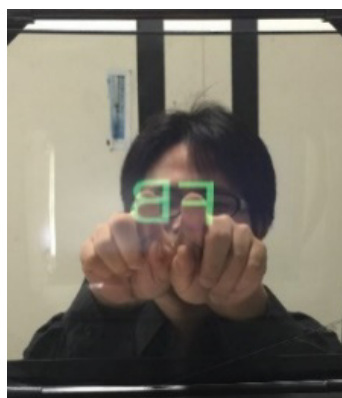


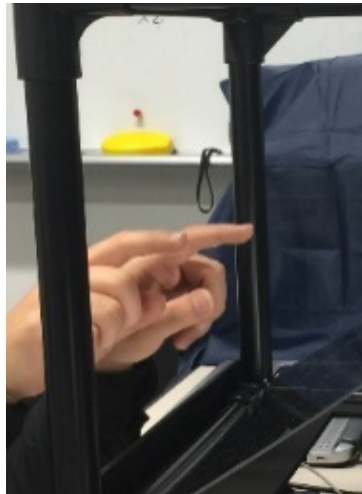
図 77：再帰反射素子をスピーカーに用いたシースルー空中ディスプレイ.



(a) 正面.



(b) 反対側.



(c) 右側面.

図 78：空中像にジェスチャーしているユーザーの3方向からの撮影結果.

5.5. おわりに

本章では、再帰反射素子をスピーカーに用いることで、空中像から音が来るように感じられるシステムを提案した. 本手法は AIRR を構成する素子をスピーカー化することで実現が可能のため、音以外の感覚を組み合わせるための他のマルチモーダル化手法との組み合わせが容易な手法である. しかしながら、本論文ではこの手法を用いることによって、空中像から音がなっているように感じられる効果について、被験者を用いた評価実験によって明らかにしていない. 本手法の有用性を示すために、今後被験者実験を行うことは必須である. また、本手法の課題点として、振動スピーカーが張り付ける面(再帰反射素子を固定するために用いるベース)の材質によって音質が変化することが挙げられる. また、張り付けた素子の固定の仕方によっても音質の変化が懸念される. よって、張り付ける面の材質及び固定方法については、現在の研究で主に用いているものについて実験を行い、音質への影響と最適な手法を明らかにすることが求められる.

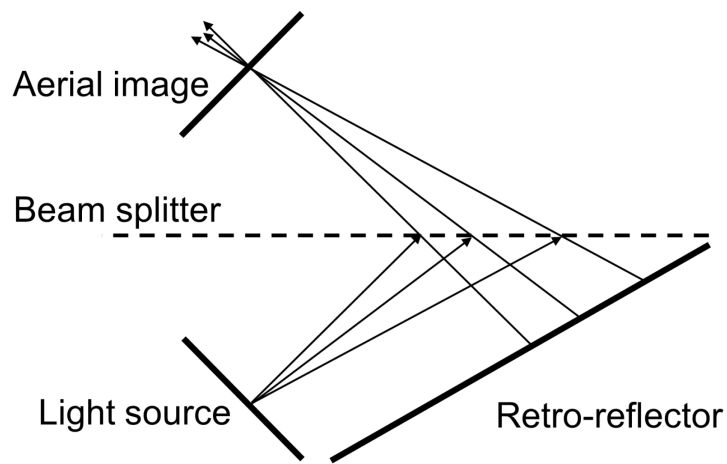
第6章 透過光を屈折する透明物体を組み合わせた空中結像

6.1. はじめに

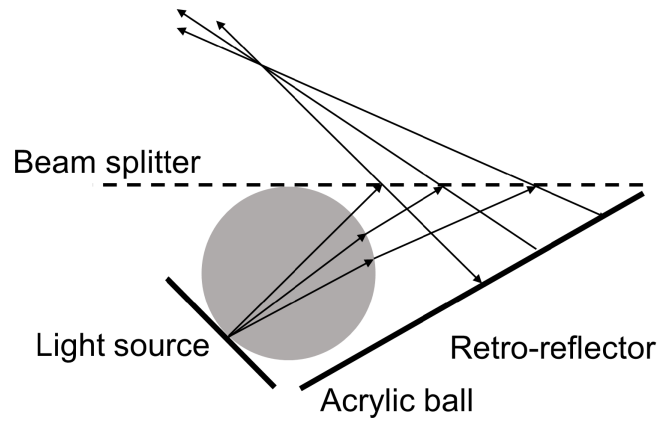
本章では、透過光を屈折する透明物体を組み合わせた空中結像手法について述べる。AIRR による空中映像は、実物体が光路上に配置されたときに視認ができない。実物体が空中結像の光路をさえぎるような状態でも空中映像を提示することができることを明らかにすれば、実物体と空中映像を組み合わせた新たな情報提示の実現につながることを期待できる。6.2 節では、透明物体を面对称に配置することによって空中結像が可能である原理を示す。6.3 節では、透明球を用いた AIRR による原理検証実験を行う。光線追跡シミュレーション結果、試作装置を用いた空中結像結果、空中像の輝度の測定結果を述べる。6.4 節では、球以外の形状の透明物体を用いた空中結像実験について述べる。

6.2. 原理

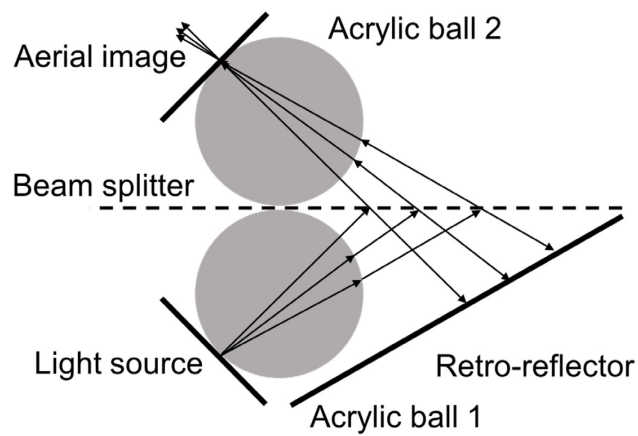
AIRR に透明球を用いた空中結像光学系の構成を図 79 に示す。提案手法はビームスプリッターで面对称に透明物体が配置されていれば空中結像が可能であるが、ここでは原理の述べやすさのために球体を面对称に配置する。図 79(a) は従来手法による AIRR の構成図である。光源、再帰反射素子、ビームスプリッターからなり、光源を出た光がビームスプリッターで反射光と透過光に分かれる。反射光が再帰反射素子で再帰反射し、ビームスプリッターで透過した光がビームスプリッターに対して光源と面对称の位置に結像する。よって空中像が形成される。図 79(b) は、光源とビームスプリッターの間に透明球を設置した図である。光源を出た光は、この透明球を出入りするときに屈折するため、再帰反射後に面对称の位置には集束しない。よって、空中像は結像されない。図 79(c) は、空中像を復号するために、ビームスプリッターに対して掩蔽用透明球と面对称の位置に復号用の透明球を設置した構成である。光源からの光は、装置内部では図 79(b) と同様に進む。ビームスプリッターを透過後、面对称位置に設置された復号用透明球を通過する。この光は再帰反射した光であるから、掩蔽用透明球と反対の屈折をすることとなり、空中像を結像する。



(a) 従来の空中結像光学系.



(b) 透明球を 1 つ組み合わせた光学系.



(c) 透明球を 2 つ組み合わせた光学系.

図 79 : 透明球を組み合わせた再帰反射による空中結像の原理.

6.3. 透明球を組み合わせた AIRR による空中結像

6.3.1. 光線追跡シミュレーション

6.3.1.1. 実験方法

光線追跡シミュレーションソフトを用いて、透明球を通して空中結像する光線の光路、再帰反射素子に入射する光の照度分布、空中結像する光の照度分布の3つのシミュレーションを行った。シミュレーションモデルの各素子のサイズを図 80 に示す。レイトレーシングは Light Tools 9.0.0 を用いて行った。面光源は 50mm 四方の正方形であり、ビームスプリッターに対して 45 度の角度で配置されている。面光源の指向性(ライトツールズ上ではターゲット球と呼ぶ)は 45 度である。透明球 1 と面光源は、面光源の中心で接している。再帰反射素子は 110mm 四方の大きさであり、本シミュレーションでは広がり角がなく減衰もない入射方向に 100% 反射する再帰反射を行う。ビームスプリッターは 200mm 四方の十分な大きさとした。ハーフミラーの特性を有している。2 つの透明球は直径 70mm のアクリル材質であり、ビームスプリッターで面对称に配置されている。

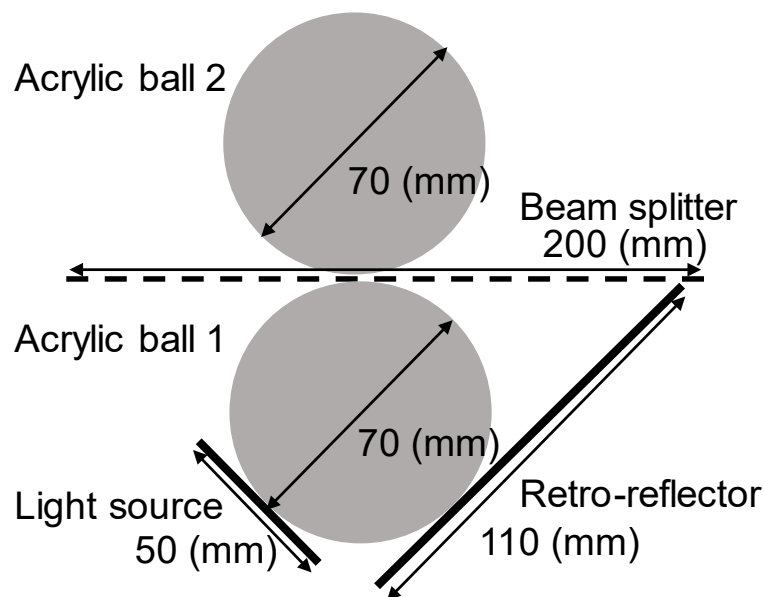


図 80：シミュレーションモデルの各素子のサイズ。

6.3.1.2. 実験結果

図 81 に、従来の AIRR 光学系における光路のシミュレーション結果を示す。また、図 82 に透明球を組み合わせた AIRR における光路のシミュレーション結果を示す。2 つの結果を比較すると、透明球を用いることにより光源からの光の発散が抑えられ、光のロスが低減されている可能性が示されている。また、光源下部から発せられた光は、2 つの透明球のみの屈折によって迷光となっていることが確認された。

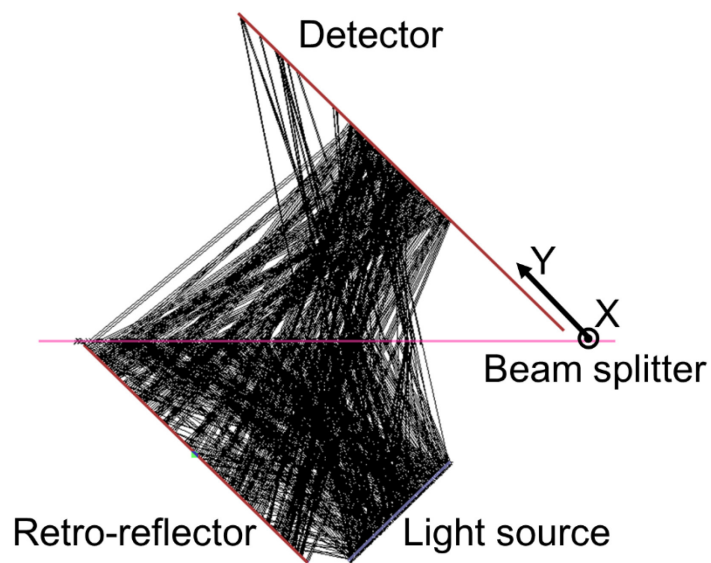


図 81：従来の AIRR 光学系における光線の光路.

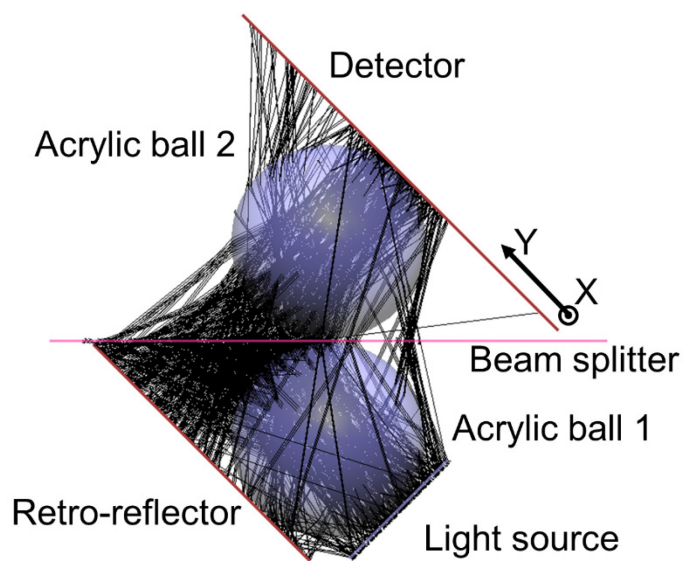


図 82：透明球を組み合わせた AIRR における光線の光路.

図 83 に、透明球を組み合わせた AIRR における再帰反射素子に入射する光の照度分布のシミュレーション結果を示す．照度分布から、透明球を用いることによって光線の発散が抑えられ、光線のロスが低減されていることが示された．この結果から、透明球を用いることによって、必要な範囲に限って再帰反射素子の面積を削減することが可能であることがわかった．

図 84 に、透明球を組み合わせた AIRR における空中結像する光の照度分布のシミュレーション結果を示す．従来手法の AIRR では面光源と同じ大きさの空中像がきれいに

矩形で形成されていた。一方で、透明球を用いた場合は透明球の中心付近で照度が従来手法に比べて高くなっていることが確認された。これは、透明球を用いることによって光のロスが低減されていることに起因すると考えられる。

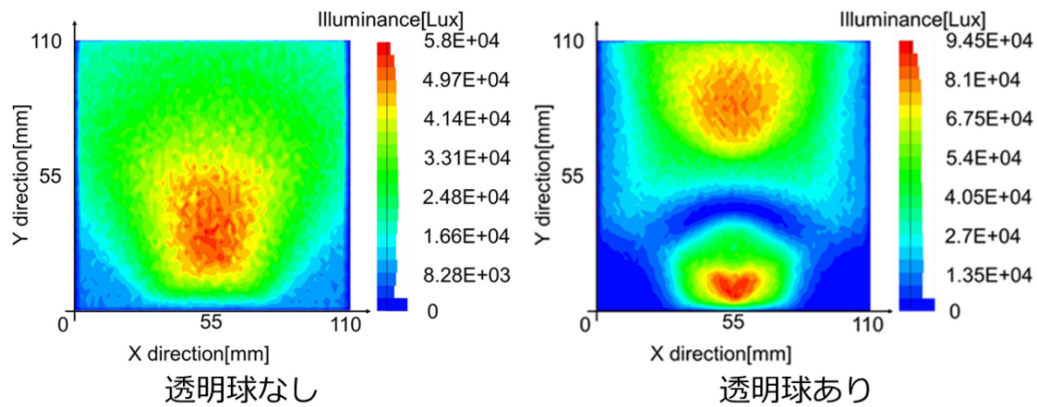


図 83：透明球を組み合わせた AIRR における再帰反射素子に入射する光の照度分布.

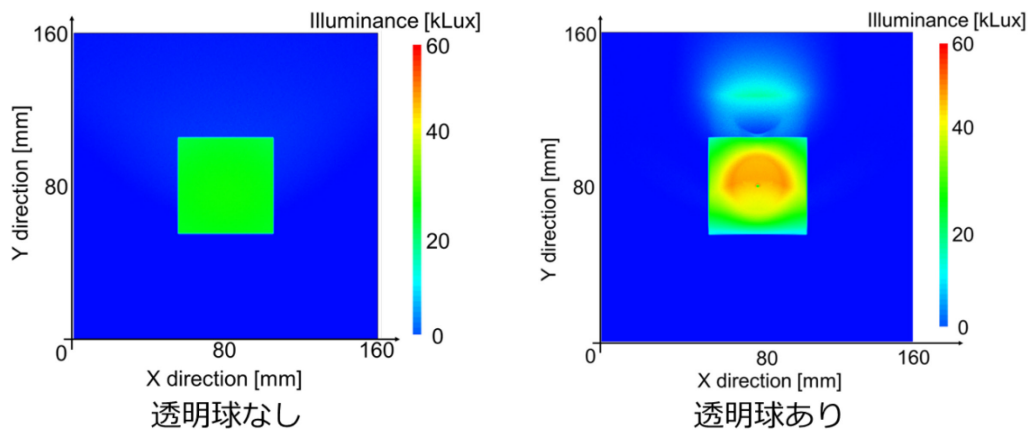
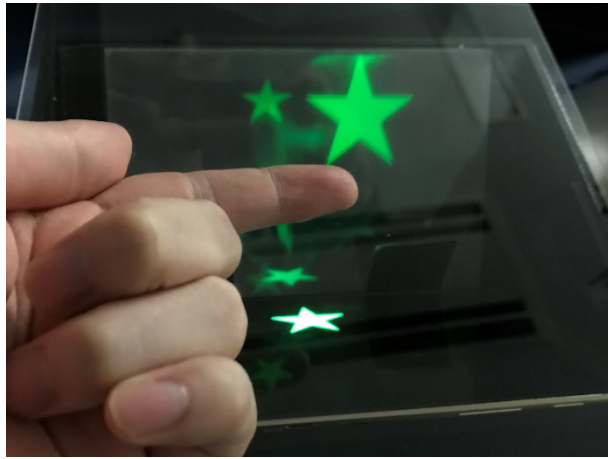


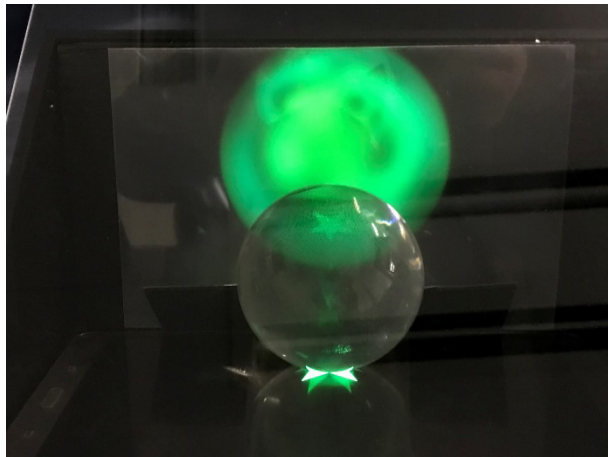
図 84：透明球を組み合わせた AIRR における空中結像する光の照度分布

6.3.2. 試作装置を用いた空中結像

初めに、図 85 に透明球を用いた試作装置による空中表示実験の結果を示す。装置構成は図 79 に示した原理と同じ構成である。従来の AIRR 構成にて星型の空中像が形成され、透明球を 1 つ組み合わせることで星型の空中像が見えなくなり、2 つの透明球を組み合わせることで元の星型の空中像が再形成されることを確認した。よって、透明物体を AIRR の光路上にビームスプリッターで面对称に配置することで、透明物体による屈折の影響を打ち消して空中結像が可能ながことが明らかになった。



(a) 従来の空中結像光学系.



(b) 透明球を1つ組み合わせた光学系.



(c) 透明球を2つ組み合わせた光学系.

図 85 : 透明球を用いた試作装置による空中表示の結果.

次に、図 83 のシミュレーション結果を基に、削減した再帰反射素子を用いて空中結像を行った。再帰反射素子は、図 86 に示すように削減した。

図 87 は透明球を用いず、削減した再帰反射素子で空中結像を行った結果である。再帰反射素子の中ほどで途切れているために、その視点では空中像が途切れてしまっていることがわかる。また、再帰反射素子のサイズが小さいため、視野角が狭くなっていた。

図 88 は、削減した再帰反射素子を用いて明球を組み合わせた空中結像の結果である。透明球を用いない結果と比べたとき、再帰反射素子の途切れによって空中像が途切れていた視点からでも空中像が途切れずに観測された。また、視野角についても大きく向上していることが確認できた。よって、透明球を組み合わせることで、従来手法に比べて視野角の確保に必要な再帰反射素子を大きく削減できることが明らかになった。

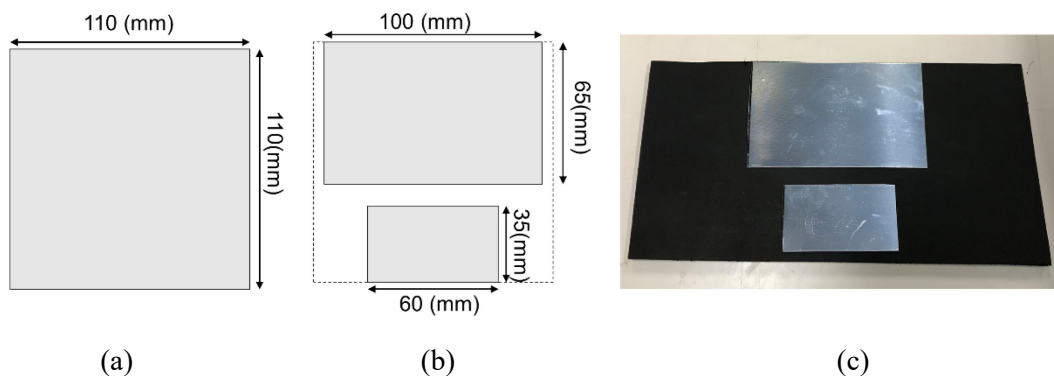


図 86：削減した再帰反射素子の設計。

(a)削減前の構成、(b)削減後の構成、(c)実際に実験に用いた再帰反射素子。

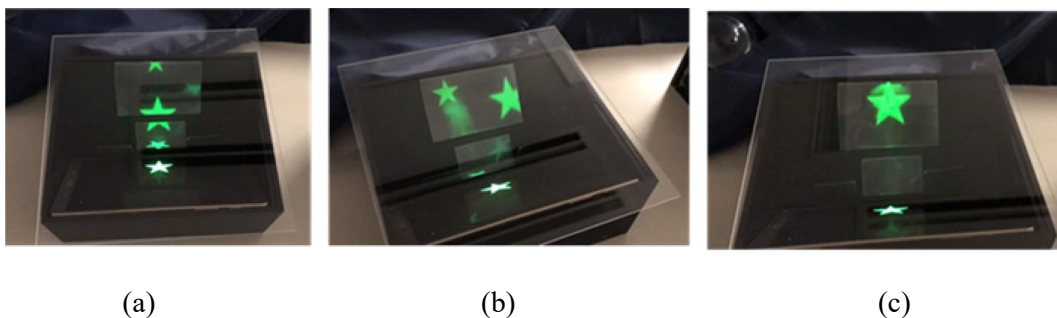


図 87：削減した再帰反射素子を用いた空中結像。

(a) 正面、(b)斜め左横方向、(c)わずかに下げた視点での観測結果。

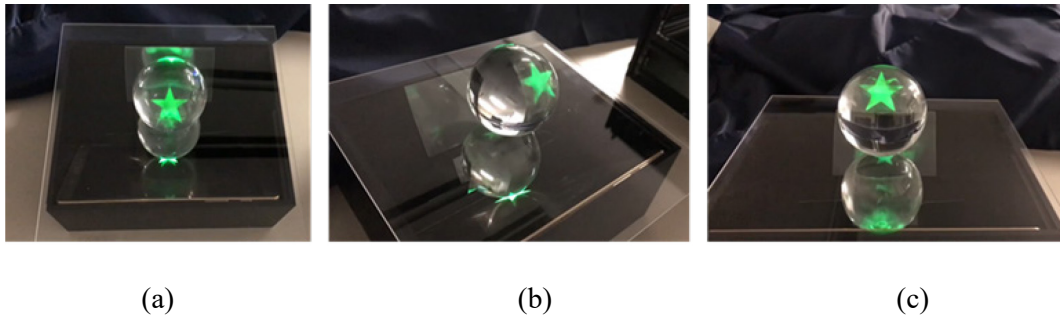


図 88：削減した再帰反射素子を用いた透明球を組み合わせた空中結像。
(a) 正面，(b)斜め左横方向，(c)わずかに下げた視点での観測結果。

6.3.3. 空中像の輝度測定

6.3.3.1. 実験方法

透明球を用いた空中結像にて，シミュレーションにて照度が向上している結果が得られたことから，空中像の輝度が向上している可能性があるため，輝度系を用いて輝度の計測を行った．図 89 に，透明球を用いた AIRR によって形成される空中像の輝度の測定実験の構成図を示す．図 90 は，撮影実験を行った実験系の全体写真であり，図 91 は空中結像部分の素子の配置の写真である．光源には iPad Pro (12.9 inch)を用いた．画面上には幅 10mm の白黒の縞模様を表示し，縦縞と横縞それぞれについて測定を行った．輝度計は ProMetric Y-29 を用いた．アクリル球の直径はシミュレーションと同様に 70mm である．ビームスプリッターはアクリル製の板であり，200mm の正方形である．再帰反射素子は，180mm 四方の大きさの日本カーバイド工業製の RF-Ax を用いた．再帰反射素子の表面反射による映り込みを防止するため，わずかに傾けて配置した．

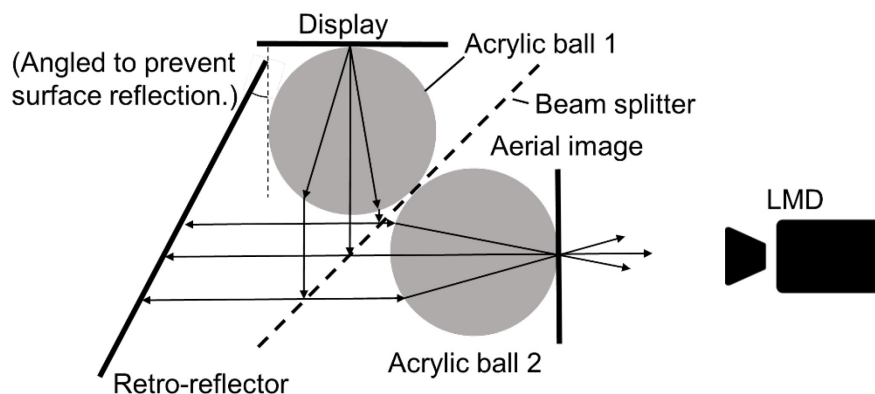


図 89：透明球を組み合わせた空中結像による空中像の輝度の測定実験系。

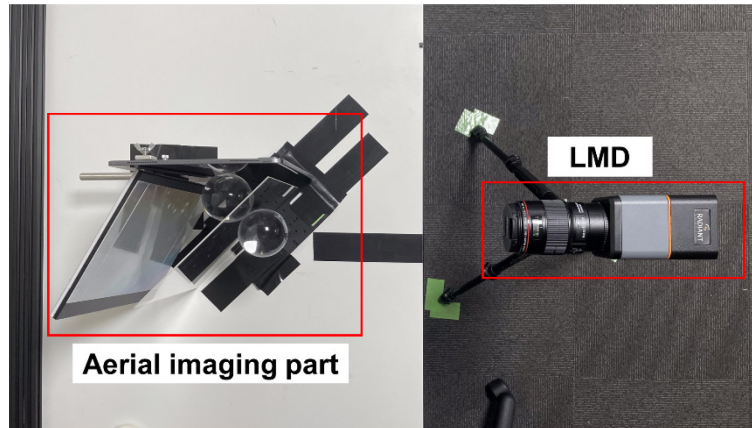


図 90：透明球を組み合わせた空中結像による空中像の輝度の測定実験系の全体図.

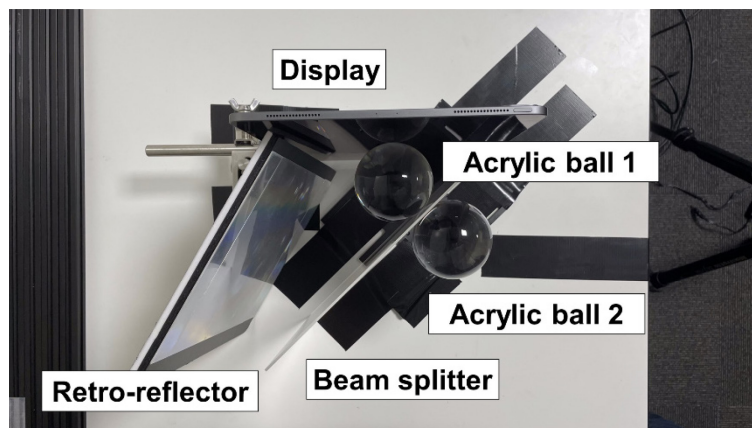


図 91：透明球を組み合わせた空中結像による空中像の輝度の測定実験の空中結像部分の拡大写真.

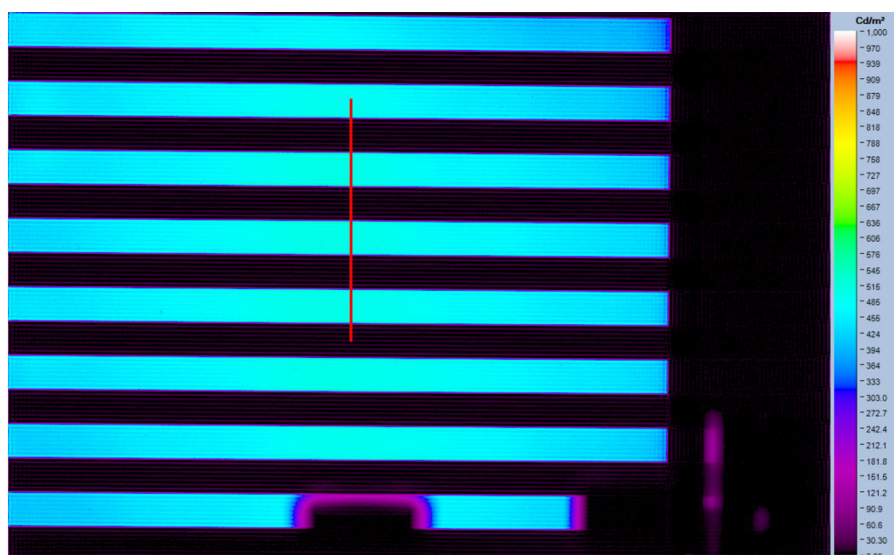
6.3.3.2. 実験結果

図 92 に、実験に使用したディスプレイの輝度の測定結果を示す．また、図 93 は、図 92 中の赤線で示した断面での輝度の変化のグラフである．これらの結果から、ディスプレイの白色輝度は 500cd/m^2 、黒色輝度は 1cd/m^2 であることが分かった．

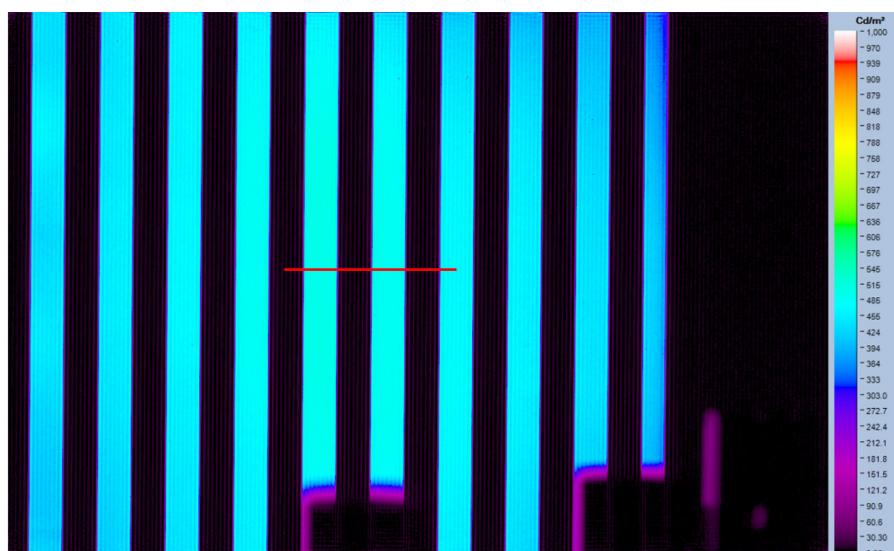
図 94 は、ディスプレイに横縞を表示したときの、透明球を設置パターンごとでの空中像の輝度の測定結果である．また、図 95 は図 94 中の赤線断面における輝度の変化のグラフである．アクリル球がない場合、空中像の白色部分の輝度は約 20cd/m^2 であった．これに対し、アクリル球を 2 つ組み合わせた場合、空中像の白色部分の輝度は中心付近で約 20cd/m^2 であったが、中心部分から離れた位置では 14cd/m^2 に減少していた．この結果は、図 84 で示したシミュレーション結果における空中結像時の照度分布と同様の傾向であるが、輝度が向上している結果は得られなかった．

図 96 は、ディスプレイに縦縞を表示したときの、透明球を設置パターンごとでの空中像の輝度の測定結果である．また、図 97 は、図 96 中の赤線断面における輝度の変化のグラフである．この場合も、アクリル球がない場合の空中像の白色輝度は約 20cd/m^2

であった。これに対し、アクリル球が2つある場合のアクリル球の中心から約10mm離れた位置での空中像の白色輝度は約16cd/m²であった。ここで、図94(b)中の輝度の低い白色部分は半径約20cm離れた位置であったことから、輝度が中心点から離れるにつれて徐々に低下していることが示された。

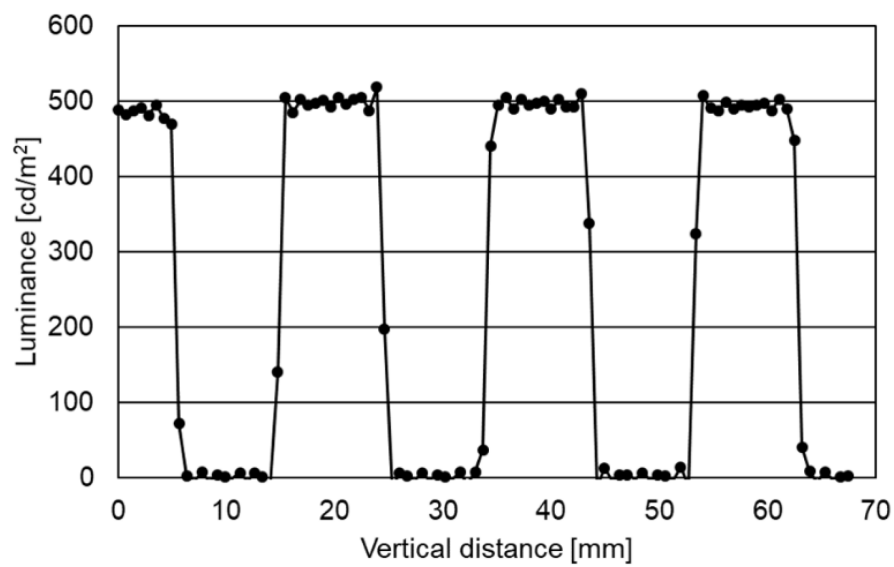


(a)

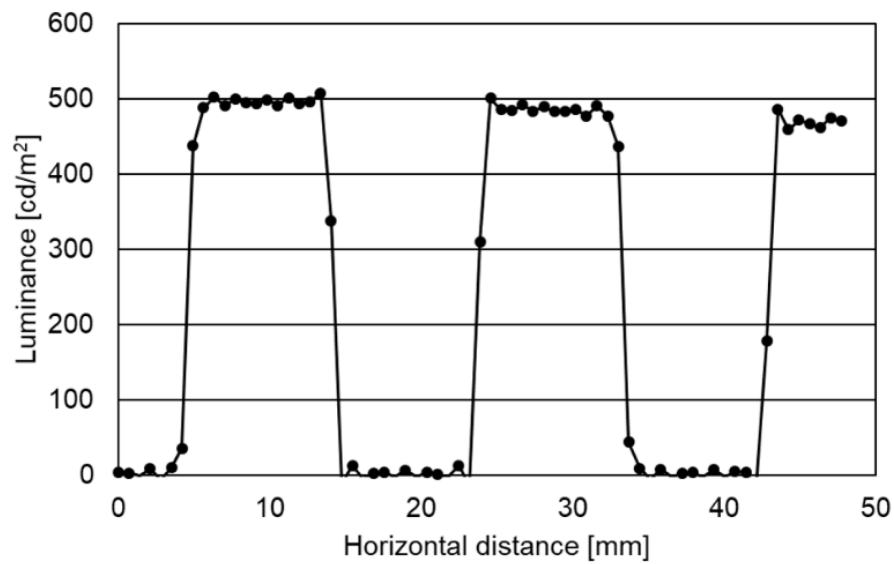


(b)

図 92 : ディスプレイの輝度の測定結果. (a) 横縞模様, (b) 縦縞模様.

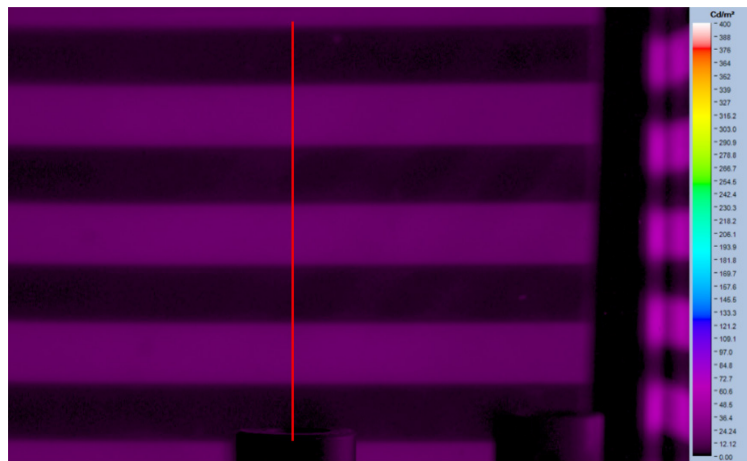


(a)

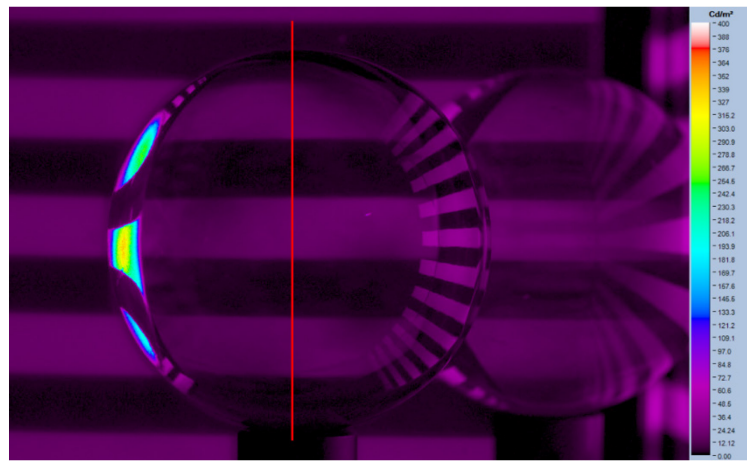


(b)

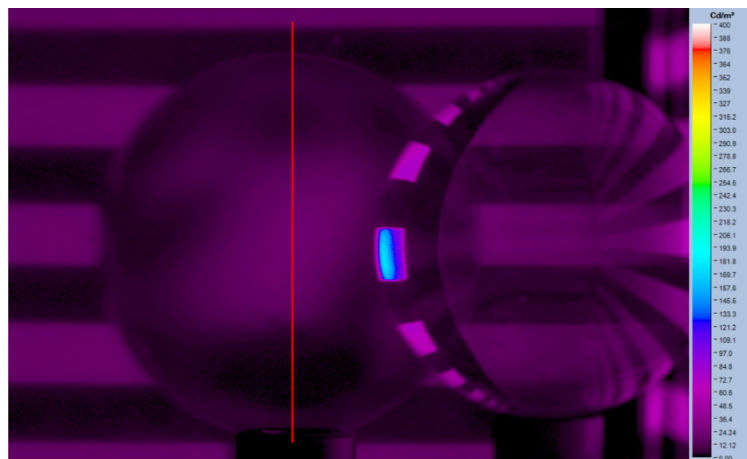
図 93：赤線断面(図 92 中)での輝度変化. (a) 横縞模様, (b) 縦縞模様



(a)



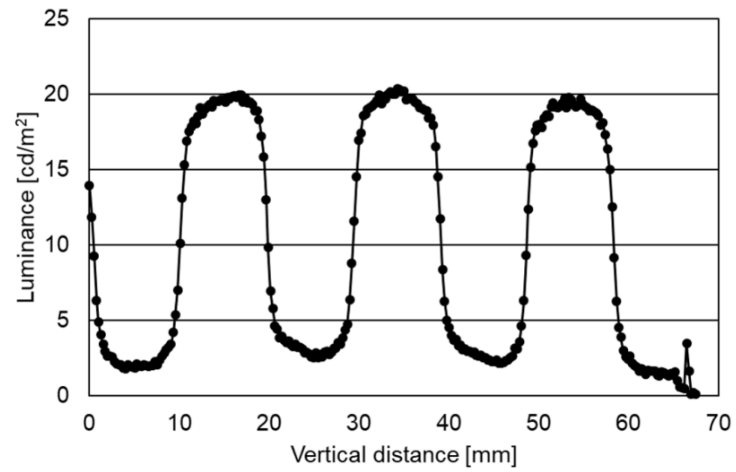
(b)



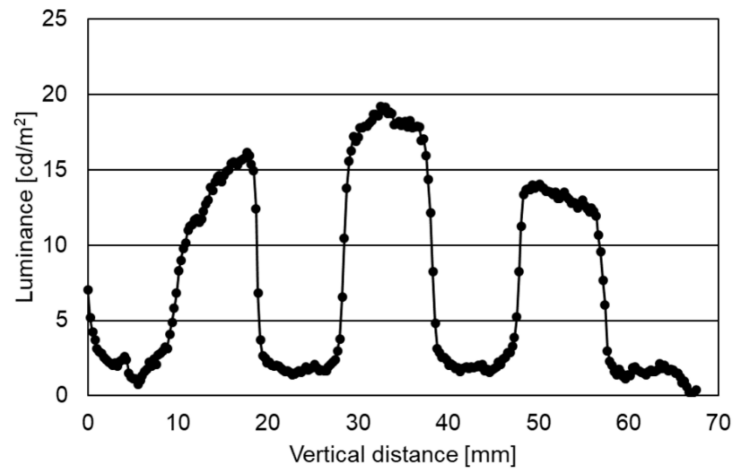
(c)

図 94 : 横縞模様を表示したときの透明球を組み合わせた空中像の輝度の撮影結果。

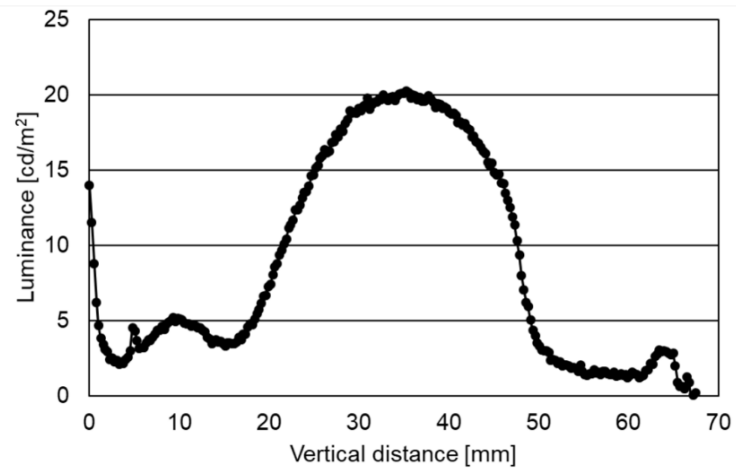
(a) 透明球無し, (b) 透明球 2 つ, (c) 透明球 1 つ。



(a)



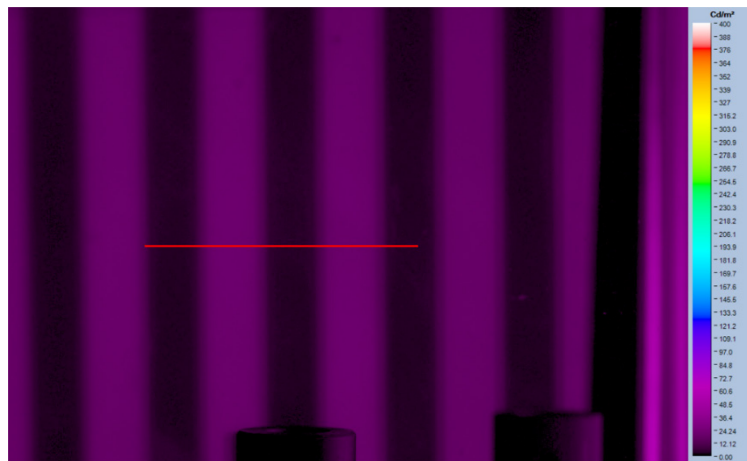
(b)



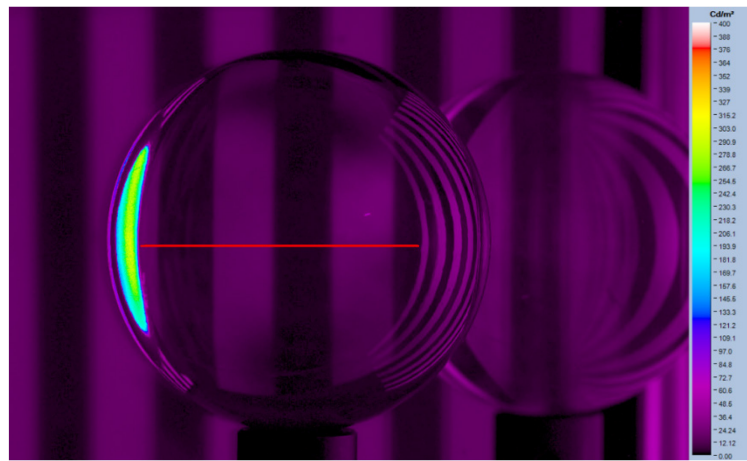
(c)

図 95 : 赤線断面(図 94 中)での輝度変化.

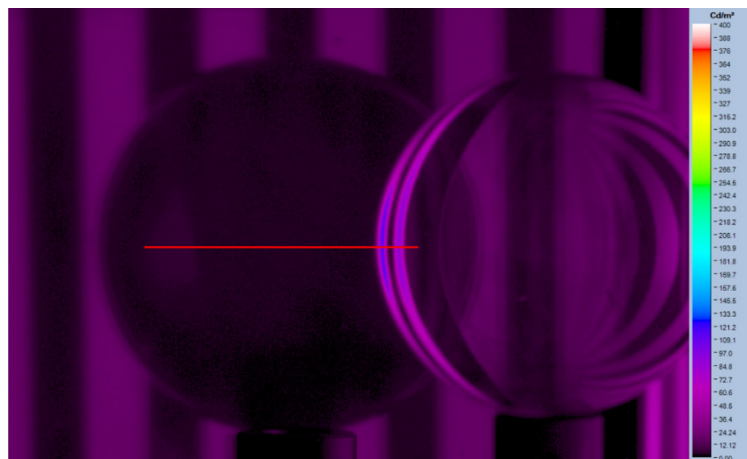
(a) 透明球無し, (b) 透明球 2 つ, (c) 透明球 1 つ.



(a)



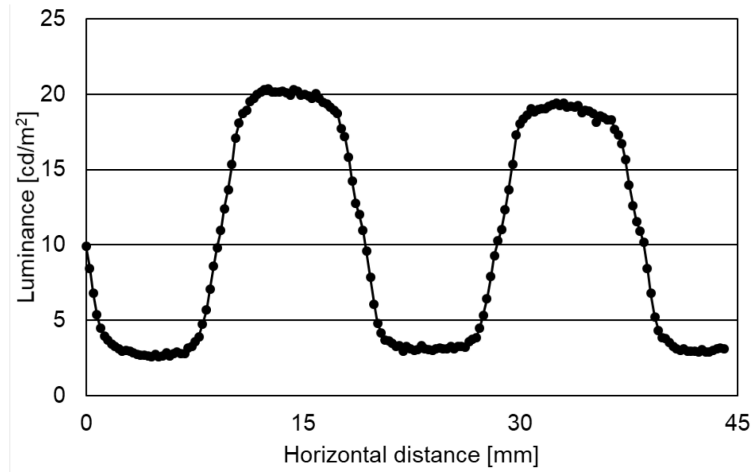
(b)



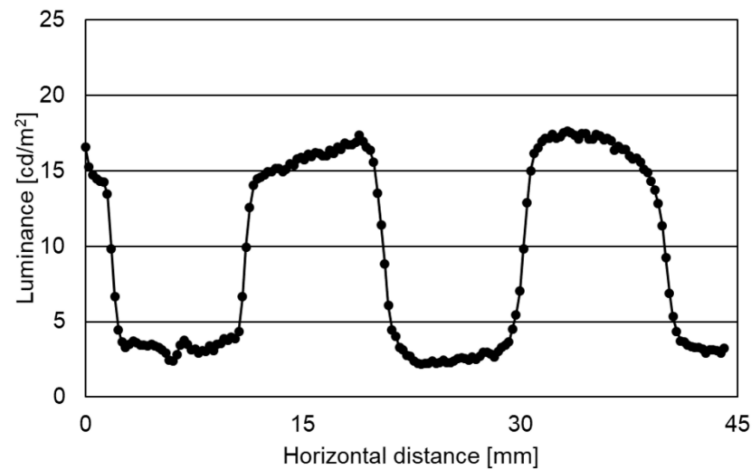
(c)

図 96：縦縞模様を表示したときの透明球を組み合わせた空中像の輝度の撮影結果。

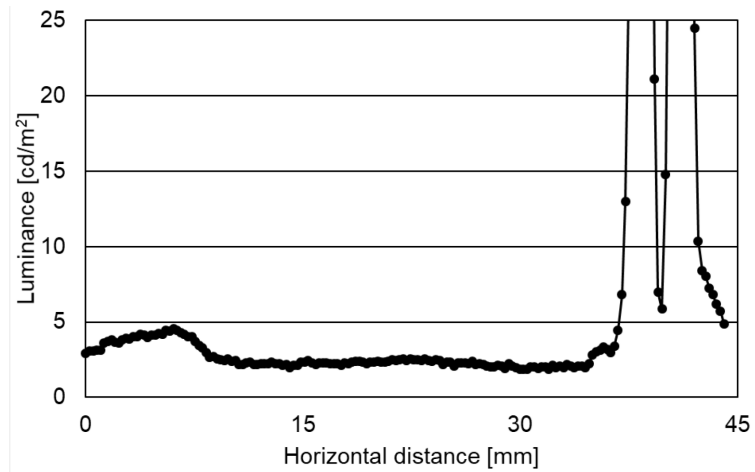
(a) 透明球無し, (b) 透明球 2 つ, (c) 透明球 1 つ。



(a)



(b)



(c)

図 97 : 赤線断面(図 96 中)での輝度変化.

(a) 透明球無し, (b) 透明球 2 つ, (c) 透明球 1 つ.

6.4. 球以外の形状の透明物体を用いた空中結像

6.3 節では、原理検証のため透明球を用いた光学系で結像実験を行い、透明球を面対称に配置することで空中結像が可能なことを明らかにした。6.4 節では、球以外の形状を用いて面対称光学系による空中結像が可能であることを明らかにした。

6.4.1. 実験方法

図 98 に実験構成を示す。空中結像は、光源と物体が離れている場合と光源と物体が接触している場合の 2 つの構成で行った。光源の映した映像は幅約 30mm で、数字の 20 を表示している。このセットアップにて、空中映像の浮遊距離は 200mm である。実験に使用した透明物体の写真を図 99 に示す。4 種類の物体を用いており、光を十分に屈折させるため実験時は水で満たしている。物体の形状はそれぞれ、幅約 60mm で角が丸みを帯びている直方体のボトル、直径約 85mm のガラス筒、幅約 60mm の飲料のペットボトル、最も幅広い部分が直径約 60mm の花瓶である。

図 100 から図 104 に、それぞれの透明物体を用いた実験系の写真を示す。ここで、図 99 (a) に示した角柱のボトルについては、角を光源に向けた配置と平らな面を光源に向けた配置の 2 パターンについて実験を行った。

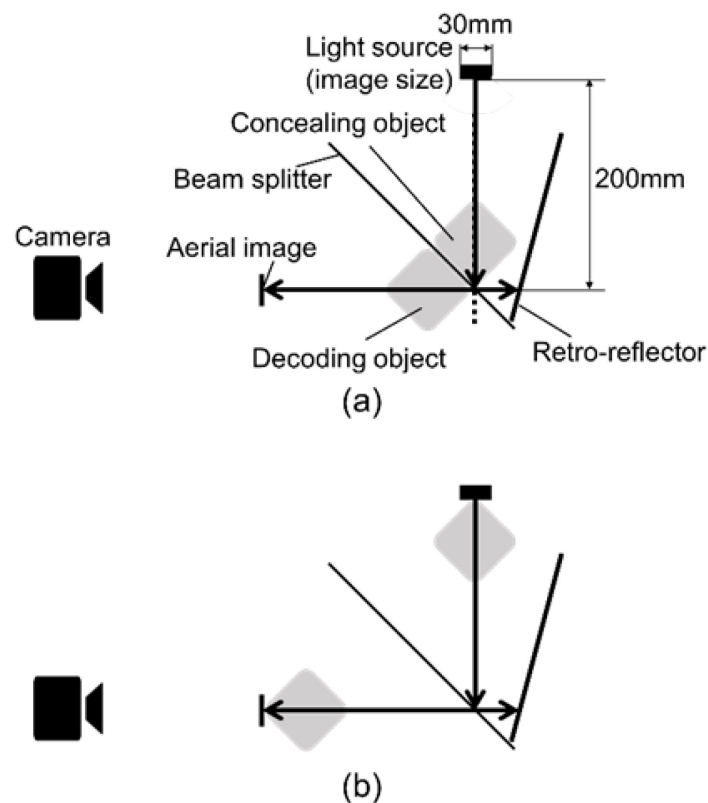


図 98：様々な形の透明物体を用いた空中結像実験の構成。

(a) 光源と物体が離れている構成，(b)光源と物体が接触している構成。

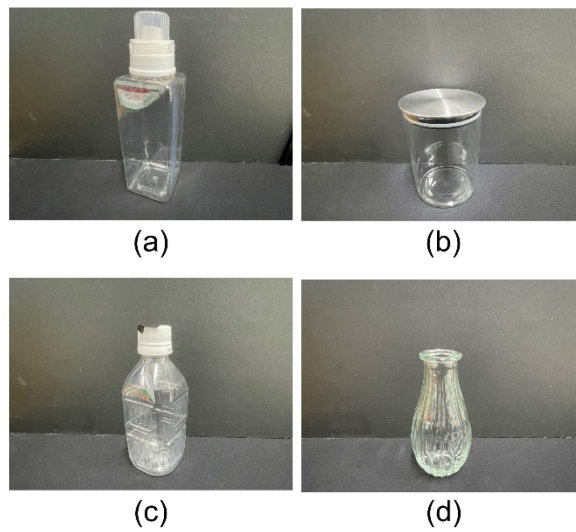


図 99：実験に使用した透明物体.

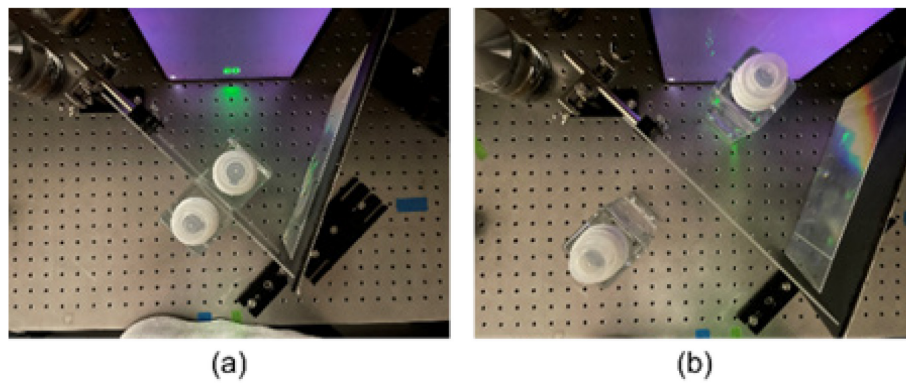


図 100：角柱ボトルの角を光源に向けた配置での結像実験系.

(a) 光源と物体が離れている配置, (b) 光源と物体が接触している配置.

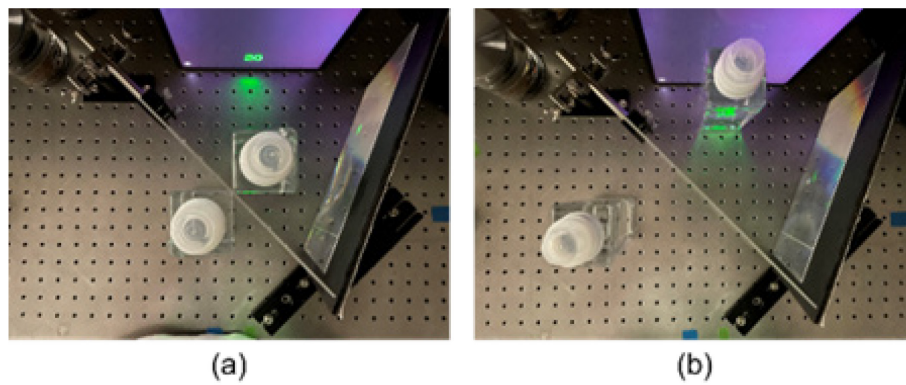


図 101：角柱ボトルの辺を光源に向けた配置での結像実験系.

(a) 光源と物体が離れている配置, (b) 光源と物体が接触している配置.

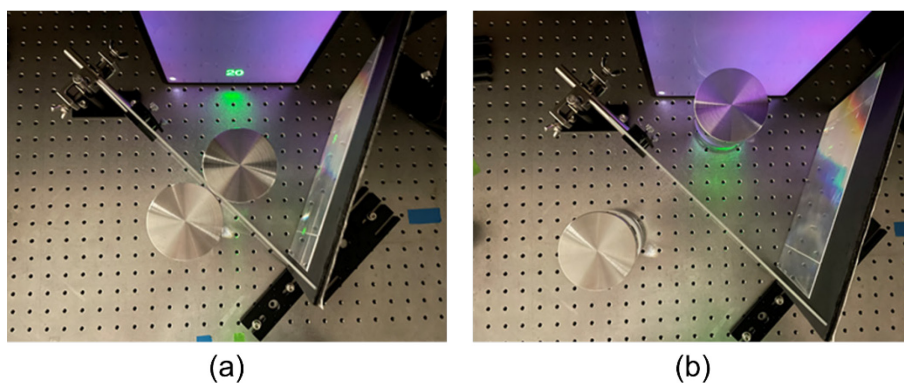


図 102：円柱ガラスを配置した光学系での結像実験系.
(a) 光源と物体が離れている配置, (b) 光源と物体が接触している配置.

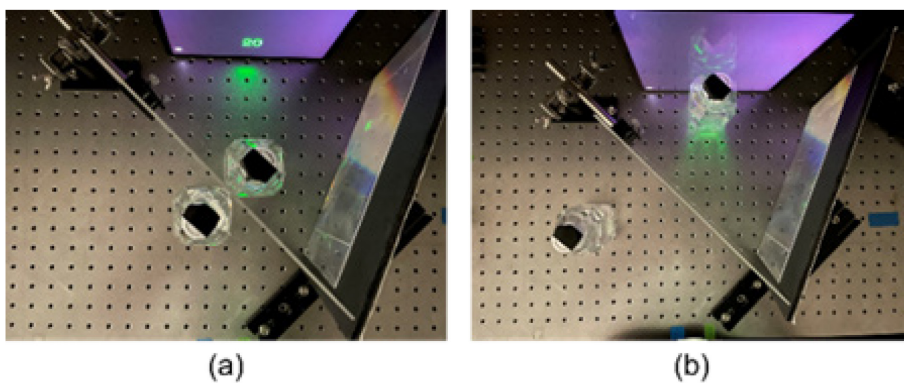


図 103：ペットボトルを配置した光学系での結像実験系.
(a) 光源と物体が離れている配置, (b) 光源と物体が接触している配置.

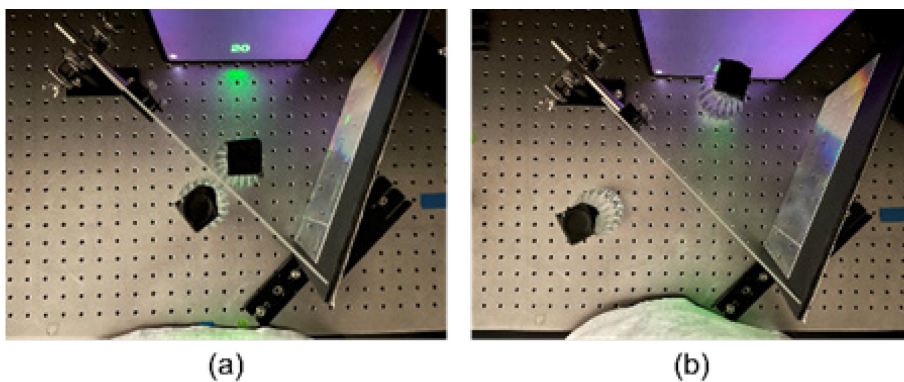


図 104：花瓶を配置した光学系での結像実験系.
(a) 光源と物体が離れている配置, (b) 光源と物体が接触している配置.

6.4.2. 実験結果

図 105 に、従来の AIRR 構成によって結像した空中像の撮影結果を示す．図に示されたように、20 という空中像がくっきり結像していることが確認できた．



図 105：従来の AIRR 構成によって結像した空中像の撮影結果．

図 106 に、角柱ボトルの角を光源に向けた配置での結像実験結果を示す．物体を光源に接触させた配置のときは空中像を確認することができたが、光源から離れている配置では視認することができなかった．

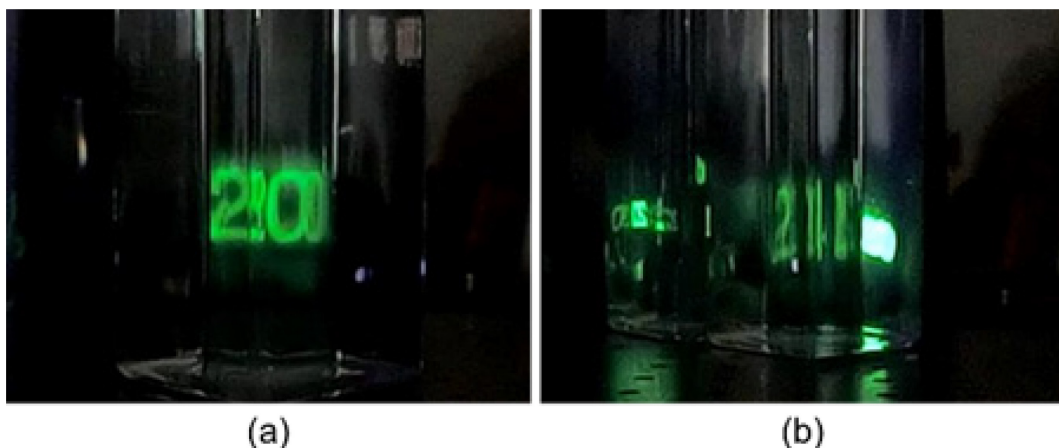


図 106：角柱ボトルの角を光源に向けた配置での結像実験結果．

(a) 物体が光源に接触している配置．(b) 物体が光源から離れている配置．

図 107 に、角柱ボトルの辺を光源に向けた配置での結像実験結果を示す．この配置では、物体と光源の位置関係にかかわらず、空中像を視認することができていた．一方で、物体が光源から離れた配置の時、光源側の物体での屈折による迷光が映り込んでいることが確認できた．

図 108 に、円柱ガラスを配置した光学系での結像実験結果を示す．この配置では、物体と光源の位置関係にかかわらず、空中像を視認することができていた．さらに、円柱ガラスは幅が広いので、視野角についても比較を行った．その結果を図 109 に示す．物体が光源に近いほうが、空中像の視野角が広く保たれていることが確認できた．



図 107：角柱ボトルの辺を光源に向けた配置での結像実験結果。
 (a) 物体が光源に接触している配置. (b) 物体が光源から離れている配置.

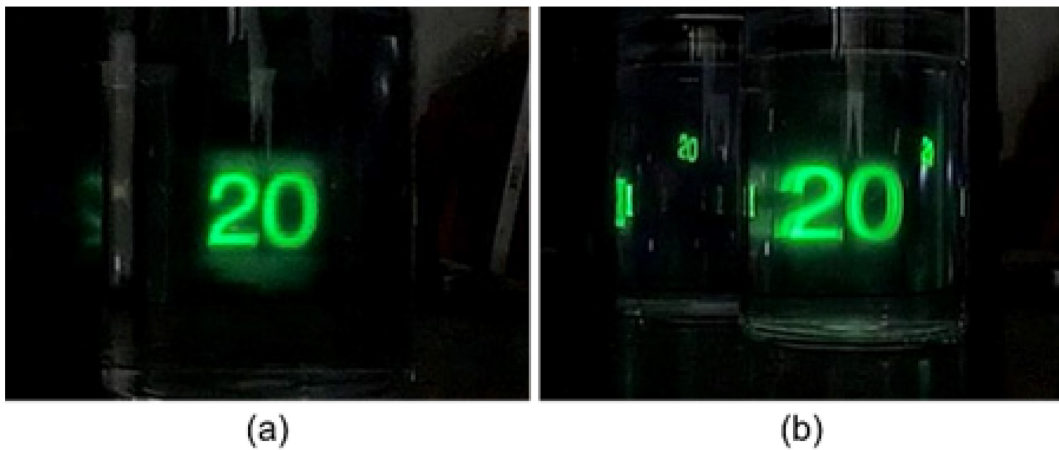


図 108：円柱ガラスを配置した光学系での結像実験結果。
 (a) 物体が光源に接触している配置. (b) 物体が光源から離れている配置.



図 109：円柱ガラスを配置した光学系における横方向の視野角の比較。
 (a) 物体が光源に接触している配置. (b) 物体が光源から離れている配置.

図 110 に、ペットボトルを配置した光学系での結像実験結果を示す。光源と物体が接触している配置では空中像を読み取ることができたが、光源から離れた配置では視認することができなかった。ペットボトルの表面形状がノイズとなっている可能性を考え、図 111 に示すようにスクリーンを用いた結像の確認を行った。その結果、物体が光源に接している配置では空中像がくっきりと浮かび上がった。一方で、物体が光源から離れている配置では、スクリーンを配置しても空中像を視認することができなかった。

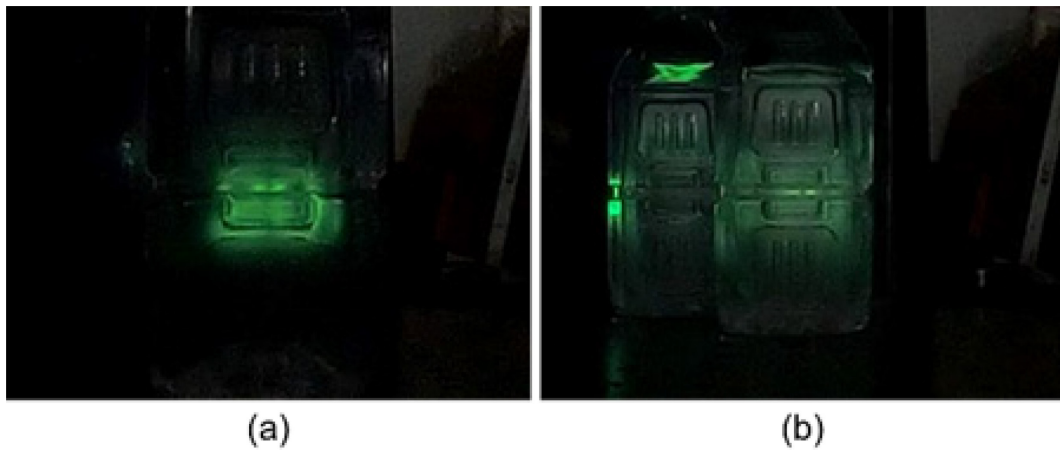


図 110：ペットボトルを配置した光学系での結像実験結果。

(a) 物体が光源に接触している配置。 (b) 物体が光源から離れている配置。



図 111：ペットボトルを配置した光学系でのスクリーンを用いた結像確認結果。

(a) 物体が光源に接触している配置。 (b) 物体が光源から離れている配置。

図 112 に、花瓶を配置した光学系での結像実験結果を示す。ペットボトルと同様に、物体が光源に接触している配置の時に空中像を読みとることができたが、ペットボトルに比べて表面の形状の影響が読み取りづらい表示となった。図 113 はスクリーンを用

いた結像の確認結果である．物体が光源と接触している配置では，スクリーンを用いることで空中像が結像していることをはっきりと確認することができた．

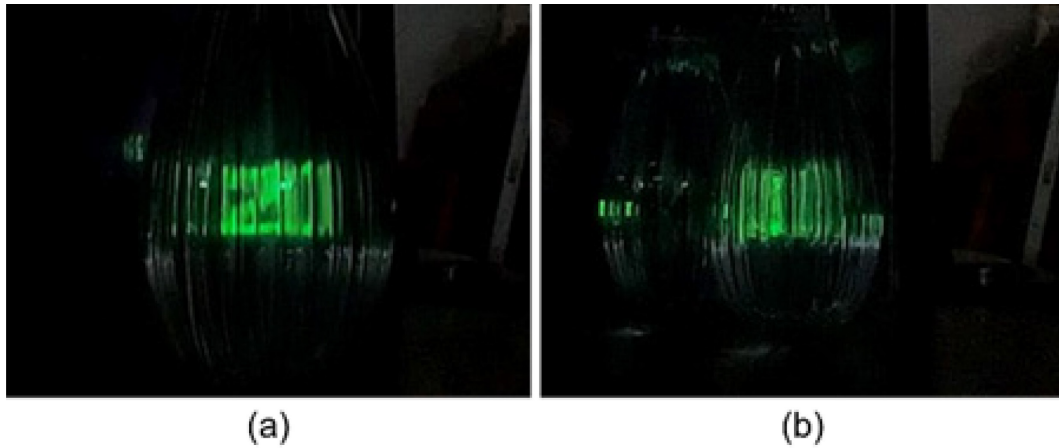


図 112：花瓶を配置した光学系での結像実験結果．

(a) 物体が光源に接触している配置．(b) 物体が光源から離れている配置．

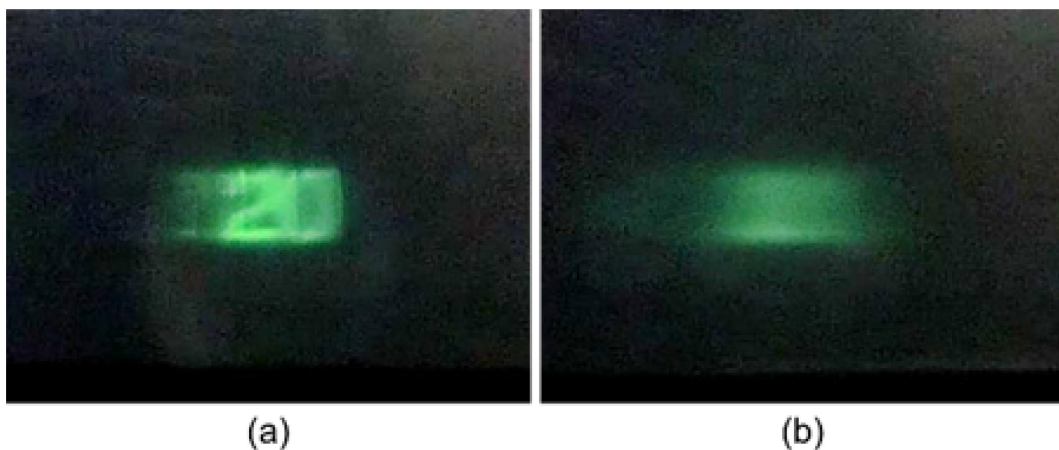


図 113：花瓶を配置した光学系でのスクリーンを用いた結像確認結果．

(a) 物体が光源に接触している配置．(b) 物体が光源から離れている配置．

6.5. おわりに

本章では，透過光を屈折する透明物体を組み合わせた空中結像が可能であることを明らかにした．透明球を用いた AIRR による原理検証実験を行い，光線追跡シミュレーション結果，試作装置を用いた空中結像結果，空中像の輝度の測定結果を基に空中結像が可能であることを述べた．そして，球以外の形状の透明物体を用いた空中結像実験を行い，空中結像を行うことが可能であることが明らかになった．

しかしながら，透明物体の表面の構造が複雑であるほど，結像された空中像の視認性

が低下する課題があることも示された。今後の展望として、本論文では透明物体の表面に空中結像を実現したが、近年発表された加飾印刷技術を用いたステルス空中インターフェース技術[76]と組み合わせることで、加飾印刷された透明物体の表面に浮かび上がるような空中結像が可能になることが期待される。

また、牛田らが報告している中空の透明球体の内部に浮かんだ映像を、透明球を回すことによって操作可能にする、インタラクションプラットフォーム(i-ball 2)[77, 78]のようなシステムを組み合わせることも考えられる。

第7章 結言

7.1. 本論文のまとめ

本論文では、未来の空中ディスプレイに求められる機能として、「人の表情や目線の自然な形での取得，3D 空中映像のリアルタイム表示，他の手法と組み合わせやすいマルチモーダル化，実物体と自然に合わさった空中表示」を挙げ，再帰反射による空中結像による空中ディスプレイで実現可能なことを明らかにした。

第3章にて，人の表情や目線の自然な形での取得を実現するために，AIRR 光学系にてユーザーを正面から観察する手法を提案し，p-AIRR 光学系と偏光板を備えたカメラを組み合わせることにより，反射型偏光板の反射を用いたユーザー観察手法によって余計な映り込みなく撮影が可能にあることを明らかにした。加えて，本手法を活用した視線一致型のビデオ通話システムと動物実験向けの行動観察系を提案した。

第4章にて，3D 空中映像のリアルタイム表示を実現するために，ライトフィールドディスプレイと AIRR によるライトフィールド空中映像のリアルタイム表示手法を提案した。ライトフィールドカメラの原理を逆再生する光学系と AIRR を組み合わせることによって，これまでライトフィールド空中映像を実現するための課題であった奥行き反転のための画像処理を不要とし，リアルタイムにライトフィールド空中映像を投影することが可能であることを明らかにした。

第5章にて，他の手法と組み合わせやすいマルチモーダル化について，音感覚についての実現を目指して，振動スピーカーを用いた AIRR における空中像から音が来るデバイスの作成を行った。AIRR 装置のビームスプリッターおよび再帰反射素子それぞれに振動スピーカーを取り付けることでスピーカーとして用いた場合の，表面に伝わる振動の周波数および振幅の分布の測定や，実際に振動スピーカーを取り付けた AIRR 装置から発生した音の測定をおこなった。それらの結果から，再帰反射素子をスピーカーに用いることで，他の手法と組み合わせやすいマルチモーダル化が可能なことを明らかにした。

第6章にて，実物体と自然に合わさった空中表示を実現するための第1歩として，透過光を屈折する透明物体を組み合わせた AIRR による空中結像を行った。透明球を用いた AIRR による原理検証実験を行い，光線追跡シミュレーション結果，試作装置を用いた空中結像結果，空中像の輝度の測定結果を基に空中結像が可能であることを述べた。そして，球以外の形状の透明物体を用いた空中結像実験を行い，空中結像を行うことが可能であることが明らかになった。

7.2. 今後の課題と展望

第3章で述べた AIRR 光学系にてユーザーを正面から観察する手法について今後の課題と展望を述べる。本手法における未実施事項として，3.6 節で述べた視線一致型のビ

ビデオ通話における被験者を用いた視線一致感の評価実験が行われていない。本実験はその構成から視線一致が実現しているといえるが、人間はわずかな目線の不一致も感じることができることが、先行研究より明らかになっている。よって、被験者実験による主観評価を行う必要がある。また、今後の展望としては、山本研究室で行われているメダカやベタといった魚に対して空中像を提示する行動実験について、3.7 節で提案した動物実験向け観察システムを用いて観察を行いたい。映像を提示しつつ正面から撮影を行うことはこれまで困難であったため、本手法による新たな知見を得られることが期待される。

第4章で述べたライトフィールドディスプレイと AIRR によるライトフィールド空中映像のリアルタイム表示手法について、今後の課題と展望を述べる。4.6 節でも述べた通り、本手法では投影レンズの位置を変えることによって空中像の拡大と縮小が可能である。これは、ライトフィールドカメラのセンサーの画素数同じ解像度のモニターを用いることができたならば、実寸大でライトフィールド空中映像を投影できる可能性があることを示している。しかしながら、そのようなディスプレイはいまだ開発されていないため、実験装置を用いての検証は困難である。一方で、このデバイスを構成することによる映像の視野角や運動視差を有する範囲については、本論文で構成した実験装置や提案手法の原理から導出することが可能である。よって、撮影したライトフィールド映像と投影システムの構成から表示されるライトフィールド空中映像の視野角や解像度の定量化を行うことが求められる。また、今後との展望としては、視線一致型ビデオ通話システムと組み合わせて、より対面に近いビデオ通話を実現したいと考えている。今日の感染対策事情による遠隔地の親戚との交流機会の減少などに対して、まるで対面したかのようなコミュニケーションをとることができれば、外出が困難になった状況でも孤独感をやわらげたり安心感を高めたりする効果が期待できるだろう。

第5章で述べた再帰反射素子をスピーカーに用いることで、空中像から音が来るように感じられるシステムについて、今後の課題と展望を述べる。初めに、本論文ではこの手法を用いることによって、空中像から音がなっているように感じられる効果について、被験者を用いた評価実験によって明らかにしていない。本手法の有用性を示すために、今後被験者実験を行うことは必須である。また、本手法の課題点として、振動スピーカーが張り付ける面(再帰反射素子を固定するために用いるベース)の材質によって音質が変化することが挙げられる。また、張り付けた素子の固定の仕方によっても音質の変化が懸念される。よって、張り付ける面の材質及び固定方法については、現在の研究で主に用いているものについて実験を行い、音質への影響と最適な手法を明らかにすることが求められる。

第6章で述べた透過光を屈折する透明物体を組み合わせた空中結像について、今後の課題と展望を述べる。本論文では、透明球を用いた空中結像系について、輝度系を用いて空中像の輝度の変化を明らかにしている。しかしながら、球の屈折率や直径を基にした、空中像の輝度変化について数値計算を用いた一般化は行われていない。本手法では、

球の中心付近から周囲にかけて輝度が低下する傾向が見られたため、表示したい空中像のサイズにあわせた適切な球のサイズや材質を導出できる式を導き出すことは、今後の研究のためにも必要である。一方で、6.5 節でも述べたが透明球または透明物体を用いたユニークな空中ディスプレイインターフェースとしての展望も考えられる。例えば、透明なマネキンの表面に任意の衣服の空中像を重ねて表示する試着システムをはじめ、様々な応用が検討できる。空中ディスプレイは観察者に特殊な機器の装着やスキルを有することを要求しない強みがあるため、日常の様々な場面での活用が期待される。

最後に、本論文に加えて、様々な研究による空中ディスプレイの多機能化の手法が組み合わさることで、「人の情報の自然な取得」及び「豊かな情報提示」ができる空中ディスプレイへの発展を期待する。

参考文献

- [1] B. Javidi, A. Carnicer, J. Arai, T. Fujii, H. Hua, H. Liao, M. Martínez-Corral, F. Pla, A. Stern, L. Waller, Q. Wang, G. Wetzstein, M. Yamaguchi, and H. Yamamoto, "Roadmap on 3D integral imaging: sensing, processing, and display," *Opt. Express* 28, 32266–32293 (2020).
- [2] Jason Geng, "Three-dimensional display technologies," *Adv. Opt. Photonics* 5, 456–535 (2013).
- [3] 東芝テック, “世界初※！非接触・空中ディスプレイ技術を POS レジに採用『デジ POS』の実証試験をセブン-イレブン店舗にて開始,”
https://www.toshibatec.co.jp/release/20220128_01.html.
- [4] 日刊スポーツ, “「空中ディスプレイ」が脚光 S F 映画の世界現実に.”
<https://www.nikkansports.com/general/nikkan/news/202012200000114.html>.
- [5] 日立オムロンターミナルソリューションズ株式会社, “医療機関や公共施設、製造現場などの機器を利用する環境で空中でのボタン操作によるタッチレスソリューションを展開,” <https://www.hitachi-omron-ts.co.jp/news/2020/202005-001.html>.
- [6] マクセルホールディングス株式会社, “高輝度で視認性のよい空中映像と高精度の空中操作が可能な非接触 HMI 「Advanced Floating Image Display」を開発,”
https://ssl4.eir-parts.net/doc/6810/ir_material21/144618/00.pdf.
- [7] 富士通フロンテック株式会社, “広島銀行様、長野県信用組合様と共同で新型コロナウイルス感染症の感染防止対策をした ATM の実証実験を開始,”
<https://www.fujitsu.com/jp/group/frontech/about/resources/news/press-releases/2020/1215.html>.
- [8] "3D display devises Part 51-1: Generic introduction of aerial display," IEC TR 62629-51-1: 2020 (2020).
- [9] 内閣府, “第 5 期科学技術基本計画 Society 5.0,”
https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/index.html
- [10] Y. Tokuda, A. Hiyama, M. Hirose, and H. Yamamoto, “R2D2 w/ AIRR: Real time & Real space Double-Layered Display with Aerial Imaging by Retro-Reflection,” *Proc. SIGGRAPH Asia’15, Emerging Technologies* (2015).
- [11] H. Yamamoto, M. Yasui, M. Sakti Alvissalim, M. Takahashi, Y. Tomiyama, S. Suyama, and M. Ishikawa, “Floating display screen formed by AIRR (Aerial imaging by retro-reflection) for interaction in 3D space,” *3D Imaging (IC3D)*, 2014 International Conference on. IEEE (2014).
- [12] S. Maekawa and S. Markon, “Airflow interaction with Floating images,” *Proc. SIGGRAPH ASIA 2009 Art Gallery & Emerging Technologies*, pp. 61 (2009).
- [13] トラベル Watch, “JAL と NTT Com、宙に浮いて見えるビデオ通話を活用した実証実験公開。サクララウンジのシャワー受付で待ち時間をなくす,”
<https://travel.watch.impress.co.jp/docs/news/1180676.html>.

- [14] T. Hoshi, M. Takahashi, K. Nakatsuma, and H. Shinoda, "Touchable holography," In ACM SIGGRAPH 2009 Emerging Technologies (SIGGRAPH '09). Article 23, pp. 1(2009), <https://doi.org/10.1145/1597956.1597979>.
- [15] 河出弘志, 萩原良信, 今村弘樹, 雀 龍雲, "現実物体と仮想物体のインタラクションを考慮した AR に基づく情報提示装置の開発," ITE Technical Report, 35, 9, pp59–63(2011).
- [16] H. Kim, I. Takahashi, H. Yamamoto, S. Maekawa, T. Naemura, "MARIO: Mid-air Augmented Reality Interaction with Objects," Entertainment Computing, Volume 5, Issue 4, pp. 233–241(2014).
- [17] H. Yamamoto, and S. Suyama, "Aerial imaging by retro-reflection (AIRR)," SID Digest, pp.895-897(2013).
- [18] H. Yamamoto, Y. Tomiyama, and S. Suyama, "Floating aerial LED signage based on aerial imaging by retro-reflection (AIRR)," Optics Express, Vol. 22, No. 22, 26919–26924 (2014).
- [19] 日本カーバイド工業株式会社, "再帰反射シート," https://www.carbide.co.jp/product/retroreflective_material/
- [20] 日本カーバイド工業株式会社, "空中ディスプレイ用リフレクター," https://www.carbide.co.jp/product/airial_display/
- [21] S. Onose, T. Okamoto, K. Onuki, M. Takahashi, H. Yamamoto, "Developments of Large Aerial LED Display with Aerial Imaging by Retro-Reflection (AIRR)," IMID 2016 DIGEST, E45-3(2016).
- [22] M. Yasugi, H. Yamamoto, "Exploring the combination of optical components suitable for the large device to form aerial image by AIRR," Proc. IDW, Vol. 26, pp. 1382–1383 (2019).
- [23] Y. Tokuda, and H. Yamamoto, "Illumination & Display Polarized aerial imaging by retroreflection for 2.5 D floating image displays," SPIE Newsroom. DOI: 10.1117/2.1201604.006428 (2017.1.31access).
- [24] K. Onuki, M. Nakajima, T. Okamoto, N. Kawagishi, and H. Yamamoto, "Brightness improvement by polarization modulation in the aerial imaging by retro-reflection (AIRR)," proc. OSA'16, pp. JT3A.65 (2016).
- [25] K. Onuki, N. Kawagishi, H. Yamamoto, "Comparison of Divergence Angle of Retro-Reflectors for Aerial Imaging by Retro-Reflection (AIRR)," Proc. IDW, pp.542–545 (2016).
- [26] N. Kawagishi, R. Kakinuma, H. Yamamoto, "Aerial image resolution measurement based on the slanted knife edge method," Optics Express, Vol. 28, Issue 24, pp. 35518–35527 (2020). DOI: 10.1364/OE.408983.
- [27] R. Kakinuma, N. Kawagishi, M. Yasugi, H. Yamamoto, "Influence of incident angle, anisotropy, and floating distance on aerial imaging resolution," OSA Continuum, Vol. 4, Issue 3, pp. 865–878 (2021). DOI: 10.1364/OSAC.416504.
- [28] Y. Maeda, "Floating image display based on a dihedral corner reflector array," Proc. IDW **22**, 822–825 (2015).
- [29] "Parity Innovations," <https://www.piq.co.jp/>.

- [30] 藤島智彦, 大坪誠, "光学結像装置に使用する光制御パネルの製造方法," 特開 962011-175297 (2011).
- [31] "株式会社アスカネット, "ASKA 3D," <https://www.asukanet.co.jp/>.
- [32] 東京大学 石川渡辺研究室, "AIRR Tablet: 空中映像を手で操作できるシステム ～自由空間をインタラクティブなディスプレイに～," http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/perception/AIRR_Tablet/index-j.html.
- [33] S. Ito, N. Kurokawa, H. Yamamoto, "Calibration between a 3D camera and an aerial information screen," SPIE Digital Optical Technologies, Vol.10335(2017).
- [34] S. Ito, K. Uchida, and H. Yamamoto, "Use of Ultrasonic Waves for Navigation to the Viewing Position of Aerial Secure Display," Proc. IDW, Vol. 24, HAPp1-4 (2017).
- [35] T. Okamoto, S. Ito, K. Onuki, S. Onose, T. Itoigawa, and H. Yamamoto, "Visual and Thermal Floating Display with AIRR and WARM," Proc. IDW, pp.823–826 (2016).
- [36] R. Kujime, S. Suyama, H. Yamamoto, "Thermal and visual 3D display by use of crossed-mirror array," Proc. IDW/AD'12, 3Dp-21, pp. 1243–1246(2012).
- [37] Ryosuke Kujime, Hatuki Mizushina, Shiro Suyama, Hirotugu Yamamoto, "How to Converge Long Wave-Length Sound by Small-Aperture Crossed-Mirror Array," Proc. IDW'15, Vol. 22, pp859–862(2015).
- [38] Ryosuke Kujime, Hironori Nakamura, Shiro Suyama, Hirotugu Yamamoto, "Wave form of converged sound by crossed-mirror array," IMID 2015, P2-83(2015).
- [39] R. Kujime, H. Mizushina, S. Suyama, and H. Yamamoto, "Converging light, thermal and sound wave by 2 types crossed mirror array," JSAP-OSA Joint Symposia 2015, 13a-C301-3, pp. 04-003 (2015).
- [40] H. Yamamoto, T. Okamoto, R. Kujime, "Multi-Modal Aerial Information Display for Next Generation Digital Signage," The 25th International Conference on Advanced Laser Technologies, MD-III-3(2017).
- [41] H. Yamamoto, S. Ito, T. Okamoto, R. Kujime, K. Fujii, Y. Terashima, Y. Takeda, "Aerial Display with Thermal and Acoustic Sensation," SIGGRAPH 2017, a16(2017).
- [42] Y. Terashima, S. Suyama, H. Yamamoto, "Aerial depth-fused 3D image formed with aerial imaging by retro-reflection (AIRR)," Optical Review Vol.26, Issue 1, pp.179–186 (2019). DOI: 10.1007/s10043-018-0473-9
- [43] Y. Terashima, R. Kujime, S. Suyama, H. Yamamoto, "Aerial Protruding DFD Display with AIRR," The 7th Laser Display and Lighting Conference 2018 (LDC'18), LDC3-5(2018).
- [44] 河合一樹, 山本裕紹, "再帰反射シートとアーク 3D を用いた運動視差を有する空中像の形成", 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会講演予稿集, 15a-C42-10(2016).
- [45] H. Yamamoto, K. Kawai, H. Mizushina, S. Suyama, "Forming Aerial 3D Images with Smooth Motion Parallax in Combination of Arc 3D Display with AIRR," Proceedings of SPIE, 10666, 106660I-1–106660I-6(2018).
- [46] 黒川 菜緒, 山本 裕紹, "AIRR による空中ディスプレイにおける hollow face 錯視," 電気情報通信学会技術研究報告, HIP2017-94(2018).

- [47] N. Kurokawa, S. Ito, H. Yamamoto, “Aerial 3D display by use of a 3D-shaped screen with aerial imaging by retro-reflection (AIRR),” SPIE Digital Optical Technologies, Vol.10335(2017).
- [48] N. Kurokawa, K. Fujii, S. Ito and H. Yamamoto, “Aerial Hollow-Face Illusion with AIRR,” Proc. IDW, Vol. 24, 3Dp2-1 (2017).
- [49] T. Iwane, M. Nakajima, and H. Yamamoto, “3D Volume Image Reconstruction in Space, Using Combined System of Light-Field Display and Aerial Imaging Device”, Proc. IDW, pp.815–818 (2016).
- [50] T. Iwane, M. Nakajima, and H. Yamamoto, “Light-field Display Combined with an Aerial Image Display Device, Aerial Imaging by Retro-Reflection (AIRR),” Proc. OSA’16, TM3A.3 (2016).
- [51] T. Kobori, K. Shimose, S. Onose, T. Okamoto, M. Nakajima, T. Iwane, and H. Yamamoto, “Aerial Light-Field Image Augmented Between You and Your Mirrored Image,” SIGGRAPH ASIA 2017, 08-0176(2017).
- [52] S. Ito, K. Uchida, H. Mizushina, S. Suyama, H. Yamamoto, “Aerial Secure Display by Use of Polarization-Processing Display with Retarder Film and Retro-Reflector,” SPIE Photonics West 2017, 101260O, pp. 1–6(2017).
- [53] T. Okamoto, T. Kobori, R. Kujime, H. Yamamoto, “Projecting Prompter Information via a Common Information Screen with AIRR,” Proc. IDW’17, Vol. 24, PRJp1-2 (2017).
- [54] E. Abe, M. Yasugi, H. Takeuchi, E. Watanabe, Y. Kamei, H. Yamamoto, “Development of omnidirectional aerial display with aerial imaging by retro-reflection (AIRR) for behavioral biology experiments,” Optical Review, Vol. 26, pp. 221–229 (2019). DOI: 10.1007/s10043-019-00502-w.
- [55] E. Abe, S. Onose and H. Yamamoto, “Geometric Transformation to Form a Cylindrical Information Screen on an Omnidirectional Aerial Display,” IMID 2017, P1-199
- [56] E. Abe, H. Yamamoto, “Immersive Reaction of Medaka to Omnidirectional Aerial Display,” Proc. IDW’19, 3DSAp2/3Dp2-7(2019).
- [57] 阿部 絵理菜, 小野瀬 翔, 山本 裕紹, “全周型空中ディスプレイを用いたベタの行動実験,” 第 22 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 2E2-02 (2017).
- [58] M. Morita, H. Yamamoto, K. Yoshihara, N. Nara, “Use of Aerial Agent for Smart Cockpit,” IDW’18, PRJ5-1(2018).
- [59] 森田学, 吉原敬一朗, 阿部憲幸, 奈良憲和(2018). 第 4 章 Smart Cockpit®における空中エージェント, 山本裕紹(監修), 空中ディスプレイの開発と応用展開, シーエムシー出版, pp. 238–244.
- [60] 小堀 智史, 岡本 智行, 小野瀬 翔, 長坂 千嘉夫, 山本 裕紹, “AIRR による空中ディスプレイのアミューズメント機器応用,” Optics & Photonics Japan 2017, 31aP18 (2017).
- [61] D. Nishimura, K. Chiba, K. Matsushita, K. Fujii, M. Yasugi, T. Miyashita, K. Sawada, and H. Yamamoto, “Outdoor Aerial Signage with Optical See-Through AIRR,” 3DSA 2021, S9-8 (2021).
- [62] H. Kikuta, M. Yasugi, H. Yamamoto, “Examination of deblur processing according to optical parameters in aerial image,” OSA Continuum, Vol. 1, Issue 3, pp. 462–474 (2022).
- [63] H. Kikuta, H. Yamamoto, “Examination of Deblur Processing for Full-color Aerial Image According to the Light Wavelength,” Proc. IDW ’21, Vol. 28, pp. 245-248, FMC5-3 (2021).
- [64] 柿沼遼太, 下瀬主揮, 山本裕紹, “分割された再帰反射素子を用いた AIRR による空中像の見かけのボケの低減,” Optics & Photonics Japan 2018, 31aP11(2018).
- [65] Rm Kakinuma, N. Kawagishi, and H. Yamamoto, “Reduction of Blur of Aerial Image Formed with AIRR by Use of Paired Masked Retro-reflectors,” Proc. IDW, Vol. 26, pp. 738–741 (2019).
- [66] 西村大輝, 山本裕紹, “再帰反射スリットアレイを用いた LED パネル上のデュアルビュー空中サイン,” 第 80 回応用物理学会秋季学術講演会 講演予稿集, 19a-E319-

- 15(2019).
- [67] D. Nishimura, M. Yasugi, H. Yamamoto, "Proposal of moire-free aerial display based on the LED panel and apertured retro-reflector," *Optical Review* 28, pp. 492–500 (2021).
DOI: 10.1007/s10043-021-00642-y.
 - [68] N. Kurokawa, K. Onuki, H. Yamamoto, "Multi-Layered Aerial LED Display by Double-Stage Polarized Aerial Imaging by Retro-Reflection," *IP'17(Information Photonics 2017)*, 20PM-1-4 (2017).
 - [69] K. Chiba, M. Yasugi, and H. Yamamoto, "Multiple aerial imaging by use of infinity mirror and oblique retro-reflector," *Japanese Journal of Applied Physics*, 59, SOOD08 (2020).
 - [70] N. Kawagishi, K. Onuki, and H. Yamamoto, "Comparison of Divergence Angle of Retro-Reflections and Sharpness with Aerial Imaging by Retro-Reflection (AIRR)," *IEICE Transactions of Electronics*, Vol. E100-C, No.11, pp.958–964(2017).
DOI: 10.1587/transele.E100.C.958
 - [71] R. Kakinuma, M. Yasugi, S. Ito, K. Fujii, and H. Yamamoto, "Aerial Interpersonal 3D Screen with AIRR that Shares Your Gesture and Your Screen with an Opposite Viewer," *IMID 2018*, P3-103(2018).
 - [72] 日本カーバイド工業株式会社, "空中ディスプレイ用リフレクター RF-A シリーズ," <https://www.carbide.co.jp/product/rf-a%E3%82%B7%E3%83%AA%E3%83%BC%E3%82%BA/>.
 - [73] M. Hagen, "Calibration and demonstration of a snapshot Mueller matrix spectropolarimeter," *Proc. SPIE*, 11833, 118330L (2021).
 - [74] S. Baldauf, J. Kullmann, T. Bakker, "Technical Restrictions of Computer - Manipulated Visual Stimuli and Display Units for Studying Animal Behaviour," *Ethology*, 114, pp. 737–751 (2008).
 - [75] 岩根 透(2018). 第 5 章 ライトフィールドの取得と再生技術, 山本裕紹(監修), 空中ディスプレイの開発と応用展開, シーエムシー出版, pp. 141–148.
 - [76] 宇都宮大学, "[プレスリリース] 世界初、宇都宮大学とアルプスアルパインが空中表示/入力デバイス「ステルス空中インターフェース」を共同開発しました," <https://www.utsunomiya-u.ac.jp/topics/research/009533.php>.
 - [77] 牛田 啓太, 原島 博, 石川 洵, "i-ball 2: 透明球ディスプレイを備えたインタラクティブプラットフォームの開発," *映像情報メディア学会誌*, 58 巻 6 号 pp. 842–845(2004).
 - [78] K. Ushida, J. Hayashi, N. Chandrasiri, H. Harashima, J. Ishikawa, "i-ball 2: An Information Platform with a Crystal-Ball-Like Display: Interactive Systems and Applications for Mutual Telexistence", Volume 11, Issue 1, pp. 133–141(2006).
 - [79] 岡田謙一, and 松下温. "臨場感のある多地点テレビ会議システム: MAJIC." *情報処理学会論文誌*, 36.3, 775–783 (1995).
 - [80] K. Gao, M. Chang, K. Jiang, Y. Wang, Z. Xu, H. Feng, Q. Li, Z. Hu, and Y. Chen, "Image restoration for real-world under-display imaging," *Optics Express*, Vol. 29, Issue 23, pp. 37820–37834 (2021).
 - [81] H. Konno, S. Igarashi, T. Nakamura, M. Yamaguchi, "Waveguide-HOE-based Camera that Captures a Frontal Image for Flat-panel Display," *Proc. IDW'18*, Vol. 25, pp. 1127–1130(2018).
 - [82] Google, "Project Starline: Feel like you're there, together," <https://blog.google/technology/research/project-starline/>.
 - [83] 谷田貝雅典, 坂井滋和, 永岡慶三, & 安田孝美 "視線一致型および従来型テレビ会

- 議システムを利用した遠隔授業と対面授業によるディベート学習の教育効果測定." 教育システム情報学会誌, 28.2, 129–140(2011).
- [84] 藤本 彩華, 永岡 慶三, 米谷 雄介, 谷田貝 雅典, “裸眼 3D 視線一致型テレビ会議システムを用いた高校・大学間遠隔対話型学習のデザインと実践,” 教育システム情報学会研究報告, 33(6), pp.79–86(2019).
- [85] T. Nakamura, S. Kimura, K. Takahashi, Y. Aburakawa, S. Takahashi, S. Igarashi, S. Torashima, and M. Yamaguchi, "Off-axis virtual-image display and camera by holographic mirror and blur compensation," *Opt. Express* 26, 24864–24880 (2018).
- [86] T. Nakamura, S. Kimura, K. Takahashi, Y. Aburakawa, S. Takahashi, S. Igarashi, and M. Yamaguchi, “HOE-based screen for virtual-image projection and scene capture,” in *International Display Workshops 2017*, 3D4-4(2017).
- [87] 大坪 誠(2018). 第 1 章 ASKA3D プレートー対面ミラー型マイクロ反射素子を用いた対称光学結像素子ー, 山本裕紹(監修), 空中ディスプレイの開発と応用展開, シーエムシー出版, pp. 35–45.
- [88] 前田 有希(2018). 第 2 章 2 面コーナーリフレクタアレイを用いた空中映像表示技術とその応用, 山本裕紹(監修), 空中ディスプレイの開発と応用展開, シーエムシー出版, pp. 46–55.

謝辞

本論文を作成するにあたり、学部3年次の仮配属から本日に至るまで、指導教員としてご指導いただきました山本裕紹教授に感謝申し上げます。山本研究室で7年近く研究活動に励み、空中ディスプレイという分野について、たくさん知見を得ることができたと確信しています。また、多くの学会発表での発表及び聴講の機会を用意していただき、空中ディスプレイをはじめ情報フォトニクス分野における新鮮な様々の研究について知見を得ることができました。日々研究に励む忙しさが苦しく感じることもありましたが、山本研究室を選択したことで最も自分を成長させることができたのではないかと感じております。誠にありがとうございました。

本論文の副査をお引き受けいただいた早崎芳夫教授、湯上登教授、副専門研修にてご指導いただいた長谷川光司教授、石川智治准教授、予備審査にて審査委員をお引き受けいただいた大谷幸利教授、NATHAN HAGEN 教授に感謝申し上げます。

早崎芳夫教授、湯上登教授、大谷幸利教授には、予備審査及び資格審査にて、博士論文についてたくさんのご助力、ご指導をいただきました。みなさまからいただいたお言葉のおかげで、本博士論文をまとめあげることができたと思っております。誠にありがとうございました。

長谷川光司教授、石川智治准教授には、副専門研修にて音の定位について、および視線の一致についてそれぞれ課題としてご指導をいただきました。それぞれの課題が本博士論文で実施した研究に結びついているものであり、自身に不足していた知識を補うことができる課題であったと感じております。誠にありがとうございました。

NATHAN HAGEN 教授には、査読付き原著論文の執筆にあたる英文の改訂にて校正をいただいたことに加え、偏光カメラを用いたストークスパラメータの測定実験にご協力いただきました。誠に感謝しております。

八杉公基特任准教授に感謝申し上げます。常日頃から、研究や実験に関する些細な質問から丁寧に相談に乗ってくださった他、多くの予稿や論文について改訂をいただきました。そして、本博士論文の作成にあたって、構成の検討段階からたくさんのご指摘とアドバイスをいただきました。誠にありがとうございました。

陶山史朗特任教授に感謝申し上げます。主に査読付き原著論文の改訂をいただき、本博士論文についても構成を検討する段階からご指摘とアドバイスをいただきました。また、陶山先生からも改訂のアドバイスをいただくようになってから、より多くの視点で改訂案をいただくことができるようになり、論文や予稿の改訂がより良いものになったと感じています。誠にありがとうございました。

当研究室の研究員であった久次米亮介博士に感謝申し上げます。久次米様は、学部のころより研究に関することから工具を使った工作まで、頼れる大先輩として様々なことを教えてくれました。この時に教わったことは、本日に至るまで研究生生活に役立ってい

たと思います。誠にありがとうございました。

当研究室の秘書である小堀由美様、前秘書であられる河野恵子様、ヘーガン倫子様、喜多紀子様、根津はるか様に感謝申し上げます。実験機材をはじめとした物品の発注、および学会等における手続きなど、事務手続きの必要となる場面でお世話になりました。

当研究室のOBであります高橋昌史様、小貫健太様、岡本智行様、小野瀬翔様、そして小堀智史様に感謝申し上げます。在学時には、皆様には当研究室におけるデモ対応の心得から、空中ディスプレイに関する様々な相談ごとに親身に対応いただきました。誠にありがとうございました。

当研究室の同期であり、現在はOBである伊藤秀征様、河合一樹様、森田渉吾様、黒川菜緒様、下瀬一揮様、堀江ひとみ様に感謝申し上げます。皆様は、動機としてともに切磋琢磨して研究生活に励みました。最近、研究室の同期がいない寂しさというものを感じておりました。皆様と励んだ修士までの研究生活は、今日も原動力となっております。誠にありがとうございました。

当研究室の後輩であり、現在はOBである阿部絵里菜様、寺島佳希様、柿沼遼太様、佐事郁弥様、千葉一成様、西村大輝様、松下孝二郎様、粕谷里奈様、渡辺祐斗様、永禮翔太郎様、郭浩通様に感謝申し上げます。皆様には先輩として、たくさんの質問や相談事を通して頼っていただくことができました。その機会を通じて、己の知識を深めることができたと感じております。誠にありがとうございました。

当研究室の後輩である井上皓介様、木村明穂様、工藤大樹様、向島直哉様、高塚大輝様、滝山和晃様、嶋村海人様、河口将也様、岸波康平様、大石尋斗様、佐藤圭吾様、渡辺健太様、安達真由様、尾本崇大様に感謝申し上げます。特に、今年からは山本研究室としての活動も活発になってきており、皆様の研究に対する意欲には強い刺激を受けております。特に、滝山様には郭様と一緒に、透明球を用いた空中結像の解像度の向上について研究を進めていただき、誠にありがとうございました。また、安達様と大石様には、共同実験に関する被験者実験の実施を引き継いでいただき、迅速に実施いただきまして誠にありがとうございました。岸波様には、共著として多くの学会に係らせていただいたほか、空中ディスプレイを用いたドラマ撮影の補助をご一緒いただくなどたくさんの研究活動でお助けいただいております。誠にありがとうございます。

大谷研究室所属の遠藤伸亮様に感謝申し上げます。偏光変調を用いて正面からユーザーを観察する手法について、偏光カメラを用いた偏光状態の測定実験にご協力いただきました。誠にありがとうございました。

オプティクス教育研究センターの事務の竹重真理様に感謝申し上げます。購入した物品の検収や、その他手続きなどでお世話になりました。

当研究室社会人博士でOBの時本豊太郎様に感謝申し上げます。時本様とは、高速表示ディスプレイというデバイスにおける人間の目の知覚について、興味深い知見を共に研究させていただきました。現在でも、後輩の研究の進捗報告を通じて、高速表示ディスプレイを用いた超解像表示の研究の歩みを楽しみにさせていただいております。誠に

ありがとうございました。

当研究室社会人博士で OB の富永修一様と川岸功和様に感謝申し上げます。お二人には、資格審査のための博士論文の構成検討の際に、たくさんの助言をいただきました。誠にありがとうございました。

ニコン株式会社の岩根透様、中島聖生様、伊藤充様に感謝申し上げます。ライトフィールドディスプレイ関連の研究では実験用のデバイスをお貸しいただいたほか、技術的なサポートもいただきました。誠にありがとうございました。

Tianma Japan の芳賀浩史様、重村幸治様、佐々木晴江様に感謝申し上げます。学部のことからともに指先での刺激に知覚について共同研究に携わらせていただき、被験者を用いた様々な実験手法を学ぶことができました。誠にありがとうございました。

日本カーバイド工業の竹田幸弘様、佐名川正年様、中謙一郎様に感謝申し上げます。本研究室で必須となる再帰反射素子を開発いただき、また SIGGRAPH および SIGGRAPH ASIA にはテクニカルサポートとして展示に参加させていただきました。海外での展示会で、私も英語で展示・デモ活動をさせていただき、貴重な経験をさせていただきました。誠にありがとうございました。

パリティ・イノベーションズの前田有希様に感謝申し上げます。空中像を用いたインタラクションを研究するにあたり、実践的な面での課題や利用者のニーズなど、貴重なお話を聞かせていただきました。

最後に、宇都宮大学に通うにあたり、金銭面や生活面で多大なる支援を下さった両親に心より感謝申し上げます。

研究業績

A. 査読付き原著論文

1. “Reduction of retro-reflector and expansion of the viewpoint of an aerial image by the use of AIRR with transparent spheres,”
Kengo Fujii, Masaki Yasugi, Satoshi Maekawa, and Hirotsugu Yamamoto, OSA Continuum Vol. 4, pp. 1207–1214 (2021).
2. “Aerial imaging steganography method for aerial imaging by retroreflection with dual acrylic ball,”
Kengo Fujii, Masaki Yasugi, Satoshi Maekawa, and Hirotsugu Yamamoto, Optical Review, Vol. 29, pp. 250–260 (2022).
3. “Aerial video-calling system with eye-matching feature based on polarization-modulated aerial imaging by retro-reflection (p-AIRR),”
Kengo Fujii, Nobuaki Endo, Nathan Hagen Masaki Yasugi, Shiro Suyama, Hirotsugu Yamamoto, , Optical Review (2022) in print.

B. 受賞

1. 2021 年 3 月 立体映像技術研究会 学生奨励賞
2. 2021 年 9 月 立体映像技術研究会 学生奨励賞
3. 2022 年 3 月 令和 3 年度宇都宮大学学長表彰

C. 国際学会発表

1. Kengo Fujii, Shusei Ito, Satoshi Maekawa, Hirotsugu Yamamoto, “Steganography by use of a clear sphere as a key for decoding a concealed aerial image formed with AIRR,” in IP’17(Information Photonics 2017), 21PM-1-3, (2017).
2. Kengo Fujii, Kenta Onuki, Kazuki Kawai, Shusei Ito, Hirotsugu Yamamoto, “Detecting Touch at an Aerial Image with a Camera Inside Aerial Display with polarized AIRR,” in IMID 2017, F54-3, pp. 239(2017).
3. Kengo Fujii, Nao Kurokawa, Kazuki Kawai, Shogo Morita, Kazuki Shimose, Ryosuke Kujime, Hirotsugu Yamamoto, “Generating Sound just Below an Aerial Image Formed with AIRR,” in JSAP-OSA Joint Symposium 2017, 6a-A409-3(2017).
4. Kengo Fujii, Nao Kurokawa, Kazuki Kawai, Shogo Morita, Kazuki Shimose, Ryosuke Kujime, Hirotsugu Yamamoto, “Constructing a Sound System as if Sound is Coming from

- Aerial Image,” Proc. IDW’17, Vol. 24, FMCp2-2, pp. 609–612(2017).
5. Kengo Fujii, Ryosuke Kujime, Hiotsugu Yamamoto, “Forming Thermal Aerial Image by Convergence of Near Infrared Ray Using AIRR,” in The 7th Laser Display and Lighting Conference 2018 (LDC’18), LDCp9-13(2018).
 6. Kengo Fujii, Ryota Kakinuma, Shusei Ito, Masaki Yasugi, Hiotsugu Yamamoto, “See-Through Aerial Display with AIRR by Using Retro-Reflector as a Speaker,” in JSAP-OSA Joint Symposium 2018, 19p-221B-8(2018).
 7. Kengo Fujii, Masao Nakajima, Masaki Yasugi, Kazuki Shimose, Toru Iwane, Clément Trovato, Hiotsugu Yamamoto, “A Device for Reconstructing Light Field Data as 3D Aerial Image by Retro-reflection,” in SIGGRAPH Asia 2018, a75(2018).
 8. Kengo Fujii, Hiotsugu Yamamoto, “Multi-Modal Underwater Information Display in Combination of Speakers and Underwater Screen with by AIRR,” Proc. IDW’18, Vol. 25, 3Dp1-17, pp. 888–891(2018).
 9. Kengo Fujii, Ryota Kakinuma, Hiotsugu Yamamoto, “Video Calling System Matching the Viewpoint with See-through AIRR,” in DHIP2018 (The 8th Korea-Japan Workshop on Digital Holography and Information Photonics), p. 67(2018).
 10. Kengo Fujii, Kazuki Shimose, Mitsuru Ito, Masao Nakajima, Toru Iwane, Masaki Yasugi, Hiotsugu Yamamoto, “Capturing of a light field image and its real-time aerial reconstruction with AIRR,” Proc. SPIE 10997, 109970G-1-10997G-6(2019).
 11. Kengo Fujii, Hiotsugu Yamamoto, “Changing Size of Aerial Image Formed with AIRR by Use of Clear Spheres,” in JSAP-OSA Joint Symposium 2019, 19a-E215-4(2019).
 12. Kengo Fujii and Hiotsugu Yamamoto, “Aerial Display on a Clear Sphere with Aerial Imaging by Retro-Reflection,” in 24th Microoptics Conference (MOC2019), P-63, pp. 222(2019).
 13. Kengo Fujii, Ryota Kakinuma, Masaki Yasugi, Hiotsugu Yamamoto, “Eye-Matching Video Calling System by Use of Aerial Screen with AIRR,” Proc. IDW’19, Vol. 26, DSAp2/3Dp2-6, pp. 138–141 (2019).
 14. Kengo Fujii, Masaki Yasugi, Hiotsugu Yamamoto, “Improvement of Visibility of Aerial Image in See-Through AIRR by Cutting Off Ambient Light Using Polarization Modulation,” in Laser Display Conference 2020 (LDC2022), LDC10-03(2020).
 15. Kengo Fujii, Kazunari Chiba, Ikuya Saji, Masaki Yasugi, Hiotsugu Yamamoto, “Touch Detection Using Scattering Light on Palm in an Aerial Guide with AIRR,” Proc. IDW’20, Vol. 27, 3Dp1-10L, pp. 531–534 (2020).
 16. Kengo Fujii, Masaki Yasugi, Hiotsugu Yamamoto, “Eye-Matching Video Calling System in See-Through AIRR by Cutting Off Ambient Light Using Polarization Modulation,” in International Workshop on Optics, Biology, and Related Technologies 2021 (2021).
 17. Kengo Fujii, Satoshi Maekawa, Hiotsugu Yamamoto, “Increasing luminance of aerial image

formed with AIRR by use of dual transparent spheres,” in Laser Display Conference 2021 (LDC 2021), LDC-3-03(2021).

18. Kengo Fujii, Masaki Yasugi, Hirotugu Yamamoto, “Aerial-Imaging Steganography by Use of a Transparent Object as the Key,” in JSAP-OSA Joint Symposium 2021, 12a-N404-7(2021).
19. Kengo Fujii, Hirotugu Yamamoto, “Aerial-Imaging Steganography with AIRR by Use of Transparent Objects as Decoding-Keys,” Proc. IDW '21, Vol. 28, pp. 235–238, FMC3/INP6-4 (2021).
20. Kengo Fujii, Masaki Yasugi, Shiro Suyama, Hirotugu Yamamoto, “Display and Camera System for Capturing Animal from the Front in Animal Experiments,” in Laser Display and Lightning Conference 2022 (LDC 2022), LDC10-03(2022).
21. Kengo Fujii, Masaki yasugi, Hirotugu yamamoto, “Optical System Capturing the User from the Front Through an Interactive Aerial Display,” in ODF'22, P-OTh-23(2022).

D. 国内学会発表

1. 藤井賢吾, 小貫健太, 山本裕紹, “再帰反射による空中ディスプレイにおける指先位置の検出,” 情報フォトニクス研究会第 10 回関東学生研究論文講演会 講演予稿集, P. 43 (2016).
2. 藤井賢吾, 伊藤秀征, 黒川菜緒, 森田渉吾, 小林都生, 菅田悠平, 山本裕紹, 大川猛, “FPGA を用いた PWM 音声出力による音楽演奏システムの設計と実装,” 第 17 回情報フォトニクス研究グループ研究会 (秋合宿) 講演予稿集, P-05 (2016).
3. 藤井賢吾, 小貫健太, 山本裕紹, “再帰反射による空中ディスプレイにおけるユーザー動作の観察,” 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会 講演予稿集, 16p-C42-11, P. 03-525(2016).
4. 藤井賢吾, 伊藤秀征, 前川聡, 山本裕紹, “AIRR による透明球復号型ステガノグラフィー,” Optics & Photonics Japan 2016 講演予稿集, 31aES5 (2016).
5. 藤井賢吾, 小貫健太, 伊藤秀征, 山本裕紹, “偏光変調を利用した AIRR における空中像の接触検知,” レーザー学会学術講演会第 37 回年次大会 講演予稿集, H307pVIII10 (2017).
6. 藤井賢吾, 久次米 亮介, 山本 裕紹, “AIRR におけるビームスプリッターの微小振動を用いた空中像からの音の発生,” Optics & Photonics Japan 2017, 31aP19 (2017).
7. 藤井賢吾, 小貫 健太, 河合 一樹, 伊藤 秀征, 山本 裕紹, “偏光変調を用いた AIRR における内部カメラを用いた空中像の接触検知,” 第 7 回バイオメトリクスと認識・認証シンポジウム, S4-21, pp. 116–117 (2017).
8. 藤井賢吾, 久次米 亮介, 山本 裕紹, “AIRR を用いた近赤外線を集束による熱空中像の形成,” 第 65 回応用物理学会春季学術講演会 講演予稿集, 19p-P2-12(2018).

9. 藤井賢吾, 柿沼 遼太, 伊藤 秀征, 八杉 公基, 山本裕紹, “再帰反射素子をスピーカーに用いた AIRR によるシースルー空中ディスプレイ,” 第 12 回新画像システム・情報フォトニクス研究討論会, A-6, p. 28 (2018).
10. 藤井賢吾, 下瀬 主揮, 伊藤 秀征, 河合 一樹, 八杉 公基, 中島 聖生, 岩根 透, 竹田 幸弘, 山本 裕紹, “穴あき再帰反射材によるライトフィールド空中像の形成時のモアレの除去,” 第 19 回情報フォトニクス研究グループ研究会 (秋合宿) 講演予稿集, P. 47 (2018).
11. 藤井賢吾, 下瀬主揮, 八杉公基, 岩根透, 中島聖生, 山本裕紹, “AIRR によるライトフィールド映像の空中投影,” Optics & Photonics Japan 2018, 31aP10 (2018).
12. 藤井賢吾, 山本裕紹, “透明球を組み合わせた AIRR における再帰反射素子の面積の削減,” 第 66 回応用物理学会春季学術講演会 講演予稿集, 11a-M114-3 (2019).
13. 藤井賢吾, 柿沼遼太, 八杉公基, 山本裕紹, “AIRR による空中表示を用いた視線一致型ビデオ通話システムの改良と試作,” 第 20 回情報フォトニクス研究グループ研究会 (秋合宿) 講演予稿集, P-13 (2019).
14. 藤井賢吾, 柿沼遼太, 山本裕紹, “シースルー型 AIRR における偏光変調を用いた空中像の見やすさの向上,” Optics & Photonics Japan 2019, 2pE2 (2019).
15. 藤井賢吾, 山本裕紹, “ハニカム構造を用いた空中ヒーター形成の可能性,” 第 67 回応用物理学会春季学術講演会, 13p-B415-14 (2020).
16. 藤井賢吾, 千葉一成, 佐事郁弥, 八杉公基, 山本裕紹, “AIRR を用いて形成された空中ガイドに対する接触検知,” Optics & Photonics Japan 2020, 16pC8 (2020).
17. 藤井賢吾, 前川聡, 山本裕紹, “再帰反射による空中結像における 2 つの透明球を用いた空中像の輝度の向上,” 映像情報メディア学会技術報告, Vol. 45, No. 9, 立体映像技術研究会, 3DIT2021-8 (2021).
18. 藤井賢吾, 前川聡, 山本裕紹, “面对称位置に設置された透明球を用いる AIRR のシミュレーション,” 第 68 回応用物理学会春季学術講演会, 19a-Z28-1 (2021).
19. 藤井賢吾, 前川聡, 山本裕紹, “AIRR に透明球を組み合わせた空中像ステガノグラフィーにおける復号像の輝度分布,” 映像情報メディア学会技術報告, Vol. 45, No.29, 3DIT2021-32 (2021).
20. 藤井賢吾, 郭浩通, 山本裕紹, “透明円筒を復号鍵とする空中映像ステガノグラフィーにおける異方的な結像特性,” Optics & Photonics Japan 2021, 29aB2 (2021).
21. 藤井賢吾, 八杉公基, 山本裕紹, “提示された映像に接近する動物を正面から撮影できる映像提示光学系,” 第 69 回応用物理学会春季学術講演会 講演予稿集, 23p-D315-5 (2022).