

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

題目(和文)	空中映像ユーザーインターフェイスのためのディスプレイ技術の研究
Title(English)	
著者(和文)	中尾勇
Author(English)	Isamu Nakao
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第12145号, 授与年月日:2021年12月31日, 学位の種別:課程博士, 審査員:山口 雅浩,熊澤 逸夫,中村 健太郎,金子 寛彦,小尾 高史
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12145号, Conferred date:2021/12/31, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

学位論文

空中映像ユーザーインターフェイスのためのディスプレイ技術の研究

東京工業大学大学院

総合理工学研究科 物理情報システム専攻

中尾 勇

2021年11月

## 目次

概要	1
1 序論	
1.1 本研究の動機	2
1.2 本研究全体の目的	2
1.3 本研究の方針	2
1.4 関連先行 UI の分析	3
1.5 具体的研究内容	6
1.6 想定される応用	6
1.7 論文構成	9
2 既存技術と課題	10
2.1 2次元実像表示	11
2.1.1 通常レンズ結像	11
2.1.2 二面直交リフレクターアレイ(DCRA)	12
2.1.3 再帰反射鏡空中像(AIRR)	14
2.1.4 屈折率分布型レンズアレイ(GRIN レンズアレイ)	14
2.2 2次元実像以外の表示方式	15
2.2.1 インテグラルイメージング	15
2.2.2 レンチキュラー方式	16
2.2.3 ピンホールアレイ方式、パララクスバリア方式	17
2.2.4 レイヤーディスプレイ方式	19
2.2.5 拡散板方式	20
2.2.6 画像積層方式	20
2.2.7 スキャン方式	20
2.2.8 水平視差動画ホログラフィ	21
2.2.9 全視差動画ホログラフィ	21
2.3 空中映像表示技術の比較	22
2.3.1 2次元と3次元空中映像の技術	22
2.3.2 表示性能比較	23
2.3.2.1 解像度	23
2.3.2.2 輝度・コントラスト	26
2.3.2.3 視域	27
2.3.2.4 シースルー機能	27
2.3.2.5 方式ごとの性能比較	30
2.4 表示以外の機能	31

2.4.1	ジェスチャー認識	32
2.4.2	触感	32
2.4.3	表示以外の機能のまとめ	32
2.5	2章まとめ	33
3	空中ディスプレイユーザーインターフェイスのユーザビリティの評価	35
3.1	目的	35
3.2	簡易空中ディスプレイ UI 装置	35
3.2.1	ハードウェアセットアップ	35
3.2.2	ソフトウェアコンテンツ	38
3.3	ユーザビリティ評価	40
3.4	実験及び解析結果	41
3.4.1	タスクごとの解析	41
3.4.2	因子分析	43
3.5	3章の結論、まとめ	45
3.6	課題	45
4	背景透過型空中ディスプレイ技術	49
4.1	はじめに	49
4.2	提案システム	50
4.2.1	全システム	50
4.2.2	DCRA	52
4.2.3	ホログラムミラー	53
4.2.4	波長分散補正	53
4.2.5	虚像抑制	53
4.2.6	虚像抑制の定量解析	57
4.3	実験	61
4.3.1	実験セットアップ	61
4.3.2	実験と解析結果	63
4.3.2.1	空中像観察	63
4.3.2.2	波長分散補正の評価	64
4.3.2.3	虚像抑制	67
4.4	本提案シースルー空中ディスプレイ表示方式の独自性と先進性	68
4.5	応用に関する議論	68
4.6	4章まとめ	68
5	総括	71
5.1	3章4章のまとめ	71
5.2	まとめ	71

5.3	今後の課題	72
5.4	今後の展望	73

謝辞

## 概要

本研究では、空中ディスプレイに触るように操作するユーザーインターフェイス (UI) が、操作の斬新性及び医学的感染防止の観点から将来のユーザーインターフェイスとして必要と考え、研究対象とした。最初に本研究の意義の確認のため、被験者と簡易的表示法によるユーザビリティ評価を行い、操作性に優れユーザーに魅力的な UIであることを示した。また、既存方式の機能分析より、背景透過性が望まれると考え、独自の新規アイデアであるホログラフィック回折素子と 2 面直交リフレクターアレイを用いたシースルー空中ディスプレイの提案を行った。この提案は同時に、これら 2 つの技術要素の課題とである波長分散と虚像を解決または低減する効果ももち合わせる。本研究では、実験用セットアップでの提案方式の実験実証により、シースルー空中ディスプレイ UI 実現の可能性を示した。

## 1 序論

### 1.1 本研究の動機

1985年茨城県つくば市で開催された国際科学技術博覧会において、まだ珍しかったということもあり眼鏡式のステレオグラム動画が多くのパビリオンで展示された[1-1]。ここで初めて3D映像を観たという人も多かったのではないかと思われる。また出展者側も、立体映像であることを強調するために飛び出し感を強調したコンテンツを多用したようである。このとき気が付いたことは、大きく物体が飛び出したシーンでは非常に多くの観客が手を伸ばしてその映像物体に触ろうとしていたことであった。2010年前後になると、ジェスチャーを中心としたナチュラルユーザーインターフェイス(NUI)という概念が提案され実用化されるようになった[1-2,1-3など]。このような中で、NUIとして提案されていた技術が本当に自然なUIなのかという疑問が提起された。本研究の趣旨に密接に関連するジェスチャーに関して述べれば、フラットパネルディスプレイ(FPD)上に表示されるコンテンツに誘導されるかのように、ユーザーが通常空間でジェスチャー操作を行うことが本当に自然な操作なのかという疑問をあげることができる。顧客中心あるいはユーザーエクスペリエンス[1-4]という視点から、1985年の国際科学技術博覧会の観客の行動を考慮すれば、ユーザーは手前に表示された物体を認識し、それを操作することで自然さ感じると考えるのが自然ではないだろうか？

### 1.2 本研究全体の目的

本研究では、1.1のような動機のもと、空中に生成した映像に触れるように操作するUIが、ユーザーに自然に受け入れられるUIである仮説を立てた。すでにこのようなUIの提案はされているが、残念ながらまだ本格的な普及には至っていないように思われる。本研究の目的は、このようなUIの本格普及のために必要な要素をクリアにし、研究開発の指針を示すことにある。

上記仮説の検証と、新規表示技術により、高い確度で社会に受け入れられる技術開発を目指す。

### 1.3 本研究の方針

後述するようにジェスチャーの技術は非常に進歩していることから、現時点で普及が進んでいない理由は表示技術的にあるかもしれない。しかし仮に優れた空中映像を表示できたとして、その良さがどこにあるは、十分に分析評価はされていない。この点をクリアにすることは、今後の開発方針や設計を進める上で必須と考えられる。またこれまでに普及した

関連 UI の使われ方を分析することで、空中映像 UI のあるべき姿からも、改善あるいは新規に加えるべき性能・機能がクリアになり、その点の研究開発を進めることができる。本研究では、以下二つの方針で進める。

- 1) 空中映像 UI の良さをクリアにして、開発設計の方向性を示す。
- 2) 関連 UI の普及分析から、改善あるいは新たに加える性能・機能をクリアにし、技術提案をする

#### 1.4 関連先行 UI の分析

1.3 節であげた指針 1) は、良さはユーザーが決めるものなので、被験者によるプロト機などを使った評価をしなければ、良さを示すことはむづかしい。しかし、指針 2) は過去の関連技術普及から、空中映像 UI が社会実装されたときの意義、言い換えるとどうすれば普及するかについて予測することができる。本節では、いくつかのこれまでの UI の例から、普及つまり社会で役に立つようにするのに必要な要素が何かを考えてみる。

最初に UI の斬新さという点を、タッチモニターの普及を例にとり考察する。タッチモニターが上市されるまでの機械式のスイッチ類に慣れたユーザーにとっては、タッチモニター上でのタップ操作やスワイプ、ピンチイン/アウトという操作は非常に斬新な UI であったとされる。技術的には、抵抗膜、静電容量、超音波などによる接触検出と、FPD モニターへの出力のフィードバックとの組み合わせによるインターフェイスである。ここで、この斬新さだけで普及が進んだと考えるのは、洞察が不十分と思われる。この手法は、機械式に比べ触感が少ないあるいは不自然なことによるフィードバックの不十分さや、操作の確度が低い（誤動作が多い）といったマイナス点も多い。このようなマイナス面を差し引いても広く普及している理由は、ディスプレイ上のどこにでもいつでも入力と出力を自在にレイアウトできるグラフィカルユーザーインターフェイス(GUI)の高い自由度によるというの是一個の理由であろう。タッチモニターはスマートフォンやタブレット端末での UI として使われることが多いが、これらの応用では主に操作対象は端末でネットワークと連携して動作するアプリケーションソフトである。タッチモニター上で入力と出力情報を、それぞれ関連した相応しい時間と場所に設計することで、機械式 UI ではできない多様な操作ができるようになり、これによっていくつかの欠点を補うメリットが得られたことが普及の理由であろう。現在、タッチモニターは当たり前前の操作になっており、斬新さを感じるユーザーはほとんどいないにも関わらず、UI として広く使われているのはこのような理由によるものと考えられる。タッチモニターによる UI を例にあげると、斬新さだけで普及が進むと考えるのは無理があると思われる。さらに、斬新さというのは非常に主観的な感性によるものである。従ってユーザビリティの主観的統計評価が必要である。



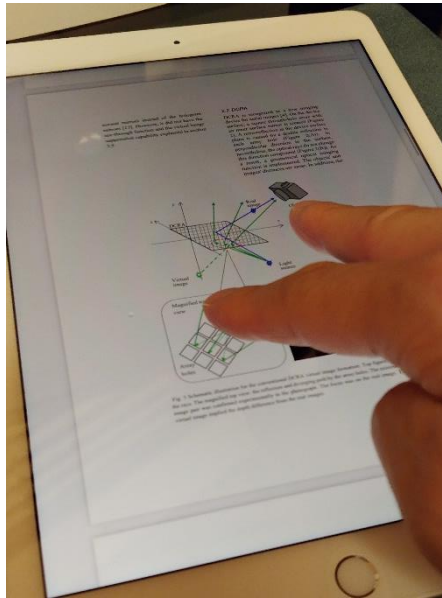


図 1.1 タッチモニターでのピンチイン/アウト

次に、本論文の研究対象である空中映像 UI にユースケースが近いと思われるスマートグラスの状況を考察することで、空中映像 UI の今後の普及の可能性を探る。ここではスマートグラスと AR グラスは同義語として扱う。シースルーでない没入型のヘッドマウントディスプレイはここでの検討の対称とはしない。スマートグラスの機能としては、ユーザーがスマートグラスよりも遠方に空中像を観察できる。光学的には虚像を観察するものが多い。またユーザーの視線に近い映像をスマートグラスに装着されたカメラで撮影でき、ネットワーク経由で第三者あるいはシステムや AI 等へのフィードバックすることができる。ネットワークはスマートグラス表示データの伝送、つまりユーザーへのフィードバックにも使用される。またユーザーの手や指を撮影し、空中映像と組み合わせたジェスチャー認識の機能も提案されている。さらに音声通話機能も付加される。ここではこのようなものをスマートグラスとして想定する。ユーザーはハンズフリーで様々な情報にアクセスできるほか、ユーザー視線の映像を見た第三者や AI はユーザーに対し指導や指示ができるため、産業用としては製造や検査、教育用などに使用されようとしている。また医療現場などでも使おうという動きがあると思われる。スマートグラスで用いられている技術は、表示以外に撮像、通信、音響、電力系などからなるが、表示以外は比較的一般的技術で成り立っていると考えられる。眼鏡同様に装着するというコンセプトから、典型的なパーソナル機器である。このため、表示に関わる部分は視力など個人差に対応する必要があるが、ユーザー個人に最適化をすることが可能である。逆説的に考えると、パブリックな使い方は不得意なシステムと考えることができる。パーソナルな装着機器の特徴である装着負荷や、今後高齢化に伴う老眼への対処など（遠近両用メガネのような対策など）、解決しなければならない課題もある。



図 1.2 Google ホームページより、スマートグラスで農業機械の組み立て作業をする様子

<https://www.google.com/glass/case-studies/>

以上のような考察より、空中映像 UI の普及のためには以下のような点がヒントになると考えられる

- 斬新さは市場導入に有用ではあるが、それだけでなく必然性のある機能や性能が加わっていないといけない。
- スマートグラスとの違いは、空中映像 UI は操作が主な UI であること、パブリックなデバイスであること
- スマートグラスとの類似性からは、操作対象が観察しやすくなければならない

一つの考え方として、類似するスマートグラスの欠点つまり装着負荷や光学系の個人最適化の課題を解決するという点に着目し、補完的に使うような使い方がある。スマートグラスと同様な産業用製造工程の一部で装着負荷を低減するために眼鏡型である必要性のないところで使用するということが考えられる。モバイル性を必要としない、製造や検査装置固有の機能として盛り込むような形態になるだろう。例えば、接触汚染が問題となる食品加工や医療機器の製造加工工程などの非接触操作などが考えられる。

もう一つは、スマートグラスがパーソナルであるのに対して空中映像 UI はパブリックあるいは少数複数人で使うような使い方とし、スマートグラスに比べて空中映像 UI に不足し

ている機能を付加していくような考えである。スマートグラスはユーザーが見ている風景画像を得ながらシステムや第三者が対象を認識しユーザーに情報などをフィードバックしている。空中映像 UI は操作を主とする UI であるので、はじめからシステムは操作対象を認識しており、スマートグラスと比較して不足しているのは、ユーザーが操作対象を観察しやすいかどうかという点に帰着することができる。2章で説明する空中映像の表示法は、ほとんどが空中像の背景が暗黒であったり投影装置が見えたりと、空中像そのものを操作する場合を除くと操作対象を観察するのは容易とは考えにくい。従って、背景や周辺にある操作対象が容易に観察できる機能が、スマートグラスとの類似性から導かれる必要機能と考えることができる。シースルーという機能はこれを実現する有用な方法と考えられる。

さらに、タッチモニターの考察から得られた、必然性のある機能を有しているかという点を考える。操作対象が容易に観察することができても、それは機械式の操作スイッチやレバーなどと基本的な機能は同じである。空中映像 UI が機械操作と比較した時の利点は、タッチセンサーと同様 UI デザインの自由度である。機械式は一度設置すれば臨機応変・迅速にスイッチ類を他のコマンドに変更することはできないが、空中映像 UI はタッチセンサーと同様、自在に表示や操作の種類、操作自体の有無などを容易に変更することができる。不要な時は空中像を消して操作をしないようにすることもできる。また、機械操作は触覚・力覚があるため、視覚情報の不足があってもこれらにより補うことができる。しかし、空中映像 UI は当面は触覚・力覚フィードバックは期待できないであろう。従って操作対象の観察しやすさという要素は非常に重要になってくる。空中映像の周辺や背後に操作対象が観察できるシースルー機能を付加することは、このような意味でも重要になってくる。

## 1.5 具体的研究内容

1.3 節、1.4 節での議論を鑑み、具体的な研究内容は、以下の二点に注力する。詳細は

- 1) 空中映像 UI プロトタイプを用いた被験者テストから、“良さ”が何かを抽出し、開発設計の指針を示す。
- 2) 操作対象をよりよく観察できるシースルー空中映像表示機能の提案と実証を行う。

これら2点に関して、3章、4章で詳細議論をする。

## 1.6 想定される応用

ここでは、1.4 節で議論した空中映像 UI の社会的存在意義の議論から導出できる、空中映像にシースルー機能が付加することができた場合の応用例を紹介する。

料理をする際に、電子書籍や Web site を利用することが多いが、料理をしている手や指には食品が付着しており、タッチセンサーを操作すれば画面に食品が付着する。また、センサー面に指で触れれば、食品の汚染にもつながる。ここで、シースルー機能をもつ空中映像 UI を端末画面に設置できれば、自由度の高い非接触 GUI が実現でき、料理のような手や指からの汚染が問題になるようなケースで有用である。同様な理由から医療現場でも利用することができる。

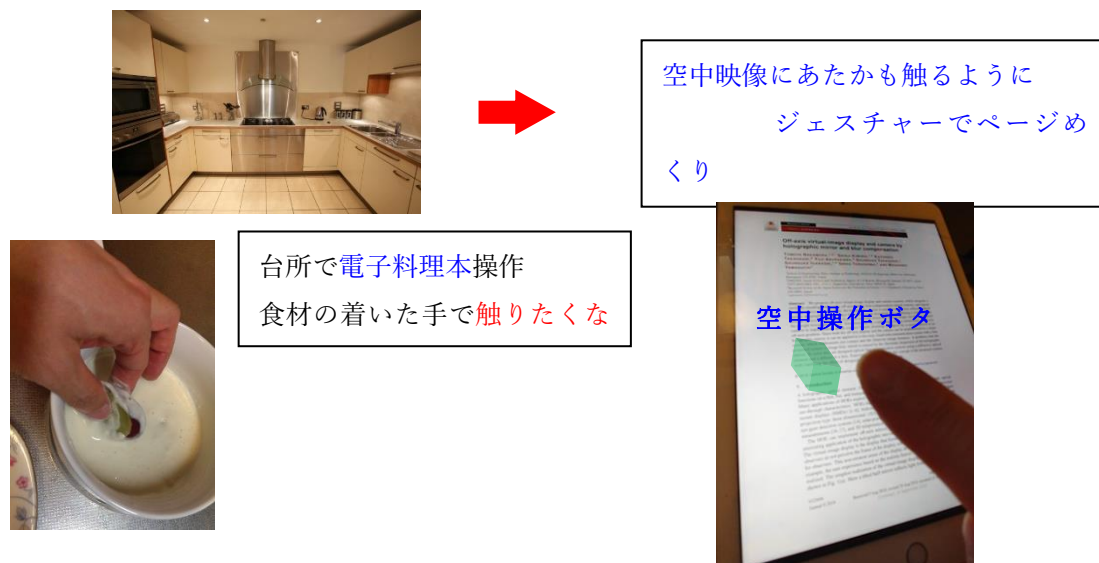


図 1.3 料理をしている時、食品汚染防止、食品付着防止目的での使用

二番目の応用として、テレビのリモコンに応用できるだろう。テレビ画面にシースルー空中映像 UI を導入し、必要に応じて画面の手前に空中映像のリモコンを提示してユーザーが操作する。通常のリモコンは、家庭では邪魔にとされることが多いが、なければテレビの操作ができない。また近年はテレビ放送の受信だけでなく、ネット接続などで機能が多くなっているので、必要な機能の操作スイッチだけを、ユーザーに応じた表示サイズで提示することができるだろう。

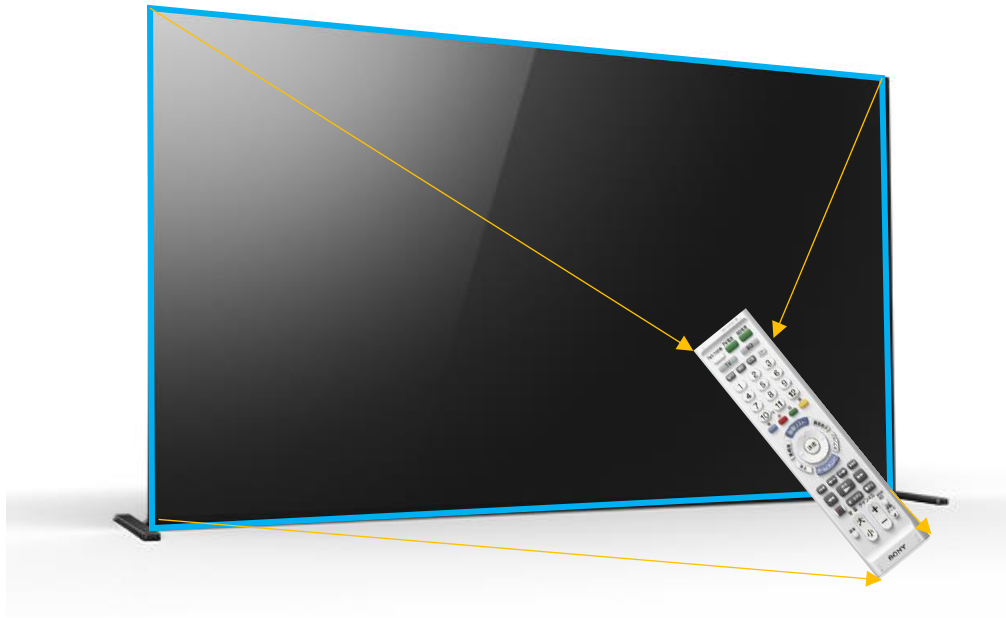


図 1.4 TV 用空中映像リモコン

三番目の例は、自動運転車用のハンドルである。自動運転車はドライバーが運転する必要がないので、ハンドルを装備する必要はない。しかし、故障や修理など何らかの理由でドライバーや整備士がハンドル操作をするケースはあるだろう。フロントガラスにシースルー空中映像 UI を設置することで、必要なときにハンドルを提示し操作をすることができる。

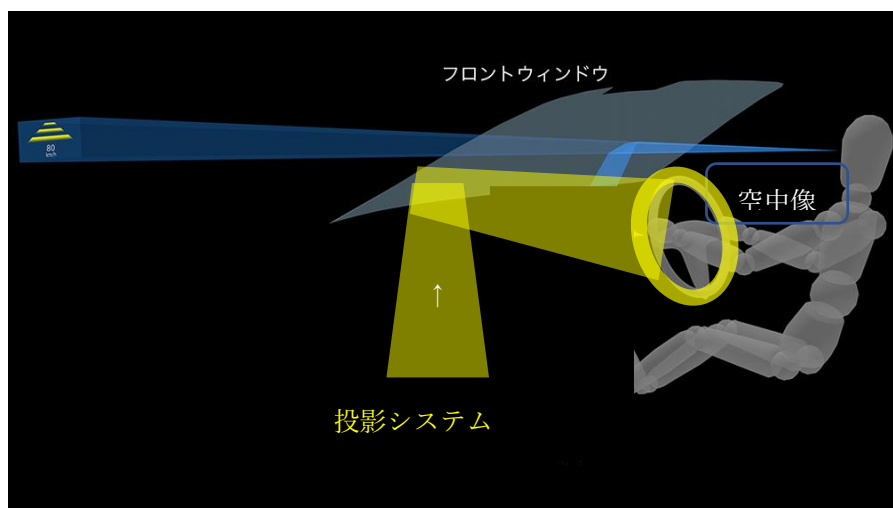
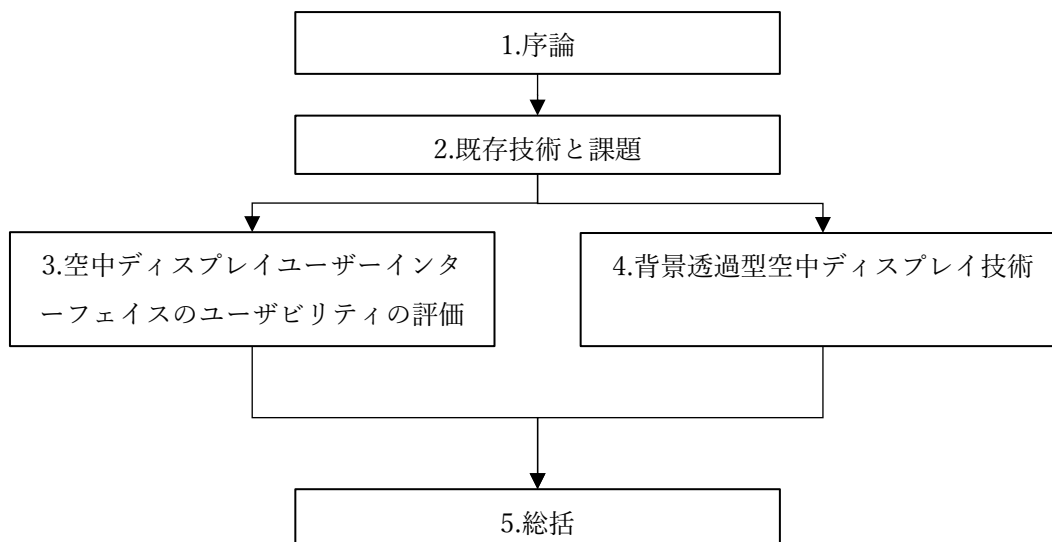


図 1.5 自動運転車用のハンドル：自動運転中は消滅

## 1.7 論文構成

本論文の構成は、以下の通りである。



### 参考文献

- 1-1) 3DTV and 3D Movie Technology 2nd edition: Articles 1996-2018 (English Edition), Stereoscopic Press
- 1-2) Interactions, Volume 17, Number 3 (2010), Pages 6-10, The way I see it: Natural user interfaces are not natural, Donald A. Norman
- 1-3) Brave NUI World: Designing Natural User Interfaces for Touch and Gesture, Daniel Wigdor, Dennis Wixon, 2011年4月, Elsevier
- 1-4) <https://www.nngroup.com/articles/definition-user-experience/>

## 2 既存技術と課題

本章では、既存の空中映像と UI の技術分析を行い、空中映像 UI としての性能及び機能面の過不足について議論する。特に 1 章で考察し抽出したシースルー表示技術は、網羅的に表示技術を考察した後、本章中盤で議論する。後半にはジェスチャーなど表示以外の部分も考察する。

空中映像 UI は、全体としてはソフトとハードウェアから成っている。本論文本章では、ハードウェアのみに絞って議論する。はじめから中盤まで、表示を中心に構成要素となり得る技術を説明、は性能・機能で比較検討、最後に重点的に検討すべき項目をまとめる。以下表 2.1 に構成要素となり得る技術をリストアップする。

表 2.1 空中映像 UI の構成要素となる技術

機能	大分類	中分類	小分類	節
2次元表示	通常レンズ結像			2.1.1
	AIRR			2.1.2
	DCRA			2.1.3
	GRIN レンズアレイ			2.1.4
3次元表示	光線再生	レンズアレイ方式	インテグラルイメージング	2.2.1
			レンチキュラー	2.2.2
			ピンホールアレイ・パララクスバリア	2.2.3
		レイヤーディスプレイ方式	レイヤーディスプレイ型	2.2.4
		拡散板方式	拡散板方式	2.2.5
	体積ディスプレイ	画像積層方式		2.2.6
		スキャン型		2.2.7
		ホログラフィ	水平視差	2.2.8
			全方向視差	2.2.9
表示以外	ジェスチャー	コンピュータビジョン	2.4.1	
		超音波	PMUT、CMUT	2.4.2
	触感	超音波	PMUT、CMUT	2.4.2

## 2.1. 2次元実像表示

本節では、既存表示技術の考察をリストアップし、その特徴を考察する。下表に空中映像UIの構成要素となり得る表示技術をリストアップする。

### 2.1.1. 通常レンズ結像

2次元空中ディスプレイは、比較的単純な通常結像システムで投影することができる。最も単純なケースを図 2.1(A)に示す。一般的な凸レンズや凹面強の結像で生成される実像を光軸の後方から観察すれば空中像を観察することができる。このため2次元の空中映像を投影することは非常に単純であると言えることができる。このとき、空中像は結像の式(2.1)で示される像位置に(2.2)で示される倍率で形成される。

$$\frac{1}{s_0} + \frac{1}{s_1} = \frac{1}{f} \quad (2.1)$$

$$\frac{s_1}{s_0} = m \quad (2.2)$$

ここで、 $s_0$ 、 $s_1$ 、 $f$ 、 $m$ は、それぞれ、物体側、像側結像距離、レンズの焦点距離、像倍率である。ただし、周囲の環境照明により結像レンズやそのホルダーなどが観察できるような場合は、ユーザーはこれらに注意を奪われ空中映像を観察することは困難である。このため、容易に空中像を観察できるようにするには、光路を構成する構造物や周囲の環境を黒色にまた暗くすることが必要である。また、フレネルレンズなど大きな開口のレンズを用いることで、比較的大きな空中像を形成することも可能である。一方、単純なレンズによる結像は、レンズの収差による色割れや歪像など、ディスプレイとしての課題が存在する。カメラレン

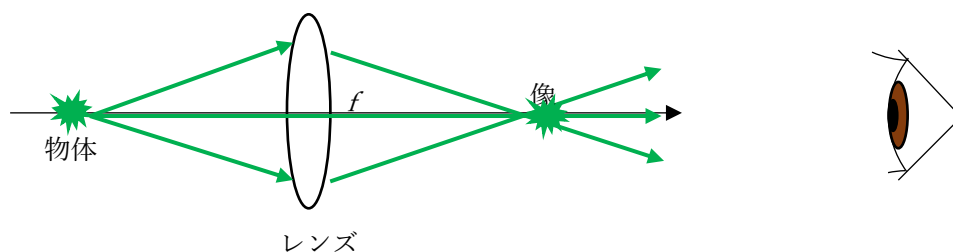


図 2.1(A) 通常レンズ結像の光路



ズや投影レンズのように、組合せレンズなどで各収差を補正することも原理的には可能であるが、レンズの開口の大きさを考慮すると現実的ではない。このような課題を解決するために、以降に示すいくつかの投影光路や投影デバイスが提案されている。

また、レンズの代わりに凹面鏡を使い、空中像を結像する方式の提案されている。図 2.1(B)に示すように、凹面鏡を対向して張り合わせ図下部中央に物体を置くと、上部凹面鏡中央に設けた開口部に空中像を結像する。

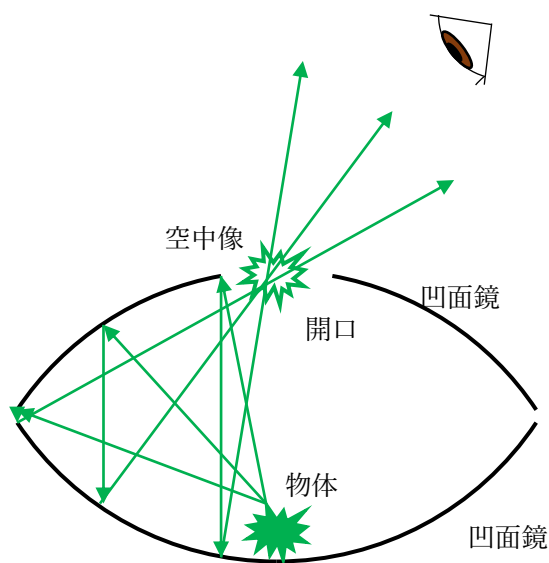


図 2.1(B) 凹面鏡による空中像結像

### 2.1.2. 2面直交リフレクターアレイ (Dihedral Corner Reflector Array, DCRA)

2000年代に情報通信研究機構の前川、神戸大学の新田らが発明した、幾何光学的な結像デバイスである[2-1]。図 2.2 に示すように、この基板上に正方貫通穴がアレイ状に形成されており、貫通穴内壁面が鏡面処理されている。ユーザーは貫通穴正開口形状の対角線方向から観察する。観察側の背面にある点光源から射出した光線は、各貫通穴に入射した後、隣接する内壁鏡面で各一回ずつ二回反射することで、基板面内では再帰的に反射する。一方基板面垂直方向の光線成分は変化しない。このような光路をとることにより DCRA 基板面に対し面対称な位置に幾何光学的に像を形成する。この際の結像は、理想的な通常のレンズ結像とは異なり、点像から点物体の光路長はどの貫通穴を通るかによって大きく異なり、その

差は投影する光の波長より十分大きい。このため、波面のレベルでの結像を議論することは非常に困難である。解像度に関しては、2.2.1.1 で詳細を議論する。また結像位置が DCRA 面に対して対称であることから、立体構造をもつ物体の像を投影すると奥行関係が逆転する Pseudo scopic な像が形成される。このため立体像を投影する場合は、2 次像を投影したり、元の物体を逆構造にするなどの工夫が必要になる。2 次元映像を投影する場合には単純な結像投影をすることができる。もう一つの特徴として、光軸を DCRA 面内のどこにとっても同じ結像が得られるという点があげられる。このため光軸に垂直な  $xy$  面での  $xy$  方向の光学アライメントが不要になる。

このような特長があるため、2 次元像の空中映像投影に相応しいと考えられるが、二つの大きな課題がある。一つはこのデバイスの製造である。100  $\mu\text{m}$  程度の周期で数百  $\mu\text{m}$  の厚さの基板に貫通穴を形成する必要がある。また内壁鏡面も一定程度の平行度と鏡面平坦性が必要のため、一般的なリソグラフィで作製することは困難である。筆者らが最初に行った試作では、Spring 8 シンクロトン放射光による平行度の高い軟 X 線を用いた LIGA (Lithographie Galvanoformung Abformung) と呼ばれる、小さな吸収断面積を利用したレジストの深い感光によるアスペクト比の高い加工方法を利用した[2-2]。現在では、貫通穴内壁 4 面のうち、結像光路を一つの対角方向に隣接する 2 面のみに限定するような使い方に限定することで、熱ナノインプリントという方法での作成が可能になっている。もう一つの大きな課題は虚像の生成である。貫通穴内部では、内壁鏡面での 2 回反射だけでなく、1 回だけ反射し外部に伝搬していく光路が大きな割合で存在する。これらは主に虚像を形成し、光路によっては空中映像の観察位置から観察することができる。反射回数が実像光路よ

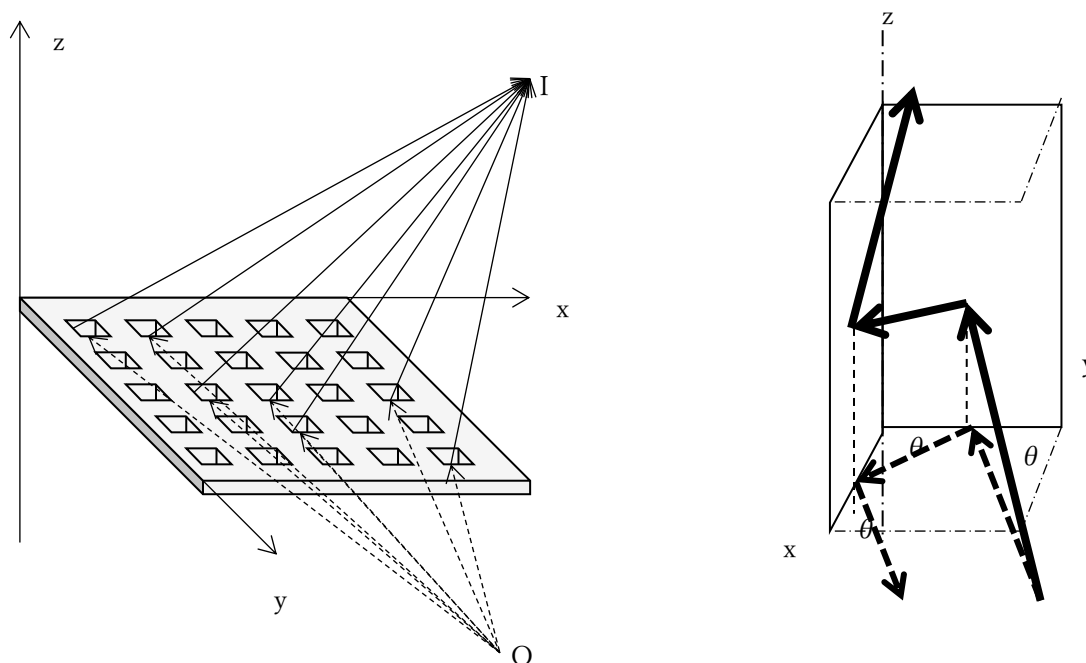


図 2.2 DCRA の結像メカニズム。点 O と I は点光源と点像を表す。

り少ないこともあり、虚像は明るく見える。像の画角内の方向は実像とは異なるが、奥行深さが物体と同じなので、ユーザーにとっては実像観察の障害になる。この虚像に関しては、抑制方法も含めて5章で詳細議論を行う。

解像度は、貫通穴アレイの構造と結像距離で決まる。この点は、2.2.1.1 で他方式と比較しながら詳細を述べる。

### 2.1.3. 再帰反射鏡空中像 (Aerial Image by Retro-Reflector, AIRR)

AIRR は、宇都宮大学の山本らが考案したハーフミラーと再帰反射ミラーを組み合わせることで空中映像を投影する方式である[2-3]。図 2.3 に示すように、光源であるディスプレイから放出された光線は、ハーフミラーで一部が反射し、再帰反射ミラーに入射する。再帰反射ミラーでは入射光路を戻るように再帰反射するので、元のディスプレイで像として結像するが、戻りの光路でも再度ハーフミラーを通るので、一部は透過し空中に像を結ぶ。

再帰反射ミラーが結像素子として働くため、これによって結像性能が決まる。詳細は 2.3.2.1 で DCRA と比較して議論する。空中像の輝度に関しては、結像光線がハーフミラーを2回透過するため、単純には最大で元の 1/4 に減衰する。この点は 2.3.2.2 で議論する。

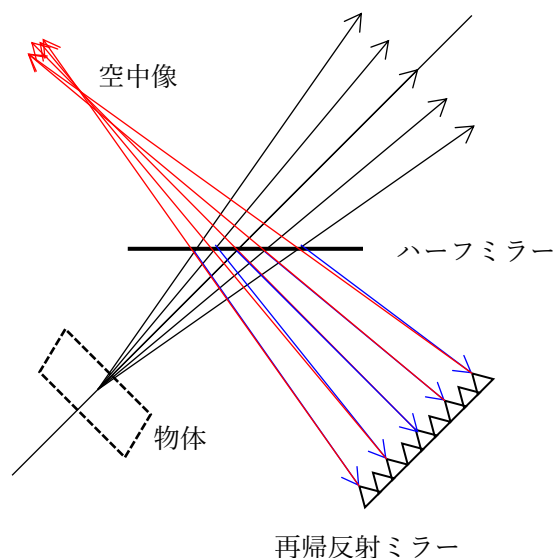


図 2.3 山本らによる AIRR 空中映像光路

### 2.1.4. 屈折率分布型レンズアレイ (Graded Index (GRIN) lens array) [2-4]

屈折率分布型 (GRIN) レンズアレイによる投影は、各レンズが正立像を結像することによって空中像を形成する。インテグラルイメージングと似ているが、Pseudoscopic 像回避のための要素画像の反転処理が不必要である。要素画像が光軸に対して垂直な平面に配置されている場合には、インテグラルイメージングと同様像の結像位置も面内に制約されるの

で、二次元空中映像表示に向いていると考えられる。GRIN レンズ（セルフオックレンズとも呼ばれる）は、導波路の断面動径方向に 2.3 式で示すように屈折率の分布を持たせた構造となっている。

$$n(r) = n_1 \left( 1 - \frac{(r\sqrt{A})^2}{2} \right) \quad (2.3)$$

$n$ 、 $n_1$ 、 $r$ 、 $A$  はそれぞれ屈折率分布、光軸上の屈折率、半径、勾配係数である。

このような屈折率分布により、導波路内で図 2.4 に示すような光路が形成され結像する。比較的長い光路長を要する用途に使われるケースがあり、手術用の硬性内視鏡内部に設置される結像光学系などに応用されている。レンズの長さにより、像の正立倒立が決まり、条件によっては無限遠の結像にもなる。当然、波長依存性もある。このため、光路長などに工夫が加えられている。このようなレンズをアレイ状にしたものが GRIN レンズアレイである。理想的な結像デバイスのように思われるが、課題は波長分散とディスプレイ用に十分な大きさのデバイスの製造が困難と思われ、これまでにそのような報告はない。

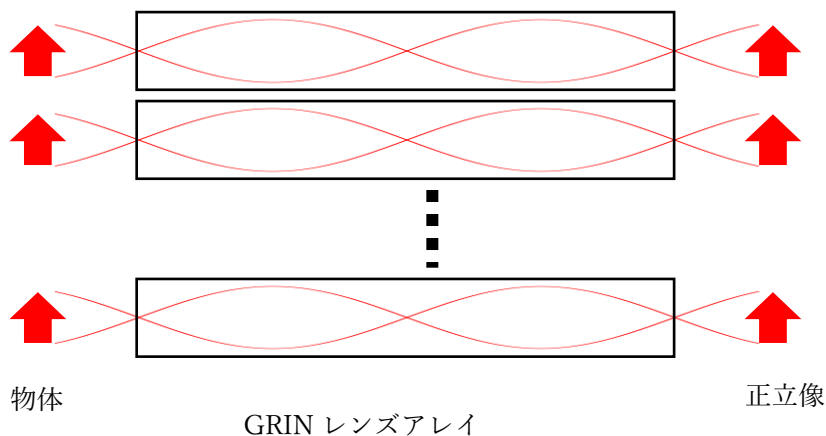


図 2.4 GRIN レンズアレイの光導波の様子。波長の整数倍伝搬で正立像が結像する

## 2.2. 2次元実像以外の表示方式

### 2.2.1. インテグラルイメージング

1905 年に Lipmann によって発明された 3 次元像の撮影・投影方法である [2-4]。図 2.5 に示すように、撮影時は物体の手前にレンズアレイを配置し、各レンズの像位置に写真フィルムや画像センサーを設置・要素画像を取得する。再生は撮影した各要素画像を、各撮影位置に置いたフィルムへの照明あるいはディスプレイ表示により再生する。各要素画像から放射された光線は、撮影時の逆光路を伝搬し 3 次元像を形成する。投影する像から逆伝搬計算した要素画像を上記ディスプレイに表示することにより、3 次元像を投影することがで

きる。2.1.2.1 のホログラフィに比べレーザーによるスペックルが存在しないなどの特長があるが、形成する3次元像の奥行き方向でレンズの焦点深度から外れた領域の解像度は低下するという課題もある。

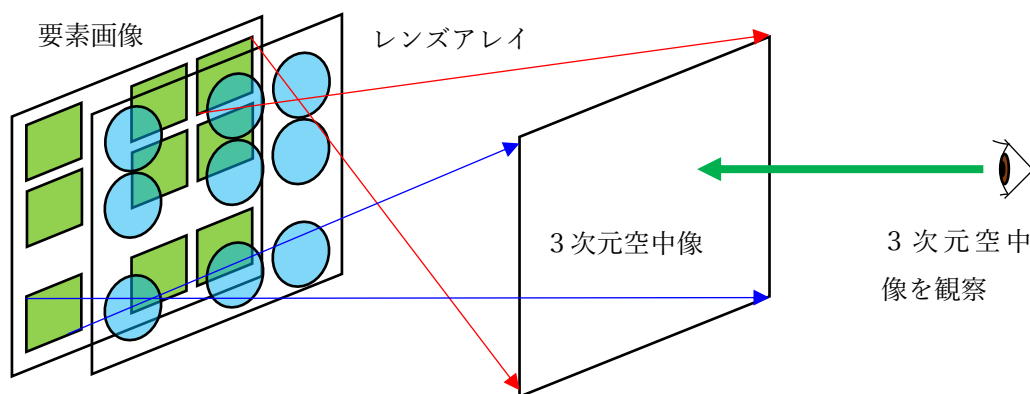


図 2.5 インテグラルイメージングの模式図

### 2.2.2. レンチキュラー方式[2-6]

一見、インテグラルイメージングに似ているが、3次元像を結像しているわけではなく、図 2.6 に示すように二次元ディスプレイが発した光線を、レンチキュラーレンズにより画素ごとに対応する左右の目に入射するように光線の角度を合わせている。この図の例では、赤線が右目、青線が左目に入る光線を示している（線の色と波長は関係ない）。図からわかるようにユーザーが観察できるディスプレイからの距離は限られている。また光線の角度を分割することで左右の目に入る光線の視差数を増やすことができるが、現実にはディスプレイの解像度とレンチキュラーにより制限される。観察位置を左右に動かすと、運動視差が観察されるが、視差数を超えるまで動かすと逆視という左右の目が観察すべき画像が一瞬逆に目に入る逆視と言われる現象が起こる。さらにユーザーは輻輳により立体視するが、フォーカスとの相違がある。これとの因果関係は明確にはなっていないが、ユーザーが不快感を示す場合がある。

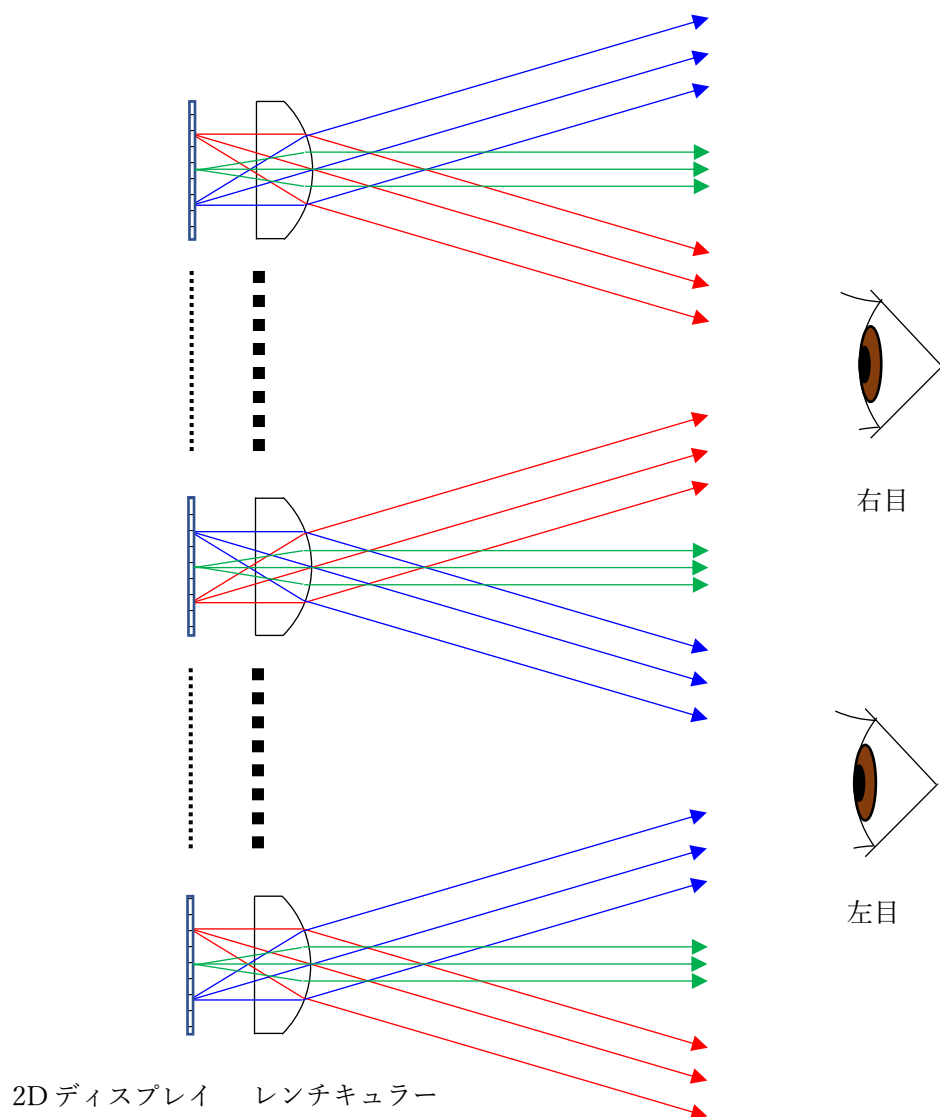
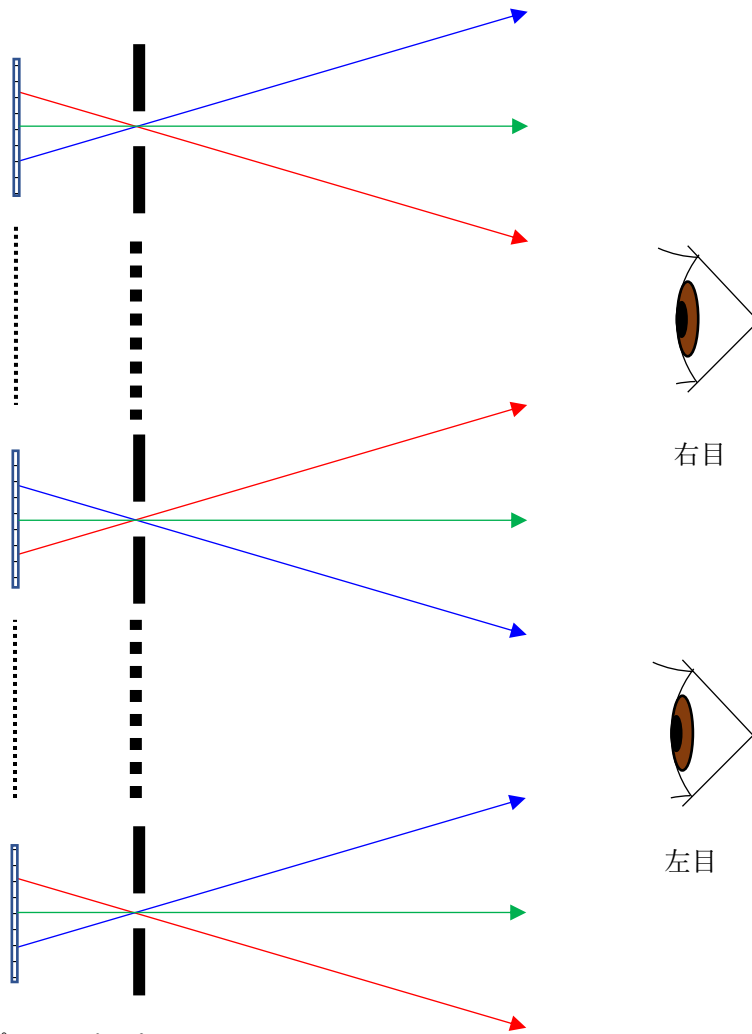


図 2.6 レンチキュラー方式の模式図

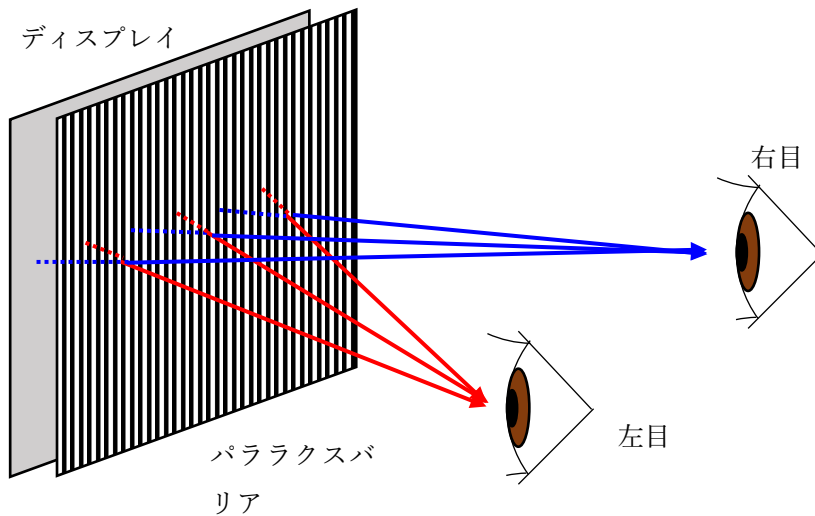
### 2.2.3. ピンホールアレイ方式、パララクスバリア方式

レンチキュラー方式と同等なメカニズムを、パララクスバリア方式あるいはピンホールアレイ方式と呼ばれる構造で実現することができる。ピンホールあるいはレンチキュラーと呼ばれる短冊状の開口が、レンチキュラーレンズと同じ機能をする。複数視差による運動視差が得られるが、ユーザー観察領域の制限、逆視、輻輳とフォーカス相違などの課題のほかに、光利用効率の低下という課題もある。しかしレンチキュラーに比べ構造が単純なため製造上のメリットがある。



2D ディスプレ ピンホール

図 2.7 ピンホール方式の模式図



点線は、パララクスバリアの背後の光線を表す

図 2.8 パララクス方式の模式図

#### 2.2.4. レイヤーディスプレイ方式

二枚の透過型液晶と光拡散バックライトを用いて、所望の光線を生成し空中像を形成する方式である[2-7]。バックライトは白色点光源の集まりで、各点から等方的に光線を発している。2枚の液晶で各々1点ずつ空間に2点を規定すれば、バックライト光源上の対応する1点から発した光線を一義的に決めることができる。このように複数の光線を、投影したい三次元像の1点を通るように生成する。そしてこのような点像を、3次元像になるように多数形成する。これにより空中3次元像が形成される。点像から二本以上の光線が眼球の瞳から入射すれば、ヒトの目は像にフォーカスすると言われている。そのような条件を満たすよ

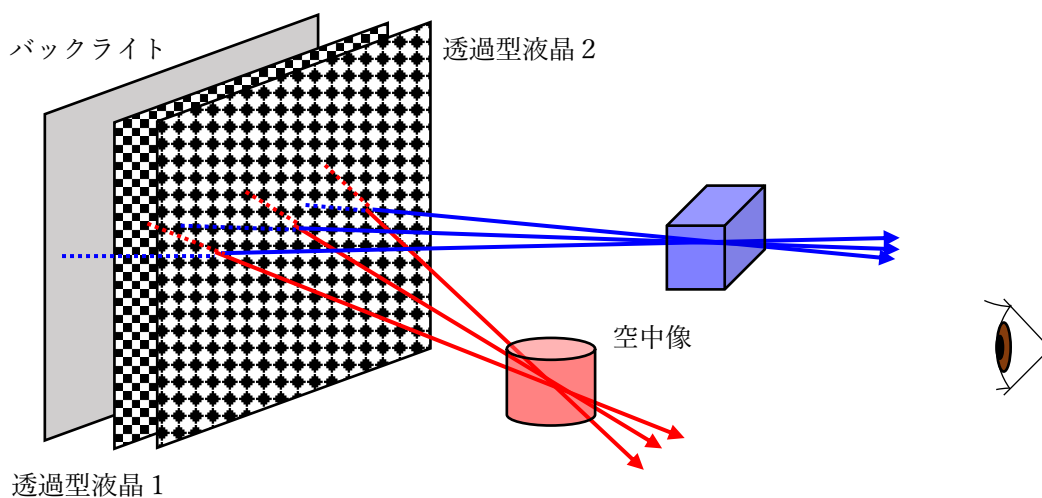


図 2.9 レイヤーディスプレイ方式の模式図



うに光線的设计・計算をする必要がある。

### 2.2.5. 拡散板方式

複数のプロジェクターにより透過型拡散スクリーンに多視点映像を重畳投影する[2-8]。このスクリーンは小さな発散角で透過するように設計されており、透過した各視点映像はユーザーの左右の目に所望の角度で入射する。これに合わせた視差画像を投影することで、ユーザーは三次元画像を認識する。

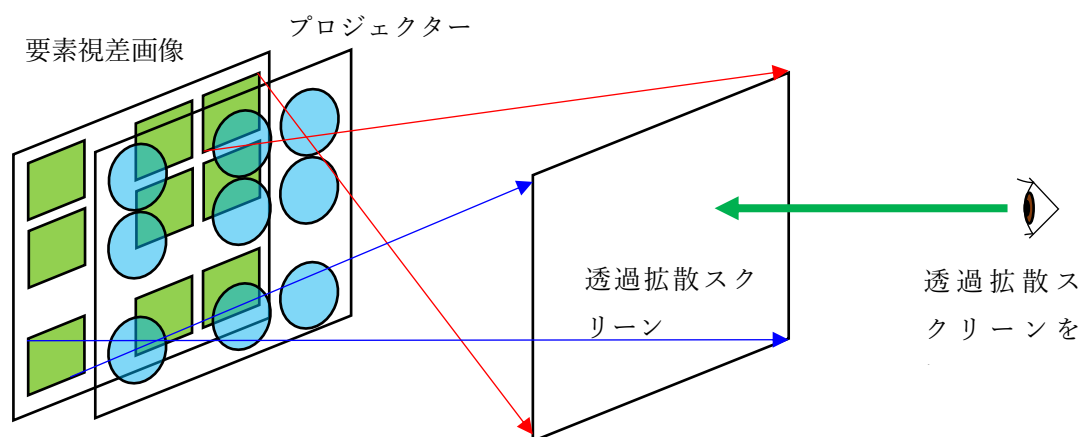


図 2.10 拡散板方式の模式図

### 2.2.6. 画像積層方式

画像積層型は、2次元の画像を、時間あるいは空間的に重畳させて3次元像を生成する方式である。光学技術としては2.1.1などで示した2次元方式に含まれると考えられるので、ここでの説明は省略する。

### 2.2.7. スキャン型

レーザー光の高エネルギー状態で生ずるプラズマ発光を利用することで、3次元の空中像を生成することができる。長短パルスレーザーを待機中で集光すると、酸素や窒素がプラズマ状態になる。ヒトの残像時間内にこの集光点をスキャンすることで、像として認識することができる。このときの発光は等方的に放射されるので、視域を制限しないという特長がある。ただし、プラズマ発光のスペクトルはプラズマ種に依存するため、カラー表示の問題や、Occlusionの問題が生ずる。

### 2.2.8. 水平視差動画ホログラフィ

最初の動画ホログラフィは、S. Benton らが 1989 年頃に開発した水平方向のみに視差をもつ HPO(Horizontal Parallax Only)と呼ばれる動画ホログラフィであろう (図 2.11) [2-9]。この方式のハードウェアは、変調器に音響光学変調素子を用い、水平方向には音波の進行波にホログラム変調信号を入力しポリゴンミラーと同期させて 1 次元の水平視差像を形成する。垂直方向はガルバノミラーでスキャンすることで水平視差のみの 3 次元空中映像を形成する。その後いくつかのバージョンアップがなされている。

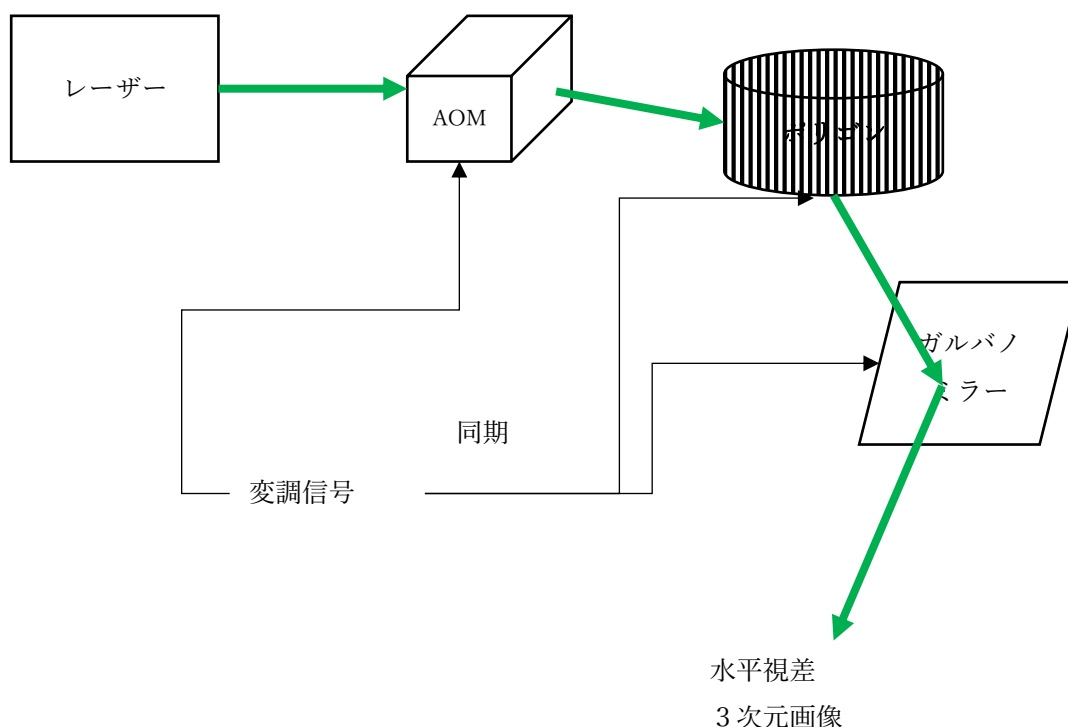


図 2.11 S. Benton らによる水平視差動画ホログラフィの模式図

### 2.2.9. 全方向視差動画ホログラフィ

一方、空間光変調器の解像度や処理系・伝送系の情報量が増えてくると、CGH(Computer Generated Holography)を、液晶をベースにした空間光変調器(Spatial Light Modulator SLM)に出力し、水平・垂直の両視差をもつ動画ホログラフィの開発が進められた。例えば、情報通信研究機構(NICT)の山本らは、3300 万画素の液晶空間光変調器 3 枚を用い、さらに 3 通りの時分割を行い、40mm 対角、奥行き 40mm の上下両視差のある視野角 15° の動画ホログラフィ像の投影実験に成功している (図 2.12) [2-10]。波面のレベルで像を再構成するホログラフィは理想的な 3 次元表示技術に思えるが、再生照明光にレーザーを使う必要

がある。このため再生像にスペックルが重畳されてしまい、ノイズとして観測されてしまうという欠点がある。

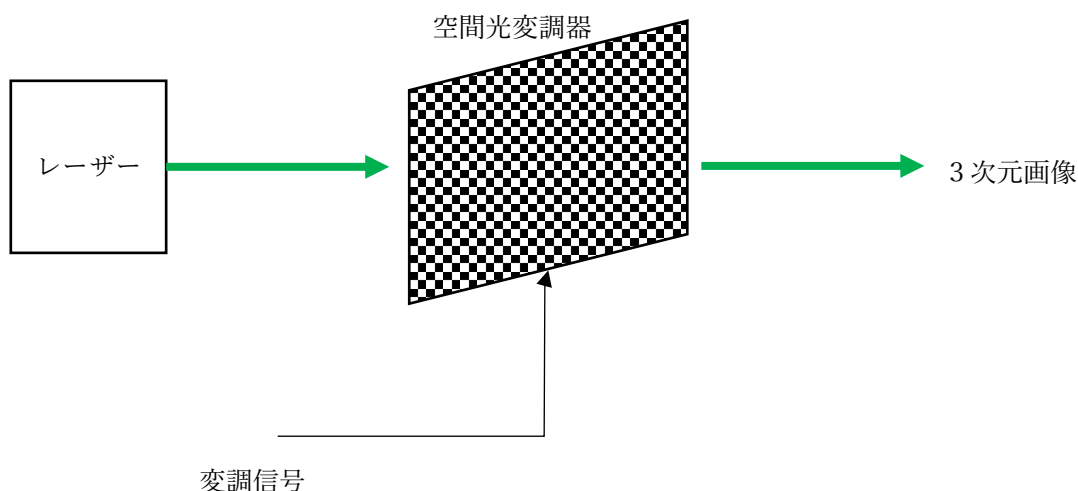


図 2.12 全方向視差動画ホログラフィの模式図

### 2.3. 空中映像表示技術の比較

#### 2.3.1. 2次元と3次元空中映像の技術

前節、前々節では、特徴的な2次元及び3次元の空中ディスプレイ方式をピックアップし、特長と欠点をあげた。これら以外にも、ライトフィールド方式などいくつかの方式が存在する。本節ではこれらを包括的に大きく2次元と3次元かに分類し、それぞれの特徴をまとめて比較・議論する。最初にUX視点で、次に技術的な視点で考える。

奥行方向に空中像を操作するあるいは表示することが、UIあるいはUXとしてどの程度有意かという点を考えてみる。既存のUIは、ピアノの鍵盤、キーボードや家電リモコンのスイッチ、自動車や産業機器の操作パネル、マウスを動かす面など、平面に配置されていたり平面で操作をしたりするものがある。一方で、航空機の操縦桿や鉄道車両、建設機械、手術支援ロボットの操作レバーなどでは、ユーザーの位置に対して手前から奥あるいはその逆の動きの操作を行う。後者に共通するのは、実際に動かす操作対象に奥行き方向の機械的運動が含まれていて、ユーザーの手の動きと操作対象の動きに関連性がある点であることがわかる。これはユーザーの心理的・感覚的な整合性がユーザビリティに重要な役割を果たしているものと考えられる。逆に考えると、奥行き方向への機械的な運動制御を目的としない操作の場合は、空間の平面内での手や指の操作でも十分なユーザビリティを提供できる可能性があるという仮説を立てることができる。

次に技術視点で2次元と3次元表示に関して包括的概念的に俯瞰する。機能的に3次元表示は、2次元表示を包含する。典型的な例として、2.2.2.10で紹介したCGHをSLMで投影するケースを想定し、単純化して3次元表示を考える。この例では一辺が40mmの立

方体中に任意の3次元立体像を20 fpsで投影することができる。しかしこの空間はジェスチャーには十分な大きさではない。仮に同じ画質と視域を保ったまま縦横奥行きがそれぞれ4倍の空間に3次元空中像を投影すると仮定すると、2.1 GピクセルのSLMが必要になる。8K放送用のディスプレイの画素数が高々数十メガピクセルであることを考慮すると、このようなSLMが開発されるまでは相当の時間を要することが予想される。また、仮にこのようなデバイスが実現したと仮定しても、デバイスへのデータの転送レートは1Tbps程度必要になり、またそれをリアルタイムで処理する処理系やメモリー、ストレージも必要になる。一方、2次元表示は通常の2次元ディスプレイは投影方法をどうするかという点を検討するだけで完結する。つまり、3次元表示には情報システム全体の進歩を必要とする要素をもち合わせているという点が、包括的に両者の技術を俯瞰した場合の大きな違いである。

もちろん、このような議論は極端なものであり、例えば Sanchez らはホログラムを用いた light field 方式の3次元ディスプレイでより現実的な空中映像 UI(3D touch)のデモンストレーションを行っているのもまた事実である。このような UI・UX と情報技術的背景から、本研究の方向性は2次元表示での空中映像 UI の研究とする。

### 2.3.2. 表示性能比較

ここでは、前節で述べたように2次元表示方法に限定して基本性能について考察する。方式としては、主に通常のレンズ結像、DCRA、AIRRの3方式に関して、主に光学解像度、輝度・コントラスト、視域を取り上げる。

#### 2.3.2.1. 解像度

通常のレンズ結像の光学解像度は、レンズの収差などに依存する。回折限界での解像度が得られれば、解像度は式3.3のように表すことができる。

$$\frac{\lambda}{2 \cdot NA} \quad (2.3)$$

ここで $\lambda$ と $NA$ はそれぞれ光の波長、レンズの開口数である。可視域波長であるので $\lambda=500\text{nm}$ 、レンズの開口が大きいことから、 $NA=0.25$ 程度とすると $1\mu\text{m}$ 程度の解像度が得られるということになるが、開口及び $NA$ が大きく、単一のレンズで構成せざるを得ない、波長範囲が広い、フレネルレンズを使用するなどの制約から、補正できるのは球面収差のみで、コマ収差、非点収差、像面湾曲、色収差などは補正できない。筆者らの観察ではVGA 17インチPCモニターの画素が辛うじて確認できる程度であった。このことから解像度は数十 $\mu\text{m}$ 程度と推測できる。

DCRA の解像度は、2.1.2 で示すように、点光源から発する全ての結像光路が、像面へ投影する貫通穴の形状の重ね合わせで決まる点広がり関数(Point Spread Function PSF)で決まる。図 2.13 は光線追跡計算で求めた開口形状の対角方向の PSF である。結像距離によって解像度は低下し、80mm では  $150\mu\text{m}$  程度まで広がる。DCRA の結像では概ねこの程度の空間解像度が得られるものと考えられる。薄い基板上に形成される DCRA は、設置によっては重力の影響で生ずる歪みなどで解像度が低下する場合もある。図 2.14 は重力による歪みを考慮し、重畳した PSF のフーリエ変換から求めた MTF の空間周波数依存性である。点は実測、線は計算結果で、この場合は解像度が 1mm 程度まで低下していることがわかる。

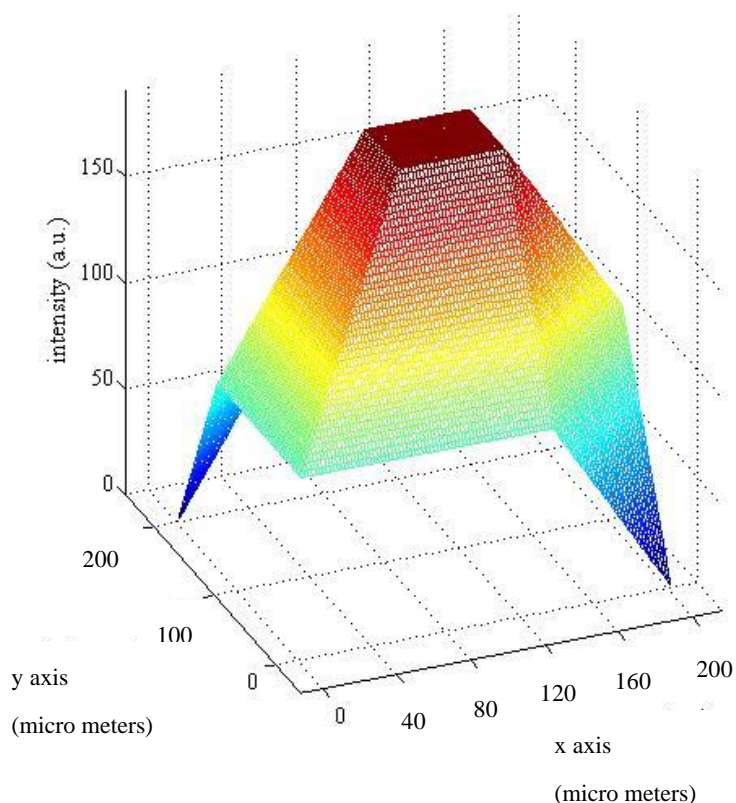


図 2.13 DCRA による点広がり関数、DCRA を構成する貫通穴の投影パターンの重ね合わせ

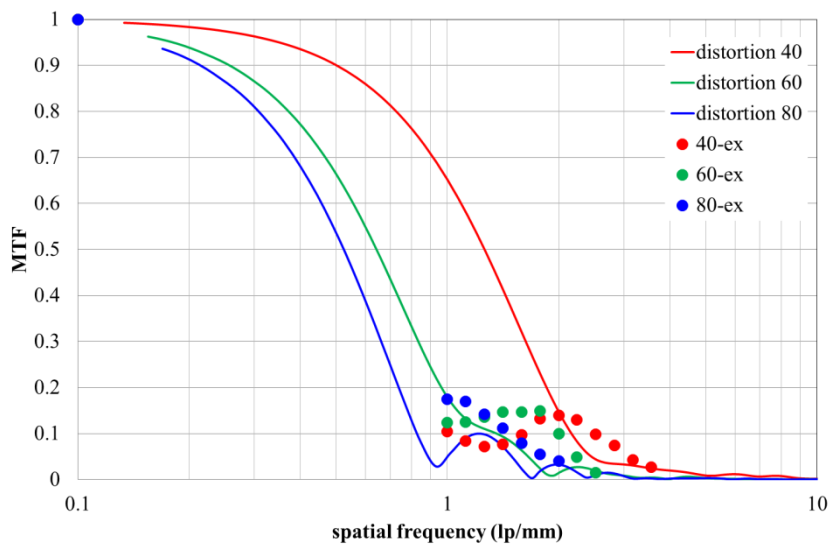
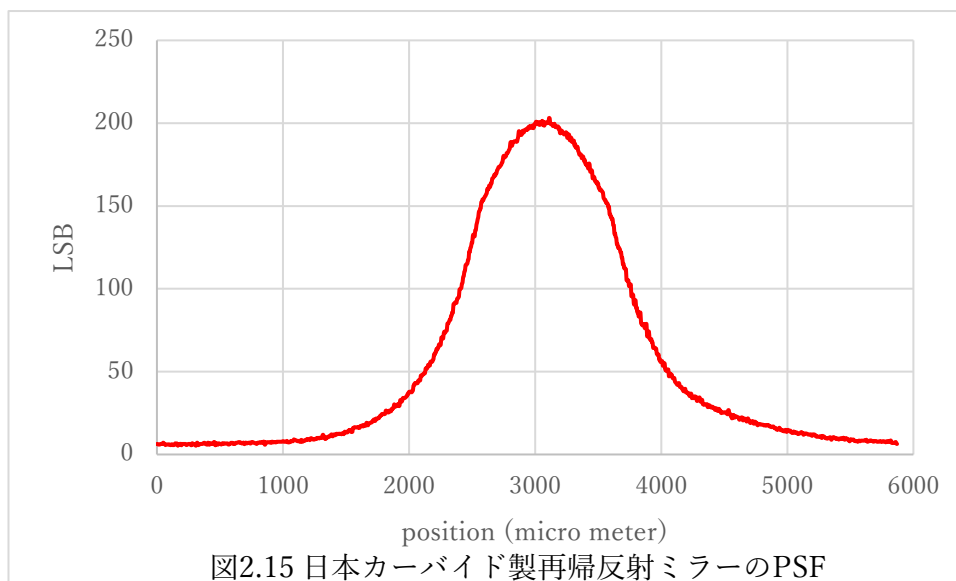


図 2.14 計算と実測による MTF の空間周波数依存性。重力による貫通穴の変位と角度変化を計算に導入。赤、緑、青のデータは、結像距離がそれぞれ 40mm、60mm、80mm。

AIRR 方式では、再帰反射ミラーの性能が解像度を定める。大きくはビーズ型とプリズム型の二通りの方式がある。道路標識の反射板などにも使われるため、広く使われているが、製造各社の技術詳細やノウハウは公開されていない。第一には構造の完成度が解像度を決めていると思われる。一例として日本カーバイド社製の再帰反射ミラーの PSF を測定した結果が図 2.15 である。AIRR の投影光路を用いて対物レンズの焦点を仮想点光源とし、結像距離 100mm の像位置にイメージセンサー面を置いて測定した。結果らわかるように、PSF は約 1.24mm でありこの程度の解像度が得られる。

GRIN レンズアレイの解像度は、各 GRIN レンズの解像度が像の解像度を定めると考えられる。導波過程での波面収差が影響を及ぼすので各 GRIN レンズ、あるいはアレイ状に実装する際の品質によるところが大きい。理想的な完成度で回折限界までの解像度が得られれば、2.3 式で示す解像度が得られる

以上をまとめると、最も解像度が高いのが通常のレンズ結像、2 番目が DCRA、最も低いのが AIRR 方式ということになる。



### 2.3.2.2. 輝度・コントラスト

空中映像の輝度は元の投影物体であるディスプレイの輝度に依存する。このため、ダークレベルと空中映像輝度の比であるコントラスト議論する。空中映像輝度は光の結合効率として考える。ダークレベルも環境の外光によるもの、元のディスプレイを含む投影システムによるものと分類される。ここでは、環境を定義することは困難なので、後者のみを比較する。前者の関連事項は別途4章で議論する。

結合効率は、各方式とも結像素子の開口が同じ設計になると仮定し、この開口に入射する光線について考える。通常のレンズ結像では開口に入射した光線は、レンズ界面やフレネル構造によるマイクロな散乱・回折などを除けば、無反射コーティングを施すことによりほぼ全ての光線が空中映像の輝度に寄与する。

DCRA は、貫通穴アレイを保持するための壁など構造体必要なため、貫通穴に入射する光量比は限定される。さらに結像に寄与する光線は、貫通穴内部では2回反射に限られる。この割合は貫通穴のアスペクト比と入射角に依存する。パリティ・イノベーションズ社の前田らによれば、同社のDCRAでは100mmの結像距離（設計値）に対し20～30%の光利用効率とのことである。将来、透明構造体の内部に波長以下の厚さのDCRAを構成するミラー一面構造が実現できれば、貫通穴の開口比による効率低下は回避できる。

AIRRは結像素子での結合効率以外に、ハーフミラーを2回透過することによる効率低下を考えなければならない。単純にはこれだけで効率は1/4に低下する。液晶のように偏光を有するディスプレイを投影する際に、ハーフミラーを偏光ビームスプリッター(Polarization Beam Splitter PBS)とし、ハーフミラーと再帰反射ミラーの間に1/4波長板(Quarter Wave Plate QWP)を置くことで、この部分の効率低下を原理的には完全に回避することができる。PBSは、図2.3の光路平面方向に垂直偏光した光(s偏光)を反射、平面内

に平行な偏光(p 偏光)を透過するような光学素子である。また、QWP は光学軸の一つに位相を  $\pi/2$  遅らせることにより直線偏光を円偏光に、あるいは円偏光に変換する素子である。QWP を 2 回透過することにより、元の直線偏光とは直交した直線偏光に、あるいは元の逆回りの円偏光に変換される。このような効果により、ハーフミラーを 2 回透過することによる結合効率 1/4 への低下を回避することができる。このようなシステムは光ディスクなどのレーザー光路では一般的に使われている。ただし、これには再帰反射ミラーは偏波面に影響を与えないということが条件になる。また光ディスクなどと異なり、空中映像に应用する場合は PBS や QWP を大型にしなければならない。再帰反射ミラーに関しては、ビーズタイプのビーズ充填率による効率低下を除くと、DCRA のような原理構造的な効率低下要因はないと考えられる。

### 2.3.2.3. 視域

通常のレンズ結像の場合は、レンズの開口数 NA により視域が決まる。例えば NA=0.25 であれば視域は  $\pm 30^\circ$  である。しかしながら、2.1.1 で述べたように組合せレンズ等による収差補正が現実的でないため、空中映像としては歪像が大きく、像が観察できる限界より正しい映像表現という点で限界に達する。

DCRA は、2.1.2 及び図 2.2 に示すように、デバイス面任意の位置に貫通穴のアスペクト比を小さくすることで、入射角を大きくとることができる。しかしその際、面に垂直に近い反射せず透過する光線の角度範囲も大きくなる。構造設計による因子が大きく寄与するが、岩瀬らによれば、典型的な視域は  $\pm 30^\circ$  程度と報告されている [2-11]。

AIRR の視域は、各構成デバイスの開口と再帰反射ミラーの再帰反射角依存性で決まる [2-3]。宇都宮大学の山本らによれば、ビーズ型の場合  $\pm 45^\circ$  に達するとの報告がある。

### 2.3.2.4. シースルー機能

操作対象をよりよく観察できる必要性は 1 章で議論した通りである。そのための機能として、シースルーつまり背面が観察できるかどうかを考察する。光学の知識を持たない一般のユーザーからよく期待を込めて求められる要望として、ディスプレイや投影装置越しではなく、通常のような環境の背景空間に空中映像を投影して欲しいと言われることがある。SF 映画などでこのような表現があるため、一般ユーザーの期待があるのは自然なことと考えられる。空中映像を投影するための光線のみを、機械構造をもたない何らかの手段で屈折や反射させて像生成し、環境光は何らこれらの影響を受けずにユーザーが観察できれば、このような要望に応えることができる。しかしながら、空気以外には何もない空間で、このような屈折や反射により像を生成し、なおかつ環境光には影響を与えない状況をつくることは非常に困難である。ユーザーの要望に近いディスプレイとして、通常の LCD や有



機EL、LEDディスプレイの構造を工夫することで、パネルに光透過性をもたせたシースルーディスプレイが提案されている。背面カメラで取得した画像情報に基づいた情報を透明ディスプレイに表示することで、新しいUXを提案している。



図 2.16 シャープ液晶シースルーディスプレイ 同社ホームページより抜粋  
<https://blog.sharp.co.jp/2019/12/17/21848/>

一方、東工大の中村らは、ホログラムミラーを用いた虚像観察システムに、操作しているユーザーの姿を撮影するためのカメラ撮像系を加えた、虚像空中映像システムを提案している[2-12]。この研究の特長は、DOE (Diffractive Optical Element)によるホログラムに対する波長逆分散と拡散板を用いて、HOEで生ずる波長分散を補償している点である。背景の観察を目的としているわけではないが、光路中のホログラムミラーは虚像光線以外を透過する。背後のカメラにより視線ずれのない双方向テレビ電話のUIとして期待されている。

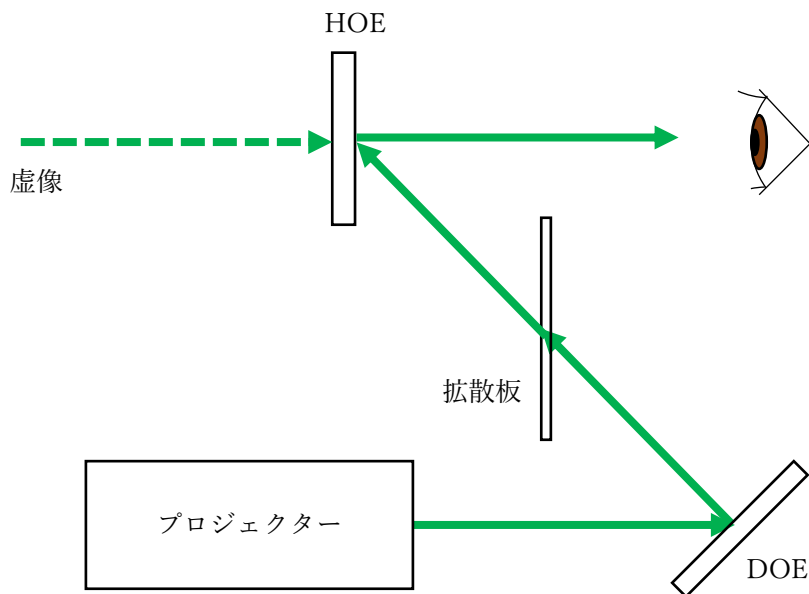


図 2.17 HOE を用いた虚像空中像表示の模式図

表 2.1 でリストアップした技術の中で、シースルーの報告がされているのは、全視差ホログラフィと AIRR である。情報通信研究機構の涌波らは HOE からなるスクリーンにホログラフィックプロジェクターで投影することによって 3 次元空中映像を投影し、同時にシースルー機能も実現している [2-13]。本来この研究は大きな像サイズと視域を同時に確保することが目的であったが、同時にシースルー機能を実現した点が興味深い。しかしながら、3 次元空中映像を空中映像 UI として利用するには、スペックルノイズや解像度、視野角、カラー表示、さらに 2.2.2 で議論した情報システム全体の向上が必要になるという課題も残っている。

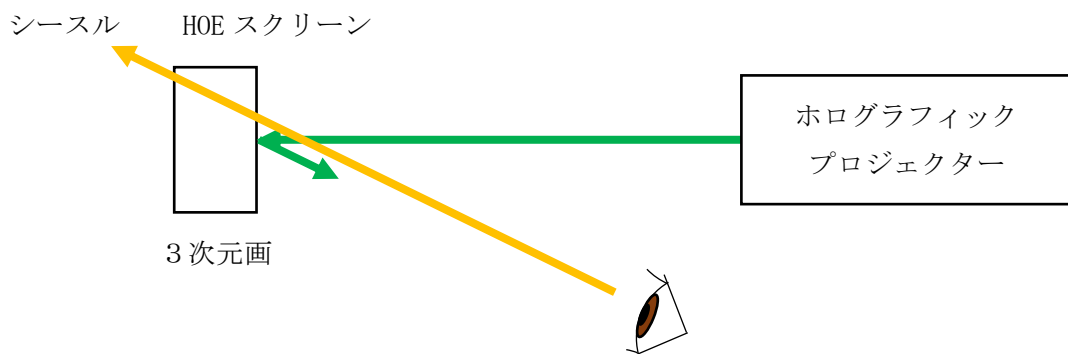


図 2.18 ホログラフィックプロジェクターと HOE スクリーンによるシースルー 3次元ディスプレイ

2次元シースルー空中映像の表示としては、宇都宮大学の山本らが2.1.2で述べたAIRR方式の光路の順序を変更することで実現している[2-14]。結像素子としては再帰反射ミラーを用いるため、前述のように解像度に懸念が残る。また背景光はハーフミラーで半分に低下する。1/4波長板と偏光ビームスプリッターによる偏光光学系を用いると、空中像輝度の低下は避けられるが、背景光は偏光制御されないためランダム偏光とすると、背景輝度は同様に半分に半分

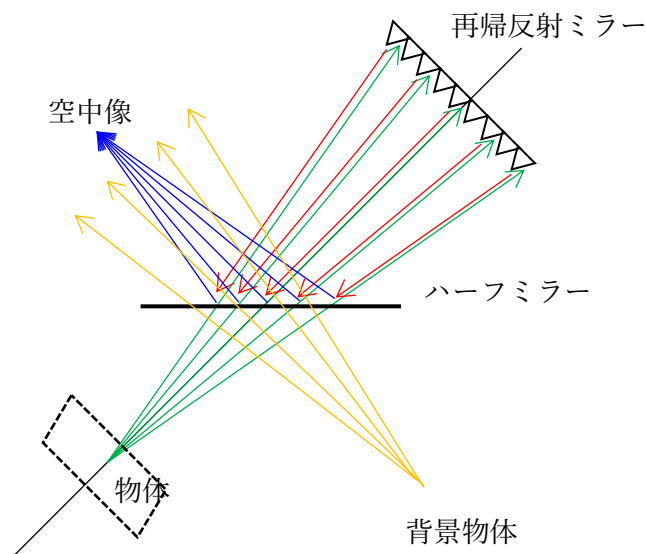


図 2.19 山本らによる AIRR の光路を変更することでシースルー機能を実現。ハーフミラーのため透過性能の制約がある。

### 2.3.2.5. 方式ごとの性能比較

ここまで議論してきた既存の空中映像表示方式の特徴を表 2.2 にまとめる。

表 2.2

	光学系解像度	輝度結合効率	視域	シースルー	その他
通常レンズ結像	数十 $\mu\text{m}$	100%	$\pm 30^\circ$ 以下	不可	フレネルレンズ想定。歪像で決まる視域は小さい。色収差顕著

DCRA	100~200 $\mu$ m	20~30%	$\pm 30^\circ$	不可	光軸をどこにでもとれるが、虚像が生成する
AIRR	1mm 程度	10%程度	$\pm 45^\circ$	構成によっては、背景透過率の低いシースルーが可能	偏光光学系は相応しいデバイスの入手困難
GRIN レンズアレイ	数十 $\mu$ m	数十%と推定	NA による $\pm 30^\circ$ 程度	不可	GRIN レンズ NA0.5 程度、
インテグラルイメージング			NA による $\pm 30^\circ$ 程度	不可	各レンズの NA で視域、解像度が決まる
レンチキュラー			NA による $\pm 30^\circ$ 程度	不可	NA で視域、解像度が決まる 輻輳・フォーカスによる不快感
パララクスバリア/ピンホールレンズアレイ			構造による $\pm 30^\circ$ 程度	不可	構造で視域、解像度が決まる 輻輳・フォーカスによる不快感
レイヤーディスプレイ				不可	
水平視差ホログラフィ				HOE スクリーンに投影するシースルーのデモ例あり	
全視差ホログラフィ					

#### 2.4. 表示以外の機能

ここまでは主に表示の性能について議論したが、本節では UI としての必要な他の機能に

ついて議論する。ジェスチャー認識、触感、その他表示を含む機能について俯瞰する。

### 2.3.1 ジェスチャー認識

ジェスチャー認識は、カメラ撮影などによるコンピュータービジョンを用いた形状や色、動きなどから、最近では深層学習なども用いて手や指など物体を認識する。それ自体で独立した UI でもある。ここでは、空中映像と組み合わせたときの特長について考える。

ジェスチャーは一般に自遊空間でのヒトの動きを認識し、形状や動きをコマンドに割り当ててシステムへの入力とする。その際、ヒトが動く空間は、システム側は座標を決めているが、ユーザーは認識できていない。大型の通常ディスプレイに表示したビジュアルな指針を示すことはできても、ユーザーの認識が完全にシステムの座標と一致することはない。ここで、ユーザーがジェスチャーを行う空間に空中映像を投影する。空中映像はシステムの座標上で管理され投影される。空中映像の仮想物体にコマンドを割り当てておけば、ユーザーがそれを観察し何らかのジェスチャー動作をすれば、割り当てられたコマンドがシステムに送信される。つまりユーザーの認識する空間座標とシステムの座標が一定の誤差範囲で一致する。この点がシステム側から見た時の、空中映像にジェスチャーを組み合わせる最大の利点である。例えば、スイッチを押す自然な動作つまりキュー(Cue)を出すコマンドは、空中映像がない場合の認識は難易度が高い。しかし空中映像と組み合わせれば、キューを出す操作物体を空間的に割り当てておくことで、認識の確率を大きく向上することができる。一方で、ユーザーから見た時の空中映像 UI の利点に関しては、十分な科学的な検証は行われていない。この点は、本研究 3 章にて検証を行う。

### 2.3.2 触感

ユーザーが物体に機械的に接触した際には触感を感じ、操作の応答を触感として与えるのが自然な UI であろう。東京大学の篠田らは超音波フェーズドアレイによる超音波波面合成により空間の任意の位置での触感提示を行っている。また、フェーズドアレイを構成する小型の要素超音波発生器として、圧電 MEMS 超音波トランスデューサ(Piezo MEMS Ultrasound Transducer PMUT)や静電容量 MEMS 超音波トランスデューサ(Capacitance MEMS Ultrasound Transducer CMUT)の開発も進んでおり[2-15]、これによるフェーズドアレイが実現されれば小型軽量な超音波触感デバイスが実現されるだろう。またこのような超音波は、反射波による物体の位置検出も可能であり、ジェスチャーのための物体検出手段としても期待されている。

### 2.3.3 表示以外の機能のまとめ

以下のようにまとめることができる。ジェスチャーは技術が十分発展しており、システム側からは空中映像により空間座標を定めるという点で重要な意味をもつ。触感は提示と物体検出の両方の側面で原理的な提案がされており比較的遠い将来の実現が期待される。

## 2.5. 2章まとめ

以上のように、本章では空中映像表示方法を中心に、技術全体を俯瞰してきた。情報技術全般の現状の考察から、本研究では2次元表示に注力する。3章で行う検討に用いるような、単純なレンズ結像でも空中像は生成できる。1章で導出されたシースルー機能には本章では重点的に分析を行った。その結果、現時点で十分なシースルー性能を有する空中映像表示方式は存在しないと考えられる。

## 参考文献

- 2-1) Satoshi Maekawa, Kouichi Nitta, Osamu Matoba, “Transmissive optical imaging device with micromirror array,” Proc. SPIE 6392, 63920E 2006
- 2-2) Y. Utsumi and T. Kishimoto: J. Vac. Sci Technol. B 23 (6) p.2903, Nov/Dec 2005
- 2-3) Hirotsugu Yamamoto, Shiro Suyama, “Aerial Imaging by Retro-Reflection (AIRR),” SID 2013. digest, 895
- 2-4) Jun Arai, Fumio Okano, Haruo Hoshino, and Ichiro Yuyama, “Gradient-index lens-array method based on real-time integral photography for three-dimensional images,” Appl. Opt. 37 (11), 2034 1998
- 2-5) M.G. Lippmann, “Epreuves Reversibles Donnant la Sensation du Relief”, J. Phys., Vol.7, No.1, pp. 821-82
- 2-6) <https://lookingglassfactory.com/>
- 2-7) Wetzstein, Gordon; Lanman, Douglas R.; Hirsch, Matthew Waggener; Raskar, Ramesh: “Tensor Display: Compressive Light Field Synthesis Using Multilayer Displays with Directional Backlighting,” ACM Trans. Graph., 31, 80 (2012)
- 2-8) Shoichiro Iwasawa, Masahiro Kawakita, and Naomi Inoue, “REI: an Automultiscopic Projection Display – Development a Many-unit Projection Display Syatem -,”, Proc. 3DSA (Three Dimensional Syatem and Applications) 2013, Selected Paper 1 (2013)
- 2-9) Pierre St-Hilaire, Stephen A. Benton, Mark E. Lucente, Mary Lou Jepsen, J. Kollin, Hiroshi Yoshikawa, John S. Underkoffler, “Electronic display system for computational holography”, In S. A. Benton, editor, Practical Holography IV, vol. 1212-20, SPIE (Bellingham, WA), 1990
- 2-10) Takanori Senoh, Tomoyuki Mishina, Kenji Yamamoto, Ryutaro Oi, Taiichiro Kurita, “Viewing-Zone-Angle-Expanded Color Electronic Holography System Using Ultra-High-Definition

- Liquid Crystal Displays With Undesirable Light Elimination,” J. Display Technology, Vol. 7, No. 7, p. 382
- 2-11) Yuta Yoshimizu and Eiji Iwase, “Radially arranged dihedral corner reflector array for wide viewing angle of floating image without virtual image,” Opt. Express 27 (2), 918 2019
- 2-12) Tomoya. Nakamura, Shinji. Kimura, Kazuhiko. Takahashi, Yuji. Aburakawa, Shunsuke. Takahashi, Shunsuke. Igarashi, Shiho. Torashima, and Masahiro. Yamaguchi, “Off-axis-imaging display and camera by holographic mirror and blur compensation”, Opt. Express Vol. 26, No.19, p.24864, 2018
- 2-13) Koki Wakunami, Po-Yuan Hsieh, Ryutaro Oi, Takanori Senoh, Hisayuki Sasaki, Yasuyuki Ichihashi, Makoto Okui, Yi-Pai Huang & Kenji Yamamoto, “Projection-type see-through holographic, three-dimensional display”, NATURE COMMUNICATIONS | DOI: 10.1038/ncomms12954
- 2-14) H. Yamamoto, S. Suyama, “Aerial Imaging by Retro-Reflection (AIRR),” SID 2013. digest, 895
- 2-15) Yongqiang Qiu, James V. Gigliotti, Margeaux Wallace, Flavio Griggio, Christine E. M. Demore, Sandy Cochran , and Susan Trolier-McKinstry, “Piezoelectric Micromachined Ultrasound Transducer (PMUT) Arrays for Integrated Sensing, Actuation and Imaging”, Sensors 2015, 15, 8020-8041

### 3. 空中ディスプレイユーザーインターフェイスのユーザビリティの評価

#### 3.1. 目的

本章では、空中映像 UI の“良さ”が何であるか、その良さの要素がどの技術的要素とどのように関わっているかを調べ、今後の開発設計にフィードバックするために、実験室レベルで試作した空間ディスプレイとジェスチャー認識を組み合わせたシステムに、相応しいソフトウェアを実装し、被験者を用いたユーザビリティテストを行った。そのアンケート結果を統計的に解析し評価結果をまとめた。

近年、2次元の映像を観察者と機器の間の空間に投影する空間ディスプレイが提案され、これとジェスチャー認識を組み合わせたユーザーインターフェイス (UI) も試みられている[3-1,3-2,3-3]。観察環境を整えることで、開口の大きな結像レンズによる PC モニター画像等の実像投影でも空間ディスプレイは実現できる。また、いくつかの革新的なデバイスも考案されている[3-1,3-2,3-3]。さらに、カメラ撮影や専用デバイスを使ったジェスチャー認識も進歩している[3-4,3-5]。ここでは、最も単純ではあるが完成度が高くハンドリングしやすい、レンズ結像による簡易空中映像 UI プロトタイプを作製し、評価を行った。

#### 3.2. 簡易空中ディスプレイ UI 装置

UI としての“良さ”がどのハードウェアの要素がどのように関わっているかを調べるために、画像とジェスチャーのパラメータを変えて評価できるシステムを用意した。3.2.1 に示すような、ユーザビリティ評価のためのハードウェアセットアップとソフトウェアコンテントを用意した。

##### 3.2.1. ハードウェアセットアップ

画質 (空中映像と通常映像の差を含む) とジェスチャーという技術要素の影響を分けて評価するために、あえてこれらの両方が良いもの悪いものは用意せず、どちらかが良いという構成とした。両方が良いもの悪いものは評価しても、各評価項目で技術要素の良いものは評価項目で良い、悪いものは悪いという結果になり、技術要素に対する特徴因子を抽出できないと考えたからである。

図 1A と B に光学システムの模式図を示す。フレネルレンズにより、液晶 (LCD) モニター画像の実像が、筐体上面ガラス開口部の上に空間ディスプレイとして結像される。フレネルレンズの焦点距離は 200mm、球面収差補正がされているものを使用した。開口部の奥側端部にはカメラが設置され、ジェスチャー認識に必要なユーザーの手や指を撮影する。取得画像の形状・パターン、色などから手や指とその動きを認識し、操作コマンドに変換する。さらに二つの赤外線 (IR) センサーが、空間ディスプレイ像付近でのユーザーの手や指の存在を検出し、ジェスチャー認識のトリガー信号を生成する。ユーザビリティテストの内容に



より、セットアップは次に示す3通りの構成をとることができる。

高い空間ディスプレイ画質と低いジェスチャー品質

低い空間ディスプレイ画質と高いジェスチャー品質

通常のディスプレイと高いジェスチャー品質

構成 A) この構成は、不快感を引き起こさない範囲で空間ディスプレイ像が最もユーザーに

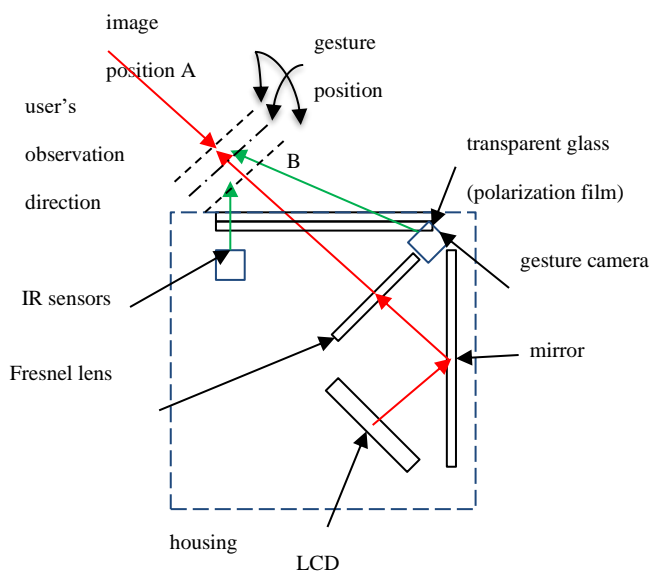


図 3.1(A) 構成 A と B: ユーザビリティテストに用いる空間ディスプレイとジェスチャー認識の光学配置

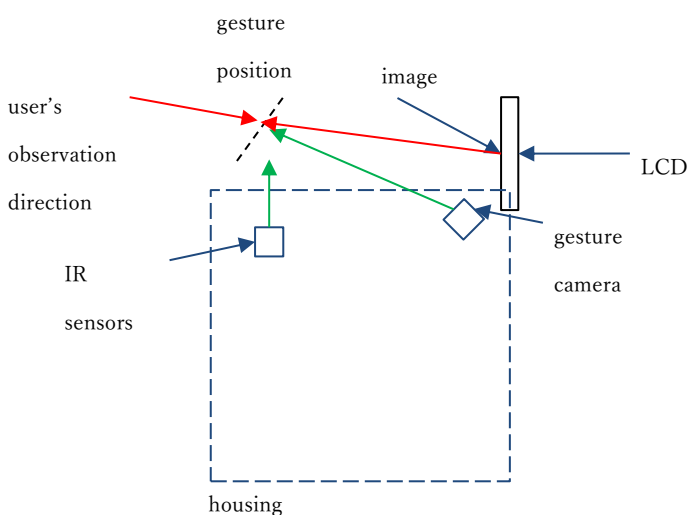


図 3.1(B) 構成 C: ユーザビリティテストに用いる通常ディスプレイとジェスチャー認識の光学配置

近い位置に結像され、コントラストが大きくなるように構成されている（図 3.1(A)の像位置 A)。空間ディスプレイ像が極端にユーザーに近いと、いわゆる“3D 酔い”のような不快感を与えることがある[3-6]。そこで事前のテストを行い、不快感を引き起こさない範囲で最も浮き出た位置に空間ディスプレイを配置した。ジェスチャー感度の中心より空間ディスプレイはユーザーに近いと、ジェスチャー感度は最適状態よりも低くなっている。また、筐体上部の開口部ガラス下に偏光フィルムを設置することで、外光の筐体内部での散乱を低下し、空間ディスプレイのコントラストを向上した。

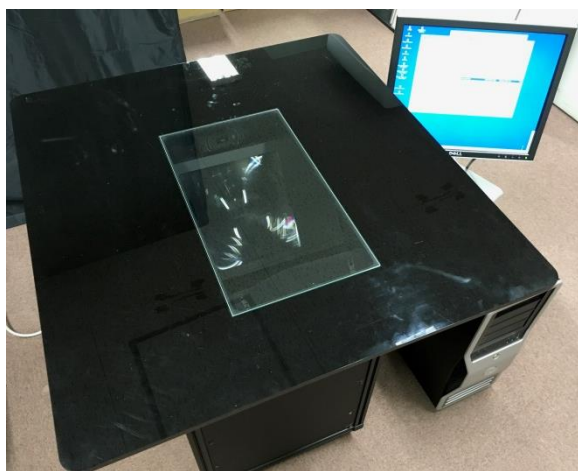


図 3.1(C) ユーザビリティテストのための空中映像 UI セットアップの写真。ディスプレイのための窓が筐体テーブルトップに配置されている。制御用の PC とモニターが背後に置かれている。ジェスチャー認識がインストールされている。

構成 B) 構成 A と異なり、この構成では空間ディスプレイ位置が、ジェスチャー感度の中心より奥側に配置されている(図 3.1(A)の像位置 B)。このためジェスチャー操作をする際、IR センサーがわずかに早くトリガー信号を生成し、ジェスチャー認識を開始する。一方、開口部の偏光フィルムは取り除かれており、構成 A に比べ空間ディスプレイのコントラストは減少している。

構成 C) 空間ディスプレイの代わりに、通常のディスプレイで構成される。ユーザーからは構成 A、B と同程度の画像の大きさに見えるように配置されている。ジェスチャーシステムは構成 A、B と同等である。このような構成は、すでに民生用ゲーム機の周辺機器として商品化がされている。

図 3.1(C)は構成 A 及び B の全体像写真である。

### 3.2.2. ソフトウェアコンテンツ

ユーザビリティテストのための 3 種類のソフトウェアコンテンツを用意した (図 3.2(A)~(C))。全てのオブジェクトはコンピューターグラフィック (CG) で作成されており、ジェスチャー操作からのコマンドにより、動いたり、変化したりする。

メニュー (図 3.2(A)) : 本システムの基本操作に対するユーザーの反応を調べるのがこのコンテンツの目的である。これはシステムのスタートアップのためのコンテンツで、本システムに実装された他の全てのシステムに遷移することができる。六角柱状のメニューオブジェクトの側面には、遷移できる全てのコンテンツのサムネイルが標記されている。手で回すようにオブジェクトを回転させ、遷移したいコンテンツが正面になるようにコンテンツを選ぶ。その状態で両手をたたくと、正面のコンテンツに遷移する。手をたたくジェスチャーは、遷移先のコンテンツからメニューへ戻る操作としても割り当てられている。

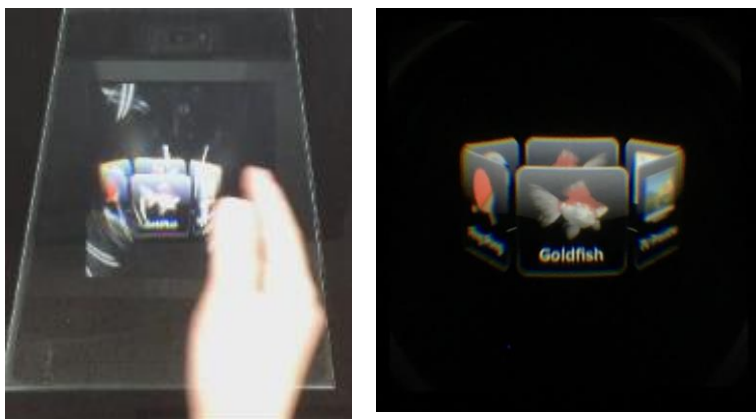


図 3.2(A) 六角柱状のメニューオブジェクト。側面に遷移可能なコンテンツのサムネイルが描かれている。ジェスチャーで回転することでコンテンツを選び、手をたたくことで正面のコンテンツに遷移する。

金魚 (図 3.2(B)) : このコンテンツの目的は、ユーザーが奥行きに対する敏感さを評価するために用意した。このコンテンツでは、ユーザーが手や指を空間ディスプレイ面にもってくると、金魚のオブジェクトは泳ぎ回りながら、徐々に指に接近していく。金魚の泳ぎは遅いので、ユーザーは待たなければならず、その間ディスプレイ面内だけでなく奥行き方向の手指の位置にも敏感になると考えられる。空間ディスプレイ位置の異なる構成 A~C を用いて比較することで、ユーザーの奥行きに対する敏感さが評価できると考えられる。

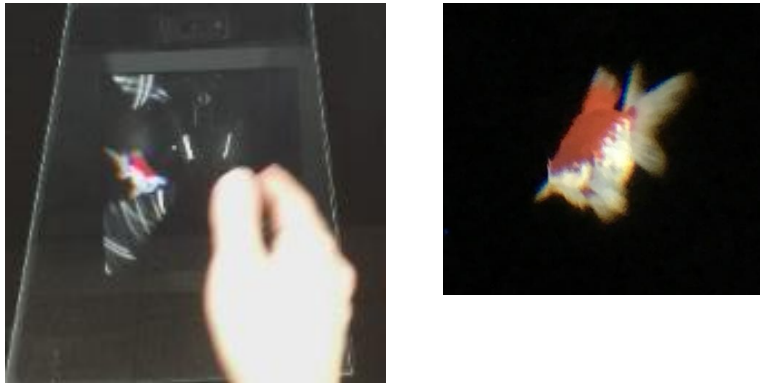


図 3.2(B) 金魚のオブジェクトが、ジェスチャー位置にあるユーザーの手に接近してくる。

卓球 (図 3.2(C)) : このコンテンツは単純な卓球ゲームである。このコンテンツは、ユーザーのダイナミックな奥行き方向の敏感さを評価するために用意した。プレイヤーがボールを打ち返すと、システムがプレイヤーの手前に再度ボールを打ち戻すようにプログラムされており、リアルな卓球と同じようにゲームを続けることができる。全ての CG オブジェクトは遠近法的に表現されており、ボールも遠近的に放物線状に飛び交う。リアルな卓球では、プレイヤーは空間での放物軌道から打つ位置とタイミングを予測している。構成 A と B では、ボールを打つ位置はリアルな卓球と概ね同じように設計されているが、2次元空間ディスプレイ面に遠近的に表現された軌道からボールをなげなければならない。評価の一つのポイントは、構成 A と B のようなディスプレイ位置の違いがどのように評価に反映されるかということである。また構成 C はすでに民生用ゲーム機で同様なシステムが実用化されているが、これと比較することで空間ディスプレイのアドバンテージが評価できると考えられる。

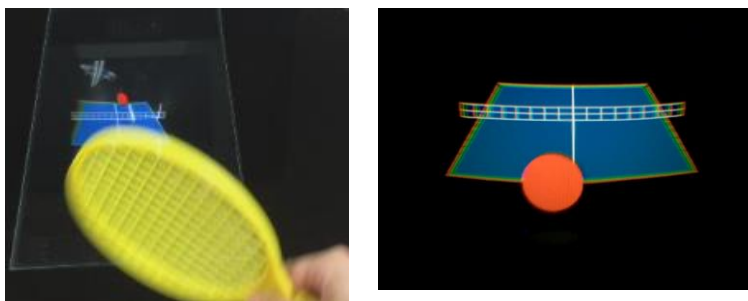


図 3.2(C) 左の写真には、CG で描かれた赤いボール、青いテーブルと、実物の黄色いラケットが撮影されている。また右の写真からは、色収差が観測される。

### 3.3. ユーザビリティ評価

本ユーザビリティテストの評価法には After Scenario Questionnaire (ASQ) という方法を導入した[3-7]。この方法は、関連するタスクからなるシナリオを基本としたユーザビリティテストの直後に被験者にアンケートを実施する。ASQ は、例えばディスプレイ間の評価、スマートフォンのユーザビリティテスト等に用いられている[3-8,3-9]。本研究の目的は、ユーザーの感性的なもの評価することなので、テストの直後できる限り早い測定が望まれる。ASQ は相応しい方法と考えられる。この方法では被験者は、“満足度”、“効果”と“効率”の三つの質問について、タスク終了後にアンケートに答える。アンケートには Likert 法[3-10]が用いられる。

表 3.1 被験者に課せられるタスクとコンテンツ

No.	タスク	コンテンツ	ハードウェア
1	全てのコンテンツに遷移して戻る	メニュー	A, B, C
2	金魚が被験者の手指に接近するのを確認する	金魚	A, B, C
3	10回程度、ボールを打ち返す	卓球	A, B, C

今回の実験では、全被験者に対し表 3.1 に示すような共通のタスクを、3 種類のハードウェア構成と 3 種類のソフトウェアコンテンツの組み合わせに対して課し、アンケートの回答を得た。被験者数は 17 名（男性 12 名、女性 5 名）で、全員視覚に異常はなく、浮き出た空間ディスプレイを認識することもできている。

#### タスク 1 のアンケート

全体として、このシナリオを完了するうえで、自然な使い勝手に満足している

全体として、このシナリオを完了するうえで、新鮮さあるいは斬新さに満足している

全体として、このシナリオを完了するうえで、直感的な操作性に満足している

#### タスク 2 と 3 のアンケート

全体として、このシナリオを完了するうえで、操作の容易さに満足している。

全体として、このシナリオを完了するうえで、自然な使い勝手に満足している。

全体として、このシナリオを完了するうえで、サポート情報（空間ディスプレイ面を示す矢印）に満足している

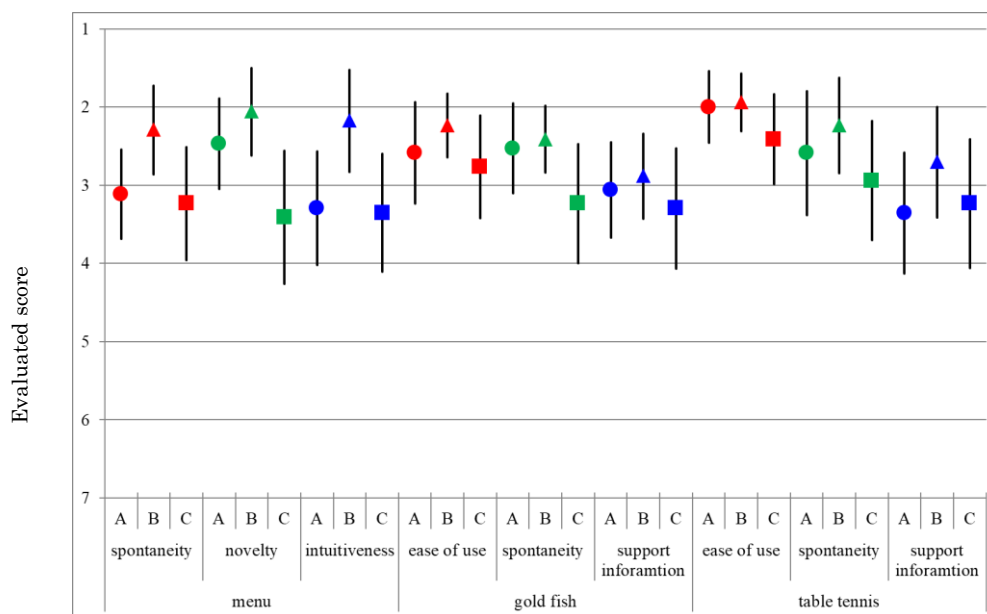
各質問に共通のアンケートのスケール

強く合意する 強く合意しない 該当せず

1 2 3 4 5 6 7 NA

### 3.4. 実験及び解析結果

図 3.3 にユーザビリティテストの結果を示す。縦軸は被験者の評価した得点を示す。横軸はタスクとハードウェア構成ごとに質問の意図を示す。データ点は平均、エラーバーは 95% 信頼区間を示す。



Contents, question points, and hardware configuration (capital alphabets)

図 3.3 ユーザビリティテストの結果。データ点は被験者評価の平均、エラーバーは 95%信頼性区間を示す。

#### 3.4.1. タスクごとの解析

Shapiro-Wilk テスト [3-11] の結果はガウス分布を示さなかったため、タスクごとの質問に対するハードウェア間の比較のために、Kruskal Wallis テスト [3-12] を用い帰無仮説棄却による優位性の確認を行った。導出された p 値を表 3.2 に示す。以下でソフトウェアコンテンツごとの各タスクの結果に対して議論する。有意レベルは 0.05 とするが、それ以上でも 0.10 までは傾向があるものとする。

表 3.2 ユーザビリティテスト結果の Kruskal Wallis テストによる解析結果. 赤色の数字は帰無仮説を棄却していることを表す

コンテンツ	質問ポイント	p 値
メニュー	自然さ	0.075
	斬新さ	0.023
	直感性	0.034
金魚	容易さ	0.588
	自然さ	0.254
	サポート情報有用性	0.801
卓球	容易さ	0.447
	自然さ	0.428
	サポート情報有用性	0.468

#### タスク 1：メニュー

このタスクの目的はこのシステムの基本操作に対するユーザーの反応を確認することである。Kruskal Wallis テスト結果からは斬新さと直感性に有意性が認められる。また自然さの結果には傾向が表れているものと思われる。ハードウェアの構成ごとに比較すると、全ての質問に対し構成 B が最も高く評価されている。構成 B は C に比べ十分高く評価されているが、同じ空間ディスプレイでも構成 A は B ほど高く評価はされていない。前述のように構成 B はジェスチャー品質が高い。従って、自然さや直感性という点ではジェスチャーの感度が重要になっていると考えられる。一方、斬新さの評価では、構成 A がある程度高く評価されている。このことは、空間ディスプレイの視覚的効果も重要な役割を果たしていると考えられる。

#### タスク 2：金魚

このタスクの目的は、ジェスチャー操作中にユーザーがどの程度奥行きに敏感になっているか評価することである。このタスクでは、全ての質問に対して有意な違いは認められない。しかしながら、タスク 1 の結果と比較することでいくつかの傾向がわかる。容易さで構成 B が高く評価されているように見えるのは、タスク 1 と同様な理由であろう。自然さでは、タスク 1 に比べ構成 A と B は同程度に高く評価されている。これは、タスク 2 では、ユーザーの動作はディスプレイ面の 1 点を指差すだけで、ジェスチャーの操作性は重要ではないためと考えられる。また空間ディスプレイ面・ジェスチャー面を示す標識の有用性も問われているが、全体に評価は低く、構成による有意な差も確認はできていない。

### タスク 3：卓球

このテストの目的は、ダイナミックな奥行き方向への敏感さの評価である。タスク 2 と同様に、いずれの質問に対しても、ハードウェアの構成で有意な差は確認できなかった。このコンテンツは、リアルなスポーツを基本にしているため被験者はよく慣れており、操作の容易さは他のコンテンツに比べ高く評価されているものと考えられる。また、ジェスチャーの動作が大きくなるため、奥行き小さな差異をプレイヤーはほとんど気にしないのであろう。自然さでは、空間ディスプレイと通常ディスプレイとの差が他より小さく見える。これは、被験者はすでに市販のゲーム機で構成 C のようなシステムの操作に慣れていると仮説することができるだろう。サポート情報の有用性にも有意な差は認められない。これは、奥行き方向にダイナミックな操作であるため、ジェスチャー面を横切る確率が高く、サポート情報はあまり役に立っていないためと思われる。

ここまで、以下の三つの項目にまとめることができる。

- 高品質のジェスチャー認識が、空間ディスプレイを組合せたシステムの操作性に重要な役割を果たす
- メニューのような空間像を操作する場合、空間ディスプレイは有意に斬新さを示す。
- ユーザーは、通常ディスプレイとジェスチャーを組み合わせたシステムにはすでに慣れている可能性がある。

#### 3.4.2. 因子分析

UX の支配的な因子を抽出するために、探索的因子分析 (EFA) を行った。はじめに、容易さとサポート情報の有用性に関する結果を、結果全体から削除した。容易さはジェスチャーの性能そのものを反映していて感性に関わる要素が少ない、サポート情報の有用性は直接ユーザビリティの評価にはなっていない、と考えられるためである。残った 5 項目の 3 種類の構成に対する質問に対して EFA を適用することで、次に示すように明らかな支配的因子を抽出することができた。

EFA の計算は一般的な手法に従い、被験者の回答の共分散行列を求め、その固有値変化の変曲点までの固有値数を因子数とした。数値計算は R 言語[3-13]を用い最尤法による最適化を行った。また因子間には相関があると考えられるので、Promax 回転を用いた。解析は、ハードウェアの構成を区別することなく 15 の質問の回答に対して行った。

表 3.3、3.4 に解析結果として得られた因子負荷と因子寄与率を示す。因子負荷の大きな項目から、それぞれの因子は次のように特徴付けることができる。



表 3.3 探索的因子分析による解析結果の因子負荷を示す。数字の色は負荷の範囲を示す。赤: 0.75 以上; 緑: 0.5 以上 0.75 未満 ; 青: 0.25 以上 0.5 未満

コンテンツ	質問	Factor1	Factor2	共通性
卓球	自然さ	0.917	-0.208	0.608
金魚	自然さ	0.669	0.026	0.473
メニュー	斬新さ	0.517	0.13	0.382
メニュー	自然さ	-0.116	1.078	0.995
メニュー	直感性	0.399	0.447	0.616

表 3.4 探索的因子分析による解析結果。各因子の因子寄与を示す。

	Factor1	Factor2
Factor contribution (SS loadings)	1.727	1.422

因子 1: 自然さでは卓球と金魚のタスクに関する因子負荷が大きい。これらのコンテンツは、操作性や機能性よりアミューズメントあるいは感覚的な要素を含む。メニューのタスクの斬新さも因子負荷が大きい。この因子は魅力的であることを示していると考えられる。

因子 2: この因子はメニューのタスクの自然さと直感性で負荷が大きい。これらメニューのタスクは操作性に関連する要素が大きく、結果としてこの因子は操作性を示すと考えることができる。

図 3.4 に、ハードウェアの構成間の比較を行うため、横軸・縦軸に因子 1 と 2 をとり、構成 A~C の得点をプロットした。各ハードウェア構成の得点は、被験者全員の回答に対する因子負荷の平均により求めた。空間ディスプレイを用いる構成 A と B は因子 1 軸で高い値を示している。これは空間ディスプレイに直接触れるようなユーザーインターフェイスが魅力的であることを表している。一方因子 2 軸では、相応しいジェスチャー認識の感度が優れた操作性に重要であることを示している。

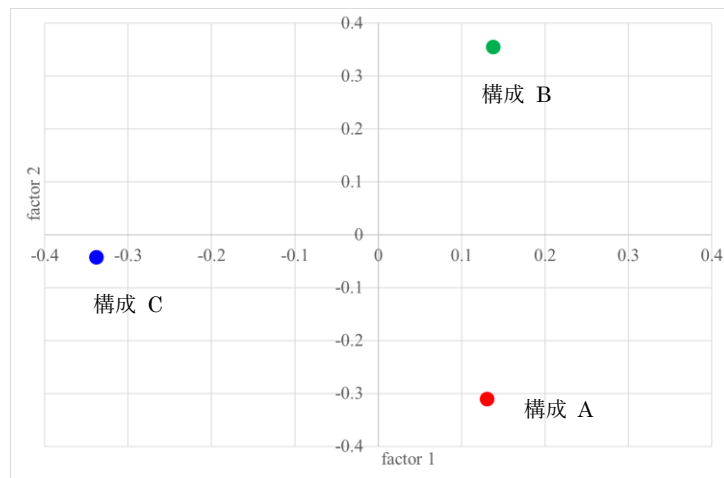


図 3.4 因子 1 および 2 に対する探索的因子分析により求められたハードウェア構成 A~C のスコア。因子 1 と 2 は、それぞれ魅力的であること、操作性を表す因子と考えることができる

### 3.5. 3章のまとめ

本章では、空間ディスプレイとジェスチャー認識を組み合わせたシステムに対し、被験者を用いてユーザビリティテストを実施した。Kruskal Wallis テストと因子分析により、空間ディスプレイと十分な品質のジェスチャー認識を組み合わせることの重要性が明らかになった。また本システムのソフトウェアの操作より、空間ディスプレイの心理的斬新さも明確になってきた。ユーザーは奥行き構造の詳細には敏感ではないことから、2次元の空間ディスプレイは空間ユーザーインターフェイスの有用な表示デバイスであると考えられる。さらに通常ディスプレイを用いたジェスチャー認識も、受け入れられていることが分かってきた。

今後、空間ディスプレイ技術の開発に加え、ユーザーインターエクスペリエンスとしてのさらなる心理学的研究が望まれる。

### 3.6. 課題

本章実験のハードウェアは、空中像を使わない構成を含め 3 種類のタイプを用いた。画質（空中映像と通常映像の差を含む）とジェスチャーという技術要素の影響を分けて評価するために、あえてこれらの両方が良いもの悪いものは用意せず、どちらかが良いという構成とした。両方が良いもの悪いものはで評価しても、各評価項目で技術要素の良いものは評価項目で良い、悪いものは悪いという結果になりこ、技術要素に対する特徴因子を抽出できな

いと考えたからである。しかしながら、このような評価をおこなったのは、ハードウェアの機構と被験者の負荷という制約も存在する。図 3.5 に示すように、ハードウェアとしてはセットアップ内部に設置された LCD ディスプレイの位置を光軸に対して前後することで空中映像の飛び出し量を約 100mm 程度調整できる機構になっている。ジェスチャーに関しては、カメラはほぼ表示系の光軸に沿って観察する構成になっていて手指の奥行位置を検出できない。このため、赤外線センサーを空中映像近傍のガラステーブルトップの下部に配置し、ここから平面ビーム状の赤外光で空中映像の位置に手指があるか検出し、像の手前や奥でジェスチャーが動作するのを回避している。このセンサーに関しては、前述空中映像の飛び出し量に合わせて前後させることが現状はできないので、今後の改修が必要である。これによって両方がよいもの、悪いものでの被験者テストが可能となる。また、被験者の負荷に関しても考慮が必要である。本章で前述した被験者テストの所要時間は一人当たり 30 分前後かかっている。単純にハードウェア構成が増えただけで 50 分かかるが、テスト中のハードウェア構成の調整時間が増えることから、1 時間程度かかると想定しておくべきだろう。長時間のテストは被験者の負荷が大きく、また疲労による評価結果の影響も懸念される。このため、短時間に少ない付加で必要な評価ができるようにコンテンツの見直しも行う必要がある。この点も今後の課題である。

本章実験二番目の課題として、主観的な感性評価だけでなく定量性のある感覚評価の必要性があげられる。今回は空中映像表示法にフレネルレンズによる最も単純な実像結像法を用いた。このため、歪像や色割れ（色収差）の影響が避けられず、特に画像に関連する項目の感覚的定量評価は困難と判断をした。今後の課題として、これら歪像や色割れ（例えば図 3.2(C)など）を解決しているクリアしている AIRR や DCRA などを用いたセットアップを用意し、それによる定量的な感覚評価が必要である。その際には、表示方法の違いもハードウェアのパラメータとし、表示系に関しては輝度、色度、解像度、視域、像サイズなどに関して識別被験者母数に対する識別人数で定量化する必要がある。また、UI としては与えたタスクを時間などの制限条件下で何割の被験者が達成できたかという定量評価も有用になると考えられる。

三番目の課題は、一定数存在する空中像を認識できないユーザーへの対応である。このようなユーザーに対しては、医学的な原因説明を行い対策するというのと、対策ができないユーザーに対しては、通常ディスプレイにジェスチャーを加えるなどの代替方法を提案し、非接触など感染対策など必要性の高い機能は保持しておくことが必要である。

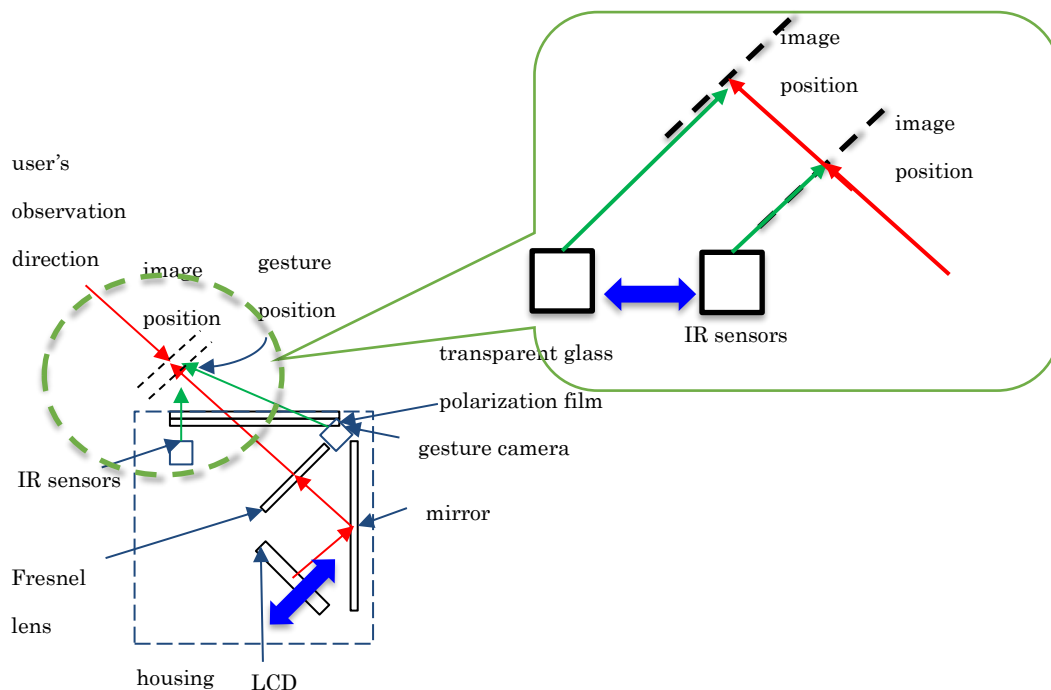


図 3.5 IR センサーの位置を、空中映像の飛出し量に応じて、調整できるように改修が必要

## 文 献

- 3-1. Y. Tokuda, A. Hiyama, M. Hirose, H. Yamamoto, SA'15 Emerging Technologies, (November 02 – 06, 2015) Kobe, Japan. ACM 978-1-4503-3925-4/15/11
- 3-2. S. Maekawa, K. Nitta and O. Matoba, Proc. of SPIE-IS&T Electronic Imaging, SPIE Vol. 6803, 68030B
- 3-3. Y. Makino, Y. Furuyama, S. Inoue and H. Shinoda, HaptoClone (Haptic-Optical Clone) for Mutual Tele-Environment by Real-time 3D Image Transfer with Midair Force Feedback, #chi4good, CHI 2016, San Jose, CA, USA
- 3-4. V. I. Pavlovic, R. Sharma, T. S. Huang, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 19, 7, pp. 677-695 (July 1997)
- 3-5. Hirsch, M., Lanman, D., Holtzman, H., Raskar, R. 2009. BiDi Screen: A Thin, Depth-Sensing LCD for 3D Interaction using Light Fields. ACM Trans. Graph. 28, 5, Article 159 (December 2009), 9 pages.
- 3-6. M. Lambooij, W. IJsselsteijn, M. Fortuin, I. Heynderickx, J. Imaging Sci. Technol., 030201-1 (May-Jun. 2009)
- 3-7. Lewis, J. R. SIGCHI Bulletin, 23, 1, pp78-81. (1991).
- 3-8. J. Grubert, M. Heinisch, A. Quigley, D. Schmalstieg, MultiFi: Multi-Fidelity Interaction with Displays On and Around the Body: CHI 2015, 3933-3942
- 3-9. J Keijzers, E. d. Ouden, and Y. Lu, MobileHCI 2008, 265-272

- 3-10. Likert, R. (1931). A technique for the measurement of attitudes. *Archives of Psychology*. New York: Columbia University Press.
- 3-11. S. S. SHAPIRO M. B. WILK, An analysis of variance test for normality (complete samples)†, *Biometrika* (1965) 52 (3-4): 591-611. DOI: <https://doi.org/10.1093/biomet/52.3-4.591>, Published: 01 December 1965
- 3-12. W. H. Kruskal & W. A. Wallis, *J. Am. Statistical Association*, 47, 260 pp. 583-621 (1952)
- 3-13. <https://www.r-project.org>

## 4. 背景透過型空中ディスプレイ技術

### 4.1. はじめに

1章で議論したように空中映像 UI システムが提案されているが[4-1]まだ十分普及しているという状況にはない。最も単純なケースでは、3章のようなフレネルレンズにより FPD の像を投影することで実現できる[4-2]が、同章で示したように、この単純な方法では歪像や色収差などにより像の低画質を避けることができない。他にもハーフミラーと再帰反射ミラーを用いた光学システム [4-3]、また 2 面直交コーナーアレイ (Dihedral Corner Reflector Array DCRA) [4-4, 4-5]、あるいは 屈折率分布型レンズアレイ (gradient-index lens-array)[4-6] といった結像デバイスも提案されている。しかしこれらも、2章で新しく追加すべき機能であるシースルーについては、十分性能なものは提案されていない。本章では、独自の技術として提案する、DCRA とホログラムミラーを用いたシースルー空中映像 UI を紹介する。

2章で述べたように、DCRA は興味深い結像デバイスであるが、虚像の生成が大きな課題となっている。空中実像とは異なる方向、物体と同じ奥行き位置に観測される[4-4]。虚像は空中実像よりも明るいため、ユーザーが空中映像を観察する妨げとなる。虚像の生成メカニズムは詳細に調べられており、後述する貫通穴の放射状配置により虚像を除去する構造が提案されている[4-7]。しかしこの構造は、DCRA のもう一つの長所である光軸をデバイス内で自由に設定できるという特長を失っている。他の虚像除去方法としては、虚像と実像の光線が空間的に分離した位置で、空間フィルタリングする方法も提案されている [4-8,4-9]。しかしながら、こちらの方法も、ユーザーの観察空間やディスプレイのサイズに制限を受けるといった課題が残る。

1章の議論のように、UX の視点から考えると、ユーザーが本質的に操作したいものは、空中映像以外の物体であることが、様々なケースであり得る。例えば輸送機器や医療機器操作に使用した場合、空中映像の周辺や背後にある空中映像以外から、必要な情報を得て操作をするだろう[4-10]。自動車のフロントガラス越しの風景や、手術患者の術部など、必要な情報や本当に操作したい物体が、空中映像の背景や周囲に存在するような使い方を想定することができる。以上より、空中映像にシースルー機能を加えることは、空中タッチディスプレイにとって望ましいものと考えられることができる。しかしながら、シースルー空中ディスプレイの過去の研究はわずかしか報告されていない[4-11]。また、DCRA を用いた研究例は報告されていない。

本章では、ホログラフィック回折素子(HOE)を DCRA の結像光路に導入した新しい空中ディスプレイシステムを提案する。ここで導入する HOE はオフアクシス体積ホログラムミラーであり、この Bragg 回折により、シースルーと虚像の抑制を実現する[4-12]。2章で説明したように、シースルー機能を有する空中ディスプレイの提案は非常に少なく、十分な背

景観観察性能や像サイズ・視域を有する提案はない。方式としては完全に独自のアイデアによるものである。

この技術が社会実装されれば、シースルー空中ディスプレイは、背景物体から視線を逸らす必要のない UI を実現する。外科手術中、術者が幹部から視線を変えられない場合や、自動車のヘッドアップディスプレイなど、このような機能は有用であろう。既存の公共タッチセンサーにシースルー空中ディスプレイ UI を追加実装できれば、少ない投資で短時間に空中タッチセンサーとして使用することができるだろう。

## 4.2. 提案システム

### 4.2.1. 全システム

提案システムの光路図を図 4.1 に示す。この図の(A)、(B)、(C) はそれぞれ側面図、DCRA より下部の上面図、同じく上面図である。投影する元の画像は FPD やプロジェクターで透過スクリーンに投影した画像を用いる。この画面から発した光線は、最初にホログラムミラーまで伝搬する。入射した光は、回折して DCRA に向かう。ホログラムミラーは、オフアクシスマイラーとして働く。詳細は 4.2.3 で説明する。DCRA はこのデバイスに平行な面内で、入射光線を再帰的に反射する(4.2.2)。面直方向には鏡面反射する。一番目と同等に設計された二番目のホログラムミラーは、回折方向が一番目と対向する向きに配置される。このように、結像光路は DCRA の前後で、DCRA 面に対して面对称となる。そして光線は二番目のホログラムミラーで回折し、元の画像と共役な位置に空中像を形成する。背景が発するほとんど全ての光線は、二番目のホログラムをユーザーの方向に透過する。これは、このホログラムミラーは体積ホログラムであり、大きな波長及び角度選択性を有するからである[4-12]。このように、シースルー空中ディスプレイが実験的に理解することができる。図 4.1 で示す本提案手法は、ホログラムミラーの代わりに通常のミラーを用いた東京大学の苗村らの過去のデモンストレーションに似ているように見える[4-13]。しかし、こちらにはシースルー機能や 4.2.5 で示すような虚像を抑制するような効果はもたない。

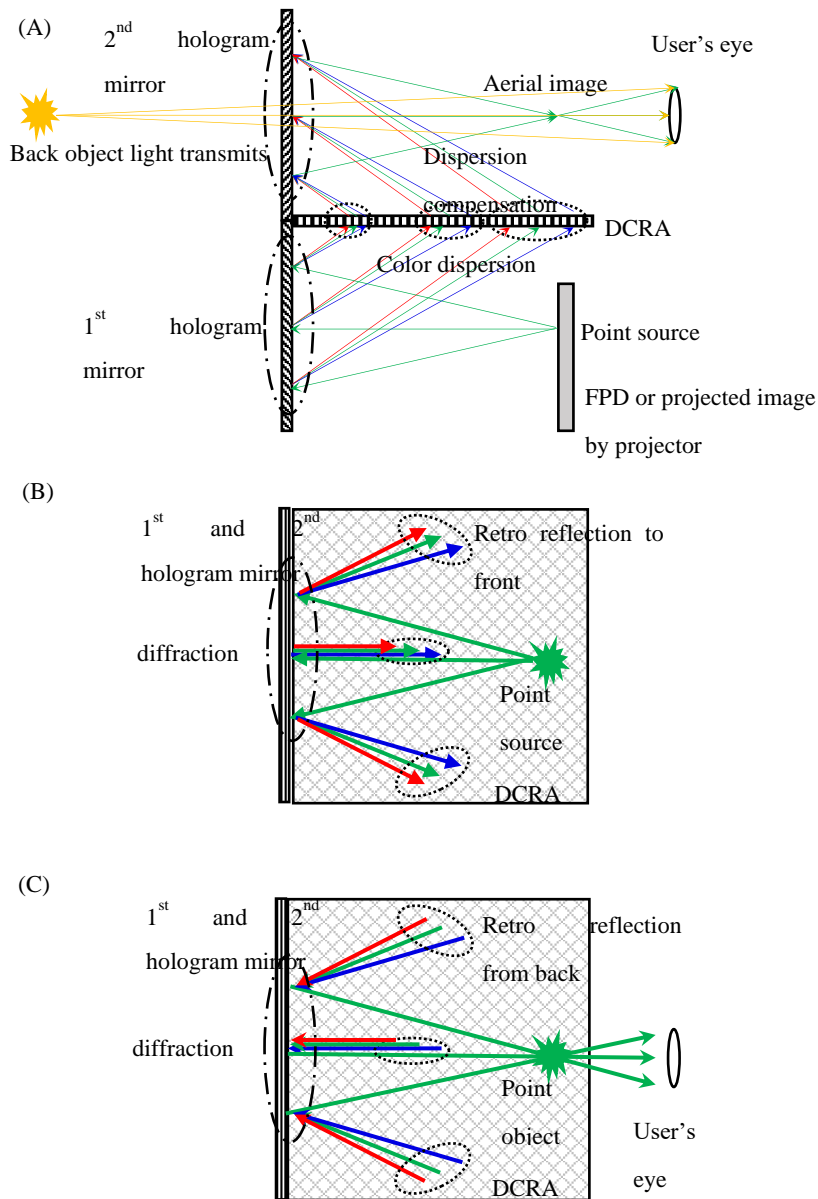


図 4.1 提案するシースルー空中映像システムの模式図。(A)、(B)、(C) はそれぞれ側面部、下部上面図、上部上面図である。元のディスプレイは FPD あるいはプロジェクターで投影した映像である。一番目と二番目のホログラムミラーは DCRA に垂直かつ対向配置されている。DCRA は 波長分散補正と結像の役割を果たす。点線楕円部は、面内再帰反射部分を表す。一点鎖線は回折する部分を示す。



#### 4.2.2. DCRA

DCRA は空中映像のための、新規結像デバイスとして認識されている [4-4]。デバイス表面には、内壁が鏡面処理された、正方形の貫通穴のアレイが形成されている(図 4.2)。それぞれの貫通穴での二回の反射によりデバイス面内での再帰反射が起こる(図 4.2(A))。一方、面直方向の成分に対しては、光線は何も変化しない(図 4.2(B))。その結果、幾何光学的な結像が実現される。そしてこのとき、デバイスから物体と像までの結像距離はそれぞれ等しくなる。DCRA での反射の前後の光路は対称になり、4.2.4 で示すように、この対称性によりホログラムアレイの波長分散が可能となる。

この貫通穴での一回反射により、虚像が形成される(図 4.3)。観察角度によっては、虚像は空中実像よりも明るいので、ユーザーが空中映像を観察するのを妨げる。本提案技術では、4.2.5 で示す体積ホログラムミラーを持ちることにより、虚像を抑制することができる。

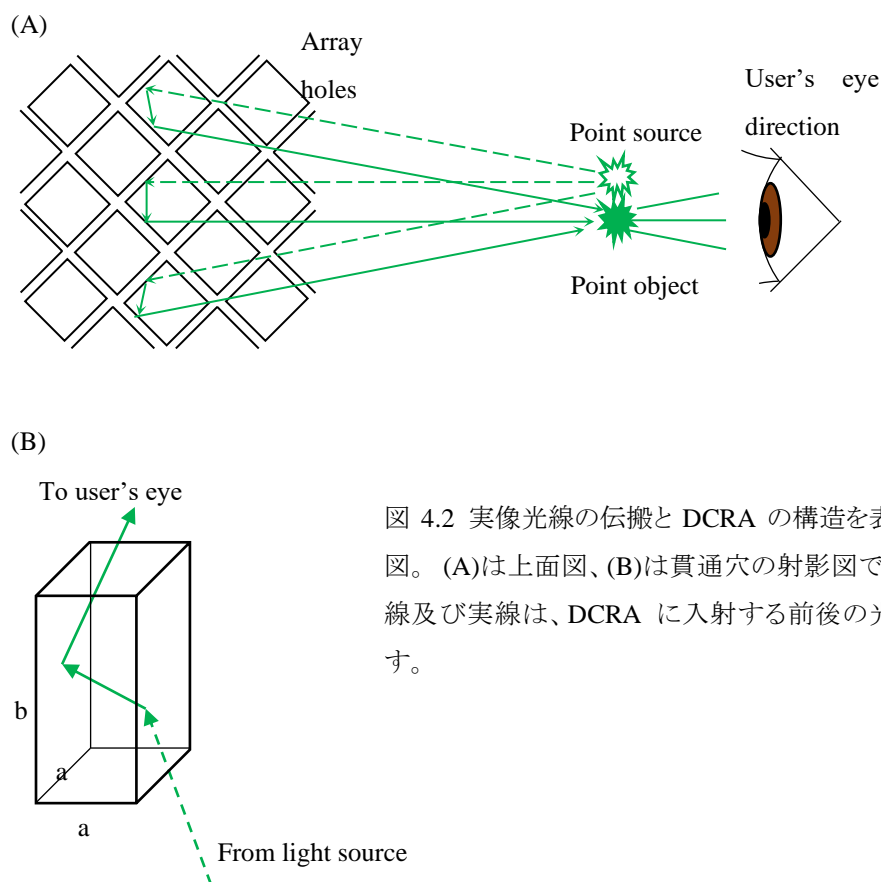


図 4.2 実像光線の伝搬と DCRA の構造を表す模式図。(A)は上面図、(B)は貫通穴の射影図である。点線及び実線は、DCRA に入射する前後の光線を表す。

#### 4.2.3. ホログラムミラー

二つの平面波を記録媒体に両側から対向して照射することで、ホログラムミラーが形成される[4-14]。参照光はホログラムに対して垂直に、物体光は斜めの角度から入射し、結果として図 4.1 で示すような光路に適合する回折角のホログラムが形成される。一番目と二番目のホログラムは同一である。一番目のホログラムミラーはディスプレイからの光線を斜めに回折し、DCRA の方向に向ける。二番目のホログラムミラーは、4.2 2 で議論した DCRA の効果により逆向きに回折する。このようにして光線は伝搬方向、DCRA 面に対して物体の対称な位置に実像を生成する。

#### 4.2.4. 波長分散補償

ホログラムミラーによる回折は、角度の色分散をともなう。反射型体積ホログラムでは、Bragg 条件により回折光は狭い波長範囲に限られる。しかしこの範囲は有限で、波長分散によるぼやけを無視することはできない。波長の広がりを  $\Delta\lambda$ , 回折によるビームの角度広がりを  $\Delta\theta$  は(1)式のように表すことができる。:

$$\Delta\theta = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \tan\theta \quad 1)$$

ここで  $\theta$  及び  $\lambda$  は、それぞれ回折角と波長である。像は回折による角度広がりのためぼやける。分散補償システムがない場合、ぼやけ  $b$  は伝搬距離が  $l$  のとき近似的に以下のように表せる。、

$$b = l \cdot \Delta\theta \quad 2)$$

例えば、 $\lambda, \Delta\lambda, \theta, l$  がそれぞれ 540 nm, 20 nm, 45 °, 100 mm の場合、ぼやけ量は 4mm に達する。したがって、何らかの補償が必要である。

回折による分散は、二つの等価なホログラムを相補的に使うことで取り除くことができる[4-15]。4.1 に示す本提案の光学システムでは、DCRA の対称性により分散補償が実現される。すなわち、一番目のホログラムで生じた分散は、DCRA で反転し、二番目のホログラムで補償される。

#### 4.2.5. 虚像抑制

DCRA は、望ましくない虚像を生成する。この現象はよく調べられており、虚像を抑制する構造やシステムが提案されている[4-7,4-8,4-9]。放射状に貫通穴が配置された構造は、虚像の生成を防ぐことができる。一方で、光軸を選ばないという特長も失われてしまう。

これまでの DCRA 光学系では、虚像は図 4.3 に示すように形成される。下部にある一つの点光源から発する発散光は、貫通穴内部で一回鏡面反射する。この貫通穴は、光線の伝搬方向に垂直に一直列に並んでいる。したがって、これらの光線の発散は、このような配置の貫通穴内壁鏡面により保たれる。そうして虚像が点光源と同じ奥行きに観測される [4-16]。

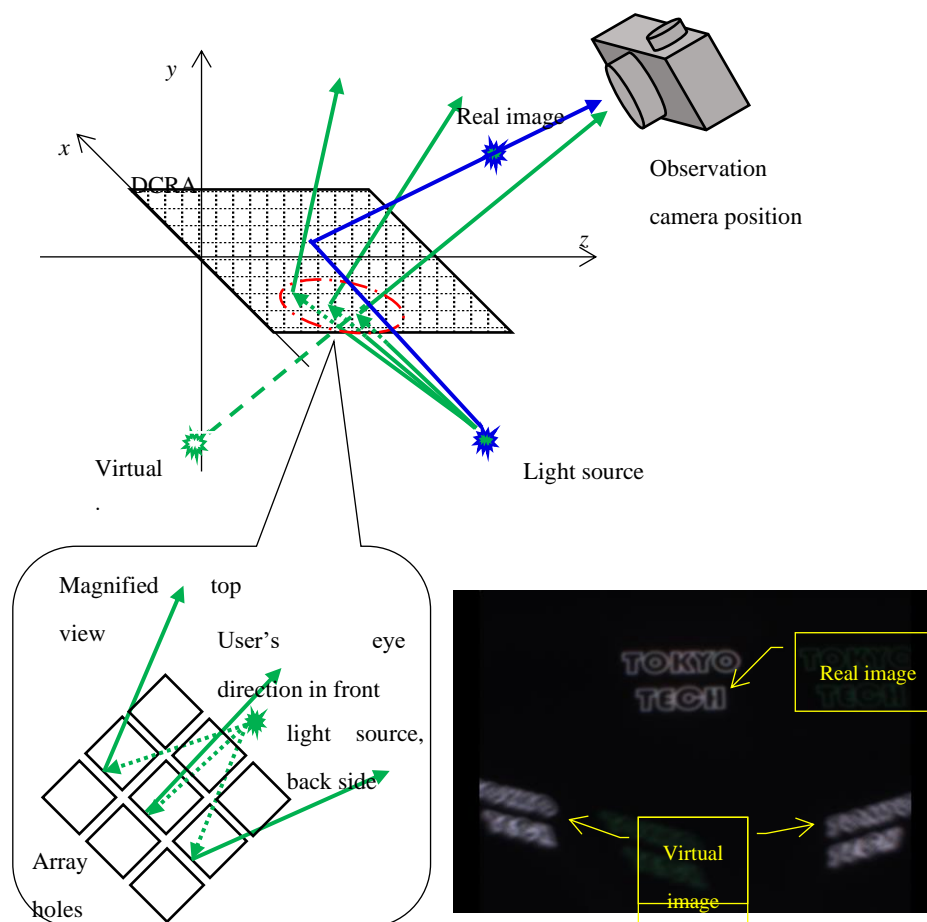


図 4.3 通常の DCRA による虚像形成を表す模式図。上図：光路全システム、拡大上面図：貫通穴による光線の反射と発散を示す。写真において、二つの虚像の存在が実験的に確認されている。撮影は実像にフォーカスしている。虚像のぼやけは虚像と奥行き位置が異なることをしめしている。

したがって、ルーバーフィルムは DCRA への入射角度を最適化することができるので、虚像を抑制することができると考えられる。しかしながら、単一の貫通穴には一回反射と二回反射が共存する。したがって空中実像の輝度や視域を制限してしまうだろう。

図の4~7は、提案手法の虚像抑制の様子を示す。図4.4(A)、(B)、(C)は、斜投影、上面、側面図である。

次に概念的にメカニズムを説明する。一番目のホログラムミラーで、点光源から発した白色光が回折される。図4.4(B)と4(C)はオフアクシスマイラーとして機能するホログラムミラーによって $VI_1$ に生成した虚像を示す。波長と角度に対してBragg条件を満足した光線だけが回折する。そしてそれに応じたDCRAの貫通穴に到達する。穴の内部で、一回だけ反射した光線が虚像をつくる。内壁ミラーはホログラムミラー面に対して垂直方向には平行に、水平方向には $45^\circ$ 傾けて配列されている。このためホログラム面に対して光線の伝搬角度は垂直には保たれているが水平には変化する。二番目のホログラムミラーは、一番目に対して対称に対向している。二番目のホログラムもオフアクシスマイラーとして働くので、図4(B)、(C)で示すように $VI_2$ の位置に、もうひとつの虚像を生成するだろう。 $VI_2$ は通常のDCRA空中映像投影で生ずる虚像に相当する。提案システムでもし二番目のホログラムミラーへの水平入射角度が一番目と異なっていれば、光線はBragg条件を満足しない。このようにして、光線は二番目のホログラムを透過し、ユーザーの観察位置での虚像を抑制する。

虚像と実像光線の空間分離を利用した先行研究に加え[4-8,4-9]、提案手法はBragg回折によるこれらの角度の違いを導入している。したがって、虚像の見えない広い空中像観察範囲が期待される。

図4.4(B)と(C)に示すように、空間座標を $x, y, z$ 、水平及び垂直角度を $\theta, \varphi$ とする。点光源からDCRAの入射位置までの光路長の $z$ および $x$ 成分をそれぞれ $l, d$ とする。これらの図では、ユーザーは光線が二番目のホログラムで回折する点を見ていると仮定する。 $s$ と $h$ は、それぞれDCRAの射出点からユーザーの観察位置までの光路長の $z$ および $x$ 成分である。さらに、入射光の条件に依らず全ての貫通穴は、面内での鏡面反射と再帰反射の両方の反射要素をもつと仮定する。図4.4(B)の上面図で、 $\theta_u$ と $\theta_v$ をそれぞれ一番目及び二番目のホログラムの水平回折(反射)角とすると、 $\theta_u$ と $\theta_v$ は幾何学的に(3)式のように表すことができる。

$$\theta_u = \tan^{-1}\left(\frac{d}{l}\right), \theta_v = \tan^{-1}\left(\frac{h}{s}\right) \quad (3)$$

DCRAのミラー面で、反射の法則から以下が得られる。

$$\theta_u + \theta_v = \pi/2, \quad (4)$$

$\theta_u$ と $\theta_v$ の差 $\Delta\theta$ は次のように与えられる。

$$\Delta\theta = \theta_v - \theta_u = \frac{\pi}{2} - 2\theta_u$$

5)

$\theta_u = \pi/4$  であれば、 $\Delta\theta = 0$  となり、二番目のホログラムミラーは Bragg 条件を満足する。

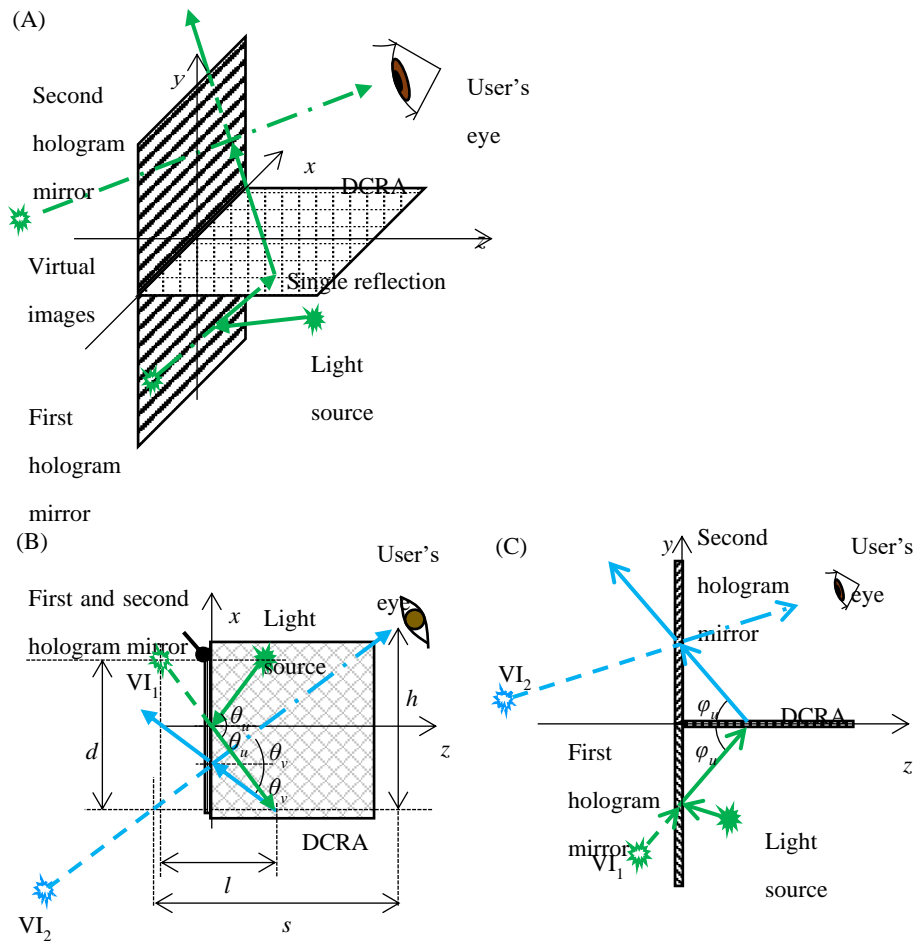


図 4.4 (A) 虚像抑制の概念図。点線は背後の光線を示す。一点鎖線は虚像が観測された場合を仮定した光線を示す。(B) と (C) は、虚像光線の上上面図と側面図である。上面図の幾何光学的な解析と、鏡面反射の角度の関係より  $\theta_u$  は (3) 式と (4) のようになることがわかる。

実際には、Bragg 条件は図 4.5 に示すように 3 次元の波数ベクトル空間で解析されなければならない。物体波  $\mathbf{k}_{obj}$  と参照波  $\mathbf{k}_{ref}$  が干渉することで、格子ベクトル  $\mathbf{K}$  を生成する (図 4.5(A))。再生照明光の波数ベクトル  $\mathbf{k}_{ill}$  の入射角度は、一番目のホログラムミラーでの再生において、物体波  $\mathbf{k}_{obj}$  とは異なっても構わない (図 4.5(B))。その結果、異なる波長の光が Bragg 条件を満たす。回折光の波数ベクトルは次のように与えられる。

$$\mathbf{k}_{dif} = \mathbf{k}_{ill} + \mathbf{K}. \quad (6)$$

二番目のホログラムミラーでの再生では (図 4.5(C))、 $\mathbf{K}$  の  $y$  成分が反転して  $\mathbf{K}'$  となる。二番目のホログラムミラーへの入射ビームの波長域は狭くなり、水平及び垂直方向の入射角はそれぞれ  $\theta_v$ 、 $\varphi_u$  となる。二番目のホログラムへの入射ビームはこの波長に対して Bragg 条件を満足する。図 4.5(C) に示す格子ベクトルの経路を考慮に入れなければならないが、この解析では単純化のため (5) 式の  $\Delta\theta$  を Bragg 条件からのずれとして用いる。

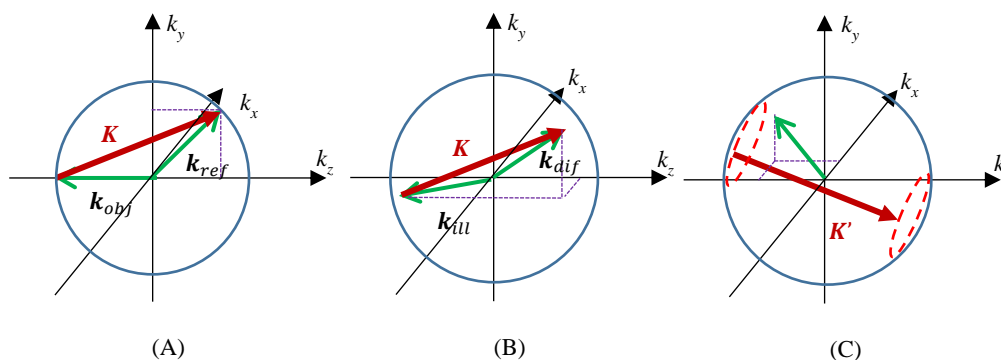


図 4.5 3 次元的な波数ベクトルの関係：(A)ホログラムミラー露光時、(B)一番目のホログラムミラーでの回折、(C)二番目のホログラムミラーでの回折。二番目のホログラムミラーは、一番目と逆の方向を向いている。波数ベクトル  $\mathbf{K}$  の  $k_y$  成分は、 $\mathbf{K}'$  では反転している

#### 4.2.6. 虚像抑制の定量解析

Bragg 条件から外れた吸収のない反射型体積ホログラムの回折効率を、結合波理論によって導出し、虚像抑制の定量的な解析を行う [4-17]。以下を無視する。

- 1) ホログラム界面での回折
- 2) 高次の回折

### 3) 回折光の複素振幅の2回微分

回折効率  $\eta$  は以下のように表すことができる

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{1 - \xi^2}{\sinh^2 \sqrt{\nu^2 - \xi^2}}} \quad 7)$$

$$\nu = \frac{\pi n_1 t}{\lambda \sqrt{\cos \vartheta |C_S|}} \quad 8)$$

$$\xi = \Delta \vartheta \frac{K t \sin(\vartheta_0 - \phi)}{2C_S} \quad 9)$$

$$C_S = \cos \vartheta - \frac{K}{\beta} \cos \phi \quad 10)$$

$$\beta = 2\pi n / \lambda \quad 11)$$

$K$ : 格子ベクトルの絶対値

$\vartheta$ : 入射角  $\vartheta_0$ : Bragg 角

$\phi$ : 回折角

$n$ : 媒体の平均屈折率

$n_l$ : 屈折率の変調振幅

一番目のホログラムミラーで回折した光線は Bragg 条件を満足するので、近似的に(9)式の  $\Delta \vartheta$  を  $\Delta \theta$  として用いる。例えば表 4.1 のようなパラメーターに対し、 $\theta_u$  及び  $\Delta \theta$  の関数として回折効率  $\eta$  を数値解析的に求めることができる。図 4.6(A)は、ホログラムミラーに対する回折効率の計算結果を示す(青線)。参考文献[4-7]と表 4.1 の条件より求めた、単一の貫通穴に入射する、全光線に対する一回反射の割合の  $\theta_u$  依存性計算結果も示す(緑線)。

表 4.1 計算条件

Hologram mirror	
Exposure wavelength	532 nm
Illumination wavelength	532 nm
Exposure angle	0 and 135 deg
Averaged media refractive index	1.5
Index modulation amplitude	0.03
Absorption	0
Media thickness	16 $\mu\text{m}$
DCRA	
Hole aperture size a (Figure4. 2B)	100 $\mu\text{m}$
Array hole height b (Figure4. 2B)	100 $\mu\text{m}$

一回反射は  $\theta_u=45\text{deg}$  でピークをとり、割合は 1 に達する。この時の条件は直感的に容易に理解することができる。45deg.から離れるにつれ、この割合は徐々に小さくなり、 $\theta_u=0$  と 90deg で最小値をとる。回折効率も  $\theta_u=45\text{deg}$  ( $\Delta\theta=0\text{deg.}$ )でピークとなる。しかし、こちらは 45deg から少しずれると急に減少する。一回反射割合と回折効率の積を赤線で、参考として [4-7]から求めた実像強度を示す二回反射割合を黒線で図 4.6(B)に示す。 $\theta_u$  が小さいか大きい場合は二番目のホログラムミラーの角度選択性により虚像が除去される。しかし、45deg. 付近では除去することができず、虚像が観察される。

ここでの一回及び二回反射の計算は、単一の貫通穴に対して行ったものである。ユーザーが認識する輝度は全ての穴から目に入る光線の積分であるので、通常の DCRA 光路では虚像は多くの場合明るく見える。



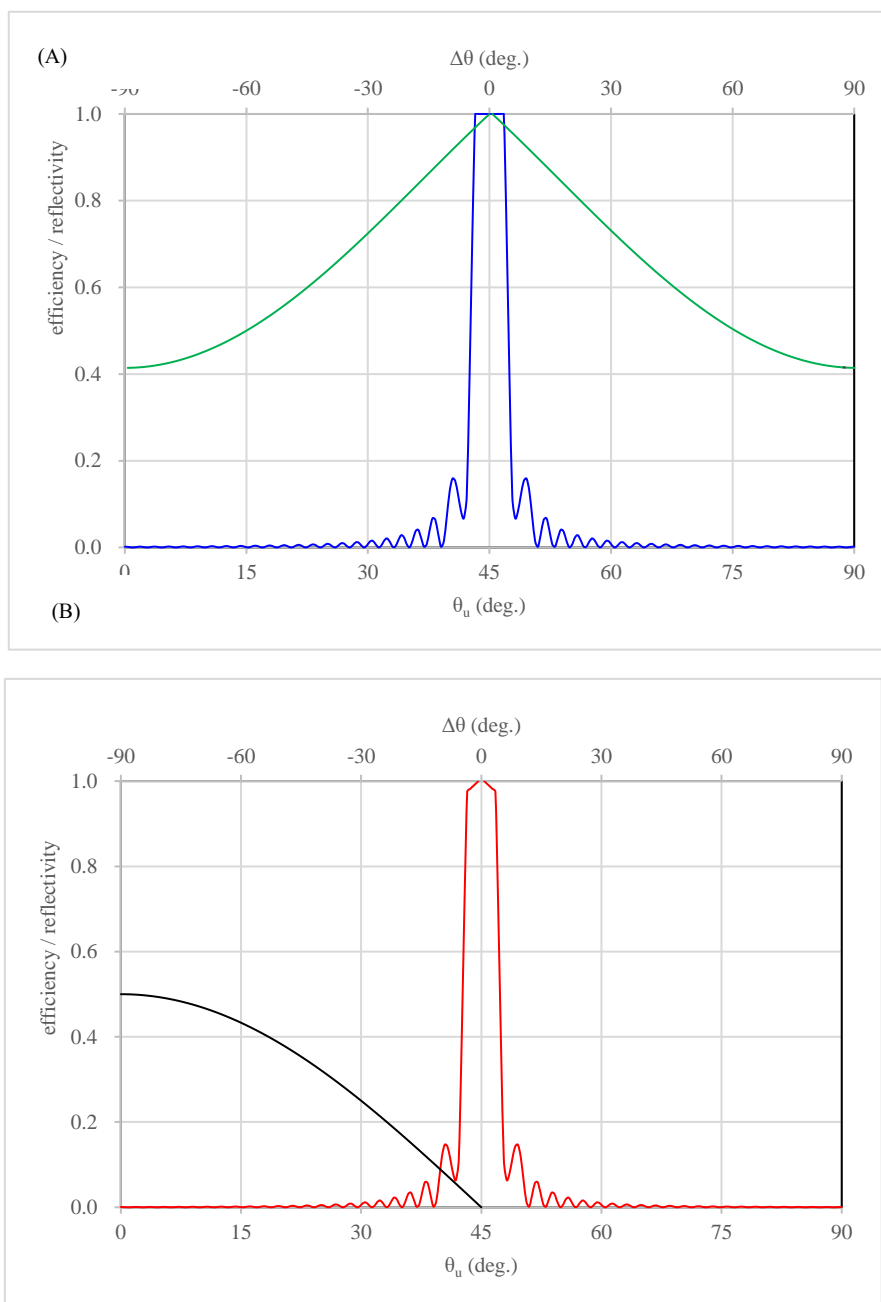


図 4.6(A) 結合波理論より求めた入射角のずれに対する回折効率の変化（青線）。単一の貫通穴に入射する全光線に対する一回反射光線の割合（緑線）。 図 4.6(B) 回折効率と一回反射割合の積で求められる、単一貫通穴から観察される虚像の強度（赤線）。 単一貫通穴からの実像光線の割合（黒線）。

## 4.3. 実験

### 4.3.1 実験セットアップ

図 4.7 に示すように、図 4.1 に従って光学セットアップを作製した。実験の都合上、光学系は  $90^\circ$  横に寝かせてある（写真の右側が下部、左側が上部）。実験には 300mm 角サイズのパリテイイノベーションズ社製 DCRA パリテイミラーを用いた[4-18]。カラーのホログラムミラーは、Covestro 社製フォトポリマーHX-200 [4-19]用いて、参考文献[4-14]に従って作製した。サイズは約 175mm 角である。青 (473 nm)、緑 (532 nm)、赤 (665 nm) のレーザーを同軸に合波して露光システムに導入した。フォトポリマーフィルムに対し、物体光の角度は垂直、参照光の角度は  $135\text{deg.}$ とした。従って水平方向の最大回折角度は  $22.5\text{deg.}$ になる。直径 0.77mm の要素ホログラムを、フィルムを動かしながら連続的に一つずつ露光した。図 4.8 に露光したホログラムミラーの回折効率を示す。フレネル反射による損失、散乱、吸収は実験的に取り除かれている。フィルム内のフォトポリマー分子は露光時時に各色の干渉縞に分配されるため、40%程度の低い回折効率に留まっていると考えられる。円形の要素ホログラムの空間的な充填率ももう一つの理由として考えられる。

空中映像の元画像はデータプロジェクターで透過型スクリーンに投影することで作成した。その背後に一番目のホログラムミラーを配置した。ホログラムミラーでは、光線は約  $45\text{deg.}$  で回折した。スクリーンの上部は DCRA から 75mm 離れており、回折光が効率よく DCRA に届くように構成されている。DCRA より先は、手前と対称な光路となっている。

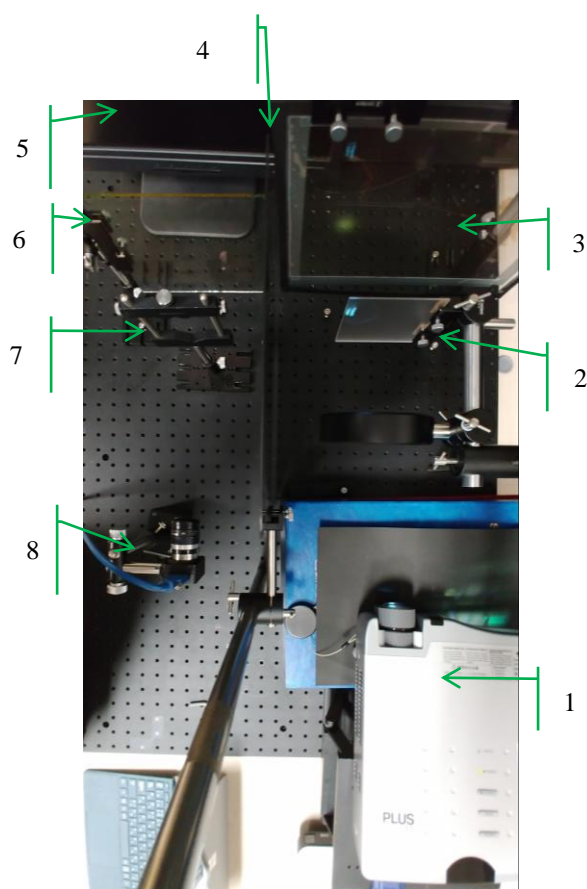


図 4.7 実験セットアップの写真。説明するデバイスは、緑色矢印の先に位置する。1：データプロジェクター、2：透過型拡散スクリーン、3：一番目のホログラムミラー、4：DCRA、5：背景表示のための液晶ディスプレイ、6：二番目のホログラムミラー、7：空中像位置、8：観測用カメラ

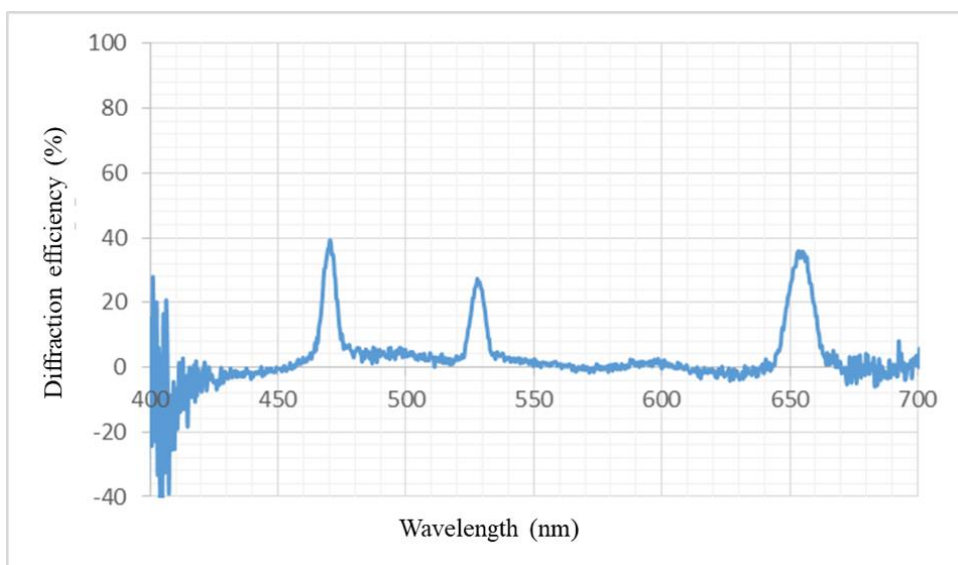


図 4.8 ホログラムミラーの回折効率。緑色のピークが青赤に比べ小さい。

## 4.3.2 実験と解析結果

### 4.3.2.1 空中像観察

最初の評価として、空中映像形成の確認実験を、観察カメラの焦点位置依存性と運動視差によって確認した。空中映像はアルファベットの文字で、二番目のホログラムミラーの 50mm 手前に結像するように設計した。液晶ディスプレイが二番目のホログラムミラーの約 50mm 後に配置され、背景として屋外の風景が映し出されている。図 4.9(A) ~ (C) は、それぞれ空中像、二番目のホログラム、背景画像にフォーカスを合わせたときの写真である。カメラの撮影条件は、F#: 1.4、f: 12 mm、カメラレンズからホログラムまでの距離は 400mm である。奥行きのある位置関係に応じてフォーカスの合っている像が異なる写真が撮影されている。図 4.9(D) と (E) は背景と空中像の運動視差を表している。これらの写真は水平視野角が約 $\pm 15\text{deg}$ の範囲で撮影されている。運動視差による背景と空中像の関係が捉えられている。

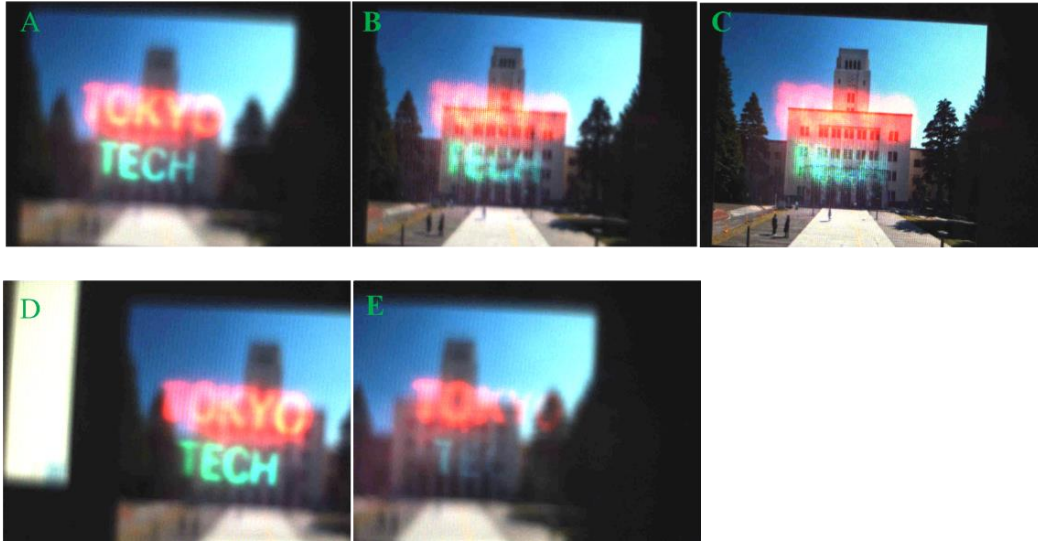


図 4.9(A)～(C) それぞれ空中像、ホログラムミラー、背景に焦点を合わせて撮影した写真。図 4.9(D)、(E) 空中像と背景の運動視差を表す。±15° の角度範囲で撮影。

#### 4.3.2.2 波長分散補正

空中像の波長分散補償の比較実験のための実験光学系を作製した。二番目のホログラムミラーと両方のホログラムミラーを通常のミラーに置換えた構成である (図 4.10(A) and (B))。通常のミラーは空中像が提案手法のものと同じ位置に形成されるよう、±22.5deg. 傾けられている。図 4.10(C)、(D)、(E)は四角形のパターンをそれぞれ、提案方式、二番目のホログラムミラーを通常ミラーで置換えた構成、両方のホログラムミラーを通常ミラーに置換えた方式によって投影した時の、空中像の写真である。図 4.10(D)は、縦方向 (回折方向) に数 mm のぼやけが生じている。像は縦方向に潰れているが、これは一方のホログラムミラーの置換による非対称性から来るもので、ここでは問題とはならない。この歪みを差し引いても、図 4.10(D)のぼやけは図 4.10 (C) や (E)で観察されている像のものよりも著しく大きい。提案方法や通常ミラー 2 枚構成では、このような大きなぼやけは生じない。図 4.10(C)で縦方向 (回折方向) の線の幅は、水平方向の幅と同等である。このような実験結果より、分散補償が十分機能していることがわかる。補足として、図 4.10(C)、(D)と(E)の色の違いはホログラムミラーのスペクトルによるものである。赤っぽく見えるのは、単純にホログラムミラー完成度によるものであり、今後の改善が求められる。さらに写真で形状が歪んでいるのは、観察カメラのアライメントエラーによるものである。また、テストチャートによる解

像度評価による比較でも、提案手法と比較光路での同等な解像度の結果が得られたことから、波長分散補償の効果が再確認された（図 4.10(F)~(H)）。

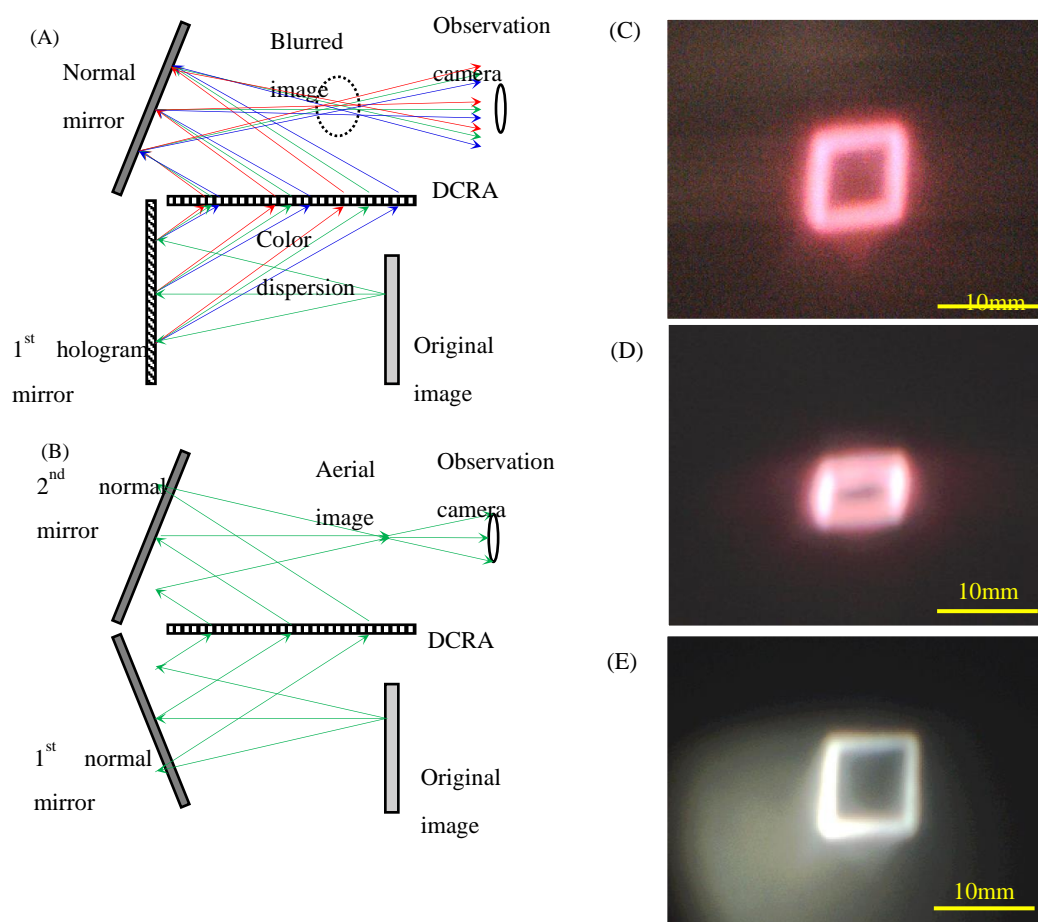


図 4.10 (A)、(B) 一つあるいは二つのホログラムミラーを通常のミラーで置換えた構成。  
 図 4.10(C) 提案手法で投影された四角形の空中像。図 4.10(D)、(E) 一つあるいは二つの  
 ホログラムミラーを通常のミラーで置換えた構成で（図 4.10(A)、(B)）、同じ四角形  
 を投影した空中像。

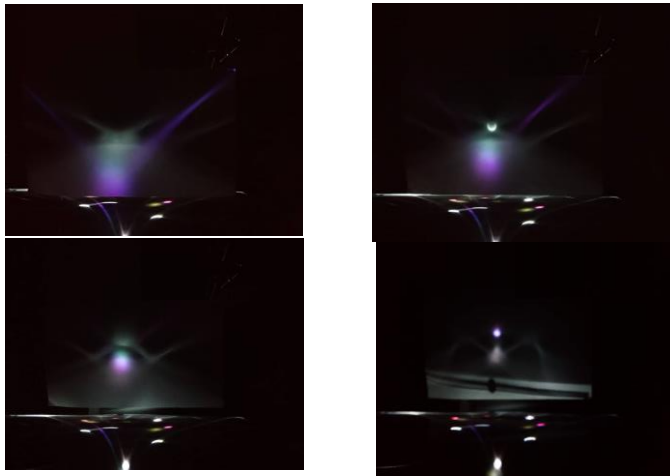
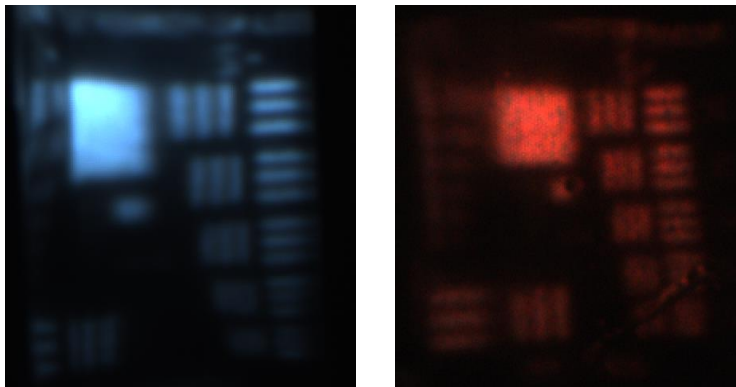
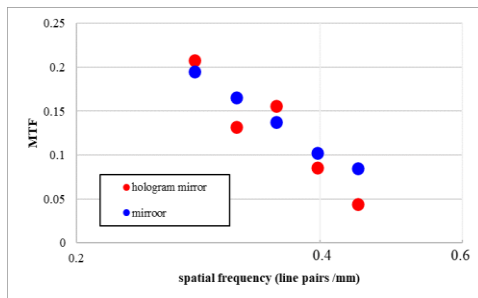


図 4.10(F) 白色点像投影における DCRA 射出後の光路のパターン。左上、右上、左下、右下の順に、HOE からの距離が 60mm、40mm、20mm、0mm。撮影位置が HOE に近づくとつれ、色分散が収束していく



(F) 比較光路

(G) 提案手法



(H) MTF の空間周波数依存性

図 4.10(F)、(G)、(H) USAF チャートによる解像度評価。波長分散が補正されていない場合は比較光路に比べ、像解像度が低下しているはずである。図 4.10(H)において、提案方式と比較光路はほぼ同等な MTF の空間周波数依存性が得られている。

#### 4.3.2.3 虚像抑制

提案手法での虚像抑制を確認するため、図 4.1 の提案構成とホログラムミラーを通常ミラーに置換えた図 4.10(B)の構成で虚像実験を行った。その結果を図 4.11(A)と(B)に、それぞれミラー置換構成、提案構成での結果を示す。観測カメラの条件は、4.3.2.1 と同等である。ミラー置換構成では虚像が現れるが (図 4.11(A))、提案手法ではカメラの感度を 100 倍にしても同じ位置に虚像は観察されない (図 4.11(B)、(C))。これは、一番目のホログラムでの水平回折角  $\theta_u$  が 22.5 deg. と、図 4.6 での 45 deg. に比べ十分小さいためであると考えられる。

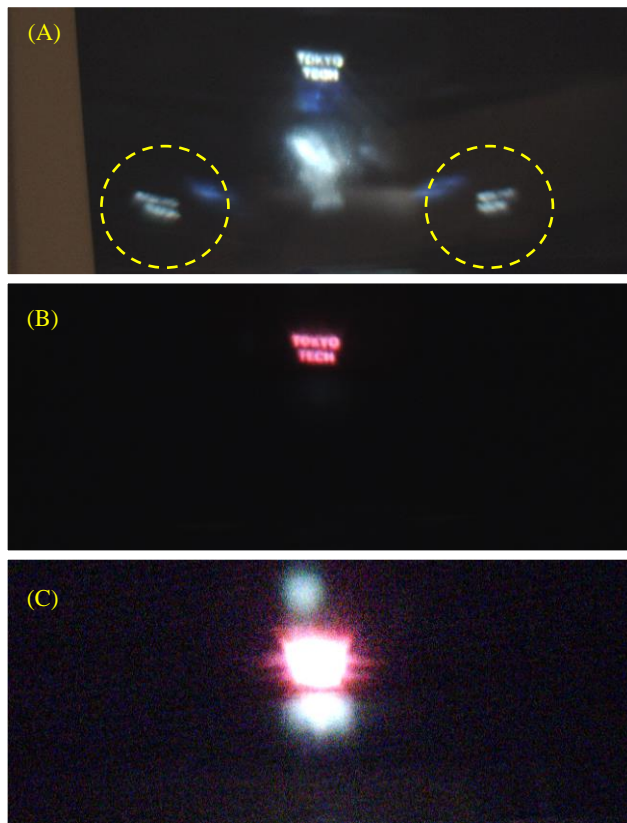


図 4.11(A) 二つのホログラムミラーを通常ミラーで置換えた構成 (図 4.10(B)) で投影した空中像と虚像 (黄色点線円内) では虚像が観察されている。提案手法では、虚像は観察されていない (図 4.11 (B))、観察カメラの感度を 100 倍にしても同様である (図 4.11(C))。



#### 4.4. 本提案シースルー空中ディスプレイ表示方式の独自性と先進性

本提案方式は、本研究での完全に独自のアイデアの技術であり、2章 2.3.2.4 で紹介した方法とも異なる独自の技術である。DCRA を使ったシースルー方式は、これまで前例がなく、AIRR シースルー方式に比べ透過率という点で圧倒的に背景観察が容易になると考えられる。また、本提案方式は、波長分散を補正できているという点、DCRA 固有の虚像を抑制できているという点で、これまでの要素技術の課題と考えられてきた課題も同時に解決している。ホログラフィックプロジェクターと HOE スクリーンの方式に比べても、ノイズや画像サイズ、視域という点で優れている。

#### 4.5. 応用に関する議論

本研究では DCRA とホログラムミラーを組み合わせることで、双方の欠点を克服できることを見出すことができた。それによって、このシースルー空中ディスプレイシステムは新たな UI、UX を提供できるものと考えられる。

応用の点では、ユーザーが視点を変えられないような場合に、役に立つ。自動車の運転は最も一般的な例である。ドライバーはあまり頻繁に視線を変えたくはない。このシステムは、自動車のフロントガラスに実装することができる。二番目は手術である。術者は同様な状況に直面する。医師らは患者の術部から視線を動かさない状況に遭遇することがある。近年のビデオ手術システムでは、モニターを見ながら施術する。この技術はモニター上で UI 用の空中映像を、観察している部位の近くに表示することで医師をサポートすることができるだろう。

さらにこの技術は、通常のタッチスクリーンに設置することで、既存のタッチセンサーを空中映像 UI に変更することができる。これにより、公共の券売機や自販機などに安価に空中映像 UI を導入することができる。

#### 4.6. 4 章まとめ

我々は、DCRA とホログラムミラーを組み合わせたシースルー空中ディスプレイを提案した。体積 HOE の角度選択性により通常の DCRA の課題であった虚像抑制の可能性を示した。シースルー空中映像越しに液晶モニター上の背景が観察できることを実験的に示した。さらに、ホログラフィック素子で生ずる波長分散を、DCRA の対称的な光路によって補償できることも示した。

これにより、1 章で議論した必然性のある新しい機能と考えられるシースルー空中ディスプレイを、高い背景透過率で実現できることを示すことができた。

## 参考文献

- 4-1. Y. Monnai, K. Hasegawa, M. Fujiwara, K. Yoshino, S. Inoue, H. Shinoda, HaptoMime: “Mid-Air Haptic Interaction with a Floating Virtual Screen”, UIST’14, October 5–8, Honolulu, HI, USA 2014, HaptoMime: Mid-Air Haptic Interaction with a Floating Virtual Screen
- 4-2. Nakao, S. Takahashi, H. Kobayashi, M. Yamaguchi ‘A Psychometric Evaluation of the User Interaction System Combining an Aerial Display with Gesture Recognition,’ ITE Trans. on MTA 6 (3), 217-225 2018
- 4-3. H. Yamamoto, S. Suyama, “Aerial Imaging by Retro-Reflection (AIRR),” SID 2013. digest, 895
- 4-4. S. Maekawa, K. Nitta, O. Matoba, “Transmissive optical imaging device with micromirror array,” Proc. SPIE 6392, 63920E 2006
- 4-5. <https://aska3d.com/ja/>
- 4-6. J. Arai, F. Okano, H. Hoshino, I. Yuyama, “Gradient-index lens-array method based on real-time integral photography for three-dimensional images,” Appl. Opt. 37 (11), 2034 1998
- 4-7. Y. Yoshimizu, E. Iwase, “Radially arranged dihedral corner reflector array for wide viewing angle of floating image without virtual image,” Opt. Express 27 (2), 918 2019
- 4-8. S. Choi, S. Park, and S.-W. Min, "Design of ghost-free floating 3D display with narrow thickness using offset lens and dihedral corner reflector arrays," Opt. Express 28, 15691-15705 2020
- 4-9. D. Min, M.-H. Choi, and J.-H. Park, "Compact in-line floating display system using a dihedral corner reflector array," Opt. Express 29, 1188-1209 2021
- 4-10. H. Yamashita, E. Kobayashi, “Mechanism and design of a novel 8K ultra-high-definition video microscope for microsurgery,” Heliyon 7 (2), e06244 2021
- 4-11. D. Nishimura, M. Shinohara, H. Yamamoto, “Aerial Signage Formed with AIRR and DS3D Display,” SID 2020. digest • 1623, P-74
- 4-12. N. Kim, Y.-L. Piao, H.-Y. Wu, Holographic Materials and Optical Systems, Chapter 5, Holographic Optical Elements and Application, (InTech 2017)
- 4-13. H. Kajita, N. Koizumi, and T. Naemura. “SkyAnchor: Optical Design for Anchoring Mid-air Images onto Physical Objects.” In Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology 2016, 415-423. ACM, New York, NY, USA.

- 4-14. F. Watanabe, T. Nakamura, S. Torashima, S. Igarashi, S. Kimura, Y. Aburakawa, M. Yamaguchi, "Dispersion compensation for fullcolor virtual-imaging systems with a holographic off-axis mirror," Proc. SPIE 11306 1130604 2020
- 4-15. T. Kubota, "Image Sharpening Of Lippmann Hologram By Compensation Of Wavelength Dispersion," Proc. SPIE 1051, III 1989
- 4-16. M. Yuki, "Large Air Floating Image Device and Application to Non-Contact User Interface" Proc. the International Display Workshops 27th FMC3-1 2020
- 4-17. H. Kogelnik, "Coupled - wave theory for thick hologram gratings," Bell Syst. Tech. J. 48 (9), 2909 1969
- 4-18. [https://www.piq.co.jp/index\\_e.html](https://www.piq.co.jp/index_e.html)
- 4-19. F. K. Bruder, T. Fäcke, R. Hagen, D. Hönel, E. Orselli, C. Rewitz, T. Rölle, G. Walze., "Diffractive Optics with High Bragg Selectivity – Volume Holographic Optical Elements in Bayfol® HX Photopolymer Film" Proc. SPIE 9626 96260T-1 2015

## 5. 総括

### 5.1. 3章、4章のまとめ

1章の議論において、空中映像UIは“なんとなく良い”と思われていたが、3章での実験により、空中ディスプレイだけでなく十分性能のよいジェスチャーがその操作性の良さに重要な役割を果たすことが分かった。また通常ディスプレイに空中ディスプレイは、ユーザーにとって斬新さを感じるものであることが、被験者を使ったユーザビリティテストで明らかになった。これにより、通常ディスプレイより空中ディスプレイ、そして十分なジェスチャーの性能をもたせるといふ、開発設計の方向性を示すことができた。

また、3章で空中映像UIの斬新さを導くことができたが、1章ではタッチセンサーの例から、斬新さがあっても必然性のある新機能が必要なことを導出した。そしてスマートグラス普及の類似性から、シースルー機能が空中映像UIに求められる新機能であろうという仮説を立てた。これまで、十分な性能のシースルー空中ディスプレイは存在してなかったが、4章において独自の方式を提案、実証した。

以上より、斬新なUIでも必然性のある新機能が重要だという仮説に対し、3章で空中映像UIが斬新であることを示し、4章で新機能を提案した。以上より、この仮説が正しければ、十分普及するUIであると考えられる。

### 5.2. まとめ

本研究では、最初に空中映像UIの社会的存在意義、即ちどのようにしたら普及させられるか検討を行った。過去のUIの普及について考察し、斬新さと必然性のある新機能、ここではシースルー機能という要素が必要という仮説を導出した。この仮説実証のため、1) ユーザーは本当に空中映像UIが良いと思っているのか? 良いのであれば2) 操作対象を観察しやすいシースルー空中映像投影の現実解という点に、研究の主眼を置いた。

1) のためのフレネルレンズを用いた簡易空中映像投影と、カメラと赤外線センサーによるジェスチャーを組み合わせたUIプロト機を試作した。これを用いて被験者によるASQ法ユーザビリティ評価を行った。ノンパラメトリック検定の一つであるKruskal-Wallis検定と因子分析結果として、通常の2次元ディスプレイとのジェスチャーとの組み合わせに比べ、斬新で操作性の良いUIであるという因子が抽出できた。2) 独自の新しい方式である、DCRAとホログラムミラーの組み合わせたシースルー2次元空中ディスプレイ法を提案し、実験光路により実験実証した。DCRAとホログラム固有の課題である、虚像と波長分散もこの提案手法により改善・解決できる優位性も同時確認することができた。以上より、提案仮説の前提と実現手段を立証することができた。

### 5.3. 今後の課題

本研究の最終的な目的は、空中映像に触れるように操作をする UI の広義のユーザビリティを向上し、広く一般に使われる技術として確立することである。そのために必要と考えられる技術を中心とする課題を、概念的に上位から挙げる。

- A) 1) 3次元表示は、表示技術だけの向上だけでなく、情報システム全体の向上が必要という要素が求められる。しかし、3次元は2次元表示を包含するうえに、今後膨大な情報量を扱う情報技術全体の向上も期待できるので、3次元空中映像の技術は開発を進める必要がある。
- B) 超音波等を用いた触感提示技術は、実験的なデモンストレーションは行われている。今後開発が期待される PMUT, CMUT のフェーズドアレイにより小型で安価な触感提示を開発すべきである。
- C) シースルー空中映像 UI のユーザビリティ評価を様々なユースケースで行う必要がある。5章では一般論として必要性を議論したが、ユースケースに応じたプロトタイプとアプリケーションを用意して、実使用に合わせた評価を行い、ユーザーに受け入れられるかどうかの評価と、課題の抽出をすることが求められる。
- D) AIRR など他式との比較評価を行い、シースルー空中映像の方式としてのベンチマークを行う必要がある。
- E) 5章の実験では、DCRA 面とホログラムミラーの角度を垂直とし、回折角度も  $45^\circ$  の一つの例しか実施していない。透過ホログラムまで含め、想定されるあらゆるケースで、本研究5章の原理に基づく実証実験が必要と考えられる。
- F) 虚像除去光路の定量解析と評価は、4章では概念的な定性的な理解に留まる。今後光線追跡と結合波理論厳密解(Rigorous Coupled Wave Theory RCWA)等による定性的な解析が求められる。
- G) DCRA と同様、対称な結像光路を形成するデバイスあるいはシステムの探索が必要である。現状の DCRA は民生用機器に搭載するデバイスとしては高価である。また光結合効率も他の結像素子に比べて小さい。DCRA 構造最適化による効率向上も求められる。
- H) ホログラムミラーの回折効率向上：一枚のホログラムに三原色を露光すると、単色ごとに回折効率は低下する。単色を3枚重ねたホログラムはすでに検討されており、最適な構成のものを利用する。また回折効率向上のためのフォトポリマー材料開発も求められる。
- I) ホログラム以外の回折素子の可能性：例えば回折光学素子などで、4章で提案した原理に基づく空中映像が実現できるかといった検討が求められる。現状のホログラム用フォトポリマーは高価であり、少ない工数で露光できる手段に開発も必要である。光

学回折素子(Diffractive Optical Element DOE)が安価に製造でき、同等以上の回折効率と波長選択性があれば、導入すべきである。また近年開発が進んでいるメタマテリアルなどの分野は注目しておくべきであろう。

- J) 10) 空中に投影する画像は、4章の実験では発散角の小さい透過スクリーンにプロジェクターで投影した画像を利用した。しかし実用的には FPD が望ましい。一般の民生用ディスプレイより高輝度、高コントラスト、狭視域、狭帯域ディスプレイが好ましい。工学院大学本田らによるマイクロカップ LED ディスプレイ[5-1]は、高輝度、高コントラスト、狭視域を設計により実現できる可能性がある。また狭帯域波長制御という点では量子ドット LED ディスプレイ[5-2]の波長設計最適も一つの手段である
- K) 11) 空中映像表示以外への応用検討：本研究の目的からは外れるが、4章での提案原理を他分野への応用を考えるべきである。

#### 5.4. 今後の展望

これまで、2次元空中映像表示技術は、DCRA や AIRR など幾何光学的アプローチが中心であったが、第4章でのホログラム導入の提案により、今後この分野の研究に波動光学的要素を取り入れる研究が増えることを期待したい。

空中映像は前述のようにそれ自体が注意を引くため、前述のように背景が黒色であったり投影光学系が見えるこれまでの表示では、空中像そのものを操作するコンテンツに応用が限定されがちであると推測される。シースルーにより、背景物体の操作、背景情報を利用した操作への応用が期待できる。さらにホログラムの回折光路の設計自由度を利用した場面、例えば輸送機器などの傾いたガラスなどに本研究成果が利用されることを期待する。

また、シースルー機能を導入することでこのような非接触 UI の用途が拡大・一般化し、公衆タッチセンサーなどでの間接接触による感染性疾患の蔓延防止の一助となることが、本研究の大きな社会的意義の一つである。

#### 参考文献

- 5-1. 中尾 勇、“表示装置および照明装置、特許第 4126751 号、2008 年 5 月 23 日登録

5-2. 名和遼祐、光成将矢、尾沼猛儀、山口智広、本田徹、“シリコンマイクロカップ基板の製作と $\mu$ -LEDの集積化の検討”、応用物理学会秋季学術講演会講演予稿集 (Extended Abstracts. JSAP Autumn Meeting)、78巻：8ページ：8p-PB1-16、2017年08月25日

## 本研究の研究業績

### 論文

- 1) “A Psychometric Evaluation of the User Interaction System Combining an Aerial Display with Gesture Recognition”, Isamu Nakao, Shunsuke Takahashi, Hiroshi Kobayashi, and Masahiro Yamaguchi, ITE Trans. on MTA Vol. 6, No. 3, pp. 217-225 (2018)
- 2) “See-through aerial display using a dihedral corner reflector array and hologram mirrors”  
Isamu Nakao, Takumi Sakamoto, and Masahiro Yamaguchi  
Applied Optics Vol. 60, Issue 31, pp. 9896-9905 (2021)

### 国内学会・研究会

- 1) “空間ディスプレイとジェスチャー認識を組み合わせたユーザーインターフェイスの心理学的評価”, 中尾 勇、高橋俊介、小林寛史、山口 雅浩、映像情報メディア学会技術報告会 2017/10/26、口頭発表及び研究会資料
- 2) “2 面コーナーリフレクターアレイとホログラフィック光学素子による背景透過空中ディスプレイ”, 中尾 勇、坂本 匠、山口 雅浩、ホログラフィックディスプレイ研究会会報 4 1 巻 3 号 (9 月発行)、映像情報メディア学会技術報告 45 巻 2 号 29-32 ページ、オンライン口頭発表及び研究会資料



## 本研究外の研究業績

### 論文

1) “Magnetically Induced Super-resolution for High Track Density”, Isamu Nakao, and Masahiko Kaneko, *Advanced Materials '93, II / B: Information Storage Materials* pp. 945-950, *Trans. Mat. Res. Soc. Jpn. Volume 15B*

### 国際会議

- 1) “Magnetically Induced Super-resolution for High Track Density”, Isamu Nakao, and Masahiko Kaneko, *International Union of Materials Research Society - International Conference on Advanced Material, Symposium V, VAa1.2, 1993, Distinguished Invited Paper*
- 2) “Synthesis and Characterization of Zinc Selenide Quantum Dots”, Isamu Nakao, Timothy Driscoll, Nabil M. Lawandy, *Materials Research Society Fall Meeting 1998*

## 謝辞

本博士研究を進めるにあたり、理解して頂いた家族と、ご協力頂きました以下の皆様に感謝致します。

兵庫県立大学 高度産業科学技術研究所	内海 裕一 教授	LIGA による DCRA 試作
(株) パリティイノベーションズ代表取締役前川 聡 博士		DCRA に関する議論
	取締役 前田 有希 博士	同上
ソニーグループ (株) 元バイスプレジデント	矢田 博昭 博士	本研究のソニー社内承認
	技術者 森田 政義 氏	簡易セットアップ機構設計
	技術者 日高 伊佐夫 氏	簡易セットアップソフト
WiS クリエーション	代表 福田 邦夫 氏	簡易セットアップ作製承認
ピクシーダストテクノロジーズ (株)	遠藤 彰 氏	簡易セットアップ制御系
大阪大学 産業科学研究所	中村 友哉 准教授	
東京工業大学大学院	高橋 俊介 氏	
東京工業大学	小林 寛史 氏	
	坂本 匠 氏	

最後に本研究全てに渡りご指導ご鞭撻頂きました東京工業大学 山口雅浩 教授に心より感謝致します。