

修士論文

2つの結像系を用いた  
複合現実型空間立像ディスプレイの研究

2007 年 2 月 2 日

指導教員 原島 博 教授

東京大学大学院 情報理工学系研究科  
電子情報学専攻 56412

加藤 紀雄

# 内容梗概

---

われわれの生活において、デスクトップ環境で情報を扱うことは今や日常的な行為である。しかし、既存のディスプレイやインタフェースだけでは、万人が自由に情報にアクセスできる環境とは言えない。そこで、ユーザがより自然な行為で情報を操作・閲覧できる新しい情報環境が切望される。その新しい情報環境を提供する手段の1つに複合現実感 Mixed Reality(MR) がある。MR は実世界環境とコンピュータ上のバーチャルな環境が高度に融合した状態である。MR 環境の実現により、既存のデバイスを使うことなく、実世界のデスクトップ環境でバーチャルな情報を扱うことができる。デスクトップ環境で実在感の高いMR 環境は、

- デスクトップ上で直立した映像をスクリーンを使わずに提示
- 実オブジェクトを介した直感的なインタラクションが可能

という2つの要件を満たすことが望ましい。

このような背景のもと、本論文では複合現実型空間立像ディスプレイの開発を行い、上記の2つの要件を満たすMR 環境を実現した。提案したディスプレイは、結像系という光学原理に基づいている。結像系はスクリーンを使うことなく空中に映像を提示できる。そこで、ユーザがデスクトップを見下ろす姿勢で直立した映像を観察するための光学設計手法を提案・実装した。これにより、ユーザは眼下にあるデスクトップ上で、実オブジェクトと直立したバーチャルな映像が混在するMR 環境を利用できる。

一方で、結像系による直立した映像は2次元映像であるため、奥行き情報が乏しいという問題を持つ。それに対して本論文では、2つの結像系を組み合わせることで位置情報を補間する手法を、2つのアプローチでそれぞれ提案・実装した。

第1のアプローチは“実世界と鏡の中の世界の整合性”に着目した手法である。鏡のあるデスクトップ環境を想定し、実世界と鏡の中の世界に同時にMR 環境を実現する。2つの世界で同じ位置・大きさの映像を映し出すことにより、2つの直立した映像を指標にした位置情報補間を実現した。この手法は、“鏡には背面が映る”という固定観念を活用して、鏡の前に提示された直立映像の表裏関係を、ユーザに違和感を与えることなく提示できる特長を持つ。

第2のアプローチは、2つの結像系による2次元映像を直交関係になるように組み合わせる手法である。直立した映像の足元に水平な地面の映像を提示することで、直立した映像の立体感の向上と、水平像による奥行き情報の表現で位置情報の補間を実現した。また、この手法にカメラによるオブジェクト認識を導入し、インタラクティブなシステムを実装した。



# 目次

---

第 1 章	序論	1
1.1	本論文の背景	2
1.2	本論文の目的	2
1.3	本論文の構成	3
第 2 章	関連研究	4
2.1	複合現実感 (Mixed Reality: MR)	5
2.2	平面スクリーンへの映像提示	6
2.2.1	古典的手法	6
2.2.2	映像と不可視情報を同時に提示する手法	9
2.3	実世界を反映した AV 環境を用いる手法	10
2.4	実世界情報に近い映像提示	12
2.4.1	メガネ型装置を用いる手法	12
2.4.2	スクリーンオブジェクトへの映像提示	13
2.4.3	結像系	16
2.4.4	鏡の世界への映像提示	18
2.5	3 次元ディスプレイ	20
2.6	本章のまとめ	23
第 3 章	デスクトップ環境における結像系の光学設計手法	24
3.1	はじめに	25
3.2	結像系	25
3.3	提案する光学設計手法の目的	27
3.4	光学設計手法	29
3.4.1	概要	29
3.4.2	側面部について導出	29
3.4.3	平面部についての導出	38
3.4.4	ユーザの視点と実像の関係	39
3.5	光学設計シミュレーション	41
3.5.1	シミュレーションの目的	41
3.5.2	シミュレータの仕様	41
3.5.3	シミュレーション	44
3.5.4	シミュレーションのまとめ	46
3.6	本章のまとめ	53

<b>第4章</b>	<b>鏡のある環境を活用した立像の位置情報補間</b>	<b>54</b>
4.1	はじめに	55
4.2	システムの概要	55
4.3	システムの構成	57
4.3.1	空間的整合性に着目した構成	57
4.3.2	光学的整合性に着目した構成	58
4.4	実装	59
4.4.1	実装に用いるレンズについて	59
4.4.2	構成 A の実装結果	59
4.4.3	構成 B の実装結果	62
4.4.4	構成 A と構成 B の比較	64
4.4.5	観察位置を左右に移動したときの様子	65
4.4.6	輝度測定	65
4.4.7	俯角および水平画角の測定	65
4.4.8	考察	66
4.5	アプリケーション	66
4.5.1	実世界と鏡の中の世界の整合性を維持した場合	66
4.5.2	実世界と鏡の中の世界の整合性にとらわれない場合	67
4.6	本章のまとめ	71
<b>第5章</b>	<b>2つの実像の直交関係を活用した立像の位置情報補間</b>	<b>72</b>
5.1	はじめに	73
5.2	システムの概要	73
5.3	システムの構成	74
5.4	実装	76
5.4.1	立像と水平像のみ提示した場合	77
5.4.2	観察位置を左右に移動したときの様子	78
5.4.3	考察	78
5.5	アプリケーション	79
5.5.1	ストーリーテリングシステム	79
5.5.2	丸太跳びゲーム	80
5.5.3	遠隔地とのコミュニケーションツール	80
5.5.4	水平像の上に置かれた実オブジェクトへのエフェクト付与	80
5.6	インタラクティブなシステムへの拡張	83
5.6.1	カメラによる実オブジェクトの認識	83
5.6.2	アプリケーション 1：個人閲覧用ビューア	84
5.6.3	アプリケーション 2：サルと実オブジェクトのインタラクション	89
5.7	本章のまとめ	95
<b>第6章</b>	<b>結論</b>	<b>96</b>
6.1	本研究の成果	97
6.2	2つの複合現実型空間立像ディスプレイの性能比較	98
6.3	今後の課題と展望	99

---

謝辭	100
参考文献	101
発表文献	106

# 目次

---

2.1	Mixed Reality の定義	5
2.2	“Fog Screen”	6
2.3	“sensetable”	7
2.4	“The Shared Design Space”	8
2.5	“Limpid Desk”	8
2.6	“Augmented Coliseum”	9
2.7	“ProactiveDesk II”	9
2.8	“kobito”	10
2.9	“MRI”	11
2.10	“Cubee”	11
2.11	“ARToolKit”	12
2.12	“Illuminating Clay”	14
2.13	“Powder Screen”	14
2.14	“Tablescape Plus”	15
2.15	“floating interface”	16
2.16	“i-ball” の概観	17
2.17	“i-ball” の提示結果	17
2.18	“ALIVE” の概観	18
2.19	“ALIVE” の提示結果	18
2.20	“tlg” の概観	19
2.21	“tlg” の提示結果	19
2.22	“Virtual image”	19
2.23	“Flat panel 3D display”	20
2.24	“Depth Fuse Display”	21
2.25	“SeeLINDER”	22
2.26	“Laser produced 3D Display in the air”	22
3.1	結像系の基本原理	25
3.2	実像の特徴	26
3.3	結像系の問題点	26
3.4	提案する光学設計のコンセプト	27
3.5	提案手法の特長 1	28
3.6	提案手法の特長 2	28
3.7	結像系全体の光学設計の導出 (側面図)	31
3.8	実像の結像位置の導出 (側面図)	32
3.9	結像に必要なレンズの大きさの導出 (側面図)	34

3.10 実装に用いたレンズによる実像の最大サイズの導出 (立像)	35
3.11 実装に用いたレンズによる実像の最大サイズの導出 (水平像)	36
3.12 結像系全体の光学設計の導出 (平面図)	38
3.13 実装に用いたレンズによる実像の最大サイズの導出 (平面図)	39
3.14 ユーザの視点と実像の関係 (立像)	39
3.15 ユーザの視点と実像の関係 (水平像)	40
3.16 ユーザの視点と実像の関係 (平面図)	40
3.17 シミュレータの全体図	41
3.18 パラメータ設定ウィンドウ	42
3.19 シミュレーションウィンドウの各部説明	43
3.20 LCD の配置を変えた場合 (1): $\theta = 45$ 度, $f = 305\text{mm}$ , $L = 300\text{mm}$ , $d' = 800\text{mm}$	47
3.21 LCD の配置を変えた場合 (2): $\theta = 45$ 度, $f = 305\text{mm}$ , $L = 300\text{mm}$ , $d' = 800\text{mm}$	47
3.22 LCD の配置を変えた場合 (3): $\theta = 45$ 度, $f = 305\text{mm}$ , $L = 300\text{mm}$ , $d' = 800\text{mm}$	48
3.23 LCD の配置を変えた場合 (4): $\theta = 45$ 度, $f = 305\text{mm}$ , $L = 300\text{mm}$ , $d' = 800\text{mm}$	48
3.24 焦点距離 $f$ を変えた場合 (1): $\theta = 45$ 度, $f = 200\text{mm}$ , $L = 300\text{mm}$ , $d' = 800\text{mm}$	49
3.25 焦点距離 $f$ を変えた場合 (2): $\theta = 45$ 度, $f = 600\text{mm}$ , $L = 300\text{mm}$ , $d' = 800\text{mm}$	49
3.26 を変えた場合 (1): $\theta = 30$ 度, $f = 305\text{mm}$ , $L = 300\text{mm}$ , $d' = 800\text{mm}$	50
3.27 を変えた場合 (2): $\theta = 60$ 度, $f = 305\text{mm}$ , $L = 300\text{mm}$ , $d' = 800\text{mm}$	50
3.28 LCD の映像サイズ $L$ を変えた場合 (1): $\theta = 45$ 度, $f = 305\text{mm}$ , $L = 100\text{mm}$ , $d' = 800\text{mm}$	51
3.29 LCD の映像サイズ $L$ を変えた場合 (2): $\theta = 45$ 度, $f = 305\text{mm}$ , $L = 750\text{mm}$ , $d' = 800\text{mm}$	51
3.30 視点 - 実像間距離 $d'$ を変えた場合 (1): $\theta = 45$ 度, $f = 305\text{mm}$ , $L = 300\text{mm}$ , $d' = 400\text{mm}$	52
3.31 視点 - 実像間距離 $d'$ を変えた場合 (2): $\theta = 45$ 度, $f = 305\text{mm}$ , $L = 300\text{mm}$ , $d' = 1300\text{mm}$	52
3.32 デスクトップ環境における結像系の課題	53
4.1 実世界と鏡の中の世界の整合性	55
4.2 鏡のある環境で実現できる 2 つ MR 環境	56
4.3 鏡の中の実像を用いた位置情報補間	56
4.4 空間的整合性に着目した構成	57
4.5 光学的整合性に着目した光学設計	58
4.6 2 枚重ねたフレネルレンズを用いた場合の実像の様子	60
4.7 構成 A の実装結果 1	61
4.8 構成 A の実装結果 1	61
4.9 光学的整合性に着目した構成 (構成 B) の実装	62
4.10 構成 B を実装したシステムの概観	63
4.11 構成 B の実装結果: 鏡 A を用いた場合	63
4.12 構成 B の実装結果: 鏡 B を用いた場合	64
4.13 構成 B の実装結果: 視点を移動させたとき	65
4.14 構成 B の実装結果: 視野角	66
4.15 動物の CG モデル (ブタ) の描画	68
4.16 化学構造式 (ニトログリセリン) の描画	68
4.17 CG モデルハウスの描画	68
4.18 実世界と鏡の中の世界の整合性を維持した MR 環境	69
4.19 実世界と鏡の中の世界の整合性にとらわれない MR 環境	69
4.20 2 つの世界の CG モデル (サル) 同士の会話	70

4.21 実オブジェクトに対して2つの世界で異なるエフェクトを付加 . . . . .	70
5.1 提案手法のコンセプト . . . . .	73
5.2 水平像を用いる理由 . . . . .	74
5.3 システムの構成 . . . . .	75
5.4 直交した2つの実像を作り出すための結像系(平面図) . . . . .	75
5.5 システムの概観 . . . . .	76
5.6 実装結果1:立像は木のモデル,水平像は木の影を持つ平野 . . . . .	77
5.7 実装結果2:観察位置を左右に移動したときの様子 . . . . .	78
5.8 提案手法の特徴 . . . . .	78
5.9 ストーリーテリングシステム . . . . .	79
5.10 立像の高さを活かした丸太跳びゲーム:着地状態 . . . . .	81
5.11 立像の高さを活かした丸太跳びゲーム:跳躍状態 . . . . .	81
5.12 遠隔地とのコミュニケーションツール . . . . .	82
5.13 水平像の上に置かれた実オブジェクトへのエフェクト付加 . . . . .	82
5.14 カメラによる実オブジェクト認識 . . . . .	83
5.15 実オブジェクトの認識結果 . . . . .	84
5.16 個人閲覧用ビューア:実オブジェクトを水平面の領域外に配置 . . . . .	85
5.17 個人閲覧用ビューア:実オブジェクトを左手奥に配置 . . . . .	86
5.18 個人閲覧用ビューア:実オブジェクトを左中央に配置 . . . . .	86
5.19 個人閲覧用ビューア:実オブジェクトを左手前に配置 . . . . .	86
5.20 個人閲覧用ビューア:実オブジェクトを右手前に配置 . . . . .	87
5.21 個人閲覧用ビューア:実オブジェクトを右中央に配置 . . . . .	87
5.22 個人閲覧用ビューア:実オブジェクトを右奥に配置 . . . . .	87
5.23 システムの正面にいるユーザAが観察した様子 . . . . .	88
5.24 ユーザAの隣にいるユーザBがシステムを観察した様子 . . . . .	88
5.25 中央と奥の列に同時に実像を提示する構成 . . . . .	89
5.26 実像を提示したときの様子 . . . . .	90
5.27 サルとのインタラクションの全体図 . . . . .	91
5.28 サル:実オブジェクトを水平面の領域外に配置 . . . . .	91
5.29 サル:実オブジェクトを左奥に配置 . . . . .	92
5.30 サル:実オブジェクトを左中央に配置 . . . . .	92
5.31 サル:実オブジェクトを左手前に配置 . . . . .	92
5.32 サル:実オブジェクトを中央奥に配置 . . . . .	93
5.33 サル:実オブジェクトを中央に配置 . . . . .	93
5.34 サル:実オブジェクトを中央手前に配置 . . . . .	93
5.35 サル:実オブジェクトを右奥に配置 . . . . .	94
5.36 サル:実オブジェクトを右中央に配置 . . . . .	94
5.37 サル:実オブジェクトを右手前に配置 . . . . .	94

# 表目次

---

2.1	関連研究と提案手法の比較 . . . . .	23
3.1	基本設計のパラメータ . . . . .	44
3.2	LCD の位置と実像の関係 . . . . .	44
3.3	焦点距離の異なるレンズを用いた際の出力結果 . . . . .	45
3.4	レンズと水平面のなす角 $\theta$ の違うときの出力結果 . . . . .	45
4.1	実装時の設定パラメータ . . . . .	59
4.2	輝度測定の結果 . . . . .	65
5.1	実装時の設定パラメータ . . . . .	77
6.1	2つのシステムの性能比較 . . . . .	98

# 第1章

---

## 序論



## 1.1 本論文の背景

テクノロジーの進歩に伴い、デスクトップ環境で情報検索やデータ処理などを、コンピュータを介して行うことは日常的な行為となっている。この際、我々はディスプレイ画面上の映像情報を見ながらグラフィカルユーザインタフェース (GUI) やマウスやキーボードといったインタフェースによって情報操作を行う。しかし、子供や高齢者、あるいはコンピュータの扱いに不慣れな人にとっては、この操作の習得が困難で、不便な思いをする場合が少なくない。万人が容易に望んだ情報にアクセスするためには、既存のディスプレイやインタフェースにとらわれることない、新しい情報環境を構築しなければならない。その情報環境を実現する手段の1つが複合現実感 (Mixed Reality: MR) である。

MR は、実世界環境とコンピュータ上のバーチャルな環境を高度に融合した状態である。実世界上のデスクトップ環境でこの MR 環境を実現することにより、

- デスクトップ面自体をディスプレイとして利用
- 空中に映像を提示
- ジェスチャやオブジェクトの操作による映像情報とのインタラクション
- 実在しない力覚・触覚の提示

など、デスクトップ環境自体をバーチャルな情報を自由に扱える情報環境にできる。このため、MR 環境を構築するための研究開発が盛んに行われている。

実環境を情報環境化するという観点で MR が注目される一方で、映像情報を実世界情報に近い状態で提示するためのディスプレイ研究も盛んに行われている。従来の映像提示デバイスの多くは、テレビやパーソナルコンピュータ (PC) のモニタのような垂直型平面ディスプレイであるため、2次元の映像しか提示できなかった。これに対して、次世代のディスプレイとして注目されているのが3次元ディスプレイである。3次元ディスプレイは運動視差に対応して映像が変わる、奥行き感や立体感・実在感があるなど、実世界情報に近い状態での提示を可能にする。3次元ディスプレイは実物の状態を再現できるため、販売製品のバーチャルショーケースや遠隔地とのコミュニケーションツールなど、多くの用途に利用できるディスプレイとして期待されている。

MR においても、3次元ディスプレイと同様に実世界情報に近い映像情報を提示することは重要である。デスクトップ上に直立した映像の提示や任意の空間に映像を提示できれば、実オブジェクトと映像情報の視覚的差異が小さくなり、SF 映画でしか成しえなかった情報環境が実現可能となる。そのため、スクリーンオブジェクトへのテクスチャ情報投影や平置き型3次元ディスプレイを利用した MR 環境構築など、実在感の高い映像提示が可能な MR 環境を実現するための研究が行われている。しかし、前者は原理的にスクリーンオブジェクトのない空間への映像提示はできず、後者も現時点ではデスクトップ上に直立していると感じる程の飛び出し感を持つ映像提示は実現できていない。したがって、デスクトップ環境における実在感の高い映像提示ができる MR 環境は未だ十分満たされているとは言えない。

## 1.2 本論文の目的

本論文ではデスクトップ環境で直立した映像 (立像) を提示し、実在感の高い MR 環境を実現できるディスプレイ (複合現実型空間立像ディスプレイ) を提案する。

複合現実型空間立像ディスプレイは、結像系という光学原理に基づいている。結像系はスクリーンのない空中に映像 (実像) を映し出すことができる。この結像系を用いたディスプレイは目的とする実在感の高い立像を提示するため、

要件1: デスクトップ環境で立像提示を実現するための結像系の光学設計の実現

要件2: 結像系の持つ原理的な問題の解決

という 2 つの要件を満たすものとなっている。要件 1 を満たすことにより、ユーザに特殊装置の装着を前提とせずに、ユーザがデスクトップ面を見下ろす姿勢で立像を観察できる。言い換えると、ユーザは自然な状態でデスクトップ環境下で構築された実オブジェクトと立像が混在する MR 環境を利用できる。加えて、結像系による立像は、提示領域にスクリーンを配置する必要がない。そのため、デスクトップ上のみならず、空中への映像提示が可能である。したがって、デスクトップ上に置かれた実オブジェクトの周辺の空間に付加情報を映し出すという、新しい情報提示環境を可能にする。次に要件 2 ついて、結像系による実像は、奥行き情報が乏しいためにユーザが観察しにくいという問題を持つ。そこで本論文では、この結像系の課題を解決し、立像の実在感を高めた複合現実型空間立像ディスプレイを 2 つ提案する。1 つは、鏡のあるデスクトップ環境を想定し、実世界と鏡の中の世界の整合性に着目した手法である。他方は、2 つの実像の直交関係を活用した手法である。2 つの手法とも、立像に位置情報を補間することで視認性を高めている。この 2 つの要件を満たした複合現実型空間立像ディスプレイによって、デスクトップ環境で実在感の高い MR 環境を実現できる。

本論文では、はじめに要件 1 を満たすための結像系の光学設計手法を述べる。次に要件 2 を満たすための、2 つの結像系を用いた複合現実型空間立像ディスプレイを 2 つ提案・実装し、それぞれのアプリケーションについて述べる。

## 1.3 本論文の構成

本論文の構成は以下の通りである。

### 第 1 章：序論

本章である。本論文の背景・目的・構成を述べる。

### 第 2 章：関連研究

MR についての概要を説明した後、デスクトップ・テーブル環境で MR 環境を構築する手法に関する研究を述べる。また、3 次元ディスプレイについても紹介する。最後に、提案する複合現実型空間立像ディスプレイの位置づけについて述べる。

### 第 3 章：デスクトップ環境における結像系の光学設計手法

はじめに本論文で着目した結像系について説明し、結像系による MR 環境を構築することの有用性を述べる。そして、デスクトップに立像を提示するための結像系の光学設計手法を提案する。なお、提案する設計手法は任意の傾きを持つ実像を作り出せるため、ここでは、立像提示の光学設計だけでなく、デスクトップ面と同一面上の水平に実像（水平像）を提示するための光学設計についても述べる。また、シミュレータを作成し光学設計の動作確認を行う。

### 第 4 章：鏡のある環境を活用した立像の位置情報補間

“実世界と鏡の中の世界の整合性”を活用することで結像系による立像の位置情報を補間し、実在感を高めたディスプレイを提案・実装する。アプリケーションについて報告する。

### 第 5 章：2 つの実像の直交関係を活用した立像の位置情報補間

直交関係を持つ 2 つの実像を活用して位置情報を補間し、実在感を高めたディスプレイの提案・実装する。アプリケーションについて報告する。カメラ認識を導入し、ディスプレイにインタラクティブ性を付与した場合の動作を述べる。

### 第 6 章：結論

本論文の成果についてまとめ、今後の課題と展望について述べる。

## 第2章

---

## 関連研究

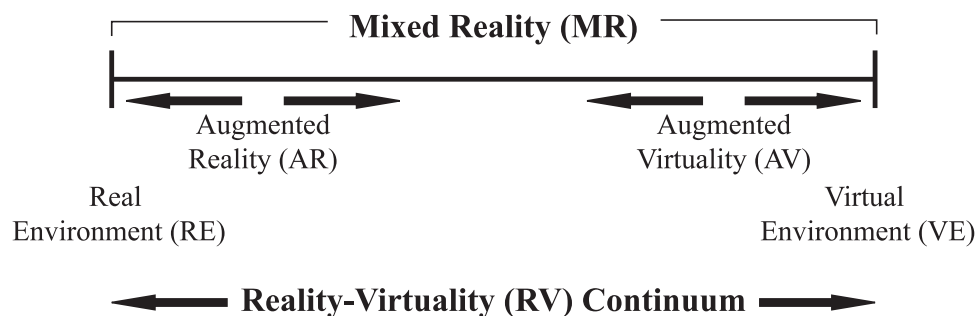


図 2.1: Mixed Reality の定義 (文献 [1] より)。

## 2.1 複合現実感 (Mixed Reality: MR)

複合現実感 (Mixed Reality: MR) は、実世界の環境 (実環境) とコンピュータの中のバーチャル世界の環境 (バーチャル環境) とが高度に融合した状態のことをいう。大田らは MR について図 2.1 のように定義している [1]。大田らは MR を 2 つに分類し、実環境上でコンピュータグラフィックス (CG) などのバーチャルな情報が融合している状態を拡張現実感 (Augmented Reality: AR)、バーチャル環境上に実写映像など実世界の情報が融合している状態を拡張バーチャル感 (Augmented Virtuality) とした。本論文では、この定義を用いて論じることとする。加えて、実世界上で AR が生じている環境を AR 環境、バーチャル環境で AV が生じている環境を AV 環境、それらの総称を MR 環境と呼ぶこととする。また、実世界とバーチャルな世界にそれぞれ存在するオブジェクトを明確にするために、実世界上のオブジェクトを実オブジェクト、バーチャル世界上のオブジェクトをバーチャルオブジェクトと呼ぶ。

初期の AR は、コンピュータビジョン (CV) によって認識を行い、その結果をプロジェクタや Head mounted display (HMD) で提示する視覚情報に反映させる手法が提案された。認識対象で分けると、Wellner らのジェスチャ認識 [2]、暦本らの 2 次元マトリクスコード認識 [3]、加藤らのマーカ認識 [4, 5] などがある。これらの多くは、テーブル面などをスクリーンとして情報提示を行っている。

次に、GUI による操作ではなく、実オブジェクトによって直感的に情報を操作するというタンジブルユーザインタフェース (TUI) の概念が石井らによって提案された [6, 7, 8, 9]。その経緯から、平面へのプロジェクションだけでなく、実オブジェクトをスクリーンとして用いることで、3 次元的な情報を扱ことができる手法が研究され始めた。スクリーンオブジェクトとして用いる対象は多岐にわたる。例えば、Ismo らの霧に投影する “FogScreen” [10] (図 2.2)、中村らの泡に投影する “bubble cosmos” [11]、Dietz らの水に投影する “Submerging Technologies” [12] など、あらゆるものにプロジェクションを行い、AR 環境を実現する手法が提案されている。これにより、バーチャルな情報に触れているような擬似的な感覚を持つ情報環境が実現し始めた。

また、石井らが提案し製品化された “SPIDAR” [13, 14] や SensAble 社の “PHANToM” [15] といった力覚ディスプレイが開発され、視覚情報と力覚ディスプレイの組み合わせにより、より実在感のある AR 環境を構築する手法が提案されている。嵯峨らは “Haptic Video” という PHANToM を用いて初学者のための学習支援システムを提案している [16, 17]。近年では、力覚に加え、視覚と触覚の組み合わせた牧野らの手法 [18] や、視覚と聴覚を組み合わせた比嘉らの手法 [19] など、複数の感覚を複合的に用いて AR 環境の実在感の向上を図っている。

一方、AV 環境については、コンピュータの高性能化や CG 技術の進歩により、実世界情報をバーチャル世界に再現することが容易となった。AR 環境と異なり、PC だけで AV 環境を利用できるため、地球を再



図 2.2: “Fog Screen” (文献 [10] より) .

現した Google 社の “Google Earth”[20] や、オンラインショッピングのために実在する販売商品を全周囲画像を基に 3DCG 化するなど、我々は日常的に様々な AV 環境を利用している。

MR に関する研究は、五感のうちの 1 つを利用するのではなく、複数の感覚を統合した MR 環境を実現する傾向にある。その中においても情報量の多い視覚情報は MR 環境を構築する際の中心的感覚であると言える。したがって、映像だけで高い AR 環境が実現するような、実世界情報に近い映像であるほかに、視覚以外の五感を伝えるインタフェース・ディスプレイを統合しやすい映像提示手法が望ましい。

2.2 節以降では、MR の研究動向のうち、特にテーブル・デスク型の AR 環境における映像提示に着目して論じる。2.2 節では、平面スクリーンへの映像提示手法について述べる。2.3 節では、実世界を反映した AV 環境を用いた手法について述べる。2.4 節では、実世界情報に近い映像を提示する手法について述べる。また、2.5 節では、実世界上で 3 次元情報を再現する AR 環境という観点から、3 次元ディスプレイについても述べる。ここでは、テーブル型以外の垂直型ディスプレイについても述べる。最後に 2.6 節でまとめる。

## 2.2 平面スクリーンへの映像提示

テーブル面やデスク面をスクリーンとして映像を提示する手法は、映像と実オブジェクトとのインタラクションを実現しやすいという特徴を持つ。本節では、平面スクリーンへのプロジェクションと物体認識を組み合わせた MR 環境構築手法について述べる。そして、近年、研究が盛んな映像を提示する際、不可視情報も一緒にプロジェクションすることで、受信装置を内蔵した実オブジェクトを操作する研究についても述べる。ここで取り上げる研究は、提示内容は 2 次元の映像情報であり、立体感や飛び出し感といった感覚を付与するものではない。

### 2.2.1 古典的手法

AR 環境を構築する際に、最も用いられる手法はテーブル・デスク面への映像提示とカメラやセンサを組み合わせたものである。カメラやセンサによってジェスチャや実オブジェクト・マーカの認識を行い、前の状態との差分を映像に反映させることで、インタラクティブ性を実現する。これまで、小池らの

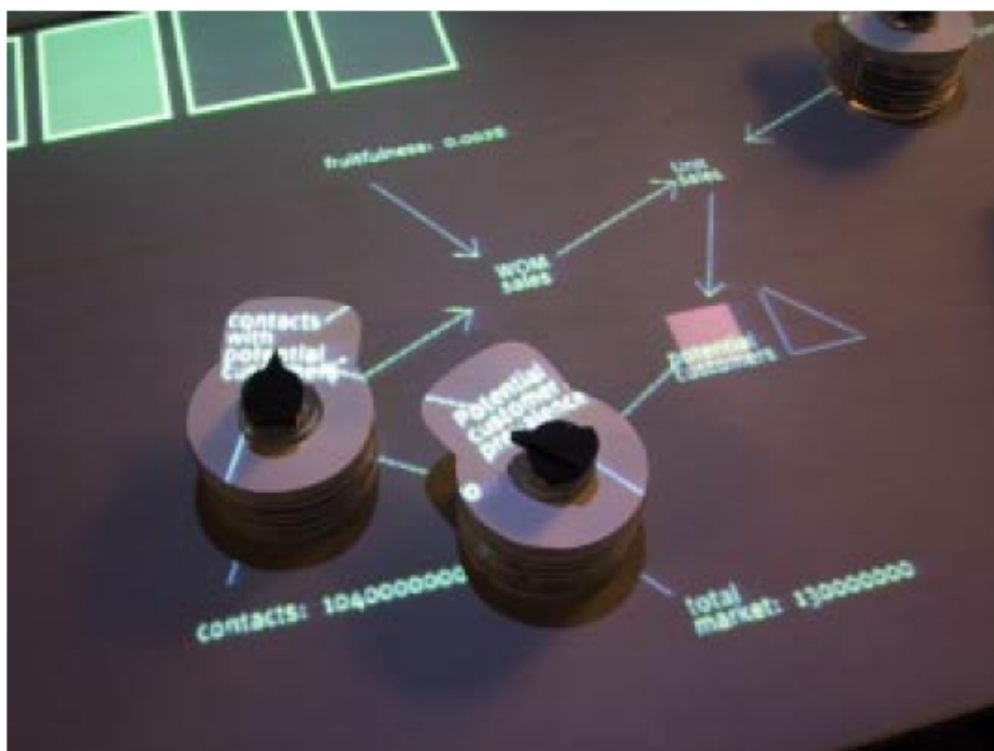


図 2.3: “sensetable” (文献 [21] より) .

“EnhancedDesk”[22]をはじめ、数多くの研究が行われてきた [23, 24] . Patten らの “sensetable”[21](図 2.3) では、電磁センサとタブレットを内蔵した机上に置かれた実オブジェクトをセンサによって認識、動作を反映させた映像を提示する．机上への映像提示は、ユーザが実オブジェクトと映像を同時に見ることができるため、直感的に操作しやすい．

多くの研究者がこの研究に取り組んだ結果、高い実用性を持つシステムが提案されている．Haller らの “The Shared Design Space”[25] (図 2.4) では、紙について 2 次元マーカの種類によって紙に映し出される映像が変わり、そこにデジタルペンによって自由に書き込みができる．かつ多人数による同時入力に対応しているため、役割分担ができる協調作業などに適している．また岩井らの “Limpid Desk”[26] (図 2.5) では、カメラにより書類の積層情報を記録することで、デスク上に山積みされた書類を AR 環境によって透過化し、整理と効率的な検索を可能にしている．

このようにテーブル・デスク面へプロジェクションする手法は、提示すべき映像が 2 次元の情報であれば、用途に応じた AR 環境を構築しやすい手法である．





図 2.4: “The Shared Design Space” (文献 [25] より) .



図 2.5: “Limpid Desk” (文献 [26] より) .

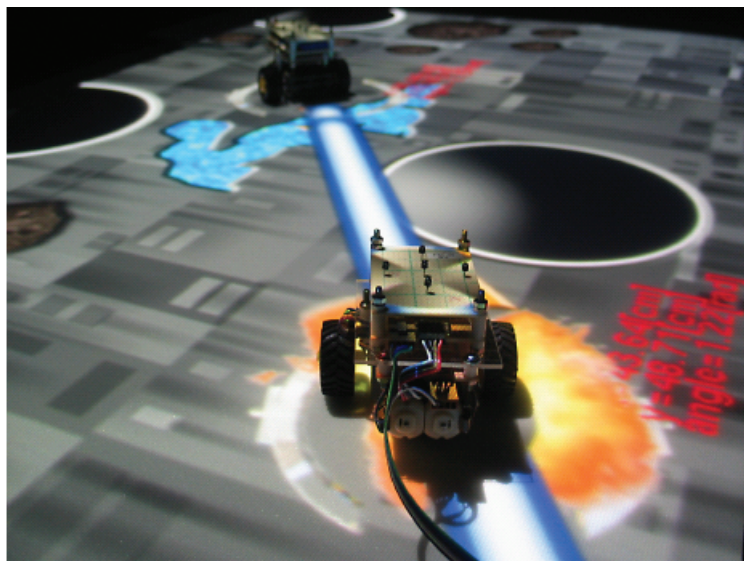


図 2.6: “Augmented Coliseum”(文献 [27] より) .



図 2.7: “ProactiveDeskII” (文献 [28] より) .

### 2.2.2 映像と不可視情報を同時に提示する手法

従来の映像提示は、ユーザに対しての提示のみと言える。これに対し、映像と一緒に受信器を内蔵した実オブジェクトへ情報を提示する研究が提案されている。代表的な研究として新居らの“Display-Based Computing” [29, 27] (図 2.6) がある。これは、提示する映像を高速に切り替えられる DLP プロジェクタを用いて、可視の映像と、ユーザには不可視だが受信器には読み取り可能な輝度パターンを提示する。これによりプロジェクタからの情報投影だけで、実オブジェクトを自由に操作することができる。吉田らの“ProactiveDesk II” [30, 28] (図 2.7) では、不可視情報に電磁場を利用している。プロジェクタ部から放った電磁場により、リニア誘導モータ (Linear induction motor: LIM) の原理を用いたテーブル型力覚ディスプレイを操作して、テーブル上の実オブジェクトを動かすことができる。





図 2.8: “kobito” (文献 [31] より)。

不可視情報により実オブジェクトを制御できる AR 環境は、実オブジェクトの遠隔操作が可能である。このため、ユーザが実オブジェクトを直接動かすのではなく、離れた場所にいるユーザのジェスチャなどによって、間接的に動かすような用途に有用な手法と考えられる。

## 2.3 実世界を反映した AV 環境を用いる手法

コンピュータ上に AV 環境を構築する際、実世界とバーチャルな世界をリンクすることにより、AV 環境との円滑なインタラクションが可能となる。青木らの “kobito”[31] (図 2.8) は、力覚ディスプレイ SPIDAR を用いてテーブル上の缶に反力を提示する。これにより、実世界上の缶と AV 環境上の CG の缶モデルを同期させ、実世界で缶に触れているユーザに対して、AV 環境上の kobito が実世界の缶を押している感覚を提示できる。したがって kobito は、缶という実オブジェクトを通じて、AV 環境とのインタラクションを実現する。一方、多数の実オブジェクトを用いて、AV 環境をデザインする用途に適したシステムとして Uray らの “MRI”[32] (図 2.9) がある。これは、マーカの ID を通じて実オブジェクトとバーチャルオブジェクトが対応しているため、実オブジェクトを動かすことで、AV 環境を自由に操作できる。実オブジェクトは底に ID が取り付けられるものであれば、任意の実オブジェクトを利用できる。そのため、機能を直感的に理解できるようなアフォーダンスを持つ実オブジェクトを選定することで、AV 環境との直感的なインタラクションが可能である。

先に述べた 2 つのシステムは平面ディスプレイによる映像提示のため、触覚的な実在感が高いが視覚的な実在感は高くない。これに対し、AV 環境を構築したディスプレイ自体をインタフェースとしたシステムに Ian らの “Cube” [33] (図 2.10) がある。立方体の各面に平面ディスプレイを配置して AV 環境を全方位提示する。そして Cube の傾きと Cube 内の AV 環境の傾きを同期させることで提示している AV 環境の実在感を高めている。

AV 環境の定義上、実世界上での実在感には限界があるが、バーチャル世界とのより直感的なインタラクションを行うためには、直感的行為を誘発するアフォーダンスを生み出すような映像提示が望まれる。



図 2.9: “MRI” (文献 [32] より) .

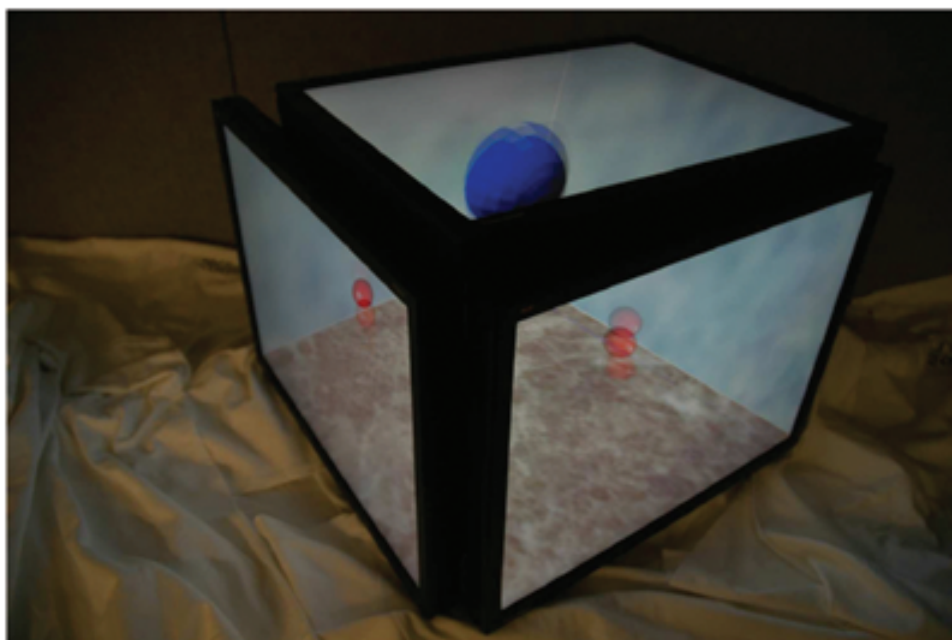


図 2.10: “Cubee” (文献 [33] より) .

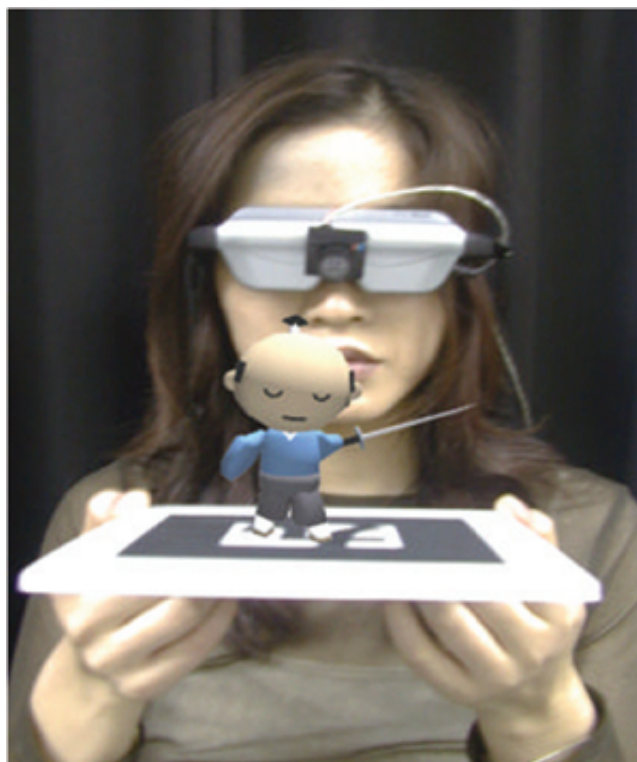


図 2.11: “ARToolKit” (文献 [34] より)。

## 2.4 実世界情報に近い映像提示

MR の研究が進むに従い、より直感的なインタラクションが可能で、かつ実在感の高い映像が提示できる AR 環境が望まれるようになった。そのため、提示する映像も可能な限り実世界情報に近い状態が要求された。しかし、2.2 節で述べた手法では、2 次元情報の提示に対して有用な手法であり、2.3 節で述べた手法も、提示については平面に対しての 2 次元情報である。

本節では、実在感の高い映像を提示するための手法を 5 つに分類して述べる。

### 2.4.1 メガネ型装置を用いる手法

映像をスクリーンのない実世界の空間に提示できれば、立体感・実在感の高い AR 環境を構築することができる。実世界空間に映像を提示する際、Head mounted display(HMD) が多く使われている。HMD とはユーザの頭部に装着するメガネ型の特殊装置である。HMD を通して実世界を観察するとユーザには実世界と CG の映像が重畳して見えるため、バーチャルオブジェクトが実世界に実在する感覚を与える。加藤らの “ARToolKit”[35, 34](図 2.11) を用いた手法では、正方形の平面マーカを HMD に付属したカメラで認識することで、マーカ上に CG モデルを出現させる。実世界のマーカと CG モデルが対応しているため、ユーザがマーカの位置を動かす行為が、CG モデルの位置を動かすことにつながる。したがって、マーカの上の空間に浮かんだバーチャルオブジェクトとの直感的なインタラクションが可能である。しかし、HMD の装着が前提であるため、ユーザ非日常的な状態にある。

また、北村らの “IllusionHole”[36] (図 2.12) は 3 次元位置トラッカ内蔵の液晶シャッターメガネを装着し

て、位置情報に対応して変化する両眼視差を用いた映像を提示する．3次元情報を逐次取得して提示映像に反映することができるので、ユーザの視線に合わせたバーチャルオブジェクトの映像を提示できる．HMD同様、メガネの装着が前提であるという制約を持つ．

メガネ型装置を用いる手法は、実世界の3次元空間へのバーチャルオブジェクトの提示が容易である反面、ユーザが特殊装置を装着しなければならないため、ユーザのストレスになる場合がある．

## 2.4.2 スクリーンオブジェクトへの映像提示

スクリーンオブジェクトの素材と形状を活用した手法

2.2節で述べた手法は、テーブル・デスク面上へのプロジェクションを目的とした手法である．これに対し、テーブル上にある実オブジェクトに対して映像をプロジェクションし、実オブジェクトと映像を融合することにより3次元的な映像を提示する手法が提案された．Raskarらは実オブジェクトに再帰性反射材を塗布し、テクスチャ情報をプロジェクションすることで、3次元的な情報を映像提示を可能にした[37]．Raskarらの用いた実オブジェクトは、形状は固定であるため、プロジェクションする映像は、実オブジェクトの固定形状を考慮した映像にする．固定形状の実オブジェクトを用いる手法に対し、石井らによる“*Illuminating Clay*”[38, 39](図2.12)、“*SandScape*”[40]は、白い粘土・砂という形状を変形しやすく、スクリーンとしての機能しやすい白色の素材を利用している．高さセンサや3次元レーザスキャナを用いて3次元形状を取得し、その3次元情報を基にプロジェクションを行う．これにより、高低さや位置によって任意の映像を提示でき、かつ直感的インタラクションも実現している．同様な手法として野口らの“*Powder Screen*”[41](図2.13)がある．*Powder Screen*は素材に微小な白いパウダービーズを利用しているのに加え、パウダービーズ中にPHANToMを内蔵することで、ユーザへの反力提示も可能なインタラクションを実現した．これらの手法は、素材の質感とテクスチャ情報を融合することで、実世界情報に近い映像を提示している．

また西川らは、映像との直接的なインタラクションは要件から外し、提示する映像に合わせた実オブジェクトの形状変化を行う手法を提案している．[42]西川らの手法は、3mm × 3mmのピンをマトリクス状に配列したものを形状復元装置として用い、そこに前後左右、上方の合わせて5方向からモデルの各方向の映像を提示する．これにより、任意モデルの再現を行う．この手法は試作モデルなどを具現化して遠隔地と議論するような用途に適していると言える．



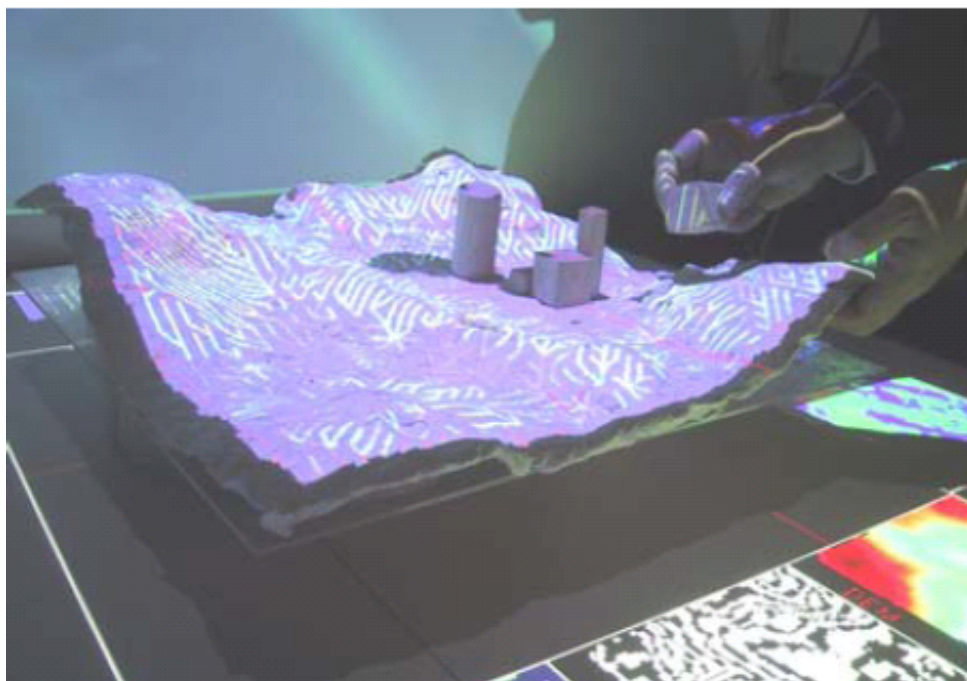


図 2.12: “Illuminating Clay” (文献 [38] より) .



図 2.13: “Powder Screen” (文献 [41] より) .

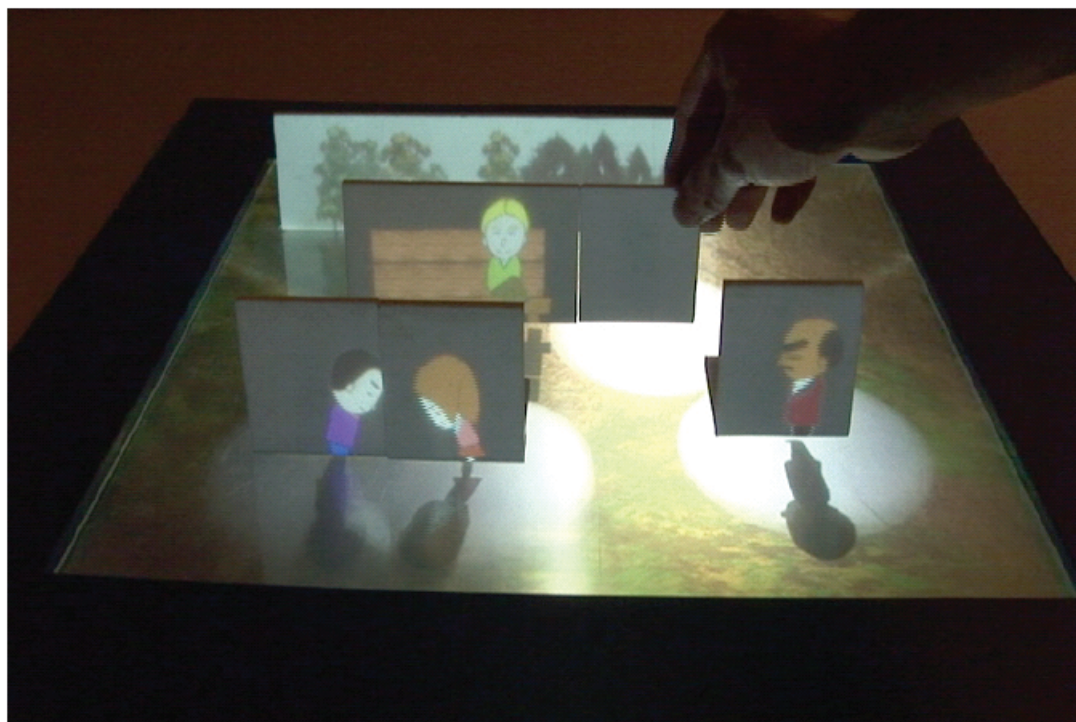


図 2.14: “Tablescape Plus” (文献 [43] より) .

#### 直立した平面スクリーンオブジェクトを用いた手法

寛らの “Tablescape Plus” [43](図 2.14) は，テーブル面とその上に置かれた垂直型のスクリーンオブジェクトに同時に映像を提示することで実在感の向上を図っている．Tablescape Plus は同じく寛らが提案した多人数用方向依存ディスプレイ “Lumisight Table”[44, 45] の原理を応用したものである．観察する角度によって透過・不透過が変わる Lumisty という視線制御フィルムをテーブル面に貼ることで，2 つの異なる方向から提示した映像を，一方はテーブル面，他方はスクリーンオブジェクトにそれぞれプロジェクションすることを実現している．テーブル面に対して直立した映像を提示できるので，映像自体は 2 次元情報であるが，実世界上に実在しているように提示できる．平面スクリーンのみに映像提示する手法では，バーチャルオブジェクトと背景は同一平面上に提示されるため，Tablescape Plus のような地面上に映像が直立しているという感覚を得ることはできない．机上スクリーンと平面スクリーンオブジェクトとを分離することによって，映像情報の役割の違いを直感的に理解でき，かつインタラクションの場合もスクリーンオブジェクトごとに機能を分担することにより，より操作性を向上することができる．

固定形状オブジェクト，質感のあるオブジェクト，平面スクリーンオブジェクトなど様々な実オブジェクトを用いて 3 次元的な情報を実現している．スクリーンオブジェクトによる手法は，映像情報を実世界上で実体化しているため，インタラクションを必要とする MR 環境においては，有用な映像提示手法である．



図 2.15: “floating interface”(文献 [46] より)。

### 2.4.3 結像系

結像系とは、結像というレンズの光学原理を用いた映像提示システムのことである。結像は、光源となる LCD などの映像の前にレンズを置くと、レンズより手前の何も無い空間に映像が上下左右反転したものが映し出される。この映像を実像という。実像は実感を伴わないが映像に直接触っているような行為を可能にする。pioneer 社の “floating interface”[46](図 2.15) は、結像系を用いた製品である。実像が映し出された空間にセンサを設置することで実像とのインタラクションができる。

結像系はスクリーンオブジェクトを必要とせずに、実世界上で映像を提示できるため、実在感の高い AR 環境の構築が期待できる。しかし、実像には光学原理的に大きな問題を持つ。実像の基となる光源の多くは、LCD などによる 2 次元の映像であるため、実像自体も平面となる。このため空間に提示した際、実像の奥行き感が乏しく、正確な位置情報を把握できず観察しづらい場合がある。したがって多くの研究者がこの問題解決に取り組んでいる。池田らの “i-ball”[47](図 2.17, 2.16) は、実像自体は平面のままで実在感を高める手法である。i-ball は実像を透明球の中に提示している。透明球によって実像の位置情報が補間されるため、実像自体の認知を容易にして実在感を高めている。しかし、透明球はユーザと実像に境界を隔ててしまうため、実像に触れる行為ができない。

一方で、実像をユーザの運動視差に対応させることで、実在感を向上させる手法が多く提案されている。掛谷は 2 つのアプローチで実在感を高める手法を提案している。1 つはステレオ視によって実像に立体感を与える手法 [48] で、さらにそれを拡張し多視点からも立体感を感じられる “FLOAT”[49] を提案した。もう 1 つは、光源となる媒体に 3 次元情報を提示できるものを用いた MOE Vision[50] を提案した。運動視差に対応するもう 1 つの手法として陶山らは、平面の実像を積層させることで実像に立体感を与える手法を提案している [51]。これは平面の実像を前後に高速移動し、奥行き方向の位置ごとに実像の映像を変化させている。これによって、ユーザには立体的な実像を観察できる。

結像系は実像の奥行き感が乏しいという問題を持つが、実世界上の空間に映像を提示できるため、実在感の高い AR 環境を構築する際には、有用な手法である。但し、関連研究では、デスクトップ環境での利用は想定されていない。





図 2.16: “i-ball” の概観 (文献 [47] より).

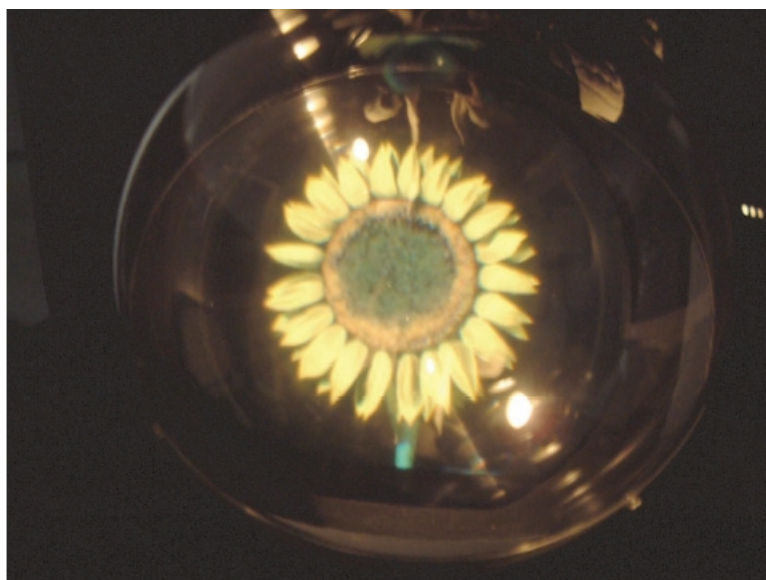


図 2.17: “i-ball” の提示結果 (文献 [47] より).





図 2.18: “ALIVE” の概観 (文献 [52] より).



図 2.19: “ALIVE” の提示結果 (文献 [52] より).

#### 2.4.4 鏡の世界への映像提示

鏡は日常の至る所に存在する実オブジェクトである．鏡の世界は，ユーザが直接入ることはできないが実世界を忠実に反映する．そのため鏡像は 2 次元の映像ではあるが実感性が高い．そこで実世界上に MR 環境を構築するのではなく，この鏡の世界に MR 環境を作り出すことで，実感性の高い映像を提示する研究が行われている．

その先駆的な研究に Maes らの “ALIVE”[52](図 2.18, 図 2.19) や森川らの “HyperMirror”[53] がある．これらは，垂直型平面ディスプレイを鏡と仮定している．鏡の前の映像をカメラで取得し，その実写映像とバーチャルオブジェクトを融合したバーチャル環境を鏡像として提示している．実世界とのインタラクションは容易だが，本物の鏡でないために映像の実感性は高くない．

それに対し，筧らの “through the looking glass(tlg)”[54] (図 2.20, 2.21) は本物の鏡の世界に MR 環境を作り出している．2.4.2 項で紹介した筧らの “Lumisight Table”[44, 45] の原理を応用しており，鏡の前のディスプレイと鏡に映されたディスプレイにそれぞれ異なる映像を提示できる．また田中らの “Virtual Display”[55] (図 2.22) は，ディスプレイ面において，ユーザが直接ディスプレイを見る方向と，ユーザが鏡を通してディスプレイを見る方向それぞれに，直線偏光と円偏光という異なる偏光を用いて映像を提示する．このディスプレイを偏光メガネを装着して鏡を見ると，実世界と鏡の世界のディスプレイ面でそれぞれ異なる映像を観察できる．

鏡は，それ自体が実環境で馴染みのある実オブジェクトであるため，MR 環境の認知的な実感性を向上させるために有効である．また，MR 環境の実感性を高めるためには，AV 環境の構築したディスプレイを鏡とするよりも，本物の鏡を用いて MR 環境を構築した方が，はるかに実感性を高くすることができる．



図 2.20: “tlg” の概観 (文献 [54] より).



図 2.21: “tlg” の提示結果 (文献 [54] より).

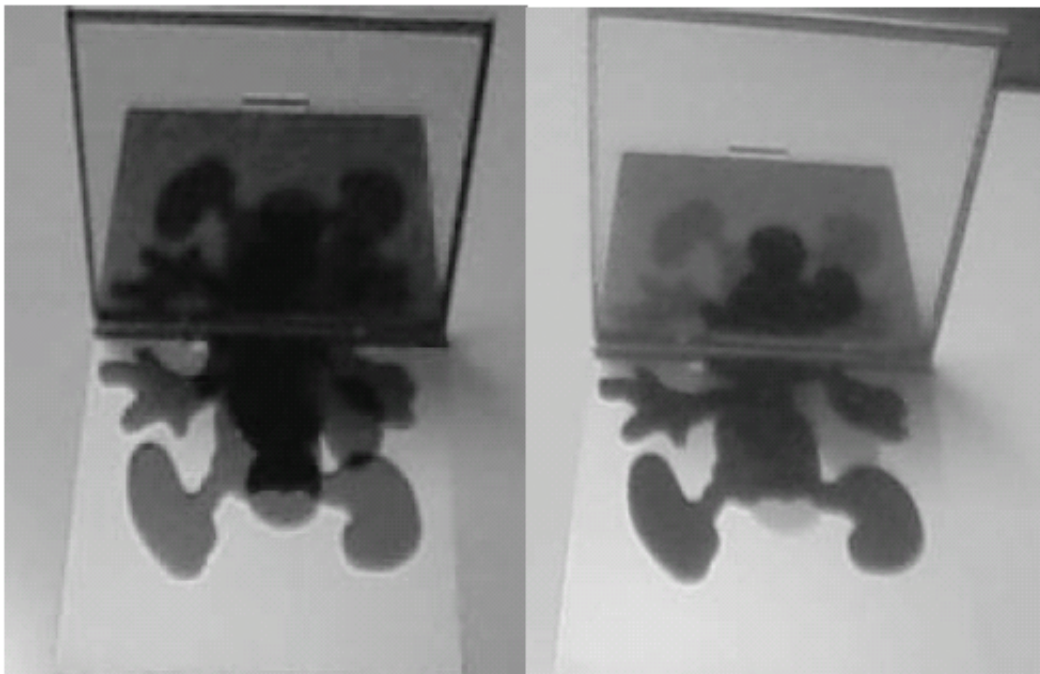


図 2.22: “Virtual image” (文献 [55] より) .



図 2.23: “Flat panel 3D display” (文献 [56] より) .

## 2.5 3次元ディスプレイ

従来の平面ディスプレイでは、平面に対して垂直な1方向へ2次元映像を提示している．このとき、本来3次元情報である実世界情報は2次元情報に落とし込まれて提示される．そのため、奥行き情報が乏しく、運動視差にも対応しない映像となってしまう．加えて、ディスプレイ表面で映像が提示されるため、立体感も乏しい．そこで実世界情報に近い、立体感・実在感の高い3次元の映像提示を実現するためのディスプレイが3次元ディスプレイである．本節では、平面提示型と全周囲提示型に分けて3次元ディスプレイに関する研究を取り上げる．

### 平面提示型

提案されている手法の多くは、平面ディスプレイ上から提示する映像の数(光線数)を増やし、映像ごとに提示する方向を変えている．これにより、ユーザの視点位置に合わせて映像が変わり、運動視差への対応を実現している．垂直型のディスプレイでは、現在、高木らの128指向性ディスプレイ[57, 58]が水平な128方向に対しての映像提示を実現している．平置き型については、TOSHIBA社の平置き型ディスプレイ[56](図2.23)では水平に16方向、小池らのIntegral Videography方式のディスプレイ[59]では、上下左右合わせて60方向で異なる映像提示を実現している．

一方、提示面からの光線数を増やすのではなく、映像の提示方法を変えることにより、立体感を表現するディスプレイも多く提案されている．LightSpace社の“DepthCube”[60]は、透明なパネル型ディスプレイを積層化し奥行き情報を提示できるボリュームディスプレイである．そして各層に奥行きに沿ったCGモデルの断面画像を提示する．これにより、積層されたパネル型ディスプレイの中に3DCGモデルが構築され、ユーザの運動視差にも対応する映像を提示できる．但し、提示する対象の奥行き情報が既知なものしか提示できない制約を持つ．

ボリュームディスプレイの他の方式として、伊達らの“Depth Fuse Display(DFD)”[62, 61](図2.24)がある．2枚の透明スクリーンを重畳させ、それぞれ同じ画像を提示する．このとき2つの画像の輝度に差を作ることで、認知的に奥行き感を生じさせ、立体感を付与している．



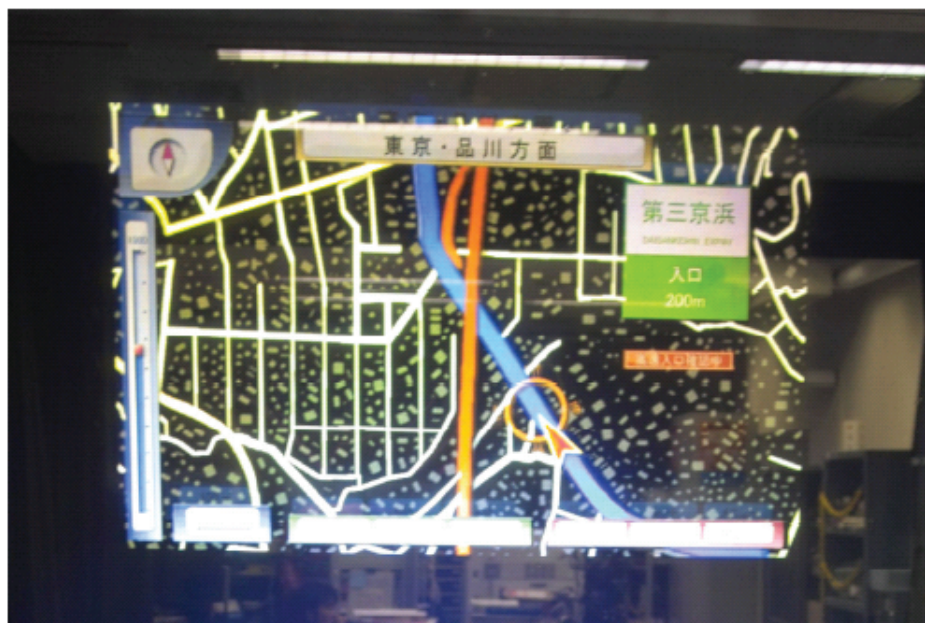


図 2.24: “Depth Fuse Display” (文献 [61] より)。

また、エッジ情報を用いて両眼視差による立体画像の立体感を高めた手法が木村らによって提案されている。[63]。木村ら手法は、視差画像を提示する CRT の前にモノクロ液晶パネルを重ねたボリュームディスプレイを形成し、そのパネル上に視差画像のエッジ画像を提示する。液晶シャッターメガネをかけて観察すると、エッジ画像による焦点誘導が生じ、通常の両眼視差よりも立体感のある立体映像を観察することができる。

垂直型の 3 次元ディスプレイは、インフォメーションボードや街頭の大型スクリーンが置かれるような、既存のディスプレイが使われている不特定多数が映像を見る公共の場に適している。一方、平置き型はディスプレイ面上に実オブジェクトの配置が可能であるため、AR 環境に利用しやすいと言える。ディスプレイ面に置かれた実オブジェクトと飛び出し感のある映像が混在することで、ユーザは実在感の高い AR 環境を体感でき、映像との直感的なインタラクションも期待できる。

#### 全周囲提示型

従来のディスプレイ形状から継承された平面型に対し、全周囲から立体的な映像を観察できるディスプレイが提案され始めている。圓道らの “SeeLINDER” [64, 65] (図 2.25) は、パララクスバリア方式という、両眼視差による立体映像を提示する原理を応用し、それを円周上で高速回転しながら全周囲提示へ拡張させた。これにより、ユーザは円筒型のディスプレイの中に提示対象が実在するような、実在感の高い映像を観察できる。また、大塚らの “Transpost” [66] は、円の中心で高速回転するスクリーンに対して、24 方向各視点から観察したときの映像 (視差画像ではない) を同時に投影する。それにより、回転するスクリーン部分に立体的な映像を観察できる。これらは、全周囲から観察できるため認知的な実在感が高い。但し、SeeLINDER、Transpost 共に従来のディスプレイと同様、映像とユーザとはディスプレイ面という物理的境界を隔てているため、実世界に映し出されているという感覚は高くない。

一方、木村らの “Laser produced 3D Display in the air” [67] (図 2.26) は、レーザープラズマの発光現象を利用して 3 次元映像を提示している。現時点では、提示できるのは白色の点群による映像であるが、全周囲から観察ができ、かつ実世界の空間に提示しているので実在感も高い。レーザープラズマの発光原理を用いているため、安全上直接触るといったインタラクションは期待できないが、ユーザの手の届かない場



図 2.25: “SeeLINDER” (文献 [64] より) .

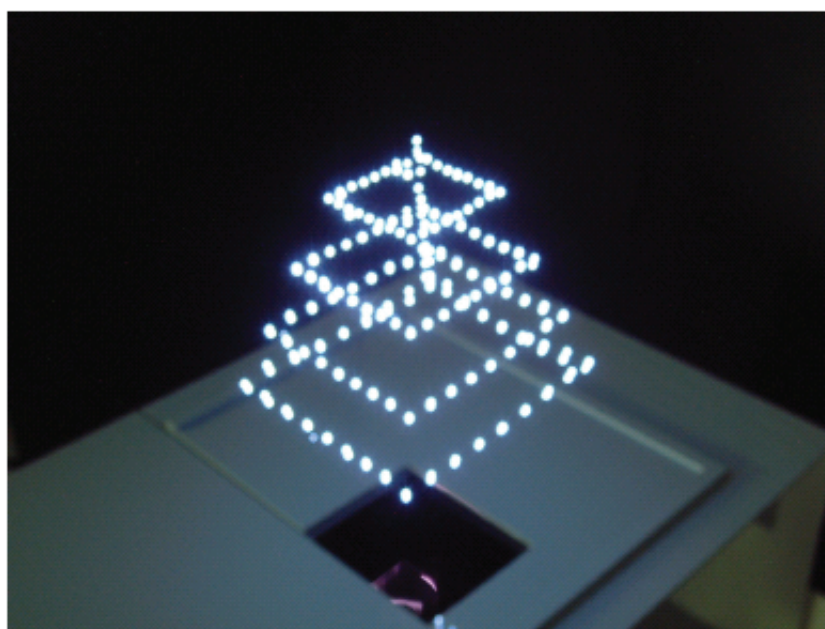


図 2.26: “Laser produced 3D Display in the air” (文献 [67] より) .

表 2.1: 関連研究と提案手法の比較.

対象	要件 1	要件 2	要件 3	要件 4
平面スクリーンへの映像提示	×			
スクリーンオブジェクトへの映像提示	×			
メガネ型装置を用いる手法			×	
結像系				×
垂直型型 3 次元ディスプレイ	×	×		×
平置き型 3 次元ディスプレイ	×			
複合現実型空間立像ディスプレイ				

所で立体映像を提供する用途に適していると言える。

全周囲型の 3 次元ディスプレイは、エンターテインメントや広告の映像を提示する際、平面型ディスプレイが使われている場所にとらわれない、新しい情報提供空間を作り出す可能性を持つ。直感的なインタラクションを要求せず、立体的な映像情報の提供を目的とする場合、3 次元ディスプレイは、要件を十分に満たす AR 環境を実現できると言える。

## 2.6 本章のまとめ

本章では、テーブル・デスク型の MR 環境を実現する研究について、提示する映像情報に着目して研究動向を述べた。関連研究と本論文で提案する複合現実型空間立像ディスプレイを次の要件

要件 1：空間への映像提示

要件 2：直感的なインタラクションの付与

要件 3：ユーザに特殊装置の装着の前提としない

要件 4：デスクトップ環境への応用

を基に比較した表を表 2.1 に示す。関連研究の多くは、4 つの要件のうち 3 つまで満たしているものの、要件 1 の“空間への映像提示”を満たすことができていない。これは、映像の提示がスクリーンを必要とするためである。これに対し、提案する複合現実型空間立像ディスプレイは、4 つの要件を全て満たすことができる。

次章では、複合現実型空間立像ディスプレイの基礎となる、デスクトップ環境で結像系による直立した映像を提示するための光学設計手法について述べる。

## 第3章

---

# デスクトップ環境における 結像系の光学設計手法

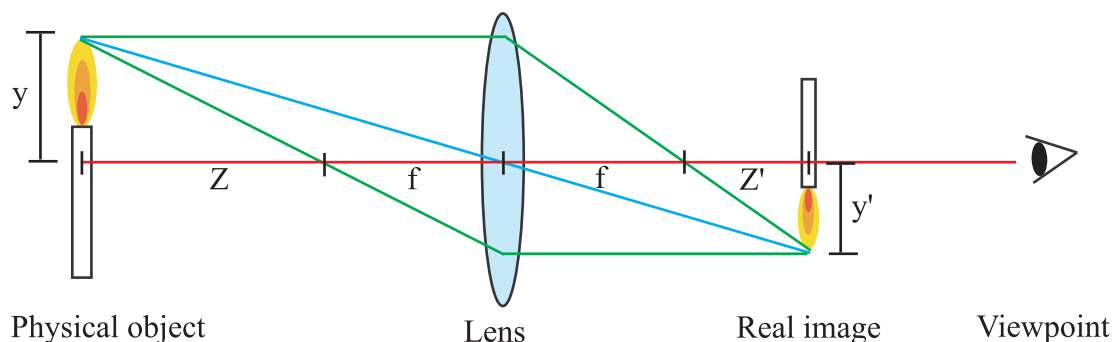


図 3.1: 結像系の基本原理。

### 3.1 はじめに

本論文では，結像系を用いた複合現実型空間立像ディスプレイを提案する．提案するディスプレイは，デスクトップ環境で直立した映像の提示を実現する．これは，デスクトップ上に置かれた実オブジェクトと直立した映像が混在する MR 環境の構築を可能とする．本章では，提案するディスプレイを構成するための基礎となる，デスクトップ環境で任意の傾きを持つ実像を提示するための結像系の光学設計手法について述べる．はじめに 2.4.3 項で述べた結像系について，改めてその原理を述べた後，提案する光学設計の目的を述べる．ここで，関連研究と提案する光学設計による結像系との比較を述べる．その後，結像系の光学設計手法を提案する．作成した光学設計のシミュレータについて，その概要と実験結果について述べる．最後に本章をまとめる．

### 3.2 結像系

本節では，提案手法の基礎となる結像系の原理について述べる．結像系の基本構成は図 3.1 である．炎やライトをはじめ，反射光なども含めた光源があるとする．その光源から離れた位置に光源のサイズよりも大きな凸レンズ (以後レンズと略記する) を配置する．このとき，光源とレンズの距離は，レンズの焦点距離  $f$  よりも長い  $Z + f (Z > 0)$  とする．すると，光源と反対側のレンズから  $Z' + f (Z' > 0)$  離れた位置に，光源の形状が上下左右反転した映像が直立して浮かび上がる．この上下左右反転した映像を実像といい，実像を作り出すことを結像と呼ぶ．この実像をユーザが観察する場合は，視線位置をレンズの光軸の同一線上に置く．実像の大きさは，式 3.1, 3.2, 3.3 から導出される．

$$M = y'/y \quad (3.1)$$

$$Z = f/M \quad (3.2)$$

$$Z' = fM \quad (3.3)$$

結像系による実像の特長は，垂直型の平面ディスプレイと違い，実世界上の空間 (空中) に映像を提示できる点である．図 3.2 のように，従来のディスプレイでは提示領域に物理的なスクリーンを必要とするため，映像に触れることはディスプレイ面に触れると同義であった．それに対し実像は，提示領域に物理的



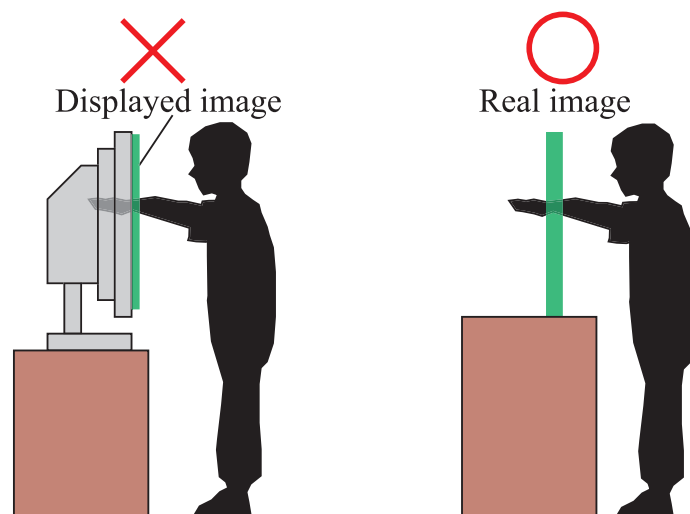


図 3.2: 実像の特徴：実感を伴わないが映像に触れる行為が可能。

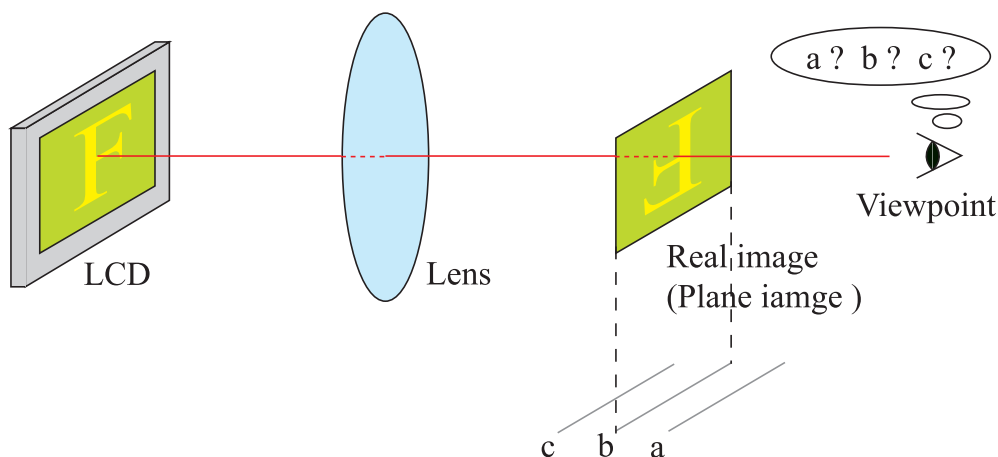


図 3.3: 結像系の問題点：奥行き情報が乏しいため，位置把握が難しい。

なスクリーンを必要としないので，実感は伴わないが，映像に触れるという行為が可能である．言い換えると，結像系による映像提示が，AR 環境の実現に等しい．ジェスチャ認識を導入すれば，実世界に浮かんだ映像とのインタラクションが可能な AR 環境を作り出せる．

一方で，結像系は原理的な問題を持つ．1 つは結像にレンズを用いるために生じる問題，もう 1 つは実像の基となる映像情報によって生じる問題である．レンズによって生じる問題は，レンズ 1 枚で実像を作った場合，レンズの裏表によって“たる型”あるいは“糸巻き型”の歪曲収差が生じる．加えて，視点移動をした場合，視線方向がレンズの光軸からずれるため，歪曲収差が増えて基となる映像の形状維持が難しい．レンズの終端まで視線をずらした場合は，実像が欠けてしまう．また，実像のサイズはレンズの大きさに依存する．但し，これらの問題は実装の際，レンズを複数重ねて使う，想定する実像のサイズに合わせて十分大きなレンズを用いる，などの対処により解決することができる．

それに対して，実像の基となる映像情報によって生じる問題は解決が容易ではない．映像情報を実像で提示する場合，一般的には LCD など平面ディスプレイの映像を用いる．そのため実像自体も 2 次元の映像

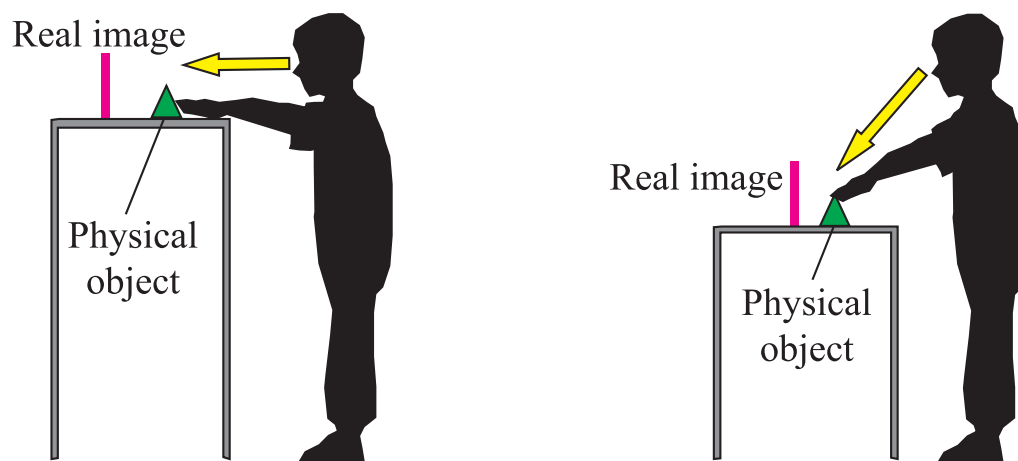


図 3.4: 提案する光学設計のコンセプト：自然な姿勢でのインタラクションの実現。

(平面像) で映し出される。平面像には奥行き情報が乏しいため、図 3.3 に示すように、ユーザが実像を観察する際、空中に浮かぶ実像の正確な位置情報を把握するのが難しくなる。

上記に述べたように、結像系は平面ディスプレイよりも AR 環境を実現しやすいという特長があるため、デスクトップ環境で 1 人で MR 環境を利用する用途などには向いていると言える。反面、原理的な制約を持つため、用途によっては平面ディスプレイよりも劣る場合がある。例えば、多人数で同時に観察した場合、視線方向によって実像が歪んで見える、あるいは実像が全く見えないユーザが生じるため、大勢で一度に観察する用途には比較的向いていない。

### 3.3 提案する光学設計手法の目的

3.2 節を整理すると、結像系の性質としては次の 3 点が挙げられる。

- 提示領域に物理的なスクリーンを必要しない
- 直感は伴わないが映像に触れる行為が可能
- 多人数の観察の場合には不向き

この性質を基に、本章では結像系を用いて“デスクトップ環境での直立した実像(立像)の提示”を目的とした結像系の光学設計を提案する。この際、図 3.4 に示すような、ユーザがデスクを見下ろす姿勢で立像を観察できる光学設計を目標とする。これは、デスクトップ環境を想定した場合、ユーザが水平方向の目線で作業を行うよりも、デスクを見下ろす姿勢で作業の方が自然であるからである。加えて、デスクトップ上に立像が提示可能であれば、実オブジェクトと立像が混在した MR 環境を実現しやすいと言える。これは、立像との直感的なインタラクションにも拡張することができる。

提案する光学設計の特長は結像系の特長である提示領域に物理的なスクリーンを必要としないほかに、立像は、デスクトップ表面からの飛び出し感が強い点である。図 3.5 のように、デスクトップ環境で平置き型の 3 次元ディスプレイを用いた場合と比較すると、高さのある実オブジェクトと同等の飛び出し感を持つ映像を提示する 3 次元ディスプレイは、現時点ではない。それに対し提案手法による立像は、実オブジェクトと同等、あるいは実オブジェクトよりも高い位置への立像の提示を可能にする。

もう 1 点、デスクトップ環境では、通常は 1 人のユーザが作業を行う状況が想定される。近年、プライバシー保護の観点から、提示映像の内容はユーザ以外の人には知られたくないという要求が生じている。

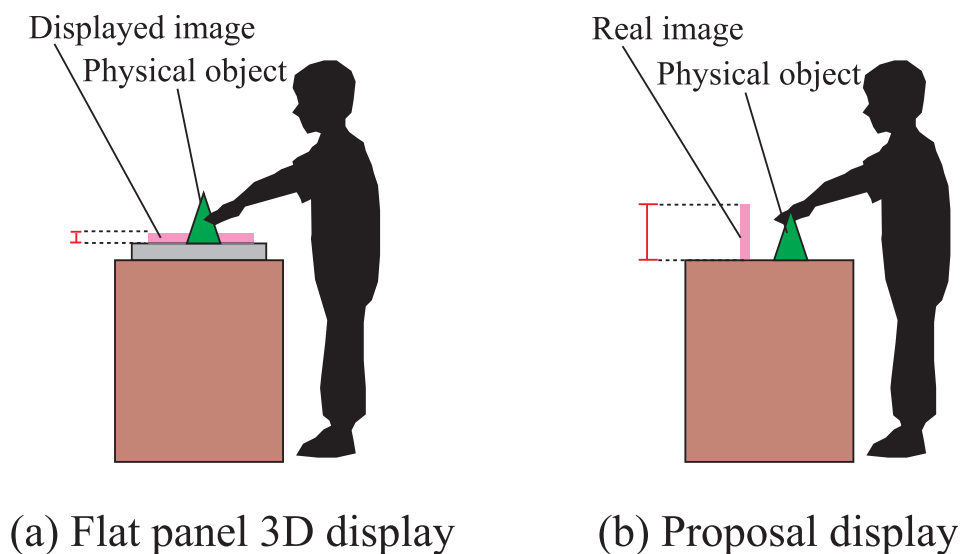


図 3.5: 提案手法の特長 1 : 映像の飛び出し感が高い。

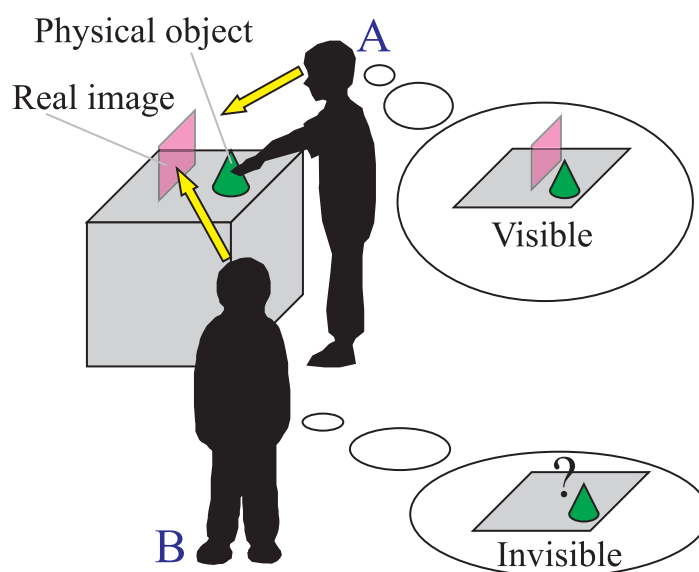


図 3.6: 提案手法の特長 2 : 他のユーザに映像が見えない。

その要求に対して提案手法では、結像系が原理的制約である視野角が狭いという欠点を逆に利用する。図 3.6 のように、視野角が狭いために、視線方向の異なるユーザからは、デスクトップ上には実オブジェクトしか見えない。したがって、結像系を用いることにより、デスクトップ環境で求められる要件を満たしたディスプレイとなっている。

このような目的のもと、本論文では、デスクトップ環境で立像を提示する結像系の光学設計を提案する。次節では、光学設計の詳細について述べる。

## 3.4 光学設計手法

### 3.4.1 概要

本章では、目的とする立像の提示のみならず、任意の傾きを持った実像を提示する光学設計を実装できる汎用性の高い結像系の光学設計手法を提案する。ここで、実像の基画像となる LCD は、平置きあるいは直立で置くと想定する。これは実装の際、平置き・直立で置く方が自然な設計であるからである。本章ではその例として、立像のほかに水平像を提示するための光学設計についても述べる。5章で提案するディスプレイでは、ここで述べる水平像の光学設計を用いる。まず、光学設計の導出に当たり、目標とする結像系の仕様を明確にしなければならない。結像系の仕様に必要な値は、

- 結像系全体のサイズ (奥行き・高さ・横幅)
- 実像のサイズ (高さ・横幅)
- ユーザの俯角

である。各値は導出には使用しないが、導出した値が仕様に沿っているかを確認するために用いる。以降は、光学設計の導出を順を追って説明する。この際、側面部と平面部それぞれについての光学設計を導出しなければならないため、それぞれ分けて説明する。光学設計導出の流れは次の通りである。

- (1) 初期パラメータ  $((x, y), \theta, L_{LCD}, D)$  の決定
- (2) 図 3.7 中の  $d, \phi, \eta, depth, height$  の導出
- (3) 図 3.8 中の結像位置の座標  $(Z'_0 + f, y'_0), (Z'_1 + f, y'_1), (Z'_2 + f, y'_2)$  から実像のサイズ  $L_{Rhigh}, L_{Rlow}, L_{Rfar}, L_{Rnear}$  を導出
- (4) 図 3.9 中から、実像の提示に必要なレンズの最小サイズ  $L_{high}, L_{low}, L_{far}, L_{near}$  を導出
- (5) 図 3.10, 3.11 から、実装に使用するレンズで許容される実像のサイズ  $L'_{Rhigh}, L'_{Rlow}, L'_{Rfar}, L'_{Rnear}$  を導出、
- (6) (5) を基に LCD の映像サイズを調整、(4),(5) を繰り返して最終的な実像サイズおよびレンズサイズを決定

(1) は側面部・平面部ともに同じであるため、本項で述べる。はじめに、本章で提案する光学設計の座標系は、レンズの中心と光軸の交点を原点とした座標系を基準とする。決定すべき既知情報は次の値とする。

- 映像を提示する LCD の中心部の座標  $(x, y)$
- レンズと水平面のなす角  $\theta$
- LCD から提示する映像のサイズ  $L_{LCD}$
- 提示した実像の中心位置からユーザの視点までの距離  $D$

$(x, y)$  は定義した座標系による理論上の値であるが、 $\theta, L_{LCD}, D$  は実装の際に用いる値によって決定する。次項から側面部と正面部に分けて、以降の光学設計の導出を行う。

### 3.4.2 側面部について導出

結像系全体の光学設計

図 3.7 は、側面における結像系全体の光学設計図である。本項で最終的に導出すべき重要な値は、ユーザの俯角  $\eta$  と光学設計の奥行き  $depth$ 、高さ  $height$  である。

はじめに  $d$  を式 3.4 によって導出する。 $d$  は光軸と LCD とレンズの中心同士を結んだ直線である。

$$d = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (3.4)$$

次に、 $\phi$  を式 3.5 によって求める。 $\phi$  は光軸と  $d$  のなす角である。

$$\phi = \arctan\left(\frac{y}{x}\right) \quad (3.5)$$

求めた  $\phi$  と既知情報である  $\theta$  からユーザの俯角  $\eta$  を導出する (式 3.6)。 $\eta$  によって、ユーザがどの角度で結像系 (全体としてはディスプレイ) を見下ろすかが決定する。そのため、この時点で仕様として決定した俯角と異なる値が導出された場合は、既知情報を再設定し、仕様で示した俯角を得られるように改めて導出を行う。

$$\eta = \frac{\pi}{2} - \phi - \theta \quad (3.6)$$

ユーザの俯角  $\eta$  が望ましい場合、式 3.7, 3.8 からディスプレイ全体の奥行き・高さを導出する。この導出においても、全体のサイズが仕様よりも大型あるいは小型の場合は、レンズの傾き  $\theta$  を変えて式 3.4 からやり直す。LCD の中心座標  $(x, y)$  を変えると俯角  $\eta$  が変化するため、結果的に  $\theta$  を変えなければ調整したことにはならない。

$$depth = (d + d') \cos \eta \quad (3.7)$$

$$height = (d + d') \sin \eta \quad (3.8)$$

#### 実像サイズの導出

結像系全体の仕様が決定した後、その結像系から作り出される実像の大きさを導出する。図 3.8(a) 中の結像位置の座標  $(Z'_0 + f, y'_0)$ 、 $(Z'_1 + f, y'_1)$ 、 $(Z'_2 + f, y'_2)$  は、 $x_n (n = 1, 2, 3)$  の値を式 3.3 に、 $y_n (n = 1, 2, 3)$  の値を式 3.1 に代入することによって、それぞれ導出できる。但し、 $x_n (n = 1, 2, 3)$  と  $y_n (n = 1, 2, 3)$  は光軸から離れた位置にあるため、レンズの傾き  $\theta$  を用いて、式 3.9 から式 3.14 によって導出する。

$$x_0 = x + \frac{L_{LCD}}{2} \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) \quad (3.9)$$

$$x_1 = x \quad (3.10)$$

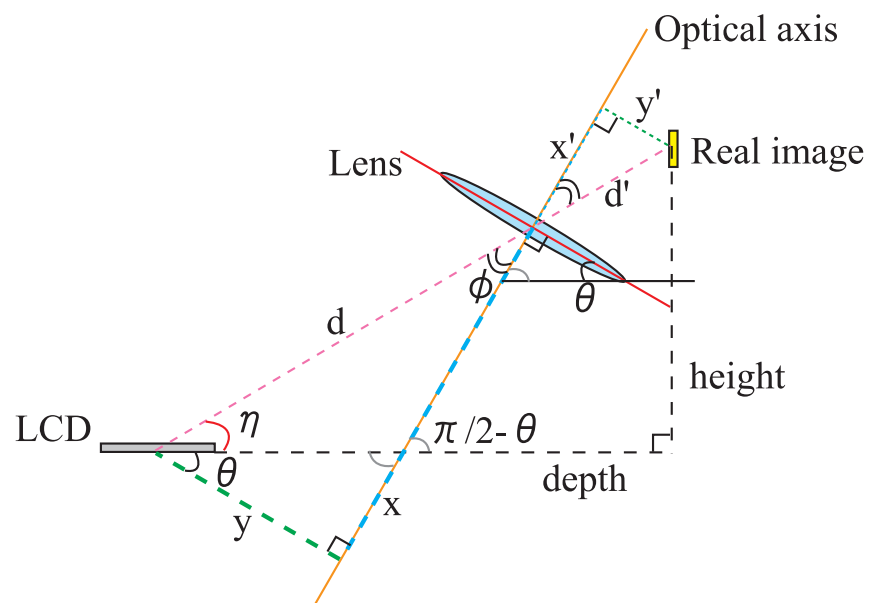
$$x_2 = x - \frac{L_{LCD}}{2} \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) \quad (3.11)$$

$$y_0 = y + \frac{L_{LCD}}{2} \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) \quad (3.12)$$

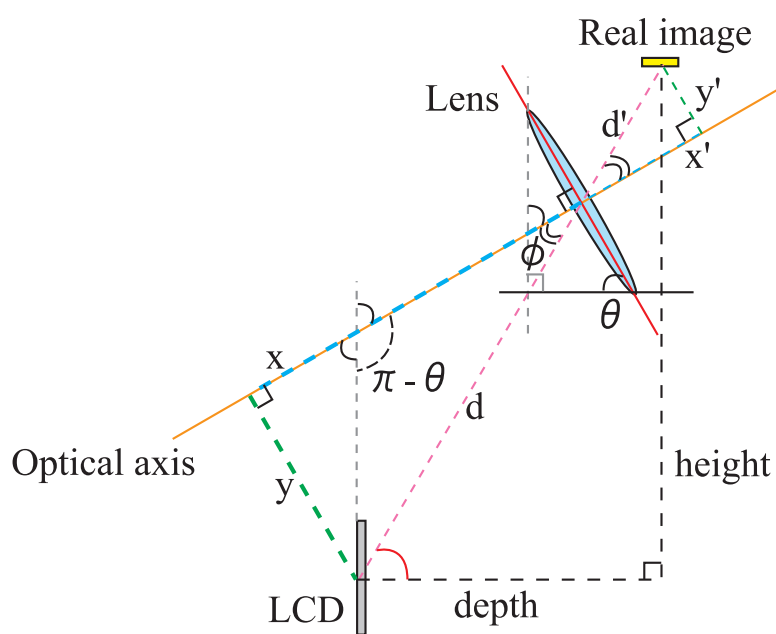
$$y_1 = y \quad (3.13)$$

$$y_2 = y - \frac{L_{LCD}}{2} \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) \quad (3.14)$$

また、図 3.8(b) については、式 3.9、式 3.11、式 3.12、式 3.14 の  $\cos$  を  $\sin$ 、 $\sin$  を  $\cos$  に置き換えることで同様に求められる。結像位置を求めた後、立像では実像の上下のサイズ  $L_{Rhigh}$  と  $L_{Rlow}$ 、水平像では、

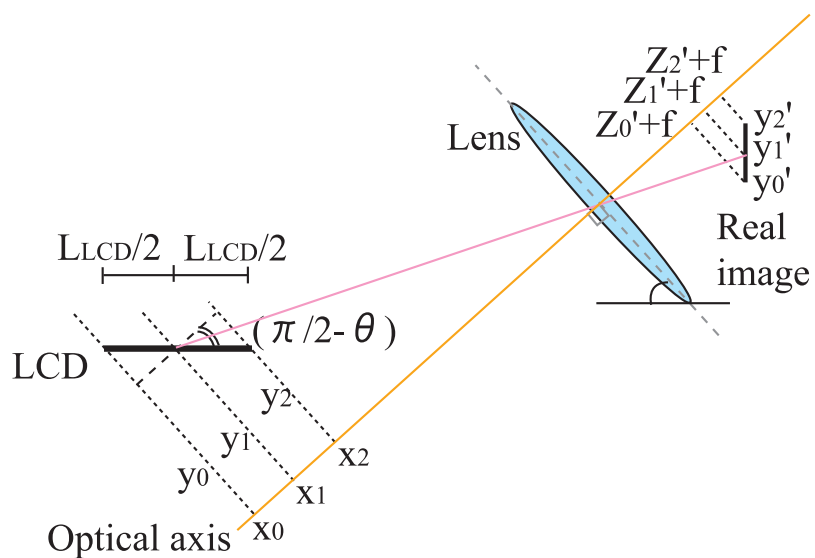


(a) 立像を提示する場合.

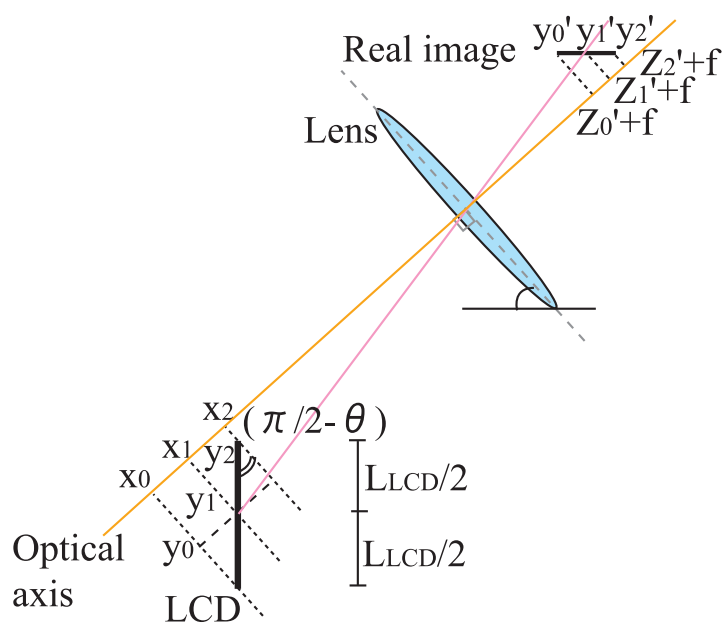


(b) 水平像を提示する場合.

図 3.7: 結像系全体の光学設計の導出 (側面図).



(a) 立像を提示する場合.



(b) 水平像を提示する場合.

図 3.8: 実像の結像位置の導出 (側面図) .

前後のサイズ  $L_{R\ far}$ ,  $L_{R\ near}$ , を導出する．ここで,  $L_{R\ high}$  と  $L_{R\ near}$  は式 3.15 で,  $L_{R\ low}$ ,  $L_{R\ far}$  は, 式 3.16 で導出できる．

$$L_{R\ high, near} = |y_2 - y_1| \quad (3.15)$$

$$L_{R\ low, far} = |y_1 - y_0| \quad (3.16)$$

式 3.15 と式 3.16 の和によって, 設計した結像系により提示できる実像の大きさが求まる．しかし, この時点で求めた実像の大きさはレンズの大きさを考慮していないため, 暫定的な値である．最終的な値を求めるには, 次項の導出した実像サイズを提示できるレンズサイズを導出し, 実装に用いるレンズがその値を満たしているか確認しなければならない．

導出した実像サイズを提示するためのレンズサイズの導出

ユーザが実像を観察したとき, レンズが実像を覆う程のサイズでなければ, 実像は欠けてしまい正しく提示できない．そのため, 図 3.9 の関係から実像が正しく提示できるレンズサイズを求める．ここで, 図 3.9 の  $d'$  は式 3.17 のように定義する．

$$d' = \sqrt{(Z'_1 + f)^2 + y_1'^2} \quad (3.17)$$

立像については, 図 3.9(a) を基に式 3.18 から式 3.21 によって  $L_{high}, L_{low}$  を求める．2 つの長さの起点はレンズ中心であるため, 大きい方のサイズを採用することで, 導出した実像のサイズで提示が可能となる．

$$\phi_{high} = \arcsin\left(\frac{L_{R\ high}}{D}\right) \quad (3.18)$$

$$\phi_{low} = \arctan\left(\frac{L_{R\ low}}{D}\right) \quad (3.19)$$

$$L_{high} = (d' + D) \tan \phi_{high} \quad (3.20)$$

$$L_{low} = (d' + D) \sin \phi_{low} \quad (3.21)$$

水平像については, 図 3.9(b) を基に式 3.22 から式 3.25 によって  $L_{far}, L_{near}$  を求める．立像のときと同様に, 2 つの長さのうち大きい方のサイズを採用することで, 導出したサイズの水平像を提示可能となる．

但し, 実装の際はユーザの視点が多少動いても実像が欠けないように導出したサイズよりも大きいサイズのレンズを用いた方がよい．

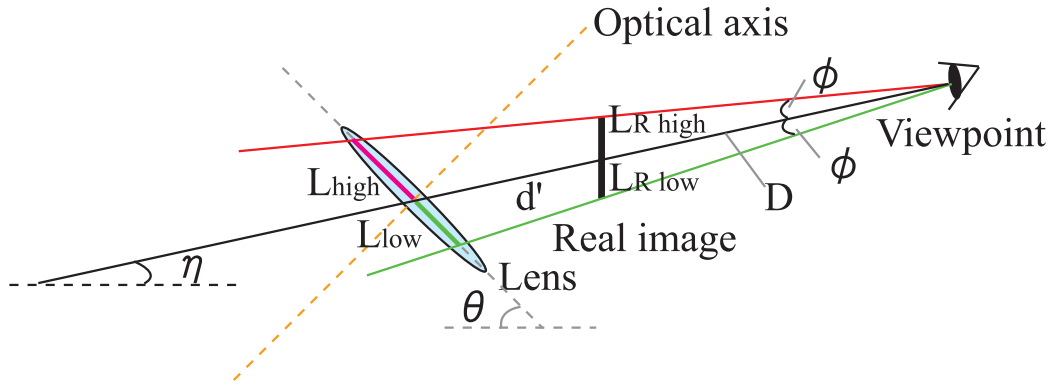
$$\phi_{far} = \arctan\left(\frac{L_{R\ far}}{D}\right) \quad (3.22)$$

$$\phi_{near} = \arcsin\left(\frac{L_{R\ near}}{D}\right) \quad (3.23)$$

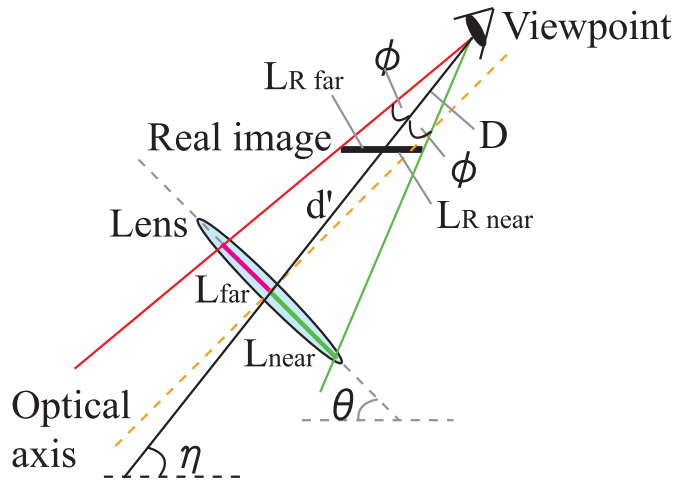
$$L_{far} = (d' + D) \sin \phi_{far} \quad (3.24)$$

$$L_{near} = (d' + D) \tan \phi_{near} \quad (3.25)$$





(a)立像を提示する場合.



(b)水平像を提示する場合.

図 3.9: 結像に必要なレンズの大きさの導出 (側面図) .

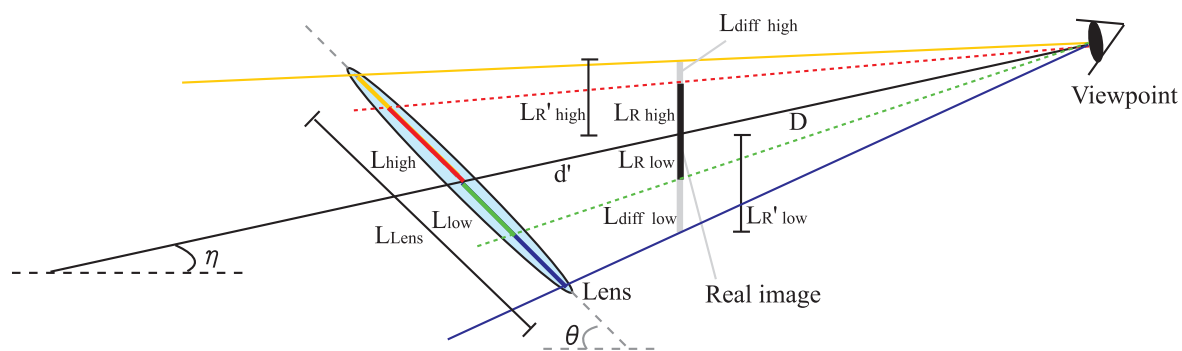
#### 使用するレンズが許容する実像サイズの導出

前項で導出した値よりも大きいレンズで実装する際、そのレンズで提示可能な実像サイズを知りたい場合がある。実像の基画像を提示する LCD 側にまだ提示サイズを大きくできるのであれば、許容される範囲内で実像サイズを大きくすることも可能だからである。

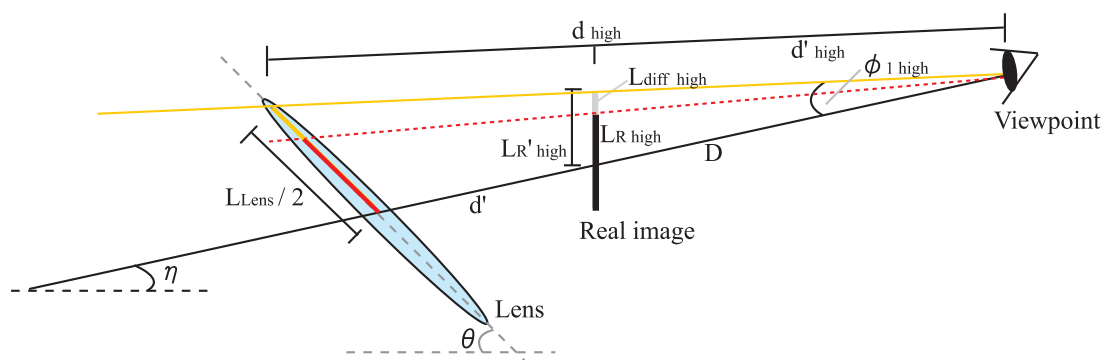
立像は、図 3.10, 水平像は図 3.11 で示す関係を基に、実装に用いるレンズで許容される実像サイズを導出する。

はじめに立像について述べる。図 3.10(a) は、導出の際に扱う変数を定義している。ここで、 $D > d'$  と仮定する。図 3.10(b) は立像の上部に注目した図であり、この関係から式 3.26 から式 3.28 によって許容される上部のサイズ  $L'_{R\ high}$  を導出する。

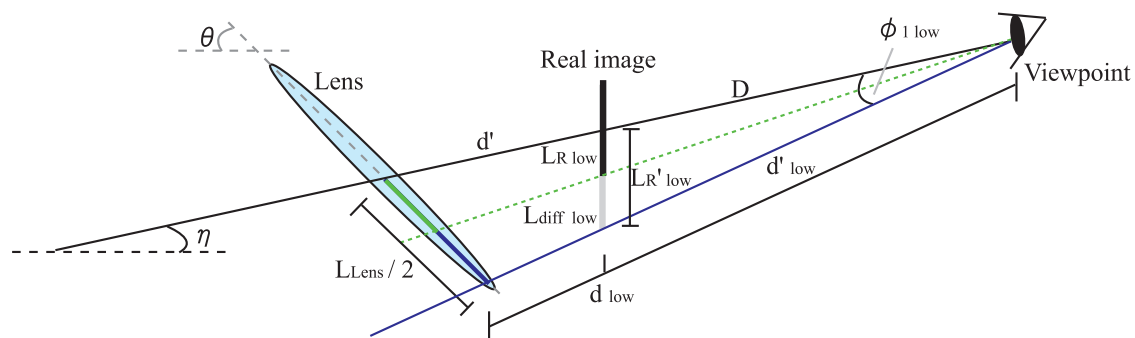
$$d_{high} = \sqrt{\left(\frac{L_{LCD}}{2}\right)^2 + (d' + D)^2} \quad (3.26)$$



(a) 立像提示時の各箇所に対応する変数の定義.

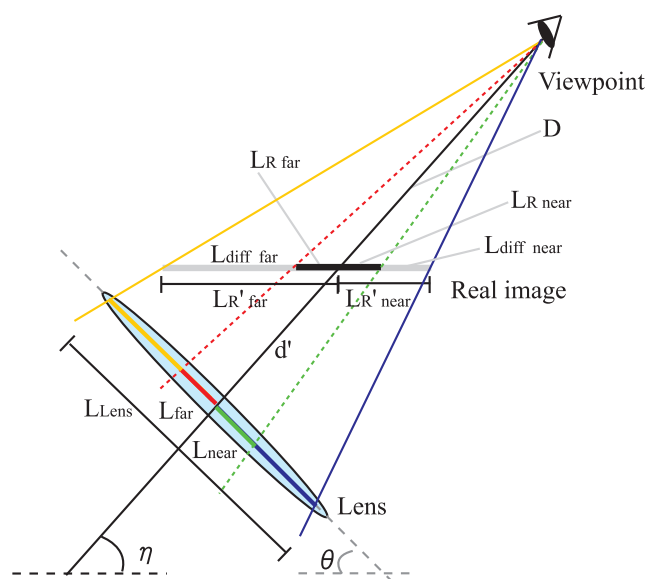


(b) 立像の上側に着目した場合.

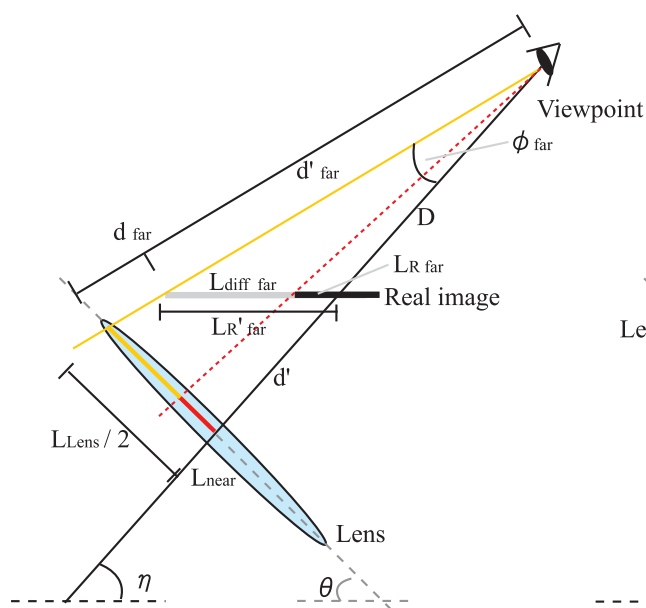


(c) 立像の下側に着目した場合.

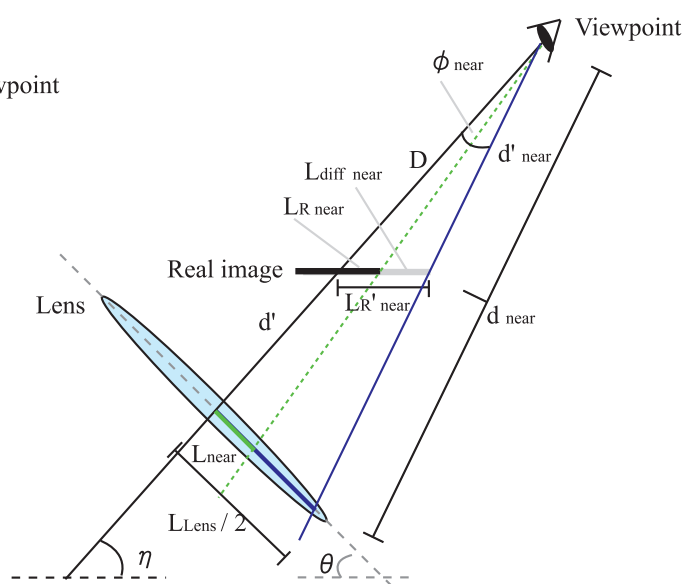
図 3.10: 実装に用いたレンズによる実像の最大サイズの導出 (立像).



(a) 水平像提示時の各箇所に対応する変数の定義.



(b) 水平像の奥側に着目した場合.



(c) 水平像の手前側に着目した場合.

図 3.11: 実装に用いたレンズによる実像の最大サイズの導出 (水平像).

$$\phi'_{high} = \arctan\left(\frac{\frac{L_{LCD}}{2}}{d' + D}\right) \quad (3.27)$$

$$L'_{R\ high} = D \sin(\phi'_{high}) \quad (3.28)$$

同様に、立像の下部に注目した図 3.10(c) から式 3.29 から式 3.31 までの式が成り立ち、ここから許容される下部のサイズ  $L'_{R\ low}$  を導出する。

$$d_{low} = \sqrt{(d' + D)^2 - \left(\frac{L_{LCD}}{2}\right)^2} \quad (3.29)$$

$$\phi'_{low} = \arcsin\left(\frac{\frac{L_{LCD}}{2}}{d' + D}\right) \quad (3.30)$$

$$L'_{R\ low} = D \tan(\phi'_{low}) \quad (3.31)$$

一方、水平像については図 3.11 によって導出する。導出の過程は同様で、はじめに図 3.11(a) で扱う変数を定義し、図 3.11(b) で水平像の奥側に着目し、そこから式 3.32 から式 3.34 を得て、奥側で許容されるサイズ  $L'_{R\ far}$  を導出する。

$$d_{far} = \sqrt{\left(\frac{L_{LCD}}{2}\right)^2 + (d' + D)^2} \quad (3.32)$$

$$\phi'_{far} = \arcsin\left(\frac{\frac{L_{LCD}}{2}}{d' + D}\right) \quad (3.33)$$

$$L'_{R\ far} = D \tan(\phi'_{far}) \quad (3.34)$$

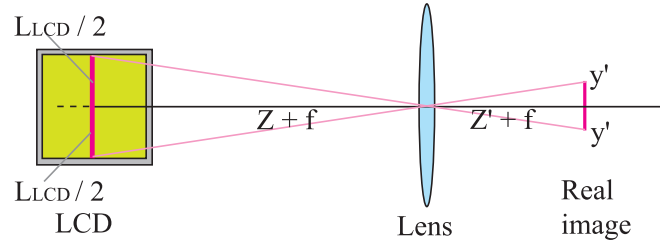
手前側も図 3.11(c) の関係から、式 3.35 から式 3.37 を得て、手前側で許容されるサイズ  $L'_{R\ near}$  を導出する。

$$d_{near} = \sqrt{(d' + D)^2 - \left(\frac{L_{LCD}}{2}\right)^2} \quad (3.35)$$

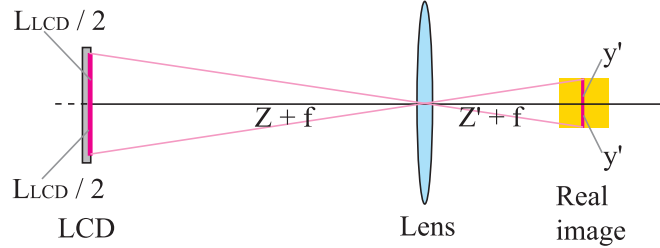
$$\phi'_{near} = \arctan\left(\frac{\frac{L_{LCD}}{2}}{d' + D}\right) \quad (3.36)$$

$$L'_{R\ near} = D \sin(\phi'_{near}) \quad (3.37)$$

レンズの大きさと実像サイズについては、ユーザの仕様に合わせて繰り返し導出を行うことで、要件を満たす光学設計を決定する。以上の過程を経て、側面部に対する結像系の光学設計は完成する。



(a) 立像を提示する場合.



(b) 水平像を提示する場合.

図 3.12: 結像系全体の光学設計の導出 (平面図) .

### 3.4.3 平面部についての導出

平面部の導出は，LCD の中心座標が光軸上に位置するため，側面部よりも導出しやすい．側面部と同様の手順で光学設計の導出を行う．

#### 実像サイズの導出

図 3.12 が平面部からの光学設計である．立像・水平像どちらの場合も光軸上に LCD の中心座標が位置するため，式 3.1，式 3.2，式 3.3 によって，実像の片側の幅  $y'$  は式 3.38 から導出される．また， $y'$  を 2 倍した値が，実像の横幅となる．

$$y' = \frac{L_{LCD}}{2} M \quad (3.38)$$

#### 導出した実像サイズを提示するためのレンズサイズの導出

実像を正しく提示するためのレンズサイズは図 3.13 の関係から導出する．式 3.39，式 3.40 によってレンズサイズの下限  $L_{side}$  を得る．

$$\phi_{side} = \arctan\left(\frac{y'}{D}\right) \quad (3.39)$$

$$L_{side} = (Z' + f + D) \tan(\phi_{side}) \quad (3.40)$$

#### 使用するレンズが許容する実像サイズの導出

図 3.13 の関係から実装に用いるレンズが許容する実像サイズの導出も行う．式 3.41，3.42 によって，片側の実像サイズの上限  $y''$  を得る． $y''$  を 2 倍した値が実装時に提示できる最大サイズとなる．





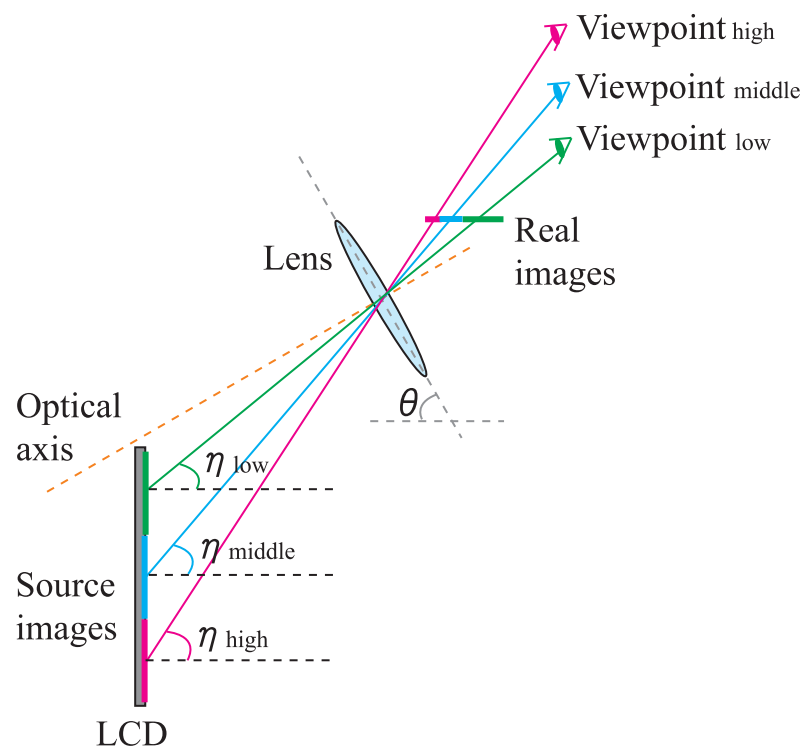


図 3.15: ユーザの視点と実像の関係 (水平像) .

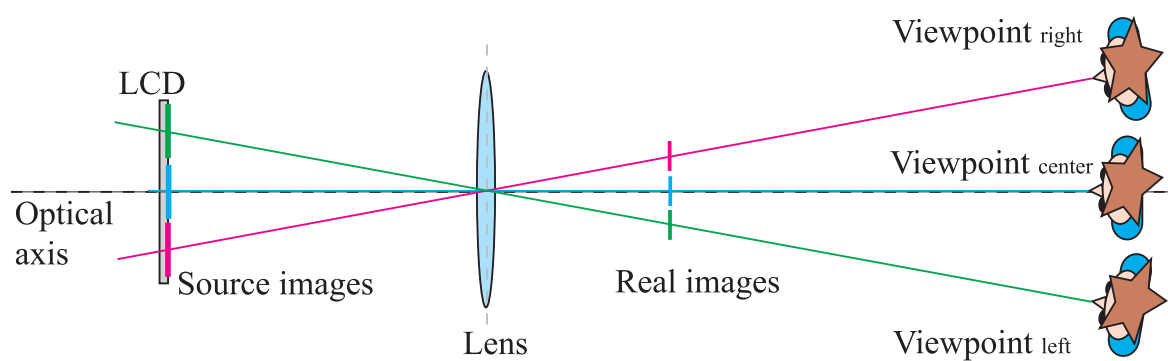


図 3.16: ユーザの視点と実像の関係 (平面図) .

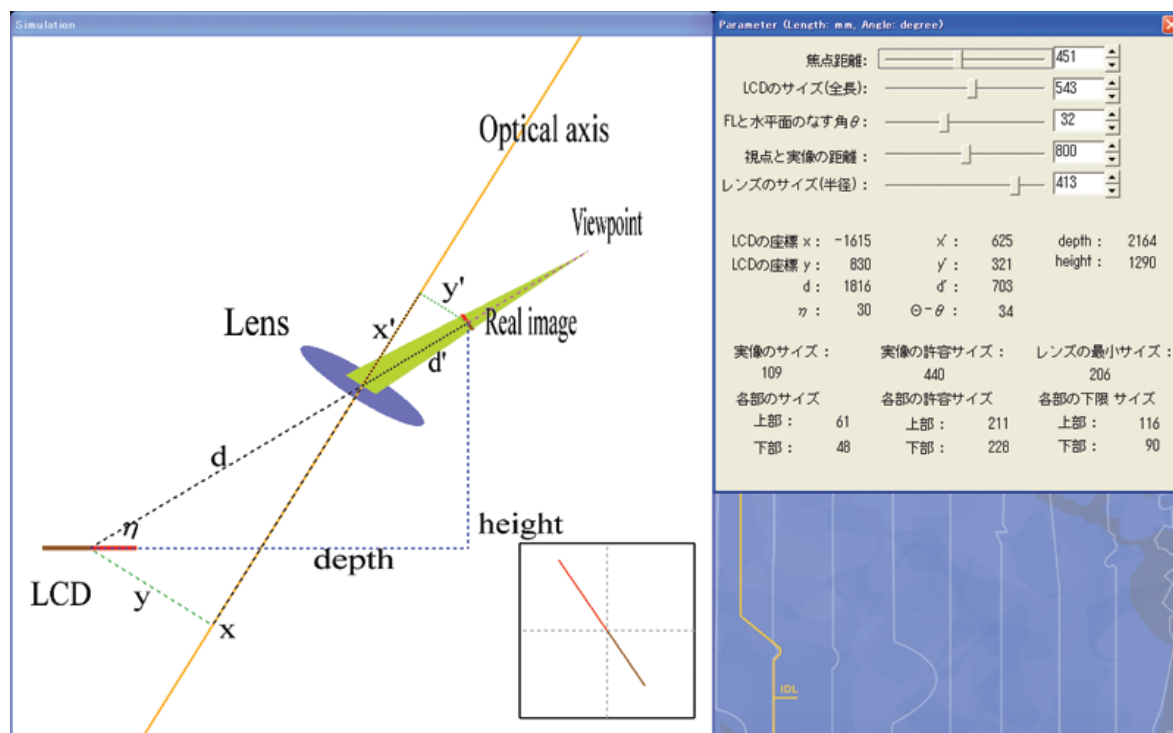


図 3.17: シミュレータの全体図。

### 3.5 光学設計シミュレーション

本節では、3.4 節で提案した結像系の光学設計に基づき行ったシミュレーションについて述べる。はじめにこのシミュレーションの目的を述べ、そのあとシミュレーションを行うために作成したシミュレータの仕様について説明する。そして、シミュレーション結果について述べる。

#### 3.5.1 シミュレーションの目的

本章で提案した光学設計によって導出した各値の変化が、結像系全体にどのような変化を及ぼすかを確認するためにシミュレーションを行う。ここで 3.4.4 項で述べたユーザの視点と実像の関係についても確認する。

また、シミュレータによって、提案手法による結像系を実装する際、ユーザが想定した仕様で結像系を実現できるかを事前に確認した上で実装することができる。

#### 3.5.2 シミュレータの仕様

結像系のシミュレーションを行うためのシミュレータは 3.4 節で述べた光学設計手法に準じて作成した。シミュレータの全体図を図 3.17 に示す。シミュレータは 2 つのウィンドウから構成されている。図 3.17 の右側のウィンドウが光学設計のパラメータ設定および導出した各値を出力するウィンドウである。そして左側のウィンドウが設定したパラメータによるシミュレーション結果を出力するウィンドウである。本節では前者を“パラメータ設定ウィンドウ”，後者を“シミュレーションウィンドウ”と呼ぶこととする。

Parameter (Length: mm, Angle: degree)

焦点距離:

LCDのサイズ(全長):

FLと水平面のなす角 $\theta$ :

視点と実像の距離:

レンズのサイズ(半径):

LCDの座標  $x$ : -1110       $x'$ : 517      depth: 1568  
 LCDの座標  $y$ : 403       $y'$ : 187      height: 733  
 $d$ : 1181       $d'$ : 550  
 $\eta$ : 25       $\Theta - \theta$ : 0

実像のサイズ:	実像の許容サイズ:	レンズの最小サイズ:
95	377	161
各部のサイズ	各部の許容サイズ	各部の下限 サイズ
上部: 57	上部: 183	上部: 96
下部: 38	下部: 194	下部: 64

図 3.18: パラメータ設定ウィンドウ.

次に2つのウィンドウそれぞれについての詳細を説明する．まずパラメータ設定ウィンドウは拡大した図を図 3.18 に示す．各値は長さは mm 単位，角度は degree 表示である．なお出力値は，小数点以下切捨てで表記している．シミュレータで操作できるパラメータは，次の5つである．

- レンズの焦点距離:  $f$
- LCD のサイズ(全長):  $L_{LCD}$
- フレネルレンズ (FL) と水平面のなす角:  $\theta$
- ユーザの視点と実像の距離:  $D$
- レンズの大きさ(半径):  $L_{Lens}$

そして出力する値は次のとおりである．

- シミュレーションウィンドウ中に記載された変数の値:  $(x, y), d, \eta, (x', y'), d', depth, height$
- 立像の傾き:  $\Theta - \theta$
- 実像のサイズ: 上部  $L_{Rhigh}$ , 下部  $L_{Rlow}$ , 全長  $(L_{Rhigh} + L_{Rlow})$
- 実像の許容サイズ: 上部  $L'_{Rhigh}$ , 下部  $L'_{Rlow}$ , 全長  $(L'_{Rhigh} + L'_{Rlow})$
- レンズの最小サイズ: 上部  $L_{high}$ , 下部  $L_{low}$ , 全長  $(L_{high} + L_{low})$

立像の傾き  $(\Theta - \theta)$  について述べる．前提として，立像の状態を 0 度と定義している．シミュレータは，本章で提案した光学設計と同様に光軸とレンズの中心の交点を原点とした座標系を採用している．こ

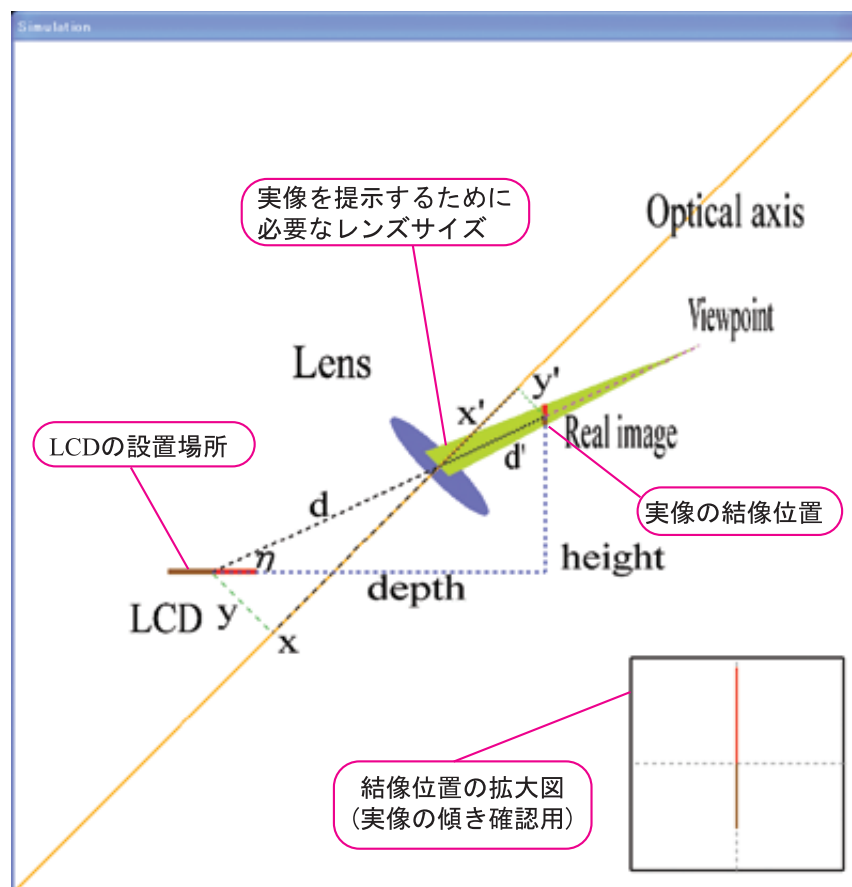


図 3.19: シミュレーションウィンドウの各部説明 .

のとき、LCD は水平ではなく傾きを持つ ( $\theta$ )。そのため、シミュレータ上では LCD を水平面にするため、レンズの傾き  $\theta$  分だけ傾けなければならない。よって、立像の傾きは  $(\Theta - \theta)$  となる。

次に、シミュレーションウィンドウについて説明する。シミュレーションウィンドウを拡大したのが図 3.19 である。図中の変数は 3.4 節の導出で用いた各変数に対応している。加えて、LCD, Lens, Real image, Optical axis, Viewpoint が各名称となっている。Viewpoint はユーザの視点である。シミュレーションウィンドウは mm を基準単位として、実装時を想定した出力を行っている。そのため、結像系に対して実像の大きさは小さくなってしまふ。そこで、図中の右下に実像部分の拡大図を示している。これによって、実像が直立しているかを確認する。また、Viewpoint からレンズに向かって放射状に伸びている緑色の部分は、ユーザが実像を正しく観察するために必要なレンズの下限を示すものである。この部分がレンズよりも広い範囲に伸びている場合は、レンズが小さいために実像が欠けてしまうことを意味する。そのため、この放射状部分をカバーできる程度のレンズをパラメータで設定する必要がある。

シミュレーションウィンドウ上の操作については、ウィンドウ上の LCD 部分をマウスで指し、左ボタンをドラッグしながら動かすと、LCD の位置を自由に変えることができる。

シミュレータは、シミュレーションウィンドウの LCD 部を操作する度に動的にシミュレーションを行い、パラメータウィンドウに出力を行う。

表 3.1: 基本設計のパラメータ.

変数	値
レンズの焦点距離	305(mm)
LCD のサイズ (全長)	300(mm)
フレネルレンズと水平面のなす角	45 度 (degree)
ユーザの視点と実像の距離	800(mm)
レンズの大きさ (半径)	150mm

表 3.2: LCD の位置と実像の関係.

図番号	$height$ (mm)	$\eta$ (degree)	$L_{R\ high}$ (mm)	$L_{R\ low}$ (mm)	$L_{high}$ (mm)	$L_{low}$ (mm)
図 3.20	534	13	9	8	14	12
図 3.21	558	16	14	12	23	18
図 3.22	625	24	36	26	58	42
図 3.23	711	33	83	52	137	85

### 3.5.3 シミュレーション

本項では、立像を提示する結像系の光学設計のシミュレーションを行い、その結果を述べる。シミュレーションに用いるパラメータの基準値は、5章で実装に用いた値を参照する。この基本設計のパラメータを表 3.1 に示す。

#### LCD の位置と立像の提示位置の関係

3.4.4 項で述べた関係性を確認するために、LCD の位置を変えてシミュレーションを行った。このとき、LCD の位置は立像が作り出せる位置とする。パラメータは表 3.1 の値を用いた。LCD を 4 つの位置に配置したときのシミュレーション結果を図 3.20 から図 3.23 に示す。また、シミュレーションで得た出力結果の一部を表 3.2 に示す。

4 つの図から、LCD の位置は同一直線上であることがわかる。そして表 3.2 から、同一直線上で LCD の位置をレンズに近づけると、立像の結像位置 ( $height$ ) は高くなっていく。言い換えると、ユーザの俯角 ( $\eta$ ) が大きくなる。つまり、ユーザの視点の高さが異なる (俯角が異なる) と、ユーザが見ている水平面の位置あるいは LCD の位置が変わることを示している。故に、3.4.4 項で述べた関係をシミュレーションによって確認できたと言える。

次に表 3.2 から、実像の結像位置が高くなるに伴い、実像サイズ ( $L_{R\ high} + L_{R\ low}$ ) が大きくなっていることがわかる。これは、LCD がレンズに近づくため結像の際の倍率  $M$  が大きくなることによる。さらに  $M$  は、実像の上部  $L_{R\ high}$  と下部  $L_{R\ low}$  にも影響を与える。LCD がレンズに近づくとき、実像の上部を結像する基画像の方がレンズに近いので、その分だけ  $M$  も大きくなる。その結果、実像の下部よりも上部の方が拡大され、基画像が上に伸びた状態の実像ができる。基画像を維持した状態の実像を作るためには、 $M$  を考慮して画像を補正する、あるいは上部と下部の倍率の差が気にならなくなるよう LCD とレンズの距離を離す必要がある。また、LCD とレンズの位置が近づくことによる実像サイズの拡大は、結像に必要なレンズサイズ ( $L_{high} + L_{low}$ ) も大きくする必要があることを示している。

表 3.3: 焦点距離の異なるレンズを用いた際の出力結果.

図番号	$depth$ (mm)	$height$ (mm)	$L_{R\ high}$ (mm)	$L_{R\ low}$ (mm)
図 3.24	824	427	57	32
図 3.25	2447	1300	46	38

表 3.4: レンズと水平面のなす角  $\theta$  の違うときの出力結果.

図番号	$depth$ (mm)	$height$ (mm)	$L_{R\ high}$ (mm)	$L_{R\ low}$ (mm)	$L_{high}$ (mm)	$L_{low}$ (mm)
図 3.26	1572	573	41	30	75	54
図 3.26	1990	752	13	11	19	16

### レンズの焦点距離を変えた場合

焦点距離  $f$  の異なるレンズを用いたときの結像系の様子について述べる．図 3.24 では  $f = 200\text{mm}$  を，図 3.25 では  $f = 600\text{mm}$  とし，他のパラメータは表 3.1 の値を用いた．加えて，2 つの場合ともユーザの俯角  $\eta$  を 27 度 (degree 表示) に設定した．出力結果の中で着目した値をまとめた表を表 3.3 に示す．2 つの図と表 3.3 から，同じ俯角の結像系を構築する際は，レンズの焦点距離が長いほど結像系の奥行きと高さが必要であることがわかる．一方で，焦点距離が短いレンズを用いると，LCD とレンズの距離も短くなる．したがって，実像の上部と下部の長さの割合が広がり，基画像よりも上部が伸びた実像を作り出される．ソフトウェアによる実像の補正を行わずに，実像を基画像に近づけたい場合は，焦点距離が比較的長いレンズを実装に用いるべきである．それに対して，実像の状態を問わず，結像系自体を小型化したい場合は，焦点距離の短いレンズを用いた方が良いと言える．

### レンズと水平面のなす角 $\theta$ を変えた場合

フレネルレンズと水平面のなす角  $\theta$  の変化による，実像の変化および結像系の性能について述べる．本項では  $\theta = 30$  度， $\theta = 60$  度についてシミュレーションを行う． $\theta$  以外のパラメータは表 3.1 の値を用いる．また，ユーザの俯角  $\eta$  は 20 度 (degree 表示) とした． $\theta = 30$  度のときのシミュレーション結果を図 3.26， $\theta = 60$  度のときを図 3.27 に示す．出力結果の中で着目した値をまとめた表を表 3.4 に示す．ここから， $\theta = 30$  度は，結像系のサイズを小型化でき，実像サイズは  $\theta = 60$  度のときよりも 3 倍以上の大きさを提示できることがわかる．したがって， $\eta$  固定の条件下において小型で実像サイズが大きい結像系を実装する場合は  $\theta$  を小さくすべきだと言える．

一方で， $\theta = 60$  度について着目すると，提示できる実像が小さい分，実像提示に必要なレンズのサイズも小さいことがわかる．実装に使用するレンズに対して，提示に必要なレンズサイズが小さいということは，言い換えると，ユーザの視点が上下に移動した場合に，実像がレンズから外れにくいと言える．すなわち，視点の異なる位置から複数人で同時に観察した場合でも全員が実像を正しく観察することができる．本章で提案する光学設計は，デスクトップ環境で 1 人のユーザによる利用を想定しているが， $\eta$  が固定の状態複数人同時観察を実装したい場合は，実像が小さくなるという犠牲は免れないが， $\theta$  を大きくすることにより実現することができる．



### LCD の提示サイズを変えた場合

パラメータ設定ウィンドウを操作して、LCD で提示する基画像のサイズを変えたときのシミュレーションを行った。ユーザの俯角  $\eta$  は 20 度 (degree 表示) とした。提示サイズが 100mm のときのシミュレーション結果を図 3.28、750mm のときの結果を図 3.29 に示す。このとき他のパラメータは、表 3.1 の値を用いた。2 つの図から自明である通り、提示サイズを大きくした分、実像のサイズも拡大する。この際、実像の上部と下部のサイズ差も広がるため、基画像が上に伸びた映像となる。

提示サイズが小さいと、それだけ実像サイズが小さいため、視野角が広がり、複数人同時観察が可能となる。

### ユーザの視点と実像の距離を変えた場合

結像系の光学設計は表 3.1 の値を用いて、ユーザの視点と実像の距離  $d'$  を変化させたときのシミュレーションを行った。図 3.30 は、実像から 400mm 離れたとき、図 3.31 は、1300mm 離れたときのシミュレーション結果である。

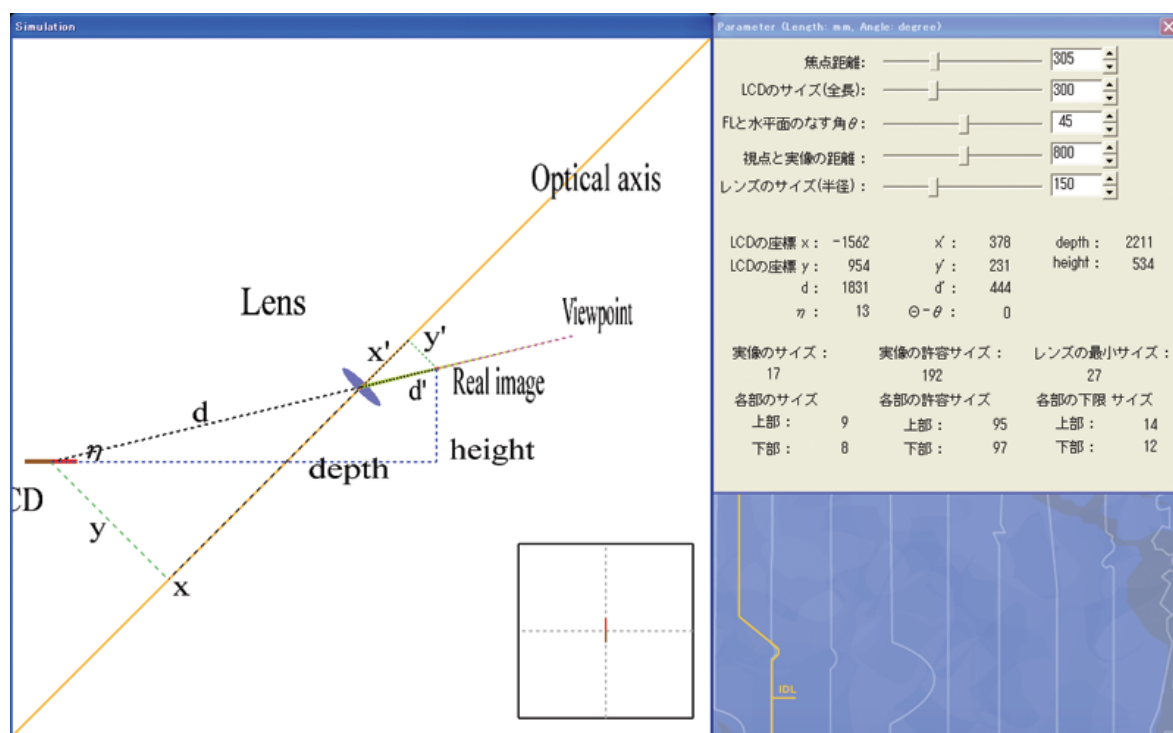
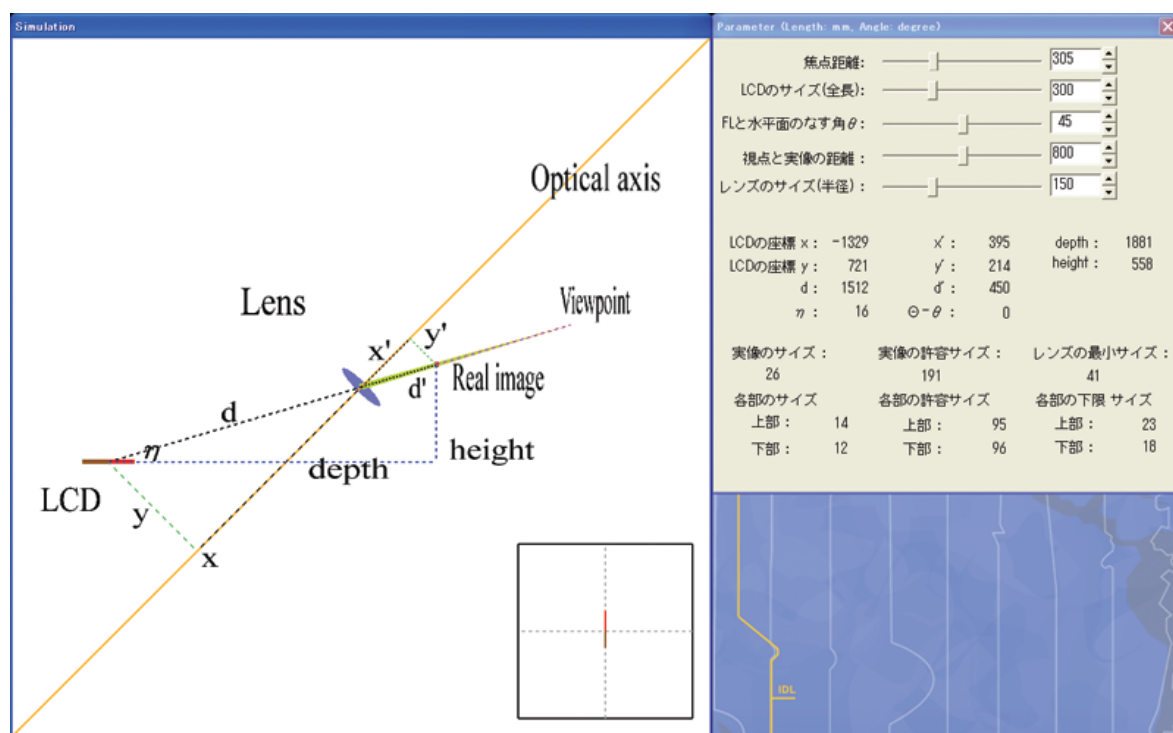
実像と視点間の距離を長くすると、提示サイズを小さくしたときと同様に実像提示に必要なレンズサイズが小さくなるため、視野角が広がり、複数人同時観察が可能となる。このとき、実像のサイズ自体は変わらないが遠近法によってユーザには実像サイズが小さく見える。

## 3.5.4 シミュレーションのまとめ

シミュレーション結果から、次のことが確認できた。

- $\theta$  固定の時、立像を提示できる LCD の位置は同一直線にある
- 光学設計によって実像サイズを大きくした場合、実像の上部と下部のサイズ差が大きくなり、実像は基画像と比較して上部が伸びた映像となる
- $\eta$  固定で  $f$  が可変の場合、 $f$  を小さくすると結像系の小型化、 $f$  を大きくすると基画像に近い実像提示を可能になる
- $\eta$  固定で  $\theta$  可変の場合、 $\theta$  によって実像のサイズを調整できる
- 実像のサイズに対し、レンズが十分大きい場合、結像系を多人数観察目的に利用することができる

提案する光学設計手法を用いて実装を行う際は、上記にまとめた性質を踏まえた上で、ユーザの要件を満たす結像系の構築を行う。

図 3.20: LCD の配置を変えた場合 (1) :  $\theta = 45$  度 ,  $f = 305\text{mm}$  ,  $L = 300\text{mm}$  ,  $d' = 800\text{mm}$  .図 3.21: LCD の配置を変えた場合 (2) :  $\theta = 45$  度 ,  $f = 305\text{mm}$  ,  $L = 300\text{mm}$  ,  $d' = 800\text{mm}$  .

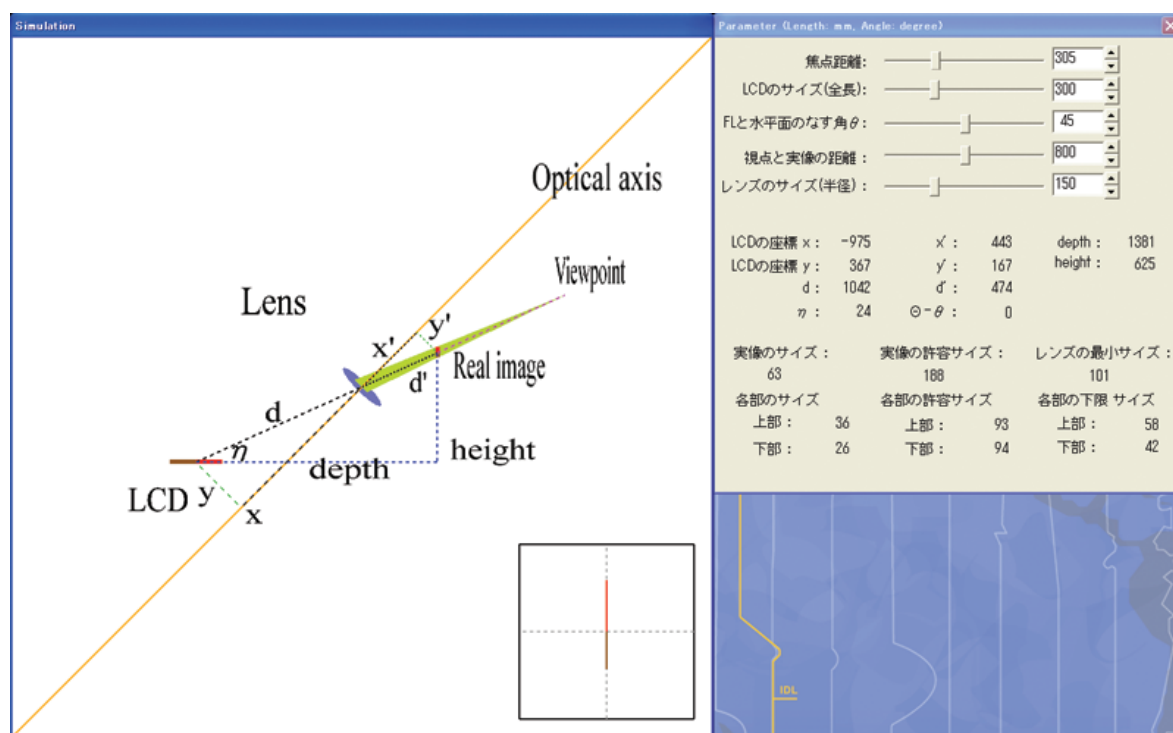


図 3.22: LCD の配置を変えた場合 (3) :  $\theta = 45$  度 ,  $f = 305\text{mm}$  ,  $L = 300\text{mm}$  ,  $d' = 800\text{mm}$  .

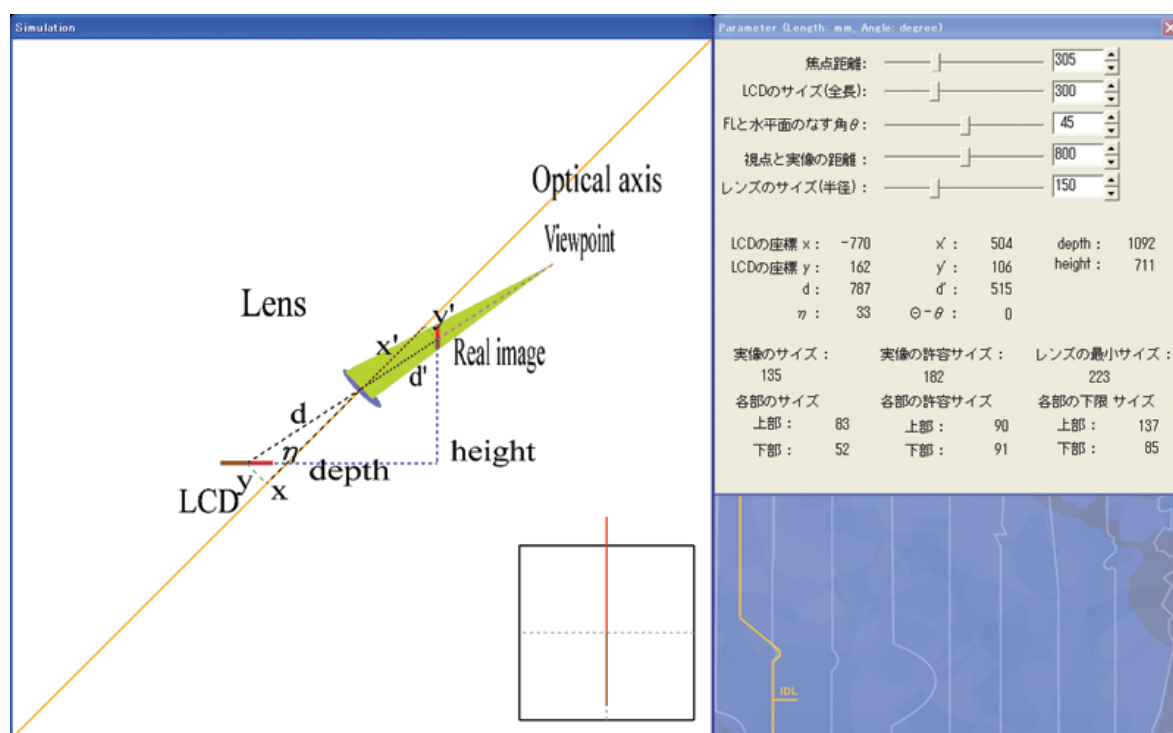


図 3.23: LCD の配置を変えた場合 (4) :  $\theta = 45$  度 ,  $f = 305\text{mm}$  ,  $L = 300\text{mm}$  ,  $d' = 800\text{mm}$  .

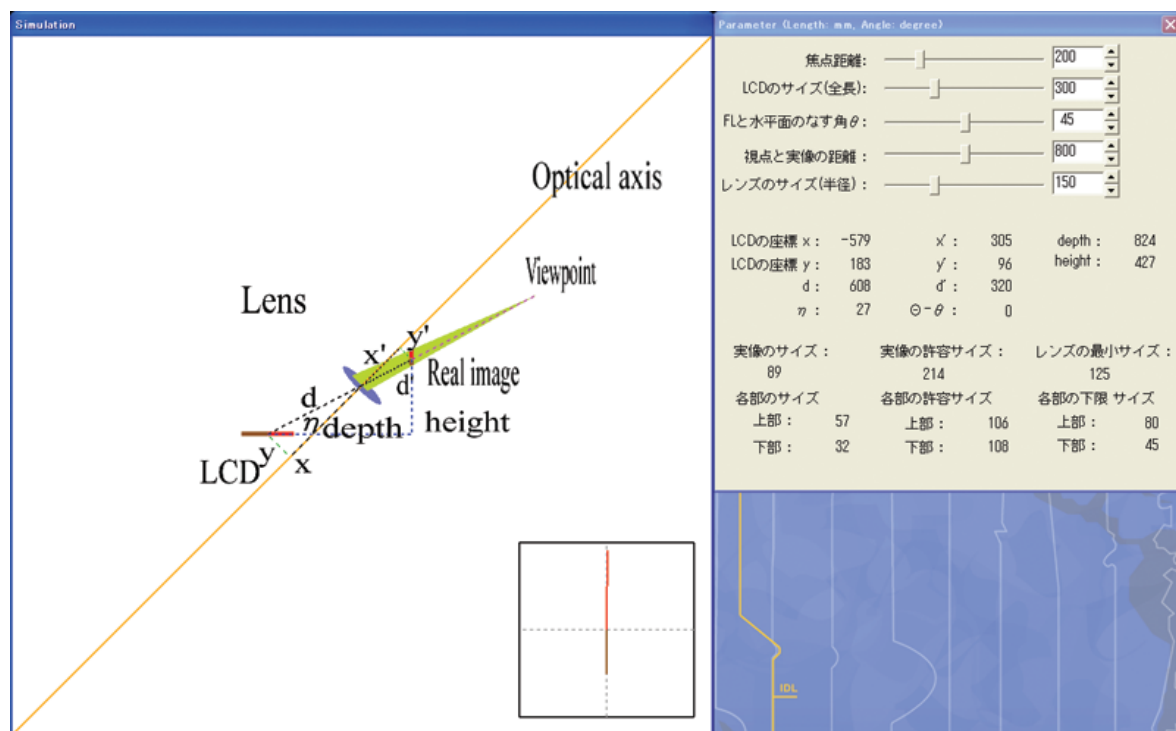


図 3.24: 焦点距離  $f$  を変えた場合 (1):  $\theta = 45$  度,  $f = 200\text{mm}$ ,  $L = 300\text{mm}$ ,  $d' = 800\text{mm}$ .

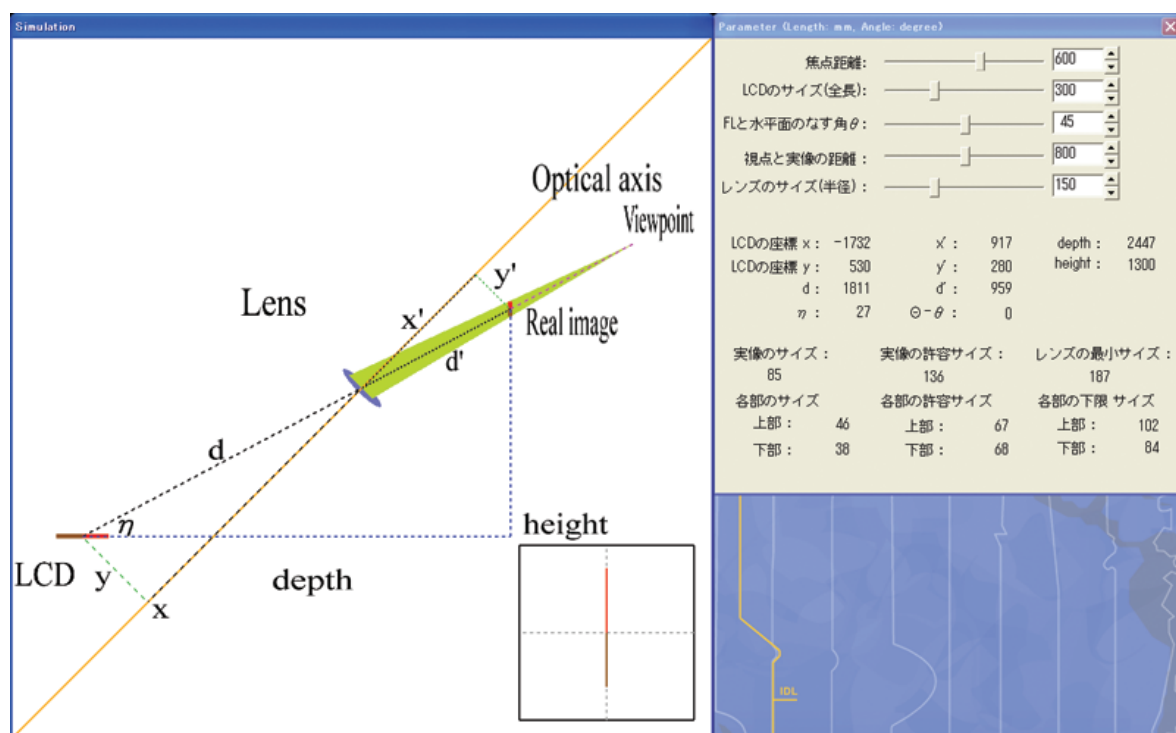


図 3.25: 焦点距離  $f$  を変えた場合 (2):  $\theta = 45$  度,  $f = 600\text{mm}$ ,  $L = 300\text{mm}$ ,  $d' = 800\text{mm}$ .

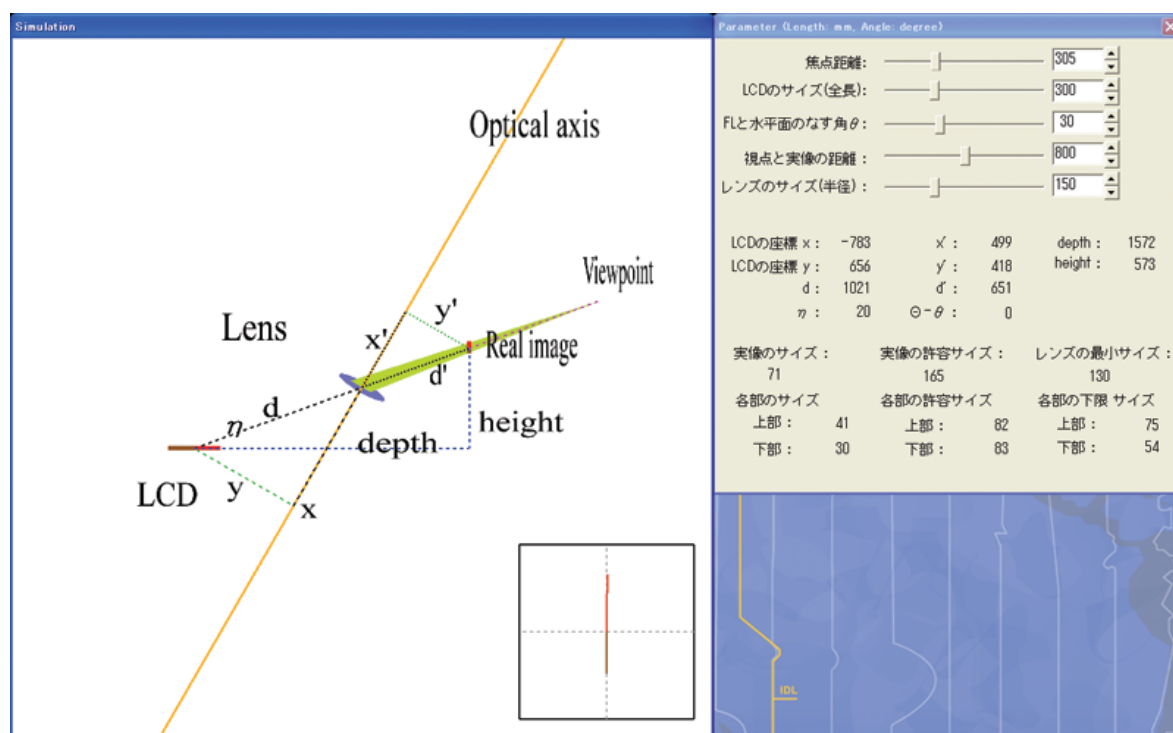


図 3.26: を変えた場合 (1) :  $\theta = 30$  度 ,  $f = 305\text{mm}$  ,  $L = 300\text{mm}$  ,  $d' = 800\text{mm}$  .

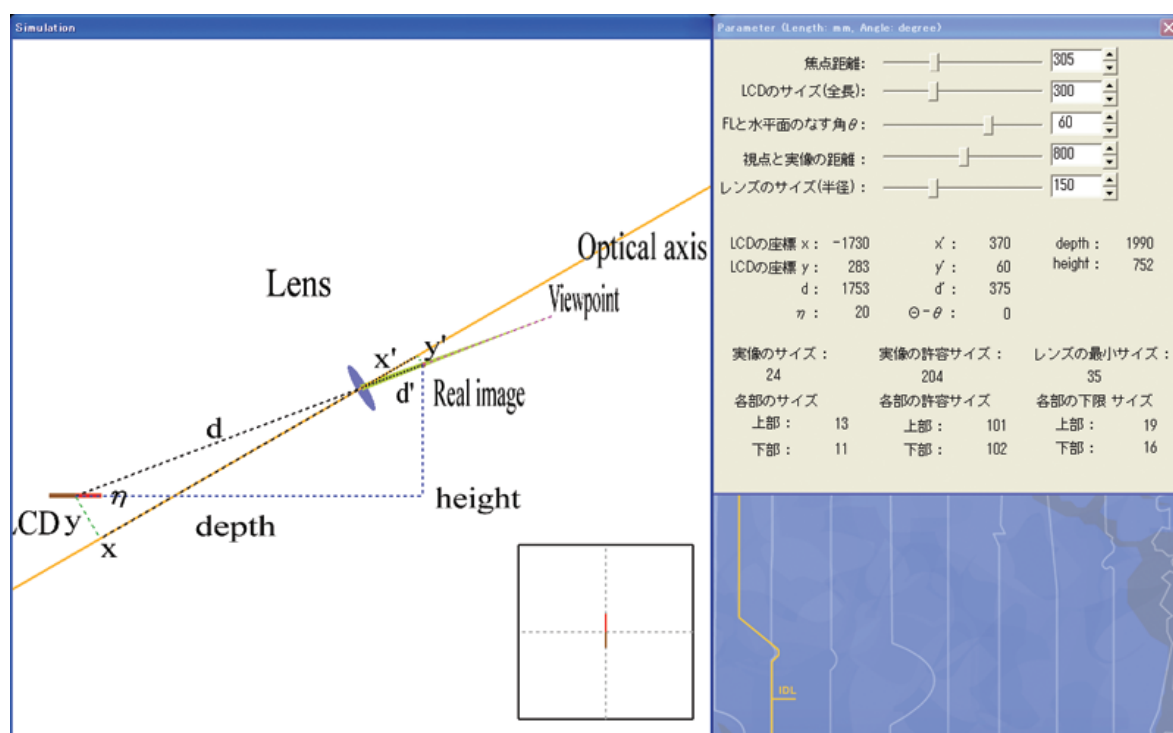
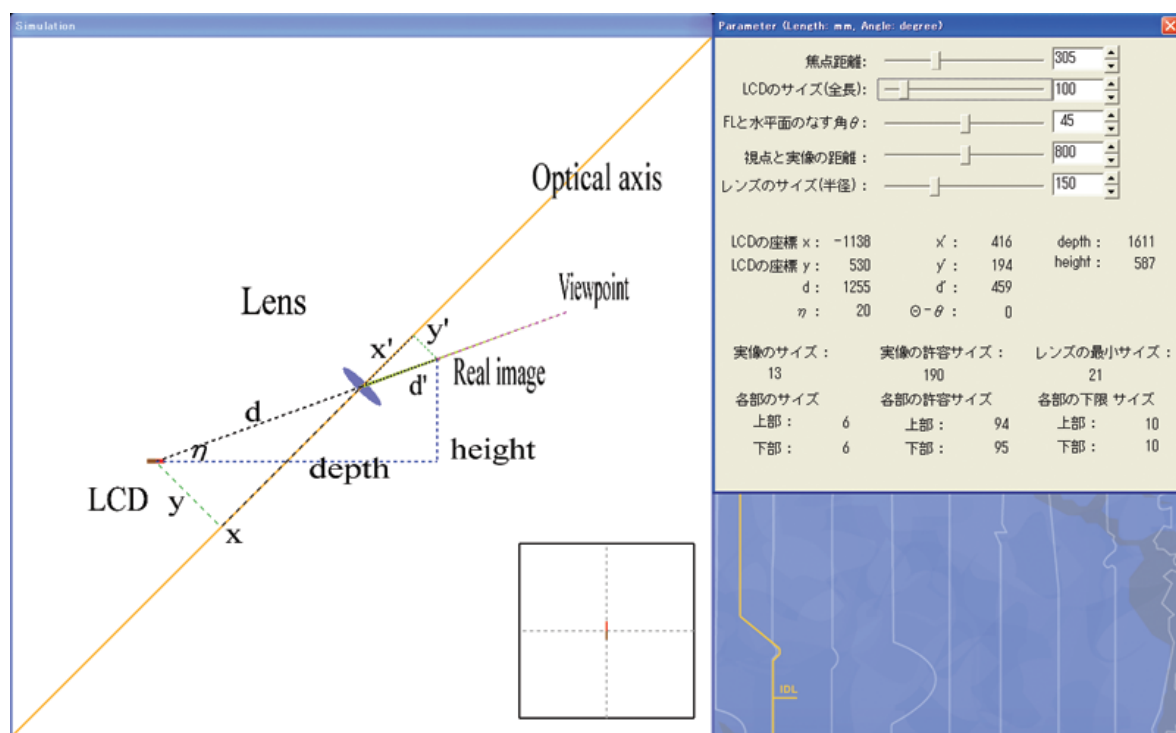
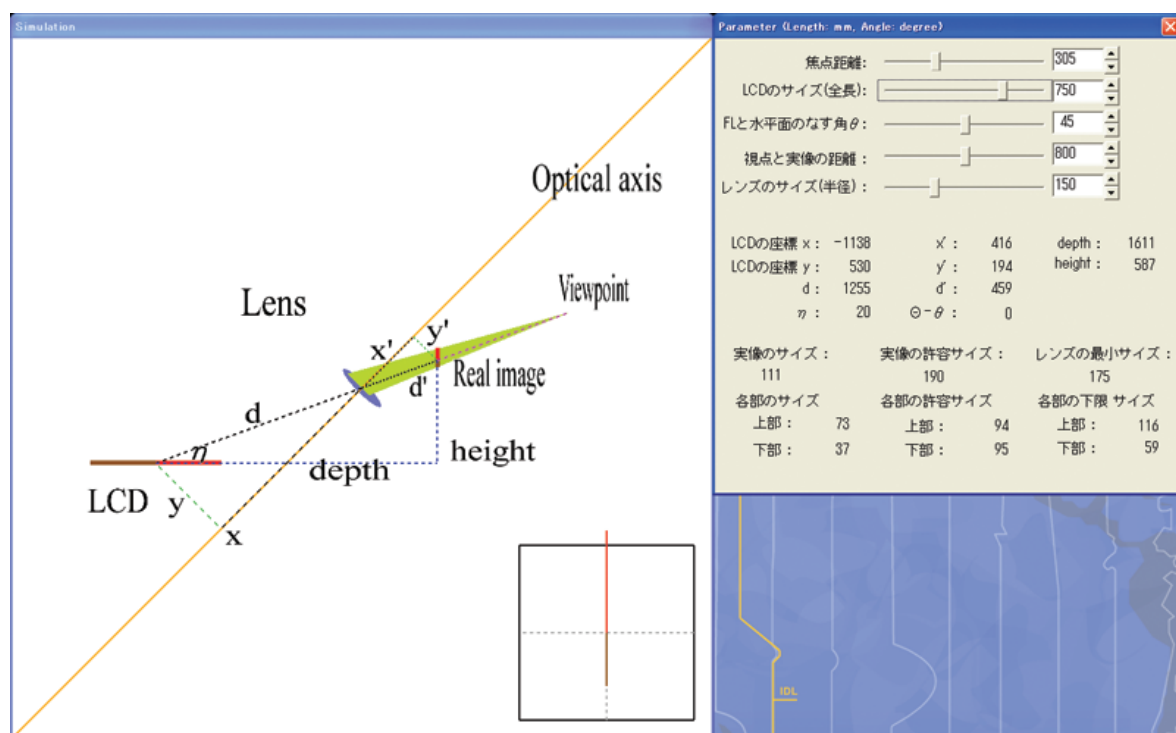


図 3.27: を変えた場合 (2) :  $\theta = 60$  度 ,  $f = 305\text{mm}$  ,  $L = 300\text{mm}$  ,  $d' = 800\text{mm}$  .

図 3.28: LCD の映像サイズ  $L$  を変えた場合 (1) :  $\theta = 45$  度 ,  $f = 305$  mm ,  $L = 100$  mm ,  $d' = 800$  mm .図 3.29: LCD の映像サイズ  $L$  を変えた場合 (2) :  $\theta = 45$  度 ,  $f = 305$  mm ,  $L = 750$  mm ,  $d' = 800$  mm .



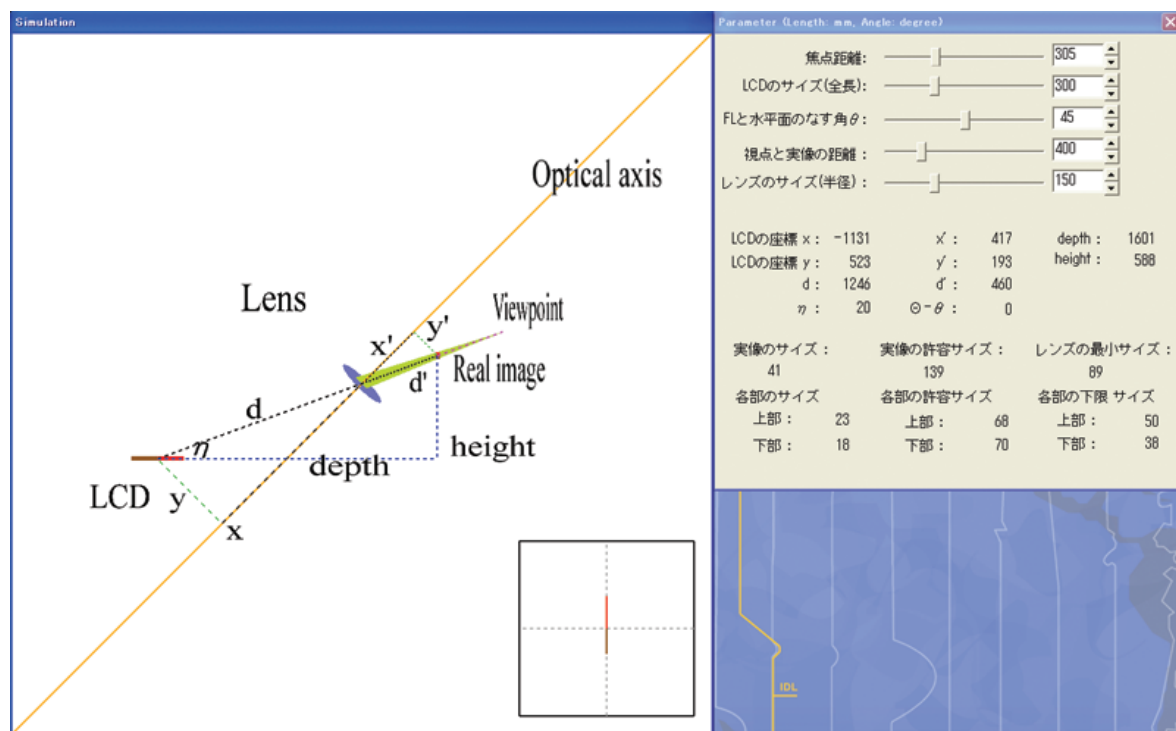


図 3.30: 視点 - 実像間距離  $d'$  を変えた場合 (1):  $\theta = 45$  度,  $f = 305\text{mm}$ ,  $L = 300\text{mm}$ ,  $d' = 400\text{mm}$ .

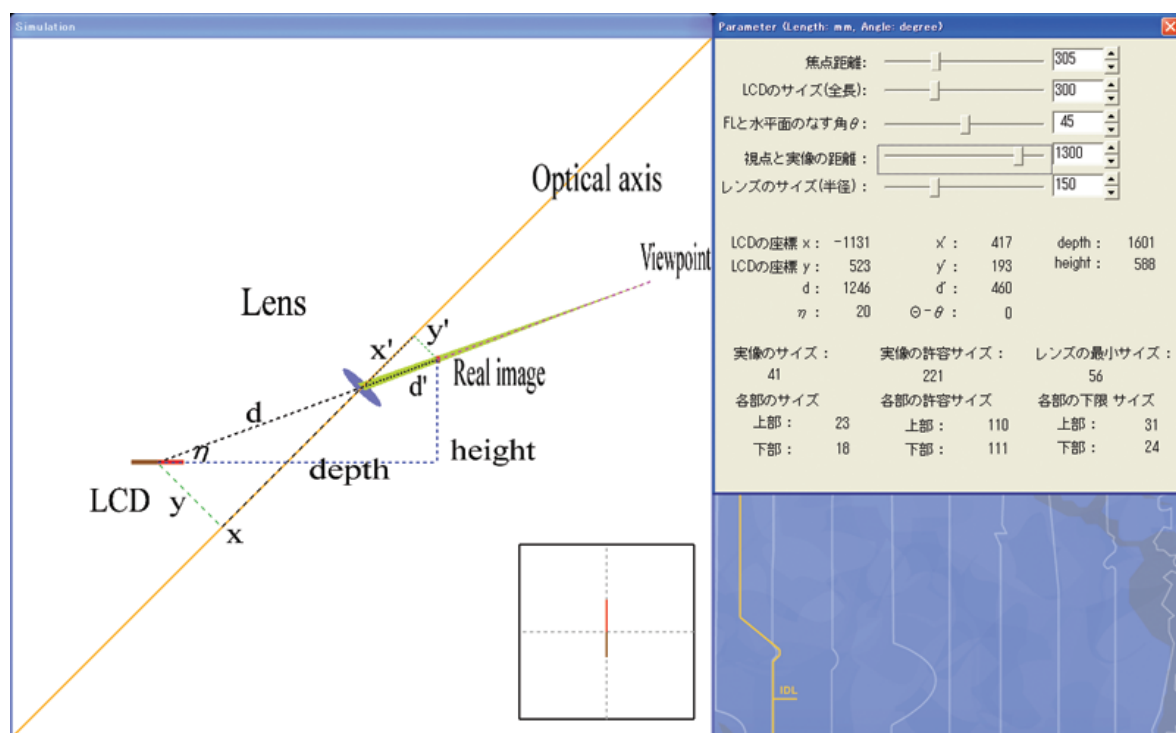


図 3.31: 視点 - 実像間距離  $d'$  を変えた場合 (2):  $\theta = 45$  度,  $f = 305\text{mm}$ ,  $L = 300\text{mm}$ ,  $d' = 1300\text{mm}$ .

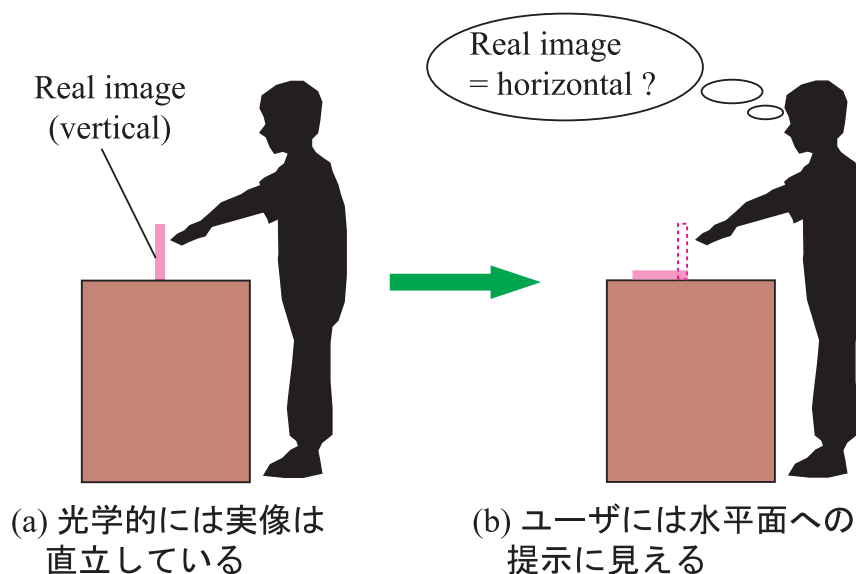


図 3.32: デスクトップ環境における結像系の課題。

### 3.6 本章のまとめ

本章では、デスクトップ環境で直立した実像を提示するための結像系の光学設計手法を提案し、そのシミュレーションを行った。提案手法によって、デスクトップ環境における結像系によるMR環境の実現が可能となる。しかし、本章で提案した手法は、立像提示を目的とし、結像系の持つ原理的な問題については取り組んでいない。そのため、図3.32のように、光学的にはデスクトップ上で直立した実像を提示しているにもかかわらず、ユーザには実像がデスクトップ面に提示されているように感じる場合がある。これは、立像とデスクトップ面が近距離にあるために、焦点が誤ってデスクトップ側に誘導されるからである。このため、立像の位置情報を補間して、実像が直立しているという認知的な実在感を高める必要がある。この課題を解決するために、4章および5章では、それぞれ異なるアプローチでMR環境を実現し、デスクトップ環境における立像の位置情報を補間した、実在感の高いディスプレイを提案・実装する。

## 第4章

---

# 鏡のある環境を活用した 立像の位置情報補間

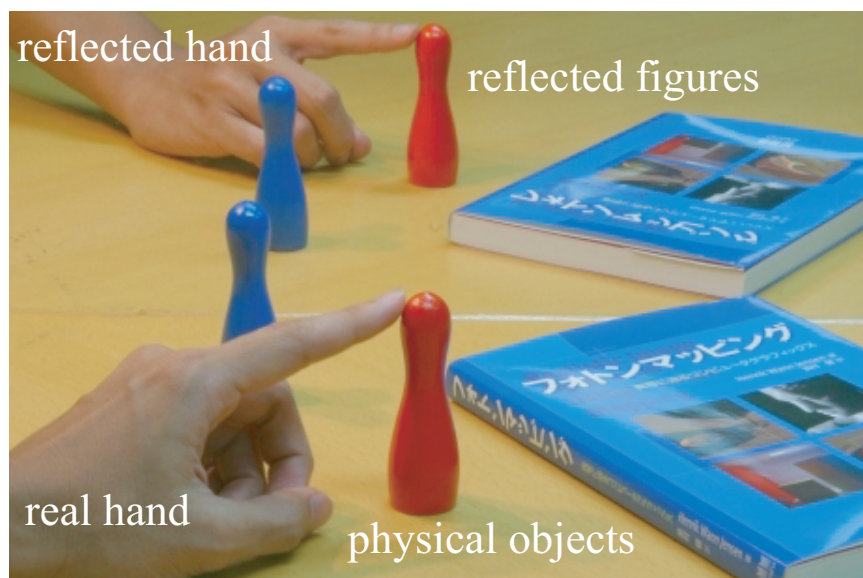


図 4.1: 実世界と鏡の中の世界の整合性。

## 4.1 はじめに

本章では、3章で述べた結像系の光学設計による立像と鏡のあるデスクトップ環境を融合した実在感の高い複合現実型空間立像ディスプレイを提案する。提案するシステムは、実世界と鏡の中の世界に対して同時にMR環境を実現できる。さらに、鏡の中の世界のMR環境を活用して立像の位置情報を補間することにより、立像の視認性向上を実現し、実在感の高いMR環境の構築を可能にする。

まず初めに、提案するシステムの概要を述べる。次にシステムの構成と実装について述べる。そして、提案するシステムの特長を活かしたアプリケーションについて述べる。最後に本章をまとめる。

## 4.2 システムの概要

鏡は、図4.1のように実世界を反映する。実オブジェクトの大きさ・位置・動作など全てが鏡の中に対となって映し出される。本論文では、これを“実世界と鏡の中の世界の整合性”と呼ぶこととする。そして、鏡は実世界と鏡の中の世界との整合性を持つだけでなく、2章で述べたように、鏡は実環境でMR環境を実現できる。

本章で提案する複合現実型空間立像ディスプレイでは、この鏡の性質を活用して次の2つの要件を満たすシステムの実現する。

- 実世界と鏡の世界に対して同時にMR環境を構築
- デスクトップ上に提示された立像の位置情報を補間し、立像の視認性を高め実在感を向上

次にシステムの原理について述べる。はじめにことばの定義を行う。本章では、結像系によって提示する立像について、2つのことばを用いる。1つは、鏡の前の実世界上で提示される、バーチャルオブジェクトの正面映像が結像した立像を“正面像”と呼ぶ。もう1つは、鏡の中の世界に提示される、バーチャルオブジェクトの背面映像が結像した立像を“背面像”と呼ぶこととする。

鏡の置かれたデスクトップ環境で正面像を提示した場合は、図4.2(a)のように、鏡の前では実オブジェクトと正面像が混在したMR環境が実現できる。しかし、正面像は光学的には存在するが物理的には存在

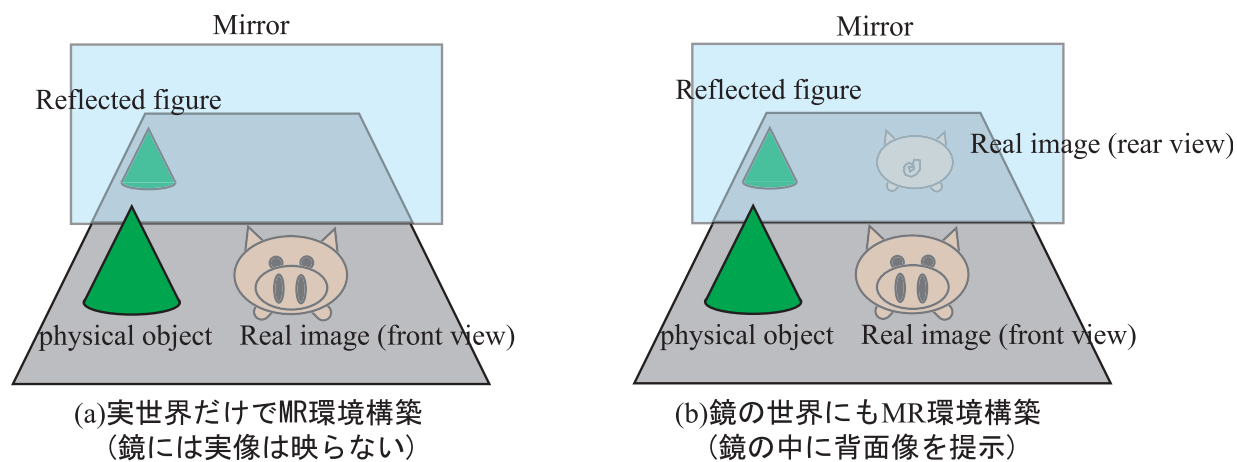


図 4.2: 鏡のある環境で実現できる 2 つ MR 環境 .

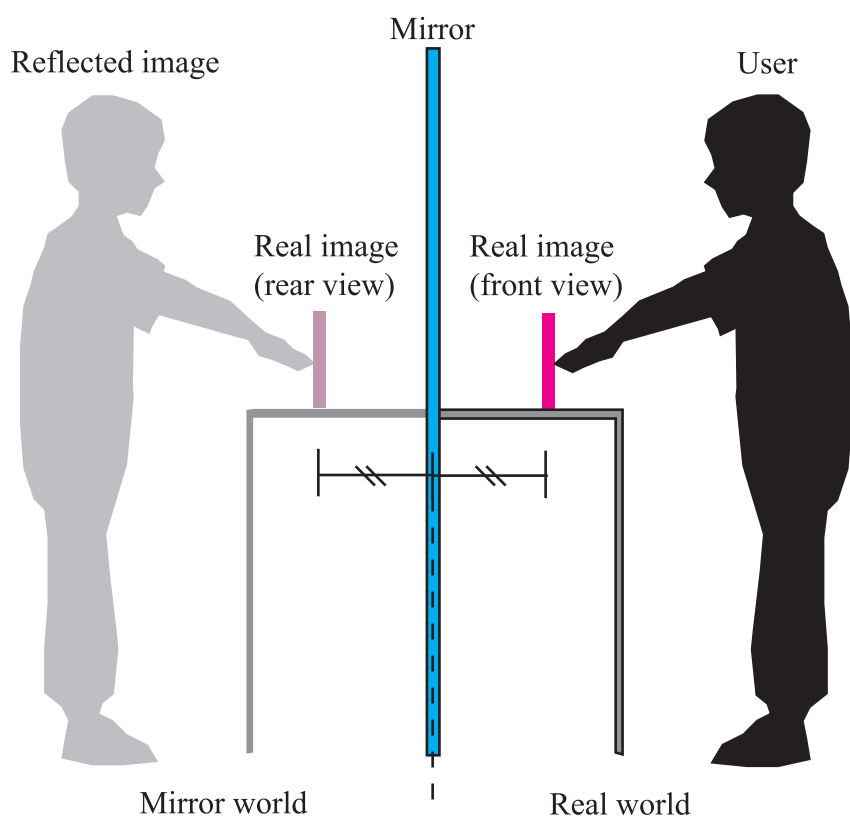


図 4.3: 鏡の中の実像を用いた位置情報補間 .

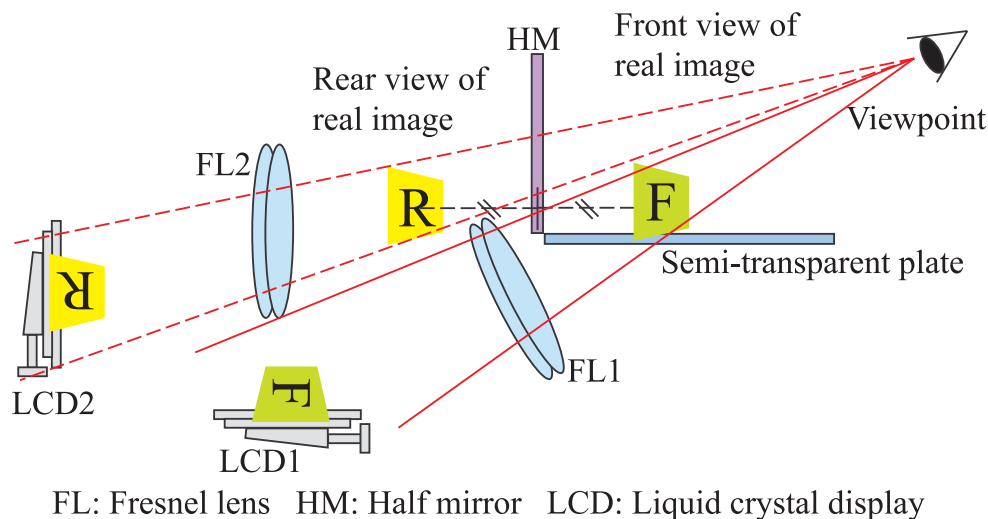


図 4.4: 空間的整合性に着目した構成.

しないため、鏡には正面像の鏡像は映らない．そのため、ユーザが鏡を見ると実オブジェクトの鏡像だけ視認できる．この状況のままでは、ユーザが例えば正面像の一部を指差したとしても、鏡の世界では何もない空間を指差しているだけなので、鏡が立像の位置情報を補間する役割を果たさない．

そこで、実世界と同時に、鏡の中の世界に対しても MR 環境を実現する．2 つの世界が同時に MR 環境であるとき、図 4.2(b) のように鏡の中に背面像を提示する．このとき、実世界と鏡の中の世界の整合性を考慮し図 4.3 に示すように、背面像は、鏡から正面像までの距離と同じ距離だけ鏡から離れた位置に配置し、正面像と同じ大きさとする．

図 4.3 が実現した MR 環境下でユーザが正面像を指差すと、ユーザの鏡像も鏡の中で背面像の同じ場所を指差す。したがって、ユーザから見ると、正面像と背面像のという 2 つの指標を基に実像の位置情報を把握することになる。これは、認知的に立像が観察しやすい状況を実現している。

鏡を見ることは日常的な行為であり、それを活用した提案システムは、ユーザが立像を観察する際、違和感を与えることはない。故に、デスクトップ環境でユーザが自然な状態でMR環境を利用できるシステムであると言える。

次節では、本項で述べた 2 つの要件を満たすためのシステム構成を述べる。

### 4.3 システムの構成

本節では、4.2 節で説明した原理を実現するために、整合性を 2 つの観点から捉え、それぞれの観点からシステム構成を提案する。本章では、水平面に対してレンズを 45 度傾けて設置した光学設計を基に話を進める。

#### 4.3.1 空間的整合性に着目した構成

図 4.4 にシステム構成を示す。システムはハーフミラー、半透明板、フレネルレンズ、LCD で構成する。机上部が半透明なのは、立像が机に直立していることを明示するためである。

2つの結像系によって、同じ大きさの正面像と背面像を提示する。そして、ハーフミラーを2つの実像の中間に配置する。これにより、ハーフミラーを挟んだ2つの実像の位置関係に整合性を持たせる。ユー



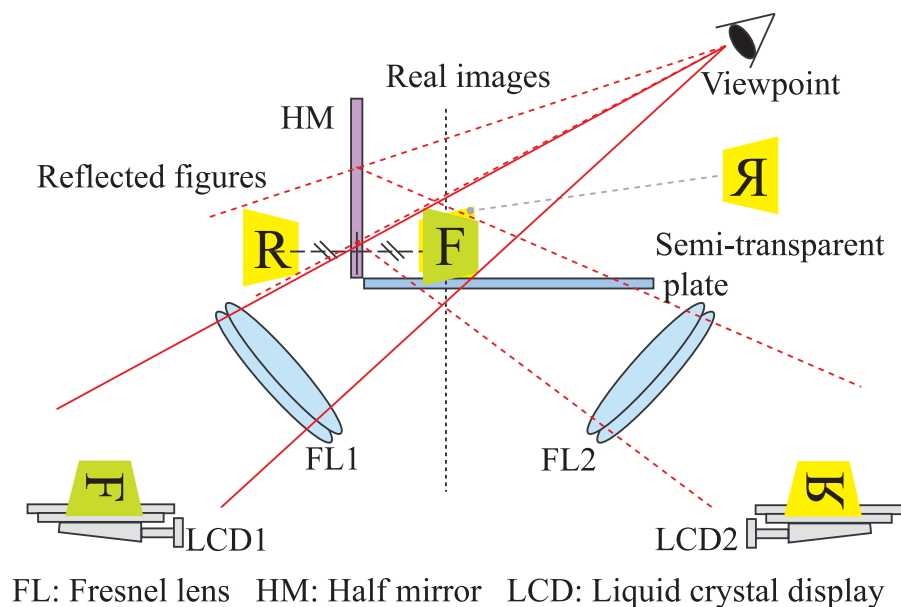


図 4.5: 光学的整合性に着目した光学設計。

ザがこのシステムを観察すると、鏡の手前にある実体のない立像‘F’の背面‘R’が鏡に映っているように見える。加えて、位置の整合が取れているため、鏡の中と外の2つの実像を指標として、立像が鏡からどれだけ離れているかを認知することがでる。このように、バーチャルな物体に実世界と鏡の中の世界との整合性を付与することでリアリティの向上を図っている。

しかし、この構成は2つの問題点を持つ。1つは、2つの立像を鏡に近づけ過ぎると、2つの結像系が重なるため正しく提示できない。鏡と立像の距離が離れると、ユーザがシステムを観察したとき、正面像と背面像を同時に視認しづらくなり、実世界と鏡の中の整合性がわかりにくくなる。そのため、立像を鏡に近づけられない問題は提案したシステムでは、大きな問題と言える。もう1つは、鏡との整合性を保つためにハーフミラーの固定を余儀なくされる。言い換えると、2つの立像が別の空間で結像しているため、鏡と立像の距離を変える際は、機械的に2つの結像系を動かして調整しなければならない。

### 4.3.2 光学的整合性に着目した構成

光学的整合性に着目した構成を図4.5に示す。システムはハーフミラー、半透明板、フレネルレンズ、LCDで構成する。‘F’はLCD1からの映像がFL1により結像し、ユーザは直接観察できる。一方、‘R’は直接観察できない。これは、LCD2からの光線方向とユーザの視線方向が一致しないためである。鏡の反射によって、光線と視線の方向が一致し、‘R’を観察できる。これにより、鏡の前の‘F’と鏡に映った‘R’を同時に観察できる。この光学設計において最も重要な点は、‘F’と‘R’（左右反転した状態）を鏡の前の同じ位置に配置することである。これにより、鏡 - ‘F’間と鏡 - ‘R’間の距離は常に等しくなる。つまり、鏡との整合性は鏡との位置関係に依存しない。言い換えると、鏡は‘F’より後ろであれば配置の制限がない。

光学的整合性に着目した構成は、結像系が対称構造で、鏡の位置関係に依存しないため、空間的整合性に着目した構成で生じた問題はない。但し、図4.5の構成を実装した場合、2つの立像を配置する位置よりも手前に結像系を1つ作る必要があるため、ユーザと立像の距離が遠くなる。このため、ユーザが立像に触れることは難しい。

表 4.1: 実装時の設定パラメータ.

変数	値
レンズの焦点距離	400(mm)
LCD のサイズ (全長)	300(mm)
フレネルレンズと水平面のなす角	45 度 (degree)
ユーザの視点と実像の距離	800(mm)
レンズの大きさ (半径)	200mm

## 4.4 実装

提案した 2 つの構成の実装について述べる．本節では，空間的整合性に着目した構成を“構成 A”，光学的整合性に着目した構成を“構成 B”と呼ぶこととする．実装は設計方針としてユーザの俯角を 30～45°と仮定し，3 章で述べたシミュレータの結果に基づき設計した．表 4.1 に設定パラメータを示す．これは実装に用いる素材を基にした値である．はじめに実装に用いるレンズについて述べ，構成 A，B の実装とシステムの性能を確かめるために，輝度測定と俯角・水平画角測定を行い，最後に考察を行う．

### 4.4.1 実装に用いるレンズについて

光学的性質上，凸レンズには歪曲収差が存在する．これは，凸レンズの表面，裏面によって，それぞれ“たる型”あるいは“糸巻き型”に実像の形状が歪む現象である．1 枚のレンズで結像系を実装すると，この歪曲収差が生じ実像の実感が低下する．そこで実装には，フレネル凸レンズ (以降，フレネルレンズと略記) を 2 枚重ねて合わせて，1 枚のレンズと見なして扱う．このとき，フレネルレンズの凸面同士を向かい合わせて重ねる．これにより，たる型と糸巻き型の歪曲収差が相殺され，歪曲収差のない実像になる．これは，図 4.6 に示すように，ユーザの視点移動に対しても歪みを軽減する効果がある．

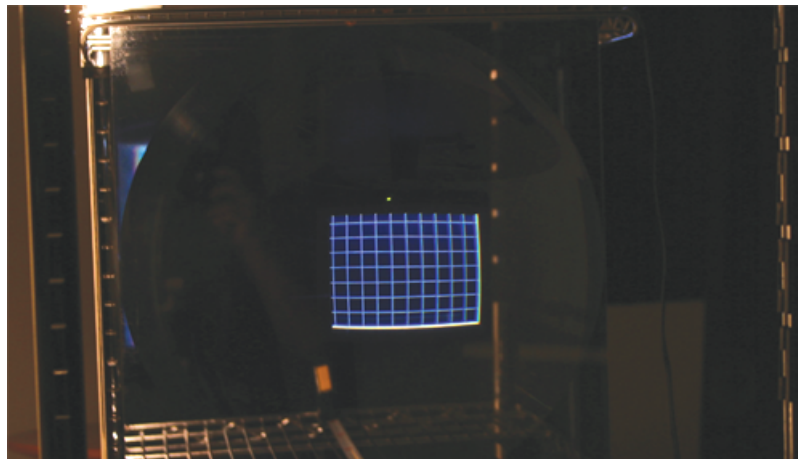
なお，フレネルレンズを 2 枚重ねて使用する場合，焦点距離は単体で使用したときよりも短くなる．2 枚のレンズを重ねたときの焦点距離を求める式は式 4.1 である．式中の変数は， $f_1$  は第 1 レンズの焦点距離， $f_2$  は第 2 レンズの焦点距離， $d$  は第 1 レンズと第 2 レンズの間隔である．

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 f_2} \quad (4.1)$$

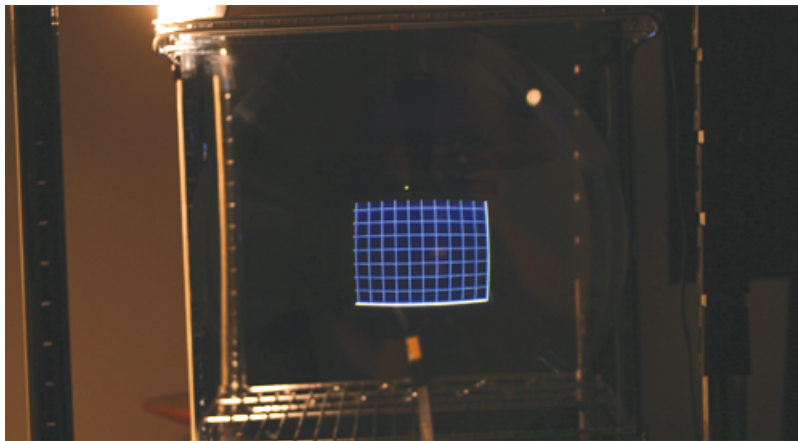
式 4.1 から，同じ焦点距離 ( $f_1 = f_2$ ) のフレネルレンズをゼロ距離 ( $d = 0$ ) で重ね合わせた場合は，焦点距離は単体の半分の長さとなる．表 4.1 で示した焦点距離は 2 枚重ねたレンズのものである．

### 4.4.2 構成 A の実装結果

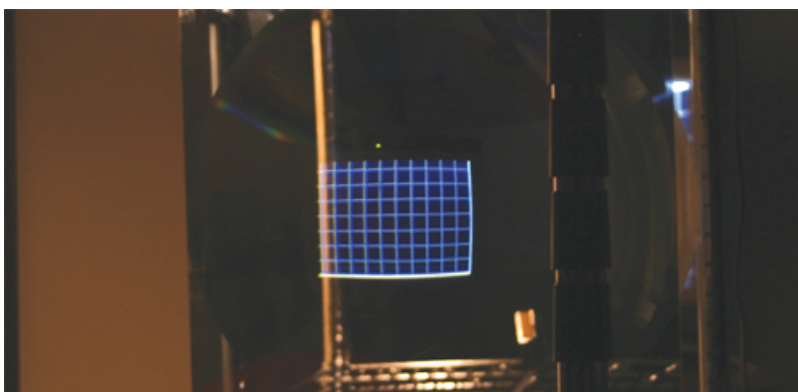
図 4.4 の構成に従い実装を行った．実装には SHARP の 17 型液晶カラーモニタ LL-T1511A，Edmund Optics Japan の焦点距離 600mm のフレネルレンズ 4 枚 (2 枚組をレンズ 1 枚として使用)，透過率 25%・反射率 75% のハーフミラー 2 枚 (1 つは半透明板として使用) を用いた．提示する内容は，遠隔地とのコミュニケーションを想定して，人の上半身を正面と背面から撮影した画像を用いた．背面の画像は鏡に映っている状況を再現するために左右反転させた．実装結果を図 4.7，図 4.8 に示す．図 4.7 では，ユーザが指で正面像に触れた場合に，鏡の中でも指が背面像に触れているように見える．実物体とバーチャルな実像の位置関係が，鏡の手前と中で整合し，複合現実型の情報提示として機能していることがわかる．図 4.8 は，実物体とバーチャルな実像の隠蔽関係を示した図である．現在の実装では，実像は半透明に表示されていることが分かる．いずれの場合も，実像として観察する上での違和感は低く抑えられていることが確認された．



(a) Left side view.



(b) Front view.



(c) Right side view.

図 4.6: 2 枚重ねたフレネルレンズを用いた場合の実像の様子 .



図 4.7: 構成 A の実装結果 1: ユーザの指と鏡像の指が実像の同じ場所を指している。



図 4.8: 構成 A の実装結果 2: 実像と実オブジェクトとの隠蔽関係が正しい。



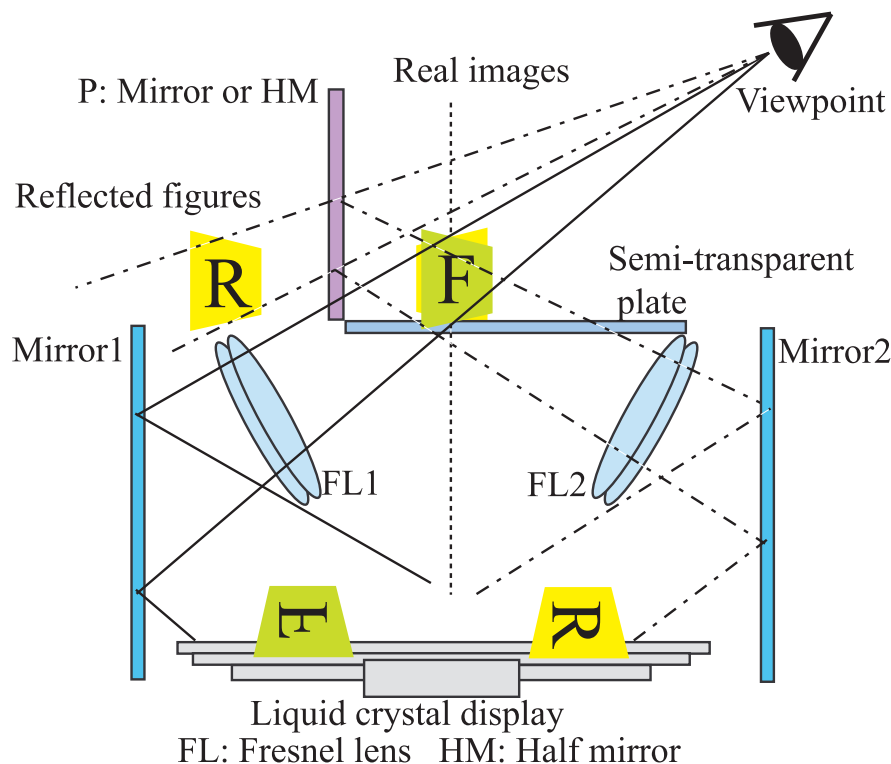


図 4.9: 光学的整合性に着目した構成 (構成 B) の実装。

#### 4.4.3 構成 B の実装結果

図 4.5 の光学設計を図 4.9 の構成により実装した。これは、図 4.5 で問題点である、ユーザと立像の距離の遠さを解決できる。実装はシミュレータによるシミュレーション結果に基づいて行った。実装には EIZO の FlexScanS2410W と焦点距離 600mm のフレネルレンズ 4 枚 (2 枚組をレンズ 1 枚として使用) を用いた。P の位置の鏡には鏡 A (透過率 0%, 反射率 100%) と鏡 B (透過率 25%, 反射率 75%) を用いた。提示する内容はバーチャルな物体 (車) の正面と背面とする。正面・背面の 2 つの映像は 1 台の LCD で提示する。このとき、正面は上下左右反転、背面は上下反転した映像である。次に正面映像は Mirror1、背面映像は Mirror2 に反射したあと、フレネルレンズにより同じ位置に結像する。実装したシステムの概観を図 4.10 に示す。

構成 B の実装結果について、鏡 A を用いた場合、鏡 B を用いた場合、ユーザが視点移動した場合の 3 つに分けて述べる。

##### 鏡 A を用いた実装結果

構成 A では設計上、鏡は透過する素材が絶対条件であった。それに対し、提案手法は絶対条件ではない。そこで、鏡 A による実装を行った。実装結果を図 4.11(a),(b) に示す。提案手法では、背面像は直接は観察できないが光学的には鏡 A の前に結像しているため、鏡 A に実像を映し出せる。しかし、光を透過しない鏡 A は提案手法でも障害となる。図 4.11(a) で自明の通り、正面像と鏡 A の距離が近い場合は正面像が鏡 A によって隠れてしまう。図 4.11(b) のように、正面像が対面する鏡 A をまたがないという制約下において、鏡 A の中と外で MR 環境を同時に作り出すことができる。

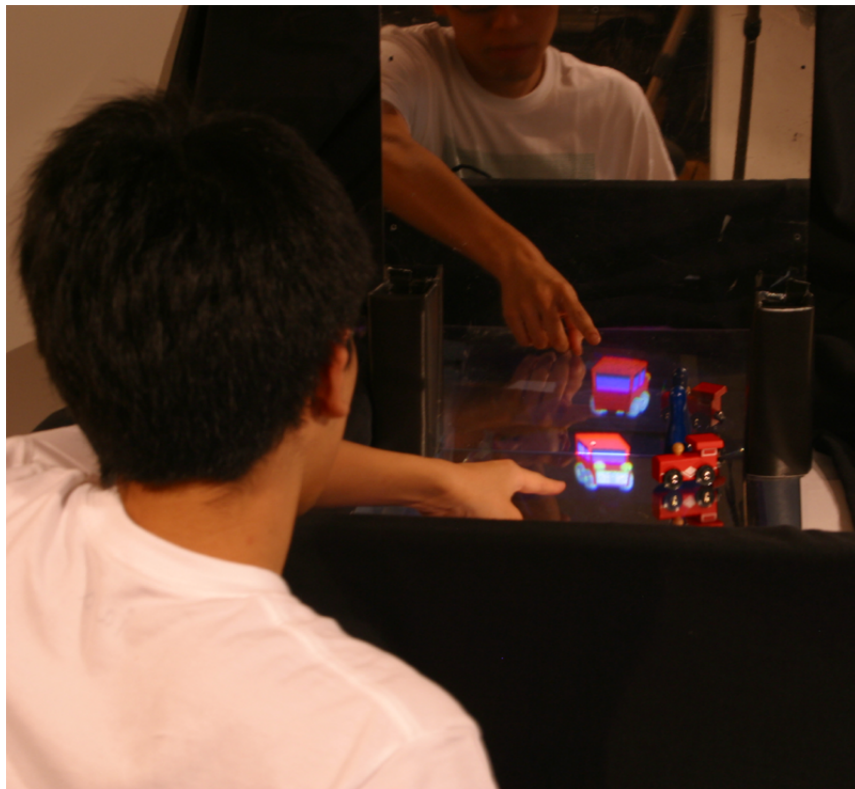
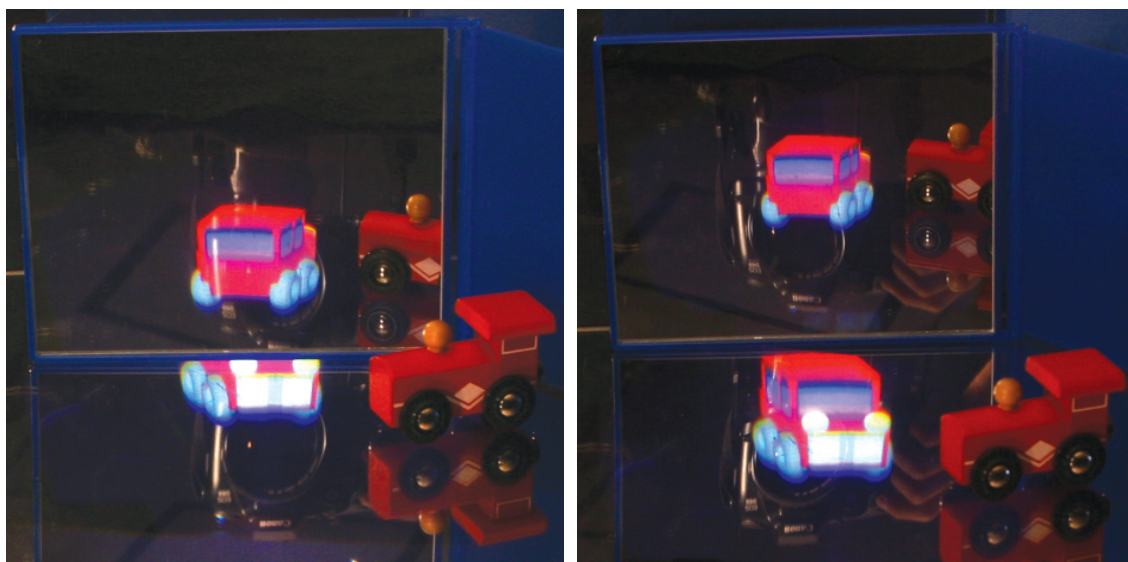


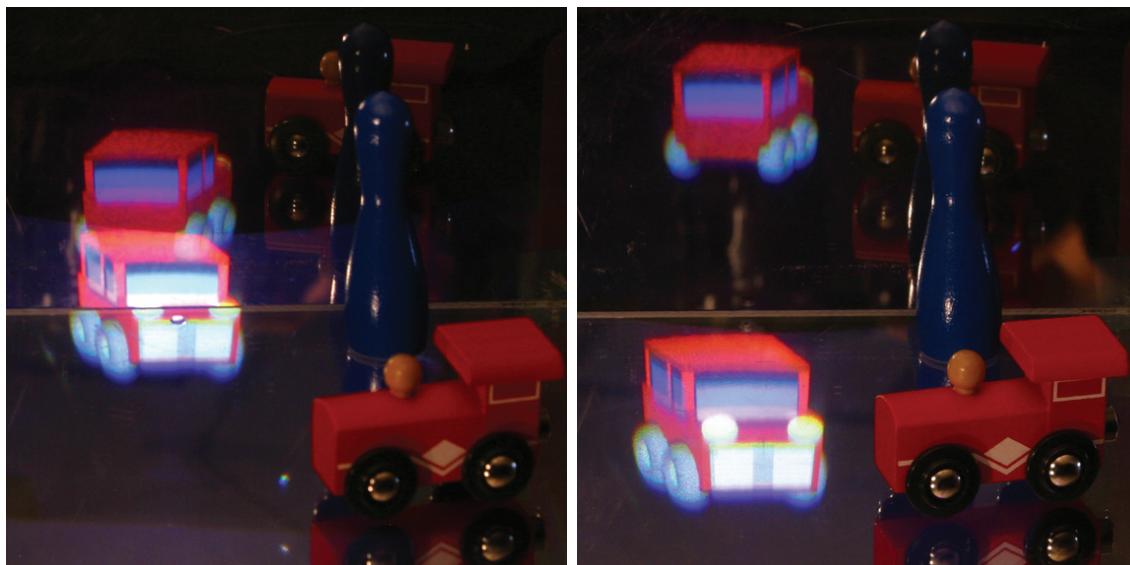
図 4.10: 構成 B を実装したシステムの概観 .



(a) 正面像：鏡Aに遮蔽される。  
背面像：鏡Aの中に提示可能。

(b) 正面像・背面像ともに  
正しく提示可能。

図 4.11: 構成 B の実装結果：鏡 A を用いた場合 .



(a)正面像：鏡Bの境界を越えて提示．  
背面像：正面像に遮蔽されている．

(b)背面像は、常に正面像と鏡B間の  
距離だけ鏡から離れて配置される．

図 4.12: 構成 B の実装結果：鏡 B を用いた場合．

#### 鏡 B を用いた実装結果

光を透過する鏡 B を用いた結果を図 4.12(a),(b) に示す．図 4.12(a) では、実像は鏡 B の領域に入り込んでいる．加えて、鏡 B に映った背面像の一部が正面像に隠れている．これらは、鏡の前に置かれた実物体と同じ状況であると言える．

次に、鏡 B を正面像から遠ざけた結果を図 4.12(b) に示す．正面像が鏡 B から遠ざかり手前にある自動車オブジェクトに近づくと、鏡 B に映る背面像も同様に自動車オブジェクトの鏡像に近づいている．このことから、2 つの実像の整合性は鏡 B との位置関係に依存しないと言える．光を透過する鏡 B は、鏡 A よりも高度な鏡との整合性を実現できる．

#### 4.4.4 構成 A と構成 B の比較

構成 A と構成 B により実装したシステムは、共に 4.2 節で述べた要件を満たすため、どちらのシステムも目的とした実在感のある MR 環境をデスクトップ上に実現できる．

しかし、構成 B によって実装したシステムは、

- 立像に 2 つの世界の整合性を付与する際、鏡の位置関係に依存しない
- 透過率 0% の鏡を使って 2 つの世界に M 同時に R 環境を構築できる．

前者は、立像と鏡の距離の調整が容易であるため、ユーザの想定する仕様に合わせやすい．また、鏡に近い位置に立像を提示できる．後者は、正面像が鏡の領域をまたがない位置に提示されている状況では、透過率 0% の鏡を用いる方が、ユーザが立像に感じる実在感を高めることができる．

故に、実装結果から構成 B の方がより実在感の高い MR 環境を実現できる環境であると言える．次項以降は、構成 B の光学的整合性に着目した構成による実装を用いて話を進める．



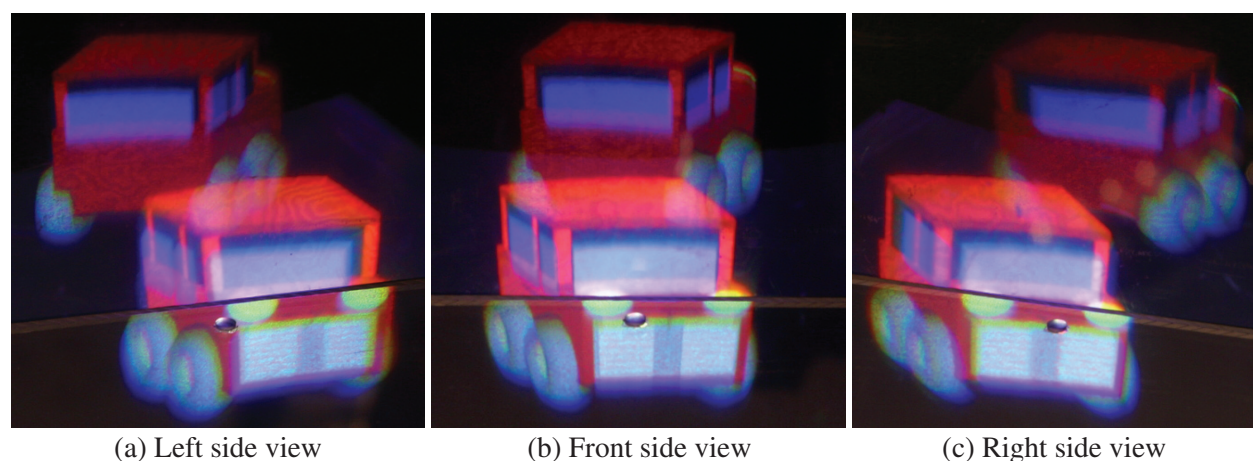


図 4.13: 構成 B の実装結果：視点を移動させたとき。

表 4.2: 輝度測定の結果.

対象	輝度 (Cd)	透過率 (%)
光源 (LCD)	256.0	—
空間像 (半透明板なし)	131.7	51.5
空間像 (半透明板あり)	19.8	7.8
鏡に映った空間像	10.9	4.2

#### 4.4.5 観察位置を左右に移動したときの様子

鏡 B を用いた実装で、観察位置を左右に移動させた結果を図 4.13 に示す。提案したシステムは多視点に対しては未対応であるため、2 つの実像の映像は左右移動によって変化しない。しかし、背面像に注目すると、正面から観察したときには正面像によって隠れていた部分が、視点移動により現れて観察可能となる。この状況も鏡の前で実物体に起こる事象の 1 つであり、実像のリアリティを高めている。

#### 4.4.6 輝度測定

鏡 B を用いた実装が使用できる照明環境を明確にするために、実像の輝度測定を行った。測定は白い正方形を提示し、正方形中の 9 点の輝度を測定、その平均を求めた。測定対象は、LCD、半透明板を通過する前と後、そして鏡 B に映った実像とした。測定結果を表 4.2 に示す。鏡 B の手前にある実像は光源である LCD の 10% 以下まで輝度を落としていた。原因は、反射用の鏡とフレネルレンズによる拡散が挙げられる。半透明板による減衰については、透過率 25% の素材を使用し、かつ LCD からの光線が傾きを持って入射した場合、半透明板の透過率が 15.0% まで下がることを確認したため、妥当な減衰であった。

#### 4.4.7 俯角および水平画角の測定

実装が設計方針を満たし、また複数人で観察できるかを確認するため、実像の像高の変化による俯角と水平画角の遷移を測定した。その際、鏡と実像の距離は 22mm という近接した状況を仮定した。また角度の許容限界は 2 つの実像の一方が欠けるまでとした。測定結果を図 4.14 に示す。図 4.14(a) から、像高 60mm

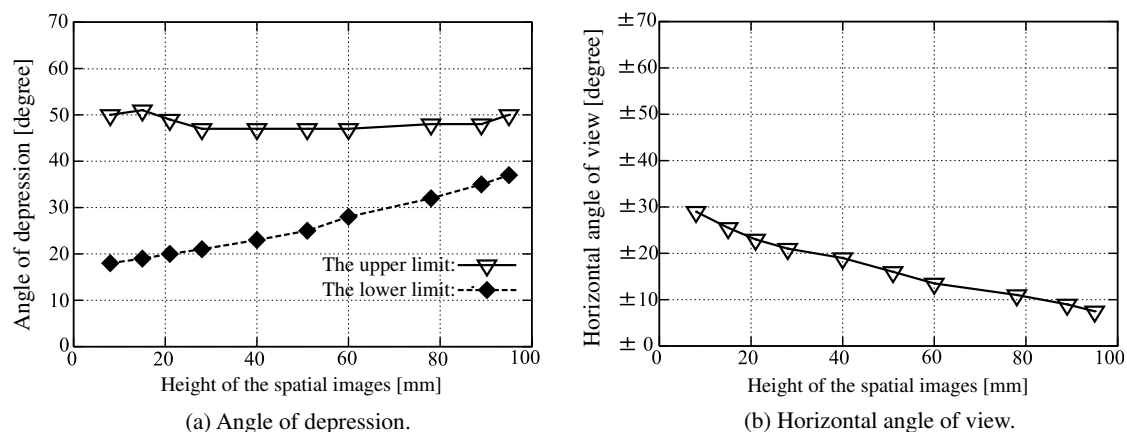


図 4.14: 構成 B の実装結果：視野角。

までは仮定した俯角  $30 \sim 45^\circ$  を満たしていた。また Fig.4.14(a) で俯角の上限が全て  $50^\circ$  付近なのは、視線がフレネルレンズの下端から外れるためである。仮定を満たす像高 60mm における水平画角を図 4.14(b) で見ると  $\pm 13.5^\circ$  であり、数人同時の観察は難しい。複数人に対応するには像高を  $30 \sim 40$ mm にし水平画角  $\pm 20^\circ$  程度にする必要がある。

#### 4.4.8 考察

本章で述べた実装結果から、鏡 B を用いて実装した構成 B の光学設計は、構成 A の課題解決と共に、鏡の前で起こる事象をより多く実像に付与してリアリティを高めていると言える。しかし、提案したシステムでは実像の輝度が低いため、自然光や照明のある明るい環境下での使用は難しく、応用範囲を広げるために輝度の改善が必要である。

また提案したシステムは、2本の光線に対極の方向に出していることに相当する。2章で紹介した3次元ディスプレイと比較すると、少ない光線数を効率的に活用してリアリティのある映像提示を実現していると言える。しかし、図 4.13 で述べたように運動視差に対応できていない。したがって、運動視差に対応する手法の検討が必要である。

一方、課題として挙げられるのは、鏡と机上部の境界線である。構成 B で鏡 B を用いて実装した場合、鏡 B をまたいで立像を提示できるが、境界線はくっきりと浮かびあがる。これは焦点誘導を引き起こしやすく、立像の実在感を低下させてしまう。

### 4.5 アプリケーション

本節では、提案したシステムの性質を活かしたアプリケーションについて、実世界と鏡の中の世界の整合性を維持した場合と、整合性にとらわれない場合に分けて述べる。

#### 4.5.1 実世界と鏡の中の世界の整合性を維持した場合

従来のディスプレイで 3DCG モデルの全周囲を観察する場合、視点ごとに複数のウィンドウを立ち上げる、あるいは、1つのウィンドウに表示された 3DCG モデルを GUI で動的に動かして観察しなければならない。それに対して、整合性を維持した状態で 3DCG モデルの映像をシステムで提示するとユーザは 3DCG モデルの正面像と背面像を同時に観察できる。これは、言い換えると全周囲を一度に観察していることと

同意である。加えて、従来のディスプレイで2つのウィンドウで正面と背面の映像を見るのと違い、鏡の性質を活用しているため、正面像と背面像の直感的に理解しやすい。また、図4.10に示した自動車などのシミュレーションモデルは生産コストが大きいので、シミュレーションモデルはできるだけ実物に近い状態が期待される。その点でも提案したシステムは、実世界上で実在感の高い状態で3DCGモデルを提示できるため、実物に近い状態で提示が可能である。したがって、実世界と鏡の中の世界の整合性が維持された状態では、3DCGモデルを提示するためのビューアとしての有用性が高いと言える。

ビューアとして用いる際、提示対象となる3DCGモデルについては、表裏関係がはっきりしているものの方がより提案するシステムの効果が見込める。例えば、図4.15に示す動物の3DCGモデル(ブタ)や図4.16の化学構造式(ニトログリセリン)、図4.17の家などは、表裏関係が明確であり、ユーザが観察したとき、鏡の中に背面が映っているという感覚が強い。

また、図4.7、図4.8で示したように、実写映像を提示した場合も表裏関係の提示による実在感の高い映像提示ができる特長により、遠隔地とのコミュニケーションツールとしての利用も期待できる。

## 4.5.2 実世界と鏡の中の世界の整合性にとらわれない場合

4.5.1項までは、図4.18で示したサル3DCGモデルのように、立像の実在感を高めるという観点から、実世界と鏡の中の整合性に着目して述べた。一方で、提案するシステムは2つの世界に異なる映像を提示することもできる。それを示したのが図4.19である。

図4.19では、図4.18で鏡の中の世界に配置されたサルの背面像の位置にブタの正面像が提示されている。サルとブタは光学的には同じ位置に結像しているため、提示場所の整合性は取れている。したがって、ユーザは1つの空間に対し、対面する鏡を介して2つの映像情報を提示できる。

図4.20では、遠隔地とのコミュニケーションツールとしての利用を想定している。実世界上では自分のアバタ、鏡の中の世界では相手のアバタを提示し、そのアバタ同士が吹き出しを使いながらやりとりする。この吹き出しは、空中に提示することができるため、アバタなどのバーチャルオブジェクトのみならず、実オブジェクトの周辺にも提示することができる。同じ実オブジェクトに対し、実世界側の吹き出しが日本語、鏡の世界側が英語で情報提示を行うことも可能となる。

実オブジェクトと立像を組み合わせたAR環境においても、提案したシステムは有効である。図4.21では、倒れたピンの実オブジェクトに対し、実世界側では通常の赤い炎、鏡の世界側では青い炎を提示している。形状は同じだが2つの世界で異なる色という、現実では起こりえない現象を提案したシステムでは表現できる。

このように、2つの世界の整合性にとらわれないMR環境においても、結像系による情報提示の機能を拡張し、関連研究ではできない映像表現を実現できる。

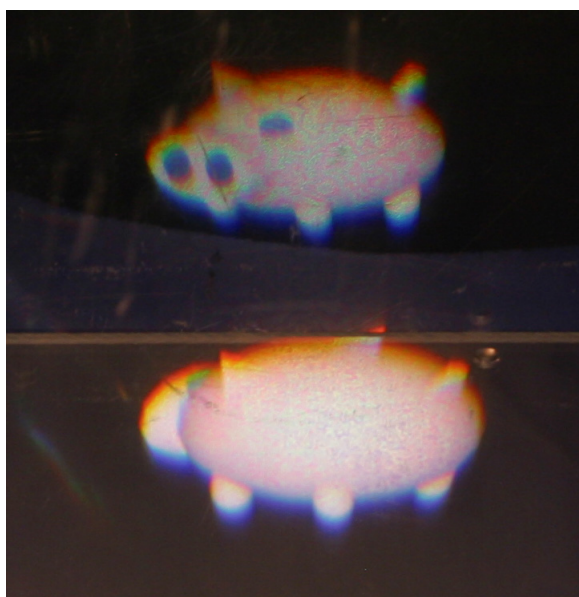


図 4.15: 動物の CG モデル(ブタ)の描画 .

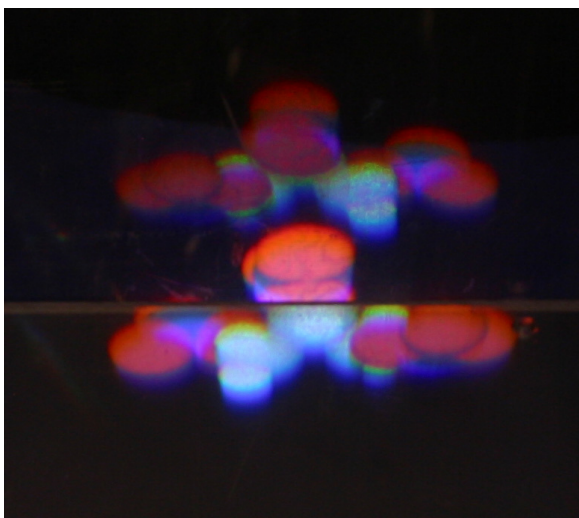


図 4.16: 化学構造式(ニトログリセリン)の描画 .

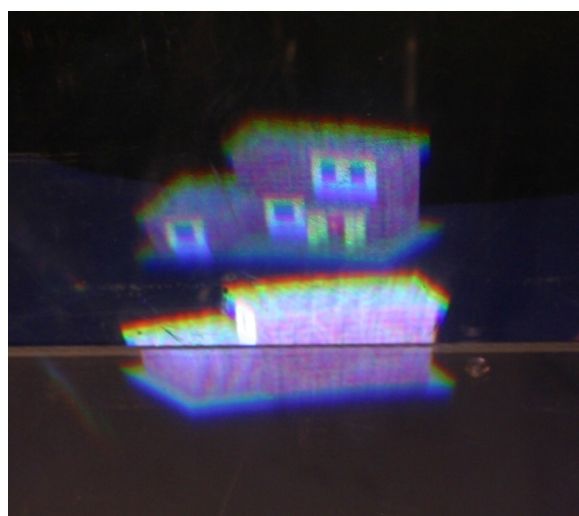


図 4.17: CG モデルハウスの描画 .



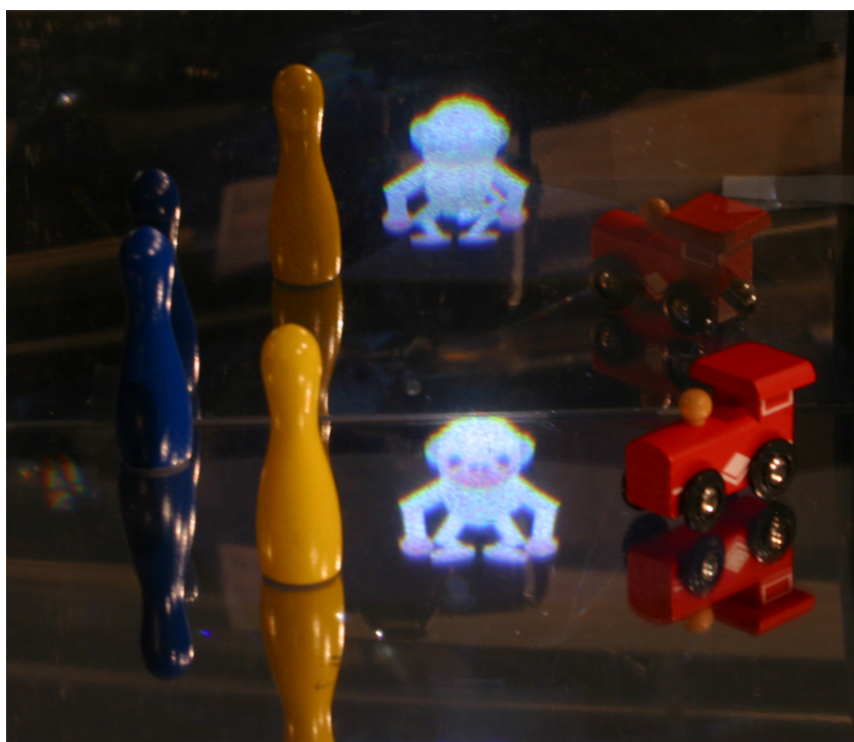


図 4.18: 実世界と鏡の中の世界の整合性を維持した MR 環境 .



図 4.19: 実世界と鏡の中の世界の整合性にとられない MR 環境 .

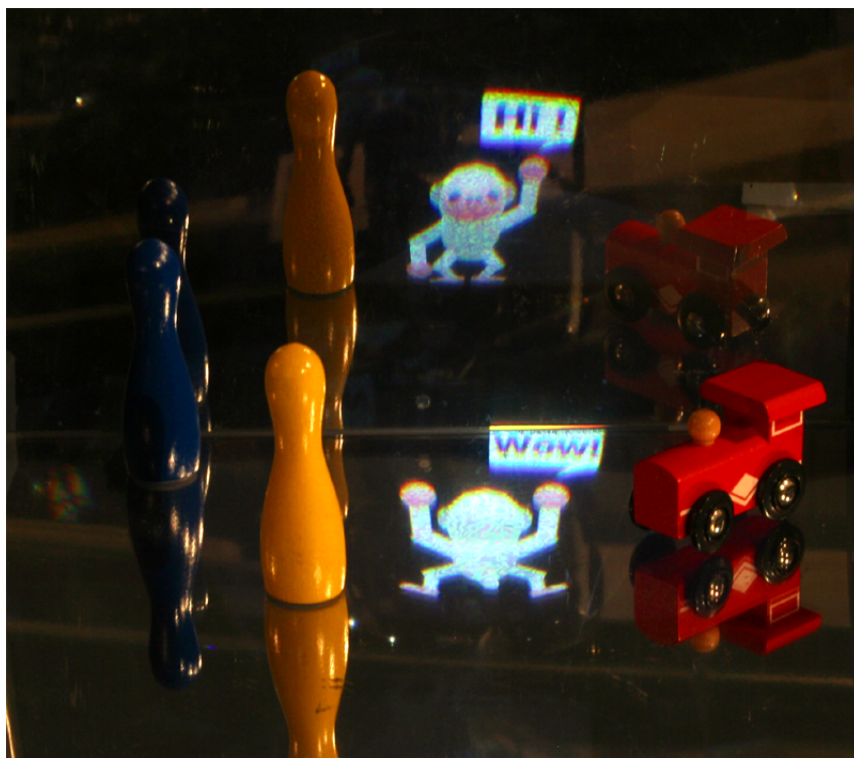


図 4.20: 2 つの世界の CG モデル (サル) 同士の会話 .

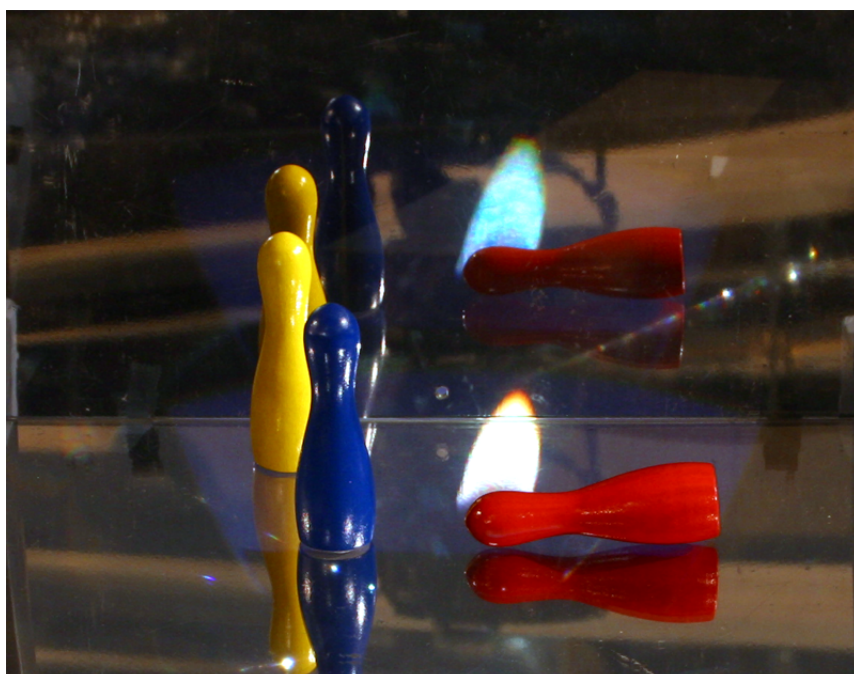


図 4.21: 実オブジェクトに対して 2 つの世界で異なるエフェクトを付加 .

## 4.6 本章のまとめ

本章では、鏡のあるデスクトップ環境を活用して実在感の高いMR環境を実現するディスプレイを提案し、

- デスクトップ環境で直立した映像を提示可能
- 実世界上で直立した映像と実オブジェクトが混在するMR環境を実現可能
- 実世界と鏡の世界に同時にMR環境を実現可能
- 実世界と鏡の世界に提示した2つの実像を指標とすることで、実世界に提示した実像の位置情報を補間、認知的に観察しやすい

という特長を持ったハードウェアの設計・実装に関して述べた。本章で提案したディスプレイは、鏡の性質を活用してバーチャルオブジェクトの正面と背面を同時に観察できるため、3DCGモデルのビューアなどの用途に有効である。また、整合性にとらわれない映像提示によって、実オブジェクトに対しての新しい映像演出を可能にする。

一方で、提案したシステムは光学設計上、実像の提示領域の下にカメラを配置することが難しい、そのため、インタラクションを想定した場合、カメラによる物体認識を行うにはシステム外部にカメラを配置しなければならない。

次章では、立像の位置情報を補間しかつ筐体内にカメラを内蔵できる、インタラクティブ性の付与が容易なディスプレイシステムの提案および実装について述べる。



## 第5章

---

# 2つの実像の直交関係を活用した 立像の位置情報補間

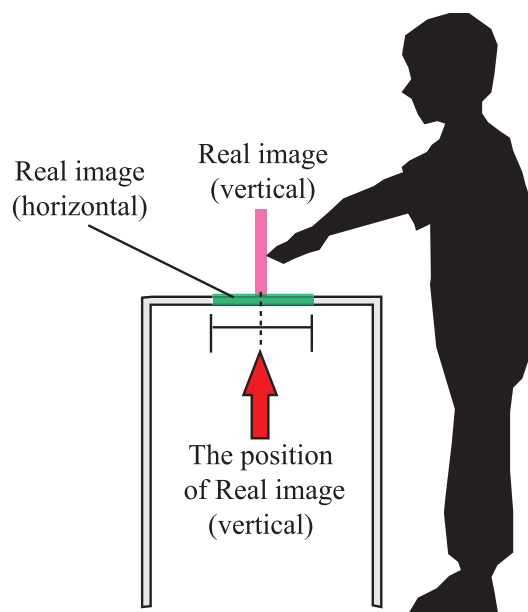


図 5.1: 提案手法のコンセプト：立像の足元に水平面を提示する．

## 5.1 はじめに

本章では、4章と異なるアプローチで立像の位置情報を補間するために、2つの実像が直交関係になるように2つの結像系を組み合わせたディスプレイシステムを提案する．はじめに、システムの概要について述べ、システムの構成および実装を述べる．また、提案するシステムにカメラ認識を付与し、インタラクティブ性を付与したアプリケーションについて述べる．

## 5.2 システムの概要

実世界では、実オブジェクトの多くは地面 (水平面) の上に直立して存在している．この状態を立像に付与することで、実像の存在感を高めることを考える．

本章で提案するディスプレイシステムは、図 5.1 に示すように立像と直交関係にある水平像を立像の足元に提示する．水平像が地面の役割をすることにより、立像が地面に立っているという立体感を高める．加えて、水平像はデスクトップ面上に提示するため、ユーザに対して奥行き情報を提示できる．したがって、水平像の存在でデスクトップ上における立像の位置が明確になり、実像の実感が向上する．

ここで、立像と直交する面で奥行き情報を提示するために、水平像を使う理由を述べる．3章で提案した光学設計による結像系を図 5.2 に示す．結像系による立像を正しくデスクトップ上に提示するためには、デスクトップ面の素材は、光を通す透過性のある素材でなければならない．現在市販されている平置き型のディスプレイ類は、物理的なデバイスなので透過性がない．次に、プロジェクタと対で用いられる透明・半透明のスクリーンがある．しかしこれは透明性を持つが光の透過性は低い．このことは、スクリーン面でプロジェクタ映像が結像することから自明である．したがって、既存のディスプレイやプロジェクタスクリーンでは提案するシステムで水平面に提示することができない．また DENSO 社が開発した透明無機 EL ディスプレイ [68] は、要件を満たすディスプレイであるが、単色でかつディスプレイ自体が小さく、市

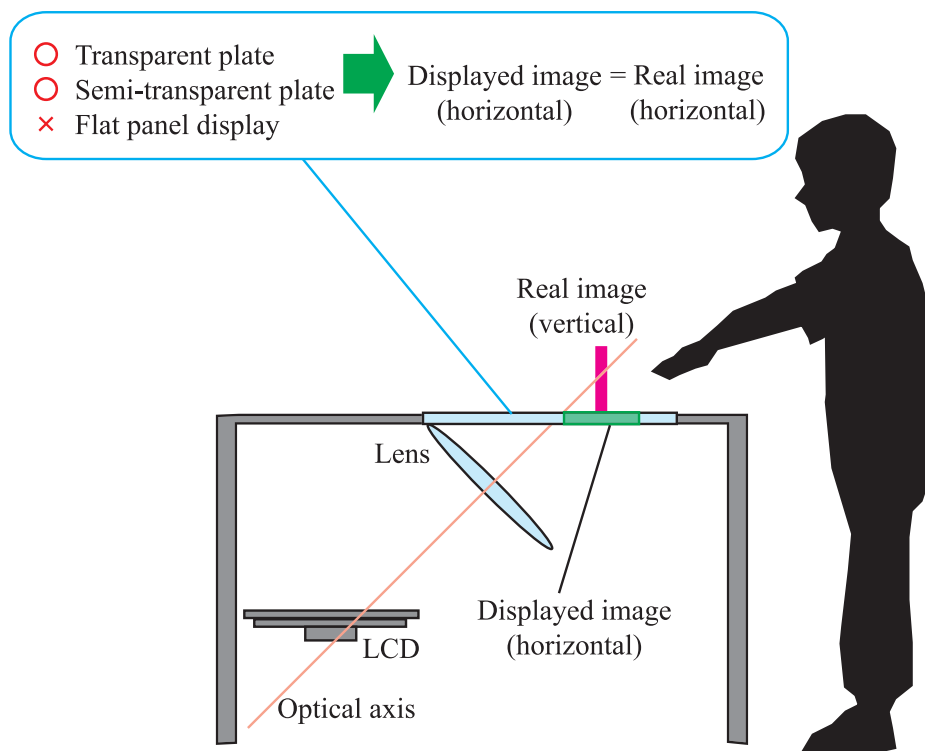


図 5.2: 水平像を用いる理由：机上部が透過性を持つ素材でなければならない。

場にも出回っていないため、このディスプレイの利用は現実的ではない。それに対して、水平像はアクリル板やハーフミラーなど透過性のある素材をデスクトップ面に用いることができる。また、水平像を結像するための光学設計も3章で提案した設計手法により設計可能である。故に、立像と同時に水平面への映像提示を実現するために、水平像を用いる。

また、立像の位置情報を補間するための水平像は、実オブジェクトと立像によるMR環境を実現する際にも有効である。水平像の提示領域に実オブジェクトが配置されたとき、水平像が指標となり実オブジェクトと立像の位置情報が明確になる。そのため、提案したシステムにインタラクティブ性を付与した際、ユーザは実オブジェクトを介して立像と直感的なインタラクションができる。

### 5.3 システムの構成

提案するシステムの構成を図5.3に示す。本章では、水平面に対してフレネルレンズを45度傾けて設置した光学設計を基に話を進める。はじめに、

図5.3の垂直に配置したLCD1（‘L’を表示）とフレネルレンズによる結像系によって水平に結像する実像（水平像）が作られる。これは3章で提案した水平像を結像するための光学設計である。次に、提案した光学設計を活用し、水平な実像‘L’に加えて、垂直な実像‘P’も同一の結像系によって作り出すことを考える。この状態を作り出すための光学設計の平面図を図5.4に示す。

図5.4において、45度に傾けたハーフミラー上の点をA、LCD1の提示面上の点をB、LCD2の提示面の下端上の点をCとする。2台のLCDはAB間とAC間の距離が等しくなるように配置する。このときBACは90度とする。この状態でハーフミラーを通してLCD1を観察すると、LCD1の提示画像‘L’の面に直交する形で、画像‘P’（LCD2の提示画像が左右反転したもの）が手前に、さらにLCD2の反射材における

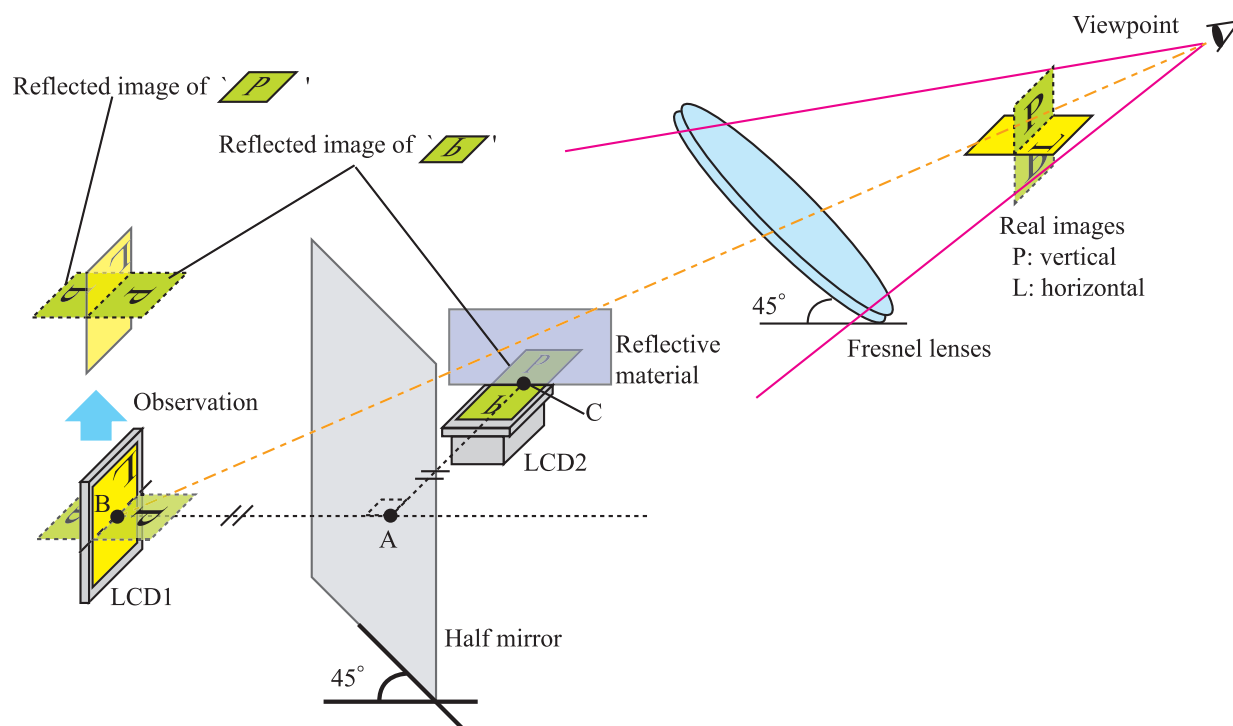


図 5.3: システムの構成 .

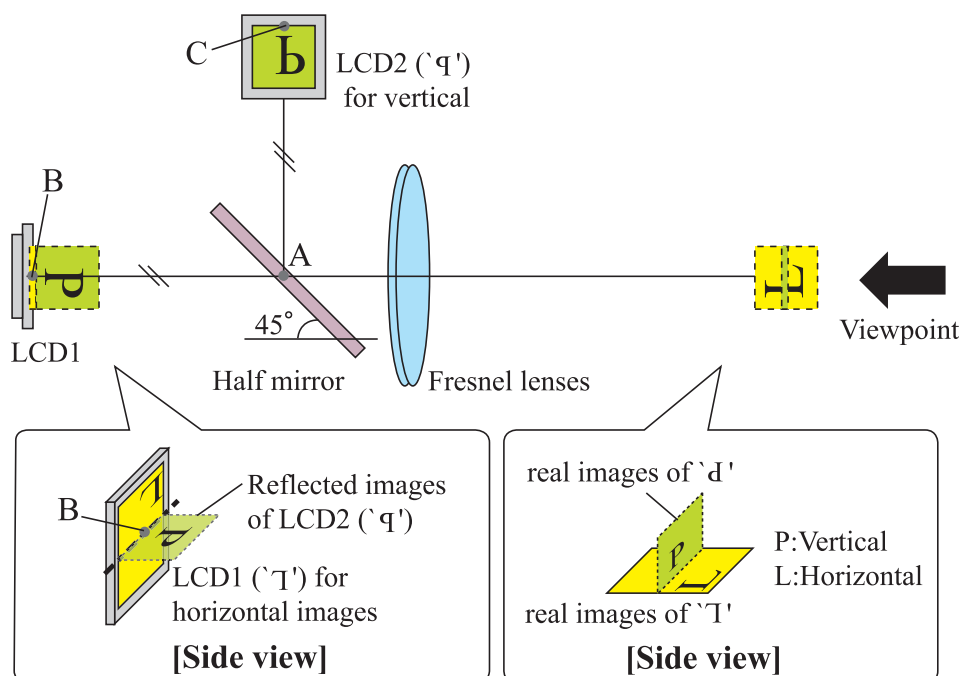


図 5.4: 直交した2つの実像を作り出すための結像系 (平面図) .

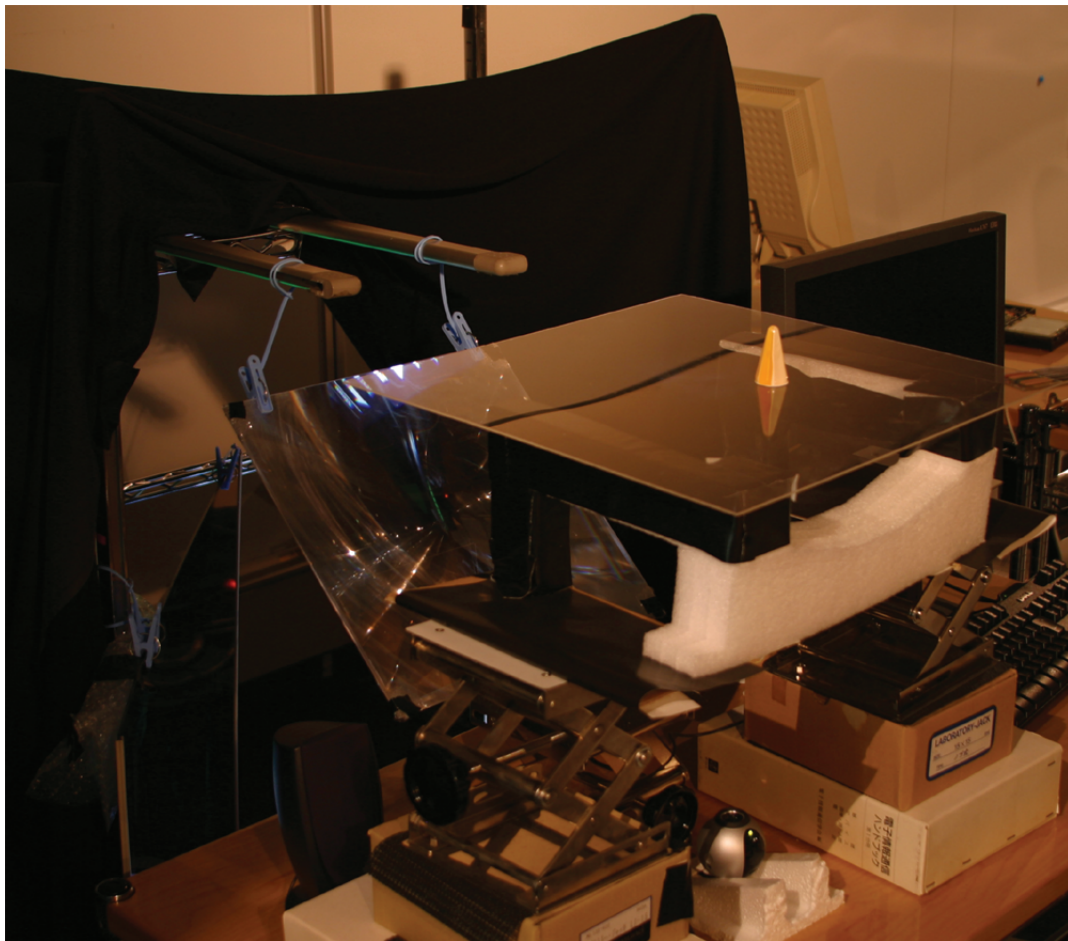


図 5.5: システムの概観 .

鏡像が奥に映し出される．このとき，AB 間と AC 間の距離が等しいため，実像 ‘P’ の下端は ‘L’ の面に一致する．また LCD2 には，図 5.3 のように反射材を設置して，直立提示される LCD2 の映像が水平面に映り込む様子まで光学的に提供できるようにした．

図 5.3 により，立像と水平像のための 2 つの結像系を構成する．LCD1 の結像系は水平面 ‘L’ を，LCD2 の結像系は垂直な ‘P’ を実像として提示する．2 枚の平面に過ぎないが，水平と垂直という 3 次元構造を有する映像の実像が空中に結像することになる．

## 5.4 実装

5.3 章で示した構成の実装について述べる．実装は，3 章で述べたシミュレータを基に設計を行った．シミュレーションに用いた設定パラメータは表 5.1 であり，実装に用いる素材を基にした．実装したシステムの概観を図 5.5 に示す．

次項から実装結果について述べる．



図 5.6: 実装結果 1：立像は木のモデル，水平像は木の影を持つ平野．

表 5.1: 実装時の設定パラメータ．

変数	値
レンズの焦点距離	305(mm)
LCD のサイズ (全長)	300(mm)
フレネルレンズと水平面のなす角	45 度 (degree)
ユーザの視点と実像の距離	800(mm)
レンズの大きさ (半径)	150mm

#### 5.4.1 立像と水平像のみ提示した場合

実装結果を図 5.6 に示す．図 5.3 の立像 ‘P’ には 1 本の木のモデル，水平像 ‘L’ には，木のモデルの影が映った緑の平野モデルを提示した．以降，前者を木，後者を平野と呼ぶ．そして MR 環境への応用を想定し，実像 ‘L’ の位置に透明なアクリル板を設置し，その上に実オブジェクトを置いた．これにより実オブジェクトとバーチャルオブジェクトである実像が混在した MR 環境を構築したことになる．実オブジェクトは，平野の四隅に白い碁石を 4 つ置いた．ユーザ 2 つの実像を観察すると，木と平野は提示している空間が異なるため，奥行き之差が生じる．この差によってユーザは木に立体感を感じる．そして平野が水平面に広がることで，木の位置が明確になり視認性が高まる．さらに，木の映像がうっすらと水平面に映り込む様子も実現しているため，実在感を高めている．

それに加え，直立している木の影を水平面に提示できるため，実物の木と同じような実在感を木に付与できる．これにより認知的な立体感をより高めている．



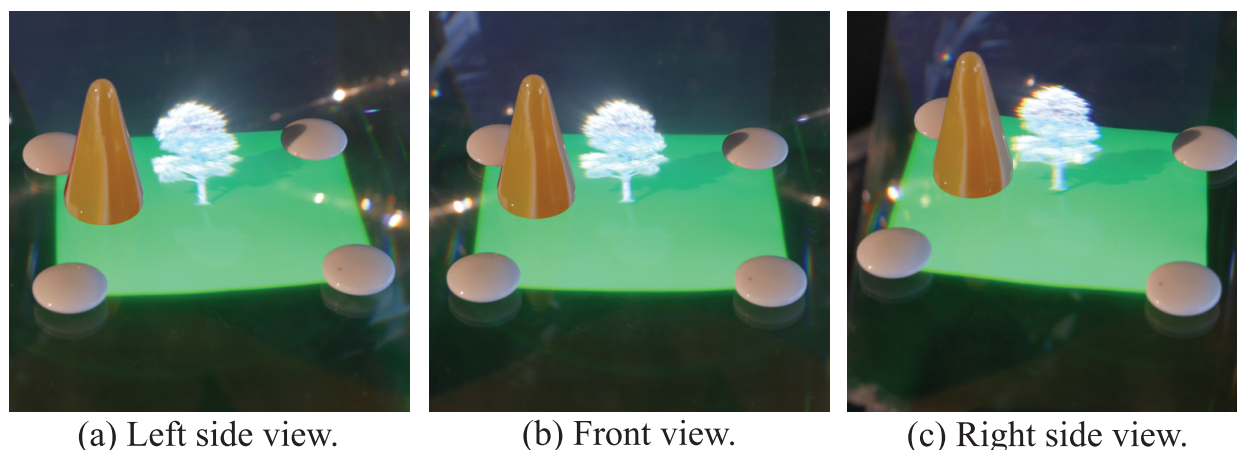


図 5.7: 実装結果 2：観察位置を左右に移動したときの様子．

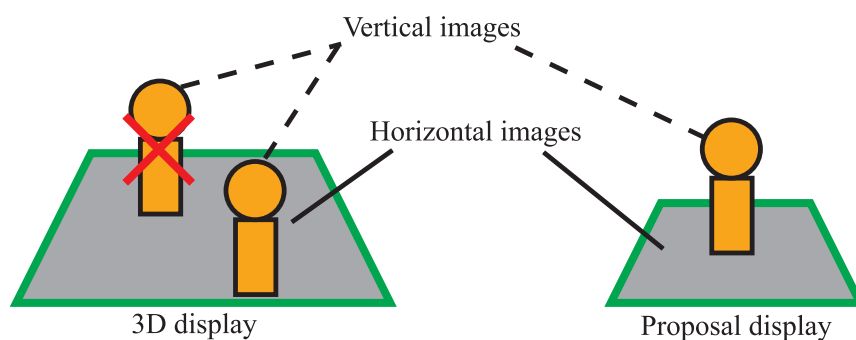


図 5.8: 提案手法の特徴．

### 5.4.2 観察位置を左右に移動したときの様子

次に、5.4.1 項の状態に加えて、平野上にオレンジ色の円錐の実オブジェクト（以降、円錐と略記）を配置し、観察位置を左右に移動した場合の様子を図 5.7 に示す．図 5.7 は、(a) 左側、(b) 正面、(c) 右側と視点位置を変えて観察した様子である．

実オブジェクト（円錐、白い碁石）と木の見え方が変化する様子に注目されたい．木は、視点移動に対して平面に配置された白い碁石との距離関係が変化する．これは直立した円錐と同様の変化であり、木が直立して見えていることを表している．一方、平野は、視点を変えても四隅に置かれた白い碁石に張り付いたままである．これは、平野が水平面に結像されていることを意味している．観察位置を移動したとき、実オブジェクトの存在が、直立したバーチャルオブジェクトが実オブジェクトと同様の変化を示すことを直感的にわかりやすくしている．このように、実オブジェクトと実像が混在した MR 環境では、実像のリアリティが増し、正しい立体感を与えるのに有効であると考えられる．

### 5.4.3 考察

提案したシステムは、MR 環境を実現することにより、水平面の上に実在感の高い立像を提示することができる．一方、図 5.8 に示すように、レンチキュラやインテグラルフォトグラフィなどの平置き型 3 次元ディスプレイでも、ディスプレイ面に平野を表示して、そこに木を立体的に表示することは可能である．



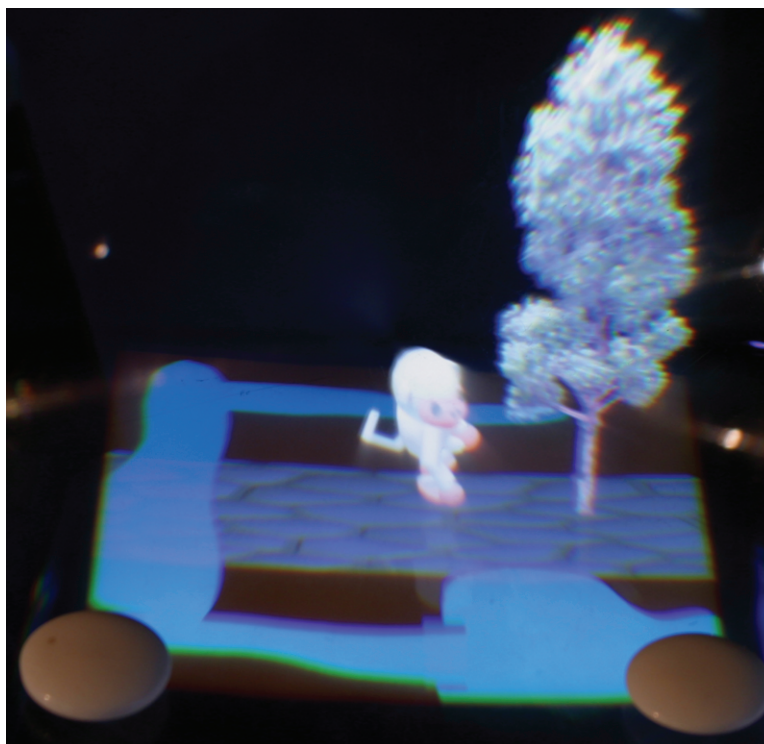


図 5.9: ストーリーテリングシステム .

しかし、3次元ディスプレイは原理上、ディスプレイ面の領域を越えて、立体的な映像を提示することができない。それに対して提案したシステムでは、立像と水平像を提示するための結像系が独立しているため、水平像の領域を越えて立像を提示できる。そして映像の飛び出し量（木の高さ）という観点でも、提案したシステムの方が有利であると考えられる。3次元ディスプレイの多くがシステムが複雑な構造で製造コストも高いのに対し、提案したシステムは、LCD とレンズを基本としたシンプルな構造でコストが低い点も特長である。

しかし提案したシステムでは、実オブジェクトと同様の運動視差に対応した位置関係の変化はあるが、3次元ディスプレイのように、視線方向ごとに映像の内容を変えることはできない。

## 5.5 アプリケーション

本節では、提案したシステムの特長を活かした4つのアプリケーションを紹介する。なお、図 5.3 の立像‘P’には1本の木のモデル、3色（白色、黄色、紫色）のサル、人の実写映像、炎のモデルを、水平像‘L’には、1本の道が敷かれと川に囲まれた茶色の荒地モデル、丸太が置かれた石畳モデル、1本の道が敷かれた緑色の平野モデルを用いた。この立像と水平像の映像の組み合わせでアプリケーションを実装した。また、実像‘L’の位置に透明なアクリル板を設置し、その上に実オブジェクトを置いた。これにより実オブジェクトとバーチャルオブジェクトである実像が混在したMR環境を構築している。

なお、本節のアプリケーションは、実オブジェクトとのインタラクションの実装は行っていない。

### 5.5.1 ストーリーテリングシステム

提案したシステムでは、水平像は奥行き情報、立像は高さ情報をユーザに提示できる。そこで、図 5.9 に示すように水平像には地理情報を提示し、立像には動物や草木などのCGモデルを提示することで、飛

び出す絵本のようなストーリーテリングシステムを実装した。水平像には、1本の道が敷かれ川に囲まれた茶色の荒地モデル、立像には、白いサルと1本の木を提示した。また、水平像がアクリル板上に提示されることを明示するため、水平像の手前側の2つの隅に実オブジェクト(白い碁石)を配置した。

時系列のアニメーションを開始すると、水平像と立像の様子が刻々と変化していき、ユーザの目の前で木の下にいるサルの物語が展開する。

また、水平像に提示した映像を横スクロールあるいは縦スクロールさせることで、より躍動感のある物語を作り出すことが可能である。

### 5.5.2 丸太跳びゲーム

次に立像の飛び出し感を活かしたアプリケーションとして、2匹のサルが丸太を跳ぶゲームを述べる。これは、中央の木の周りを丸太が回転し、それを2匹のサルが跳んで避けるというゲームである。このアプリケーションの様子を図5.10および図5.11に示す。水平像には丸太が置かれた石畳モデル、立像には黄色と紫色の2匹のサルモデル、そして1本の木モデルを用いた。図5.10は2匹のサルが着地状態にある様子である。図5.10では、サルの高さを示すため2匹のサルと木と一直線上に並ぶように2つの実オブジェクト(オレンジ色の円錐)を配置した。この図から、黄色のサルは円錐と同じ程度、そして木は円錐の2倍程度の高さ飛び出していることがわかる。次に図5.11は紫色のサルがジャンプしている様子である。図5.11は、水平像がアクリル板と同じ平面上に提示されていることを示すため、水平像の手間の2つの隅に実オブジェクト(白い碁石)を置いてある。

2つの図を見ると、紫色のサルが木の頂上まで飛び跳ねていることがわかる。平置き型の3次元ディスプレイでは提案したシステムほどの飛び出し感を表現することは難しい。したがって、提案したシステムの特長が活かされたシステムと言える。また、サルがジャンプするということは、ユーザの視点に近い場所に立像が結像するので、より立体感を感じることができる。

### 5.5.3 遠隔地とのコミュニケーションツール

4章で提案した鏡を用いたシステム同様、本章で提案したシステムでも遠隔地とのアプリケーションツールを実装した。立像には、人の実写映像、水平像には、1本の道が敷かれた緑色の平野モデル、実オブジェクトには、平野モデルの四隅に白い碁石を配置した。実装した様子を図5.12に示す。平野モデルで地面を明示することにより、実オブジェクトと同じように人の実写映像が水平面に直立している感覚をユーザに与えることができる。

本章のシステムでは、平野モデルによって位置情報の補間をするため、鏡のある環境に依存せずに実写映像の視認性を高めることができる。

### 5.5.4 水平像の上に置かれた実オブジェクトへのエフェクト付与

4章で実装した、実オブジェクトにエフェクトを付加するアプリケーションを実装した。立像には、赤い炎モデル、水平像には、1本の道が敷かれた緑色の平野モデル、実オブジェクトには、オレンジ色の円錐を配置した。目指したエフェクト効果は、平野モデルの上に配置した円錐の頂点からバーチャルな赤い炎が点火するという、現実では起こりえない状況の構築である。実装した様子を図5.13に示す。図5.13の(a)は左側から、(b)は正面から、(c)は右側から観察した様子である。視点を変えてもバーチャルな赤い炎は円錐の頂点から点火しているように見える。これは、炎モデルがアクリル板の平面上に提示された映像ではないことを意味する。

提案システムで実オブジェクトにエフェクトを付加する際、実オブジェクトと平面の立像の位置を整合することが重要である。2つを整合させる際に、水平像による地面で位置情報が補間されるので、位置合



図 5.10: 立像の高さを活かした丸太跳びゲーム：着地状態．

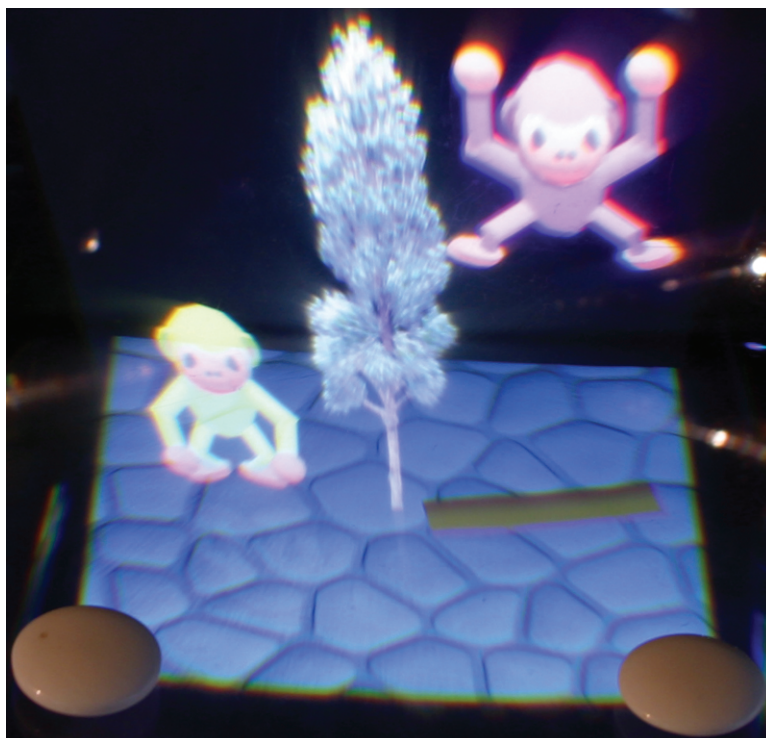


図 5.11: 立像の高さを活かした丸太跳びゲーム：跳躍状態．

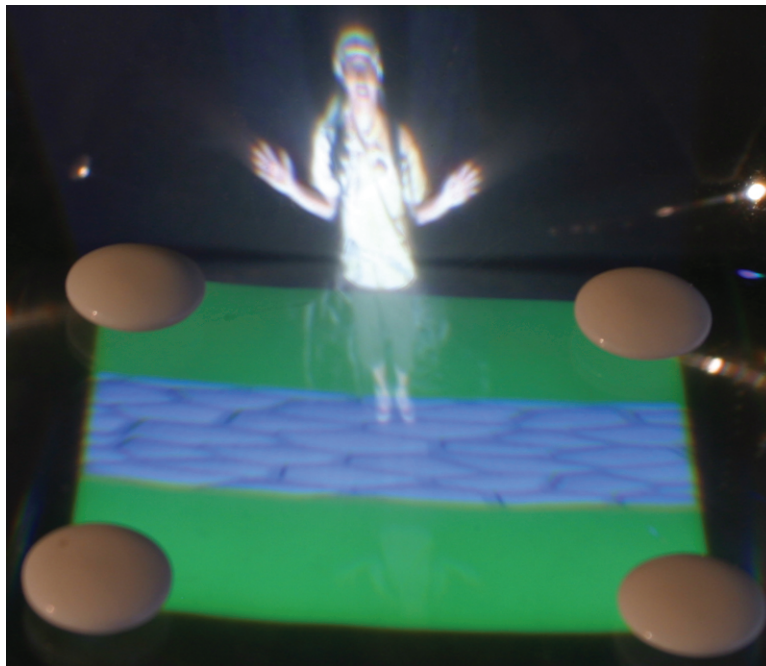
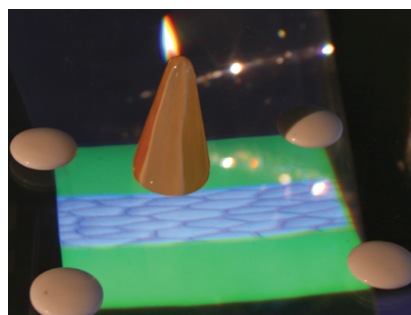
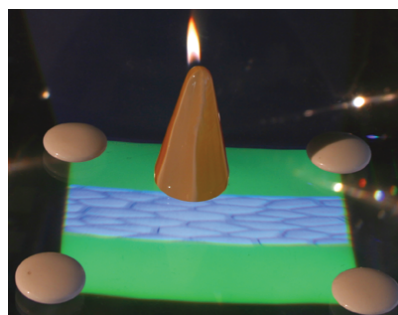


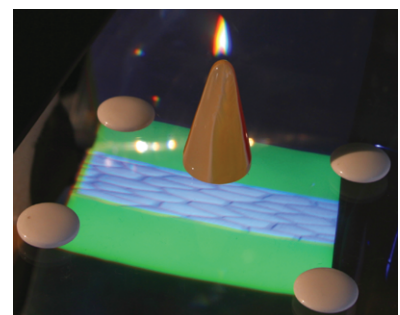
図 5.12: 遠隔地とのコミュニケーションツール .



(a) Left side view.



(b) Front view.



(c) Right side view.

図 5.13: 水平像の上に置かれた実オブジェクトへのエフェクト付加 .

わせが容易になる .

この実オブジェクトへのエフェクト付加は , 実オブジェクトとのインタラクションができる MR 環境では , ユーザに映像との直感的なインタラクションを提供する際に有効である . インタラクティブなアプリケーションについては , 次節で述べる .



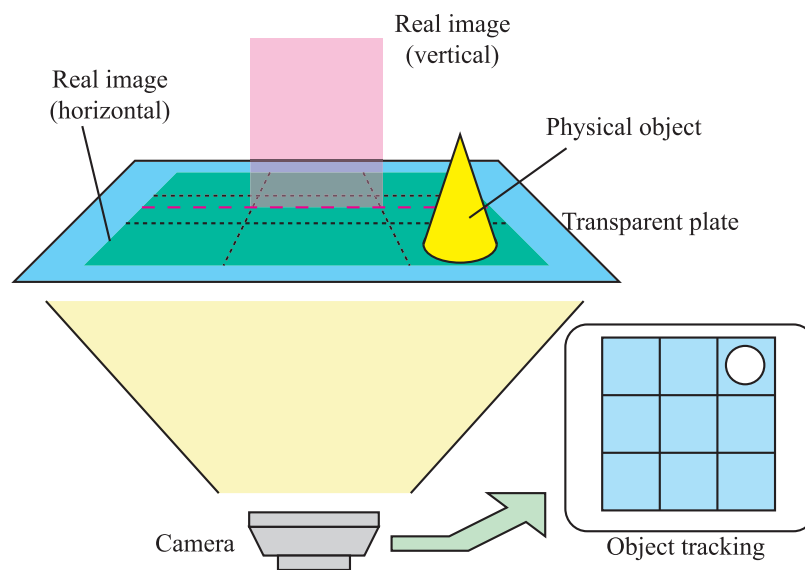


図 5.14: カメラによる実オブジェクト認識。

## 5.6 インタラクティブなシステムへの拡張

図 5.3 で示したシステムの構成では、立像と水平像の提示する領域の下には空間がある。そこで図 5.14 に示すように、下部にカメラを配置して実オブジェクトの認識を行うことにより、インタラクティブなシステムへの拡張を行った。

はじめにカメラによる物体認識方法について述べ、その後 2 つのアプリケーションについて述べる。

### 5.6.1 カメラによる実オブジェクトの認識

カメラを導入したシステムを図 5.14 に示す。透明板はアクリル板、実オブジェクトはオレンジ色の円錐を用いた。円錐の底には、認識精度を上げるため白い円形のシールを貼ってある。実装で用いたカメラは Logicool の QV-4000R である。実オブジェクトを認識するためのアルゴリズムを図 5.15 に示す。手順は次の通りである。

- (1) 事前に、グレースケールに変換した背景画像およびテンプレート画像として実オブジェクトに貼られた白い円の画像を取得しておく
- (2) カメラから画像を取得しグレースケールに変換
- (3) 背景画像と取得画像の背景差分をとる。この処理で得た画像を背景差分画像とする
- (4) 背景差分画像とテンプレート画像をテンプレートマッチングする
- (5) マッチングした矩形領域から中心座標を取得する

カメラ認識の実装には OpenCV ライブラリを用いた。図 5.15 では、認識した矩形領域を赤枠で囲っている。図から実オブジェクトの底に貼られた白い円の部分を正しく認識できていることが確認できる。

また本節では、実オブジェクトと立像のインタラクションをわかりやすくするため、水平像の領域を 9 分割して考える。そのため、実装の際はオブジェクト認識によって得られた座標が 9 つの領域のどの領域なのかを判定する処理を加える。インタラクションの際は、実オブジェクトが別の領域に遷移したときに、

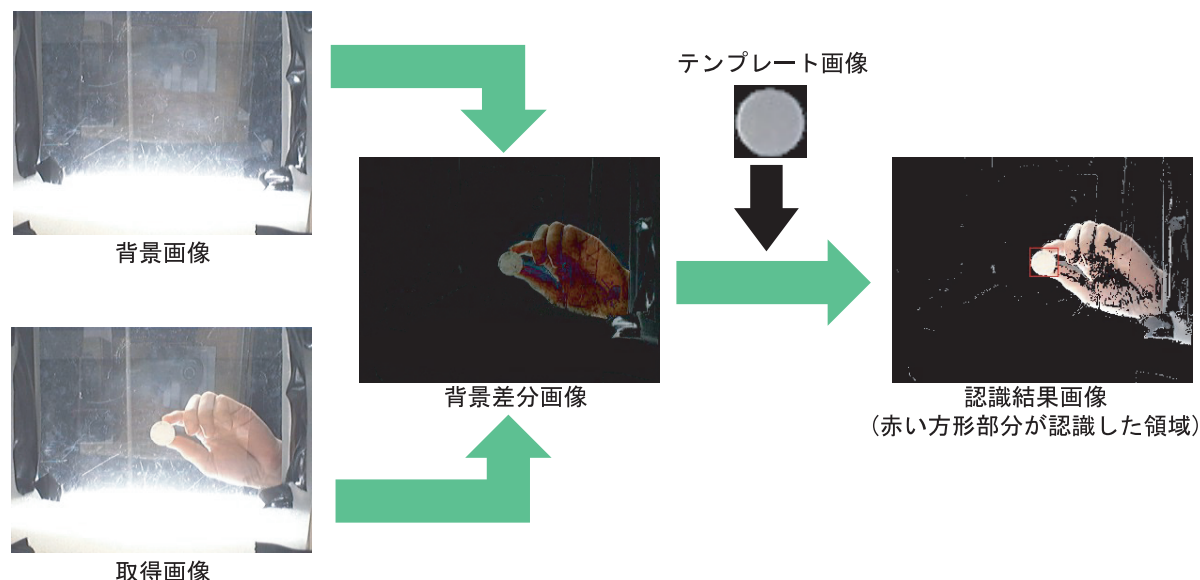


図 5.15: 実オブジェクトの認識結果 .

それを明示するためのアクションを立像に与える .

オブジェクト認識に背景差分を用いたため、この認識は照明環境の変化に弱い性質を持つ . そのため、ユーザが利用する際に背景画像を更新してからインタラクションを行う必要がある . また、実装したオブジェクト認識は1つの実オブジェクトのみを認識する仕様とし、複数の実オブジェクトが置かれる状況を想定しないものとする .

### 5.6.2 アプリケーション1：個人閲覧用ビューア

インタラクティブなアプリケーションとして、システムの正面にいるユーザだけが映像情報を閲覧でき、他のユーザからは映像情報が不可視である個人閲覧用ビューアについて述べる .

#### 仕様

実オブジェクトにはオレンジ色の円錐を用い、水平像に緑色の平野モデルを用いた . また水平像は実オブジェクトが置かれたときは、その位置情報をユーザに明示するため、実オブジェクトの中心座標で直交する2本の線を描画するようにした . 立像は、水平像の9分割した領域のうち、左側の3つの領域は風景画像、右側の3つの領域はテキストが含まれる画像、中央の3つの領域は、メニュー画面を意味する1枚の画像にそれぞれ対応している . また、ユーザと立像とのインタラクションの実感を高めるため、実オブジェクトが別の領域へ遷移した際、効果音を出している .

#### 実装結果

次に、実オブジェクトとのインタラクションの様子を述べる . 実オブジェクトの配置ごとの提示の様子を図 5.16 から図 5.22 に示す . 図 5.16 は、実オブジェクトが水平像の領域の外に置かれたときの様子である . 水平像の中央にメニュー画面を提示される . なお、メニュー画面は水平領域の外ならどこでも同じ出力となる . そしてメニュー画面は実オブジェクトを中央の3つの領域のいずれに配置しても同様の出力を行う . 図 5.17、図 5.18、図 5.19 は、左側の領域に実オブジェクトを配置したときの様子である . 領域ごとに街並

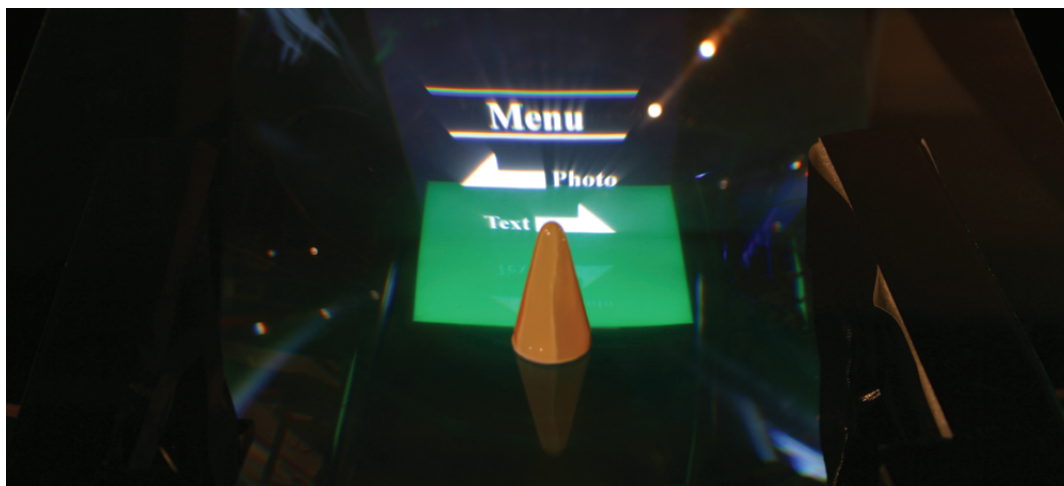


図 5.16: 個人閲覧用ビューア：実オブジェクトを水平面の領域外に配置．

みの風景，山林の風景，鎌倉の大仏の風景をそれぞれ閲覧することができる．一方，図 5.20，図 5.20，図 5.22 は，右側の領域に実オブジェクトを配置したときの様子である．領域ごとに，テキスト，グラフ，天気予報図を閲覧できる．図 5.16 から図 5.22 の様子から，ユーザが配置した実オブジェクトの位置に応じた映像情報提示を実現したと言える．

また，図 5.17 から図 5.19，図 5.20 から図 5.22 をそれぞれ連続して見ると，実オブジェクトが立像より後ろの位置から同一線上，そして立像より手前に配置されていくのがわかる．これは，実オブジェクトの存在が立像の位置把握を手助けしていることを意味する．提案したシステムにインタラクティブ性を付与することで，立像の実在感が高い MR 環境を実現することができる．

ここで，個人閲覧用ビューアが正面にいるユーザ A には映像情報が可視で，横にいるユーザ B には不可視であることを示す．図 5.23 および図 5.24 は，実オブジェクトを水平像の右手前に配置したとき，正面のユーザ A からシステムを見た様子とその横にいるユーザ B がシステムを見た様子である．図 5.23 中の正面にいるユーザ A は水平なアクリル板の上に緑色の矩形領域が映り，その平面上に天気予報図の映像が直立して見える．それに対し，図 5.23 中のユーザ A の横にいるユーザ B には，ユーザ A がアクリル板の上の円錐を持っている様子だけで，映像情報が全く見えない．したがって，実装した個人閲覧用ビューアは目的とした機能を備えていると言える．

近年，インターネットカフェなどでの Web 情報閲覧の際，個人情報保護の観点から自分が閲覧した情報を他の人には覗かれたくない．このようなニーズに対して，本項で実装したアプリケーションは有効であると言える．



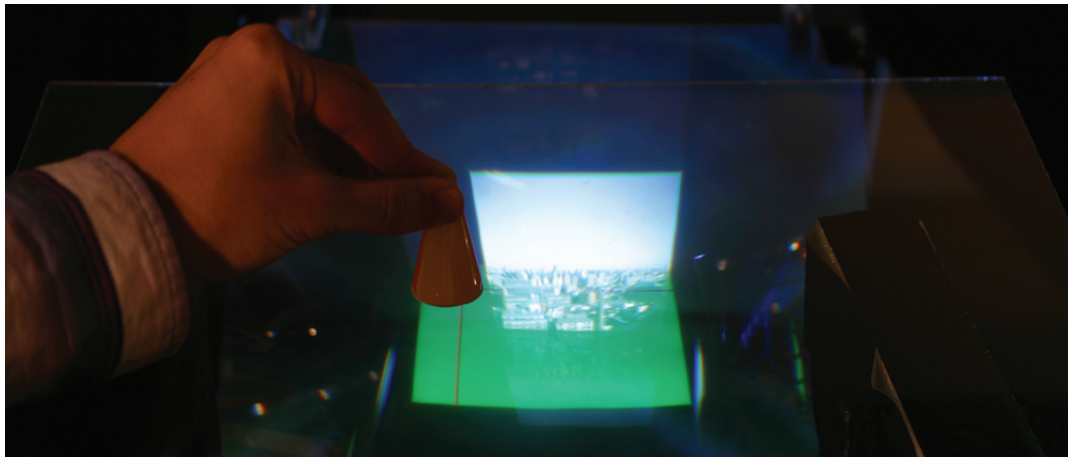


図 5.17: 個人閲覧用ビューア：実オブジェクトを左奥に配置．

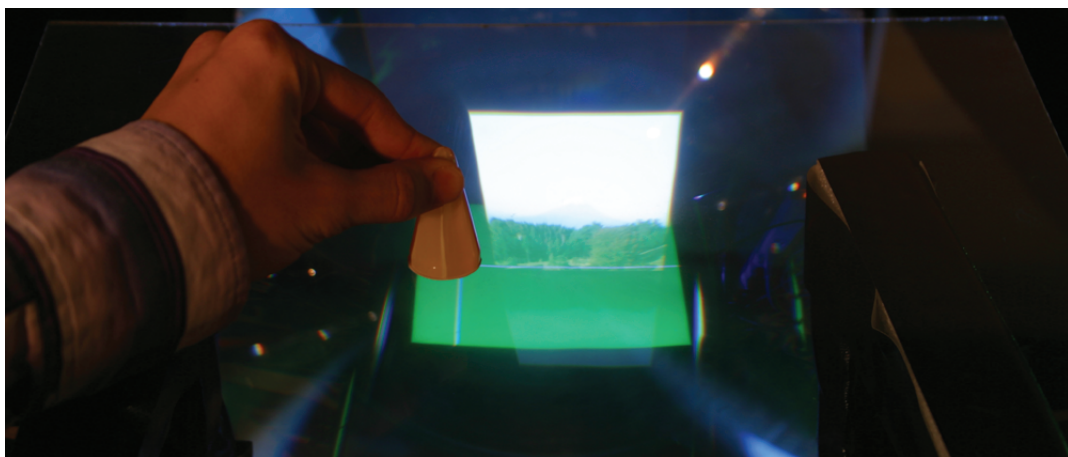


図 5.18: 個人閲覧用ビューア：実オブジェクトを左中央に配置．



図 5.19: 個人閲覧用ビューア：実オブジェクトを左手前に配置．



図 5.20: 個人閲覧用ビューア : 実オブジェクトを右手前に配置 .

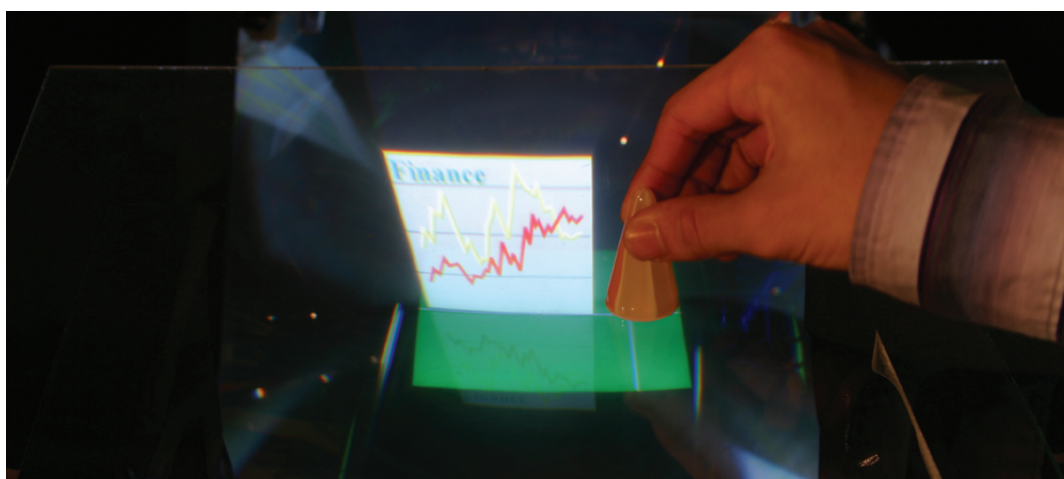


図 5.21: 個人閲覧用ビューア : 実オブジェクトを右中央に配置 .



図 5.22: 個人閲覧用ビューア : 実オブジェクトを右奥に配置 .



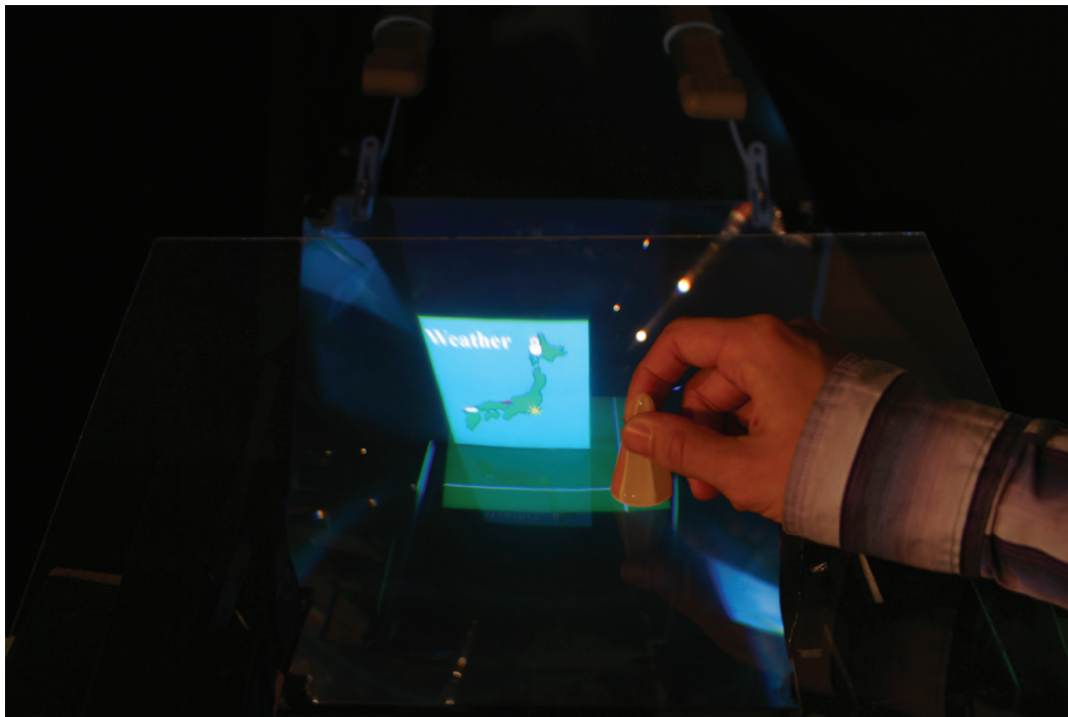


図 5.23: システムの正面にいるユーザ A が観察した様子 .



図 5.24: ユーザ A の隣にいるユーザ B がシステムを観察した様子 .

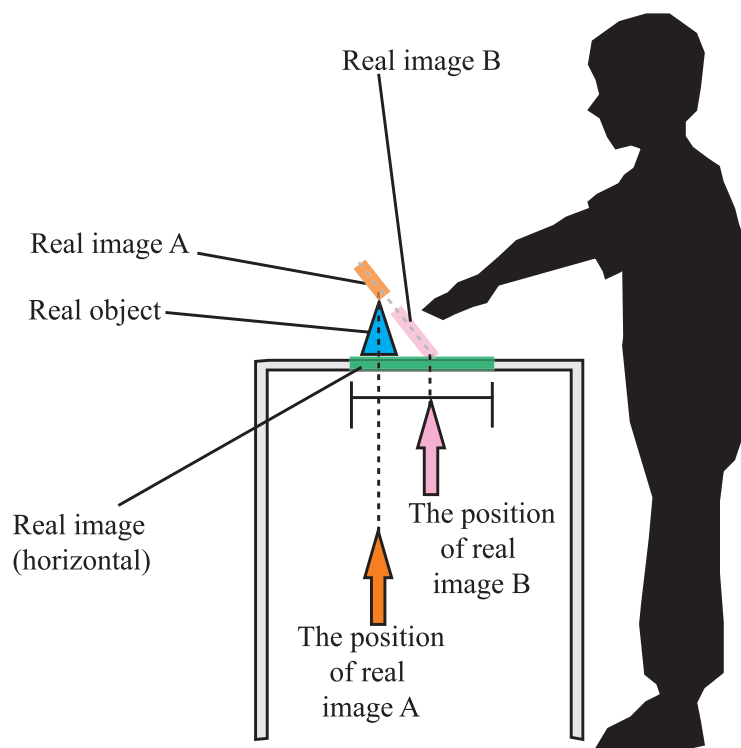


図 5.25: 中央と奥の列に同時に実像を提示する構成。

### 5.6.3 アプリケーション 2：サルと実オブジェクトのインタラクション

#### 概要

本章で提案したシステムは、2 つの実像の直交関係を活用して立像の位置情報を補間し、実在感の高い MR 環境を実現している。しかし、立像が水平像から離れ、ある程度高い位置で提示された場合、それは空中に提示されていることになり、水平像との関係性が希薄になり効果も低下する。そこで本項では、実像を直立にせず、図 5.25 のように傾斜をつけて実像を提示する。これにより、水平像の上に提示されている実像 B は、立像のときに近い位置情報の補間を得る。一方、水平像から離れた実像 A は、水平像の上に置かれた実オブジェクトによる焦点誘導の効果によって、位置情報の補間が行われる。また、実像が傾斜を持つ分、奥行き異なる領域に映像を提示できる。したがって、図 5.25 の構成を実装することで、図 5.26 に示すように、中央の領域と実オブジェクトが置かれた奥の領域へ同時に実像を提示できる。

#### 仕様

本項では、図 5.26 を実装するに当たり、実像 A に炎モデル、実像 B に白色のサルモデル、水平像に緑色の平野モデルを用いた。以降、それぞれを炎、サル、平野と呼ぶ。実オブジェクトにはオレンジ色の円錐を用いた。水平像は、実オブジェクトの置かれた場所を黄色の円で提示している。また、ユーザと立像とのインタラクションの実感を高めるため、実オブジェクトが別の領域へ遷移した際、効果音を出している。

アプリケーションの仕様は、サルが実オブジェクトと列が重ならないよう、逃げ回るようにしている。そして、実オブジェクトが奥の領域に配置された場合に、実オブジェクトの頂点からバーチャルな炎が点火する。点火の際、領域を明確にするため、左側、中央、右側によって炎の色を変化させた。

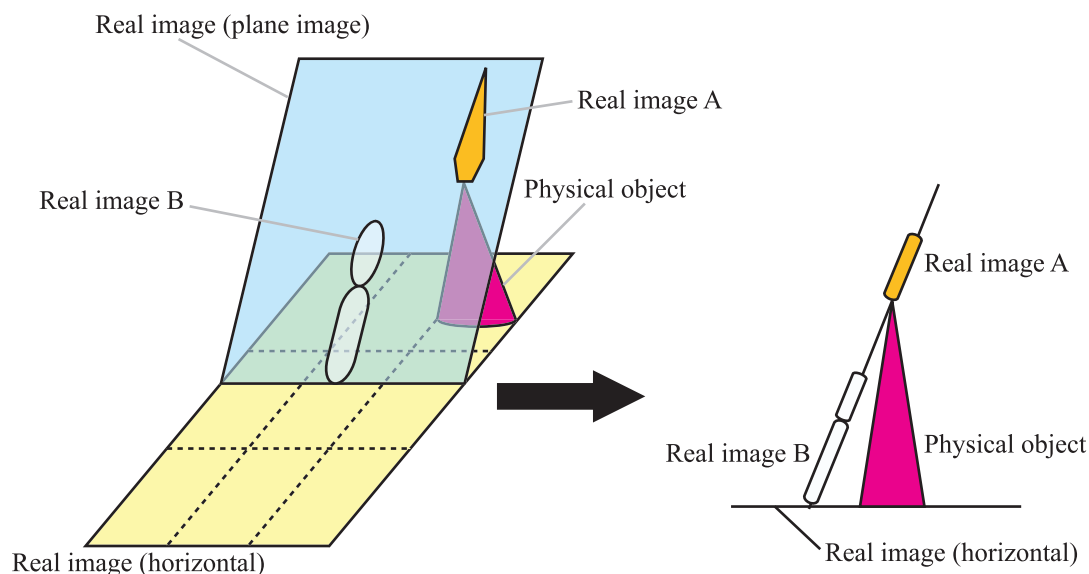


図 5.26: 実像を提示したときの様子。

### 実装結果

実装したシステムの全体図を 5.27 に示す。白色のサルと同時に、実オブジェクト（円錐）の頂点からバーチャルな赤い炎が出ている。このとき、サルは中央の領域は奥の領域にそれぞれ提示されている。次に水平像の領域外に実オブジェクトが置かれたときの様子を図 5.28 に述べる。実オブジェクトが水平像の領域外にあるとき、サルは「どこ？」という吹き出しを提示して実オブジェクトを探す動作をする。一方、実オブジェクトが領域内に配置されたとき、左側の列に置かれた場合を図 5.29 から図 5.31、中央の列を図 5.32 から図 5.34、右側の列を図 5.35 から図 5.37 に示す。

まず、実オブジェクトを配置した場所に応じて、サルの反応が変化する。これによって、ユーザは実オブジェクトを介してサルの実像とのインタラクションをしている実感を高めている。

次にサルと炎の関係に着目する。まず、水平像の効果により、実オブジェクトとサルの位置関係が明確になる。そして、実オブジェクトとサルの位置関係は 5.6.2 項で述べた実装結果と同様、実オブジェクトの存在により、実像の位置情報補間がさらに進む。このため、実オブジェクトが奥の領域にある場合、サルはそれより手前に配置されていることがわかる。一方、炎は実オブジェクトの頂点と炎の点火位置が整合し、かつ実オブジェクトによって焦点誘導が生じるため、炎が実オブジェクトが配置された位置で提示されていることがわかる。したがって、この 2 点から、中央と奥の異なる 2 つの領域でサルと炎の 2 つの実像がそれぞれ提示できていると言える。

但し、2 つの場所における実像提示を実現する際、実オブジェクトがサルと重なると、結像系の光を遮蔽しサルが正しく提示できなくなる。したがって、このシステムでは中央の領域の実像と奥の領域の実オブジェクトが重ならないように実像が逃げるようなインタラクションを実装するなど、ソフトウェアで対処すべきである。本項で実装したアプリケーションでは、サルは常に実オブジェクトから逃げて重ならないようにする対処を行っている。

4 章で提案したシステムで本項で述べた構成を実装すると、実像を傾けて提示することはできるが、水平面の奥行き情報を提示する手段がない。したがって、本章で提案したシステムよりも実在感が弱い MR 環境となる。

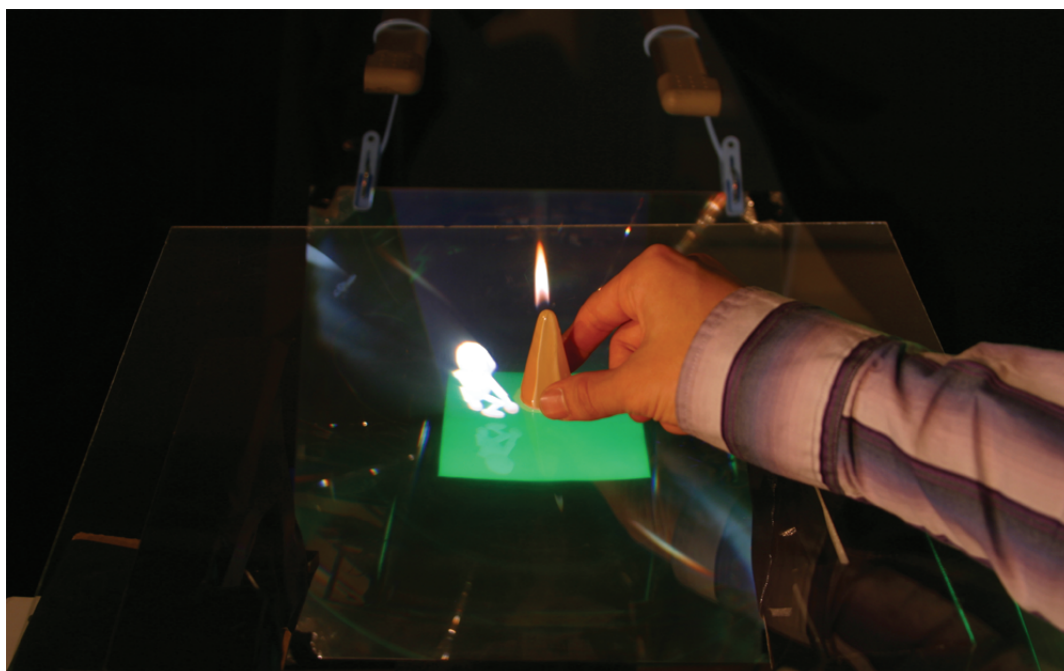


図 5.27: サルとのインタラクションの全体図 .

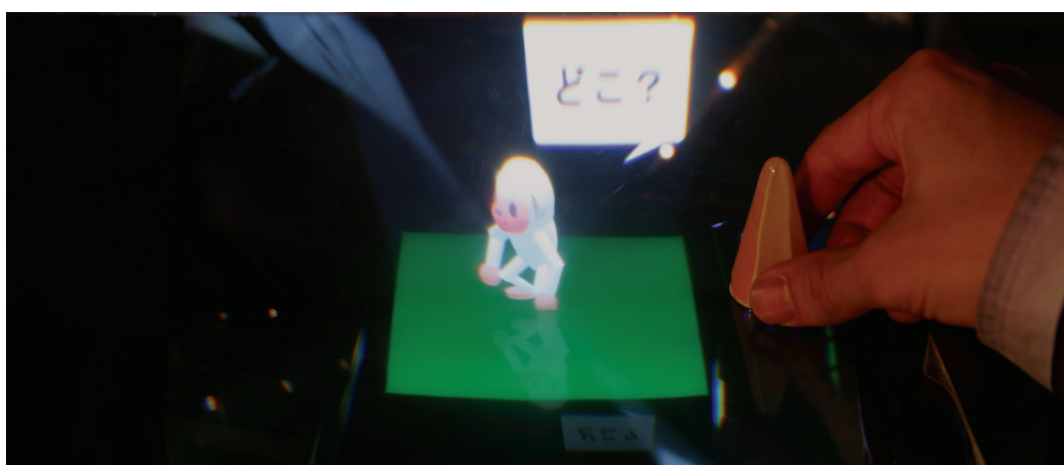


図 5.28: サル：実オブジェクトを水平面の領域外に配置 .



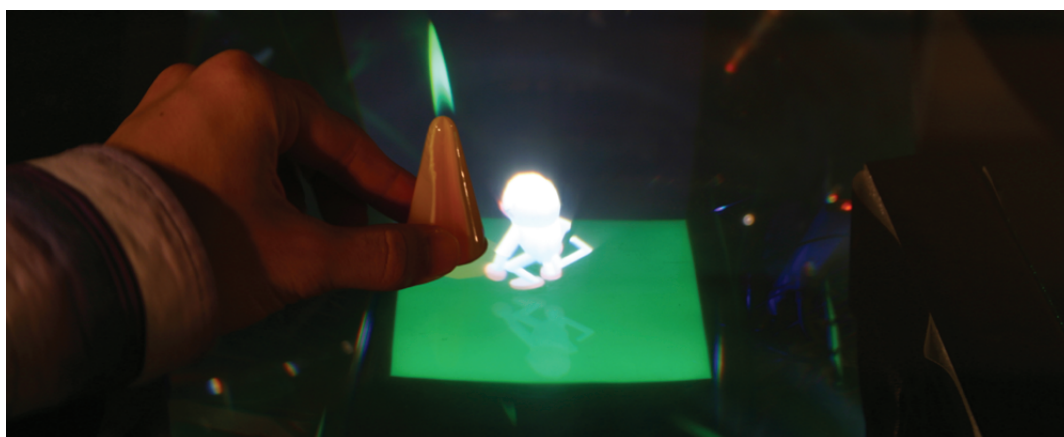


図 5.29: サル：実オブジェクトを左奥に配置．

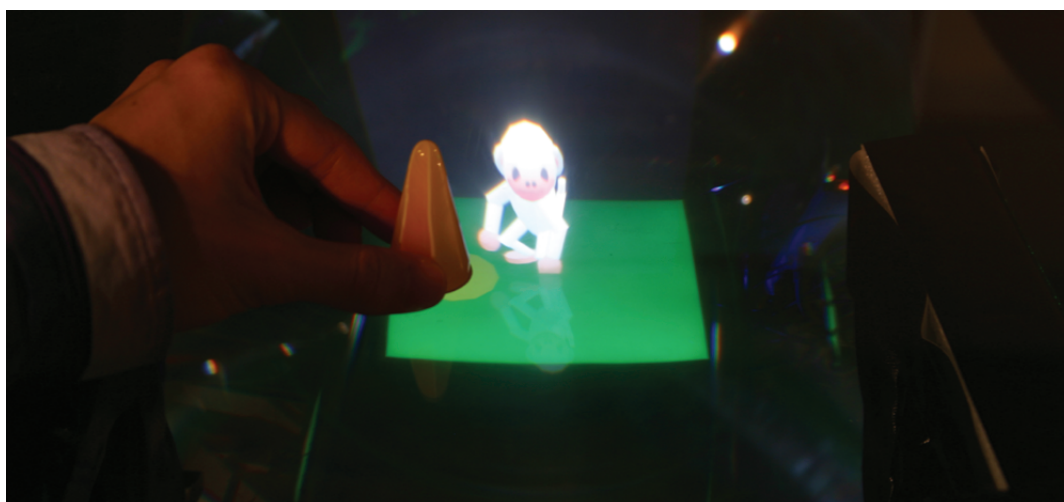


図 5.30: サル：実オブジェクトを左中央に配置．

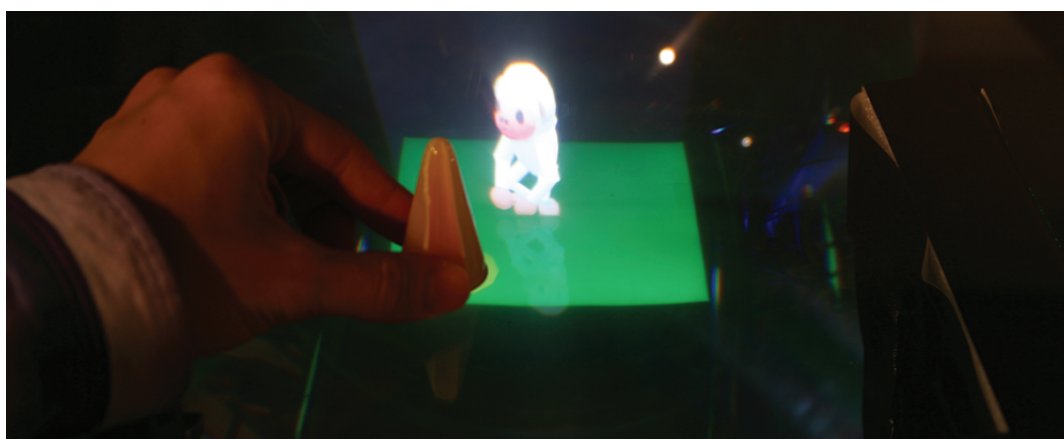


図 5.31: サル：実オブジェクトを左手前に配置．



図 5.32: サル：実オブジェクトを中央奥に配置．

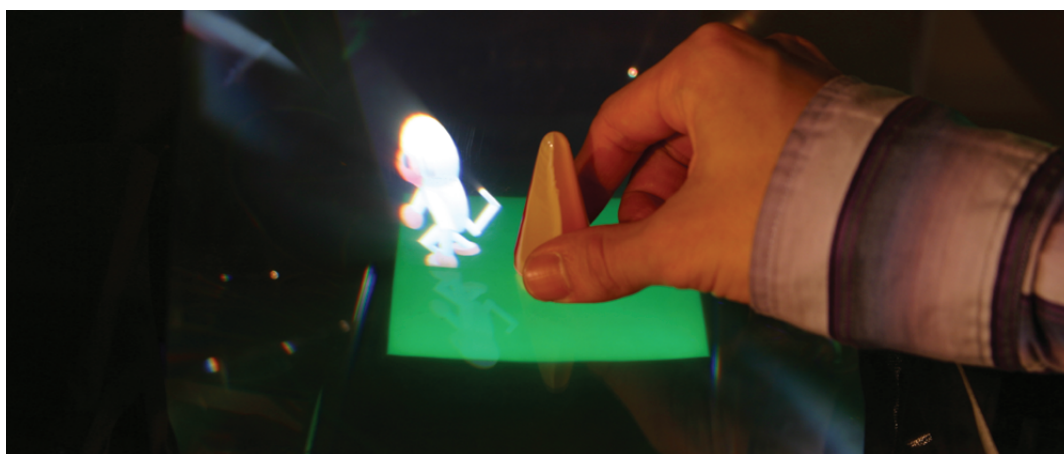


図 5.33: サル：実オブジェクトを中央に配置．

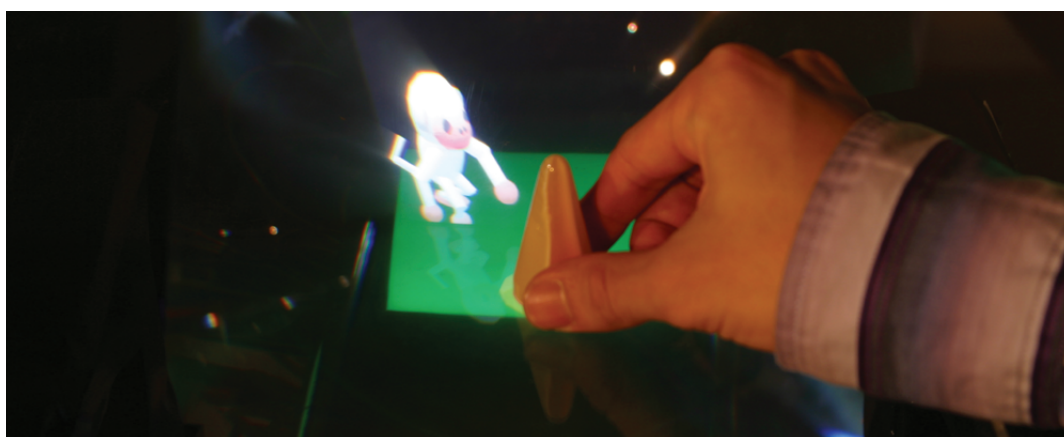


図 5.34: サル：実オブジェクトを中央手前に配置．



図 5.35: サル：実オブジェクトを右奥に配置．

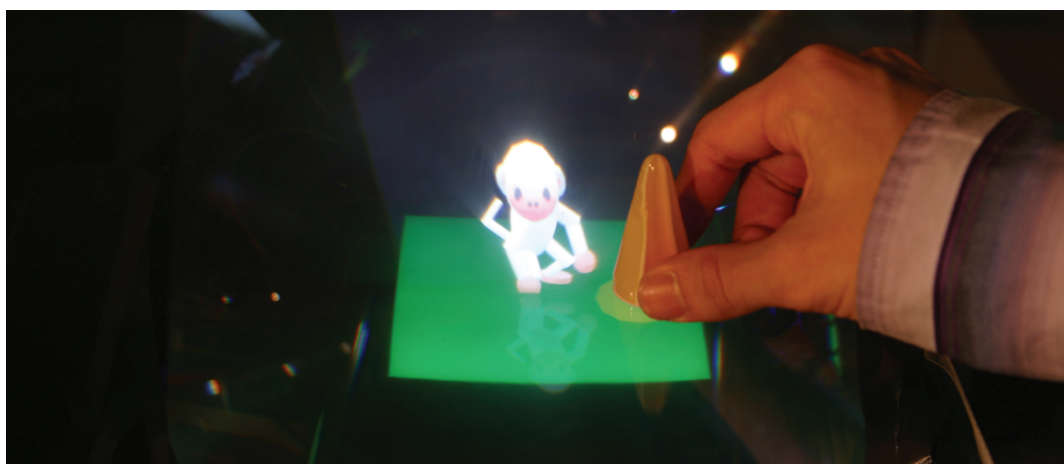


図 5.36: サル：実オブジェクトを右中央に配置．

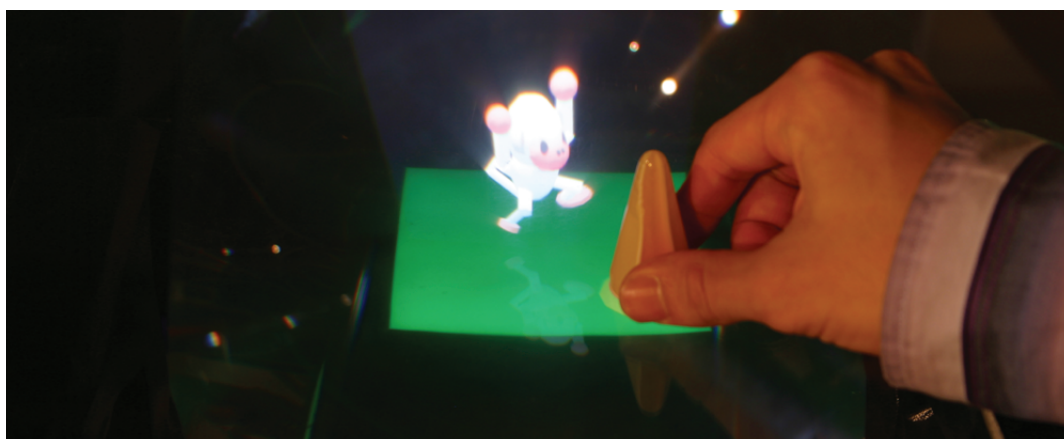


図 5.37: サル：実オブジェクトを右手前に配置．

## 5.7 本章のまとめ

本章では、4章で提案したシステムとは異なるアプローチである、2つの実像の直交関係を活用して実在感の高いMR環境を実現するディスプレイを提案し、

- デスクトップ環境で直立した映像を提示可能
- 水平面の映像により直立した映像の位置情報補間を実現
- カメラによるインタラクティブ性の付与が容易
- 背丈の高い実オブジェクトと提案手法の応用により、異なる奥行きのある場所に対して同時に実像を提示可能

という特長を持ったハードウェアの設計・実装に関して述べた。本章で提案したシステムは、デスクトップ面をディスプレイとして利用できる状態で、その上に飛び出し感の高い立像を提示することができる。そのため、2つの平面映像だけで高い実在感を持つMR環境を維持したまま平野にいる動物、石畳で遊ぶ子供、など、任意のシチュエーションを再現できる。そしてインタラクティブなシステムへの拡張が容易であるため、実用性の高いMR環境をユーザに提供できる。また立像とのインタラクションを行う際、水平像による位置情報補間のほかに、実オブジェクトと混在で生じる焦点誘導による位置情報補間も付加されるため、ユーザはより高い実在感を感じることができる。3次元ディスプレイの多くは、立体感のある映像によってAR環境を構築するために、複雑な構造を持つシステム構成を余儀なくされている。それに対し、提案したシステムは、2つの結像系の組み合わせという、シンプルな構成によって実在感の高いMR環境を実現している。



## 第6章

---

## 結論

## 6.1 本研究の成果

本節では、本論文の主たる成果についてまとめる。

本論文では、デスクトップ環境における実在感の高いMR環境の実現を目的とした、2つの結像系を用いた複合現実型空間立像ディスプレイを提案・実装した。システムの提案に当たり、デスクトップ環境で結像系を利用するための光学設計手法について合わせて提案した。また、システムは異なるコンセプトを基に2タイプの提案・実装を行った。

以降に、本論文の章構成に沿って成果をまとめる。

第2章では、本研究の根幹をなしている複合現実感 (Mixed Reality: MR) について説明した。そしてテーブル・デスク環境でMR環境を実現する手法に関して、特に映像提示手法に着目して研究動向をまとめた。また、関連研究と本手法とを比較し、本研究が

- 空間へ映像提示が可能
- 直感的なインタラクションの付与が可能
- ユーザに特殊装置の装着を前提としない
- デスクトップ環境への応用可能

という4つの要件を満たす手法であることを位置づけた。

第3章では、提案したシステムの中核となる、空間に浮かぶ映像 (実像) を提示可能な結像系について説明し、実在感の高いMR環境の実現のために結像系を用いることの有用性を述べた。本論文で提案する、結像系による直立した実像 (立像) を用いたMR環境についてそのコンセプトを述べた。デスクトップ環境で、立像を含む任意の傾きを持つ実像を提示するための結像系の光学設計手法を提案した。提案した光学設計の動作確認のため、シミュレータを作成してシミュレーションを行った。シミュレーション結果から、提案した光学設計手法の性能についてまとめた。また、デスクトップ環境で結像系による映像提示を行う場合の課題について述べた。

第4章では、鏡のあるデスクトップ環境を活用した、2つの結像系を用いた複合現実型空間立像ディスプレイを提案・実装した。提案したシステムが実世界と鏡の中の世界に対して同時にMR環境を実現することを示した。加えて、実世界と鏡の中の世界の整合性を立像に付与することにより、立像の位置情報を補間して視認性を高めることを示した。鏡の前の実オブジェクトに生じる現象が、鏡の前の配置された立像に対しても生じていることを示した。加えて、“鏡には背面が映る”という固定観念を活用し、立像の表裏関係をユーザに違和感なく提示できる特長を持つことを示した。また、2つの世界の整合性を維持した場合と、整合性にとらわれない場合についてのアプリケーションについて述べた。

第5章では、2つの実像の直交関係を活用した2つの結像系を用いた複合現実型空間立像ディスプレイを提案・実装した。提案したシステムが、立像の足元に水平な実像 (水平像) を提示できることを示した。水平像の効果により、立像の立体感向上および奥行き情報の提示による位置情報補間を実現することを示した。また、提案したシステムをカメラ認識によるインタラクティブなシステムへ拡張した。インタラクティブなシステムによるアプリケーションについて述べた。



表 6.1: 2 つのシステムの性能比較.

比較項目	2 つの世界の整合性を活用 (システム A)	2 つの実像の直交関係を活用 (システム B)
xy 平面の位置情報補間方法	2 つの立像の高さから認知 実オブジェクトによる焦点誘導	立像と水平像の奥行き差から認知 実オブジェクトによる焦点誘導
xz 平面の位置情報補間方法	2 つの立像と鏡の位置関係から認知 実オブジェクトによる焦点誘導	水平像で奥行き情報を明示 実オブジェクトによる焦点誘導
システム構成	鏡が必須	カメラ内蔵可能
視認時の 2 つの立像の配置場所	異なる領域	同じ領域
特長	2 つの世界に MR 環境実現 立像の表裏関係を提示可能	水平像で影や軌跡を提示 水平像で立像がいるシーンを表現可能
実在感を低下する要因	立像が鏡から離れすぎる (xz 平面の補間精度を低下)	立像が水平像から離れすぎる (xy 平面の補間精度を低下)

## 6.2 2 つの複合現実型空間立像ディスプレイの性能比較

本節では、4 章および 5 章で提案・実装した 2 タイプの複合現実型空間立像ディスプレイの性能を、補間する位置情報の種類に分けて比較する。そして、各システムの得意なアプリケーションについて検討する。なお、説明上、4 章で提案したシステムを“システム A”、5 章で提案したシステムを“システム B”と呼ぶ。また定義として、横方向を  $x$  軸、高さ方向を  $y$  軸、奥行き方向を  $z$  軸と定義し、 $x$  軸と  $y$  軸からなる平面を  $xy$  平面、 $x$  軸と  $z$  軸からなる平面を  $xz$  平面と呼ぶこととする。

2 つのシステムの性能比較をまとめた表を表 6.1 に示す。まず、 $xy$  平面の位置情報補間について着目する。システム A は実世界と鏡の中の世界に配置された 2 つの立像の高さを指標として認知する。この補間は、2 つの実像の高さが整合しているため補間精度は高い。それに対し、システム B は、提示位置が異なる立像と水平像との奥行き差を基に認知する。このため、立像が水平像から離れすぎると、奥行き差が視認できなくなり補間精度が低下する。このためシステム B では、立像を水平像に着地させる、あるいは水平像に近い高さに提示することが高い実在感を得るための条件となる。したがって、デスクトップ上に浮遊するようなバーチャルオブジェクトを実像として提示する場合はシステム A が適している。加えて、システム A では立像の表裏関係を提示できるので、 $xy$  平面の場所を問わず実在感の高い立像をユーザに提供できる。また、打ち上げ花火など、 $z$  軸に対する位置を変えず実オブジェクトを  $x$  軸方向にずらすと、 $xy$  平面上の空間でバーチャルな映像を提示するようなインタラクションを行う際にもシステム A は適している。

次に、 $xz$  平面の位置情報補間について着目する。システム A は 2 つの世界に配置された立像と鏡との位置を見比べることで、位置情報を把握する。しかし、2 つの立像は異なる位置に配置されるため、立像と鏡が離れすぎるとユーザは一度に 2 つの立像を観察できず、見比べることが困難となり補間精度を落とす。このため、システム A は立像と鏡が互いに近い配置関係を維持することが条件となる。それに対し、システム B では  $xz$  平面に対して水平像により奥行き情報を提示できるので、補間精度は高い。さらに、水平像で影や立像が移動した軌跡を付与することにより、補間精度を高めることが可能である。また、水平像に平野や道路、川などを提示することにより、立像のいるシーンを表現できるため、その場面に立像が存在しているという実在感を高めることができる。システム B がカメラを内部に配置できることから、 $xz$  平面上で実オブジェクトとのインタラクションを実装する際は、システム B が適していると言える。

## 6.3 今後の課題と展望

本研究の今後の課題と展望について述べる．

### 複数人同時観察を可能にする光学設計の提案

本論文では、デスクトップ環境を想定し、個人ユーザの利用を想定したMR環境を実現するディスプレイについて述べた．一方で、3章で提案した光学設計手法は、複数人が同時観察できる結像系の設計も可能である．したがって、テーブルトップ環境に焦点を当て、複数人が実像を観察できる光学設計手法を考える必要がある．光学設計において、1人用と複数人用で設計過程でどの要素が観察可能人数に影響するのかを明確にできれば、拡張性の高い光学設計であると定義できる．

### 立像の実在感に関する評価

本論文で提案した2つのシステムによる立像は、ユーザが認知的に観察しやすいことは確認できる．但し、2つの手法の比較・評価を行う際に、“立像に実在感がある”ということは何を指標として議論するかが問題となる．心理学や認知学の観点からも含め、定量的な評価基準を検討する必要がある．立像に何を付与すれば、どれだけ実在感が高まるかが明確になれば、より高いMR環境をユーザに対して提供できると言える．

### 2つのシステムの統合

本論文では、異なるコンセプトを基に2タイプのシステムを提案・実装した．2タイプはそれぞれ独自の特長を有する．これらは相反する性質ではないため、2タイプのシステムを統合したシステムを構築できれば、別個のシステムの時よりも高い実在感を持つMR環境を実現できると言える．そのためには、実世界用に2つ、鏡の中の世界用に2つの合わせて4つの結像系を統合したシステム構成を提案する必要がある．

### 立像の多層化

5章では、傾きのある実像を用いることで、異なる奥行きに対して同時に実像提示を実現した．しかし、この手法では、立像でないという本質的な問題に加え、奥側に提示する実像の領域は制限されてしまう．理想的には、異なる奥行きに対して立像を提示できることが望ましい．それを実現するためのアプローチとして、立像の多層化が考えられる．5章で提案したシステムでは、ハーフミラーを用いることで、2つの結像系を統合している．この手法を活用し、立像を提示するための結像系をハーフミラーによって統合することで、立像の多層化を実現する可能性を秘めている．但し、ハーフミラーは輝度を低減させるため、結像系を統合した分、提示する立像が暗くぼんやりした映像になってしまう．そのため、ハーフミラーを用いた多層化を提案し実装する際には、実像の基画像を提示するディスプレイの輝度が高いものを選定する必要があり、デバイス面の制約が大きくなる．

### 実在感向上のための異なるコンセプトの提案

本研究では、実世界と鏡の中の世界の整合性に着目した手法と、実物体の多くは地面に足が付いているという点に着目した手法の2つのアプローチによって実在感の高いMR環境を実現した．しかし、これが必ずしも最適解とは言えない．自然界には数多くの性質があり、人は無意識にそのいくつかの性質を感じとり、立体感や実在感を感じているはずである．したがって、立像の実在感をより高めるためのコンセプトを考える必要がある．

# 謝辞

---

本論文は修士課程の2年間の集大成です。本論文がこうして形となったのは、原島・苗村研究室の皆様をはじめ、周囲の方々のご指導、ご協力による賜物であり、心から感謝申し上げる次第であります。

原島 博教授には、ご多忙の中、幾度もミーティングに参加いただき、科学的真理を探究することの意義や面白さをはじめ、多数の貴重なご意見を頂くとともに、研究内容から体調面に至るまで常に幅広く気を配っていただき、温かいご指導・ご鞭撻を賜りました。本当にお世話になりました。苗村 健助教授には、研究に対する姿勢から社会における常識や礼儀に至るまで、生涯において有益となることをご指導頂きました。研究内容に関して、その方向性や研究戦略について温かく的確なご助言を頂きました。また体調面の不安に対しても親身になって対応して頂き、本当に感謝しております。また飯田 誠 特任講師には、研究内容や発表方法に関する的確なアドバイスを頂くとともに、出張手続きやシステム管理など、研究室での生活における様々な場面で手助けをして頂きました。深く御礼申し上げます。森村 久美子講師には、英語指導をして頂いただけでなく、研究生活における様々な面で気づかっていたいて感謝の念にたえません。高橋 圭太特任助手には、研究内容に関して、狭い見地で議論しがちな私に対し、大局的な見地からの的確なご指導頂きました。本当にありがとうございました。

原島・苗村研究室の皆様にも大変お世話になりました。修士過程2年間の前半をSIGMA グループ、後半をSIGLF グループで貴重な時間を共有させて頂きました。SIGMA グループでは博士課程3年の寛康明氏には、研究活動を工学的な観点だけで捉えず、学際的な観点で捉えるための考え方についてご教示頂きました。博士課程2年の橋田朋子氏には、研究活動を日々謙虚に取り組むというひたむきさの手本を見せて頂きました。修士課程1年の木村 翔氏、吉野 祥之氏には、研究活動の中で何度もご協力して頂きました。SIGLF チームでは、博士課程1年の小池 崇文氏には、経験から裏打ちされた的確なアドバイスを頂くと共に、海外発表の際に大変お世話になりました。博士課程1年田口 裕一氏には、研究内容について有益な助言を頂くだけでなく、一心不乱に研究に取り組む姿勢を学ばせて頂きました。ともに研究生活を過ごした、修士課程1年の上田 健介氏、卒論生の安藤 徹氏、王 金戈氏、太田 昌宏氏にも感謝いたします。

また、2年間の研究生活全般にわたって、原島・苗村研究室の皆様には大変お世話になりました。博士課程1年のチェン・ドミニク氏には英語論文の添削をして頂き、深くお礼申し上げます。博士課程1年中洲 俊信氏には、研究内容や方針に関して実に多くの活発な議論をして頂きました。修士課程1年のソン ヨンア氏、天野 翔氏には、1年間、研究に関する議論はもとより、研究生活全体を盛り上げていただき感謝しています。かけがえのない時間を共にした、生涯の盟友と言える川上 翔治氏、北村 匡彦氏、河 宗玄氏、松本 裕子氏には、研究活動に留まらず、公私にわたり格別の御厚情を賜り心より厚く御礼申し上げます。皆様の今後のさらなるご活躍をお祈り申し上げます。また、研究環境の整備に努めてくださった、大谷 智子氏、東山 薫氏、吉田 有里氏、坂井 理笑氏に御礼申し上げます。

最後に、何よりお世話になりました両親、妹に御礼申し上げて本論文の締めくくりとさせて頂きます。本当にありがとうございました。

2007年2月2日  
加藤 紀雄

## 参考文献

---

- [1] Y. Ohta and H. Tamura: “Mixed Reality – Merging Real and Virtual Worlds”, Ohmsha, 1999.
- [2] P. WELLNER: “Interacting with paper on the digitalDesk,” *Communications of the ACM*, vol. 36, no. 7, pp. 75–84, July 1993.
- [3] 歴本純一: “2次元マトリックスコードを利用した拡張現実感の構成手法”, インタラクティブシステムとソフトウェア, 日本ソフトウェア科学会 WISS, 近代科学社, pp. 199–208.
- [4] H. Kato and M. Billinghurst: “Marker tracking and HMD calibration for a video-based augmented reality conferencing system,” in *Proc. of 2nd Int. Workshop on Augmented Reality*, pp. 85–94, Oct. 1999.
- [5] 加藤博一, M. Billinghurst, 浅野浩一, 橘啓八郎: “マーカー追跡に基づく拡張現実感システムとそのキャリブレーション”, *TVRSJ*, vol. 4, no. 4, 1999. Munich, Germany.
- [6] H. Ishii and B. Ullmer: “Tangible bits: Towards seamless interfaces between people, bits and atoms,” in *Proc. of Conference on Human Factors in Computing Systems (ACM CHI '97)*, pp. 234–241, Mar. 1997.
- [7] B. Ullmer and H. Ishii: “The metaDESK: models and prototypes for tangible user interfaces,” in *Symposium on User Interface Software and Technology (UIST'97)*, pp. 223–232, 1997.
- [8] S. Brave and A. Dahley: “intouch: A medium for haptic interpersonal communication,” in *Conference on Human Factors in Computing systems (ACM CHI '97)*, pp. 363–364, Mar. 1997.
- [9] H. Ishii, R. Fletcher, J. Lee, S. Choo, J. Berzowska, C. Wisneski, C. Cano, A. Hernandez, and C. Bulthaup: “musicBottles,” in *Conference Abstracts and Applications of SIGGRAPH '99*, p. 174, 1999.
- [10] I. Rakkolainen, J. Landkammer, M. Laitinen, and K. P. Mika Piirto: “The interactive fogscreen,” in *ACM SIGGRAPH2005 Emerging Technologies*, July 2005.
- [11] M. Nakamura, G. Inaba, J. Tamaoki, K. Shiratori, Jun 'ichiHoshino: “bubble cosmos,” *ACM SIGGRAPH2006 Emerging Technologies*, July 2006.
- [12] P. H. Dietz, J. Y. Han, J. Westhues, J. Barnwell, and W. Yezauris: “Submerging technologies,” in *ACM SIGGRAPH2006 Emerging Technologies*, July 2006.
- [13] M. Ishii and M. Sato: “3D spatial interface device using tensed strings,” *PRESENCE-Teleoperators and Virtual Environments, MIT Press, Cambridge*, vol. 3, no. 1, pp. 81–86, 1994.
- [14] C. Corp.: “SPIDAR,” <http://www.cyverse.co.jp/jp/Products/3dGrip/>.
- [15] I. SensAble Technologies: “PHANToM,” 1996, <http://www.sensable.com/>.
- [16] S. Saga, K. Vlack, H. Kajimoto, and S. Tachi: “Haptic video,” in *Conference Abstracts and Applications of SIGGRAPH2005 DVD-ROM*, 2005.

- [17] 嵯峨智, 梶本裕之, 館日章: “反力提示を利用した Haptic Teaching への視覚情報の付加と Visual Capture の影響”, 日本バーチャルリアリティ学会第 10 回大会論文集, pp. 65 – 68, Sept. 2005.
- [18] 牧野良, 池井寧: “ハプティックディスプレイ TextureExplorer における 3 次元オブジェクトの提示”, 日本バーチャルリアリティ学会第 11 回大会論文集, pp. 189–192, Sept. 2006.
- [19] 比嘉恭太, 西浦敬信, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行: “視覚・聴覚を併用した複合現実感システムの開発 (1) 視覚的 MR と聴覚的 MR の同時提示の実現”, 日本バーチャルリアリティ学会第 11 回大会論文集, pp. 285–288, Sept. 2006.
- [20] Google: “Google Earth,” <http://earth.google.co.jp/>.
- [21] J. Patten, H. Ishii, J. Hines, and G. Pangaro: “Sensetable: A wireless object tracking platform for tangible user interfaces,” in *Proc. of Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '01)*, pp. 253–260, 2001.
- [22] H. Koike, Y. Sato, and Y. Kobayashi: “Integrating paper and digital information on enhanced desk: A method for real-time finger tracking on augmented desk system,” *ACM Transaction on Computer-Human Interaction*, vol. 8, no. 4, pp. 307–322, 2001.
- [23] J. Rekimoto and M. Saitoh: “Augmented surfaces: A spatially continuous work space for hybrid computing environments,” in *Proc. of Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '99)*, pp. 378–385, 1999.
- [24] J. Rekimoto, B. Ullmer, and H. Oba: “Datatiles: A modular platform for mixed physical and graphical interactions,” in *Proc. of Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '01)*, pp. 269–276, Mar. 2001.
- [25] M. Haller, D. Leithinger, J. Leitner, T. Seifried, P. Brandl, J. Jürgen Zauner: “The shared design space,” *ACM SIGGRAPH 2006 Emerging Technologies*, July 2006.
- [26] 岩井大輔, 花谷佐和子, 堀井千夏, 佐藤宏介: “Limpid Desk : 投影型複合現実感による机上実物体の透過化”, *インタラクシオン* 2006, Mar. 2006.
- [27] M. Sugimoto, M. Kojima, A. Nakamura, G. Kagotani, H. Nii, and M. Inami: “Augmented coliseum: Display-based computing for augmented reality inspiration computing robot,” in *SIGGRAPH 2005 Full Conference DVD-ROM Disk1 Emerging Technologies*, 2005.
- [28] 吉田俊介, 野間春生, 保坂憲一: “複数物体を同時駆動可能な力覚提示装置 Proactive Desk II の開発”, *インタラクシオン* 2006, Mar. 2006.
- [29] 新居英明, 稲見昌彦: “Display-Based Computing の研究第一報: 画像提示装置を主体とした実世界指向情報システム”, 第 10 回バーチャルリアリティ学会大会論文集, 2005.
- [30] 吉田俊介, 野間春生, 保坂憲一: “Proactive Desk II: 複数物体を駆動可能なニア誘導モータ方式力覚提示装置の開発”, 日本バーチャルリアリティ学会第 10 回記念大会論文集, pp. 309–312, Sept. 2005.
- [31] 青木孝文: “Kobito Virtual Brownies : 仮想のキャラクタによる現実世界へのインタラクシオン”, 日本バーチャルリアリティ学会第 10 回記念大会論文集, pp. 467–470, Sept. 2005.

- [32] D. P. Uray, D. T. Kienzl, and D. U. Marsche: "MRI - a mixed reality interface for the masses," in *ACM SIGGRAPH2006 Emerging Technologies, ET-060*, July 2006.
- [33] I. Stavness, F. Vogt, and S. Fels: "Cubee: Thinking inside the box," in *ACM SIGGRAPH2006 Emerging Technologies, ET-060*, July. 2006.
- [34] 加藤博一, M. Billinghurst, I. Poupyrev, 鉄谷信二, 橘啓八郎: "拡張現実感技術を用いたタンジブルインタフェース", 芸術科学会論文誌, vol. 1, no. 2, pp. 97–104, June 2002.
- [35] H. Kato, M. Billinghurst, I. Poupyrev, K. Imamoto, and K. Tachibana: "Virtual object manipulation on a table-top ar environment," in *Proc. of the International Symposium on Augmented Reality(ISAR 2000)*, pp. 111–119, 2000. Munich, Germany.
- [36] Y. Kitamura, T. Konishi, S. Yamamoto, and F. Kishino: "Interactive stereoscopic display for three or more users," in *Computer Graphics Annual Conference Series (Proc. of SIGGRAPH 2001)*, pp. 231–239, 2001.
- [37] R. Raskar, G. Welch, and W.-C. Chen: "Table-Top spatially-augmented reality: Bringing physical models to life with projected imagery," in *2nd Int'l Workshop on Augmented Reality*, pp. 64–71, 1999.
- [38] B. Piper, C. Ratti, and H. Ishii: "Illuminating clay: A 3-D tangible interface for landscape analysis," in *Proc. of Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '02)*. Minneapolis, Minnesota, USA.
- [39] B. Piper, C. Ratti, and H. Ishii: "Illuminating clay: A tangible interface with potential GRASS applications," in *Proc. of the Open source GIS - GRASS users conference 2002*. Trento, Italy.
- [40] H. Ishii, C. Ratti, B. Piper, Y. Wang, A. Biderman, and E. Ben-Joseph: "Bringing clay and sand into digital design - continuous tangible user interfaces," *BT Technology Journal*, vol. 22, no. 4, pp. 287–299, Oct. 2004.
- [41] J. Noguchi, K. Kimura, M. Ohuchi, H. Shimizu, T. Aoki, J. Baba, S. Hasegawa, and M. Sato: "Powder screen: A virtual materializer," in *ACM SIGGRAPH2006 Emerging Technologies*, July 2006.
- [42] 西川修, 宮崎淳, 伊與田哲男: "空間像提示型 3D ディスプレイを用いた遠隔 3D 情報共有システムの提案", 日本バーチャルリアリティ学会第 11 回大会論文集, pp. 482–485, Sept. 2006.
- [43] Y. Kakehi, M. Iida, T. Naemura, and M. Matsushita: "Tablescape plus: Upstanding tiny displays on tabletop display," in *ACM SIGGRAPH2006 Emerging Technologies, ET-060*, July 2006.
- [44] Y. Kakehi, M. Iida, T. Naemura, and M. Matsushita: "Lumisight table: Interactive view-Dependent tabletop display," *IEEE Computer Graphics & Applications*, vol. 25, no. 1, pp. 48–53, 2005.
- [45] 筧康明, 飯田誠, 苗村健, 松下光範: "Lumisight Table における卓上オブジェクトへのインタラクティブな情報提示", 日本バーチャルリアリティ学会第 10 回記念大会論文集, pp. 165–168, Sept. 2005.
- [46] pioneer: "floating interface," 2005, <http://www.pioneer.co.jp/press/release512-j.html>.
- [47] H. Ikeda, H. Harashima, and J. Ishikawa: "i-ball: Interactive information display like a crystal ball," in *ACM SIGGRAPH2001, Emerging Technologies*, p. 122, 2001.
- [48] 掛谷英紀: "LCD の空間像を利用した裸眼立体ディスプレイ", 日本バーチャルリアリティ学会第 7 回大会論文集, pp. 45–46, 2002.



- [49] H. Kakeya, N. Kobe, and H. Kasano: "Multiview autostereoscopic display with floating real image," *SPIE*, vol. 5291, pp. 255–264, 2004. Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems XI.
- [50] 掛谷英紀: "MOE Vision: プロジェクション方式省スペース大画面多視点立体ディスプレイ", 日本バーチャルリアリティ学会第 11 回大会論文集, pp. 476–479, Sept. 2006.
- [51] 陶山史朗, 伊達宗和, 高田英明: "多少点レンズを用いた奥行き標準化型 3D 表示方式の提案", 3 次元画像コンファレンス 2006 講演論文集, pp. 13–16, June 2006.
- [52] P. Maes, T. Darrell, B. Blumberg, and A. Pentland: "The ALIVE system: Wireless, full-body interaction with autonomous agents," *ACM Multimedia Systems*, vol. 5, no. 2, pp. 105–112, 1997.
- [53] O. MORIKAWA and T. MAESATO: "HyperMirror: Toward pleasant-to-use video mediated communication system," in *Proc. of the 1998 ACM conference on Computer supported cooperative work (CSCW '98)*, pp. 149–158, 1998.
- [54] 筧康明, 苗村健: "through the looking glass," 芸術科学論文誌, vol. 3, no. 3, pp. 185–188, Sept. 2004.
- [55] A. Tanaka and K. Sakamoto: "Virtual display: Mirror image for extension of display area," in *IDW '06*, pp. 1401–1402, 2006.
- [56] TOSHIBA: "“平置き型”の裸眼立体ディスプレイ", 2005, [http://www.toshiba.co.jp/about/press/2005\\_04/pr-j1501.htm](http://www.toshiba.co.jp/about/press/2005_04/pr-j1501.htm).
- [57] 中沼寛, 亀井浩之, 高木康博: "128 指向性画像を高密度表示する自然な三次元ディスプレイの開発", 3 次元画像コンファレンス 2004 講演論文集, pp. 13–16, June. 2004.
- [58] Y. Takaki and K. Kikuta: "3D images with enhanced DOF produced by 128-directional display," in *IDW '06*, pp. 1909–1912, 2006.
- [59] T. Koike, K. Utsugi, M. Oikawa, M. Kobayashi, and M. Yamasaki: "Interactive autostereoscopic display with 60 ray directions," in *ACM SIGGRAPH2006 Research Posters*, July. 2006.
- [60] LightSpace: "DepthCube Z1024," 2005, [http://www.innovatec.co.jp/products\\_top\\_frame.html](http://www.innovatec.co.jp/products_top_frame.html).
- [61] M. Date, H. Takada, S. Suyama, K. Tanaka, and K. Nakazawa: "Projection-Type depth fused 3D (DFD) display," in *IDW '06*, pp. 1393–1396, 2006.
- [62] 伊達宗和, 高田英明, 陶山史朗, 田中敬二: "投射型 DFD(Depth Fused 3-D) 表示装置", 3 次元画像コンファレンス 2006 講演論文集, pp. 105–108, June 2006.
- [63] 木村哲也, 掛谷英紀, 恵比寿博充: "ボリューム表示とステレオ表示を組み合わせた 3D ディスプレイ", 日本バーチャルリアリティ学会第 11 回大会論文集, pp. 219 – 222, Sept. 2006.
- [64] 圓道知博, 梶木善裕, 本田捷夫, 佐藤誠: "全周型 3 次元動画ディスプレイ", 3 次元画像コンファレンス 1999 講演論文集, 1999.
- [65] T. Yendo, N. Kawakami, and S. Tachi: "Seelinder: The cylindrical lightfield display," in *ACM SIGGRAPH2005 Emerging Technologies*, 2005.
- [66] 大塚理恵子, 星野剛史: "Transpost: 360 度立体映像ディスプレイシステム", 3 次元画像コンファレンス 2005 講演論文集, pp. 33–36, June 2005.

- 
- [67] H. Kimura, T. Uchiyama, and H. Yoshikawa: “Laser produced 3D display in the air,” in *ACM SIG-GRAPH2006 Emerging Technologies*, July. 2006.
- [68] DENSO: “透明 EL ディスプレイ”, 2001, <http://www.denso.co.jp/EL/index.html>.

# 発表文献

---

- [69] 加藤 紀雄, 苗村 健: “2 つの結像系を用いた複合現実型空間立像ディスプレイ”, VR 学会論文誌 (投稿中).
- [70] 加藤 紀雄, 苗村 健: “2 つの結像系を用いた空間立像ディスプレイの基礎検討”, 映像メディア処理シンポジウム (IMPS2006), I2-02, Nov., 2006.
- [71] Norio Kato and Takeshi Naemura: “Mixed Reality Environment with a Mirror,” ACM SIGGRAPH2006 Research Posters, no. 155, July, 2006.
- [72] 加藤 紀雄, 苗村 健: “鏡を用いた複合現実型空間像提示システムの光学設計”, 3 次元画像コンファレンス 2006, pp. 215 – 218, July, 2006.
- [73] 加藤 紀雄, 苗村 健: “鏡を用いた複合現実型空間像提示システムの基礎検討”, 日本バーチャルリアリティ学会第 10 回大会, 1B1-3, pp. 21 – 22, Sept., 2005.