

修士論文

マイクロレンズアレイを用いた HMD における眼球移動 に対応した画像生成とその評価

鹿島 渉

2017 年 3 月 16 日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科 情報科学専攻

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に
修士（工学）授与の要件として提出した修士論文である。

鹿島 渉

審査委員：

加藤 博一 教授	（主指導教員）
向川 康博 教授	（副指導教員）
Christian Sandor 准教授	（副指導教員）
武富 貴史 助教	（副指導教員）

マイクロレンズアレイを用いた HMD における眼球移動 に対応した画像生成とその評価*

鹿島 渉

内容梗概

ヘッドマウントディスプレイ (HMD) は近年、注目をされつつデバイスである。その HMD を用いることで、我々はエンターテインメントや遠隔でのコラボレーション、テレプレゼンス、トレーニングで新たな体験をすることが可能である。現在のヘッドマウントディスプレイシステムでは、仮想画像上に焦点を合わせるために、焦点距離の大きいレンズが用いられていることが多い。このようなシステムでは、デバイスが重く、分厚い形状になる。マイクロレンズアレイ方式での HMD では、これらの欠点を改善し、軽量で視野角の広い HMD を実現することが可能である。眼の位置が静的であるとき、眼が眼の動かせる領域であるアイボックス内において、正しく仮想画像をみることができる。この領域は比較的小さく、ユーザーが広視野角の画像を見ようとしたとき、眼がアイボックスの領域を外れてしまう。本論文において、このような場合、どのような影響を及ぼすのか調査した。我々は、アイトラッキングカメラといった視線推定により眼の位置に対応して画像生成する方法を提案し、眼球移動したときの観察された画像が大きく改善されることを確認するために、我々は、シミュレーション、カメラでの撮影、そしてユーザーテストといった3つの実験を行った。知覚される画像は静的な画像生成と比較して、改善されたことが確認できた。

キーワード

HMD, マイクロレンズアレイ, ライトフィールドディスプレイ, 画像生成, 眼の姿勢推定

*奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報科学専攻 修士論文, NAIST-IS-MT1551032, 2017 年 3 月 16 日.

Image Generation for HMD Based on Microlens Arrays Corresponding to Eye Movement and its Evaluation*

Wataru Kashima

Abstract

Head mounted displays (HMDs) have received a lot of attention in recent years. They promise novel experiences in entertainment, remote collaboration, telepresence, and training, to name a few. Current systems use a thick focusing lens to allow users to focus onto the display. This results in heavy weight and thick form. Displays based on microlens technology can circumvent these drawbacks and create thin, light HMDs with a wide field of view. Content shown on such a display can be seen correctly as long as the eye remains within a predefined area, the eyebox. As this area is relatively small, the eye is likely to leave the eyebox when the user looks at wide field of view content. In this thesis we investigate what effects can be observed in this case.

We propose to adapt the rendering on the display depending on the pose of the eye, e.g., estimated with an eye-gaze tracking camera. To verify that content adaptation vastly improves the observed image quality as the eye rotates to observe the displayed content we have performed three studies: a simulation, a controlled camera experiment, and a user study. Our results show a significant improvement of the readability and perceived quality over the static rendering.

Keywords:

HMD, microlens array, light field display, image generation, eye pose estimation

*Master's Thesis, Department of Information Science, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-MT1551032, March 15, 2017.

目次

図目次	v
表目次	1
第 1 章 はじめに	2
1.1 ヘッドマウントディスプレイの変遷	2
1.2 既存のヘッドマウントディスプレイ技術	4
1.2.1 既存のヘッドマウントディスプレイの特徴	5
1.2.2 ライトフィールドを応用したヘッドマウントディスプレイ システム	6
1.2.3 マイクロレンズアレイ方式の利点と問題点	7
1.3 問題解決へのアプローチ	11
1.4 本論文の位置づけ	11
1.5 本論文の構成	12
第 2 章 マイクロレンズアレイ方式の画像生成	13
2.1 マイクロレンズアレイ方式の画像生成	13
2.1.1 光学的設計	13
単レンズ方式	13
マイクロレンズアレイ方式	15
2.1.2 画像生成システム	19
第 3 章 眼球の姿勢推定	21
3.1 眼科学	21
3.1.1 眼球	21
3.1.2 眼球運動	22
3.2 模型眼	23
3.3 眼の検出と視線計測	25
3.3.1 眼の検出	25
3.3.2 視線計測	25

第 4 章	眼球移動に対応した画像生成	27
4.1	光学的設計	27
4.2	画像生成システム	29
第 5 章	評価	30
5.1	シミュレーション	30
5.1.1	システム	30
5.1.2	条件	32
5.1.3	結果	34
5.2	カメラによる撮影	36
5.2.1	実験に用いる機材	36
5.2.2	条件	38
5.2.3	結果	39
5.3	ユーザーテスト	41
5.3.1	実験環境	41
5.3.2	テスト内容	41
5.3.3	条件	43
5.3.4	結果	45
5.4	結果の考察	47
第 6 章	結論	49
	謝辞	50
	参考文献	51

図目次

1.1	初期の HMD (左) [2] とヘルメット型の HMD (右) [4]	2
1.2	既存の HMD の例	3
1.3	HMD とそのソフトウェアの市場規模予測 [10]	4
1.4	マイクロレンズアレイを用いた HMD のプロトタイプ [18]	7
1.5	単レンズ方式 (左) とマイクロレンズアレイ方式 (右) における HMD のサイズの違い	8
1.6	マイクロレンズアレイ方式でのアイボックス. 黒で表示された眼 はアイボックス内で, 灰色で表示された眼はアイボックスの外を 表している	9
1.7	ディスプレイ画像が静的な場合の眼から見える画像	10
2.1	単レンズ方式における基本的構造. 図の場合, ディスプレイの大 きさによって, 視野角が制限される場合を示している.	14
2.2	単レンズ方式でのアイボックス	15
2.3	マイクロレンズアレイ方式における基本的構造	16
2.4	マイクロレンズアレイ方式でのアイボックス	17
2.5	眼とレンズの距離と視野角の関係およびアイボックスの関係	18
2.6	着目ピクセルでの入射する光線	19
2.7	出力画像	20
3.1	眼球モデル [25]	22
3.2	Gullstrand の眼球モデル [27]. 左が媒質の屈折率と屈折面の位置 を表していて, 右が光学的計算に用いられる主要点の位置	23
3.3	Listing の眼球モデル [28]. 図の F は焦点, P は眼球表面, N は節 点を表している	24
3.4	Adam らが実験で用いた模型眼 [29]	24
3.5	動画像を用いた視線追跡 [31]	26
4.1	アイボックスの移動	27

4.2	眼球移動したときのディスプレイ領域の変化（上）と眼球移動したときに見える画像（下）	28
4.3	眼球移動したときの入射する光線	29
5.1	網膜上の各ピクセルでの計算	31
5.2	実験で用いる眼球モデル	32
5.3	シミュレーションで用いる座標系	33
5.4	ターゲット画像と初期位置での結果	34
5.5	プロトタイプ	36
5.6	撮影環境	37
5.7	撮影条件	38
5.8	ターゲット画像と初期位置での出力画像	39
5.9	実験環境	41
5.10	初期設定のときに見える画像	42
5.11	用いる仮想画像	43
5.12	文字の正答率	45
5.13	文字の鮮明さ	46
5.14	カメラで撮影のとき	48
5.15	ユーザーテストのとき	48

表目次

1.1	既存の HMD の特徴	5
2.1	その他のパラメータ	18
5.1	シミュレーションで用いる眼球のパラメータ	32
5.2	シミュレーションで用いるディスプレイのパラメータ	33
5.3	シミュレーション結果	35
5.4	カメラ撮影で用いるパラメータ	38
5.5	x および y 軸中心に回転するときのカメラでの撮影結果	40
5.6	ディスプレイのパラメータ	44
5.7	ユーザーテストのパラメータ	44
5.8	検定結果	46

第 1 章 はじめに

ヘッドマウントディスプレイ (HMD) は仮想現実や拡張現実などの分野で用いられる人間の視覚に働きかけるデバイスで、近年、注目されつつある。装着することで、ハンズフリーで使えるため、広い分野で用いることができる。例えば、遠隔地にいる人と共同作業したり、空間を共有したり、またトレーニングや医療などでも新しい体験をすることが可能である。それらの体験により、社会や、人々の生活に大きく影響するとされている。そこで、本研究において、HMD に着目し進めていく。

1.1 ヘッドマウントディスプレイの変遷

HMD の変遷については Rolland と Hua が調査し、発表している [1]。コンピュータグラフィックスを見ることができる HMD は 1960 年代にアイヴァンら [2] によって開発されました。この HMD は非常に重く、天井からつりさげられた状態で保持するような構造で、ユーザーに負担を強いる設計であった。1970 年代に開発された頭部装着のみの HMD はヘルメット型で、軍用用途で用いられた [3, 4]。このような形状であるがゆえに、当時の HMD の利用用とは限られていた。

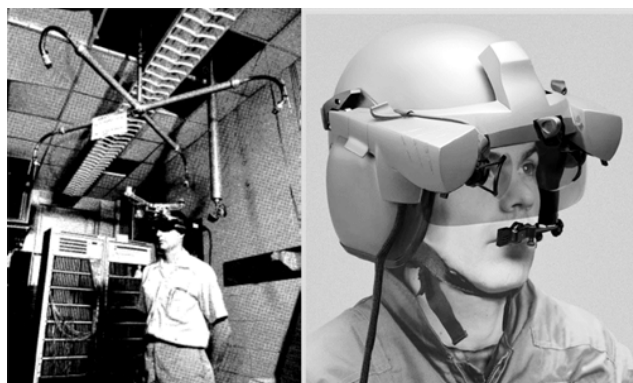


図 1.1: 初期の HMD (左) [2] とヘルメット型の HMD (右) [4]

しかしながら近年、HMD は急速に普及しはじめた [5]。その理由として、デバイ

スの小型・軽量化により，装着時の負担や違和感が軽減され，また，コンピュータの計算性能が向上し，表示するコンテンツが鮮明に視認できるようになったことが考えられる．しかしながら現状，HMD は形状や視野角，解像度などのさまざまな要件はターゲットとなるアプリケーションによって大きく異なる [7]．例えば，図 1.2a のようなメガネ型の HMD[8] では，目の前に巨大なスクリーンを表示して，動画コンテンツを視聴したり，実空間に情報が付加されたものを視認することができる．また図 1.2b のようなゴーグル型の HMD[9] では，仮想空間において一人称視点の没入感のあるゲームができたり，仮想空間において他者と空間を共有できたしする．そして現状，形状，視野角，解像度などの要件をすべて満たすような HMD を実現することは技術的に非常に困難である．



(a) EPSON Moverio BT-300[8]



(b) Oculus Rift[9]

図 1.2: 既存の HMD の例

本研究において，ウェアラブルデバイスとしての HMD に着目する．塚本 [6] は，ウェアラブルデバイスとしての HMD に重要な要素として以下の点を挙げている．

- 手軽さ：いつでもどこでも情報活用などのコンピュータ機能が利用できる．
- 長時間利用：生活や仕事の中で長時間にわたって利用できる．
- 現場利用：生活や仕事の現場で利用できる．
- ファッション性：装着する機器は被服の一部としてファッション性を有する．
- ユビキタス情報・機器利用：身の回りに存在するユビキタス情報やユビキタス機器，サービスなどをより高度に利用できる．

また、Goldman Sachs 社は図 1.3 のような HMD の市場規模予測 [10] を行っており、先ほどの要素をみたすようなウェアラブルな HMD を実現することで、図のように HMD は巨大な市場規模を形成すると述べている。この図から読み取れるように HMD は人々に多大な影響を与え得るデバイスである。

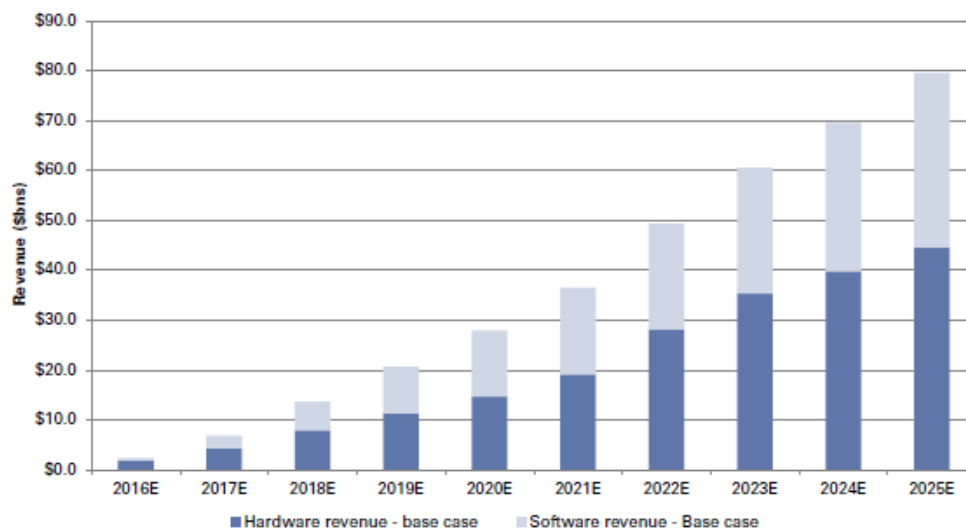


図 1.3: HMD とそのソフトウェアの市場規模予測 [10]

1.2 既存のヘッドマウントディスプレイ技術

HMD はターゲットとなるアプリケーションに応じて、様々な形状、ディスプレイ方式の HMD がコンシューマー向けに展開されている。形状に関して、図 1.2a のようなメガネ型、図 1.2b のようなゴーグル型がある。また、前節において、ウェアラブルデバイスとしての HMD の重要な要素について述べた。これらの記述を基に、以下の 2 点に着目する。

- 形状・重さ：装着時の負担・違和感を軽減するためには、メガネのようにコンパクトで軽い方が望ましい。
- 視野角：広視野角にすることで、広い周辺視野を保つことができ、表示できる情報量が増す。

この要素に関して、既存の HMD について分類を行い、特徴および課題について言及する。そして、それらの課題を解決することができる機構であるライトフィールドを応用した HMD のシステムについて着目し、特徴を述べる。

1.2.1 既存のヘッドマウントディスプレイの特徴

既存の HMD に関しての形状、ディスプレイ方式、重さ、視野角についてまとめた。これを表 1.1 に示す。重さに関しては、ヘッドセットのみの重さである。

表 1.1: 既存の HMD の特徴

	形状	ディスプレイ方式	重さ (g)	水平視野角 (度)
PlayStationVR	ゴーグル型	非透過型	610	100
HTC Vine	ゴーグル型	非透過型	555	110
FOVE	ゴーグル型	非透過型	520	87
Oculus Rift	ゴーグル型	非透過型	470	94
Galaxy Gear VR	ゴーグル型	非透過型	463	96
Microsoft HoloLens	ゴーグル型	透過型	579	30
Meta2	ゴーグル型	透過型	420	78
Sony SmartEyeglass	メガネ型	透過型	77	19
EPSON Moverio BT-300	メガネ型	透過型	69	20
Google Glass	メガネ型	透過型	36	14

形状に着目したとき、メガネ型はいずれも軽量である。しかしながら、視野角に着目すると、いずれも視野角は大きくない。これは、視野角と解像度がトレードオフの関係にあるのと、眼を動かせる範囲が制限されているためである。また視野角の大きな HMD に着目すると、いずれもゴーグル型で重量である。これは、レンズの焦点距離に応じて、ディスプレイとレンズの距離を離さなくてはならないからである。ゆえに、表のような既存の HMD において、軽量コンパクトでかつ視野角の大きい HMD は既製品としてはない。

このコンパクトでかつ視野角の大きい HMD を実現するために、これらの要素を実現できるポテンシャルをもっている技術に着目する。

1.2.2 ライトフィールドを応用したヘッドマウントディスプレイシステム

そこで、前項で述べた要求を満たすような、HMD を実現するために、ライトフィールドを応用したディスプレイシステムに言及する。そして、本研究において着目するマイクロレンズアレイ方式でのディスプレイシステムに関して述べる。

非共軸光学系のヘッドマウントディスプレイシステムは、旧来のビームスプリッター型の設計から、大きな変化をもたらした。それは光学透過型で、光軸に対して非球面な要素が用いられる [11, 12]。また、Jurik ら [14] は、360 度観察可能なライトフィールドディスプレイを提案した。これは、小さなプロジェクターを配列的に設置することで、各プロジェクターを一つのピクセルとみなすことで実現している。また、Maimone ら [15] はアクリルシートに小さな孔が格子状に配置されているピンホールアレイを用いて、光学透過型の HMD を実現している。多層ディスプレイを用いた、裸眼での多視点立体ディスプレイも提案されている [16]。これは、基本的にバックライトと液晶パネルにより構成されていて、両眼視差、運動視差により、奥行き知覚できるようになっている。そして、Maimone と Fuchs [17] は多層のディスプレイを用いて、光学透過型の小型 HMD を提案している。

また、Lanman ら [18] は、マイクロレンズアレイを用いて、非透過型の HMD を実現している。マイクロレンズアレイとはマイクロレンズが配列になっているレンズのことである。この HMD は、マイクロレンズアレイとディスプレイを用いて、図 1.4 のようなコンパクトな HMD を実現している。マイクロレンズアレイを用いることにより、十分な光量も確保することができる。このデバイスはマイクロレンズアレイを通して、ディスプレイを見ることで、仮想画像を見ることができるという機構である。マイクロレンズアレイ方式の問題点として、ディスプレイの解像度に対して、仮想画像の解像度が低くなってしまうことと、アイボックスが制限されていることである。

壺内 [19] は、眼の瞳孔径サイズに最適化して、ディスプレイ画像を生成することにより、眼から見える画像をよりシャープにする手法を提案した。また、プロトタイプを製作する際に、設置誤差の影響が大きいという点に着目し、マイクロレンズアレイとディスプレイの設置誤差を補正する手法も提案している。この手法により、ディスプレイ上の画像を調整することにより、誤差の値を計算して、その値を反映させた画像生成をすることで、設置誤差を補正している。また、Wang ら [20]

は、マイクロレンズアレイ方式の問題点の一つであるディスプレイの解像度に対して、仮想画像の解像度が小さくなってしまいうという点に着目し、眼から見た時の解像度を向上させる手法を提案している。これはサブピクセルを用いるレンダリング手法であり、人間の視覚の特性を用いて、見た目の解像度を上げることを実現している。また、Huang ら [22] は、被写界深度を動的に変更することができる HMD を作成した。この HMD では我々はより自然に奥行を感じることができる。そして、Pamplona ら [21] は、マイクロレンズアレイ方式のディスプレイを用いて、視力を測定するアプリケーションを製作した。このアプリケーションを用いることで、手軽に視力測定をすることが可能である。

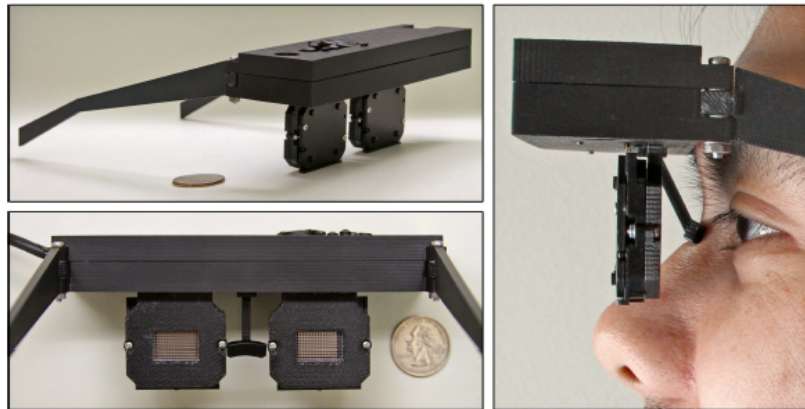


図 1.4: マイクロレンズアレイを用いた HMD のプロトタイプ [18]

本研究において、輝度に制限がなく、特殊なディスプレイを用いる必要のない上に、コンパクトな設計をすることができるマイクロレンズアレイ方式を用いた HMD に着目する。

1.2.3 マイクロレンズアレイ方式の利点と問題点

本研究において、マイクロレンズアレイ方式に着目する。まずマイクロレンズアレイ方式は、コンパクトな HMD を実現できる点について述べる。図 1.5 は単レンズ方式とマイクロレンズアレイ方式を用いた時の HMD の構造を示している。HMD において、同じ距離に仮想画像を出力する場合、ディスプレイとレンズの設

置距離は、レンズの焦点距離に依存する。単レンズ方式の場合、レンズ口径が大きいことから、レンズの焦点距離も大きい。ゆえに、レンズとディスプレイの設置距離を大きくしなければいけない。それに対して、マイクロレンズアレイ方式のとき、レンズ口径が小さいことから、レンズの焦点距離も小さく、単レンズ方式と比較して、レンズとディスプレイの設置距離を小さくすることができる。レンズとディスプレイの設置距離を小さくできるので、HMD のディスプレイ部分を薄くすることができる。

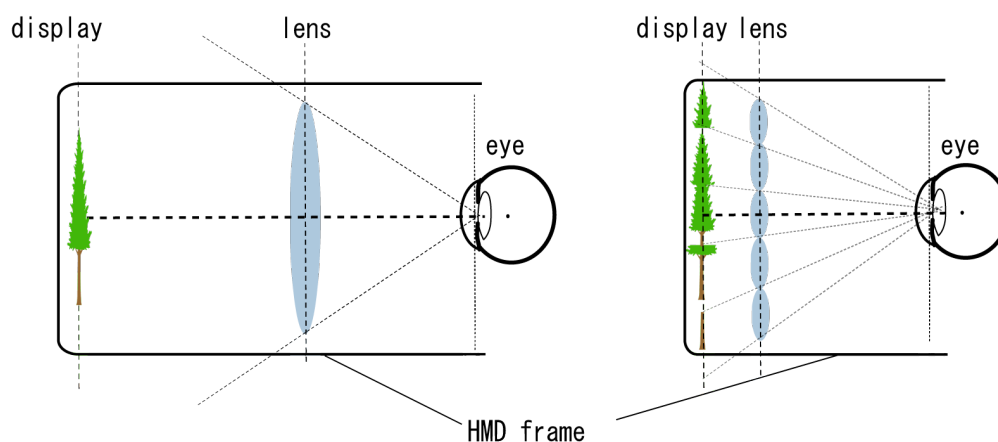


図 1.5: 単レンズ方式（左）とマイクロレンズアレイ方式（右）における HMD のサイズの違い

また、マイクロレンズアレイ方式では、焦点距離が小さくなるほど、ディスプレイの解像度に対して、仮想画像の解像度が小さくなってしまう。ゆえに、マイクロレンズアレイ方式で用いるディスプレイの解像度は大きい方が望ましい。そして、図 1.5 では、焦点距離が小さいほど、デバイスをコンパクトにすることが可能であると述べた。ゆえに解像度とデバイスのコンパクトさはトレードオフの関係にある。

また、マイクロレンズアレイ方式では、広視野角を設定することができる。大きい視野角を設定できる分、広い範囲を注視することが可能となり、大きく眼球移動する。しかしながら、HMD において、眼球移動を制限する距離として、アイボックスがされていて、マイクロレンズ方式の場合、マイクロレンズの口径が小さいことにより、アイボックスは小さい。このアイボックスは HMD において、重要なパ

ラメータでこれは図 1.6 のように求められている。眼球移動することにより、その着目したマイクロレンズアレイとそれに対応するディスプレイ領域の眼球からの位置関係が変化してくる。この変化により、対応していたディスプレイ領域が隣のレンズから見えるようになる。このとき、仮想画像として設定していた画像が適切に見えなくなる。この様子を図 1.7 に示す。図 1.7b のように、眼球移動により、対応していたディスプレイ領域が隣のレンズから見えて、二つの画像が重なり合ってしまう。大きく眼球移動する際、マイクロレンズ方式を用いる場合、このような画像の移り変わりが生じてしまう。

本研究において、このような問題に着目し、眼球移動した場合でも、適切に仮想画像が視認できるような方法について検討する。

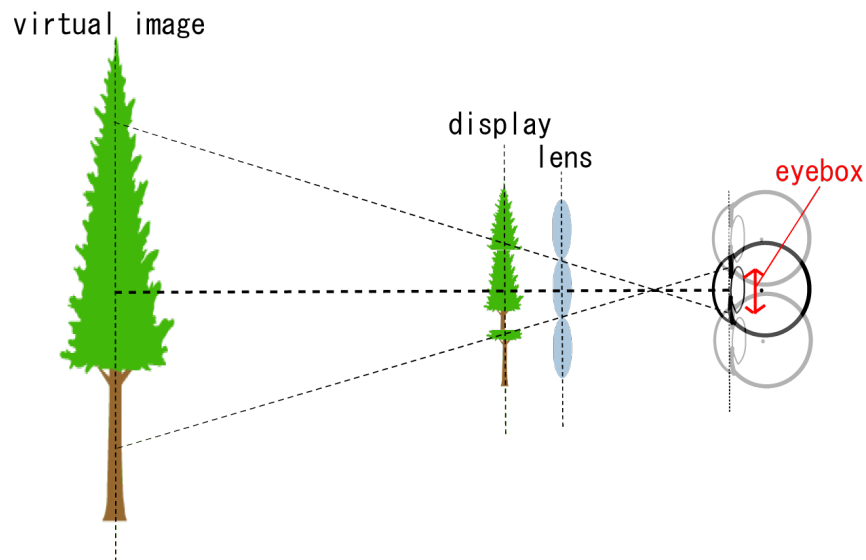
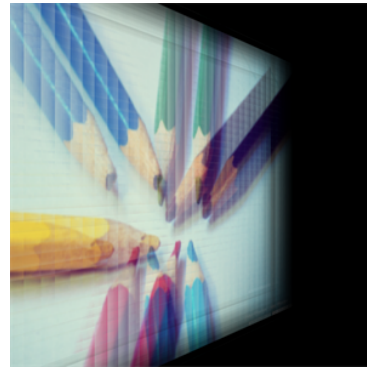


図 1.6: マイクロレンズアレイ方式でのアイボックス。黒で表示された眼はアイボックス内で、灰色で表示された眼はアイボックスの外を表している



(a) 眼球が固定されているとき



(b) 眼球移動するとき

図 1.7: ディスプレイ画像が静的な場合の眼から見える画像

1.3 問題解決へのアプローチ

本研究において、マイクロレンズアレイ方式での HMD の問題点の一つである眼球移動することによって、画像の移り変わりが生じてしまう問題に取り組む。そして、この問題を解決するためには、以下のような 2 段階の手順が必要となる。

1. 眼球移動を検出し、視線の推定をする。
2. 検出した眼球移動に対応した画像生成をする。

眼球移動を検出および視線推定に関して、人間の視線情報は学術的にも、商業的にも利用用途が多くあり、従来から多くの研究がされてきており、また、近年注目されている技術である。第 3 章により詳細を述べる。この視線推定に関して、既存の研究により、要件を満たすことが可能である。そこで、本研究では、この二つの手順の中でも、眼球移動に対応した画像生成に着目する。前項で述べたように、アイボックスが静的な場合、眼球移動すると図 1.7b のように、画像の移り変わりが生じてしまう。そこで、眼球移動に対応させて、ディスプレイ画像を動的に更新することにより、アイボックスを移動させる。このように、眼球移動に対応する。第 4 章により、眼球移動に対応して、動的に画像生成する手法を紹介する。

1.4 本論文の位置づけ

ウェアラブルデバイスとしての HMD を実現するために、マイクロレンズアレイ方式の HMD に着目した。マイクロレンズアレイ方式では、コンパクトで大きな視野角をもつ HMD を実現することができる。大きな視野角をもつ場合、広い範囲で注視することができ、大きく眼球移動する。しかしながら、マイクロレンズアレイ方式を用いた HMD では、眼の動かすことができる範囲であるアイボックスが制限されている。ゆえに、眼球移動に対応して画像生成する必要がある。しかしながら、眼球移動において、動的に対応した画像生成に関して述べられている研究はない。

そこで、本研究において、マイクロレンズアレイ方式を用いた広視野角をもつヘッドマウントディスプレイにおいて、眼球移動に対応したディスプレイの画像生成および、適切に機能するのか評価することを目的とする。

1.5 本論文の構成

以下 2 章では，関連研究と本論文の位置づけについて述べ，3 章では，現状の HMD の問題を解決するためのアプローチのひとつである眼球の姿勢推定について述べ，4 章では，提案する眼球移動に対応した画像生成方法について述べる．そして，5 章でその画像生成システムを用いて正常に機能するのかを評価し，最後に 6 章で結論を述べる．

第 2 章 マイクロレンズアレイ方式の画像生成

本研究では，ヘッドマウントディスプレイのためのマイクロレンズアレイ方式の画像生成に着目する．そこで，マイクロレンズアレイ方式の画像生成の詳細とその画像生成システムに関して述べる．

2.1 マイクロレンズアレイ方式の画像生成

Lanman ら [18] はヘッドマウントディスプレイのためのマイクロレンズアレイ方式の画像生成手法を提案している．そこで，その画像生成手法の光学的な設計および，画像生成システムに関して述べる．

2.1.1 光学的設計

マイクロレンズ方式での光学的設計を述べる上で，その基礎となる単レンズ方式についての光学的設計についてまず述べる．その後，マイクロレンズアレイ方式における光学的設計に関して説明していく．

単レンズ方式

単レンズの場合，図 2.1 のような設計となる．単レンズを用いたヘッドマウントディスプレイは従来から用いられている設計で，代表的なヘッドマウントディスプレイである Oculus Rift も基本的には同様の構造をしている． d_l はレンズとディスプレイとの距離， f は焦点距離， d_e は眼とレンズの距離，ディスプレイ領域の大きさは w_s ，レンズの大きさは w_l とする．このような構造では，図 2.1 のように，ユーザーはレンズを通じてディスプレイを見ることで，仮想画像を見ることができる．眼から仮想画像までの距離 d_o ，拡大率を M ，仮想画像の大きさを w_o とすると，それぞれの値は以下のようにして求めることができる．

$$d_o = \frac{f \cdot d_l}{f - d_l} + d_e \quad (2.11)$$

$$M = \frac{d_o - d_e}{d_l} \quad (2.12)$$

$$w_o = M \cdot w_s \quad (2.13)$$

また，視野角 α は以下のように定義できる．最小値を取得する式の左側がレンズの大きさにより，見える仮想画像が制限される場合を表していて，右側がディスプレイの大きさにより仮想画像が制限される場合を表している．

$$\alpha = 2 \arctan \left[\min \left(\frac{w_l}{2 \cdot d_e}, \frac{M \cdot w_s}{2 d_o} \right) \right] \quad (2.14)$$

この式のように，視野角の大きさはレンズの大きさと眼とレンズの距離に依存することがわかる．また，解像度は，解像度 $N_p[pix]$ は，用いるディスプレイのピクセルピッチを p とすると以下のように求めることができる．最小値を取得する式の左側はレンズによって見える仮想画像が制限されるときを表していて，右側の式は，ディスプレイの大きさによって制限されるときを表している．

$$\begin{aligned} N_p &= \left\lfloor \frac{2 d_o \cdot \tan(\alpha/2)}{M \cdot p} \right\rfloor \\ &= \min \left(\left\lfloor \frac{d_o \cdot w_l}{d_e \cdot M \cdot p} \right\rfloor, \left\lfloor \frac{w_s}{p} \right\rfloor \right) \end{aligned} \quad (2.15)$$

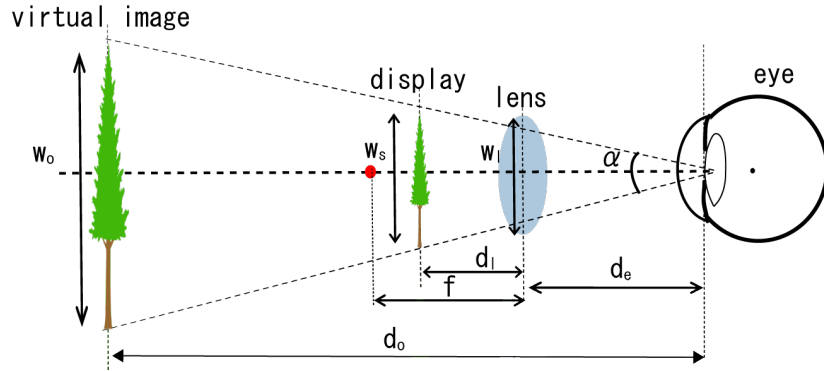


図 2.1: 単レンズ方式における基本的構造．図の場合，ディスプレイの大きさによって，視野角が制限される場合を示している．

また，眼球の設置位置を制限する範囲として，図 2.2 のようにアイボックスが定義できる．単レンズにおいて，この値が大きいほど眼球は大きく動いても，仮想画

像を見ることができる．このアイボックス w_e は

$$\begin{aligned} w_e &= \left| \left(\frac{d_o}{d_o - d_e} \right) w_l - \left(\frac{d_e}{d_o - d_e} \right) w_o \right| \\ &= \left| \left(\frac{d_o}{d_o - d_e} \right) w_l - \left(\frac{d_e}{d_l} \right) w_s \right| \end{aligned} \quad (2.16)$$

となる．このように，アイボックスはレンズの大きさに依存していることがわかる．これらのパラメータをもとに単レンズにおいて，見せたい仮想画像から，ディスプレイ画像を生成することができる．

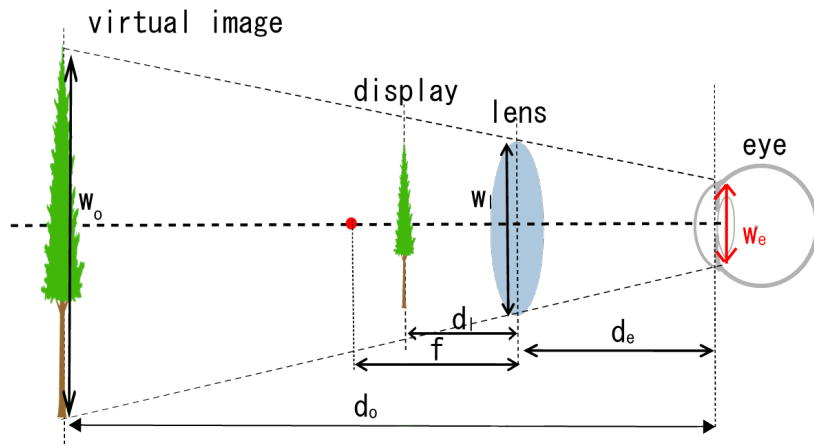


図 2.2: 単レンズ方式でのアイボックス

マイクロレンズアレイ方式

マイクロレンズアレイはレンズを配列にしたものであるので，部分的には前項の単レンズの場合と同様の原理である．ゆえに，マイクロレンズアレイ方式も同様に，マイクロレンズアレイを通してディスプレイを見ることで，仮想画像を見ることができる．今回ディスプレイの大きさを $w_s \geq \left(\frac{d_e + d_l}{d_e} \right) w_l$ とすると，マイクロレンズアレイ方式の場合，レンズの個数を N_l としたとき，視野角 α は，

$$\alpha = 2 \arctan \left(\frac{N_l \cdot w_l}{2 \cdot d_e} \right) \quad (2.17)$$

また、解像度 $N_p[\text{pix}]$ は、

$$\begin{aligned} N_p &= \left\lfloor \frac{2d_o \cdot \tan(\alpha/2)}{M \cdot p} \right\rfloor \\ &= \left\lfloor \frac{d_o \cdot N_l \cdot w_l}{d_e \cdot M \cdot p} \right\rfloor \end{aligned} \quad (2.18)$$

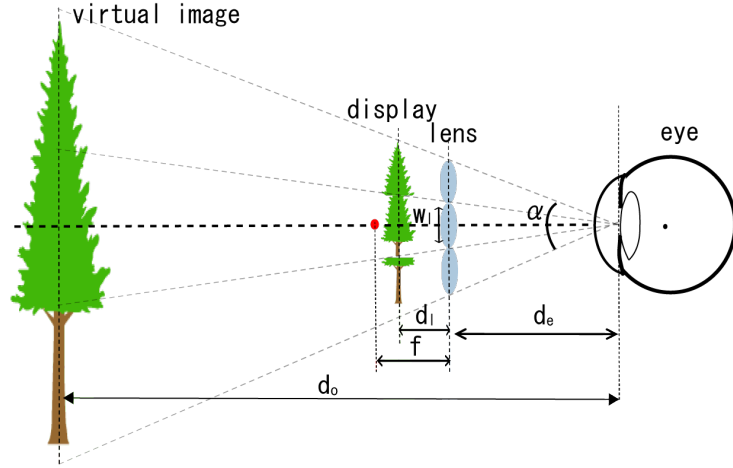


図 2.3: マイクロレンズアレイ方式における基本的構造

マイクロレンズアレイ方式でのアイボックス w_e は一つのマイクロレンズに対応する仮想画像の大きさを Δw_o 、その部分的な仮想画像領域に対応するディスプレイ領域の大きさを Δw_s 、として以下のように求めることができる。

$$\begin{aligned} w_e &= \left| \left(\frac{d_o}{d_o - d_e} \right) w_l - \left(\frac{d_e}{d_o - d_e} \right) \Delta w_o \right| \\ &= \left| \left(\frac{d_o}{d_o - d_e} \right) w_l - \left(\frac{d_e}{d_l} \right) \Delta w_s \right| \end{aligned} \quad (2.19)$$

となる。マイクロレンズアレイ方式の場合、マイクロレンズの口径が小さいため、アイボックスは小さくなる。また、マイクロレンズアレイ方式の場合、初期位置でのアイボックスから、隣のアイボックスに移動する場合、アイボックスとアイボックスの境目で画像の移り変わりが生じる。画像の移り変わりは、着目したマイクロレンズから見える仮想画像と、隣のレンズから見える仮想画像とが重なって見えて

しまい、見せたい仮想画像が見えなくなってしまう問題が生じる。

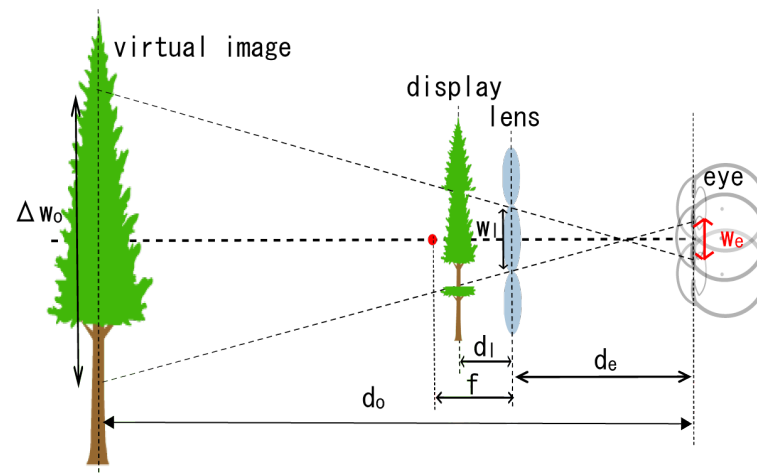


図 2.4: マイクロレンズアレイ方式でのアイボックス

■**分析** また、図 2.5 に眼とレンズの距離と視野角およびアイボックスの関係を示す。ここでは、その他のパラメータを表 2.1 に示している。図 2.5 より、眼とレンズの距離が小さいほど、視野角は大きくなり、コンパクトで広視野角の両立を実現することができる。しかしながら、眼とレンズの距離が小さいほどアイボックスは小さくなっていくことが確認できる。すなわち、コンパクトにすることで、アイボックスが小さくなっていくため、眼球が少し動いただけで、画像の移り変わりが生じてしまう。このように、視野角とアイボックスはトレードオフの関係にある。

本研究において、HMD をメガネと同等の薄型に設計するため、眼とレンズの距離を 12mm に設定する。その時の視野角は約 120 度で大きく、アイボックスの大きさは約 4.5mm と非常に小さくなる。本研究に関して、このような小さいアイボックスに対して、ディスプレイ画像を動的に更新していくことにより、眼球移動に対応する。

表 2.1: その他のパラメータ

変数名	値
レンズの一つの大きさ w_l	1.0 mm
レンズの個数 N_l	41×41
レンズとディスプレイの距離 d_l	2.6 mm
焦点距離 f	2.6175 mm
レンズと仮想画像の距離 $d_o - d_e$	388 mm

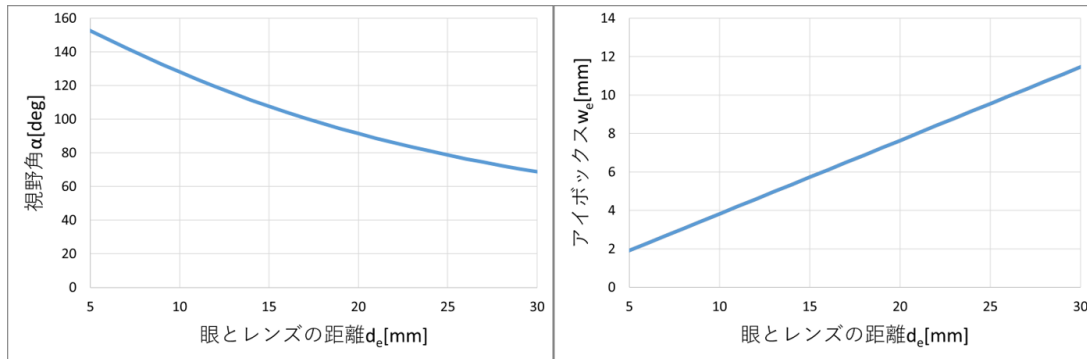


図 2.5: 眼とレンズの距離と視野角の関係およびアイボックスの関係

2.1.2 画像生成システム

前節で述べた，光学的設計に基づき，マイクロレンズ方式における画像生成システムを作成した．この計算は各ピクセルごとに計算する．一つのピクセルに着目したときの計算手順を以下に示す．また，その時の光線の例を図 2.6 に示す．

1. ピクセル座標を求める．
2. ピクセル座標に対する着目レンズを求める．
3. 着目レンズ中心とピクセルを結ぶ直線と仮想画像との交点を求める．
4. 仮想画像上の交点の画素値を着目ピクセルの画素値として取得する

一つのピクセルに着目し，まず，ディスプレイの大きさに基づいて，ピクセル座標を求める．そして，そのピクセル座標と対応するレンズを求める．その後，着目レンズ中心とピクセル座標を結ぶ直線と仮想画像上の交点を計算する．仮想画像上の交点の画素値がディスプレイでの着目ピクセルの画素値となる．これを各ピクセルごとに計算し，一つの画像として出力する．

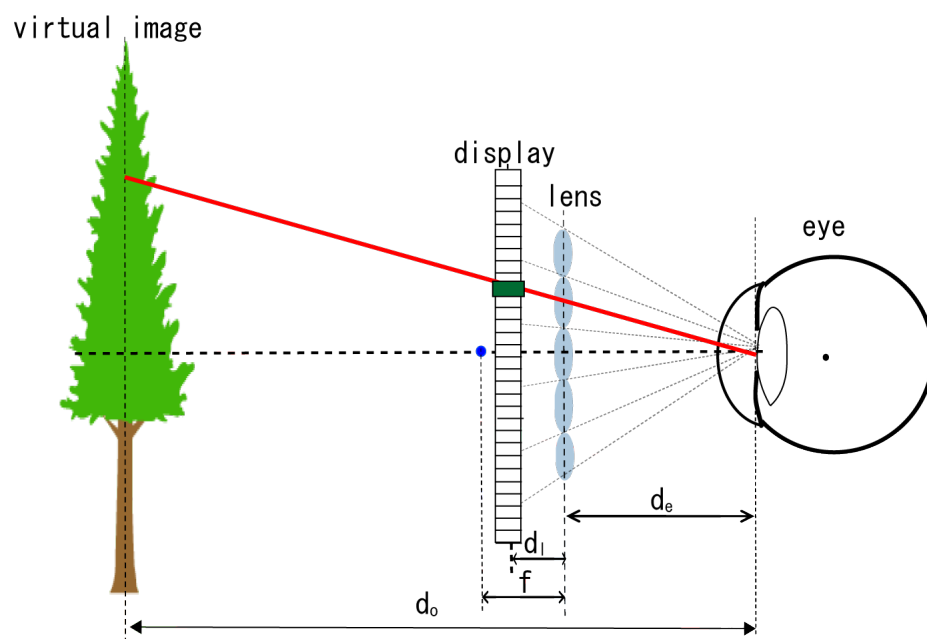
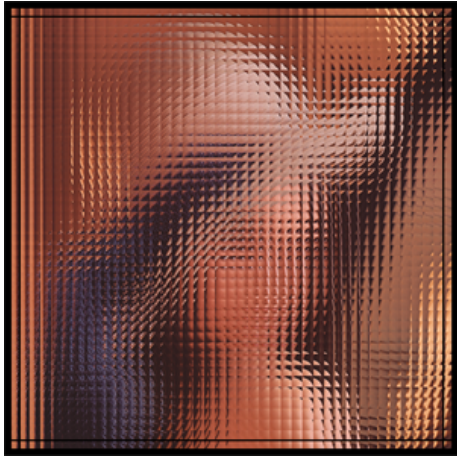


図 2.6: 着目ピクセルでの入射する光線

そして、このシステムを用いて画像生成したディスプレイ画像とシミュレーションにより出力した眼から見える画像を示す.



(a) ディスプレイ画像



(b) 眼から見える画像

図 2.7: 出力画像

第 3 章 眼球の姿勢推定

マイクロレンズ方式でのヘッドマウントディスプレイの問題解決へのアプローチの手順の一つとして、眼球の姿勢推定があり、それについて調査した。以下に眼科学、模型眼、および眼球検出と視線計測について述べていく。

3.1 眼科学

まず、眼球の姿勢推定のために、眼球の構造に関する知見を得る必要がある。そこで、以下に眼球およびその運動に関して述べていく。

3.1.1 眼球

図 3.1(a) は眼を正面から見た時の写真で、図 3.1(b) は人間の眼の断面図である。人間の眼は厳密には球ではなく、図 3.1(b) のような曲率の異なる二つの球体を重ね合わせた形になっている。眼球の壁は 3 層からなっていて、最内層の網膜で視覚情報処理をする。また、光が網膜に達するまでには、主に、角膜、眼房水、水晶体、硝子体を通過する [23, 24]。そこで、瞳孔と水晶体について着目し、その特徴を述べていく。

- 瞳孔

瞳孔は虹彩の中央にある小さな孔で、光はこの孔を通り、網膜に達する。瞳孔の機能は周辺光をさえぎることにより、入射光量を調節することである。また、明るくなることで、瞳孔が縮小する反射を対光反射という。また、光が弱くなれば、瞳孔は散大する。このような瞳孔の作用から、瞳孔径は 2 ～ 8 mm まで変化し、眼への入射光量を調節している。

- 水晶体

水晶体は虹彩の後ろにある凸レンズで、毛様体が収縮することにより曲率が変わる。このように曲率を変化させて、眼の屈折力を変化させることを調節 (accommodation) という。正常眼での安静状態において、無限遠の像が網膜上に結ばれるようになっている。毛様体が収縮すると水晶体の弾性で、水

晶体が厚くなり、屈折力が増す。この作用により、近方に焦点が合うようになる。

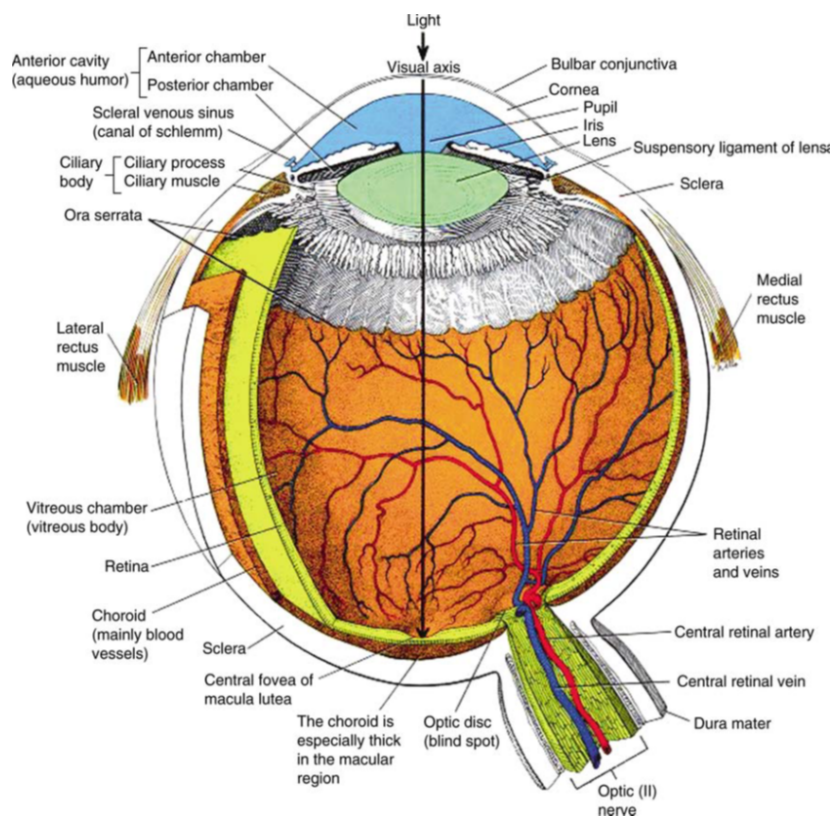


図 3.1: 眼球モデル [25]

3.1.2 眼球運動

眼球運動は大きく衝動性眼球運動と滑動性眼球運動に大別される。そこで、以下に、それらの特徴に関して述べる [26]。

- 衝動性眼球運動 (saccadic eye movement)

周辺視野にみえる対象を中心窩でとらえる時におこる速度の速い眼球運動である。衝動性眼球運動には二つの機能があり、一つは、ある眼球の位置から

別の位置へできるだけ速く移動させることである。もう一つは移動した新たな眼球の位置を維持し続けることである。

- 滑動性眼球運動 (smooth pursuit eye movement)

ゆっくり動く視覚対象物の網膜像を中心窩付近に維持し、その動きに合わせて視線を滑らかに動かすときにおこる眼球運動である。

3.2 模型眼

屈折系の実測値あるいはそれに近い値を基に作例される眼球光学系の標準的な眼球モデルを模型眼 (schematic eye) と言う。模型眼を用いることにより、理論的取り扱いを簡素化できるため、古くより、多種の模型眼があり、用いられている。最も広く参照されている模型眼は図 3.2 のような Gullstrand の眼球モデルである [27]. Gullstrand モデルは多くの眼科学や光学的な要素が考慮されている。このモデルでの、光線の経路を決める重要なパラメータは、角膜とレンズ表面の曲率、それらの位置関係、およびそれらを通過する媒体の屈折率である。

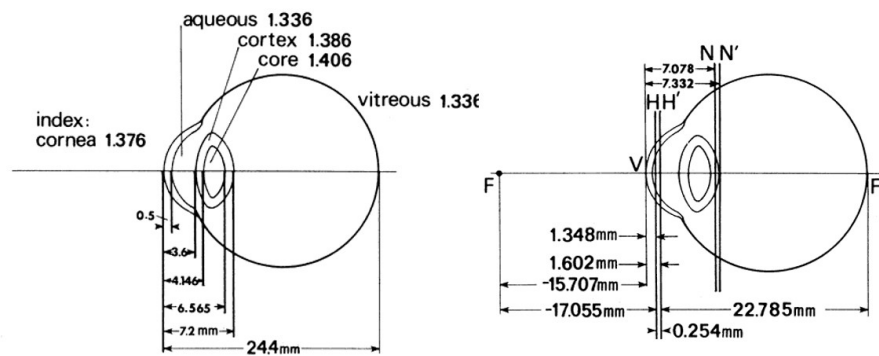


図 3.2: Gullstrand の眼球モデル [27]. 左が媒質の屈折率と屈折面の位置を表して、右が光学的計算に用いられる主要点の位置

さらに簡潔化された眼球モデルは図 3.3 のような省略眼 (reduced eye) として

Listing が提案している [28].Gullstrand の眼球モデルは、6つの屈折面を含んでいるため、計算量が多くなってしまふ。これに対して、Listing が提案した眼球モデルでは、単一の屈折面に簡略化されている。光線は節点を通過して、直進する。結果として、光線が眼球に入射する角度と網膜に入射する角度は等しくなる。このように、Listing の眼球モデルは簡潔化されている。

Adam[29] らは、仮想環境で用いられる模型眼を紹介した。そして、模型眼が光学

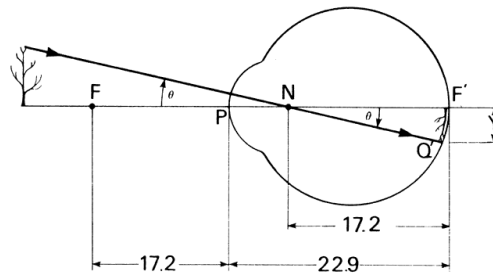


図 3.3: Listing の眼球モデル [28]. 図の F は焦点, P は眼球表面, N は節点を表している

中心や瞳孔間距離を適切に近似できているのか評価した。図 3.4 に示すような模型眼はすべて角膜からの相対距離になっている。また、これらの値は眼球移動しても不変の値である。

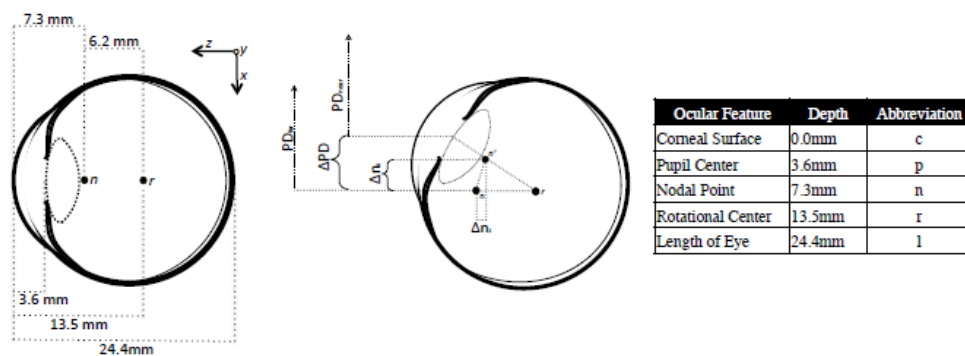


図 3.4: Adam らが実験で用いた模型眼 [29]

3.3 眼の検出と視線計測

人間の顔の最も顕著な特徴の一つとして、眼とその動きがあり、それらは、人の願望やニーズ、認知プロセスを表したり、感情状態、対人関係を表すのに重要な役割を果たす。視覚世界への個人の認識と注意に対する眼の動きの重要性は、情報を収集する手段として認められている。また、ユーザーインターフェイスとしての眼の動きを用いる研究もされている。このように、視線情報は、多くの利用用途があり、注目されている生体情報の一つである。ゆえに、それらの研究は多く取り組まれてきた。Witzner ら [30] は動画像に基づいた眼の検出と視線計測に関して、調査している。動画像に基づいた計測は精度よくまた、ユーザーの負担も非常に少ないため、主流の計測方法である。眼球検出とその追跡に関する研究は、眼の位置の検出と視線の計測に分類でき、それぞれに関して、以下に述べる。

3.3.1 眼の検出

眼の検出のための眼球モデルに関して、主に形状に基づいた方法と特徴に基づいた方法、外観に基づいた方法、それらを組み合わせたハイブリット式の方法がある。形状に基づいた方法は、通常、幾何学的な眼球モデルと類似性の測定の二つの要素から成る。これら二つの要素を基に、眼の検出をする。特徴に基づいた方法は、人間の眼特有の特徴を特定するために、特徴を探索する方法である。また、外観に基づいた方法は、眼とその周囲の色分布またはフィルタ応答によって特徴づけられる測光された値に基づいて、直接眼の検出および追跡をする方法である。ハイブリット方法とは、前で述べた方法のそれぞれの欠陥をなくすために、それぞれの検出方法を組み合わせた方法である。

3.3.2 視線計測

視線の計測方法に関して、特徴に基づいた注視計測を紹介する。これは輪郭、目頭、および眼の画像からの反射像を用いて局所的特徴を抽出し、視線を推定する手法である。この手法の利点として、瞳孔と反射像が容易に検出することができる点である。ゆえに、この特徴に基づいた注視推定は最も一般的なアプローチである。

また、その中でも、三次元モデルベースアプローチは人間の目の構造を幾何学的にモデル化して、3次元の注視方向ベクトルを算出している。図 3.5 はこの手法を用いる時の、構造を表している。眼の幾何学的モデルに使用される外的パラメータは、3次元の眼球位置と光軸である。また、被験者固有の値は角膜半径、視軸と光軸の角度、媒体の屈折率、虹彩半径、および瞳孔中心と角膜中心との間の距離がある。多くの三次元モデルベースの視線推定はカメラのキャリブレーションと光源、カメラ、モニタ位置そして、方向の幾何学的情報が必要となる。通常、角膜中心、または光軸を3次元で推定する。また、多くの場合、眼球および角膜を球面と仮定して、視線方向を推定する。角膜曲率が既知であるならば、一つのカメラと二つの光線を用いることで、角膜中心を推定することが可能である。しかし、眼の固有パラメータが未知であるならば、少なくとも、二つの光源と二つのカメラが必要となる。このように様々な視線計測のアプローチがある。

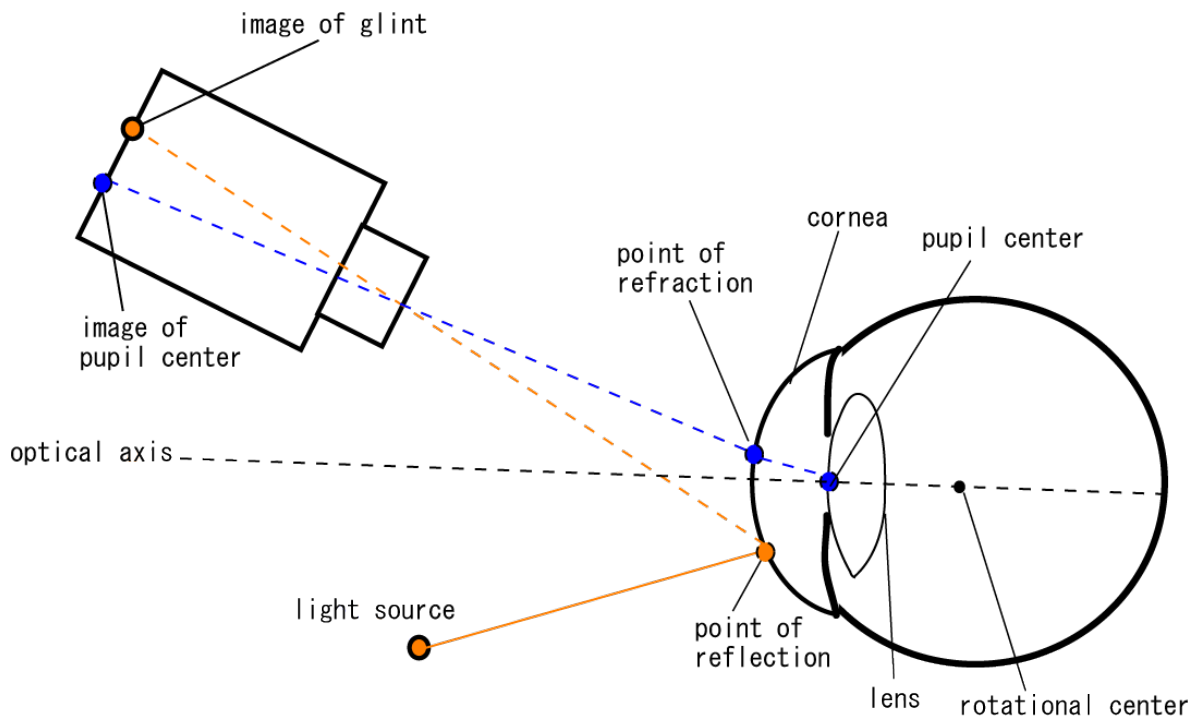


図 3.5: 動画像を用いた視線追跡 [31]

第4章 眼球移動に対応した画像生成

第2章において、眼球がディスプレイの中心を見ている場合の、静的な画像生成手法について述べた。第3章では、視線推定により、眼の視線を求めることができることを確認した。その点を踏まえて、本章では、眼球移動に対応する動的な画像生成手法について提案する。以下にその光学的な設計およびシステムについて述べる。

4.1 光学的設計

ヘッドマウントディスプレイにおいて、眼を動かすことのできる範囲であるアイボックスが定義されていて、マイクロレンズアレイ方式において、一つのマイクロレンズの口径が小さいことから、アイボックスは小さい。眼球移動することにより、このアイボックスを外れてしまうと、画像の移り変わりが生じてしまう。ゆえに、眼球移動に対応させて、図4.1のように、アイボックスを動的に移動させることにより、画像の移り変わりが生じずに、視点移動ができるような動的な画像生成の方法を提案する。

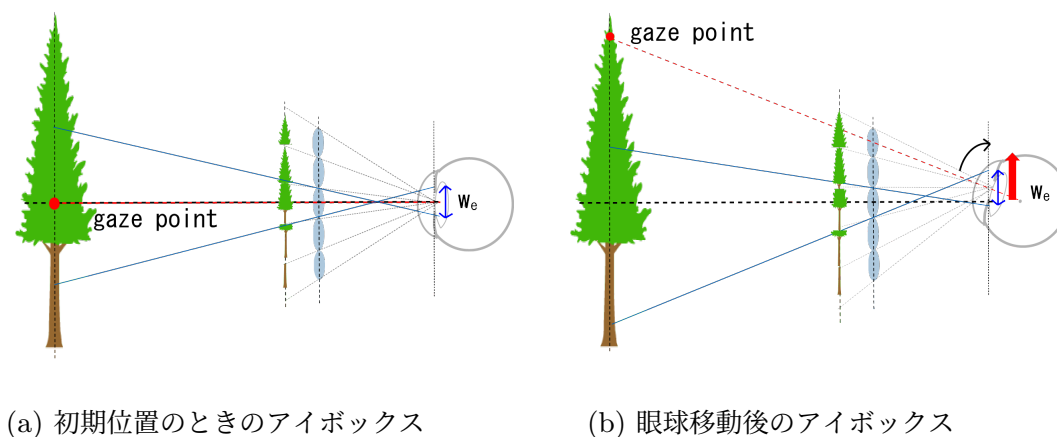


図 4.1: アイボックスの移動

眼球移動するとき、図 4.2a, 4.2b のように、眼から見たマイクロレンズアレイと

ディスプレイとの位置関係が変化することに着目して、その変化を図 4.2b のディスプレイ上の矢印方向のようにディスプレイのピクセルを移動させることにより補正する。このときの眼球移動に対応したディスプレイ領域の変化値を o_e 、ディスプレイとの水平平面での眼の瞳孔中心位置の変化を $\Delta position$ とし、眼球移動することによる眼とレンズの距離の変化を Δd_e とすると、補正値は以下の式のようにになる。

$$o_e = \left(\frac{d_e + \Delta d_e + d_l}{d_e + \Delta d_e} \right) \cdot (\Delta position) \quad (4.11)$$

この値を用いることで、各ピクセルを補正し、眼球移動に対応させることができる。また、このときに見える画像は以下のようにになる。

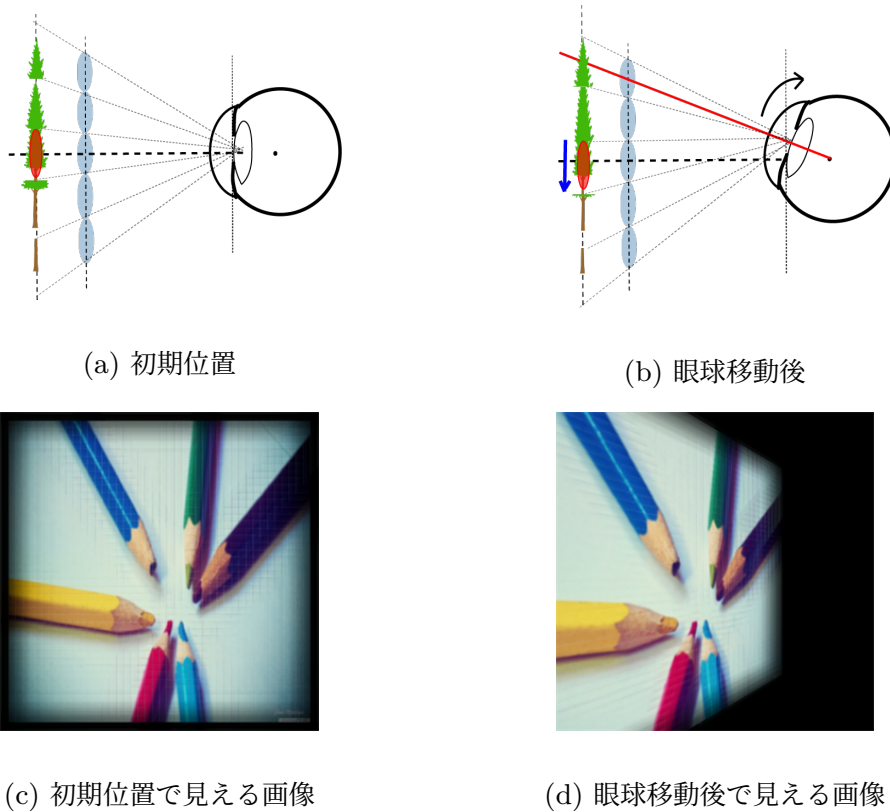


図 4.2: 眼球移動したときのディスプレイ領域の変化（上）と眼球移動したときに見える画像（下）

4.2 画像生成システム

ディスプレイ上の一つのピクセルに着目したときの眼球移動に対応する画像生成のシステムの手順を以下に示す．また，入射する光線の様子を図 4.3 に示す．

1. ピクセル座標を求める．
2. 眼球移動に対応してピクセル座標を補正する．
3. ピクセル位置に対応する着目レンズを求める．
4. 着目レンズ中心とピクセルを結ぶ直線と仮想画像との交点を求める．
5. 仮想画像上の交点の画素値を着目ピクセルの画素値として取得する．

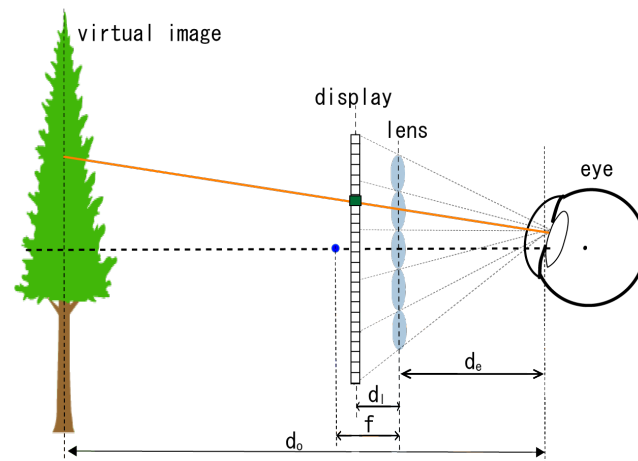


図 4.3: 眼球移動したときの入射する光線

一つのピクセルに着目し，まず，ディスプレイの大きさに基づいて，ピクセル座標を求める．その後，式 4.11 にあるような補正值を用いて補正する．そのピクセル座標と対応するレンズを求める．その後，着目レンズ中心とピクセル座標を結ぶ直線と仮想画像上との交点を計算する．仮想画像上の交点の画素値がディスプレイでの着目ピクセルの画素値となる．これを各ピクセルごとに計算し，一つの画像として出力する．この処理を各ピクセルごとに行う．そして，眼球移動ごとに画像を出力する．

第 5 章 評価

本章では，シミュレーション，カメラでの撮影，ユーザーテストにより，眼球に対応した画像生成について評価した．そして，それぞれの結果を踏まえて結果の考察を述べる．

5.1 シミュレーション

まず，眼球移動に対応した画像生成をシミュレーションにより，評価した．これは，眼球移動に対応していない画像生成と対応している画像生成とを比較し，確認することで，眼球移動に対応した画像生成が正しく機能しているのか確認するために行った．また，このシステムは奈良先端科学技術大学院大学博士課程後期に在籍する Arno Lubke が作成した．

5.1.1 システム

マイクロレンズ方式での画像生成に基づいて出力した画像を読み込み，眼球モデルのパラメータに基づいて，網膜上にどのように投影されるか計算する．網膜上に投影される画像を計算するために，網膜上のピクセル一つずつに着目し，その画素値を求める．図 5.1 はその手順を表したものである．まず，網膜上のピクセル座標を計算する．そして，そのピクセルに入射する光線を計算していく．しかし，入射する光線は一つに定まらないので，指定した数の光線を計算し，それぞれの計算で取得した画素値を平均化する．光線の計算方法は，瞳孔径内の一様なランダムな点を求める．その点と網膜上のピクセルを結ぶ光線を計算する．その光線と交わるマイクロレンズを求めて，ディスプレイとの交点を求める．そして，そのディスプレイ画像上の交点の画素値を取得する．この画素値を光線のサンプル数で平均化し，網膜上のピクセルの画素値とする．この処理を各ピクセルごとに行い，画像を出力する．そして眼球を移動させて，その移動を反映させて，再度，これらの処理をする．これらの繰り返しにより，眼から見える動画像を得ることができる．

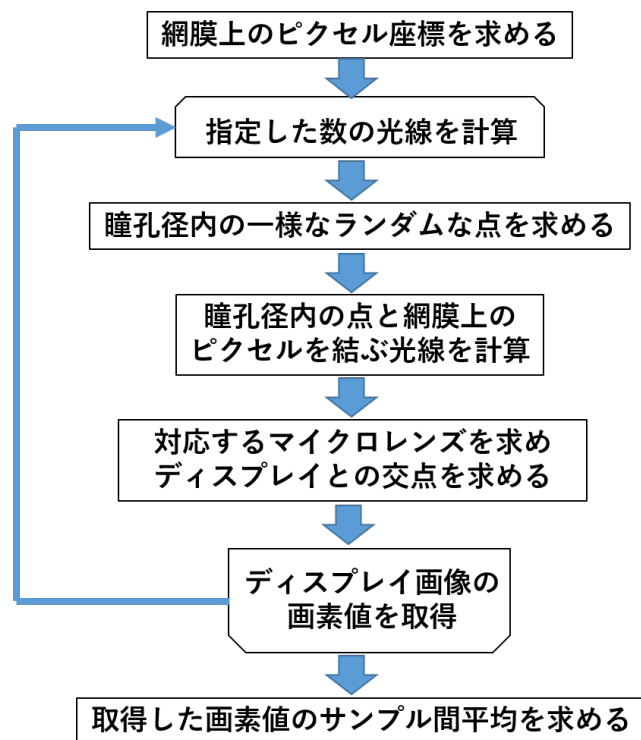


図 5.1: 網膜上の各ピクセルでの計算

5.1.2 条件

すべての実験では，Adam[29] の模型眼を参考に図 5.2 のような模型眼を用いる．また，表 5.1，表 5.2 にそれぞれシミュレーションの中で用いる眼球，ディスプレイのパラメータを示す．

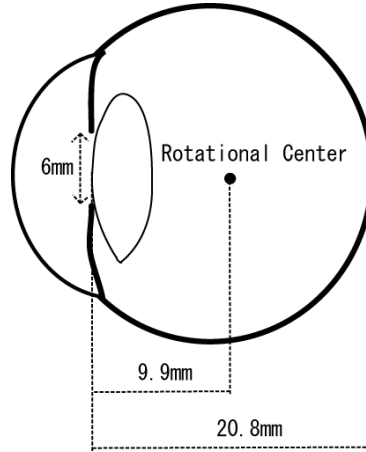


図 5.2: 実験で用いる眼球モデル

表 5.1: シミュレーションで用いる眼球のパラメータ

変数名	値
回転半径	9.9 mm
瞳孔から網膜までの距離	20.8 mm
瞳孔径	6 mm
一つの網膜上の画素に対して取得する光線数	64

また，シミュレーションで用いる座標系を図 5.3 に示す．眼の回転中心が原点にあり，初期状態の視線は z 軸の正方向と等しくなる．そして， y 軸中心に眼球を回転させる角度を θ とし，そこから， x 軸中心に眼球を回転させる角度を ϕ とする．

表 5.2: シミュレーションで用いるディスプレイのパラメータ

変数名	値
レンズの一つの大きさ w_l	1.0 mm
レンズの個数 N_l	41×41
レンズとディスプレイの距離 d_l	2.6 mm
焦点距離 f	2.6175 mm
眼と仮想画像の距離 d_o	400 mm
眼とレンズの距離 d_e	12 mm
ディスプレイピクセルピッチ p	0.0317 mm/pix
ディスプレイの解像度	1600×1600 pix
視野角 α	119 度

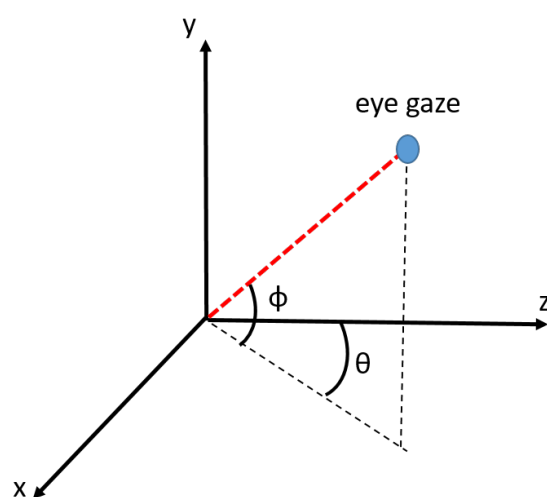


図 5.3: シミュレーションで用いる座標系

5.1.3 結果

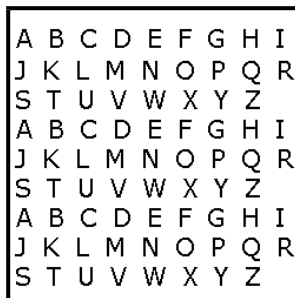
仮想画像に人物画を用いた場合と、文字列を表示した場合のシミュレーションの結果を表 5.3 に示す。眼球が 20 度回転したとき、眼球移動に対応していない場合、画像の移り変わりが顕著に生じているのに対して、眼球移動に対応している場合、見せたい画像を確認することができる。そして、眼球が 40 度回転したとき、眼球移動に対応していない画像生成に注目した場合、先ほどの眼球が 20 度回転したときと比較すると、画像の重なりが軽減しているように見える。これは、最初に位置していたアイボックスから、となりのアイボックスに移動したためである。そして、眼球が縦方向に回転した場合でも、同様に眼球移動に対応した画像生成において、見せたい画像を適切に見せることができている。また、ターゲット画像が文字列のときも、人物像と同様の結果となっている。



(a) ターゲット画像



(b) 初期位置, 角度 (0,0)



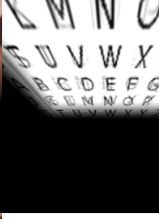
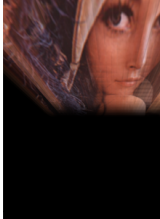
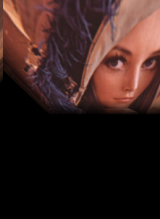
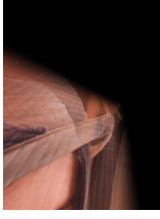
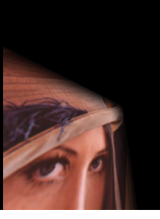
(c) ターゲット画像



(d) 初期位置, 角度 (0,0)

図 5.4: ターゲット画像と初期位置での結果

表 5.3: シミュレーション結果

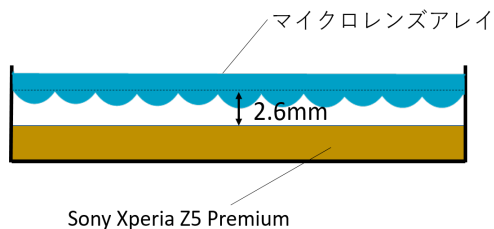
角度 (ϕ, θ)	人物画		文字	
	Static	Dynamic	Static	Dynamic
(20,0)				
(40,0)				
(0,-20)				
(0,-40)				
(40,40)				

5.2 カメラによる撮影

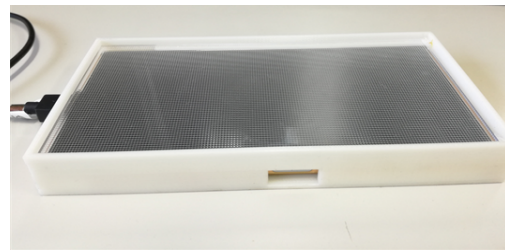
人間の眼を用いて、正確な距離と角度を計測して実験することが困難であるため、カメラでの撮影により、実環境において眼球に対応した画像生成が正しく機能するのか評価した。以下に、実験に用いる機材、条件、結果を示していく。

5.2.1 実験に用いる機材

ディスプレイとして、Sony Xperia Z5 Premium[32] を使用し、3D プリンタで作成したケースに、ディスプレイと、マイクロレンズアレイを図 5.5a のような構成で設置している。完成したものが図 5.5b のようなプロトタイプである。用いているディスプレイの解像度は $3860 \times 2160 \text{pix}$ 、ピクセルピッチは $0.0317 [\text{mm}/\text{pix}]$ である。マイクロレンズアレイは各マイクロレンズの直径が 1mm のものを用いている。そして、人間の眼の瞳孔に該当する部分として、図 5.6a のようなカメラマスクを用いている。このマスクは孔の直径を 6mm に設定している。そして、正確な角度を計測するため、図 5.6b のような角度の調節可能なカメラスタンド [33] を使用した。これらの機器を用いて、図 5.6c のように設置し、撮影を行った。



(a) プロトタイプの構成



(b) プロトタイプの外観

図 5.5: プロトタイプ



(a) カメラマスク



(b) カメラスタンド



(c) 設置したときの外観

図 5.6: 撮影環境

5.2.2 条件

カメラ撮影で用いるパラメータを以下に示す．回転中心は角度調節可能なカメラスタンドの回転中心に依存するため，カメラマスクからディスプレイ側に 6.5mm の場所に設定した．また，視野角は 119 度に設定しているが，カメラの画角に制限されているため，視野角よりも見える範囲が小さくなっている．また，座標系に関して，シミュレーションと同様の図 5.3 のような座標系を用いた．

表 5.4: カメラ撮影で用いるパラメータ

変数名	値
レンズの一つの大きさ w_l	1.0 mm
レンズの個数 N_l	41×41
レンズとディスプレイの距離 d_l	2.6 mm
レンズの焦点距離 f	2.6175 mm
眼と仮想画像の距離 d_o	400 mm
眼とレンズの距離 d_e	12 mm
ディスプレイピクセルピッチ p	0.0317 mm/pix
カメラマスク直径	6 mm
回転半径	6.5 mm
視野角 α	119 度

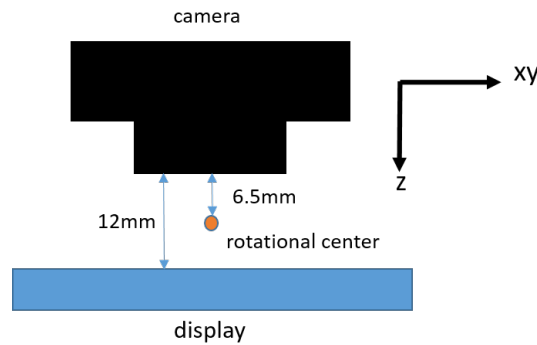


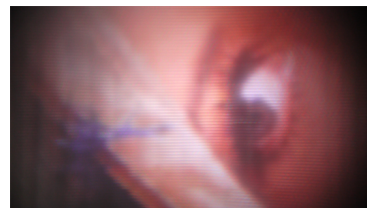
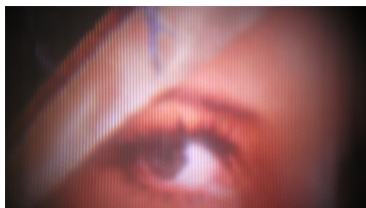
図 5.7: 撮影条件

5.2.3 結果

以下にターゲット画像および、カメラで撮影した画像を示していく。今回、カメラ角度は 3.75 度ずつ回転させ、眼球移動に対応していない画像生成を Static, 眼球移動に対応した画像生成を Dynamic とした。表 5.5 において、x 軸および y 軸を中心に回転させた場合、Static のとき、角度が大きくなるにつれて、画像の移り変わりの影響が大きくなっていることが確認できる。これに対して、Dynamic のとき、見せたい画像を適切に撮影できていることが確認できた。また、どの方向においても、眼球移動に対応していない画像生成は、回転角度が大きくなるにつれて、画像の重なりが大きくなっていき、眼球移動に対応する画像生成では、見せたい画像を適切に見せることができていることを確認できた。



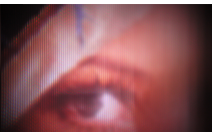
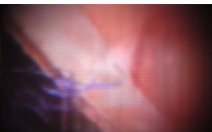
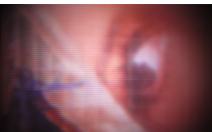
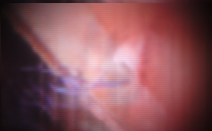
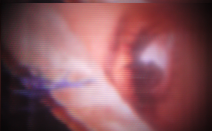
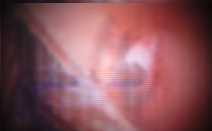
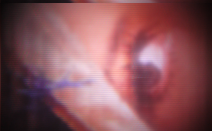
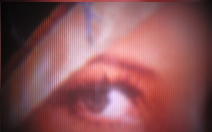
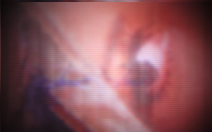
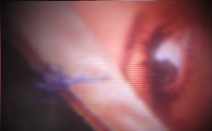
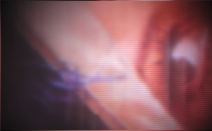
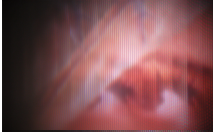
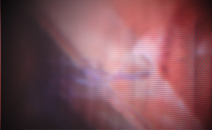
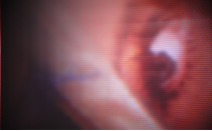
(a) ターゲット画像



(b) y 軸中心回転での初期位置, 角度 (0,0) (c) x 軸中心回転での初期位置, 角度 (0,0)

図 5.8: ターゲット画像と初期位置での出力画像

表 5.5: x および y 軸中心に回転するときのカメラでの撮影結果

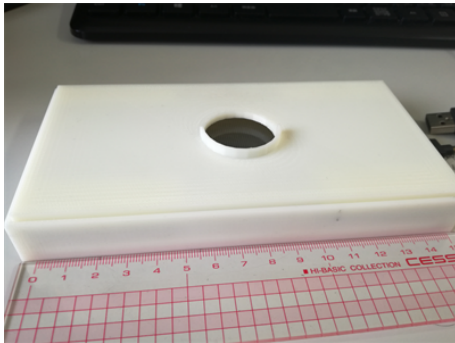
角度 [deg]	y 軸中心		x 軸中心	
	Static	Dynamic	Static	Dynamic
+15				
+11.25				
+7.5				
+3.75				
-3.75				
-7.5				
-11.25				
-15				

5.3 ユーザーテスト

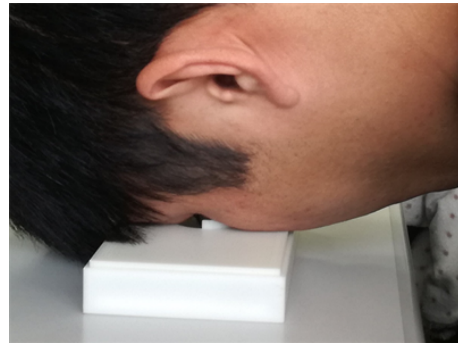
最後に、ユーザーテストにより、実際の人間の眼球を用いた環境で、眼球移動に対応した画像生成が適応し、機能するのか確認した。

5.3.1 実験環境

プロトタイプとその構造に関しては、図 5.5b と図 5.5a と同様の構造で、ユーザーには、図 5.9a のようなプロトタイプを用いて、図 5.9b のように中心の孔からディスプレイを見てもらい実験した。



(a) プロトタイプ



(b) ディスプレイを見る様子

図 5.9: 実験環境

5.3.2 テスト内容

このテストの目的は、眼球移動に対応する画像生成と対応しない画像生成を比較することにある。そのためには、眼球移動を検出する必要があるが、現状、視線計測するシステムを構築していない。そこで、視点の位置を指定し、ユーザーにはその点を見てもらうことで、視点の位置を既知とし、その上でその視点に対応した画像生成をする画像と、対応しない画像を比較することにした。具体的な、ユーザーテストの手順を述べていく。

1. 初期位置の設定

このユーザーテストにおいて、眼球の回転中心を固定した状態で、回転移動させることが重要である。ゆえに、最初に初期位置の設定をする。そのために、まず仮想画像が適切に見える位置に眼を位置する。そのとき、図 5.9a のような画像が見える時に眼を固定してもらった。

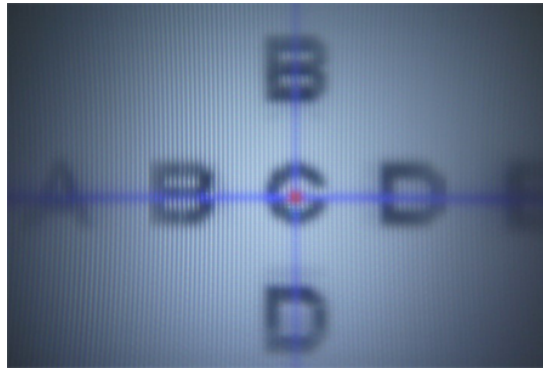


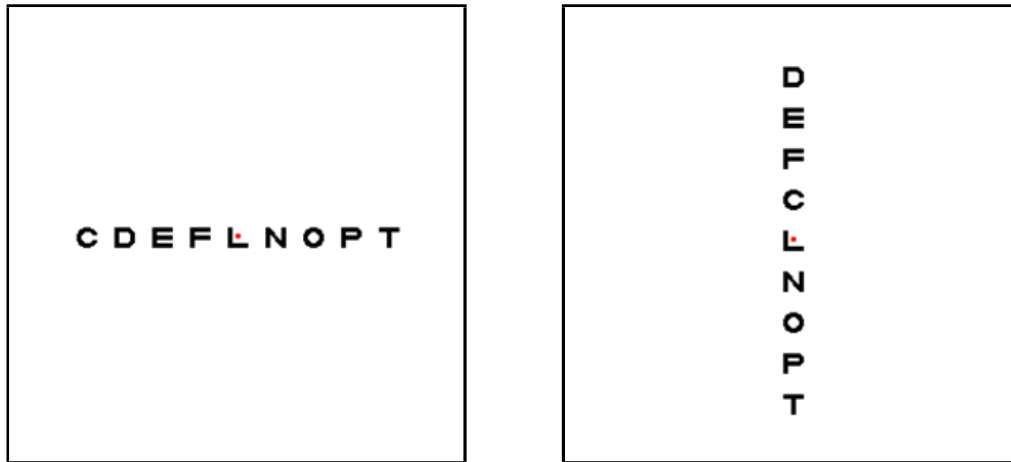
図 5.10: 初期設定のときに見える画像

2. 注視点の追跡

ユーザーの注視点を指定することで、眼球移動に対応できるようにする。そこで図 5.11a もしくは図 5.11b のような画像を仮想画像として用いる。図 5.11a のようなとき、赤い注視点は横方向に移動し、5.11b のようなとき、赤い注視点は縦方向に移動する。注視点は、一定間隔で、4 秒間静止する。ユーザーは常に注視点を追う。注視点は中心から二つ目までの文字まで動き、折り返して、逆方向の中心から二つ目までの文字まで動き、中心に戻る。この一往復を 1 試行とする。また、注視点の速度に関して、十分に眼で追うことのできる速度である $8.3[\text{deg/sec}]$ に設定した [35]。

3. 文字の種類とその鮮明さの回答

一定間隔で注視点が静止するので、静止したところで、その注視点上に位置している文字とその鮮明さについて、ユーザーに回答してもらう。仮想画像上に表示す



(a) 仮想画像例 1

(b) 仮想画像例 2

図 5.11: 用いる仮想画像

る文字に関して、スレネン視標 [36] という、視力を計測する際に用いられる文字である Sloan letters を使用した。この視標に基づいて、視力が 0.006 の人が識別できる大きさで文字を表示した。また、注視点の大きさに関しても、視力 0.006 の人が識別できる大きさに設定した。また、鮮明さに関して、3 段階で以下のような評価をした。

- 0: 文字が重なっていて、文字を一つに断定できない。または文字が見えない。
- 1: 一つの文字は認識できるが、鮮明ではなく、ノイズが入っている。
- 2: 文字が鮮明に見える。

5.3.3 条件

ユーザーテストで用いる、ディスプレイの設定条件は、カメラ撮影のときと同様に、以下になる。また、ユーザーテストの比較条件として、左右どちらの眼を用いるのか、眼球に対応する画像生成か対応していない画像生成を用いるのか、そして、注視点の移動方向を比較した。

また、以下のようにユーザーテストの各パラメータを設定した。

表 5.6: ディスプレイのパラメータ

変数名	値
レンズの一つの大きさ w_l	1.0 mm
レンズの個数 N_l	41×41
レンズとディスプレイの距離 d_l	2.6 mm
レンズの焦点距離 f	2.6175 mm
眼と仮想画像の距離 d_o	400 mm
眼とレンズの距離 d_e	12 mm
ディスプレイピクセルピッチ p	0.0317 mm/pix
視野角 α	119 度

表 5.7: ユーザーテストのパラメータ

変数名	値
表示する文字の識別できる最小視力	0.006
視標速度	8.3 deg/sec
最大注視角度	30 deg

5.3.4 結果

8 人の被験者が実験に参加した。以下にその結果を示す。

眼球移動に対応していない画像生成を用いている時を Static とし，眼球移動に対応している画像生成を用いているときを Dynamic とする。まず，文字を正確に答えることができたかの正答率に関して，注視点が横方向および縦方向に動くときいずれも，すべての文字の位置において，Static の場合よりも，Dynamic の場合の方が，同等もしくはそれ以上の正答率となっている。特に，一番端の文字に関して，Static の場合，被験者は正答することができていなかった。また，鮮明さに関して，注視点が横方向および縦方向に動くときいずれも，Static の場合よりも，Dynamic の場合の方が，同等もしくはそれ以上の正答率となっている。また，ユーザー，左右の眼，注視点の移動方向，Static か Dynamic の画像生成方法を比較要因として，一試行（注視点の一往復）による鮮明さの平均値を ANOVA により検定した結果を表 5.8 に示す。この表より，ユーザーおよび画像生成方法により，有意差が確認できた。

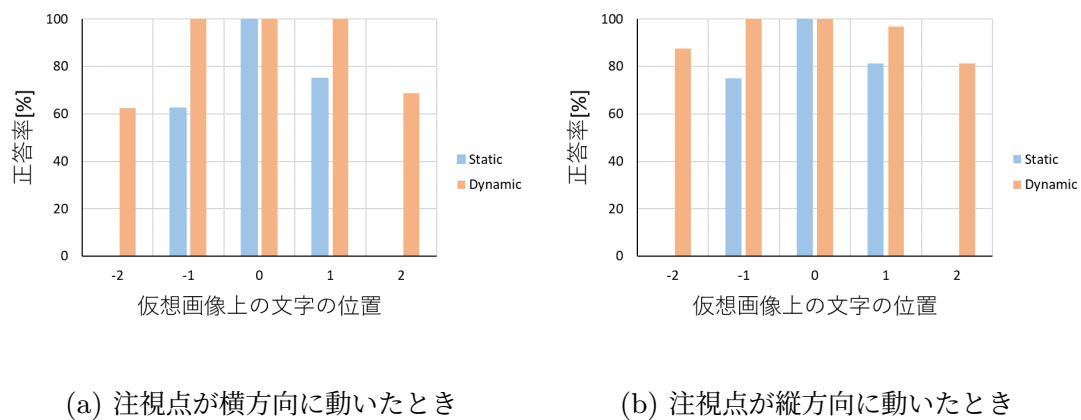
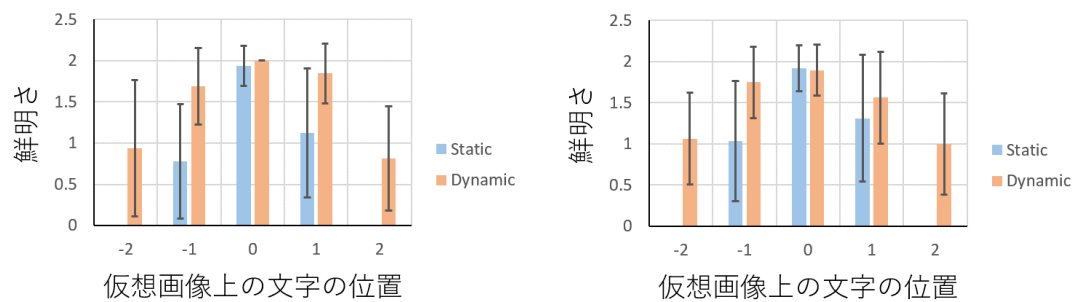


図 5.12: 文字の正答率



(a) 注視点が横方向に動いたとき

(b) 注視点が縦方向に動いたとき

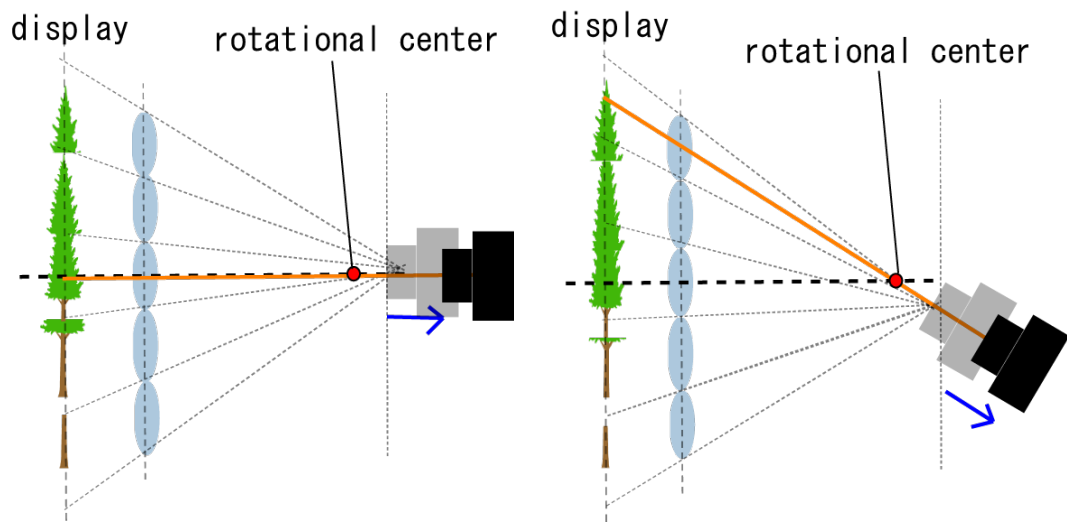
図 5.13: 文字の鮮明さ

表 5.8: 検定結果

要因	p 値
ユーザー	0.006899
左右の眼	0.360551
注視点の移動方向	0.694229
画像生成方法	3.223×10^{-13}

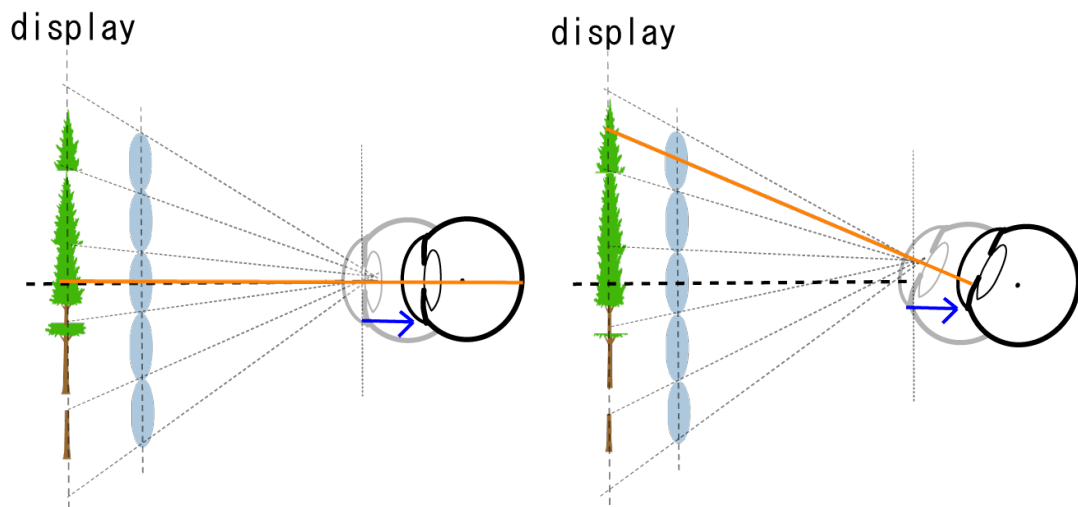
5.4 結果の考察

シミュレーション、カメラでの撮影、ユーザーテストの三つの実験結果を踏まえた上で結果を述べていく。シミュレーションは、眼球移動に対応するアルゴリズムが正常に機能するか確認するために行った。また、カメラでの撮影は、実環境において、眼球移動に対応した画像生成が正しく機能するのかに着目した。そして、ユーザーテストに関しては、実環境において、人間の眼球を用いた場合でも、眼球移動に対応した画像生成が正しく機能するのかに着目した。眼球移動に対応していない場合と対応している場合を比較したとき、いずれの場合も、眼球移動に対応している場合のほうが、滑らかな視点移動ができていると考えられる。カメラでの撮影に関して、眼球移動に対応している画像生成において、眼球の回転角が大きい場合と、小さい場合とでは大きな差異はなかった。ユーザーテストに関しては、眼球移動に対応した画像生成に関して、眼球の回転角が大きい方が、文字の正答率が低く、鮮明でないことも確認できた。カメラ撮影とユーザーテストで異なる結果が表れている。この理由として、眼とレンズの距離に誤差が生じた場合、カメラ撮影のときは回転中心とディスプレイの相対位置が変化しない。それに対して、ユーザーテストの場合、回転中心とディスプレイの相対位置が変化しているからであると考えられる。図 5.14 はカメラ撮影での、図 5.15 はユーザーテストでの眼とレンズの距離に誤差が生じた場合の、注視点がディスプレイ中心にあるときと端にあるときの様子を表している。カメラでの撮影の場合、図 5.14 のように、眼とレンズの距離に誤差が生じていても、回転中心は変化しない。ゆえに注視点がディスプレイ中心にあるときも端にあるときも注視点付近の光線は瞳孔内に入射する。しかしながら、図 5.15 のように、ユーザーテストの場合、眼とレンズの距離に誤差が生じた場合、注視点がディスプレイ中心にあるとき、注視点付近の光線は瞳孔内に入射するが、注視点がディスプレイ端にあるとき、注視点付近の光線が瞳孔内に入射しなくなる。ゆえに、ユーザーテストにおいて、眼球の回転が大きくなるほど、顕著に正答率が低下し、鮮明でなくなったと考えられる。



(a) 注視点がディスプレイ中心にあるとき (b) 注視点がディスプレイ端にあるとき

図 5.14: カメラで撮影のとき



(a) 注視点がディスプレイ中心にあるとき (b) 注視点がディスプレイ端にあるとき

図 5.15: ユーザーテストのとき

第 6 章 結論

本研究では、マイクロレンズアレイ方式を用いた広視野角をもつヘッドマウントディスプレイにおいて、眼球移動に対応したディスプレイの画像生成および適切に機能するのか評価した。マイクロレンズアレイ方式では、コンパクトでかつ視野角の大きな設計が可能であるが、眼とレンズの距離を小さくし、これら二つを同時に満たすことで、アイボックスが小さくなってしまう。そこで、眼球に対応し動的に画像生成することで、アイボックスを眼球移動に合わせて移動させ、適切に見せたい画像をみせることを試みた。そして、シミュレーション、カメラでの撮影、ユーザーテストで、眼球移動に対応した画像生成の評価実験を行った。シミュレーションでは、眼球移動に対応した画像生成が適切に機能するのか確認した。また、カメラでの撮影で、実環境においても適応できるのか確かめた。最後にユーザーテストにより、人間の眼球に適応できるのか確かめた。ユーザーテストにおいて、ユーザーによる鮮明さのばらつきがあった。これは、ユーザーの眼球位置にばらつきがあったと考えられる。

今後の展望として、実際に、視線検出をして、それに対応し動的に画像生成のシステムを構築することである。そして、ユーザーに見せたい画像が見えているのか評価する必要がある。特に、視線計測に多少の誤差が生じて、適切に機能するのかを評価する必要があると考えられる。そして、今回瞳孔径がアイボックス以上になると、ノイズが発生する問題に関して議論してこなかった。ゆえに、そのノイズを取り除くアルゴリズムのもとで、眼球移動に対応したレンダリングのシステムを構築、評価する必要がある。

謝辞

本研究の全過程において、未熟な私に多大なるご指導およびご助言を頂き、研究方針だけでなく、研究に対する姿勢、論文執筆についても多くのご助言を頂きましたインタラクティブメディア設計学研究室加藤博一教授に心より感謝申し上げます。また、副指導教員である光メディアインターフェイス研究室向川康博教授には学内での研究発表会を通じて、貴重なご助言、ご指導頂いたことを心から御礼申し上げます。本研究の遂行にあたり、理解力の乏しい私に対し、終始懇切丁寧なご指導頂きましたインタラクティブメディア設計学研究室 Alexander Plopski 助教に深く感謝致します。様々な場面で、本研究に対し貴重なご指導、ご助言頂きましたインタラクティブメディア設計学研究室武富貴史助教に心より感謝申し上げます。研究のみならず、発表方法や発表に対する姿勢について、貴重なご指導頂きましたインタラクティブメディア設計学研究室 Christian Sandor 准教授に心より感謝申し上げます。研究のみならず、研究室での活動全般にわたって様々なご助言を頂きましたインタラクティブメディア設計学研究室山本豪志朗客員准教授に心より感謝申し上げます。研究生を送る上で様々なサポートを行って頂いた上野真紀子秘書に心より感謝申し上げます。私では到底作ることができないようなシミュレーションシステムを作成してくださいました Arno Lubke 氏に心より感謝申し上げます。実験の統計的な分析をご指導頂きました Max Krichenbauer 氏に心より感謝申し上げます。そして、研究において、未熟な私に優しく丁寧に指導頂きました壺内貴弘氏に心より感謝申し上げます。また研究室において活発な議論や助言を頂きました先輩、同輩、後輩の皆様に心より感謝申し上げます。最後に、このように研究に励む機会を与えて頂いた両親に心より御礼申し上げます。

参考文献

- [1] Rolland, J.P. and Hua, H., 2005. Head-mounted display systems. Encyclopedia of optical engineering, pp.1-13.
- [2] Sutherland, I.E., 1968, December. A head-mounted three dimensional display. In Proceedings of the December 9-11, 1968, fall joint computer conference, part I (pp. 757-764). ACM.
- [3] Gilboa, P., Gold, A. and Yaeli, J., Elbit Ltd., 1994. Helmet mounted display. U.S. Patent 5,341,242.
- [4] Melzer, J.E., 2000. Head-mounted displays. In Digital Avionics Handbook, Second Edition-2 Volume Set. CRC Press.
- [5] 総務省, 2015. “平成27年度版情報通信白書”
- [6] 塚本昌彦, 2007. 社会の未来を拓くネットワーク情報共有空間: 2. 情報共有空間のためのウェアラブルコンピューティング. 情報処理, 48(2), pp.128-134.
- [7] 清川清, 2010. 展望 1: AR のハードウェア AR 用ヘッドマウントディスプレイ技術. 情報処理, 51(4), p.414.
- [8] MOVERIO BT-300. <http://www.epson.jp/products/moverio/bt300/>.(2017 年 2 月 17 日アクセス)
- [9] Oculus. <https://www.oculus.com/>.(2017 年 2 月 17 日アクセス)
- [10] Goldman Sachs. 2016. Profiles in Innovation – Virtual and Augmented Reality – Understanding the race for the next computing platform. <http://www.goldmansachs.com/our-thinking/pages/technology-driving-innovation-folder/virtual-and-augmented-reality/report.pdf>.(2017 年 2 月 17 日アクセス)
- [11] Cakmakci, O., Thompson, K., Vallee, P., Cote, J. and Rolland, J.P., 2010, February. Design of a free-form single-element head-worn display. In OPTO (pp. 761803-761803). International Society for Optics and Photonics.
- [12] Cheng, D., Wang, Y., Hua, H. and Sasian, J., 2011. Design of a wide-angle, lightweight head-mounted display using free-form optics tiling. Optics letters, 36(11), pp.2098-2100.

- [13] Perlin, K., Paxia, S. and Kollin, J.S., 2000, July. An autostereoscopic display. In Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (pp. 319-326). ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.
- [14] Jurik, J., Jones, A., Bolas, M. and Debevec, P., 2011, June. Prototyping a light field display involving direct observation of a video projector array. In Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), 2011 IEEE Computer Society Conference on (pp. 15-20). IEEE.
- [15] Maimone, A., Lanman, D., Rathinavel, K., Keller, K., Luebke, D. and Fuchs, H., 2014, July. Pinlight displays: wide field of view augmented reality eyeglasses using defocused point light sources. In ACM SIGGRAPH 2014 Emerging Technologies (p. 20). ACM.
- [16] Wetzstein, G., Lanman, D., Hirsch, M. and Raskar, R., 2012. Tensor displays: compressive light field synthesis using multilayer displays with directional backlighting.
- [17] Maimone, A. and Fuchs, H., 2013, October. Computational augmented reality eyeglasses. In Mixed and Augmented Reality (ISMAR), 2013 IEEE International Symposium on (pp. 29-38). IEEE.
- [18] Lanman, D. and Luebke, D., 2013. Near-eye light field displays. ACM Transactions on Graphics (TOG), 32(6), p.220.
- [19] 壺内貴弘, 2015. マイクロレンズアレイを用いたヘッドマウントディスプレイのボケ補正のためのキャリブレーション法. 奈良先端科学技術大学院大学修士論文.
- [20] Wang, X., Deng, Y., Zhang, G. and Wang, Z., 2015, November. Apparent resolution enhancement for near-eye light field display. In SIGGRAPH Asia 2015 Mobile Graphics and Interactive Applications (p. 4). ACM.
- [21] Pamplona, V.F., Mohan, A., Oliveira, M.M. and Raskar, R., 2010, July. NETRA: interactive display for estimating refractive errors and focal range. In ACM transactions on graphics (TOG) (Vol. 29, No. 4, p. 77). ACM.
- [22] Huang, F.C., Chen, K. and Wetzstein, G., 2015. The light field stereoscope:

- immersive computer graphics via factored near-eye light field displays with focus cues. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 34(4), p.60.
- [23] 大野重昭, 澤充 and 木下茂, 2004. 標準眼科学.
 - [24] 田崎京二, 大山正 and 樋渡涓二, 1979. 視覚情報処理. 朝倉書店.
 - [25] Irsch, K. and Guyton, D.L., 2009. *Anatomy of Eyes*.
 - [26] 芋坂, 中澤 and 古賀, 1993. 眼球運動の心理学.
 - [27] Duane, T.D., 1985. *Clinical Ophthalmology*, vol 2.
 - [28] von Helmholtz, H., 1867. *Treatise on Physiological Optics* Vol. III.
 - [29] Jones, J.A., Edeward, D., Tyrrell, R.A. and Hodges, L.F., 2016, March. A schematic eye for virtual environments. In *3D User Interfaces (3DUI)*, 2016 IEEE Symposium on (pp. 221-230). IEEE.
 - [30] Hansen, D.W. and Ji, Q., 2010. In the eye of the beholder: A survey of models for eyes and gaze. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 32(3), pp.478-500.
 - [31] Guestrin, E.D. and Eizenman, M., 2006. General theory of remote gaze estimation using the pupil center and corneal reflections. *IEEE Transactions on biomedical engineering*, 53(6), pp.1124-1133.
 - [32] Xperia Z5 Premium. <http://www.sonymobile.co.jp/xperia/docomo/so-03h/>.(2017年2月17日アクセス)
 - [33] ギア付きジュニア雲台. <https://www.manfrotto.jp/410-junior-geared-head-410>.(2017年2月17日アクセス)
 - [34] Guestrin, E.D. and Eizenman, M., 2006. General theory of remote gaze estimation using the pupil center and corneal reflections. *IEEE Transactions on biomedical engineering*, 53(6), pp.1124-1133.
 - [35] 玉田彰, 樋渡章二 and 三好豊二, 1981. 視標追跡運動における速度, 振幅, 周波数の影響力について. *Equilibrium Research*, 40(1), pp.38-44.
 - [36] Snellen, H., 1873. *Probebuchstaben zur bestimmung der sehschärfe*. H. Peters.