

博士学位論文

ヘッドマウントディスプレイ導光板における
広画角・輝度均一化の研究

2022年3月

宇都宮大学大学院 工学研究科 システム創成工学専攻

中村 俊輝

要旨

ユーザの視界中に拡張現実 (AR) の情報をハンズフリーに表示するヘッドマウントディスプレイの導光板において表示画角拡大と輝度均一化の手法を提案する。導光板の数的モデルを構築し、回折格子と信号光の相互作用領域を考慮して観察者が視認する映像を解析し、広画角及び輝度均一化手法を研究した。

表面掘り込み式の回折格子導光板では導光層を 2 層化しかつ回折格子の溝深さを離散的に変調する手法を提案し、 35° (水平) \times 20° (垂直)の画角で画面内の最小輝度と最大輝度の比である輝度均一性を従来比 1.4 倍とする手法を提案する一方で、理論的にこれ以上の広画角化が困難であることを明らかとした。

そこで同一の場所に複数の回折格子を重畳できる体積ホログラム技術に着眼し、線対称イメージの入力により単層体積ホログラフィック導光板の表示画角を拡大する手法を提案した。提案方法は、入力画像内の線対称点から来る別の光線による相互作用ボリュームの変動を補償し輝度均一性を向上し、従来の表面掘り込み式導光板と比較して約 2 倍の画角である 60° (水平) \times 60° (垂直) に渡って 490 倍の輝度均一性の改善を達成した。

また、線対称イメージ入力法の表示解像性能への向上効果について詳細に検討を行い、提案する線対称イメージ入力法での点像の角度分布は 0.02° 以下に抑制され、従来手法に比べ 92% の改善効果を得られることを明らかとした。

目次

1. 序論	1
1.1 研究背景	1
1.1.1 情報表示デバイス	1
1.1.2 ヘッドマウントディスプレイ	3
1.2 研究目的	4
1.3 本論文の構成	4
2. ヘッドマウントディスプレイ導光板の基本原理	6
2.1 はじめに	6
2.2 ヘッドマウントディスプレイ光学系	6
2.2.1 虚像投影	6
2.2.2 評価指標	8
2.2.3 ヒトの眼の視覚機能	9
2.2.4 接眼光学系	10
2.3 ヘッドマウントディスプレイ導光板	11
2.4 表面掘り込み式回折格子導光板	13
2.4.1 基本原理	13
2.4.2 導光層の多層化	15
2.4.3 表示画像シミュレーション結果	18
2.5 輝度不均一の要因	21
2.6 おわりに	21
3. 溝深さ変調表面掘り込み式回折格子導光板	23
3.1 はじめに	23
3.2 溝深さ変調回折格子導光板	23
3.3 フォトンバジェット解析モデル	24
3.4 回折格子パターン最適化	30
3.5 同定した回折格子構造	32
3.6 光線追跡と電磁波解析シミュレーションによる設計結果の検証	32
3.7 サブ格子領域境界の影響の考察	35
3.8 広面角化・輝度均一化の到達限界の考察	35
3.9 おわりに	40
4. 線対称イメージ入力体積ホログラム導光板	41
4.1 はじめに	41

4.2	体積ホログラム導光板	41
4.3	端面入射体積ホログラム導光板	42
4.3.1	基本コンセプト	42
4.3.2	迷光の発生	43
4.4	導光板解析モデル (ボルン近似)	44
4.5	表示画像シミュレーション結果	50
4.6	線対称イメージ入力法	52
4.7	線対称軸の変位による影響	56
4.8	おわりに	58
5.	体積ホログラム導光板における Off-Bragg 回折と解像性能	60
5.1	はじめに	60
5.2	Off-Bragg 回折	60
5.3	導光板の Off-Bragg 回折解析モデル	61
5.4	解像度への影響評価	66
5.4.1	導光板厚さ依存性	66
5.4.2	画面輝度依存性	67
5.5	線対称イメージ入力による解像度の向上	68
5.6	おわりに	70
6.	ヘッドマウントディスプレイ光学系の展望	72
6.1	はじめに	72
6.2	提案導光板方式の水準比較	72
6.3	今後の展望	73
6.3.1	記録技術と媒体	73
6.3.2	導光板の高機能化	74
6.3.3	超小型ライトエンジンとの接続技術	75
6.4	おわりに	75
7.	結論	76
	参考文献	79
	謝辞	84
	研究業績リスト	85
	学術論文	85
	招待講演	85
	学会発表：国際会議	85
	学会発表：国内会議	86
	特許	86

1. 序論

1.1 研究背景

1.1.1 情報表示デバイス

情報化社会の進展に伴って、サイバ空間と現実世界が高度に融合する時代が始まろうとしており、政府は、目指していく未来の社会像として、サイバ空間と現実世界を高度に融合させたシステムにより、経済発展と社会的課題の解決を両立する人間中心の社会「Society 5.0」を掲げている[1]。この目指していく社会の中で、実世界（フィジカル空間）にある多様なデータをセンサとネットワークを介して収集し、サイバ空間で大規模なデータ処理技術を駆使して分析／知識化を行い、そこで創出した情報／価値によって、産業の活性化や社会問題の解決を図っていくサイバーフィジカルシステム（Cyber Physical System：CPS）の重要性が増している[2]。

このような 実世界とサイバ空間が相互連携した社会（CPS/IoT 社会）において、データのセンシングと解析結果の実世界へのフィードバックといった一連のサイクルを実現する上で、サイバ空間の情報を人々へ表示する手段が必須である。

表1に情報表示手法の比較を示す。古くから情報を蓄積・可視化する方法としては紙が広く用いられた。しかし大量の情報を持ち運ぶ際の携帯性や、現代の情報化社会においてサイバ空間のコンテンツ情報をオンデマンドに表示するといった点での機能性は十分でない。

表1 情報の表示手段

	紙	ブラウン管	薄型ディスプレイ	VRディスプレイ	ヘッドマウントディスプレイ
携帯性	△	×	○	×	◎
カラー表示	○	○	○	○	○
オンデマンド 情報表示	×	○	○	○	○
拡張/複合現 実表示	×	×	△	×	◎

◎: Excellent, ○: Good, △: Fair, ×: Poor

これに対してブラウン管による情報表示は動的なコンテンツの表示が可能であり、初期のテレビやパーソナルコンピュータといった装置と共に用いられたが、サイズの制約から携帯性に乏しく、いつでもどこでも情報のやり取りをして CPS を実現する為のデバイスとしての活用は困難である。

近年、液晶や有機発光素子を用いた 10 インチ程度の薄型で小型なディスプレイが実用化され、携帯性が大きく向上したことでスマートフォンに搭載されるようになり場所を問わずに人々がサイバ空間にアクセスできる環境が提供されている。

また、サイバ空間に没入することに特化した情報表示デバイスとして仮想現実 (Virtual Reality : VR) ゴーグルの普及も進んでいる [3]。図 1.1 にはこれらの情報表示デバイスと CPS 上でのポジショニングについて示す。

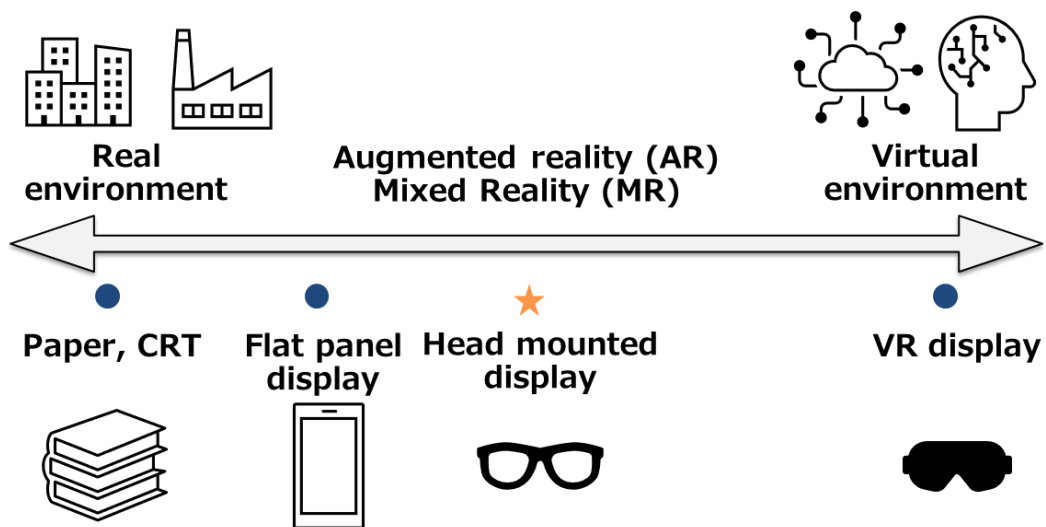


図 1.1 情報表示デバイスと CPS 上のポジショニング

今後、仮想と現実の世界を融合し CPS を一体とした社会運営がされる世界を目指す上で、拡張現実 (Augmented Reality : AR) 技術に注目が集まっている。

拡張現実 (AR) とはその名の通り、現実を拡張する技術であり、目の前に存在しないものを、現実の世界に重ねて、表現・体験できる技術である。視界の全面に仮想の情報を重ね合わせる複合現実 (Mixed Reality : MR) の一種とも言われる。仮想世界と現実世界の情報をユーザに提供し、現実空間を拡張した体験をすることや、遠隔地の現実空間の人物や物が、あたかもその場に存在するかのように表れて複数人でリアルなコミュニケーションや体験を可能にする [3, 4-6]。

このような背景から、仮想と現実の世界を融合する世界を実現する上での必須の可視化デバイスと言えるヘッドマウントディスプレイに大きな注目が集まっている。ヘッドマウントディスプレイは、メガネの形状をしたウェアラブル型のデバイスであり、表示光学系

を通して見える現実の景色に、CG の映像情報を重ねて表示する機能を持つものであり、今後の進展に大きな期待が寄せられている。

1.1.2 ヘッドマウントディスプレイ

ヘッドマウントディスプレイは、究極には視界に入るものすべてを AR 表示の対象範囲とし、現実世界の情報とデジタル情報を組み合わせることで、拡張・複合現実を作り出し、現実の景色に本来存在しない映像やアイコン、アノテーションなど様々な情報を付加する。現実世界の視認性の確保が必要要件であり、デバイスがシースルー（透過型）性を持つことが望まれる。また、屋内外の場所を問わずに常時利用できることが求められるため、デバイスの携帯性や装着性を兼ね備え頭部に装着するディスプレイである必要がある。また両眼視・単眼視の形態がある。従来のディスプレイは装置に対して利用者が視線を向けなければならないのに対し、ヘッドマウントディスプレイはその必要が無い。両手が自由になり、より現実に近い感覚で作業をしながら AR 情報を視認できる。例えば、ヘッドマウントディスプレイを活用した遠隔からの業務指示・支援の取り組みが進んでいる[3-9]。このようなユースケースで作業者は視野の広い範囲に図面や作業指示書を視認できる広い画角の表示機能と、作業視界を阻害しないシースルー性が強く求められる。

このような世界を実現するキーデバイスとしてのヘッドマウントディスプレイ光学系への期待は大きく、活発な研究開発が行われている[4-6, 10-14]。図 1.2 にヘッドマウントディスプレイの代表的な接眼光学系の概略図を示す。現在、広く市場に普及しているアイピース型光学系は、小型のプロジェクタを瞳の前に配置してマイクロディスプレイの投影を拡大投影する方式である。視界にバルク状のプロジェクタの光学部が配置されるためシースルー性やアイボックスが限定され、大きな画角の映像投影をするためには大型のプロジェクタを配置しなければならないという課題がある。

このような課題を踏まえ、近年、接眼部に透明で平板状の光学素子を用いて映像を投影する導光板方式は、シースルー性やアイボックスの確保が可能であり、大画面表示の実現を目指して活発な研究が行われている[20-27]。

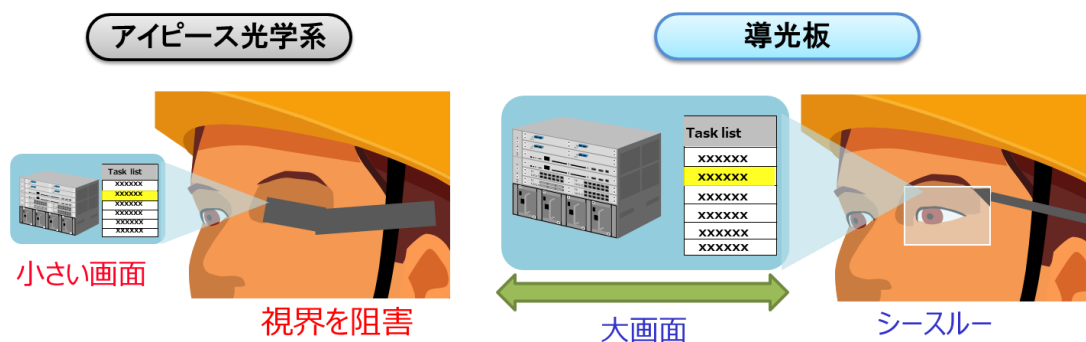


図 1.2 ヘッドマウントディスプレイの接眼光学系

1.2 研究目的

ヘッドマウントディスプレイ導光板は大別してミラーアレイ方式と回折格子方式が存在する。本研究では、低コスト化に有利で現在活発に広画角化の研究がおこなわれている回折型に着目した。広画角化にあたっては画面の輝度均一性がトレードオフになることが多く、ヘッドマウントディスプレイに適用する導光板の広画角化及び輝度均一化を目的に研究を行う。導光板の数学的モデルを構築し、回折素子としての表面掘り込み式回折格子や、体積ホログラムと信号光の相互作用を考慮して観察者が視認する映像を解析し、広画角・輝度均一化手法を検討する。

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

第2章 ヘッドマウントディスプレイ導光板の基本原理

第3章 溝深さ変調表面掘り込み式回折格子導光板

第4章 線対称イメージ入力体積ホログラム導光板

第5章 体積ホログラム導光板におけるオフブラッグ回折と解像性能

第6章 ヘッドマウントディスプレイ光学系の展望

第7章 結論

第2章は、ヘッドマウントディスプレイの光学系の基本原理や方式分類及び評価指標について述べた後に、本研究で着眼する導光板方式の原理や既存研究の課題について説明する。

第3章は、表面掘り込み回折格子を用いた導光板における輝度均一化手法を提案する。溝深さを離散的に変調した複数の回折格子を、導光板へ配置し、表示画像の輝度均一性を向上する手法を提案する。フォトンバジェットモデルと溝深さの最適化手法を構築し、同定した溝深さ変調パターンを有する2層の表面掘り込み式回折格子導光板の有効性をシミュレーションにより検証する。

第4章は、単層の導光板において更なる広画角化と輝度均一化を実現する為に、体積ホログラムを用いた導光板による線対称イメージ入力法を提案する。本手法では体積ホログラム導光板に所望の表示映像とそれに線対称なイメージを同時に入力することで、入力画像の線対称点から来る別の信号光が表示画面の輝度の変動を補償する。ボルン近似に基づいた導光板の解析モデルを構築し、本手法の有効性を検証する。

第5章は、体積ホログラム導光板におけるオフブラッグ回折の解像度への影響を評価する。所望の角度とは異なる回折角度で生じるオフブラッグ回折光を考慮するモデルを構築

し、体積ホログラム導光板の物理パラメータと解像度特性の関係性を明確化する。さらに提案する線対称イメージ入力法がオフブラック回折による解像度の低下を抑圧し高い解像度特性を実現することを明らかとする。

第 6 章は、提案した各方式による性能を比較するとともに、さらにヘッドマウントディスプレイ光学系の高性能化に向けて技術課題や展望を論じる。

第 7 章は、本研究の成果と今後の課題をまとめ、全体の結論とする。

2. ヘッドマウントディスプレイ導光板の基本原則

2.1 はじめに

本章では、ヘッドマウントディスプレイの画面表示に関わる光学系の基本原則や代表的な方式及び、表示映像の評価指標について述べる。さらに本研究で着眼する導光板方式について更に詳しい動作原則や現状の課題について説明し、本研究が取り組むべき方向性について述べる。

2.2 ヘッドマウントディスプレイ光学系

2.2.1 虚像投影

初めにヘッドマウントディスプレイの映像の投影原則について述べる。ヘッドマウントディスプレイの映像の投影原則はプロジェクタに類似している。ただし、プロジェクタがスクリーンなどに光を投射するのに対して、ヘッドマウントディスプレイは小型のディスプレイの映像を、投射レンズで拡大して虚像を生成し、直接眼に光を投射するところに特徴がある。図 2.1 にヘッドマウントディスプレイの虚像生成の仕組みについて示す。

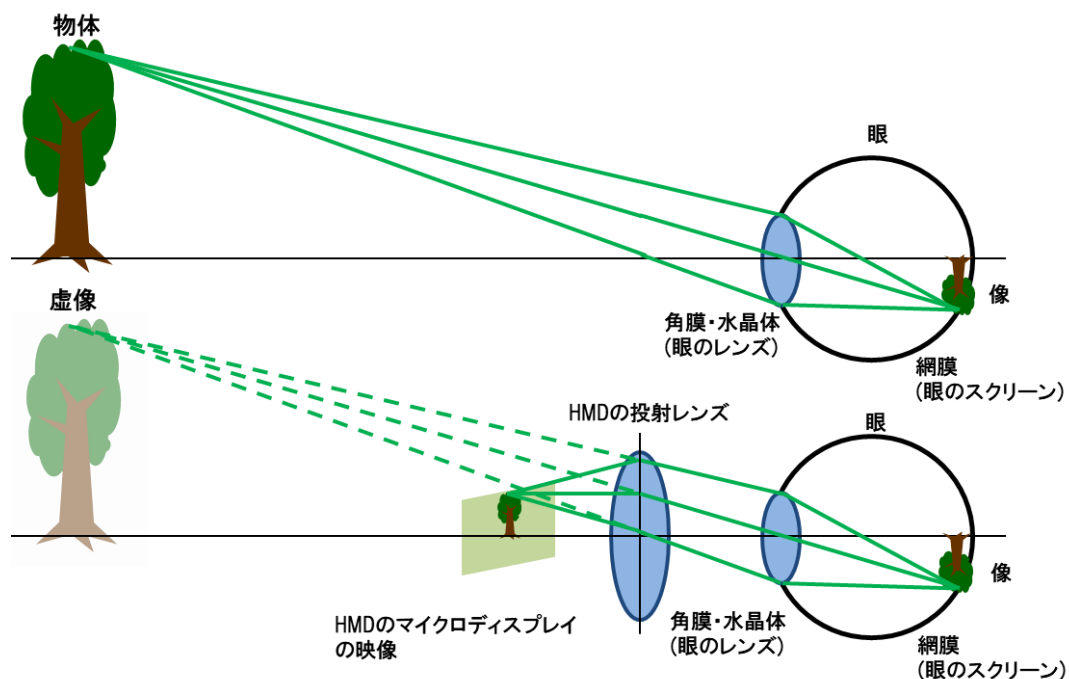


図 2.1 虚像生成の仕組み

ヒトの眼には、カメラのレンズやセンサに相当する役割をする部位が形成されている。レンズとして水晶体、センサとしては網膜が形成されている。物体からの光は水晶体によって網膜に結像され、網膜上の視神経によって光を受光することで、ヒトは物を視認する。

ヒトの眼が物体を視認する仕組みを活用し、ヘッドマウントディスプレイでは、小型ディスプレイからの映像光を投射レンズによって拡大かつ遠方から来るものと同様の光線に変換して瞳に投射する。入射した信号光は遠方の物体からの光線と同様に水晶体によって網膜に像が結像される。これにより、装着者は実際にはない物がそこにあるように視認することができ、このように見える像は虚像と呼ばれる。

虚像の投影部を両眼に夫々設けて異なる映像を映し出すことも可能である。視差画像を左右の眼に投影することで、立体的な映像表示を提供することもできる。

ヘッドマウントディスプレイで視界の範囲に現実世界の景色にデジタル情報を組み合わせて表示する拡張・複合現実を作り出すためには現実世界と虚像の視認性の両立が必要要件であり、デバイスがシースルー（透過型）性を持つことが望まれる。1965年にヘッドマウントディスプレイの先駆者と言われるアイバン・サザランドによって開発されたARディスプレイ[10]以降、画角、シースルー性、小型といった観点での研究開発が活発になされてきた[4-6, 11-14]。図2.2にハーフミラーによってシースルー機能を備えたヘッドマウントディスプレイ光学系を示す。

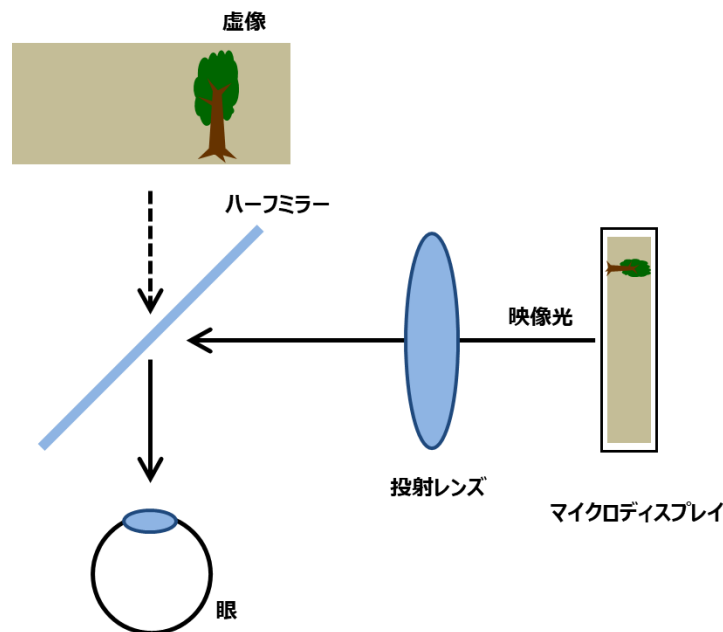


図 2.2 ハーフミラーによるシースルー機能

半透明のハーフミラーを介して図 2.1 を用いて説明した虚像生成の光学系からの映像光を瞳へ投影する構成として、装着者は現実の景色と虚像を重畳して視認が可能となり AR

表示を実現している。

また小型のディスプレイを利用するため非常に省電力であることも魅力である。特に仮想的な大型ディスプレイを形成したときには、実際の大型ディスプレイを使用した際と比較して大幅な消費エネルギー削減が可能であり、虚像光学系は小型や装着性という観点においても重要である。

2.2.2 評価指標

ヘッドマウントディスプレイの光学性能を評価するための代表的な指標を表 2.1 にまとめる。

画角は表示画面の大きさを表す指標であり、装着者の瞳に対するヘッドマウントディスプレイからの光線の入射角度の範囲によって定義される。実際の外界の視野角範囲に重畳して映像を表示できる範囲を示している。

輝度均一性は表示画面範囲内での輝度の均一性を示す。画面内の最低輝度と最高輝度の比率と定義して評価を行う。数値が高い程、画面内の輝度にムラや暗部が無く均一な映像表示を実現できることを示す指標である。

輝度は表示画像の明るさを示す指標である。屋内外、昼夜問わずに使用するためには数 cd/m^2 から数千 cd/m^2 まで周囲環境の明るさに応じた輝度の表示が必要である。

表 2.1 ヘッドマウントディスプレイ光学系の評価指標

評価指標	単位	内容
画角	degrees	表示する画面の大きさを表す指標。瞳に対する主光線の入射角度の範囲。
輝度均一性	%	表示する虚像の画面範囲内での輝度の均一性。画面内の最低輝度と最高輝度の比。
輝度	cd/m^2	表示する虚像の明るさ。
色均一性	-	表示する虚像の画面範囲内での色の均一性。画面内の色座標変化量。
シースルー性	%	接眼部の透過率。装着時の外界の見通し易さを示す指標。
アイボックス	mm^2	瞳が移動した際に映像を視認できる範囲

色均一性は表示画面範囲内での色の均一性を示す指標である。白色の画面を表示した際に画面内で色の変化がどの程度あるかを定量的に表すために、国際照明委員会による CIE XYZ 表色系の xy 色座標における画面内の色座標の変化量を評価する。

シースルー性はヘッドマウントディスプレイの接眼部の透過率を示す指標である。AR による表示には外界の見通し易さも重要な指標であり、装着時の外界からの光の透過率に

よって定義されるヘッドマウントディスプレイ特有の指標である。

またアイボックスは瞳が移動した際に映像を視認できる範囲である。瞳とヘッドマウントディスプレイの位置関係は装着者に応じて変化や、使用時にメガネと同じように経時的に変化する。従ってアイボックスが広い程、視認性が高く使いやすいデバイスである。

2.2.3 ヒトの眼の視覚機能

ヘッドマウントディスプレイはヒトの眼に直接映像を投影するという点で、他の情報表示デバイスとは異なる特徴を持ち、視覚機能に関する理解も重要な要素である。本節ではヒトの眼の構造や視覚機能に関する要点をまとめる[15-19]。

ヒトの眼球の断面図を図 2.3 に示す[15]。眼球内の構造のうち角膜 (Cornea)、瞳孔 (Pupil)、虹彩 (Iris)、水晶体 (Lens) などの構造が、光学的な役割を果たす部位である。ヒトの眼の光学系をカメラに例えた場合、角膜は単焦点レンズ、瞳孔は絞り、水晶体は可変焦点レンズ、網膜 (Retina) はセンサに相当する。

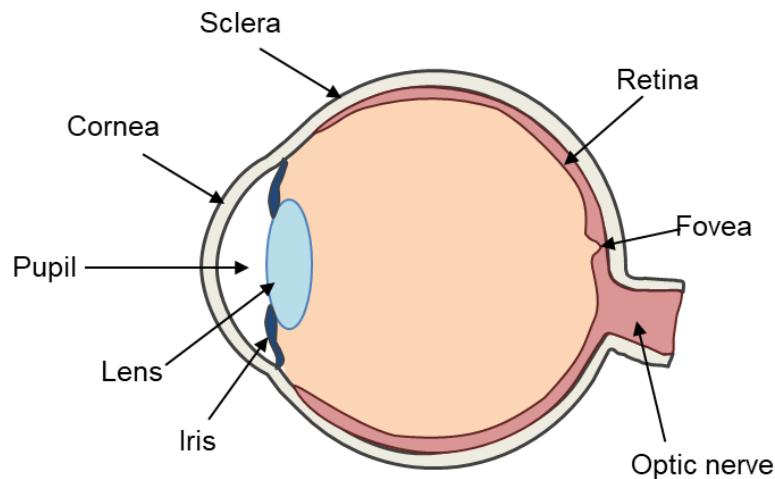


図 2.3 ヒトの眼球の断面図

外部からの光はまず角膜により屈折される。角膜の屈折力は 40 D 程度である。これは、水晶体の屈折力 (20D 程度) よりも大きい。角膜の屈折力が大きいのは、角膜が屈折率の差の大きい空気と境界をなしているためである。

次に光は瞳孔を通過する。周囲の環境照度対応 (暗順応) するために水晶体の周囲には瞳孔と虹彩が存在し、眼の開口絞りを形成する。瞳孔の大きさは環境照度によって異なり、通常は 2~8 mm の範囲で変化する。非常に暗い場所では 8 mm、通常の一般的な明るさでは 2 mm から 5 mm の間で変動する[17]。瞳孔径の変化は虹彩をなす虹彩筋の作用による。

水晶体はレンズに相当し、かつ毛様体筋の働きによって厚みを変化し屈折力を 20-30 D 程度の間で変化して焦点の調節機能を有する。

水晶体により屈折された光は、最後に網膜へと像を投影する。網膜において光受容がなされ、神経信号へ符号化され、網膜からつながる視神経を経て、脳へと伝達する。

成人の網膜は厚さ約 0.5 mm、直径 30 mm から 40 mm 前後である。網膜の中心部は視力に最も関係している部位であり、黄褐色に見えるため、黄斑部と呼ばれる。さらに黄斑の中央部は網膜が 0.05 mm 程度と薄くくぼんだ形状であり、中心窩 (Fovea) と呼ばれる。

網膜には視神経として桿体細胞 (Rods) と錐体細胞 (Cones) が分布する。錐体細胞は明るい光に対して動作し、明所視と色覚をもたらす。中心窩に多く存在し、その密度は中心窩から離れると急速に減少する。したがって高密度に錐体細胞が存在する中心窩が、脳へ伝える画像の分解能が最も高くなっている。

一方、桿体細胞は中心窩を取り巻くように網膜周辺部に多く存在し、色覚には関与しないが、光に対する感度が高く、暗所視に寄与する。桿体細胞は約 100 個程度の細胞の出力をひとまとめとして神経系が脳へ信号伝達するため空間分解能は低い。

黄斑部の 4-5 mm 内側には、網膜全体の神経系が集合して眼球の外へと出て行く視神経乳頭が存在する。この視神経乳頭には視細胞が存在しないため、この部位では物を見ることができず、盲点と呼ばれる部分に相当する。

錐体細胞の分布が密である視野 $\pm 2.5^\circ$ の領域が高分解能な視力を提供する部分である。視野が $\pm 30^\circ$ 以上の領域では桿体細胞の密度も大きく減少し[18]、いわゆる実用的な視野の範囲は $\pm 30^\circ$ となる。したがってヘッドマウントディスプレイの視野角の一つの理想的な目標は視野角 $\pm 30^\circ$ の実現と言える。

2.2.4 接眼光学系

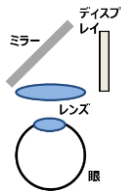
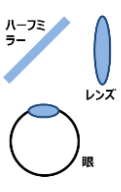
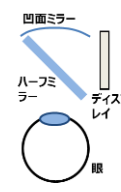
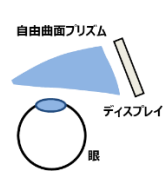
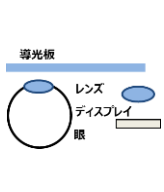
本節ではヘッドマウントディスプレイ接眼光学系について複数の従来例を挙げて方式毎の技術的な特徴を具体的に論じる。接眼光学系の方式比較をまとめたものを表 2.2 に示す。前節でも説明したアイピース光学系[11]は瞳の前に小型のプロジェクタを配置するタイプで最もシンプルな光学系であり確立された技術であることから最も普及しているが、画角が制限され、かつシースルー性や、アイボックスの観点で課題を抱えている。

このような課題を受けてハーフミラー方式[12]やバードバス方式[13]の光学系が提案されている。瞳の前にハーフミラーを配置することでシースルー機能の提供を実現している。しかし依然として瞳の前の光学系のサイズは大きく画角の拡大が困難である。またシースルー性の点でもハーフミラーを使用することから 50%程度であり、サングラス程度の透過性となる。また投影光学系が瞳から遠ざかることからアイボックスが縮小しやすく、アイボックスの確保には大口径の投射光学系が必要となり、サイズとのトレードオフとなる。

次の自由曲面プリズム方式は、プリズム内の内面全反射を使ってディスプレイからの光を瞳へ向かって伝搬しつつプリズムの曲面によって投射レンズ機能を持たせるものである

[14]。依然としてハーフミラー面でのシースルー性や、外界の景色がプリズムでゆがんでしまうために補正プリズムが必要という課題と、サイズやアイボックスサイズの観点でも同様に課題を有する。

表 2.2 接眼光学系の方式比較

方式	アイピース	ハーフミラー	バードバス	自由曲面 プリズム	導光板
概略図					
画角	×	×	○	○	△
シースルー	×	△	△	△	○
輝度均一性	○	○	○	○	×～○
サイズ	○	△	○	△	○
アイボックス	×	×	×	×	○
コスト	○	○	△	×	○

◎: Excellent, ○: Good, △: Fair, ×: Poor

これらに対して接眼部に透明で平板状の光学素子を用いて小型のプロジェクトからの光を全反射によって導光し、瞳へ伝達することが可能な導光板方式は、従来方式の機能に加えて課題であったサイズやシースルー性、アイボックスの観点でも良好な性能を提供できる方式として、注目を浴びている。本研究ではこの導光板方式に着目して研究を行うこととし、以下においてその基本原理と現状に課題と研究のポイントについて詳しく述べる。

2.3 ヘッドマウントディスプレイ導光板

ヘッドマウントディスプレイ導光板は大別してミラーアレイ方式[20, 21]と回折格子方式[22-27]が存在する。この2つの方式の基本原則と特徴について説明する。図 2.4 に各導光板方式の概略図を示す。図 2.4 (a) にミラーアレイ方式を、図 2.4 (b) に回折方式の導光板を示す。

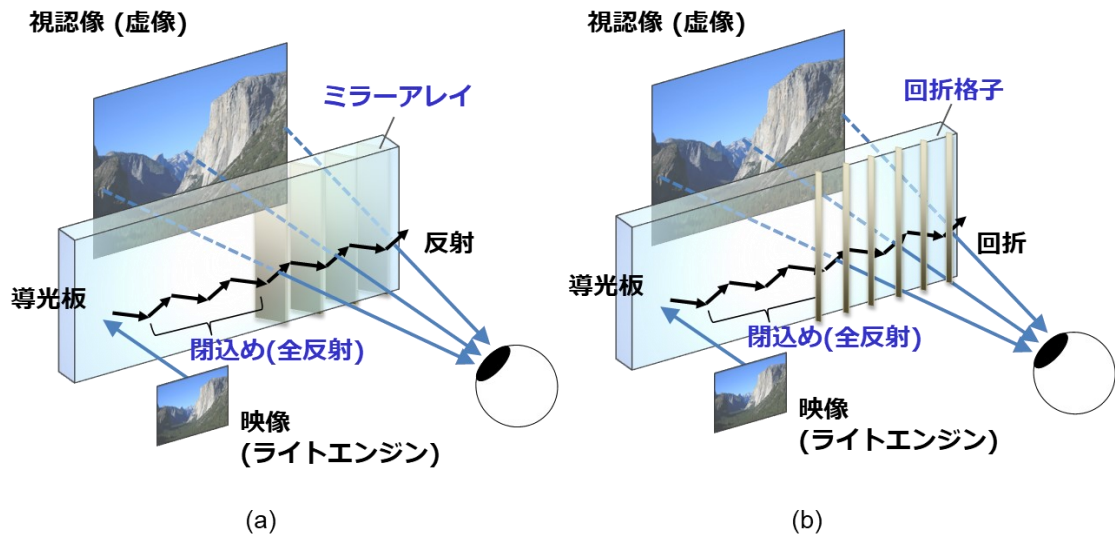


図 2.4 導光板の動作原理

どちらの方式も小型のプロジェクタであるライトエンジンからの信号光を導光板へ入力し内部で信号光の進行方向を導光板の面内へと進行方向を変換する。導光板内の信号光は全反射条件を満たす角度で伝搬し、内部に閉じ込められて装着者の瞳の方向へ向かって伝搬する。従って導光板自体にはミラーコートなどの必要が無く、透明なガラス基板の状態であり十分なシースルー性が確保される。またそれらの性能に関する比較を表 2.3 に示す。

表 2.3 導光板方式比較

偏向原理	反射	回折
偏向素子	ミラーアレイ	回折格子
画角	△	△～○
シースルー	○	△
輝度均一性	○	×
重量	○	△
コスト	△	○

◎: Excellent, ○: Good, △: Fair, ×: Poor

反射方式では瞳の前の導光板部分には複数の部分反射ミラーをアレイ状に配列する構成として瞳へ向かって信号光を反射する。ミラーであることから波長や光線角度に対する反射率変化を抑制しやすく、輝度均一性や色均一性が高いことが特徴である。また、ミラー

の反射率は 10%前後の部分反射ミラーでよく、十分に外界を見通すシースルー性を有する。

一方で、回折方式の場合は瞳の前付近の導光板表面に回折格子を設ける。回折格子に入射信号光は回折によって進行方向を偏向され瞳へ向かって出射する。回折格子の回折効率も数%~10%程度でよく、十分に外界を見通すシースルー性を提供する。

どちらの方式も厚さ 1 mm 程度のガラス基板によって構成する為、接眼部の光学系は視力矯正用の眼鏡と同等レベルに薄型化が実現する。

この 2 種類の導光板方式を比較すると、多数のミラーを配列および接合して製造する必要のあるミラーアレイよりも、ガラス基板表面に回折格子を形成することで製造可能な回折方式が低コスト化かつ広画面角化に有利であり、現在活発に研究がおこなわれている。本研究では、この回折型の導光板に着目した。一方で回折格子は光線波長や入射角に対する回折効率の依存性が大きく、画面内の輝度均一性の向上に課題があり、これらの詳細について次節で詳しく説明する。

2.4 表面掘り込み式回折格子導光板

2.4.1 基本原理

一般的な表面掘り込み回折格子導光板の基本原則を説明する。図 2.5 に表面掘り込み回折格子導光板の模式図を示す。ヘッドマウントディスプレイに用いる表面掘り込み回折格子導光板は、基板の表面に溝構造が形成された 3 つの回折格子領域 (Input, Vertical expander (VE), Output) を有する[5, 22-25]。

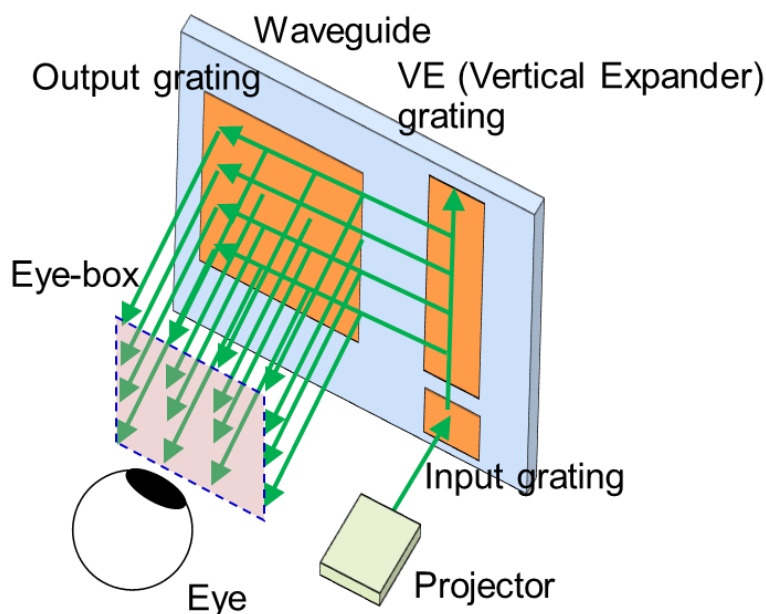


図 2.5 表面掘り込み回折格子導光板

投射レンズによってマイクロディスプレイを物体面として無限遠を像面とする信号光を導光板へ入射する。導光板に設けられた Input 回折格子は投射レンズからの信号光の進行方向を回折によって進行方向を変化させて導光板内部へ取込む役割を持っている。したがって Input 回折格子の回折効率¹⁾は 100%に近いほどよく、かつ片側の回折次数に光量が集中するように、ブレード化されることが望まれる。

次の VE 回折格子は、垂直方向のアイボックスを拡大するための領域である。信号光は全反射と回折に分岐をしながら一軸方向にアイボックスが拡大される。

最後の Output 回折格子は、水平方向のアイボックスを拡大しつつ、導光板から信号光を装着者の瞳に向かって回折して出射する機能を有する。

ここで各回折格子の幾何学的な関係性について図 2.6 に示す。図 2.6 (a) に示すように、Input 回折格子の格子ベクトルを k_{Input} 、VE 回折格子の格子ベクトルを k_{VE} 、Output 回折格子の格子ベクトルを k_{Output} と表すときに、導光板の回折格子の溝ピッチと溝方向を設計する際には、各回折格子の格子ベクトル (k_{Input} , k_{VE} , k_{Output}) が以下の条件式、

$$k_{Input} + k_{VE} + k_{Output} = 0 \quad (2.1)$$

を満たし、信号光の波数ベクトルが入力光と出力光の間で保存される必要がある[5, 22-25]。これは図 2.6 (b) に示すように Input 回折格子に入射した光は格子ベクトル k_{Input} , k_{VE} , k_{Output} の作用を受けて回折するが、導光板内でこれら Input から Output 全ての格子ベクトルの作用を受けて、回折の作用が完全にキャンセルされることを意味している。従って、投射レンズから出力される映像光と同じ光を、Output 回折格子は出射することで、ヘッドマウントディスプレイ装着者は投射レンズから出力される投影映像と同等の映像を視認することができる。

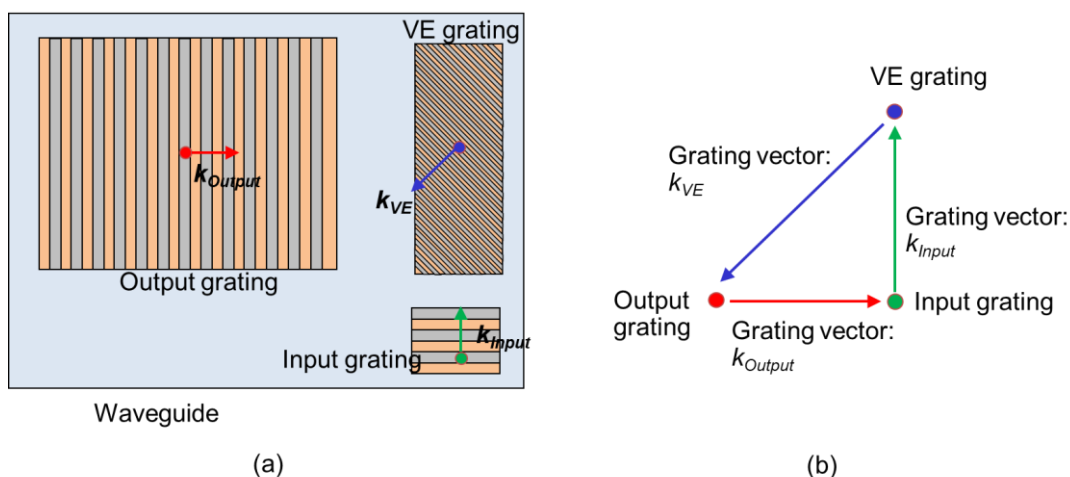


図 2.6 各回折格子ベクトルの幾何学的関係

一方で Input 回折格子からの 1 次回折によって信号光が導光板に結合された後、上記の

保存関係を満たさない信号光も存在することになる。例えば VE および Output 回折格子では信号光は 1 次回折によって VE (又は Output) 回折格子から Output 回折格子 (又は装着者) に進行方向が変換されるが、光線エネルギーの一部は 0 次回折光としての全反射光のまま VE (又は Output) 回折格子の先にある導光板の端面に向かって進行し損失となる。しかし、これらの光は装着者の瞳には結合されないため、顕著な迷光として視認されることはない。

2.4.2 導光層の多層化

次にフルカラー (RGB) 画像表示するための導光板の回折角度と全反射条件の関係性について述べる。導光板の設計では、回折格子のピッチを最適化することにより、広い画角に対応しながら、ガラス基板内の光線の伝搬角度を全反射の臨界角度よりも大きく保ち光閉じ込めを実現する必要がある。表面掘り込み回折格子導光板では RGB スペクトル毎に使用する導光板を分離した 3 層導光板が上市されている [6]。

ここでは、2 層の導光板デザインが最大 40° の画角をサポートできることを示す。青色信号光 (中心波長: 455 nm) と赤色信号光 (中心波長: 615 nm) が夫々異なる層の導光板を伝搬し、緑色信号光 (中心波長: 520 nm) は上記の赤色と青色の導光板の両者を使って導光する導光板によって対角方向の画角 40 度をサポートする。

図 2.7 に青色向けの導光板において導光板基材の屈折率と波長 455 nm, 520 nm において画角 40 度の信号光の導光板内での伝搬角度の範囲をプロットする。導光板の屈折率は 1.5~2.2 の範囲であり、回折格子のピッチは、式 (2.1) の条件を満たし、かつ画角 40° の範囲内で、後述する全反射臨界角と回折格子領域への入射回数を満たしうる条件として、Input 回折格子で 343.3 nm, VE 回折格子で 237.2 nm, Output 回折格子で 328 nm として設定されている。

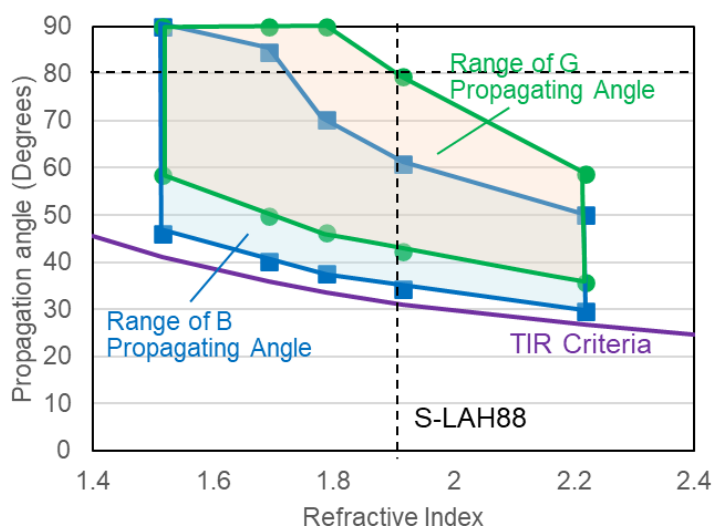


図 2.7 青色光源用の導光板の光線角度

基板の屈折率を検討する上で伝搬角度の範囲は、波長が短く回折角度の小さい青色光の全反射角度の臨界角によって下限が設定され、上限は回折角度の大きい緑色光の最大許容の光線角度によって制限される。理論的には、最大許容伝搬角度は90度未満の任意の角度を取ることができるが、実際には、アイボックス確保や輝度均一性の観点から信号光はVEおよびOutput回折格子と複数回（3回以上）相互作用することが望ましく、80°以下を実際的な制限とした。

図 2.7 から、基板屈折率 $n_d > 1.9$ で青色と緑色の信号光が全反射臨界角と、Output回折格子と結合するための光線角度の必要範囲である80°以下を満たすことがわかる。これは市場に流通する高屈折率ガラス材料（S-LAH88, オハラ社, $n_d = 1.91650$ ）を使用して、対角方向の画角40度を実現できることを示している。

図 2.8 に導光板内での各色の光線の模式図を示す。青色光が全反射角度を満たす範囲とした場合、Input回折格子において青色光よりも回折角度の大きな緑色光までは全反射による閉じ込めが成立するものの、波長が長くより回折角度が大きい赤色光は十分な結合をOutput回折格子と得ることが困難となる。これらの分析結果は、 $n_d < 1.9$ の画角40度に対応するには、2つ以上の導光板層が必要であることを示している。

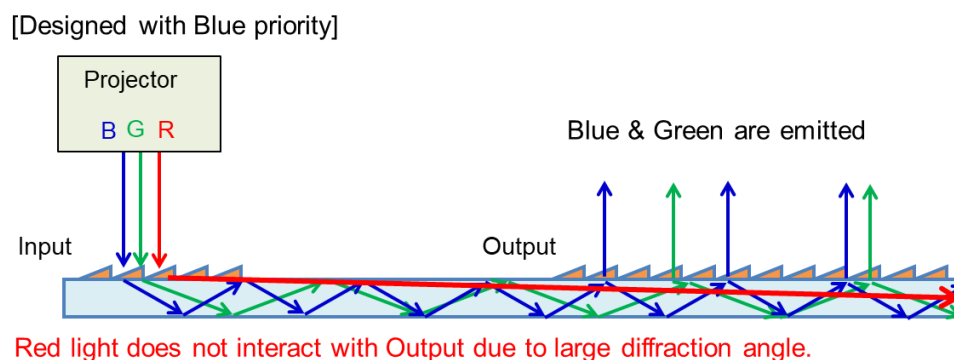


図 2.8 青色光源用の導光板

図 2.9 に赤色向けの導光板において導光板基材の屈折率と波長 520 nm, 615 nm において画角 40 度の信号光の導光板内での入射角度範囲をプロットする。導光板の屈折率は 1.5 ~ 2.2 の範囲であり、回折格子のピッチは、Input回折格子で 455.5 nm, VE回折格子で 300.6 nm, Output回折格子で 400 nm として設定されている。

入射角度の範囲は、緑色光の全反射角度によって下限が設定され、赤色光の最大許容入射角度によって上限が設定される。最大許容入射角度は前述と同様に VE および Output 回折格子と複数回（3 回以上）相互作用する必要があるため、80 度以下が実際的な制限となる。

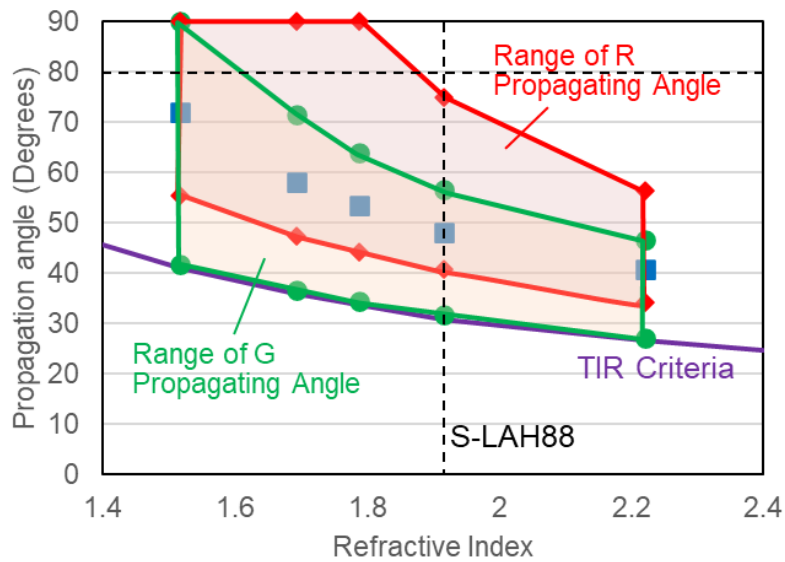


図 2.9 赤色光源用の導光板の光線角度

図 2.9 から、基板屈折率 $n_d > 1.9$ で緑と赤の信号光が全反射臨界角と、Output 回折格子と結合するための光線角度の必要範囲である 80° 以下を満たすことがわかる。これは市場に流通する高屈折率ガラス材料 (S-LAH88) を使用して、対角方向で画角 40° の実現が可能であることを示している。

図 2.10 に赤色の導光板内での各色の光線の模式図を示す。青色光が全反射角度を満たす範囲とした場合、Input 回折格子において緑色光と赤色光は全反射による閉じ込めが成立する。一方で青色光は赤色光導光板の Input 回折格子で回折しても全反射閉じ込めに必要な回折角度を得ることができずに、導光板外へ漏れ出すこととなる。

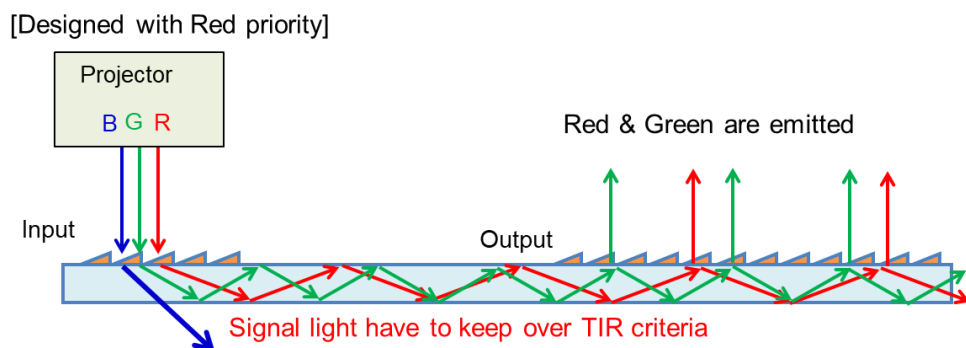


図 2.10 赤色光源用の導光板

以上より、2 層の表面掘り込み回折格子導光板により対角方向の画角 40° のフルカラーの映像表示が可能であることを示した。また、赤色光に対する青色導光板の Input/Output

回折格子の回折効率は青色光および緑色光よりも低く、赤色光のほとんどが Input/Output 回折格子を 0 次回折光として透過するため、青色光用の導光板が装着者に近い側へ配置される。

2.4.3 表示画像シミュレーション結果

表面掘り込み回折格子導光板を用いたヘッドマウントディスプレイの光学システムを図 2.11 に示す。図 2.11 (b) の実線はマイクロディスプレイからの光線を表しており、マイクロディスプレイからの各信号の色に対応して色分けされている。導光板は 2 層化されており、装着者側の導光板の Input 回折格子は、マイクロディスプレイを備えた投影レンズなどの外部光学系からの青色と緑色光を導光板に結合する。装着者から遠い側の導光板の Input 回折格子は、赤色と緑色光を導光板に結合する。結合された信号光は内部を伝搬し VE においてアイボックスを垂直方向に伸長される。Output 回折格子はアイボックスを水平方向に拡張し、信号光を瞳に結合する。

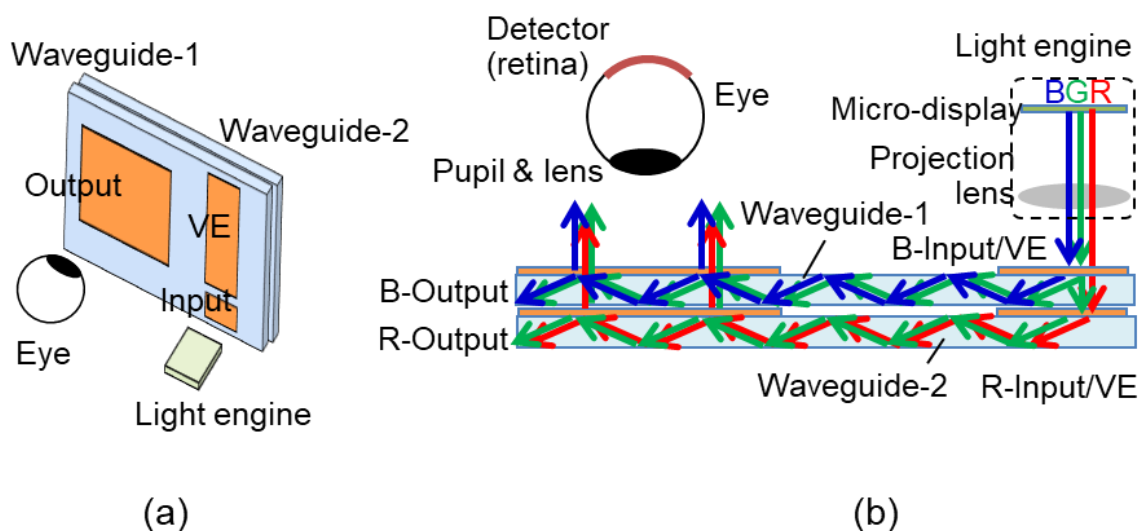


図 2.11 導光板を用いた光学システム

上述した光学システムにおける導光板の性能を正確に評価するために、導光板の輝度均一性と光利用効率を、幾何光学的なノンシーケンシャル光線追跡と電磁波解析シミュレータを用いて数値的な確認を行った。RCWA によって計算された回折格子の入射光線角度、格子溝の方向、格子溝深さ、偏光方向に対する回折効率をlookupテーブルとして幾何光学的光線追跡コード (Zemax) に統合し[28-33]、その影響を考慮した表示映像の解析を実施した。

一般に、マイクロディスプレイの対角線のサイズ (L_{disp}) と投影レンズの焦点距離 (f_{pl})

に対して、 $2\arctan(L_{disp}/2f_p)$ によって対角線の画角（全角）が決定される。光学系では、マイクロディスプレイのサイズはアスペクト比 16:9 の 0.31 インチに設定され、投影レンズの焦点距離は 10.91 mm に設定した。広い波長スペクトルを持つ LED (Osram LCG H9RM, LE BR Q7WM) [34, 35] のスペクトルを光源として想定した。導光板モデルとして対角方向の画角は 40 度 (35° (水平) \times 20° (垂直)) で、アイボックスのサイズは水平: ± 8.5 mm, 垂直: ± 6.5 mm とした。このアイボックスのサイズを考慮して VE と Output 回折格子の物理的な領域サイズ (VE: 11.6 mm (水平) \times 30.6 mm (垂直), Output: 25.8 mm (水平) \times 19.0 mm (垂直)) を決定した。瞳孔の直径は 4 mm, 導光板の厚さは 1 層あたり 1 mm に設定した。

表面掘り込み回折格子導光板の表示映像の解析結果を図 2.12 に示す。各色の虚像の輝度分布の結果を示しおり, (a) に青色 LED での虚像の輝度分布, (b) に緑色の LED での虚像の輝度分布, (c) に赤色 LED での虚像の輝度分布を示している。

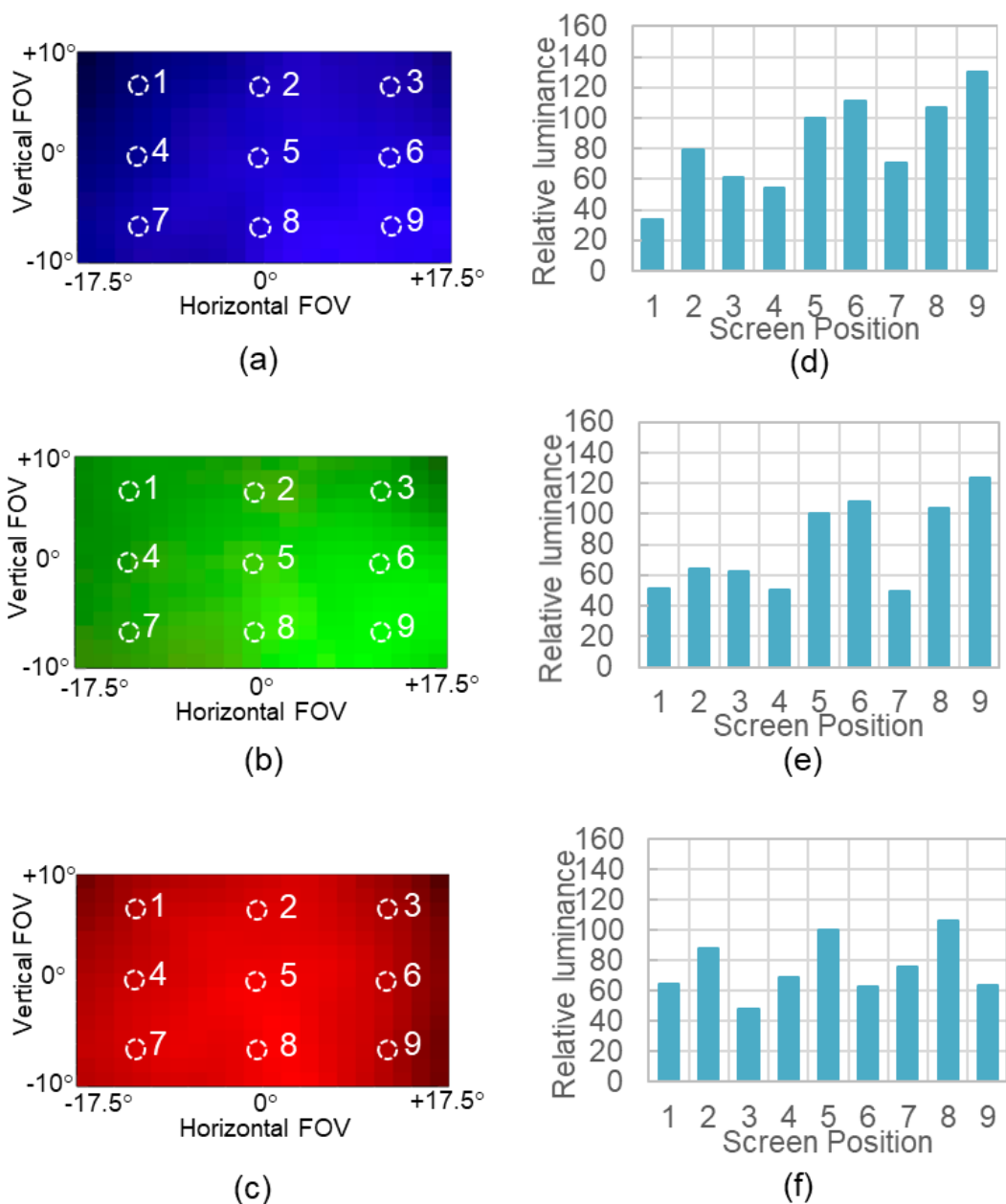


図 2.12 表示画像シミュレーション結果（従来導光板）

図 2.12 右側のグラフ (d, e, f) は画面範囲に示した画像中心(#5)の輝度を基準として周囲の 9 つの評価点の相対輝度を示している。(d) に青色 LED の場合の各評価ポイントの相対輝度, (e) が緑色の LED の場合, (f) が赤色 LED の場合の結果を示した。

虚像の画角は 35° (水平) \times 20° (垂直) であり, 画像中心にある評価点「#5」に対して画面内の評価点で最小の輝度値のポイントとの比として定義する輝度均一性は 33% である。表面掘り込み回折格子導光板では, 画像の右側と下側が高輝度になる傾向があり, 画像の左側と上側が低輝度になる傾向がある。

RGB の各 LED の発光デューティは、虚像の中心で色座標が $x=0.31$, $y=0.34$ の白色を表示するように調整され、ライトエンジンの射出瞳での信号光の光束を 1 lm とした場合の画面輝度は 230 cd/m^2 であり、その色座標は $x=0.32$, $y=0.35$ である。導光板の回折格子は波長によって回折効率が異なるため、虚像と射出瞳の間の色座標にはわずかな違いが生じている。

2.5 輝度不均一の要因

前節の光線追跡と電磁波解析の統合シミュレーションによる検証結果から、表面掘り込み回折格子導光板に見られる一般的な課題は、表示画面の画角全体での輝度の不均一性である。図 2.13 にこの輝度の不均一を生む要因について示す。幾何学的な制約から、導光板内を進む信号光において、画面の右端を構成する光線は Output 回折格子と相互作用する回数が少なく、一方で画面の左端を構成する光線は Output 回折格子と相互作用する回数が増加する。画面右側の光線は相互作用の回数が通常 10 倍または 20 倍少ないため、輝度は画像の左端よりも高くなってしまふ。同様に、VE 回折格子においても同様の現象が生じており回折格子との相互作用が少ない、画面の下側の輝度は高くなる傾向となり、輝度均一化の観点で課題を抱えている。

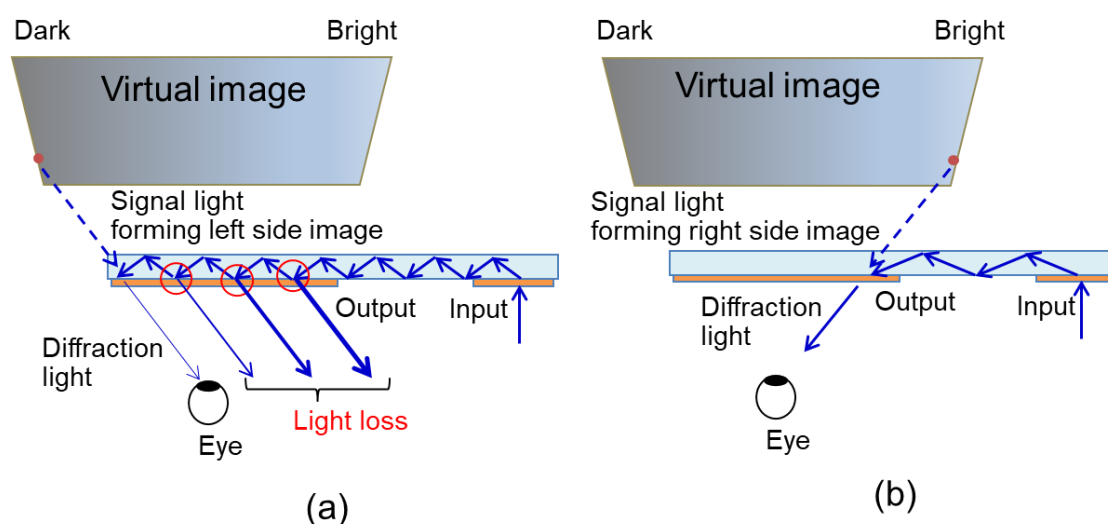


図 2.13 画角による信号光伝搬過程

2.6 おわりに

本章では、ヘッドマウントディスプレイの画面表示に関わる光学的な背景について述べた。ヒトの眼の視覚機能から、虚像投影の基本原則、表示映像の評価指標、さらに本研究で着目する導光板方式について詳しい動作原理や現状の課題を明らかとし、本研究が取り

組むべき方向性について纏めた。主な要点は以下の通りである。

瞳の前に配置されるバルク状のプロジェクタの光学部でシースルー性やアイボックスが限定され、大きな画角の映像投影が困難なアイピース型光学系に対し、接眼部に透明で平板状の光学素子を用いて映像を投影する導光板方式はシースルー性やアイボックスの確保に優れ、本研究において注目に値する方式である。

特にガラス基板表面に回折格子をナノインプリント法によって低コストに形成でき広画面角化に有利な表面掘り込み式回折格子導光板は広く注目を集めている。

一方で、表面掘り込み式回折格子導光板のシミュレーション解析の結果、光線角度と回折格子との相互作用回数が画角毎に大きく異なることや、光線波長や入射角に対する回折効率の依存性を起因として、画角全体での輝度の不均一性の課題があり、虚像の画角は 35° （水平） $\times 20^{\circ}$ （垂直）で、輝度均一性は33%にとどまることを明らかとした。

3. 溝深さ変調表面掘り込み式回折格子導光板

3.1 はじめに

第2章では、ヘッドマウントディスプレイ光学系として表面掘り込み回折格子導光板に着眼すると共に輝度均一性の課題を明らかとした。本章では、表面掘り込み回折格子をベースに、新しく回折格子の溝深さが個別に変化するサブ格子領域にセグメント化し、画角全体の輝度の均一性の向上と、導光板内での全体的な光損失を低減する手法を提案する。

また、上記の溝深さ変調回折格子パターンを最適化するうえで、非シーケンシャルレイトレーシングによる大規模な反復がボトルネックとなる全体的な設計サイクル時間を短縮するための方法論についても取り上げる。

3.2 溝深さ変調回折格子導光板

ヘッドマウントディスプレイ導光板内の光線の通過経路は画角毎に異なる為、導光板上の回折格子の回折効率を場所に応じて変化させることは、画角全体で輝度のバランスをとることに効果的と考えられる。そこで、表面掘り込み回折格子の溝深さを導光板上の場所に応じて離散的に変化させる導光板構成の研究を行った。図3.1に溝深さ変調回折格子導光板の概略図を示す。

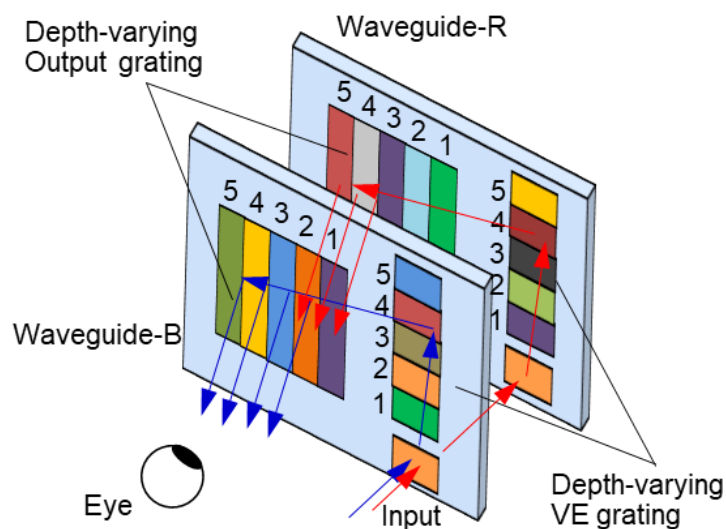


図 3.1 溝深さ変調回折格子導光板

青色光と緑色光の導光層と赤色光と緑色光の導光層とで 2 層化された導光板において、VE 領域と Output 領域の回折格子を複数のサブエリアに分割し、各サブエリアで、画角領域内の輝度のバランスを取りつつ、全体的な光利用効率を向上するように、各回折格子の溝深さ（回折効率）を最適化する手法について検討した。

3.3 フォトンバジェット解析モデル

導光板の表面掘り込み回折格子をセグメントに分割し、個別に溝深さの異なるサブ回折格子を組み込み、画角全体の輝度均一性の改善設計を行う上で、幾何学的なノンシーケンシャル光線追跡による大規模な反復による最適化を行うと設計時間が膨大となる。例えば、溝深さ変調パターン 1 つあたりの解析に数百万の光線追跡を行う場合は、計算に半日程度を要する。このボトルネックである設計時間を大幅に短縮するために構築したフォトンバジェット解析モデルについて本節では取り上げる。

フォトンバジェット解析モデルの解析モデルの概念図を図 3.2 に示す。フォトンバジェット解析モデルは、溝深さを変化させる回折格子と光線の相互作用による回折効率を考慮しながら、光線に沿ってライトエンジンから導光板を通して装着者の瞳までのエネルギー伝搬を解析する数学モデルである。

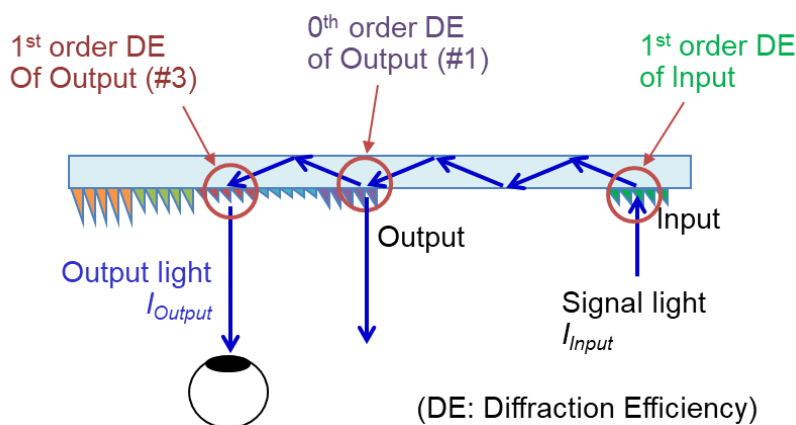


図 3.2 フォトンバジェット解析モデル

モデル内で光線が VE および Output 回折格子に入射すると、光強度の一部は回折光線として導光板外部に取り出され、残りの光強度は 0 次回折として保持される。光線が VE および Output 回折格子のサブ領域と複数回に渡って相互作用する間、このプロセスが繰り返し、相互作用時の回折効率はサブ領域間で異なることを考慮して光線のエネルギー伝搬を解析する。

本モデルによって、表面掘り込み回折格子の溝深さが最適化され、画角内の画像輝度が均等化される。回折格子の深さを関数とする回折効率は、厳密結合波理論（RCWA）によ

って事前に計算され、ルックアップテーブルとして最適化プロセスに組み込まれている。本解析モデルは、多数の光線を使用した複数の光線追跡ベースのシミュレーションに頼ることなく、輝度均一性や光利用効率などの主要なパフォーマンスを妥当な精度で予測し、溝深さ変調回折格子の構造を特定し、回折格子の溝深さを最適化するために必要な時間を大幅に短縮する。

上記で説明した基本的な内容に加えて、構築する解析モデルでは計算精度を向上するために、回折格子の回折効率に応じた光線のエネルギー伝搬に加えて、図 3.3 に示す要素を考慮して解析を行う。図 3.3 (a) 及び (b) は Input 回折格子において、導光板入射後に裏面から再び光線が Input 回折格子に結合し信号光の一部が導光板外へ排出されて光損失が起きる要因を説明している。図 3.3 (c) (d) は面角に応じて光線角度が異なることで内部の全反射周期が変化し、Output 回折格子において出力される信号光の間隔に差異が生じて、瞳孔に結合される信号光量が変化する要因を説明している。

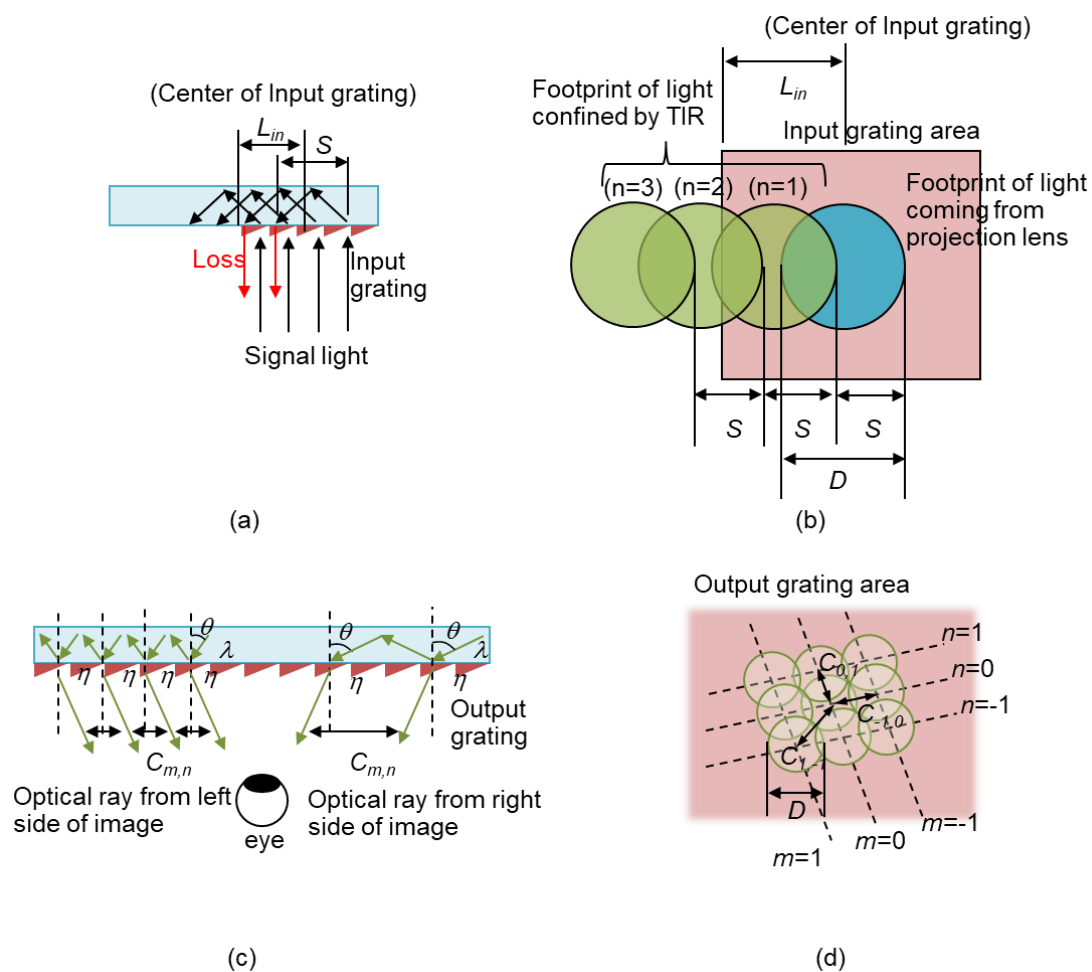


図 3.3 解析モデルの高精度化要素

単一光線に沿って導光板を介した光学効率 (f_{WG-B}) を計算するプロセスは数学的に以下のように定式化される。

$$\begin{aligned}
f_{WG-B} &= \eta_{Input-B}(\Gamma, \lambda, \theta, \phi, T, 1^{st}) * (1 - \beta) \\
&* \prod_{i=1}^{k_{VE}-1} \eta_{VE-B}(\Gamma_i, \lambda, \theta, \phi, R, 0^{th})^{(m_{VE-Bi}-1)} * \eta_{VE-B}(\Gamma_{k_{VE}}, \lambda, \theta, \phi, R, 1^{st}) \\
&* \prod_{i=1}^{k_{Output}-1} \eta_{Output-B}(\Gamma_i, \lambda, \theta, \phi, R, 0^{th})^{(m_{Output-Bi}-1)} * \eta_{Output-B}(\Gamma_{k_{Output}}, \lambda, \theta, \phi, T, 1^{st}) \\
&* \rho_{\lambda, WG-B}
\end{aligned} \tag{3.1}$$

式(3.1)の中で各プログラムの回折効率は次のような変数を持つ関数であり、後述するRCWA法によって数値的に計算を行う。

$$\eta_{NameofGrating}(\Gamma_i, \lambda, \theta, \phi, Mode, DiffOrder) \tag{3.2}$$

上記の回折効率は回折格子の溝深さ Γ 、光源波長 λ 、入射角 θ 、および視野の水平方向を 0° として表した回折格子溝の方向角度 ϕ の関数である。「*Mode*」は T で透過回折または R で反射回折のいずれかを指定し、「*DiffOrder*」で回折次数を指定する、「*Name of Grating*」は考慮対象の回折格子を指定し、例えば VE-B であれば青色用の導光板の VE 回折格子を指している。「*i*」は、光線の伝搬方向に沿って昇順でカウントされた回折格子のサブ格子領域のインデックスである。

式(3.1)の最初の行の項は光線が Input-B 回折格子と相互作用し、透過における 1 次回折を介して Waveguide-B に結合されたときの光線の効率を示す。ここで図 3.3 (a) で説明した Input 回折格子自体での裏面への再入射による光損失 (β) は、以下の式 (3.3) で与えられる。

$$\beta = \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \sin^{-1} \frac{2(S_i - L_{in})}{D} - \frac{2}{\pi D} (S_i - L_{in}) \cos \left(\sin^{-1} \frac{2(S_i - L_{in})}{D} \right) \right) \right] \tag{3.3}$$

$$* \left(\eta_{Input}(\Gamma, \lambda, \theta, \phi, R, 0^{th})^{i-1} - \eta_{Input}(\Gamma, \lambda, \theta, \phi, R, 0^{th})^i \right)$$

ここで、図 3.3 (a) および図 3.3 (b) 示すように、全反射の 1 周期あたりの光線の移動距離は S であり、Input 回折格子領域の半分のサイズを L_{in} とする。式 (3.3) の角括弧内の項は全反射によって閉じ込められた伝搬光のフットプリントの面積を表し、これらフットプリントの合計面積を求めて 0 次以外の回折効率を掛けて光損失を計算している。これによって、Input 回折格子で複数回発生する裏面からの再入射によって引き起こされる光損失の総量を考慮する。

式 (3.1) の 2 行目の項では VE-B 回折格子領域を伝搬する単一光線の光伝搬効率を計算している。単一光線が VE 回折格子の領域へ入射する回数は以下の変数で表す。

$$m_{Name of grating-i} \tag{3.4}$$

下付き文字の「*Name of grating*」は、VE-B が青色光用の VE 回折格子であり、「*i*」がサブ格子領域のインデックスとなって、回折格子の場所を指定する。式 (3.1) の添え字「*k_{VE}*」は、光線と結合して Output 回折格子に向かって回折するサブ格子領域を指定し、その領域は画角に応じて変化する。

式 (3.1) の 3 行目の項は、Output-B 回折格子と相互作用するときの光線の効率を示す。この計算には、Output-B のサブ回折格子上で全反射に相当する 0 次回折光の反射効率と、瞳孔に向かって回折するサブ格子領域を指定する添え字「*k_{Output}*」と共に光線の回折するための Output-B の 1 次の透過回折効率が組み込まれている。画角によって瞳に到達する有効なサブ回折格子領域は変化することに応じて考慮すべきサブ回折格子も変化する。

導光板内で全反射を繰り返す信号光は、VE と Output 回折格子への複数回にわたる入射と回折を繰り返して図 3.3 (c) に示すように光線密度を決定する。導光板内での全反射角度（またはそれに対応する画角）に依存して導光板から出力される光線密度は決定される。この出力光線の密度を示す充填因子 ($\rho_{\lambda, Layer}$) は、式 (3.5) によって計算される。

$$\rho_{\lambda, Layer} = \sum_{-m}^m \sum_{-n}^n \left[2D^2 \cos^{-1} \left(\frac{C_{m,n}}{2D} \right) - \frac{1}{2} C_{m,n} \sqrt{4D^2 - C_{m,n}^2} \right] \quad (3.5)$$

ここで、図 3.3 (d) に示したように投影レンズの射出瞳の直径は D であり、周辺の重なり合う出力光線までの距離は C_{mn} である。光線の伝搬方向に沿って昇順でカウントされる添え字の m, n によってどの出力光線との距離であるかを指定し、かつ出力光線は 2 次元に分布することから、水平方向は m 、垂直方向は n として指定する。 $\rho_{\lambda, Layer}$ の添え字インデックスは λ が光源波長を指定し、「*Layer*」は、Waveguide-B など導光板の導光層を指定する。

これまでは手前の青色光用の導光板に関するフォトンバジェットモデルについて説明したが、同様の議論により、単一光線に沿って奥側の赤色光用の Waveguide-R を通過する光線の光学効率 (f_{WG-R}) は式 (3.6) で与えられる。

$$\begin{aligned} f_{WG-R} = & \eta_{Input-B}(\Gamma, \lambda, \theta, \phi, T, 0^{th}) * \eta_{Input-R}(\Gamma, \lambda, \theta, \phi, T, 1^{st}) * (1 - \beta) \\ & * \prod_{i=1}^{k_{VE}-1} \eta_{VE-R}(\Gamma_i, \lambda, \theta, \phi, R, 0^{th})^{(m_{VE-Ri}-1)} * \eta_{VE-R}(\Gamma_{k_{VE}}, \lambda, \theta, \phi, R, 1^{st}) \\ & * \prod_{i=1}^{k_{Output}-1} \eta_{Output-R}(\Gamma_i, \lambda, \theta, \phi, R, 0^{th})^{(m_{Output-Ri}-1)} * \eta_{Output-R}(\Gamma_{k_{Output}}, \lambda, \theta, \phi, T, 1^{st}) \\ & * \eta_{Output-B}(\Gamma_{k_{Output}}, \lambda, \theta, \phi, T, 0^{th}) * \rho_{\lambda, WG-R} \end{aligned} \quad (3.6)$$

信号光線は青色光用の導光板 Waveguide-B を透過して赤色光用の導光板 Waveguide-R に向かうため、導光板の多層構造を次のようにモデル化を行った。図 3.4 にフォトンバジェット解析モデルでの多層導光板構造の模式図を示す。図 3.4 (a) に Input 回折格子でのモデルを示しており、Input 回折格子での Waveguide-B における透過 0 次回折効率を組み込むことで、手前層の導光板での回折による光損失を考慮する。同様に、図 3.4 (b) に Output 回折格子でのモデルを示しており、信号光線は Waveguide-R からの信号光線が

Waveguide-B の Output 回折格子を透過する。手前層での Output 回折格子での回折による光損失を考慮するために、Waveguide-B の透過 0 次光の回折効率が組み込まれている。

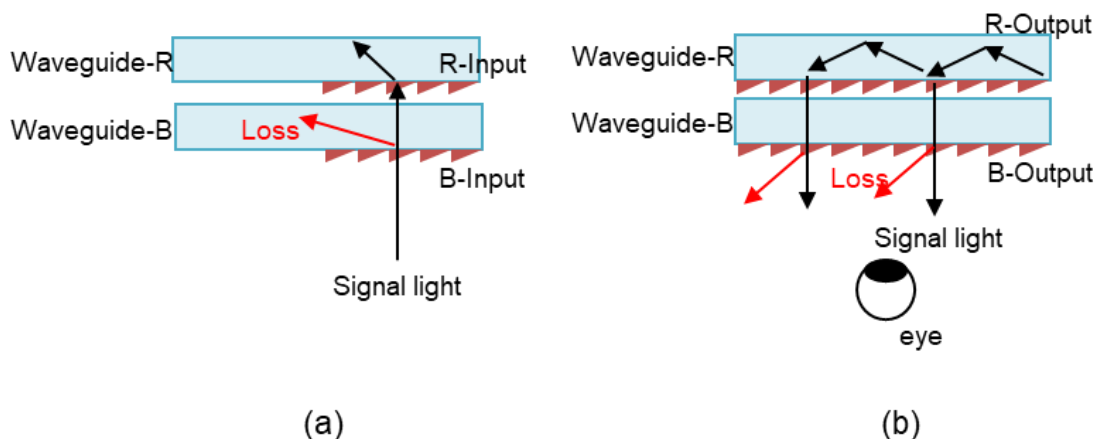


図 3.4 多層導光板構造の解析モデル

以上の議論から、2 層表面掘り込み回折格子導光板の全体を通しての光利用効率は、式 (3.7) で与えられる。

$$f_{WG} = f_{WG-B}(\lambda) + f_{WG-R}(\lambda) \quad (3.7)$$

Waveguide-B では、青と緑の光の一部がそれを伝搬し、波長として 422 nm から 530 nm で画角の全範囲が伝搬する。また、Waveguide-R は赤と緑の光の一部である波長 516 nm から 639 nm の間の光を伝搬する。一部の光は Input-B 回折格子を通過して Input-R 回折格子で導光板に取り込まれる、両方の導光板層を伝搬する波長範囲が存在する。

表示画角 40° に渡って各色の全反射角度を考慮して決定した導光板に組み込む回折格子のピッチと回折格子溝の方向について表 3.1 にまとめた。

表 3.1 回折格子ピッチと溝方向

Waveguide	Waveguide-B			Waveguide-R		
Grating	Input	VE	Output	Input	VE	Output
Material	S-LAH88					
Period	343.3 nm	237.2 nm	328 nm	455.5 nm	300.6 nm	400 nm
Groove direction	-90°	136.3°	0°	-90°	138.7°	0°

青色用の導光板では Input-B で 343.3 nm, VE-B で 237.2 nm, Output-B で 328 nm である。赤色用導光板では Input-R で 455.5 nm, VE-R で 300.6 nm, Output-R で 400 nm と

設定した。これらは表 3.2 に示すガラス基板の材質にはオハラ製の S-LAH88 を想定し、屈折率は $n_d = 1.91650$ としたときの、導光板内での各波長での全反射の臨界角の条件を基に決定した。また、回折格子溝の方向は垂直方向に平行な溝を 0° として角度を記載しており、いずれも式 (2.1) で示した格子ベクトルの保存条件を満たす条件となっている。

表 3.2 全反射臨界角条件

Wavelength	TIR criteria
455 nm	30.91°
520 nm	31.23°
615 nm	31.52°

これらの回折格子の構造における導光板内での具体的な伝搬光線角度を表 3.3 にまとめる。表 3.3 は画面の中心画角と画面四隅の伝搬光線角度を夫々示している。Input 回折格子で回折後 (VE 回折格子まで) の光線角度と、VE 回折格子で回折後 (Output 回折格子まで) の光線角度を全て示している。

表 3.1 で提示した回折格子によって Waveguide-B では青色光と緑色光において全ての画角で全反射臨界角以上の光線角度を実現することを示している。一方で赤色光は回折できない上限が生じる (ハイフン記載部)。また、Waveguide-R では赤色光と緑色光が全ての画角で全反射臨界角以上の光線角度となり導光可能な一方で、青色光の一部の画角は臨界角を下回り、導光板内にとどまることができない。

表 3.3 導光板内での画面四隅の光線角度

Wave guide	λ (nm)	Ray angle in waveguide (deg.)									
		Input to VE					VE to Output				
		中心	左下	左上	右下	右上	中心	左下	左上	右下	右上
B	455	42.91	51.86	37.64	37.64	51.86	45.44	34.37	34.37	60.76	60.76
	520	51.75	62.92	45.38	45.38	62.92	55.29	42.18	42.18	79.44	79.44
	615	68.48	-	59.25	59.25	-	78.61	-	55.83	-	-
R	455	30.87	38.53	26.77	26.77	38.53	35.75	26.00	26.00	48.16	48.16
	520	36.29	44.49	31.65	31.65	44.49	42.38	31.68	31.68	56.70	56.70
	615	44.90	54.41	39.35	39.35	54.41	53.49	40.71	40.71	75.07	75.07

解析モデルではブレイズ回折格子を近似するために、10 ステップの階段状のマルチレベル回折格子を想定した。回折効率は、光線の入射角と波長、および偏光をパラメータとして M.G. Moharam ら [29-32] によって提示された定式化に基づく、RCWA 法によって計算した。使用した RCWA シミュレータは、アリゾナ大学によって構築及び配布されている Optiscan を用いた [33]。

RCWA 法によって計算される回折効率は、回折格子のような周期的な構造を持つ構造に入射する平面波のマクスウェルの方程式の厳密解である。一般に、RCWA による回折効率 (η) は、特定の偏光方向や格子溝の方向に応じて、p 偏光 (η_p) および s 偏光 (η_s) 成分が計算される。導光板の Input, VE, Output の回折格子は格子溝の方向が異なるため、信号光の偏光方向だけでなく回折格子の溝方向も考慮した解析が必要となる。モデルに組み込まれた回折効率 (η) は、p 偏光 (η_p) と s 偏光 (η_s) の成分に分解する必要がある。ただし、フォトンバジェットモデルでは解析を簡略化するために、表面掘り込み回折格子の回折効率は、p 偏光成分と s 偏光成分の回折効率の平均として仮定した。したがって、回折効率は $\eta = (\eta_p + \eta_s) / 2$ で与えられる。回折格子の溝深さで一致するデータがlookupテーブル内に存在しない場合には、構築した解析モデルは隣接するデータポイントの値を参照し、線形補間を使用して対象の回折効率を推定する。

3.4 回折格子パターン最適化

大規模なノンシーケンシャルベースの光線追跡ベースの計算手法に依存せずに、前節で構築した数学的モデルを用いて、溝深さが変化する回折格子を用いた導光板の最適な構造を特定する手法について説明する。

導光板モデルとして対角面角は 40 度 (35° (水平) \times 20° (垂直)) で、アイボックスのサイズは水平： ± 8.5 mm, 垂直： ± 6.5 mm とした。アイボックスのサイズを考慮して VE と Output 回折格子の物理的な領域サイズ (VE： 11.6 mm (水平) \times 30.6 mm (垂直), Output： 25.8 mm (水平) \times 19.0 mm (垂直)) を決定した。瞳孔の直径は 4 mm, 導光板の厚さは 1 層あたり 1 mm に設定した。設計の中心波長は、各色 LED の代表的な波長に対応する 455 nm, 520 nm, および 615 nm で取得した (Osram LCG H9RM [34], LE BR Q7WM [35])。光利用効率の評価ポイントについて図 3.5 に示す。虚像の全画角を 3×3 サブエリアに分割し、分割された各面角領域の中心にあるポイントにおいて光利用効率の評価を実施する。

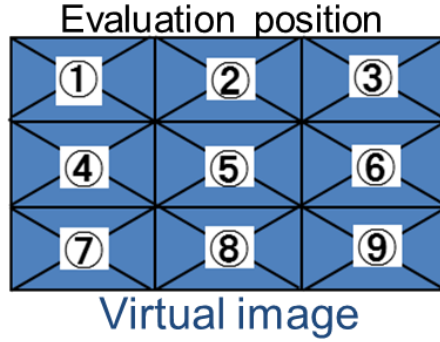


図 3.5 最適化における輝度評価ポイント

最適化では以下で定義する評価関数(f_m)を用いて画面内で輝度のバランスが取れるように評価を行った。

$$\begin{aligned}
 f_m = & \alpha_1 [(\phi_{B4} - \phi_{B5}) + (\phi_{B6} - \phi_{B5})] + \alpha_2 [(\phi_{G4} - \phi_{G5}) + (\phi_{G6} - \phi_{G5})] + \alpha_3 [(\phi_{R4} - \phi_{R5}) + (\phi_{R6} - \phi_{R5})] \\
 & + \alpha_4 [(\phi_{B2} - \phi_{B5}) + (\phi_{B8} - \phi_{B5})] + \alpha_5 [(\phi_{G2} - \phi_{G5}) + (\phi_{G8} - \phi_{G5})] + \alpha_6 [(\phi_{R2} - \phi_{R5}) + (\phi_{R8} - \phi_{R5})] \\
 & + \alpha_7 [(\phi_{B4} - \phi_{B6})] + \alpha_8 [(\phi_{G4} - \phi_{G6})] + \alpha_9 [(\phi_{R4} - \phi_{R6})] \\
 & + \alpha_{10} [(\phi_{B2} - \phi_{B8})] + \alpha_{11} [(\phi_{G2} - \phi_{G8})] + \alpha_{12} [(\phi_{R2} - \phi_{R8})]
 \end{aligned} \quad (3.8)$$

ここで、 α_n は重み係数あり、各色での評価位置 # 5 に対する各画面位置での相対的な光学効率を $\Phi_{RGB,n}$ で表している。

この評価関数を使用して、一般化勾配減少法[36]に基づく Microsoft Excel ソルバーツールによって評価関数を最小化することで Output および VE 回折格子の各サブ格子領域の溝深さを最適化する。評価関数は、水平方向及び垂直方向に沿った輝度の均一性を評価し（位置：2, 4, 5, 6, 8）、VE /Output 回折格子エリアは5つのサブエリアに分割して解析をする。最適化プロセスにおいて収束点を探索しやすくするために4隅の位置（位置：1, 3, 7, 9）を評価する項は式(3.8)には組み込まない。また、最適化プロセスでは、製造が難しい浅すぎるまたは深すぎる回折格子溝を回避するため、Waveguide-B の VE 回折格子の溝深さは 40 nm から 100 nm の範囲内に制限した。同様に、Waveguide-R の VE 回折格子の溝深さは 50 nm から 110 nm 以内に制限し、Waveguide-B の Output 回折格子の溝深さは 50 nm から 150 nm 以内であり、Waveguide-R の Output 回折格子の溝深さは 100 nm から 200 nm の範囲とした。また、溝深さを変調しない場合の導光板の光利用効率以上の光学効率を得られるよう制限条件を付加している。

重み係数 α_n は、最適化の結果を見ながら均一性を向上させるために手動で調整を行った。これは評価関数を用いたレンズ設計の最適化プロセスと同様で、最適化の各反復では重み係数を手動で調整し、重み係数の関数としてパフォーマンスを記録する手法と同様のアプローチであるあり、コンピュータベースの最適化における重み係数の決定に積極的に介入を行った[28, 37, 38]。

回折角度の波長依存性のため、青色光は緑色/赤色光と比較して伝搬角度が小さく、VEとOutput回折格子とでより多くの回数に渡って相互作用し、最適化プロセスにおいて青色画像の輝度均一性が低くなる傾向がある。青色の重み係数 α_n ($n=1, 4, 7, 10$)には、緑と赤の画像の重み係数 α_n よりも高い値の設定が必要となる。

以上で説明した解析手法は、導光板の回折格子の溝深さを最適化するために必要な時間を大幅に短縮し、一例として市販のプロセッサ（コア i5-3320M, Intel）を用いた場合では、通常2秒未満で回折格子の溝深さ深さの候補パターンを特定可能であり、大幅な計算時間の低減が実現される。

3.5 同定した回折格子構造

前節で説明したフォトンバジェット解析モデルを用いて特定した溝深さ変調回折格子導光板の回折格子の溝深さプロファイルを表3.4に要約する。各色の2層化された導光板のInput, VE, Output回折格子の各サブ格子領域の溝深さの最適化結果を示している。

検討においては、回折格子のサブ格子領域を6つ以上に分割した場合についても検討をしたが、隣接間の格子溝深さの変化が小さく、輝度や輝度分布への改善効果も小さいため、5分割の構造を採用した。

表 3.4 溝深さ変調回折格子導光板の格子溝深さ

Sub-area	Grating Depth (nm)					
	VE		Output		Input	
	Blue	Red	Blue	Red	Blue	Red
1	40	101	54	100	380	520
2	49	78	72	120	-	-
3	52	88	79	125	-	-
4	58	110	98	127	-	-
5	58	110	98	126	-	-

3.6 光線追跡と電磁波解析シミュレーションによる設計結果の検証

構築した解析モデルによって特定した溝深さ変調回折格子導光板の映像表示性能を正確に評価するために、幾何光学的なノンシーケンシャル光線追跡と電磁波解析シミュレータによって導光板の輝度均一性と光利用効率の数値的な検証を行った。このために、RCWA

によって計算された回折格子の入射光線角度，格子溝の方向，格子溝深さ，偏光方向に対する回折効率をlookupテーブルとして幾何学的な光線追跡シミュレータ（Zemax）に統合し[28-33]，導光板の映像表示性能の正確な評価を実施した。統合シミュレータ内では数百万本の大規模な光線の追跡を行い，光線が導光板内で回折格子領域に入射する度にRCWAによる回折効率のlookupテーブルを参照し，回折光を生成することで正確な導光板性能の検証が可能である。

一般に，マイクロディスプレイの対角線のサイズ（ L_{disp} ）と投影レンズの焦点距離（ f_{pj} ）に対して， $2\arctan(L_{disp}/2f_{pj})$ によって対角方向の画角（全角）が決定される。光学系では，マイクロディスプレイのサイズはアスペクト比16：9の0.31インチに設定され，投影レンズの焦点距離は10.91 mmに設定した。広い波長スペクトルを持つLED（Osram LCG H9RM, LEBR Q7WM）[34, 35]のスペクトルと同じ光源を想定した。解析した光学系は図2.12に示したものと同様であり，導光板の幾何学的寸法（厚さ，回折格子サイズ，瞳孔サイズ）は上記で述べたものと同じ条件に設定する。

溝深さ変調回折格子導光板の表示映像の解析結果を図3.6に示す。各色の虚像の輝度分布の結果を示しており，（a）に青色LEDでの虚像の輝度分布，（b）に緑色のLEDでの虚像の輝度分布，（c）に赤色LEDでの虚像の輝度分布を示している。

図3.6右側のグラフ（d, e, f）は示す画像中心（#5）の輝度を基準とした画面周囲の評価点の相対輝度を示している。（d）に青色LEDの場合の各評価ポイントの相対輝度，（e）に緑色のLEDの場合，（f）に赤色LEDの場合の結果を示した。

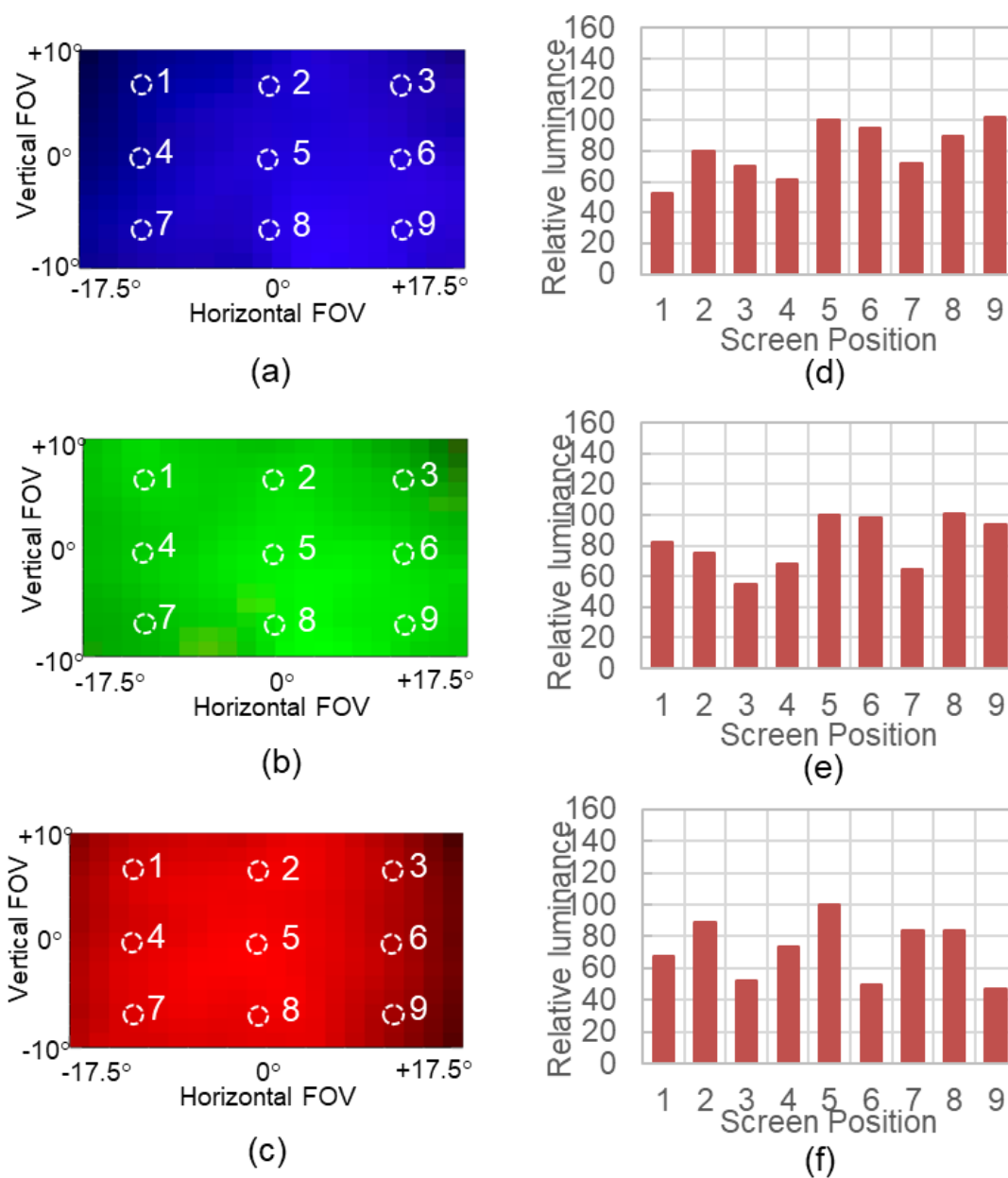


図 3.6 溝深さ変調回折格子による表示映像シミュレーション

虚像の画角は 35° (水平) \times 20° (垂直)であり、画角中心にある評価点「#5」を基準とした画面の 9 つの評価点の中で最小輝度の場所との比である輝度均一性は溝深さ変調回折格子を用いることで 33%から 47%へと 1.4 倍向上することが明らかとなった。

ライトエンジンの射出瞳上で 1lm の光束 (色座標: $x=0.33$, $y=0.35$) を信号光として出力する場合、導光板越しに視認される画像の画角中心の輝度は $315 \text{ cd/m}^2/\text{lm}$ (色座標: $x=0.31$, $y=0.34$) に達する。これは溝深さ変調回折格子導光板によって伝搬プロセスでの光損失が低減することを示しており、従来の導光板に比べて光利用効率が 37%増加する。

また、導光板の回折格子は波長によって回折効率が異なるため、虚像と射出瞳の間の色座標にはわずかな違いが生じている。

以上より、幾何光学および電磁波解析による分析の結果、提案する溝深さ変調回折格子導光板が輝度均一性及び光利用効率を向上することを明らかとした。

3.7 サブ格子領域境界の影響の考察

ここでは回折格子をサブ領域へ分割したことによる画像形成への影響について議論する。コリメートされた信号光が導光板内でサブ回折格子間の境界に入射すると、信号光ビーム内では対応するサブ回折格子に応じた効率で個別に回折が生じる。ここで、回折格子のピッチや溝方向はサブ回折格子上で一定に保たれていれば、回折光の波数ベクトルの方向はサブ回折格子毎に差異が生じることが無く、問題なく画像が投影される。

もう一つの観点として、製造公差の観点から、サブ回折格子領域の形成位置がずれることで、サブ回折格子の境界部に空間的なギャップが生じる場合が予想される。このサブ回折格子間の隙間による、1) 画像輝度の不均一性、2) 画像の欠落や迷光、の影響が懸念されるが、以下の理由により基本的に観察されないと考えられる。

1) 画像輝度の不均一性

ライトエンジンの各ピクセルの信号光はコリメート光として全反射を繰り返して導光板内を伝播している。よってサブ回折格子間の隙間に入射した信号光は、引き続き全反射を起こす。この全反射は意図するものではないが、回折格子の隙間の幅はマイクロメートル程度のオーダーであると見積もられる。一方で回折格子上の信号光ビームの幅はミリメートルを超えるサイズを有する。よって、サイズスケールで3桁の差異があり、輝度の均一性に対する回折格子の隙間部分の影響は無視できるレベルである。

2) 画像の欠落や迷光

装着者の網膜上に結像される画像は、導光板上の回折格子ではなく、ライトエンジン内のマイクロディスプレイと共役である。したがって、回折格子間の隙間が網膜上に結像されることはなく、装着者が視認することはない。さらに瞳から回折格子面までは30mm程度の光路長にあり、水晶体のフォーカス調整範囲として実像の視認をした場合においても、隙間の幅の角度範囲はヒトの眼の角解像度を下回る。

3.8 広画角化・輝度均一化の到達限界の考察

今後、理想的な導光板を目指す上では、より一層の画角の拡大と軽量化やコストの観点から導光板の単層化も強く求められる部分である。そこで単層の表面掘り込み回折格子導光板で対応可能な画角の理論限界を明らかとするために、回折格子による回折角と全反射

よる閉じ込めとの関係を考察する。

図 3.7 は、波長として 455 nm, 520 nm, および 615 nm で画角 40 度の映像光が単層の表面掘り込み回折格子導光板に入力した場合における、導光板内の光線角度 (AOI) の範囲を導光板の基板の屈折率に応じてプロットしたものである。導光板の屈折率は 1.5~2.2 の範囲で、回折格子のピッチは、Input が 343.3 nm, VE が 237.2 nm, Output が 328 nm を想定した。

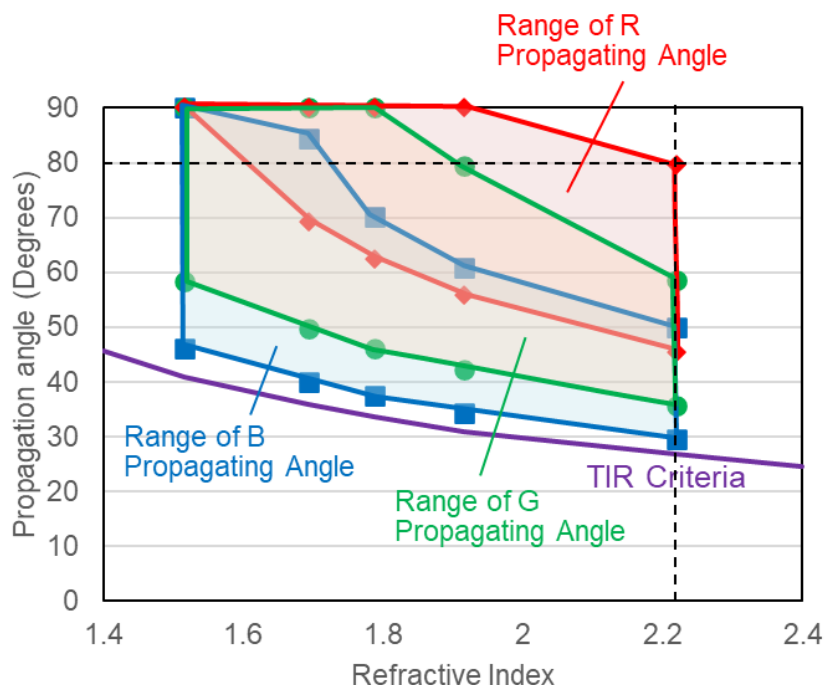


図 3.7 単層の表面掘り込み回折格子導光板内の光線角度範囲

単層の表面掘り込み回折格子導光板では、同一の回折格子で青・緑・赤色全ての信号光が回折される。従って波長が短く回折角度の小さい青色光の全反射角度の臨界角によって下限が設定され、上限は回折角度の大きい赤色光の最大許容の光線角度によって制限される。図 3.7 から、単層の導光板で青色光と緑色光とは $n_d > 1.9$ で全反射臨界角と 80° の間の必要な光線角度範囲を満たす一方で、赤色光の回折角度が大きく、 $n_d = 1.9$ を超える必要性があることもわかる。

導光板基板をさらに高屈折率化し、 $n_d > 2.2$ とすると問題は解決するが、 $n_d > 2.2$ は光学ガラス材料の屈折率の上限のレベルである [39]。以上の結果は、単層の表面掘り込み回折格子導光板は画角 40° に制限され、更に画角を拡大するには、2 層以上の導光層を持った導光板構造が必須であることを示している。

次に、輝度均一化の観点での議論を行うために、回折格子の回折特性について着眼し検討を行う。回折格子の波長・入射角依存性が大きな表面掘り込み回折格子導光板において、

本章で示した設計は、溝深さ変調回折格子構造を用いることで、従来の表面掘り込み回折格子の設計と比較して、より高い光利用効率と輝度均一性の両方を実現した。これらの解析は、各サブ回折格子領域の回折効率特性に RCWA によって計算された現実的な解析データを用いて提案手法の効果を検証した。

一方で、回折格子の波長・入射角依存性が大きな表面掘り込み回折格子導光板において、より理想的な特性の回折格子を仮定した場合（入射エネルギーを 0 次と 1 次の 2 つの回折次数のみに分割する理想的ではあるが、架空の回折素子）において、光利用効率と輝度の均一性の点でどの程度の性能に到達可能かを調査した。この検討は、画角と輝度均一性の評価指標において、提案した導光板の構成がどのレベルにあるかを把握する上で有効であると考えられる。

図 3.8 は、VE および Output 回折格子に理想的な回折光学素子を適用した場合の表示画面輝度分布のシミュレーション結果を示している。各色の虚像の輝度分布の結果を示しており、(a) に青色 LED での虚像の輝度分布、(b) に緑色の LED での虚像の輝度分布、(c) に赤色 LED での虚像の輝度分布を示している。図 3.8 右側のグラフ (d, e, f) は画像中心 (#5) の輝度を基準とした画面周囲の評価点における相対輝度を示している。(d) に青色 LED の場合の相対輝度、(e) に緑色の LED の場合、(f) に赤色 LED の場合の結果を示した。

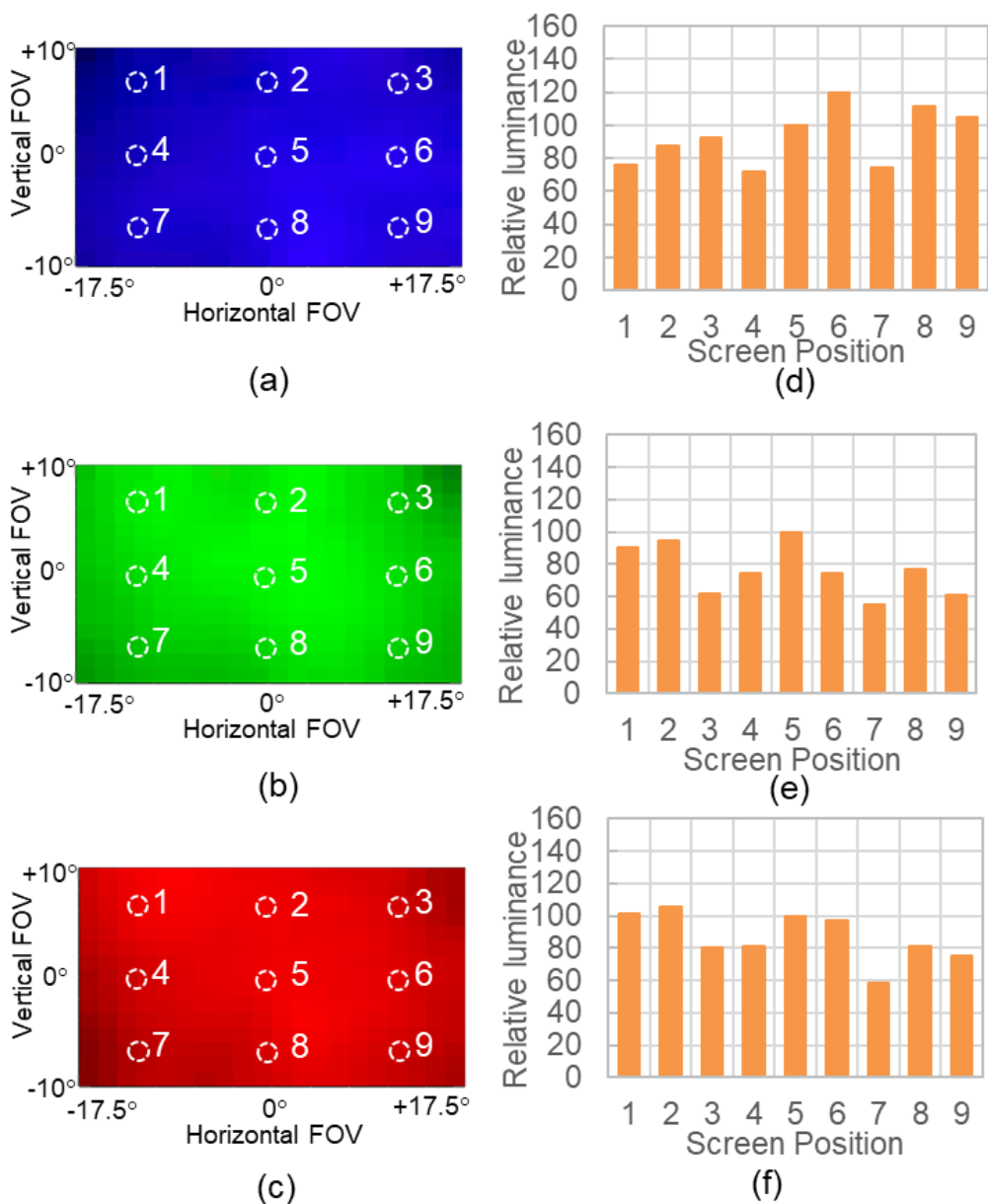


図 3.8 理想回折格子でのシミュレーション結果

解析結果より、ライトエンジンの射出瞳位置において 1 lm の光束（色座標： $x = 0.35$, $y = 0.35$ ）を信号光として出力した場合に、導光板越しに視認される画像の画角中心の輝度は $560 \text{ cd/m}^2/\text{lm}$ （色座標： $x = 0.31$, $y = 0.34$ ）に達することがわかった。

従って、実際の回折格子特性を使用して設計した溝深さ変調回折格子導光板は、上記の理想的な回折格子の解析から導いた理論上の限界の 56% の輝度を実現している。実際の回折格子の回折効率は、波長、入射角度、溝の方向、偏光に依存する。これらの要因が理想的な性能限界との乖離の要因であるが、この解析結果からは、溝深さ変調回折格子導光板の表示輝度は約 2 倍にまで向上する余地があることを示唆している。

また、理想回折格子での輝度均一性の解析結果は 55%となった。前節の現実の回折格子特性を用いた解析結果から大きな改善は得られず、輝度均一性の観点からは表面掘り込み回折格子導光板での画角は現状の 40° が限度であると考えられる。

最後に回折格子の製造性の観点から考察を行う。本研究では、製造性の観点から回折格子の溝深さを、40 nm から 110 nm (VE) および 50 nm から 200 nm (Output) の範囲内に制限した[40-42]。今回の設計は、回折格子構造の屈折率は基板の屈折率 ($n_d = 1.9165$) と一致した構造を想定している。階段状マルチレベル回折格子構造は、小規模生産にのみ適した複数の電子ビームリソグラフィによって製造できる。しかし、大きな回折格子面積 (通常は数百 mm²) を持つ導光板において、電子ビームリソグラフィによる上記のような広範囲の露光は、電子ビームライタの視野が狭いために、推定によれば、100 時間以上を必要とする。このような課題に対し、近年、変位タルボットリソグラフィにおける位相シフトマスクのような、短い露光時間で大面積の回折格子を製造するための代替方法が提案されている[43-45]。このような最先端の製造方法を用いれば、回折格子の製造にかかる時間を短縮することができると考えられる。

また上述の製造プロセスとは異なるアプローチとして、ポリマー材料にナノ構造を転写して回折格子を製造するナノインプリントリソグラフィを用いることができれば、低コストで大規模生産が可能である[42]。しかしナノインプリントプロセスを、現在の設計に適用するには、基板の屈折率に一致する高屈折率ポリマー材料を必要とするが、従来の透明ポリマー材料の屈折率は、約 1.74 となっている[46]。基板に比べて屈折率が小さい回折格子によって、格子溝の深さを設計すると、位相変調を高屈折率の格子構造に近づけるために、より深い構造を必要とする。特に高い回折効率を必要とする Input 回折格子の溝深さが最も深くなり、ナノインプリントプロセスによる溝構造の転写性に影響を与える。導光板基板と回折格子構造の材料屈折率との最適な組み合わせを調査することは本研究の範囲外ではあるが、ナノ複合材料において潜在的に適用可能な候補が報告されている[47]。

以上では導光板の製造性や製造時間の短縮に関する考察を述べたが、もう一方では、前述の通り、時間を要するボトルネックとして設計プロセスが残留する。設計プロセスでは、光線と回折格子との相互作用を考慮しながら、大量の光線をノンシーケンシャルにシミュレータ内で追跡する必要がある。通常、この最適化設計を繰り返して良好な性能の設計解に到達するまでに数十日またはそれ以上の時間を要する。本研究で提案し、検証したフォトンバジェットティングによる解析手法は、溝深さが変化する回折格子パターンを短時間で同定する。その上で、後段の電磁波解析を組み込んだノンシーケンシャル光線追跡により、その解析解の妥当性について正確に検証を行った。このプロセスは、実際に、レンズ設計で確立され広く採用されているザイデル収差理論に基づく基本光学系の特定と、それに続く最新の光線追跡コードによる最適化[28, 37, 38]の設計手法に着想を得たものである。さらに解析精度に関して一例を挙げれば、輝度均一性の解析結果の不一致は 24%未満であり、この誤差が許容できる場合は、解析モデルによる結果は最終的な設計解となりえる。一方で、さらなる最適解を追求する場合においても、良好な 2 次的な設計の開始点を提供する

ことを意味しており、提案する解析手法の有効性は明らかである。

3.9 おわりに

第3章では、表面掘り込み回折格子導光板をベースに、新しく回折格子の溝深さを個別に変化するサブ格子領域にセグメント化し、画角全体の輝度の均一性の向上と、導光板内での全体的な光損失を低減する手法を提案した。

また、上記の溝深さ変調回折格子パターンを設計する上で、ノンシーケンシャル光線追跡による大規模な解析がボトルネックとなる設計時間を短縮する方法論について取り上げた。通常、最適化設計を繰り返して改善するまでに数十日またはそれ以上の時間を要する、何百万もの光線をノンシーケンシャルに追跡することなく、数学モデルと最適化手法によって、数秒での溝深さ回折格子構造の同定を可能とする設計手法を提供した。

電磁波解析による回折格子特性を考慮する光線追跡によって正確な画像表示性能の解析を行い、導光層を2層とする溝深さ変調導光板を設計し、画角(35°(水平), 20°(垂直))で315 cd/m²/lmを達成し、光利用効率従来導光板と比較し37%向上した。さらに画角全体にわたる輝度均一性も33%から47%への向上を達成した。

一方で、実際の回折格子特性と理想的な回折格子特性との両面から溝深さ変調回折格子導光板を解析し、これ以上の輝度均一性や画角の大きな向上は見込めず、多層構造も不可欠であることを明らかとした。

4. 線対称イメージ入力体積ホログラム導光板

4.1 はじめに

本章では、複数の回折格子を同一の場所に重畳記録できる体積ホログラムを活用し単層化されたヘッドマウントディスプレイ導光板について検討する。

体積ホログラム導光板の数学的モデルを構築し、導光板内の信号光と体積ホログラムの相互作用体積を考慮して、観察者が見る虚像を分析する。相互作用体積の変化により、回折光強度が光線角度ごとに変化し、虚像の輝度均一性が低下するという重大な課題を明らかとする。本課題に対して単層体積ホログラフィック導光板に線対称イメージを入力することにより、画角を拡大する手法を提案する。

4.2 体積ホログラム導光板

表面掘り込み回折格子導光板は、回折格子の波長依存性が大きく、可視光領域の全体に渡って全反射の条件を満たすことは困難である。図 4.1 (a) に示す通り、信号光の色に応じて導光層を分割する必要があることを第 2 章で述べた。表面掘り込み回折格子導光板に屈折率約 2 のガラス材料を使用した場合でも、多層構造が不可欠であり、画角は約 40° に制限される。さらに回折格子の領域は多くのセグメントに細かく分割されて溝深さを変調した回折格子を用いた導光板としても輝度均一性は 55% が限界であることを第 3 章で述べた。

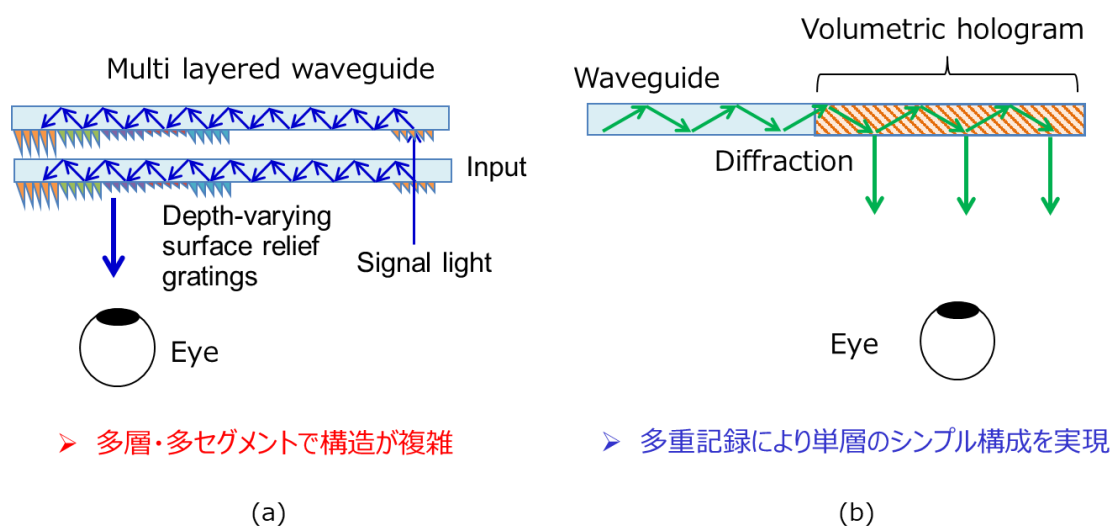


図 4.1 体積ホログラム導光板

これらの研究結果は表面掘り込み式回折格子の導光板によって大幅な広画面角化が困難であることを示しており，図 4.1 (b) に示すような単層の導光板で広画面角の映像表示を実現するために，本研究では同一の場所に複数の回折格子を多重化して記録できる特徴を持つ体積ホログラム技術に着眼した[48-52]。

体積ホログラムでは導光板上に必要な場所に各画面角の光線角度に最適な回折格子を多重化して記録することが可能であり，体積ホログラムによる広画面角で輝度が均一なヘッドマウントディスプレイ導光板を実現する研究を行った。

4.3 端面入射体積ホログラム導光板

4.3.1 基本コンセプト

体積ホログラム導光板を備えたヘッドマウントディスプレイの光学システムを図 4.2 に示す。体積ホログラム導光板は薄い平面の平行板で，これまでと同様にマイクロディスプレイと投影レンズを備えたピコプロジェクタや MEMS (Micro-Electro Mechanical System) ミラーシステムなどをライトエンジンとして映像信号光が入力される。

図 4.2 (a) は体積ホログラムを組み込んだ導光板の既存の研究例を示している。ライトエンジンからの信号光を取り込む入力側の体積ホログラムと，複数の全反射を介した過程により導光板内を伝播し，瞳の前で導光板から信号光を取り出すための出力側の体積ホログラムを備えた構成となっている[27, 53-57]。非常に薄い体積ホログラム層がガラス基板によって挟み込まれるか，ガラス基板の表面に張り付けられた構成をしている。この構成の場合，出力側の体積ホログラムを信号光ビームが照明する領域が限られ，瞳に向かって出力される信号光は離散的になる。画面角によっては瞳へ結合しにくい光線角度の条件が生じ，画面に輝度ムラを生じて広画面角化を阻害する。

この他にも，より広い画面角を狙って，外部光学系を導光板と瞳孔の間に配置するアプローチが報告されているが，これらの外部光学系はシースルー品質を低下させる[59, 60]。

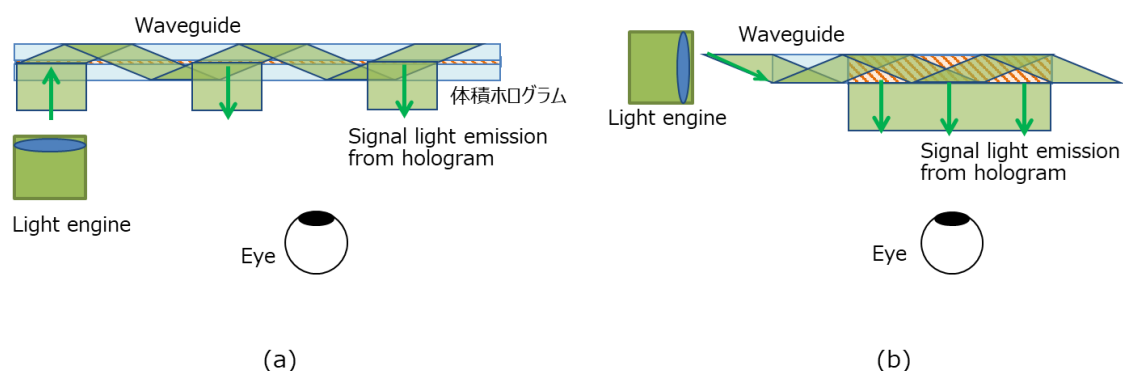


図 4.2 端面入射体積ホログラム導光板

次に本研究で提案する体積ホログラム導光板の構成について図 4.2 (b) に示す。本導光板のポイントのひとつは、信号光が約 1 mm の導光板端面から信号光を入力することである。非常に薄い体積ホログラム層 (0.1 mm 未満) が導光板に組み込まれている場合、ホログラムと信号光の間の相互作用が少ないと、光利用効率が 90% 低下する。光利用効率を向上させるには、導光板全体を体積ホログラムにする必要がある。この章では、導光板と瞳孔の間に外部光学系がない体積ホログラム導光板を使用して輝度の均一性を向上させながら、画角拡大する技術を提案する。

4.3.2 迷光の発生

ここでは提案する端面入射体積ホログラム導光板の技術的な課題について図 4.3 の概略図を用いて説明する。画面中心の信号光を光線角度 0° として導光板の端面に入射する。この時の画面の左右両端の光線角度をそれぞれ $-a^\circ$, $+a^\circ$ とする。この構成では、端面から入射された左右両端の光線は導光板内で全反射による光線角度の反転により光線角度 $-a^\circ$ と光線角度 $+a^\circ$ の信号光を区別することが困難となる。したがって体積ホログラムは光線角度 $+a^\circ$ と $-a^\circ$ の両方の信号光を同じ方向に回折し、迷光となる。その結果、通常の画像に左右反転した画像が重畳された虚像を視認するという問題が生じる。

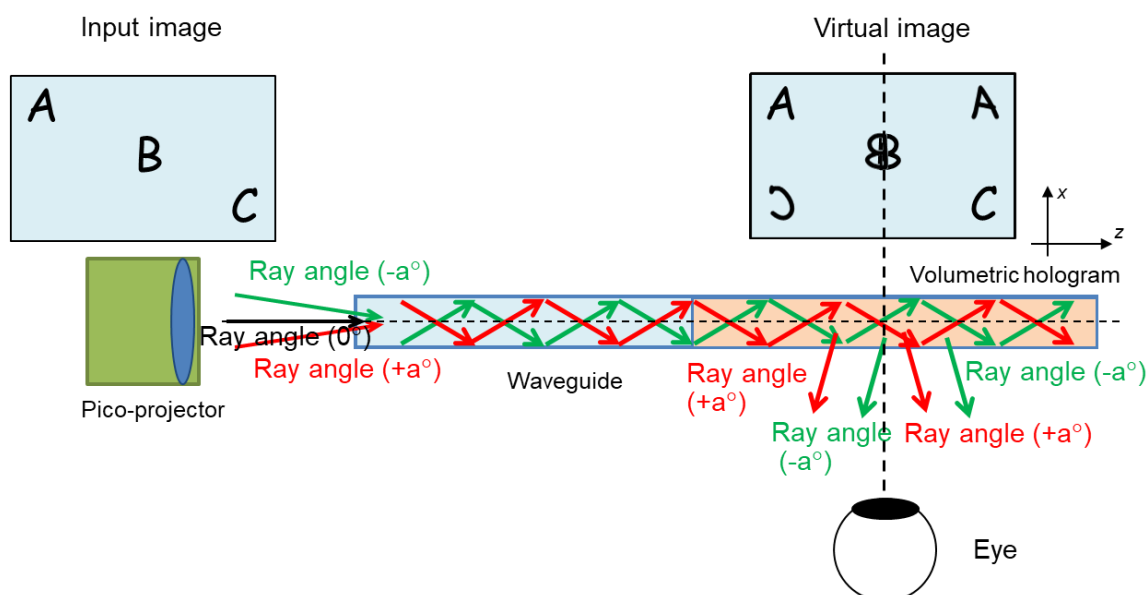


図 4.3 端面入射での体積ホログラム導光板の課題

このような重ね合わせ画像を避けるための構成を図 4.4 に示す。ライトエンジンから導光板へ入力する光線角度を 0° から $+a^\circ$ までの片側の画角の領域に制限する必要が生じる。図 4.4 (a) に片側画角のみから入射する方法での概略図を示し、図 4.4 (b) に導光板内部

での信号光の伝搬経路の様子について示す。

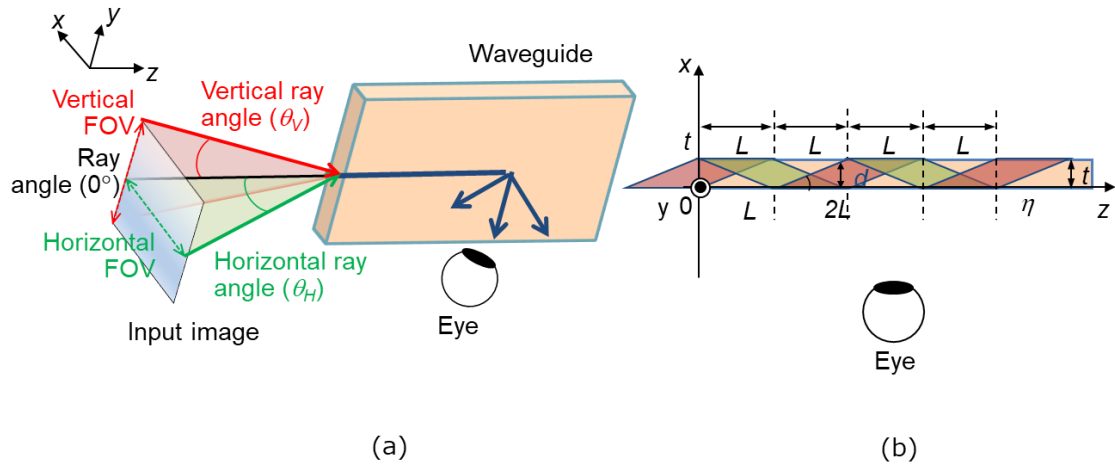


図 4.4 片側画角での端面射での体積ホログラム導光板

4.4 導光板解析モデル（ボルン近似）

体積ホログラム導光板の映像表示性能を解析するために、本節では各光線角度の出力信号強度を計算する数学モデルを構築する。前章において構築した表面レリーフ回折格子導光板のフォトンバジェット解析モデルではガラス基板と基板上の表面レリーフ回折格子で構成され、信号光が回折格子面に入射して回折が生じる場合を考慮している。つまり、前章の手法では体積ホログラムの回折層に厚みがある場合の回折特性を十分に考慮されていない。体積ホログラムの厚みを考慮した解析という点では、その他の研究例においてもなされていない[22-27, 53-58]。

前述した端面から画像を入力することで光利用効率を向上するには、導光板全体を体積ホログラムとする必要がある。回折効率、この厚い体積ホログラムと信号光の相互作用に依存する。そこで、照明された体積ホログラム領域の厚さを考慮した新しい数学モデルを構築して、高精度の回折効率を計算する。これは、提案する体積ホログラム導光板の解析に必須であり、新規な計算手法となる。

導光板全体に体積ホログラムを書き込むために、導光板材料はフォトリフラクティブ材料で構成される必要がある。フォトリフラクティブ効果により体積ホログラムを形成できるフォトリフラクティブ材料は、一般に入手可能な材料（例：LiNbO₃, LiTaO₃）である。これらのフォトリフラクティブ材料の屈折率[61-63]を基に、導光板の屈折率を 2.3 と仮定する。また、計算モデルを単純化するために屈折率は材料の結晶軸に依存しない等方性とし、本研究の解析では複屈折の影響は考慮しない。

構築する解析モデルは、体積ホログラムと信号光との相互作用時の回折効率を考慮しながら、光線に沿ったエネルギー伝搬を考慮し、虚像の輝度均一性を計算する。図 4.4 は、

垂直光線角度 $\theta_v = 0$ が信号光として入力された場合の導光板内の信号光の進行経路を示している。信号光の yz 平面への投影光線ベクトルに沿った全反射の周期 ($2L$) は、次の式で与えられる。

$$2L = \frac{2t}{\tan(\theta_p)} \quad (4.1)$$

ここで、図 4.4 に示すように、 t は導光板の厚さ、 θ_p は yz 平面への入力信号光の光線ベクトルの入射角である。

x 軸に沿った信号光の断面ビーム幅 (d) は、導光板内の位置 z に対応して変化する。体積ホログラムでの信号光の回折プロセスの概略図を図 4.5 に示す。全反射を繰り返しながら通過する信号光が体積ホログラムを照明すると、回折ビームが体積ホログラムから観察者の瞳へ向かって出射される。

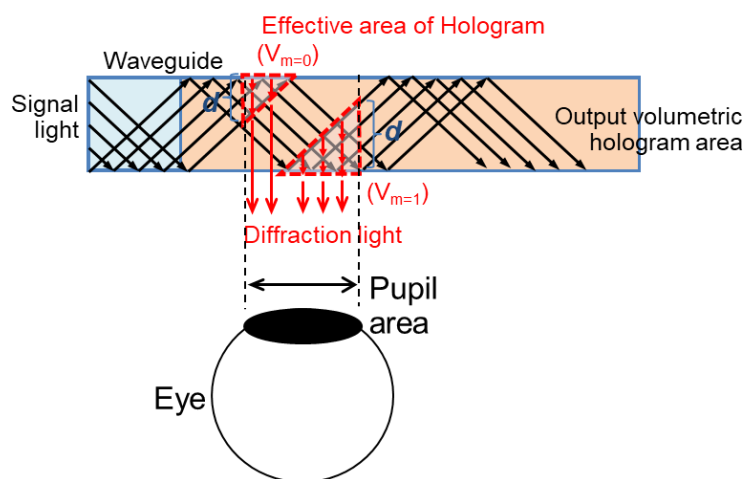


図 4.5 体積ホログラム導光板の信号光回折モデル

投影映像を生成する外部のライトエンジンがレーザ光源と MEMS, DMD (Digital Micromirror Device), またはファイバ走査システム[64-67]によって投影画像を生成する場合、導光板へはコヒーレントな光が入力される。共振によって駆動される MEMS ミラーはミラー径と駆動周波数の間に依存関係があり[66], ビームサイズを約 1 mm に制限するため、一般的な MEMS ミラーの直径は約 1 mm に制限される。一方、ファイバ走査型のライトエンジンの場合は、超短焦点距離のコリメートレンズを備えており、このレンズの直径である約 1 mm のコリメート走査光を提供する[64, 66]。これらのようなビーム径は、狭い導光板の端面に結合するのに適している。

体積ホログラムからの回折強度 (I_{diff}) は、照明された体積ホログラム領域の体積に依存する。図 4.5 に示すように、照明領域がいくつかの領域 (V_m) に分割される場合、各照明領域に対応する回折光の位相 (ϕ_n) も回折強度に影響する。ブラッグ条件が満たされる場合、回折強度は式 (4.2) に示すように、第 1 ボルン近似[68-70]に基づいて信号光で照明された体積ホログラム領域の体積の 2 乗に比例する。

$$I_{diff} \propto \left| \sum_m V_m e^{i\phi_m} \right|^2 \quad (4.2)$$

図 4.5 に示すように、信号光の断面の幅 d と瞳孔径は、式 (4.2) の照射された体積ホログラム領域の体積を決定するための重要なパラメータである。瞳孔の直径は、前述の通り周囲の環境の明るさに応じて 2 mm から 8 mm まで変化する [17]。もう 1 つの重要なパラメータである信号光の断面の幅 d は次のように定式化される。

全反射周期 $2L$ は、水平または垂直方向の光線角度によって変化し、信号光の断面の幅 d は光線角度と yz 平面の位置に依存する。導光板の入力端面に対する入力画像の水平方向の光線角度と垂直方向の光線角度をそれぞれ θ_H と θ_V で表すと、信号光の断面幅 (d) は次のように計算される。

図 4.4 (a) の θ_H と θ_V の定義から、導光板の端面で屈折後の入射光線ベクトル $\mathbf{e}_k = (e_{kx}, e_{ky}, e_{kz})$ (法線ベクトル $N = (0, 0, -1)$) は次の式で与えられる。

$$\mathbf{e}_k = \begin{pmatrix} e_{kx} \\ e_{ky} \\ e_{kz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\cos \theta_V \sin \theta_H}{n_{gl}} \\ -\frac{\sin \theta_V}{n_{gl}} \\ \sqrt{\frac{n_{gl}^2 + (\cos \theta_V \cos \theta_H)^2 - 1}{n_{gl}^2}} \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

ここで、 n_{gl} は導光板の屈折率である。端面へ入射後に導光板の zy 平面へ投影された光線ベクトルと z 軸との間の角度によって定義される垂直方向の光線角度 (θ_{gv}) は次の式で与えられる。

$$\theta_{gv} = \cos^{-1} \frac{e_{kz}}{\sqrt{e_{ky}^2 + e_{kz}^2}} \quad (4.4)$$

屈折した信号光は垂直方向に光線角度 θ_{gv} で導光板内を伝搬する。そこで、 x 軸に沿った座標回転によって z 軸が光線ベクトル \mathbf{e}_k の zy 平面への投影と平行になるように与えられる別の座標系 (x', y', z') を導入する。 θ_{gv} , x' , y' , z' 軸などの定義は、図 4.6 に示す。

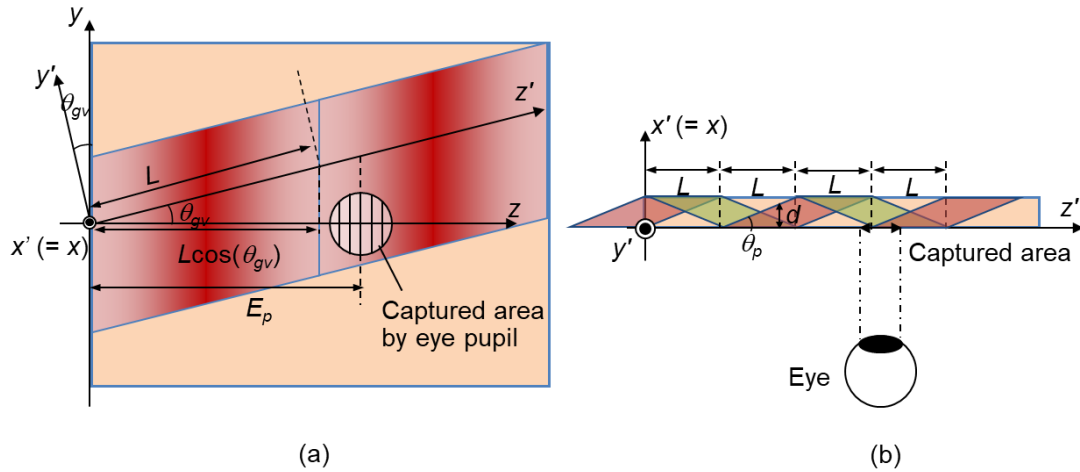


図 4.6 各種記号の幾何学的定義

$x'y'z'$ 座標系で信号光の断面幅 d を計算するために θ_p の角度は、 $x'z'$ 平面に投影された光線と $y'z'$ 軸との間の角度として再定義する。図 4.6 (b) に示すように、 xyz 座標系では z 軸に沿った単位ベクトルは $(0, \sin\theta_{gv}, \cos\theta_{gv})$ であるため、 θ_p の角度は次のように計算される。

$$\theta_p = \cos^{-1} \frac{e_{ky} \sin \theta_{gv} + e_{kz} \cos \theta_{gv}}{\sqrt{e_{kx}^2 + e_{ky}^2 + e_{kz}^2}} = \cos^{-1} (e_{ky} \sin \theta_{gv} + e_{kz} \cos \theta_{gv}) \quad (4.5)$$

この角度 θ_p は、 $x'y'z'$ 座標系での全反射 ($2L$) の周期を決定する。

次に、信号光の出力位置が光利用効率に与える影響について考察する。導光板から出射された信号光はヘッドマウントディスプレイを装着したユーザの瞳孔に取り込まれる。表示画面の輝度の均一性を正確に計算するには、解析モデルで瞳孔への信号光の結合プロセスを定式化する必要がある。実用性の観点から、瞳孔と導光板の間には一定の距離が必要となる。瞳孔から導光板の表面までの距離は、一般にアイレリーフと呼ばれる。図 4.7 に示すように、アイレリーフを考慮すると、瞳孔によって捕捉される信号光の導光板の表面での出射位置は光線角度に応じて変化する。このようにアイレリーフによる影響は正確な計算のために重要である。

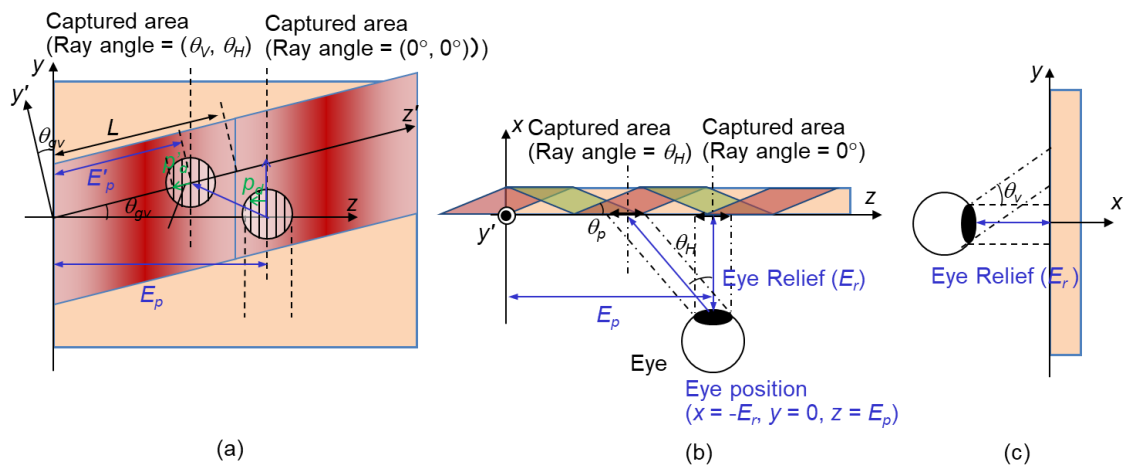


図 4.7 信号光と瞳の結合過程

信号光の垂直方向の光線角度に依存して、瞳孔に結合される信号光が導光板から出射する領域は垂直 (y 軸) 方向に変化する。本導光板の構成では信号光が入力される端面が全反射周期の開始点となる為、入力端面を起点とする距離によって断面幅 d が変化する。よって、瞳孔に結合する信号光の出射領域が垂直方向に移動しても、断面幅 d および回折光強度 I_{diff} は一定である。

一方、出射位置が水平光線角度とともに水平方向に変化する場合、出射光強度は断面幅 d の変化の影響を受ける。そのため、水平光線角度に応じて信号光の出射位置を考慮し出射する回折光強度を求める必要がある。 z 軸の出射位置 E'_p は、次の式で与えられる。

$$E'_p = (-E_r \tan \theta_H + E_p) / \cos \theta_{gv} \quad (4.6)$$

ここで、 E_p は瞳孔の位置、 E_r はアイレリーフを表している。

眼の瞳孔内における信号光強度の変化を考慮するために、図 4.8 に示すように瞳孔内に細かい計算メッシュを設けた解析モデルとする。

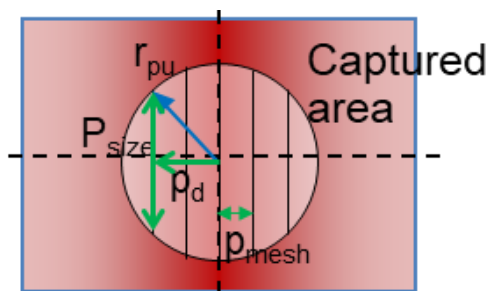


図 4.8 瞳孔内での計算メッシュ

前述のように、断面幅 d と回折光強度は垂直方向に沿って一定である。したがって、瞳孔の計算メッシュは水平方向に分割され、垂直方向に沿った計算メッシュサイズ (P_{size}) は次のように与えられる。

$$P_{size} = 2 \frac{p_d}{\tan\left(\sin^{-1} \frac{p_d}{r_{pu}}\right)} \quad (4.7)$$

ここで、 p_d は瞳孔の中心から計算の対象とするメッシュまでの距離、 r_{pu} は瞳孔の半径である。この計算メッシュまでの距離 p_d も $x'y'z$ 座標系に変換する必要があり、式 (4.8) によって p'_d に変換される。

$$p'_d = p_d / \cos \theta_{gv} \quad (4.8)$$

各計算メッシュでの信号光の断面幅 d_{mesh} は光線角度 θ_p 、瞳孔の位置 E'_p 、および計算メッシュ位置 p'_d により計算される。断面幅 d_{mesh} は式 (4.9) で記述される。

$$d_{mesh}(E'_p, p'_d, \theta_p) = \left| t \left(2 \left(\left[\frac{E'_p + p'_d}{2L} \right] - \left[\frac{E'_p + p'_d}{2L} \right] \right) - 1 \right) \right| \dots (\theta_H \geq 0) \quad (4.9)$$

ここで“ $[\]$ ”は床関数である。

前述したように、回折光の強度は照明された体積ホログラムの体積の二乗に比例する。また、照明されるホログラム領域を複数の領域に分割する場合は、分割されたホログラム領域間の回折光の位相差の影響を計算モデルに組み込む必要がある。位相差 ($\Delta\phi$) は、式 (4.10) で計算される。

$$\Delta\phi = \frac{2n_{gl}t}{\sin \theta_p} km \quad (4.10)$$

ここで、 k は信号光の真空中の波数であり、 m は図 4.5 および式 (4.2) で定義した照明されるホログラム領域を識別する変数である。

瞳孔内の各計算メッシュから回折される光波の振幅は、上記のように、各光線角度、瞳孔位置、およびアイレリーフを考慮して決定する必要がある。眼の瞳孔内の全ての光強度を計算するために、各計算メッシュの光波の振幅は次のように積算される。

$$I(\theta_V, \theta_H, E_r, E_p) = \left| \int p_{size}(p_d) d_{mesh}(z'_d, p'_d, \theta_p) e^{i\Delta\phi_{mesh}} dp_d \right|^2 \quad (4.11)$$

ここで、 d_{mesh} は各計算メッシュでの信号光の断面幅であり、 $\Delta\phi_{mesh}$ は位相差である。計算メッシュが同一の照明ホログラム領域内にある場合 ($m = 0$) は $\Delta\phi_{mesh} = 0$ となる。計算メ

ッシュが別の照明ホログラム領域 ($m \neq 0$) にある場合、 $\Delta\phi_{mesh} = \Delta\phi$ となり各計算メッシュで式 (4.10) を用いて位相差を考慮する。

光線角度が大きい回折光の場合、照明される体積ホログラム領域の形状は斜方体の形状である。しかし、式 (4.11) による解析モデルでは計算を簡単にするために、全ての回折光線角度に対して長方形の直方体形状を仮定している。この近似は導光板表面での屈折により光線角度が導光板内部では減少することから有効である。屈折率が 2.3 の導光板材料では、空気中での光線角度が 60° の回折光の導光板内での光線角度は 22° であり、この光線角度での計算精度への影響は 10%未満である。このように、導光板表面での屈折の効果により、直方体を仮定した計算メッシュの影響は限定的である。

また、広い画角に渡って輝度均一性を改善する線対称イメージ入力法の基本的な重要性を明らかにするために、体積ホログラムの回折特性についても基礎的かつ簡潔なモデルの選定が適当である。そこで、体積ホログラムの回折特性として、所定の単一の光線角度および波長に対して回折効率を有する体積ホログラムが視野範囲に渡る光線角度に対して導光板に多重記録されたモデルを想定する。

4.5 表示画像シミュレーション結果

定式化した式(4.11)による解析モデルを用いて体積ホログラム導光板から視認される虚像の輝度分布を算出した。図 4.9 に計算結果を示す。計算結果は水平方向に 0° から 60° までの光線角度、垂直方向の光線角度は $\pm 30^\circ$ の範囲で示す。導光板の厚さ t を 1 mm、アイレリーフ Er を 22 mm、瞳孔の位置 Ep を 25 mm とした。瞳孔の直径は周囲の環境の明るさによって異なるが、計算モデルでは一般的な中間サイズである 3 mm を使用した。光源の波長は 555 nm の単一波長であると想定した。導光板の屈折率は理想的なフォトリアクティブ材料として 2.3 とした。

導光板への入力画像を図 4.9 (a) に示す。全画面の画素を ON にした画像を導光板の端面に入力した場合において、導光板から出力される虚像の輝度分布の計算結果を図 4.9 (b) に示す。計算結果は、人間の明るさの知覚を考慮して対数目盛でプロットされている。

視認像には繰り返しの暗線が生じることがわかり、画面の輝度均一性が低く、視認映像の範囲において最大輝度と最小輝度の比として定義する輝度均一性は 0.1%以下となった。

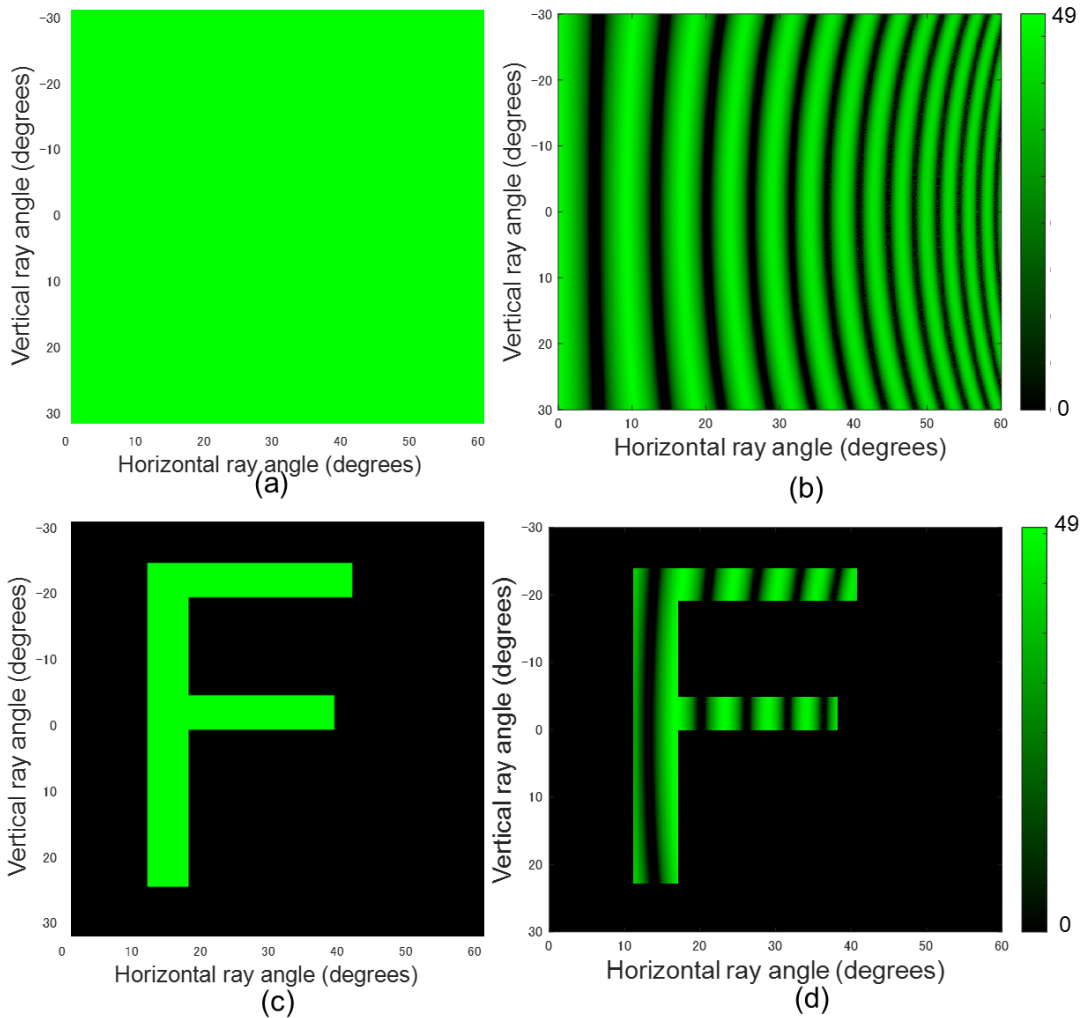


図 4.9 体積ホログラム導光板でのシミュレーション結果

図 4.9 (c) には、入力画像として「F」の文字を入力した場合の例を示している。このとき導光板から出力される虚像の計算結果を図 4.9 (d) に示す。繰り返し現れる暗線の影響で輝度均一性が低く、単純な文字においても視認性が悪く、文字認識が困難である。

計算結果から、体積ホログラム導光板へ端面から画像入力を行う手法では輝度均一性が 30% を超える領域の水平画角は 9° 未満の範囲となり有効画角が大きく制限されることが明らかとなった。

このような低い輝度均一性の要因について図 4.10 を使って説明する。図 4.10 は体積ホログラム導光板の断面図であり内部での信号光の伝搬の経路を幾何学的に示している。導光板内では信号光は全反射を繰り返す為に断面幅 d は一定でない。4.4 節で説明した、体積ホログラムの回折効率¹⁾は信号光で照明される体積の 2 乗に比例することから、信号光の断面幅が小さくなる領域では回折効率が大きく低下する。これは導光板からの出力光に光強度の強いエリアと弱いエリアが繰り返し生成されることを示す。画角（光線角度）により

全反射周期は異なるため、出力光の強弱のエリアは画角に応じて変化する。したがって、瞳が結合する光量が光線角度に依存して変化し、視認される映像輝度には明暗の領域が繰り返し生成される。

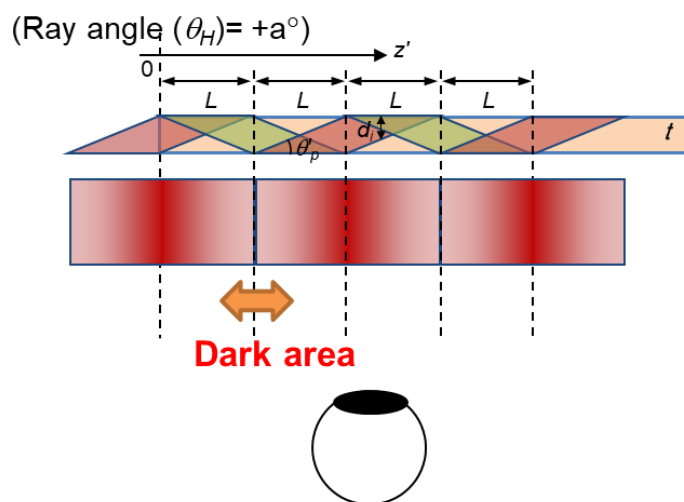


図 4.10 光線断面幅と出力強度

計算結果が示すように、端面入力 of 体積ホログラム導光板では十分な画像表示機能を備えておらず、その画角は非常に制限されており、対角で約 40° の画角をもつ表面掘り込み回折格子導光板の画角よりも小さくなってしまふことが明らかとなった。そこで、次のセクションでは、ヘッドマウントディスプレイ用の体積ホログラム導光板において新しい画角拡大手法を提案する。

4.6 線対称イメージ入力法

輝度均一性を改善するために、体積ホログラム導光板内の光線角度 $+a^\circ$ および $-a^\circ$ の信号光伝搬プロセスの対称性に焦点を当てた手法を考える。図 4.11 (a) に、それぞれの光線角度の導光板内の光伝搬経路の概略図を示す。前述の通り対称な角度の光線からのクロストークを回避するために、画角を片側の光線角度（たとえば、 0° から 60° ）に制限する必要がある。

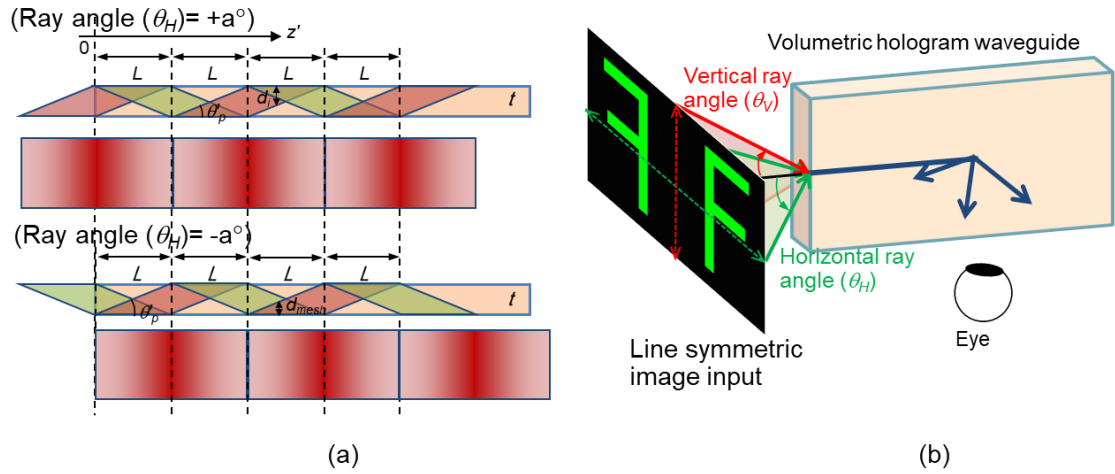


図 4.11 線対称イメージ入力による画角拡大手法

しかし、ここで上記の幾何学的対称性を考慮すると、角度 $+a^\circ$ と $-a^\circ$ の光線は、半サイクルの位相シフトを伴う同じ周期の全反射プロセスを持っていることがわかる。従って、光線角度 0° を対称軸に持つ線対称イメージとして2つの光線を入力すると、夫々の回折光強度の暗い領域をお互いに補完し、輝度均一性を向上することが期待される。

対称軸に対して反転した側から入力される信号光は負の水平方向の光線角度 $(\theta_H = -a^\circ)$ を持ち、この反転信号光 d_i の断面幅は光線角度 $\theta_H = +a^\circ$ の全反射の周期と同じでかつ半周期分の位相シフトを持つ。反転信号光の断面幅 d_i は式(4.12)で表す。

$$d_i(z, \theta_p) = t - \left| t \left(2 \left(\left\lfloor \frac{z}{2L} \right\rfloor - \left\lfloor \frac{z}{2L} \right\rfloor \right) - 1 \right) \right| \quad (4.12)$$

入力端面で負の水平方向の光線角度 $\theta_H = -a^\circ$ を持つ反転信号光から発生する回折光は、正の光線角度 $\theta_H = +a^\circ$ の信号光と同じ方向に回折して導光板から出射し、虚像を構成する。よって、反転信号光の場合、アイレリーフの影響による出射位置シフトは、 $-\theta_H = +a^\circ$ で計算する必要がある。従って、出射位置 E''_p は、以下の式によって考慮する必要がある。

$$E''_p = (E_r \tan(-\theta_H) + E_p) / \cos \theta_{gv} \quad (4.13)$$

E''_p を使うと瞳孔内の単一の計算メッシュにおける線対称の信号光の断面幅 d_{i-mesh} は以下で与えられる。

$$d_{i-mesh}(E''_p, p'_d, \theta_p) = \left(t - \left| t \left(2 \left(\left\lfloor \frac{E''_p + p'_d}{2L} \right\rfloor - \left\lfloor \frac{E''_p + p'_d}{2L} \right\rfloor \right) - 1 \right) \right| \right) \quad (4.14)$$

よって、提案する線対称イメージ入力用いた画角拡大手法における瞳孔内の全回折光強度は、式(4.11)を変形して式(4.15)によって計算される。

$$I(\theta_V, \theta_H, E_r, E_p) = \left| \int p_{size}(p_d) \left(d_{mesh}(E'_p, p'_d, \theta_p) e^{i\Delta\phi_{mesh}} \right) dp_d \right|^2 + \left| \int p_{size}(p_d) \left(d_{i-mesh}(E''_p, p'_d, \theta_p) e^{i\Delta\phi_{i-mesh}} \right) dp_d \right|^2 \quad (4.15)$$

この解析モデルを使って、提案手法の基本的な有用性を確認するために、線対称画像の片側の光線角度領域のみ画素を全てONとした場合の視認画像の計算結果を図 4.12 に示す。

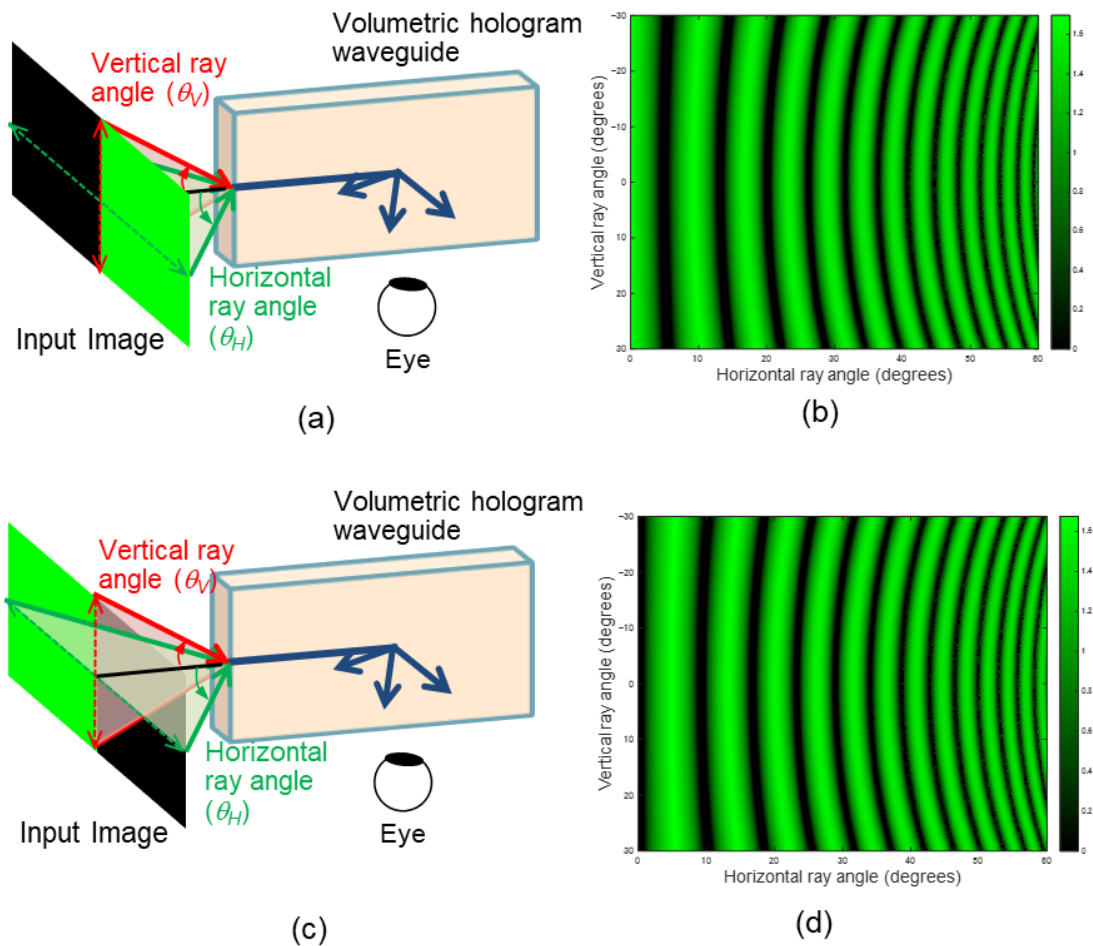


図 4.12 線対称イメージ入力法の原理確認シミュレーション

図 4.12 (a) に水平方向の光線角度が $0^\circ \sim +a^\circ$ が全てONの場合、図 4.12 (b) に水平方向の光線角度が $0^\circ \sim +a^\circ$ が全てONの場合の解析結果を示す。

この2つの計算結果の輝度分布を比較すると、図 4.12 (a) で暗線となっている部分は図 4.12 (b) では明線となっていることを確認でき、線対称イメージ入力法は輝度の明暗の位相が反転する左右の画像出力によって相互に輝度を補完し、表示画面の輝度均一性を向上することがわかる。

次に提案した線対称イメージ入力手法を用いた体積ホログラム導光板から表示される虚像の輝度分布の計算結果を図 4.13 に示す。解析結果は水平視野として光線角度 0° から 60° 、垂直視野として光線角度 $\pm 30^\circ$ の範囲の結果を示す。計算条件は前述と同様に導光板の厚さ t を 1 mm、アイレリーフ Er を 22 mm、瞳孔の位置 Ep を 25 mm と仮定した。瞳孔の直径は周囲の環境の明るさによって異なるが、計算モデルでは一般的な中間サイズである 3 mm を使用した。光源の波長は 555 nm の単一波長であると想定した。導光板の屈折率は理想的なフォトリフラクティブ材料として 2.3 とした。

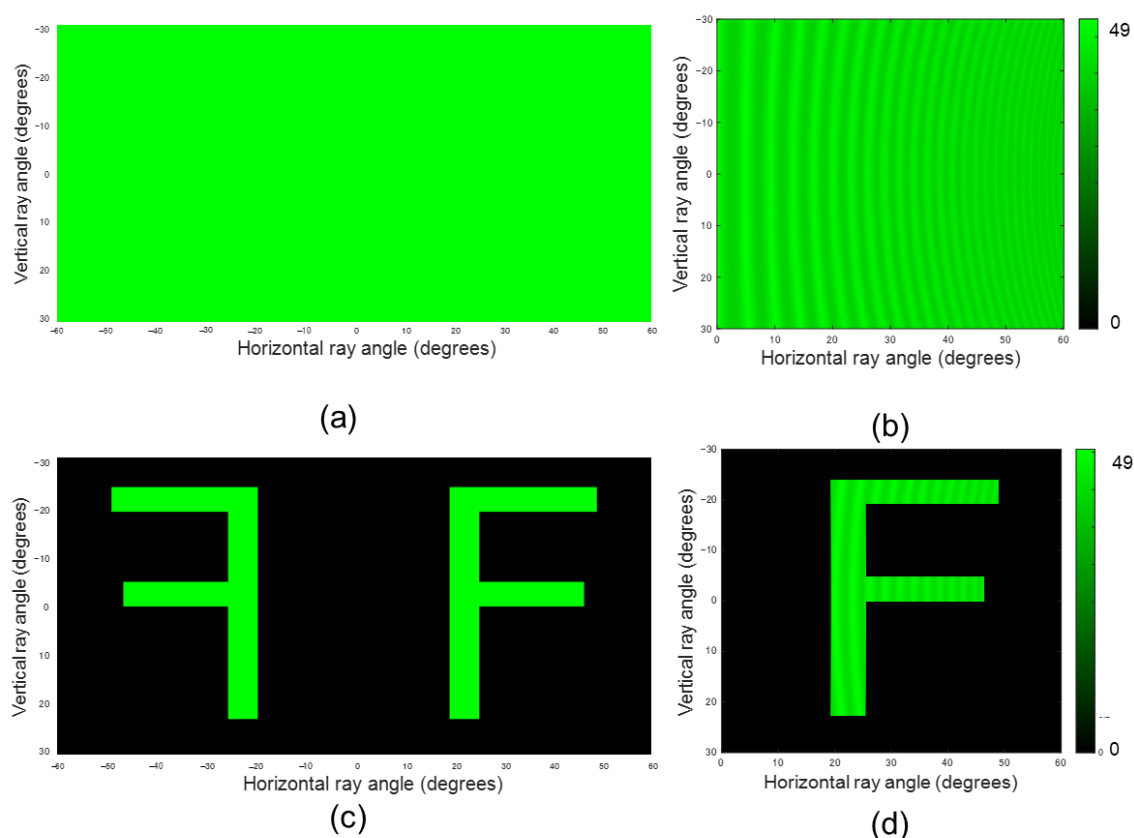


図 4.13 線対称イメージ入力法でのシミュレーション結果

図 4.13 (a) には入力画像とした画像の全画素が ON になっている画像を示し、図 4.13 (b) には図 4.13 (a) を入力した場合に、体積ホログラム導光板から出力される虚像の計算結果を示す。

提案する線対称イメージ入力法によって、画面内での輝度の均一性が大きく改善することがわかる。単層構造の体積ホログラム導光板において輝度均一性は、画角 0° から $+60^\circ$ の水平方向と垂直方向の画角 $\pm 30^\circ$ の範囲で 49% を達成した。線対称イメージ入力を用いた画角拡大技術により、輝度均一性が 490 倍以上に向上することが明らかとなった。

次に図 4.13 (c) に示すように、文字の「F」を表す線対称画像を入力画像した場合、導

光板から出力される虚像の計算結果を図 4.13 (d) に示す。提案する画角拡大法により、輝度均一性が改善し、虚像上の文字の視認性が著しく改善することがわかる。

4.7 線対称軸の変位による影響

線対称イメージ入力法は入力画像の線対称性を利用しているため、実用上の観点から対称性に対する許容誤差を解析することは、効率的で信頼性の高い大量生産の手法を考察する上で重要である。

そこで入力の光線角度に変位が生じた場合や、導光板端面に対して入力の光線位置が変位した場合に表示画像へ与える影響について検討する。代表的な導光板システムでは、ユーザは光線角度の違いを視認画像の視野角度の違いとして認識するため、光線角度の変位は画質にとって非常に重要な要素である[5]。

構築した解析モデルを用いて対称軸の入力角度に変位が生じた場合の影響を解析した。それらの解析結果を図 4.14 に示す。図 4.14 (a) に示すように入力画像の線対称軸が理想的な水平方向の光線角度 0° から変位が生じた場合における視認画像の解析を実施した。入力画像の線対称軸の変位が、 0.2° の場合を図 4.14 (b) に、 0.6° の場合を図 4.14 (c) に、 1.0° の場合を図 4.14 (d) に、 2.0° の場合を図 4.14 (e) に、解析結果を示す。

解析条件として、光線角度の範囲や導光板の厚さ t 、アイレリーフ E_r 、瞳孔の位置 E_p 、瞳孔サイズ、光源の波長、導光板の屈折率はこれまでの条件と同様である。

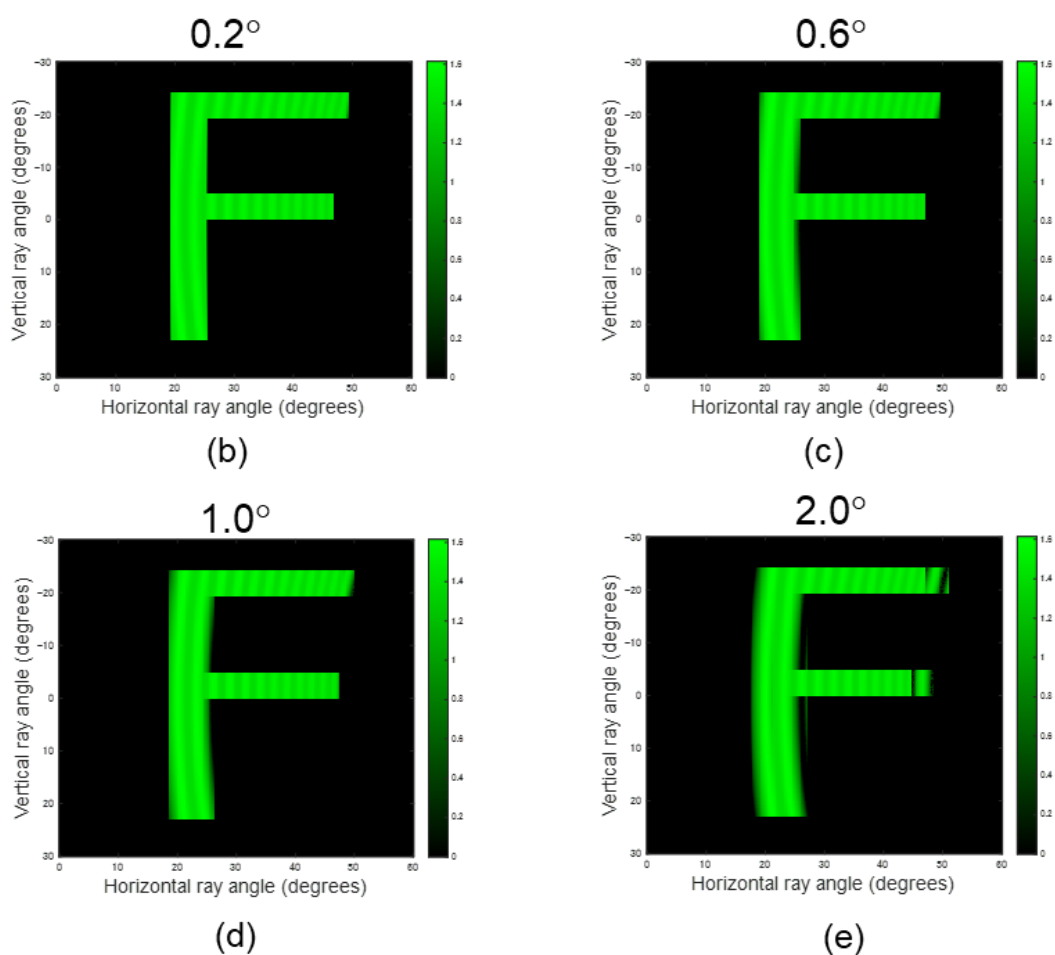
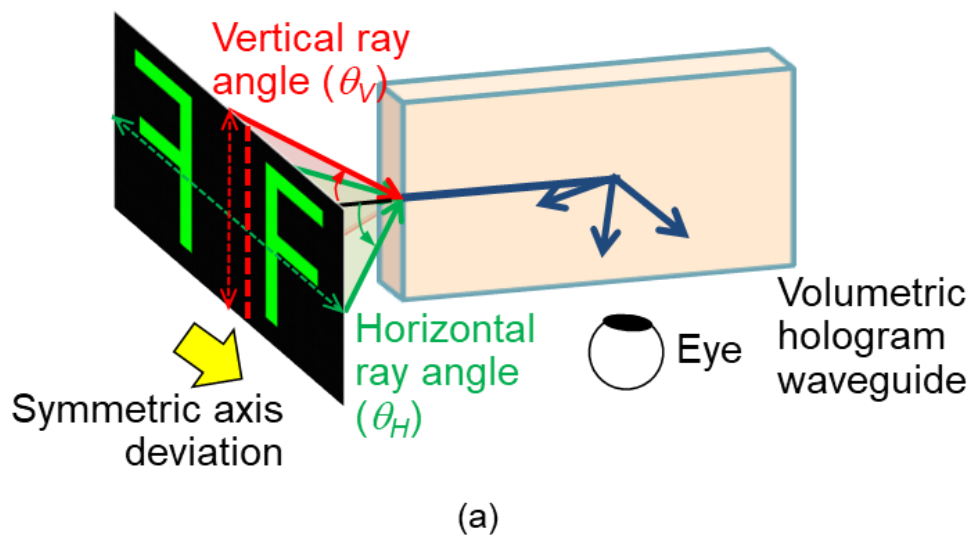


図 4.14 線対称軸に変位がある場合の視認像シミュレーション

入力画像の対称軸が Δ 度ずれている場合、横軸に光線角度 $+a^\circ+\Delta$, $-a^\circ+\Delta$ の 2 つの信号光

が導光板に入力される。この場合、出力された虚像上で 2Δ 度ずれた位置に複製画像が現れる。したがって、画像の劣化を低減するためには、入力画像の線対称軸を正確に調整する必要があり、ライトエンジンと導光板の相対的な組み立て精度が重要となる。

線対称軸の変位を補正する別の方法として、入力画像を生成するライトエンジンにおいて電氣的に画素レベルでの画像位置をシフトさせて線対称軸を調整する手法が効果的である。電氣的な角度変位の補償により、ライトエンジンと導光板の組付け精度への要求が緩和され、構造部品や組み立て作業の簡素化が期待できる。

画像の回転に相当する光線角度の変位 (z 軸回りの線対称軸の回転) は、前述の対称軸の入力角度変位と類似の状況となる。入力する線対称軸の回転を抑制する高い精度の機械的な組み立ての実施や、ライトエンジン側で電氣的に画素レベルの入力画像の回転処理による補正が有効である。

次に、導光板の端面に対して x 軸または y 軸に沿って入力する信号光の位置が変位した場合の影響を考察する。この光線位置の変位によっては入力する光線角度に変位は生じない。従って、この状態の光線の位置のずれは、導光板への結合効率のみに影響を与える。

光を結合するための導光板の厚み方向 1 mm の端面幅は、精密に成型されたライトエンジンの筐体に取り付けられることが想定される。この精度は通常、0.05 mm 以内で達成される。この変位量における光学システムの結合効率の損失は 5% 以下であり、入射光線の導光板に対する位置ずれは重大な影響は与えない。

また、実用性に関する別の観点として、2 つの光線が重畳されることに対する干渉パターンの出現の影響について考察する。提案手法では、線対称軸を介して 2 つの線対称点から出力される光線が重畳される状態となる。この 2 つの光線は、レーザ光源とそれを走査する MEMS ミラー又はファイバースキャナによって出力されるが、この出力タイミングには時間的な差がある。従って、これら 2 つの光線は互いにインコヒーレントビームと見なされ、ユーザの網膜に重ねられた画像は、光の強度によって単純に統合される。いくつかの MEMS ミラー、レーザ、および導光板を組み込んだ光学システムが既に市場に流通しており [5]、理論的にも干渉パターンは目立たない。

以上のように、提案する線対称イメージ入力法による画角拡大・輝度均一化技術を用いた体積ホログラム導光板は、実用的な瞳位置とアイレリーフ位置において、従来の表面掘り込み回折格子導光板の 2 倍以上の画角を実現する。さらに、水平方向の画角 0° から $+60^\circ$ 、垂直方向の視野角 $\pm 30^\circ$ の範囲において、提案手法を用いない体積ホログラム導光板と比較して、輝度の均一性を 490 倍に向上する。

4.8 おわりに

本章では、複数の回折格子を同一の場所に重畳記録できる体積ホログラムを活用し単層化されたヘッドマウントディスプレイ導光板の広画角・輝度均一化の手法を提案した。

体積ホログラム導光板の数学的モデルを構築し、導光板内の信号光と体積ホログラムの

相互作用体積を考慮して、観察者が見る虚像を分析した。相互作用体積の変化により、回折光強度が光線角度ごとに変化し、虚像の輝度均一性が低下するという特有の課題を明らかとした。

本課題に対して線対称イメージ入力法による、単層体積ホログラフィック導光板の画角の拡大手法を提案した。入力画像内の線対称点から来る別の光線により相互作用する体積の変動を補償し、従来の導光板と比較して2倍以上の画角 60° （水平） \times 60° （垂直）に渡って輝度均一性 49%を達成し、提案手法を用いない体積ホログラム導光板と比較して輝度均一性を 490 倍に改善することを明らかとした。

線対称イメージ入力法は入力画像の線対称性を利用しているため、実用上の観点から対称性に対する許容誤差を検討し、特に影響度の大きい対称軸の入力角度に変位が生じた場合の影響について定量的な解析の実施と、大量生産のための有効な対応手法について考察を実施した。

5. 体積ホログラム導光板における Off-Bragg 回折と解像性能

5.1 はじめに

本章では、体積ホログラムの Off-Bragg 回折光の影響について議論を行う。意図しない方向への回折光である Off-Bragg 回折は導光板の表示映像の解像性能に影響する。前章で取り扱った体積ホログラム導光板は所望の回折光である Bragg 条件を満たす回折光を考慮したモデルである。本章では、導光板の解析モデルにこの Off-Bragg 回折プロセスを組み込み表示画像への影響度について定量的に評価検討する。

5.2 Off-Bragg 回折

体積ホログラムでは Bragg 条件に完全に一致していない条件においても、回折光が発生し、この回折は Off-Bragg 回折とよばれる [71, 72]。体積ホログラム導光板では複数の光線角度（画素）の読み出し光が混在している状態であり、Off-Bragg 回折により意図しない読み出し光からも再生光が生じてしまう。図 5.1 に Off-Bragg 回折の画質への影響の概念図を示す。入力画像に対して意図しない方向への Off-Bragg 回折光が発生し、表示映像の解像性能が低下し、文字や表示コンテンツの視認性が低下する懸念がある。本章ではこれらの影響を解析評価し、体積ホログラム導光板に必要な要件を明確化する

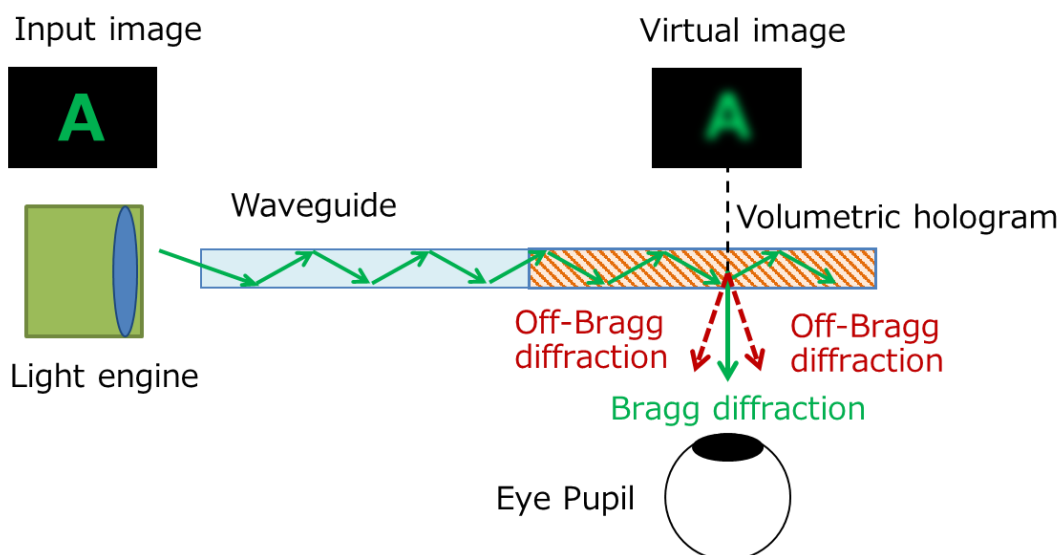


図 5.1 Off-Bragg 回折の画質影響

5.3 導光板の Off-Bragg 回折解析モデル

本節では導光板内での Off-Bragg 回折を定式化し、表示映像の解析モデルへの組み込みを行う。そこで特定の単一面素を例にとって図 5.2 の模式図を用いて説明する。特定の単一面角の光線角度は一意に決まるので、瞳の位置が固定されると、前章でも説明した通りアイレリーフ長を考慮して導光板からの信号光の出射ポイントが決まる。この出射ポイントから、Bragg 条件を満たした Bragg 回折光と Off-Bragg 回折光が同じ光線角度で射出され、これらの光強度の和によって特定の単一面角の輝度が決定される。

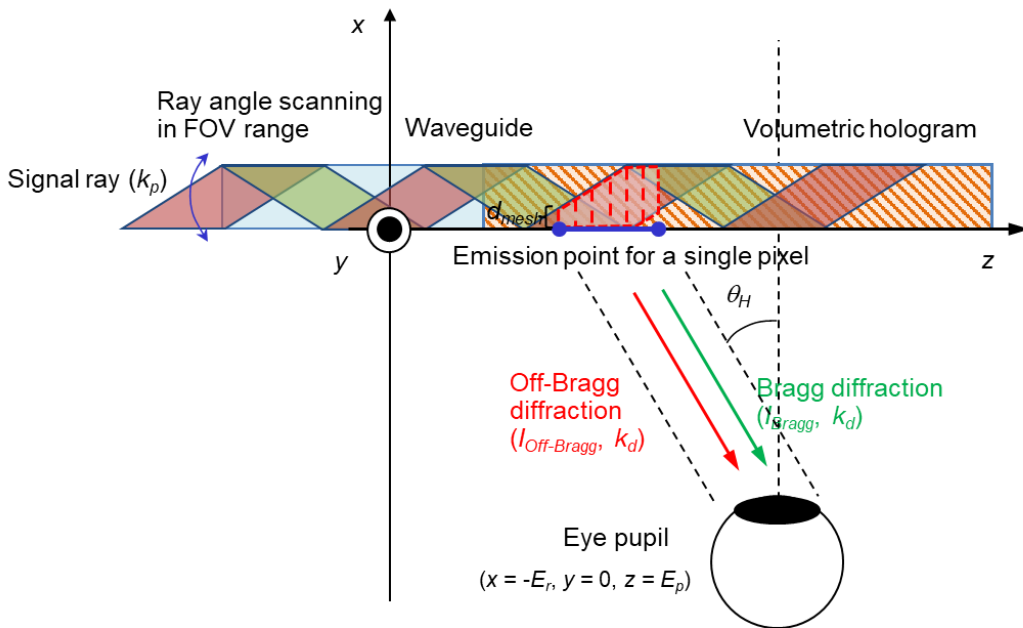


図 5.2 Off-Bragg 回折モデル

Bragg 回折光の強度 (I_{Bragg}) は第 4 章で説明した通りである。一方の Off-Bragg 回折光の強度 ($I_{Off-Bragg}$) は Off-Bragg ベクトル δk_g と照明される体積ホログラムの領域サイズに依存することが知られており [71, 72], これらは以下の式に統合される。

$$I_{Off-Bragg} \propto \left| L_x L_y L_z \operatorname{sinc}\left(\frac{\delta K_{gx} L_x}{2}\right) \operatorname{sinc}\left(\frac{\delta K_{gy} L_y}{2}\right) \operatorname{sinc}\left(\frac{\delta K_{gz} L_z}{2}\right) \right|^2 \quad (5.1)$$

ここで L_x , L_y , L_z は信号光で照明されるエリアの x 軸, y 軸, z 軸に沿った寸法であり, sinc 関数の定義は $\operatorname{sinc}(x) = \sin x / x$ である。また Off-Bragg ベクトル δk_g は, 以下の式で定義され,

$$\delta k_g = k_p - k_d + k_g \quad (5.2)$$

ここでは読み出し光の波数ベクトルを k_p 、回折光（再生光）の波数ベクトルを k_d 、Bragg 回折の格子ベクトルを k_g とする。格子ベクトルは $k_g = k_s - k_r$ であり、 k_s は記録信号光、 k_r は記録参照光である。

図 5.3 にエワルド球を用いた Off-Bragg ベクトルの幾何学定義を示す。図 5.3 (a) は通常の Bragg 回折について説明している。入射光ベクトル k_p が所望の Bragg 回折ベクトル k_g によって回折され回折光 k_d が生じる。図 5.3 (b) は Off-Bragg 回折の場合を表している。所望の回折光ベクトル k_d と、入射光ベクトル k_p 、Bragg 回折ベクトル k_g によって Off-Bragg ベクトル δk_g が決定する。この回折強度は式 (5.1) 表されるように Off-Bragg ベクトル δk_g とホログラムの大きさに依存し、点像がどのように広がるかが決定される。

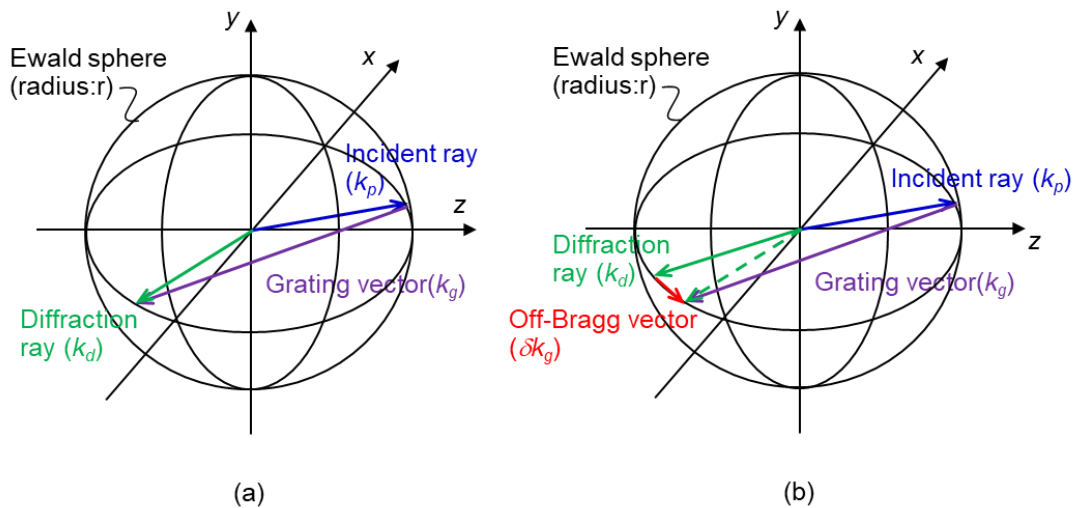


図 5.3 エワルド球を用いた Off-Bragg 回折

表示画像の各画素へ寄与する Off-Bragg 回折光は入力画像の全画素の信号光から発生する可能性がある為、これらすべてを読み出し光として逐次計算して光強度を求める必要がある。そこで解析モデル内での計算処理のフローチャートを図 5.4 に示す。入力画像に対して計算対象となる単一画素と対応する水平と垂直方向の光線角度 (θ_H , θ_V) を定めて、出射ポイントを決める。そのうえで、読出し光とする画素の水平と垂直方向の光線角度 (θ_{Hcalc} , θ_{Vcalc}) を定めて Off-Bragg ベクトルを算出し、Off-Bragg 回折光の強度 $I_{off-Bragg}$ 求めて所定のメモリテーブル内に格納する。計算対象の光線角度 (θ_H , θ_V) において入力画像の全画素に対して同様の計算を行い、Off-Bragg 回折光の強度を積算する。

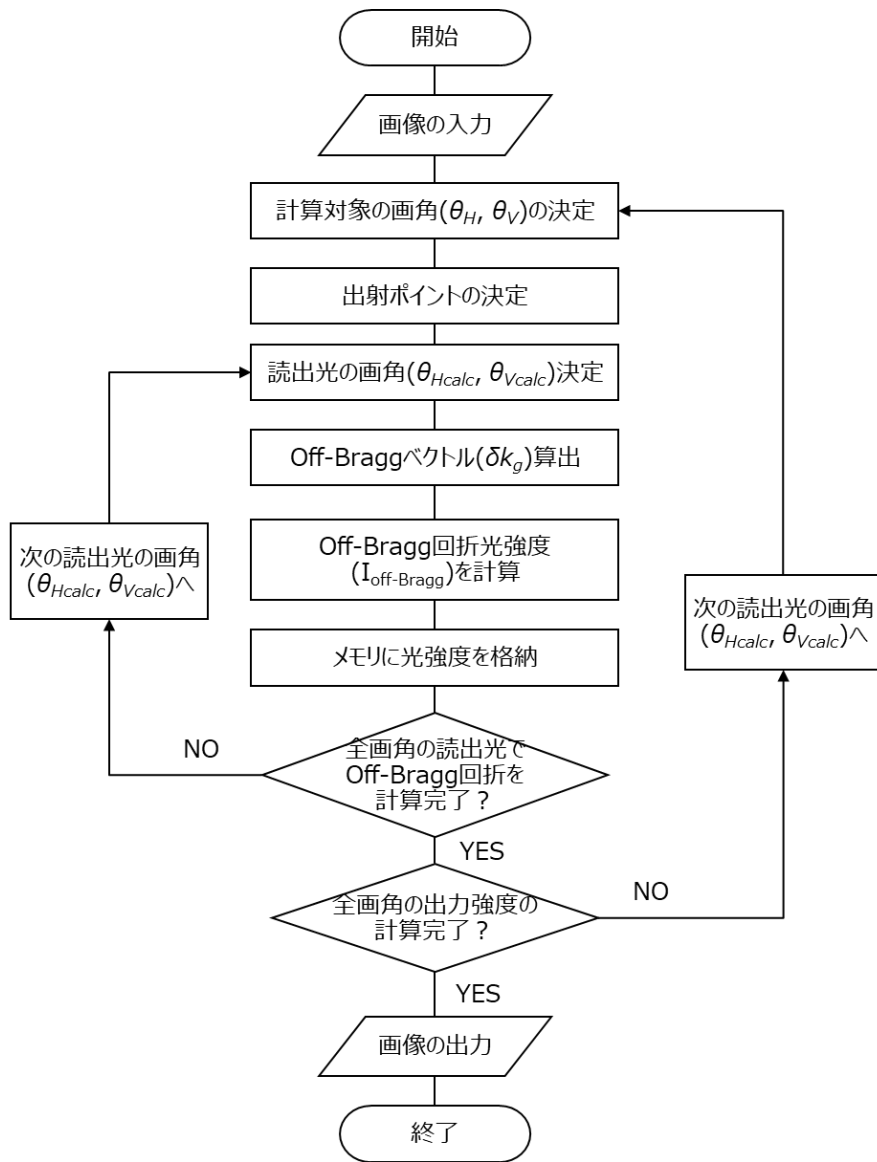


図 5.4 Off-Bragg 回折の導光板解析フローチャート

これらの一連のループを計算対象の光線角度 (θ_H, θ_V) として入力画像の全画素において行うループをさらに回すことで、off-Bragg 回折を考慮した出力画像を算出する。Off-Bragg ベクトルの算出に必要な読出し光の波数ベクトル k_p は以下の式で表される。

$$k_p = \begin{pmatrix} e_{kpx} \\ e_{kpy} \\ e_{kpz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\cos \theta_{Vcalc} \sin \theta_{Hcalc}}{n_{gl}} \\ -\frac{\sin \theta_{Vcalc}}{n_{gl}} \\ \frac{\sqrt{n_{gl}^2 + (\cos \theta_{Vcalc} \cos \theta_{Hcalc})^2 - 1}}{n_{gl}} \end{pmatrix} \quad (5.3)$$

次に、回折光（再生光）の波数ベクトル k_d は光線角度（ θ_H , θ_V ）を用いて以下の式で与えられる、

$$k_d = \begin{pmatrix} e_{kdx} \\ e_{kdy} \\ e_{kdz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{\sqrt{n_{gl}^2 + (\cos \theta_V \cos \theta_H)^2 - 1}}{n_{gl}} \\ \frac{-\sin \theta_V}{n_{gl}} \\ -\frac{\cos \theta_V \sin \theta_H}{n_{gl}} \end{pmatrix} \quad (5.4)$$

以上の読出し光の波数ベクトル k_p 、回折光の波数ベクトル k_d はいずれも導光板内の光線ベクトルである。さらに格子ベクトル k_g は以下のように表される。

$$k_g = \begin{pmatrix} e_{kgx} \\ e_{kgy} \\ e_{kgz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{\sqrt{n_{gl}^2 + (\cos \theta_V \cos \theta_H)^2 - 1}}{n_{gl}} & -\frac{\cos \theta_V \sin \theta_H}{n_{gl}} \\ 0 \\ -\frac{\cos \theta_V \sin \theta_H}{n_{gl}} & -\frac{\sqrt{n_{gl}^2 + (\cos \theta_V \cos \theta_H)^2 - 1}}{n_{gl}} \end{pmatrix} \quad (5.5)$$

以上の定義を用いると、Off-Bragg ベクトル δk_g は以下の式で与えられる。

$$\delta k_g = \begin{pmatrix} \delta k_{gx} \\ \delta k_{gy} \\ \delta k_{gz} \end{pmatrix} = \frac{2\pi n_{gl}}{\lambda} \begin{pmatrix} \frac{\cos \theta_{Vcalc} \sin \theta_{Hcalc}}{n_{gl}} - \frac{\cos \theta_V \sin \theta_H}{n_{gl}} \\ -\frac{\sin \theta_{Vcalc}}{n_{gl}} + \frac{\sin \theta_V}{n_{gl}} \\ \frac{\sqrt{n_{gl}^2 + (\cos \theta_{Vcalc} \cos \theta_{Hcalc})^2 - 1}}{n_{gl}} - \frac{\sqrt{n_{gl}^2 + (\cos \theta_V \cos \theta_H)^2 - 1}}{n_{gl}} \end{pmatrix} \quad (5.6)$$

これらを用いて導光板から出力される Bragg 回折光と Off-Bragg 回折光の瞳へ結合される単一面素の光強度の計算式は以下で与えられる。

$$\begin{aligned} I &= \int I_{mesh}(\theta_{Vcalc}, \theta_{Hcalc}, E_r, E_p) d\theta_{Vcalc} d\theta_{Hcalc} \\ &= \int \left| \int L_x L_y L_z \operatorname{sinc}\left(\frac{\delta k_{gx} L_x}{2}\right) \operatorname{sinc}\left(\frac{\delta k_{gy} L_y}{2}\right) \operatorname{sinc}\left(\frac{\delta k_{gz} L_z}{2}\right) e^{i(\Delta\phi_{mesh} + n_{gl} D_t \frac{2\pi}{\lambda})} dP_d \right|^2 d\theta_{Vcalc} d\theta_{Hcalc} \end{aligned} \quad (5.7)$$

ここで、計算メッシュ内において信号光に照明される体積ホログラムのサイズを決定する L_x , L_y , L_z は以下で与えられる。

$$\begin{pmatrix} L_x \\ L_y \\ L_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_{mesh} \\ P_{size} \\ P_{mesh} \end{pmatrix} \quad (5.8)$$

ここで、 d_{mesh} は各計算メッシュでの信号光の断面幅であり、光線角度 θ_p 、装着者の瞳孔の位置 E'_p 、および計算メッシュ位置 p'_d によって前章において説明した式 (4.9)、式 (4.14) によって与えられる。

また前述の通り、断面幅 d_{mesh} と回折光強度は垂直方向に沿って一定であり、瞳孔内の計算メッシュは水平方向に分割され、垂直方向に沿った計算メッシュサイズ (P_{size}) は式 (4.7) で与えられる。

各計算メッシュからの回折光について、前章の Bragg 回折は体積ホログラムで散乱した光が同位相で重なり合う Bragg 条件を満たした光である。よって各計算メッシュからの回折光は位相の揃った光として扱える。しかし、本章で着眼している Off-Bragg 回折光は、有限の大きさの体積ホログラムで散乱光が完全に打ち消し合わず、Bragg 条件から外れた回折光である。したがって、各計算メッシュからの Off-Bragg 回折光は位相が揃わないことから、隣接セル間での位相差を考慮して網膜上での光強度を求める必要がある。そこで、図 5.5 に示すように隣接する計算セルからの回折光の光路長差が波長の整数倍となるように水平方向の計算メッシュサイズ (P_{mesh}) を設定し、隣接計算メッシュ間の回折光の位相を考慮した解析を実施した。

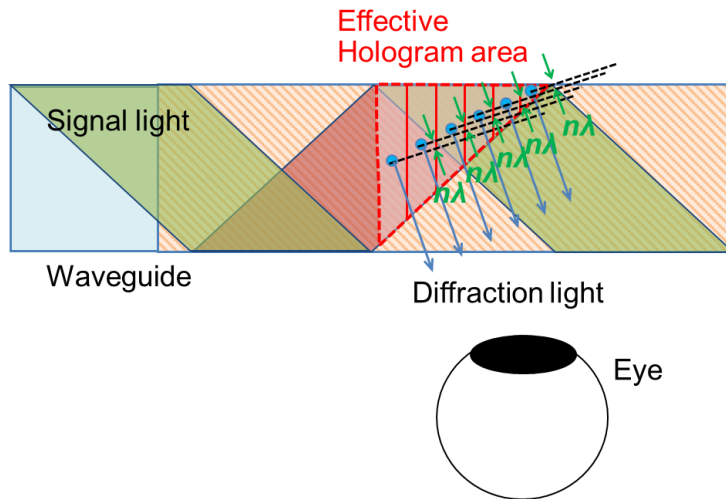


図 5.5 Off-Bragg 回折解析での計算メッシュ

これには隣接する計算セルの中心からの回折光ベクトルに沿った光路長が波長の整数倍となれば良く、これを満たすための条件は以下の式で与えられる。

$$L_z = P_{mesh} = \frac{n\lambda}{\frac{e_{kdx} \cos \theta_p}{2 \cos \theta_{qvp}} + e_{kdz}} \quad (5.9)$$

ここで n は波長の整数倍を規定するための任意の整数である。

本節で構築した Off-Bragg 回折光の解析モデルによって、表示映像に及ぼす影響の解析を行い、体積ホログラム導光板の必要要件の検討を実施する。

5.4 解像度への影響評価

5.4.1 導光板厚さ依存性

Off-Bragg 回折光の解析モデルを用いて体積ホログラム導光板の表示映像の解像度への影響度の検討を行う。式 (5.1) に与えられたように、Off-Bragg 回折光は信号光で照明される体積ホログラムの体積によって発生量が増える。従って導光板の厚みと表示解像度との関連性は大きいと推測され、導光板の設計を行う上で導光板厚みと Off-Bragg 回折光の影響の依存関係については明確化し、要件整理を行う必要がある。

そこで、入力として単一画素のみを ON とした画像（点像）を入力した場合の出力画像の点像の解像性能について解析を実施した。図 5.6 に点像分布の導光板の厚み依存性を示す。水平 0.1° 、垂直 0° に点像を入力し、導光板からの出力について縦軸に光強度、横軸に水平方向画角をとってプロットしたものである。導光板は厚さ t を 0.3 mm から 4.0 mm まで変化させ、アイレリーフ E_r を 22 mm、瞳孔の位置 E_p を 25 mm を想定した。瞳孔の直径は 3 mm とした。光源の波長は、赤色、緑色、青色の代表的な波長の条件において計算し、図 5.6 (a) に 450 nm、図 5.6 (b) に 555 nm、図 5.6 (c) に 660 nm の単波長の計算結果を示した。導光板の屈折率は理想的なフォトリフラクティブ材料として 2.3 とした。入力画像には線対称イメージ入力法は用いず、単純な片側の画角からの点像の入力での結果である。図 5.6 (d) にはこれらの導光板の厚みと各点像分布の半値全幅 (FWHM) との関係性をプロットしたものを示す。

解析結果は導光板厚みが厚いほど Off-Bragg 回折が抑制され表示解像度が向上することを示している。また式 (5.1) と式 (5.6) から示されるように、Off-Bragg 回折は波長の逆数をパラメータに光強度が決定される為、計算結果も波長が短い程、点像分布の広がりが抑制されて高解像度の映像の表示能力を有することが分かる。

国際眼科評議会 (International Council of Ophthalmology : ICO) は視力に障がないの通常視力として視力 0.8 以上と定義している [73]。導光板の必要な解像性能を決める基準として視力 0.8 相当の角度範囲である 0.02° を設定し、これを下回る点像の広がりを許容可能であるとする。計算結果の点像分布から、導光板は 1.0 mm 以上の厚みとすることで十分な分解能が確保できることがわかる。

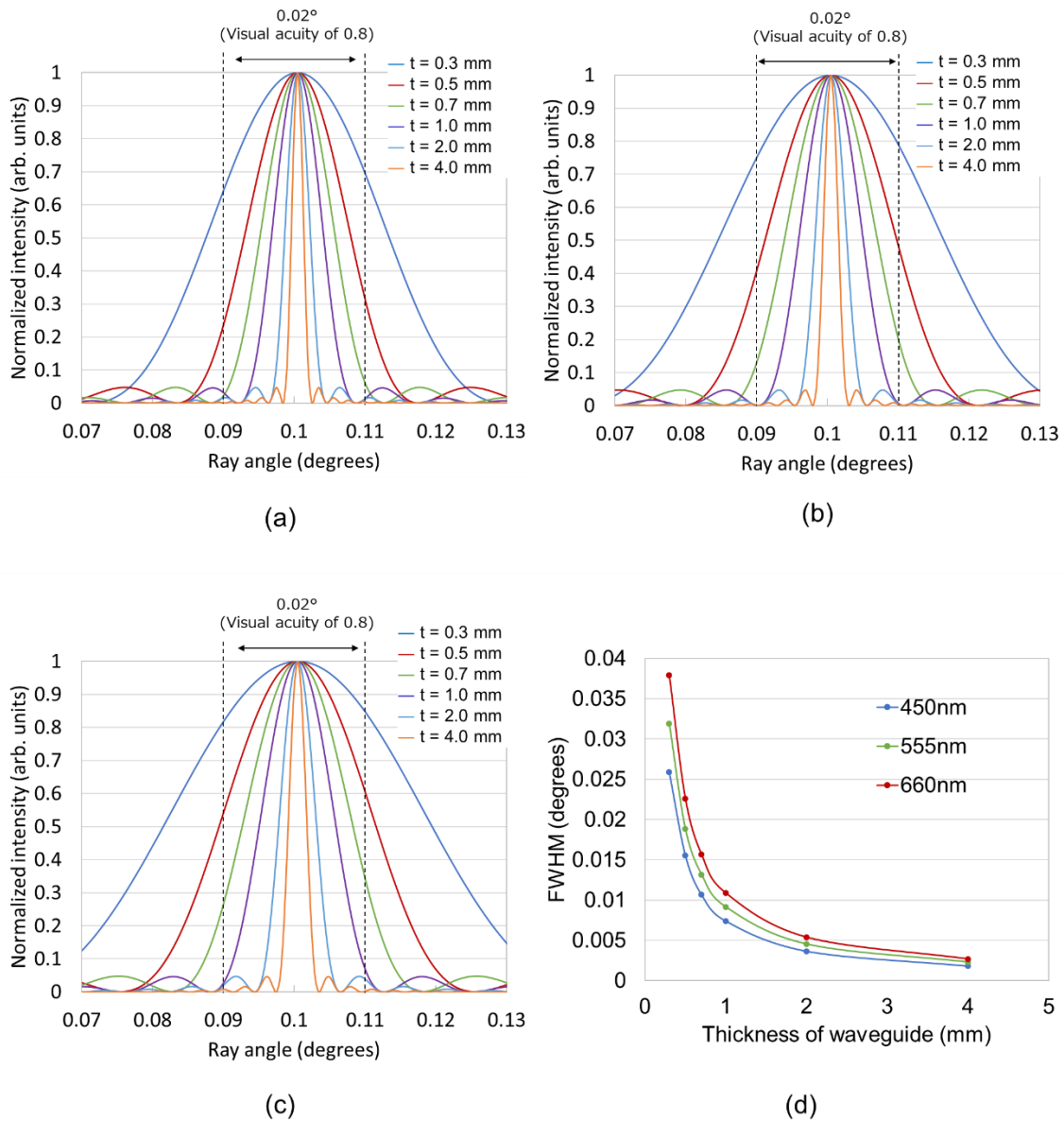


図 5.6 点像分布の導光板厚み依存性

5.4.2 画面輝度依存性

次に Off-Bragg 回折の画角依存性を調査することを目的に、単一面素を ON とした入力画像（点像）の画角位置を変化させて、導光板の出力画像の点像分布を解析する。図 5.7 に通常の片側画角から画像入力を行った場合における点像分布の画角依存性のプロットを示す。点像を表示する水平画角の位置を変化させた場合の、導光板の出力画像の点像分布の半値全幅をプロットしている。その他の計算条件はこれまで同様に、導光板の厚さ t を 1 mm, アイレリーフ E_r を 22 mm, 瞳孔の位置 E_p を 25 mm, 瞳孔の直径は 3 mm, 光源波

長は 555 nm の単一波長，導光板の屈折率は理想的なフォトリフラクティブ材料として 2.3 とした。

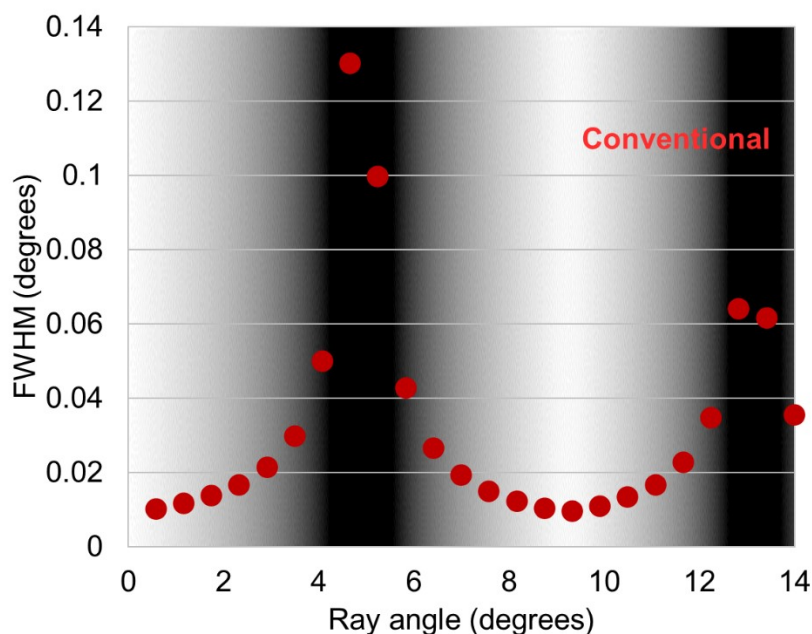


図 5.7 点像分布の画角依存性

計算結果から画角に応じて周期的に点像分布の広がりが増加し，大幅な解像度の劣化領域がある。このような周期的な悪化条件を生み出す要因として，式 (5.1) に示すように，Off-Bragg 回折の回折効率が信号光に照明される体積ホログラムの体積に依存することに着目した。導光板内で照明領域が減少する領域では Off-Bragg 回折が増大する。またそのような領域では同じく照明されるホログラムの体積に回折効率が依存する Bragg 回折とも関係性があり，画面内の輝度の明暗と解像性能に密接な関係があると推定される。

そこで図 5.7 のグラフの背景に全画素を ON とした画像を入力した際の，導光板出力画像の各画角での輝度の明暗を重ねて示す。各点像分布の FWHM のプロットと全画素 ON での表示画像輝度分布を見比べると，輝度と解像度に相関が存在し，輝度の低い光線角度では解像度が大きく劣化することわかる。したがって，これは体積ホログラム導光板において，線対称イメージ入力法を用いて画面の輝度分布を改善すると，表示解像度をも向上できる可能性を示唆している。

5.5 線対称イメージ入力による解像度の向上

前節で述べたように Off-Bragg 回折は表示画面の輝度に依存して解像度の表示性能が変化することが明らかとなっており，前章で提案した線対称イメージ入力法の表示解像性能への向上効果について詳細に調査を行う。

線対称イメージ入力により点像を入力した際の出力映像の点像分布の解析を行った。計算条件はこれまで同様に導光板の厚さ t を 1 mm, アイレリーフ E_r を 22 mm, 瞳孔の位置 E_p を 25 mm, 瞳孔の直径は 3 mm, 光源波長は 555 nm の単一波長, 導光板の屈折率は, 理想的なフォトリフラクティブ材料として 2.3 とした。

図 5.8 は前節の解析で解像性能の悪かった画角 4.6° 付近での, 通常の片側画角からの画像入力と線対称イメージ入力の点像分布のプロットである。

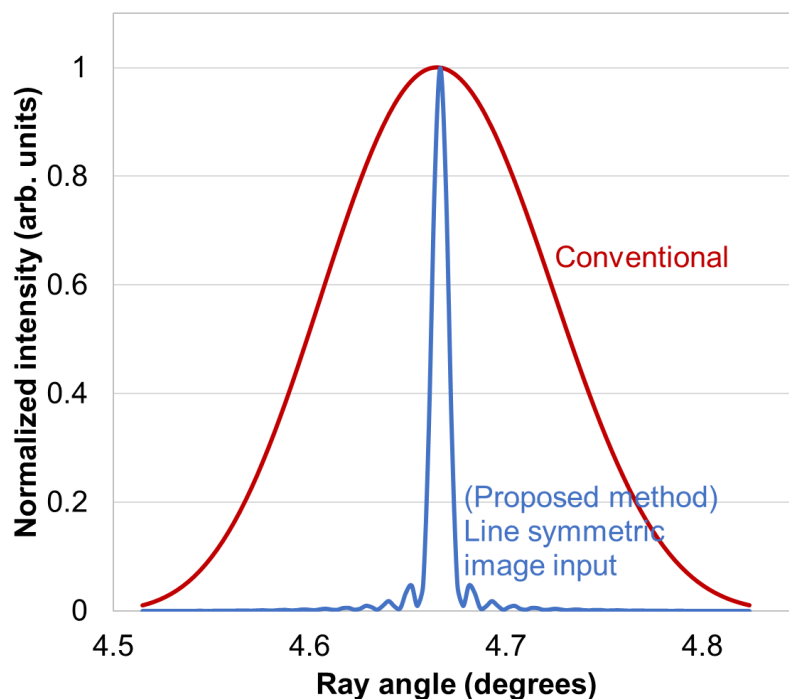


図 5.8 線対称イメージ入力による点像分布

従来の画像入力では導光板出力の点像が FWHM で 0.13° の分布広がりを持つのに対し, 提案する線対称イメージ入力法を用いた導光板からの出力される点像の FWHM は 0.01° にまで抑圧され, 点像の広がりには 92% の低減効果がある。

次に線対称イメージ入力法による出力画像の点像の広がり (FWHM) と水平方向の表示画角との関係を図 5.9 に示す。計算条件は導光板の厚さ t を 0.7 mm から 2 mm まで変化させ, その他の条件はこれまでと同様, アイレリーフ E_r を 22 mm, 瞳孔の位置 E_p を 25 mm, 瞳孔の直径は 3 mm, 光源波長は 555 nm の単一波長, 導光板の屈折率は, 理想的なフォトリフラクティブ材料として 2.3 とした。

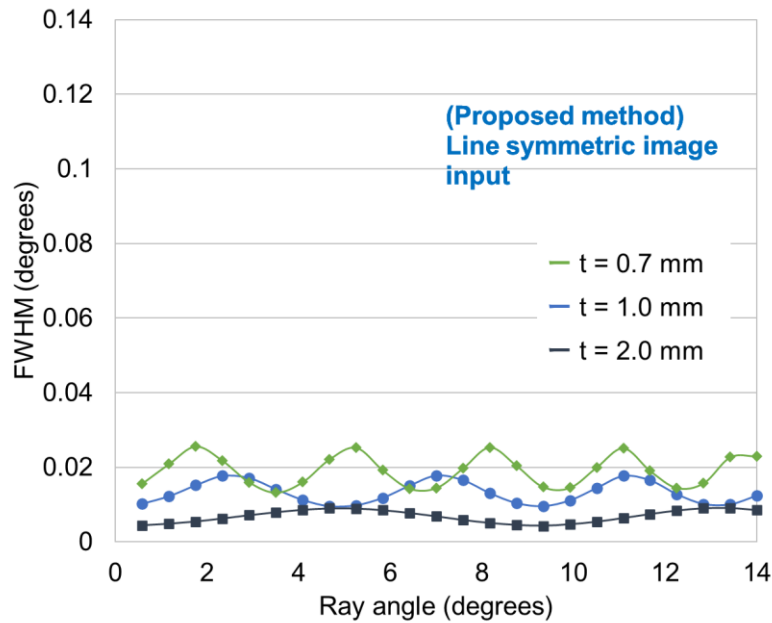


図 5.9 線対称イメージ入力による点像分布と画角依存性

従来手法において輝度が低下し解像度が悪化していたいずれの光線角度において、輝度が改善することで解像度が大きく改善する。導光板の厚みは 1.0 mm 以上とすることで、計算したすべての画角範囲において、必要解像度の基準とした 0.02° を下回る分解能を達成する。いずれの厚みにおいても解像度の変化は表示画面の輝度の変化にリンクしていて、厚みが厚いほど輝度変化の周期が長くなるので、解像度の変化の周期も長くなっている。

以上の結果が示すように、信号光と体積ホログラムの相互作用領域を補償する線対称イメージ入力法は表示映像の暗線をなくすとともに、表示解像度を向上することが明らかとなった。

5.6 おわりに

本章では、体積ホログラムの Off-Bragg 回折光が表示解像度に及ぼす影響について議論を行った。意図しない方向への回折光である Off-Bragg 回折は導光板の表示映像の解像性能に影響する。導光板の解析モデルに Off-Bragg 回折プロセスを組み込み、表示画像への影響度について定量的に評価検討を行った。

Off-Bragg 回折の回折効率は信号光に照明される体積ホログラムの体積に依存することから、導光板内で照明領域が減少する光線角度では Off-Bragg 回折が増大し、表示解像度を低下することを明確にした。また輝度均一性を低下させる画面内の明暗と解像性能の低下に密接な関係があることを示した。

線対称イメージ入力法が表示解像性能への向上効果について詳細に検討を行い、従来の画像入力では導光板から出力する点像が FWHM で 0.13° の広がりを持つのに対し、提案

する線対称イメージ入力法での点像の FWHM は 0.01° にまで抑圧され、92%の低減効果を得られた。このように信号光と体積ホログラムの相互作用領域を補償する線対称イメージ入力法は表示映像の輝度均一性を改善するとともに、表示解像度を向上することを明らかとした。

6. ヘッドマウントディスプレイ光学系の展望

6.1 はじめに

第3章から第5章では、ヘッドマウントディスプレイ導光板の広画角・輝度均一化の手法として、溝深さ変調表面掘り込み回折格子導光板と線対称イメージ入力体積ホログラム導光板の個別の技術提案について説明を行った。本章では、これら提案技術の比較を行うと共に今後のヘッドマウントディスプレイ光学系の展望を述べる。

6.2 提案導光板方式の水準比較

本研究において提案したヘッドマウントディスプレイ導光板方式の水準比較を行う。表6.1にヘッドマウントディスプレイ接眼部の主要な方式と性能指標に対する比較評価の結果を示す。

瞳の前にバルク状のプロジェクタの光学部が配置されるためシースルー性やアイボックスが限定され、大きな画角の映像投影が困難なアイピース型光学系に対し、接眼部に透明で平板状の光学素子を用いて映像を投影する導光板方式はシースルー性やアイボックスの確保が可能であり、本方式に着眼し、大画面かつ輝度均一性の高い表示の実現を目指して研究を推進した。

ガラス基板表面に回折格子をナノインプリント法によって低コストに形成でき広画角化に有利な表面掘り込み式回折格子導光板は広く注目を集めているが、一方で光線波長や入射角に対する回折効率の依存性を起因とした、画面内の低い輝度均一性の課題がある。そこで本研究では信号光の波長に応じて導光層を2層に分離し、回折格子の溝深さを変調し画角に応じた光利用効率のバランスを向上する手法を研究した。

実際の回折格子プロファイルと理想的な回折格子特性との両面から溝深さ変調回折格子導光板を解析し、本手法は輝度均一性を向上する効果がある一方で、画角は 40° から大きな拡大は見込めず、多層構造も不可欠であることが明らかとなった。

単層の導光板で広画角の映像表示を実現するために、次に本研究では同一の場所に複数の回折格子を多重化して記録できる特徴を持つ体積ホログラム技術に着眼した。体積ホログラムでは導光板上の必要な場所に各画角の光線角度に最適な回折格子の多重化記録が実現する。

線対称イメージ入力法は体積ホログラム導光板の信号光と体積ホログラムの相互作用領域の偏りを補償することで表示映像の暗線をなくし、画角と輝度均一性を大きく向上する。単層構造による重量・コストの観点でもメリットのある方式であり、AR情報をハンズフリーに表示するヘッドマウントディスプレイ導光板を今後大きく進展させる方式としての

優位性は明らかであり、一層の研究の進展を進める。

表 6.1 導光板方式の水準比較

概略図	導光板					
	アイピース ミラーアレイ	表面掘り込み 回折格子	溝深さ変調回 折格子	体積ホログラ ム	線対称イメー ジ入力体積ホ ログラム	
面角	×	△	△	△	△	◎
シースルー	×	○	△	△	○	○
輝度均一性	○	○	×	△	△	○
重量	○	○	△	△	○	○
コスト	○	△	○	○	○	○

◎: Excellent, ○: Good, △: Fair, ×: Poor

6.3 今後の展望

本研究において広画角化・輝度均一化の有効性を示した線対称イメージ入力法による体積ホログラム導光板と、それを搭載したヘッドマウントディスプレイへと展開していく観点での今後の展望について本節では述べる。

6.3.1 記録技術と媒体

初めに、提案する体積ホログラム導光板を実現する為に、記録技術についての研究の推進が今後重要である。導光板のホログラムは2光束ビームによる角度多重によって所望の記録を行う。本研究では理想的に画素数の数だけホログラムが記録されていてクロストークが無い条件を仮定したが、実際には記録メディアのダイナミックレンジである $M/\#$ により記録多重数が制限される。一般的には平面波テストにより角度多重を行い、どれだけの

回折効率の多重ができるかで $M/\#$ は測定され、個々のホログラムの回折効率 η_i (i は整数) として、式(6.1)で定義される。

$$M/\# = \sum_i^N \sqrt{\eta_i} \quad (6.1)$$

画角 60° の範囲を角度分解能 0.02° で回折効率 1% の記録ホログラムで書き込むには $M/\# = 300$ 程度の媒体が要求される。これは現実的な値ではなく、例えば導光板の右半分には右側の画角の表示に使うホログラムのみを書き込むなど、複数の領域にセグメント分けした記録が必要となる。図 6.1 にホログラム導光板の分割セグメント数と必要な媒体の $M/\#$ について回折効率を変化させた際の見積もり結果を示す。

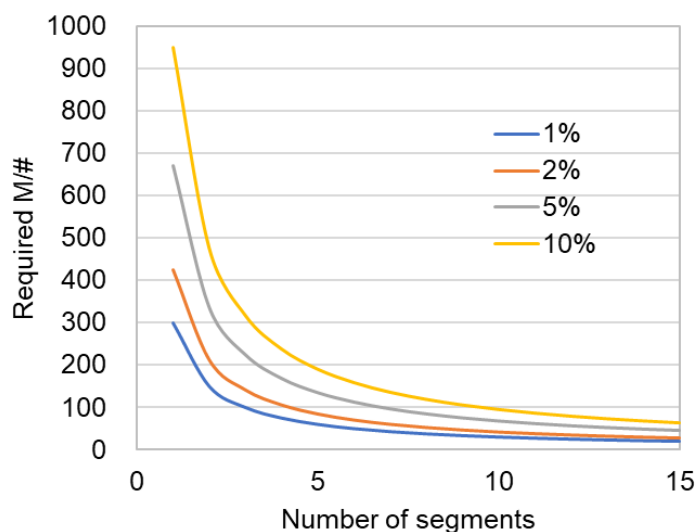


図 6.1 必要 $M/\#$ の見積もり

現実的には回折効率 5% 程度のホログラムを $M/\# = 100$ 程度の媒体で実現するためには画角に応じてホログラム領域を 7 か所程度のセグメントに分割して多重記録を行う必要性がある。ここで、本研究で提案した線対称イメージ入力法を適用する場合においては追加のホログラムを記録する必要性はなく、輝度の均一性と解像度の向上を実現できる点も提案手法のメリットである。

6.3.2 導光板の高機能化

導光板の高機能化の観点では、フルカラー化への展開があげられる。本研究の体積ホログラム導光板では主に緑色単色での解析により提案手法の有効性と詳細な特徴を明らかにしたが、本方式を活用したヘッドマウントディスプレイの利用範囲を拡大する上でフルカラー化へ向けた研究は重要である。

フルカラー化では第 2 章で述べた色ムラの指標での評価が必要となる。色ムラは各色での輝度分布に差異があると生じるため、各色での表示画面内の輝度分布の統一性の観点で

の解析と、高性能化へ向けた手法の提案が重要である。

また、アイボックスの観点では、本研究の体積ホログラム導光板は 1 次元のアイボックス拡大機能を有するが、実用性の観点では 2 次元にアイボックスが拡大されることが望ましい。表面掘り込み回折格子導光板にて形成した VE 回折格子に相当する体積ホログラム領域を別途形成し、2 次元のアイボックス拡大を実現することとなるが、これに必要な要件や詳細な解析を行う必要がある。

自然な立体視の為のライトフィールド技術の研究も盛んにおこなわれている [74, 75]。本研究の導光板は視野の無限遠に像面があるが、より進んだ AR・MR のためのライトフィールド技術やオクルージョン [76] への対応といった技術と導光板技術の融合も重要な研究領域であると考えられる。

6.3.3 超小型ライトエンジンとの接続技術

導光板を搭載するヘッドマウントディスプレイの観点では、広画角・高輝度均一性に加えて装着性を高める小型化の視点も必要となり、ライトエンジン部分の小型化技術も重要な要素である。近年では光学エンジン部の外径が直径 1 mm 程度のファイバ走査型のディスプレイ [64] や、MEMS とレーザー光源が一体化された超小型素子 [77] の報告がなされるなど活発な研究がおこなわれている。こういった光学エンジンは出力される光ビーム径が狭小化され、導光板と組み合わせる際に輝度均一性が低下するという課題も報告されている [78]。このような超小型ライトエンジンとの親和性を高める観点での体積ホログラム導光板の研究展開も重要となると考えられる。

6.4 おわりに

本章では、ヘッドマウントディスプレイ導光板の広画角・輝度均一化の手法として、溝深さ変調表面掘り込み回折格子導光板と線対称イメージ入力体積ホログラム導光板の水準比較を行う共に今後のヘッドマウントディスプレイ光学系の展望をまとめた。

線対称イメージ入力法は、画角と輝度均一性を大きく向上し、単層構造による重量・コストの観点でもメリットのある方式であり、AR 情報をハンズフリーに表示するヘッドマウントディスプレイ導光板を今後大きく進展させる方式としての優位性は明らかである。また、さらなる飛躍に向けて、ホログラムの記録技術、フルカラー対応、アイボックスの 2 次元化、超小型ライトエンジンとの接続技術の観点でのより一層の研究加速の重要性を論じた。

7. 結論

本研究ではユーザの視界中に拡張現実（AR）の情報をハンズフリーに表示するヘッドマウントディスプレイ導光板における広画角・輝度均一化の手法を明確にした。以下、各章の要約を示す。

第1章では、今後、仮想と現実の世界を融合し CPS を一体とした社会運営がされる世界を目指す上で、AR 技術に期待が集まっており、仮想空間と現実空間を融合する世界を可視化する上で必須のデバイスとしてヘッドマウントディスプレイに大きな注目が集まっていることを述べた。

第2章では、ヘッドマウントディスプレイの画面表示に関わる光学的な背景について述べた。ヒトの眼の視覚機能から、虚像投影の基本原則、表示映像の評価指標、さらに本研究で着眼する導光板方式について詳しい動作原理や現状の課題を明らかとし、本研究が取り組むべき方向性について纏めた。主な要点は以下の通りである。

瞳の前に配置されるバルク状のプロジェクタの光学部でシースルー性やアイボックスが限定され、大きな画角の映像投影が困難なアイピース型光学系に対し、接眼部に透明で平板状の光学素子を用いて映像を投影する導光板方式はシースルー性やアイボックスの確保に優れ、注目に値する方式である。

特にガラス基板表面に回折格子を低コストに形成できる表面掘り込み回折格子導光板は広く注目を集めている。一方で、表面掘り込み式回折格子導光板のシミュレーション解析の結果、光線角度と回折格子との相互作用回数が画角毎に大きく異なることや、光線波長や入射角に対する回折効率の依存性を起因として、画角全体での輝度の不均一性の課題があり、虚像の画角は 35° （水平） $\times 20^\circ$ （垂直）で、輝度均一性は 33%にとどまることを明らかとした。

第3章では、表面掘り込み回折格子導光板をベースに、新しく回折格子の溝深さを個別に変化するサブ格子領域にセグメント化し、画角全体の輝度の均一性の向上と、導光板内での全体的な光損失を低減する手法を提案した。

また、上記の溝深さ変調回折格子パターンを設計する上で、ノンシーケンシャル光線追跡による大規模な解析がボトルネックとなる設計時間を短縮する方法論について取り上げた。数十日またはそれ以上の時間を要する、何百万もの光線を追跡することなく、数学モデルと最適化手法によって、数秒での溝深さ回折格子構造の同定を可能とする設計手法を提供した。

さらに電磁波解析による回折格子特性を考慮した光線追跡によって正確な画像表示性能の解析を行い、導光層を2層とする溝深さ変調導光板を設計し、画角（ 35° （水平）

20°（垂直）で 315 cd/m²/lm を達成し、光利用効率は従来の導光板と比較し 37% 向上した。さらに画角全体にわたる輝度均一性も 33% から 47% への向上を達成した。

一方で、実際の回折格子プロファイルと理想的な回折格子特性との両面から溝深さ変調回折格子導光板を解析し、これ以上の輝度均一性や画角の大きな向上は見込めず、多層構造も不可欠であることを明らかとした。

第 4 章では、複数の回折格子を同一の場所に重畳記録できる体積ホログラムを活用し単層化されたヘッドマウントディスプレイ導光板の広画角・輝度均一化の手法を提案した。

体積ホログラム導光板の数学的モデルを構築し、導光板内の信号光と体積ホログラムの相互作用体積を考慮して、観察者が見る虚像を分析した。相互作用体積の変化により、回折光強度が光線角度ごとに変化し、虚像の輝度均一性が低下するという特有の課題を明らかとした。

本課題に対して線対称イメージ入力法による、単層体積ホログラフィック導光板の画角の拡大手法を提案した。入力画像内の線対称点から来る別の光線により相互作用する体積の変動を補償し、従来の導光板と比較して 2 倍以上の画角 60°（水平）× 60°（垂直）に渡って輝度均一性 49% を達成し、提案手法を用いない体積ホログラム導光板と比較して輝度均一性を 490 倍に改善することを明らかとした。

線対称イメージ入力法は入力画像の線対称性を利用しているため、実用上の観点から対称性に対する許容誤差を検討し、特に影響度の大きい対称軸の入力角度に変位が生じた場合の影響について定量的な解析の実施と、大量生産のための有効な対応手法について考察を実施した。

第 5 章では、意図しない方向への回折光である Off-Bragg 回折光が表示解像度に及ぼす影響について議論した。解析モデルに Off-Bragg 回折過程を組込み、画像への影響度を定量評価した。Off-Bragg 回折の回折効率は信号光に照明される体積ホログラムの体積に依存することから、照明領域が減少する光線角度では Off-Bragg 回折が増大し、解像度が低下することを明らかとした。また輝度均一性に起因する明暗と解像性能の低下に密接な関係があることを示し、線対称イメージ入力法の解像性能の向上効果について解析した。従来手法では導光板出力の点像が FWHM で 0.13° の分布を持つのに対し、線対称イメージ入力法での点像広がり FWHM は 0.01° にまで抑圧され、92% の低減効果を得られた。このように信号光と体積ホログラムの相互作用領域を補償する線対称イメージ入力法は輝度均一性と共に、表示解像度を向上することを明らかとした。

第 6 章では、ヘッドマウントディスプレイ導光板の広画角・輝度均一化の手法として、溝深さ変調表面掘り込み回折格子導光板と線対称イメージ入力体積ホログラム導光板の水準比較を行うと共に今後のヘッドマウントディスプレイ光学系の展望をまとめた。

線対称イメージ入力法は、画角と輝度均一性を大きく向上し、単層構造による重量・コストの観点でもメリットのある方式であり、AR 情報をハンズフリーに表示するヘッドマウントディスプレイ導光板を今後大きく進展させる方式としての優位性は明らかである。また、さらなる飛躍に向けて、ホログラムの記録技術、フルカラー対応、アイボックスの

2次元化，超小型ライトエンジンとの接続技術の観点でのより一層の研究加速の重要性を論じた。

結果として，線対称イメージ入力法による体積ホログラム導光板により，従来導光板の約2倍の画角である画角 60° （水平） \times 60° （垂直）にわたって49%の輝度均一性が得られる可能性を示した。本研究は理論およびシミュレーションによる検討が主であるため，今後，実機を用いた検証が不可欠である。

参考文献

1. 総務省, “情報通信白書,” (2019)
2. 一般社団法人電子情報技術産業協会, “CPS とは,” <https://www.jeita.or.jp/cps/about/>
3. 富士キメラ総研, “AR/VR 市場の将来展望 2020,” (2020)
4. D. W. F. van Krevelen, R. Poelman, “A Survey of Augmented Reality Technologies, Applications and Limitations,” *Journal of Virtual Reality*, 9(2), 1–20 (2010)
5. B. Kress. “Optical Architectures for Augmented-, Virtual-, and Mixed-Reality Headsets,” SPIE Press (2020)
6. Microsoft, “Hololens2,” <https://www.microsoft.com/ja-jp/hololens>
7. 日立製作所, “ニュースリリース,”
<https://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2020/03/0316f.html>
8. NEC ソリューションイノベータ, “AR・NEC 遠隔作業支援サービス,”
<https://www.nec-solutioninnovators.co.jp/ss/arvr/products/ar/>
9. NTT コミュニケーションズ, “仮想現実ソリューション,”
<https://www.ntt.com/business/solutions/communication-and-collaboration/vrsol/ar.html>
10. I. E. Sutherland “The Ultimate Display,” *Proc. IFIP 65* (2), 506-508, (1965)
11. J. Iwai and K. Suzuki, “Small and Lightweight Optical Module for HMD,” *Proc. Of The International Display Workshops*, Vol. 21, PRJ6 – 1L, 1127-1128 (2014)
12. 高木 将行, “スマートグラス MOVE R I O B T – 4 0 S / 4 0 の光学技術と市場開拓へ向けたエプソンの取り組み,” *日本光学会 光設計研究グループ*, 第 71 回研究会, 予稿集 (2021)
13. M. B. Spitzer, “Development of Eyewear Display Systems: A Long Journey,” in *SID International Symposium Digest of Technical Papers*, 230-233 (2014)
14. H. Hua, D. Cheng, Y. Wang, S. Liu, “Near-eye displays: state-of-the-art and emerging technologies,” *Proc. SPIE 7690*, Three-Dimensional Imaging, Visualization, and Display, 769009 (2010)
15. H. Kolb, R. Nelson, E. Fernandez and B. Jones, “Webvision: The Organization of the Retina and Visual System,” Utah University, <https://webvision.med.utah.edu/>
16. J. Schwiegerling, “Field Guide to Visual and Ophthalmic Optics,” SPIE Press (2004)
17. A. B. Watson, and J. I. Yellott, “A unified formula for light-adapted pupil size,” *Journal of Vision* 12, 12(10) (2012)
18. D. Mustafi, A. H. Engel, K. Palczewski, “Structure of cone photoreceptors,” *Progress in*

- Retinal and Eye Research,” Vol. 28, Issue 4, 289-302 (2009)
19. C. A. Curcio, K. R. Sloan, R. E. Kalina, A. E. Hendrickson, “Human photoreceptor topography,” *The Journal of comparative neurology*, Vol.292, Issue4, 497-523 (1990)
 20. A. Frommer, “Lumus Optical Technology for AR,” in *SID International Symposium Digest of Technical Papers*, 134-135 (2017)
 21. R. Ukai, T. Kuno, T. Nakamura, M. Uchiyama, S. Ouchi, “High luminance and high see-through head-mounted displays with beam-splitter-array waveguides,” *J. Soc. Inf. Display*, Volume29, Issue1, Pages 78-88 (2021)
 22. M. Popovich, and S. Sagan, “Application specific integrated lensed for displays,” in *SID International Symposium Digest of Technical Papers*, 1060-1063 (2000)
 23. T. Levola, “Diffractive optics for virtual reality displays,” *J. Soc. Inf. Disp.* 14, 467-475 (2006)
 24. T. Levola, and P. Laallonen, “Replicated slanted gratings with a high refractive index material for in and outcoupling of light,” *Opt. Express* 15(5), 2067-2074 (2007)
 25. B. C. Kress, and W. J. Cummings, “Towards the ultimate mixed reality experience: HoloLens display architecture choices,” in *SID International Symposium Digest of Technical Papers*, 127-131 (2017)
 26. D. Grey, and S. Talukdar, “Exit pupil expanding diffractive optical waveguide device,” *International Patent WO 2016/020643*
 27. H. Mukawa, K. Akutsu, I. Matsumura, S. Nakano, T. Yoshida, M. Kuwahara, and K. Aiki, “A full-color eyewear display using planar waveguides with reflection volume holograms,” *J. Soc. Inf. Disp.* 17/3, 185-193 (2009)
 28. Zemax LLC., *Zemax OpticStudio user manual*, available as a part of *Zemax OpticStudio* (2021)
 29. H. Kogelnik, “Coupled wave theory for thick hologram gratings,” *Bell Syst. Tech. J.* 48(9), 2909–2947 (1969)
 30. M. G. Moharam and T. K. Gaylord, “Diffraction analysis of dielectric surface-relief gratings,” *J. Opt. Soc. Am.* 72(10), 1385–1392 (1982)
 31. M. G. Moharam and T. K. Gaylord, “Three-dimensional vector coupled-wave analysis of planar-grating diffraction,” *J. Opt. Soc. Am.* 73(9), 1105–1112 (1983)
 32. M. G. Moharam, E. B. Grann, D. A. Pommet, and T. K. Gaylord, “Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings,” *J. Opt. Soc. Am.* 12(5), 1068–1076 (1995)
 33. T. D. Milster, “OptiScan Simulation Program,” University of Arizona, <https://wp.optics.arizona.edu/milster/resources/optiscan-simulation-program/>
 34. OSRAM Opto Semiconductors GmbH, “OSRAM OSTAR Projection cube datasheet,” <https://dammedia.osram.info/media/resource/hires/osram-dam->

- 7845549/LCG%20H9RM_EN.pdf
35. OSRAM Opto Semiconductors GmbH, “OSRAM OSTAR Projection compact,” https://dammedia.osram.info/media/resource/hires/osram-dam-7387165/LE%20BR%20Q7WM_EN.pdf
 36. L. S. Lesdon, A. D. Waren, A. Jein, and M. Ratner, “Design and testing of a generalized reduced gradient code for nonlinear programming,” Tech. Report SOL. (Stanford University), 76-3 (1976)
 37. Synopsys, Inc., Code V reference manual, available as a part of CodeV (2014)
 38. Y. Takashima and L. Hesselink, “Design and tolerance of NA 0.8 objective lenses for page-based holographic data storage systems,” *Jap. J. Appl. Phys.* 48, 03A004 (2009)
 39. A. Masuno, S. Kohara, A. C. Hannon, E. Bychkov, and H. Inoue, “Drastic Connectivity Change in High Refractive Index Lanthanum Niobate Glasses,” *Chemistry of Materials*, 25 (15), 3056-3061 (2013)
 40. T. Shiono, K. Setsune, O. Yamazaki, and K. Wasa, “Computer-controlled electron-beam writing system for thin film micro-optics,” *J. Vac. Sci. Technol. B* 5(1), 33–36 (1987)
 41. G. J. Swason and W. B. Veldkamp, “Diffractive optical elements for use in infrared systems,” *Opt. Eng.* 28, 605–608 (1989)
 42. S. Y. Chou, P. R. Krauss, W. Zhang, L. Guo, and L. Zhuang, “Sub-10 nm imprint lithography and applications,” *J. Vac. Sci. Technol. B* 15(6), 2897–2904 (1997)
 43. H. H. Solak, C. Dais, and F. Clube, “Displacement Talbot lithography: a new method for high-resolution patterning of large areas,” *Opt. Express* 19(11), 10686–10691 (2011)
 44. H. H. Solak, C. Dais, F. Clube, and L. Wang, “Phase shifting masks in Displacement Talbot Lithography for printing nano-grids and periodic motifs,” *Mic. Eng.* 143, 74–80 (2015)
 45. L. Wang, F. Clube, C. Dais, H. H. Solak, and J. Gobrecht, “Sub-wavelength printing in the deep ultra-violet region using Displacement Talbot Lithography,” *Micr. Eng.* 161, 104–108 (2016)
 46. M. Nogai, K. Handa, A. N. Nakagaito, and H. Yano, “Optically transparent bionanofiber composites with low sensitivity to refractive index of the polymer matrix,” *Appl. Phys. Lett.* 87(24), 243110 (2005)
 47. Mitsui Chemicals, inc., “MR lens,” https://www.mitsuichem.com/sites/default/files/media/document/2018/mr_brochure_en.pdf
 48. D. Gabor, “A New Microscopic Principle,” *Nature* 161, 777–778 (1948)
 49. P. J. van Heerden, “Theory of optical information storage in solids,” *Applied Optics*, Vol. 2, No. 4, 393-400 (1963)
 50. H. C. Klich, “A new approach to read volume holograms at different wavelengths,”

- Optics Communications, Vol. 64, No. 5, 407-411 (1987)
51. R. Fujimura, T. Shimura, and K. Kuroda, "Multiplexing capability in polychromatic reconstruction with selective detection method," *Opt. Express* 18, 1091-1098 (2010)
 52. K. Wakunami, P. Hsieh, R. Oi, T. Senoh, H. Sasaki, Y. Ichihashi, M. Okui, Y. Huang, and K. Yamamoto, "Projection-type see-through holographic three-dimensional display," *Nat. Commun.* 7, 12954 (2016)
 53. I. Kasai, Y. Tanijiri, E. Takeshi, and U. Hiroaki, "A practical see-through head mounted display using a holographic optical element," *Opt. Rev.* 8(4), 241-244 (2001)
 54. M. R. Ayres, K. Anderson, A. Urness, and F. Schlottau, "Skew mirrors, methods of use, and methods of manufacture," U.S. Patent Application No. 10/185,069 (2019)
 55. J. Han, J. Liu, X. Yao, and Y. Wang, "Portable waveguide display system with a large field of view by integrating freeform elements and volume holograms," *Opt. Express* 23, 3534-3549 (2015)
 56. C. T. Draper, C. M. Bigler, M. S. Mann, K. Sarma, P. A. Blanche, "Holographic waveguide head-up display with 2-D pupil expansion and longitudinal image magnification," *Appl. Opt.* 58, A251-A257 (2019)
 57. T. Utsugi, M. Sasaki, K. Ono, Y. Tada, "Volume Holographic Waveguide Using Multiplex Recording for Head-Mounted Display," *ITE Transactions on Media Technology and Applications*, Vol. 8, Issue 4, 238-244 (2020)
 58. Z. Shen, Y. Zhang, A. Liu, Y. Weng, and X. Li, "Volume holographic waveguide display with large field of view using a Au-NPs dispersed acrylate-based photopolymer," *Opt. Mater. Express* 10, 312-322 (2020)
 59. J. Xiao, J. Liu, Z. Lv, X. Shi, and J. Han, "On-axis near-eye display system based on directional scattering holographic waveguide and curved goggle," *Opt. Express* 27, 1683-1692 (2019)
 60. Y. Wu, C. P. Chen, L. Zhou, Y. Li, B. Yu, and H. Jin, "Design of see-through near-eye display for presbyopia," *Opt. Express* 25, 8937-8949 (2017)
 61. A. Ashkin, G. D. Boyd, J. M. Dziedzic, R. G. Smith, A. A. Ballman, J. J. Levinstein, and K. Nassau, "Optically-induced refractive index inhomogeneities in LiNbO₃ and LiTaO₃," *Appl. Phys. Lett.* 9(1), 72-74 (1966)
 62. P. Günter, J. P. Huignard, "Photorefractive Materials and Their Applications I, II," Springer-Verlag, Berlin (1988)
 63. K. H. J. Buschow, R. Cahn, M. Flemings, B. Ilschner, E. Kramer, S. Mahajan, P. Veyssiere, "Encyclopedia of Materials: Science and Technology," Elsevier Ltd. (2001)
 64. B. T. Schowengerdt, E. J. Seibel, "True 3-D scanned voxel displays using single or multiple light sources," *J Soc Inf Disp.*, 14, (2), 135 (2006)
 65. Y. Takaki, Y. Matsumoto, and T. Nakajima, "Color image generation for screen-

- scanning holographic display,” *Opt. Express* 23, 26986-26998 (2015)
66. R. Khayatzadeh, F. Civitci, O. Ferhanoglu, and H. Urey, “Scanning fiber microdisplay: design, implementation, and comparison to MEMS mirror-based scanning displays,” *Opt. Express* 26, 5576-5590 (2018)
 67. B. Hellman and Y. Takashima, “Angular and spatial light modulation by single digital micromirror device for multi-image output and nearly-doubled étendue,” *Opt. Express* 27, 21477-21496 (2019)
 68. M. Born and E. Wolf, “Principle of optics: 60th Anniversary Edition,” Cambridge University Press, (2019)
 69. J. Harthong and A. Medjahed, “Thickness measurement for volume holograms by analysis of first-order diffraction,” *Appl. Opt.* 31, 1803-1809 (1992)
 70. B. Gombkoto, P. Koppa, A. Suto, and E. Lorincz, “Computer simulation of reflective volume gratings holographic data storage,” *J. Opt. Soc. Am. A* 24, 2075–2081 (2007)
 71. H. J. Coufal, D. Psaltis, G. T. Sincerbox, “Holographic Data Storage,” Springer, (2000)
 72. R. Fujimura, T. Shimura and K. Kuroda, “Theory of Polychromatic Reconstruction for Volume Holographic Memory, Holograms - Recording Materials and Applications,” IntechOpen (2011)
 73. International Council of Ophthalmology, “Visual Acuity Measurement Standard,” (1984)
 74. J. H. Park and S. B. Kim, “Optical see-through holographic near-eye-display with eyebox steering and depth of field control,” *Opt. Express* 26, 27076-27088 (2018)
 75. M. Xu, Hong Hua, “Geometrical-lightguide-based head-mounted lightfield displays using polymer-dispersed liquid-crystal films,” *Opt. Express*, 28, 21165-21181 (2020)
 76. Austin Wilson and Hong Hua, “Design and prototype of an augmented reality display with per-pixel mutual occlusion capability,” *Opt. Express* 25, 30539-30549 (2017)
 77. A. Nakao, S. Yamada, T. Katsuyama, O. Kawasaki, K. Iwabata, K. Horii, and A. Himeno, “A compact fullcolor laser beam scanning image projector based on a waveguide-type RGB combiner,” *Proceedings of the International Display Workshop*, Vol. 27, PRJ3/FMC2-3 (2020)
 78. T. Kuno, T. Nakamura, T. Matsuda, S. Onoe, Y. Seo, S. Ouchi, “Fiber-scanning based ultra-compact near-eye display with a narrow-beam waveguide,” *Optical Review* (2021)

謝辞

本論文の執筆にあたり、社会人博士課程の学生として受け入れ頂き、3年間に渡り丁寧なご指導を頂いた藤村隆史准教授に深く感謝を申し上げます。会社業務と並行しての研究推進が必要な中、研究の進め方や、検討内容の考察において非常に有益なご助言を頂きました。社会人博士課程の学生として、学術的な起点から研究の価値を追求するという、企業の研究者の価値観とは異なる視点での、深くかつ鋭い先生との議論の時間は、一人の研究者としての視野を広げ、価値観を再考するという観点において非常に貴重な時間でした。

本論文の執筆に際して、ご多忙な中、副査をお願いさせて頂き多くのご助言とご指導を頂きました。湯上登教授、杉原興浩教授、山本裕紹教授、茨田大輔准教授に深く感謝を致します。

本論文の溝深さ変調回折格子導光板の研究を推進するにあたり、多大なるご指導を頂いたアリゾナ大学の高島譲准教授に深く感謝を申し上げます。先生には米国での研究生活の立上から、新たな研究領域での取り組み方まで広くご指導頂きました。

社会人博士として宇都宮大学に入学することを許可し、ご支援頂いた株式会社日立製作所の関係者の皆様に感謝いたします。特に星沢拓前部長、嶋田堅一部長には多くのご支援とご指導を頂きました。

博士課程進学に賛同し、休日に家族との時間を十分にとれない中でも暖かく応援してくれた家族に深く感謝致します。

最後に、ここでお名前を挙げる事ができませんでしたが、本研究に関わって頂いた全ての皆様に感謝を申し上げ、本論文の締めくくりとさせていただきます。

令和4年3月
中村 俊輝

研究業績リスト

学術論文

1. Toshiteru Nakamura, and Ryushi Fujimura, “Field of view enlargement with line symmetric image input technique of volumetric hologram waveguide for head mounted displays,” *Optical Review* 28, 693-703 (2021)
2. Toshiteru Nakamura, and Yuzuru Takashima, “Design of discretely depth-varying holographic grating for image guide based see-through and near-to-eye displays,” *Optics Express* Vol.26, Issue 20, 26520-26533 (2018)
3. Ryuji Ukai, Takuma Kuno, Toshiteru Nakamura, Masahito Uchiyama, Satoshi Ouchi, “High luminance and high see-through head-mounted displays with beam-splitter-array waveguides,” *J. Soc. Inf. Display*, Volume29, Issue1, Pages 78-88 (2021)
4. Takuma Kuno, Toshiteru Nakamura, Takahiro Matsuda, Shinsuke Onoe, Yoshiho Seo, Satoshi Ouchi, “Fiber-scanning based ultra-compact near-eye display with a narrow-beam waveguide,” *Optical Review* (2021)
5. K. Bando, T. Nakamura, S. Fujiwara, Y. Masumoto, F. Sasaki, S. Kobayashi, Y. Shimoi, and S. Hotta, “Optical selection rule for the lower Davydov excitons in co-oligomer single crystals,” *Phys. Rev. B* 77, 045205 (2008)
6. K. Bando, T. Nakamura, Y. Masumoto, F. Sasaki, S. Kobayashi, and S. Hotta, “Origin of the amplified spontaneous emission from thiophene/phenylene co-oligomer single crystals: Towards co-oligomer lasers,” *J. Appl. Phys.*, 99, 013518 (2006)

招待講演

1. Toshiteru Nakamura, and Yuzuru Takashima, “Image guide design for near to eye displays with depth-varying grating,” *International symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory*, Niigata, (2019), We-M-02
2. 中村俊輝, 久野拓馬, 鶴飼竜志, 中道 拓也, 毛利考宏, 大石耕太郎, “高輝度・高シースルーAR グラスを実現する ABSA 導光板技術,” *映像情報メディア学会, 創立 70 周年記念大会*, (2020)

学会発表：国際会議

1. Toshiteru Nakamura, and Yuzuru Takashima, “Physical and geometrical hybrid design of two-layer and depth-chirped holographic image guide for see-through glass type head

- mounted display,” SPIE optics + Photonics, Optical Data Storage 2018: Industrial Optical Devices and Systems, San Diego, 2018
2. Toshiteru Nakamura, and Ryushi Fujimura, “Line symmetric image input technique of volumetric hologram waveguide for wide field of view head mounted displays,” International symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory, Online, 2020, Tu-D2-03
 3. Ryuji Ukai, Takuma Kuno, Toshiteru Nakamura, Masahito Uchiyama, Satoshi Ouchi, “High See-Through and High Efficiency Waveguide for Head Mounted Displays and Waveguide Evaluations,” International Display Workshop 2019, PRJ1, Sapporo, 2019
 4. T. Kuno, T. Nakamura, T. Matsuda, S. Onoe, Y. Seo, and S. Ouchi, “Scanning Fiber Based Ultra-compact Near-eye Display with a Narrow Beam Waveguiding Technique,” International symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory 2020, Tu-D2-04
 5. Takahiro Matsuda, Shinsuke Onoe, Takuma Kuno, Toshiteru Nakamura, Yoshiho Seo, Satoshi Ouchi, “Laser scan control technology of scanning fiber device for small display system and its applications” ODS 2020: Industrial Optical Devices and Systems

学会発表：国内会議

- 1.(チオフェン/フェニレン)コオリゴマー単結晶の光学スペクトル, 中村俊輝,阪東一毅,舛本泰章,小林俊介,佐々木史雄,堀田 収, 日本物理学会 2004 年秋季大会,
2. (チオフェン/フェニレン)コオリゴマー結晶の低温における光物性, 中村俊輝,阪東一毅,舛本泰章,小林俊介,佐々木史雄,堀田 収, 第 51 回応用物理学会関係連合講演会 2004 年春季,

特許

1. US patent: 10877275, Imageguide for head mounted display, Toshiteru Nakamura, Yuzuru Takashima, 2020.12.29
2. (出願中), ホログラフィック導光板における線対称イメージの伝送, 藤村隆史, 中村俊輝
3. 特許第 05124148 号, 光ピックアップ装置およびそれを用いた光ディスク装置, 中村俊輝 木村茂治 大西邦一 杉山俊夫, 2012/11/02
4. 特許第 04969434 号, 光ディスク装置, 中村俊輝 鈴木基之 一色史雄, 2012/04/13
5. 特許第 05103367 号, 光ピックアップ装置およびそれを用いた光ディスク装置, 中村俊輝, 2012/10/05
6. 特許第 05174768 号, 光ピックアップ装置及びそれを用いた光ディスク装置, 中村俊輝 山崎和良, 2013/01/11
7. 特許第 05378120 号, 光ピックアップ装置及びそれを用いた光ディスク装置, 中村俊輝 中井伸郎 木村茂治, 2013/10/04
8. 特許第 05358475 号, 光ディスク装置およびフォーカス制御方法, 中村俊輝, 2013/09/06

9. 特許第 05542459 号, 光ピックアップ装置及びそれを用いた光ディスク装置, 中村俊輝 中井伸郎 木村茂治, 2014/05/16
10. 特許第 06200791 号, 光学ユニット, 投射型表示装置, および撮像装置, 中村俊輝 大内敏, 2017/09/01
11. 特許第 06535456 号, 映像投射装置及びヘッドマウントディスプレイ, 中村俊輝 大内敏 瀬尾欣穂 川村友人 岡本吉雄, 2019/06/07
12. 特許第 06475362 号, 光走査装置, 映像装置, 及び T O F 型分析装置, 中村俊輝 大内敏 瀬尾欣穂 藤田浩司 尾上慎介 山田健一郎 川村友人, 2020/02/08
13. 特許第 06765928 号, 光走査装置, T O F 型分析装置, および光干渉断層計測装置, 中村俊輝 瀬尾欣穂 松田孝弘 尾上慎介, 2020/09/18
14. US Patent: 7965594, Optical pickup and optical disc apparatus, T. Nakamura, et. al., 2011.6.21
15. US Patent: 8184509, Optical pickup device and optical disk device using the same, T. Nakamura et. al., 2012.5.22
16. US Patent: 8184518, Optical disc apparatus and method for controlling the same, T. Nakamura, 2012.5.22
17. US Patent: 8270281, Optical pickup device and optical disc apparatus using the same, T. Nakamura et. al., 2012.9.18
18. US Patent: 9664984, Optical unit, projection display apparatus, imaging apparatus, T. Nakamura et. al., 2017.5.30
19. US Patent: 9927613, Image display apparatus and head mounted display, T. Nakamura et. al., 2018.3.27
20. US Patent: 10413187, Optical scanning device, imaging device, and TOF type analyzer, T. Nakamura et. al., 2019/09/17
21. US Patent: 10859839, Head mounted display, T. Nakamura et. al., 2020/12/08
22. CN Patent: ZL200910168246.9, Optical pickup device and optical disc apparatus using the same, T. Nakamura et. al., 2012/08/08
23. CN Patent: ZL201010165035.2, Optical pickup device and optical disc apparatus using the same, T. Nakamura et. al., 2013/04/03
24. CN Patent: ZL201010167259.7, Optical pickup device and optical disk device using the same, T. Nakamura et. al., 2014/08/13
25. CN Patent: ZL201010227405.0, Optical disc apparatus and method for controlling the same, T. Nakamura et. al., 2015/06/03
26. CN Patent: ZL201010573373.X, Optical pickup device and optical disc apparatus using the same, T. Nakamura et. al., 2014/12/17
27. CN Patent: ZL201410737186.9, Optical unit, projection display apparatus, imaging apparatus, T. Nakamura et. al., 2018/01/23

28. CN Patent: ZL201510751890.4, Image display apparatus and head mounted display, T. Nakamura et. al., 2019/05/14
29. CN Patent: ZL201680027206.0, Optical scanning device, imaging device, and TOF type analyzer, T. Nakamura et. al., 2020/03/31
30. CN Patent: ZL201910962536.4, Head mounted display, T. Nakamura et. al., 2021/08/10

以上