

東海大学大学院令和3年度博士論文

自由空間光通信における受信光学系の  
非機械的な手法による構築に関する研究

指導 高山佳久教授

東海大学大学院総合理工学研究科

総合理工学専攻

山下 泰輝

# 目次

<b>第 1 章</b>	<b>序論</b>	<b>1</b>
1.1	背景	1
1.2	研究の目的	5
1.2.1	ホログラフィック光学素子による伝搬角度変動の抑圧	5
1.2.2	波面制御素子に LCOS を用いた補償光学システム	6
1.3	論文の構成	8
<b>第 2 章</b>	<b>自由空間光通信システム</b>	<b>10</b>
2.1	大気ゆらぎが自由空間光通信システムに与える影響	12
2.1.1	大気揺らぎのモデル	12
2.1.2	到来角変動	14
2.1.3	ビームワンダー	14
2.1.4	シンチレーション	16
2.2	自由空間光通信における通信光の擾乱を抑圧する手法に関する既往の研究	16
2.2.1	精追尾機構	16
2.2.2	補償光学システム	18
<b>第 3 章</b>	<b>受信光強度変動を安定するホログラフィック光学素子</b>	<b>21</b>
3.1	ホログラフィの原理	22
3.1.1	干渉縞による光波の記録と再生	22
3.2	体積型ブラッグ回折格子	23
3.2.1	ブラッグ条件	24
3.2.2	再生時と異なる波長での回折格子の記録	25
3.2.3	Kogelnik の結合波動方程式	26
	仮定と解析	27
	回折効率	29
3.3	回折格子の多重記録による受信光伝搬角度の安定化	32
3.3.1	回折格子を角度多重記録した HOE	32
3.3.2	通信光と波長が異なる光波での HOE の記録	34

3.4	HOE の試作と評価 . . . . .	36
3.4.1	記録に用いる感光材料 . . . . .	36
3.4.2	HOE の記録 . . . . .	36
	記録光学系 . . . . .	36
	SLM による参照光の生成 . . . . .	38
	露光の設定 . . . . .	40
3.4.3	反射型 HOE の作成と評価 . . . . .	41
	評価の目的と手法 . . . . .	41
	評価光学系 . . . . .	42
	HOE の設計 . . . . .	42
	実験結果 . . . . .	43
	考察 . . . . .	43
3.4.4	透過型 HOE の作成と評価 . . . . .	45
	評価光学系 . . . . .	46
	HOE の設計 . . . . .	47
	実験結果 . . . . .	47
	考察 . . . . .	48
3.4.5	記録波長と異なる波長で使用する HOE の作成と評価 . . . . .	49
	評価光学系 . . . . .	50
	HOE の設計 . . . . .	51
	実験結果 . . . . .	51
	考察 . . . . .	52
3.5	HOE を適用した受信光学系の符号誤り率の考察 . . . . .	53
3.5.1	受信器のモデル . . . . .	54
3.5.2	試作した HOE の再生照明光の入射角度ごとの BER の推定 . . . . .	55
3.6	HOE 設計のための受信光学系のモデル . . . . .	57
	有限の大きさを持つ HOE に対する仮定 . . . . .	57
	HOE を適用した受信光学系 . . . . .	58
	HOE の設計例 . . . . .	59
3.7	まとめ . . . . .	61
<b>第 4 章</b>	<b>LCOS を波面制御素子に用いた補償光学システム</b>	<b>63</b>
4.1	モーダルな基底による波面の再構成 . . . . .	63
4.2	ランダムベクトルを基底に用いる波面の再構成 . . . . .	66
4.2.1	任意行列の再構成 . . . . .	66
4.2.2	補償光学シミュレーション . . . . .	68
	評価手法 . . . . .	71

	結果 . . . . .	72
4.3	まとめ . . . . .	75
第 5 章	結論	76
	謝辞	80
	参考文献	82
	業績リスト	91



# 第 1 章

## 序論

### 1.1 背景

地球近傍における宇宙空間の活用や深宇宙探査では、遠方で活動する宇宙機と地球との通信が必要不可欠である。地球観測や深宇宙探査などにおいては、人工衛星や探査機が搭載する観測機器の性能が向上するとともに、地球との通信に高速な回線が必要となり、よりデータレートの高い通信装置を搭載する傾向にある [1]。さらに、近年の観測機器の小型化と高性能化によって、比較的安価に開発・打ち上げが可能な重量 100kg 以下の超小型衛星の活用が広がっている。超小型衛星は搭載容量が特に限られているため、ミッションの遂行上十分に高速な通信が可能でありながらも小型な通信システムが必要とされている。また、インターネットの通信においても、開発途上国の経済発展に伴う潜在的なインターネットユーザーの増加などを背景に、大量の小型衛星を同時運用する衛星コンステレーションによって場所を問わず高速なインターネット通信環境を提供する衛星通信サービスが台頭している。コンステレーション運用に供する人工衛星は経済的観点から小型化が望まれることと、情報通信技術の発展とコモディティ化によりコンテンツのデータ量が增大していることから、特にバックボーン回線となる衛星間通信や地上へのフィードリンクの構築において小型な装置で高速通信を実現可能なシステムが必要とされている。

無線通信装置の小型化はアンテナの小型化を伴うため、通信速度の高速化と通信装置の小型化を同時に達成するには、受信電力密度の増大が必要となる。一方で、無線通信では搬送波が送信開口から自由空間伝搬するため、回折によって搬送波が拡がる現象により受信電力密度が低下し、伝搬損失が増大する。回折が原因の搬送波の拡がり角はその波長に比例するため、より短波長の電磁波を搬送波に用いることが、小型な装置で高速な通信速度を実現するために重要である。よって電波を搬送波に用いる通信システムでは X バンドや Ka バンドなどのマイクロ波帯の波長を採用し、通信速度の高速化を図っている。しかし、マイクロ波帯を用いてもなおアンテナの小型化は十分とは言えない。例えば 2014 年にマイクロ波帯によるダウンリンクで 3.2Gbps の通信速度を達成した人工衛星 WINDS は、アンテナアレイの実質的な開口として直径 2.4m の反射板を有しており [2]、小型衛星に同仕様の通信装置を搭載することは難しい。そこで、通信装置の小型化と Gbps 級の高速通信を両立するために、電波より波長が短いレーザー光を搬送波使った自由空間光通信

(FSOC:Free-space Optical Communications) が近年盛んに検討され、実用が始まっている。現在通信実績がある自由空間光通信システムでは、ドイツ航空宇宙センター (DLR) が 2008 年に人工衛星 TerraSAR-X に搭載されたアンテナ開口直径 124mm, 搬送波波長 1064nm の光通信装置で 5.6Gbps のダウンリンクを確立した例があり [3], 搬送波としてレーザー光を採用することが衛星通信装置の小型化と高速化に大きく寄与している。

宇宙通信にレーザー光を用いた光通信を適用する試みは 1970 年代から行われている [4,5]。初めて地上-衛星間の自由空間光通信が行われたのは、1994 年に宇宙開発事業団 (現: 宇宙航空研究開発機構, JAXA) によって打ち上げられた ETS-6 での実験で通信総合研究所 (現: 情報通信研究機構, NICT) の宇宙光通信地上センターとの間の地上-静止軌道衛星間通信であった [6,7]。2001 年には低軌道-静止軌道の衛星間における片方向光通信実験がフランス国立宇宙研究センターの SPOT-4 と欧州宇宙機関 (ESA) の ARTEMIS によって行われた [8]。2005 年に JAXA の OICETS と ARTEMIS の間で低軌道-静止軌道の衛星間の双方向通信実験が成功している [9]。2006 年には OICETS と NICT の地上局との間で地上-低軌道間の双方向光通信実験が行われ成功した。これにより地球周回軌道と地上の間の組み合わせにおいて自由空間光通信が可能であることが示された [10,11]。さらに 2008 年にはドイツ宇宙機関 (DLR) の人工衛星 TerraSARX が地上-低軌道間で 5.6Gbps の高速通信に [3], 2013 年には NASA の LADEE が月周回軌道-地上間で 622Mbps の長距離高速通信に成功している [12]。また、2014 年に打ち上げられた人工衛星 SOCRATES に情報通信研究機構の光通信装置 SOTA が搭載され、地上-低軌道の光通信実験を行った。SOTA は装置重量 5.2Kg, 光アンテナの開口直径 50mm という小型軽量な光通信装置で 10Mbps の通信を行った [13,14]。以上に紹介した世界各国のプロジェクトによって自由空間光通信は電波による宇宙通信と比較してより長距離の通信回線により高速な通信が可能であり、装置の小型化も見込めることが明らかになった。そして 2016 年には ESA が EDRS(European Data Relay System) の初号機を打ち上げ、低軌道-静止衛星軌道の衛星間通信に 1.8Gbps の自由空間光通信回線の実用を開始している。2020 年には日本の JAXA も JDRS(Japanese Data Relay System) を打ち上げ、光ファイダリンクにより 1.8Gbps の通信が可能なデータ中継衛星の運用を開始し、日本の自由空間光通信の技術を実用化段階へと進めた。また、商業的には、衛星コンステレーションによるインターネット接続サービスで極軌道衛星のバックボーン回線の構築に自由空間光通信システムを適用することが計画されているほか [15], 光通信装置設計製造の専門企業としてドイツ Mynaric 社や、人工衛星によって量子鍵配送のネットワークを拡大するためのインフラとして自由空間光通信を用いるサービスを提供しようとしている英国 Arqit 社など、世界各国で多数の企業が自由空間光通信に注目している。

自由空間光通信は搬送波の波長が短く通信光のビームが先鋭であることが特徴であり、回線設計上の利点をもたらす。これは、伝搬先でのビームスポットの直径が小さくなる事や、大気中の伝搬において温度による屈折率変化などの影響を受けやすくなる事とのトレードオフである。従って、自由空間光通信システムでは非常に高い精度でのビームの指向制御が要求され、システム構築の技術的難度が高い。特に大気中では、大気の屈折率や、散乱と吸収の原因となる塵や水分などの分布が時間的に変化する。これら大気のゆらぎの影響によってビームの波面形状が時間的に変化する。

結果として、受信地点での伝搬角度や強度分布が変動することで受信光強度の時間的変動を生み、ビット誤りの原因となる。これを抑圧するには大気の状態の変動に対応して波面形状を検出し補正するシステムが必要になる。特に高速な通信を行うシステムでは受信した通信光をシングルモードファイバ (SMF:Single Mode Fiber) に結合するため、より精度の高い指向制御が必要となる。受信に SMF を用いる理由は、高速通信を可能にするフォトダイオードは電氣的な応答速度を高めるために有効直径が  $10\mu\text{m}$  程度に設計されていることと、受信光を増幅して高速通信に十分な利得を確保するために用いる低ノイズ光アンプの多くは入力部分が SMF となっていることにある。自由空間光通信システムの通信速度の大容量化が進むにつれて、高速な光電変換素子と低ノイズ光アンプを組み合わせる構成の通信装置が増えると考えられる。従って、受信した通信光の波面歪みを高速かつ高精度に補正し安定的に SMF へ結合する技術は、今後ますます重要になる。

自由空間光通信システムにおいて通信ビームの指向制御を行う機構は捕捉追尾システムと呼ばれる。捕捉追尾システムは大きく 2 段階の精度にわけて通信光のビーム指向制御を行う。一段目は粗追尾機構であり、通信の開始前に光アンテナを通信相手の光アンテナと対向させる初期捕捉と、その状態を維持する粗追尾を行う。粗追尾機構は通信相手を捉えるためのカメラ等のエリアセンサーを備え、その画像や軌道予測値などを元に 2 軸ジンバルに懸架された光アンテナを指向する。二段目は光アンテナより送受信装置側に位置する内部光学系における追尾系であり、粗追尾機構の機械的誤差と大気の影響による波面歪みの影響を抑圧することが目的である。内部光学系では補正対象とする波面形状の粗さに応じて、精追尾機構と補償光学システムの 2 つが使い分けられる。精追尾機構は、波面形状の Tip-tilt 成分によるビームの伝搬角度変動を抑圧することが目的であり、四分割フォトディテクタ (QPD:Quadrant Photo Diode) などのセンサーで捉えた受信光の光軸中心の位置を基に、小型の鏡を機械的な機構によって駆動し受信光の進行方向を設計された角度へ補正する [16, 17]。補償光学システムは、精追尾機構で補正されない複雑な波面形状成分によるビームの強度分布の変動を抑圧することが目的であり、シャックハルトマンセンサー等の波面センサーにより波面形状を検出し、可変型鏡などの波面制御素子によって複雑な形状の波面歪みを補正する。これらの捕捉追尾システムはすべて再帰的な能動制御によるものである。このフィードバック制御の応答遅延は大気の影響による受信光の伝搬角度の変動速度より短いことが望ましい。しかし、地上-衛星間光通信リンクにおける受信光伝搬角度の変動で支配的な周波数成分は  $0\text{Hz}$  から  $1\text{kHz}$  以上まで分布するのに対し [14]、例えば人工衛星に搭載された実績がある精追尾機構の動作速度は数百  $\text{Hz}$  である [18, 19]。精追尾機構の制御帯域向上に関する研究は 1980 年代から現在に至るまで数多くなされており [20–23]、2008 年には  $3.5\text{kHz}$  の制御帯域を実現した例もあるが [24]、文献 [24] で示された装置でも良好な特性を示すのは  $100\text{Hz}$  以下とされている。精追尾機構は高速な自由空間光通信回線を構築するために必要不可欠であるが、センサーとアクチュエータと制御装置が必要であり通信装置の複雑さや搭載容量が増すことに加え、光学系の素子数を増加させて通信装置の内部損失を増大し回線設計を圧迫するなど、システム設計上の制約にもなっている。また機械的に駆動する機構は、人工衛星に搭載するためには振動試験やそれに耐える設計を行う必要があり、装置の設計・製造の工程を複雑化するためには可能な限り除去することが望ましい。補償光学システムもまたフィードバックシステムであり、機械的に鏡の表面形状を変化させるデフォーダブルミラー

(DM:Deformable Mirror) が波面制御素子として繁用される。自由空間光通信装置への補償光学システムの適用は検討や開発が進んでいる段階にある [25]。著者の知る限り補償光学システムを用いた自由空間光通信装置が人工衛星に搭載された例は未だ無いが、将来的には精追尾機構と同様に通信を行う双方の通信装置に搭載されると考えられる。人工衛星に補償光学システムを搭載する場合にも、機械的駆動部は低減することが望ましい。また、DM は多数の駆動素子の配列により鏡の形状を機械的に変化させるため、小型化と多素子化が比較的難しく、より精細度が高い波面歪みを補正することが難しい。

また、自由空間光通信の超長距離高速通信という特性をより活用しやすくし、様々なユースケースに適用可能とするためには、光通信装置をより小型・簡易化しシステムの複雑さを緩和することが重要である。小型で簡易な光通信装置が効果を発揮する例として、データ中継衛星が地上へのフィードリンクに加えて複数の人工衛星と光通信リンクを持つために、人工衛星の限られたスペースに複数の光通信装置を設置したい場合や、通信装置から可動部を廃して開発費用やテストにかかる費用を削減した低コストな衛星ミッションに用いる場合などが挙げられる。既報の光通信装置の簡易化においては通信速度や機能を低減・削減することで装置構成を簡易にする施策が取られている。例えば、受信光を SMF ではなくマルチモードファイバ (Multi Mode Fiber:MMF) にカップリングすることで理論上の回線速度の低下と引き換えに精追尾機構を不要とするものや [26]、通信方向を片方向に限定することで片側の通信装置を再帰性反射鏡と光変調素子のみで構成する検討などがある [27]。しかし、宇宙通信において更なる通信速度の高速化が必要視されている状況においては、自由空間光通信は電波通信に比べてより小型な装置でより高速な通信を可能とすることが期待されている。よって、電波を超える高速な通信が可能でありながら、衛星の搭載容量資源を圧迫しない自由空間光通信装置を構築することが今後の宇宙通信の発展のためには重要な課題だと考えられる。

現状では精追尾機構や補償光学システムなどのフィードバックシステムによって波面歪みの時間的な変動を抑圧する手法が用いられている。フィードバック制御によって波面形状の補正を行うシステムにおいて、応答遅延により波面補正が大気の影響による波面形状の変動速度に追いつかない状態が生じると、受信光強度が低下及び変動し [23, 28-30]、ビット誤り率が上昇し通信品質が劣化する原因となる [31-33]。このため多数の研究によって精追尾機構と補償光学システムのいずれにおいても動作周波数の向上が図られているが、フィードバックシステムの応答遅延を完全に除去することは原理的に不可能である。従って、この応答遅延を除去するには、これまでに適用例のない革新的なパッシブ光学システムを創出し、フィードバックシステムと置き換える必要がある。また、搭載容量が限られた人工衛星の資源を有効活用するために、小型な構成でありながら高速な通信速度を実現可能な通信装置が期待されている。通信装置の小型化には、多数の構成部品を要するフィードバックシステムや機械的駆動部の削減が効果的である。通信装置から機械的駆動部を排除することは、人工衛星に搭載する通信装置の設計と製造にかかるコストを削減するため、経済的観点からも期待されている。よって、フィードバックシステムと置き換える新しい光学素子の創出は、応答遅延が無く、機械的駆動部が無く、構成が簡易な理想的な自由空間光通信の捕捉追尾システムの実現を加速する成果となる。

## 1.2 研究の目的

本論文では、自由空間光通信システムの高速度化、小型化及び簡易化に資する検討として、非機械的に波面歪みの補正を行う手法を研究する。まず、補正の対象とする波面歪みを、伝搬角度変動を発生させる Tip-tilt と、より複雑な波面形状の二つに大別する。Tip-tilt 成分の波面歪みは受信光の伝搬角度変動の原因であり、大気の影響だけでなく粗追尾機構の指向誤差も含む。自由空間光通信の受信光学系で光ファイバに受信光を結合するには、まず光ファイバの端面に受信光を照準する必要がある、伝搬角度の時間的な変動の抑圧が必要不可欠である。よって Tip-tilt は他の波面形状の成分と比べて補正の遅延を削減した際の効果が大きく、受動素子によって補正する意義が大きいと考えられる。より複雑な形状の波面歪みは、光ファイバへの結合効率の変動の原因である。一般に、より複雑な波面形状の成分ほど受信光全体のパワーに対して占める割合が少ない。受動素子による波面形状の補正がエネルギーロスの原因と成り得ることを考慮すると、実測に基づいて補正を行うことの効果が大きい。従来の受信光学系では、波面歪みの補正にセンサー・制御装置・機械駆動素子の組合せで構成されるフィードバックシステムが用いられ、制御遅延・多数の部品による構成・機械的可動部の信頼性担保が自由空間光通信装置の高性能化・小型化・低コスト化を阻んでいる。

そこで、本研究では以下の二点を提案する。まず、受信光の伝搬角度変動の補正には、応答遅延と制御システムを完全に排除し、単一の素子で波面形状の補正をする手法としてホログラフィック光学素子 (HOE:Holographic Optical Element) を利用する。また、より複雑な波面歪みの補正には、非機械的に波面形状の補正を行う手法として位相型 LCOS(Liquid Crystal on Silicon) を波面制御素子として用いる。HOE については設計手法の提案と試作による機能の確認を行い、LCOS を適用した補償光学システムについては、LCOS の特徴を考慮した制御方法を提案しシミュレーションにより効果を確認する。これらの検討により、遅延のない伝搬角度変動の補正と複雑な波面歪みの補正を非機械的に実施可能な、簡易で小型な通信装置による自由空間光通信システム設計の基礎を構築することが、本研究の目的である。

### 1.2.1 ホログラフィック光学素子による伝搬角度変動の抑圧

HOE は、映像表示装置や光情報処理の分野で、所望の波面変調を行う機能を持った光学素子の実現手法として注目され、盛んに検討されている技術の一つである [34-39]。HOE はホログラムの原理によって作成される回折光学素子の総称であり、所望の複素振幅分布を持った物体光を記録したホログラムと考えられる。HOE が一般的なホログラムと異なるのは、使用時に再生照明光として HOE に入射する光波は必ずしも記録時の参照光と同じとは限らないことである。使用時に HOE を照明する光波の波長と複素振幅分布、その光波に与えたい位相か振幅もしくはその両方の変調を考慮し、記録時の参照光と物体光の複素振幅分布や照射時間などを工夫した記録方法を考案することで、所望の光学的機能をもった HOE を作成できる。よって、HOE の機能は単に既存の

光学素子の代替に留まらず、複数の光学素子の統合や、再生照明光の波長や入射角度をパラメータとした光学的機能の実現など、様々な波面変換を行う素子として設計可能であり、潜在的な応用の幅が広い。

HOE を用いて光通信装置の構成を簡易化する場合には、精追尾機構を構成していた種々の部品はすべて除去し、単一の HOE のみによって大気擾乱の影響による受信光の伝搬角度変動を抑圧する。HOE は光波の伝搬現象を原理として利用した受動的な光学素子であるためフィードバック制御が不要であり、応答遅延は発生せず、高速な大気擾乱に対しても有効に伝搬角度を補正できる。また吸収のない位相型の回折格子は理論上は回折効率が 100% となる回折格子を設計可能であり [40]、実際に HOE を作成する際にエネルギーの吸収が少ない材料を選べば、エネルギー損失に敏感な通信システムにも適用可能である。ただし、実際に HOE を作成する際には、記録時に入射する光に対する材料の光学的・時間的な応答特性が原因となり、作成された HOE の回折効率は理論よりも大幅に減少する。光への応答が既知の材料を用いる場合には記録時の材料の応答を考慮して HOE の設計を行えるが、例えばフォトポリマーなどの有機材料では材料の応答が十分明らかでない場合も多い。

本論文では、まず適用対象のアプリケーションである自由空間光通信システムの構成要件を仮定し、HOE の仕様を定め、その仕様に沿って結合波動理論によって HOE の設計を行う [40]。また、入手できたホログラム記録材料と機材を用いて HOE を試作、実験を行い提案手法が原理的に成立することを確認する。具体的には、試作した HOE が望遠鏡開口面に対する受信光の入射角変動に対して所望の特性を示すことを確認するために、HOE の回折光を SMF にカップリングする実験を行い、SMF にカップリングした光強度の参照光入射角に対する依存性を評価する。また、精追尾機構が大気擾乱に追従できない状況での提案手法の有用性を確認するために、精追尾機構を模擬したミラーについてもビームの伝搬角度に対する SMF にカップリングした光強度の依存性を評価し、HOE の結果と比較する。また、結合波動理論によって回折格子の回折効率をシミュレーションし、特定の受信光学系に提案手法を適用する場合の HOE の設計パラメータを示す。

### 1.2.2 波面制御素子に LCOS を用いた補償光学システム

光学望遠鏡を用いた天文観測においては、大口径の望遠鏡を建設し遠い天体から届く光をより多く受光し、高い解像度で観測することが重要である。しかし、地上の望遠鏡では大気の影響によって天体から届く光の波面が歪んで星像の解像度が低下し、望遠鏡の回折限界に迫る解像度で星像を得ることは難しい。大気の影響で歪んだ観測光の波面を補正し、地上に建設した大型望遠鏡の性能を高めることを目的に研究・開発された仕組みが補償光学システムである。補償光学システムは、波面センサーで波面歪みを測定し、測定した歪みを相殺する位相分布を算出し、その位相分布に相当する波面変調を受信光に与えるように波面制御素子を駆動する [30]。天文学的な要求から開発された補償光学システムは、媒質のゆらぎの先にある対象を高解像度で撮像する手法として注目され、生物学や医学における顕微鏡画像の高精細化に応用されている。自由空間光通信においても、大気の影響を抑圧して望遠鏡で受信した通信光を効率良く集光し、受信光のエネルギー損失を低下

させることを目的に、補償光学システムを通信システムに組み込む検討がなされている [41].

本論文では、人工衛星に搭載する自由空間光通信装置の機械的駆動部を削減するため、LCOS によって波面制御を行う補償光学システムを検討する。LCOS は液晶が封入された板の表面と裏面に、部分的に電圧を印加する電極が配列された構造をしており、電圧の印加によって液晶分子の配向が変化する現象を利用して波面の変調を行うため、機械的駆動部を持たない。一方で、DM は要素素子を同心円状やハニカム状に配列するなどして望遠鏡の円形の開口形状に良く一致するよう工夫がなされているのに対し、LCOS は一つの電極によって制御される要素領域の形状が矩形であり、それがタイル状に配列されているのが一般的である。波面センサーの要素の配置と波面制御素子の要素素子の配置は必ずしも一致しないため、適切に波面制御素子を駆動するには、計測した波面形状を波面制御素子で再現できる成分の組み合わせによって表現する必要がある。これを波面の再構成と呼ぶ。

波面の再構成は、任意のベクトルを基底ベクトルの系列に展開する問題として扱われる [30]。ここで、任意のベクトルは歪んだ波面を計測した波面センサーの出力に対応し、基底ベクトルは波面制御素子で平面波を変調した時の波面センサーの出力に対応する。実際の計算では、任意の波面形状を有限個の基底ベクトルとその係数行列の積として再構成するため、より多くの基底ベクトル及びそれに対応する波面センサーの出力を用いることで再構成の精度が向上する。DM を波面制御素子に用いる場合は、望遠鏡の円形の開口形状に合わせて要素素子の配列が工夫されていることから、極座標系で定義されており円形のパターンを持つ Zernike 多項式が直交基底の系列として繁用される [42–45]。しかし、一般的な LCOS は矩形の要素素子がタイル状に配列されているため、Zernike 多項式をそのまま適用すると誤差が大きくなると考えられる。また、Zernike 多項式を直交基底として用いる場合には、波面の再構成に用いる基底ベクトルの数を増加させると、より高次の Zernike 多項式を使うことになる。その際、波面制御素子や波面センサーで再現または検出可能な空間周波数より高い空間周波数を含む位相分布はシステム中で扱えないため、実際に波面の再構成に使用できる Zernike 多項式の項数は波面センサーの要素数に満たず、波面の再構成の精度に改善の余地を残す場合もある。

そこで本研究では、Zernike 多項式の代替としてランダムベクトルを基底ベクトルに用いて、波面の再構成を行うことを提案する。ランダムベクトルが基底として機能することは従来から知られており、シングルピクセルイメージングなどに応用されている [46]。統計的には、任意のランダムベクトル同士には相関が無く、その内積はゼロになるため、ランダムベクトルの系列は直交基底の性質を満たす。また、ランダムベクトルを 2 次元のパターンとして見た場合に、その空間周波数スペクトルは大きく偏らないと考えられる。そのため、波面センサーの要素数と同数の基底ベクトルを波面の再構成に使用可能となる。また、ランダムベクトル同士の内積を統計的にゼロと見なすには多数の要素が必要になるが、LCOS の要素数は 200 万を超える場合が多く、ランダムベクトルの統計的な特徴を利用するに足る要素数を使えると考えて差し支えない。以上から、波面制御素子として LCOS を用い、波面の再構成の基底ベクトルとしてランダムベクトルを採用することで、非機械的で高精細な補償光学システムが実現可能になる。ただし、実際にはシステムの構築に用いる波面センサーや LCOS の仕様、数値計算アルゴリズムの実装上の問題によって、補償光学システ

ムの性能は変化するため、単なる線形代数的な計算に留まらず、より現実的な条件での検討が重要である。本論文では、ランダムベクトルと Zernike 多項式それぞれの基底による波面の再構成について、再構成の精度と用いる基底ベクトルの数の関係に着目して比較する。原理確認のために、単純な行列演算としてモデル化した波面再構成の問題を、それぞれの基底で解き、比較する。また、現実の補償光学を想定して、大気擾乱や光学系中の光波伝搬を考慮した補償光学シミュレーションにおいても、ランダムベクトルと Zernike 多項式による、波面補正の特性の比較を行う。

### 1.3 論文の構成

本論文の構成は以下の通りである。

第二章では自由空間光通信システムについて概説し、レーザー光を用いた無線通信における大気の影響とその対策について述べる。まず自由空間光通信システムの概略と一般的な通信装置の構成を説明する。次に通信路の特性として、大気が自由空間光通信システムの通信路の特性に与える影響について、乱流モデルを基礎とした理論を紹介する。そして、大気の影響を抑圧する既往の研究を紹介し、それぞれの手法が通信システムの構成に課す制約を考察する。

第三章では、HOE によって受信光の伝搬角度変動を抑圧する手法を提案する。まず、HOE を作成するための基礎理論として、ホログラムの原理を説明し、厚みのある感光材料に記録されたホログラムの回折効率について Kogelnik の結合波動方程式を用いて理論的に説明する。その後、受信光の伝搬角度変動を抑圧する HOE の設計手法を紹介する。シングルモードファイバへの光の結合効率と厚いホログラムに記録された回折格子の回折効率について、それぞれの受信光の入射角度に対する依存性に着目して受信光学系のモデルに組み込む。ここで構築したモデルに基づいて、受信光学系の各種パラメータを仮定した場合の HOE の設計例を示す。そして、提案手法の実現性と有効性を示すために、HOE を試作し、受信光の伝搬角度変動に伴う受信光強度の変動を抑圧する機能を評価する。最後に、試作した HOE を受信光学系に組み込んだ自由空間光通信システムを想定して、当該システムのビット誤り率について考察する。

第四章では、波面制御素子として LCOS を用いた補償光学システムの制御手法として、ランダムベクトルを基底ベクトルに採用した手法を提案する。まず、補償光学システムにおける波面の再構成について説明し、既往の研究を紹介する。その後、ランダムに生成された数列が直交基底として機能することに着目し、線形方程式の求解において、ランダムベクトルを基底として得た解と Zernike 多項式から生成したベクトルを基底として得た解を比較し、ランダムベクトルの利用が従来手法に対して優位性を持つことを確認する。補償光学システムの波面再構成にランダムベクトルを用いることを想定し、補償光学シミュレーションにおいてランダムベクトルを用いて生成した基底と、Zernike 多項式を用いて生成した基底とで、波面補正の精度を比較する。このシミュレーションには、大気による波面歪みの時間的変動、望遠鏡開口による遮蔽、波面センサーの光学的特性がパラメータとして含まれる。最後に、ランダムに生成されたベクトルと Zernike 多項式で生成されたベクトルの、基底としての特性の差について考察する。

第五章では、HOE による伝搬角度変動の抑圧と、補償光学システムによる波面歪み補正を組み



合わせた，受信光学系の構成について考察し，結論と今後の課題について述べる．

## 第 2 章

# 自由空間光通信システム

図 2.1 に地上-衛星間の自由空間システムの概略図を示す。自由空間光通信システムでは送受信局が互いの光アンテナ (望遠鏡) を対向させ、送信局から受信局の光アンテナへ向けてレーザービームを照射して通信回線を確立する。通信ビームの指向角度を制御して、通信相手をビームの範囲内に捉え、追尾して安定的に回線の接続を維持する機能を捕捉追尾と呼ぶ。自由空間光通信装置は、通信相手の移動と動揺、大気の影響による通信ビームの伝搬角度・波面形状変動を抑圧して精密な捕捉追尾を行うため、複数の段階に分けて通信ビームの指向制御の機構を持つ。図 2.2 に空間光通信システムにおける送受信装置の概略図を示す。送信システムで光通信装置から出射した通信光は、補償光学システムと精追尾機構で精密な指向制御を受けた後、光アンテナで通信相手へむけて照射される。光アンテナはカメラ等のエリアセンサーとジンバルから成る粗追尾機構によって通信相手を追尾している。必要な場合には、送信光の伝搬角度を光アンテナの前段にある光行差補正

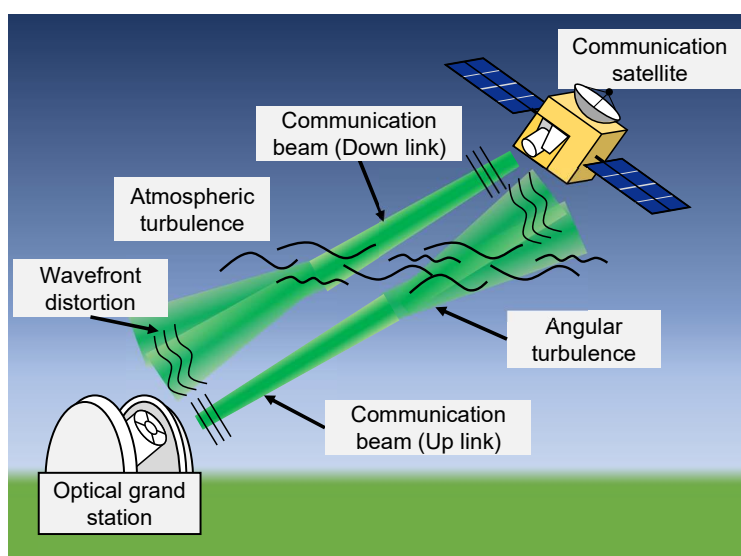


図 2.1: 地上-衛星間の自由空間光通信

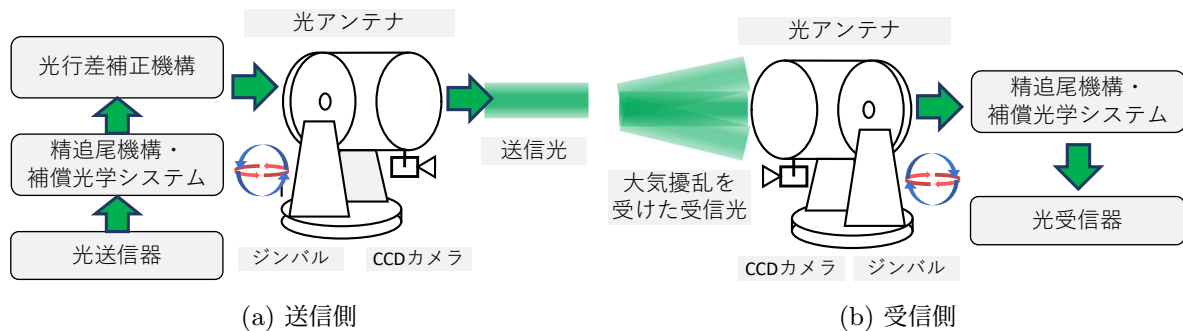


図 2.2: 自由空間光通信システムの概略図

機構によって光が伝搬する時間中に通信相手が移動する距離に応じて微調整する。一方で受信システムでは、粗追尾機構で光アンテナを通信光の到来角度へ指向・追尾し、集光した光を受信光とする。受信光は精追尾機構で伝搬角度の誤差を補正され、補償光学システムで波面歪みの補正を受け、光受信器へ導かれる。光受信器への入力口は光ファイバとなっている場合が多く、精追尾機構と補償光学システムは粗追尾機構の指向誤差と大気の影響による受信光の波面歪みを抑圧し、受信光を効率よく光ファイバへカップリングする役割を担っている。

通信に用いる変調装置や光電変換素子は光ファイバを用いた地上の高速光通信の技術に立脚する。過去の衛星通信実験のプロジェクトで通信に用いられたレーザー光の波長は  $0.8\mu\text{m}$  帯,  $1\mu\text{m}$  帯,  $1.5\mu\text{m}$  帯と様々であるが、近年は地上の光ファイバ通信と同じ波長帯の  $1.5\mu\text{m}$  帯の採用が多くなっている。よって自由空間光通信システムの最たる役割は、地上と宇宙空間ほどの遠方に位置する光電変換素子に、最低受信感度を上回る電力を安定的に届け続ける事である。10Gbps を超えるような高速通信を行うには、一般的に静電容量が小さく電気的応答速度が速い光電変換素子が用いられる。高速な光電変換素子ほど有効面積が小さくなる傾向があり、例えば 50GHz 程度の応答速度を持つフォトダイオード製品の多くは有効直径が  $10\mu\text{m}$  から  $20\mu\text{m}$  程度である。その有効直径の小ささと装置の設計の合理性から、空間光通信装置に適用する際には、空間を伝搬する通信光を一度シングルモードファイバ (SMF: Single Mode Fiber) に結合してフォトダイオードまで導波する構成を採る場合が多い [25, 28]。加えて回線設計上、光アンテナで集光した受信光の電力が光電変換素子の最低受信感度に満たない場合は、低ノイズ光アンプによって受信光強度を増幅する構成が有効である。多くの光アンプは入力口がシングルモードファイバとなっている。SMF の有効直径はモードフィールド径と呼び、 $1.5\mu\text{m}$  帯ではおよそ  $5\mu\text{m}$  である。よって、地上-衛星間の自由空間光通信システムで 10Gbps を超えるような高速通信を行うには、少なくとも数百 km 以上先の受信局の内部に設置された  $5\mu\text{m}$  の SMF の開口に通信光のビームを結合し続けられる捕捉追尾システムが必要である。

送信局の捕捉追尾システムに要求される指向角度の分解能はビームの拡がり角によって規定される。送信するビームがガウスビームであり、送信アンテナ直径がガウスビームの回折パターンに影響を与えないよう設定されていると仮定する。ここで送信アンテナの開口面に送信するビームの

ビームウエストが位置するとみなすと、波長を  $\lambda$ 、通信距離を  $z$ 、ビームウエストの半径を  $w_0$ 、とすると伝搬先でのビームフットプリントの半径は

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left( \frac{\lambda z}{\pi w_0^2} \right)^2} \quad (2.1)$$

である。ガウスビームのビームウエスト及び伝搬後のビーム径は、光軸に垂直な面におけるガウス分布状の強度分布の  $\frac{1}{e^2}$  幅で定義されている。ここで通信システムの回線設計における指向誤差による受信電力変動のマージンが 3dB だとすれば、ガウスビームの半値全幅 (FWHM: Full Width Half Maximum) が、 $\frac{1}{e^2}$  幅のビーム直径  $2w(z)$  により

$$FWHM(z) = \frac{2w(z)}{\sqrt{\frac{2}{\ln 2}}} \approx \frac{2w(z)}{1.699} \quad (2.2)$$

と定義されるため。捕捉追尾システムに要求される指向精度は FWHM に対応する拡がり角の半角、

$$\theta_{req} = \arctan \frac{FWHM(z)}{2z} \quad (2.3)$$

だと考えられる。例えば通信距離 1000km、中心波長  $1.55\mu\text{m}$ 、送信ビーム直径 50mm の地上-低軌道間の自由空間光通信システムを考えると、式 (2.3) より、捕捉追尾システムに要求される指向精度は  $5.8\mu\text{rad}$  程度と見積もられる。

本章では、捕捉追尾システムに要求される指向精度を達成することの阻害要因となる、大気が通信ビームおよび受信光強度に与える影響について説明し、それを抑圧するために用いられている精追尾機構、補償光学システムを始めとする既往の研究について述べる。

## 2.1 大気ゆらぎが自由空間光通信システムに与える影響

不均質な媒質中を伝搬する電磁波は須らく媒質の屈折率分布の影響を受けて、場所によって位相が進んだり遅れたりする。伝搬する電磁波が元はコヒーレントな平行光であったとしても、不均質で複雑な屈折率分布の媒質中を伝搬した後には、その波面は乱れ、強度分布には干渉によるスペckルパターンが生じる。地球上に送受信局を有する自由空間光通信システムにおいては通信光はレーザービームであり、大気はその媒質である。光波が伝搬する媒質としての大気を考えるときには、温度と密度によって決まる屈折率が重要なパラメータである。大気の屈折率分布は日射や地面からの輻射熱、風などの影響によって空間的に不均質であり時間的に変動する。特に問題となるのは乱流による、予測困難な屈折率分布の変動である。

### 2.1.1 大気揺らぎのモデル

大気の影響によって光波が受ける擾乱は、複数の理論によってモデル化されている。特に繁用されるのが Kolmogorov モデルと、それを拡張し現実との乖離を小さくした Von Karman モデルで

ある。これらのモデルは、不均質な大気をそれぞれ異なる均質な屈折率を持った大小の渦の集まりと考えている。ここで渦はその大きさに応じたエネルギーを持つとする。渦の集団のパワースペクトル密度  $\Phi_n(k)$  を考えると、大気にそれぞれの大きさの渦がどれだけ含まれているかを考慮できる。 $\Phi_n(k)$  の関数型は乱流に関する物理法則から予測されており、Kolmogorov モデルではこのスペクトルを

$$\Phi_n(k) = 0.033C_n^2\kappa^{-11/3} \quad (2.4)$$

としている。[47,48] ここで  $\kappa$  は渦の大きさを  $L$  として  $\kappa = 2\pi/L$  である。また、 $C_n^2$  は屈折率構造パラメータと呼ばれ、揺らぎの強さを表す変数である。式 (2.4) が成立する  $\kappa$  の値の範囲は限られており、その範囲から外れると現実の大気の振る舞いから乖離してしまう。この点を改良したのが式 (2.5) に示す Von Karman スペクトルである [49]。

$$\Phi_n(\kappa) = \frac{0.033C_n^2 \exp(-\kappa^2/\kappa_m^2)}{(\kappa^2 + \kappa_0^2)^{11/6}} \quad (2.5)$$

ここで、 $\kappa_m = 5.92/l_0$ 、 $\kappa_0 = 2\pi/L_0$  であり、 $l_0$  は大気揺らぎの空間分布の最小スケール、 $L_0$  は最大スケールを表す。

地上-衛星間の自由空間光通信システムにおける大気の影響を考える場合、通信光のレーザービームは大気を縦方向に伝搬するため、高度ごとの大気揺らぎの状態を知ることが重要になる。それを表すパラメータは  $C_n^2(h)$  とよばれ、屈折率構造パラメータを高度の関数としたものである。 $C_n^2(h)$  の定義には2つの繁用されるモデルがあり、一つはSLCモデル、もう一つはHufnagel-Valleyモデルである。

SLCモデルは実測値に基づいて定義されており、ハワイのマウワ島ハレアカラ山における測定値に由来している [50]。それ故に場所における大気観測のデータに適用すると誤差が大きくなるという問題がある。SLCモデルでは日中の大気状態を表す daytime モデルと夜間の大気状態を表す night モデルがある。それぞれを式 (2.6) と式 (2.7) に示す。

$$\begin{aligned} C_n^2(h) &= 1.7 \times 10^{-14}, & 0 < h < 18.5[m] \\ &= 3.13 \times 10^{-13}/h^{1.05}, & 18.5 < h < 240[m] \\ &= 1.3 \times 10^{-15}, & 240 < h < 880[m] \\ &= 8.87 \times 10^{-7}/h^3, & 240 < h < 7200[m] \\ &= 2.0 \times 10^{-16}/h^{1/2}, & 7200 < h < 20000[m] \end{aligned} \quad (2.6)$$

$$\begin{aligned} C_n^2(h) &= 8.4 \times 10^{-15}, & 0 < h < 18.5[m] \\ &= 2.87 \times 10^{-12}/h^2, & 18.5 < h < 240[m] \\ &= 2.5 \times 10^{-16}, & 240 < h < 880[m] \\ &= 8.87 \times 10^{-7}/h^3, & 240 < h < 7200[m] \\ &= 2.0 \times 10^{-16}/h^{1/2}, & 7200 < h < 20000[m] \end{aligned} \quad (2.7)$$

Hufnagel-Valley モデルにおける  $C_n^2(h)$  は、地上における大気の状態を用いて上空の  $C_n^2$  を推定できる関数になっており、場所による推定値の誤差がSLCモデルよりも小さい。関数型は式 (2.8)

の通りである [47].

$$C_n^2(h) = 0.0059(v/27)^2(10^{-5}h)^{10} \exp\left(-\frac{h}{1000}\right) + 2.7 \times 10^{-16} \exp\left(-\frac{h}{1500}\right) + A \exp\left(-\frac{h}{100}\right) \quad (2.8)$$

ここで、 $h$  は高度  $v$  はバフトン風速モデルによる擬似風速、 $A$  は地上における  $C_n^2$  の値である。このモデルではコリメートされたガウスビームの伝搬を仮定している。

### 2.1.2 到来角変動

大気による擾乱を受けたレーザービームが自由空間光通信装置の受信光アンテナに入射することを考える。光アンテナをレンズとみなすと図 2.3 に示す通り、大気による位相分布の擾乱の影響により波面が歪み、レンズ焦点面におけるビームスポットの位置が時間的に変動する。レンズの焦点距離とビームスポットの位置から計算できる幾何光学的な伝搬角度の傾きを到来角変動と呼ぶ。

大気擾乱が無い状態からの光波の位相差  $\Delta S$  は、光波の波数を  $k$ 、大気擾乱による光路差を  $\Delta l$  とすると

$$\Delta S = k\Delta l \quad (2.9)$$

となる。ここで、到来角変化量  $\beta_a$  が十分に小さく、 $\sin \beta_a \cong \beta_a$  だと見なせる場合には、 $W_G$  をレンズの半径として

$$\beta_a = \frac{\Delta l}{2W_G} = \frac{\Delta S}{2kW_G} \text{ [radian]} \quad (2.10)$$

が成立する。到来角変動の時間平均  $\langle \beta_a \rangle$  が 0 になると仮定すれば、その分散は

$$\langle \beta_a^2 \rangle = \frac{\langle (\Delta S)^2 \rangle}{(2kW_G)^2} = \frac{D_S(2W_G, L)}{(2kW_G)^2} \quad (2.11)$$

となる。ここで  $D_S$  は位相構造関数であり、レンズの直径と大気揺らぎのモデルにおける大気の渦の大きさ  $L$  を引数に取る。  $D_S$  の詳細な定義は参考文献 [47] の Chapter6 式 (66) にある。式 (2.11) では、擾乱を受ける波面は無限に広がる平面波であることと、レンズの半径が大気の渦の最小スケールより十分に大きいという条件  $W_G \gg l_0$  を仮定する。

### 2.1.3 ビームワンダー

レーザービームを長距離に渡って大気中を伝搬させると、擾乱を受けてビームの光路が曲がったり、ビームスポット内の光強度分布が変動したりする。これをビームワンダーと呼ぶ [51]。ビームワンダーのモデルを図 2.4 に示す。図中で  $t_1$  から  $t_4$  は時間変化を表している。地表にある送信開口面からガウスビームが天頂角  $\zeta$  で一定距離離れた面まで伝搬したときの、観測面における時間的・空間的な光強度変動を考える。光強度のピークをホットスポットとよび、比較的狭い半径  $W_{ST}$  の範囲内で高速にホットスポットが変動し、その狭い領域が低速に広い半径  $W_{LT}$  の範囲を

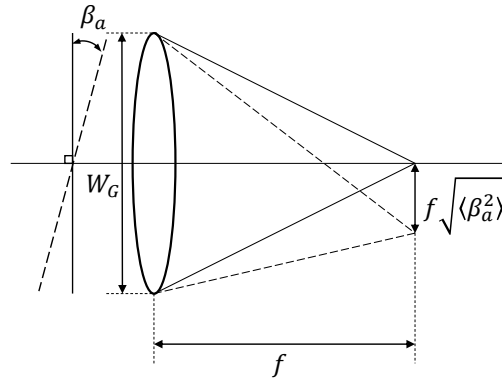


図 2.3: 到来角変動

移動する. このモデルによるホットスポットの位置の時間的な分散は, フリードパラメータ  $r_0$  を用いた式

$$\langle r_c^2 \rangle = 0.54(H - h_0)^2 \sec^2 \zeta^2 \left( \frac{\lambda}{2W_0} \right)^2 \left( \frac{2W_0}{r_0} \right)^{5/3} \left[ 1 - \left( \frac{\kappa_0^2 W_0^2}{1 + \kappa_0^2 W_0^2} \right)^{1/6} \right] \quad (2.12)$$

によって計算できる. この式で,  $H$  は観測面の高度,  $h$  は送信開口面の高度,  $W_0$  は送信開口の半径である.

フリードパラメータ  $r_0$  は, 大気のコヒーレンス長 (atmospheric coherence width) とも呼ばれ,

$$r_0 = 2.1\rho_0 \quad (2.13)$$

で定義される.  $\rho_0$  は, その大きさが大気のコヒーレンス長  $l_0$  より十分に大きくかつ最大スケール  $L_0$  より十分に小さい場合には

$$\rho_0 \equiv (1.46C_n^2 k^2 L)^{-3/5} \quad (2.14)$$

である.

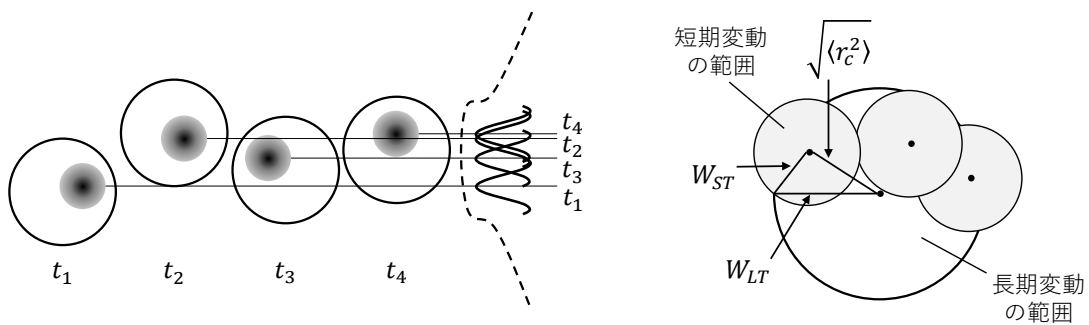


図 2.4: ビームワンダーのモデル

## 2.1.4 シンチレーション

シンチレーションとは、大気中を伝搬した光波を特定の点で観測した際に光強度が時間的に変動する現象である。自由空間光通信システムにとってシンチレーションは通信光の強度変調に対するノイズとなり、通信リンクのシグナル-ノイズ比 (Signal Noise Rate :SNR) を劣化させる要因であるため、その程度を知ることは重要である。シンチレーションによる光強度の変動の程度を表すパラメータが定義されており、それをシンチレーションインデックスと呼ぶ。シンチレーションインデックスはシンチレーションによる光強度の変動を測定した値から計算でき、大気の揺らぎの程度を表すパラメータとして繁用されている [52,53]。シンチレーションインデックスの測定は理想的には点光源から放たれた光を面積 0 の受信機で計測する必要がある。観測点において測定された光強度を  $I$  とすると、シンチレーションは

$$\sigma_I^2 = \frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2} = \frac{\langle I^2 \rangle}{\langle I \rangle^2} - 1 \quad (2.15)$$

で表される [54,55]。式中でブラケット  $\langle \rangle$  は時間平均を表す。

## 2.2 自由空間光通信における通信光の擾乱を抑圧する手法に関する既往の研究

### 2.2.1 精追尾機構

自由空間光通信システムでは通信光が大気中を伝搬するため、通信光が大気の影響を受け、受信光強度の変動が発生する。光強度の変動の原因となるのは主に到来角変動やビームワンダー、シンチレーションであり、その変動の主要な周波数成分は 0Hz から 1kHz 程度までであることが知られている [14]。自由空間光通信の受信システムでは、光アンテナを粗追尾機構で指向制御しながら通信光を集光する。光アンテナは高倍率の縮小光学系であり、その倍率に応じて大気の影響による受信光の伝搬角度の変動を増幅してしまう。また、粗追尾機構の駆動精度は 0.01deg 程度であり [56]、

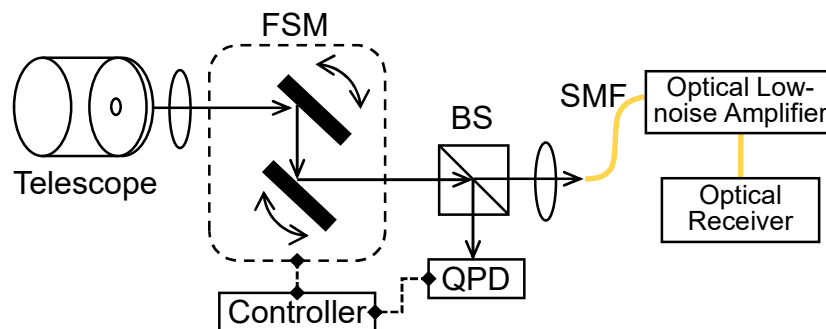


図 2.5: 精追尾機構を使った受信光学系の例



それ以下の角度の指向誤差が発生する。

こうした受信光の伝搬角度の高速な変動や指向誤差の影響を抑圧し、受信光の光強度を安定化するために、自由空間光通信装置では精追尾機構 (FPM:Fine Pointing Mechanism) が用いられている。図 2.5 に精追尾機構を使った受信光学系の構成例を示す。精追尾機構では光アンテナ (Telescope) で受信した通信光を高速駆動鏡 (Fast Steering Mirror : FSM) で反射した後に、その一部をビームスプリッタ (BS) で分けて、四分割光検出器 (Quadrant Photo Detector : QPD) に入力し受信光の輝度重心を検出する。検出した輝度重心が設計上期待される位置から乖離していた場合、高速駆動鏡の角度を変更し、QPD で検出される輝度重心の値を設計上の位置へ近づける。このフィードバック制御を高速に繰り返すことで受信光の伝搬角度を常に一定に保つ。精追尾機構で伝搬角度を補正した後、受信光は光受信器の入力光ファイバへカップリングされる。より高速な通信を行うシステムなどでは回線設計上の必要性から光受信器の前に光アンプが導入される場合がある。光アンプの入力光ファイバは多くの場合シングルモードファイバ (SMF) であり、受信光を効率よくカップリングするためにはマルチモードファイバを用いる場合よりも高い精度で伝搬角度を補正する必要がある。

精追尾機構は多くの光通信衛星に搭載され、自由空間光通信リンクの確立に必要とされている [14,56]。また、精追尾機構によって自由空間光通信の通信光をシングルモードファイバにカップリングした例としては、国立研究開発法人情報通信研究機構が行った低軌道衛星 OICETS と地上間の光通信実験が挙げられる。同実験では事前に大気擾乱を受けた通信光の SMF へのカップリング効率を予測する理論を構築し、実験結果と比較している [57,58]。これらの実験ではそれぞれ、カップリング効率 17dB、カップリング損失 10-19dB を記録し、理論と実験値の傾向が一致することを確認し精追尾機構の有用性を示している。

しかし、自由空間光通信装置の小型・簡易化の観点では精追尾機構には以下に挙げる課題がある。1つ目はシステムを構成する部品点数が多いことである。精追尾機構を構築するためには最低でもビームスプリッタ、センサー、ミラー、アクチュエータ、コントローラが必要である。人工衛星の限られた搭載容量を割いて多くの部品を組み込むことや、宇宙空間における部品や協調動作の不具合に対応するための事前試験や冗長構成が必要になり、光通信装置の簡易化に対しては阻害要因となる。2つ目はシステム中に機械的な可動部が存在することである。人工衛星は打ち上げ時に大きな振動にさらされる。よって機械的な可動部は振動によって破壊されないようロンチロックと呼ばれる機構で保護される [18]。これは精追尾機構の運用時には使用しないため打ち上げ後はデッドウェイトとなるうえに、ロンチロック自体の設計や試験が必要になり通信システムの簡易化に対して阻害要因となる。3つ目は動作速度に制限があることである。大気の大気擾乱は 1kHz 程度までの振動成分を有するのに対し、報告されている精追尾機構の動作速度は 600Hz や 800Hz [18,19] 程度でしかなく完全には追従できていない。これはセンサーで伝搬角度を検出してから対応する角度を計算し、FSM に制御指令を送り、最終的に FSM が駆動し終わるまでに時間がかかるためである。4つ目は受信光の伝搬角度を検出するために受信エネルギーの一部を消費してしまうことである。通信システムの伝送速度を向上させるためには送受信利得の向上が重要であり、精追尾機構は受信電力を減少させてしまう。また、超長距離の通信ではフォトンカウンティングによって受信信

号の検出を行う場合もあるが [59], その場合には受信光は粒子と見なせるほど少なく, 伝搬角度の検出と通信を同時に行うことはできない.

## 2.2.2 補償光学システム

補償光学システムは天文観測において, 地上の大口径望遠鏡の能力を向上させる技術として研究開発が進められてきた [30]. 地球に届く遠方の天体からの光を望遠鏡で観測する際に, 大気の影響によって観測対象の光の波面が歪み, 結像面で観測される星像の解像度が望遠鏡の回折限界よりも低くなってしまふことが天文観測における課題の一つである. この歪んでしまった波面を望遠鏡の後段に設置された内部光学系において補正し, 望遠鏡の回折限界に迫る星像分解能を実現することが天文観測における補償光学システムの目的である. 図 2.6 に補償光学システムの概要を示す. 観測対象の天体の近くに点光源と見做せる明るい恒星を用意し, これをガイドスター (GS: Guide Star) とする. 旧来は恒星を天然のガイドスター (NGS: Natural Guide Star) としていたが, 必ずしも観測対象の天体の近くにガイドスターになり得る天体が存在するとは限らないため, 現在では地上から大気中のナトリウム層へ向けてレーザー光を照射して大気中のナトリウムを励起することにより, 観測対象の天体を望遠鏡で捉えた時の視野の中に人工のガイドスター (LGS: Laser Guide Star) を作る場合も多い [30]. ガイドスターから望遠鏡開口へ届く光の波面は大気の影響によって歪む. 歪んだ波面の形状を波面センサー (WFS: Wavefront Sensor) によって検出し, ガイドスター

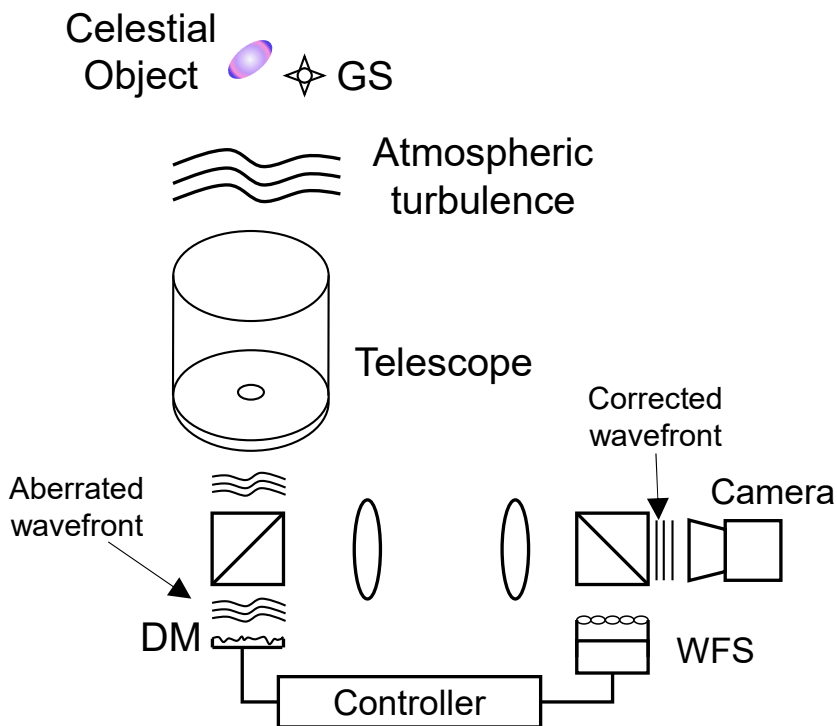


図 2.6: 補償光学システムの概要

とした点光源が理想的に結像する場合の波面と比較する．前段に設置されたデフォーマブルミラー (DM:Deformable Mirror) などの波面制御素子によって歪みを相殺するように観測対象の波面に空間的な位相変調を与える．ガイドスターを観測対象の天体の近くに位置づければ，両者から望遠鏡に届く光の多くは同一の大気を通過し，波面歪みも同等であると考えられるため，結果として観測対象の天体から届く波面の歪みを補正できる．一方で，大気の影響による波面歪みを避ける方法として宇宙空間に望遠鏡を設置する方法がある．宇宙空間には大気が存在しないため，望遠鏡の光学性能を十分に活かした観測が可能であるが，ロケットで打ち上げる都合から望遠鏡の大口径化が難しい．近年は系外惑星などの暗い天体の詳細な観測が要求されており，地上に設置される望遠鏡の大口径化が著しい．例えば，ハワイ島マウナケア山に建設中の TMT(Thirty Metere Telescope) は開口直径 30m [60]，チリに建設中の E-ELT(European Extremely Large Telescope) は開口直径 39m である [61]．望遠鏡の大口径化に伴い補償光学システムにおける波面制御素子の多要素化も進んでいる．日本の国立天文台がハワイに設置する口径 8m のすばる望遠鏡で用いられている DM の要素数が 188 であるのに対し [62]，TMT では地表面に共役な面に 3125 要素，高度 11.2km に共役な面に 4548 要素の DM が設置される [63,64]．また，E-ELT の計画では M4 と呼ばれる副鏡の一つが DM となっており，5136 の要素を有する波面制御素子として機能させることが計画されている [65]．

自由空間光通信システムにおいても，送信局から出射した通信光は大気層を貫いて受信局に到達し，望遠鏡で集光された後に SMF へ結合するためにレンズで結像される．結像した点像の解像度が高いほどシステムの性能が良くなるのは，天文観測と同じである．そこで，補償光学システムを自由空間光通信システムに適用することが検討されている [25, 28, 41, 66–69]．自由空間光通信システムの通信光のシンチレーションの低減のために補償光学システムを用いることは，遅くとも 2000 年代前半には既に検討が始まっていた [66, 70, 71]．実際に地球周回軌道上の人工衛星に搭載された自由空間光通信装置からのダウンリンクに対して補償光学システムに

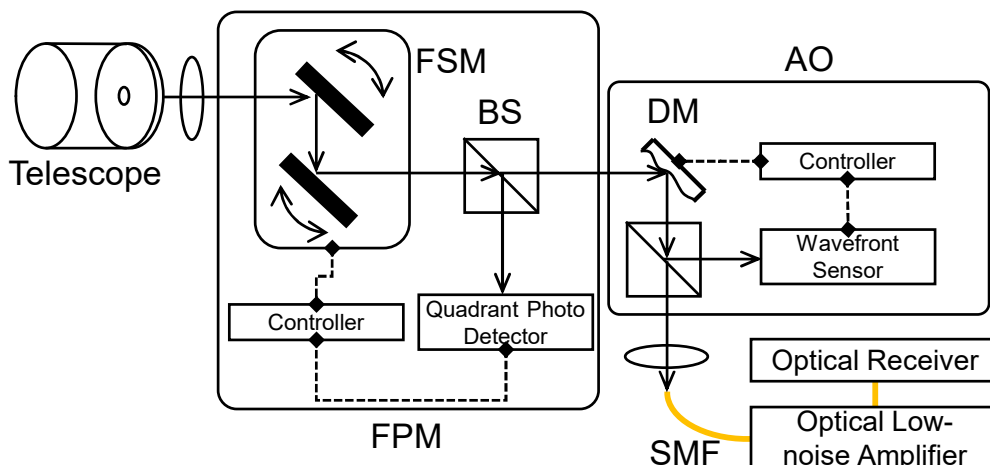


図 2.7: 補償光学システムを適用した受信光学系の例

よる波面補償を行ったのは、2015年にJPL(Jet Propulsion Laboratory)が国際宇宙ステーション (ISS:International Space Station) に搭載された自由空間光通信装置である OPALS(Optical Payload for Lasercomm Science) からのダウンリンクを光地上局で受光したデモンストレーションが最初である [28]。また同2015年にはフランスの ONERA の光地上局において、日本の NICT が打ち上げた人工衛星 SOCRATES に搭載された光通信装置 SOTA からのダウンリンクに対して補償光学システムによる波面補正が行われている [68]。ISS-JPL 間の実験では SMF への結合効率が補償光学システムによって約 16dB 改善し、ONERA-SOTA 間で行われた実験では SMF へのダウンリンク光の結合効率が、補償光学なしでは平均 0.6% だったのに対し、補償光学のフィードバック制御によって平均 8% まで向上している。また、NICT が計画中の次世代光通信装置 HICALI では、地上局での補償光学システムによって 10Gbps のダウンリンクを実現しようとしている [41]。

受信光学系の構成例を図 2.7 に示す。光アンテナ (Telescope) で集光された通信光は精追尾機構で Tip-tilt 成分の波面歪みを補正される。そして DM で反射された後に BS で分岐され、一方は波面センサーに入射、他方は結合レンズに入射して SMF へ結合される。波面センサーで検出された波面歪みに基づいて、それを相殺する位相パターンが制御装置で計算され、DM の表面形状に反映される。DM によって波面形状が補正された通信光は結合レンズによって効率よく SMF へ結合される。補償光学の観点から図 2.7 の光学系を見ると、精追尾機構は波面歪みのうち Tip-tilt の成分のみを補正する補償光学システムである。このように複数の段階に分けて波面補正を行う構成は天文観測向けの補償光学システムでは繁用されており [72]、精追尾機構専用のセンサーとコントローラを後段の補償光学システムと共通化する構成も考えられる。

## 第 3 章

# 受信光強度変動を安定するホログラフィック光学素子

本章では、大気中を伝搬するレーザー光の伝搬角度の変動によって発生する自由空間光通信システムの受信光強度の変動を抑圧するホログラフィック光学素子 (HOE:Holographic Optical Element) の設計手法, 作成手法, 作成した HOE の特性を説明する. 本研究で提案する HOE は, 同一の回折光を発生させる回折格子を角度多重記録したホログラムである. これは角度多重回折格子 (Angular Multiplexed Grating) の一種である. 角度多重回折格子は多重記録する回折光と再生照明光の関係性を工夫することで様々な応用が考えられることから, 継続的に研究されている [73–76]. 以降の節では, まず干渉縞の記録によって任意の光波を記録し再生するホログラムの基本原則を紹介する. 次に, ホログラフィック材料に記録された回折格子の回折効率を Kogelnik の結合波動方程式を用いて説明する. そして, 提案する HOE の設計, 作成及び特性の評価を行い, 提案手法の有用性と課題について議論する.

本章で回折効率の解析に用いる Kogelnik の結合波動方程式はスカラー波動方程式による 2 波の干渉の解析であり, 媒質の異方性は考慮されない [40]. 一般的に, ホログラムの記録と再生の過程を厳密に解析するには, ベクトル波動方程式を用いることが望ましい. しかし, 本論文で HOE の作成に用いる材料は異方性を持たないことから, 材料内部の光波の伝搬はスカラー波動方程式によって説明可能である. また, HOE を適用する自由空間光通信システムの受信光学系では, 受信した通信光の偏光状態を操作可能であり, 光学系の設計によって HOE の設計に際して考慮すべき偏光方向を限定できるため, HOE に入射する通信光もスカラー波動方程式で記述できる. よって, 本論文で行う HOE の設計に必要な検討は光波をスカラー量として取り扱うことにより全て実施可能であるため, 以降の解析では Kogelnik の結合波動方程式を用いる.

本研究で HOE の作成に使用する感光材料は Covestro 社の HX シリーズである [77]. 同材料の光に対する応答特性の解析は, 実際に記録した回折格子について回折効率の再生照明光の入射角度依存性を測定し, 測定結果を Kogelnik の結合波動方程式から導かれる回折効率の関数にフィッティングすることで行われている [78]. よって, この材料を用いた HOE の設計に際しては, Kogelnik の理論に基づいた議論が特に有意義である.

### 3.1 ホログラフィの原理

ホログラフィは1947年ハンガリーの物理学者 D. Gabor により、電子顕微鏡の分解能向上を目的として発明された [79]。当時、電子顕微鏡写真の空間分解能がレンズの収差によって低下することが課題となっていた。そこで Gabor は、振幅だけではなく位相も記録し、再生時に逆位相をもつレンズを通せば分解能を向上できると考えた。Gabor の提案手法では、位相を記録する手段として光の干渉を用い、干渉縞を材料に記録する。この干渉縞を記録したものがホログラムである。当時は光波の記録と再生に水銀灯の光を用いていた為に、ホログラムを再生して得られた像は不鮮明で実用的ではなかった。しかし、後に発明されたレーザー光源を利用して鮮明な像を得る手法が発表され、それ以降ホログラフィは急速に発展した [80]。ホログラムは光の振幅と位相の情報を記録するため、原理的には任意の光波場の再現が可能である。この性質はホログラムが継続して注目される理由の一つであり、その応用は多岐に渡る。応用の一つとして、物体の3次元像の記録と再生ができることは有名である。

3次元像の記録と再生を例にとって、ホログラムの概要を説明する。図 3.1 は一般的なホログラムの記録と再生の模式図である。記録時には、レーザー光源から得た光をハーフミラー等で2つに分け、一方をそのまま記録面へ導き、他方は被写体に照射され表面で反射した光が記録面に到達する。被写体からの反射光を物体光と呼び、直接記録面に到達した光を参照光と呼ぶ。記録面には感光材料が置かれ、物体光と参照光の干渉縞が感光材料に記録されてホログラムとなる。再生時には、ホログラムに参照光を照射すると記録された物体光が再生される。この時に物体光が出射する方向からホログラムを覗き込むと被写体の3次元像が見られる。

#### 3.1.1 干渉縞による光波の記録と再生

ホログラフィによる光波の記録と再生の原理について述べる。この説明は参考文献 [80, 81] を一部引用している。記録を行うには物体光と参照光を干渉させ、その干渉縞を感光材料に記録する。感光材料は照射されたエネルギーに応じて光の透過率や屈折率が変化する。この節の説明では、感

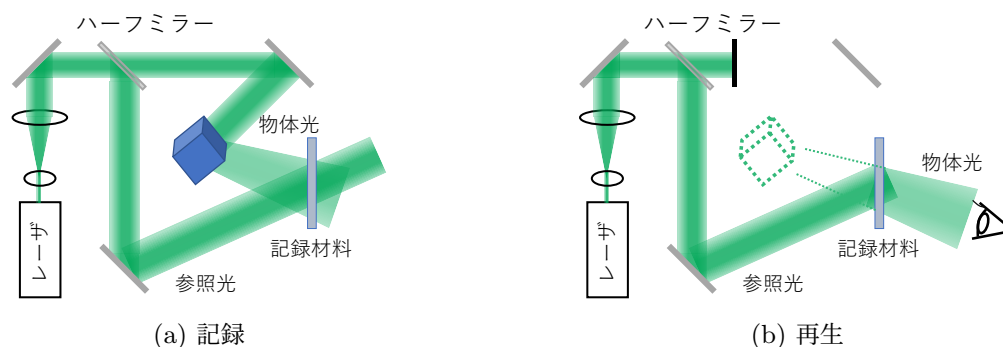


図 3.1: ホログラムの概念図

光材料は照射エネルギー量に対して線形に透過率が変化するものとする。すなわち、感光材料に記録されるホログラムの透過率の分布は材料が設置されている面における干渉縞の強度分布に比例し、ホログラムの各点における光透過率は露光時間に比例する。干渉縞の強度分布は、物体光を

$$a(x, y) = |S(x, y)| \exp(i\phi(x, y)) \quad (3.1)$$

参照光を

$$A(x, y) = |R(x, y)| \exp(i\psi(x, y)) \quad (3.2)$$

とすると、

$$I(x, y) = |a(x, y)|^2 + |A(x, y)|^2 + 2|a(x, y)||A(x, y)| \cos(\psi(x, y) - \phi(x, y)) \quad (3.3)$$

で表される参照光と物体光のコヒーレント和である。この時、記録に使う感光材料の光透過率が光強度に対して線形に応答することと、参照光の振幅  $|R(x, y)|$  が材料中の全領域において一定であることを仮定すれば、ホログラムが記録された材料中の光透過率の分布は

$$t_A(x, y) = t_b + \beta'(|a|^2 + A^*a + Aa^*) \quad (3.4)$$

となる。ここで、 $t_b$  は材料の平均透過率であり、 $\beta'$  は一定の露光時間と光強度で露光された材料の透過率である。このホログラムを再生することを考える。材料に記録された干渉縞に再生参照光  $B(x, y)$  を照射して記録した物体光を再生するとき、記録材料を透過する光は

$$B(x, y)t_A(x, y) = t_bB + \beta'aa^*B + \beta'A^*Ba^* + \beta'ABa^* = U_1 + U_2 + U_3 + U_4 \quad (3.5)$$

となる。ここで再生参照光  $B$  が記録時の参照光  $A$  と同じであれば

$$U_3 = \beta'|A|^2a(x, y) \quad (3.6)$$

であり、物体光  $a(x, y)$  に比例した光波となる。また、再生参照光に記録時の参照光の共役波  $A^*$  を使った場合には

$$U_4 = \beta'|A|^2a^*(x, y) \quad (3.7)$$

であり、物体光の共役波に比例した光波となる。また、もし仮に物体光と参照光の関係を取り替えてもこの関係が成り立つ。物体光である  $U_3$  でホログラムを照明すれば、参照光  $U_1$  が再生され、共役波に関しても同様に成立する。

## 3.2 体積型ブラッグ回折格子

3.1 節のホログラムの説明では、物体光と参照光の干渉縞が記録される材料の厚みは、近似的に 0 として扱われていた。しかし、実際にホログラム記録材料に干渉縞を記録する場合には、材料には厚みがあり、干渉縞は材料中に 3 次元的に記録される。厚みを見ることができないホログラムは体積ホログラムと呼ばれる。体積ホログラムの再生は、屈折率または透過率が空間的な分布を持つ媒質中における電磁波の伝搬現象である。よって解析には、ホログラムに対応する波動方程式の解を得る

か、厳密に測定したホログラム内部の屈折率もしくは透過率の分布データを用いて数値解析を行う必要がある。しかし、任意のホログラムに対して波動方程式の解を得ることは難しい。また、厳密な解析に耐えるホログラムの内部状態の計測には、最低でも記録に用いた波長の半分以下の空間分解能が必要であり、これも簡単ではない。そのため、体積ホログラムの解析では、任意のホログラムを無数の体積型ブラッグ回折格子の和として近似する [81]。そのような仮定を置くとき、2つの平行光によって記録された体積型ブラッグ回折格子についての解析は最も基本的な解となる。本節では、体積型ブラッグ回折格子の回折効率を解析する。回折効率の解を得た後、再生照明光の入射角度、波長、回折格子の厚み、についてそれぞれ回折効率の依存性を数値的に考察する。

### 3.2.1 ブラッグ条件

感光材料に回折格子を記録することを考える。図 3.2 は記録時の物体光、参照光、感光材料および回折格子の幾何学的関係を示している。 $z$  軸方向へ  $d$  の厚みがある感光材料が  $xy$  平面上に設置されている。この材料に参照光と物体光を、互いの進行方向が成す角を  $2\psi$  として照射する。照射される光波はいずれも波長  $\lambda$  の平行光であり、 $xz$  平面に並行に伝搬する。感光材料は光強度にตอบสนองして屈折率が変化し、干渉縞の光強度分布に応じた 3 次元屈折率分布が感光材料に記録される。図 3.2 中の記録材料として示した枠の中の周期的な黒線は干渉縞の光強度が最も高くなる面の位置を示している。この面の周期を  $\Lambda$  とし、回折格子周期と呼ぶ。干渉縞の等光強度面の角度は、物体光と参照光が互に平行光で波長が等しい場合には、常に両波動が交わる角度  $2\psi$  を二等分する角度  $\psi$  となる。この 3 次元屈折率分布を説明するために、参照光と物体光の波動をそれぞれ

$$U_r(\vec{r}) = A \exp i\vec{k}_r \cdot \vec{r} \quad (3.8)$$

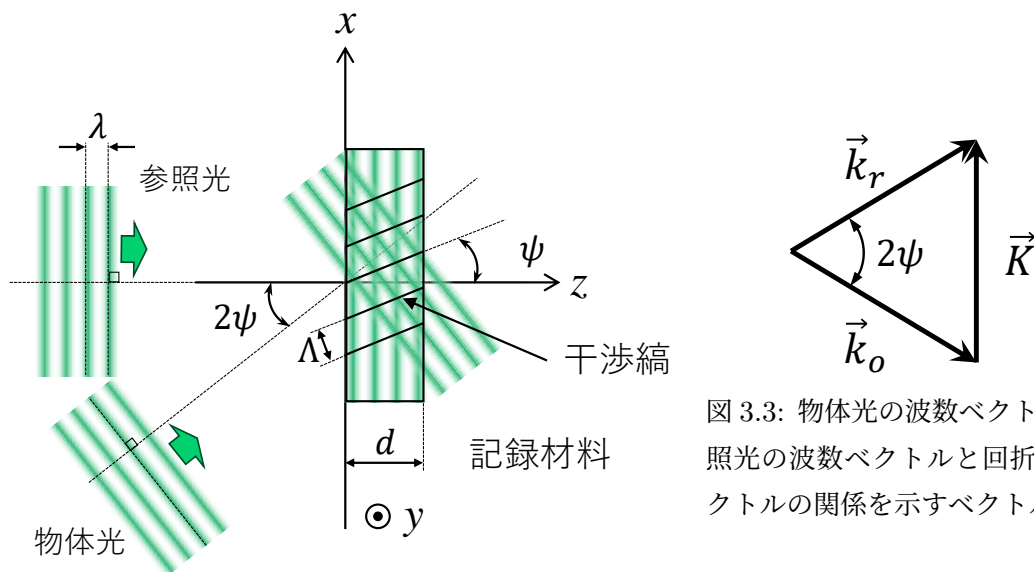


図 3.2: 体積回折格子の記録



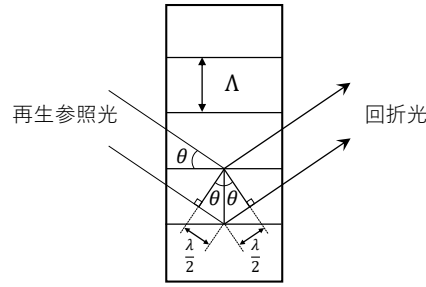


図 3.4: ブラッグ条件での回折格子の再生

$$U_o(\vec{r}) = a \exp i\vec{k}_o \cdot \vec{r} \quad (3.9)$$

と表す。ここで、 $\vec{r}$  は  $(x, y, z)$  成分からなるポインティングベクトルであり、 $\vec{k}_r$  と  $\vec{k}_o$  はそれぞれ参照光と物体光の波数ベクトルである。これら 2 つの波動の干渉によって生じる干渉縞の強度分布は

$$I(\vec{r}) = |A|^2 + |a|^2 + 2|A||a| \cos [(\vec{k}_r - \vec{k}_o) \cdot \vec{r} + \varphi] \quad (3.10)$$

となる。 $\varphi$  は物体光波動と参照光波動との位相差である。

回折格子の周期的な屈折率分布もまた波数ベクトルで表せる。屈折率分布は干渉縞の光強度分布と比例するため、物体光と参照光の波数ベクトルを用いて

$$\vec{K} = \vec{k}_r - \vec{k}_o \quad (3.11)$$

として定義できる。この  $\vec{K}$  を回折格子ベクトルと呼び、ベクトルの絶対値は干渉縞の周期が  $\Lambda$  であるときには  $\frac{2\pi}{\Lambda}$  である。この関係をベクトル図で表すと図 3.3 のようになる。

次に、上述のようにして記録された回折格子に再生参照光を照射して再生することを考える。図 3.4 に回折格子と再生参照光、回折光の関係を示す。記録時に干渉縞の光強度のピークがあった面では感光材料の屈折率が大きく変化しており、再生参照光の一部を反射する。反射されなかった光はそのまま次の反射面まで進み、そこでまた一部が反射される。このとき回折光強度を最も高めるには、隣接する面から反射された光波同士の光路差がちょうど光波長の整数倍でなければならない。その条件を満足する回折格子周期と再生参照光の波長、入射角度の関係は

$$\sin \theta = \pm \frac{\lambda}{2\Lambda} \quad (3.12)$$

で表され、これをブラッグ条件と呼ぶ。

### 3.2.2 再生時と異なる波長での回折格子の記録

回折格子の記録時に用いる参照光と物体光の光波長と、使用時に回折格子を照明する再生照明光の波長が異なる条件を考える。特定の再生照明光に対してブラッグ条件を満たす回折格子を再生時

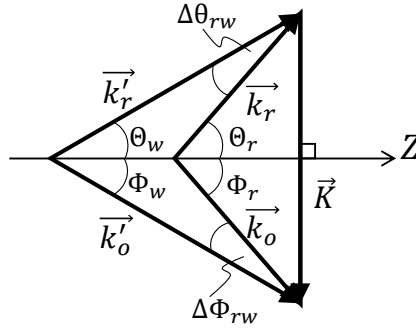


図 3.5: 記録時と再生時の波数ベクトルと回折格子ベクトルの関係

と異なる波長で記録する施策は、再生照明光の波長に対して感光しない材料の使用を可能とする。これは HOE の作成に用いる材料の選択枝を増加させるため有用である。

再生時と異なる波長で回折格子を記録するには、記録時に用いる光波の波数ベクトルが、再生時の光波の波数ベクトルと同一の回折格子ベクトルに対してブラッグ条件を満たすようにする。光波長は波数ベクトルの長さに対応するため、長さの異なる波数ベクトルが同一の回折格子ベクトルに対してブラッグ条件を満たすには、それぞれの波数ベクトルと回折格子ベクトルが成す角度を適切に選択すれば良い。図 3.5 において、再生照明光の波数ベクトル  $\vec{k}_r$  及び回折光の波数ベクトル  $\vec{k}_o$  のベクトル長と、記録時の参照光の波数ベクトル  $\vec{k}_r'$  及び物体光の波数ベクトル  $\vec{k}_o'$  のベクトル長とは互いに異なっており、同一の回折格子ベクトル  $\vec{K}$  に対してブラッグ条件を満たしている。図 3.5 中の  $Z$  軸に対して、回折格子ベクトル  $\vec{K}$  は直交しており、波数ベクトル  $\vec{k}_r, \vec{k}_o, \vec{k}_r', \vec{k}_o'$  の角度はそれぞれ、 $\theta_r, \Phi_r, \theta_w, \Phi_w$  である。また、 $\Delta\theta_{rw}$  と  $\Delta\Phi_{rw}$  は記録に用いる波数ベクトルと再生時の波数ベクトルの角度の差であり、図 3.5 から

$$\Delta\theta_{rw} = \Delta\Phi_{rw} = \arccos\left(\frac{|\vec{K}|}{2|\vec{k}_r|}\right) - \arccos\left(\frac{|\vec{K}|}{2|\vec{k}_r'}|\right) \quad (3.13)$$

である。

### 3.2.3 Kogelnik の結合波動方程式

体積ホログラムに再生参照光を照射して回折光が生起される過程を厳密に理解するには、回折格子が記録されている材料の形状や電磁界に対する応答、回折格子の構造などを考慮した電磁波の結合波動方程式を解く必要がある [82]。干渉する光波を平行光に限定し、材料の応答を過程したいくつかのモデルについて結合波動方程式の解析解が導出されており [40, 83, 84]、Kogelnik の結合波動理論 [40] もその一つである。本節では、3.3 節で提案する HOE の理論的説明の準備として、体積型ブラッグ回折格子を再生する際の回折効率の理論式と、その導出過程で仮定されている条件について述べる。回折効率の紹介は、本論文の実験で使用する感光材料が露光で与えられたエネルギーに対して屈折率が変化する性質を持っていることから、反射型及び透過型の位相回折格子に的

を絞る.

### 仮定と解析

Kogelnik の結合波動方程式の解析では、2つの平行光を干渉させた干渉縞が材料に記録された回折格子を平行光で再生する場合を考える。図 3.6 に解析で仮定するジオメトリを示す。回折格子は  $xy$  平面に対して平行に設置されており、 $z$  軸方向へ  $d$  の厚みがある。材料の境界条件は  $z$  軸方向のみ設定されており、 $x$  軸方向へは無限に広がると仮定している。また、 $y$  軸方向への変位は無しとする。回折格子は  $xz$  面内において  $x$  軸に対して角度  $\psi$  だけ傾いている。 $\vec{K}$  は回折格子ベクトルであり  $|\vec{K}| = 2\pi/\Lambda$  である。 $\vec{\rho}$  は角度  $\theta$  で材料に入射する再生照明光の波数ベクトル、 $\vec{\sigma}$  は回折光の波数ベクトルである。

この解析ではスカラー波動方程式

$$\nabla^2 U(x, z) + k^2 U(x, z) = 0 \quad (3.14)$$

を用いる。この方程式はヘルムホルツ方程式とよばれ、時間に無関係であるため、光波が伝搬中の媒質の変化を取り扱うことはできない [81]。また、スカラー波動方程式であることから材料の等方性を仮定する。ここで、 $U(x, z)$  は複素振幅で表される光波であり、 $k$  は複素数で表される波数  $k = (2\pi/\lambda_0) + i\alpha$  である。 $\alpha$  は吸収定数、 $\lambda_0$  は真空中での波長である。回折格子の中での屈折率  $n$  と吸収定数  $\alpha$  は

$$\begin{aligned} n &= n_0 + n_1 \cos \vec{K} \cdot \vec{r} \\ \alpha &= \alpha_0 + \alpha_1 \cos \vec{K} \cdot \vec{r} \end{aligned} \quad (3.15)$$

に従って正弦波状に変化すると仮定する。 $n_0$  は平均屈折率、 $n_1$  は屈折変化量の最大値、 $\alpha_0$  は平均吸収率、 $\alpha_1$  は吸収率変化量の最大値である。

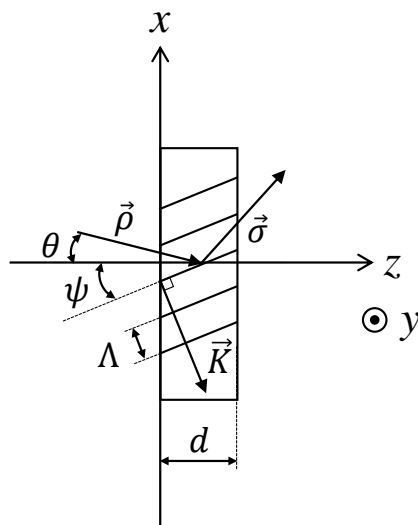


図 3.6: Kogelnik の結合波動方程式のジオメトリ

ここまで体積型ブラッグ回折格子を解析するための条件を列挙してきたが、Kogelnik の結合波動理論では式 (3.17) を式 (3.14) に代入して得られる波動方程式を解くために、更に多くの仮定が導入されている。まず、材料の厚み  $d$  は十分に大きく、回折格子内では再生照明光の波動  $U_p(\vec{r})$  と回折光の波動  $U_i(\vec{r})$  だけしか存在しないと考える。この 2 つの波動によって作られる光波場を、波数ベクトル  $\vec{\rho}$  と  $\vec{\sigma}$  を用いて

$$U(\vec{r}) = U_r(\vec{r}) + U_i(\vec{r}) \quad (3.16)$$

$$= R(z) \exp i\vec{\rho} \cdot \vec{r} + S(z) \exp i\vec{\sigma} \cdot \vec{r} \quad (3.17)$$

と記述する。ここまでの仮定では回折波の角度は与えられていないが、ここで回折波の波数ベクトルを

$$\vec{\sigma} = \vec{\rho} - \vec{K} \quad (3.18)$$

として定義し、回折波はこの式で与えられた角度へ伝搬するものとする。さらに、光波 1 波長分の距離での吸収は十分小さく、屈折率の変化は材料の平均屈折率に比較して小さく、

$$n_0 k_o \gg \alpha_0, n_1 k_o \gg \alpha_1, n_0 \gg n_1 \quad (3.19)$$

であると仮定する。  $k_o$  は真空中の波長であり、  $k_o = 2\pi\lambda_0$  である。

以上の仮定により、波動方程式 (3.14) へ代入する  $k^2$  を

$$k^2 = [k_o(n_0 + n_1 \cos \vec{K} \cdot \vec{r} + i(\alpha_0 + \alpha_1 \cos \vec{K} \cdot \vec{r}))]^2 \quad (3.20)$$

$$\approx B^2 + 2iB\alpha_0 + 4\kappa B \cos \vec{K} \cdot \vec{r} \quad (3.21)$$

として展開し、簡単化することができる。ここで  $B = k_o n_0$  である。また  $\kappa$  は結合定数と呼ばれ

$$\kappa = \frac{1}{2} (k_o n_1 + i\alpha_1) \quad (3.22)$$

と定義される。この結合定数が 0 であると、再生照明光の波動  $R$  のエネルギーは回折光の波動  $S$  に結合せず、回折光は発生しない。

式 (3.17) と式 (3.21) をスカラー波動方程式 (3.14) へ代入する。このときに式 (3.17) で干渉し合う 2 つの波動を  $z$  軸方向へ緩やかに変化する関数だとみなし、Slowly Varying Envelop Approximation によって 2 階微分の項を省略する。この波動方程式の解析によって得られる  $R(z)$  と  $S(z)$  が満たすべき条件は、

$$\begin{aligned} c_R \frac{dR}{dz} + \alpha_0 R &= i\kappa S, \\ c_S \frac{dS}{dz} + (\alpha_0 - i\vartheta) S &= i\kappa R, \end{aligned} \quad (3.23)$$

である [81]。  $c_R$  と  $c_S$  は

$$\begin{aligned} c_R &= \frac{\rho z}{B} = \cos \theta, \\ c_S &= \frac{\sigma z}{B} = \cos(\theta - 2\psi), \end{aligned} \quad (3.24)$$

と与えられる。また、 $\vartheta$ は、

$$\vartheta = \Delta\theta \cdot |\vec{K}| \sin\phi - \theta_0 - \frac{\Delta\lambda \cdot |\vec{K}|^2}{4\pi n}, \quad (3.25)$$

と定義される位相不整合パラメータであり、再生照明光の入射条件とブラッグ条件との乖離を表す。 $\theta_0$ と $\Delta\theta$ はそれぞれブラッグ条件を満たす参照光入射角とその角度からの差であり、 $\Delta\theta$ との関係式 $\theta = \theta_0 + \Delta\theta$ によって定義される。 $\Delta\lambda$ もまたブラッグ条件を満たす波長 $\lambda_0$ からの差分であり、 $\lambda = \lambda_0 + \Delta\lambda$ で定義される。 $\phi$ は $\vec{K}$ の角度である。

### 回折効率

回折効率は、回折格子に入射する再生照明光と回折格子の反対側から出射する回折光の電力の比であるので、再生照明光の波動 $R(z)$ の振幅を1とした時、回折光の波動 $S(z)$ を用いて回折効率を

$$\eta = \frac{|c_S|}{c_r} S S^* \quad (3.26)$$

と定義する。

#### 透過型位相回折格子

透過型の位相回折格子では、解析対象の位相型回折格子はエネルギーを吸収しないものとし、 $a_0 = a_1 = 0$ を仮定する。また、回折効率の解析対象とすべき回折光は回折格子の厚み $d$ だけ伝搬した地点における $S(z)$ の光強度であるので、注目すべきは $S(d)$ でありその解は

$$S(d) = -i \sqrt{\frac{c_R}{c_S}} e^{-i\xi} \frac{\sin(\nu^2 + \xi^2)}{\sqrt{1 + \frac{\xi^2}{\nu^2}}} \quad (3.27)$$

である [40]。ここで $\xi$ と $\nu$ は、それぞれ

$$\xi = \frac{\vartheta d}{2c_s} \quad (3.28)$$

$$\nu = \frac{\pi n_1 d}{\lambda \sqrt{c_R c_s}} \quad (3.29)$$

である。式 (3.27) を式 (3.26) に代入すると、透過型位相型回折格子の回折効率

$$\eta = \frac{\sin^2(\sqrt{\nu^2 + \xi^2})}{1 + \frac{\xi^2}{\nu^2}} \quad (3.30)$$

が得られる。

#### 反射型位相回折格子

反射型の位相回折格子では、回折光は $z$ 軸に対して負の方向に発生するので、再生照明光が材料に入射するのと同じ地点における回折光の波動 $S(0)$ が解析の対象となる。解析対象の位相型回折

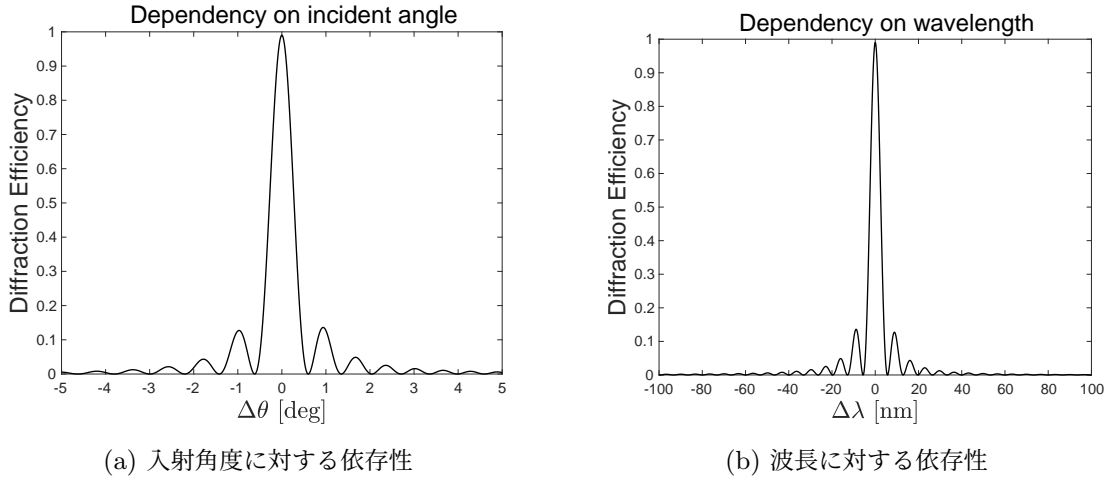


図 3.7: 透過型位相回折格子の回折効率の計算例

格子はエネルギーを吸収しないものとして  $a_0 = a_1 = 0$  を仮定すると、 $S(0)$  の解は

$$S(0) = \frac{\sqrt{\frac{c_R}{c_S}}}{\frac{\xi}{\nu} + \sqrt{1 + \frac{\xi^2}{\nu^2} \coth(\sqrt{\nu^2 + \xi^2})}} \quad (3.31)$$

である [40]. ここで  $\xi$  と  $\nu$  はそれぞれ,

$$\xi = \frac{-\vartheta d}{2c_s} \quad (3.32)$$

$$\nu = i \frac{\pi n_1 d}{\lambda \sqrt{c_R c_S}} \quad (3.33)$$

である. 式 (3.31) を式 (3.26) に代入すると、反射型位相型回折格子の回折効率は,

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{1 - \frac{\xi^2}{\nu^2}}{\sinh \sqrt{\nu^2 - \xi^2}}} \quad (3.34)$$

である.

#### 位相不整合がある条件下での回折効率

位相不整合がある場合の回折効率について考察する. 再生条件の位相不整合を定義する式 (3.25) において, 再生照明光の入射角度と波長のブラッグ条件からの変位がそれぞれ  $\Delta\theta$  と  $\Delta\lambda$  に対応する. 図 3.7 と図 3.8 にそれぞれ, 透過型と反射型の位相回折格子の回折効率の特性を示す. この計算に用いたパラメータを表 3.1 に示す. 図 3.7 と図 3.8 それぞれの (a) は  $\Delta\theta$  のみを, (b) は  $\Delta\lambda$  のみを変数としてして式 (3.30) 及び式 (3.34) を計算したグラフである. 図 3.7a において,  $\Delta\theta = 0$  での回折効率は 99%, 図 3.8a においては 87% である. 再生照明光の入射角度がブラッグ条件を

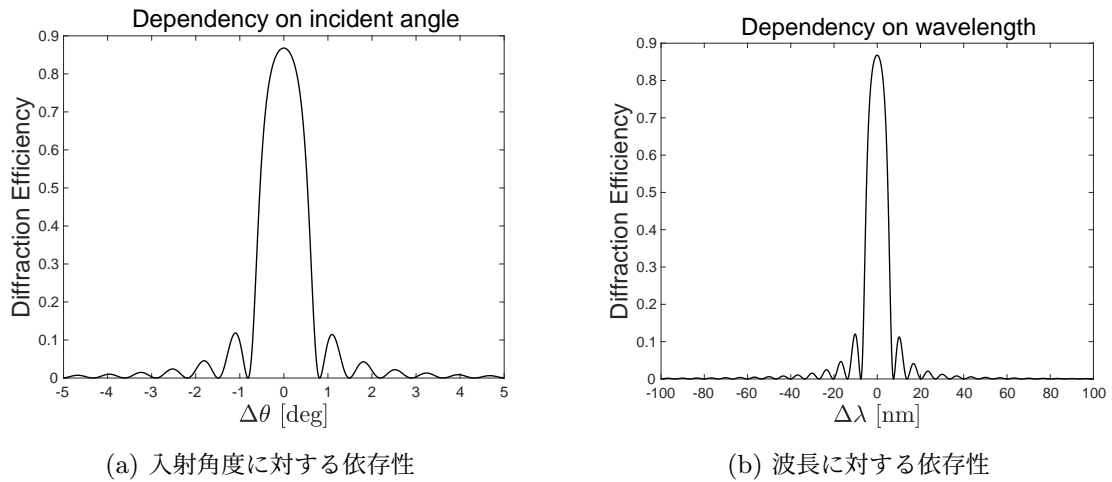


図 3.8: 反射型位相回折格子の回折効率の計算例

表 3.1: 図 3.7 と図 3.8 の計算に用いたパラメータ

パラメータ	記号	透過型	反射型
材料の平均屈折率	$n$	1.5	
屈折率変化量	$n_1$	0.01	
材料の厚み	$d$	20 $\mu$ m	
光波長 (ブラッグ条件)	$\lambda_0$	532nm	
再生照明光入射角度 (ブラッグ条件)	$\theta_0$	45deg	
回折格子ベクトルの傾き	$\psi$	0deg	90deg

満たす状態で回折効率が最大となり、ブラッグ条件から乖離するほどに回折効率が低下している。このように特定の入射角度で再生照明光を照射した時にのみ良好な回折効率を示す特徴を、回折効率の角度選択性と呼ぶ。また、図 3.7b と図 3.8b でも、 $\Delta\lambda = 0$  での回折効率はそれぞれ、99%、87% であり、再生照明光の波長がブラッグ条件から乖離するほどに回折効率が低下することが示されている。これを回折効率の波長選択性と呼ぶ。回折効率の角度選択性と波長選択性は、回折格子の厚みに依存する特性である。

### 3.3 回折格子の多重記録による受信光伝搬角度の安定化

受信した通信光の波面歪みのうち、Tip-tilt 成分の変動による通信光の伝搬角度変動を抑圧する HOE として、回折格子を多重記録したホログラムに着目する。レーザー光の伝搬角度を安定化するという光学的機能を体積型ホログラムの特性として改めて表現すると、実現したい HOE は、再生照明光の入射角度に依らず特定の角度へ伝搬する回折光の光強度が変化しない特性、を持った HOE である。本節では Kogelnik の理論に基づいて、回折格子を角度多重記録したホログラムの回折効率の特性を検討し、HOE の設計モデルを提案した後、通信光の波長と異なる波長の光で HOE を記録する手法を述べる。

提案する HOE を適用した自由空間光通信装置の概念図を図 3.9 に示す。提案する HOE は精追尾機構の機能を代替することである。本研究では、受信した通信光の伝搬角度の変動を単一の HOE のみで補正し、当該の機能を完全に受動的な素子のみで構成することを目指す。

#### 3.3.1 回折格子を角度多重記録した HOE

回折格子を角度多重記録したホログラムの回折効率の角度選択性について考える。3.2 節で述べたように、任意のホログラムは無数の回折格子ベクトルの組み合わせと見做せる。よって、ホログ

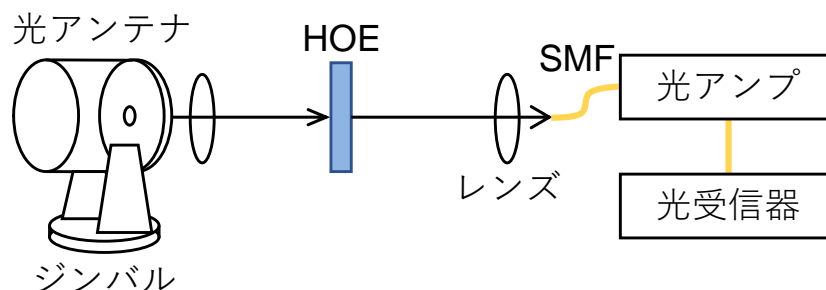


図 3.9: HOE によって精追尾機構が代替された受信光学系

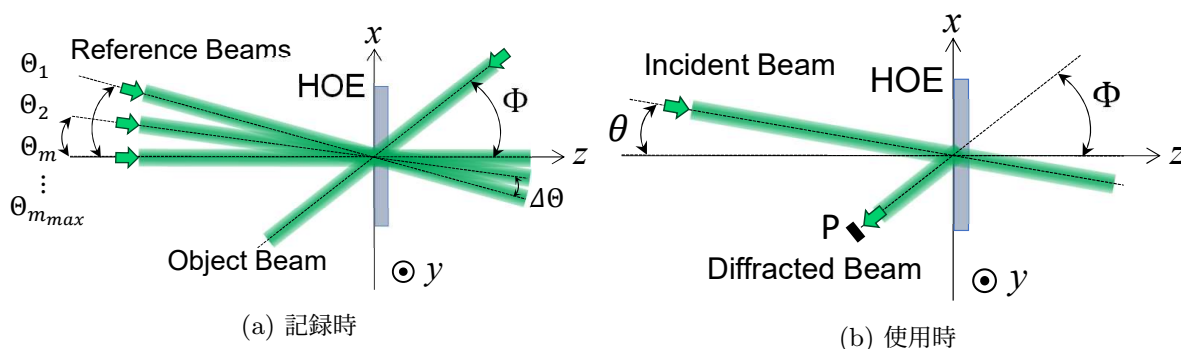


図 3.10: 受信光の伝搬角度を安定化する HOE



ラムの回折効率を構成する全ての回折格子の回折効率の和である。ここで、自由空間光通信システムの受信光学系における通信光の伝搬角度変動を抑圧するため、以下のような HOE を提案する。

まず、複数の回折格子ベクトルを選んでホログラムを構成することを考える。選ぶ回折格子は全て同一の光波 (回折光) に再生照明光のエネルギーを結合するものとし、それぞれに異なった再生照明光の入射角度でブラッグ条件を満たすものとする。3.2.3 節で解析した体積型回折格子の回折効率の角度選択性を考慮すると、特定の回折格子ベクトルの回折効率は再生照明光の入射角度に依存するため、入射角度がその回折格子のブラッグ条件から乖離するほどに回折光の光強度は低下するはずである。そこで、回折効率の角度選択性のピークが重なり合うように回折格子ベクトルを選ぶと、ホログラム全体としての回折効率の角度選択性は幅広いピークを持つことになる。このホログラムは角度多重回折格子 (Angular Multiplexed Grating) の一種であり、多重記録された全ての回折格子が同一の回折光を発生させることが他の角度多重回折格子と比べた時の特徴である。

提案した HOE の記録時と、再生時のアライメントを図 3.10 に示す。図 3.10 には代表して反射型の HOE が描かれているが、提案手法は透過型 HOE としても実装可能である。透過型の場合には記録時の物体光および再生時の回折光の伝搬方向が、反射型の場合と逆方向になる。図 3.10a では 3 つの回折格子を角度多重記録する例を示している。異なる再生照明光の入射角度で同一の光波に対してブラッグ条件を満たすように回折格子を多重記録するため、複数の参照光に対して共通の物体光を干渉させる。 $\Theta_1, \Theta_2, \Theta_m \dots \Theta_{m_{max}}$  は、多重記録するそれぞれの回折格子に対応する参照光の入射角度であり、添字の  $m$  は回折格子の番号、 $m_{max}$  は多重記録される回折格子の数、 $\Delta\theta = \Theta_m - \Theta_{m\pm 1}$  である。また、 $\Phi$  は物体光の入射角度である。図 3.10b における Incident Beam は自由空間光通信装置の受信光学系における通信光であり、角度  $\theta$  で HOE へ入射している。この入射角度  $\theta$  が大気の影響によって変動する。点 P は角度  $\Phi$  で伝搬する回折光の光軸上に位置しており、自由空間光通信装置の低ノイズアンプの入力である SMF の端面が固定されている位置を示している。提案する HOE で実現する機能は、 $\theta$  によらず点 P で SMF へ結合する光強度が安定する機能である。

回折格子を多重記録したホログラムの回折効率を考察するため、感光材料の屈折率が等方であること、記録時の屈折率変化の光強度への応答が線形であり、露光された光波のエネルギーの総量が材料の屈折率変化のダイナミックレンジ以下に収まっていることを仮定する。ホログラムに入射する再生照明光の光強度を  $I_R$ 、回折光の光強度を  $I_S$  とする。多重記録された回折格子の回折効率の角度選択性を  $\eta_m(\theta)$  とおくと、ホログラムの回折光強度の再生照明光の入射角度に対する依存性は

$$I_S(\Delta\theta_m) = I_R \sum_{m=1}^{m_{max}} \eta_m(\Delta\theta_m) \quad (3.35)$$

と定義できる。 $\eta_m(\Delta\theta_m)$  は Kogelnik の結合波動方程式によって解析された体積型回折格子の回折効率の角度選択性であり、透過型の場合は式 (3.30) を、反射型の場合は式 (3.34) を適用する。式 (3.35) を用いて計算した図 3.10 の HOE の回折効率の角度選択性のグラフを図 3.11 に示す。破線が多重記録されたそれぞれの回折格子の回折光強度であり、太線が式 (3.35) で表されるホログ

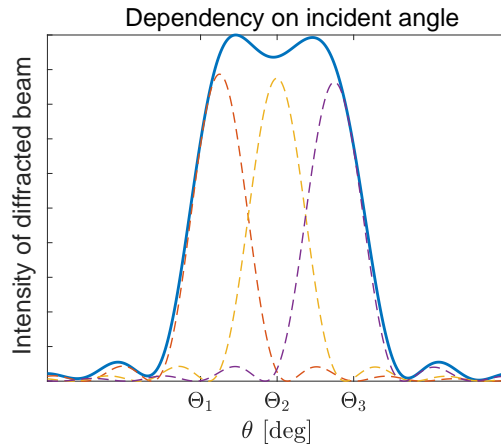


図 3.11: 伝搬角度を安定化する HOE の回折光強度の参照光入射角に対する依存性

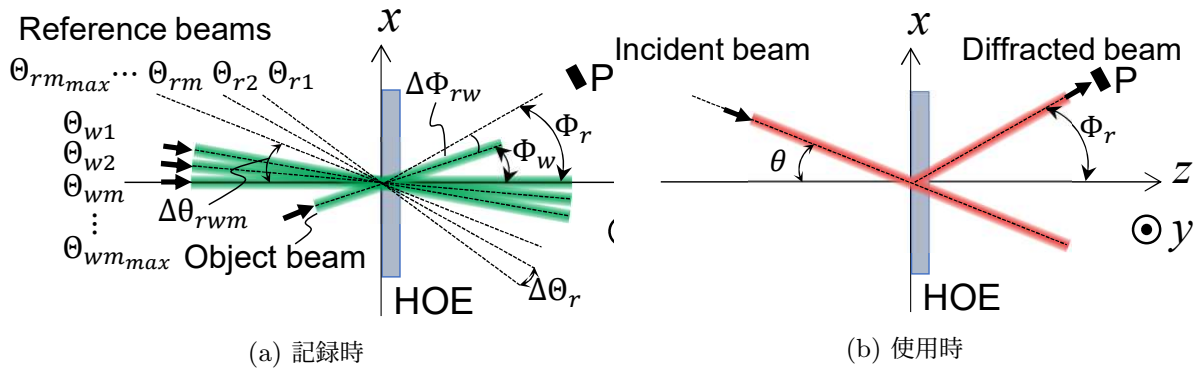


図 3.12: 記録時と使用時で異なる波長を用いる HOE のジオメトリ

ラムの回折光強度である。提案する HOE では、多重記録されたそれぞれの回折格子から回折される光波が全て同一であるため、図 3.10b における点 P で SMF へ結合する光強度は式 (3.35) に従い、図 3.11 に例示するような特性となる。一定の角度選択性を持った回折格子を、回折効率の和が一定値を下回らないように多重記録することで、点 P における回折光強度が参照光入射角の変動によらず一定値を上回るような角度範囲を確保できる。

### 3.3.2 通信光と波長が異なる光波での HOE の記録

設計した HOE を作成する最も直接的な手法は、HOE を使用する際に用いる光波と同じ波長の光波で干渉縞を作り、その強度分布を感光材料に記録することである。しかし、感光材料の特性を考慮すると、HOE を適用する光学システムで用いられている波長で感光し、記録したホログラムの安定性や、力学的な強度、耐候性、入手性などの特徴が HOE を適用する対象のシステムにとって適切な材料が必ず存在するとは限らない。そこで、HOE の材料選定の選択肢を拡げるため、材

料が感光しない波長帯で用いる HOE の作成方法を示す事は有意義である。

自由空間光通信システムで通信に用いられる光の波長は、低ノイズ光アンプの入手性の観点から、地上の光ファイバを用いた通信方式と同様に近赤外の波長帯が選択される。一方で、本研究で実験に用いる感光材料である Bayfol HX シリーズが感光する波長帯は、可視光帯に限定されている [85]。近赤外の波長帯で用いる HOE を可視光帯の光波で作成するためには、3.2.2 節の記述の通りに式 (3.13) を用いて、参照光と物体光の入射角度を調整する必要がある。

図 3.12 に、再生時と異なる波長で回折格子を角度多重記録する際のジオメトリを示す。 $\Delta\theta_{rwm}$  は材料に対する再生照明光の入射角度  $\Theta_{rm}$  と参照光の入射角度  $\Theta_{wm}$  の差であり、 $\Delta\Phi_{rw}$  は材料に対する再生照明光の入射角度  $\Phi_r$  と参照光の入射角度  $\Phi_w$  の差である。添字の  $m$  は多重記録される回折格子の番号を表し、 $m = 1, 2, 3 \dots m_{max}$  である。点 P は受信器の入力となる SMF の端面が設置される位置を示している。HOE の設計に際しては、まず再生時の角度  $\Theta_{rm}$  と  $\Phi_r$  を設定する。ここで、HOE に角度多重記録される回折格子ベクトルを  $\vec{K}_m$  とすると、記録時の角度  $\Theta_{wm}$  と  $\Phi_w$  を (3.13) で得られる  $\Delta\theta_{rwm}$  および  $\Delta\Phi_{rw}$  を用いて算出する。

## 3.4 HOE の試作と評価

本節では、前節で提案した手法の成立性と有用性を確認する実験を行う。まず HOE の作成に用いる材料と光学系について説明する。次に、提案した HOE が精追尾機構を代替し得ることを確認するために、大気によって伝搬角度が変動する受信光と空間光通信の受信光学系を模擬する評価光学系を構築しその光学系に合わせた仕様の HOE を試作し評価する。最後に実験結果を示して考察を行う。

HOE の設計は反射型と透過型に大別される。3.2 節での解析の通り、体積型回折格子の回折効率の角度選択性は反射型と透過型でそれぞれに異なる。そこで反射型の HOE と透過型の HOE を評価して、提案する HOE がそれぞれのタイプとして作成可能であることを示す。また、感光材料が感度を持たない波長で HOE を使用する状況を想定して、本実験で用いる材料が感度を持たない通信波長帯で照明した際に適切に機能するように HOE を設計する手法を示し、同様に評価する。

### 3.4.1 記録に用いる感光材料

本論文ではフォトポリマーを感光材料として用いる。フォトポリマーは基剤の中に混ぜられたモノマーが感光反応によって重合してポリマーとなり屈折率が変化することで、材料中の屈折率分布として位相型のホログラムを記録する有機材料がフォトポリマーである [86]。フォトポリマーは干渉縞によって書き込まれた屈折率分布が比較的良く固定化されるため、書き込みの光波を切った後の回折特性の劣化が少ない。また、ホログラフィックメモリーやフルカラーホログラム、また HOE の作成に用いる感光材料として研究開発が活発に行われているため [78, 85–87]、入手性が比較的が良いのが特徴である。

図 3.13 に HOE の作成に用いた材料の構造を示す。記録材料は Covestro 社のフォトポリマー、Bayfol HX シリーズである [77]。当該の材料フィルムは厚さ 16 $\mu\text{m}$  のフォトポリマー材料が、厚さ 60 $\mu\text{m}$  の基板フィルムと、厚さ 40 $\mu\text{m}$  のカバーフィルムに挟まれた構造をしている。基板フィルムは表面が粘着質で、ガラスなど他の材料に貼り付けやすくなっている。実験ではこの材料フィルムを 40mm  $\times$  40mm の大きさに手作業で切り出し、大きさ 50mm  $\times$  50mm で厚さ 3mm の光学ガラス基板 (BK-7) に貼り付けて使用した。この材料が感光し屈折率が変化する波長帯は可視光帯であり、通信波長帯である近赤外線では感光しない。よって通信波長帯で機能する HOE を作成するには、記録波長と再生照明光の波長が異なる状態を考慮した記録方法をとる必要がある。

### 3.4.2 HOE の記録

#### 記録光学系

HOE を作成するために、干渉縞を感光材料に記録する光学系を構築する。本実験ではホログラムの参照光として微小に角度の異なる平面波を複数使用する。参照光同士が成す角度が小さく、通常の鏡を使って参照光側の光学系を構築しようとする、素子同士の配置の干渉の問題や、参照

光と物体光の光路長を調整が難しくなる問題などが発生し、実験の自由度が制限される。そこで、SLM(空間光変調器:Spatial Light Modulator)を用いて参照光の伝搬角度を変調する。図 3.14 と図 3.15 に反射型と透過型それぞれの HOE を記録する光学系を示す。レーザー光源は波長 532nm で出力 1.5W の半導体レーザーであり、紙面に対して平行な直線偏光のレーザー光を出射する。出射したレーザー光は対物レンズとピンホール、コリメートレンズで構成される光学系で平行なガウスビームとなる。コリメートされた光は、ビームスプリッター (BS) によってパワー比 1:1 で 2 分割され、一方は物体光となり鏡 M1 へ向かい他方は SLM で位相変調を受け参照光となる。SLM の諸元は表 3.2 の通りである。参照光は再び BS で分割され、反射された方の光が鏡 M2 で縮小光学系へ導かれる。縮小光学系は 2 度 BS を通過したことで減衰した参照光のパワー密度を向上すると同時に、SLM の画素ピッチによる最大回折角の制限を緩和する目的で設置されており、光束径を 0.5 倍に縮小し、パワー密度を 4 倍に、最大回折角を約 2 倍に拡大している。また、縮小光学

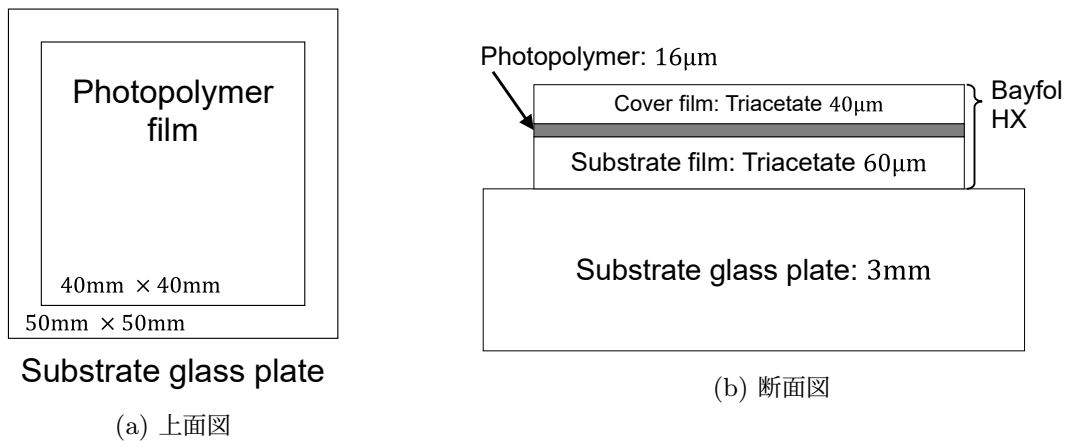


図 3.13: HOE を記録する材料の構造

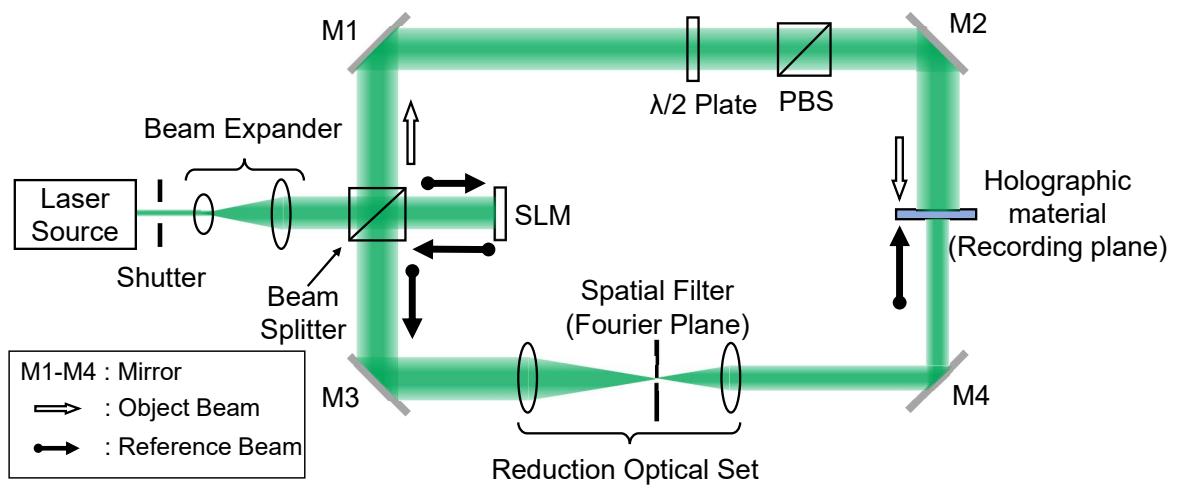


図 3.14: 反射型 HOE 用の記録光学系

表 3.2: 使用した SLM の諸元

パラメータ	記号	値
変調方式		位相型 LCOS
最大位相変調量		$2\pi$ @532nm
位相変調の階調		8bit(256steps)
有効面積のサイズ		15.36mm × 8.64mm
画素ピッチ	$p$	$8\mu\text{m}$
解像度		1920 × 1080

系のフーリエ面には空間周波数フィルタが設置されており、SLM での変調によって生じた共役光などの記録に不要な光を除去する。縮小光学系を透過した光は鏡 M3 で反射され記録面へ到達し、物体光との干渉縞を材料に記録する。記録面は縮小光学系において SLM の表面と共役な関係にあり、SLM で参照光に与えた位相分布が再現される。物体光は鏡 M1 で反射された後、半波長板と偏光ビームスプリッタ (PBS) を通過してから記録面へ導かれる。PBS は紙面に対して平行な偏光成分を記録面へ向けて反射するよう設置されており、半波長板を回転させることで物体光の光量を増減できるようになっている。物体光はその後、反射型の光学系では M2 で反射されて参照光と同一の光軸へ導かれ、参照光とは逆側から感光材料に入射する。透過型の光学系では M2 および M3 で反射され、参照光と同じ側から感光材料に入射する。

### SLM による参照光の生成

本実験では参照光の伝搬角度を位相型 SLM によって制御するため、所望の伝搬角度を得るには SLM に適切な位相パターンを表示する必要がある。実験に用いた SLM は位相型の LCOS であ

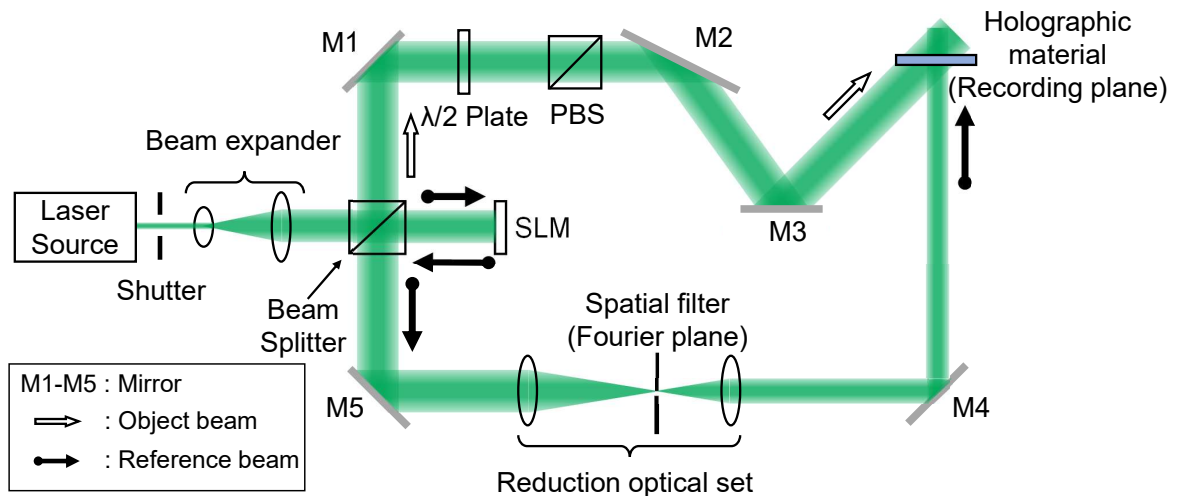


図 3.15: 透過型 HOE 用の記録光学系

り、矩形の画素が縦横に一定の間隔で整列しており、各画素に対して 0 から  $2\pi$  の位相変調を与えられる。LCOS は 2 次元の位相パターンで入射した光波の位相分布を制御できるが、説明のため、まずは 1 次元方向の位相分布の変調にのみ注目する。SLM に対して垂直にレーザー光が入射しているとき、画素同士のピッチを  $p$ 、隣り合う画素で与える位相変調の差を  $\Delta\phi$ 、とすると SLM から出射する光は伝搬角度

$$\theta = \arcsin\left(\frac{\Delta\phi\lambda}{2\pi p}\right) \quad (3.36)$$

の成分を持つ。  $\Delta\phi$  の最大値は  $\pi$  であるので、画素ピッチが  $p$  で、  $\pi$  以上の位相変調を各画素に与えられる SLM で生成できる最大の伝搬角度は

$$\theta_{max} = \arcsin\left(\frac{\lambda}{2p}\right) \quad (3.37)$$

であり、これを最大回折角と呼ぶ。 [88]. 入射する光波の位相を最大で丁度  $2\pi$  変調するように設計されている LOCS では、内部の光路長は 1 波長分になるため、LCOS に投影された位相パターンは薄いホログラムと考えられる。 よって 3.1.1 節で述べたように、LCOS で変調された光波は、所望の変調を受けた成分に加えて、その共役成分および変調を受けず直進する成分も含む。 共役成分と直進成分は所望の光波ではなく、正常な HOE の記録を妨げるため、空間フィルターで除去する。 本実験では記録光学系の中の縮小光学系のフーリエ面に片側波帯透過フィルターを設置し、記録に不要な光を除去した [89].

参照光入射角の差を用いて一つの記録材料に複数のホログラムを多重記録する場合には、記録材料へ照射する物体光と参照光を時間的に切り替えて各ホログラムを逐次的に記録する方法と、多重記録するすべての光波を合成した物体光と参照光を使って一度に記録する方法が考えられる。 本実験では使用する記録材料の時間応答特性が不明確であることや、光学定盤の振動や空気の揺らぎ等の時間的に変化する不確定要因によって干渉縞のコントラストが低下することを避けるために後者の方法で記録を行うこととした。

SLM に表示する位相分布は、図 3.10 に示した各参照光を合波した光波場の複素振幅分布から位相を抽出して得る。  $z$  軸に対して  $\Theta_m$  deg 傾いて伝搬する参照光の  $x$  軸上における複素振幅分布を

$$A \exp[i(\omega + \Gamma(x))], \quad (3.38)$$

$$\Gamma(x, \Theta_m) = \frac{2\pi x}{\lambda \sin(\Theta_m)}, \quad (3.39)$$

とすると、多重記録のための参照光の複素振幅分布  $g(x)$  は

$$g(x) = \sum_{m=1}^{m_{max}} A \exp[i(\omega + \Gamma(x, \Theta_m))] \quad (3.40)$$

で表される。 ここで  $A$  は振幅、  $\omega$  は  $x$  軸と  $z$  軸の交点における光波の位相、  $\lambda$  は光の波長である。

平行光の伝搬角度と空間周波数の関係を考えると [81], この  $g(x)$  は空間周波数スペクトラムを逆フーリエ変換することでも得られる.  $x$  軸に対する光波の空間周波数分布  $G(f_x)$  を

$$\begin{aligned} G(f_x) &= 0, & f_x &\neq \frac{1}{\lambda \sin(\Theta_m)} \\ &= A, & f_x &= \frac{1}{\lambda \sin(\Theta_m)} \end{aligned} \quad (3.41)$$

と定義すると, その逆フーリエ変換は  $g(x)$  と一致し,

$$g(x) = \mathcal{F}^{-1}(G(f_x)) \quad (3.42)$$

が成立する. この関係は 2 次元的な参照光の伝搬角度とその空間周波数分布に対しても成り立つ [81]. 本実験ではこの特性を利用し, SLM の画素で構成される実面に対応したフーリエ面において, 所望の伝搬角度に対応する点に振幅を与えて  $G$  を作成し, その逆フーリエ変換  $\mathcal{F}^{-1}(G)$  を計算して, SLM の表面上の複素振幅分布  $g$  を得た. 但し, 使用する SLM は位相のみを変調するため,  $g$  の振幅分布は SLM に入射する参照光の振幅分布と一致する必要がある. そこで, GS アルゴリズムを用いて, SLM に表示すべき位相分布を算出した. GS アルゴリズムは, 実面とフーリエ面の振幅分布もしくは位相分布に拘束条件を設定し, フーリエ変換と逆フーリエ変換を繰り返し行うことで, 拘束条件が成立するように実面とフーリエ面の複素振幅分布を最適化する手法である [90,91]. SLM に表示すべき位相分布を得るために, 実面とフーリエ面で与える拘束条件はそれぞれ, SLM 表面を照明する参照光の振幅分布の実測データ, 所望する伝搬角度に対応する点に振幅 1 を与えたフーリエ面の振幅分布, とした. この拘束条件の下に 1000 回のイタレーションを行い, 最終的に得た実面の位相分布を SLM に表示する位相パターンとした.

## 露光の設定

材料の準備, 記録光学系の構築, SLM に表示する位相パターンの算出が完了した後に, 材料に参照光と物体光の干渉縞を露光し HOE を記録する. ここでは, 露光時に必要な光学系の調整項目を挙げる.

HOE は干渉縞の強度分布に応じて材料内部の屈折率分布が変化することによって記録される. 露光エネルギーに対する屈折率の変化量は材料の化学的な特性に依存する. 本実験で使用する材料に波長 532nm のレーザー光を露光する場合, 透過型では  $30\text{mJ}/\text{cm}^2$ , 反射型では  $20\text{mJ}/\text{cm}^2$  のエネルギーを露光すると, 露光した領域の屈折率が規定の屈折変化量  $n_1 = 0.03$  だけ変化する [77]. この露光量をシャッターの開時間によって調整する. 規定の屈折変化量を得るのに必要な露光量を  $P_E$  として, 記録光学系の材料設置面における参照光の光強度 [ $\text{W}/\text{cm}^2$ ] を  $P_R$ , 物体光の光強度 [ $\text{W}/\text{cm}^2$ ] を  $P_O$  とすると, 適切な記録に必要なシャッターの開時間  $t_s[\text{second}]$  は

$$t_s = \frac{P_E}{P_R + P_O} \quad (3.43)$$

である.  $P_R$  と  $P_O$  の比は記録光学系の物体光側の光路に挿入されている半波長板の角度で調整で



きる。記録時には、干渉縞のコントラストを最も高めるために  $P_E : P_O = 1 : 1$  となるよう半波長板を設定する。

### 3.4.3 反射型 HOE の作成と評価

提案する HOE が、自由空間光通信システムの受信光学系における通信光の伝搬角度変動に起因する受信光強度の変動を抑圧する機能を有することを確認することを目的に、受信光学系を模した評価光学系を構築し、その光学系に合わせた HOE を設計、試作、評価する。本節ではまず反射型の HOE について評価を行う。

#### 評価の目的と手法

評価実験では、評価光学系の SMF へ通信光を結合するレンズの前段に設置する素子を変えて、それぞれの素子に入射する光波の伝搬角度変動に対する SMF へ結合する光強度の依存性を測定する。評価対象の素子は、単一の回折格子、回折格子を多重記録した HOE、鏡、の三種類である。単一の回折格子の評価は、HOE を設計するための予備実験と回折格子を多重記録することの効果判定するための対照実験を兼ねている。回折格子を多重記録した HOE に対する評価は、提案手法の有効性を直接確認するための実験である。鏡に対する評価は、HOE を用いない受信光学系に対して提案手法が優位に機能することを確認する対照実験である。この鏡は静止しており、通信光の伝搬角度変動による受信光強度の変動を緩和することに寄与しない。この状態は、精追尾機構のフィードバック制御が大气ゆらぎに全く追従できない状態と見做せる。

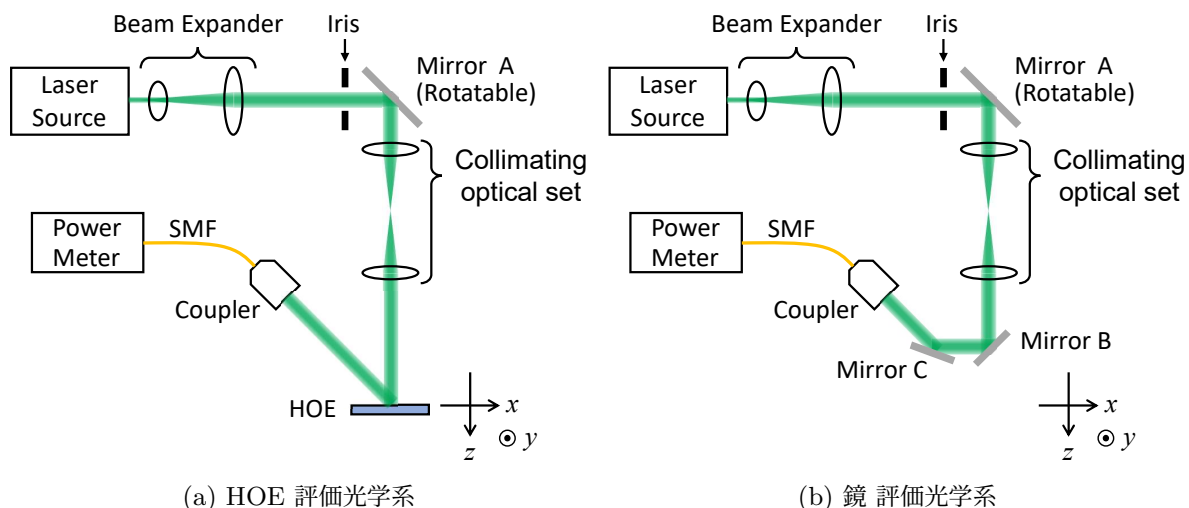


図 3.16: 反射型 HOE の評価実験用光学系の構成。業績リスト-筆頭-論文 [2] の文献より引用。Copyright (2019) The Japan Society of Applied Physics

表 3.3: 評価光学系の光学素子諸元

光学素子パラメータ	値
コリメート光学系単レンズ焦点距離	500mm
ファイバカプラー開口直径	12.5mm
ファイバカプラー焦点距離	24.91mm
ファイバカプラー NA	0.25
SMF コア直径	5 $\mu$ m
SMF NA	0.13

### 評価光学系

評価光学系の構成を図 3.16 に示す. (a) が HOE を評価するための光学系であり, (b) が対照実験として鏡の評価を行うための光学系である. どちらの光学系も HOE と鏡 B 及び鏡 C 以外の部分は共通である. レーザー光源から波長 532nm で紙面に並行な直線偏光のレーザー光が射出する. レーザー光はコリメータで並行なガウスビームへとコリメートされた後, アイリスでビーム直径が HOE の有効面積に収まるよう調節され, 鏡 A へ導かれる. 鏡 A は回転とあおりの 2 軸ジンバルにマウントされており, レーザー光の反射角をステッピングモーターで制御する. 鏡 A で反射された光はコリメート光学系と通り, HOE もしくは鏡 B と鏡 C に入射する. HOE からの回折光, もしくは鏡 C からの反射光はファイバカプラーの方向へ射出し, SMF へカップリングした光強度がパワーメーターで計測される. コリメート光学系の入射瞳を鏡 A の反射面としたときに, 対応する射出瞳が HOE 評価光学系においては HOE 設置面に, 鏡評価光学系ではファイバカプラー開口面になるよう調整されており, HOE もしくはファイバカプラー開口上でレーザー光が照射する領域は鏡 A の角度によらず変化しない. また, パワーメーターの測定はレーザー光が射出瞳を照射する角度が 0.0028deg 変わる毎に行われる. この角度幅は, コリメート光学系の焦点距離と鏡 A の最小駆動角度で規定されている. 各部光学素子の詳細を表 3.3 に示す.

この評価光学系は空間光通信装置の受信光学系を模擬しており, コリメートされたガウスビームは通信光に, 鏡 A による反射角の変化は大気擾乱による伝搬角度変動に相当する. コリメート光学系は受信光アンテナを模擬しており, HOE や精追尾機構を通った光を受光するファイバカプラーはちょうど光アンテナの瞳に設置されている状況を想定している. そして, SMF からパワーメーターは光受信器に当たる部分である.

### HOE の設計

提案する HOE の, 受信光のコニカルな角度変動による SMF への結合効率の変動を HOE で安定化できることを確認するために, 方位角方向と仰角方向に参照光入射角度が設定された  $m_{max} = 5$  の HOE A を試作する. また, 多重記録する回折格子の参照光入射角度の差  $\Delta\theta$  の決定と, 多重記録の効果を確認するために, 単一の回折格子を記録した HOE B を試作する.

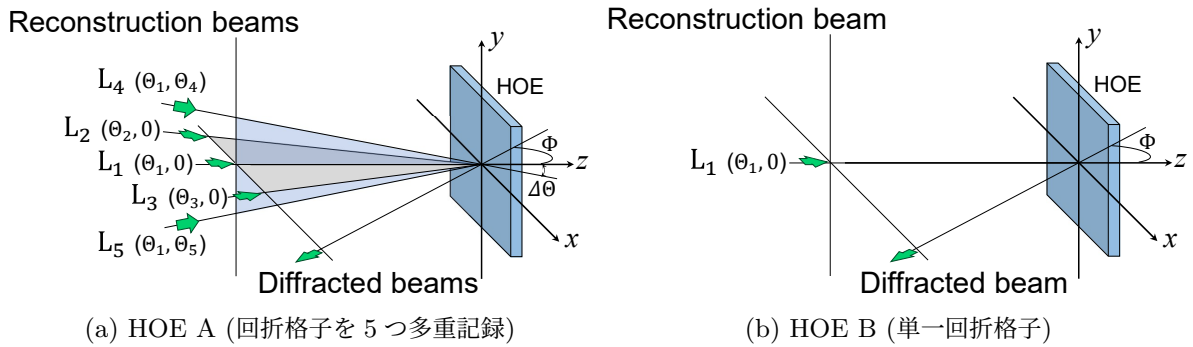


図 3.17: 反射型 HOE の設計. 業績リスト-筆頭論文 [2] の文献より引用. Copyright (2019) The Japan Society of Applied Physics

図 3.17a に HOE A の, 図 3.17b に HOE B についての, 再生時 (使用時) の再生照明光の入射角度と回折光の出射角度を示す. 図 3.17a 中で  $L_1$  から  $L_5$  までの記号で示されているのは, 多重記録されるそれぞれの回折格子に対応する再生照明光の入射角度である.  $L_1$  から  $L_3$  は  $x-z$  平面内で  $z$  軸に対してそれぞれ  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  の角度を持つ.  $L_4$  と  $L_5$  は  $x-z$  平面に対してそれぞれ  $\theta_4$  および  $\theta_5$  の角度,  $y-z$  平面に対しては共通して  $\theta_2$  の角度を持って記録材料に入射している.  $\Delta\theta$  は隣り合う参照光の入射角度の差であり, 図中では代表して  $L_2$  と  $L_1, L_3$  と  $L_1$  に対応する  $x-z$  平面内の角度のみ描かれているが,  $L_4$  と  $L_5$  の  $L_1$  に対する角度も  $\Delta\theta$  に等しい. また, 物体光は  $x-z$  平面内で  $z$  軸に対して  $\Phi$  の角度で材料に入射している.

表 3.4 に HOE A と HOE B の設計値を示す. ここで, 記録に用いる光波長を  $\lambda_w$ , HOE の使用時に用いる波長を  $\lambda_r$  と定義している. また,  $\Delta\theta$  の値は, HOE A の設計前に HOE B を作成し, 回折光の SMF への結合効率の再生照明光入射角度に対する依存性のプロファイルを取得して, そのピークの半値全幅としている.  $\Delta\theta$  の決定に用いた HOE B の評価結果は, HOE A 及び鏡に対する評価の結果と合わせて次節で提示する.

## 実験結果

実験結果を図 3.18 に示す. (a) が HOE A, (b) が HOE B, 及び (c) が鏡についての評価結果を示している. 各グラフについて, 横軸と縦軸は HOE または鏡に入射したレーザー光の入射角度であり, 疑似色は SMF へ結合した光強度をそれぞれ最大値で正規化した値を示している. 測定時に HOE または鏡へ照射したレーザー光のパワーは  $350\mu\text{W}$  であり, SMF へカップリングした光強度の最大値はそれぞれ,  $1.65\mu\text{W}$ ,  $7.05\mu\text{W}$ ,  $247.87\mu\text{W}$  であった. また, HOE A および HOE B の回折効率の最大値はそれぞれ 28.3%, 27.4% であった.

## 考察

本実験では, SMF へ結合する光強度の入射角度依存性の緩和に注目している. そこで, SMF へカップリングされた光強度の入射角依存性を HOE と鏡とで比較するための指標として, それぞれ

の光学素子を使って SMF ヘカップリングされた光強度の最大値の 10% 以上を維持する角度幅 (以降, 10% 角度幅) に着目する. これは, 自由空間光通信装置の受信光学系において SMF ヘ結合された通信光が光アンプで増幅されることを仮定しており, 一般的な光アンプの入力として許容される光強度変動のダイナミックレンジがおよそ 15dB 程度であることに由来する. 受信した通信光の伝搬角度変動が 10% 角度幅の範囲内であれば, HOE によって SMF ヘカップリングされた通信光が光アンプで適切に増幅されると考える.

表 3.5 と表 3.6 に本実験の評価結果をまとめる. まず回折格子の多重記録による 10% 角度幅の拡大に着目する. HOE A の  $\Delta\theta$  は HOE B の参照光入射角依存性の分布の半値幅であることを考慮すると, HOE A の同半値幅はその HOE B の 2 倍となると予測され, 10% 角度幅もそれに従うと考えることができる. しかし, 評価結果によると HOE A の 10% 角度幅は  $x, y$  軸方向それぞれ HOE B の 0.9 倍及び 1.375 倍であり, 設計の意図から乖離した結果となっている. 考察を行うために, SMF ヘカップリングされた光強度の最大値の 2% 以上を維持する角度幅 (2% 角度幅) に着目する. HOE A の 2% 角度幅は  $x, y$  軸方向それぞれ 0.17deg, 0.15deg であり, HOE B の 2% 角度幅は  $x, y$  軸方向それぞれ 0.13deg, 0.1deg であった. HOE B に対する HOE A の 2% 角度幅の比率は  $x, y$  軸方向に 1.3 倍及び 1.5 倍である. 2% 角度幅を踏まえると, HOE に多重記録する回折格子の数を増加させると, 特定の角度方向へ回折するエネルギーが低下することと引き換えに, より広い参照光入射角で回折光が発生していると考えられる. また, HOE A と HOE B の回折効率の最大値に着目するとそれぞれ, 28.3%, 27.4% であり, 多重記録によって HOE 全体の回折効率は大きく変化していない. これらの結果から推測される現象の一つは, 多重記録された各々の回折格子の角度選択性が十分に高くなっておらず, HOE に入射した再生照明光のエネルギーがブラッグ条件を満たさない角度へ伝搬する光波にも結合されているという状態である.

また, 鏡を用いた場合と比べると参照光のパワーに対して SMF ヘカップリングしたパワーの比率が低い原因としては, 角度選択性が低い回折格子の多重記録による影響に加え, 本来は平面波で

表 3.4: 反射型 HOE の設計値

パラメータ	HOE A	HOE B
記録波長 $\lambda_w$	532nm	
使用波長 $\lambda_r$	532nm	
$\Phi$	2deg	
$\Delta\theta$	0.0448deg	-
$\theta_1$	0deg	0deg
$\theta_2$	-0.0448deg	-
$\theta_3$	0.0448deg	-
$\theta_4$	0.0448deg	-
$\theta_5$	-0.0448deg	-

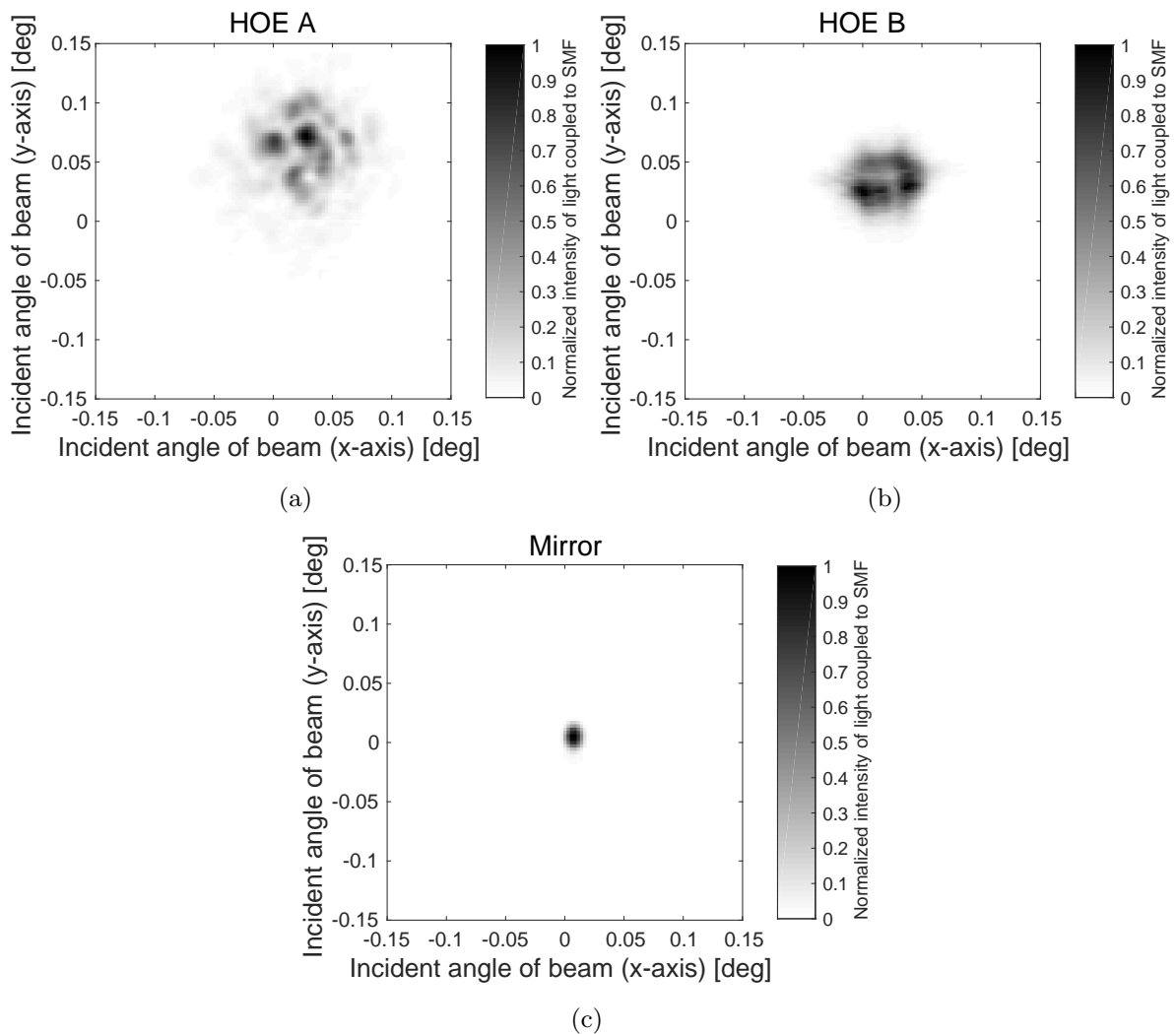


図 3.18: 反射型 HOE の評価における, SMF へカップリングした光強度の入射角依存性. 業績リスト-筆頭-論文 [2] の文献より引用. Copyright (2019) The Japan Society of Applied Physics

あるべき回折光の波面が乱れていることも考えられる.

### 3.4.4 透過型 HOE の作成と評価

前節の反射型 HOE に対する評価に続き, 透過型の HOE について評価を行う. 評価の目的と手法は前節と同じであるが, 評価光学系の構成と HOE の設計が透過型用に変更されているので, 変更点に注目して説明を行う.

表 3.5: 反射型 HOE の評価実験における各素子の 10% 角度幅 [deg]

	HOE A	HOE B	Mirror
$x$ 方向	0.09	0.1	0.02
$y$ 方向	0.11	0.08	0.03

表 3.6: 反射型 HOE の評価実験における SMF への結合効率の最大値

HOE A	HOE B	Mirror
0.47%	2%	70%

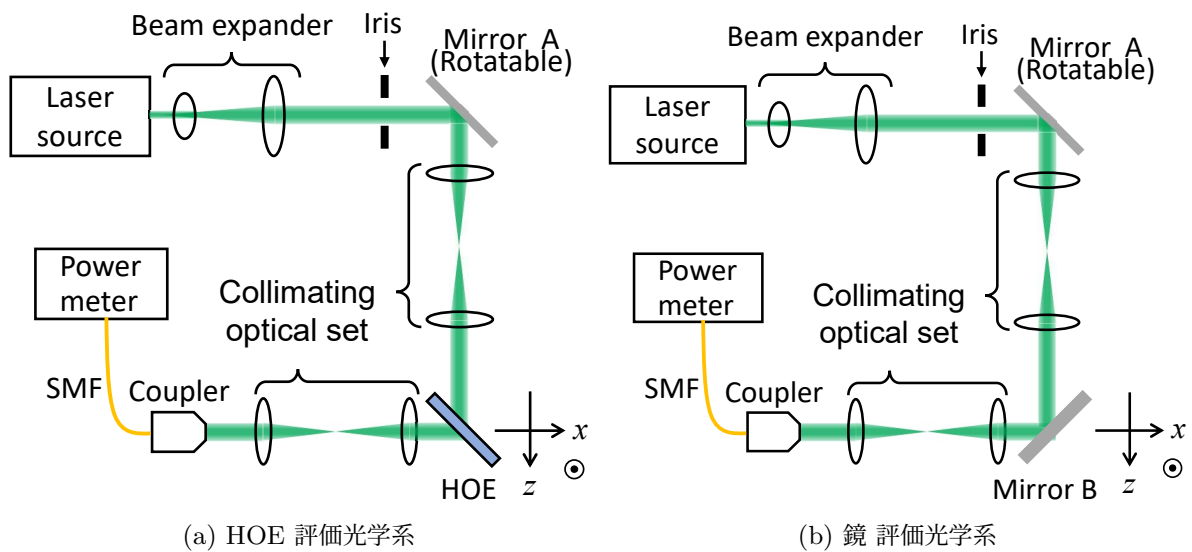


図 3.19: 透過型 HOE の評価実験用光学系の構成. 業績リスト-筆頭-論文 [1] の文献より引用.

### 評価光学系

透過型 HOE の評価に用いる光学系を図 3.19 に示す. (a) が HOE を評価する光学系であり, (b) が鏡を評価する光学系である. HOE もしくは鏡が設置されている面までの構成は, 反射型 HOE の評価に用いた光学系, 図 3.16 と同一である. 変更点は, HOE が透過型であることに対応してファイバーカプラーの設置位置を変えたこと, 鏡を評価する光学系において評価対象の鏡が 1 枚になったこと, HOE もしくは鏡が設置される面からファイバーカプラーの開口までの間にコリメート光学系が挿入されたこと, の 3 点である. 評価対象の素子を設置する面とファイバーカプラーの開口面は間に設置されたコリメート光学系の入射瞳と出射瞳に位置している. このコリメート光学系を追加した目的は, 反射型 HOE の評価結果の考察から, ブラッグ条件を満たさない角度へ回折される光波のうち, ファイバーカプラー開口面への入射位置が設計上の光軸から外れることが原因で SMF へ結合しない成分の損失を低減することである.

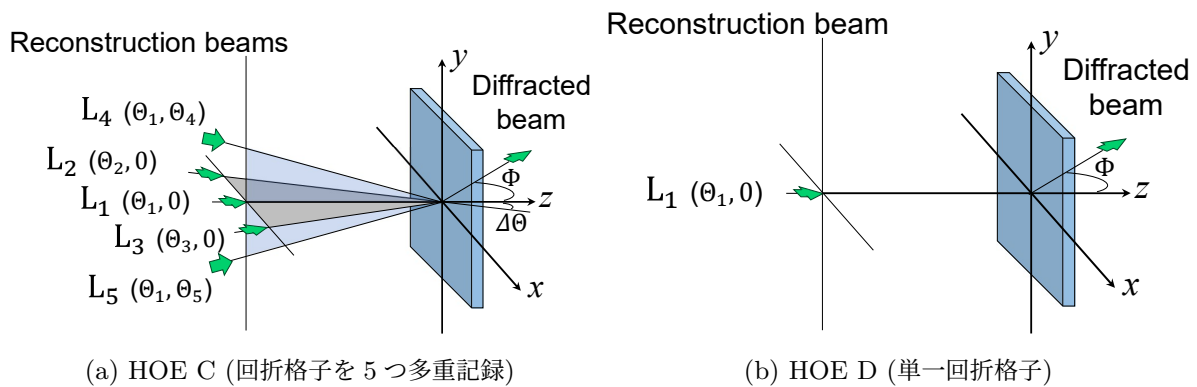


図 3.20: 透過型 HOE の設計. 業績リスト-筆頭-論文 [1] の文献より引用.

### HOE の設計

透過型 HOE の評価においても, 方位角方向と仰角方向に参照光入射角度が設定された  $m_{max} = 5$  の HOE C と, 単一の回折格子を記録した HOE D を試作する. 設計の目的は反射型 HOE の評価と同じである. 図 3.20 に試作する HOE の再生時の再生照明光と回折光の関係を示す. 図 3.20a に示すように HOE C は 5 つの回折格子が多重記録された透過型 HOE であり,  $L_1$  から  $L_5$  は多重記録された各回折格子のブラッグ条件を満たす再生照明光の入射角度を示している.  $L_1$  から  $L_5$  の成分  $\theta_1$  から  $\theta_5$  および  $\Delta\theta$  の位置関係は図 3.17 と等しい. 回折光の出射角度  $\Phi$  は  $x-z$  面内における  $z$  軸に対する角度であり, 回折光の進行方向は, 再生照明光の進行方向から見て材料を透過する方向であり, 図 3.17 とは逆方向である. また, 記録と再生に用いる光波長は共に等しく, 532nm である. HOE C と HOE D の設計値を表 3.7 に示す. ここで  $\theta_1$  と  $\Phi$  の値は共に 45deg であり, 互いが成す角度は 90deg である.  $\Delta\theta$  の値は, HOE D を先に評価して, その回折光の SMF への結合効率の再生照明光の入射角度に対する依存性のプロファイルの半値全幅を計測し, その値としている. HOE D の評価結果は HOE C 及び鏡の評価結果と共に次節で示す.

### 実験結果

実験結果を図 3.21 に示す. (a) が HOE C, (b) が HOE D, 及び (c) が鏡についての評価結果を示している. 各グラフについて, 横軸と縦軸は HOE または鏡に入射したレーザー光の入射角度であり, 疑似色は SMF へ結合した光強度とレーザーの出力の比をそれぞれ最大値で正規化した値を示している. ここで, HOE もしくは鏡に入射した光強度と SMF へ結合した光強度の比を便宜的に SMF への結合効率と呼ぶ. SMF への結合効率の最大値は HOE C, HOE D, 鏡でそれぞれ, 0.19%, 5.04%, 31.89% であった. また, HOE C および HOE D の回折効率の最大値はそれぞれ 3.5%, 34.5% であった.

表 3.7: 透過型 HOE の設計値

パラメータ	HOE C	HOE D
記録波長 $\lambda_w$	532nm	
使用波長 $\lambda_r$	532nm	
$\Phi$	45deg	
$\Delta\Theta$	0.028deg	-
$\Theta_1$	45deg	45deg
$\Theta_2$	45.028deg	-
$\Theta_3$	44.972deg	-
$\Theta_4$	0.028deg	-
$\Theta_5$	-0.028deg	-

### 考察

自由空間光通信装置の受信光学系において光アンプによって受信した通信光を増幅することを仮定し、一般的な光アンプの入力光強度のダイナミックレンジが 15dB 程度であることから、本評価実験で SMF へ結合した光強度がその最大値の 10% 以上となる角度幅 (10% 角度幅) に着目して議論を行う。表 3.8 に HOE C, HOE D, 鏡それぞれの 10% 角度幅を示す。HOE C の 10% 幅は、単一の回折格子を記録した HOE D に比べて、 $x$  軸および  $y$  軸方向にそれぞれ 1.44 倍および 1.63 倍広がっている。これは、回折格子を角度多重記録することで、設計に従って、より広い受信光の入射角度幅で SMF へ結合する光強度の変動を安定化できていることを意味する。鏡と HOE C について 10% 角度幅を比較すると、HOE C が鏡に対して  $x$  軸、 $y$  軸方向にそれぞれ 1.64 倍、3.25 倍広がっており、制御遅延の観点から HOE が精追尾機構に対して優位性があることを示唆している。

HOE C の回折効率が HOE D の 1/10 程度になっている。この原因として考えらる事項は、記録時の振動、材料のダイナミックレンジを超えるような露光条件および参照光の強度分布、材料の保存状態、などである。一方で反射型 HOE の評価実験では回折格子の多重記録による回折効率の低下は認められなかった。回折効率の向上は HOE の作成上重要な課題であるが、その手法は材料の特性に強く依存する。さらに提案手法の有効性の確認では回折効率の絶対値ではなく、その再生照明光の入射角度に対する依存性を評価対象としていることから、試作した HOE の回折効率が高くないことは本研究の成果を直接否定しないと考えられるため、ここでは追求しない。

SMF への結合効率の最大値を表 3.9 にまとめる。反射型 HOE の評価では、HOE A と HOE B の結合効率の比は 1/4 ほどであった。しかし HOE C の SMF への結合効率は HOE D の 1/26.5 ほどとなっている。この原因としてはまず HOE C の回折効率が低いことと、次に回折光の波面が歪んでいることなどが考えられる。これらの課題を除去した上で、更に結合効率を向上させるには、ブラッグ条件を満たさない角度への回折光の発生を低減させることが手段として挙げられる。



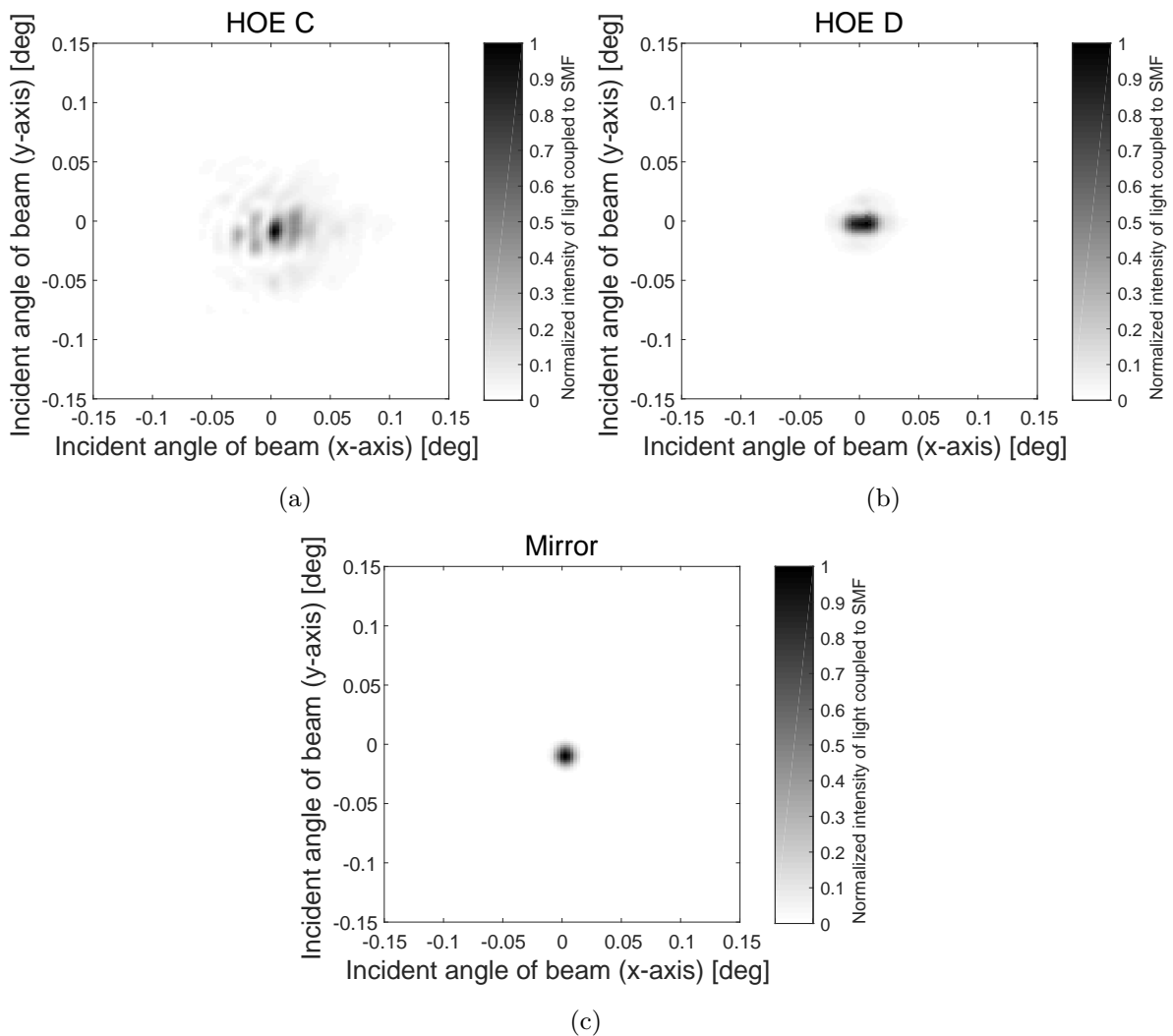


図 3.21: 透過型 HOE の評価における, SMF へカップリングした光強度の入射角依存性. 業績リスト-筆頭-論文 [1] の文献より引用.

### 3.4.5 記録波長と異なる波長で使用する HOE の作成と評価

ここまでは, 記録時の波長と同じ波長で HOE を再生するという条件下で提案手法の有効性を確認してきた. 実験の結果, 回折格子の角度多重記録した HOE によって, 通信光の伝搬角度変動による受信光強度の変動を安定化できることが示された. しかし, 本実験で用いている材料は通信波長帯の光波に対して十分な感光反応を示さず, 当該波長では記録工程を行えない. そこで, 提案する HOE が通信波長帯で機能することを確認するため, 3.3.2 節で示した手法によって通信波長帯の一つである波長 852nm の再生照明光で機能する HOE を作成し, 評価する. 記録に用いる光源は既に評価した HOE と同じ波長 532nm のレーザ光源とし, 評価には別途用意した 852nm の

表 3.8: 透過型 HOE の評価実験における各素子の 10% 角度幅 [deg]

	HOE C	HOE D	Mirror
$x$ 方向	0.064	0.042	0.039
$y$ 方向	0.073	0.045	0.022

表 3.9: 透過型 HOE の評価実験における SMF への結合効率の最大値

HOE C	HOE D	Mirror
0.19%	5.04%	31.89%

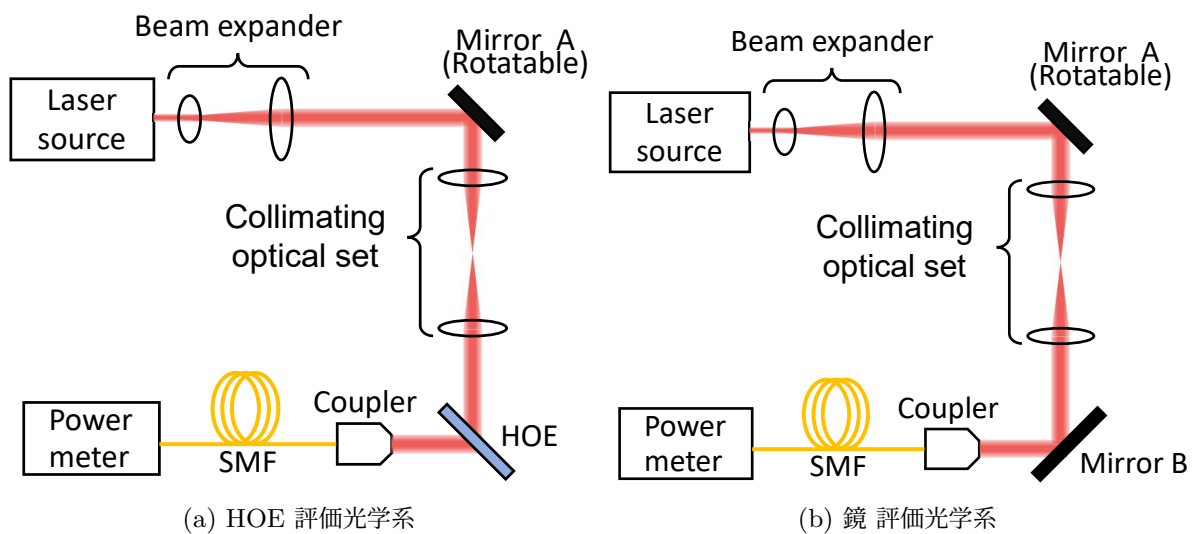


図 3.22: 通信波長帯用 HOE の評価実験用光学系の構成

レーザー光源を用いる。評価内容は前節までと同様に、回折格子の多重化の効果の確認と、鏡を相手とした対照実験を実施する。

### 評価光学系

本評価でも HOE に対する評価光学系と、鏡に対する評価光学系を用意する。評価光学系の素子の位置関係は図 3.22 の通りである。レーザー光源から HOE もしくは鏡が設置される面までの光学素子のアライメントと機能は図 3.19 と同一である。そして、評価対象の素子から回折もしくは反射した光は直接ファイバーカップラーに導かれる。レーザー光源の波長は 852nm に変更されている。また、コリメート光学系のレンズの位置は波長の変更に対応して変更されている。

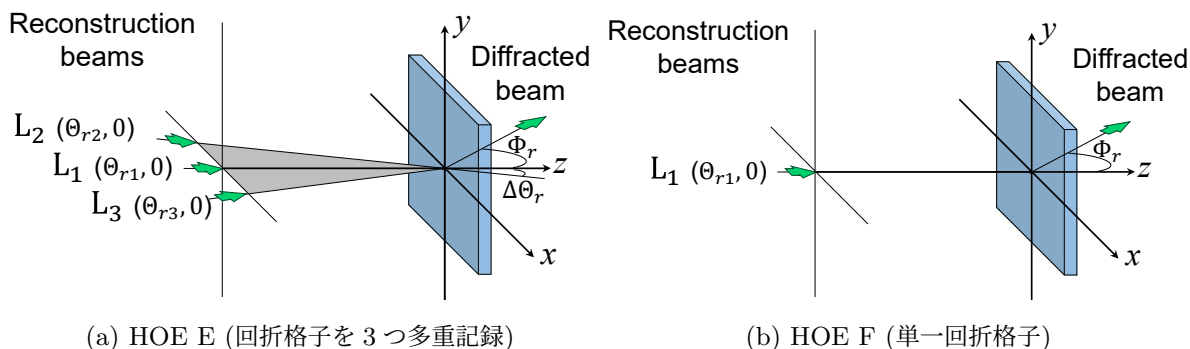


図 3.23: 通信波長帯用 HOE の設計

### HOE の設計

通信波長帯用 HOE の評価においては、方位角方向に参照光入射角度が設定された  $m_{max} = 3$  の HOE E と、単一の回折格子を記録した HOE F を試作する。設計の目的は反射型や透過型の HOE の評価と同じである。多重記録する回折格子の数が少ないのは、記録時と再生時の波長が異なるために回折効率の低下が顕著に現れることを予想したからである。図 3.23 に試作する HOE の再生時の再生照明光と回折光の関係を示す。図 3.23a に示すように HOE E は 3 つの回折格子が多重記録された透過型 HOE であり、 $L_1$  から  $L_3$  は多重記録された各回折格子のブラッグ条件を満たす再生照明光の入射角度を示している。 $L_1$  から  $L_3$  の成分  $\Theta_1$  から  $\Theta_3$  および  $\Delta\Theta$  の位置関係は図 3.20 と等しい。回折光の出射角度  $\Phi$  は  $x-z$  面内における  $z$  軸に対する角度であり、回折光の進行方向は、再生照明光の進行方向から見て材料を透過する方向である。また、記録に用いる光波長は 532nm、再生に用いる光波長は 852nm である。HOE E と HOE F の設計値を表 3.10 に示す。ここで  $\Theta_{r1}$  と  $\Phi_r$  の値は共に 5deg であり、成す角度は 170deg である。 $\Delta\Theta$  の値は、HOE F を先に評価して、その回折光の SMF への結合効率の再生照明光の入射角度に対する依存性のプロファイルの半値全幅を計測し、その値としている。HOE F の評価結果は HOE D 及び鏡の評価結果と共に次節で示す。

### 実験結果

実験結果を図 3.24 に示す。(a) が HOE E、(b) が HOE F、及び (c) が鏡についての評価結果を示している。各グラフについて、横軸と縦軸は HOE または鏡に入射したレーザー光の入射角度であり、疑似色は SMF へ結合した光強度とレーザーの出力の比をそれぞれ最大値で正規化した値を示している。ここで、HOE もしくは鏡に入射した光強度と SMF へ結合した光強度の比を便宜的に SMF への結合効率と呼ぶ。SMF への結合効率の最大値は HOE E、HOE F、鏡でそれぞれ、0.16%、1.07%、5.55% であった。また、HOE E および HOE F の回折効率の最大値はそれぞれ 6.95%、21.52% であった。

表 3.10: 通信波長帯用 HOE の設計値

パラメータ	HOE E	HOE F
記録波長 $\lambda_w$	532nm	
使用波長 $\lambda_r$	852nm	
$\Phi_r$	5deg	
$\Delta\Theta_r$	0.0476deg	-
$\Theta_{r1}$	5deg	5deg
$\Theta_{r2}$	5.0476deg	-
$\Theta_{r3}$	4.9524deg	-
$\Delta\theta_{rw}$	3.04deg	3.04deg
$\Delta\Phi_{rw}$	3.04deg	3.04deg

### 考察

反射型 HOE および透過型 HOE の実験結果の考察と同様に、本評価実験で SMF へ結合した光強度がその最大値の 10% 以上となる角度幅 (10% 角度幅) に着目して議論を行う。表 3.11 に HOE E, HOE F, 鏡それぞれの 10% 角度幅を示す。HOE E の 10% 幅は、単一の回折格子を記録した HOE D に比べて、 $x$  軸に 2.83 倍広がっている。これは、回折格子を角度多重記録することで、設計に従って、より広い受信光の入射角度幅で SMF へ結合する光強度の変動を安定化できていることを意味する。鏡と HOE E について 10% 角度幅を比較すると、HOE C が鏡に対して  $x$  軸方向に 2.77 倍広がっており、制御遅延の観点から HOE が精追尾機構に対して優位性があることを示唆している。 $y$  軸方向の角度へは回折格子の多重記録を行っていないため、HOE E, HOE F, 鏡の 10% 幅は、鏡の値を基準にして 5% 以下の差に収まっている。この原因としては、HOE から出射した回折光の波面の歪み、素子の再設置に伴う光学系のミスアライメント等が挙げられ、実験環境に依存する誤差の範囲内と考えられる。

HOE E の回折効率が HOE F の 1/3.1 になっている。この原因として考えらる事項は、記録時の振動、材料のダイナミックレンジを超えるような露光条件および参照光の強度分布、材料の保存状態、などである。

SMF への結合効率の最大値を表 3.14 にまとめる。HOE E の SMF への結合効率は HOE F の 1/6.68 になっている。これは回折格子の多重記録によって、HOE の SMF への結合効率は単一の回折格子よりも低くなることを示唆している。原因としては、記録された回折格子に対してブラッグ条件を満たさない角度へも回折光が発生する現象が考えられる。ブラッグ条件を満たさない角度への回折は、材料の厚さを増して回折格子の角度選択性を高めることで低減可能である。

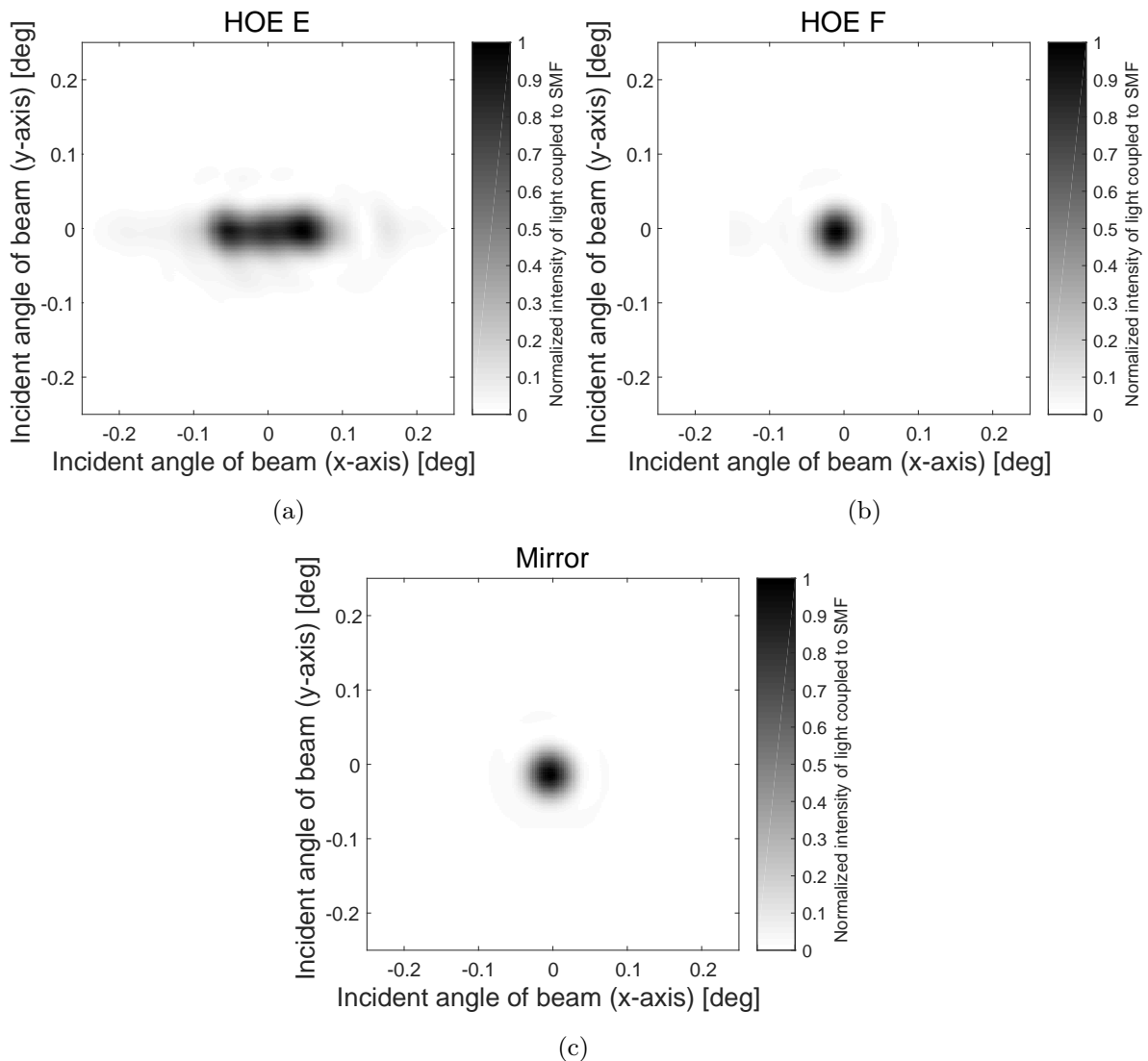


図 3.24: 通信波長帯用 HOE の評価における, SMF へカップリングした光強度の入射角依存性

### 3.5 HOE を適用した受信光学系の符号誤り率の考察

提案した HOE を自由空間光通信システムに適用する際に, 回線設計の観点からの関心事はビット誤り率 (BER: Bit Error Rate) についての特性である. 前節の実験により, HOE に入射した通信光のエネルギーは必ずしも多重記録された回折格子のブラッグ条件を満たす光波にのみ結合するのではなく, HOE から出射する回折光は一定の伝搬角度の広がりを持っていることが示唆された. 再生照明光に波面歪みがある場合, 回折格子がブラッグ条件を満たさない回折を許容する状態では, 回折光の波面は平面波とならず再生照明光の波面歪みに依存した波面形状となる. 大気ゆらぎの影響を受けた通信光の波面形状は時間的に変動するため, HOE で回折された通信光の波面も同

表 3.11: 通信波長帯用 HOE の評価実験における各素子の 10% 角度幅 [deg]

	HOE E	HOE F	Mirror
$x$ 方向	0.230	0.081	0.083
$y$ 方向	0.077	0.085	0.081

表 3.12: 通信波長帯用の評価実験における SMF への結合効率の最大値

HOE E	HOE F	Mirror
0.16%	1.07%	5.55%

様に変動する。この状況は、通信光の波面歪みのうち Tip-tilt のみが補正され、より複雑な形状の波面歪みが残った状態と考えられる。そこで本節では、HOE で回折された通信光に残存する波面歪みによるシンチレーションを考慮し、HOE への入射角度ごとの BER を考察する。

### 3.5.1 受信器のモデル

BER の考察を行うために、図 3.25 に示す通りに受信器のモデルを仮定する。通信速度は 2Gbps、変調方式は On-Off keying で検波方式は直接検波とする。図 3.25 において、大気の影響で伝搬角度と波面形状が変動する通信光が光アンテナに入射する。通信光の伝搬角度変動は光アンテナの瞳に設置された HOE によって抑圧される。HOE からの回折光は、HOE がブラッグ条件を満た

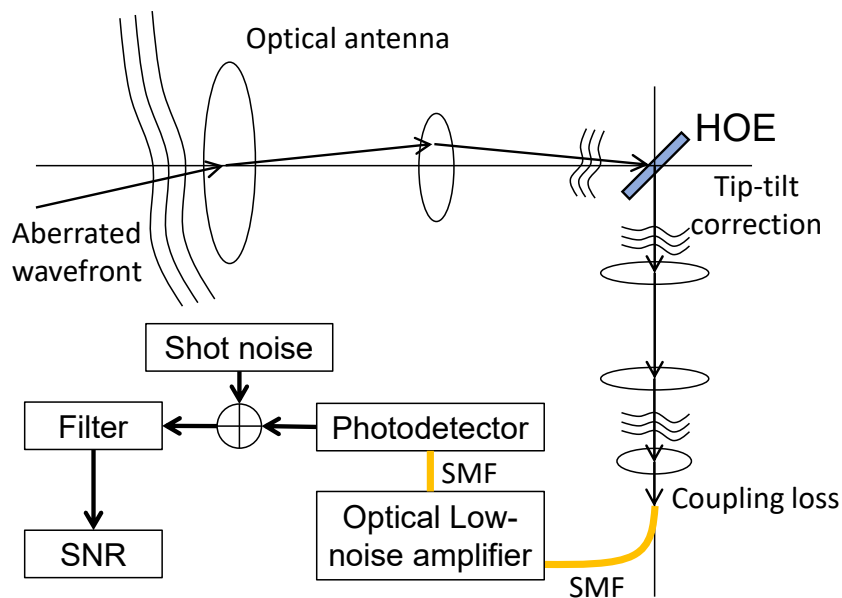


図 3.25: HOE を適用した通信装置による受信のモデル

表 3.13: BER 計算に用いたパラメータ

パラメータ	記号	HOE E	HOE F	鏡
光周波数	$\nu$	351.9THz (850nm)		
電気回路透過周波数帯域幅	$B$	2GHz		
フォトディテクタ量子効率	$\eta_q$	0.73		
プランク定数	$h$	$6.626 \times 10^{-34}$		
シンチレーションインデックス	$\sigma_I^2$	0.3		
入射光強度	$P_r$	2mW	295 $\mu$ W	57 $\mu$ W

さない回折光の発生を許容するために、依然として波面形状が変動する。回折光の SMF への挿入損失は波面形状の変動により時間的に変化する。SMF へ結合された通信光は低ノイズ光アンプによって振幅を増大され、フォトディテクタで電気信号に変換される。ここでは理想的なフォトディテクタが想定されており、信号に重畳される電気的なノイズはショットノイズのみと仮定する。そして、電気回路が透過する周波数帯域を示すフィルターを通過した後の電気信号の SNR を、BER の計算に用いる。

ショットノイズとシンチレーションを考慮した On-Off keying の BER は、

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{SNR}{2\sqrt{2}} \right) \quad (3.44)$$

であり、ここで

$$SNR = \frac{SNR_0^2}{\sqrt{1 + \sigma_I^2 SNR_0^2}} \quad (3.45)$$

$$SNR_0^2 = \sqrt{\frac{\eta_q P_S}{2h\nu B}} \quad (3.46)$$

である。  $P_S$  はフォトディテクタを照明する通信光の光強度、  $\eta_q$  はフォトディテクタの量子効率、  $\nu$  は通信光の波長、  $B$  はフィルターの透過帯域幅、  $h$  はプランク定数、  $\sigma_I^2$  はフォトディテクタにおける通信光のシンチレーションインデックスである。 HOE を照明する通信光の光強度を  $P_r$ 、 SMF へ結合する光強度の比を  $\eta_c$ 、 低ノイズ光アンプの増幅率を  $A_v$  とすると、  $P_S$  は

$$P_S = P_r \eta_c A_v \quad (3.47)$$

となる。

### 3.5.2 試作した HOE の再生照明光の入射角度ごとの BER の推定

3.4.5 節で試作した HOE E と HOE F 及び鏡について、再生照明光の入射角度ごとの BER を計算する。 HOE E は  $x$  軸方向に 3 つの回折格子が多重記録された設計であるため、 BER の計算は図 3.24 における  $y$  軸に対する再生照明光の入射角度が 0deg のスライスに対して行う。 BER の

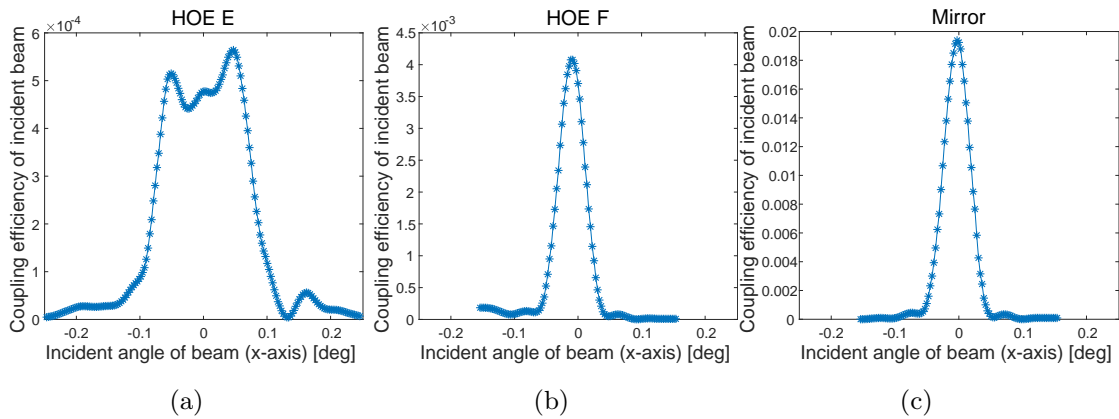


図 3.26: 通信波長帯用 HOE の入射光強度に対する SMF への結合光強度の比 ( $\eta_c$ )

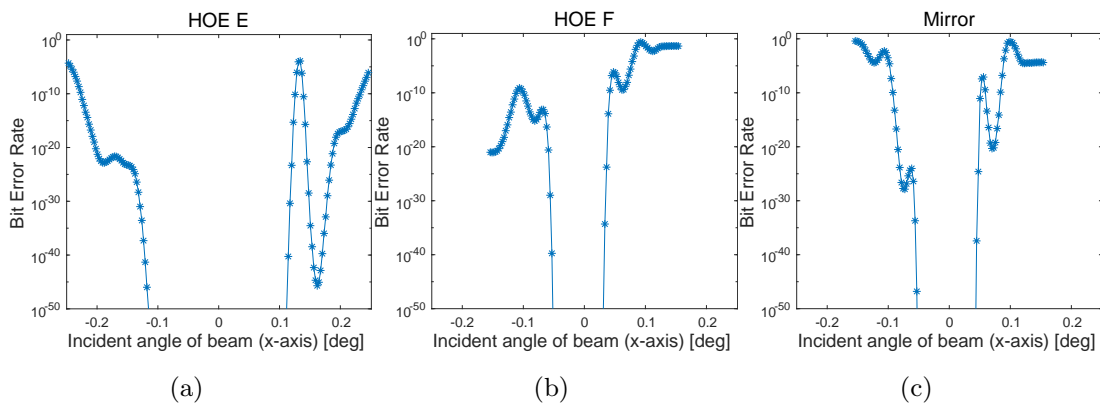


図 3.27: ショット雑音とシンチレーションを考慮した OOK の BER の通信光の伝搬角度に対する依存性

表 3.14: BER が  $10^{-12}$  を下回る角度幅

HOE E	HOE F	Mirror
0.344deg	0.132deg	0.101deg

計算に用いたパラメータを表 3.13 に示す．また，対象の HOE について再生照明光の入射角度ごとの SMF への結合効率  $\eta_c$  を図 3.26 に示す．ここで，低ノイズ光アンプが許容する入力光強度の最低値を  $-35\text{dBm}$ ，最高値を  $-10\text{dBm}$  とし，入力光強度が許容値に収まる場合には増幅率  $A_v$  は出力光強度が一定になるように制御されるとする．表 3.13 で各 HOE 及び鏡に仮定している入射光強度は，受信光強度の急激な変動に対する低ノイズ光アンプの入力に許容される光強度に対して  $15\text{dB}$  のマージンを取り， $P_S$  が  $25\text{dBm}$  を超えないように設定されている．

図 3.27 は，図 3.26 を基に計算した HOE E，HOE F，鏡それぞれについての BER の伝搬角度依存性である．ここでは回折格子の多重記録による HOE の特性の変化に着目するため，敢えて理



想的な受信器を仮定しており、その受信器において誤り訂正を適用しない状態の BER について考察する。指標として、BER が  $10^{-12}$  を下回る角度幅 (以降、 $10^{-12}$  角度幅と呼ぶ) に着目する。これは、人工衛星 OICETS(JAXA) を用いて地上-衛星間で行われた自由空間光通信実験で、BER  $10^{-9}$  でエラーフリーと考えられていたことを参考に、将来はより高速な通信が必要とされることを考慮したものである [92]。表 3.14 に各素子の  $10^{-12}$  角度幅を示す。回折格子を 3 つ角度多重記録した HOE E の  $10^{-12}$  角度幅は、単一の回折格子である HOE F に対して 2.62 倍広く、鏡に対しては 3.41 倍広がっている。これは、回折格子の多重記録によって BER の通信光の伝搬角度に対する依存性が緩和されることを意味している。一方で回線設計の観点からは、HOE E は鏡に比べて 15.45dB だけ受信光学系の損失を増加させてしまっている。これは、FPM を用いた光学系において低ノイズアンプへの入力光強度が許容する上限になるように回線設計をしたシステムにおいて、単純に FPM を HOE に置き換えると、低ノイズアンプへの入力光強度は許容される入力光強度の下限値を 0.45dB 下回ることになる。よって、この評価において HOE E を適用した受信光学系は FPM を適用した光学系に比べて 0.45dB 多い送信電力を要求する。

### 3.6 HOE 設計のための受信光学系のモデル

ここまでの実験と考察により、提案した HOE が自由空間光通信システムにおいて、大気の影響を受けた通信光の伝搬角度変動による受信光強度の変動を抑圧することが示された。しかし、実際に作成した HOE の回折特性は、設計の基礎理論とした Kogelnik の結合波動方程式の解析における仮定と必ずしも一致しない部分があることも明らかになった。特に、材料の大きさが有限で、材料の厚みが限られた条件において、体積型回折格子への再生照明光の入射角度が変化に伴って回折光の出射角度も変化する現象は、提案手法のエネルギー効率を考察する上で無視できない。HOE の設計手法を検討する上で、多様な材料に対応可能であることは重要である。そこで本節では、提案手法の実装に比較的薄い材料を用いる場合を想定し、回折光の出射角度の変化にも対応した設計モデルを提案する。

#### 有限の大きさを持つ HOE に対する仮定

Kogelnik の結合波動方程式では、回折格子が  $x$  軸及び  $y$  軸方向へ無限の広がりを持つと仮定していた。しかし、実際に作成する HOE は有限の大きさを持っており、Kogelnik の解析における仮定と現象に乖離が生じる原因になる。特に、回折格子の作成に用いる材料  $z$  軸方向の厚みが他の軸方向の厚みに比べて極端に薄い場合には、再生照明光の入射角度に応じて回折光の出射角度が変化する。一方で、Kogelnik の理論では再生照明光の入射角度に関わらず常に単一の波動への結合のみが考慮されているため、現実には回折格子を再生した際の回折光の伝搬角度の変化は議論の対象となっていない。有限の大きさを持つ回折格子を再生した際に記録された波動とは異なる波動に参照光が結合する現象は、空間的に領域制限された干渉縞の回折格子ベクトルスペクトルを考えることによって検討できる [81]。

また、Kogelnik の結合波動方程式の位相不整合パラメータにおける  $\Delta\theta_m$  と  $\Delta\lambda$  は摂動論により

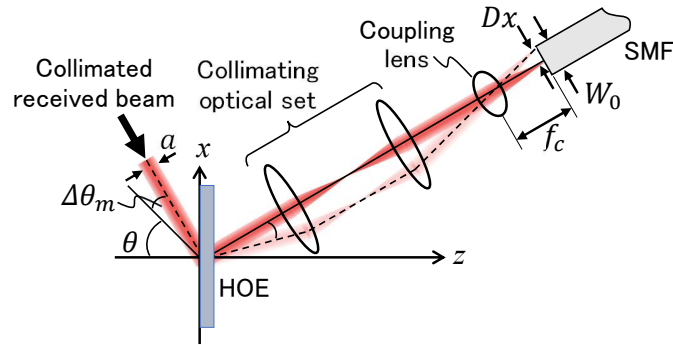


図 3.28: HOE を適用した受信光学系

導入された項である。これは、Kogelnik の結合波動方程式の解析において、波数ベクトルの摂動が許容されていることを意味する。よって、回折格子の大きさが有限であるために再生照明光の入射角度の変化に応じて回折光の出射角度が変化する状況においても、回折光の光強度は Kogelnik の結合波動方程式で解析された回折効率の解に従うものとする。この仮定は、実際の回折格子の回折効率の検討でしばしば用いられており、本論文で HOE の作成に用いる感光材料の感光特性も同様の仮定に基づいた実験により解析されている [78, 93]。

### HOE を適用した受信光学系

図 3.28 に HOE を適用した受信光学系のモデルを示す。光アンテナで集光された通信光は縮小光学系によりビーム直径を縮小後、コリメートされ平行光として HOE を照射する。HOE は縮小光学系でリレーされた光アンテナの瞳に位置し、通信光はその伝搬角度変動によらず常に HOE の一定の領域を照明し続ける。HOE の大きさが有限であることから、HOE に多重記録された回折格子で回折された光の伝搬角度は、該当する回折格子のブラッグ条件を満たす入射角度と実際の通信光の HOE への入射角度の差  $\Delta\theta_m$  に応じて僅かに変化する。HOE で回折された通信光はリレー光学系を通り結合レンズに入射する。結合レンズと HOE はリレー光学系の瞳に位置し、HOE で回折された光は常に結合レンズの中心を通り SMF の端面で結像され、SMF へ結合されて低ノイズアンプへと導かれる。これらリレー光学系、結合レンズ、SMF は HOE の記録時の物体光の光軸上に同入射角度  $\Phi$  でアライメントされている。 $a$  は HOE を照明する通信光のビーム直径、 $f_c$  は結合レンズの焦点距離、 $W_0$  は SMF のモードフィールド径、 $D_x$  は SMF 端面における通信光の結像位置と SMF の光軸との距離であり、 $D_x = f_c \tan \Delta\theta_m$  である。この光学系において、HOE を照明する通信光の光強度と SMF へ結合する光強度の比は、HOE の回折効率と SMF への結合効率の積と考えられる。

結合レンズで結像された回折光のビームウェストが SMF のモードフィールド径  $W_0$  と一致すると仮定した場合、SMF への回折光の結合効率の  $D_x$  への依存性は

$$T_D = \exp \left[ - \left( \frac{D_x}{W_0} \right)^2 \right] \quad (3.48)$$

表 3.15: 受信光学系のパラメータ設計例

パラメータ	記号	透過型
再生照明光の波長	$\lambda_0$	850nm
光アンテナ直径		50mm
アンテナ光学倍率		50
HOE に入射するビームの直径	$a$	1mm
結合レンズの焦点距離	$f_c$	10.2mm
SMF のモードフィールド径	$W_0$	5.5 $\mu$ m

である [94]. また, 回折光の SMF への入射角度  $\Delta\theta_m$  に対する結合効率の依存性は

$$T_\theta = \exp \left[ - \left( \pi W_0 \frac{\Delta\theta_m}{\lambda} \right)^2 \right] \quad (3.49)$$

である [94]. よって, 近軸近似を適用するとこの受信光学系における HOE の回折光の SMF への結合効率は, 通信光の HOE への入射角度  $\Delta\theta_m$  に依存する関数

$$\eta_c(\Delta\theta_m) = \exp \left[ - \left( \frac{f_c \tan \Delta\theta_m}{W_0} \right)^2 \right] \exp \left[ - \left( \pi W_0 \frac{\Delta\theta_m}{\lambda} \right)^2 \right] \quad (3.50)$$

として定義できる.

従って, HOE によって SMF へ結合される通信光の光強度は

$$I_c(\theta) = I_R \sum_{m=1}^{m_{max}} \eta_m(\Delta\theta_m) \eta_c(\Delta\theta_m) \quad (3.51)$$

である. この受信光学系では  $\eta_m(\Delta\theta)$  と  $\eta_c(\Delta\theta)$  が一致する際に, 通信光の SMF への結合効率が最も高くなる. 例えば,  $\eta_m(\Delta\theta)$  の半値全幅が  $\eta_c(\Delta\theta)$  のそれよりも広い場合には, SMF へ結合しない角度へも回折光が発生し, その分の回折光のエネルギーは受信光学系の内部損失となる.

### HOE の設計例

提案した受信光学系のモデルに基づいて設計した光学系のパラメータを表 3.15 に, HOE の設計例を表 3.16 示す. この HOE は透過型として設計されており, 多重記録された 5 つの回折格子によって構成されるホログラムである. この設計例では, 通信光で HOE を照明することを考慮し, 通信波長帯の 850nm を再生照明光の波長として適用した. 図 3.29 は, 設計例の HOE に多重記録された回折格子のうち  $\Theta_3$  に対応するものの角度選択性の特性  $\eta_3(\Delta\theta_3)$ ,  $\eta_c(\Delta\theta_3)$  及びそれらの積  $\eta_3(\Delta\theta_3)\eta_c(\Delta\theta_3)$  である. 図 3.30 は HOE を適用した受信光学系における受信光強度の角度依存性である. 太線は式 (3.51) を  $I_R = 1$  として計算した  $I_c$  のグラフ, 破線は角度多重記録されたそれぞれの回折格子から生じた回折光の SMF への結合効率  $\eta_m\eta_c$  である.  $I_c$  に着目すると, SMF へ結合する通信光の光強度の変動が,  $\pm 0.06\text{deg}$  の角度幅に渡って最大値の 3.85% 以内に抑えられ

表 3.16: HOE のパラメータ設計例

パラメータ	記号	透過型
再生照明光の波長	$\lambda_0$	850nm
材料の平均屈折率	$n$	1.5
屈折率変化量	$n_1$	0.001
材料の厚み	$d$	400 $\mu$ m
多重記録する回折格子の数	$m_{max}$	5
記録時の参照光入射角度	$\Theta_1$	24.926deg
	$\Theta_2$	24.963deg
	$\Theta_3$	25.000deg
	$\Theta_4$	25.037deg
	$\Theta_5$	25.074deg
記録時の物体光入射角度	$\Phi$	-25deg
結合効率を安定化する角度幅		$\pm 0.06$ deg

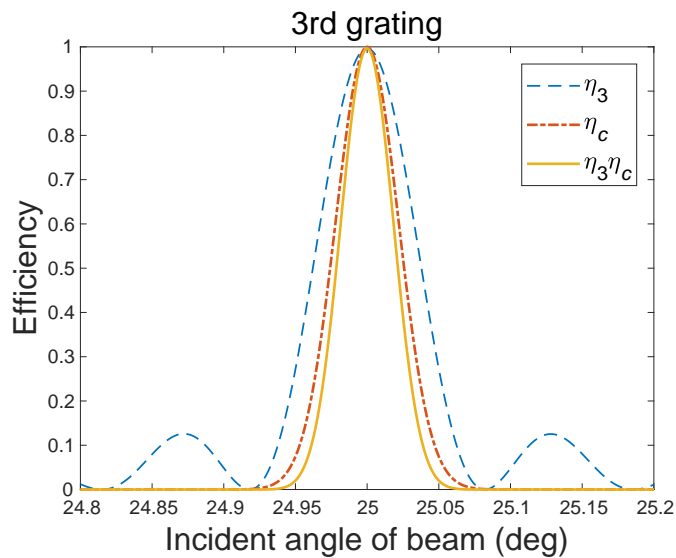


図 3.29:  $m=3$  の回折格子の回折効率, 及び回折光の SMF への結合特性

ている. これは受信した通信光の伝搬角度が大気の影響によって  $\pm 0.06$ deg の幅で変動しても, 受光電力の変動幅は受光電力の 3.85% 以内に収まることを意味している.

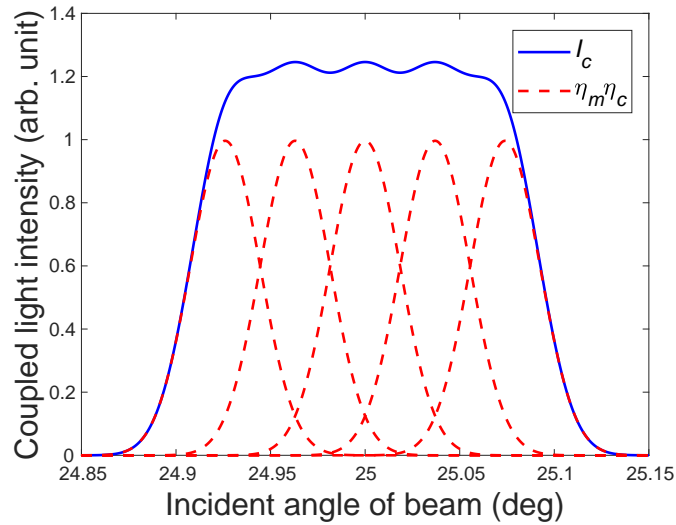


図 3.30: HOE を適用した受信光学系における受信光強度の角度依存性の設計例

### 3.7 まとめ

本章では、自由空間光通信システムの通信光の伝搬角度が大気の影響によって時間的に変動することに起因して受信光強度が変動する現象を、回折格子を角度多重記録した体積型ホログラムとして作成した HOE によって抑圧する手法を提案した。

提案した HOE は Kogelnik の結合波動方程式によって解析された体積型回折格子の回折効率の角度選択性を説明する理論に基づいて設計されている。提案手法の成立性と有用性を確認するために、HOE の試作と評価実験が行われた。評価実験では、理論上の回折特性の違いがあることから、反射型と透過型の HOE をそれぞれ作成・評価し、従来手法である精追尾機構の機能を代替し得る特性を確認した。また、提案した HOE を使用時とは異なる波長の光波で作成するための手法も提示した。可視光帯にのみ感度を持つ感光材料と 532nm の緑色のレーザー光源を用いて、通信に用いられる波長帯である 852nm の光波で機能する HOE を作成し、通常的手法で作成された HOE と同様に評価を行った。評価の結果、使用時と異なる波長で作成した HOE でも、受信した通信光の伝搬角度に対する SMF への結合光強度の依存性を緩和する効果を持つことを確認した。さらに、HOE を適用した自由空間光通信システムの受信装置のモデルを仮定し、BER の推定も行った。この評価では、HOE を適用した受信光学系では、精追尾機構を用いる従来の光学系に比べて 0.45dB 強い送信電力が要求されることになったが、BER の観点からも HOE が精追尾機構の機能を代替し得ることを確認した。本評価実験で作成された通信波長帯用の HOE は、角度幅で 0.23[deg] 以内の受信光の伝搬角度変動を安定化可能である。提案する HOE は精追尾機構を代替することを目的としているため、人工衛星に搭載された精追尾機構が安定化可能な角度幅と比較する。例として人工衛星 OICETS(JAXA) と OSIRIS4CubeSat(DLR) を挙げる。搭載された精追尾機構が

安定化可能な受信光の伝搬角度変動の角度幅は、OICETS で  $\pm 0.0286$ [deg], OSIRIS4CubeSat で  $\pm 1$ [deg] である [95, 96]. 精追尾機構が安定化可能な角度幅は、自由空間光通信のシステム、及び装置の光学系の設計によって決定されるため例示した値には幅があるが、本評価で試作した HOE が安定化可能な角度幅である  $0.23$ [deg] は、その範囲内に収まっている。よって、本研究で提案した手法によって作成された HOE は、将来的に精追尾機構を代替するに足る性能を持つと考えられる。

一方で、HOE C と HOE E の評価では回折格子を多重記録した HOE の回折効率が、単一の回折格子を記録した HOE よりも低くなった。原因となった可能性がある事象としては記録時の振動や、材料の屈折率変化量のダイナミックレンジを超える露光、が挙げられる。本評価では、材料の提供元から供給された情報に基づいて、材料に照射するエネルギーが一定になるよう露光時間を調整した。しかし一般に感光材料の露光条件は露光エネルギーの総量だけでなく、露光時間に対しても最適値が存在する。HOE の回折効率を向上する施策としては、光学系を真空チャンバに収めるなどして十分に振動を除去した環境を整え、最適な総露光量と露光時間を探索する事などが考えられる。また、試作したすべての HOE の評価において、ブラッグ条件を満たさない伝搬角度へも回折光が伝搬する現象が原因と考えられる結果が確認された。この現象の原因は、作成した回折格子の大きさが、厚み方向とそれ以外の方向で大きく異なっていることが原因と考えられる。HOE の作成にあたって常に材料の形状を自在に選択できるとは限らないため、この現象を考慮して HOE を設計することが重要である。そこで、回折光の出射角度が再生照明光の HOE への入射角度に伴って変化することを考慮した受信光学系の構成と、そこに適用する HOE の設計モデルを提案した。提案したモデルに基づいて HOE の設計を行い、通信光の伝搬角度に対する SMF へ結合する光強度の依存性を数値計算により示した。

## 第 4 章

# LCOS を波面制御素子に用いた補償光学システム

本章では LCOS を波面制御素子として用いる補償光学システムのために、ランダムベクトルを基底としたモーダルな波面再構成による制御手法を提案する。補償光学システムにおける波面の再構成について、MVM(Matrix Vector Multiplication) の基底としてモーダルなパターンを用いる方法について説明し、従来から用いられている Zernike 多項式によって定義されるパターンを紹介する。その後、ランダムベクトルを基底として用いることを提案し、Zernike 多項式で定義される基底との比較によって波面再構成における両者の特性の違いを明らかにする。最後に、大気ゆらぎの影響を受けた平行光を受光する受信光学系を仮定し、補償光学システムのシミュレーションを行う。シミュレーションでは、ランダムベクトルと、Zernike 多項式で定義されるベクトルそれぞれを基底として用いて波面補償を行い、焦点面の Strehl 比によって補償光学システムの性能に与える影響を評価する。

以降の節で取り扱う補償光学システムを図 4.1 に示す。大気ゆらぎの影響を受けて波面形状が歪んだ通信光が光アンテナで集光された後にコリメートされる。コリメートされた通信光は LCOS で波面形状の補正を受けた後にリレー光学系を通過し BS で二手に分けられる。一方は Shack-Hartmann 波面センサー (SHWFS:Shack-Hartmann Wavefront Sensor) に入射し波面形状が検出される。他方は結合レンズに入射し SMF へ結合される。LCOS の表面と SHWFS の開口、及び結合レンズの表面はすべてリレー光学系に対して光学的に共役な面に位置する。SHWFS で検出された波面は、LCOS で表現可能な形状に再構成される。

### 4.1 モーダルな基底による波面の再構成

補償光学システムでは、波面センサーの出力を基に波面制御素子を制御し、波面制御素子に入射する光波の波面形状から大気ゆらぎの影響を取り除く。この際、波面センサーで検出する波面の位置が波面制御素子で制御できる波面の位置と完全に一致している場合には、波面センサーの出力の位相共役を直接波面制御素子の入力とすれば良い。しかし、現実には波面センサーと波面制御素子

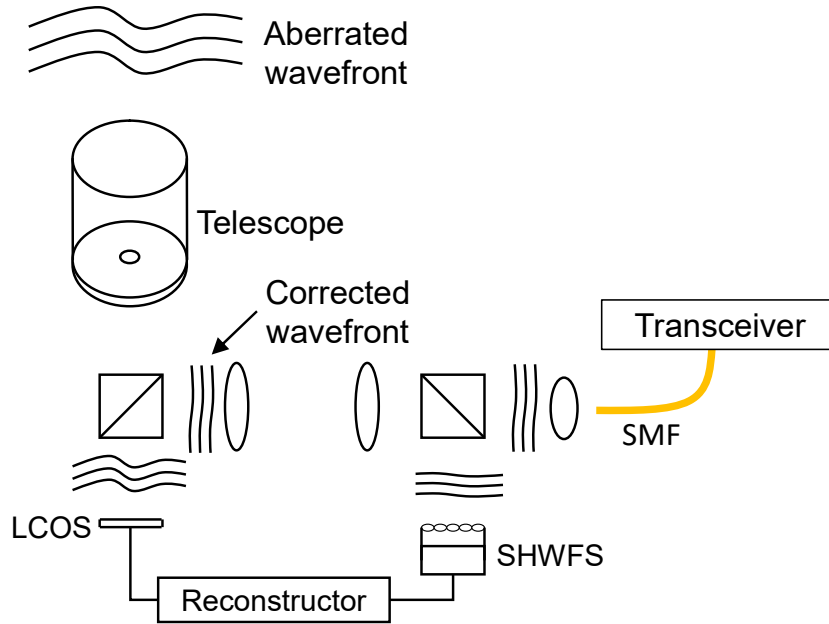


図 4.1: 補償光学システムを適用した受信光学系の概念図

の要素数や 1 要素に対応する物理的空間が異なる場合が殆どである。例えば、仮に装置の仕様として DM の制御点数と SHWFS のレンズレットの数を同数にし、それぞれの要素素子の配置を同一とし、設置位置を光学的に共役な位置として設計したとする。この場合でも実際に装置を構築すると、光学素子の収差や設置位置の誤差によって、波面制御素子と SHWFS の各要素を完全に共役な位置に設置するのは困難になる。そのような条件下で、波面制御素子全体に 2 次元パターン (モーダルパターン) を与えそれに対応する波面センサーの出力を取得することで波面センサーの出力と波面制御素子の入力の対応関係を決定する方法を、モーダルな波面再構成の手法と呼ぶ。

波面制御素子へ与える入力と、波面センサーの出力を対応付ける手法の一つが MVM による波面の再構成である。波面制御素子への入力を制御行列、波面センサーの出力を応答行列と呼ぶ。ここで、任意の応答行列  $s$  が基底行列  $\mathbf{B}$  とその係数ベクトル  $\mathbf{a}$  の積で

$$\mathbf{s} = \mathbf{B}\mathbf{a} \quad (4.1)$$

と表現できると仮定する。波面センサーの要素数を  $O$ 、基底行列に含まれる基底ベクトルの数を  $M$ 、とすると式 (4.1) は

$$\begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_i \\ \vdots \\ s_O \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{1j} & \cdots & b_{1M} \\ b_{21} & b_{22} & b_{2j} & \cdots & b_{2M} \\ b_{i1} & b_{i2} & b_{ij} & \cdots & b_{iM} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{O1} & b_{O2} & b_{Oj} & \cdots & b_{OM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_i \\ \vdots \\ a_M \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

と詳細に書ける。ここで  $i = 1, 2, \dots, O$ ,  $j = 1, 2, \dots, M$  である。 $\mathbf{B}$  の列ベクトルは、波面制御素子に制御行列  $\phi_j$  を与えて平面波を変調した際の応答行列  $\mathbf{b}_j$  であり、波面制御素子の要素数を  $L$ ,



$l = 1, 2, \dots, L$  とすると両者は,

$$\mathbf{b}_j = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_i \\ \vdots \\ b_M \end{bmatrix}, \phi_j = \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_l \\ \vdots \\ \phi_L \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

である。制御行列として与えるベクトル  $\phi_j$  も  $\mathbf{b}_j$  に対応して  $M$  個必要であるので、波面制御素子に対応する基底行列

$$\Phi = \begin{bmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} & \phi_{1j} & \cdots & \phi_{1M} \\ \phi_{21} & \phi_{22} & \phi_{2j} & \cdots & \phi_{2M} \\ \phi_{l1} & \phi_{l2} & \phi_{lj} & \cdots & \phi_{lM} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_{L1} & \phi_{L2} & \phi_{Lj} & \cdots & \phi_{LM} \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

が用意されている。

任意の応答行列  $\mathbf{s}$  が与えられた時、これを波面制御素子で再現可能な行列として再構成するには、式 (4.1) の仮定に基づいて、係数ベクトル  $\mathbf{a}$  を得れば良い。  $\mathbf{B}$  は既知であるので、

$$\mathbf{a} = \mathbf{B}^{-1}\mathbf{s} \quad (4.5)$$

である。  $\mathbf{B}$  と  $\Phi$  が線形な光学システムで一対一に対応すれば、平面波を波面制御素子で変調して、任意の応答行列  $\mathbf{s}$  を得るための制御行列は

$$\phi_s = \Phi\mathbf{a} \quad (4.6)$$

である。

式 (4.5) は  $\mathbf{B}$  が正則である場合には逆行列  $\mathbf{B}^{-1}$  が存在し容易に解けるが、  $\mathbf{B}$  は必ずしも正則とは限らない。そこで、特異値分解 (SVD: Singular Value Decomposition) を用いて、擬似逆行列として近似的に  $\mathbf{B}^{-1}$  を得るのが一般的である。この近似を真の値に近づけるには、全ての  $\phi_j$  及び  $\mathbf{b}_j$  が直交していることが重要である。  $\mathbf{b}_j$  を得る際に波面制御素子に入力する  $\phi_j$  が 2 次元の直交関数系で表されることが望ましい。そのような直交関数系として、Zernike 多項式が一般的に繁用される。波面制御素子の表面に、有効開口の中心点を原点として極座標系を定義すると、Zernike 多項式は

$$Z_n^m(\rho, \psi) = \begin{cases} R_n^m(\rho) \cos(m\psi) & m \geq 0 \\ R_n^{|m|}(\rho) \sin(|m|\psi) & m < 0 \end{cases} \quad (4.7)$$

ここで、  $n$  は非負整数、  $m$  は  $n \geq |m|$  である整数、  $\rho$  は極座標系の動径 ( $0 \leq \rho \leq 1$ )、  $\psi$  は偏角である。  $R_n^m(\rho)$  は、

$$R_n^m(\rho) = \begin{cases} \sum_{q=0}^{\frac{n-m}{2}} \frac{(-1)^q (n-q)!}{q! (\frac{n+m}{2}-q)! (\frac{n-m}{2}-q)!} \rho^{n-2q} & n-m \equiv 0 \pmod{2} \\ 0 & n-m \equiv 1 \pmod{2} \end{cases} \quad (4.8)$$

である。Zernike 多項式は整数  $n$ ,  $m$  の組み合わせに応じてユニークな 2 次元分布を持つ。また値域は  $[-1, 1]$  である。そこで  $n$  と  $m$  の組み合わせを一つの変数に統合し、分布に固有の番号が与えられている。  $j$  に Zernike 多項式の個別の分布を割り当てるとすると、OSA による定義では

$$j = \frac{n(n+2) + m}{2} \quad (4.9)$$

と Zernike 多項式の分布に順序が与えられる [97]。  $j$  番目の Zernike 多項式を  $Z_j(\rho, \psi)$  として  $\rho$  と  $\psi$  に対応する位置の波面制御素子の要素に与える入力を決める制御行列を  $\phi_{zj}$ ,  $\phi_{zj}$  に対応する応答行列を  $z_j$ , 応答行列に対応する基底ベクトルを  $\mathbf{B}_z$ , 制御行列に対応する基底を  $\Phi_z$  とする。基底ベクトル  $\mathbf{B}_z$  と  $\Phi_z$  を以降便宜上「Zernike 基底」と呼ぶ。  $M$  個の  $z_j$  によって再構成される任意の応答行列  $s_z$  は

$$s_z = \sum_{j=1}^M a_j z_j \quad (4.10)$$

である。

## 4.2 ランダムベクトルを基底に用いる波面の再構成

本研究では、MVM の基底としてランダムベクトルを用いることを提案する。ランダムベクトルは、ランダムに生成された値を要素に持つベクトルであり、統計的にランダムベクトル同士の相関はゼロと見做せる。2つの関数の相関がゼロの場合、それらの関数は直交している。よって、ランダムベクトルも互いに直交しており、基底を成すと考えられる。本節では、ランダム基底と、Zernike 基底について、波面の再構成の精度を比較することによって特性の理解を深める。まず、単純なベクトルの分解と再構成において、それぞれの基底で再構成されたベクトルと元のベクトルの二乗平均誤差 (RMSE:Root Mean Square Error) を評価する。次に、補償光学システムシミュレータを用いて、LCOS を用いた補償光学システムの MVM にランダム基底を適用した場合の特性を Zernike 基底を適用した場合の特性と比べる。

### 4.2.1 任意行列の再構成

区間  $[-1, 1]$  の実数からランダムに選ばれた値で構成されるベクトル  $\phi_{rj}$  を制御行列とし、それに対応する応答行列をベクトル  $r_j$  とする。応答行列に対応する基底ベクトルを  $\mathbf{B}_r$ , 制御行列に対応する基底を  $\Phi_r$  とする。基底ベクトル  $\mathbf{B}_r$  と  $\Phi_r$  を以降便宜上「ランダム基底」と呼ぶ。  $M$  個の  $r_j$  によって再構成される任意の応答行列  $s_R$  は

$$s_R = \sum_{j=1}^M a_j r_j \quad (4.11)$$

である。

ランダムベクトルで構成される行列が波面再構成を行う MVM の基底として機能することを確認する。確認のための評価では、任意の行列  $s$  から式 (4.5) によって係数ベクトル  $a$  を求め、

$$s' = Ba \quad (4.12)$$

として再構成されたベクトル  $s'$  を求める。  $s'$  と  $s$  の差を二乗平均誤差  $RMSE(s, s')$  として算出し評価対象とする。この評価を同一の  $s$  について、用いる基底を  $B_z$  と  $B_r$  としてそれぞれ再構成した  $s'$  の RMSE を比較することによって、Zernike 基底による再構成と、ランダム基底による再構成の特性を較べる。以降説明のために、  $B_z$  で再構成されたベクトルを  $s'_z$ 、  $B_r$  で再構成されたベクトルを  $s'_r$  とする。よって、本評価の比較対象は  $RMSE(s, s'_z)$  と  $RMSE(s, s'_r)$  である。

MVM によるベクトルの再構成の精度は、再構成する対象のベクトルと基底行列に含まれるベクトルに依存する。そこで統計的な評価を行うために、評価に用いる  $s$  のセットを以下のように 3 つ用意した。

Set A:  $B_z$  にランダムな係数ベクトルを掛けて生成したベクトル。

Set B:  $B_r$  にランダムな係数ベクトルを掛けて生成したベクトル。

Set C: 図 4.2 に示す屋外でのレーザー光伝搬実験によって取得した波面センサーの応答行列。

全てのセットにおいて、大きさ  $23 \times 23 = 529$  の正方形のパターンを一行に変形して  $1 \times 529$  の列ベクトルとしている。それぞれのパターンは円形の望遠鏡で受光した波面を想定しており、正方形に内接する円状の領域を構成する要素にのみ有効な値が含まれ、それ以外の要素は 0 である。パターンの 529 要素のうち、有効な値が含まれている要素は 377 個である。A と B において、ベクトルの生成に用いたの基底の要素列ベクトルの数  $M$  は 529 である。セット A と B で用意されたベクトルの数  $N$  は 100、セット C は 98 である。セット A の Zernike パターンの生成には式 4.7 を、セット B のランダムベクトルの生成にはメルセンヌ・ツイスタを用いた。また、C の実験で用いたレーザー光源の波長は 635nm、レーザー光源から出射した光は SMF でコリメータレンズの焦点まで導かれ、平行光として屋外を 50m 伝搬する。平行光のビーム直径は 20mm である。屋外を伝搬し大気の影響を受けたビームは SHWFS に入射し、波面形状が測定される。SHWFS の有効スポット数は  $23 \times 23$  である。評価では、  $N$  個のベクトルについてそれぞれ MVM による再構成を行って RMSE を算出し、その平均値と標準偏差を確認する。また、再構成に用いる基底行列に含まれる基底ベクトルの数 (基底の次元数) に対する特性を評価するため、1 から  $O$  個までの基底ベクトルで構成されるそれぞれの基底行列について、それぞれ  $N$  個のベクトルの再構成の評価を行った。

再構成したベクトルの RMSE の評価結果を図 4.3 及び図 4.4 に示す。図 4.4 は図 4.3 のデータを対数プロットしたものである。図 4.3、図 4.4 ともに図左側が RMSE のパーセント表示、右側が RMSE の標準偏差を示すグラフであり、横軸はいずれも基底行列を構成する基底ベクトルの数  $M$  である。図中の a,b,c がそれぞれ Set A,B,C に対応する。全てのセットについて、ランダム基底を用いる場合には、377 を超える数の基底ベクトルを用いて再構成されたベクトルの RMSE の平均値が  $10^{-13}$  のオーダーにまで低下している。一方で Zernike 基底を用いて再構成した波面の

表 4.1: 図 4.3 における RMSE の平均値のクロスポイント

セット	A	B	C
クロスポイントの基底の数	376	1	377
ランダム基底による再構成の RMSE	0.66%	26.88%	$6.57 \times 10^{-13}$
Zernike 基底による再構成の RMSE	0.90%	26.93%	0.23

RMSE の最低値は、全てのセットにおいて、ランダム基底による再構成より  $10^3$  以上大きくなっている。この結果は、ランダム基底が様々な成分を持つ波面形状の再構成に利用可能であるだけでなく、高精度な波面再構成を行う場合にはランダム基底が Zernike 基底に対して優位であることを示している。

各セットについて、ランダム基底と Zernike 基底による再構成の RMSE の平均値のクロスポイントと、当該の基底の数での RMSE の平均値を表 4.1 にまとめる。一方で再構成に用いる基底が 376 以下の場合、セット A とセット C においては、Zernike 基底の方がランダム基底よりも少ない数の基底ベクトルでより精度の高い再構成が行えている。特にセット C でその傾向は顕著であり、Zernike 基底とランダム基底の RMSE の平均値の差は、67 の基底ベクトルを再構成に用いる場合に最大になり、18.50% である。該当する RMSE の平均値は、Zernike 基底が 5.29%、ランダム基底が 23.80% である。この原因は、セット C で再構成の対象となるベクトルは空間伝搬したレーザー光の波面を実測したものであり、Zernike 多項式の低次の項に合致する点対称状の成分が多分に含まれている事だと考えられる。

#### 4.2.2 補償光学シミュレーション

補償光学システムにおける MVM による波面再構成の基底としてのランダム基底の特徴を評価するために、補償光学システムを仮定し、フィードバックループによる波面補償をシミュレーションする。この評価ではフェイズスクリーンを用いて大気ゆらぎの影響を受けた波面形状の変動をランダムに生成し、波面の再構成と補償のモンテカルロシミュレーションを行う。評価対象は図 4.1 の結合レンズで結像された光波の強度分布の Strehl 比である。波面の再構成に用いる基底の数に

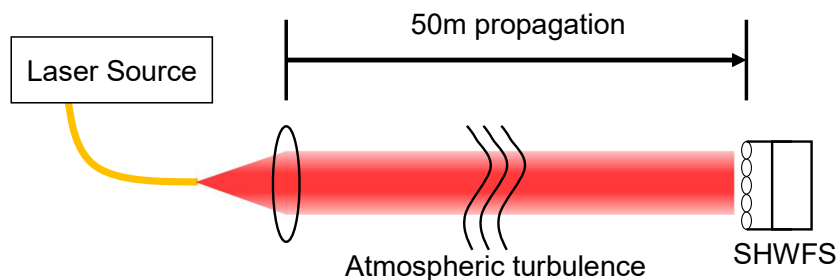
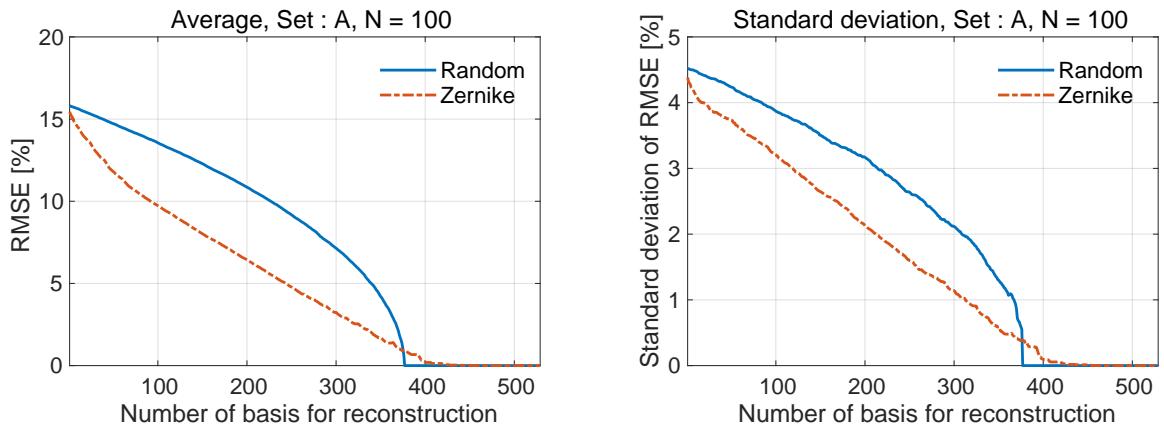
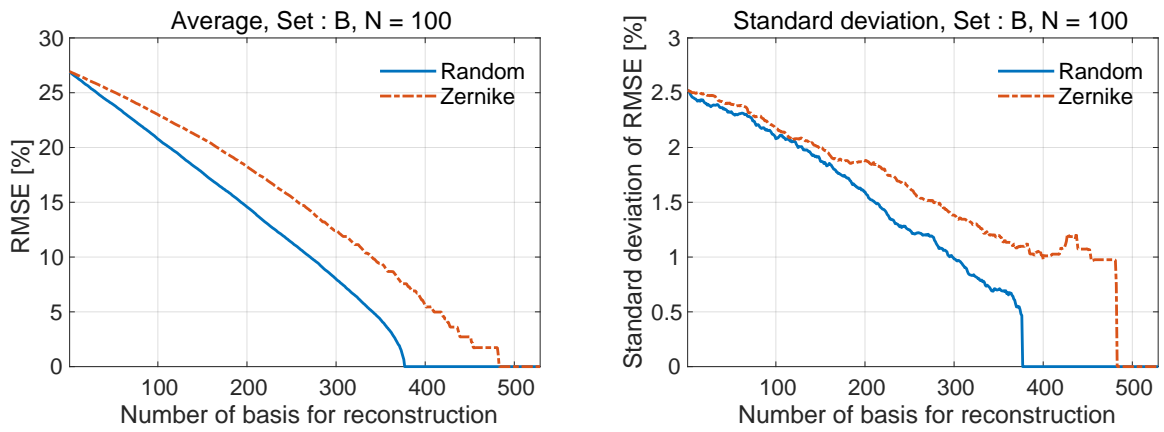


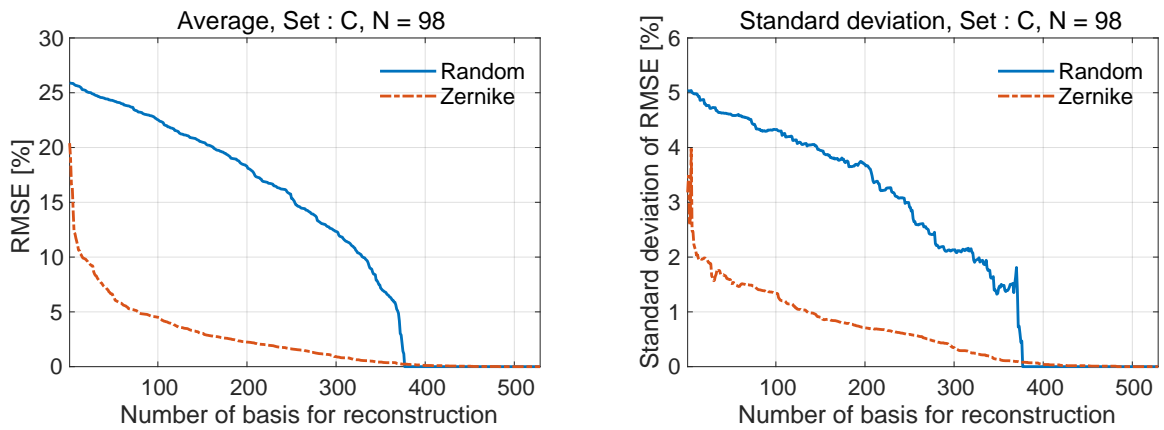
図 4.2: Set C のベクトルを取得するための実験の概要図



(a)

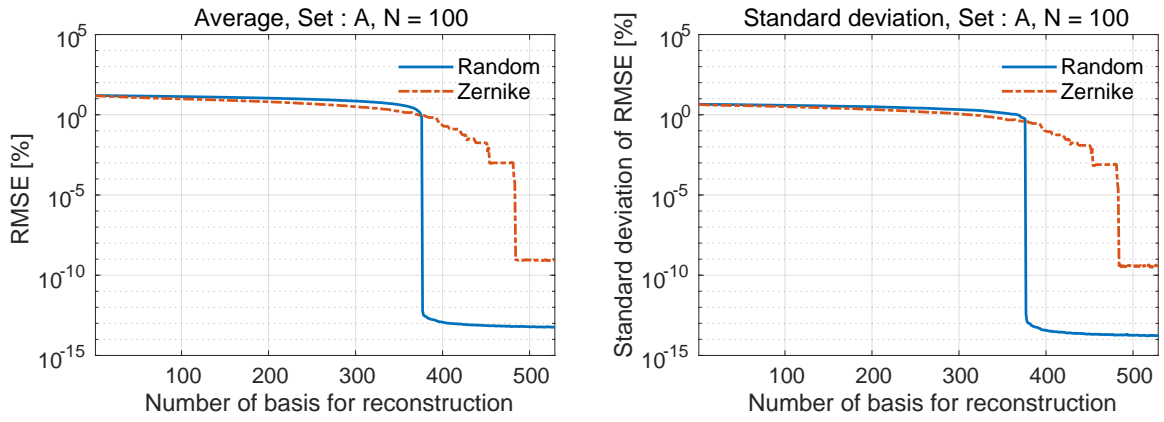


(b)

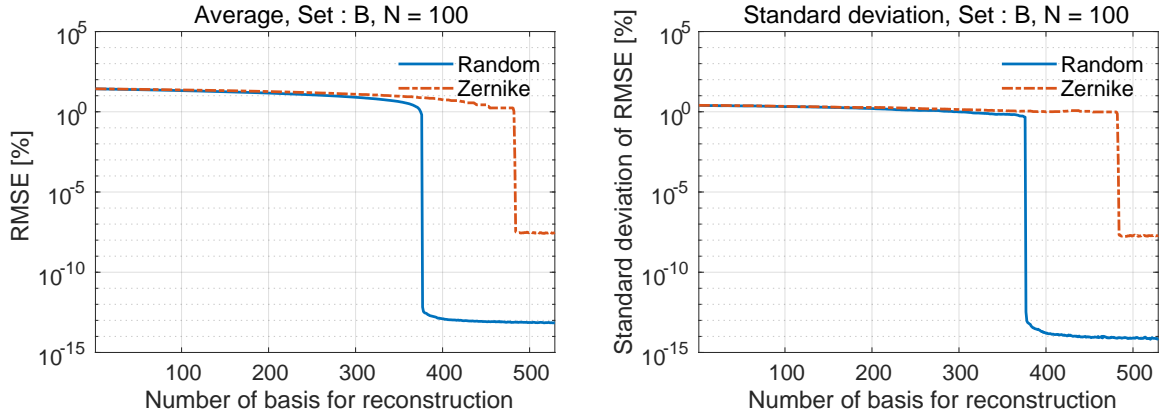


(c)

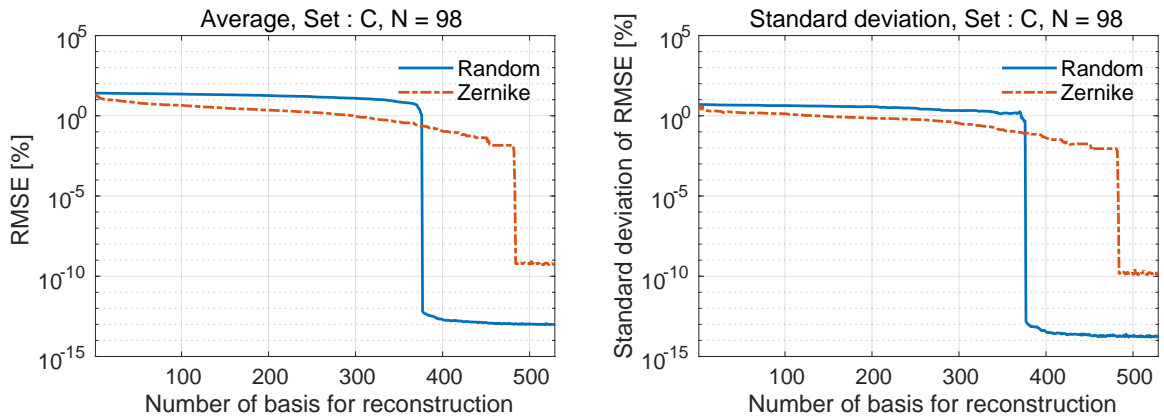
図 4.3: 再構成したベクトルの RMSE. 各図において左側が RMSE の平均値, 右側が標準偏差である. 業績リスト-筆頭-国際会議 [1] の文献より引用. Copyright 2020 Society of Photo Optical Instrumentation Engineers (SPIE).



(a)



(b)



(c)

図 4.4: 再構成したベクトルの RMSE とその標準偏差. 図 4.3 のデータを対数プロットしたものである.

表 4.2: フェイズスクリーンのパラメータ

スクリーン	光アンテナ開口からの距離	風向	風速	$r_0$	$L_0$	$l_0$
1	15km	135deg	20m/sec	0.16m	20m	0.01m
2	10km	90deg	20m/sec	0.16m	20m	0.01m
3	5km	45deg	20m/sec	0.16m	20m	0.01m
4	0km	0deg	20m/sec	0.16m	20m	0.01m

対する波面補正の精度の依存性を確認するために、ランダム基底による再構成と Zernike 基底による再構成でそれぞれ基底ベクトルの数  $M$  について、Strehl 比の平均値と標準偏差を算出し比較する。このシミュレーションにはオープンソースの補償光学システムシミュレータ "Simulation 'Optique Adaptative' with Python (soapy)" を利用した。

### 評価手法

図 4.1 を用いてシミュレーションを用いた評価の手法を説明する。平面波として出射された光波が大気ゆらぎの影響を受け、波面形状が変動する状態で光アンテナに入射する。LCOS と SHWFS は共役な位置に置かれており、SHWFS の出力を MVM で再構成し、LCOS に入射する光波が再構成した波面に対して位相共役になるように算出された制御行列を LCOS に入力する。シミュレーション上のフィードバックループの速度は 400Hz で、5 秒間に渡って 2000 回の波面補正が試行される。光アンテナの直径は 8m、カセグレン型の望遠鏡を想定し、中央に直径 1.1m の遮蔽がある。LCOS の要素数  $L$  は  $230 \times 230 = 52900$  である。Strehl 比を算出するために結合レンズの焦平面上 (SMF 端面上) に定義された面は、要素数が  $64 \times 64$  で、光学系において 1 秒角に相当する大きさを持つ。SHWFS のマイクロレンズアレイの要素数は  $23 \times 23$  であり、要素レンズの視野は 2.5 秒角に相当する。大気ゆらぎは 4 枚のフェイズスクリーンで表現される。各フェイズスクリーンの設定値を表 4.2 に示す。

soapy によるシミュレーションは以下の手順で行われる。

- Step 1: LCOS に与えるモーダルパターンの生成。
- Step 2: シミュレータの初期化。パラメータセットの読み込みとフェイズスクリーンの生成。
- Step 3: 波面センサー側の基底行列の生成。基底を成すベクトルを LCOS の制御行列として与え、平面波をモーダルパターンで変調する。変調された波面を SHWFS で検出し、その応答行列を基底ベクトルとして保存し、波面を再構成するための基底行列を生成する。
- Step 4: フェイズスクリーンを用いた伝搬計算によって、大気ゆらぎの影響で歪んだ波面形状を計算する。
- Step 5: 結合レンズ焦点面上の強度分布を計算し、Strehl 比を算出、記録する。
- Step 6: SHWFS で検出された波面形状を Step3 で生成した基底行列で再構成し、波面を補正する制御行列を算出、LCOS に入力し波面形状を補正する。

Step 7: フェイズスクリーンの位相分布を次の時刻に対応する分布に更新し、フィードバックループのカウンタに1を加算する。

Step 8: カウンタがシミュレーション期間終了を示す値に到達していた場合は、シミュレーションを終了、そうでない場合は Step4 に戻りフィードバックループを繰り返す。

本シミュレーションでは、波面の再構成に用いる SHWFS の応答行列  $\mathbf{b}_j$  を得るために LCOS の制御行列として与えるベクトル  $\phi_j$  が属する基底行列を、Zernike 基底  $\Phi_z$  及びランダム基底  $\Phi_r$  として用意し、波面再構成にランダム基底を用いた場合の補償光学システムの特徴を、Zernike 基底を用いた場合の特徴と比較し、評価する。 $\Phi_z$  に属する制御行列は  $\phi_z$ 、 $\Phi_r$  に属する制御行列は  $\phi_r$  である。

$\phi_{zj}$  は、LCOS の有効開口の中心を原点とし、短辺の長さを2とした極座標における Zernike 多項式の  $j+1$  次の分布を、LCOS の各画素の中心点でサンプリングして得る大きさ  $230 \times 230$  のマトリクス状のパターンを、 $1 \times 52900$  の列ベクトルに変形したものである。Zernike 多項式の定義より、 $\phi_{zj}$  の要素の値域は  $[-1, 1]$  である。図 4.5 にシミュレーションで使用する Zernike 基底の2次元パターンを例示する。

$\phi_{rj}$  の生成について説明する。区間  $[-1, 1]$  の実数からランダム選んだ値を要素にとり、大きさ  $230 \times 230$  のマトリクスを生成する。ここで、SHWFS がマイクロレンズアレイの要素レンズへ入射する波面として平面波を仮定していることに注意する。本評価の光学系において、LCOS の空間分解能は SHWFS の各辺につき10倍である。SHWFS が適切に波面を検出するには少なくとも、マイクロレンズアレイに入射する波面に含まれる最大の空間周波数が、要素レンズの中心点の間隔に対してサンプリング定理を満たす必要がある [98]。本シミュレーションでは、LCOS に与える波面変調のパターンの空間周波数帯域が SHWFS で検出可能な空間周波数の  $1/3$  となるように、空間周波数のローパスフィルターによってランダムに生成したマトリクスの空間周波数帯域を制限した。また、ランダムパターンだけでは Tip-tilt のモードを再構成することは難しいため、Zernike 多項式にも Tip-tilt が含まれていることを鑑み、ランダム基底の  $j = 1, 2$  の基底ベクトルを Tip-tilt のパターンに対応させた。図 4.6 にシミュレーションで使用するランダム基底の2次元パターンを例示する。

## 結果

波面補償シミュレーションにおける、波面の再構成に用いる基底の数に対する波面補正の精度の依存性を図 4.7 に示す。図中左のグラフが Strehl 比の平均値、右のグラフが標準偏差である。グラフ中、各プロット点が1回のモンテカルロシミュレーションに対応し、それぞれが2000回の波面補償シミュレーションで得た Strehl 比の平均値および標準偏差である。また、実線がランダム基底による波面再構成、破線が Zernike 基底による波面再構成での Strehl 比に対する結果を示している。横軸に対するプロット点の間隔は23毎である。

波面再構成に Zernike 基底を用いた場合とランダム基底を用いた場合で、Strehl 比が最大になった条件に着目する。Zernike 基底については161の基底ベクトルで基底行列を構成した場合、ラン



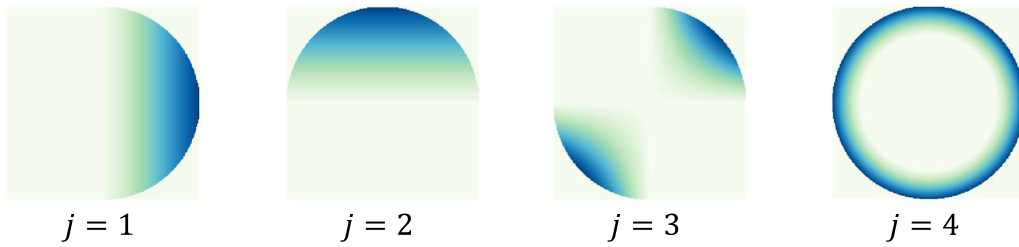


図 4.5: LCOS に与える Zernike 基底のモーダルパターンの例

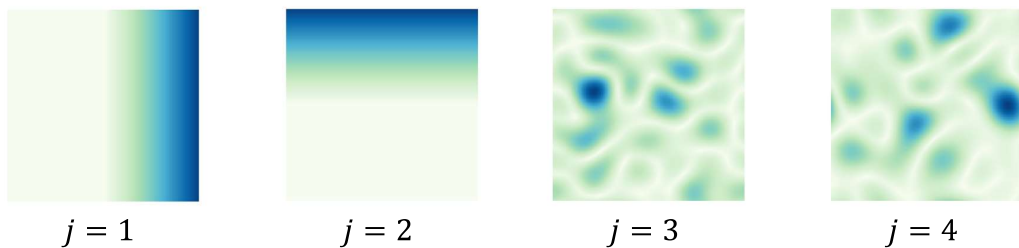


図 4.6: LCOS に与えるランダム基底のモーダルパターンの例

ダム基底については 529 の基底ベクトルで基底行列を構成した場合に、それぞれ Strehl 比は最大値 0.72, 0.77 であった。その時、標準偏差はそれぞれ 0.03, 0.06 であった。ランダム基底による波面再構成によって Zernike 基底より高い Strehl 比が得られており、ランダム基底が補償光学システムにおける波面再構成の基底として機能することが確認された。

図 4.7 において再構成に用いる基底ベクトルの数が 161 を超えると、Zernike 基底による波面補正の Strehl 比が悪化している。この点に着目し、波面の再構成に用いる Zernike 基底を構成する基底ベクトルの数について、より詳細なグラフを図 4.8 に示す。図 4.7 のプロットは横軸に対して 23 毎であるのに対し、図 4.8 は横軸に対して 1 ずつプロットされている。図 4.8 によると、189 の基底ベクトルを再構成に用いた場合を境に、Zernike 基底での波面補償の Strehl 比が悪化、同時に標準偏差も増大し始める。この原因は、 $j = 190$  以上の Zernike 多項式のパターンで変調された平面波の空間周波数スペクトラムの帯域が SHWFS で検出可能な空間周波数帯域を超えて分布した事だと考えられる。SHWFS で適切にサンプリングされなかった Zernike 基底のモーダルパターンは応答行列において直交関数系としての性質を満たさない。よって、基底行列の要素ベクトルのうち直交しないベクトルの数が増えるごとに波面再構成の精度が低下し、Strehl 比も悪化したものと考察する。一方で、再構成に用いる基底ベクトルの数が 189 以下の場合には、Zernike 基底はランダム基底に対して高い精度で波面歪みの補正ができています。これは、望遠鏡開口が円形であることや、大気ゆらぎの影響による波面歪みの空間周波数スペクトラムの帯域幅がランダム基底に比べて狭いこと等が原因として考えられる。

対してランダム基底による波面補正の精度は、波面の再構成に用いる基底ベクトルの数の増加に伴って対数関数的に向上し続ける傾向にある。これは再構成に使用する基底ベクトルの数と、モー

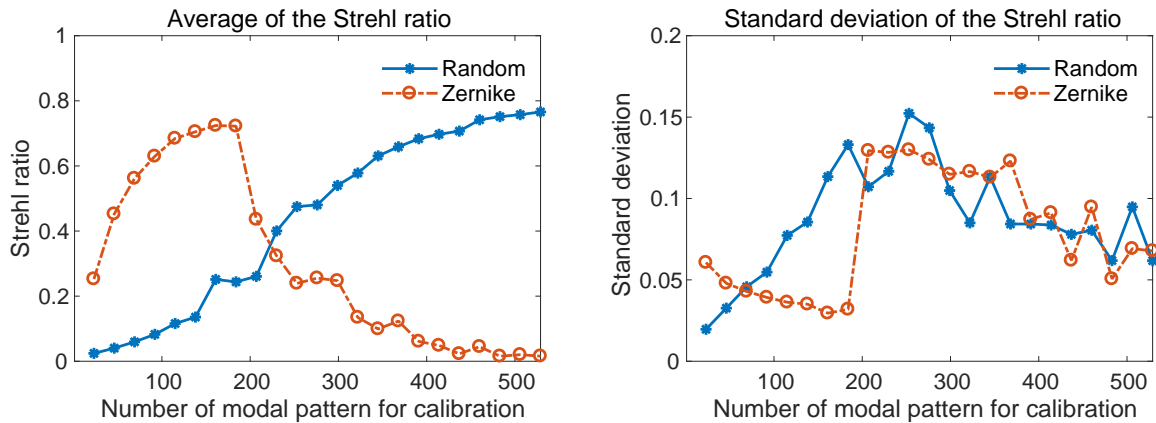


図 4.7: 再構成に用いる基底ベクトルの数に対する波面補正の精度の依存性. 左図が Strehl 比の平均値, 右図が標準偏差. 業績リスト-筆頭-国際会議 [1] の文献より引用. Copyright 2020 Society of Photo Optical Instrumentation Engineers (SPIE).

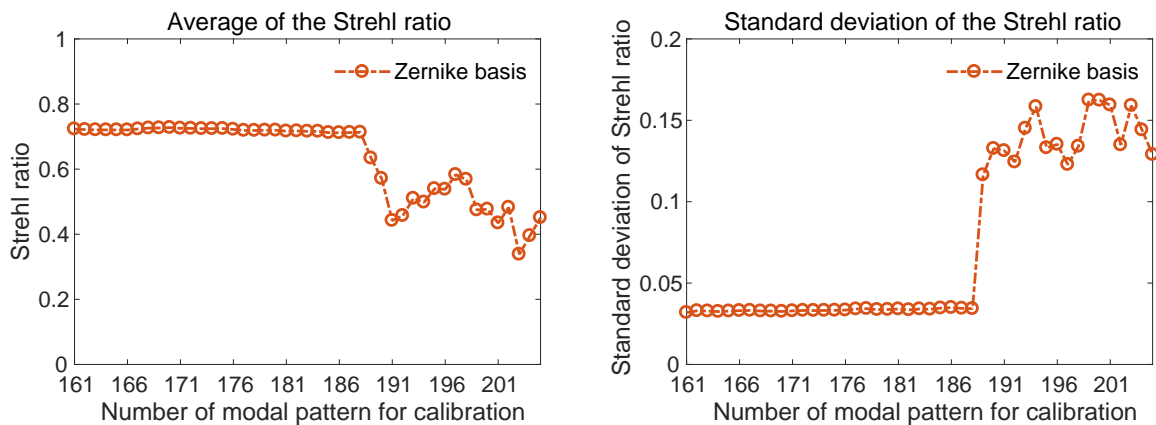


図 4.8: 再構成に用いる Zernike 基底のベクトル数に対する波面補正の精度の依存性. 業績リスト-筆頭-国際会議 [1] の文献より引用. Copyright 2020 Society of Photo Optical Instrumentation Engineers (SPIE).

ダルパターンの持つ空間周波数スペクトラムの関係を分離できた事によるものだと考えられる. Zernike 基底を波面の再構成に用いる場合には, SHWFS で検出可能な空間周波数を越えた空間周波数スペクトラムを持つパターンを使用できないことから, 基底行列を構成する基底ベクトルの数に制限が生じる. 一方でランダム基底では, 大気ゆらぎの強さや光学系の仕様等に応じて, 空間周波数の制限を受けることなく, 再構成に用いる基底ベクトルの数を決定できる.

### 4.3 まとめ

本章では、自由空間光通信装置に搭載する補償光学システムから機械的駆動部を除去することを目的として、波面制御素子に LCOS を使う構成と、LCOS を使った補償光学システムにおける波面再構成の新たな手法として MVM の基底行列にランダムベクトルを用いることを提案した。LCOS は一般的な補償光学システムで用いられている波面制御素子の DM に比べて要素素子の数が多く、DM を LCOS で置換すると波面センサーの要素数が波面制御素子に比べて少ない状態になる。このような補償光学システムの制御には MVM によるモーダルな波面再構成が適している。一般的には MVM の基底に用いるモーダルパターンとして Zernike 多項式の 2 次元パターンが用いられている。

提案手法では、ランダムベクトル同士の相関の低さに着目し、直交関数系である Zernike 多項式の 2 次元パターンをランダムパターンで代替した。ランダムベクトルを補償光学システムに適用するために、第一にランダムベクトルが基底として機能し、任意の行列を再構成できること確認した。この再構成の精度の評価では、ランダム基底の使用が Zernike 基底より優位となる条件が示された。次に、補償光学システムのシミュレータを用いて、補償光学システムの光学系を仮定し、大気ゆらぎによって波面形状が変動する様子を再現し、波面補正のモンテカルロシミュレーションを行った。シミュレーションにおいて、波面の再構成に用いる基底として、ランダムベクトルで構成される基底 (ランダム基底) と Zernike 多項式のパターンで構成される基底 (Zernike 基底) をそれぞれ用いて、波面補正の精度を Strehl 比によって比較した。Zernike 基底を用いた波面の再構成では、再構成に用いる基底ベクトルの数を増やすごとにモーダルパターンの空間周波数帯域が広がり、SHWFS で検出可能な空間周波数帯域の制限によって波面の再構成に利用できる基底の数に制限が生じた。一般的に MVM による波面の再構成ではより多数の基底ベクトルの使用によって、再構成の精度が向上するため、Zernike 基底における空間周波数の制限は補償光学システムの性能向上を目指す上での阻害要因となる。対して、提案手法によって空間周波数帯域を制限したランダムパターンを MVM の基底に用いた場合には、再構成に用いる基底ベクトルの数が、SHWFS の空間周波数分解能の制限を受けないことが示された。従って、Zernike 多項式に基づくベクトルではなく、ランダムベクトルを MVM の基底行列に用いることで、LCOS を波面制御素子に用いる補償光学システムにおける波面補償の精度の向上が見込めることが明らかになった。

## 第 5 章

# 結論

本研究で解決しようとした社会的要求は、地上-衛星間通信を中心とした長距離無線通信システムの高速度と小型・低コスト化によるアクセシビリティの向上である。小型衛星を中心とした観測ミッションや通信サービスの商業化の進行を背景に、小型な装置で高速な無線通信回線を構築する手法として自由空間光通信システムの研究開発が進んでいる。本研究は、受信光学系を非機械的な素子のみによって構築することで、より高性能でかつ小型・簡易な自由空間光通信装置を構成することを目的としている。具体的には、精追尾機構の HOE による代替、及び補償光学システムの波面制御素子に LCOS を用いることで、受信光学系から機械的駆動部を排除し、高性能化・小型化・低コスト化を可能とする手法を提案した。HOE については試作を行い、実験によって提案手法で作成された HOE が精追尾機構の機能を代替し得ることを確認した。この結果を以て、HOE によって自由空間光通信システムの通信光の伝搬角度変動の影響を、単一の受動的な光学素子により、遅延ゼロで抑圧可能であることを示した。また、LCOS を用いた補償光学システムについては、波面再構成の基底にランダムベクトルを用いることで LCOS の特徴を活かし、従来の Zernike 多項式を基底とする手法よりも高精度な波面補正を可能とした。ランダムベクトルが基底として機能することを確認する基礎的な評価と、波面補正の精度を確認する補償光学システムのシミュレーションを行い、その両方でランダムベクトルが Zernike 多項式に基づくベクトルを基底に用いる場合に対して優位な条件を見出した。この結果を以て、波面制御素子に LCOS を用いて機械的駆動部を排除した補償光学システムにおいて、従来より高精度な波面の補正が可能であることが示された。以上二点の提案とその基礎評価の結果は、自由空間光通信システムの高速度・小型化・低コスト化を促進し、将来的な宇宙通信の通信容量拡大に資するものである。

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

HOE による精追尾機構の代替は、通信光の伝搬角度変動を受動的な単一の素子のみで実施する手法である。Kogelnik の結合波動方程式に基づいて解析された体積型ブラッグ回折格子の回折効率の角度選択性と波長選択性に着目し、回折格子を多重記録した体積型ホログラムの設計を工夫することで、ホログラムへの通信光の入射角度に対する SMF への結合効率の依存性を緩和する HOE を設計・作成する手法を示した。提案手法で作成した HOE の特性を確認するために、反射型、透過型の HOE を試作・評価した。評価の結果、反射型 HOE では SMF への結合効率が最大

値の 2% 以上で推移する角度幅が、単一の回折格子に対して x 軸方向で 1.3 倍、y 軸方向で 1.5 倍拡大することを確認した。透過型 HOE では、SMF への結合効率が最大値の 10% 以上で推移する角度幅が単一の回折格子に対して x 軸方向で 1.64 倍、y 軸方向で 3.25 倍拡大することを確認した。これらの実験により、回折格子を角度多重記録した HOE によって、通信光の伝搬角度変動による受信光強度の変動を抑圧できることが確認できた。

また、材料が感光する波長帯が通信波長帯でなくても、自由空間光通信用の HOE を作成する手法を示し、HOE を試作・評価する実験で有効性を確認した。実験では 852nm で機能する HOE を 532nm で作成し、作成した HOE が設計に従った特性をもつことを確認した。さらに、試作した HOE を自由空間光通信装置の受信光学系に組み込むことを想定して、BER の推定を行った。BER の推定では、HOE の特性に注目するためにショット雑音のみを考慮する理想的な受信器を仮定した。この試算では、提案手法の HOE を適用した受信装置では、大気ゆらぎに追従できない状態の精追尾機構を搭載した受信装置にくらべて、BER が  $10^{-12}$  を下回る通信光の伝搬角度の幅が 3.41 倍拡大された。一方で、今回試作した HOE を搭載する場合には HOE の回折効率が低いことに起因して、0.45dB 多くの送信電力を要求する結果となった。

回折格子を角度多重記録する HOE に関する以上の実験では、HOE に記録された回折格子のブラッグ条件を満たさない角度への回折光の発生が確認された。評価実験の結果から、回折格子の多重数を増加させるにしたがってブラッグ不整合な回折光の光量も増加したことが示唆されている。ブラッグ条件を満たさない光波は、HOE の設計とは異なる方向へ回折するためエネルギー損失の原因となる。そこで、ブラッグ条件を満たさない回折光が発生することを前提として、エネルギー損失を低減する HOE の設計手法を提案し、当該手法による HOE の設計例とその特性の数値解析の結果を示した。

本研究で提案した HOE を実際の通信システムに組み込む場合には、以下の三点に留意が必要となる。一点目は、HOE のエネルギー効率である。より理想的な HOE を作成するためにブラッグ条件を満たさない回折光の発生を低減し、回折格子の回折格子の角度選択性を高めるには記録材料の厚みを増すことが有効である。厚みを増すと角度選択性が高まると同時に回折効率も向上する傾向がある。HOE の回折効率は材料に露光するエネルギーの総量や、露光時間などに対する材料の屈折率変化の応答特性に従うため、最適な条件を探索する必要がある。一方で、通信システムの観点に立てば、高効率な変調方式や誤り訂正符号の導入によって受信エネルギーの要求を緩和できる。エネルギーについては HOE の作成手法の改善による回折効率の改善と、変調方式や符号の改善の両面から検討を進めることが効果的である。二点目は、HOE が対応する光波長である。評価実験では通信波長帯用の HOE として 852nm の通信光に対応した HOE を試作した。しかし実際の自由空間光通信システムでは、光アンプの入手性の問題や地上のネットワーク機材との技術の共通化のために、 $1\mu\text{m}$  帯と  $1.55\mu\text{m}$  帯の利用が検討され、標準化が始まっている [99]。本研究で使用した材料は可視光帯でのみ感光するため、記録に用いる波数ベクトルの角度を調整して  $1.55\mu\text{m}$  の波長でブラッグ条件を満たす回折格子を作成することは困難である。一方で、近赤外の波長帯で感光するホログラフィック材料も新たに開発されており [100]、そのような材料を用いることで  $1.55\mu\text{m}$  の通信波長帯用の HOE が作成可能になると考えられる。三点目は、HOE の材料の放射

線耐性である。本評価で使用した材料はフォトポリマーであり、比較的放射線耐性が低い材料だと考えられる。人工衛星に搭載して宇宙空間で使用されることを考慮すれば、宇宙放射線に曝されても材料中のホログラムが長期間維持されることが望ましい。代替と成り得る材料としては、高エネルギーレーザーの分野で利用される、ガラスなどの無機原料を基材とした感光材料などが挙げられる [101, 102].

第四章では、波面制御素子に LCOS を採用した補償光学システムを想定し、ランダムベクトルで構成された基底を波面の再構成に用いることを提案した。まず、ランダムベクトルを要素に持つ基底行列で、任意のベクトルを再構成可能であることを確認した。次に、補償光学システムのシミュレータにおいて、MVM の基底としてランダムベクトルで構成された基底と、Zernike パターンで構成された基底でそれぞれ大気ゆらぎで歪んだ波面を補正するモンテカルロシミュレーションを行った。Strehl 比による評価において波面の再構成に用いた基底ベクトルが Zernike パターンによるものだと最大の Strehl 比は 0.72、ランダムベクトルで構成される基底だと最大の Strehl 比は 0.77 であった。また、Zernike パターンで構成される基底では、基底の数を増やすに従ってモードパターンの空間周波数帯域も広がり、SHWFS で検出できる空間周波数帯域を超えた帯域を持つパターンを基底ベクトルとして使用すると、Strehl 比が低下することが確認された。一方で、ランダムベクトルで構成された基底行列による波面の再構成では、空間周波数帯域による制限と関係なく、再構成に使用する基底ベクトルの数を増加させることができることが確認された。これは、ランダムベクトルによって構成される基底を考慮に入れることで、波面センサの要素数に対して波面制御素子の要素素子の数が多い構成を採る場合など、多様な条件下での補償光学システムの設計の自由度を高めることに繋がる。従って、本研究では単に DM を LCOS で置き換えるだけではなく、自由空間光通信システムにおける補償光学システムの設計自由度を拡張し、通信速度の向上や装置の簡易化に資する知見を得られたと考える。

本研究で得られた成果から期待される次なる研究の一つは、補償光学と HOE を組み合わせた受信光学系の構築とその評価である。本論文で指摘されたように、HOE を照明する通信光の波面歪みは回折効率と SMF への結合効率の低下の原因となる。そこで、例えば、波面歪みを補正する補償光学システムを HOE の前段に設置し、HOE の回折効率の向上を図る構成が考えられる。補償光学システムはフィードバックシステムであるため遅延が発生するが、HOE を照明する光波が平面波により近づくと期待できる。そして、補償光学システムの遅延によって取り残された波面歪みが受信光強度の変動に与える影響を HOE で抑圧する。本来は完全に受動的な構成を採ることが理想であるが、このような構成は、精追尾機構の HOE による代替と補償光学システムでの LCOS の採用を組み合わせた本研究の成果を活かした、より実践的な受信光学系の構成の一つであると考えられる。

補償光学システムをも受動的な仕組みで代替した理想的な受信光学系を構築する方策としては、例えば、本研究で行ったランダムパターンを波面として多重記録した HOE などによって、一定の効果が得られると予想される。しかし、単純にホログラムを多重記録する方法では、既に考察した通り回折効率の問題が発生する。また、ホログラムの光学的特性は材料に強く依存するため、任意の波面が多重記録されたホログラムの回折効率を解析的に解くことは難しい。この解析を効果的か

つ能率的に行える数値解析手法を開発することによって、体積型 HOE の設計手法に関する研究はより進展するものと考えられる。一方で材料の観点からは、吸収が少なく、記録が容易で、記録したホログラムが安定する材料の出現によって、エネルギー的により高効率な HOE が作成可能になることを期待する。

# 謝辞

私を自由空間光通信と光学の世界へ導き、ホログラムや自由空間光通信の魅力を存分に感じるための機会と環境を、そして日々の厚いご指導により研究を楽しむための基礎力を頂いた総合理工学研究科の高山佳久教授に深い感謝を申し上げます。

本研究の HOE についての検討は国立研究開発法人情報通信研究機構との連携によって行われました。SLM に表示する CGH の計算手法を中心として計算手法や計算機について多大な議論とご助言を頂いた同機構の市橋保之氏に深く感謝いたします。

HOE 作成・評価のための光学系の構築、HOE の記録手法などホログラムの理論と実際について多大な議論とご助言を頂いた同機構の涌波光喜氏に深く感謝いたします。

光波の複素振幅分布の計測と解析についての議論を通して、本研究の実施に必要な様々な視点やご指摘を頂いた同機構の田原樹氏に深く感謝いたします。

同機構で私が活動するための環境を作って頂き、常に研究の進行を支えて頂いた同機構の大井隆太郎氏に深く感謝いたします。

本研究が開始された当時に私が同機構で活動するきっかけを頂き、チームに迎えて下さった徳島大学の山本健詞教授(当時、情報通信研究機構)に深く感謝いたします。

本研究の補償光学についての検討は国立天文台との連携によって行われました。補償光学の理論・シミュレーション・実験に至るまで、多大な議論とご助言、ご指導によって支えて頂きました大学共同利用機関法人自然科学研究機構国立天文台の早野裕教授に深く感謝いたします。

本研究が根ざす自由空間光通信の分野において、日本を代表する宇宙機関としての視点から見た背景や、人工衛星の運用の実際について、多大な議論とご助言を頂いた国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構の向井達也氏に深く感謝いたします。

大気中を伝搬する通信光が大気のゆらぎによって受ける影響を、実感を持って知る実験の機会を頂いた、宇宙航空研究開発機構の石井寛一氏に深く感謝いたします。

HOE を製作する過程において、製作した HOE の品質を確認・向上するための実験に協力して頂いた高山研究室の後輩、植田優基氏に感謝いたします。

私をワーキングスチューデントとして迎えて下さり、本論文を執筆するための時間を捻出することを快諾し日々励まして頂いた、ドイツ Mynaric 社の CTO Joachim Horwath 氏、Nicola Tylar 氏に深く感謝いたします。I gratefully acknowledge Mr. Joachim Horwath and Dr. Nicola Tylar for admitting me to join Mynaric as a part of collaboration with Tokai University and



for allowing me to write this thesis.

私に科学技術の面白さと論理的思考の大切さを教え、学問を志すための素地を与え、そして何より命を授け今日まで育ててくれた両親に心からの感謝をいたします。

## 参考文献

- [1] M. Toyoshima, “Trends in satellite communications and the role of optical free-space communications,” *Journal of Optical Networking*, vol. 4, pp. 300–311, 2005.
- [2] 島田政明, 黒田知紀, 谷島正信, 小澤悟, 小川康雄, 横山幹雄, and 高橋卓, “超高速インターネット衛星 (winds) 特集 3-2 通信システム,” *情報通信研究機構季報*, vol. 53, no. 4, 2007.
- [3] B. Smutny, H. Kaempfner, G. Muehlnikel, U. Sterr, B. Wandernoth, F. Heine, U. Hildebrand, D. Dallmann, M. Reinhardt, A. Freier, R. Lange, K. Boehmer, T. Feldhaus, J. Mueller, A. Weichert, and P. Greulich, “5.6 gbps optical intersatellite communication link,” in *SPIE LASE: Lasers and Applications in Science and Engineering*, 2009.
- [4] D. L. Fried, “Scintillation of a ground-to-space laser illuminator,” *Journal of the Optical Society of America*, vol. 57, pp. 980–983, 1967.
- [5] P. O. Minott, “Scintillation in an earth-to-space propagation path,” *Journal of the Optical Society of America*, vol. 62, pp. 885–888, 1972.
- [6] K. ARAKI and Y. ARIMOTO, “An overview of laser communications experiments demonstration,” *Review of The Communications Research Laboratory*, vol. 43, pp. 493–520, 1997.
- [7] 有本好徳, 豊嶋守生, 豊田雅宏, 高橋鉄雄, 鹿谷元一, and 荒木賢一, “ETS-VI を用いた双方向レーザー伝送実験,” in *電子情報通信学会総合大会*, 1995.
- [8] T. Tolker-Nielsen and G. Oppenhauser, “In-orbit test result of an operational optical intersatellite link between artemis and spot4, silex,” in *Free-Space Laser Communication Technologies XIV*, 2002.
- [9] A. Alonso, M. Reyes, and Z. Sodnik, “Performance of satellite-to-ground communications link between ARTEMIS and the optical ground station,” in *Optics in Atmospheric Propagation and Adaptive Systems VII* (J. D. Gonglewski and K. Stein, eds.), SPIE, nov 2004.
- [10] T. Jono, Y. Takayama, K. Shiratama, I. Mase, B. Demelenne, Z. Sodnik, A. Bird, M. Toyoshima, H. Kunimori, D. Giggenbach, N. Perlot, M. Knapek, and K. Arai, “Overview of the inter-orbit and orbit-to-ground laser communication demonstration by oicets,” in *Free-Space Laser Communication Technologies XIX and Atmospheric*

*Propagation of Electromagnetic Waves*, 2007.

- [11] N. Perlot, M. Knappek, D. Giggenbach, J. Horwath, M. Brechtelsbauer, Y. Takayama, and T. Jono, “Results of the optical downlink experiment KIODO from OICETS satellite to optical ground station oberpfaffenhofen (ogs-op),” in *Free-Space Laser Communication Technologies XIX and Atmospheric Propagation of Electromagnetic Waves*, 2007.
- [12] Z. Sodnik, H. Smit, M. Sans, D. Giggenbach, P. Becker, R. M. Calvo, C. Fuchs, I. Zayer, M. Lanucara, K.-J. Schulz, J. Widmer, F. Arnold, A. Alonso, and I. Montilla, “Results from a lunar laser communication experiment between nasa ’ s laadee satellite and esa ’ s optical ground station,” in *International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS)*, 2014.
- [13] Y. Koyama, M. Toyoshima, Y. Takayama, H. Takenaka, K. Shiratama, I. Mase, and O. Kawamoto, “Sota:small optical transponder for micro-satellite,” in *International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS)*, 2011.
- [14] H. Takenaka, D. Kolev, Y. Koyama, M. Akioka, Y. Munemasa, H. Kunimori, and M. Toyoshima, “Experimental results of satellite-to-ground laser communications link through atmospheric turbulence using sota,” in *International Conference on Space Optics (ICSO)*, 2016.
- [15] A. U. Chaudhry and H. Yanikomeroglu, “Free space optics for next-generation satellite networks,” *IEEE Consumer Electronics Magazine*, pp. 1–1, 2020.
- [16] 竹中秀樹 and 豊嶋守生, “地上 – 衛星間光通信回線を用いた精追尾機構の動作実証,” in **電子情報通信学会技術報告**, vol. 109 of *SANE2009-29*, pp. 81–85, 2009.
- [17] Y. Koyama, E. Morikawa, H. Kunimori, K. Shiratama, and Y. Yasuda, “Components development for nels optical terminal,” in *Lasers and Applications in Science and Engineering*, 2005.
- [18] S. Shimizu, K. Fukushima, and K. Kodeki, “Development of fine pointing mechanism for optical inter-satellite communication,” in *International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS)*, 2014.
- [19] T. Yamashita, M. Morita, M. Shimizu, D. Eto, K. Shiratama, and S. Murata, “The new tracking control system for free-space optical communications,” in *International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS)*, 2011.
- [20] E. A. Swanson and J. K. Roberge, “Design considerations and experimental results for direct-detection spatial tracking systems,” *Optical Engineering*, vol. 28, jun 1989.
- [21] G. C. Loney, “Design and performance of a small two-axis high-bandwidth steering mirror,” SPIE, feb 1991.
- [22] J. M. Hilker, G. Kanga, and K. Kinnear, “Line-of-sight kinematics and corrections for fast-steering mirrors used in precision pointing and tracking systems,” in *Airborne Intelligence, Surveillance, Reconnaissance (ISR) Systems and Applications XI* (D. J.

- Henry, D. A. Lange, D. L. von Berg, S. D. Rajan, T. J. Walls, and D. L. Young, eds.), SPIE, jun 2014.
- [23] H. Chaudhary, S. Khatoon, R. Singh, and A. Pandey, “Fast steering mirror for optical fine pointing applications: A review paper applications: A review paper,” in *2018 3rd International Innovative Applications of Computational Intelligence on Power, Energy and Controls with their Impact on Humanity (CIPECH)*, IEEE, nov 2018.
- [24] 有本好徳, シングルモードファイバ結合による超高速空間光通信方式の研究. PhD thesis, 電気通信大学, 2008.
- [25] D. Kolev, K. Shiratama, H. Takenaka, A. Carrasco-Casado, Y. Saito, and M. Toyoshima, “Research and development of an optical ground station supporting both GEO and LEO-to-ground links [international communications satellite systems conference],” in *Advances in Communications Satellite Systems. 37th International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC-2019)*, Institution of Engineering and Technology, 2019.
- [26] Y. Takayama, H. Kunimori, H. Takenaka, Y. Koyama, and M. Toyoshima, “Studies for simplified optical ground station,” in *Technical Committee on Satellite Telecommunications (SAT)*, 2012.
- [27] K. J. Grant, K. A. Mudge, B. A. Clare, A. S. Perejma, and W. M. Martinsen, “Maritime laser communications trial 98152-19703,” tech. rep., 2012.
- [28] M. W. Wright, J. F. Morris, J. M. Kovalik, K. S. Andrews, M. J. Abrahamson, and A. Biswas, “Adaptive optics correction into single mode fiber for a low earth orbiting space to ground optical communication link using the OPALS downlink,” *Optics Express*, vol. 23, p. 33705, dec 2015.
- [29] E. Miller, K. Birnbaum, C.-C. Chen, A. Grier, M. Hunwardsen, and D. Jandrain, “Fine pointing and tracking concepts for optical intersatellite links,” in *2017 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS)*, IEEE, nov 2017.
- [30] R. H. Tyson, *Principles of Adaptive Optics*. CRC Press, 4th ed., 2016.
- [31] J. Ma, Y. Jiang, L. Tan, S. Yu, and W. Du, “Influence of beam wander on bit-error rate in a ground-to-satellite laser uplink communication system,” *Optics Letters*, vol. 33, p. 2611, nov 2008.
- [32] J. Ding, M. Li, M. Tang, Y. Li, and Y. Song, “BER performance of MSK in ground-to-satellite uplink optical communication under the influence of atmospheric turbulence and detector noise,” *Optics Letters*, vol. 38, p. 3488, sep 2013.
- [33] M. Li, M. Tang, B. Li, X. Zhang, Y. Song, and J. Yang, “Investigation on performance of OOK, DPSK, QDPSK in a space laser uplink communication system with the consideration of beam wander,” in *2015 International Conference on Wireless Communications & Signal Processing (WCSP)*, IEEE, oct 2015.
- [34] T. Ando and E. Shimizu, “Head-mounted display using holographic optical element,” in

- Three-Dimensional Video and Display: Devices and Systems: A Critical Review*, SPIE, feb 2001.
- [35] I. KASAI, Y. TANIJIRI, T. ENDO, and H. UEDA, “A practical see-through head mounted display using a holographic optical element,” *Optical Review*, vol. 8, pp. 241–244, jul 2001.
- [36] A. Okamoto, K. Morita, Y. Wakayama, J. Tanaka, and K. Sato, “Mode division multiplex communication technique based on dynamic volume hologram and phase conjugation,” in *Micro-Optics 2010* (H. Thienpont, P. V. Daele, J. Mohr, and H. Zappe, eds.), SPIE, apr 2010.
- [37] Y. Wakayama, A. Okamoto, K. Kawabata, A. Tomita, and K. Sato, “Mode demultiplexer using angularly multiplexed volume holograms,” *Optics Express*, vol. 21, p. 12920, may 2013.
- [38] K. Wakunami, P.-Y. Hsieh, R. Oi, T. Senoh, H. Sasaki, Y. Ichihashi, M. Okui, Y.-P. Huang, and K. Yamamoto, “Projection-type see-through holographic three-dimensional display,” *Nature Communications*, vol. 7, oct 2016.
- [39] B. J. Jackin, L. Jorissen, R. Oi, J. Y. Wu, K. Wakunami, M. Okui, Y. Ichihashi, P. Bekaert, Y. P. Huang, and K. Yamamoto, “Digitally designed holographic optical element for light field displays,” *Optics Letters*, vol. 43, p. 3738, jul 2018.
- [40] H. Kogelnik, “Coupled wave theory for thick hologram gratings,” *The Bell System Technical Journal*, vol. 48, 1969.
- [41] Y. Munemasa, Y. Saito, A. Carrasco-Casado, P. V. Trinh, H. Takenaka, T. Kubo-oka, K. Shiratama, and M. Toyoshima, “Feasibility study of a scalable laser communication terminal in NICT for next-generation space networks,” in *International Conference on Space Optics — ICSSO 2018* (N. Karafolas, Z. Sodnik, and B. Cugny, eds.), SPIE, jul 2019.
- [42] G. ming Dai, “Modal wave-front reconstruction with zernike polynomials and karhunen–loève functions,” *Journal of the Optical Society of America A*, vol. 13, p. 1218, jun 1996.
- [43] O. Soloviev and G. Vdovin, “Estimation of the total error of modal wavefront reconstruction with zernike polynomials and hartmann-shack test,” in *5th International Workshop on Adaptive Optics for Industry and Medicine* (W. Jiang, ed.), SPIE, dec 2005.
- [44] F. Dai, F. Tang, X. Wang, O. Sasaki, and P. Feng, “Modal wavefront reconstruction based on zernike polynomials for lateral shearing interferometry: comparisons of existing algorithms,” *Applied Optics*, vol. 51, p. 5028, jul 2012.
- [45] Z. Hosseinimakarem, A. D. Davies, and C. J. Evans, “Zernike polynomials for mid-spatial frequency representation on optical surfaces,” in *Reflection, Scattering, and Diffraction from Surfaces V* (L. M. Hanssen, ed.), SPIE, sep 2016.

- [46] J. H. Shapiro, “Computational ghost imaging,” *Physical Review A*, vol. 78, p. 061802, dec 2008.
- [47] L. C. Andrews and R. L. Phillips, *Laser beam propagation through random media*. Society of Photo Optical, 2005.
- [48] A. N. Kolmogorov, “The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large reynolds numbers,” *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 434, pp. 9–13, jul 1991.
- [49] L. C. Andrews, *Field Guide to Atmospheric Optics*, vol. FG02. SPIE, 2004.
- [50] M. G. Miller and P. L. Zieske, “Turbulence environment characterization,” tech. rep., United States Department of Defense, 1979.
- [51] R. L. Phillips, “Strehl ratio and scintillation theory for uplink gaussian-beam waves: beam wander effects,” *Optical Engineering*, vol. 45, p. 076001, jul 2006.
- [52] K. A. Mudge, K. K. M. B. D. Silva, B. A. Clare, K. J. Grant, and B. D. Nener, “Scintillation index of the free space optical channel: Phase screen modelling and experimental results,” in *2011 International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS)*, IEEE, may 2011.
- [53] 豊嶋守生, 久利敏明, クラウスヴェルナー, 豊田雅宏, 竹中秀樹, 荘司洋三, 高山佳久, 小山善貞, 國森裕生, 城野 隆, 山川史郎, and 荒井功恵, “NICT 光地上局レーザ通信システム概要と地上–衛星間レーザ通信実験,” *国立研究開発法人情報通信研究機構 季報*, vol. 58, no. 1, pp. 45–65, 2012.
- [54] L. C. Andrews, R. L. Phillips, and P. T. Yu, “Optical scintillations and fade statistics for a satellite-communication system,” *Applied Optics*, vol. 34, p. 7742, nov 1995.
- [55] L. C. Andrews, R. L. Phillips, and C. Y. Young, *Laser Beam Scintillation with Applications*. SPIE, jul 2001.
- [56] 豊田雅宏 and 小山善貞, “光衛星間通信実験衛星 oicets 搭載光通信機器,” *日本応用物理学会 フォトニクス分科会誌 光学*, vol. 28, no. 7, pp. 372–377, 1999.
- [57] 竹中秀樹, *低軌道衛星–地上局間光通信回線における高品質化に関する研究*. PhD thesis, 電気通信大学, 2014.
- [58] H. Takenaka, M. Toyoshima, and Y. Takayama, “Experimental verification of fiber-coupling efficiency for satellite-to-ground atmospheric laser downlinks,” *Optics Express*, vol. 20, p. 15301, jun 2012.
- [59] B. E. Vyhnalek, S. A. Tedder, and J. M. Nappier, “Performance and characterization of a modular superconducting nanowire single photon detector system for space-to-earth optical communications links,” in *SPIE LASE*, 2018.
- [60] O. Guyon, B. A. Mazin, M. P. Fitzgerald, D. Mawet, C. Marois, A. Skemer, J. Lozi, and J. Males, “Wavefront control architecture and expected performance for the TMT planetary systems imager,” in *Adaptive Optics Systems VI* (D. Schmidt, L. Schreiber,

- and L. M. Close, eds.), SPIE, jul 2018.
- [61] M. Cayrel, “E-ELT optomechanics: overview,” in *Ground-based and Airborne Telescopes IV* (L. M. Stepp, R. Gilmozzi, and H. J. Hall, eds.), SPIE, sep 2012.
- [62] Y. Minowa, Y. Hayano, S. Oya, M. Watanabe, M. Hattori, O. Guyon, S. Egner, Y. Saito, M. Ito, H. Takami, V. Garrel, S. Colley, T. Golota, and M. Iye, “Performance of subaru adaptive optics system AO188,” in *Adaptive Optics Systems II* (B. L. Ellerbroek, M. Hart, N. Hubin, and P. L. Wizinowich, eds.), SPIE, jul 2010.
- [63] J.-C. Siquin, A. Bastard, C. Boyer, S. Cornette, R. Cousty, B. Ellerbroek, X. Gilbert, B. Gourdet, R. Grasser, D. Groeninck, C. Guillemard, G. Herriot, A. Iannacone, A. Jeulin, A. Moreau, H. Pagès, and L. Wang, “TMT DMs final design and advanced prototyping results at cilas,” in *Adaptive Optics Systems III* (B. L. Ellerbroek, E. Marchetti, and J.-P. Véran, eds.), SPIE, sep 2012.
- [64] C. Boyer and B. Ellerbroek, “Adaptive optics program update at TMT,” in *Adaptive Optics Systems V* (E. Marchetti, L. M. Close, and J.-P. Véran, eds.), SPIE, jul 2016.
- [65] S. Hippler, “Adaptive optics for extremely large telescopes,” *Journal of Astronomical Instrumentation*, vol. 08, p. 1950001, may 2019.
- [66] K. Markus, *Adaptive Optics for the Mitigation of Atmospheric Effects in Laser Satellite-To-Ground Communications*. PhD thesis, TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN, 2011.
- [67] Y. Kaymak, R. Rojas-Cessa, J. Feng, N. Ansari, M. Zhou, and T. Zhang, “A survey on acquisition, tracking, and pointing mechanisms for mobile free-space optical communications,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 2, pp. 1104–1123, 2018.
- [68] C. Petit, N. Vedrenne, V. Michau, G. Artaud, J.-L. Issler, E. Samain, M. Toyoshima, M. Akioka, D. Kolev, Y. Munemasa, H. Takenaka, and N. Iwakiri, “Adaptive optics results with SOTA,” in *2015 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS)*, IEEE, oct 2015.
- [69] J. Zhao, Y. Zhou, B. Braverman, C. Liu, K. Pang, N. K. Steinhoff, G. A. Tyler, A. E. Willner, and R. W. Boyd, “Performance of real-time adaptive optics compensation in a turbulent channel with high-dimensional spatial-mode encoding,” *Optics Express*, vol. 28, p. 15376, may 2020.
- [70] R. K. Tyson, “Measurement of the bit-error rate of an adaptive optics, free-space laser communications system, part 2: multichannel configuration, aberration characterization, and closed-loop results,” *Optical Engineering*, vol. 44, p. 096003, sep 2005.
- [71] K. Wilson and L. Roberts, “Recent developments in adaptive optics for the lcrd optical ground station at table mountain,” 2014.
- [72] O. Keskin, P. Hampton, R. Conan, C. Bradley, A. Hilton, and C. Blain, “Woofers-tweeters

- adaptive optics test bench,” in *First NASA/ESA Conference on Adaptive Hardware and Systems (AHS06)*, IEEE, 2006.
- [73] S. K. Case, “Coupled-wave theory for multiply exposed thick holographic gratings,” *Journal of the Optical Society of America*, vol. 65, p. 724, jun 1975.
- [74] M. G. Moharam, “Cross-talk and cross-coupling in multiplexed holographic gratings,” in *Practical Holography III* (S. A. Benton, ed.), SPIE, may 1989.
- [75] J. Shamir and K. Wagner, “Generalized bragg selectivity in volume holography,” *Applied Optics*, vol. 41, p. 6773, nov 2002.
- [76] P. Chen, Y. Jin, D. He, J. Chen, J. Xu, J. Zhao, Y. Zhang, F. Kong, H. He, and J. Shao, “Design and fabrication of multiplexed volume bragg gratings as angle amplifiers in high power beam scanning system,” *Optics Express*, vol. 26, p. 25336, sep 2018.
- [77] Covestro AG, “Bayfol HX200 Data Sheet.” [https://solutions.covestro.com/-/media/covestro/solution-center/products/datasheets/imported/bayfol/bayfol-hx200\\_en\\_86194384-20033146-20033738.pdf](https://solutions.covestro.com/-/media/covestro/solution-center/products/datasheets/imported/bayfol/bayfol-hx200_en_86194384-20033146-20033738.pdf).
- [78] H. Berneth, F.-K. Bruder, T. Fäcke, D. Jurbergs, R. Hagen, D. Hönel, T. Rölle, and G. Walze, “Bayfol HX photopolymer for full-color transmission volume bragg gratings,” in *Practical Holography XXVIII: Materials and Applications* (H. I. Bjelkhagen and V. M. Bove, eds.), SPIE, feb 2014.
- [79] G. Dennis, “A new microscopic principle,” *Nature*, vol. 161, pp. 777–778, 1948.
- [80] 辻内順平, ホログラフィー. 裳華房, 1994.
- [81] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics [3rd Edition]*. Roberts & Company, 2005.
- [82] 高山佳久, フォトリフラクティブ結晶を用いた4波混合による位相共役光発生の高効率化とその制御に関する研究. PhD thesis, 北海道大学, 1998.
- [83] S. K. Case, “Coupled-wave theory for multiply exposed thick holographic gratings,” *Journal of the Optical Society of America*, vol. 65, p. 724, jun 1975.
- [84] 岡本淳, 三島瑛人, and 桜庭一郎, “4光波パラメトリック映像アップコンバータにおける結合波動方程式のフーリエ変換,” *北海道大学工学部研究報告*, vol. 142, pp. 45–52, 1988.
- [85] H. Berneth, F. K. Bruder, T. Fäcke, R. Hagen, D. Hönel, D. Jurbergs, T. Rölle, and M.-S. Weiser, “Holographic recording aspects of high-resolution bayfol HX photopolymer,” in *Practical Holography XXV: Materials and Applications* (H. I. Bjelkhagen, ed.), SPIE, feb 2011.
- [86] J. IKEDA, “Development of photopolymer materials for holographic memory,” *The Review of Laser Engineering*, vol. 38, no. 5, pp. 363–368, 2010.
- [87] F.-K. Bruder, T. Fäcke, R. Hagen, D. Hönel, T. P. Kleinschmidt, E. Orselli, C. Rewitz, T. Rölle, and G. Walze, “Diffractive optics in large sizes: computer-generated holograms (CGH) based on bayfol HX photopolymer,” in *Advances in Display Technologies V* (L.-



- C. Chien, S.-D. Lee, and M. H. Wu, eds.), SPIE, mar 2015.
- [88] 妹尾孝憲, 三科智之, 山本健詞, 大井隆太朗, and 栗田泰市郎, “電子ホログラフィの視域角拡大技術,” *国立研究開発法人情報通信研究機構 季報*, vol. 56, pp. 31–42, 2010.
- [89] O. Bryngdahl and A. Lohmann, “Single-sideband holography,” *Journal of the Optical Society of America*, vol. 58, pp. 620–624, may 1968.
- [90] R. W. Gerchberg and W. O. Saxton, “A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures,” *Optik*, vol. 35, pp. 237–246, 1972.
- [91] M. Hacker, G. Stobrawa, and T. Feurer, “Iterative fourier transform algorithm for phase-only pulse shaping,” *Optics Express*, vol. 9, p. 191, aug 2001.
- [92] T. Morio, K. Toshiaki, K. Werner, T. Masahiro, T. Hideki, S. Yozo, T. Yoshihisa, K. Yoshisada, K. Hiroo, J. Takashi, Y. Shiro, and A. Katsuyoshi, “Overview of the laser communication system for the next optical ground station and laser communication experiments on ground-to-satellite links,” *Journal of the National Institute of Information and Communications Technology*, vol. 59, 2012.
- [93] F.-K. Bruder, F. Deuber, T. Fäcke, R. Hagen, D. Hönel, D. Jurbergs, T. Rölle, and M.-S. Weiser, “Reaction-diffusion model applied to high resolution bayfol HX photopolymer,” in *Practical Holography XXIV: Materials and Applications* (H. I. Bjelkhagen and R. K. Kostuk, eds.), SPIE, feb 2010.
- [94] N. Amitay, H. Presby, F. DiMarcello, and K. Nelson, “Optical fiber tapers—a novel approach to self-aligned beam expansion and single-mode hardware,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 5, no. 1, pp. 70–76, 1987.
- [95] T. Jono, Y. Takayama, N. Kura, K. Ohinata, Y. Koyama, K. Shiratama, Z. Sodnik, B. Demelenne, A. Bird, and K. Arai, “OICETS on-orbit laser communication experiments,” in *Free-Space Laser Communication Technologies XVIII* (G. S. Mecherle, ed.), SPIE, feb 2006.
- [96] C. Fuchs, F. Moll, D. Giggenbach, C. Schmidt, J. Keim, and S. Gaisser, “OSIRISv1 on flying laptop: Measurement results and outlook,” in *2019 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS)*, IEEE, oct 2019.
- [97] L. N. Thibos, R. A. Applegate, J. T. Schwiegerling, and R. W. and, “Standards for reporting the optical aberrations of eyes,” in *Vision Science and its Applications*, OSA, 2000.
- [98] N. Zon, O. Srour, and E. N. Ribak, “Hartmann-shack analysis errors,” *Optics Express*, vol. 14, no. 2, p. 635, 2006.
- [99] The Consultative Committee for Space Data Systems (CCSDS), “Research and Development for Space Data System Standards OPTICAL HIGH DATARATE (HDR) COMMUNICATION—1064 NM (CCSDS 141.11-O-1),” 2018.
- [100] F.-K. Bruder, J. Frank, S. Hansen, A. Lorenz, C. Manecke, R. Meisenheimer, J. Mills,

- L. Pitzer, I. Pochorovski, and T. Rölle, “Expanding the property profile of bayfol HX(r) film towards NIR recording and ultra-high index modulation,” in *Practical Holography XXXV: Displays, Materials, and Applications* (H. I. Bjelkhagen and S.-H. Lee, eds.), SPIE, mar 2021.
- [101] Z. Li, R. Tan, C. Xu, and L. Li, “A novel external cavity with double volume bragg gratings for rubidium laser pumping,” in *High-Power Lasers and Applications VI* (U. N. Singh, D. Fan, J. Yao, and R. F. Walter, eds.), SPIE, nov 2012.
- [102] I. V. Ciapurin, L. B. Glebov, and V. I. Smirnov, “Modeling of gaussian beam diffraction on volume bragg gratings in PTR glass,” in *Practical Holography XIX: Materials and Applications* (T. H. Jeong and H. I. Bjelkhagen, eds.), SPIE, apr 2005.

# 業績リスト

## 筆頭

### 論文・紀要

- [1] Hiroki Yamashita, Koki Wakunami, Yasuyuki Ichihashi, Yoshihisa Takayama, “Application of Holograms for Optical Receiver of Free-Space Optical Communications” , The Review of Laser Engineering, Vol. 47, No.12, 2019.
- [2] Hiroki Yamashita, Koki Wakunami, Yasuyuki Ichihashi, Kenji Yamamoto, Yoshihisa Takayama,”Fiber coupling characteristics of Holographic Optical Element for Free-space Optical Communications”, Journal of Japan Applied Physics, Vol.58, No.SJJA03, pp.SJJA03-01 - SJJA03-06, 2019.
- [3] 山下泰輝, 涌波光喜, 市橋保之, 山本健詞, 高山佳久, ”ホログラムの自由空間光通信装置への適用に関する検討”, 東海大学紀要情報通信学部, Vol.10, No.2, pp9-13, 2017.

### 国際会議

- [1] Hiroki Yamashita, Yoshihisa Takayama, Yutaka Hayano, “The use of random phase patterns composed of huge number of elements for wavefront reconstruction in adaptive optics” , SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation, 114481Q, Online, Dec. 2020.
- [2] Hiroki Yamashita, Koki Wakunami, Yasuyuki Ichihashi, Yoshihisa Takayama, “Studies on fiber coupling characteristics of received beam by transmission-type holographic optical element for free-space optical communications” , 24th Microoptics Conference, P-81, pp.258-259, Toyama Japan, Nov. 2019.
- [3] Hiroki Yamashita, Yoshihisa Takayama, “Implementation of the method for estimating propagation direction of laser beam transmitted from ground to satellite” , 37th International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC), #130, Okinawa Japan, Nov. 2019.
- [4] Hiroki Yamashita, Koki Wakunami, Yasuyuki Ichihashi, Kenji Yamamoto, Yoshihisa Takayama,”Studies on fiber coupling characteristics of holographic optical element for free-

- space optical communications”, in Proceedings of 23rd MICROOPTICS CONFERENCE, P-41, Taipei Tiwan, Oct. 2018.
- [5] Hiroki Yamashita, Koki Wakunami, Yasuyuki Ichihashi, Kenji Yamamoto, Yoshihisa Takayama, ”A proposition of holographic reception in free-space optical communications”, in Proceedings of 23rd KaConference, #48, Trieste Italy, Oct. 2017.
- [6] Hiroki Yamashita, Yoshihisa Takayama, ”A Studies on Beam Propagation Simulations for Optical Systems of Free Space Optical Channel”, in Proceedings of 31th International Symposium on Space Technology and Science, 2017-j-27p, Ehime Japan, Jun. 2017.

## 国内発表

- [1] 山下泰輝, 涌波光喜, 市橋保之, 高山佳久, ”空間光通信装置の受信光学系へ適用する HOE の設計”, 第 20 回レーザー学会東京支部研究会, Mar. 2020.
- [2] 山下泰輝, 高山佳久, 高橋成五, ”レーザー光の伝搬による水中の屈折率構造関数の推定に関する検討”, 2020 年 電子情報通信学会 総合大会, B-10-23, Mar. 2020.
- [3] 山下泰輝, 涌波光喜, 市橋保之, 山本健詞, 高山佳久, ”空間光通信装置へ適用するホログラフィック光学素子に関する理論的検討”, 第 32 回 コンテンポラリーオプティクス研究会予稿集, Dec. 2018.
- [4] 山下泰輝, 植田優基, 涌波光喜, 市橋保之, 山本健詞, 高山佳久, ”超小型光通信装置のためのホログラフィック光学素子の研究”, 国立研究開発法人情報通信研究機構 オープンハウス 2018, Jun. 2018.
- [5] 山下泰輝, 高山佳久, ”ビーム伝搬シミュレーションにおける波動光学と幾何光学の組み合わせに関する一検討”, 第 31 回 コンテンポラリーオプティクス研究会予稿集, Dec. 2017.

## 受賞

- [1] 国立研究開発法人情報通信研究機構 オープンハウス 2021 学生による動画セッション ベストプレゼンテーション賞, Jun. 2021.
- [2] 国立研究開発法人情報通信研究機構 オープンハウス 2019 学生によるポスターセッション 電磁波研究所所長賞, Jun. 2019.
- [3] 国立研究開発法人情報通信研究機構 オープンハウス 2018 学生によるポスターセッション 奨励賞, Jun. 2018.

## 共著

### 査読付き国際会議

- [1] Masatsuna Yamazaki, Hiroki Yamashita, Yoshihisa Takayama, Chiemi Fujikawa, Tomoko Nakayama, and Kashiko Kodate, "Manipulation of received beam for free-space optical communications of intermediate distance", 24th Microoptics Conference (MOC), P-58, pp.212-213, Toyama Japan, 2019.
- [2] Eiji Taira, Hiroki Yamashtia, Yoshihisa Takayama, "Estimation of relationship between data transmission quality and atmospheric effects in free-space laser communication", in Proceedings of 31th International Symposium on Space Technology and Science, 2017-j-28p, Ehime Japan, Jun. 2017.

### 国内発表

- [1] 大峯春佳, 山下泰輝, 奥澤宏輝, 高橋成五, 高山佳久, "水中光通信における日照による受信光到来角変動の検討", 2019年 電子情報通信学会 ソサエティ大会, ABS-1-17, Sep. 2019.
- [2] 山崎 優綱, 山下泰輝, 涌波光喜, 市橋保之, 高山佳久, "HOE を用いて作成した MASS の入射角度依存性の検討", 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2019, 3pP9, Dec. 2019.
- [3] 山崎優綱, 山下泰輝, 高山佳久, "光波伝搬計算における伝搬距離による計算結果の比較", レーザー学会学術講演会 第 39 回年次大会予稿集, 13-21, Jun. 2019.
- [4] 金崎真也, 植田優基, 山下泰輝, 高山佳久, 藤川知栄美, "光位置センサーを用いた空間伝送光の計測と通信リンクの検討", レーザー学会学術講演会 第 39 回年次大会予稿集, 14-13, Jun. 2019.
- [5] 植田優基, 山下泰輝, 涌波光喜, 市橋保之, 山本健詞, 高山佳久, "ホログラフィック光学素子における回折効率のブリーチング条件への依存性", レーザー学会学術講演会 第 39 回年次大会予稿集, 14-9, Jun. 2019.
- [6] 國井さやか, 山下泰輝, 高山佳久, "光を使った音声伝搬装置の周波数特性の評価", 第 32 回 コンテンポラリーオプティクス研究会予稿集, Dec. 2018.
- [7] 山崎優綱, 山下泰輝, 高山佳久, "反射望遠鏡における送信光の伝搬計算", 第 32 回 コンテンポラリーオプティクス研究会予稿集, Dec. 2018.
- [8] 井上英美, 山下泰輝, 谷田部和貴, 高山佳久, 早野裕, "乱数パターンを用いた波面制御素子の制御行列生成", 日本光学会年次学術講演会講演予稿集, 1pD8, Nov. 2018.
- [9] 野村優, 山下泰輝, 高山佳久, "システム間干渉を抑えるコミュニケーションシステムの検討", 第 31 回 コンテンポラリーオプティクス研究会予稿集, Dec. 2017.

## 著作権表示

図 4.3, 図 4.7, 図 4.8 は, 業績リスト-筆頭-国際会議 [1] 及び以下に示す文献からの引用である. Hiroki Yamashita, Yoshihisa Takayama, Yutaka Hayano, “The use of random phase patterns composed of huge number of elements for wavefront reconstruction in adaptive optics” , Proc. SPIE 11448, Adaptive Optics Systems VII, 114481Q (December 2020). DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2561208> , Copyright 2020 Society of Photo Optical Instrumentation Engineers (SPIE). One print or electronic copy may be made for personal use only. Systematic reproduction and distribution, duplication of any material in this publication for a fee or for commercial purposes, or modification of the contents of the publication are prohibited.