

東海大学大学院令和4年度博士論文

空間光通信における
通信品質の向上に関する研究

中山 朋子

目次

第1章	序論	1
1.1.	研究背景	1
1.2.	研究目的	8
1.3.	本論文の構成	9
第2章	空間光通信と光の空間における伝搬	13
2.1.	衛星-光地上局空間光通信と Unmanned aerial vehicle (UAV)-光地上局間空間通信との比較	13
2.2.	空間光通信システムが光の空間の伝搬により受ける影響.....	14
2.2.1.	大気ゆらぎ	14
2.2.2.	光の強度変動	17
2.2.3.	空間伝搬損	19
2.2.4.	指向誤差	21
2.3.	大気ゆらぎの影響の低減手法	23
2.3.1.	補償光学	23
2.3.2.	誤り訂正符号	24
2.3.3.	電波通信との併用	24
2.3.4.	開口平均効果	24
2.3.5.	空間ダイバシティ	24
2.4.	まとめ	28
第3章	複数ビーム生成素子を適応した送信機能	31
3.1.	従来の複数ビーム生成法	31
3.2.	デュプリケート光学系の特性	34
3.3.	大気ゆらぎの影響低減のための複数ビーム生成素子の設計.....	37
3.4.	複数ビーム生成素子を用いた大気ゆらぎの影響低減実験.....	41

3.4.1.	複数ビーム生成素子を適応した送信器の構築.....	41
3.4.2.	複数ビーム生成素子を用いたビーム伝送実験.....	43
3.5.	ビーム拡がり角の制御のための複数ビーム生成素子.....	47
3.6.	複数ビーム生成素子によるビーム拡がり角の制御の検討.....	50
3.7.	まとめ	55
第4章	受信光の焦点制御を適応した受信機能.....	57
4.1.	UAV の大容量通信の要求	57
4.2.	通信距離の変化に伴う課題	59
4.3.	受信光の焦点制御の提案	60
4.3.1.	受信光の焦点制御.....	60
4.3.2.	液晶空間光変調器(LCOS-SLM).....	62
4.3.3.	受信光の焦点変動	62
4.3.4.	焦点制御の実証	63
4.4.	焦点制御の実証実験	67
4.5.	まとめ	72
第5章	指向誤差を考慮した通信品質の推定.....	73
5.1.	指向誤差に伴う課題	73
5.2.	指向誤差に対する BER の算出.....	74
5.3.	指向誤差の許容範囲	78
5.4.	まとめ	82
第6章	結論.....	83
6.1.	本研究の結論	83
6.2.	将来の展望	86
	謝辞.....	87
	参考文献.....	89
	研究業績.....	99

第1章 序論

1.1. 研究背景

情報社会(Society 4.0)から、Society 5.0 への移行が標榜される中、仮想空間と現実空間の融合システムにおいても、情報の役割は今まで以上に大切なものとなることが予想される[9]。現在、日常生活では、インターネットショッピング、クレジットカードや QR コードなどでの支払い・決済、地図・ナビゲーションの利用、情報検索・ニュース閲覧による情報収集、また、動画や音楽配信等による動画、音楽、ゲームといったエンターテインメント、SNS(Social networking service)を使ったコミュニケーションが一般的になっている[10]。また、企業では、ファイル保管・データ共有、情報共有など、クラウドサービスの活用も盛んになった[11]。さらに、2019年12月に確認され世界的なパンデミックとなり、今も流行が続いている新型コロナ感染症(COVID-19)の感染を避けるため、テレワークの導入やオンライン教育の実施、オンライン診療の規制緩和が行われた。また、行政などにより毎日、ウイルス感染者数、検査実施件数、ビッグデータを用いた人流データなどが発信され、さらに、接触確認アプリが開発・利用された。イベントのオンライン開催の実現も模索され、音楽やスポーツのオンライン配信、仮想現実(Virtual reality : VR)による観光などが行われた[12], [13]。

上記のような情報化社会は、情報通信技術(Information and communication technology : ICT)の進歩により実現している。通信による情報の「伝達」と「分配」の機能に、コンピュータによる情報の「蓄積」と「処理」という機能が加わった高度な ICT である。近年のコンピュータの処理能力の向上には目を見張るものがあり、更なる高速伝送の要求につながっている[14]。2020年3月末、我が国の光ファイバ整備率(世帯カバー率)は99.1%に達しており[15]、現在の我が国の ICT は光ファイバ通信によって支えられていると言える。その一方で、過疎地域や離島などの地理的にファイバ敷設が困難な地域ではその整備が遅れている。

光ファイバ通信の有線通信に対し、ワイヤレス通信はその名の通りケーブルの敷設の必要がなく、3次元の空間を自由に通信でき、移動性・可搬性があるという特長があり[16], [17]、近年、世界的に技術が高度化・利用が活発化している。また、地上と宇宙空間の人工衛星との通信はワイヤレス通信に頼らざるをえない。衛星通信における技術の高度化としては、通信衛星のデジタル化が進んでいること、利用の活発化の例としては、衛星コン

ステレーションのための多数の小型衛星の打ち上げが挙げられる[18]–[20]。地上のワイヤレス通信では、2020年に第5世代移動通信システム(5th generation mobile communication system : 5G)が導入され、Beyond 5G/第6世代移動通信システム(6th generation mobile communication system : 6G)に向けた IOWN (Innovative optical and wireless network)[21]–[23]に代表される研究開発が活発化している[24]–[26]。将来的には、衛星、航空機、無人航空機(Unmanned aerial vehicle : UAV)、船舶などの非地上系端末と、光地上局、列車等の地上系端末の様々な種類の端末要素が、図 1-1 に示すように 3次元に接続されるネットワークの実現につながると考えられる[27]–[29]。特に、ワイヤレス通信が関わる非地上系ネットワーク(Non-terrestrial networks : NTN)は、国際電気通信連合(International telecommunication union : ITU)の Beyond 5G 将来技術トレンド調査における重要な位置づけとなっている[30]。

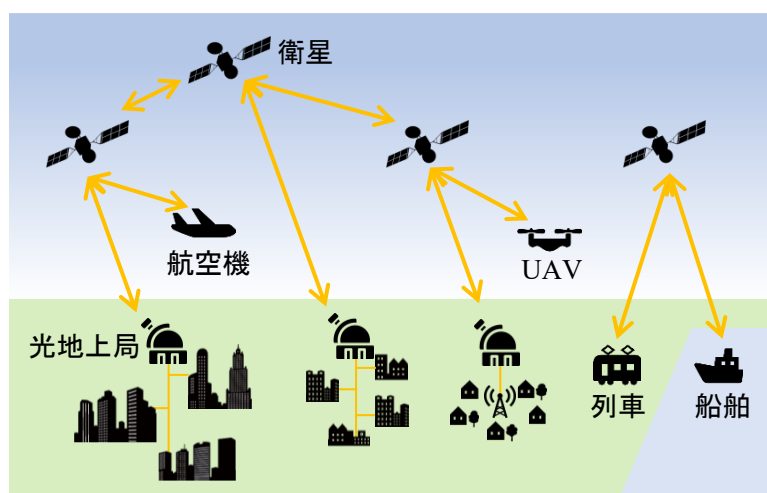


図 1-1 次世代通信ネットワーク

前述の Beyond 5G/6G の通信システムに関する研究においては、いくつかの課題がある。地上系の 5G の eMBB(enhanced mobile broadband)を達成するため、従来の 6 GHz 以上の高い周波数帯である 28 GHz 帯などの Ka 帯やミリ波帯の周波数割当が行われ、テラヘルツ帯においては合計 137 GHz の新たな周波数特定がなされている。今後、電波の周波数や帯域の確保が難しく、周波数逼迫が課題となるであろう。また、Beyond 5G/6G においては、移動体端末との通信であっても 10~100 Gbps 級の通信速度が求められている[30]。そこで、多くの衛星通信が利用している電波通信の数 100 Mbps の限界[31]を超えるための解決手法が求められる。

伝送容量の向上に関し、空間光通信は、電波と比べ波長が短いレーザ光を用いるため、指向性の鋭いビームが射出でき、光の広帯域性も利用することで、大容量の回線が提供できる。電波通信では、干渉を避けるため規制機関に周波数帯の使用許可が必要であるが、現在のところ光の周波数帯は国際的な周波数調整の制約がない。さらに、空間光通信は、アンテナ径を小さくできるため、通信装置の小型・軽量化、低消費電力を可能とする、また、指向性の鋭いビームの射出により秘匿性が高い、と期待され注目されている[32]–[36]。

しかしながら、現状では、空間光通信には実用化に向けたいくつかの課題がある。光の空間伝搬により受ける影響が引き起こす空間光通信における通信品質の低下は未だ解決されていない。すなわち、空間光通信において送信された光信号が受信器に到達するまでに受ける影響の低減を図り、実用化に向けて通信品質を高めることは非常に重要な課題である。

通信品質の低下は、信号対雑音比(Signal-to-noise ratio : SN 比)の低下、SN 比の変動により引き起こされる。また、SN 比の低下と SN 比の変動は、ビット誤り率(Bit error rate : BER)の増加を招き、SN 比の大幅な低下と SN 比の大幅な変動により、通信が不能となることがある。

SN 比の低下を招く要因として、伝搬に伴い広がった光波を有限の大きさのアンテナで受信するために生じる空間伝搬損、大気の組成分子による吸収、信号を検出する際に太陽光が入射するために生じる背景雑音、ショット雑音、熱雑音である受信器内の雑音が挙げられる。SN 比の変動は、温度と気圧の不均一性によって引き起こされる大気ゆらぎによる強度変動、移動体における風や光地上局における地震、建物の揺れなど様々な要因により引き起こされる指向誤差、また、天候が引き起こす散乱により生じる。それぞれの影響を低減するため、様々な手法が提案されている[37]が、①大気ゆらぎ、②空間伝搬損、③指向誤差は、検討が加えられているものの確実な低減にはつながっていない。

大気ゆらぎの中を伝搬した光には、受光面で強度の変動が生じる[38]。この受光面における強度変動を抑制するため、光の波面を補正する方法と複数の光の重ね合わせによる複数ビームの伝送を利用する方法がある[32]。アメリカのジェット推進研究所(Jet propulsion laboratory : JPL)、ドイツ航空宇宙センター(Deutsches zentrum für luft- und raumfahrt : DLR)、欧州宇宙機関(European space agency : ESA)、情報通信研究機構(National institute of information and communications technology : NICT)が、それぞれ保有する光地上局と低軌道衛

星である光衛星間通信実験衛星(Optical inter-orbit communications engineering test satellite : OICETS)による通信実験を行った。同じ衛星を相手に異なる環境に置かれた複数の地上局で、それぞれ時間的な受光強度ゆらぎの正規化分散であるシンチレーションインデックスが取得された[39]。

空間伝搬損の観点からの検討としては、Mushtaq らによって、受信器と送信器の距離が 5 km の空間光通信において、受信器開口の直径が 15 cm と大きく、発散角が 0.025 mrad 以下と小さい場合、数値計算により、送信器開口の直径は 5 cm 以下が適当であるという結果が得られている[40]。この損失を補償するために、Heng らは、受信アンテナの開口や送信電力を大きくするのではなく、ビーム拡がり角を制御する方法を検討している[41]。

指向誤差による影響としては、地上の建物に設置した光通信装置により計測されたビームの中心の移動は、建物への日照等による建物の揺れに起因し、最大 0.3 mrad に達し、24 時間ごとに周期的なパターンを示すことが報告されている[42]。この指向誤差による影響は、短距離の通信では広いビーム拡がり角を持つレーザ光を使用、また、長距離通信では自動追尾システムを適応することによる低減手法が紹介されている[37]。

特に、昨今の空間光通信の利用範囲の拡大に伴い、従来の通信相手との距離に対して距離の変化の割合が小さい、あるいは、距離が無限に遠いと思わせる通信だけではなく、距離の変化の割合が大きい空間光通信についての検討が要求されている。この場合、通信相手との距離変化により引き起こされる④レーザの進行方向に対する受信光の焦点位置の変動に伴う SN 比の変動という、本研究で新たに見出した課題が生じる。

本研究では、空間光通信の送信機能、受信機能、指向誤差に着目し、通信品質の向上を目指す。空間光通信の主要課題の 1 つである大気ゆらぎに加え、宇宙での通信や UAV との通信などのあらゆるワイヤレス通信が被る空間伝搬損、また、新たな検討課題である距離変化により引き起こされる受信光の焦点の変動に伴う SN 比の変動、さらに、避けられない機体の振動に伴う SN 比の低減に着目し、それぞれの課題に対して、提案・検討を行う。

それぞれの提案・検討について、具体的に述べる。まず、大気ゆらぎの影響と空間伝搬損を低減するための送信機能について検討を加える。図 1-2 に示すように、ビームが大気中を伝搬するために生じる大気ゆらぎによる影響とビームが広がって伝搬するために生じる空間伝搬損は、本論文で着目している衛星-光地上局間空間光通信と UAV-光地上局間空間光通信の両方に影響を与えるが、衛星-光地上局間空間光通信を事例に挙げ検討を行う。大気ゆらぎの影響を低減するために検討されている光の波面を補正する手法は、受信波面

- 大気ゆらぎによる強度変動
- 空間伝搬損
 ➡ 3章 複数ビーム生成素子を適応した送信機能

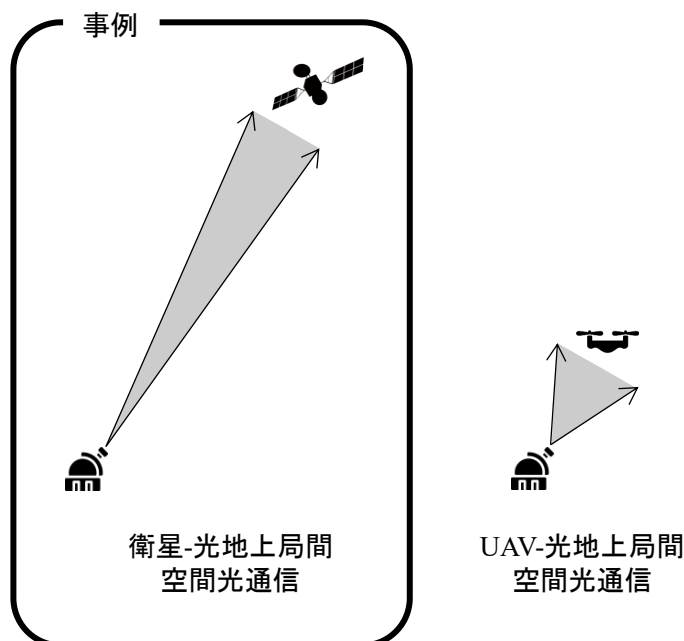


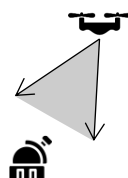
図 1-2 検討対象とした大気ゆらぎによる強度変動と空間伝搬損の影響を受ける空間光通信

を基準にして送信の波面を補正するため、通信相手の移動前後の位置を見込む角度である光行差補正角が大気の波面歪みが同等と見なせる角度である等波面離角よりも大きくなると、送信する波面の補正が効かなくなる[43], [44]。その場合、新たに波面補正の基準となるビーコンやガイドスターのようなものが移動体の前方に必要となる。もう一つの複数ビームの伝送手法は、位置変化が生じて大気ゆらぎの影響の低減が可能で、この手法のキーとなる従来の複数ビーム生成素子は反射率分布を持たせたミラーとビームスプリッタで構成された光学系を送信機能に設置したり[45]、ビームの数と同じ数のレーザと望遠鏡で設置し同一方向にビームが射出されるようにしている[46]。前者は既存の光地上局に挿入可能だが反射系のため光軸のずれが生じ、両者とも出力ビーム数の制御が容易にできず大気ゆらぎの影響に応じた柔軟な影響の低減を図ることが困難である。また、従来の送信レーザのビーム拡がり角は固定されており、自局と通信相手のそれぞれの追尾誤差、収差補正誤差、光軸誤差、距離の変化、通信相手との相対速度に依存する指向誤差に対応してお

らず、通信相手に対して十分に大きなビーム照射領域のレーザ光を送信することから、空間伝搬損が生じていた。そこで、この空間伝搬損を低減するため、指向誤差、距離、速度の変化に応じて、適切なレーザ光の拡がり角を制御するデバイスとして、ビームごとにレンズ系の位置を変える方法と、液晶を挿入し液晶の屈折率を変える方法が考えられる。しかし、前者は機械的な駆動装置を用い、後者は屈折率の変化を精密に制御する必要がある。そこで、大気ゆらぎの影響と空間伝搬損の低減を図るデバイスの実装に関するこれらの課題を解決するため、光情報処理の分野で複製像の生成に用いられてきた 2 つのアレイレンズと 2 つのレンズで構成されるデュプリケート光学系[47], [48]を複数ビーム生成素子として送信機能へ適応することを提案する。生成ビーム数や出力ビームの強度分布を光学的に制御でき、小型・軽量で、同軸配置のため既存の光学系に容易に挿入できるなど優れた特長を持っている[49], [50]。

次に、図 1-3 に示すように、UAV-光地上局間空間光通信におけるレーザの進行方向に対する受信光の焦点の変動を低減するための送信機能について検討を加える。UAV は特にリモートセンシングの分野で目覚ましい進歩を遂げており、中でも小型 UAV が幅広く適応されており[51]、UAV に搭載される画像センサの高解像度化に伴い、空間光通信の適応が検討されている[52]。また、小型 UAV との空間光通信において、光アンテナで受光した光を

- ・ **レーザ光の進行方向に対する焦点位置の変動**
 ➡ 4章 受信光の焦点制御を適応した受信機能
- ・ **指向誤差**
 ➡ 5章 指向誤差を考慮した通信品質の推定



UAV-光地上局間
空間光通信

図 1-3 検討対象としたレーザ光の進行方向に対する焦点の変動位置と指向誤差の影響を受ける空間光通信

直接光ファイバに結合、あるいは、光の検出領域が小さい受光素子を用いる場合を想定する。先に述べたように、小型 UAV との通信を含む短距離の空間光通信では、機体の振動に起因する影響の低減を図るため、ビーム拡がり角の広いレーザ光を用いる。そのため、距離変化に伴い、光ファイバに結合したり、受光素子に集光するためのレンズの焦点位置がレーザ光の進行方向に変動する。この焦点の変動に伴い、光ファイバや受光素子に入射する信号光が減少し、SN 比が低減する。これまで平行光を照射するか、あるいは、距離に対して距離変化の小さい空間光通信を仮定しており、焦点位置の変動を考慮する必要がなかった。本研究で見出された新たな課題である。そこで、小型 UAV-光地上局間光通信の距離変化に伴う信号光の減少を低減し、通信品質向上を図るため、受信機能への受信レーザ光の焦点位置の制御機能の適応を提案する。

さらに、図 1-3 に示す UAV-光地上局間空間光通信において、UAV に送受信のアンテナ軸を高精度で一致させる捕捉追尾システムの搭載が難しいため、指向誤差に着目し、指向誤差を考慮した BER の推定を行う。空中の UAV の機体は風による擾乱の影響を受けやすい。そのため、UAV の機体にランダムな振動が発生し、UAV の不安定な挙動の変化につながる [53]。小型 UAV との空間光通信において、指向性の高いレーザ光を用いて、ランダムな揺れが生じる不安定な小型 UAV に対し高品質な通信を構築するには、小型 UAV から通信相手に向け送信器がレーザ光を送信した方向と実際の通信相手の方向との角度の誤差である指向誤差を補正する機能の適応が求められる。この指向誤差を補正するシステムには様々な種類があり、それらの中から適切なシステムを選択するためには、指向精度の要求値を明らかにする必要がある。そこで、小型 UAV-光地上局間光通信における通信品質向上を図ることを目的に、指向誤差を考慮した通信品質の推定を行う。

以上を組み合わせることにより、空間光通信の通信品質の向上が実現できると考える。

本論文は、空間光通信の実用化の促進のため、通信品質の向上を目指し、送信機能、受信機能、指向誤差に着目し、デバイスの実装、通信相手との距離変化、機体の不安定性への課題の解決を図る提案についての一連の研究成果を取りまとめたものである。

1.2. 研究目的

本研究は、将来の大容量伝送のための技術候補である空間光通信において、通信品質を高め、空間光通信の実用化に貢献することを目指す。空間光通信の送信機能、受信機能、指向誤差に着目し、通信の品質向上の実現を目的とするものである。空間光通信において、大気ゆらぎの影響と空間伝搬損を低減するデバイスの実装、小型 UAV との通信における移動に伴う信号光の減少、また、小型 UAV の機体の揺れが招く通信品質の低下が課題となっている。そこで、これらの課題の解決を図り、高品質な通信の実現を目指す。

それぞれの課題に対する研究目的について簡潔に述べる。

1 つ目の目的は、デュプリケート光学系を適応した送信機能の提案と実証である。空間光通信の通信の品質向上を目的とした、大気ゆらぎの影響を受けた SN 比の変動を低減するための複数ビーム伝送法、さらに、伝搬に伴って拡がる光波を有限の大きさのアンテナで受信する空間伝搬損を低減するためのビーム拡がり角の制御法におけるデバイスの実装の課題解決を目指し、送信機能に複数ビーム生成素子であるデュプリケート光学系を組み込むことを提案する。また、この複数ビーム生成素子を適応した送信機能による、通信品質の向上を明らかにする。

2 つ目の目的は、受信光の焦点制御を適応した受信機能の提案と実証である。小型 UAV と地上間の空間光通信における、距離変化に伴う受信光の焦点位置の変動により SN 比の変動が生じる。SN 比の変動抑制のために提案した受信機能への焦点制御の適応による、高品質な空間光通信の実現の可能性を実証する。

3 つ目の目的は、指向誤差を考慮した通信品質の推定である。機体にランダムな揺れが生じる不安定な小型 UAV と地上局間の空間光通信に着目した。通信品質の向上を図るため、レーザ光の伝搬方向と通信相手の方向との角度差である指向誤差を補正する様々なシステムの中から適切な補正システムを選択することを目指し、指向誤差を考慮した通信品質の推定を行う。通信品質の推定により、要求される通信品質に対する指向精度の要求値を明らかにする。

以上、3 つを本研究の具体的な研究目的とする。

1.3. 本論文の構成

第1章では、本研究の背景と目的を述べ、本論文の構成を示した。将来の大容量データ伝送を担う技術として空間光通信の必要性を論じる。空間光通信の実用化のために、通信品質向上の実現を目指し、デバイスの実装、移動体と光地上局の距離変化が大きい場合の通信品質の低下、また、通信品質の低下を招く小型 UAV の機体の振動の課題を示し、送信機能、受信機能、指向誤差に着目した提案をした。

第2章では、光の空間の伝搬による影響を挙げ、空間光通信の通信品質の向上のために考慮すべき検討項目を整理する。その中でも大気ゆらぎによる強度変動の影響を取り上げ、その低減技術について述べ、本研究で目的とする空間光通信の通信の品質向上を目指す。

第3章では、空間光通信の通信品質を向上するため、大気ゆらぎの影響と空間伝搬損失の低減を目指し、光情報処理の分野で複製像の生成に用いられているデュプリケート光学系を生成ビーム数や出力ビームの強度分布が制御可能な複数ビーム生成素子として着目し、送信機能への適応を提案した。数値計算により、従来素子では不可能であった大気ゆらぎの影響に応じたデュプリケート光学系の生成ビーム数の制御を明らかにした。また、実験により、デュプリケート光学系の生成した複数ビームにより受信器での強度変動が小さくなることを確認し、デュプリケート光学系による大気ゆらぎの影響低減を初めて実証した。さらに、数値計算を用い、デュプリケート光学系による光地上局と移動体の距離、指向誤差、速度の変化に応じたビーム拡がり角の制御の可能性を示した。以上の結果から、デュプリケート光学系により通信品質の向上が可能であることを明らかにした。

第4章では、用途が拡大している小型 UAV と地上との空間光通信において、小型 UAV と地上間の距離に対して小型 UAV の移動に伴う距離変化が大きいことに着目した。数値計算を用いて、小型 UAV-光地上局間空間光通信の距離変化に応じてレーザ光の進行方向に対する受信光の焦点位置の変動が生じ、SN比が低減することを初めて明らかにした。そこで、受信光の焦点位置の変動を低減し、通信品質を向上するため、受信機能への受信光の焦点制御の適応を提案し、実験により、実環境における受信ビームの焦点制御の可能性を実証した。以上のことから、小型 UAV-光地上局間空間光通信における通信品質の向上の可能性を示した。

第5章では、小型 UAV-地上局間空間光通信における小型 UAV の機体に生じるランダム

な揺れによる指向誤差が招く通信品質の低下に着目した。小型 UAV-地上局間空間光通信の通信品質向上のため、大気のゆらぎの影響を考慮し、通信品質を評価する指標の 1 つである BER の推定を行った。通信相手の方向の角度誤差である指向誤差に対する BER の依存性を評価し、要求される通信品質に求められる具体的な指向精度の要求値を求めた。示された指向精度の要求値により、小型 UAV の機体の不安定性に適した指向誤差の補正システムの選択が可能となり、小型 UAV-光地上局間光通信における通信品質の向上を達成できる。

第 6 章では、本研究を総括し、結論及び今後の展望を述べた。

本論文の構成を図 1-4 に示す。

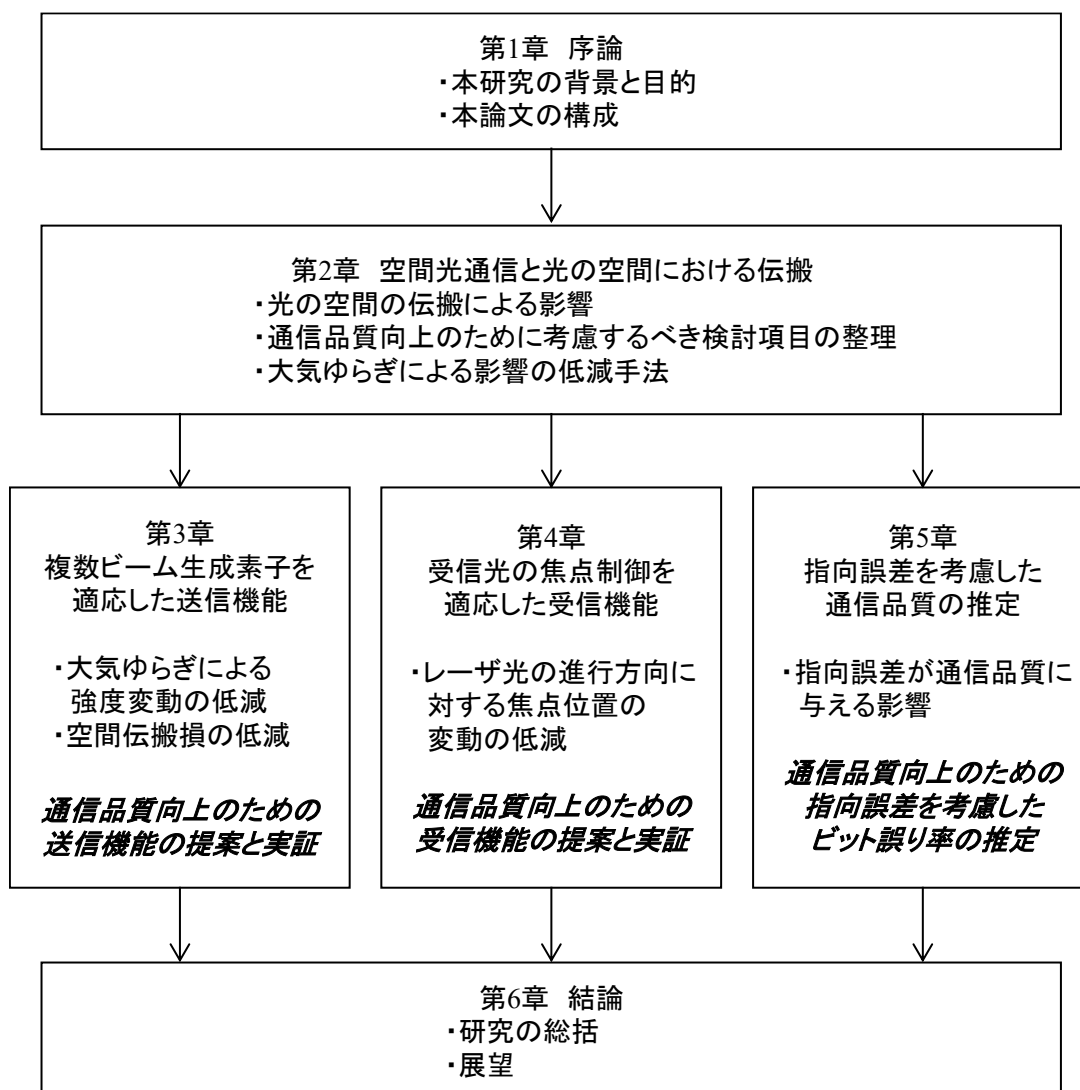


図 1-4 本論文の構成

第2章 空間光通信と光の空間における伝搬

2.1. 衛星-光地上局空間光通信と Unmanned aerial vehicle (UAV)-光地上局間空間通信との比較

本章では、光の空間伝搬により空間光通信システムが受ける影響について検討を加える。本論文の検討対象である衛星-光地上局間空間光通信と UAV-光地上局間空間光通信は、両方共にこれらの影響を受けるが、衛星-光地上局間空間光通信を事例に挙げ検討を加えていく。

ここで表 2-1 に示すように、本章で着目する衛星-光地上局間空間通信を、UAV-光地上局空間光通信と比較し、整理する[34], [35], [51], [54]–[58]。衛星-光地上局間空間通信は、UAV-光地上局空間光通信に比べ長距離の通信である。また、衛星の高度は UAV に比べ高い。さらに、最大の角速度に着目すると、UAV は衛星に比べ早いことから、UAV-光地上局空間光通信は早い移動に対する対応が必要となる。また、UAV-光地上局空間光通信は、短距離の通信であり、高速移動と機体揺れへの対応に加え、UAV の重量制限により UAV への捕捉追尾システムの搭載が難しいことから、捕捉追尾を容易にするため、拡がり角の大きなビームを用いて通信を行う。

	衛星-光地上局間空間光通信 (低軌道衛星)	UAV-光地上局間空間光通信 (小型UAV；最大離陸重量(MTOW) 5 kg以上30 kg未満[51])
距離	1,000~2,000km[34]	<10 km[54]
移動体の高度	400~1,000 km[34]	<300 m[54]
移動体の速度	7.6 km/s (OICETS軌道高度610 km)	<50 m/s (MTOW<10 kg)[55] <130 m/s (MTOW : 10~25 kg) [55]
移動体の角速度	高度610 kmの場合 12.5 mrad/s	高度150 mの場合 <334.9 mrad/s (MTOW<10 kg) <896.4 mrad/s (MTOW : 10~25 kg)
波長	0.8 μm , 1.06 μm , 1.55 μm [56]	0.976 μm [57], 1.55 μm
捕捉追尾システム	両方に搭載が必要[35]	UAVへの搭載が困難[57] (UAVの重量制限により)
ビーム拡がり角	小さい(1 mrad~数 μrad) [35],[58]	大きい(例 : 20 mrad[57])

2.2. 空間光通信システムが光の空間の伝搬により受ける影響

2.2.1. 大気ゆらぎ

大気ゆらぎは、大気の屈折率が空間的・時間的に不規則に変動する現象である。地球表面における太陽の加熱と、それにより生じる近接空気への熱伝達により、温度分布、つまり屈折率分布が生じる。これが風の流れや対流により細かく砕かれ、屈折率が一定で、異なるもの同士の屈折率差が 10^{-6} 程度のかたまりに分かれる。非常に多くのかたまりが時間的・空間的に不規則に動き大気ゆらぎを引き起こす。かたまりの直径 r_0 は大気のコヒーレンス長あるいは Fried パラメータと呼ばれ、1~2 mm から数 10 cm である。また、大気ゆらぎの少ない場合、 r_0 はおよそ 10 cm、状態の持続時間はおよそ $1 \sim 10^{-3}$ 秒となる[59], [60]。また、大気ゆらぎの度合いは、温度、高度、風速に依存し、通常、温度が高い日中に最も大きくなる[61]。

2.2.1.1. ビームワンダ

大気ゆらぎの生じた大気中を伝搬する光に観測される現象の一つに、伝搬方向の変動が挙げられ、この現象はビームワンダと呼ばれる。図 2-1 (a)に示すように、大気ゆらぎによる屈折率の異なる複数のかたまりがレンズのように働き、破線で示す本来の光の伝搬方向から、実際の伝搬方向がランダムに変動するものである[61], [62]。

また、図 2-1 (b)は、受光面上で観測したビームワンダの様子で、時刻の経過 t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 に伴い、実線の円で示した光の照射領域が移動する。この光の照射領域の移動と同時に、光強度が最も高い黒丸で示した箇所も実線の円内で動く。そのため、これらを長時間観測すると、本来の光束径よりも広い範囲である点線の円を照射することとなる[62]。

図 2-2 に示すアップリンクの平面波の伝搬において、ビームワンダによる受光面における照射領域の移動の分散は

$$\langle r_c^2 \rangle = 7.25(H - h_0)^2 \sec^2 \xi W_0^{-1/3} \int_{h_0}^H C_n^2(h) \left(1 - \frac{h - h_0}{H - h_0}\right) dh \quad (2-1)$$

で与えられる[63]。ここで、 C_n^2 は大気の乱れを表す大気の屈折率構造関数、 ξ は天頂角、 W_0 は送信ビーム半径、 h_0 と H は受信器と送信器の高度である。また、 H は距離 L を用いて $L + h_0 \cos \xi$ と表される

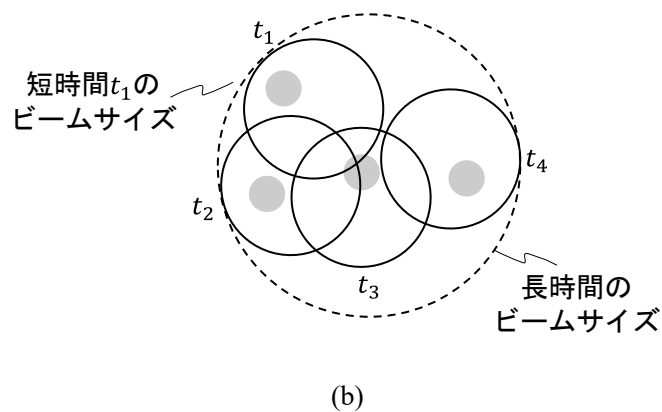
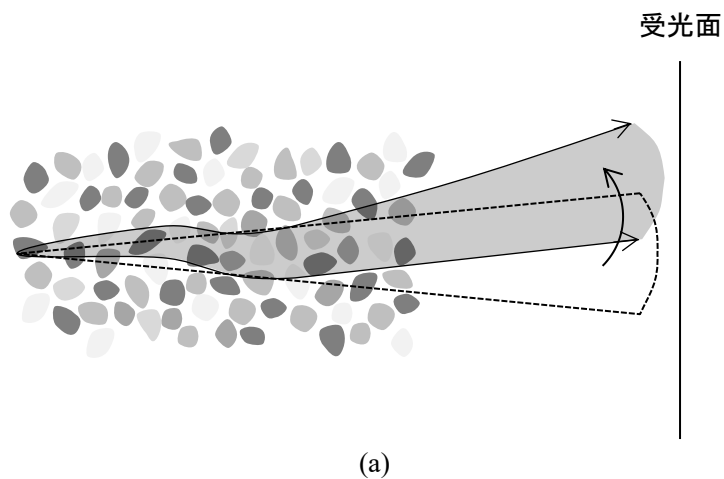


図 2-1 大気ゆらぎの影響により生じるビームワンダ[62]
 (a) 伝搬角度の変動、(b) 受光面上で観測される光の照射領域

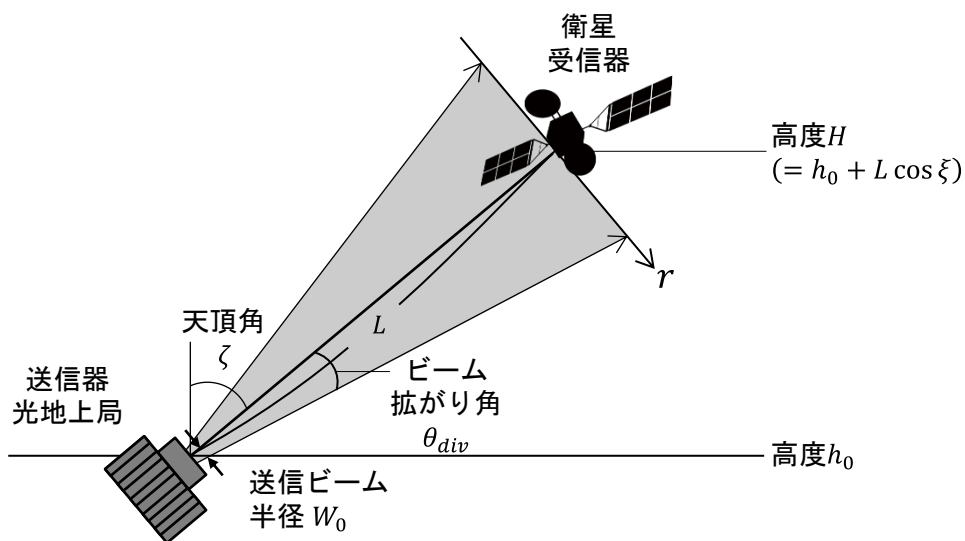


図 2-2 衛星-光地上局間光通信

さらに h_0 を0と仮定し、光の射出点から計測した変位を角度変位に換算した値を $\sqrt{\langle\theta_{BW}^2\rangle}$ とすると

$$\sqrt{\langle\theta_{BW}^2\rangle} = \sqrt{\frac{\langle r_c^2 \rangle}{L^2}} = \sqrt{\frac{7.25W_0^{-1/3}}{\cos \xi} \int_0^H C_n^2(h) \left(1 - \frac{h}{H}\right) dh} \quad (2-2)$$

と表される。

C_n^2 の値が大きくなるほど大気ゆらぎは大きくなり、一般に高度 h に依存する。また、実験に基づいて得られた複数の C_n^2 のモデルが提案されている。 C_n^2 の変化を全てとらえることは難しく、極めて正確に大気ゆらぎの特徴を示すモデルはない[63]が、Hufnagel-Valley(H-V)モデルは

$$C_n^2(h) = 0.00595(v/27)^2(10^{-5}h)^2 \exp(-h/1000) + 2.7 \times 10^{-16} \exp(-h/1500) + A \exp(-h/100) \quad (2-3)$$

と表され、用途が広いモデルである。ここで、 v は疑似風速、 A は $C_n^2(0)$ の公称値である。

今回の検討では、H-V 5/7 モデルの $v = 21 \text{ m/s}$ 、 $A = 1.7 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ を適応した[64]。

JAXA と NICT が行った光地上局から OICETS へのアップリンクの実験を仮定し、 ζ が0度、 L が610 km[65]場合の伝搬光の角度変動と W_0 の依存性を式(2-2)を用い求めた。得られたグラフを図2-3に示す。図2-3より、ビームワンドは射出光の半径に W_0 依存し、 W_0 が小さくなると角度の変動量が大きくなる事が分かる。

また、同様に、光地上局から OICETS へのアップリンクを想定した、波長 λ が815 nm、ビーム拡がり角 θ_{div} が102 μrad [66]では、 $\theta_{div} = \lambda/\pi W_0$ の関係より、 W_0 は2.54 mmとなる。図2-3より、 W_0 が2.54 mmの場合、照射領域の移動 $\sqrt{\langle\theta_{BW}^2\rangle}$ (半角)は10.9 μrad となる。したがって、この場合、送信光のビーム拡がり角がビームワンドによる角度変化よりも大きく、光通信装置はビーム変動によらず、相手局を照射し続けることが分かる。

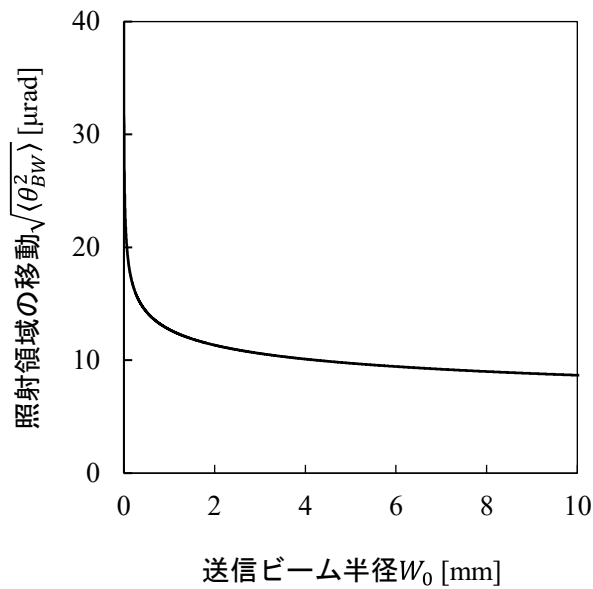


図 2-3 距離 $L : 610 \text{ km}$ における送信ビーム半径 W_0 と照射領域の移動の分散 $\sqrt{\langle \theta_{BW}^2 \rangle}$ の関係

2.2.2. 光の強度変動

大気ゆらぎの生じた大気を伝搬した光に観測されるもう一つの現象が、図 2-4 に示す受光面における強度変動であり、SN 比の変動を引き起こす。屈折率の異なる複数のかたまりが動くプリズムの集まりのように振る舞うために生じる。この現象はシンチレーションと呼ばれ、その度合いはシンチレーションインデックス σ_I^2 として表される。 σ_I^2 は

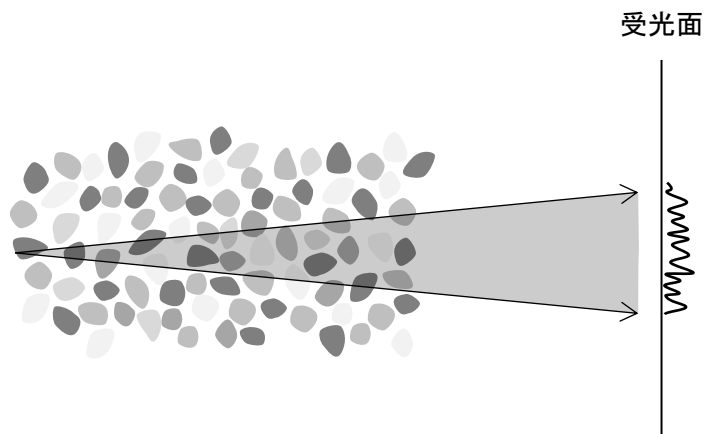


図 2-4 大気ゆらぎの影響により生じる光の強度変動

$$\sigma_I^2 = \frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2} = \frac{\langle I^2 \rangle}{\langle I \rangle^2} - 1 \quad (2-4)$$

と示され、ここで、 I は受光面での光強度、 $\langle \rangle$ はアンサンブル平均である[63]。

図 2-2 に示すように、ガウシアンビームを射出し、点の受信器で受信する場合、アップリンクのシンチレーションインデックス $\sigma_I^2(r, L)$ は、下の式より求められる。ここで、 r はビームの光軸からの距離で、 L は送信器と受信器の距離である。

$$\sigma_I^2(r, L) = 8.702k^{7/6}(H - h_0)^{5/6} \sec^{11/6}(\zeta) \times \left[\mu_3 + 1.667 \frac{\mu_1 \Lambda^{5/6} \alpha^2 (H - h_0)^2 \sec^2(\zeta)}{W_0(\Omega_0^2 + \Omega^2)} \right], \quad (2-5)$$

$$\alpha \leq W/L$$

$$\mu_1 = \int_{h_0}^H C_n^2(h) \left(1 - \frac{h - h_0}{H - h_0}\right)^{5/3} dh \quad (2-6)$$

$$\mu_3 = \text{Re} \int_{h_0}^H C_n^2(h) \left\{ \left(1 - \frac{h - h_0}{H - h_0}\right)^{5/6} \left[\Lambda \left(1 - \frac{h - h_0}{H - h_0}\right) + i \left(\theta + \tilde{\theta} \frac{h - h_0}{H - h_0} \right) \right]^{5/6} - \Lambda^{5/6} \left(1 - \frac{h - h_0}{H - h_0}\right)^{5/3} \right\} dh \quad (2-7)$$

$$\Lambda = \frac{\Omega}{\Omega_0^2 + \Omega^2} \quad (2-8)$$

$$\theta = \frac{\Omega_0}{\Omega_0^2 + \Omega^2} \quad (2-9)$$

$$\tilde{\theta} = 1 - \theta \quad (2-10)$$

$$\Omega_0 = 1 \text{ (平面波)} \quad (2-11)$$

$$\Omega = \frac{2L}{kW_0^2} \quad (2-12)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2-13)$$

$$\alpha = r/L \quad (2-14)$$

$$W = W_0(\Omega_0^2 + \Omega^2)^{1/2} \quad (2-15)$$

これらの式を用い、光地上局から OICETS へのアップリンクを想定し、 σ_I^2 を求めた。波長 λ が 815 nm、ビーム拡がり角 θ_{div} が 102 μrad [66]、 ζ が 0 度、 L が 610 km[65]、 h_0 が 0 m を仮定した。また、 C_n^2 には H-V 5/7 モデルを適応した。得られたグラフを図 2-5 に示す。 r が

0 m よりも大きくなる、あるいは、小さくなると、 σ_I^2 は大きくなる。また、 r が 0 m のビームの光軸上においても、 σ_I^2 は弱いゆらぎ($\sigma_I^2 < 0.1$)よりも大きな 0.12 となった。

σ_I^2 はビームが移動体に届くまでの大気を通る距離が長いほど大きくなるため、 σ_I^2 は天頂角 ζ においてビームの光軸上で最も小さくなる。よって、大気を通る距離のみ考慮する場合、 σ_I^2 は、 ζ が 0 度のビームの光軸上で最少の値をとる。OICETS は実際には ζ が 0 度となることはないが、 ζ が 0 度を仮定した図 2-5 では、想定される最小の σ_I^2 であっても弱いゆらぎよりも大きくなることを明らかにした。したがって、大気ゆらぎによって生じる強度変動の低減の検討が必要であることが分かった。さらに、大気ゆらぎの影響の度合いは、時間と場所に応じて変化するため、柔軟に光の強度変動を低減できる手法が必要である。

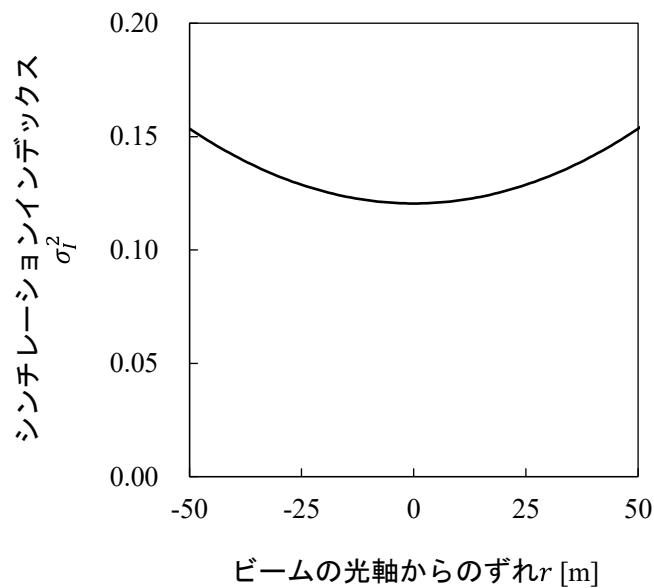


図 2-5 ビームの光軸からのずれ r とシンチレーションインデックス σ_I^2 との関係($\zeta = 0$ 度)

2.2.3. 空間伝搬損

光が空間中を伝搬するために生じる損失の一つが空間伝搬損(Geometric loss : GL)である。回折により広がった光ビームの一部のみが受信開口に受光されるために生じる損失である。

送信電力 P_T に対する受信電力 P_R は、

$$\frac{P_R}{P_T} = \frac{D_R^2}{(D_T + 2\theta_{div}L)^2} \quad (2-16)$$

と表される[63]。したがって、dB 単位の空間伝搬損は

$$GL = -20 \log \left[\frac{D_R}{D_T + 2\theta_{div}L} \right] \text{ [dB]} \quad (2-17)$$

で与えられる[63]。

そこで、式(2-17)を用い、 D_t が 710 mm、 D_R が 260 mm、 θ_{div} が 102 μrad の場合の空間伝搬損を求めた。これらは OICETS のアップリンクに用いられた値である[66]。得られた結果を図 2-7 に示す。図 2-7 から分かるように、 L が OICETS の軌道高度である 610 km[65] の場合、 GL は 53.6 dB に達する。したがって、空間伝搬損の低減のための検討が必要であることが示された。

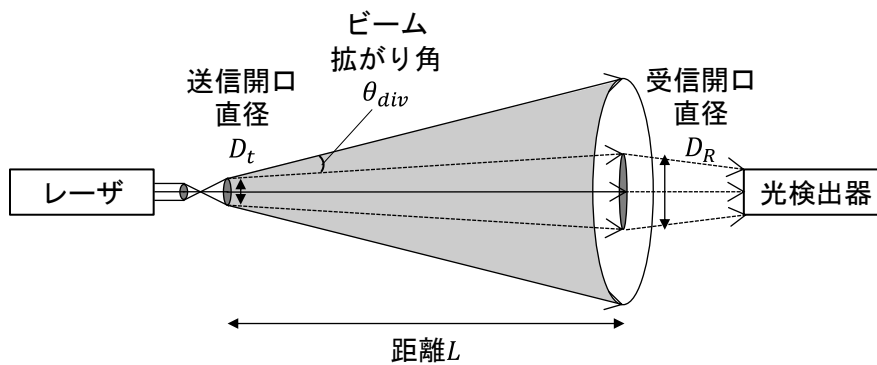
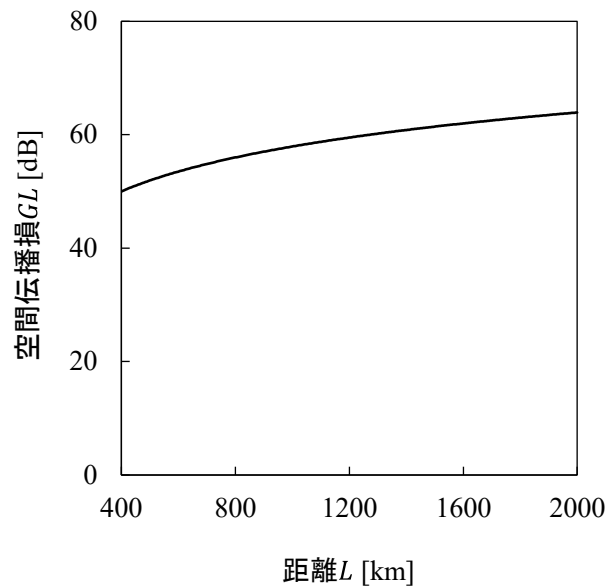


図 2-6 空間伝搬損

図 2-7 距離 L と空間伝搬損 GL の関係

2.2.4. 指向誤差

送信器と受信器のアライメントが不十分である際に生じる損失を指向誤差と言い、指向誤差により大きな信号減衰が生じる[63]。図 2-8 に示す、ビームの伝搬方向と通信相手の方向との角度差である θ を指向誤差と言う。指向誤差 θ による減衰(Pointing loss : PL)は

$$PL = \exp\left(\frac{-2\theta^2}{\theta_{div}^2}\right) \quad (2-18)$$

と表され、ここで、 θ_{div} はビーム拡がり角である[63]。

OICETS から地上局へのダウンリンクを想定し、 θ_{div} が $2.75 \mu\text{rad}$ [66]、 L が 610 km [65]における PL の関係を式(2-18)より求め、図 2-9 に示した。 θ が大きくなる程、 PL は大きくなる。また、 θ が θ_{div} の 1/2 倍である $1.375 \mu\text{rad}$ の場合、 PL は 2.17 dB にも達することが分かった。したがって、指向誤差の検討が必要であると言える。また、 PL を低減するために、捕捉・追尾・指向システムが用いられる。

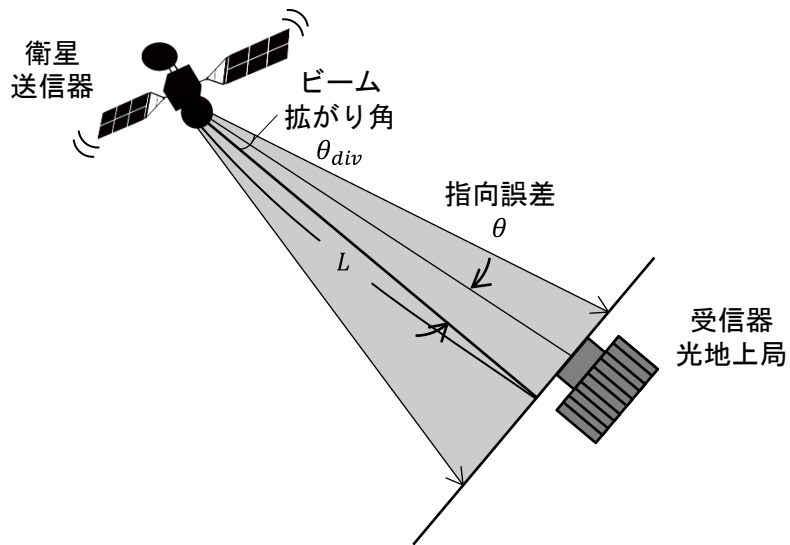


図 2-8 衛星-光地上局間空間光通信における指向誤差

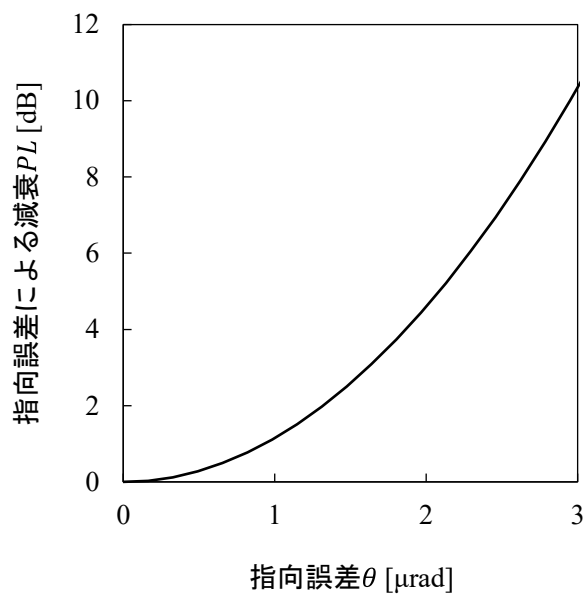


図 2-9 指向誤差 θ と指向誤差による減衰 PL の関係

2.3. 大気ゆらぎの影響の低減手法

2.3.1. 補償光学

補償光学は、天文学で提案された手法である。大気ゆらぎの影響を受けた光ビームを参照光として受光し、その波面ゆらぎを波面センサで計測し、可変形鏡を実時間で制御して波面を補正し、実時間で能動的に本来の波面に近い波面を得る手法である[16], [67], [68]。空間光通信の場合、相手局から伝送される受信光を参照光として用いる。図 2-10 に示すように、受信光の波面補正と同時に、変形した可変形鏡により送信レーザ光を大気ゆらぎに共役となるようあらかじめ補正して送信することで、大気を伝搬しても歪みのない送信光を伝送できる[16], [62], [69]。つまり、受信光と送信光の波面補正、つまり、光強度変動の低減が可能である。

しかしながら、移動体との通信において、移動体の移動前後の位置を見込む角度である光行差補正角が大気の波面歪みが同等と見なせる角度等波面離角よりも大きくなると、受信光に基づいた波面操作の効果が得られなくなる。その場合、受信光を波面補正の基準として用いられず、新たにビーコンやガイドスターのようなものが移動体の前方に必要となる課題が生じる[43], [44]。

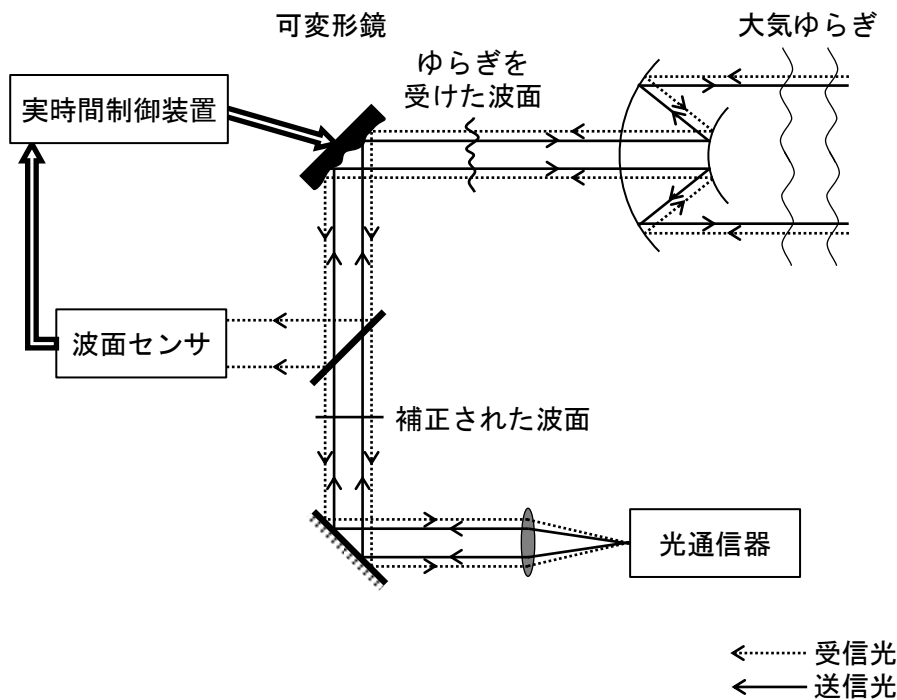


図 2-10 空間光通信用補償光学システム[16]

2.3.2. 誤り訂正符号

誤り訂正符号は、大気ゆらぎによる光の強度変動を低減するために用いられており、一般的に受信者が大気ゆらぎ中の伝送により生じたエラーを訂正できるよう、送るべきビットに冗長性を付加する手法である[63], [70], [71]。大気ゆらぎの大きさや距離に応じた適切な符号化技術の選択により、空間光通信の BER を向上できる。符号化に加えて、インターリーブはバースト誤りが生じる際に用いられる[63]。

しかし、誤り訂正符号やインターリーブの適応は、データ伝送の高速化に応じて、一定の時間における、受信側でフェージングが起きる間に伝送されるデータ、つまり、データの欠損量が増加する。そのため、演算時間と演算に要する資源が増加するという課題がある[62]。

2.3.3. 電波通信との併用

空間光通信の性能は天候と大気ゆらぎの影響を受けるため、これにより回線が確立できなかったり、不十分な BER となることがある。そこで、信頼性と回線の稼働率を向上するために、空間光通信システムとより信頼性の高い電波通信システムの併用が提案・適応されている。空間光通信が停止した際に、バックアップとして低データ速度の電波通信を用いることで全体のシステムの稼働率を向上できる。しかし、電波通信は、ユーザ数の増加に伴い、隣接するノードからの干渉により、回線容量が制限されるという課題がある[63]。

2.3.4. 開口平均効果

受信器の開口直径が大きくなる程、非一様な照射の平均化/積分効果が大きくなり、光検出器が受ける信号のゆらぎが減少する。このように受信器の開口直径を大きくし、光強度の変動を低減することを開口平均効果と言う[61]。しかし、大きな開口はアップリンクでは実用的ではない[72]。

2.3.5. 空間ダイバシティ

開口積分受信器と同じ性能が得られるよう、1つの大きな開口を、それぞれが十分離れた小さな複数の送信器あるいは受信器の開口に置き換える手法が提案され、適応されてい

る。複数開口の間隔を大気のコヒーレンス長 r_0 より大きくし、複数開口の光強度の相関性を十分に低くする。図 2-11 に示すように、大気ゆらぎの影響を低減するため、送信器、あるいは、受信器複数開口を適応する手法を総称し空間ダイバシティと呼ぶ。また、それぞれ送信器への適応を送信ダイバシティ、受信器への適応を受信ダイバシティと言う[63]。

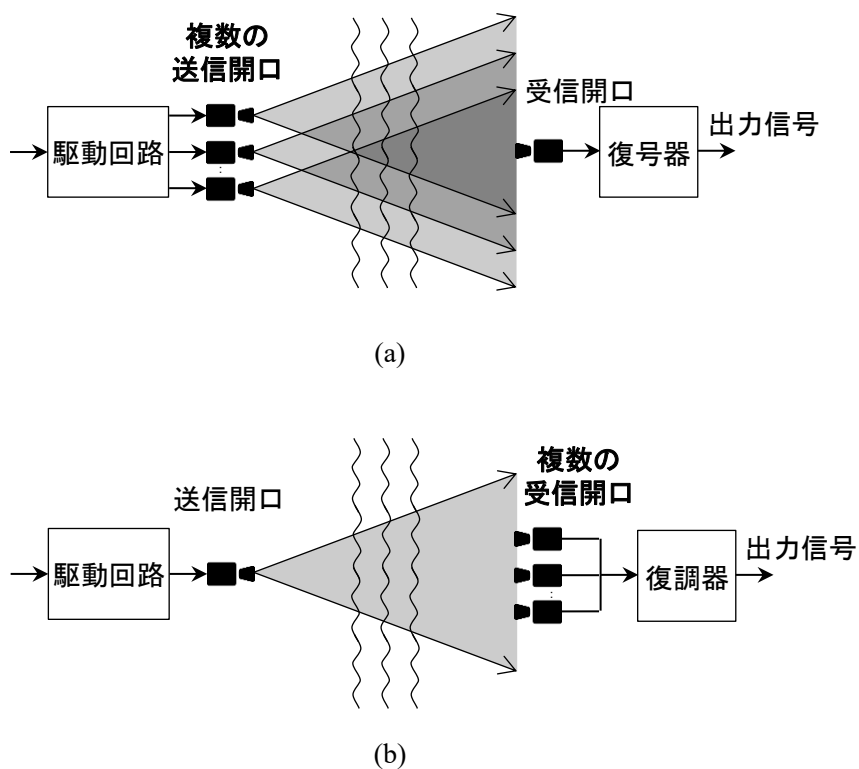


図 2-11 空間ダイバシティ

(a) 送信ダイバシティ：複数ビーム伝送、(b) 受信ダイバシティ

1本の大気中を伝搬するレーザ光が送信に用いられる場合、大気ゆらぎにより1本のビームは複数の小さなビームに分割され、屈折率が局所的に変化しているため、分割された小さなビームは独立して動く。受信器では、お互いに同位相あるいは位相がずれているそれらの小さなビームが、混ざり合う。同位相の場合、電力が急増するのに対し、位相がずれている場合、信号が減衰する。送信ダイバシティのように、1本のビームではなく、独立している相関性のない複数のビームを送信に用いる場合、受信器でそれぞれのビームが重なり合い、異なるビームの電力の加算となり、激しい減衰、急増の可能性が低減する[63]。

大気ゆらぎにより生じる強度変動の低減に加え、空間光通信システム設計において、送信電力は安全な電力の許容範囲内に限定される。1つの大きな開口に対して、複数開口の性能向上を求めるために、 N 個の静的に独立な検出器の場合を取り上げる。この場合、合計の出力は、

$$I_r = \eta \sum_{j=1}^N (I_{s,j} + I_{N,j}) \quad (2-19)$$

と与えられ、ここで、 η は光電変換効率、 $I_{s,j}$ は j 番目の受信器の信号電流、 $I_{N,j}$ は j 番目の受信器の雑音電流である。簡単のため、全ての受信器の信号電流と雑音電流の平均と分散は同じ値であると仮定する。この仮定を用いると、全ての受信した電流 I_r の平均は

$$\langle I_r \rangle = N \langle I_{s,1} \rangle \quad (2-20)$$

と与えられ、また、 I_r の分散は

$$\sigma_{I_r}^2 = N \left[\langle I_{s,1}^2 \rangle - \langle I_{s,1} \rangle^2 + \langle I_{N,1}^2 \rangle \right] = N(\sigma_{s,1}^2 + \sigma_{N,1}^2) \quad (2-21)$$

となる。

したがって、平均の rms SN 比は

$$\langle SNR_N \rangle = \frac{N \langle I_{s,1} \rangle}{\sqrt{N(\sigma_{s,1}^2 + \sigma_{N,1}^2)}} = \sqrt{N} \langle SNR_1 \rangle \quad (2-22)$$

と与えられる。ここで、 $\langle SNR_1 \rangle$ は1つの受信器のSN比の平均である。この式は、 N 個の独立した受信器によるSN比は、 \sqrt{N} 倍システム性能が向上することを示している。

1個の検出器の信号電力と N 個の検出器の信号電力の総和が一定の場合、 N 個の検出器のシンチレーションインデックスは、1個の検出器のシンチレーションインデックスの $1/N$ に減少する。つまり、

$$\sigma_{I,N}^2 = \frac{1}{N} \sigma_{I,1}^2 \quad (2-23)$$

と与えられ、ここで、 N は検出器数である。これは複数の独立した相関性のないビームを送信器へ伝送する、送信ダイバシティの複数送信器にも当てはまり、複数ビームの使用により大気ゆらぎにより生じる強度変動の影響は低減する[63]。

BERは大気ゆらぎの大きさに依存するため、既定のBERを達成する複数の受信器、あるいは、送信器が求められ、原則として、受信する強度の状態は送信と受信のアンテナ数に応じて向上する。しかし、システムの複雑性、コスト、送信レーザ電力の効率、変調タイミングの精度、空間の可用性のような実施上の配慮から10以下のダイバシティが限界であろう[63]。

また、光の強度変動の大きいアップリンクにおいて、受信側である積載量に制限のある移動体に複数開口を設置する受信ダイバシティの適応は難しい。したがって、アップリンクでは、送信側である光地上局に複数開口を設置する送信ダイバシティ、つまり、複数ビーム伝送の適応が有効である。また、大気ゆらぎの度合いは場所や時間によって変わるため、アップリンクにおいて大気ゆらぎの影響の度合いに応じて柔軟に光の強度変動を低減できる複数ビーム伝送手法の検討が必要である。

2.4. まとめ

本章では、空間光通信システムが光の空間の伝搬により受ける影響で、本研究で検討対象とする大気ゆらぎにより生じるビームワンダ、受信面での光の強度変動、さらに、空間伝搬損、指向誤差について、それらの特徴を比較し示した。中でも、空間光通信の大きな課題の1つとして挙げられている大気ゆらぎの影響を低減するための手法である補償光学、誤り訂正符号、電波通信との併用、開口平均効果、空間ダイバシティを比較した。

光が空間伝搬する際に生じる、大気ゆらぎによる光の強度変動、空間伝搬損、指向誤差は、空間光通信の通信品質に与える影響が大きいことを数値計算により示し、それぞれの低減の必要性を示した。

また、今回通信品質に与える影響が大きいと着目した SN 比の低下を引き起こす受信電力の低下の要因以外にも含めた、空間光通信における受信電力の低下の事例をまとめた円グラフを図 2-12 に示す。この事例は、光地上局から OICETS へのアップリンクを想定し、波長 λ を 815 nm、ビーム拡がり角を 102 μ rad、送信開口直径を 710 mm、受信開口直径を 260 mm[66]とし、また、距離を 610 km[65]、天頂角 0 度を仮定した。本研究では、図 2-12 の円グラフの黒色の枠で囲んだ、大気ゆらぎ、空間伝搬損、指向誤差による減衰、合わせて 68.8 dB に対して新たな検討を加える。なお、大気ゆらぎによる減衰値は、[66]を参考とした。また、指向誤差による減衰は指向誤差がビーム拡がり角の 1/2 倍の場合を仮定している。吸収による減衰は、高度が高くなるほど大気が薄くなり小さくなるが、対流圏で一定

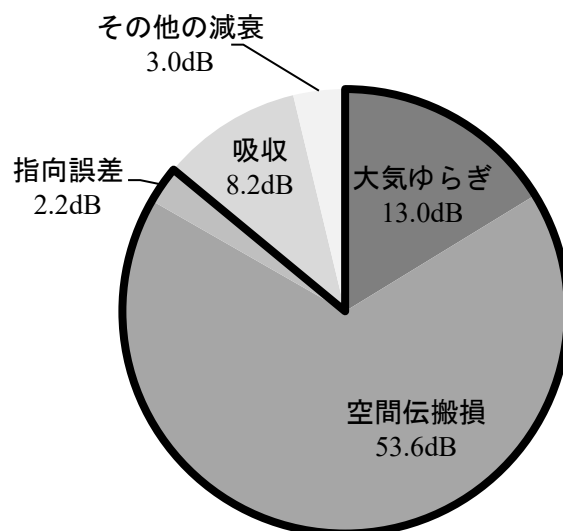


図 2-12 受信電力の低下の事例

の吸収を仮定し[73]を参考に求めた。図 2-12 は OICETS の受信可能な減衰範囲 77.7～81.4 dB[66], [74], [75]を満たしている。

大気ゆらぎの影響の低減手法は複数あるが、中でも、大気ゆらぎの影響が大きいアップリンクにおいて、送信側である光地上局に複数開口を設置する送信ダイバシティ、つまり、複数ビーム伝送が特に有効であり、さらに、大気ゆらぎの影響の度合いに応じて柔軟に光の強度変動を低減できる手法が要求されていることも示した。

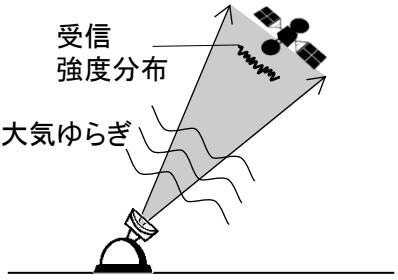
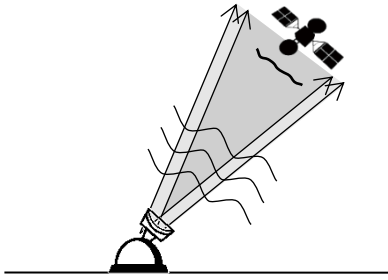
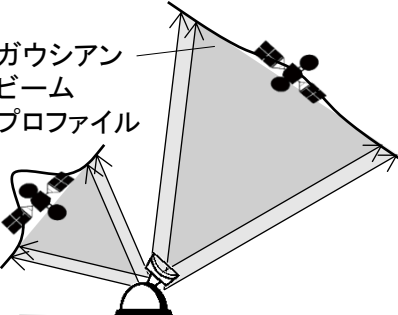
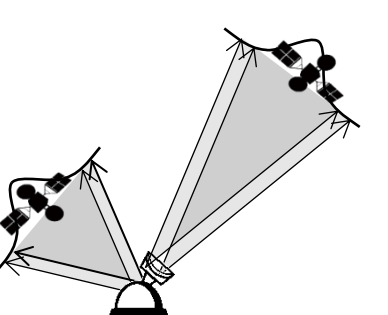
第3章 複数ビーム生成素子を適応した送信機能

3.1. 従来の複数ビーム生成法

本章では、本論文の検討対象である衛星-光地上局間空間光通信と UAV-光地上局間空間光通信の両方に影響を与える、ビームが大気中を伝搬するために生じる大気ゆらぎによる影響とビームが広がって伝搬するために生じる空間伝搬損について検討を加える。本章の事例として、衛星-光地上局間空間光通信挙げ、検討を行う。

レーザ光を用いる空間光通信における課題である通信の品質向上を図るため、大気ゆらぎの影響の低減を図ることが第一に挙げられており[76]、大気ゆらぎによって生じる受信信号の強度変化の変動を低減し、通信品質の低減の抑制を図るための検討が進められている。これまでに、アップリンクにおける大気ゆらぎの影響を抑制する方法として、(a)大気ゆらぎの影響を被っている光波面の補正[63], [69]、(b)大気ゆらぎの影響を受けた複数ビー

表 3-1 複数ビームと可変のビーム拡がり角を持つビームの射出の効果

単一ビームの射出	複数ビームの射出
	
固定されたビーム拡がり角を持つビームの射出	可変のビーム拡がり角を持つビームの射出
	

ムを重ね合わせた光強度の平均化効果を利用する複数ビーム伝送法(表 3-1 の右上)[63], [77] が提案されている。

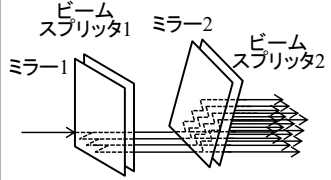

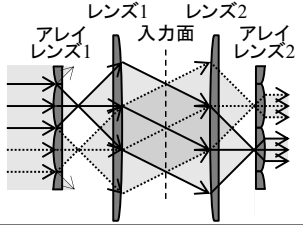
しかし、移動体との通信において、送受信器の相対位置が高速に変化し、その角度変化がビーム拡がり角よりも大きくなる場合、移動体の移動前と移動後の位置の見込み角である光行差補正角を考慮する必要がある。(a)の補償光学を適応し波面を補正する方法では、ダウンリンクの波面を基準にアップリンクの波面を補正するため、光行差補正角が大気の波面の歪みが同等と考えられる角度範囲である等波面離角よりも大きくなると、受信光を波面補正の基準として用いられず[43], [44]、新たに波面補正の基準となるビーコンやガイドスターのようなものを移動体の前方に設置する必要がある。一方で、(b)の複数ビーム伝送法は、光行差補正角があっても大気のゆらぎの影響を容易に低減できる。さらに、すでに複数ビーム伝送法におけるビーム分離と受信器開口サイズの効果を実験的に実証したグループもあり、(b)の複数ビーム伝送法に着目した。

(b)の手法のキーとなる従来の複数ビーム生成法は、表 3-2 に示すように、反射率分布を持たせたビームスプリッタとミラーで構成された光学系を既存の光地上局の望遠鏡に設置したり[45]、光源のレーザと望遠鏡を必要なビーム数の数だけ準備し同じ方向にビームが射出されるようにしたものである[46], [78], [79]。前者は既存の光地上局に挿入可能だが、反射系のため挿入により光軸がずれ、後者は既存の光地上局の利用ができない。また、ともにビーム数の増減には、光学系を構成する各素子から新たに作製する必要がある。

さらに、光地上局から移動体に向けて射出されるレーザ光のビーム拡がり角は固定されているため、衛星追尾誤差、光軸誤差含むそれぞれの光地上局と移動体に応じた指向誤差、距離の変化、光地上局と移動体の相対速度に、ビーム拡がり角は対応していない。従来使用されているレーザ光は、移動体の位置に対して十分な大きさのビーム照射領域を持っているため、受信光強度の低下のような要因で光回線が途切れることなく安定的に維持されていた。しかし、光軸を中心として受光面のビーム半径の範囲にレーザ光のエネルギーが 68 %も集中しているため、移動体の位置で十分に大きなビーム照射領域を確保する必要があり、空間伝搬損による送信ビームのエネルギー損失が課題となっている。そのため、表 3-1 の右下に示すように、光地上局と移動体の指向誤差、距離、速度の変化に応じて、移動体に対するレーザ光のビーム拡がり角を制御することができれば、送信ビームの空間伝搬損によるエネルギー損失の低減を図ることができる。ビーム拡がり角を制御する方法として、レンズ系の位置を変える方法[41]と、挿入した液晶の屈折率を制御し位相を変える方

法が考えられる。前者が機械的な駆動部を用いるのに対し、後者は屈折率の変化を精密に制御する必要がある。

表 3-2 複数ビーム生成素子[6]

複数ビーム生成法	2つのバルク光学素子[45] (振幅分割)	1台のジンバルに搭載された 同一方向を向いた 望遠鏡[46], [78], [79]	提案手法 デュプリケート光学系 [49], [50] (波面分割)
年	2006	2013	2012
グループ	M. Toyoshima, Y. Takayama [NICT]	D. M. Boroson [MIT]	著者ら
光学系			
光学系の構成	ミラー: 2 ビームスプリッタ: 2	反射望遠鏡: 4 (ミラー: 2 × 4)	アレイレンズ: 2 レンズ: 2
光学系の作製	ビームスプリッタの反射率分布を利用することで、ビームスプリッターからの透過光の強度を均一にする	2つ以上の同一の光源、同一性能の望遠鏡が同一方向に調整される	光軸を制御することで、アライメントが容易となる
ビーム数	若干の制限あり (ビームスプリッタの反射率分布の性能に依存)	限定される (必要なビームの数と同じ数だけレーザー光源と望遠鏡を準備することが必要)	フレキシブル (同一光学系で入力面を制御することで、ビーム数の増加が容易に可能)
アライメントと調整	容易	困難 (光学素子が多いため)	容易
既存の光地上局の利用	可能 (反射系のため、挿入により光軸がずれる)	不可能	可能 (同軸配置のため容易に挿入可能)

3.2. デュプリケート光学系の特性

空間光通信の品質の向上のため、レーザ光の大気ゆらぎの影響と空間伝搬損の低減を図るデバイスの実装に関するこれらの課題の解決を目指す。また、2つのアレイレンズと2つのレンズで構成されるデュプリケート光学系[49], [50]は光情報処理の分野で複製像の入力装置として用いられてきた[47]。このデュプリケート光学系を、1本のビームから複数のビームを生成する複数ビーム生成素子として送信機能へ適応することを提案する。

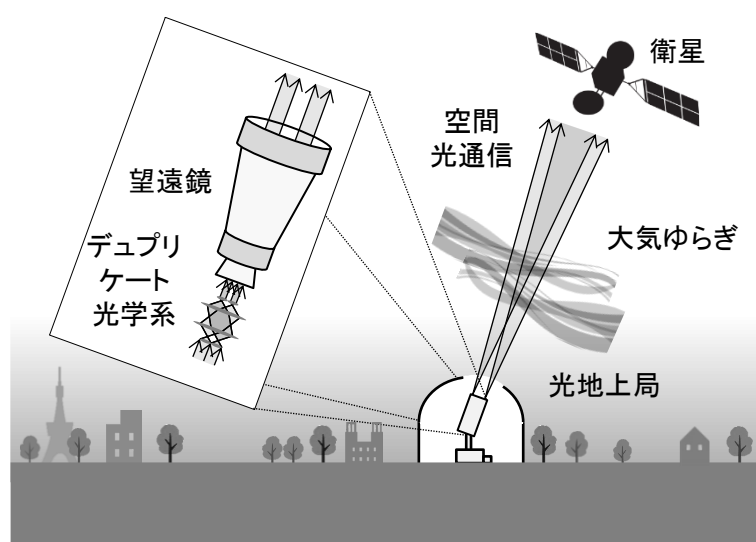


図 3-1 デュプリケート光学系の空間光通信への適応[3]

(Copyright (2016) The Japan Society of Applied Physics)

図 3-1 に示すように、レーザ光をデュプリケート光学系により分岐し、生成された複数ビーム望遠鏡に入射させる。望遠鏡により拡大されたビームを対象とする移動体へ向け射出する。デュプリケート光学系は、小型軽量の装置で、同軸配置のため既存の光地上局に容易に挿入できるという、大気ゆらぎの影響を低減する複数ビーム生成素子として優れた特長を持っている。さらに、各素子の構成を変更することなく、入力面の制御によりビーム分岐数の制御が可能である。大気ゆらぎの影響の度合いは、光地上局の位置あるいは移動体との通信時間に依存するため、ビーム数の制御により大気ゆらぎの影響の度合いに応じた強度変動の低減が可能であることは、空間光通信において有効である。

さらに、デュプリケート光学系は、液晶フィルタを挿入し、その開口パターンを変える

ことで、生成される複数ビームの強度分布を変え、レーザ光のビーム拡がり角を制御するデバイスとしても適応できる。機械的駆動部を用いることなく容易にレーザ光のビーム拡がり角を制御できる。

適応を提案するデュプリケート光学系を図 3-2 に示す。入射光がアレイレンズ 1(AL1)によりアレイの数だけ波面分割され、分割された光がそれぞれレンズ 1(L1)に入射する。AL1 と L1 がアフォーカル系となっており、L1 による分割光が様々な方向に進む平行光となり、入力面へ重なり合って入射する。入力面に透過画像を表示すると、それぞれの平行光がレンズ 2(L2)の焦点面において、AL を構成するレンズ数と同数の透過画像のフーリエ変換像を生成する。さらに、アレイレンズ 2(AL2)によりそれぞれのフーリエ変換像が再びフーリエ変換され、AL2 の焦点面である出力面に入力面に表示した画像がデュプリケート(複製)される[49], [50]。

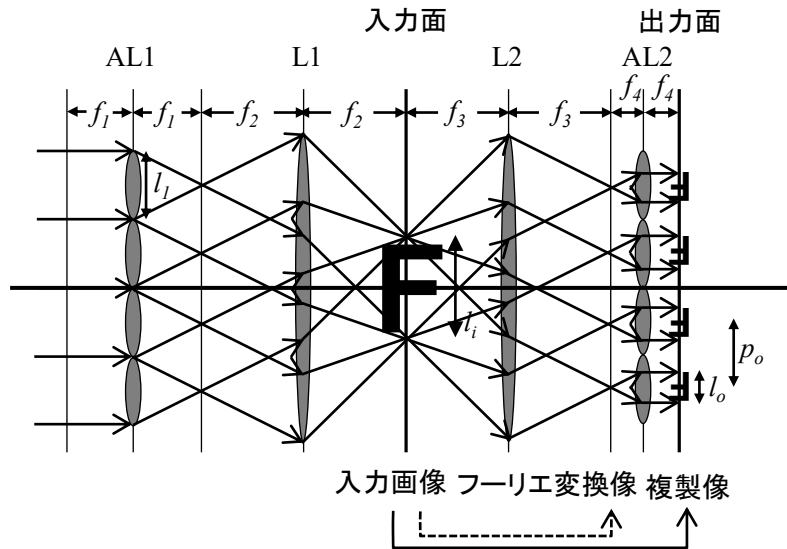


図 3-2 デュプリケート光学系[4]

入力画像の最大の大きさ l_i は、

$$l_i = l_1 f_2 / f_1 \quad (3-1)$$

デュプリケート像の倍率 β は、

$$\beta = -f_4 / f_3 \quad (3-2)$$

出力ビームの大きさ l_o は、

$$l_0 = -l_1 f_2 f_4 / f_1 f_3 \quad (3-3)$$

間隔 p_0 は、

$$p_0 = -l_1 f_3 / f_2 \quad (3-4)$$

で表される。ここで、 l_1 はAL1を構成するレンズの直径、 f_1 、 f_2 、 f_3 、 f_4 はAL1、L1、L2、AL2の焦点距離である。また、複製像の数はAL1、AL2を構成するレンズ数と同数である[49],[50]。

3.3. 大気ゆらぎの影響低減のための複数ビーム生成素子の設計

デュプリケート光学系を空間光通信に適応するためには、厚いレンズへの拡張が必要である。しかし、今までレンズの厚さについて検討されず、デュプリケート光学系を設計するためのプロセスが示されていない。

そこで、図 3-3 のフローチャートに示すデュプリケート光学系の設計方法を提案する。まず、出力ビームの必要なパラメータの決定後、レンズの焦点距離を選択する。さらに、幾何光学に基づき、最小のレンズ径などを算出する。その後、レンズの厚さや材質を考慮し、レンズのパラメータを求める。光学設計ソフトでレンズの収差や回折によるクリッピングを避けるため L1 または L2 のレンズ径を大きくする補正処理を行った後、光学系が目的の大きさよりも小さくなっていることを確認する。

表 3-3 に示す設計条件で、空間光通信用デュプリケート光学系の設計を行った。実験の実施を考慮した光学系として、入力ビームの直径を 10 mm 未満、光学系の全長を 500 mm 未満を仮定した。また、都市部での使用を想定し、大気のコヒーレンス長 r_0 が 30 mm とし、さらに、10 倍の望遠鏡を備えることを仮定し、出力ビーム間隔 p_0 の設計条件を 3 mm とした。都市部での r_0 は数 cm とされている。設計したデュプリケート光学系のビーム間隔は 3 mm であり、望遠鏡から射出される出力ビーム間隔 30 mm となる。よって、そのビーム間隔は、 r_0 を十分考慮していると考えられる。また、簡易化のため L1 と L2 を同一仕様とし、AL1 と AL2 は矩形レンズアレイ、AL1 と AL2 は円形レンズとした。

図 3-4 (a)はこれらの設計条件に基づき、その一例として設計した空間光通信用デュプリケート光学系、図 3-4 (b)~(e)は光学設計ソフト“CODE V®”を用いた数値計算より得られたスポットダイアグラムである。入力面には 4 つの異なる方向からコリメート光が斜入射する。ビームはすべてデュプリケート光学系の光軸を中心とする正方形となり、それぞれが重なり合う。入力面を制御しない場合、得られた図 3-4 (b)が示すように、確かに入力面に正方形のスポットダイアグラムが形成された。正方形の一辺の長さ l_i は、 l_1 が 3 mm、 f_1 が 50 mm、 f_2 が 100 mm であることから、式(3-1)より算出される値の 6 mm で、スポットダイアグラムから推定された値も 6.0 mm であることを確認した。図 3-4 (c)が示すように、出力面では、1 本の入力ビームから 4 本の分岐ビームが生成されていることが確認できた。生成された正方形のビームの一辺の長さ l_o は、上記の値に加え、 f_3 が 100 mm、 f_4 が 25 mm より、式(3-3)で計算された理論値は 1.5 mm となり、スポットダイアグラムからの推定値も 1.5

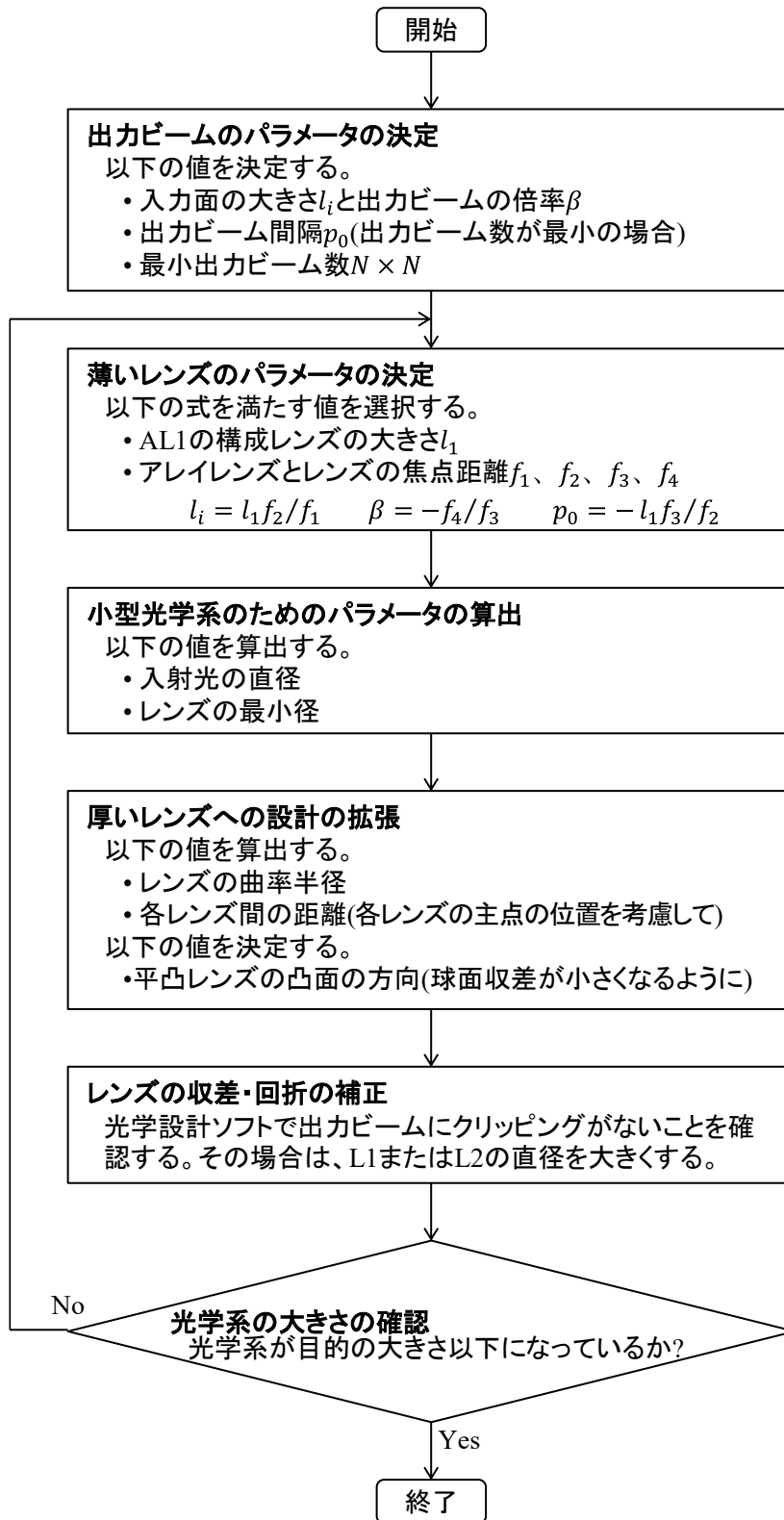


図 3-3 デュプリケート光学系の設計フローチャート[4]

mm であった。また、式(3-4)から l_1 、 f_2 、 f_3 の値より計算された出力ビームの間隔 p_0 の理論値は3 mm で、数値計算により得られたスポットダイアグラムから推定された値も3.0 mm であった。入力面上の正方形のスポット(6 mm×6 mm)が、アレイレンズを構成する正方形のレンズ数に相当する数だけ、式(3-2)で計算される複製ビームの倍率 β が1/4で複製されたものとみなせる。

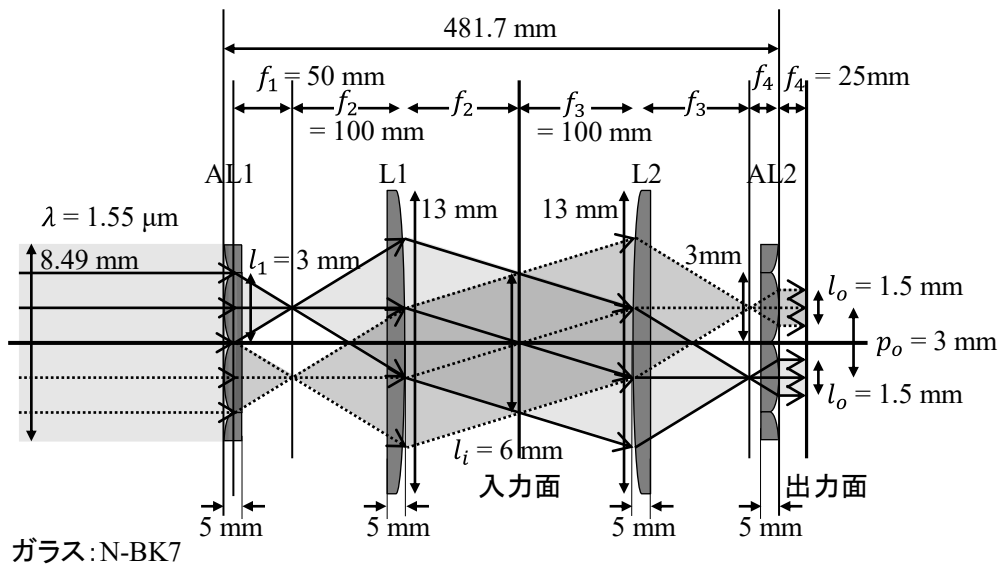
図 3-4 (d)、(e)は、数値計算において入力面に4つの開口アレイを挿入した場合の入力面および出力面上のスポットダイアグラムである。4つの正方形パターンを挿入した場合、4つの正方形パターンが、アレイレンズを構成するレンズの数だけ複製される。したがって、合計16個の正方形パターンが出力された。また、正方形の出力パターンは、入力された正方形の画像の1/4の大きさであることが確認できた。入力面の制御によるビーム分岐に伴い最小の出力ビーム間隔が1.0 mm となった。大気ゆらぎの影響がさらに大きくなった場合、大気ゆらぎの影響の低減が可能である。これらの数値計算結果から、入力面に $N \times N$ 個の画像を挿入した場合、 $4N \times 4N$ 本のビームに分岐されることを確認した。

したがって、デュプリケート光学系による、レンズとアレイレンズの仕様や配置を変更することのない、入力面に挿入される分岐素子の数に応じたビーム数の柔軟な制御を確かめることができた。しかし、入力面に開口アレイを入力し出力ビームの本数を増やすと、出力ビームの間隔が小さくなる。複数ビーム伝送で大気ゆらぎの影響を低減するためには、ビームの間隔を大気のコヒーレンス長 r_0 よりも大きくする必要があるが、デュプリケート光学系の後ろに設置する望遠鏡の倍率を変えることで、この間隔を調整することができる。

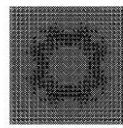
なお、本論文における原理確認の数値計算において、デュプリケート光学系へ入力するビームは平面波を仮定している。実際の空間光通信ではガウシアンビームを使用しており、平面波はガウシアンビームよりもおよそ $\pi/2$ だけ、ビーム拡がり角が大きくなることを承知している。計算の簡易化のため、理想的に平面波を用いることを仮定しても、結果に多少の相違が出るが、原理確認はできると判断する。

表 3-3 空間光通信用デュプリケート光学系の設計条件

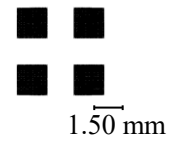
波長 λ (μm)	1.55
入力ビームの直径 (mm)	<10
光学系の全長 (mm)	<500
出力ビーム間隔 p_o (mm)	3



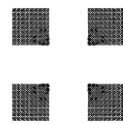
(a)



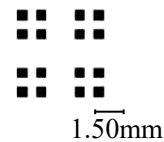
(b) 入力面



(c) 出力面



(d) 入力面: 4つの矩形



(e) 出力面

図 3-4 設計した空間光通信用デュプリケート光学系とスポットダイアグラム[4]

(a) 設計したデュプリケート光学系

(b) 遮蔽なしの場合の入力面、(c) 出力面、

(d) 4つの矩形開口を挿入した場合の入力面、(e) 出力面

3.4. 複数ビーム生成素子を用いた大気ゆらぎの影響低減実験

3.4.1. 複数ビーム生成素子を適応した送信器の構築

図 3-5 に示すように、デュプリケート光学系で生成した複数のビームを東海大学湘南キャンパスの 2 点間の大気中を伝送させ、CCD(Charge-coupled device)カメラで動画として撮像した。動画から得られた光強度の確率密度分布から、複数ビーム伝送の場合、1 つのビームを伝送した場合と比べて受信光強度の変動が小さくなることを確認した。

図 3-6 は、5 倍の拡大系を備えた送信器である。L5 と L6 の焦点距離 f_5 と f_6 は、それぞれ 40 mm と 200 mm である。送信器の光学系は、屋外での実験を行うための可搬性を考慮し、三脚上のブレッダボード(450 mm×450 mm)に構築した。デュプリケート光学系は、図 3-3 に従い設計した。入力波長 λ は 785 nm、AL1 の焦点距離 f_1 は 38.7 mm、L2 の焦点距離 f_2 は 30 mm、L3 の焦点距離 f_3 は 40 mm、AL2 の焦点距離 f_4 は 38.7 mm である。AL1 と L2 の間の距離 d_1 を 69 mm、L2 と L3 の間の距離 d_2 を 65 mm、L3 と AL2 の間の距離 d_3 を 70 mm とした [5]。

また、送信器の基本構成の変更として、図 3-7 に示すように、大気ゆらぎが小さい場合でもデュプリケート光学系の効果を確認できるように、ミラーとビームスプリッタを追加し、さらに、遮光板の配置により、ビーム A と B を選択的に伝送した。そのため、ビーム A のみ、ビーム B のみ、ビーム A と B を同時にというように伝送条件を変えられる。

伝送したビームは、三脚に設置された CCD カメラで構成される受信器で撮像される。CCD カメラで撮像した映像のサンプリングレートは 29.97 fps で、大気ゆらぎの影響を受けた平均的な強度を得るのに十分である。さらに、出力ビームサイズから推定される受信器側のビームフットプリントは、直径約 75 mm であった。

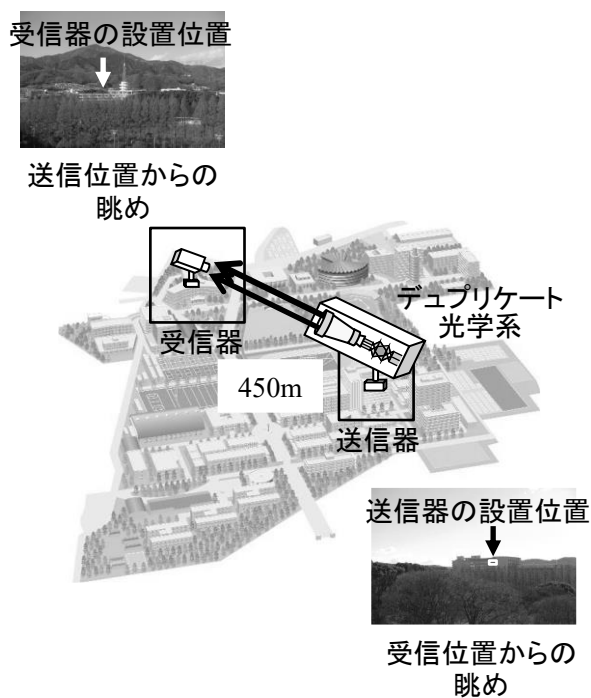


図 3-5 東海大学湘南キャンパスでの実験[1]

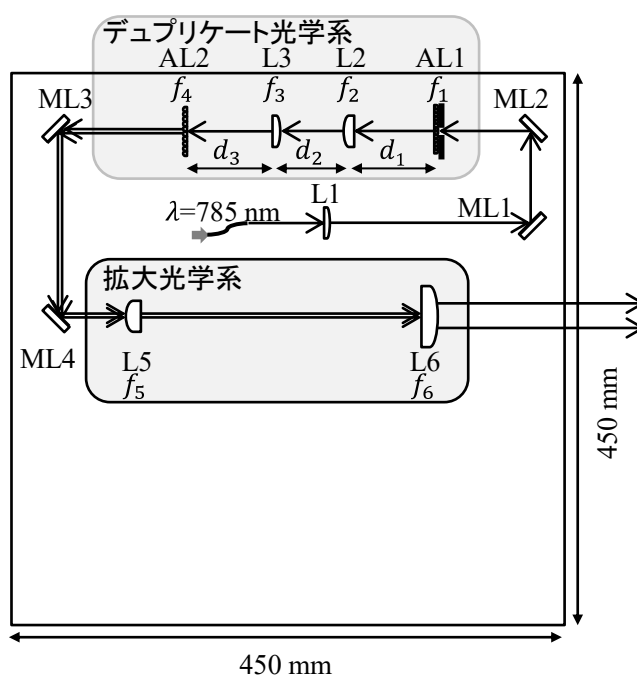


図 3-6 デュプリケート光学系と拡大系を適応した送信器[1]

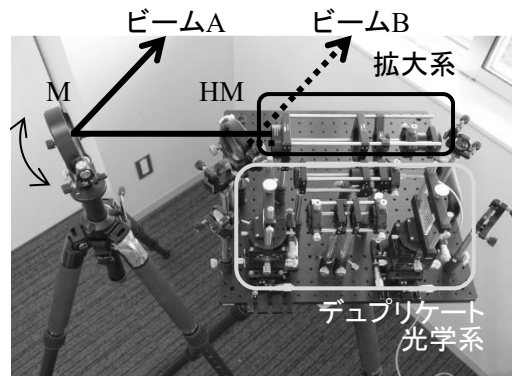


図 3-7 ビーム A と B を選択的に伝送する送信器[1]

3.4.2. 複数ビーム生成素子を用いたビーム伝送実験

2017年12月27日～28日に東海大学湘南キャンパスにて実験を実施し、データの測定を12月28日に行った。約450m伝搬したレーザ光を、受信器で動画として撮像した。また、撮像した動画の一部の固定ピクセルの光強度変化から、大気ゆらぎの状態を推定した[80]結果、屈折率構造定数 C_n^2 は $5.61 \times 10^{-14} \text{ m}^{-23}$ 、大気のコヒーレンス長 r_0 は9.46 mmであった。

図 3-8 に解析の手順を示す。まず、動画から取り出した各画像から、受信したビームの領域(85×85 ピクセル)を抽出する。さらに、光強度の変化を定量的に比較するために、この領域のヒストグラムから正規化された光強度の確率密度分布を算出する。得られた正規化強度の確率密度分布を、最小二乗法により対数正規分布に近似した。対数正規分布の確率密度関数は次式で表される。

$$f(x) = \frac{1}{\sigma x \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{(\log x - \mu)^2}{2\sigma^2} \right\} \quad (3-5)$$

ここで、 μ と σ^2 はそれぞれ $\log x$ の平均と分散を表し、 x と σ はともに正の値である。

図 3-9 は、取得した画像のサンプルと、光強度の確率密度分布を対数正規分布の近似曲線で表したものである。確率密度分布は大気ゆらぎの影響により変化している。

図 3-10 は、図 3-8 の解析により、得られた全ての画像による確率密度分布の近似曲線である[21]。図 3-10 では伝送ビーム数の1本から2本の増加に伴い、対数正規分布の分散が小さくなっている。したがって、デュプリケート光学系により、大気ゆらぎの影響が低減

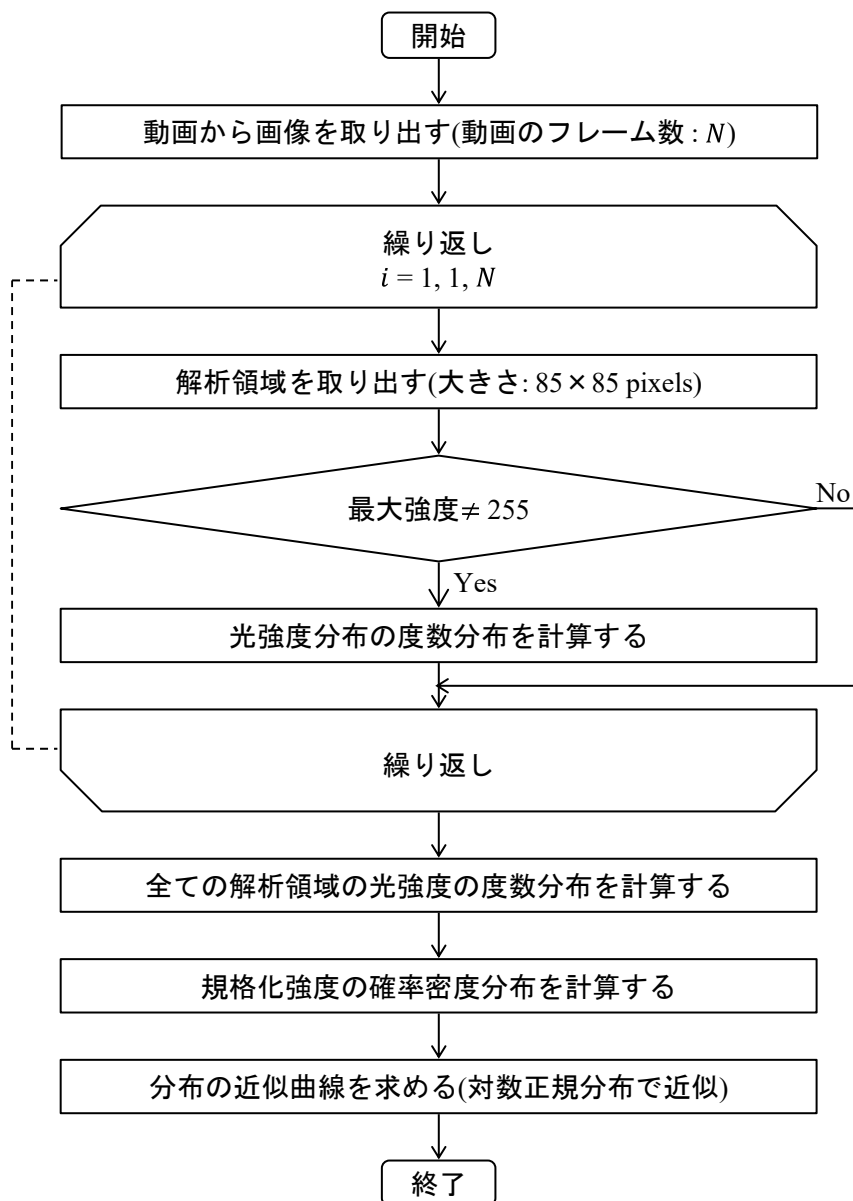


図 3-8 取得したそれぞれのビーム伝送状況における動画の解析フローチャート[1]

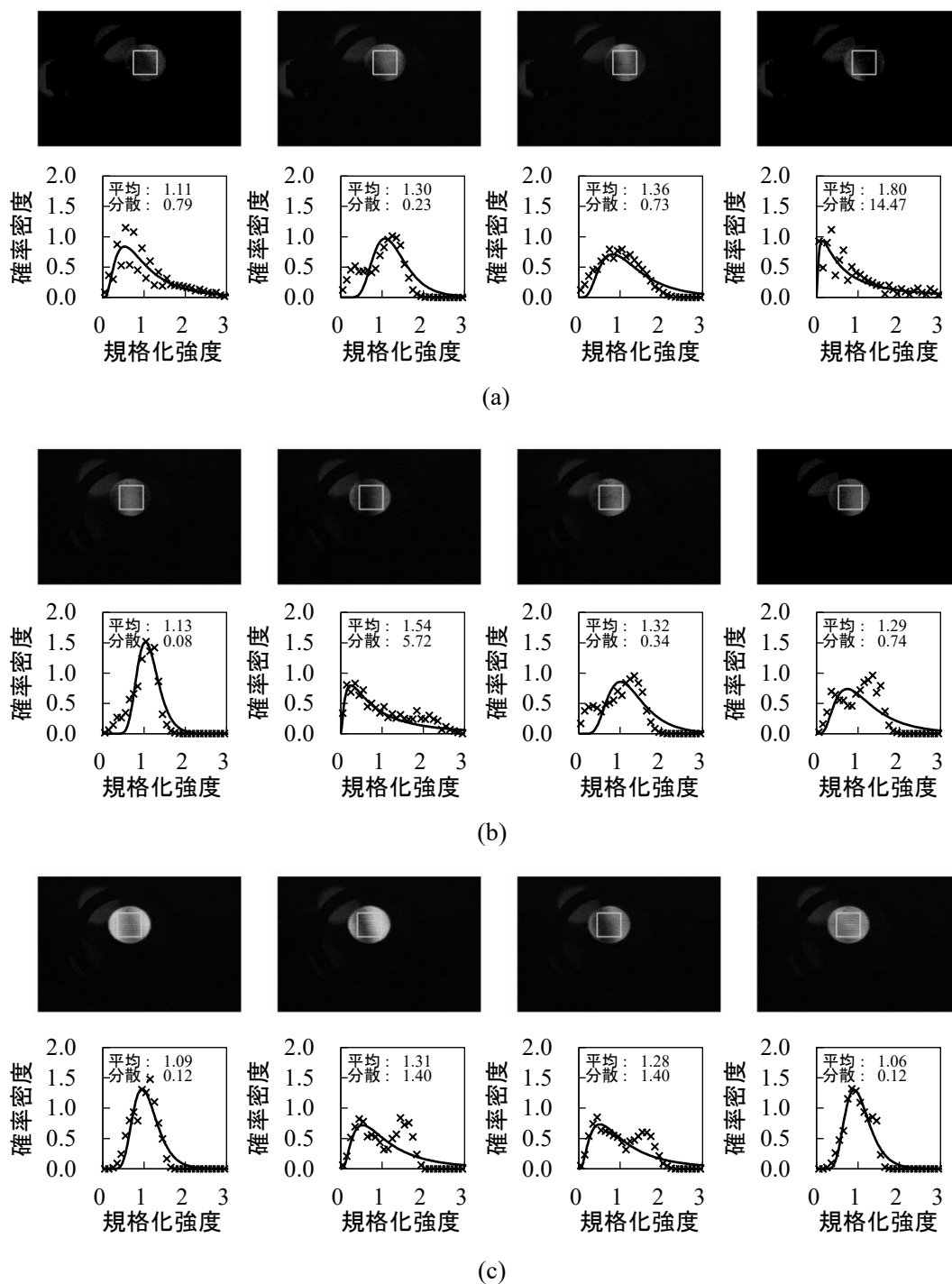


図3-9 (a)ビーム A のみ、(b)ビーム B のみ、(c)ビーム A と B の両方を伝送した場合の動
画から取り出した画像のサンプルと規格化された規格化強度と確率密度分布の関係[1]
(画像中の灰色の四角形は解析領域、確率密度分布中の×マークは測定値、
実線は測定値の対数正規分布への近似曲線を示す。)

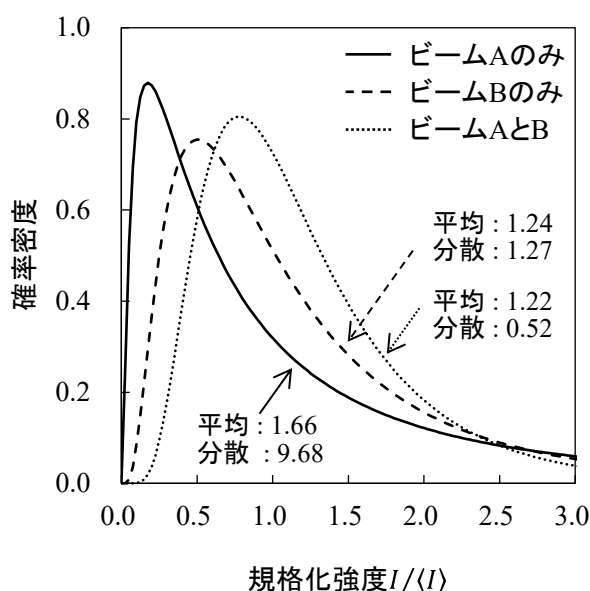


図 3-10 正規化強度と動画から算出した確率密度分布の対数正規分布近似曲線[1]

し、デュプリケート光学系が空間光通信の通信品質の向上に有効であることが確認された。本実験では、2本のビームを生成して測定を行っている。しかし、確率密度分布が小さくなる傾向は、より多くの数のビームを同時に伝送するほど顕著になる。

図3-10のビームAのみ、ビームBのみの確率密度の形状は異なる。想定よりも大気ゆらぎの影響が小さかったため、図3-7に示すように、ミラーとビームスプリッタを追加し、デュプリケート光学系による2ビームのビーム間隔を29 mmに広げ、遮光板の配置により、ビームAとBを選択的に伝送した。ビームAとBがそれぞれ異なる大気ゆらぎの状況の空間を伝搬したため、それぞれの確率密度分布の形状が異なっている。

注意すべき点は、先ほど述べた様に、今回の実験では大気ゆらぎの影響が想定よりも小さかったことである。我々が構築・設計したデュプリケート光学系はより強い大気ゆらぎにおいて平均化効果が得られるため、従来の平均化効果は光学系の出力ビームの数やビーム間隔を改良することで得られる。

3.5. ビーム拡がり角の制御のための複数ビーム生成素子

まず、図 3-11 にビーム拡がり角の制御による空間伝搬損の低減の具体事例を示す。OICET のアップリンクを想定し、ビーム拡がり角 θ_{div} を $102 \mu\text{rad}$ 、送信開口直径 D_t を 710 mm 、受信開口直径 D_R を 260 mm [66]、また、距離 L を 610 km [65]と仮定した。式(2-17)より、空間伝搬損は 53.6 dB となる。 L が 2 倍の 1220 km となった場合、 L の増加に伴い、空間伝搬損は 59.6 dB に増加する。しかし、 θ_{div} を半分の $52 \mu\text{rad}$ すると、空間伝搬損は初めの例と同じく 53.6 dB となる。よって、 θ_{div} を半分にすることで、空間伝搬損を 6dB の低減できる。

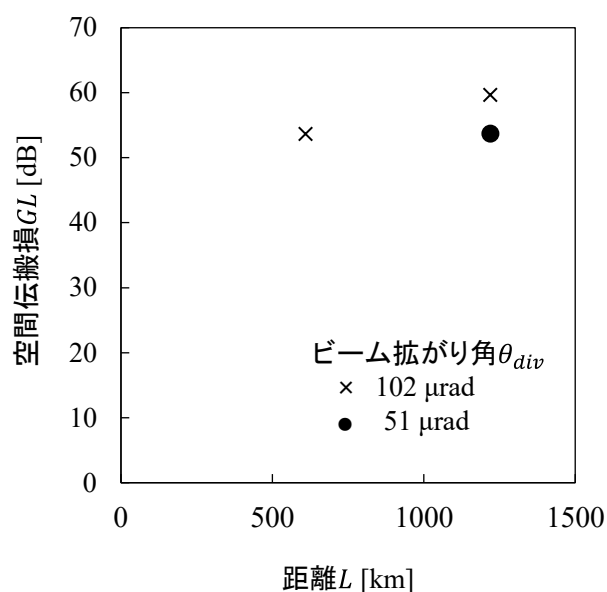


図 3-11 ビーム拡がり角の制御による空間伝搬損 GL の低減

図 3-12 (a)に示すように、デュプリケート光学系は、入力面に 1×1 の開口部を持つフィルタを挿入すると、アレイレンズのレンズ数に応じて 1 本のビームが複製され、出力面には 2×2 本のビームが出力される。入力面に 3×3 の開口部を持つフィルタを挿入することで、出力ビーム数はそれに対応して 6×6 に増やすことができる。したがって、入力面のフィルタを交換することで、デュプリケート光学系は出力ビームの数を制御することができる。

出力ビームの総電力を変えずに、移動体の位置に応じてビーム拡がり角を制御するためには、入力面に挿入されているフィルタが以下の 2 つの条件を満たす必要がある。

1つ目の条件がメッシュフィルタの挿入である。図 3-12 (b)に示すように、入力面にメッシュフィルタを挿入することで、小ビームの集合体が複製される。複製された画像の集合(小ビームの集合体)は、移動体の位置まで伝搬し、干渉する。回折した平面波のビーム拡がり角は λ/D (λ は波長、 D は平行光の大きさ)に比例するため、メッシュの大きさを大きくすると(D を大きくすると)、各出力レーザー光のビーム拡がり角が狭くなる。これに対して、メッシュの大きさを小さくすると(D を小さくすると)、各出力ビームのビーム拡がり角が広がる。このように、メッシュの大きさを変えることでビーム拡がり角を調整できる。

2つ目の条件が、フィルタの総面積を等しくすることである。図 3-12 (a)と(b)のように、フィルタの総面積を等しくすると、デュプリケート光学系の出力ビームの総出力は等しくなる。出力ビームの総出力を等しくすれば、大幅な電力の減衰抑制が可能である。

また、移動体の位置に合わせてビーム拡がり角を制御するために、メッシュフィルタの開口配列の形状、数、大きさ、外縁の大きさを適宜変更する必要がある、入力面内の既存のフィルタを機械的に新しいフィルタに交換する必要がある。そこで、液晶フィルタの使用を提案する。

このように、ビーム拡がり角の制御を容易に実現し、さらに駆動部を必要とせずに 1 本のビームから任意の本数のビームを生成することができるデバイスは、これまで提案されていない。

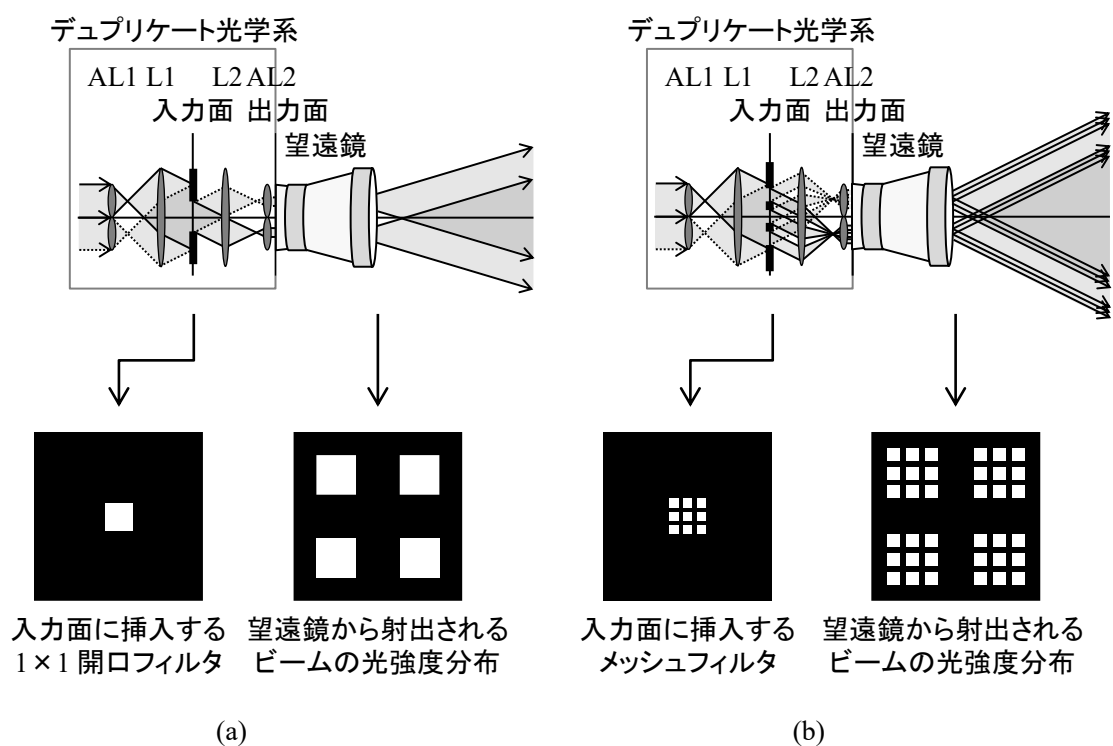


図 3-12 デュプリケート光学系によるビーム拡がり角の制御[3]

(a) 入力面に 1×1 の開口フィルタを挿入した場合、

(b) 入力面にメッシュフィルタを挿入した場合

(Copyright (2016) The Japan Society of Applied Physics)

3.6. 複数ビーム生成素子によるビーム拡がり角の制御の検討

数値計算で得られた条件で、移動体位置でのレーザ光の光強度分布の数値解析を行った。送信器の光学系の構造を変えずに、デュプリケート光学系の入力面に液晶フィルタを挿入することで、可変開口によりビーム拡がり角の制御が可能であるか、シミュレーションによる検討を行う。数値計算の条件は以下の通りである。

- ・ 強度が一定の平面波がデュプリケート光学系に入射する。
- ・ デュプリケート光学系と望遠鏡に収差がない。
- ・ ビームは大気中を伝搬するが、大気ゆらぎはない。
- ・ 各ビームは、大気のコヒーレンス長によって分離されていないため、コヒーレントである。

これらの条件に従って、望遠鏡の開口から射出される光強度と位相が一樣な複製された複数ビームの回折強度分布を計算した。これらのビームは、屈折率が一定の大気中を伝搬する。望遠鏡から移動体への光ビームの伝搬は、移動体までの伝送距離を l 、レーザの波長を λ 、出射ビームの最大領域を d として、フラウンホーファ回折式により計算する。 z_1 面上の複素振幅分布 $U_1(x_1, y_1)$ は z_1 面から z 軸に沿って l の距離を回折しながら伝搬し、その複素振幅が $U_2(x_2, y_2)$ となるとする。 d が U_1 の最大拡散範囲、 λ が波長の場合、条件

$$l \gg d^2/\lambda \quad (3-6)$$

を満たすと、 $U_2(x_2, y_2)$ は次式で表される[81], [82]。

$$U_2(x_2, y_2) = \frac{je^{-ikl}}{\lambda l} \exp\left[-jk\frac{x_2^2 + y_2^2}{2l}\right] \iint U_1(x_1, y_1) \exp\left[j\frac{2\pi(x_1x_2 + y_1y_2)}{\lambda l}\right] dx_1 dy_1 \quad (3-7)$$

表 3-4 は、シミュレーションに用いた入力パラメータの詳細を示している。これらの値は、式(3-6)の条件を満たしている。また、精度よくビーム照射幅を測定するため、図 3-13 (e)の 5×5 の矩形アレイビームにおいて、ピクセル数を 1000×1000 から 45000×45000 まで増やし、ピクセルサイズを 1×1 から $625 \times 625 \mu\text{m}^2$ まで大きくした様々な組み合わせの数値計算を行い、回折パターンの半値全幅(Full width at half maximum : FWHM)が 0.18 km とほとんど変化しない最適化されたピクセル数とピクセルサイズを採用した。ピクセル数が少なく、ピクセルサイズが小さい場合、移動体の受光面でのピクセルサイズが大きくなり、正確な照射領域の幅が得られなくなるため、適切なピクセル数とピクセルサイズを選択する最適化を行った。

表 3-4 伝搬数値解析に用いた入力パラメータ

波長 λ (μm)	1.550
伝播距離 l (km)	2,000
大気の屈折率 n	1.0
ピクセル数 (pixels)	25,000 \times 25,000
ピクセルサイズ (μm^2)	
3 \times 3 ビーム以外	25 \times 25
3 \times 3 ビーム	33.333 \times 33.333
射出ビームの大きさ (mm^2)	
1 \times 1 ビーム	12.5 \times 12.5
2 \times 2 ビーム	6.25 \times 6.25
3 \times 3 ビーム	4.167 \times 4.167
4 \times 4 ビーム	3.125 \times 3.125
5 \times 5 ビーム	2.5 \times 2.5
射出ビーム間隔 (mm)	
2 \times 2 ビーム	2.5
3 \times 3 ビーム	1.233
4 \times 4 ビーム	0.8
5 \times 5 ビーム	0.625
射出ビームの最大範囲 d (mm^2)	
1 \times 1 ビーム	12.5 \times 12.5
2 \times 2 ビーム, 5 \times 5 ビーム	15 \times 15
3 \times 3 ビーム	14.967 \times 14.967
4 \times 4 ビーム	14.9 \times 14.9

図 3-13 (2)および図 3-13 (3)は、入力面上のフィルタの総面積を維持しながら、フィルタの開口アレイ数を変化させた場合の、移動体位置におけるレーザ光の光強度分布を示している。これらのグラフは、望遠鏡の開口面から射出される光強度が 1 である一様なビームの光強度分布と、移動体の $y_2 = 0$ におけるビームプロファイルを示している。最適化したピクセル数とピクセルサイズを使用し、図 3-4 の設計したデュプリケート光学系を用い、射出ビーム全体が 15 mm \times 15 mm の範囲内に収まるようにしている。さらに、デュプリケート光学系のマスクの領域を 15 mm \times 15 mm に拡張することで、分割数を増やしても、総面積を維持している。これらの条件を満たし、射出する矩形ビームの大きさは等しく、ビーム間隔は最大となるよう、ビームの大きさとビーム間隔を決定した。また、矩形ビームの数は 1 \times 1、2 \times 2、3 \times 3、4 \times 4、5 \times 5 である。

図 3-13 (a)~(e)の(2)に示した全てのグラフは、光軸の位置 $(x_2, y_2) = (0, 0)$ における回折ビーム中心の光強度が 2.54×10^{-9} a.u. という条件を満たしているが、プロファイルの形状は異なっている。特に、(a)以外の場合には、サイドローブの光強度が(a)の場合よりも大きい。

図 3-14 は、移動体での受信閾値を最大強度のおよそ 2 割の 0.49×10^{-9} a.u. を仮定した場合の移動体位置でのビーム照射の幅を示したもので、移動体位置でのビーム拡がり角を制御する際に考慮すべき例である。サイドローブが閾値以上であれば、サイドローブを含む領域を照射領域と判断した。また、サイドローブが閾値以下の場合は、中央のピークの領域が照射領域となる。しかし、光地上局の望遠鏡から射出されたレーザー光が大気ゆらぎの影響を受けずに伝搬すると仮定して計算しているため、中央のピークとサイドローブの間には光強度が 0 となる位置が存在する。光強度が 0 になる位置は、ビームが大気中を通過する際の大気ゆらぎの影響を受けて、ほとんど発生しない。また、デュプリケート光学系で複製した各ビームの伝搬方向は、大気の影響を受けて時間とともに変化する。したがって、ビームを重ね合わせた移動体では、各ビームに対応する光強度 0 の領域が重なる可能性は極めて低い。

移動体の位置における閾値以上のビーム照射幅を求めた結果、約 0.25~0.61 km の範囲でビーム照射の幅を調整可能で、したがって、ビーム拡がり角を調整可能であることを確認できた。また、ビーム照射領域はほぼ正方形であるため、デュプリケート光学系の入力面上のフィルタの総面積が一定で、フィルタの配列数を変えた場合、照射面積を約 6 倍制御することが可能である。さらに、フィルタの開口部の配列の形状、数、大きさ、間隔を変えるとファーストフィールドの光強度分布は変化するため、フィルタの開口部の配列の形状、数、大きさ、間隔を最適化することで、ビーム照射の幅、つまり、ビーム拡がり角に大きな変化が得られると考えている。

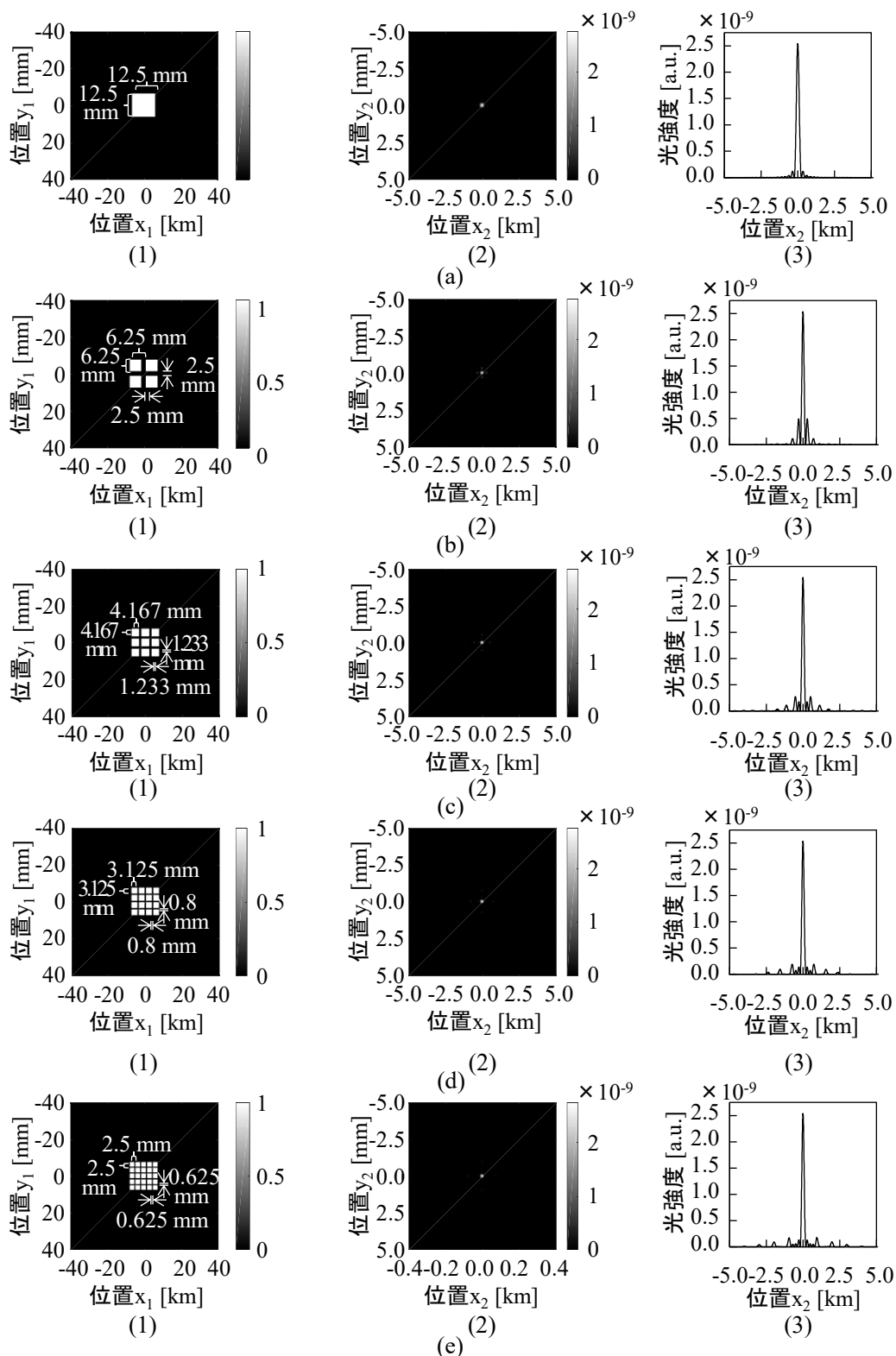


図 3-13 デュプリケート光学系の入力パターンを変更して移動体で得られた回折パターン(数値解析)

- (a) 1 ビーム、(b) 2×2 ビーム、(c) 3×3 ビーム、(d) 4×4 ビーム、(e) 5×5 ビームの場合
 (1) 望遠鏡の開口面から射出されたビームの 2 次元的光強度分布、
 (2) 移動体での 2 次元光強度分布、(3) (2)の強度分布プロファイル($y_2 = 0$)

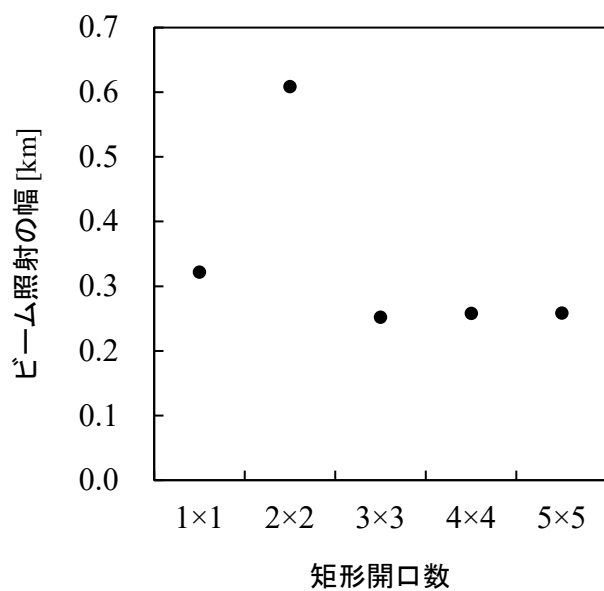


図 3-14 移動体の位置におけるビーム照射幅の変化

3.7. まとめ

本論文では、将来有望な大容量空間光通信の開発を目的に、大気ゆらぎの影響と、同時に、空間伝搬損を低減し、通信品質の向上を図るために必要な技術として、送信機能へ複数ビーム生成素子であるデュプリケート光学系を適応することを提案・検討し、以下の成果を得た。

- (1) 大気ゆらぎの影響を低減するための複数ビーム生成デバイスとして空間光通信用小型デュプリケート光学系の適応を提案した。従来提案されていた複数ビーム生成法は、ビーム数を制御するために、新たな素子が必要である。しかし、今回提案するデュプリケート光学系は、光学系の構造を変えることなく、簡単に出力ビーム数を増やすことができる。したがって、デュプリケート光学系は、大気ゆらぎの状況に応じて容易にゆらぎを抑えることができる非常に有用なデバイスである。
- (2) 空間光通信用の小型なデュプリケート光学系を構築するための簡単な設計手法を提案し、幅広い応用の可能性を示した。提案したデュプリケート光学系が、非常に有効なデバイスであることを数値計算により確認した。
- (3) 約 450 m の距離でビーム送信実験を行い、規格化強度の確率密度分布を算出し、伝送ビーム数が増えるほど分散が小さくなることが分かった。これにより、デュプリケート光学系が受信ビームの光強度の変動を抑え、大気ゆらぎの影響を抑制し、空間光通信における光回線の通信品質の向上に有効であることを実験的に確認できた。
- (4) 空間伝搬損の低減を目的に、機械的駆動部なしで、移動体の位置に応じてビーム拡がり角を制御するためにデュプリケート光学系を適応し、デュプリケート光学系の入力面に液晶フィルタを挿入し、メッシュフィルタの開口数を変更することで、出力ビームの総電力を変えることなく、レーザ光のビーム拡がり角を制御することを提案した。
- (5) 回折を考慮した数値解析を行い、デュプリケート光学系によるビーム照射領域はほぼ正方形になり、移動体が受信する光強度にサイドローブよりも小さい閾値がある場合は、サイドローブよりも大きい閾値がある場合に比べて、ビーム幅が約 2 倍、照射面積が約 6 倍になり、ビーム拡がり角が制御できることを確認した。デュプリケート光学系による空間伝搬損の可能性を示した。

これらの結果から、デュプリケート光学系は、大気ゆらぎの影響を低減し、空間伝搬損

も低減できる空間光通信の通信品質の向上に非常に有効なデバイスであることが確認できた。

第4章 受信光の焦点制御を適応した受信機能

4.1. UAVの大容量通信の要求

前章まで、空間光通信の応用として検討が進んでいる、衛星と光地上局間の空間光通信を事例として取り上げ、検討を加えてきた。本章では、図4-1に示すように、UAV-光地上局間空間光通信に着目し、ビーム拡がり角の大きなビームを用い、また、距離に対し距離変化が大きいため生じるレーザ光の進行方向に対する焦点位置の変動について、検討を加える。

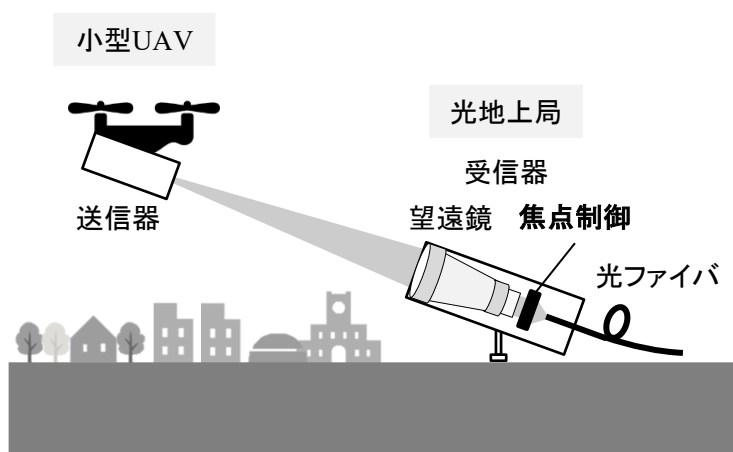


図4-1 小型 UAV-光地上局間空間光通信[2]

(Copyright (2021) The Japan Society of Applied Physics)

UAVは、空中撮影、測量、警備・監視など、用途が拡大している。そこで、より高解像度の多数の画像の伝送が求められている。現在、UAVに搭載されている測量用4眼高速連写カメラ(CN-DR400、ザクティ社)[83]の例を示す。2000万画素の静止画を、4つのカメラで高速連写し、1秒間に2.88 Gbitのデータが取得され、外部メモリに保存する。そのため、

表4-1 測量用4眼高速連写カメラ(CN-DR400、ザクティ社)の仕様[83]

画素数 (pixels)	2000万
圧縮方法	JPEG/DNG(RAWデータ)
連写速度(fps/camera)	JPEG : 2、DNG : 1
ストレージ (GB)	最大512 (SDXC) × 4

ワイヤレス通信を適応した場合、少なくとも 2.88 Gbps の大容量通信が要求される。

このように、UAV の用途の拡大に伴う大容量の通信の要求により、UAV と光地上局間への空間光通信の適応が注目されるなど、空間光通信の応用の範囲が広がっている。

4.2. 通信距離の変化に伴う課題

小型 UAV から送信されたレーザ光が地上局の望遠鏡で受光され、光ファイバに直接結合されることを想定した場合、人工衛星などの移動体との長距離の空間光通信では姿勢揺れによる指向誤差を抑制するために自動指向ジンバルが搭載されている[84]が、最大積載量の制限から小型 UAV にジンバルを搭載することは困難である。そのため、小型 UAV-光地上局間空間光通信では、揺れを十分にカバーするビーム拡がり角を持つレーザ光を送信する必要がある。しかし、送信ビームに拡がりがあるため、小型 UAV から光地上局までの距離に応じて、レンズによる受信ビームの焦点位置が変動する。そのため、光ファイバに結合される受信ビームの電力が極端に低下し、通信品質が低下する。しかし、知る限り、これまで距離の変化については考慮されてこなかった。そこで、光地上局の受信機能に焦点制御を適応することを提案する。

4.3 節では、距離変化による受信ビームの焦点位置の変化を数値計算により定量的に評価し、通信の成立性の観点から焦点制御の必要性を明らかにする。さらに、焦点制御により光ファイバとの結合効率が向上することを確認する。4.4 節では、大気ゆらぎが生じている地上の 2 点間の 450 m 伝搬したレーザ光を、焦点制御を適応した受信機能で受光する屋外実験について報告する。この実験により、大気のゆらぎの影響下で受信ビームの焦点位置を制御できることを確認し、実環境での通信品質の向上が可能であることを確かめる。

4.3. 受信光の焦点制御の提案

4.3.1. 受信光の焦点制御

図 4-2 (a)は、従来の小型 UAV-光地上局間光通信システムの模式図である。受信器は、レンズ L1 と L2 から成る縮小光学系に加え、精捕捉追尾系、レンズ L と光ファイバで構成される。それぞれのレンズの焦点距離を f_1 、 f_2 、 f 、また、L1 の開口半径を R_1 、L から光ファイバの端面までの距離を d' とする。小型 UAV からのレーザー光は距離 L' 伝搬し光地上局で受光され、光ファイバの端面に集光する。

図 4-2 (b)は小型 UAV が受信器に対し水平方向に移動し、小型 UAV と受信器までの距離が L となった受信器を示している。受信器に入射した光は L1 に入射し、L1 の背後から距離 d_1 、L2 の前方 d_2 の位置で焦点を結んだ後、再度拡がり L2 に入射する。L2 を通り距離 d_4 だけ伝搬し L に入射する光は、L2 の背後から距離 d_3 の点光源から射出された光のように作用する。また、L にビーム半径 R で入射する。図 4-2 (b)に示すように、送信されたレーザー光は小型 UAV の姿勢揺れをカバーするビーム拡がり角を持つため、受信されたレーザー光の焦点は、UAV から受信器までの距離に応じて L の背後、距離 d の位置に移動し、受信ビームの光ファイバへの結合効率が低下する。この焦点の変動を防ぐために、受信ビームの焦点を制御可能なレンズを適応する。どのレンズにも適応可能であるが、ここでは、例えば、レンズ L を可変焦点レンズに置き換える。

一方で、UAV の受信器に対する垂直方向の移動に伴い、レーザーの進行方向に対して垂直に焦点が移動する。この移動の低減のためには、すでに高速な駆動ミラーを用いた精捕捉追尾系が適応されている。

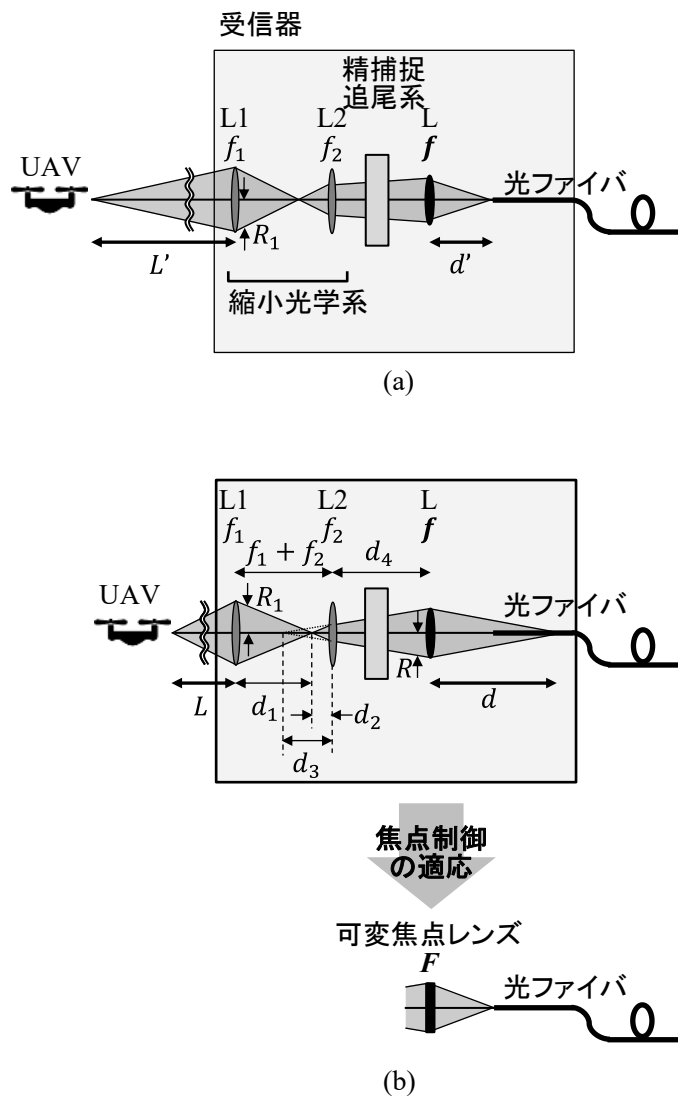


図 4-2 小型 UAV-光地上局間空間光通信の受信器への焦点制御の適応[2]

(a) 小型 UAV から光地上局までの距離が L' の場合の従来の受信器

(b) 距離が L に変わった場合の従来の受信器と焦点制御を適応した受信器

(Copyright (2021) The Japan Society of Applied Physics)

4.3.2. 液晶空間光変調器(LCOS-SLM)

焦点制御が可能な可変焦点レンズとして様々なデバイスが提案されており、すでに高速オートフォーカスシステム[85]や光スイッチング[86]、光ピンセット[87]など、幅広い分野で用いられている。中でも、液晶空間光変調器(Liquid crystal on silicon-spatial light modulation: LCOS-SLM)は、可変焦点レンズとして動作する際に精密な位相変調が可能で、また、軽量化も可能である[88]。そこで LCOS-SLM の適応を提案する。容易な取り扱いと軽量化に伴う光地上局の可搬性の向上は、空間光通信の新たな応用の拡大に繋がる[89]。

4.3.3. 受信光の焦点変動

距離に応じて変化する受信ビームの焦点位置 d は、以下の一連の式で求められる。

$$d_1 = \frac{f_1 L}{L - f_1} \quad (4-1)$$

$$d_2 = f_1 + f_2 - d_1 \quad (4-2)$$

$$d_3 = \frac{f_2 d_2}{f_1 - d_2} \quad (4-3)$$

$$d = \frac{f(d_3 + d_4)}{d_3 + d_4 - f} \quad (4-4)$$

図 4-3 は、これらの式から求めた、距離 L に対する L の背後から焦点までの距離 d と L の焦点距離 f との差を示している。つまり、 f を基準とする焦点の変動距離の関係である。図 4-3 を求めるために、実験を想定した値として、 f_1 を 150 mm、 f_2 を 40 mm、 d_4 を 216 mm、 f を 100mm、150mm、200mm と仮定した。さらに計算条件として、 L は 30 m~500 m とした。この値は、日本の安全規制のガイドラインで要求されている 2つの UAV の運用条件により決定した[90], [91]。さらに、光源は点光源を仮定とした。この仮定は、出射ビームの直径が L よりはるかに小さいことに基づいている。また、照射領域が受信望遠鏡の開口部をカバーするように、出射ビームのビーム拡がり角が送信器のレンズ系により制御される。波長 λ は 1.55 μm 、ビーム品質係数 M^2 は 1.4 で、地上の光ファイバ網で使用される半導体レーザーの代表的な値である。 f が 100 mm、200 m、300 m の 3 パターンについて検討した。 f が 200 mm の場合、 L と f の差は、 L が 30 m では 19.1 mm、 L が 500 m では 1.1 mm となり、 L が短いほど受信ビームの焦点位置の変化が大きくなることが分かる。さらに、同じ L では f

の値が大きいくほど、受信ビームの焦点の位置変化が大きくなる。

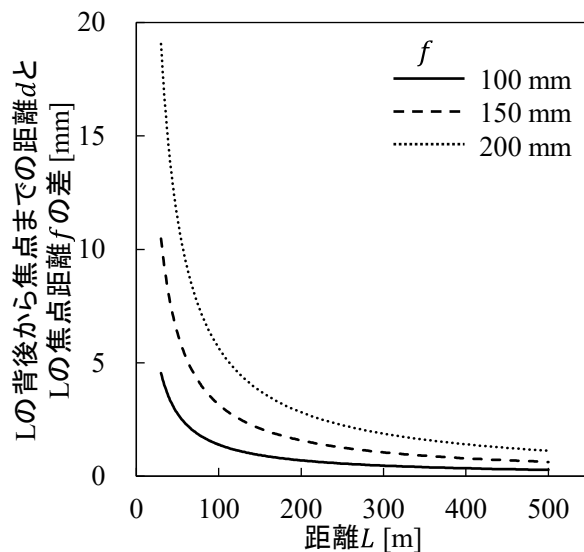


図 4-3 距離 L および L の背後から焦点までの距離 d と L の焦点距離 f との差の関係[2]

(Copyright (2021) The Japan Society of Applied Physics)

4.3.4. 焦点制御の実証

ファイバの結合効率 η は、ファイバに結合した電力 P_T とファイバへの入射総電力 P_S を用い、

$$\eta = \frac{P_T}{P_S} \quad (4-5)$$

と表される値であり[92]、焦点制御を適応した場合の結合効率 η_f は次のように求められる[93]–[97]。

$$\eta_f = \left[1 - \exp\left(-\frac{2a^2}{M^2 w_0^2}\right) \right] \left[1 - \exp\left(-\frac{2\theta^2}{M^2 \phi_0^2}\right) \right] \quad (4-6)$$

$$F = \frac{(d_3 + d_4)d'}{d_3 + d_4 + d'} \quad (4-7)$$

$$\sigma \approx 0.21 \frac{\lambda}{R/F} \quad (4-8)$$

$$w_0 = 2\sigma \quad (4-9)$$

$$\theta = \arcsin(NA) \quad (4-10)$$

$$\phi_0 = \lambda/\pi w_0 \quad (4-11)$$

$$R = -\frac{R_1 d_2 (d_3 + d_4)}{d_1 d_3} \quad (4-12)$$

なお、レンズによって形成されるビームパターンはガウス分布に近似している。

焦点制御を行わない場合の結合効率 η_n は次のように与えられる。

$$\eta_n = \left[1 - \exp\left(-\frac{2a^2}{M^2 w_0'^2}\right) \right] \left[1 - \exp\left(-\frac{2\theta^2}{M^2 \phi_0'^2}\right) \right] \quad (4-13)$$

$$w''_0 \approx 2 \cdot 0.21 \frac{\lambda}{R/f} \quad (4-14)$$

$$w'_0 = w''_0 + |F - f| \cdot \frac{R - w''_0}{f} \quad (4-15)$$

$$\phi'_0 = \lambda/\pi w''_0 \quad (4-16)$$

図 4-4 にこれらの式を用いて算出した、距離 L と焦点制御ありとなしの結合効率 η の関係を示す。 L' を 500 m、マルチモードファイバのコア半径 a を 25 μm 、開口数(NA)を 0.22 とした。今回は、高いファイバの結合効率と光地上局の簡易化を目的に、受信光をレンズにより光ファイバに直接結合させ、マルチモードファイバにより受信器外のフォトディテクタに導光することを想定した。受信光をレンズによりフォトディテクタに集光させる場合と異なり、通信速度の変化に応じたフォトディテクタの調整を容易に行うことができる。また、フォトディテクタを受信器から離れた屋外に設置し、電源供給を屋内で行うことも可能である[98],[99]。実験を想定した値である、 R_1 が 25 mm、 d' が 235 mm、および、距離 30 m の場合、図 4-4 より、焦点制御により結合効率は 0.22 % から 91 % へと大幅に改善され、 L が変化しても通信品質の向上が可能であることが分かった。

また、 L が最小の 30 m において、焦点制御がある場合の結合効率が最大となっているが、この L が 30 m に対する最適化を行ったのではなく、対象とした距離 30~50 m のそれぞれの距離に対して、可変焦点レンズによりファイバ端面に集光する、つまり、ファイバ端面において可変焦点レンズが形成するビーム径が最小となる最適化を行っている。焦点制御が

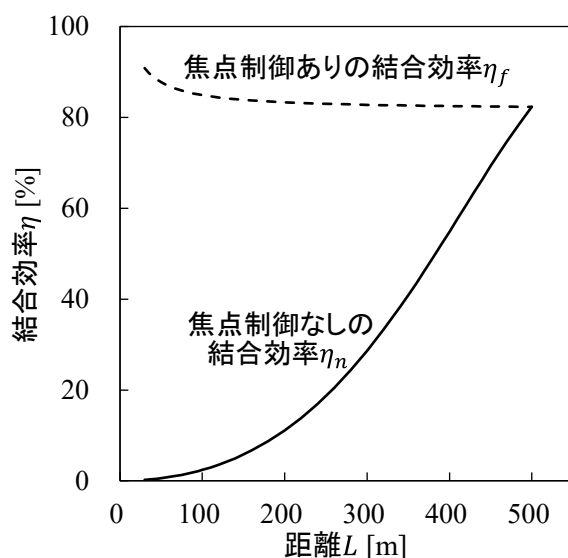


図 4-4 距離 L と結合効率 η の関係[2]

(Copyright (2021) The Japan Society of Applied Physics)

あり、 L が 100 m より小さい場合、 L が小さくなると、 w_0 が約 22 から 19 μm と小さくなる。また、 ϕ_0 は約 23 から 26 μrad と大きくなるが、 $\theta \gg \phi_0$ であるため、結合効率が 85 から 91 % に向上する。焦点制御があり、 L が 100 m 以上の場合、 w_0 は約 22~23 μm 、 ϕ_0 は約 22~23 μrad とほぼ一定であるため、結合効率もほぼ一定の約 82~85 % となる。ここで、 w_0 はファイバでのビーム半径、 ϕ_0 はファイバへのビームの入射角、 θ はファイバの最大受光角である。

さらに、焦点制御を行わない場合の結合効率 η_n 、受信面での電力密度を計算し、それぞれ L_{max} が 500 m で得られた値で正規化した値と、両方の正規化した値を考慮した総合効率を図 4-5 に示す。

L_{max} が 500 m の場合と比較して、総合効率は L が 55 m で 1.5 dB 減衰しており、提案する焦点制御の必要性を示している。この計算により、トランシーバとしてイーサネット用の通信モジュールである SFP(Small form-factor pluggable)トランシーバを空間光通信システムに搭載する例を挙げると、SFPの光信号検出下限値が一般的には-24 dBm であることから、指向誤差がない場合、30~500 m の距離で光信号の受信に約-22.5 dBm 以上が求められることが分かった。

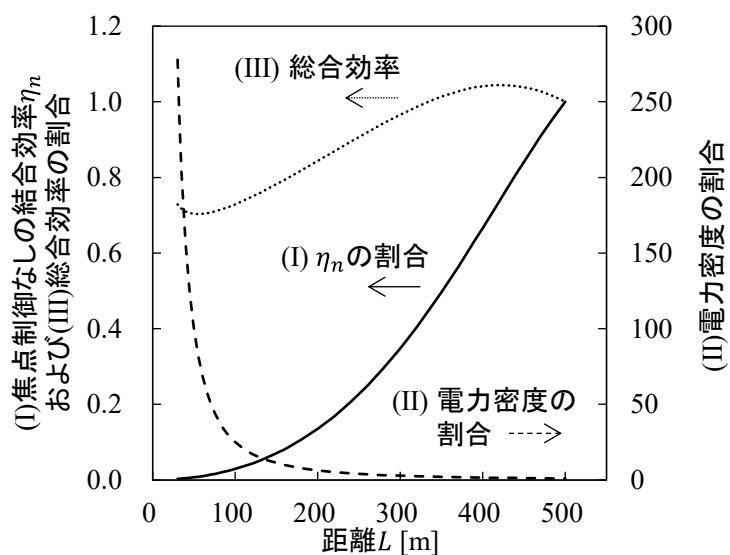


図 4-5 距離 L および(I) η_n の割合、(II)電力密度の割合と(III)総合効率の関係[2]

(Copyright (2021) The Japan Society of Applied Physics)

4.4. 焦点制御の実証実験

次に、大気ゆらぎの生じる実環境下で、提案した焦点制御の可能性を実証するため、2018年8月20日～23日に、図4-6に示すように、東海大学湘南キャンパスにおいて、A地点からB地点に送信されるレーザ光の焦点位置を制御する屋外実験を実施した。A地点とB地点の2点間の距離は約450mである。これは4.3節の数値計算で用いた最大距離に近いものである。また、数値計算では波長を1.55 μm としたが、装置の制約から675 nmの波長を用いた。光源の波長を675 nmから1.55 μm へ変更する場合、レンズなどの材料の光学特性は波長に依存するため、波長に合わせて光学系を変更する必要があるが、実験結果には同様の傾向が見られ、実証となると考えている。

図4-7 (a)に示すように、受信器の縮小光学系に入射したレーザ光は、ミラー(Mirror : M)、偏光板(Polarizer : P)、ビームスプリッタ(Beam splitter : BS)を通り、可変焦点レンズとして用いたLCOS-SLMで反射される。BSで折り返されたビームは対物レンズ(Objective lens : OL)で拡大され、その光強度分布を所定の位置に固定されたCCDカメラで観測する。

f_1 が150 mm、 f_2 が40 mmのため、縮小光学系の倍率は0.27である。また、 R_1 は25 mmである。さらに、浜松ホトニクス製のLCOS-SLMの有効画素数は792×600 pixels、その画素ピッチは12.5 μm 、CCDカメラの解像度は2048×1088 pixels、画素サイズ5.5 μm ×5.5 μm である。ただし、OLの拡大効果により、CCDカメラの1画素は1.2 μm ×1.2 μm に相当する。

焦点距離が F のレンズ効果は、LCOS-SLMの位相分布 $\phi(r)$ が

$$\phi(r) = \text{mod} \left(\frac{2\pi}{\lambda} \left(F - \sqrt{r^2 + F^2} \right), 2\pi \right) \quad (4-17)$$

となると得られる。ここで、 λ は入力するレーザ光の波長、 r はレンズの半径である[100]–[102]。図4-7 (b)は、LCOS-SLMに入力した画像データの一例で、この画像の入力によりLCOS-SLMの位相分布が変調され、 F が239.9 mmのレンズ効果を得ることができる。

実験の際には、LCOS-SLMの有効エリア(9.9 mm×7.5 mm、792×600 pixels)に対して、およそ直径7.5 mm、600 pixelsのビームを入射した。

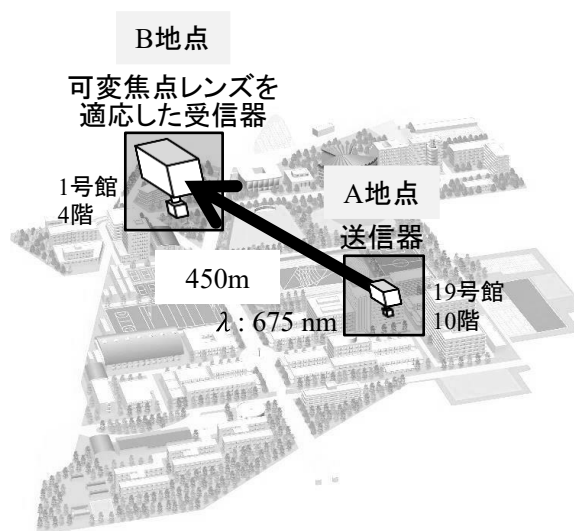


図 4-6 実験の模式図[2]

(Copyright (2021) The Japan Society of Applied Physics)

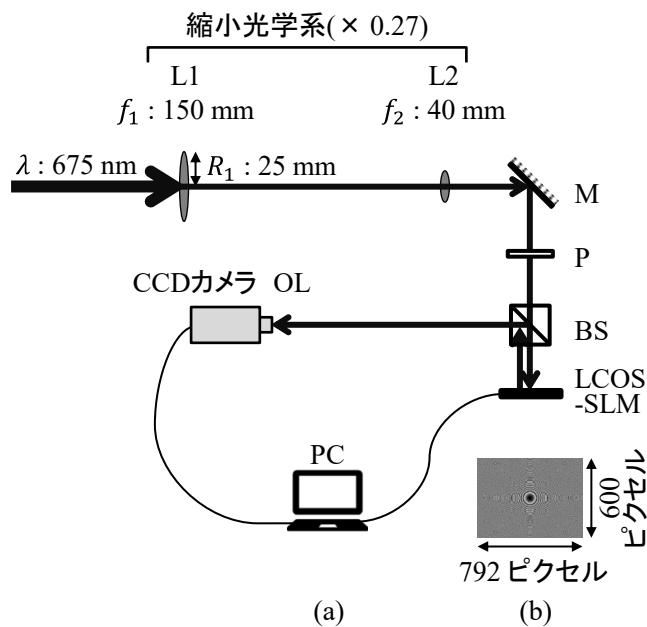


図 4-7 焦点制御を適応した受信器[2]

(a) 可変焦点レンズとして LCOS-SLM を搭載した受信器

(b) LCOS-SLM に入力したサンプル画像

(Copyright (2021) The Japan Society of Applied Physics)

図 4-7 (a)のように、焦点距離 F を変えながら、受信ビームの光強度分布を CCD カメラで観察すると、観察面に焦点が合っている場合には、ビーム直径が最小になる。焦点が観察面から離れるとビーム直径が大きくなるため、カメラの画像によって焦点制御が確認できる。

図 4-8 は、実験で得られた光強度分布の一例で、 F が 239.9 mm の場合に得られた 2 次元と 1 次元強度分布である。

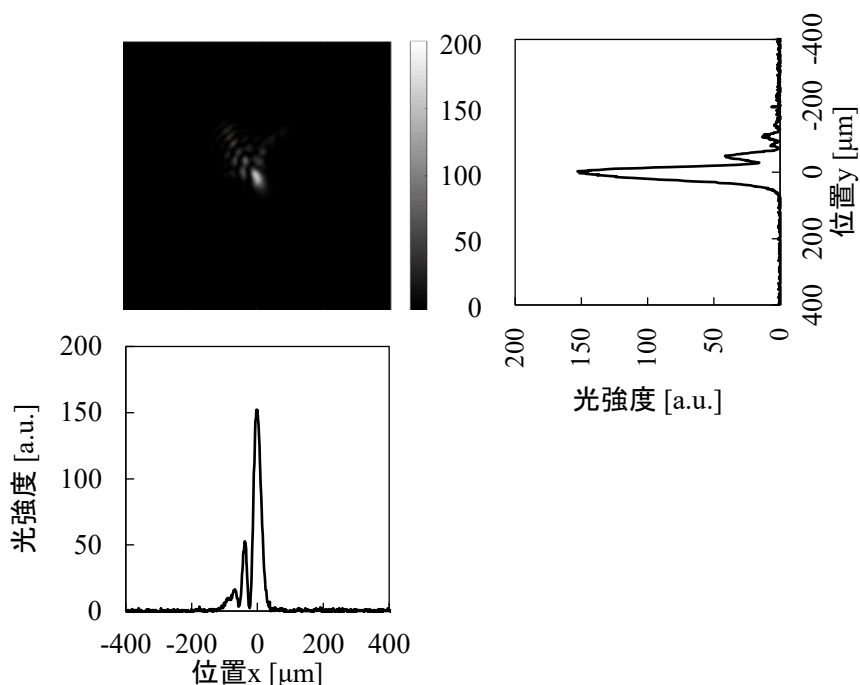


図 4-8 可変焦点レンズの焦点距離 F が 239.9 mm での光強度分布

さらに、図 4-9 に示すように、 F を変えて得られた強度分布からビーム直径を推定した。撮像されたスポットは円形で、最大光強度の半分の値以上の光強度を持つ画素で構成されると仮定した場合、有効直径 w は以下の式で表される。

$$w = 2 \sqrt{\frac{n}{\pi}} l \quad (4-18)$$

ここで、 n は最大光強度の半分以上の光量を持つ画素の数、 l は正方形の画素の幅に相当する物理的な長さである。

図 4-9 より、 F を大きくすると w が徐々に小さくなり、 F が 239.9 mm のときに最小の w が得られることが分かる。大気ゆらぎの影響により集光特性にノイズが乗っており、また、

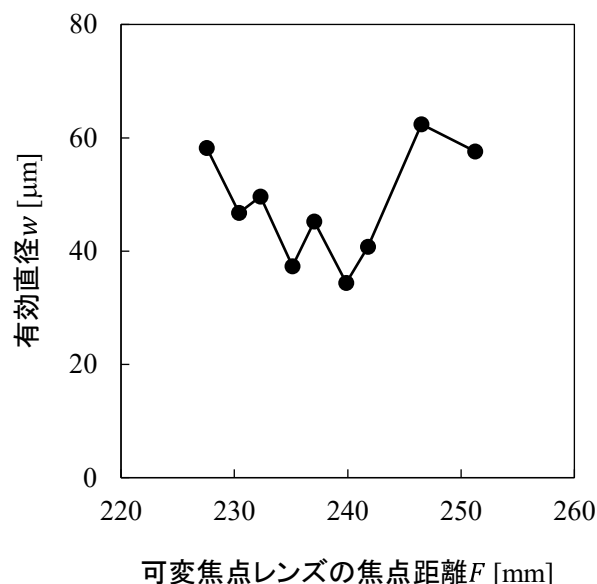


図 4-9 実環境下の受信光の集光特性[2]

(Copyright (2021) The Japan Society of Applied Physics)

大気ゆらぎに伴う光軸に対するミスアライメントにより対称性がやや崩れているが、大気ゆらぎの影響下における LCOS-SLM の焦点制御による集光位置の変化を確認することができた。これにより、大気ゆらぎの影響下で焦点制御が可能であることが分かり、小型 UAV と地上局との通信距離が変化しても、空間光通信の通信品質の向上ができる可能性が示された。

さらに、実験結果と数値計算結果を比べる。先ほど、数値計算として挙げた図 4-4 において、距離 30～500m における可変焦点レンズの焦点制御範囲は、213.20～233.46 mm であった。実験では、距離およそ 450 m で 227.6～251.3 mm の範囲の焦点制御を確認した。数値計算と実験において焦点可変範囲の幅はほぼ同じであり、計算の 30～500 m の範囲の補正が可能な実験結果が得られた。

数値計算による距離 450 m でファイバ端面に焦点が位置する可変焦点レンズの焦点距離は 233.3 mm である。図 4-9 より、距離およそ 450 m の実験では、最小の有効直径を示した焦点距離が 239.9 mm であるため、CCD の観察面上に光ファイバ端面を設置した場合、焦点距離 233.9 mm の可変焦点レンズによる焦点がファイバ端面に位置することになる。実験は数値計算では考慮していない光学系のミスアライメントと大気ゆらぎ、測定した集光特性の可変焦点レンズの焦点距離の間隔の影響を受けるが、ファイバ端面に焦点が位置する

可変焦点レンズの焦点距離の数値計算と実験の差は僅か 6.6 mm となった。

UAV の飛行状態を考慮すると、姿勢の変動によってビームの伝搬方向が不安定になり、受信面での光信号の焦点が移動する。この現象に対しては、姿勢の変化によって生じる集光ビームの移動と、距離の変動によって生じる集光ビームの移動が空間的に直交しているため、提案した焦点制御は有効ではない。したがって、この場合は、受信ビームの集光光学系の前に、ビームの伝搬角を補正する機能を追加する必要がある。このような機能は、例えば、受信光学系にステアリングミラーを設けたり、送信光学系にジンバルを設けたりすることで実現可能である。また、補正が可能な角度が狭い範囲に制限されるものの、LCOS-SLM による角度補正を組み込むことも考えられる。

4.5. まとめ

本研究では、小型 UAV から地上への空間光通信における光回線の通信品質の向上を図るため、通信距離の変化に応じて受信レーザー光の焦点を制御し、受信器の光ファイバに結合させることを提案した。

数値計算の結果、この焦点制御法によって結合効率が向上することが分かった。さらに、結合効率と電力密度の両面から、受信ビームの焦点位置を制御する必要性が明らかになった。

また、ビームを屋外で地上の2点間の450 m 伝搬させる実験を行い、大気ゆらぎの影響下で、可変焦点レンズによる受信ビームの焦点位置の制御の可能性を確かめた。今回提案した受信光の焦点制御を適応した受信機能は、大気ゆらぎのある実環境下での光回線の通信品質の向上の可能性がある。

第5章 指向誤差を考慮した通信品質の推定

5.1. 指向誤差に伴う課題

本章では、UAV-光地上局間空間光通信に着目し、UAVに送受信のアンテナ軸を高精度で一致させる捕捉追尾システムの搭載が難しいために生じる指向誤差について、検討を加える。

UAV-光地上局間空間光通信において、UAV本体の揺れとレーザ光の高い指向性により、通信相手への指向誤差を補正する機能が送信器に求められる。このような補正システムとしてボディポインティングやジンバル機構があり、それらの中から適切なものを選択する必要がある。そのため、指向精度の要求値を明らかにすることが重要である。そこで、通信品質を評価する指標の1つであるBERに着目した。受信器のフォトディテクタの受信電力と生じる雑音電力を求めることでBERの推定を行い、伝搬ビームに対する大気ゆらぎの影響を考慮し、通信相手の相対的な位置の変化に対する指向誤差の許容範囲を明らかにする。

5.2. 指向誤差に対する BER の算出

図 5-1 に示すように、ガウスビームが小型 UAV から光地上局へ角度 ζ で射出され、大気ゆらぎの影響を受けながら距離 L だけ伝搬する。小型 UAV の機体揺れにより、光地上局の受信器はガウシアンビームの光軸から距離 r 、角度にすると θ だけずれた位置にある。 θ を指向誤差という。

θ に対する BER の算出において、大気ゆらぎには H-V 5/7 モデルを適応した。さらに、図 5-2 に示す Nonreturn-to-zero(NRZ)および Return-to-zero(RZ)信号を用いたオンオフ変調(On-off keying : OOK)方式[103]を採用し、送信平均電力は一定と仮定した。平均電力を一定と仮定しているため、RZ 信号の信号'1'におけるデューティ比が 50% の場合、RZ 信号の最大送信電力は NRZ の 2 倍となる。なお、計算に用いた記号は表 5-1 に示す。

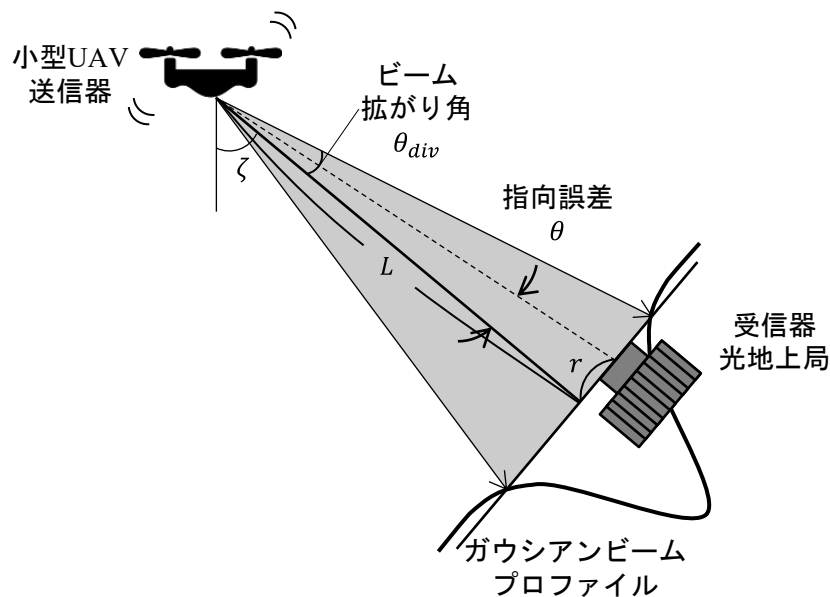


図 5-1 UAV-光地上局間空間光通信[7]

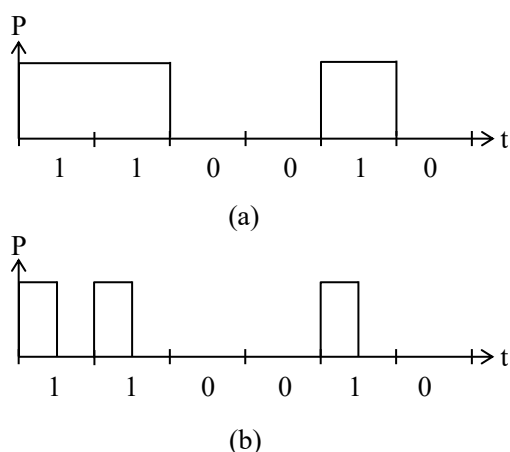


図 5-2 (a)NRZ 信号と(b)RZ 信号

表 5-1 指向誤差に対する BER 算出パラメータ[7]

波長 λ (μm)	1.55
UAVの高度 H (km)	6.47~129
光地上局の高度 h_0 (m)	0
送信器開口でのビーム半径 W_0 (μm)	95
天頂角 ζ (degree)	75
送信器開口でのビームの曲率半径 F_0 (m)	∞
地上での疑似風速 v (m/s)	21
屈折率構造関数 $C_n^2(0)$ の公称値 A ($\text{m}^{-2/3}$)	1.7×10^{-14}
受信器の光アンテナの開口半径 R_R (mm)	10
送信電力 P_T (mW)	67.4
量子効率 η	0.8
帯域幅 B (Hz)	1×10^9
暗電流 I_D (A)	10×10^{-9}
フォトダイオードの雑音指数 F_n	1
フォトダイオードの抵抗負荷 R_L (Ω)	1000
温度 T (K)	298

距離 L は

$$L = (H - h_0) / \cos \zeta \quad (5-1)$$

と示され[64]、また、指向誤差 θ は

$$\theta = \arctan(r/L) \quad (5-2)$$

と表される。

さらに、受信器の光アンテナでの平均光強度 $\langle I(r, L) \rangle$ は、以下の式から求められる[64]。ここで、 W は大気ゆらぎの影響を受けない場合の受信器開口でのビーム半径、 W_e は大気ゆらぎの影響を受けた場合の受信器開口でのビーム半径である。

$$\langle I(r, L) \rangle = \frac{W_0^2}{W_e^2} \exp(-2r^2/W_e^2) \quad (5-3)$$

$$W_e = W(1 + G_d)^{1/2} \quad (5-4)$$

$$W = W_0(\Omega_0^2 + \Omega^2)^{1/2} \quad (5-5)$$

$$\Omega_0 = 1 - \frac{L}{F_0} \quad (5-6)$$

$$\Omega = \frac{2L}{kW_0^2} \quad (5-7)$$

$$k = 2\pi/\lambda \quad (5-8)$$

$$G_d = 4.35\mu_2\Lambda^{5/6}k^{7/6}(H - h_0)^{5/6}\sec^{11/6}(\zeta) \quad (5-9)$$

$$\mu_2 = \int_{h_0}^H C_n^2(h) \left(\frac{h - h_0}{H - h_0} \right)^{5/3} dh \quad (5-10)$$

$$C_n^2(h) = 0.00549(v/27)^2(10^{-5}h)^{10}\exp(-h/1000) + 2.7 \times 10^{-16}\exp(-h/1500) + A\exp(-h/100) \quad (5-11)$$

$$\Lambda = \frac{2L}{kW^2} \quad (5-12)$$

次に、受信器の光アンテナの開口部は、受信器の光アンテナの平面上のビーム径に比べて十分に小さいと仮定する。この仮定とガウシアンビームの総電力[104]を考慮し、受信電力 P_R は下の式で得られる。

$$P_R = \langle I(r, L) \rangle \times \pi R_R^2 \times P_T \frac{2}{\pi W_0^2} \quad (5-13)$$

ここで、 P_T は送信電力である。

さらに、SN比は、フォトダイオードの熱雑音とショット雑音を考慮し、次の式で得られる[105]–[107]。

$$SNR = \frac{I_p^2}{2qB(I_p + I_D) + 4k_B T B F_n / R_L} \quad (5-14)$$

$$I_p = \eta P_R q / h\nu \quad (5-15)$$

$$\nu = c / \lambda \quad (5-16)$$

q は電気素量、 k_B はボルツマン定数、 h はプランク定数、 c は光速である。

また、NRZ信号とRZ信号(デューティ比が50%)によるBERはそれぞれ以下の式で表される[105]。

$$Pr_{NRZ} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\sqrt{SNR}}{2\sqrt{2}} \right) \quad (5-17)$$

$$Pr_{RZ} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\sqrt{SNR}}{2} \right) \quad (5-18)$$

以上の流れで、BERが計算できる。今回のBERの計算において、受信器の光アンテナでの平均光強度 $\langle I(r, L) \rangle$ の値を用いた。BERの算出のためには、大気ゆらぎにより生じる受信器の光アンテナにおける強度変動を考慮する必要がある[108]が、今回は強度変動の影響を受けないと仮定した。

5.3. 指向誤差の許容範囲

小型 UAV から波長 λ が 1.55 μm 、ビーム拡がり角 θ_{div} が 5.2 mrad、送信電力 P_T が 67.4 mW のガウスビームを $\zeta 75$ 度で射出し、開口部半径 R_R が 10 mm の光学アンテナを用いて受光する。 L は 25~500 m とし、さらにその他のパラメータを表 5-1 に示す。

L は、プライバシーを考慮し[109]、また、日本の安全規制のガイドラインで要求されている2つの UAV の運用条件によって決定した[90], [91]。 L が 500 m における UAV の機体揺れを 5 m と想定し、これをカバーできるビームの照射に加え、受光面におけるビーム半径を W とした場合、ガウシアンビームが光軸を中心に $-W$ から W の範囲に 68 %のエネルギーが集中することを考慮し、 θ_{div} は 5 mrad よりも少し大きい 5.2 mrad とした。また、 L が 500 m における光軸上での受信電力 P_R が 2 μW となる P_T 、67.4 mW を仮定した。 P_T については、人体への安全性を考慮済みである。米国規格協会(American national standards institute : ANSI) Z136.1 レーザの安全利用上位基準では、人体への露光が安全とされるレーザ放射レベルの最大値である最大許容露光量(Maximum permissible exposure : MPE)は、波長 1.55 μm において、肌の大面積露光(露光面積が 0.1 m^2 を超える場合)では 100 W/m^2 、目では 1 kW/m^2 である。最短の L である 25 m におけるビームの光軸上では 25.4 mW/m^2 となる。また、この P_R は、実際に入手できる受信器を用い、1 Gbps 以上を達成可能である。さらに、表 5-1 における、H-V 5/7 モデルに関するパラメータは[64]を、フォトダイオードの各パラメータは[105]を参考にした。これらの条件を用い、前節の計算式に従って、指向誤差に対する BER を算出した。

図 5-3 は、得られた数値計算結果の一例で、距離 L が 25 m、250 m、500 m における指向誤差 θ と受信電力 P_R の関係、および、指向誤差 θ と BER の関係である。 L が大きくなる程、 P_R が低下することが分かる。また、いずれの L においても、 θ が 0 に近づくに従い、すなわち、 θ が小さくなるほど BER が小さくなる。

さらに、NRZ よりも RZ の方が BER は小さくなった。図 5-2 に示すように NRZ は信号'1'の場合、全てのビットの持続時間を光パルスが占めるが、RZ は持続時間の一部を光パルスが占める。前述のように、今回の数値計算では NRZ も RZ も送信平均電力は一定と仮定したため、RZ の信号'1'において例えば光パルスの持続時間の 50 %を占めると仮定した場合、送信する光パルスの電力は NRZ よりも RZ の方が 2 倍大きくなる。このように、NRZ よりも RZ の送信する光パルスの電力が大きくなることから、BER が小さくなったと考える。

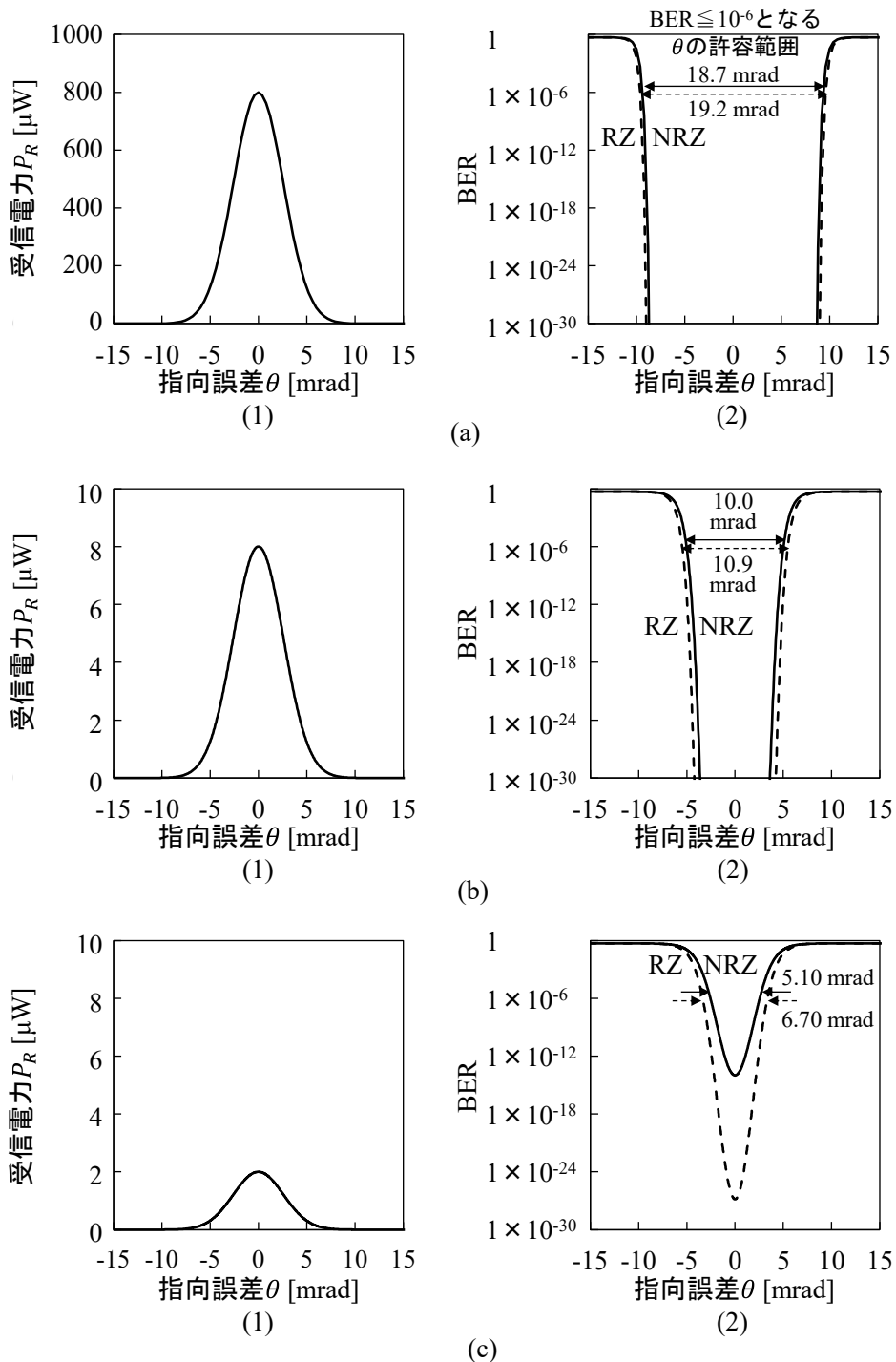


図 5-3 距離 L ごとの指向誤差 θ と受信電力 P_R 、BER の関係

(a) L が 25 m の場合、(b) L が 250 m の場合、(c) L が 500 m の場合

また、一般に BER が 10^{-6} 以下の場合に通信可能[110]とされていることから、BER が 10^{-6} 以下となる θ の値に着目すると、 L が 25 m の場合の $BER \leq 10^{-6}$ となる θ の許容範囲は、NRZ が 18.7 mrad、RZ が 19.2 mrad となった。 L が 250 m の場合は NRZ が 10.0 mrad、RZ が 10.9 mrad、 L が 500 m の場合は NRZ が 5.10 mrad、RZ が 6.70 mrad となった。

さらに様々な L における θ に対する BER を計算し、得られた $BER \leq 10^{-6}$ となる指向誤差 θ の許容角度範囲(全角)を図 5-4 に示す。 θ の許容範囲は、NRZ と RZ 信号ともに L が大きくなる程、小さくなる。NRZ と RZ 信号による許容範囲の最大はそれぞれ 18.7、19.2 mrad、最小は 5.10、6.70 mrad を示した。よって、 $BER \leq 10^{-6}$ において要求される指向精度は、この $BER \leq 10^{-6}$ となる θ の許容範囲の最小値となり、NRZ 信号で 5.1 mrad、RZ 信号で 6.7 mrad である。したがって、大気ゆらぎの影響を考慮した指向誤差補正システムに要求される指向精度を推定することができた。

平均電力が一定の場合、光パルスに含まれる電力はデューティ比に反比例するため、指向精度の緩和には RZ 信号の方が NRZ 信号よりも有利となる。ただし、RZ 信号の周波数帯域は NRZ 信号よりも広がるため、受信器が許容する帯域幅に留意する必要がある。

さらに、同じ条件で、 P_T の値のみを変更した $BER \leq 10^{-6}$ となる NRZ 信号と RZ 信号での θ の許容範囲(全角)を図 5-5 に示す。 P_T が 1/2 倍の 33.7 mW、1/5 倍の 13.4 mW、1/10 倍の 6.74 mW の場合を取り上げた。 P_T が 1/2 倍の場合の RZ 信号の $BER \leq 10^{-6}$ において要求される指向精度は、 L が 500 m における最小の θ の許容範囲である 2.7 mrad と推定した。 P_T が 1/2

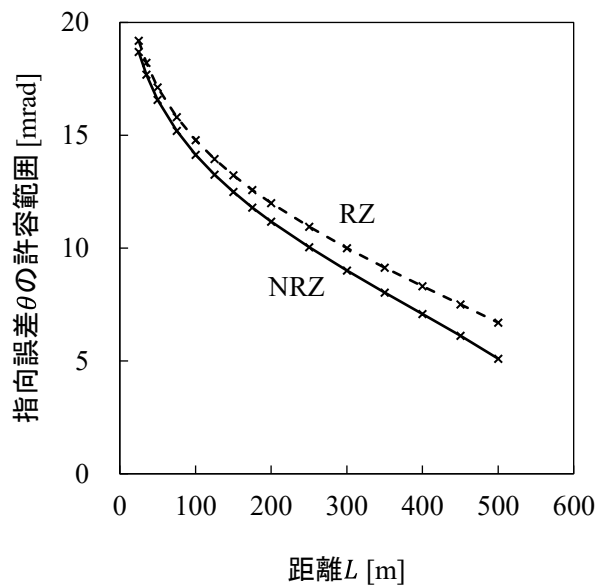


図 5-4 距離 L と指向誤差 θ の許容範囲(全角)の関係[8]

倍の場合の RZ 信号以外の、 P_T が 1/2 倍の NRZ 信号、1/5 倍の RZ 信号と NRZ 信号、1/10 倍の RZ 信号と NRZ 信号においては、 θ の許容範囲の最小値が 0 rad となったことから、BER $\leq 10^{-6}$ の通信の実現には、RZ 信号では P_T が 33.7 mW 以上、NRZ 信号では 67.4mW 以上必要であることが明らかになった。

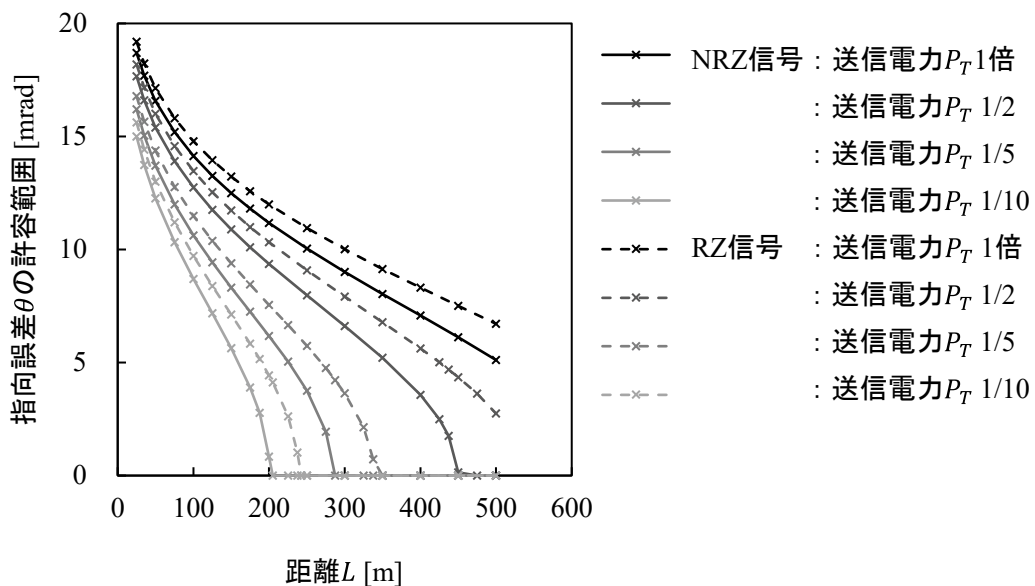


図 5-5 送信電力 P_T を変えた場合の距離 L と指向誤差 θ の許容範囲(全角)の関係

5.4. まとめ

指向誤差が通信品質に与える影響を BER に着目し検討を行った。伝搬ビームに対する大気ゆらぎの影響を考慮し、受信器のフォトディテクタで得られる受信電力と雑音から求めた SN 比を用い、指向誤差に対する BER を算出する計算方法をまとめた。この計算方法を用い、避けられない機体揺れの生じる UAV-光地上局間空間光通信を想定した数値計算を行った。NRZ と RZ 信号による BER が 10^{-6} 以下となる指向誤差の許容範囲(全角)の最大がそれぞれ 18.7、19.2 mrad、最小は 5.10、6.70 mrad となることを示した。数値計算により、大気ゆらぎの影響下で BER が 10^{-6} 以下の指向誤差の許容範囲を具体的に求め、送信器に設置する通信相手への指向誤差を補正する補正システムに要求される仕様、つまり、小型 UAV のボディポインティングやジンバルの指向精度の要求値が明らかとし、指向誤差により生じる SN 比の低減抑制の可能性が示された。

第6章 結論

6.1. 本研究の結論

本研究は、将来の大容量通信の技術候補である空間光通信の実用化に貢献するため、空間光通信の送信機能、受信機能、通信品質に着目し、光回線の通信品質向上を図るための提案の基本原理について数値計算と実証実験による考察を行ったものである。

大気ゆらぎの影響と空間伝搬損により生じる SN 比の変動と低減を抑制するデバイスの実装に関する課題を解決し、空間光通信の通信品質の向上を図るため、送信機能に光情報処理の分野で用いられてきた複製像の生成デバイスを複数ビーム生成素子として空間光通信に適応することを提案し、実験による大気ゆらぎの影響の低減と数値計算による空間伝搬損の低減を確かめた。また、今まで着目されていなかった距離の変化に注目し、距離に対して距離変化の大きい通信における受信光の焦点位置の変動による SN 比の低下を抑制し空間光通信の通信品質の向上を図るため、受信機能への焦点制御を提案し、数値計算と実験による焦点制御の可能性を示した。さらに、主に機体揺れが原因の指向誤差が招く SN 比の低減を抑制し空間光通信の通信品質の向上を図るため、数値計算により指向誤差を考慮した通信品質の推定を行った。

これらの検討から、送信機能、受信機能、指向誤差に着目した 3 つの提案による空間光通信の通信品質の向上の可能性が得られた。

以下に本研究で得られた主要な結果について述べる。

1. 大気ゆらぎの影響と空間伝搬損を低減するための複数ビーム生成素子を適応した送信機能

大気ゆらぎの影響により生じる SN 比の変動を抑制するデバイスとして送信機能への適応を提案した複数ビーム生成素子は、従来のデバイスと比べ多重反射を起こしにくく、時間や場所によって変わる大気ゆらぎの影響に応じて生成ビーム数を制御でき、小型・軽量で同軸配置のため既存の光学系に挿入できるという優れた特徴を持っている。この複数ビーム生成素子を容易に設計するための手法を新たに提案し、提案した設計法を用いて設計した空間光通信用複数ビーム生成素子への $N \times N$ の開口アレイの挿入より $4N \times 4N$ のビーム生成が可能で、生成ビーム数を制御可能であることを数値計算により確認した。また、複数ビーム生成素子が

生成したビームを屋外の2点間の約450 m 伝搬させる実験を行い、1本から2本の伝送ビーム数の増加に伴い、受信光の確率密度分布の幅が小さくなり、大気ゆらぎにより生じた受信光の変動の抑制を確認した。

この送信機能へ適応した複数ビーム生成素子は、大気ゆらぎの影響の低減に加え、液晶フィルタの挿入し、メッシュフィルタの開口数を変更することで、移動体の位置に応じてビーム拡がり角を制御し大気伝搬損を低減するデバイスとしても適応できることを提案した。考えうるビーム拡がり角の制御法と比べ、機械的な駆動部がなく、また、屈折率の変化の精密な制御も不要となる。数値計算により、ビーム幅を約2倍に制御可能で、空間伝搬損により生じるSN比の低減の可能性を得た。

2. 距離に伴うSN比の低減を抑制するための焦点制御を適応した受信機能

距離に対して距離変化の大きい通信において、距離の変化に伴い受信光の焦点位置の変動が生じることを数値計算により確かめた。また、数値計算を用い、焦点制御機能の適応により、距離変化に伴う光ファイバに結合される受信ビームの結合効率の低減が抑制でき、例えば距離が30 mの場合、焦点制御により結合効率の0.22 %から91 %への大幅改善が確認された。焦点制御を行わない場合、結合効率に加え、受信面での電力密度を考慮した総合効率を数値計算により求め、距離が55 mで1.5 dBもの減衰が確認され、提案する焦点制御の必要性が示された。さらに、屋外の2点間の約450 mを伝搬した光ビームを焦点制御機能つまり可変焦点レンズに入射させ、その光強度分布をCCDカメラで観察する実験を行った。可変焦点レンズの焦点距離を変えながら強度分布を観察すると、CCDカメラの観察面に可変焦点レンズの焦点が合っている場合、ビーム直径が最小となり、焦点が観察面から離れるとビーム直径が大きくなり、焦点制御が確認できる。実験では可変焦点レンズの焦点距離の変化に伴いビーム径が変化し、焦点距離が239.9 mmの時に最小のビーム径が得られ、実験により、大気ゆらぎの状況下での実環境における焦点制御が示された。

3. 指向誤差に伴うSN比の低減を抑制するための通信品質の推定

指向誤差が通信品質に与える影響を推定するため、指向誤差に対するBERについ

て検討を行った。まず、伝搬ビームに対する大気ゆらぎの影響を考慮し、得られる受信器の受信電力と雑音電力から求めた SN 比を用い、指向誤差に対する BER を算出する計算方法を見出した。この計算方法を用い、NRZ と RZ 信号による BER が 10^{-6} 以下となる指向誤差の許容範囲(全角)の最大がそれぞれ 18.7、19.2 mrad、最小は 5.10、6.70 mrad となることを示した。この数値計算により、送信器に求められる通信相手への指向誤差を補正する補正システムに要求される指向精度が明らかとなり、指向誤差により生じる SN 比の低減抑制の可能性が示された。

6.2. 将来の展望

本研究での、空間光通信の実用化に貢献するため、光回線の通信品質の向上を目指した、送信機能、受信機能、指向誤差におけるそれぞれの提案に関する基本的な理論的検討と実証実験による検討の内容を踏まえ、更なる通信品質の向上を目指した将来の展望とそれを実現するための検討内容を述べる。

これまでの成果により、空間光通信の通信品質の低減の抑制を実現し、通信品質の向上を図り、例えば、図 6-1 に示す遠隔操作による無人化施工の実現が期待できる。災害場所や危険個所の無人のブルドーザなどの重機を遠隔から操縦するため、重機に設置した複数のカメラからの動画を撮影する。同時に、作業現場を確認するため、UAV を飛行させ、上空からも動画を撮影する。これらの膨大なデータを空間光通信により伝送する。重機との通信において、地表に近いほど大気ゆらぎの影響の度合いが大きくなるため、デュプリケート光学系を用い大気ゆらぎの影響の低減を図ると共に、空間伝搬損の低減を図る。UAV との通信において、焦点制御により受信光の焦点の変動を低減し、同時に、通信品質の推定を行い、適切な指向誤差の補正機能を選択する。

例として挙げた図 6-1 のように、本研究の検討を踏まえ、通信品質の向上を図ることで、空間光通信が Beyond 5G と連携し、生活を支える通信技術となることが期待される。

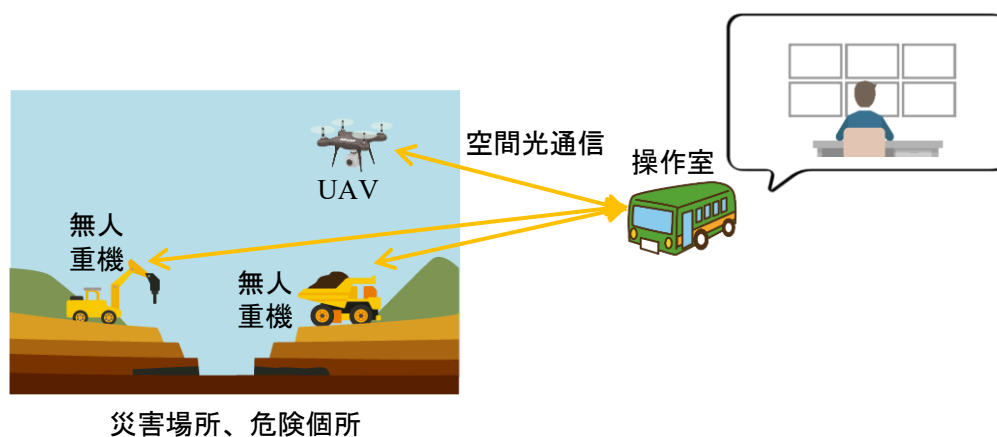


図 6-1 空間光通信を用いた遠隔操作による無人化施工

謝辞

本論文は、東海大学 情報通信学部 高山佳久教授のご指導の下に研究を行い、その成果である学術論文を基に、Springer Nature、IOP Publishing、東海大学紀要情報通信学部、東海大学紀要工学部の許諾を得て、まとめたものです。高山先生には、多大なるご指導・ご鞭撻を賜りました。1つ1つに対する的確なご助言とともに、細やかな温かいご指導を下さいましたことを、心よりお礼申し上げます。

東海大学 工学部 藤川知栄美教授には、本論文の本論文の主査としてご意見いただいただけなく、日本女子大学 小舘香椎子研究室の OG としても常に励まし、研究面でも細やかなご指導を下さいました。お礼申し上げます。

東海大学 工学部 室谷裕志教授、遊部雅生教授、稲森真美子准教授には、本論文の副査として、多くのご意見をいただきました。お礼申し上げます。情報通信研究機構のクラウド ヴェルナー統括研究員には、卒業論文・修士論文をご指導下さり、また、本論文の副査としてもたくさんのご意見を下さいました。お礼申し上げます。宇宙航空研究開発機構 荒木智宏主任研究開発員には、本論文の専門分科会委員として、多くのご意見を頂戴しました。お礼申し上げます。

日本女子大学 小舘香椎子名誉教授には、卒業論文・修士論文研究から現在に至るまでの、まさに長きに渡るご指導を下さり、また、様々な貴重な機会を頂戴しました。小舘先生から研究面に限らない温かいご指導と常日頃からの激励を賜り、今までの成果として本論文をまとめることができました。心よりお礼申し上げます。

また、東海大学 情報通信学部 高山研究室の学生の皆様には、高輪キャンパスや湘南キャンパスでの実験の事前準備、実験実施だけでなく、研究についての議論も下さいました。感謝申し上げます。

東海大学 工学部 藤川研究室の学生の皆様には、湘南キャンパスでの実験を進めるにあたり、前向きの多くのサポートを下さいました。感謝申し上げます。

日本女子大学 小舘研究室 OG の皆様には、支えとなり応援して下さいました。感謝申し上げます。中でも、坂牧貴子先生には日頃より温かく見守って下さいました。小川賀代先生には、研究室の助手として研究面に限らずご指導下さいました。稲葉利江子さん、加藤恵子さん、田中アイさんは、本論文をまとめられたことをいち早く共有したい同期です。才田有子さんの的確で温かいアドバイスが力となりました。そして、渡邊恵理子さん、駒

井友紀さん、岡恵子さんは、それぞれの分野で第一線のご活躍の姿には励まされ、今も身近に支えてくださっています。

また、株式会社 Photonic System Solutions の増川佐知子代表、皆様にはご配慮下さり、感謝申し上げます。

最後に、長きに渡り見守って応援してくれた両親、家族に感謝し、本論文の謝辞といたします。

参考文献

- [1] T. Nakayama, Y. Takayama, C. Fujikawa, K. Kodate, “Reduction of atmospheric turbulence using optical duplicate system in free-space optical communications,” *Opt. Rev.*, vol. 28, no. 4, pp. 434–439 (2021).
- [2] T. Nakayama, Y. Takayama, C. Fujikawa, K. Kodate, “Optical link stabilization by controlling focus of received beam in mini-unmanned aerial vehicle-to-ground free-space optical communications,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 60, no. 3, p. 032007 (2021).
- [3] T. Nakayama, Y. Takayama, C. Fujikawa, K. Kodate, “Controlling laser beam irradiation area using an optical duplicate system to improve satellite–ground laser communications,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 55, no. 8S3, pp. 08RB05-1-08RB05-5 (2016).
- [4] T. Nakayama, Y. Takayama, C. Fujikawa, E. Watanabe, K. Kodate, “Compact Optical Duplicate System for Satellite–Ground Laser Communications : Application of Averaging Effects,” *Opt. Rev.*, vol. 21, no. 5, pp. 659–667 (2014).
- [5] 中山朋子, 高山佳久, 藤川知栄美, 小舘香椎子, “中距離伝搬実証実験用デュプリケート光学系の検討,” *東海大学紀要情報通信学部*, vol. 10, no. 1, pp. 9–14 (2017).
- [6] 中山朋子, 高山佳久, 藤川知栄美, 渡邊恵理子, 小舘香椎子, “衛星-地上局間宇宙光通信のためのデュプリケート光学系,” *東海大学紀要工学部*, vol. 52, no. 2, pp. 117–122 (2012).
- [7] T. Nakayama, Y. Takayama, C. Fujikawa, K. Kodate, “Acceptable angular range of beam pointing in free-space optical communications,” *Tech. Dig. 26th Microoptics Conf. (MOC 2021)*, pp. 192–193 (2021).
- [8] 中山朋子, 高山佳久, 藤川知栄美, 小舘香椎子, “空間光通信におけるビーム指向角度の許容範囲の検討,” *第 65 回宇宙科学技術連合講演会講演集*, 2D08 (2021).
- [9] 山本和男, “Society 5.0 の概要,” *電気設備学会誌*, vol. 39, no. 8, pp. 477–479 (2019).
- [10] 総務省, “デジタル化の現状と課題,” *令和 3 年度版 情報通信白書*, pp. 50–74 (2021).
- [11] 総務省, “ICT 分野の基本データ,” *令和 3 年度版 情報通信白書*, pp. 274–351 (2021).
- [12] 総務省, “はじめに,” *令和 2 年度版 情報通信白書*, pp. 2–5 (2020).
- [13] 総務省, “5G がもたらす社会全体のデジタル化,” *令和 2 年度版 情報通信白書*, pp. 105–199 (2020).

- [14] 井上伸雄, “情報化社会への道,” 情報通信技術はどのように発展してきたのか, ベレ出版, pp. 11–25 (2016).
- [15] 総務省, “ICT 政策の動向,” 令和 3 年度版 情報通信白書, pp. 352–454 (2021).
- [16] 有賀規, “空間伝送光学システム,” 空間伝送光学, 水曜社, pp. 158–193 (2009).
- [17] 高野忠, “光ワイヤレス通信と赤外線技術,” 日本赤外線学会誌, vol. 13, no. 2, pp. 6–11 (2004).
- [18] 豊嶋守生, 阿部侑真, コレフ・ラドコフディミタル, 辻宏之, 久保岡俊宏, 三浦周, “超スマート社会における ICT×宇宙通信,” 電子情報通信学会誌, vol. 104, no. 5, pp. 453–462 (2021).
- [19] 筋誠久, 亀井雅, “衛星を利用した伝送技術の最新動向,” NHK 技研 R&D, no. 185, pp. 4–15 (2021).
- [20] 辻宏之, 三浦周, 豊嶋守生, “非地上系ネットワークにおける衛星通信の研究開発,” 信学技報, vol. 121, no. 104, pp. 34–38 (2021).
- [21] NTT, “「NTT Technology Report for Smart World : What’s IOWN?」の発表について,” [Online]. Available: <https://group.ntt.jp/newsrelease/2019/05/09/190509b.html>.
- [22] 伊藤新, “IOWN 構想に基づくオールフォトニクス・ネットワーク関連技術の取り組み,” NTT 技術ジャーナル, vol. 18, no. 5, pp. 10–11 (2020).
- [23] 澤田純, “What is IOWN?,” NTT 技術ジャーナル, vol. 20, no. 2, pp. 4–8 (2022).
- [24] 柳迫泰宏, “「Beyond 5G 推進戦略—6G へのロードマップ—」の概要及び今後の展開,” 電子情報通信学会誌, vol. 104, no. 5, pp. 398–403 (2021).
- [25] 岸山祥久, 永田聡, 須山聡, “6G で目指す世界と無線技術の展望,” 電子情報通信学会誌, vol. 104, no. 5, pp. 404–411 (2021).
- [26] 大槻知明, “5G から 6G への無線通信技術の進化と展望,” 電子情報通信学会誌, vol. 104, no. 10, pp. 1059–1064 (2021).
- [27] A. B. Raj, A. K. Majumder, “Historical perspective of free space optical communications: From the early dates to today’s developments,” IET Commun., vol. 13, no. 16, pp. 2405–2419 (2019).
- [28] J. Liu, Y. Shi, Z. M. Fadlullah, N. Kato, “Space-air-ground integrated network: A survey,” IEEE Commun. Surv. Tutorials, vol. 20, no. 4, pp. 2714–2741 (2018).
- [29] P. P. Ray, “A review on 6G for space-air-ground integrated network: Key enablers, open

- challenges, and future direction,” *J. King Saud Univ. - Comput. Inf. Sci.*, pp. 1–28 (2021).
- [30] 豊嶋守生, チン・ヴィエットフック, カラスコ・カサドアルベルト, コレフ・ラドコフ
ディミタル, 白玉公一, 布施哲治, 辻宏之, “Beyond 5G/6G 技術の超拡張性を目指す光空
間・宇宙光通信 (特集 Beyond 5G/6G に向かう! 光通信技術),” *O plus E*, vol. 43, no. 5, pp.
501–507 (2021).
- [31] R. Swaminathan, S. Sharma, A. S. Madhukumar, “Performance Analysis of HAPS-Based
Relaying for Hybrid FSO/RF Downlink Satellite Communication,” *Proc. IEEE Veh. Technol.
Conf.*, pp. 1–5 (2020).
- [32] 高山佳久, 豊嶋守生, 竹中秀樹, 門脇直人, “衛星光通信の現状と展望,” *電子情報通信学
会誌 B*, vol. J94-B, no. 11, pp. 1443–1451 (2011).
- [33] H. Kaushal, V. K. Jain, S. Kar, “Overview of wireless optical communication systems,” *Free
Space Optical Communication*, Springer, pp. 1–39 (2017).
- [34] 荒木智宏, “大容量通信を実現する, 宇宙光通信の研究開発動向,” *電子情報通信学会
通信ソサイエティマガジン*, vol. 13, no. 3, pp. 205–215 (2019).
- [35] 宗正康, “次世代大容量衛星通信ネットワークを実現する衛星—地上間光ファイダリ
ンクの技術,” *電子情報通信学会 通信ソサイエティマガジン*, vol. 14, no. 1, pp. 45–54
(2020).
- [36] M. Toyoshima, “Trends in satellite communications and the role of optical free-space
communications [Invited],” *J. Opt. Netw.*, vol. 4, no. 6, pp. 300–311 (2005).
- [37] A. Mansour, R. Mesleh, M. Abaza, “New challenges in wireless and free space optical
communications,” *Opt. Lasers Eng.*, vol. 89, pp. 95–108 (2017).
- [38] J. C. Ricklin, S. M. Hammel, F. D. Eaton, S. L. Lachinova, “Atmospheric channel effects on
free-space laser communication,” *Free-Space Laser Communications*, Springer, pp. 9–56
(2006).
- [39] 小山義貞, 豊嶋守生, 高山佳久, 竹中秀樹, “OICETS 側の光通信実験結果,” *情報通信研
究機構季報*, vol. 58, no. 1/2, pp. 105–111 (2012).
- [40] M. T. Mushtaq, S. M. Yasir, M. S. Khan, A. Wahid, M. S. Iqbal, “Analysis of internal design
parameters to minimize geometrical losses in free-dspace optical communication link,” *Acta
Phys. Pol. A*, vol. 134, no. 1, pp. 275–277 (2018).
- [41] K. H. Heng, N. Liu, Y. He, W. D. Zhong, T. H. Cheng, “Adaptive beam divergence for inter-

- UAV free space optical communications,” *Proc. IEEE Photonics Glob.*, pp. 1–4 (2008).
- [42] I. I. Kim, R. Stieger, J. Koontz, C. Moursund, M. Barclay, P. Adhikari, J. J. Schuster, E. J. Korevaar, R. Ruigrok, C. M. DeCusatis, “Wireless optical transmission of fast ethernet, FDDI, ATM, and ESCON protocol data using the TerraLink laser communication system,” *Opt. Eng.*, vol. 37, no. 12, pp. 3143–3155 (1998).
- [43] R. Mata-Calvo, D. Bonaccini Calia, R. Barrios, M. Centrone, D. Giggenbach, G. Lombardi, P. Becker, I. Zayer, “Laser guide stars for optical free-space communications,” *Proc. SPIE*, vol. 10096, pp. 100960R-1-100960R-12 (2017).
- [44] R. K. Tyson, “Adaptive optics and ground-to-space laser communications,” *Appl. Opt.*, vol. 35, no. 19, pp. 3640–3646 (1996).
- [45] 豊嶋守生, 荒木賢一, “光分岐方法,” 特開 2001-156371 (1999).
- [46] D. M. Boroson, B. S. Robinson, “The lunar laser communication demonstration: NASA’s first step toward very high data rate support of science and exploration missions,” *Lunar Atmos. Dust Environ. Explor. Mission*, pp. 115–128 (2015).
- [47] Y. Hayasaki, I. Tohyama, T. Yatagai, M. Mori, S. Ishihara, “Optical learning neural network using selfoc microlens array,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 31, no. 5S, pp. 1689–1693 (1992).
- [48] T. Yatagai, Y. Hayasaki, I. Tohyama, “Use of selfoc microlens array in optical neural network,” *J. Adv. Sci.*, vol. 10, no. 1, pp. 54–59 (1998).
- [49] K. Hamanaka, H. Nemoto, M. Oikawa, E. Okuda, T. Kishimoto, “Multiple imaging and multiple Fourier transformation using planar microlens arrays,” *Appl. Opt.*, vol. 29, no. 28, pp. 4064–4070 (1990).
- [50] K. Hamanaka, T. Kishimoto, “Multiple imaging and multiple Fourier transformation using microlens arrays,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 29, no. 7, pp. L1277–L1280 (1990).
- [51] T.-Z. Z. Xiang, G.-S. S. Xia, L. Zhang, “Mini-unmanned aerial vehicle-based remote sensing: Techniques, applications, and prospects,” *IEEE Geosci. Remote Sens. Mag.*, vol. 7, no. 3, pp. 29–63 (2019).
- [52] A. K. Majumdar, “Free-space Optical (FSO) Platforms: Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and Mobile,” *Advanced Free Space Optics (FSO) A Systems Approach*, Springer, pp. 203–225 (2015).
- [53] H. S. Choi, S. Lee, H. Ryu, H. Shim, C. Ha, “Dynamics and Simulation of the Effects of Wind

- on UAVs and Airborne Wind Measurement,” *Trans. Japan Soc. Aero. Sp. Sci.*, vol. 58, no. 4, pp. 187–192 (2015).
- [54] I. Colomina, P. Molina, “Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review,” *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 92, pp. 79–97 (2014).
- [55] M. N. Boukoberine, Z. Zhou, M. Benbouzid, “A critical review on unmanned aerial vehicles power supply and energy management: Solutions, strategies, and prospects,” *Appl. Energy*, vol. 255, 113823 (2019).
- [56] L. Vaillon, G. Planche, P. Bernard, “From SILEX/LOLA to High data rate optical telemetry for LEO satellite,” *Proc. ICSOS*, 4–4 (2012).
- [57] P. V. Trinh, A. Carrasco-Casado, T. Okura, H. Tsuji, D. R. Kolev, K. Shiratama, Y. Munemasa, M. Toyoshima, “Experimental Channel Statistics of Drone-to-Ground Retro-Reflected FSO Links with Fine-Tracking Systems,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 137148–137164 (2021).
- [58] W. G. Cowley, “RF and Optical Communications for Small Satellites,” *Handb. Small Satell.*, pp. 353–369 (2020).
- [59] 鶴田匡夫, “大気の揺動,” 第4・光の鉛筆—光技術者のための応用光学—, 新技術コミュニケーションズ, pp. 70–100 (1997).
- [60] 鶴田匡夫, “アダプティブ・オブティクス,” 第4・光の鉛筆—光技術者のための応用光学—, 新技術コミュニケーションズ, pp. 201–216 (1997).
- [61] H. Hemmati, D. Caplan, “光衛星通信,” 光ファイバ通信(第6版) 第II部 システムとネットワーク, I. P. Kaminow, T. Li, A. E. Willner, Eds. (訳)木村達也, オーム社, pp. 159–206 (2016).
- [62] 高山佳久, “光の空間伝搬を活用した通信システム=大気の伝搬光への影響=,” 光アライアンス, vol. 28, no. 12, pp. 36–39 (2017).
- [63] H. Kaushal, V. K. Jain, S. Kar, “Free-space optical channel models,” *Free Space Optical Communication. Optical Networks*, Springer, pp. 41–89 (2017).
- [64] L. C. Andrews, P. T. Yu, R. L. Phillips, “Optical scintillations and fade statistics for a satellite-communication system,” *Appl. Opt.*, vol. 34, no. 33, pp. 7742–7751 (1995).
- [65] 宇宙航空研究開発機構, “光衛星間通信実験衛星「きらり」(OICETS) .,” [Online]. Available: <http://www.satnavi.jaxa.jp/project/oicets/index.html>.
- [66] 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, 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,” 情報通信研究機構季報, vol. 58, no. 1/2, pp. 45–65 (2012).
- [67] 大屋真, “天文学用補償光学の概要,” 日本写真学会誌, vol. 81, no. 4, pp. 345–350 (2018).
- [68] 渡邊誠, “天文学における補償光学,” 計測と制御, vol. 56, no. 6, pp. 435–440 (2017).
- [69] R. Tyson, “Adaptive optics systems,” *Principles of Adaptive Optics*, Elsevier, pp. 85–109 (1991).
- [70] 高野忠, 小川明, 坂庭好一, 小林英雄, 外山昇, 有本好徳, “衛星通信,” 宇宙通信および衛星放送, コロナ社, pp. 6–77 (2001).
- [71] 高野忠, 小川明, 坂庭好一, 小林英雄, 外山昇, 有本好徳, “宇宙探査機との通信,” 宇宙通信および衛星放送, コロナ社, pp. 146–196 (2001).
- [72] L. C. Andrews, R. L. Phillips, “Free space optical communication systems,” *Laser Beam Propagation through Random Media*, 2nd ed., pp. 439–476 (2005).
- [73] A. Carrasco-Casado, R. Mata-Calvo, “Space Optical Links for Communication Networks,” *Springer Handbooks*, pp. 1057–1103 (2020).
- [74] 池辺憲一, 佐藤尚樹, 間瀬一郎, 杵野正明, 藤原勇一, 荒井功恵, “光衛星間通信実験衛星 (OICETS) 「きらり」 システムの概要と軌道上評価,” 日本航空宇宙学会誌, vol. 55, no. 639, pp. 102–108 (2007).
- [75] T. Jono, Y. Takayama, N. Kura, K. Ohinata, Y. Koyama, K. Shiratama, Z. Sodnik, B. Demellenne, A. Bird, K. Arai, “OICETS on-orbit laser communication experiments,” *Proc. SPIE*, vol. 6105, pp. 13–23 (2006).
- [76] 荒木智宏, “「大気中における光空間伝送技術の研究開発動向」 特集号によせて,” レーザー研究, vol. 47, no. 12, pp. 666–667 (2019).
- [77] I. I. Kim, H. Hakakha, P. Adhikari, E. Korevaar, A. K. Majumdar, “Scintillation reduction using multiple transmitters,” *Proceeding SPIE*, vol. 2990, pp. 102–113 (1997).
- [78] D. M. Boroson, J. J. Scozzafava, D. V. Murphy, B. S. Robinson, H. Shaw, “The Lunar Laser Communications Demonstration (LLCD),” *Proc. 3rd IEEE Int. Conf. Sp. Mission Challenges Inf. Technol.*, pp. 23–28 (2009).
- [79] D. M. Boroson, J. J. Scozzafava, D. V. Murphy, B. S. Robinson, “The lunar laser communications demonstration (LLCD),” *Dig. Third IEEE Int. Conf. Sp. Mission Challenges*

- Inf. Technol., pp. 23–28 (2009).
- [80] N. Perlot, D. Fritzsche, “Aperture averaging: theory and measurements,” *Proc. SPIE.*, vol. 5338, pp. 233–242 (2004).
- [81] 小山次郎, 西原浩, “光の回折,” *光波電子工学*, コロナ社, pp. 48–86 (1978).
- [82] 栖原敏明, “光波の干渉と回折,” *光波工学*, コロナ社, pp. 43–87 (1998).
- [83] ザクテイ, “ドローンカメラ,” [Online]. Available: https://xacti-co.com/service/drone_camera/.
- [84] I. K. Son, S. Mao, “A survey of free space optical networks,” *Digit. Commun. Networks*, vol. 3, no. 2, pp. 67–77 (2017).
- [85] H. Oku, M. Ishikawa, “High-speed liquid lens for computer vision,” *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, pp. 2643–2648 (2010).
- [86] H. Ren, S.-T. Wu, “Optical switch using a deformable liquid droplet,” *Opt. Lett.*, vol. 35, no. 22, pp. 3826–3828 (2010).
- [87] M. Kawamura, M. Ye, S. Sato, “Optical trapping and manipulation system using liquid-crystal lens with focusing and deflection properties,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 44, no. 8, pp. 6098–6100 (2005).
- [88] T. Inoue, H. Tanaka, N. Fukuchi, M. Takumi, N. Matsumoto, T. Hara, N. Yoshida, Y. Igasaki, Y. Kobayashi, “LCOS spatial light modulator controlled by 12-bit signals for optical phase-only modulation,” *Proc. SPIE*, vol. 6487, pp. 64870Y-1-64870Y-11 (2007).
- [89] K. Riesing, H. Yoon, K. Cahoy, “A portable optical ground station for low-earth orbit satellite communications,” *Proc. Iof EEE Int. Conf. Sp. Opt. Syst. Appl.*, pp. 108–114 (2017).
- [90] H. Nakamura, Y. Kajikawa, “Regulation and innovation: How should small unmanned aerial vehicles be regulated?,” *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 128, pp. 262–274 (2018).
- [91] L. Davies, R. C. Bolam, Y. Vagapov, A. Anuchin, “Review of unmanned aircraft system technologies to enable beyond visual line of sight (BVLOS) operations,” *Proc. Int. Conf. Electr. Power Drive Syst.*, pp. 1–6 (2018).
- [92] M. Azadeh, “Light Coupling and Passive Optical Devices,” *Fiber Optics Engineering*, Springer, pp. 177–197 (2009).
- [93] J. Niu, J. Xu, “Coupling efficiency of laser beam to multimode fiber,” *Opt. Commun.*, vol. 274, no. 2, pp. 315–319 (2007).

- [94] B. Zhang, J. Zerubia, J.-C. Olivo-Marin, “Gaussian approximations of fluorescence microscope point-spread function models,” *Appl. Opt.*, vol. 46, no. 10, pp. 1819–1829 (2007).
- [95] T. F. Johnston, M. W. Sasnett, “Characterization of laser beams: The M2 model,” *Handbook of Optical and Laser Scanning*, CRC Press, pp. 1–68 (2012).
- [96] R. Hui, “Optical fibers,” *Introduction to Fiber-Optic Communications*, Elsevier, pp. 19–76 (2019).
- [97] O. Svelto, “Ray and wave propagation through optical media,” *Principles of Lasers*, 5th ed., Springer, pp. 131–161 (2009).
- [98] 有佐傑, “空間光通信におけるマルチモードファイバへのレーザ光のカップリング効率,” *電気通信大学修士論文* (2014).
- [99] S. Arisa, Y. Takayama, H. Endo, R. Shimizu, M. Fujiwara, M. Sasaki, “Coupling efficiency of laser beam to multimode fiber for free space optical communication,” *Proc. SPIE*, vol. 10563, pp. 105630Y-1-105630Y-8 (2017).
- [100] H. Nishihara, T. Suhara, “Micro fresnel lenses,” *Prog. Opt.*, vol. 24, pp. 1–37 (1987).
- [101] K. Kodate, “Development of diffractive optics and future challenges,” *Handbook of Optical Interconnects*, CRC Press, pp. 85–150 (2005).
- [102] (監修)小館香椎子, 神谷武志, “序論,” *回折光学素子の数値解析とその応用*, 丸善出版, pp. 1–31 (2011).
- [103] A. Jain, R. K. Bahl, A. Banik, “Demonstration of RZ-OOK modulation scheme for high speed optical data transmission,” *Proc. IFIP Int. Conf. Wirel. Opt. Commun. Networks*, pp. 1–5 (2014).
- [104] A. E. Siegman, “Physical Properties of Gaussian Beams,” *Lasers* (University Science Books), University Science Books, pp. 663–697 (1986).
- [105] M. I. Mutaharrik, N. R. Syambas, B. Pamukti, “Performance of on-off keying modulation for free space optics communication,” *Proc. Int. Conf. Electr. Eng. Informatics*, pp. 638–643 (2019).
- [106] 末田正, “光の検波,” *光エレクトロニクス入門*, 丸善株式会社, pp. 116–128 (1998).
- [107] 末田正, “光エレクトロニクスとは,” *光エレクトロニクス入門*, 丸善株式会社, pp. 1–15 (1998).
- [108] M. Yousefi, R. T. Azad, F. D. Kashani, B. Ghafary, “Scintillation index effects on the bit

- error rate in free space optical communication of incoherent flat-topped laser beam propagating through turbulent atmosphere,” *Iran. J. Sci. Technol.*, vol. 39, no. 3.1, pp. 369–374 (2015).
- [109] S. Park, K. Lee, “Developing Criteria for Invasion of Privacy by Personal Drone,” 2017 Int. Conf. Platf. Technol. Serv., pp. 1–7 (2017).
- [110] 井上伸雄, “有線・無線伝送システム,” 基礎からの通信ネットワーク 増補改訂版, pp. 242–257 (2008).

研究業績

原著論文

1. T. Nakayama, Y. Takayama, C. Fujikawa, K. Kodate, “Reduction of atmospheric turbulence using optical duplicate system in free-space optical communications,” *Opt. Rev.*, vol. 28, no. 4, pp. 434-439 (2021).
2. T. Nakayama, Y. Takayama, C. Fujikawa, K. Kodate, “Optical link stabilization by controlling focus of received beam in mini-unmanned aerial vehicle-to-ground free-space optical communications,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 60, no. 3, pp. 032007-1-032007-6 (2021).
3. 中山朋子, 高山佳久, 藤川知栄美, 小館香椎子, “中距離伝搬実証実験用デュプリケート光学系の検討,” *東海大学紀要情報通信学部*, vol. 10, no. 1, pp. 9-14 (2017).
4. T. Nakayama, Y. Takayama, C. Fujikawa, K. Kodate, “Controlling laser beam irradiation area using an optical duplicate system to improve satellite-ground laser communications,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 55, no. 8S3, pp. 08RB05-1-08RB05-5 (2016).
5. T. Nakayama, Y. Takayama, C. Fujikawa, E. Watanabe, K. Kodate, “Compact optical duplicate system for satellite-ground laser communications: application of averaging effects,” *Opt. Rev.*, vol. 21, no. 5, pp. 659-667 (2014).
6. 中山朋子, 高山佳久, 藤川知栄美, 渡邊恵理子, 小館香椎子, “衛星－地上局間宇宙光通信のためのデュプリケート光学系,” *東海大学紀要工学部*, vol. 52, no. 2, pp. 117-122 (2012).

国際学会・シンポジウム

1. T. Nakayama, Y. Takayama, C. Fujikawa, K. Kodate, “Acceptable Angular Range of Beam Pointing in Free-space Optical Communications,” *Tech. Dig. 26th Microoptics Conference (MOC2021) (Online)*, pp. 192-193 (2021).
2. M. Yamazaki, H. Yamashita, Y. Takayama, C. Fujikawa, T. Nakayama, K. Kodate, “Manipulation of received beam for free-space optical communications of intermediate distance,” *Tech. Dig. 24th Microoptics Conference (MOC2019) (Toyama, Japan)*, pp. 212-213 (2019).
3. T. Nakayama, Y. Takayama, C. Fujikawa, K. Kodate, “Stabilization of optical link at medium

- and short range free-space optical communications,” Tech. Dig. 23rd Microoptics Conference (MOC2018) (Taipei, Taiwan), P-11 (2018).
4. T. Nakayama, Y. Takayama, C. Fujikawa, K. Kodate, “Medium-Range Propagation Experiment Using Optical Duplicate System,” Tech. Dig. 22nd Microoptics Conference (MOC2017) (Tokyo, Japan), pp. 338-339 (2017).
 5. T. Nakayama, Y. Takayama, C. Fujikawa, K. Kodate, “Design of Optical Duplicate System for Medium-Range Propagation Experiment,” Ext. Abstr. The 24th Congress of the International Commission for Optics (ICO-24) (Tokyo, Japan), P1-04 (2017).
 6. T. Nakayama, Y. Takayama, C. Fujikawa, K. Kodate, “Optical duplicate system for satellite-ground laser communication: reduction of the effects of atmospheric turbulence and simplification of the optical ground station,” Tech. Dig. 20th Microoptics Conference (MOC’15) (Fukuoka, Japan), pp. 100-101 (2015).
 7. T. Nakayama, Y. Takayama, C. Fujikawa, E. Watanabe, K. Kodate, “Application of Compact Optical Duplicate System as a Multi-Beam Generation Device for Satellite-Ground Laser Communications,” Ext. Abstr. International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS 2014) (Kobe, Japan) P-9 (2014).
 8. T. Nakayama, Y. Takayama, C. Fujikawa, E. Watanabe, K. Kodate, “Design of Compact Optical Duplicate System for Multi-Beam Generation and Application of Satellite-Ground Laser Communications,” Tech. Dig. 9th International Conference on Optics-photonics Design & Fabrication (ODF’14) (Itabashi, Tokyo, Japan), pp. 155-156 (2014).

国内学会

1. 中山朋子, 高山佳久, 藤川知栄美, 小舘香椎子, “空間光通信におけるビーム指向角度の許容範囲の検討,” 第 65 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 2D08 (2021).
2. 佐藤遼, 藤川知栄美, 高山佳久, 中山朋子, 小舘香椎子, “中距離光伝搬実験における光回線安定化のための検討,” 第 63 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 1P15 (2019).
3. 中山朋子, 高山佳久, 藤川知栄美, 小舘香椎子, “中近距離光通信における光回線の安定化の検討,” コンテンポラリーオプティクス研究グループ研究会 (2018).
4. 中山朋子, 高山佳久, 藤川知栄美, 小舘香椎子, “中近距離光通信における空間位相分布制御素子を用いた受信効率の安定化の検討,” 第 62 回宇宙科学技術連合講演会講演集,

- 1G18 (2018).
5. T. Nakayama, Y. Takayama, C. Fujikawa, K. Kodate, “Medium-Range Propagation Experiment Using Multi-Beam Generation by Designed Optical Duplicate System,” コンテンポラリーオプティクス研究グループ研究会 (2017).
 6. 中山朋子, 高山佳久, 藤川知栄美, 小舘香椎子, “宇宙光通信のマルチビーム伝送用小型デュプリケート光学系の検討 V,” 第 61 回宇宙科学技術連合講演会予稿集, 1A14 (2017).
 7. 中山朋子, 高山佳久, 藤川知栄美, 小舘香椎子, “衛星-地上局間光通信用デュプリケート光学系の検討,” 第 64 回応用物理学会春季学術講演会, 17a-P1-6 (2017).
 8. 中山朋子, 高山佳久, 藤川知栄美, 小舘香椎子, “デュプリケート光学系の衛星-地上局間光通信への応用,” コンテンポラリーオプティクス研究グループ研究会 (2016).
 9. 中山朋子, 高山佳久, 藤川知栄美, 小舘香椎子, “宇宙光通信のマルチビーム伝送用小型デュプリケート光学系の検討 IV,” 第 60 回宇宙科学技術連合講演会予稿集, 3J08 (2016).
 10. T. Nakayama, Y. Takayama, C. Fujikawa, K. Kodate, “Application of optical duplicate system to satellite-ground laser communication: Reduced effect of atmospheric turbulence and simplification of the optical ground station,” コンテンポラリーオプティクス研究グループ研究会 (2015).
 11. 中山朋子, 高山佳久, 藤川知栄美, 小舘香椎子, “宇宙光通信のマルチビーム伝送用小型デュプリケート光学系の検討 III,” 第 59 回宇宙科学技術連合講演会予稿集, 3F09 (2015).
 12. 中山朋子, “宇宙光通信のためのマルチビーム伝送用デュプリケート光学系の設計,” 国際光年記念シンポジウム ～国際光年記念式典～, 118 (2015).
 13. 中山朋子, 高山佳久, 藤川知栄美, 小舘香椎子, “宇宙光通信用小型デュプリケート光学系の汎用化に向けた検討,” 第 62 回応用物理学会春季学術講演会講演予稿集, 13a-P3-2 (2015).
 14. 中山朋子, 高山佳久, 藤川知栄美, 小舘香椎子, “宇宙光通信のマルチビーム伝送用小型デュプリケート光学系の検討 II,” 第 58 回宇宙科学技術連合講演会予稿集, 3C15 (2014).
 15. 中山朋子, 高山佳久, 藤川知栄美, 渡邊恵理子, 小舘香椎子, “宇宙光通信におけるマルチビーム伝送用デュプリケート光学系の検討,” CODE V 特別セミナー 2013, pp. 155-170 (2013).
 16. 中山朋子, 高山佳久, 藤川知栄美, 渡邊恵理子, 小舘香椎子, “宇宙光通信のマルチビー

ム伝送用小型デュプリケート光学系の検討,' 第 57 回宇宙科学技術連合講演会予稿集,
1H10 (2013).