

論文の内容の要旨

論文題目「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」

学位申請者 山下 泰輝

キーワード：自由空間光通信 大気揺らぎ 波面歪み ホログラフィック光学素子
補償光学

自由空間光通信は長距離無線通信を格段に高速化する技術として研究開発が進んでいる。電波による既存の通信システムと比べると、搬送波にレーザー光を用いるため回折によるビームの拡がり小さく回線設計を行う上で有利であることが特徴である。自由空間光通信はその利点を活かし、小型な通信装置で高速な回線を構築できることから、超小型衛星や小型無人機を含めた様々な移動体に搭載され、リモートセンシングや衛星通信サービス等の多様なアプリケーションの通信基盤を担うことが期待されている。

一方で、搬送波のビームが鋭いことは、アンテナの指向制御に高い精度が要求されることを意味する。更に、大気中を伝搬するレーザー光では、気象による大気の屈折率分布の変動によって波面が歪み、その時間的変動が生じる。媒質である大気の影響による光波の状態の時間的変動を大気揺らぎと呼ぶ。自由空間光通信装置の受信光学系では、精追尾機構と補償光学システムによって通信光の波面歪みによる受信光強度の変動を抑圧し、通信品質を向上している。特に精追尾機構は、受信した通信光の伝搬角度を補正し受信器の入力であるシングルモードファイバ(SMF)の端面へ導く役割を担うため、通信の確立に必要不可欠である。また、補償光学システムは通信光の波面歪みのうち複雑な形状を補正し、SMFへの結合効率を高めて回線設計上の損失を低減する。しかし、波面歪みを補正するこれらのシステムは、センサと機械的駆動部品を組合せたフィードバック制御のシステムであることから、駆動部分の信頼性の担保、移動体の搭載容量の圧迫、制御遅延、が課題であり、自由空間光通信システムの性能向上・小型化・低廉化を進める上での障壁となっている。

本研究では自由空間光通信システムを高性能化・小型化・低廉化するために、受信光学系における通信光の波面歪みを補正する機能を、非機械的に構築する手法を提案し、評価した。波面歪みのうち伝搬角度変動に対応する成分はシステムへの影響度が大きく、制御遅延を除去する意義が大きい。より複雑な形状の波面歪みの成分は、伝搬角度変動の成分に比して全体のエネルギーに占める割合が小さく、エネルギー効率がより重要である。そこで、以下の二つの非機械的手法による受信光学系の構築を提案する。まず、伝搬角度変動はホログラフィック光学素子(HOE)によって補正し、完全に受動的な単一の光学素子によって精追尾機構を代替する。そして、より複雑な波面形状の補正には引き続き補償光学システムを用い

るが、波面制御素子として可変形鏡(DM)ではなく液晶素子(LCOS)を用いることで、機械的駆動部品を排除する。これらの手法について試作及び数値シミュレーションによる評価を行って、受信光学系における損失の特性を明らかにし、その有効性と既存手法に対する優位性を示した。

本論文は5章で構成されており、以下に各章の概要を示す。

第1章は序論である。本研究の背景と目的の説明として、自由空間光通信システムに対する社会的要求とこれまでの研究開発の経緯を示し、現在のシステムにおける課題を明らかにし、その解決手法を提案した。提案手法であるHOE及びLCOSを用いた補償光学システムの概要を説明し、本研究の社会的意義を明らかにした。また、本論文の構成と各章の概要について述べた。

第2章では、自由空間光通信システムと、システムに対する大気揺らぎの影響について理論的背景を示した。まず自由空間光通信システムの構成について概説し、大気中を伝搬するレーザー光の波面歪みと、その影響を説明する理論を説明した。そして、大気揺らぎの影響を抑圧する手法である精追尾機構と補償光学システムについて、それらの既往の研究を紹介し、それぞれの手法が、制御遅延のために大気揺らぎの影響を完全に抑圧可能ではないこと、システムの構成上機械的駆動部を持ち信頼性の担保のための試験が必要なこと、多数の部品から構成されるフィードバックシステムであり搭載容量を圧迫することを指摘した。

第3章では、精追尾機構を代替するHOEの設計および作成の手法、評価実験の方法とその結果を示し、提案手法の特性について考察した。まずHOEを設計するための基礎理論としてホログラムの原理を紹介し、ブラッグ回折格子の回折効率についてKogelnikの結合波動方程式を用いて説明した。次に、回折格子を多重記録したHOEによって受信した通信光の伝搬角度変動を抑圧する手法を提案し、Kogelnikの理論に基づいて具体的な設計手法を示した。HOEの評価実験では、通信光のHOEに対する入射角度への、SMFへの結合効率の依存性を評価した。提案した設計手法で作成したHOEが設計に従った特性を発揮することを確認した。本論文で評価したHOEのうち、通信波長帯で機能するよう設計されたものについては、 0.23deg の角度幅で受信光の到来角変動を抑圧する機能を持つ事を確認した。これは、既存の精追尾機構が補正可能な角度幅と同等であり、提案手法の有効性が示された。また、SMFへの結合効率を基にビット誤り率の見積もりを行い、回線設計の観点からHOEの特性を考察した。考察に当たって仮定した受信システムにおいて、HOEは精追尾機構に対して 0.45dB 多い送信電力を要求することが明らかになった。考察においてHOEの回折効率を向上し損失を低減するには、材料の特性を考慮し、HOEの記録時における露光時間や露光エネルギーの最適値を探索する必要性が示唆された。

第4章では、波面制御素子にLCOSを適用した補償光学システムによって、より高精度な波面補正を行うための制御手法を提案し、数値シミュレーションによる評価を行った。提案した制御手法では、波面の再構成における基底行列をランダムベクトルで構成した。従来はZernike多項式のパターンに基づいた基底が使われていたが、ランダムベクトルで構成された基底を用いることで、波面の再構成の精度を示す二乗平均誤差が最大で 10^3 以上向上

する結果を得た。また、補償光学システムのシミュレータにおける波面の再構成にランダムベクトルで構成された基底を適用し、Strehl 比を用いて波面補正の精度を評価した。評価の結果、Zernike 多項式に基づく基底を用いた場合と較べて、ランダムベクトルを用いた場合は 5% 高い Strehl 比が得られ、提案手法の有効性が示された。また、Zernike 多項式に基づく基底で波面を再構成する従来の手法では、効果的に波面を補正可能な基底の数に制限がある一方で、ランダムベクトルを基底に用いた場合には、基底の数と波面補正の精度が比例することも明らかになり、ランダムベクトルを波面の再構成に用いることの有用性が示された。

第 5 章は結論であり、本論文で得られた知見をまとめ、総括した。

以上のように、本研究は自由空間光通信装置の受信光学系における精追尾機構を HOE で代替し、補償光学システムの DM を LCOS で代替することで、機械的駆動部を排除することを提案した。到来角変動を抑圧する HOE については、設計通りの特性が得られ、現用の精追尾機構を同等の角度幅の到来角変動を抑圧できることが明らかになった。また、補償光学システムの波面制御素子に LCOS を用いる際に、ランダムベクトルを波面再構成の基底とすることで、従来の補償光学システムより高精度な波面補正が可能であることが明らかになった。これらの成果は、自由空間光通信装置を高性能化・小型化・低廉化し、高速な長距離無線通信システムが利用可能な状況を増加させる事によって、リモートセンシングや衛星通信サービスを始めとする様々なアプリケーションの価値を高める事に貢献するものである。