

## 審査結果の要旨

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

本論文は、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ものである。本論文で報告されている主な学術的成果は、自由空間光通信の受信光学系から機械的駆動部を排除し、通信装置を小型化しかつ性能と信頼性を向上させる手法を新たに提案し、その有用性と効果を明らかにしたことである。本論文では、空間光通信装置の受信光学系において、従来は機械的な可動部品と閉ループ制御で実現されていた精追尾機構を単一の受動光学素子であるホログラフィック光学素子(HOE)で代替する手法、補償光学システムの波面制御素子に従来用いられていた可変型鏡を液晶型の空間光変調器(LCOS)に代替して機械的駆動部を排し、さらに波面制御素子の制御における線形方程式の基底行列にランダムに値を生成した行列を適用し高精度な波面補正を可能とする手法、の二点により課題の解決を図っている。

本論文の背景には、空間光通信装置の小型化と高性能化の要求に対し、機械的駆動部を持つ受信光学系の構成では期待される効果を発揮することが困難であるという課題がある。自由空間光通信における受信光学系では、大気中を伝搬するレーザー光の波面歪みを補正して、受信器への入力であるシングルモードファイバ(SMF)へ安定的に受信光を結合する機能が重要である。波面歪みのうち Tip-tilt 成分には精追尾機構、その他の高次の波面歪み成分には補償光学システムが補正に用いられている。精追尾機構は受信光を SMF へ結合するために不可欠である、また補償光学システムは SMF への受信光の結合効率を向上させるために空間光通信装置への適用が検討されている。一方で、これらの機構は制御遅延の発生を避けられず大気ゆらぎの影響を完全に抑圧することは困難であった。また機械的駆動部を含む高速駆動や可変型鏡が使用されている為人工衛星への搭載に際しては振動耐性試験等が必要であり製造コストを増大させているため、よりシンプルで高信頼な精追尾機構と補償光学システムの構成が望まれている。

本論文の目的は、自由空間光通信における受信光学系の構成から機械的駆動部を排除し、通信装置の小型化、高性能化、高信頼化に対する制約を打開する手法の確立である。受信光学系で波面補正の機能を担う機構のうち、精追尾機構については単一の HOE で代替することで制御機構を不要化し、制御遅延の完全な除去、光学系の大幅な小型化、可動部品の排除による信頼性の向上、を図っている。試作した HOE では精追尾機構と同等の  $0.23\text{deg}$  の角度幅で波面歪みの Tip-tilt 成分の変動の影響を抑圧することに成功している。補償光学システムについては、波面制御素子を非機械的な LCOS に代替することで、信頼性の向上を図っている。また、補償光学システムの制御に用いる線形方程式の基底として従来から用いられている Zernike 多項式によって生成された行列に代えて、ランダムに値を生成した行列を利用することで、波面再構成の精度を  $10^3$  以上向上し、通信装置の高性能化に貢献している。

本論文の構成は以下の通りである。

第 1 章では、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、精追尾機構を代替する 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。序論としての的確であり、申請者が自由空間光通信システムにおける通信光の波面歪みの問題と、その抑圧を担う自由空間光通信装置について十分な知識と経験を有していると判断できる。また従来の自由空間光通信装置における課題と、その解決を図る提案手法

が示されており、本研究の目的を明確に示している。

第2章では、自由空間光通信の通信光に対する大気ゆらぎの影響、及びその影響を抑圧に従来から用いられる手法である、精追尾機構と補償光学システムについて詳細かつ的確に述べられている。大気ゆらぎが1kHzを超える周波数成分まで含むのに対し、精追尾機構の制御速度は数百Hzまでに留まっている点を指摘し、SMFへの受信光の結合効率が17dB程度である事を示している。また補償光学システムについても、導入によってSMFへの結合効率が16dB向上する事が示され、従来手法が立脚する理論と研究動向、課題が具体的に述べられている。

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について述べられている。体積型回折格子を3つ角度多重記録したHOEによって0.23degの角度幅で受信光の波面のTip-tilt成分の動揺による受信光強度の変動を抑圧しており、単一のHOEによって精追尾機構を代替可能である事を明らかにした。また、多くのホログラム記録材料が通信波長帯である近赤外線で感光しない点に対応する手法として、作成時と異なる波長で使用されるHOEの設計手法を示し、852nmで使用するHOEを532nmで記録して設計通りに機能する事を確認し、提案手法の有用性を示した。一方でHOEを用いた際の受信光のSMFへの結合効率は0.16%であり、向上の余地が残されている。結合効率の向上に必要な施策として、より厚い材料を利用してブラッグ不整合な回折光の発生を抑圧することと、ブラッグ不整合な回折光が発生するHOEでも結合効率を改善する為の受信光学系とHOEの設計手法を提案し、数値シミュレーションによって有効性を示しており、精追尾機構を代替するHOEの開発に関する重要な知見を含んでいる。

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り評価している。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に値が生成された行列で構成した。従来のZernike多項式に基づいて生成された基底行列を用いる場合に対し、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ている。また、補償光学システムのシミュレーションにおいても、ランダムに値が生成された行列の利用によって波面補正の精度を示す指標であるStrehl比が5%向上しており、提案手法の優位性を証明している。特に、直交関数系であるZernike多項式を用いて補償光学システムの制御を行う線形方程式の基底行列を生成するより、ランダムに値を生成した基底行列を用いることで、補償光学システムの性能とシステムの設計の自由度を向上する点は新たな知見であり、本研究の学術的な価値は高いと判断される。

第5章では、精追尾機構を代替するHOEと、LCOSを波面制御素子に用いた補償光学システムにより、自由空間光通信装置の受信光学系を非機械的に構築する手法について総括し、本論文の結論を述べている。本研究は自由空間光通信装置にHOEを適用する手法と、補償光学システムの制御における線形方程式の基底行列にランダムに値を生成した行列を用いる手法を提案し、具体的かつ的確な評価を行った点が、学術的価値を有する。今後の発展の方向性として、これらの成果を融合し、高次の波面歪みを補正するHOEなどに言及している。本研究の成果は、高性能な自由空間光通信装置をさらに小型かつ高信頼に構築することで、自由空間光通信による高速無線通信システムの学術的研究とその産業応用に大きな影響を及ぼすことが十分に期待できると考えられる。

以上の結果、本論文は学位論文として十分な内容を有するものと審査委員全員の一致で判定された。

したがって、学位申請者 山下 泰輝 氏は東海大学博士(工学)の学位を授与されるに値すると判断した。

論文審査委員

主査	博士 (工学)	遊部 雅生	(総合理工学研究科総合理工学専攻)
委員	博士 (工学)	山口 滋	(総合理工学研究科総合理工学専攻)
委員	博士 (工学)	濱本 和彦	(総合理工学研究科総合理工学専攻)
委員	博士 (工学)	藤川 知栄美	(総合理工学研究科総合理工学専攻)
委員	博士 (工学)	高山 佳久	(総合理工学研究科総合理工学専攻)
委員	博士 (工学)	市橋 保之	(国立研究開発法人情報通信研究機構電磁波研究所 電磁波応用総合研究室)
委員	博士 (工学)	盛岡 敏雄	(デンマーク工科大学 Department of Photonics Engineering)