



# HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	空間分割多重通信に向けた空間モード補償技術に関する研究 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	沈, 澤宇
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(情報科学)
Dissertation Number	甲第16006号
Issue Date	2024-03-25
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/92073">https://hdl.handle.net/2115/92073</a>
Rights(URL)	<a href="https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/">https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/</a>
Type	doctoral thesis
File Information	Zeyu_Shen_abstract.pdf, 論文内容の要旨



## 学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（情報科学） 氏名 沈 澤 宇

### 学 位 論 文 題 名

空間分割多重通信に向けた空間モード補償技術に関する研究  
(Study on Spatial Mode Compensation Technique for Space Division Multiplexing  
Communications)

近年、光ネットワークにおいて中心的な存在であるシングルモード・ファイバは、非線形シャノン限界やファイバ・ヒューズとして知られる現象により、その理論的な限界に迫っている。これらの限界を克服することは、ますます増大するデータ伝送の需要に対応するために不可欠であり、近年、マルチモードファイバの一種であるフェューモードファイバを用いたモード分割多重通信の研究が進められてきた。マルチモードファイバは複数の空間モードをサポートし、ファイバ入力の入射条件が光の特定の伝搬モードを定める役割を果たす。モード分割多重通信においては、マルチモードファイバの伝送容量は理論的に空間モードの数に正比例し、各空間モードが光の個別伝送路と見なされるため、伝送容量が増大する可能性が高まる。

光ファイバ中の空間モードを用いて通信を行う場合、コア偏心、楕円形状、不均一な屈折率、屈曲など、ファイバ内の不完全性はモード結合を引き起こし、伝送速度の低下とクロストークをもたらす。将来的には、モード結合の問題を軽減するために、光領域でのモード補償やモード変換など、さまざまなモード制御技術の開発が必要である。現在のモード分割多重通信システムでは、光信号を受信した後、大規模な MIMO 信号処理が必要となり、実用化の妨げとなっている。そのため、モード分割多重通信システムにおける MIMO 信号処理への依存度を低減するための取り組みが行われている。

本研究では、マルチモードファイバを用いた光通信技術の高度化を目的として、プログレッシブ位相共役技術を用いた空間モードの補償ならびにモード合分波器の不要な新たな信号の多重化方法を提案し、それらの基本動作を理論および実験により検証した。

まず、信号光と干渉性のある参照光を用意できない環境でも、空間モード光の複素振幅を計測・制御する方法として、プログレッシブ位相共役技術を提案した。本手法はローパスフィルターを用いて信号光から平面波成分を抽出し、信号光との干渉により位相計測を行うことで、参照光を用意することなく高精度に複数振幅分布を計測することを可能にする。次に、プログレッシブ位相共役技術を用いてマルチモードファイバ内の空間モードの位相歪みを補償することができることを検証した。光信号の空間位相歪みを計測し、空間光変調器を用いて必要な位相変調を加えることで、複数の高次モードに分布した光複素振幅を基本モードに変換できることを示した。また、本手法のモード補償効果は、高次モードと基本

モードの強度の重なりに依存するため、ランダム拡散板と光学レンズを用いて、入力空間モード光の強度分布を一様に拡散させることで、補償効果が向上することを示した。

最後に、モード分割多重通信システムで必要だったモードマルチプレクサとデマルチプレクサを不要にする、新たな多重化方式であるモード拡散多重通信を提案した。モード拡散多重方式では、プログレッシブ位相共役技術を用いて、信号光の入射位置または入射角度の相違によりマルチモードファイバ内に異なるモード分布を有する通信チャンネルを生成することができる。本研究では、モード拡散多重方式における各チャンネル間の入射角度の最小差と、伝送に使用できる入射角度の最大範囲を評価することにより、多重化可能な最大チャンネル数を推定した。

以下に本論文を構成する各章の要旨を示す。

第1章では、光通信の発展を概観し、本研究の背景及び目的・意義について述べた。

第2章では、空間分割多重伝送システムの重要性を述べた。特に、空間分割多重伝送の実現に向けて検討されている複数の実装形態についてそれぞれの特徴を述べた。また、伝送に必要な要素技術について、その概要と要求される機能を述べた。

第3章では、光学的位相共役光とデジタル位相共役の基礎について述べた。また、デジタルホログラフィによる光複数振幅の計測について述べた。最後に、プログレッシブ位相共役技術の動作原理と特徴を述べた。

第4章では、プログレッシブ位相共役技術を用いた空間モード補償手法を提案し、その基本概念や特長を述べた。次に、本手法の補償効果を数値解析および実験により評価した。さらに、実験結果を従来のデジタル位相共役に基づく方法と比較することで、提案手法の優位性を示した。

第5章では、高次モードに対するプログレッシブ位相共役技術を用いた空間モードの補償効果を向上させる目的で、ランダム拡散板によるモード補償効果の改善手法を提案した。数値解析により拡散板を加えた場合の補償効果を評価し、補償効果の大幅な向上が可能であることを示した。

第6章では、プログレッシブ位相共役技術を用いたモード拡散多重方式を提案し、その基本概念や特長を述べた。実験により、入射条件の変更により、マルチモードファイバ内に異なるモード分布を有する通信チャンネルを生成することができることを示した。また、信号入射面におけるチャンネルの最小サイズ、最小間隔と配置可能領域を評価し、実験結果から本手法の最大可能多重数を推定した。

第7章では、本論文で提案した技術について、得られた成果を総括し、今後の展望と残された課題を述べる。