

令和 4 年 6 月 12 日現在

機関番号：32601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2020～2021

課題番号：20K22416

研究課題名（和文）光学拡散板と空間光変調器による空間モード変換技術に関する研究

研究課題名（英文）spatial mode conversion technique by using a spatial light modulator and an optical diffuser

研究代表者

前田 智弘（Maeda, Tomohiro）

青山学院大学・理工学部・助教

研究者番号：90880641

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、将来のモード分割多重ネットワークにおける空間モードによるフレキシブルなルーティングの実現に向け、高次モードを入力とした空間モード変換技術の確立を目的とした。初年度は空間クロスモジュレーションにおいて空間光変調器に与えられる位相変調関数に対して入力光の位相分布を差し引くことによって、高次モードの入力に適応可能であることを示した。本年度は、位相変調関数の導出過程に遺伝的アルゴリズムを導入することにより、挿入損失とクロストークの両方を改善する方向への最適化の進行を確認した。加えて、実験で変換性能を評価し、高次モードを入力としたモード変換が可能であることを実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究が挑戦した「あらゆる空間モードを自在に変換する技術」の確立は、将来の超大容量光ファイバネットワークにおけるフレキシブルなルーティングの実現に寄与するものである。実験では、実験環境の困難さから現行の400 Gbit/s伝送システムで採用されている16QAM信号のクロストークしきい値である -25 dBを満足する精度は得られなかったが、数値解析では極めて高い精度での変換が可能であることが示された。また、提案技術では任意の波面を全く異なる別の波面へと変換することができるため、空間モード変換以外にも、「補償光学」や「3Dディスプレイ」など他分野への応用が期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we aimed to establish the technique of the spatial mode conversion from higher order modes, toward the realization of flexible routing based on spatial modes in the future mode-division multiplexed network. In the first year, we showed that the spatial cross modulation can be applied to the mode conversion from higher-order modes by subtracting the input phase distribution from the phase modulation function to be displayed on the spatial light modulator. In the second year, we confirmed that the progress of the optimization in the direction of improving both insertion loss and crosstalk by introducing the generic algorithm to the process to calculate the phase modulation function. In addition, we conducted an experiment on the mode conversion from higher-order modes and evaluated the performance of the conversion.

研究分野：光情報処理

キーワード：モード分割多重伝送 空間光変調器 空間モード変換 光ファイバ通信

1. 研究開始当初の背景

空間モード間の結合性の低い弱結合数モードファイバ(FMF)を利用したモード分割多重(MDM)伝送は、光ファイバ通信システムにおける伝送容量を飛躍的に拡大する技術として注目を集めている[1]。弱結合 FMF を用いた MDM 伝送では、空間モードを独立した伝送キャリアとして扱うことができるため、空間モードによるフレキシブルなネットワークの構築が期待できる。このとき、空間モードパスを有効活用したルーティングを実現するためには、中継ノードにおいて任意の空間モードを光信号のまま別の空間モードへと変換する技術が必要不可欠となる。

2. 研究の目的

本研究では、空間クロスモジュレーション(SCM)[2]に着目し、高次モードを入力とした空間モード変換の実現を目的とした。図1に示すように、SCMは光学拡散板と空間光変調器(SLM)を直列配置した構成により複素振幅変調を実現する。SCMは実光学系を模した仮想光学系による計算過程と実光学系による再生過程により成立する。これまでに、計算過程への反復計算の導入により、任意の強度分布を有した入力光に対して高精度な変調が実現できることが示されている[3]。しかしながら、高次モードはそれぞれ固有の位相分布を有しているため、高次モードを入力とした空間モード変換を実現するためには、強度分布だけでなく位相分布も任意に取ることができるように機能を拡張する必要がある。

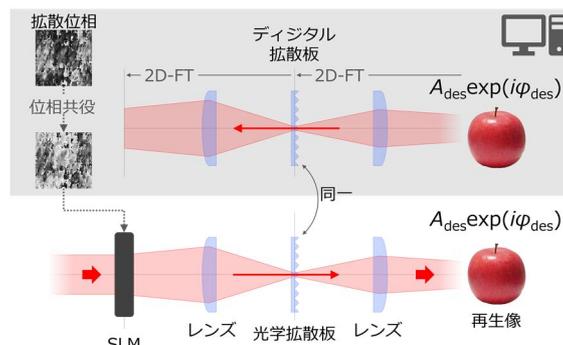


図1 SCMの概念図。

3. 研究の方法

(1) 位相共役の原理を用いることによる高次モード入力への適応手法の提案

反復計算によって得られた位相分布 $\varphi_{o,N}$ は、任意の強度分布を有した入力光を所望とする波面へと変換することができる分布である。本研究では、図2に示すように、反復計算によって得られた分布から入力光の位相分布 φ_{in} を差し引いた分布を SLM に与える。これにより、入力光がもともと有していた位相分布が位相共役の原理により相殺されて $\varphi_{o,N}$ が新たに与えられる。したがって、SLM による位相変調を受けた光波が仮想光学系と等価な実光学系を通過することにより、所望とする波面が出力として得られる。原理実証として、10モードファイバ中の LP_{11e} を入力光、 LP_{21e} を変換目標とした変換について数値解析を行った。

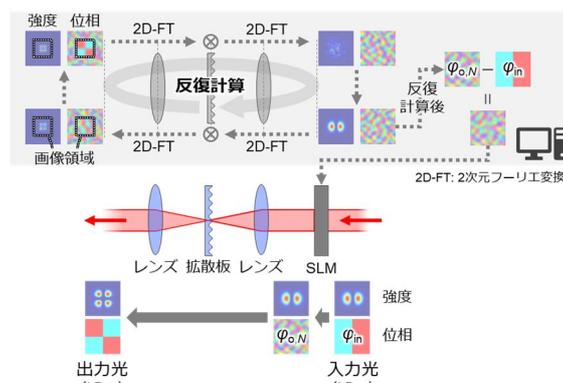


図2 SCMによる高次モードの変換。

(2) 変調関数導出過程への最適化アルゴリズムの導入

反復計算の導入による効果として、任意の強度分布への適応だけでなく変換精度の向上がある。しかし、反復計算では反復中に拘束条件として与えた分布との誤差が小さくなる方向にのみ最適化が進行するため、光利用効率は考慮されない。すなわち、変換精度と光利用効率がトレードオフになるという課題があった。そこで、本研究では、SLM に与える変調分布導出過程に遺伝的アルゴリズムを導入することにより、変換精度と光利用効率の両立を図った。

(3) 実験による性能評価

図3に示す光学系を用いて実験による性能評価を行った。光源としては波長 532 nm のレーザを用い、空間モード変換の入力光としては光ファイバ出射光を用いた。このとき、光ファイバとして(a) 532 nm の光波に対して SMF として動作するもの、(b) 1550 nm の光波に対して SMF として動作するもの、(c) コア径 50 μm の MMF の 3 種を用いた。(b) については、532 nm の光波に対して 10 程度の導波モードを有することから、FMF を想定した。

ファイバから出射した光波は SLM が動作する方向の直線偏光成分のみが抽出され、SCM によるモード変換部へと入力した。ここで、SLM の図中左側を SLM として、同右側を拡散板として利用

した。また、SLM と拡散板を接続するレンズは凹面鏡により代用した。変換による出力光と平面波との干渉縞強度分布から出力光の複素振幅分布を算出し、各空間モードへの結合効率を求めることで変換性能を評価した。

実験結果については、研究方法(1)で提案した入力光の位相分布を減算する処理の有無について比較した。

4. 研究成果

(1) 位相共役の原理を用いることによる高次モード入力への適応手法の提案

数値解析によって得られた結果を図4に示す。減算なし場合には全く再生像が得られていないのに対し、減算ありの場合は出力面中の画像領域に変換目標とした LP_{210} の分布が正確に現れている。しかし、入力する空間モードによって変換性能に差が生じるため、変調関数を導出する際のパラメータを入力空間モードごとに最適化することにより、さらなる性能の向上が見込まれる。

(2) 変調関数導出過程への最適化アルゴリズムの導入

10モードファイバ中の LP_{21} を変換目標とし、挿入損失とクロストークを組み合わせて評価関数として世代交代の際に与える分散や世代数などのパラメータに対する変換性能を評価した。初期分布は12回反復計算を行った後の分布とし、評価関数は挿入損失 IL と最大クロストーク $\max(XT)$ に対して $IL + \max(XT) \times 10^4$ とした。解析の結果、図5に示す通り、従来の反復計算による最適化ではクロストークの低減と損失の増大がトレードオフとなっていたが、遺伝的アルゴリズムの導入によりクロストークと損失の両方を低減する方向への最適化の進行が確認された。しかし、損失については0.1 dB程度と微小な改善に留まっているため、パラメータのさらなる調整が課題となる。

(3) 実験による性能評価

実験によって得られた LP_{210} を変換目標としたときの入力光および出力光の複素振幅分布を図6に示す。図4に示した数値結果の結果と異なり、入力位相の減算処理を与えていない場合であっても LP_{210} の分布が現れている。これは、入力光が LP_{11} など単一の高次モードではなく、多数の空間モード成分を含んでいたことによると考えられる。得られた複素振幅分布から10モードファイバの各導波モードに

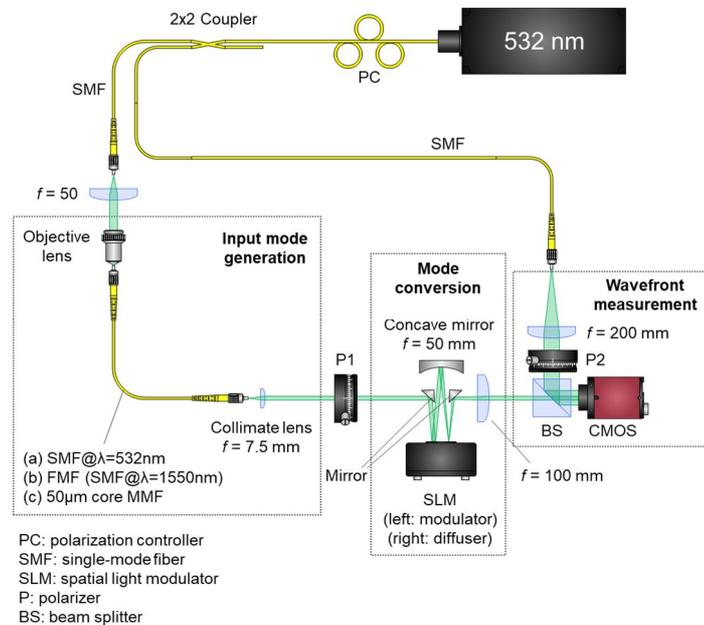


図3 実験で用いた光学系。

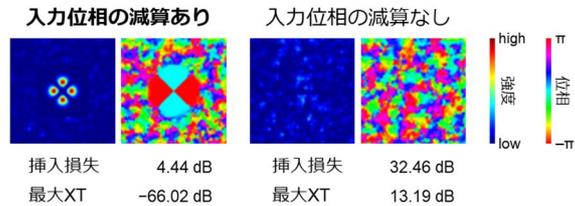


図4 数値解析によって得られた出力光の複素振幅分布および変換性能。

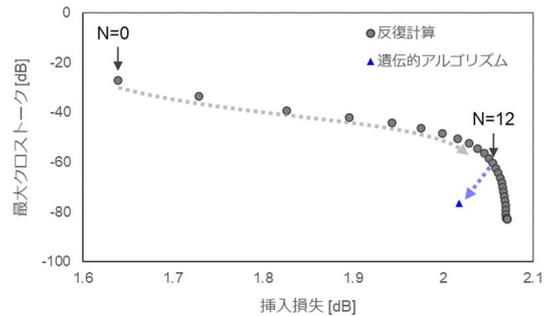


図5 遺伝的アルゴリズムの導入による効果。反復計算では反復回数の増加に従ってクロストークは低減されるが、挿入損失は増大している。一方で、遺伝的アルゴリズムの場合は初期分布から損失とクロストークの両方を改善する方向に最適化が進行している。

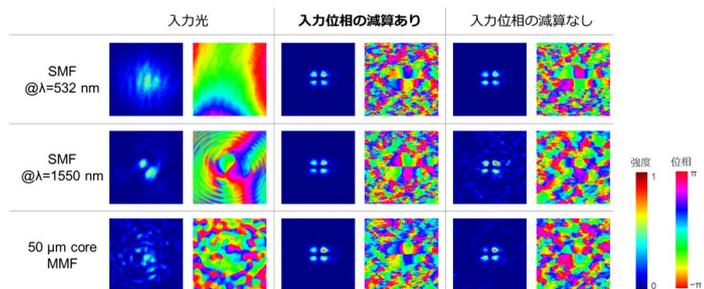


図6 実験によって得られた入力光および出力光の複素振幅分布。

対する結合効率を算出し、挿入損失およびクロストークを評価した結果を図7に示す。入力光の生成に532 nm用のSMFを用いた場合は、入力位相の減算処理の有無はほとんど変換性能に影響を与えないが、1550 nm用のSMFを用いた場合は挿入損失に約5 dBの大きな差が生じている。さらに、コア径50 μm のMMFを用いた場合では、挿入損失に加えて、クロストークにも約4 dBの差が生じた。以上より、入力位相の減算処理を与えることにより高次モードを入力としたモード変換が可能であることを実証した。加えて、入力光の分布が複雑になるほどその効果が大きく現れるという知見が得られた。

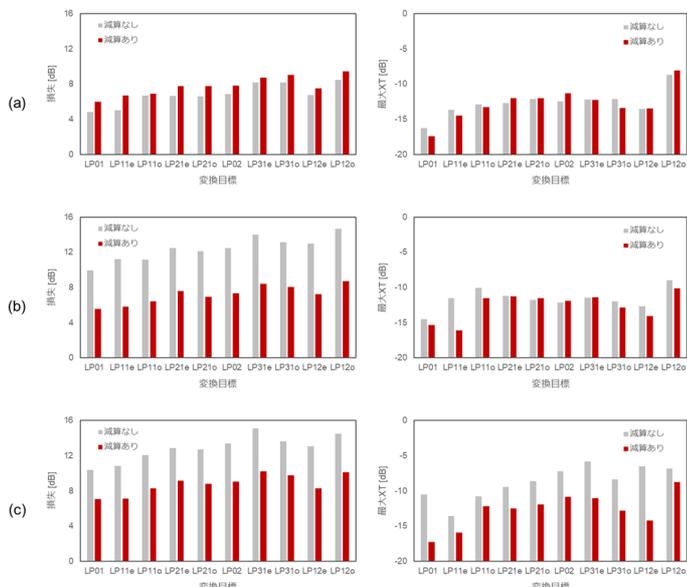


図7 各変換目標に対する変換性能。入力光の生成に用いたファイバ：(a)532 nm用SMF，(b)1550 nm用のSMF，(c) コア径50 μm のMMF。

最適化に関する解析において

て、一度の解析に数日を要するなど想定以上の時間を要したことで十分な検討ができず、従来のアルゴリズムに対して優位性を示すまでの成果は得られなかった。今後はより高性能なGPUの導入、およびコーディングの見直しなどにより解析に要する時間を短縮した上で、パラメータのチューニングや複数の最適化手法に対する比較検討など、当初の研究計画を引き続き遂行していく。

実験に関しては、今回の構成では2回の位相変調を1台のSLMで賅ったことから、サブピクセルオーダの調整が不可能であったことに加え、三角ミラーを始めとした光学系の調整が極めて困難であった。今後はより自由度の高い構成による実験を実施するために、すりガラス拡散板を用いたSCMによる空間モード変換について検討を進める。

参考文献

- [1] R. Ryf et al., J. Light. Technol. 30, 521 (2012).
- [2] A. Shibukawa et al., Opt. Express 22, 3968 (2014).
- [3] T. Maeda et al., OECC/PSC 2019, TuE2-4, Fukuoka, Japan (2019).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 石橋 梨乃, 前田 智弘, 外林 秀之
2. 発表標題 遺伝的アルゴリズムの導入による空間クロスモジュレーションを用いた空間モード変換技術の性能向上
3. 学会等名 第69回 応用物理学会 春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 前田 智弘, 岡本 淳, 外林 秀之
2. 発表標題 空間クロスモジュレーションによる高次空間モードの変換
3. 学会等名 2021年 電子情報通信学会 ソサイエティ大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------