

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 22 日現在

機関番号：10101
研究種目：基盤研究(B) (一般)
研究期間：2013～2016
課題番号：25289110
研究課題名(和文) 光複素振幅制御技術を用いたモード拡散多重光ファイバ通信に関する研究

研究課題名(英文) Spatial

研究代表者
岡本 淳 (Okamoto, Atsushi)
北海道大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号：40224068
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,300,000円

研究成果の概要(和文)：近年、光ファイバ通信容量の拡大に向けて空間モード分割多重通信方式の検討が活発に進められている。本研究では、高度な空間モード利用に必要となる空間モードの生成・変換・分離・検出技術の新規提案と、その性能向上に向けた研究を行った。参照光の不要な光位相計測技術と、空間光変調器を用いた空間モードの生成技術、および、これらをベースとした空間モードの動的な変換技術などを開発した。

研究成果の概要(英文)：In recent years, studies on spatial mode division multiplexing are being actively pursued to expand optical fiber communication capacity. In this research, we proposed and improved new technologies for generation, conversion, separation, and detection of spatial modes required for advanced spatial mode utilizations. Moreover, we developed a reference-free phase measurement technology, a spatial mode generation technology using a spatial light modulator, and dynamic conversion technology of spatial mode based on our proposed technologies.

研究分野：光電子工学

キーワード：光ファイバ通信 位相計測 位相共役 空間モード

1. 研究開始当初の背景

光ファイバの伝送容量は、光増幅器の帯域や光ファイバへの入力光パワー増大による非線形光学効果等の観点から見て、物理的限界に近付いている。これに対し、社会の通信トラフィック需要は増加の一途を辿っているため、マルチコアファイバ通信やモード分割多重通信技術など、伝送容量の更に飛躍的増大を目指した技術の開拓が社会から求められている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、近年、光ファイバ通信容量の拡大に向けて空間モード分割多重通信方式の検討が活発に進む中、必ずしも単一の空間モード毎に信号を変復調しなくても、光ファイバにおける空間位相歪の影響を回避できる「モード拡散多重伝送」の仕組みを新たに提案し、その基本動作を実証することにある。また、高度な空間モード利用に必要な空間モードの生成・変換・分離・検出技術の改良と、その性能向上に向けた研究を行う。

3. 研究の方法

(1) モード拡散通信の実現には、空間複素振幅を高精度に検出する技術が必須になる。CCDやCMOSなどの撮像素子の検出速度は、一般的な通信用光検出器に比べて大幅に遅く、局部発振レーザとの干渉効果を用いた位相検出は技術的に困難である。そこで、本研究では、信号光に空間フィルタリングを行ってDC空間周波数成分を抽出し、これを信号光と再干渉させることで空間位相分布を高速・高精度に計測する方法(参照光不要型位相検出)を理論と実験により検証する。

(2) モード拡散多重通信においては、前記参照光不要型位相検出器で検出された複素振幅の電子データから、位相共役光を生成する手段が必要である。本研究では、高精細空間光変調器(SLM)を用いて、電子データから光複素振幅を生成する方法を考案する。

(3) モード拡散伝送の基本動作を以下の手順で検証する。まず、パイロット光を光ファイバに入射してモード光を励振し、ファイバ伝送後に歪みを受けたモード光の複素振幅分布を参照光不要型位相検出器で検出する。検出された光複素振幅の位相共役分布を、SLM上に表示し、SLMに入射した信号光のスペckル分布が平面波に変換されることを実験的に検証する。

(4) 高度な空間利用に向けた空間モードの相互変換技術を開発する。空間光変調器(SLM)、ホログラム、フォトリフラクティブ材料などを用いた新規の方法を検証する。

4. 研究成果

(1) 信号光に空間フィルタリングを行ってDC空間周波数成分を抽出し、これを信号光と再干渉させることで空間位相分布を高速・高

精度に計測する新規技術を開発した。また、複数回の計測と最適化アルゴリズムの組み合わせにより、計測精度を大幅に改善する方法を実証した。これらの成果は、信号光に含まれる空間モードを参照光を用いることなく検出可能とするため、参照光用の伝送路を不要とし、かつ、空間モードの変動に対して高速に適應できる通信システムを構築できる点で大きな意義がある。さらに、ホログラフィックダイバーシティ干渉法の計測アルゴリズムを大幅に改良し、参照光強度に対する制約なく、光複素振幅の空間分布を正確に計測する方法を考案し、理論と実験の両面からこれを実証した。

(2) 高精細空間光変調器(SLM)上にコンピュータ生成ホログラム(CGH)を表示して、電子データから空間モードの生成に必要な光複素振幅を得ることに成功した。また、2台のSLMを並列に用いることで、高効率かつ高精度な複素振幅生成を実現できる新規の方法を考案し、これと位相計測技術を組み合わせることにより、新規のデジタル位相共役システムの開発に成功した。さらに、従来のCGHよりも高性能・高精度かつ1台の位相変調SLMで複素振幅を生成可能な技術として、空間クロスモジュレーション法を開発し、これを任意の空間モード生成器として用いることができることを実証した。

(3) ファイバ伝送後に歪みを受けたモード光の複素振幅分布を参照光不要型位相検出器で検出し検出された光複素振幅の位相共役分布をSLM上に表示することで、信号光のスペckル分布が平面波に変換されることを実験的に検証できた。さらに、これらの動作を近赤外域で行う実験に成功した。

(4) 位相変調型SLMによってリコンフィギュラブルな空間モード変換を行う方式の基礎実験を行い、低次空間モードと高次空間モードの相互変換に成功した。また、フォトリフラクティブ結晶中に多重ホログラムを形成し、複数の空間モードを同時に変換することのできるフォトニッククロスコネクットの動作確認実験に成功した。さらに、ホログラム素子を用いて、空間モードの変換と分離を同時に行う方式を提案しその基礎実験に成功した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計10件)

Yuta Wakayama, Atsushi Okamoto, Kento Kawabata, Akihisa Tomita, and Kunihiro Sato, Mode demultiplexer using angularly multiplexed volume holograms, *Optics Express*, Vol. 21, No. 10, pp. 12920-12933 (2013). DOI: 10.1364/OE.21.012920

Atsushi Shibukawa, Atsushi Okamoto, Yuta Goto, Satoshi Honma, and Akihisa Tomita, Digital phase conjugate mirror by parallel arrangement of two phase-only spatial light

modulators, *Optics Express*, Vol. 22, No. 10, pp. 11918-11929, (2014). DOI: 10.1364/OE.22.002968

Atsushi Okamoto, Tomohiro Maeda, Yuki Hirasaki, Atsushi Shibukawa, and Akihisa Tomita, Progressive phase conjugation and its application in reconfigurable spatial-mode extraction and conversion, *Proceedings of SPIE*, Vol. 9130, 913012(1-11) (2014). DOI: 10.1117/12.2051729

Yanfeng Zhao, Atsushi Okamoto, Tomohiro Maeda, Yuki Hirasaki, Akihisa Tomita, and Masatoshi Bunsen, Parallel and Simultaneous Spatial Mode Conversion using Photorefractive Crystal for Photonic Cross-Connect, *Proceedings of SPIE*, 9389, 93890H(1-10), (2015). DOI: 10.1117/12.2078767

Jin Nozawa, Atsushi Okamoto, Atsushi Shibukawa, Masanori Takabayashi and Akihisa Tomita, Two-channel algorithm for single-shot, high-resolution measurement of optical wavefronts using two image sensors, *Appl. Opt.*, 54, pp. 8644-8652 (2015). DOI: 10.1364/AO.54.008644

Jin Nozawa, Atsushi Okamoto, Masataka Toda, Yasuyuki Kuno, and Akihisa Tomita, Virtual interferogram-generation algorithm for phase measurement using two interferograms, *Proceedings of SPIE*, 9771, 97710B(1-8), (2016). DOI: 10.1117/12.2212015

Hiroki Sakuma, Atsushi Okamoto, Atsushi Shibukawa, Yuta Goto, and Akihisa Tomita, Highly accurate spatial mode generation using spatial cross modulation method for mode division multiplexing,” *Proceedings of SPIE*, 9774, 97740K(1-7), (2016). DOI: 10.1117/12.2211948

野澤 仁, 岡本 淳, 小川 和久, 富田 章久, 2つのホログラムのみを使用した高精度な位相計測に向けた仮想干渉縞生成法, *映像情報メディア学会技術報告*, Vol. 40, No.6, pp.303-307, (2016).

Jin Nozawa, Atsushi Okamoto, Kazuhisa Ogawa, and Akihisa Tomita, Virtual interferogram-generation algorithm for robust complex amplitude measurement using two interferograms, *Optics Express*, Vol. 24, No. 21, pp. 24002-24017 (2016). DOI: 10.1364/OE.24.024002

Yuta Goto, Atsushi Okamoto, Yuta Wakayama, Kazuhisa Ogawa, Jin Nozawa, Akihisa Tomita, and Takehiro Tsuritani, Reference-free holographic diversity interferometry via iterative measurements for high accuracy phase detection, *Optics Express*, Vol. 24, No. 21, pp. 24739-24749 (2016). DOI: 10.1364/OE.24.024739

〔学会発表〕(計 26 件)

A. Okamoto, Spatial mode excitation and separation using spatial phase control technology, CLEO-PR & OECC/PS 2013, 2013年6月30日~2013年7月4日, 京都国際会議場(京都市) [invited].

Yuki Hirasaki, Conversion and Extraction of Spatial Modes from a Multimode Fiber by Reference-Free Holographic Diversity Interferometry, CLEO-PR & OECC/PS 2013, 2013年6月30日~2013年7月4日, 京都国際会議場(京都市).

Tomohiro Maeda, Holographic-Diversity Interferometry for Reference-Free Phase Detection, CLEO-PR & OECC/PS 2013, 2013年6月30日~2013年7月4日, 京都国際会議場(京都市).

平崎裕貴, プログレッシブ位相共役技術を用いたマルチモードファイバを伝播する空間モードの変換と抽出, 2014年電子情報通信学会総合大会, 2014年3月18日~2014年3月21日, 新潟大学(新潟市).

Yanfeng Zhao, Reconfigurable Spatial Mode Conversion using a Spatial Light Modulator, 2014年電子情報通信学会総合大会, 2014年3月18日~2014年3月21日, 新潟大学(新潟市).

Yuki Hirasaki, Progressive Phase Conjugation and Selective Extraction of Six Different Speckle Patterns in Multi-Mode Fiber, 5th EOS Topical Meeting on Optical Microsystems, 2013年9月12日~2013年9月14日, Capri(Italy).

Kento Kawabata, Diffraction property of volume holographic mode de-multiplexer for wavelength-division multiplexing signals, International Workshop on Holography, 2013年10月15日~2013年10月17日, 北見工業大学(北見市).

前田 智弘, 空間光変調器による位相変調を用いたリコンフィギュラブルな空間モード変換, 27回光通信システムシンポジウム, 2013年12月12日~2013年12月13日, 東レ総合研修センター(三島市).

Tomohiro Maeda, Reconfigurable Spatial Mode Conversion using a Phase-Type Spatial Light Modulator, 19th OptoElectronics and Communications Conference 2014, 2014年6月6日~2014年6月10日, Melbourne(Australia).

Yuki Hirasaki, Adaptive Compensation for Extraction of Spatial Modes using Progressive Phase Conjugation, 19th OptoElectronics and Communications Conference 2014, 2014年6月6日~2014年6月10日, Melbourne(Australia).

Atsushi Shibukawa, Improvement of fidelity in digital phase conjugation by parallel alignment of two phase-only spatial light

- modulators, European Optical Society Annual Meeting 2014, 2014年9月15日~2014年9月19日, Berlin(Germany).
Tomohiro Maeda, Reconfigurable Spatial Mode Conversion using a Spatial Light Modulator, IONS2014, 2014年9月15日~2014年9月16日, 北海道大学(札幌市).
小田 友和, プログレッシブ位相共役技術による偏光多重空間モードの抽出, 第75回 応用物理学会秋季学術講演会, 2014年9月17日~2014年9月20日, 北海道大学(札幌市).
趙 岩峰, フォトニッククロスコネクタのためのフォトリフラクティブ結晶を用いた並列空間モード変換, 平成26年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会, 2014年10月25日~2014年10月26日, 北海道科学大学(札幌市).
野澤 仁, 高精度な位相変調信号の計測に向けたホログラフィックダイバーシティ干渉法における計測精度の評価, 映像情報メディア学会, 2015年2月23日~2015年2月24日, 北海道大学(札幌市).
趙 岩峰, フォトニッククロスコネクタのためのホログラフィックメモリを用いた並列空間モード変換, 映像情報メディア学会, 2015年2月23日~2015年2月24日, 北海道大学(札幌市).
- Jin Nozawa, Virtual interferogram-generation algorithm for phase-shifting digital holography, MOC 2015 Microoptics Conference, 2015年10月25日~2015年10月28日, 福岡国際会議場(福岡市).
Yanfeng Zhao, Optimization of diffraction efficiency and coupling efficiency in spatial mode conversion for photonic cross connector, MOC 2015 Microoptics Conference, 2015年10月25日~2015年10月28日, 福岡国際会議場(福岡市).
佐久間 大樹, プログレッシブ位相共役技術による空間モードの選択的抽出, 第63回応用物理学会春季学術講演会, 2016年3月19日から2016年3月22日, 東京工業大学大岡山キャンパス(東京都).
Fumiya Mizukawa, Spatial Mode Separation and Interconversion Using Volume Hologram, International Symposium on Optical Memory 2016 (ISOM 2016), 2016年10月16日~2016年10月20日, 京都市リサーチパーク(京都市).
- 21 Jin Nozawa, Accuracy evaluation of phase shifting digital holography using virtual interferogram-generation algorithm, International Symposium of Optical Memory 2016 (ISOM 2016), 2016年10月16日~2016年10月20日, 京都市リサーチパーク(京都市).
- 22 水川郁弥, 体積ホログラムを用いた空間モード分離変換技術の検証実験, 映像情報メディア学会 2017年2月20日~2017年2月21日, 北海道大学(札幌市).
- 23 水川郁弥, 体積ホログラムによる数モードファイバ間の add/drop 機能の検討, 電子情報通信学会光通信システム研究会第30回光通信シンポジウム, 2016年12月20日~2016年12月21日, 東レ総合研修センター(静岡県三島市).
- 24 水川郁弥, 体積ホログラムを用いた相互変換機能を有するモード分離器の集光レンズの最適化, 平成28年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会, 2016年11月5日~2016年11月6日, 北海学園大学(札幌市).
- 25 野澤 仁, 仮想干渉縞生成法を用いた干渉縞間の位相シフト誤差補正に関する検討, Optics & Photonics Japan, 2016年10月30日~2016年11月2日, 筑波大学東京キャンパス(東京都).
- 26 佐久間大樹, 空間モード変換に向けたインライン型デュアルフェーズモジュレーション法の提案, 平成28年度電子情報通信学会ソサエティ大会, 2016年9月20日~2016年9月23日, 北海道大学(札幌市).
- 〔図書〕(計1件)
岡本 淳, 日本工業出版, アライアンス(光ファイバ通信の大容量化にむけた空間モード光制御技術), 2014年, 11-14.
- 〔産業財産権〕
出願状況(計4件)
- 名称: 複素振幅画像再生装置および複素振幅画像再生方法、ならびに、散乱位相画像生成装置および散乱位相画像生成方法
発明者: 岡本 淳, 渋川敦史, 後藤優太
権利者: 国立大学法人北海道大学
種類: 特許
番号: 特願 2013-168989
出願年月日: 2013年8月15日
国内外の別: 国内
- 名称: 複素振幅画像生成装置および複素振幅画像生成方法
発明者: 岡本 淳, 渋川敦史
権利者: 国立大学法人北海道大学
種類: 特許
番号: 特願 2013-233492
出願年月日: 2013年11月11日
国内外の別: 国内
- 名称: モード変換装置
発明者: 若山雄太, 釣谷剛宏, 岡本 淳
権利者: KDDI 株式会社, 国立大学法人北海道大学
種類: 特許
番号: 特願 2015-165127
出願年月日: 2015年8月24日

国内外の別： 国内

名称：光学部材の評価装置

発明者：若山雄太，釣谷剛宏，岡本 淳，後藤優太

権利者：KDDI 株式会社，国立大学法人北海道大学

種類：特許

番号：特願 2016-007214

出願年月日：2016年1月18日

国内外の別： 国内

取得状況（計0件）

〔その他〕

ホームページ等

<http://optpia.ist.hokudai.ac.jp/mdm2/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡本 淳 (OKAMOTO, Atsushi)

北海道大学・大学院情報科学研究科・准教授

研究者番号：40224068

(3) 連携研究者

本間 聡 (HOMMA, Satoshi)

山梨大学・医学工学総合研究部・准教授

研究者番号：70362085

佐藤邦宏 (SATO, Kunihiro)

北海学園大学・工学部・教授

研究者番号：00205907

高山佳久 (TAKAYAMA, Yoshihisa)

独立行政法人情報通信研究機構・ワイヤレス

ネットワーク研究所・主任研究員

研究者番号：30358915