

令和 4 年 6 月 22 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K05308

研究課題名（和文）空間モード多重度の飛躍的な増加のための空間単次元モード合分波基礎技術の研究

研究課題名（英文）Research on spatial single-dimensional mode multiplexer / de-multiplexer for drastically increasing modes multiplexing

研究代表者

姜海松（Jiang, Haisong）

九州大学・総合理工学研究院・助教

研究者番号：00738049

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、空間モード多重度を増加させるため、スラブ導波路を用いた単次元空間モードの合分波集積デバイスを提案した。その基本動作原理を解明し、原理的に集光位置差が不十分なため、隣り合うモード間は-5dB以下のクロストークを得るのが困難であることを判った。強結合導波路構造を用いることで、導波路の曲げ部分のモード間のクロストークが5dB以上低減できることを実験的に検証した。3次元導波路による高精度直接結合技術の基礎検討として、機械学習手法を用いた導波路検知技術を提案・検証した。また、新たにナノピクセル構造を用いたモード合分波集積デバイスを検討し、基本的な機械学習の設計手法を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

空間モード多重伝送の基盤技術であるモード合分波技術の空間モード多重度が少なく、モード多重度の飛躍的な向上が課題となっていた。本研究の検討より、スラブ導波路を用いた位相制御型合分波集積デバイスのモードの一括合分波の基本原則が明らかとなり、モード多重度の飛躍的な向上は実現できなかったが、空間モード合分波デバイスの研究開発において学術的に重要な知見が得られた。一方、本研究で検討した曲線導波路においてのモード間クロストーク低減手法、3次元導波路による高精度直接結合技術は、モード多重デバイスの技術発展に寄与することが期待できる。

研究成果の概要（英文）：We suggested a phase control type single dimensional spatial modes multiplexer / de-multiplexer using slab waveguide to drastically increase modes multiplexing. In this research, the operating principle of a single-dimensional spatial mode multiplexer using a slab waveguide was ascertained. By analyzing simulation results, we revealed that it is difficult to obtain mode crosstalk of lower than -5 dB due to insufficient difference of focusing position between adjacent modes. We also experimentally demonstrated the effect of reducing crosstalk between higher-order modes in the bending waveguide by using strongly coupled waveguide. As a preliminary study of optical coupling technology between MCF and modes multiplexer using 3D waveguides, we proposed and demonstrated machine-learning-based automatic waveguide recognition using YOLO. In addition, a basic machine learning design method was established for designing modes multiplexer / de-multiplexer based on nano-pixel waveguide.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：モード合分波器 単次元空間モード スラブ導波路

### 1. 研究開始当初の背景

光通信の大容量伝送技術として、空間モード多重伝送が注目されている。空間モード多重伝送による光ファイバー1本で10Pbit/sを超える大容量伝送が実現されたが、基盤技術であるモード合分波技術の空間モード多重度が少なく、10モード程度に留まっており、更なる大容量伝送を実現するには、空間モード多重度の飛躍的な向上が課題となっていた。これまでに合分波技術に関する報告では、空間光学系、PLC導波路型、フォトニックランタン型など、従来のLPモード(Linearly Polarized Mode)の合分波技術に関するものであった。ところが、LPモードは厳密固有モードの擬縮退状態に加えて、モード間隔が不規則であるため[1]、空間モード多重度の飛躍的な向上が困難とされていた。空間モード合分波の多重度を飛躍的に増やすため、研究代表者のグループは、単次元空間モード[2]のフィールド分布特性およびスラブ導波路の等位相面集光特性を利用して、単次元空間モードを一括合分波できる位相制御型合分波集積デバイスを検討していた。シミュレーションの結果により、異なる単次元空間モードの集光位置が異なることを確認し、基本原理として使える目処が付いたが、挿入損失及びクロストークの改善の課題に加え、導波路の曲げ部分のモード間のクロストークの抑制及び集積デバイスとマルチコアファイバーとの直接結合などの課題があって、解明する必要があった。

### 2. 研究の目的

上記の背景のもと、スラブ導波路を用いた単次元空間モード位相制御型合分波集積の基本動作原理の解明、導波路の曲げ部分のモード間クロストークの低減手法の確立、実用化に向けた合分波集積デバイスとマルチコアファイバーとの直接結合技術の確立、以上3点の解明により100モード以上の空間モードを光学的に一括合分波できる集積デバイスの基礎技術の確立を本研究の目的として研究を進める。

### 3. 研究の方法

#### (1) ビーム伝搬法(BPM)シミュレーションによる基本原理の実証

単次元空間モード位相制御型合分波集積デバイスは、強結合導波路部分、位相制御部分、スラブ導波路部分で構成されている(図1)。強結合導波路において単次元空間モードは、各モードの等位相面が異なり、 $v$ 次モードと $v+1$ 次モードの間は $\pi$ の等位相面の位相差がある。図2に示すようにスラブ導波路は、レンズ効果を持つ導波路として、等位相面を持つ光波を集光することができ、異なる等位相面を持つ光波は集光位置が異なる特性を持ち、結果として異なる等位相面を持つ単次元空間モードの一括分波が可能となる。各モードの集光特性は、入射する強結合導波路の本数、導波路の間隔、出力側の導波路の間隔、スラブ導波路の入力側の半径等のパラメータに関連している。強結合導波路からスラブ導波路に入射する光波の波面の制御により、いい集光特性が得られ、合分波器の挿入損失が低減するとともに、モード間のクロストーク特性が改善できる。BPMシミュレーションにより、強結合導波路の本数、導波路の間隔、出力側の導波路の間隔、スラブ導波路の入力側の半径などのパラメータが分波特性に与える影響を解析し、その結果に基づいて、2dB以下の低挿入損失及び-20dB以下のモード間のクロストーク特性を実現できる導波路構造を設計する。

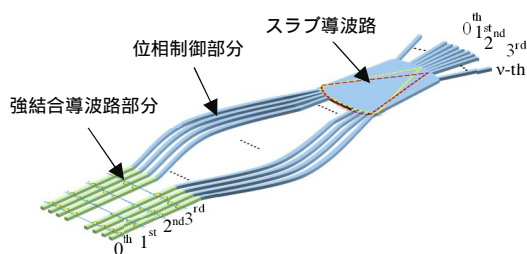


図1 位相制御型合分波集積デバイス構造概略図。

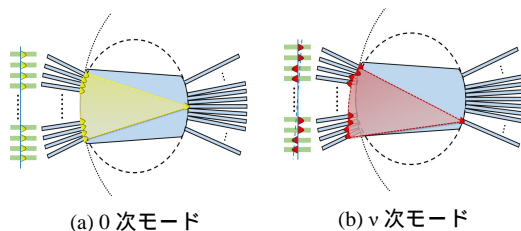


図2 スラブ導波路の集光特性。

#### (2) 導波路の曲げ部分のモード間クロストークの低減手法の検討

導波路の曲げ部分において、特に曲げ半径が小さい場合、高次モードの励起現象によるモード間のクロストークが懸念され、位相制御部分での曲げ導波路のモード間のクロストークの低減が必要である。曲げ半径を大きくすることでモード間のクロストークを防ぐことは可能だが、素子のサイズが大きくなる。そのために、スリット構造による強結合導波路構造を提案し、シミュレーションによりスリット入り強結合導波路構造(図3)を用いることで、曲げ部分のモード間クロストークが抑制できること

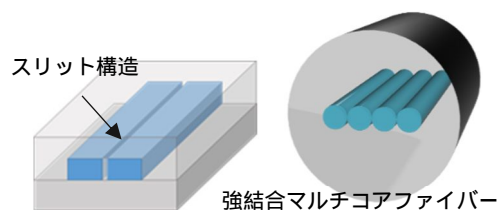


図3 スリット入り強結合導波路及び強結合マルチコアファイバーの概略図。

を確認した。スリット入り強結合導波路構造と同じ効果を持つ、強結合マルチコアファイバーと通常のマルチモードファイバーと異なる曲げ半径においてのモード間のクロストークを比較することで、実験的にスリット構造のクロストークの低減効果を確認する。光を異なる曲げ半径を持つ、強結合マルチコアファイバーと通常のマルチモードファイバーに入射させ、射出したファーストフィールドパターン(FFP)からモード間のクロストークを解析して、曲げ半径とモード間のクロストークの関係を確認する。その結果の比較から、スリット構造を用いることによるモード間クロストークの低減手法を実験的に検証する。

### (3) 実用化に向けた合分波集積デバイスとマルチコアファイバーとの直接結合技術の検討

空間モード多重伝送技術において、100モード以上への拡張を考慮すると、マルチコアファイバーを3次元構造へ展開する必要がある。そのため、合分波集積デバイスとマルチコアファイバーと、高精度に直接結合する技術が必要で、3次元ポリマー導波路による高精度直接結合技術を提案した(図4)。合分波集積デバイスとマルチコアファイバーをより高精度に結合するためには、正確かつ素早く導波路の位置を検知する必要がある。そのために、高精度直接結合技術の基礎検討として、機械学習を用いた導波路層位置検知技術について検討する。

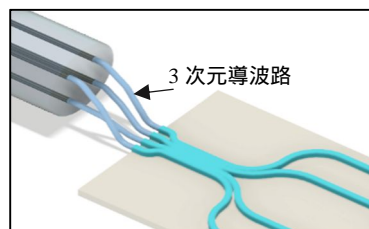


図4 3次元導波路による高精度直接結合技術概略図。

## 4. 研究成果

(1) スラブ導波路を用いた単次元空間モード合分波集積デバイスの基本動作原理の解明: シミュレーションにより、スラブ導波路においての単次元空間モードの集光特性を確認し、モード間に十分な集光位置差を確保すれば-20dB以下のクロストークが実現できることを理論的に確認した。位相制御領域のアレイ導波路間の位相差がゼロの等位相面の0次モード光波がスラブ導波路に入射する時、スラブ導波路の反対側の中心に光が集光することを確認した。アレイ導波路間の位相差が $\pm m\pi/(N-1)$ の等位相面の高次モードの光波は、0次モードの光波と異なる位置に集光することを確認した(図5)。図6で示すように、高次モードと0次モード間の集光位置差 $\Delta d$ は、モード次数に比例し、次数が高いほど大きな集光位置の差が持つことが確認できた。モード間の集光位置差が大きいほどより高いモード間クロストークが得られ、集光位置差が十分に確保できれば、-20dB以下のモード間クロストークが得られることが確認できた[3]。ところが、各パラメータの制御により、モード間のクロストークの改善を試したが、原理的隣り合うモード間の $\pi$ の等位相面の位相差による集光位置差が短いため、-5dB以下のモード間のクロストークを得るのが困難であることが判明された。このクロストークでは、隣り合うモードを分離するのに十分でないため、今後の大きな検討課題となり、改善策の検討が必要である。そこで、一括合分波できる導波路型集積デバイスとして、比較的自由に導波路の構造を設計

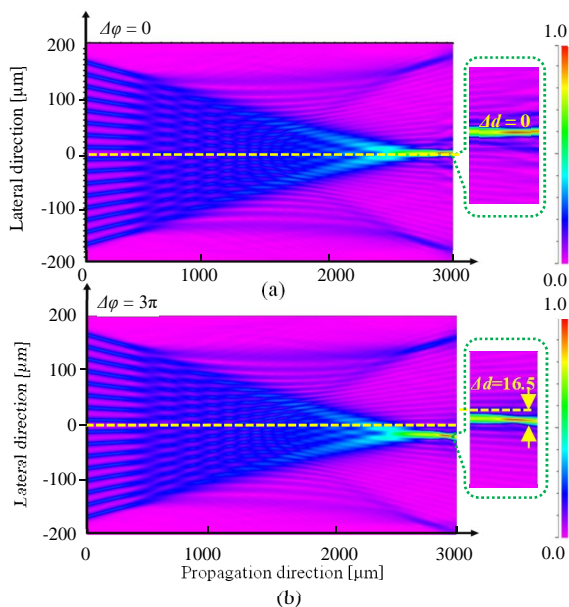


図5 スラブ導波路の集光特性のシミュレーション結果。(a) 0次モード、(b) 3次モード。

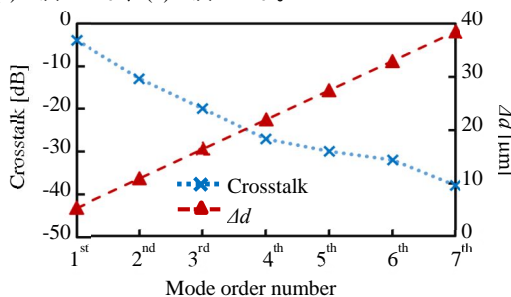


図6 モードの集光位置とクロストークのシミュレーション結果。

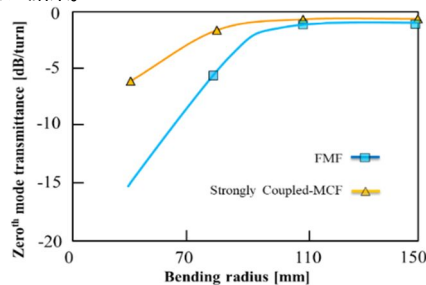


図7 強結合ファイバーと通常のマルチモードファイバーの異なる曲げ半径においてのモードクロストークの評価結果。

できる、ナノピクセル構造を用いた合分波器について検討し、基本的な機械学習の設計手法を確立した。

(2) 導波路の曲げ部分のモード間クロストークの低減手法の検証：強結合マルチコアファイバーとマルチモードファイバーの出力 FFP の解析により曲げ部分のモード間のクロストークを評価した。その結果を図7に示す。強結合方式を用いることで、曲げ半径が7cmより小さい場合、モード間のクロストークが5dB以上改善できることを実験的に確認した[4]。今後の展開として、スリット構造によるシリコン導波路の曲げ部分のモード間のクロストークの低減効果を実験的に検証する必要がある。

(3) 3次元導波路による高精度直接結合技術の検討：高精度直接結合技術の基礎検討として、導波路層位置検知技術を検証した。3次元導波路形成時、機械学習であるYOLO (You Only Look Once) を導入することで、導波路の検出時間110msと、高速導波路描画のために必要な検出時間300msに比べて極めて短時間に検出できることを初めて確認した[5]。

(4) 高次モード導波路のコンプレッサーの提案・実証：高次モードへの拡張に伴い、集積デバイスの巨大化が懸念され、小型化及び高集積化を実現するため、機械学習手法によりナノピクセル構造を用いた単次元空間モード合分波器及び高次モード導波路コンプレッサー(図8)を設計した。シミュレーション結果により、ナノピクセル構造を用いることで、0次モードは70%、1次モードは50%以上の幅が縮小できることが確認され[6]、今後の高次モードデバイスの設計に寄与することが期待できる。

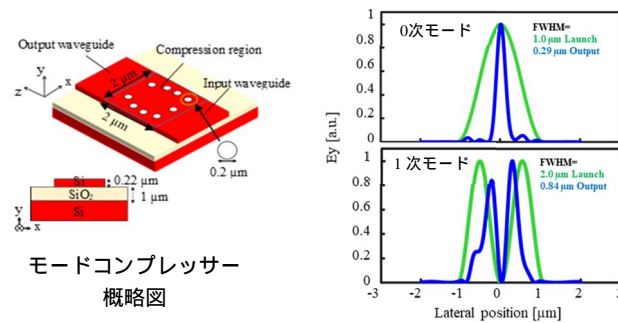


図8 モードコンプレッサーの概略図とシミュレーション結果。

#### 参考文献

- [1] 岡本勝就著, “光導波路の基礎”, 1992.
- [2] 浜本 貴一, 姜 海松, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J100-C, 2017.
- [3] H. Jiang, et. al., IEICE Trans. Electron., Vol.E104-C, pp. 164-167, 2021.
- [4] M. Nasef, et. al., Tech. Dig. OECC, ThG3-4, 11<sup>th</sup> Jul. 2019.
- [5] S. Matsubara, et. al, Tech. Dig. MOC, PD-2, 29<sup>th</sup> Sep. 2021.
- [6] Y. Wang, et. al., Tech. Dig. MOC, PO-61, 28<sup>th</sup> Sep. 2021.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Jiang Haisong, Nasef Mahmoud, Hamamoto Kiichi	4. 巻 E104.C
2. 論文標題 Spatial Single Dimensional Mode Based De-Multiplexer Using Slab Waveguide	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Electronics	6. 最初と最後の頁 164 ~ 167
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transele.2020ECS6017	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Ogawa Satoshi, Idris Ahmad Syahrin, Han Yu, Jiang Haisong, Hamamoto Kiichi	4. 巻 58
2. 論文標題 Surface improvement investigation of sol-gel SiO <sub>2</sub> cladding for waveguide device passivation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SJJB04 ~ SJJB04
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab27b2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Shun Matsubara, Tomoya Zennouji, Haisong Jiang and Kiichi HAMAMOTO	4. 巻 -
2. 論文標題 Rapid automatic waveguide recognition using YOLO and OpenCV for 3D waveguide fabrication	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Yunjie Wang, Haisong Jiang and Kiichi HAMAMOTO	4. 巻 -
2. 論文標題 Space-mode compressor by using nano-pixel	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計19件(うち招待講演 1件/うち国際学会 10件)

1. 発表者名 Yunjie Wang, Haisong Jiang, Kiichi Hamamoto
2. 発表標題 Proposal of space-mode “compressor” by using nano-pixel
3. 学会等名 26th Microoptics Conference (MOC 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shun Matsubara, Tomoya Zennouji, Haisong Jiang, Kiichi Hamamoto
2. 発表標題 Rapid automatic waveguide recognition using YOLO for 3D waveguide drawing
3. 学会等名 26th Microoptics Conference (MOC 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yunjie Wang, Haisong Jiang, Kiichi Hamamoto
2. 発表標題 Proposal of space-mode compressor toward compact MDM devices
3. 学会等名 6th International Symposium on Extremely Advanced Transmission Technologies, EXAT2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shun Matsubara, Tomoya Zennouji, Haisong Jiang, Kiichi Hamamoto
2. 発表標題 Real-time rapid waveguide recognition using YOLO for 3D waveguide fabrication
3. 学会等名 6th International Symposium on Extremely Advanced Transmission Technologies, EXAT2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松原 瞬 善能寺友也 姜 海松 浜本 貴一
2. 発表標題 MCF / 光スイッチ直接結合のための基礎検討(2) -導波路自動検出の検討-
3. 学会等名 電子情報通信学会2021年ソサイエティ大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yunjie Wang, Keiichiro Shoda, He Xiao, Haisong Jiang, Kiichi Hamamoto, Keiichiro Kozu
2. 発表標題 Fundamental study of nano-pixel waveguide design using machine learning ( )
3. 学会等名 電子情報通信学会2021年ソサイエティ大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 姜 海松 浜本 貴一
2. 発表標題 フレキシブルモード多重ネットワーク実現を目指した 空間単一次元光モードスイッチ
3. 学会等名 EXAT2021年8月研究会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yunjie Wang, Haisong Jiang, Kiichi Hamamoto
2. 発表標題 Proposal of space-mode compressor toward compact MDM devices
3. 学会等名 電子情報通信学会2022年総合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松原 瞬 善能寺友也 姜 海松 浜本 貴一
2. 発表標題 複数3D導波路形成に向けたYOLOによる導波路検出
3. 学会等名 電子情報通信学会2022年総合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Jin Zhang, Haisong Jiang, Kiichi Hamamoto
2. 発表標題 Feasibility study of 1×4 optical mode switch based on single dimensional mode-set
3. 学会等名 2020 Opto-Electronics and Communications Conference (OECC) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Haisong Jiang, Mahmoud Nasef, Kantaro Fujimoto, and Kiichi Hamamoto
2. 発表標題 Spatial Single Dimensional Mode De-multiplexer Based on Rowland Circle Waveguide
3. 学会等名 24th OptoElectronics and Communications Conference (OECC 2019) and 2019 International Conference on Photonics in Switching and Computing (PSC 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mahmoud Nasef, Kantaro Fujimoto, Haisong Jiang, Kiichi Hamamoto
2. 発表標題 Propagation Mode Retention Using Strongly Coupled Multi-Core Fiber
3. 学会等名 24th OptoElectronics and Communications Conference (OECC 2019) and 2019 International Conference on Photonics in Switching and Computing (PSC 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 Satoshi Ogawa, Haisong Jiang, and Kiichi Hamamoto
2. 発表標題 Proposal of 1×N Optical Mode Switch Based on Spatial Single Dimensional Mode
3. 学会等名 24th OptoElectronics and Communications Conference (OECC 2019) and 2019 International Conference on Photonics in Switching and Computing (PSC 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Haisong Jiang, Mahmoud Nasef, Fujimoto Kantaro, and Kiichi Hamamoto
2. 発表標題 Spatial Single Dimensional Mode De-multiplexer Based on Rowland Circle Waveguide
3. 学会等名 2019 The International Symposium on Extremely Advanced Transmission Technology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mahmoud Nasef, Fujimoto Kantaro, Haisong Jiang, and Kiichi Hamamoto
2. 発表標題 Propagation Mode Retention Using Strongly Coupled Multi-Core Fiber
3. 学会等名 2019 The International Symposium on Extremely Advanced Transmission Technology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 姜海松, Mahmoud Nasef, 藤本勘太郎, 浜本貴一
2. 発表標題 スラブ導波路を用いた位相制御型単一次元空間モード合分波器
3. 学会等名 2019 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mahmoud Nasef, Kantaro Fujimoto, Haisong Jiang, and Kiichi Hamamoto
2. 発表標題 Propagation Mode Retention at Fiber Bending Region Using Strongly Coupled Multi-Core Fiber
3. 学会等名 2019 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mahmoud Mohamed Nasef, Kantaro Fijumoto, Haisong Jiang and Kiichi Hamamoto
2. 発表標題 Propagation Mode Retention at Fiber Bending Region Using Strongly Coupled Multi-Core Fiber
3. 学会等名 2019 第72回電気・情報関係学会九州支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Satoshi Ogawa, Haisong Jiang, and Kiichi Hamamoto
2. 発表標題 Proposal of 1×N Optical Mode Switch Based on Spatial Single Dimensional Mode
3. 学会等名 2019 第72回電気・情報関係学会九州支部連合大会
4. 発表年 2019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
研究 分担 者	浜本 貴一  (Hamamoto Kiichi)  (70404027)	九州大学・総合理工学研究院・教授   (17102)	

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
---------	---------