

令和 5 年 5 月 25 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18H03769

研究課題名（和文）半導体光フェーズドアレイを用いた高速イメージング

研究課題名（英文）High-speed imaging using semiconductor optical phased array

研究代表者

種村 拓夫（Tanemura, Takuo）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・准教授

研究者番号：90447425

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 33,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、半導体チップに集積した大規模光フェーズドアレイを用いたイメージング手法を構築することを目的とした。まず、シリコンチップ上に128本の熱光学型位相制御器を集積した光フェーズドアレイ素子を設計・試作し、ゴーストイメージングの実証に成功した。また、多モードファイバに接続することで、高解像2次元イメージング機能を実証した。さらに、冗長性を排除したフェーズドアレイ素子を提案・作製し、19,000点以上の解像点数を達成した。一方、高速化に向けて、インジウムリン中のキャリア効果を利用した素子を設計・試作し、ナノ秒オーダーの応答速度を実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、まず、ゴーストイメージング手法を光集積フェーズドアレイ素子に初めて導入することで、従来課題であった精密な光位相制御を不要とし、素子の作製誤差や環境変化に依存しない計測手法を新しく実証した。さらに、解像可能点数が光位相シフト数の二乗でスケールする非冗長アレイ構成を新たに見出し、波長掃引を用いない光フェーズドアレイ素子の実証例としては過去最大となる空間分解点数を達成した点も、学術的意義が大きい。光集積フェーズドアレイを用いた小型かつ実用的なイメージング素子の実現可能性を実証したことにより、LIDAR（ライダー）や医療/生体イメージングなど、広範な産業分野への応用が期待される。

研究成果の概要（英文）：We aimed to develop an imaging method using a large-scale optical phased array integrated on a semiconductor chip. First, an optical phased array with 128 thermo-optic phase controllers integrated on a silicon chip was designed and fabricated, and ghost imaging was successfully demonstrated. In addition, by connecting it to a multimode fiber, a high-resolution two-dimensional imaging function was demonstrated. Furthermore, we proposed and fabricated a non-redundant optical phased array and achieved more than 19,000 resolvable points. For high-speed applications, we designed and fabricated carrier-injection-based device on InP and demonstrated nanosecond-order response time.

研究分野：集積フォトニクス

キーワード：光集積デバイス イメージング 光フェーズドアレイ

1. 研究開始当初の背景

光フェーズドアレイは、アレイ状に並べた多数のアンテナの位相を正確に調節することでビームの入射方向を選択する技術であり、既存の機械式ミラーを用いた光ビーム偏向素子を置き換える技術として、様々な分野において急速に注目を集めている。特に、3次元画像情報を取得するLIDAR(ライダ)素子の小型化、高速化、低コスト化を同時に実現する技術として有力視されている。

一方、従来の光フェーズドアレイの実用化を妨げる最大の課題として、光の位相制御の難しさがある。良質なビーム形状を保ったまま出射方向を走査するには、全ての光位相制御器を同期して精密に合わせ込む必要があるが、光の位相は、光導波路の僅かな作製誤差や使用環境の変化に対して敏感に変動する。そのため、これらの誤差を補償し、最適な駆動条件を抽出する調整作業(カリブレーション)が不可欠となる。実用上十分な空間分解点数を得るには、数100~数1000の位相制御器が必要であるが、各分解点についてこれら全ての条件を抽出するために数時間以上の膨大な時間と手間がかかる。さらに、導波路内の光の位相は温度によってもドリフトするため、使用中も環境変化を常時モニタしながら全ての制御器の駆動条件を更新する必要がある。例えばLIDARなどの民生品に向けた応用では、低コスト化が必須であり、到底実用に耐えられるものではない。

2. 研究の目的

本研究では、半導体チップにコンパクトに集積した大規模光フェーズドアレイに、ゴーストイメージング手法を導入することで、実用的なイメージング素子を実証することを目的とした。具体的には、光フェーズドアレイから出力されるランダムパターン(スペックル)を照射光として用いてイメージングを行うことで、光位相の精密制御を不要にし、簡易かつロバストな画像取得を可能にする。さらに、アレイ規模を大きくしたときのスケラビリティを明らかにするとともに、少ない光位相制御器を用いて高分解能化を達成するための手法を構築することを目指した。

3. 研究の方法

まず、提案手法の原理検証のため、シリコンチップ上に128個の熱光型位相制御器を搭載した光フェーズドアレイ素子を設計し、ファウンドリを用いて試作した。作製した素子を用いて、1次元ゴーストイメージング実験を行い、位相制御器をランダムに駆動することで画像が取得できることを確認した。続いて、回折格子を用いて波長掃引を行うことで、2次元イメージングにも展開可能であることを検証した。さらに、光フェーズドアレイ素子に3次元ガラス導波路と多モードファイバを接続することで、多モードファイバの出力端からスペックルパターンを出射させ、2次元イメージングの実験を試みた。

一方、高解像度化に向けて、冗長性を排除したアレイ配置を検討した。詳細な理論解析に基づき、非冗長光フェーズドアレイを新たに発案し、数値シミュレーションにより有効性を検証した。その上で、127個の位相制御器と回折格子型カプラを集積した非冗長光フェーズドアレイ素子を設計し、ファウンドリを用いて試作した。光学系を新たに構築し、近視野像と遠視野像を観察することで、素子の特性を評価した。また、位相制御器数と分解点数の関係について、理論解析結果と実験結果を比較することで、スケラビリティを明らかにした。

以上に加えて、高速化に向けてインジウムリン基板上にキャリア注入型光位相制御器を100個搭載した光フェーズドアレイ素子を設計した。素子の作製には、これまでに研究代表者が開発したInP光集積回路プロセス技術を適用した。有機金属気相エピタキシャル結晶成長法を用いて製膜を行い、誘導結合プラズマ反応性イオンエッチングを用いて導波路構造を作製した。作製した素子を用いて応答速度を検証した。

4. 研究成果

図1に、128個の位相制御器を集積したシリコンフォトニクス光フェーズドアレイ素子の顕微鏡写真とゴーストイメージング結果の一例を示す。この実験では、回折格子を用い、波長掃引を行うことで、2次元画像の取得を可能にした。照射数 K の増加とともに良好な画像が取得できることを実証した。

図2に、多モードファイバを接続した際の構成(a)と、実験的に得ら

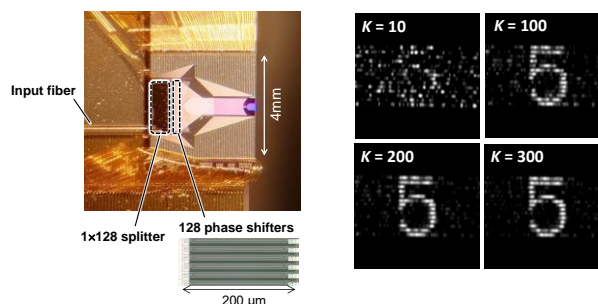


図1 128個の位相制御器を集積したシリコンフォトニクス光フェーズドアレイの写真と実験結果。

れた近視野像 (b), 及び, 再構成されたイメージの例 (c) を示す. 位相制御器の駆動信号を切り替えることで, 異なるスペックル状の照射光パターンが発生出来ることを確認した. 照射数 K が 600 の場合に, 鮮明な画像が取得できることを実証した. 僅か 128 個の位相制御器で, 波長掃引も必要なく, 1000 点以上の二次元画像を取得することに成功しており, 多モードファイバ中を伝搬させることによって空間分解能が向上することが示唆された.

図 3 に, 本研究において提案した非冗長アレイの構造と実験結果を示す. 作製した集積素子を図 3 (b) に示す. 素子に入射された光は, まず多段 1×2 スプリッタにより 128 本の導波路に分配され (1 ポートはモニタ用に用いた), 127 個の位相制御器により各導波路における位相を調整された後, 微小回折格子カプラ型光アンテナにより上方に出射される. 図 3 (c) に, 本素子を用いてビームを 2 次元面内の両軸方向に掃引したときの測定結果を示す. この結果より得られたビームの半値全幅と, 最小アンテナ間隔から決まる掃引可能範囲との比から, 解像点数は約 19, 100 点と算出された. この値は, 現在までに報告された, 波長掃引を用いない光フェーズドアレイ素子の解像点数としては最大の解像点数に相当する.

従来の等間隔の光フェーズドアレイ素子では, 分解点数が位相変調器数 N に高々比例するのに対し, 非冗長アレイ配置を用いることで, 図 3 に示すように, N^2 のオーダーで分解点数が増大することが示された. 逆に言えば, 実用上求められる分解点数が M のとき, 必要な位相制御器数は $(M)^{1/2}$ 程度で十分であることを意味する. これは, 従来問題であった光位相の較正や最適化作業を大幅に緩和する上で極めて有益な帰結である. 以上より, 高分解かつ高速なイメージングに向けて, 有力な手法になると期待される.

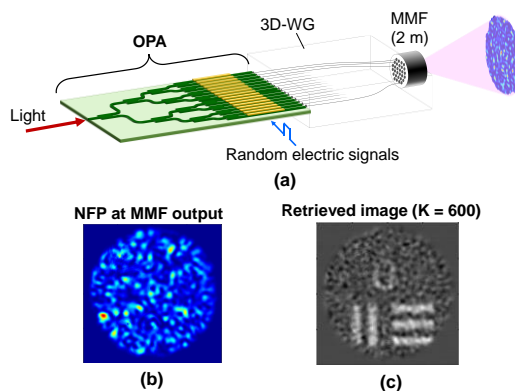


図 2 光フェーズドアレイと多モード光ファイバを用いたイメージング手法と実験結果.

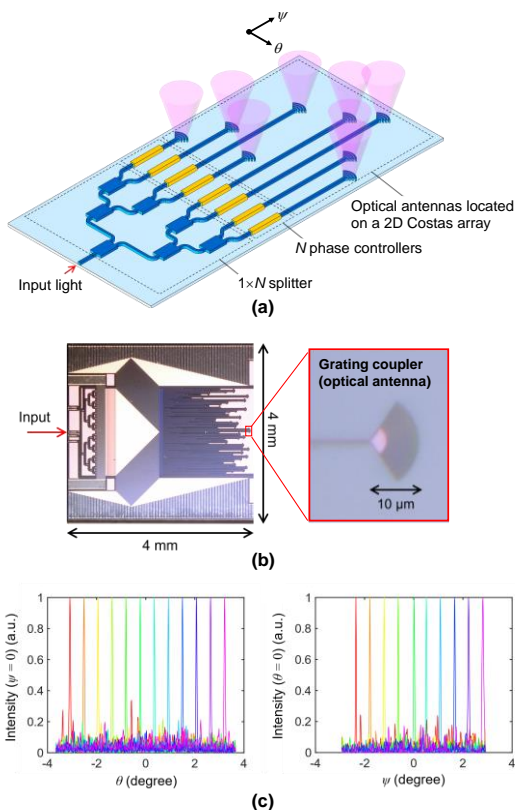


図 3 非冗長光フェーズドアレイの構成(a), 作製した素子(b), ビーム偏向実験結果(c).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 8件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 T. Fukui, K. Komatsu, Y. Nakano, and T. Tanemura	4. 巻 39
2. 論文標題 Comparative analysis of speckle-based single-pixel imaging using uniform and non-redundant optical phased arrays	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Optical Society of America A	6. 最初と最後の頁 2325-2325
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/JOSAA.476683	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 種村拓夫, 福井太郎, 小松憲人, 中野義昭	4. 巻 50
2. 論文標題 半導体光フェーズドアレイ素子を用いた高分解イメージング	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 レーザー研究	6. 最初と最後の頁 463-467
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 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 T. Fukui, R. Tanomura, K. Komatsu, D. Yamashita, S. Takahashi, Y. Nakano, T. Tanemura	4. 巻 8
2. 論文標題 Non-redundant optical phased array	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optica	6. 最初と最後の頁 1350-1358
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OPTICA.437453	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 S. Emara, T. Fukui, K. Komatsu, Y. Kohno, R. Tang, T. Tanemura, Y. Nakano	4. 巻 13
2. 論文標題 Single-Pixel Imaging Using Carrier-Depletion Optical Phased Array With Reduced Phase Shift Requirement	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Photonics Journal	6. 最初と最後の頁 6600105
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/JPHOT.2021.3113925	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 K. Komatsu, Y. Kohno, Y. Nakano, T. Tanemura	4. 巻 33
2. 論文標題 Large-Scale Monolithic InP-Based Optical Phased Array	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Photonics Technology Letters	6. 最初と最後の頁 1123-1126
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LPT.2021.3107277	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 S. Emara, T. Fukui, K. Komatsu, Y. Kohno, T. Tanemura, Y. Nakano	4. 巻 60
2. 論文標題 Optimization based on the condition number of the speckle patterns in single-pixel imaging using optical phased arrays	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 72006
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac0cb9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Fukui Taichiro, Kohno Yusuke, Tang Rui, Nakano Yoshiaki, Tanemura Takuo	4. 巻 39
2. 論文標題 Single-Pixel Imaging Using Multimode Fiber and Silicon Photonic Phased Array	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Lightwave Technology	6. 最初と最後の頁 839 ~ 844
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/JLT.2020.3008968	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Fukui Taichiro, Nakano Yoshiaki, Tanemura Takuo	4. 巻 38
2. 論文標題 Resolution limit of single-pixel speckle imaging using multimode fiber and optical phased array	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Optical Society of America B	6. 最初と最後の頁 379 ~ 379
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/JOSAB.408985	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kohno Yusuke, Komatsu Kento, Tang Rui, Ozeki Yasuyuki, Nakano Yoshiaki, Tanemura Takuo	4. 巻 27
2. 論文標題 Ghost imaging using a large-scale silicon photonic phased array chip	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 3817 ~ 3817
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.27.003817	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 福井太郎, 田之村亮汰, 小松憲人, 山下大之, 高橋俊, 中野義昭, 種村拓夫	4. 巻 9
2. 論文標題 超高分解能ビーム偏向のための非冗長光フェーズドアレイ	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 応用物理学会フォトニクス分科会フォトニクスニュース	6. 最初と最後の頁 1
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 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計31件 (うち招待講演 9件 / うち国際学会 13件)

1. 発表者名 T. Tanemura
2. 発表標題 Optical phased array and metasurface devices for imaging and communication
3. 学会等名 Optics & Photonics International Congress 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Fukui, K. Komatsu, Y. Nakano, T. Tanemura
2. 発表標題 Scalability of non-redundant optical phased array for speckle-based single-pixel imaging
3. 学会等名 27th OptoElectronics and Communications Conference / International Conference on Photonics in Switching and Computing 2022 (OECC/PSC '22) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Takahashi, T. Fukui, R. Tanomura, Y. Taguchi, Y. Ozeki, Y. Nakano, and T. Tanemura
2. 発表標題 Characterization of silicon optical phased array with on-chip phase monitors
3. 学会等名 27th OptoElectronics and Communications Conference / International Conference on Photonics in Switching and Computing 2022 (OECC/PSC ' 22) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Fukui, R. Tanomura, K. Komatsu, D. Yamashita, S. Takahashi, Y. Nakano, and T. Tanemura
2. 発表標題 Ultra-high-resolution beam steering using non-redundant optical phased array
3. 学会等名 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO ' 22) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 種村拓夫, 小松憲人, 福井太郎, 中野義昭
2. 発表標題 高解像イメージングに向けた光集積フェーズドアレイ
3. 学会等名 フォトニクス技術フォーラム (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 種村拓夫, 小松憲人, 福井太郎, 中野義昭
2. 発表標題 高分解能イメージングに向けたシリコン集積光フェーズドアレイ
3. 学会等名 第163回微小光学研究会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 種村拓夫
2. 発表標題 集積フォトニクスに基づく光波合成・検出素子の新展開
3. 学会等名 2022年国際光デー記念シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 福井太郎, 田之村亮汰, 小松憲人, 山下大之, 高橋俊, 中野義昭, 種村拓夫
2. 発表標題 非冗長光フェーズドアレイを用いた高分解能ビーム掃引
3. 学会等名 第70回応用物理学会春期学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 K. Komatsu, Y. Kohno, Y. Nakano, T. Tanemura
2. 発表標題 Monolithic InP 100-port optical phased array
3. 学会等名 Frontiers in Optics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Emara, T. Fukui, K. Komatsu, Y. Kohno, T. Tanemura, Y. Nakano
2. 発表標題 Effect of limited phase shift on single-pixel imaging using carrier-depletion silicon photonic phased array
3. 学会等名 2021 OSA Imaging and Applied Optics Congress (IAOC) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 福井太郎, 田之村亮汰, 小松憲人, 山下大之, 高橋俊, 中野義昭, 種村拓夫
2. 発表標題 非冗長光フェーズドアレイによる高分解能光掃引
3. 学会等名 第69回応用物理学会春期学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小松憲人, 河野佑亮, 中野義昭, 種村拓夫
2. 発表標題 InP大規模光フェーズドアレイの実証
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

1. 発表者名 L. Qinpei, K. Komatsu, T. Fukui, T. Tanemura, Y. Nakano
2. 発表標題 Optical Phased Array with Pulse-Driven SOAs for Time-of-Flight LiDAR System
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

1. 発表者名 高橋俊, 福井太郎, 田之村亮汰, 田口富隆, 小関泰之, 中野義昭, 種村拓夫
2. 発表標題 位相モニタ集積光フェーズドアレイ素子の検証
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋期学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 福井太郎, 田之村亮汰, 小松憲人, 山下大之, 高橋俊, 中野義昭, 種村拓夫
2. 発表標題 非冗長光フェーズドアレイによる超高分解能光偏向: 提案と実証
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋期学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Fukui, Y. Nakano, and T. Tanemura
2. 発表標題 Resolution enhancement of optical-phased-array-based single-pixel imaging by using a multimode fiber
3. 学会等名 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Fukui, Y. Kohno, R. Tang, Y. Nakano, and T. Tanemura
2. 発表標題 Single-pixel imaging through multimode fiber using silicon optical phased array chip
3. 学会等名 Optical Fiber Communication Conference (OFC) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Tanemura, T. Fukui, K. Komatsu, Y. Kohno, and Y. Nakano
2. 発表標題 Single-pixel imaging using optical phased array chip
3. 学会等名 Asia Communications and Photonics Conference (ACP) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 種村拓夫, 福井太郎, 河野佑亮, 小松憲人, 中野義昭
2. 発表標題 光集積フェーズドアレイによる単一ピクセルイメージング
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Tanemura, T. Fukui, and Y. Nakano
2. 発表標題 Single-pixel speckle imaging using integrated optical phased array
3. 学会等名 IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting Series (SUM) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 福井太郎, 中野義昭, 種村拓夫
2. 発表標題 多モードファイバと光フェーズドアレイを用いた単一ピクセルイメージングの分解能限界
3. 学会等名 第68回応用物理学会春期術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 梅崎敏和, 小松憲人, 福井太郎, 中野義昭, 種村拓夫
2. 発表標題 単一ピクセルイメージングに適した高効率駆動型光集積フェーズドアレイ素子の解析
3. 学会等名 第68回応用物理学会春期術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Fukui, Y. Nakano, and T. Tanemura
2. 発表標題 On ghost imaging using multimode fiber and integrated optical phased array
3. 学会等名 24th OptoElectronics and Communications Conference / International Conference on Photonics in Switching and Computing 2019 (OECC/PSC) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Tanemura, Y. Kohno, T. Fukui, and Y. Nakano
2. 発表標題 Single-pixel imaging using integrated optical phased arrays
3. 学会等名 Photonic Device Workshop (PDW) (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Fukui, Y. Kohno, R. Tang, Y. Nakano, and T. Tanemura
2. 発表標題 Single-pixel imaging through multimode fiber using silicon optical phased array chip
3. 学会等名 Optical Fiber Communication Conference (OFC) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 梅崎敏和, 福井太郎, 田之村亮太, 山下大之, 河野佑亮, 中野義昭, 種村拓夫
2. 発表標題 深層学習による光集積フェーズドアレイ素子の駆動条件最適化手法の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Emara, T. Fukui, Y. Nakano, and T. Tanemura
2. 発表標題 Effect of limited phase shift on single-pixel imaging using optical phased array
3. 学会等名 電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福井太郎, 河野佑亮, 唐睿, 中野義昭, 種村拓夫
2. 発表標題 多モードファイバと光フェーズドアレイを用いた単一ピクセルイメージングの実証
3. 学会等名 応用物理学会秋期術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Kohno, K. Komatsu, Y. Ozeki, Y. Nakano, and T. Tanemura
2. 発表標題 Large-scale silicon photonic phased array chip for single-pixel ghost imaging
3. 学会等名 Optical Fiber Communication Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福井太郎, 中野義昭, 種村拓夫
2. 発表標題 光フェーズドアレイと多モードファイバによる高速イメージングの検討
3. 学会等名 電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 河野佑亮, 小松憲人, 小関泰之, 中野義昭, 種村拓夫
2. 発表標題 光フェーズドアレイによるランダム照明パターンを用いた2次元イメージング
3. 学会等名 電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 光照射装置、イメージング装置、及びレーザー加工装置	発明者 種村拓夫, 福井太一郎, 中野義昭, 山下大之, 田之村亮汰	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2019-000901	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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