

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：12201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04917

研究課題名（和文）ピクセル間クロストークを利用した位相検出法における信号符号化方式の研究

研究課題名（英文）A study of signal coding methods for single-shot phase detection using inter-pixel crosstalk

研究代表者

藤村 隆史（Fujimura, Ryushi）

宇都宮大学・工学部・准教授

研究者番号：50361647

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、ホログラフィックメモリの記録密度を向上させるため、われわれが提案してきたクロストークを利用したシングルショット位相検出法における新しい位相検出アルゴリズムと信号符号化手法について検討を行った。本研究では、新たに偏光と位相を同時に変調した信号符号を提案したほか、従来考慮できなかった遠く離れたピクセルからの影響をピクセル拡がり関数を利用して組み込む新しい位相決定法を提案し、この手法を用いることで従来の2値強度信号の約2倍の記録密度が見込めることを数値的に示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、クロストークを利用した位相検出法における新しいアルゴリズムを提案し、記録密度と検出精度を向上させた。また、偏光・位相変調信号という新しい信号方式を提案し、ホログラフィックメモリシステムの理論的基盤を強化した。

本研究のような高密度かつ高転送レートの光メモリ技術の発展は、データセンターでのコールドストレージデバイスとしての利用が期待され、データ保存寿命の延長と消費電力の低減を実現し、情報社会のさらなる進展に貢献すると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we investigated new phase detection algorithms and signal encoding methods in our proposed single-shot phase detection method that utilizes crosstalk to improve the recording density of holographic memory systems. We propose a new signal-encoding method that simultaneously modulates the polarization and phase. In addition, we introduced a new phase determination method that incorporates the effects of distant pixels, previously unconsidered, using the pixel spread function. Our numerical analysis demonstrated that our proposed method can achieve approximately double the recording density compared to conventional binary intensity signals.

研究分野：応用光学

キーワード：ホログラフィックメモリ クロストーク 位相検出 偏光位相多値信号

## 様式 C-19、F-19-1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

ホログラフィックメモリーは、ホログラフィーの原理を利用して記録と再生を行う光メモリーである。近年では、回折光の有無という従来の強度 2 値信号の代替として、回折光の位相を情報とする位相多値符号を用いることで、コードレートを増加させ、高転送レート化と高密度記録化を狙った研究が盛んに行われている。しかしながら、この場合、撮像素子は光の強度情報しか取得できないため、位相信号の検出には、4 ステップ位相シフト法などの干渉計測が必要となる。一般に干渉計測には撮像素子面で回折光と干渉させるための追加の光波（位相検出参照波）が必要となり、光学系が大型化し、信号の再生品質が振動に大きく影響してしまうといった課題があった。

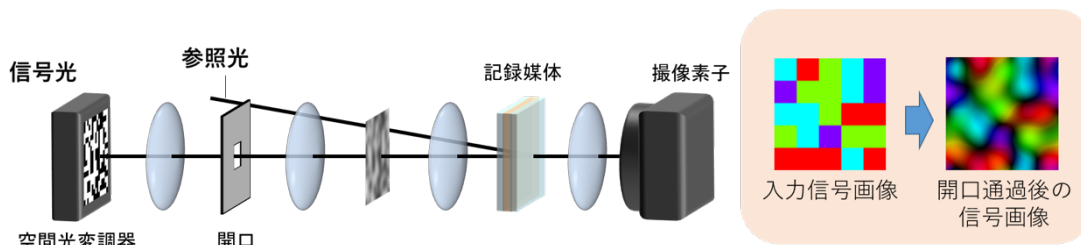


図1. ホログラフィックメモリーにおける記録光学系

これに対しわれわれは、シングルショットでかつ位相検出参照波を用いることなく安定して回折光の位相を決定できる新しい位相検出法を提案している。通常、ホログラフィックメモリーでは、図1のように記録媒体の露光面積（ホログラム面積）を制限するために、入力信号のフーリエ面に開口を挿入する。この開口によって信号画像は空間周波数成分のうち高周波成分が失われ、隣接画素への光波の染み出し（ピクセル間クロストーク）が生じる。通常はこのクロストークは、像品質の劣化を引き起こすため避けるべきものであるが、本手法ではこれを逆に位相検出に利用する。図2のように信号画像内に既知位相ピクセルを埋め込み、隣接した信号ピクセルとの間でこのクロストークを利用して光波を干渉させ、変調されたピクセル境界付近の強度情報から信号位相を決定する。これまでわれわれは、4 値の位相多値信号に対し、シミュレーションと実験の両方で十分に低い信号検出誤り率（エラーレート）が実現できることを実証し、本手法の有効性を示してきた。しかし一方で、高密度記録をねらい、開口を小さくしていくと、クロストークが必要以上に大きくなり、隣接する既知位相ピクセル以外の離れたピクセルからやってくる光波の染み出しによって境界強度が影響をうけ、エラーレートが増加するといった問題があることがあきらかになってきた。

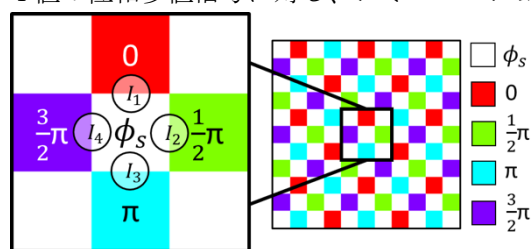


図2. 既知位相を配置した信号画像

### 2. 研究の目的

本研究では、ピクセル間クロストークを利用した本手法特有のノイズの解析を行い、エラー特性を理解し、本手法に即した独自の位相符号化法とその検出アルゴリズムを見出すことを目的とする。また隣接画素の境界強度の情報に加えて、周囲の光強度の情報を考慮した位相決定アルゴリズムの開発を行う。最終的には本研究の実施により、従来の強度 2 値符号と比較して、3 倍以上の高密度化と高転送レート化を目指す。

### 3. 研究の方法

(1) エラーピクセルの解析による新しい位相決定アルゴリズムの開発と信号符号の選択  
 どのような信号符号が近接しているときに、エラーが生じやすいかという本手法特有のエラー特性を調査し、その知見をもとに、あたらしい位相決定アルゴリズムの開発、および新しい信号符号のセットを構築する。信号符号の構築では、複数の信号ピクセルを組み合わせることで1つのデータシンボルとし、エラーの出やすい信号符号を隣接しないように配置した新しい信号符号を構築する。このようなエラーの出にくい信号符号の探索を行い、記録密度の改善をはかる。

#### (2) 複合位相多値信号への拡張

記録密度と転送レートは、1ピクセルがもつ平均ビット数であるコードレートを改善することで向上させることができる。従来、位相のみの多値信号を扱っていたところを、振幅情報や偏光情報にも信号を組み込んだ複合位相多値信号へ信号符号の範囲を拡張し、高密度化を目指す。

#### (3) 周囲の信号位相を考慮した位相決定アルゴリズムの検討

離れたピクセルからの寄与を考慮するために、ピクセル拡がり関数を利用した新しい位相決定アルゴリズムを開発する。本手法は、位相分布から推定された境界光強度と実際の測定された

境界光強度を比較し、その差異が最小になるようにイタレーションを用いてその誤差を最小化していくという方法である。このイタレーションを用いた位相決定法の特性を調査し有効性を評価する。

本研究では、位相決定アルゴリズムおよび信号符号化方法の評価指標として、総信号ピクセル数に対する誤検出された信号ピクセル数の割合として定義される信号検出誤り率 (Pixel Error Rate, PxER) を用いた。PxER は、システムの記録密度限界を評価するための重要なパラメータになりうる。これは一般的にシステムが補正できる限界エラーレートよりも小さなエラーレートが得られれば、その余剰分を、ホログラム面積の縮小化、多値数の増加に割り当てて、記録密度を増加させることができるためである。また記録密度の評価指標として、下記のように定義される記録密度ファクターを導入した。

$$\xi_{1page} = \frac{C}{R_{Nyq}^2}$$

ここで  $C$  はコードレートで、1ピクセルがもつ平均情報量を表している。 $R_{Nyq}$  は、ナイキスト開口比で、開口サイズをナイキストサイズで規格化した値として定義されているものである。記録密度は媒体露光面積 (ホログラム面積) に反比例するので、コードレートをナイキスト開口比の2乗で割った値を評価指標としている。

#### 4. 研究成果

##### (1) エラーピクセルの解析による新しい信号符号の構築

本手法は基本的に既知位相ピクセルとの干渉強度を利用して位相を決定するが、意図せず隣の信号ピクセルが影響し、検出エラーを引き起こす場合がある。そこでここでは複数の信号ピクセルを組み合わせて1つのデータシンボルとし、エラーの出やすい信号符号を隣接しないように配置した新しい信号符号を構築することを試みる。たとえば4値の振幅位相多値信号において2つの信号ピクセルを組み合わせて1つのデータシンボルを構築したとする。このとき、このデータシンボルが表現できる場合の数は、 $4 \times 4 = 16$ 通りあるが、このすべてを信号符号として使用せず、16通りの中からエラーが生じやすい信号符号のペアを除いて、新しいデータシンボルの信号符号を定義する。この場合、そのデータシンボルが表現できる場合の数は減少するので、情報は減少するが、エラーが低下したことにより開口サイズなどの別のパラメータを調整することで記録密度を改善できる可能性がある。

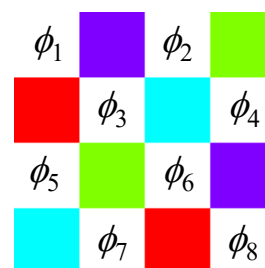


図3. 8つの信号ピクセルを含むデータシンボル

今回は、図3にあるように、8つの信号ピクセルを含んだピクセルのセットをひとつのデータシンボルとして信号符号を構築した。まずこのデータシンボルにおいてエラーの出やすい信号の組み合わせを評価するために、このデータシンボルの周囲に2ピクセル分のピクセルを追加した  $8 \times 8$  pix の画像をエラー解析用の画像とし、各データシンボル毎に、周囲の信号ピクセルの位相をランダムに変えてシンボル内のエラーの個数の評価を行った。100回の試行で得られたエラーの個数の平均値と標準偏差を算出した。

得られたデータに対し、平均値+標準偏差を評価指標としてエラーの小さい順に並べなおした。もともとの信号符号数は多値数4の8乗通りあるため、合計65536個ある。この中から、エラーの少ない上位  $N$  個の信号符号を組み合わせて新しい信号符号を構築した。得られた PxER と記録密度ファクターのグラフを図4、図5にそれぞれ示す。図4よりエラーの少ない信号符号だけを採用することで、すべての開口サイズにおいて PxER が大きく減少していることがわかる。

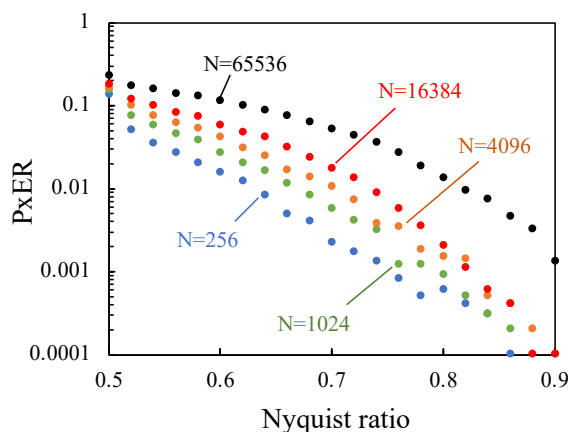


図4. PxERの開口サイズ依存性

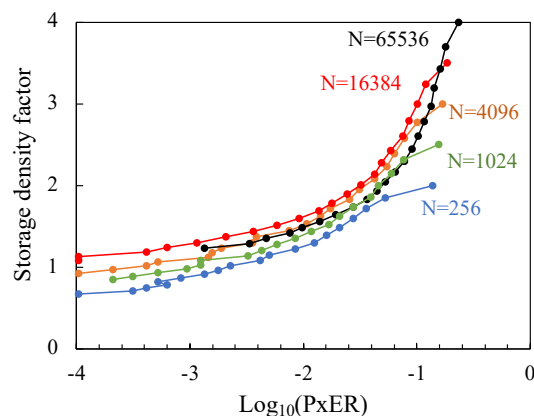


図5. 記録密度ファクターの比較

一方で採用する信号符号が少ない場合、その分コードレートは減少してしまうためいくら PxER が減少しても記録密度は改善することはできない。たとえば  $N=256$  ではコードレートが半分に低下してしまうが、それに見合った PxER の低下ができていないため記録密度ファクターはすべてを採用する元の信号符号 ( $N=63356$ ) よりも低い結果となった (図 5)。今回の計算では、エラーの少ない上位 25% を信号符号として採用する  $N=16384$  の場合において、15% 程度の記録密度の改善が得られることがわかった。

### (2) 複合位相多値信号への拡張：偏光・位相変調多値信号のシングルショット検出法

この研究では、位相 2 値 (0 と  $\pi$ ) と直線偏光の偏光角度を組み合わせた位相・偏光複合信号を提案し、それらの信号をシングルショットで検出した場合の信号検出特性の調査を行なった。図 6 に本手法で用いたページデータを示す。各画素の光波は電場の振動方向が位相と共に変調されており、電場の振動方向 ( $\theta_{sig}$ ) が信号情報となっている。各信号画素は電場の振動方向が既知である 4 種類の既知参照画素に囲まれており、この既知参照画素との境界に偏光子を設置して境界強度を取得し、その光強度から下記の式を用いて信号電場の向き ( $\theta_{sig}$ ) を決定する。

$$\theta_{sig} = \tan^{-1} \frac{I_2 - I_4}{I_1 - I_3}$$

本方式により本来は複数の検出が必要な偏光・位相情報を一回の強度情報の取得により特定することができる。

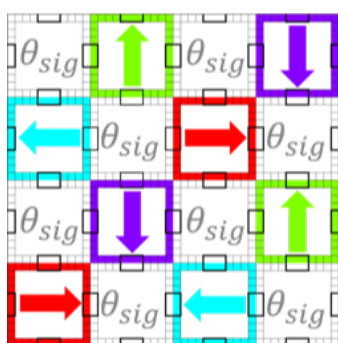


図 6. 偏光・位相変調多値信号

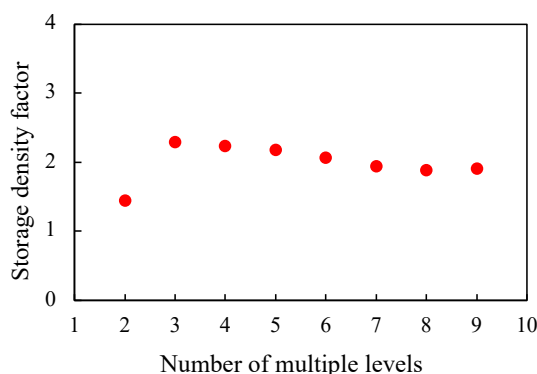


図 7. 記録密度ファクターの多値数依存性

本手法の信号判定能力を数値シミュレーションにより評価を行なった。偏光・位相複合信号の多値数を変え、記録密度ファクターを算出した結果を図 7 に示す。ここではシステムの許容エラーレートを 0.1 として計算をしている。この結果から、多値数を増やしても記録密度を増加させることはできず、最適な多値レベル数は 3 であることがわかった。

現時点ではまだ隣接ピクセルの影響しか考慮していないため記録密度ファクターはそれほど大きな値が得られていないが、今後、機械学習や次に述べるピクセル拡がり関数を用いたイタレーション法などを適用することにより、さらに改善できると考えられる。

### (3) ピクセル拡がり関数を用いた位相決定アルゴリズムの開発と特性評価

提案手法の位相推定過程を図 8 に示した。本手法はまず従来の隣接ピクセルのみを考慮した位相決定アルゴリズムにより信号位相分布の初期値を得る。この位相分布を開口通過後の電場の拡がりを表すピクセル拡がり関数と畳み込み、その位相分布の場合に得られるはずの境界光強度を計算する。これを実際に開口を通過した後の光強度と比較し、差分が大きい境界は位相が誤って推定されているとみなして、その周辺ピクセルの位相をランダムに変更する。これを繰り返す。

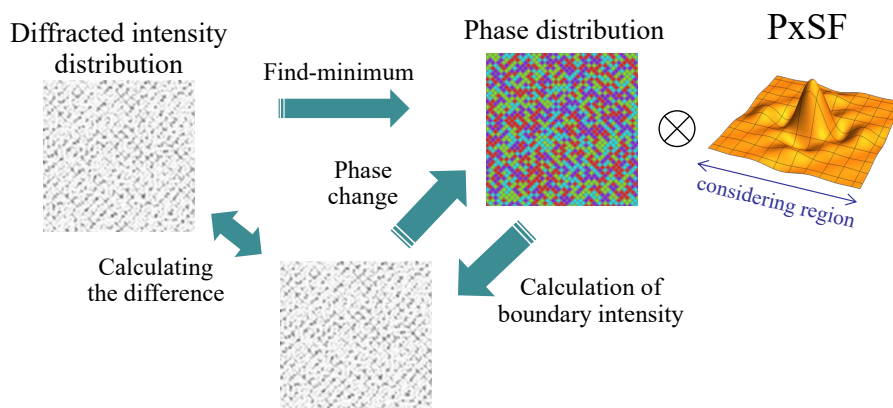


図 8. ピクセル拡がり関数 (PxSF) を用いた位相決定法



返し行うことで、画像全体の境界光強度の誤差を最小化していき、誤差の変化がなくなったところで反復を終了して、最終的な位相分布とする。

上記の方法で位相を推定した場合の PxER の低減の様子を図 9 に示す。このシミュレーションでは、ナイキスト開口比は  $R_{Nyq} = 0.8$  とし、ピクセル拡がり関数は  $6 \times 6$  ピクセル分を考慮して計算を行なった。イタレーション前の PxER が 0.02 であったのに対し、約 100 回のイタレーションで 0.0002 まで PxER を低下させることができ、本手法の有効性を示すことができた。ただし各イタレーションの際の位相の変更はランダムなプロセスで行われるため、最終的な PxER は試行ごとに微妙に変化した。参考までに、われわれの計算環境では、100 回の繰り返しの要する時間は 45 秒であった。

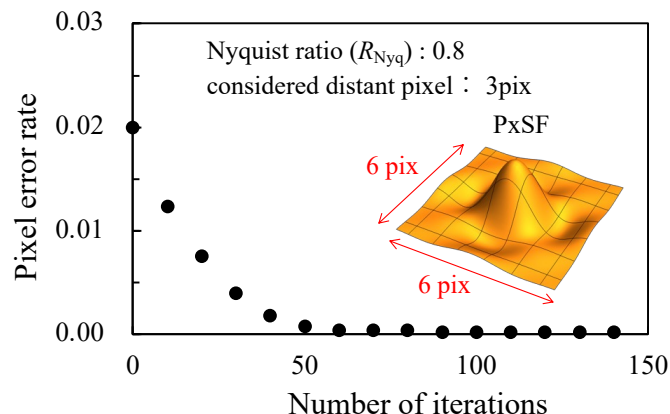


図 9. イタレーションプロセスによるエラーレートの低減の様子

図 10 に最終的に得られた PxER をナイキスト開口比の関数としてプロットした結果を示す。参考として、従来の隣接ピクセルのみを考慮した信号検出法（最小値探索法）の結果（青）と、干渉計測が必要な従来の 4 値位相信号（緑）、2 値強度信号の結果（黒）も示した。図 10 からわかるとおり、本手法（赤）は他の従来法と比較して PxER が非常に小さく、本手法の有効性が十分に確認できる。

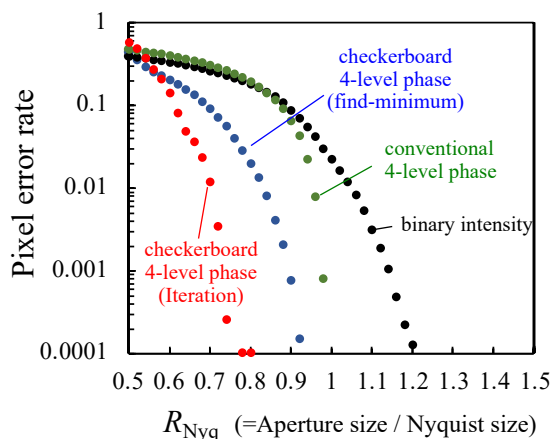


図 10. PxER のナイキスト開口比依存性

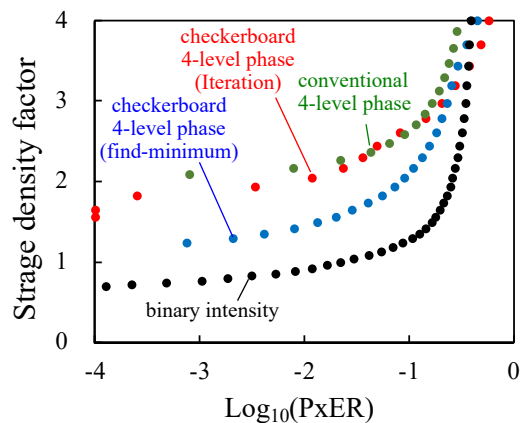


図 11. 記録密度ファクターの比較

図 11 に記録密度ファクターを比較した結果を示す。このグラフから、隣接ピクセルのみを考慮した信号検出法（青）では、干渉計測が必要な従来の 4 値位相信号（緑）に記録密度の点で劣っているが、ピクセル拡がり関数を用いた位相検出アルゴリズム（赤）を用いることで、従来の 4 値位相信号（青）と同レベルまで蓄積密度係数を改善できることがわかる。最終的に、本提案方式によって 2 値強度信号の約 2 倍の記録密度が見込めることがわかった。

## 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 3件）

1. 著者名 Nonaka Takuya, Hirayama Soki, Shimura Tsutomu, Fujimura Ryushi	4. 巻 11
2. 論文標題 The Designed Phase Mask for Suppressing the Inter-Pixel Crosstalk Noise in Intensity-Modulated Multilevel Holographic Data Storage Systems	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Photonics	6. 最初と最後の頁 507 ~ 507
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/photonics11060507	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 Tokoro Michito, Fujimura Ryushi	4. 巻 10
2. 論文標題 Improvement in Signal Phase Detection Using Deep Learning with Parallel Fully Connected Layers	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Photonics	6. 最初と最後の頁 1006 ~ 1006
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/photonics10091006	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 藤村 隆史	4. 巻 50
2. 論文標題 ホログラフィックメモリーにおけるピクセル間クロストークの抑制と利用	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 レーザー研究	6. 最初と最後の頁 627-632
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 Fujimura Ryushi	4. 巻 9
2. 論文標題 [Invited Paper] Investigation of Noise Characteristics of Multivalued Signals and Estimation of Single-page Storage Density in Holographic Data Storage	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ITE Transactions on Media Technology and Applications	6. 最初と最後の頁 144 ~ 152
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3169/mta.9.144	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10件（うち招待講演 6件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 藤村隆史
2. 発表標題 ホログラフィックメモリーにおけるクロストークノイズの抑制と利用
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第44回年次大会（招待講演）
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 T. Tatsuki, R. Fujimura
2. 発表標題 Single shot detection of polarization and phase modulated signals using inter-pixel crosstalk noise in holographic data storage
3. 学会等名 The Fourteenth Japan-Finland Joint Symposium on Optics in Engineering (OIE2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 R. Fujimura
2. 発表標題 Numerical investigation of the storage density in multi-valued holographic data storage systems
3. 学会等名 Photonics WEST 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 R. Fujimura
2. 発表標題 Suppression and utilization of inter-pixel crosstalk noise in holographic data storage systems
3. 学会等名 International Workshop on Optics, Biology, and Related Technologies (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 野中琢矢, 藤村隆史
2. 発表標題 デザインされた位相パターンを付加した強度多値信号の再生特性
3. 学会等名 Optics & Photonics Japan 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 立木透, 藤村隆史
2. 発表標題 ホログラフィックメモリーにおける偏光多値信号のクロストークを利用したシングルショット検出
3. 学会等名 第17回関東学生研究論文講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 R. Fujimura, M. Tokoro
2. 発表標題 Single-shot Detection of Phase-encoded Signals in Holographic Data Storage System
3. 学会等名 International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 R. Fujimura
2. 発表標題 Iterative Phase Determination Method using Pixel Spread Function
3. 学会等名 International Workshop on Holography and related technologies (IWH2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年



1. 発表者名 R. Fujimura, M. Tokoro
2. 発表標題 Single shot detection of phase-modulated signals by using inter-pixel crosstalk
3. 学会等名 Photonics West 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤村隆史
2. 発表標題 クロストークを利用したシングルショット位相検出法における位相決定アルゴリズムの検討
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
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