

解 説

光空間周波数フィルタリングの特徴と応用

池田佳奈美*

1. はじめに

光空間周波数フィルタリングは、光学的フーリエ変換を利用して入力複素振幅分布を空間周波数分布に変換し、入力複素振幅分布に対してフーリエ面で複素空間フィルタを適用する技術である [1]。2次元データの並列処理が高速に行えるため画像処理との相性がよく、マルチメディア処理の高速化や省エネ化への貢献に対してとくに期待が高い。また、イメージングシステムやレーザ加工システムへの応用など光演算器としての応用にとどまらないさまざまな分野で光空間周波数フィルタリングが用いられている [2–5]。

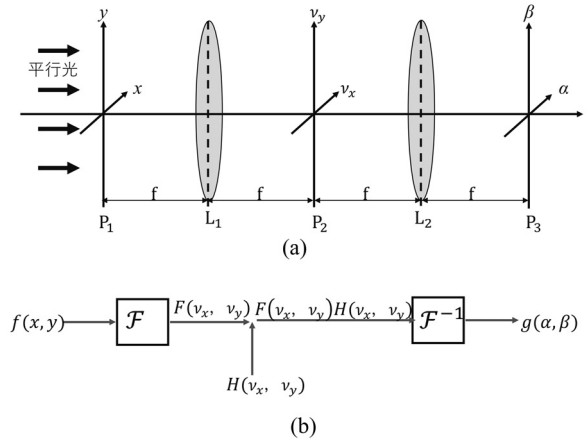
本稿では、光空間周波数フィルタリングについて概説し、高速画像照合や画像分類、光無線通信への応用例を紹介する。

2. 光空間周波数フィルタリングの原理と特徴

レンズによってレンズの前側焦点の物体の2次元フーリエ変換がレンズの後ろ側焦点に高速・並列に演算可能な光学的フーリエ変換は光空間周波数フィルタリングの基本である。1960年代、情報通信理論と光学結像理論が融合され光空間周波数フィルタリングが生まれた [6]。本稿で扱う光学系はコヒーレント光を用い、線形システムとみなすことができる光学系とする。

光空間周波数フィルタリングは線形な複素の光学変換が実行でき、高速性、高い並列性、消費電力の少なさなどの利点を有している。また、ハイパス・ローパスフィルタやバンドパスフィルタにとどまらないさまざまな複素の空間フィルタを構成することができる特徴をもつ。具体的には、フィルタの不透明部分によって特定の空間周波数帯を遮断し、位相変調素子を挿入することで位相遅れを生じさせることにより複素空間フィルタリングが行われる。

第1図(a)にレンズを二つ用いて2連続でフーリエ変換を行うシステム構成を示す。この光学系は一般に4f光学系とよばれ、 f はレンズの焦点距離を意味する。このシステムは入力面 P_1 、フーリエ面 P_2 、出力面 P_3 と平行光および二つのレンズ L_1 、 L_2 で構成されている。振



第1図 (a) 2連続フーリエ変換光学系概要と (b) システムブロック図

幅透過率 $f(x,y)$ で示される物体が入力面 P_1 に置かれたとすると、 P_2 での複素振幅分布 $F(v_x, v_y)$ は $f(x,y)$ のフーリエ変換

$$F(v_x, v_y) = \mathcal{F}\{f(x, y)\}$$

になる。ここで v_x と v_y は空間周波数、 $\mathcal{F}\{\}$ はフーリエ変換を表している。さらに、複素振幅透過率 $H(v_x, v_y)$ の空間フィルタがフーリエ面 P_2 に置かれたとすると、空間フィルタ直後の P_2 での複素振幅分布は、

$$E(v_x, v_y) = KF(v_x, v_y)H(v_x, v_y)$$

となり、光の透過によって二つの2次元複素振幅分布の積が得られる。ここで K は比例定数である。さらに、レンズ L_2 で逆フーリエ変換が実行され、 P_3 面での分布は

$$\begin{aligned} g(\alpha, \beta) &= K \iint_s F(v_x, v_y) H(v_x, v_y) \exp[i(v_x \alpha + v_y \beta)] dv_x dv_y \\ &= K \iint_s f(x, y) h(\alpha - x, \beta - y) dx dy \\ &= K f(x, y) \otimes h(x, y) \end{aligned}$$

となる。ここで $h(x, y) = \mathcal{F}^{-1}[H(v_x, v_y)]$ はフィルタのインパルス応答であり、 $\otimes$ は畳み込み演算を示している。また、座標軸 α と β は入力面の x, y 座標の座標軸がそれ

* 大阪府立大学 大学院 工学研究科

Key Words: spatial filtering, optical matched filtering.

ぞれ反転された座標軸である。このシステムのブロック図は第 1 図 (b) のようになる。一般に、 P_3 面にイメージセンサを置くことで振幅分布の絶対値の二乗 $|g(\alpha, \beta)|^2$ が出力信号として検出される。ここで、複素空間フィルタ $H(v_x, v_y)$ は複素振幅透過率として

$$H(p, q) = |H(v_x, v_y)| \exp(i\phi(v_x, v_y))$$

で与えるものであり、 $|H(v_x, v_y)| \leq 1, 0 \leq \phi(v_x, v_y) < 2\pi$ の範囲において物理的に実現される。とくに、複素空間フィルタ $H(v_x, v_y)$ を $f_2(x, y)$ のフーリエ変換 $F_2(v_x, v_y)$ の複素共役 $F_2^*(v_x, v_y)$ に設定すると、

$$\begin{aligned} g(\alpha, \beta) &= \mathcal{F}^{-1}\{KF(v_x, v_y)F_2^*(v_x, v_y)\} \\ &= Kf(x, y) * f_2(x, y) \end{aligned}$$

となり、入力 $f(x, y)$ とテンプレート $f_2(x, y)$ の相関演算を出力面 P_3 で取得できる。このように、入力のフーリエ変換の複素共役を振幅透過率としてもつマッチトフィルタによるフィルタリングも第 1 図に示した 4f 光学系に基づき実現することができる。

本章では 4f 光学系と空間周波数空間におけるフィルタリングについて概説した。第 3 章では、アナログホログラムを用いてマッチトフィルタを実現する方法について概説し、それを基本とした光相関演算システムの紹介および体積ホログラムをフィルタとして導入した高速光相関演算システムの例について紹介する。第 4 章では、空間光変調器 (SLM) と 4f 光学系による空間周波数領域でのフィルタリングの応用に関して、暗号化された光空間通信の信号検出に光空間周波数フィルタリングを用いた報告例を紹介する。

3. アナログホログラムを用いた光空間周波数フィルタリング

3.1 アナログホログラムを用いたマッチトフィルタリング

前述の通り、マッチトフィルタは入力のフーリエ変換の複素共役を振幅透過率としてもつものであり、画像照合においては二つの画像の相関および移動量を求める手法である。Vander Lugt によって開発された光の干渉を用いた複素フィルタの合成法によって、アナログホログラムを用いた光空間周波数フィルタリングは実装可能である [7]。これはテンプレートパターン $f_2(x, y)$ をフーリエ変換ホログラムとして記録し、フィルタとして用いる手法である。具体的には、相関演算のテンプレートとなるホログラム記録過程、光相関演算過程の二つの過程に分けられる。

ホログラム記録過程においては入力面 P_1 に振幅透過率 $f_2(x, y)$ をもつ物体と中心から α ずれた参照光用点 $f_{\text{ref}}(x, y)$ を置く。得られる干渉縞は、

$$l(p, q) = |F_2(v_x, v_y) + F_{\text{ref}}(v_x, v_y)|^2$$

となる。光相関演算過程においては、得られた干渉縞の強度分布 $l(v_x, v_y)$ に振幅透過率が比例する複素空間フィルタをフーリエ面 P_2 に置く。 $f(x, y)$ で示される物体が入力面 P_1 に置かれると、出力面での光分布には、出力面の光軸上に現れる 0 次の回折光、 $f(x, y)$ と $f_2(x, y)$ のコンボリューションと相互相関が現れる。 $f(x, y)$ と $f_2(x, y)$ の類似度が高いとき、相関ピークは出力光分布の中の明るい点として現れる。つまり、光分布 $F(v_x, v_y)$ が記録されているホログラムには同時に $F(v_x, v_y)^*$ が記録されているため、ホログラムは振幅透過率 $F(v_x, v_y)^*$ をもつ空間周波数フィルタとして作用する。このように、フーリエホログラムをアナログ的に記録しフィルタとすることで、マッチトフィルタリングを実現することができる。

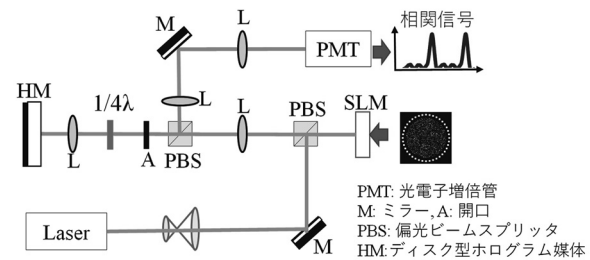
3.2 体積ホログラムを用いた高速光相関演算システム

本節では、光空間周波数フィルタリングの中でも、空間フィルタの高速切り替えを実現するために照合フィルタを体積ホログラムで実装した光相関演算システムについて紹介する。

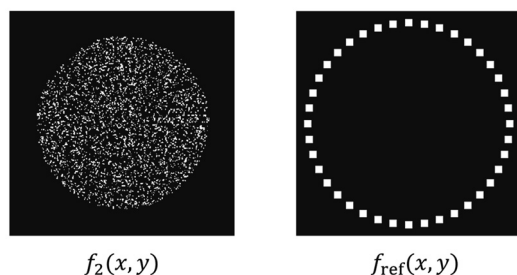
まず、体積ホログラムを用いた光相関演算の特徴を示す。記録するホログラム媒体に厚みがあると、出力回折光を得るためにはブラッグ回折条件を満たす必要がある。すなわち、マッチトフィルタで検出可能な要素の一つである移動量の検出ができなくなってしまう。一方、ホログラム媒体の厚みの中に体積的にフィルタを記録することができるため、フィルタをオーバーラップさせて記録できる特徴が生まれる [8]。このような体積ホログラムを用いた光相関演算は、あらかじめホログラムを記録しておけば光相関演算時には SLM の応答速度に速度が拘束されずに高速なフィルタの切り替えができる利点があるため、結晶を使ったホログラムを用いる手法 [9–14] やディスク型のフォトポリマーを用いる手法 [15–22] など多くの提案がされている。

第 2 図に体積ホログラムを用いた光相関演算システムの 1 例として同軸型ホログラフィの光学系とディスク型フォトポリマーを用いた光相関演算システムの概略図を示す [17]。

本システムは、同軸型ホログラフィの光学系配置 [23] に基づき、1 台の SLM に情報光と参照光を配置し、相関



第 2 図 光相関演算システムの光学系例



第3図 同軸型ホログラフィ光学系に基づく光相関演算システムにおける情報光と参照光の例

フィルタを生成する光相関演算システムである。

ホログラム記録過程においてはVanderLugt 相関器と同様にレンズの前側焦点の同一面内に情報光と参照光を配置したデータベース用画像を配置し平行光を照射する。第3図に同軸型ホログラフィの光学系に基づく光相関演算システムにおける情報光と参照光の例を示す。情報光と参照光はレンズによってフーリエ変換され、情報光と参照光の干渉縞はホログラム記録媒体に体積的に記録される。このホログラムが光相関演算におけるフィルタとなる。

光相関演算過程においては照合の入力として情報光のみを回転するホログラムディスクに対して、CW レーザを用いて連続的に照射する。ホログラムに記録されたデータと入力データとの類似度によってホログラムからの回折光強度は変化し、データ間の類似度を時系列の光強度信号として連続的に取得できる。ディスク型のホログラム記録媒体にアナログホログラムをフィルタとして高密度に記録し光相関演算システムにおける照合のデータベースとして用いることで、高速な照合フィルタの切り替えと相関演算が実現される。本システムでのフィルタの切り替えおよび照合速度は、ホログラム記録のシフト多重記録シフト間隔と光相関演算時におけるディスク回転数に依存し、

$$v_{\text{frame}} = \frac{2\pi r R}{d}$$

と表せる。ここで、 $R[\text{rotations/sec}]$ は回転数、 $d[\text{mm}]$ はシフト多重記録シフト間隔、 $r[\text{mm}]$ はディスク半径である。シフト多重記録シフト間隔 $2\mu\text{m}$ 、ディスク回転数 15 rotations/sec での実験が報告されており、その結果、ピーク間隔 $0.4\mu\text{s}$ 、 $2.4 \times 10^6 \text{ frames/sec}$ での相関演算が達成されている [19]。このフィルタ切り替え速度に対して、照合している画像のサイズを掛けると転送速度 143 Gbps 相当の速度でデータを読み出し照合していることに相当する。このように、転送速度 100 Gbps 以上の速度をもつ光相関演算システムが実現可能であることが実験的にも示されている。また、このシステムにおける $4f$ 系を構成するレンズはCDの読み書き用のピックアップを用いており、従来の光ディスクの制御機構との

相性がよい。そのため、データベースとなるホログラムの記録の安定化に向けて、トラッキングサーボ制御導入と光相関用安価・簡易なディスク構造の提案およびそれを用いた 1000 枚を超えるデータベースの実験実証も報告されている [21]。

光相関演算システムの高速度性が実験的に示されたことによって、デジタル情報処理技術との融合による光相関演算システムの応用展開可能性が拡がり、光相関演算システムが情報化社会におけるデータ解析性能向上のブレイクスルーとなり得ることが示され、応用が広がってきている。次節にこの光相関演算システムの応用に関する報告についていくつか紹介する。

3.3 体積ホログラムを用いた高速光相関演算システムの応用

データ解析においては、一般に特徴量抽出器が重要である。光相関演算システムを用いて画像検索や識別などのデータ解析を行う場合、特徴抽出器によるデータの特徴抽出に加えて、光相関演算システムのインターフェイスに合わせたデータ変換も重要となる。これまでに、体積ホログラムを用いた高速光相関演算システムの応用として、 k 近傍法に基づく類似画像検索 [19] やクロスドメイン類似画像検索 [20]、線形識別器に基づくクラス識別 [22] への応用などが報告されてきた。

k 近傍法に基づく類似画像検索応用においては、光相関演算システムで照合を行う前の処理としてカラー画像に対してグレースケール化・エッジ抽出・二値化を行うハンドクラフトな特徴量抽出器が用いられた。ここで用いられた特徴量抽出器の出力は2値であるため、光相関演算システムのインターフェイスに合わせてデータを円形に配置する光相関用の変換器でシステムの入力開口の形に変換した後に光記録するシステムであった。この方式は、特定の画像サイズの完全一致を検索する照合に限られ、限定的であったが、高速な一致画像検索において優れた性能を示していた [19]。また、クラス識別応用のためにサポートベクターマシンなどの機械学習によって生成された識別器を光記録する報告もあった [23]。具体的には、学習によって得られる実数値ベクトルの識別器を近似計算を用いてバイナリ分解することで光相関演算システムのインターフェイスに合わせ、光記録および記録されたホログラムをフィルタに用いたクラス識別応用が実現された。さらに、光相関演算システムを用いたクロスドメイン類似画像検索も報告されている。この応用は、深層畳み込みニューラルネットワークを特徴抽出器として用い、光相関用のデータ変換モジュールを自己符号化器 [25] を用いて構築することによって実現された。具体的なアプリケーションとして、スケッチ画像を入力として類似する物体写真を検出するクロスドメイン検索が光相関演算システムを用いて実証された [20]。このように、光相関演算システムのインターフェイスに合わせ

る変換器を構築することによって、光相関演算システムと機械学習との融合による応用先の拡大が進んでおり、さらなる展開が期待される。

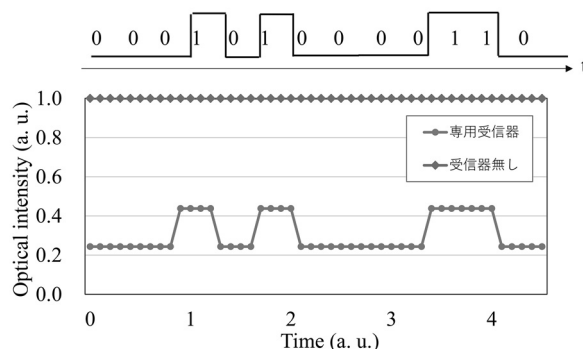
近年では、光相関演算システムのデータベースを計算機ゴーストイメージング [26] における符号化パターンのデータベースとして用いることでパターンの高速切り替えを行うイメージング応用も提案されており [24], アナログホログラムを用いた光相関演算システムの光相関演算用途に限らない、さらなる展開が期待される。

4. 空間光変調器を用いた光空間周波数フィルタリング

前章では、アナログホログラムを用いた光空間周波数フィルタリングの例として光相関演算システムに特化して紹介した。アナログホログラムを用いることで SLM の応答速度に依存しない速度でフィルタリングを実行することができる。一方、フィルタの柔軟性に利点があるため、SLM の高精度化・高精細化に伴い、SLM と 4f 光学系による空間周波数領域でのフィルタリングも用いられてきている。これは、フィルタを電子コンピュータに保存して随時 SLM に呼び出す方式である。Boulder Nonlinear System 社による小型で汎用的な光相関演算システム [27] や、Optalysys 社による Cambridge correlator [28] など光相関演算器としての応用においても実用化されている。このほか、SLM と 4f 光学系による空間周波数領域でのフィルタリングはイメージングシステムやレーザ加工など数多くの報告がある [2-5]。本章では、SLM を用いた光空間周波数フィルタリングを光空間通信システムに応用した例について紹介する。

4.1 光空間通信システムへの応用例

本節で紹介するのは、光空間通信の送受信器に 4f 光学系を搭載し、直接強度変調された 2 値信号を送信器内での光空間周波数フィルタリングによって暗号化し、受信器内での空間周波数フィルタリングによって復号するシステムである [29,30]。具体的には、送信器において、信号の 1bit の状態 1 と 0 のそれぞれに対応したパターンとして二つの画像を用意することから始まる。伝送したい 2 値データ列とその反転信号を生成し、それぞれのパターンに対して直接強度変調した光を照射する。言い換えると、1bit の状態 1 と 0 に照射される光の強度変調の信号は互いに反転の関係であるため、片方が照射されているとき他方は照射されておらず、また常にどちらかが照射されている状態である。つまり、受信器での光空間周波数フィルタリングなしでは強度変調されている状態の信号の観測ができない。受信器には復号化のための 4f 光学系と 1bit の状態 1 として用いた画像に対応したフィルタを受信器内のフーリエ面に搭載することで、出力面では直接強度変調された 2 値データ列が受光される。このように、送信器内で変調に用いた画像と受光器に搭載



第 4 図 空間周波数フィルタリングを導入した光空間通信システムのシミュレーション結果

するフィルタの組合せが光無線通信システムにおける通信信号復元のための物理的鍵となるシステムである。シミュレーションの結果を第 4 図に示す。正しい鍵が搭載されている受信器のみが信号を受信できる基礎検討の結果がシミュレーションと実験により報告された [20]。今後、伝送距離の長距離化や伝送信号の並列化などの展開が期待される。

5. おわりに

光空間周波数フィルタリングとその実装の基礎を概説し、いくつかの応用例について紹介した。レンズを利用した線形な複素の光学変換に基づきさまざまな複素の空間フィルタを適用するフィルタリングが光空間周波数フィルタリングである。ここでは、光空間周波数フィルタリングの中でも光相関演算システムを中心とした一部の応用に着目して紹介したが、近年、機械学習と組み合わせた報告も相次いでおり（たとえば [31]）、今後もさまざまな分野における応用展開が期待される。

謝 辞

本稿で紹介した研究の一部は電気通信大学大学院在籍時に取り組んだ研究である。指導教員の電気通信大学渡邊恵理子准教授をはじめとする共同研究者の皆様に謝意を示す。また、一部の研究は大阪府立大学大学院工学研究科光機能システム研究グループでの成果である。山田誠教授をはじめとする光機能システム研究グループの皆様にも謝意を示す。

(2020 年 8 月 19 日受付)

参 考 文 献

- [1] J. Goodman: *Introduction to Fourier Optics*, 3rd edition, W. H. Freeman & Co Ltd. (2007)
- [2] S. E. Schausberger, B. Heise, C. Maurer, S. Bernet, M. R. Marte and D. Stifter: Flexible contrast for low-coherence interference microscopy by Fourier-plane filtering with a spatial light modulator; *Opt. Lett.*, No. 35, Iss. 24, pp. 4154–4156 (2010)

- [3] W. Tang, Y. Guo, W. Yi, J. Yang, J. Zhu, W. Wang and X. Li: A robust fast variable-aperture Fourier ptychography; *Opt. Commun.*, Vol. 443, pp. 144–149 (2019)
- [4] N. Hai and J. Rosen: Interferenceless and motionless method for recording digital holograms of coherently illuminated 3D objects by coded aperture correlation holography system; *Opt. Express*, No. 27, Iss. 17, pp. 24324–24339 (2019)
- [5] Y. Nakata, K. Osawa and N. Miyanaga: Utilization of the high spatial-frequency component in adaptive beam shaping by using a virtual diagonal phase grating; *Scientific Reports*, Vol. 9, p. 4640 (2019)
- [6] A. Vander Lugt: Signal detection by complex spatial filtering; *IEEE Trans. Inform. Theory*, Vol. 10, Iss. 2, pp. 139–145 (1964)
- [7] L. J. Cutrona, E. N. Leith, C. J. Palermo and L. J. Porcello: Optical data processing and filtering systems; *IRE Trans. Inform. Theory*, Vol. 6, Iss. 3 p. 386 (1960)
- [8] C. Gu, F. Mok, J. Hong, I. McMichael and R. Saxena: Cross-talk-limited storage capacity of volume holographic memory; *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol. 9, Iss. 11, pp. 1978 (1992)
- [9] T. Zheng, L. Cao, Q. He and G. Jin: Full-range in-plane rotation measurement for image recognition with hybrid digital-optical correlator; *Opt. Eng.*, Vol. 53, Iss. 1, p. 011003 (2013)
- [10] Y. Yi, L. Cao, W. Guo, Y. Luo, J. Feng, Q. He and G. Jin: Optical fingerprint recognition based on local minutiae structure coding; *Opt. Express*, Vol. 21, Iss. 14, pp. 17108–17121 (2013)
- [11] F. T. S. Yu and X. J. Lu: A real-time programmable joint transform correlator; *Opt. Commun.*, Vol. 52, Iss. 1, pp. 10–16 (1984)
- [12] A. Heifetz, J. T. Shen, J. K. Lee, R. Tripathi and M. S. Shahriar: Translation invariant object recognition system using an optical correlator and a super parallel holographic random access memory; *Opt. Eng.*, Vol. 45, Iss. 2, p. 025201 (2006)
- [13] C. Gu, H. Fu and J. R. Lien: Correlation patterns and cross-talk noise in volume holographic optical correlators; *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol. 12, Iss. 5, pp. 861–868 (1995)
- [14] A. Pu, R. Denkewalter and D. Psaltis: Real-time vehicle navigation using a holographic memory; *Opt. Eng.*, Vol. 36, Iss. 10, pp. 2737–2746 (1997)
- [15] E. Watanabe and K. Kodate: Optical correlator for face recognition using collinear holographic system; *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 45, No. 8B, pp. 6759–6761 (2006)
- [16] E. Watanabe Y. Ichikawa, R. Akiyama and K. Kodate: Ultrahigh-speed optical correlation system using holographic disc; *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 47, No. 7S1, pp. 5964–5967 (2008)
- [17] K. Ikeda and E. Watanabe: High-speed optical correlator using coaxial holographic system; *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 54, No. 9S, p. 09ME02 (2015)
- [18] K. Ikeda, K. Kodate and E. Watanabe: Optical-digital hybrid image search system in cloud environment; *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 55, No. 9S, p. 09SC03 (2016)
- [19] K. Ikeda and E. Watanabe: High-speed image matching with coaxial holographic optical correlator; *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 55, No. 9S, p. 09SC01 (2016)
- [20] K. Ikeda, H. Suzuki and E. Watanabe: Optical correlation-based cross-domain image retrieval system; *Opt. Lett.*, Vol. 42, Iss. 13, pp. 2603–2606 (2017)
- [21] K. Ikeda, A. Fukumoto, T. Sugaya and E. Watanabe: Improving stability of coaxial holographic optical correlation system using a simple disk structure; *Opt. Rev.*, Vol. 26, No. 2, pp. 295–300 (2019)
- [22] K. Ikeda, M. Yamada, H. Fujiyoshi and E. Watanabe: Optical classifier based on volume holographic filter with vector decomposition; *Electron. Lett.*, Vol. 56, No. 6, pp. 752–754 (2020)
- [23] H. Horimai, X. Tan and J. Li: Collinear holography; *Appl. Opt.*, Vol. 44, Iss. 13, pp. 2575–2579 (2005)
- [24] A. Inoue, R. Usami, K. Saito, Y. Honda, K. Ikeda and E. Watanabe: Optical correlator-based computational ghost imaging towards high-speed computational ghost imaging; *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 58, No. SK, p. SKKA02 (2019)
- [25] G. E. Hinton and R. R. Salakhutdinov: Reducing the dimensionality of data with neural networks; *Science*, Vol. 313, Iss. 5786, pp. 504–507 (2006)
- [26] J. H. Shapiro: Computational ghost imaging; *Phys. Rev. A*, Vol. 78, Iss. 6, p. 061802 (2008)
- [27] D. M. Simon and S. A. Serati: Optical correlator using ferroelectric liquid crystal spatial light modulators and Fourier transform lenses, US patent US5418380A (1994)
- [28] T. D. Wilkinson: Optical correlator, UK patent application number WO2004029746, 9726386.7 (1997)
- [29] K. Ikeda, Y. Sato, O. Koyama and M. Yamada: Two-dimensional encryption system for secure free-space optical communication of time-series data streams; *Electron. Lett.*, Vol. 55, No. 13, pp. 752–754 (2019)
- [30] K. Ikeda, Y. Sato, O. Koyama and M. Yamada: Experimental demonstration of encryption system using two-dimensional pattern for secure free-space optical communication; *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 59, No. SO, p. SOOA01 (2020)
- [31] T. Yan, J. Wu, T. Zhou, H. Xie, F. Xu, J. Fan, L. Fang, X. Lin and Q. Dai: Fourier-space diffractive deep neural network; *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 123, Iss. 2, p. 023901 (2019)

著 者 略 歴

いけ だ か な み
池 田 佳 奈 美

2016 年 4 月から 2018 年 3 月まで日本
学術振興会特別研究員として研究に従事。
2018 年 3 月電気通信大学大学院情報理工
学研究科先進理工学専攻博士後期課程修
了。同年 4 月大阪府立大学大学院工学研究
科電気・情報系専攻助教となり現在に至る。
光情報処理，光応用計測の研究に従事。応用物理学会，電子
情報通信学会，日本光学会，The Optical Society (OSA) な
どの会員。
