

# 情報フォトニクスの新展開

谷 田 純

## New Developments in Information Photonics

Jun TANIDA

Information photonics is a research area developed from optical information processing and the researches aiming at optical computers and optical computing. It seems difficult to draw the boundary of the research area from the accumulated achievements. This article provides a simplified view of the research area focusing on the roles of light and information technology to clarify the essence of information photonics. Recent research subjects are reviewed, and the future directions of information photonics are considered.

**Key words:** optics, information technology, holography, display, nano technology

情報フォトニクスとは何かという問いは、本質的だが明解に答えることは難しい。「光学」32巻7号において情報フォトニクスが特集されており、早崎による総合報告<sup>1)</sup>では、「フォトニクス技術を核とする多様な技術を結びつけたフォトニック情報システム構築のために新しく考案された研究領域」と定義され、光情報処理の関連分野との関係が示されている。その後、日本光学会（応用物理学会）情報フォトニクス研究グループ（<http://www.i-photonics.jp/>）からは、「フォトニクス分野中の情報操作（生成・収集・蓄積・伝送・処理・検索・提示）に関連し、光を情報のキャリアとして利用し、情報を操作する方法に新規性を見いだす研究開発領域」と説明されている。情報フォトニクスは、光情報技術をルーツに、光コンピューターや光コンピューティングを目標とした研究領域が、競合技術や応用展開などの要因により変遷しながら発展してきたものであり、その境界線を明確に定めることは難しい。本解説では、光と情報技術との関係を整理し、情報フォトニクスという研究領域の本質を明らかにする。その上で、最近の重要な研究課題を紹介し、情報フォトニクスの将来展開の方向性を検討する。

### 1. 情報フォトニクスとは

フォトニクスは、その名の通り、光子（フォトン）を扱う光工学である。しかし、情報フォトニクスでは、光の巨視的描像である光波や光線を含めた光応用技術の意味でとらえられている。光情報処理や光コンピューティングの面白さは、光に関わる物理的特性や現象を総動員して、情報に関わる操作や機能を実現する点にあり、光子レベルの物理的性質の利用に限定されるものではない、というのがその理由である。また、情報という言葉は、「情報」そのものに限らず、情報技術、情報科学、情報何某など非常に広い語義で解釈される。これらが相まって、情報フォトニクスという名称は、大きな可能性を感じさせるとともに、逆説的に、その本質がわかりにくいという問題を内包している。

情報フォトニクス分野で対象にされている研究課題は、光の役割と、情報の位置づけを考えることにより、系統的に整理できる。光の役割としては、1) 情報媒体、2) 物質・物体とのインターフェース、3) 人間とのインターフェースの3つが考えられる。光はさまざまな特徴的性質をもっているが、情報フォトニクスでは、情報キャリアとしての優れた特性、光と物質間で発現される豊富な相互作用、人間の視覚系に適合した情報表現性、が重視されている。

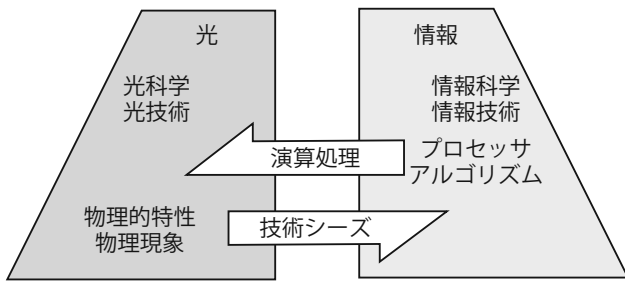


図1 情報フォトニクスにおける光と情報の関係。

一方、情報の位置づけとしては、A) 演算手段として利用する、B) 情報技術自体にシーズを提供する、の2つの場合が考えられる。図1にこの関係を示す。光で表現された情報や光信号として取得された情報に対して、情報技術による演算処理を適用することで、光技術の可能性は飛躍的に広がる。反対に、情報技術自体にも高機能化や高性能化が求められており、光に関わる物理的特性や現象は、新しい情報技術のシーズとしての利用が期待される。

図2は、光の役割と情報の位置づけを直交させて、マトリクス表示したものである。この図により、情報フォトニクスにおける研究課題を系統的に整理することができる。以下では、各研究課題におけるおもな研究内容を紹介する。なお、光配線、光記録、情報可視化は、それぞれ独立した研究分野が形成されており、本解説ではとりあげない。

## 2. 研究の現状

### 2.1 計算イメージング

コンピュータの演算能力の劇的な向上により、物体空間における光信号を演算を用いて再現することは困難な処理ではなくなった。適当な光学的手法を用いて物体空間の光信号を記録し、視点位置やフォーカス距離を変化させた物体画像を再構成する技術は、計算イメージング、コン

ピューショナルフォトグラフィーなどとよばれている<sup>2)</sup>。結像光学系は、物体の一点から出た光線群を、像空間の対応する一点に収束させる。光エネルギーの伝送効率が高いが、物体空間の光線情報が失われるため、結像位置における物体画像しか得られない。これに対して、マイクロレンズアレイを用いて光線情報を記録するライトフィールドカメラ、あるいは、プレノプテックカメラ<sup>3)</sup>が提案されている。結像光学系にマイクロレンズアレイを挿入し、本来、フォーカス面に収束する光線信号を、撮像素子上で分離させて取得する。

同様の機能を実現する撮像装置として、複眼撮像システムがあげられる<sup>4)</sup>。イメージセンサー上にマイクロレンズアレイを配置した複眼撮像システム TOMBO<sup>5)</sup> はコンパクトかつ多機能な計算イメージングのプラットフォームであり、三次元形状計測、分光イメージング、超解像処理など多様な処理が実装されている。さらに、新たな信号処理の枠組みとして注目されているコンプレッシブセンシング<sup>6)</sup>の適用により、重畳取得した信号を効率的に分離して再構成できる。この手法により、空間座標、波長、時間など多次元情報の一括取得<sup>7)</sup>、複数チャンネル画像の重畳一括撮像<sup>8)</sup>などが実現されている。

### 2.2 デジタルホログラフィー

計算イメージングでは光信号は光線として取り扱われるが、より精密な情報を与える光の描像は光波である。電磁波としての光は、 $10^{14} \sim 10^{15}$  Hz と非常に高速に振動するため、その位相変化を直接取得できない。しかし、参照光との干渉による時間不変な定在波を利用すれば、光波の空間位相成分を記録することが可能になる。干渉縞が記録された記録媒体に、記録時と同一の参照光を入射させると、記録した光波が再生される。これがホログラフィーであり、三次元撮像技術として古くから知られている。

		光の役割		
		情報媒体	物質・物体とのインターフェース	人間とのインターフェース
情報の位置づけ	演算手段として利用	計算イメージング	デジタルホログラフィ	3D ディスプレイ
	技術シーズを提供	情報セキュリティ 光配線	ナノ情報技術 光記録	新画像表現技法 情報可視化

図2 情報フォトニクスにおける研究課題。

ホログラフィーでは、微細な干渉縞を記録するため、専用のフィルムや乾板などが用いられる。しかし、これらの記録媒体は入手困難になり、現像プロセスなどの取り扱いの煩雑さから、イメージセンサーを利用したデジタルホログラフィー<sup>9)</sup>が急速に発展している。ただし、イメージセンサーの空間分解能はホログラム記録には不十分であり、画素ピッチ1  $\mu\text{m}$  のデバイスを利用しても、物体光と参照光の角度は15~20°程度に制限される。物体光と参照光の位相差を3ないし4段階(例えば、0,  $\pi/2$ ,  $\pi$  など)に変えて干渉信号を取得する位相シフト法<sup>10)</sup>は、この制約を実効的に緩和するため、実用上、大きな意義をもつ。異なる位相条件による干渉信号を効率的に撮影する手法として、ランダム位相参照波法<sup>11)</sup>、並列位相シフト法<sup>12)</sup>などが考案されている。

デジタルホログラフィーは微小物体や超高速現象の観察手段として大きな力を発揮する。一瞬の現象を記録し、演算処理により元の物体空間を再構成する。再構成はすべて演算処理で実行されるため、再生のための光学系や精密な調整を排除できる。その結果、安定した再生像が得られるだけでなく、信号を増幅したり、異なる観察条件での再生像を自由に合成できる。ナノ粒子に対する高精度位置計測法<sup>13)</sup>は、これらの特徴を生かした応用である。さらに、デジタルホログラフィーは、カラー化<sup>14)</sup>や低コヒーレンス化による画質向上<sup>15)</sup>など、高い機能拡張性をもっている。

### 2.3 三次元ディスプレイ

人間が外界から得る情報の多くは視覚によるものであり、その情報は光信号により伝送されている。人間に対するインターフェースとして光を利用する典型的なシステムがディスプレイであり、立体情報を表示する三次元ディスプレイにはさまざまな方式が提案されている。人間の奥行き方向の知覚特性を利用したDFD(奥行き融合型三次元)ディスプレイ<sup>16)</sup>、多数の指向性画像を重畳して表示する超多眼ディスプレイ<sup>17)</sup>、コーナー反射鏡アレイ<sup>18)</sup>やプリズムシート<sup>19)</sup>による空中実像ディスプレイ、演算処理によりホログラムデータを作成して任意の立体像を表示する電子ホログラフィーなどがあげられる。

三次元ディスプレイにおける課題はおもに光学系だけにあるように考えられるが、三次元画像は情報量が大きく、表示信号の計算や伝送には非常に大きな演算パワーと広帯域の信号伝送路が必要になる。そのため、専用ハードウェアやグラフィックプロセッサが積極的に利用されている<sup>20)</sup>。また、よりよい三次元信号を高速に生成する演算アルゴリズムの開発も活発に行われている<sup>21,22)</sup>。さらに、ホ

ログラフィー全体をコンピューター上で再現するデジタルホログラフィー<sup>23)</sup>などの概念も提案されている。

### 2.4 情報セキュリティ

コンピューターの高性能化に伴い、すべての演算処理を光学的に実行するような情報システムは非現実的である。しかし、特殊な専用処理に限って光技術を適用する手法は今なお合理的である。そのような手法の一例として、空間フィルタリングがあげられる。レンズを介したフラウンホーファー回折は二次元フーリエ変換と等価であり、結像光学系を線形システムとみなして、二次元画像信号を周波数領域で変調する技術が空間フィルタリングである。この枠組みの利用により、二次元画像信号を対象とした暗号化処理が効率的に実現される。代表的手法として、物体面とフィルター面に鍵情報となるランダム位相信号を配置する二重ランダム位相符号化法<sup>24)</sup>が知られている。この手法をもとにして、結合相関光学系による簡便な実装法<sup>25)</sup>や鍵空間解析による評価<sup>26)</sup>などが行われている。

### 2.5 ナノ情報技術

光の回折限界より微小なスケール領域には、光情報処理にとって未開拓の世界が広がっている。ナノフォトニクスやナノオプティクスの進展により、ナノサイズの光信号を取り扱う技術が発達しており、それらをナノスケールで動作する情報技術に応用した技術が提案されている。ナノスケールの構造は、光信号に対して、特異的な物理現象を示すことが知られている。例えば、ナノ構造体を同サイズのプローブで観察する場合と、より大きなサイズのプローブで観察する場合とで、異なる信号応答を設定することができる。この特性を発展させて、スケール階層性をもつナノ情報システム<sup>27)</sup>が提案されている。さらに、同技術をホログラムに適用した情報隠蔽技術<sup>28)</sup>が開発されている。

DNAに代表される機能性分子を利用すると、光の回折限界をはるかに超えた分子スケールでの論理演算や情報処理が実現できる。分子状態は、蛍光標識や分光計測などの光計測手法により観測したり、光異性化反応などにより能動的に制御したりできる。そのため、光技術と分子情報技術は高い親和性を持ち、これらを融合したナノ情報技術は大きな可能性を秘めている。光信号による再利用可能な分子センサー<sup>29)</sup>、蛍光共鳴エネルギー移動を利用したDNA足場論理回路<sup>30)</sup>、DNA分子を閉じ込めた液滴反応場の光操作技術<sup>31)</sup>などが開発されている。ナノ情報を効率的に取り扱うスマートフォールドアーキテクチャー<sup>32)</sup>は、ナノ情報技術と既存の情報技術をつなぐひとつの方策を提示している。

## 2.6 新画像表現技法

人間の視覚を利用して秘密情報を復元する視覚復号型暗号<sup>33)</sup>が提案されている。局所的な符号パターンや偏光パターンの重ね合わせにより、特定の鍵情報が与えられたときに限り、原情報が復元される。局所的な符号パターンを重ね合わせる場合、視覚系の高周波遮断特性により、等しい透過率を得る符号パターンの組み合わせが複数組存在するため、その自由度を情報秘匿に利用する。また、視点や光源の移動など人間による操作を利用して、隠された画像情報を顕在化させる隠顕技術への応用が注目されている。人間とのインターフェースにおける新しい情報技術シーズであり、今後の進展が期待される。

## 3. 今後の展開

図1に示したように、情報フォトニクスの将来展開には2つの方向性が示唆される。一方は、演算手段として情報技術を利用する立場の延長で、物理系と演算系の融合をさらに推し進める方向、他方は、新しい情報技術を実現する技術シーズとして発展させる方向である。

### 3.1 アーティフィシャル光学

計算イメージング、デジタルホログラフィー、三次元ディスプレイなどは、いずれも自由空間を伝搬する光学現象をコンピューターによる演算処理を用いて代行し、仮想空間内で自由に操作する技術とみなすことができる。計算機ハードウェアや周辺装置などの物理的実体をコンピューターやクラウド環境上でのソフトウェアに置き換える手法は仮想化とよばれ、現在の情報技術において広く利用されている。

情報フォトニクスが進む第1の方向は、まさに光学現象の仮想化にほかならず、より大きな概念としてとらえる必要がある。ここでは、自然(natural)と対極にある人工(artificial)という言葉を用いて、アーティフィシャル光学とよぶ。情報科学の観点からは、物理的実体をもつ光学現象を仮想化し、既存の情報システムの枠組みに適合させる普遍的概念といえる。結果として、光技術と情報技術がより高度に融合されることが期待され、新しい情報フォトニクスの世界が広がる。

### 3.2 フロンティア光情報技術

情報技術の実装には、何らかの物理的機構が必要となる。半導体集積回路は光の回折限界を超え、情報密度の点から、情報媒体としての光信号の出番はないように見える。しかし、光と物質との相互作用に着目すると、量子現象や分子制御など既存技術では取り扱い困難な対象において、フォトニクスは有効な解決手段を与える。ナノスケール

で動作し極微小エネルギーで駆動可能な情報システムや、情報技術への展開は有望なものと考えられる。ナノフォトニクスやナノオプティクスなど、ナノスケールでの光技術の進展はめざましく、情報技術への適用は自然な流れといえる。特に、ナノスケール領域は細胞や生体分子の世界であり、生物情報を直接的に取得したり、制御したりする情報技術としての展開が期待される。

情報フォトニクスは、自然と人工技術の融合を基礎とする研究領域である。最後に示した2つの方向は、自然の人工技術化と、人工技術への自然の導入という、正反対の動きである。これは、今後、自然と人工技術のさらなる融合が進んでいくことのひとつの表れにほかならない。情報フォトニクスは、その先駆的研究分野として、重要な役割を果たすものと期待される。

## 文 献

- 1) 早崎芳夫：“情報フォトニクス：その概念とめざすもの”，光学，**32** (2003) 410-415.
- 2) M. Levoy: “Light fields and computational imaging,” Computer, **39**, No. 8 (2006) 46-55.
- 3) R. Ng, M. Levoy, M. Bredif, G. Duval, M. Horowitz and P. Hanrahan: “Light field photography with a hand-held plenoptic camera,” Stanford Tech. Report CTSR (2005) 2005-02.
- 4) 谷田 純：“複眼画像システム”，光学，**39** (2010) 313-319.
- 5) J. Tanida, T. Kumagai, K. Yamada, S. Miyatake, K. Ishida, T. Morimoto, N. Kondou, D. Miyazaki and Y. Ichioka: “Thin observation module by bound optics (TOMBO): Concept and experimental verification,” Appl. Opt., **40** (2001) 1806-1803.
- 6) D. L. Donoho: “Compressed sensing,” IEEE Trans. Info. Theory, **52** (2006) 1289-1306.
- 7) R. Horisaki, K. Choi, J. Hahn, J. Tanida and D. J. Brady: “Generalized sampling using a compound-eye imaging system for multi-dimensional object acquisition,” Opt. Express, **18** (2010) 19367-19378.
- 8) R. Horisaki and J. Tanida: “Multi-channel data acquisition using multiplexed imaging with spatial encoding,” Opt. Express, **18** (2010) 23041-23053.
- 9) J. W. Goodman: “Digital image formation from electronically detected holograms,” Proc. SPIE, **0010** (1967) 176-181.
- 10) I. Yamaguchi and T. Zhang: “Phase-shifting digital holography,” Opt. Lett., **22** (1997) 1268-1270.
- 11) T. Nomura and M. Imbe: “Single-exposure phase-shifting digital holography using a random-phase reference wave,” Opt. Lett., **35** (2010) 2281-2283.
- 12) T. Kakue, R. Yonesaka, T. Tahara, Y. Awatsuji, K. Nishio, S. Ura, T. Kubota and O. Matoba: “High-speed phase imaging by parallel phase-shifting digital holography,” Opt. Lett., **36** (2011) 4131-4133.
- 13) A. Sato, Q. D. Pham, S. Hasegawa and Y. Hayasaki: “Three-dimensional subpixel estimation in holographic position measurement of an optically trapped nanoparticle,” Appl. Opt., **52** (2013) A216-A222.
- 14) Y. Ito, Y. Shimozato, P. Xia, T. Tahara, T. Kakue, Y. Awatsuji, K. Nishio, S. Ura, T. Kubota and O. Matoba: “Four-wavelength color digital holography,” J. Disp. Technol., **8** (2012) 570-576.

- 15) Y. Mori and T. Nomura: "Synthesis method from low-coherence digital holograms for improvement of image quality in holographic display," *Appl. Opt.*, **52** (2013) 3838–3844.
- 16) M. Date, T. Hisaki, H. Takada, S. Suyama and K. Nakazawa: "Luminance addition of a stack of multidomain liquid-crystal displays and capability for depth-fused three-dimensional display application," *Appl. Opt.*, **44** (2005) 898–905.
- 17) Y. Takaki, H. Takenaka, Y. Morimoto, O. Konuma and K. Hirabayashi: "Multi-view display module employing MEMS projector array," *Opt. Express*, **20** (2012) 28257–28266.
- 18) D. Miyazaki, N. Hirano, Y. Maeda, S. Yamamoto, T. Mukai and S. Maekawa: "Floating volumetric image formation using adihedral corner reflector array device," *Appl. Opt.*, **52** (2013) A281–A289.
- 19) Y. Maeda, D. Miyazaki and T. Mukai: "Volumetric display using a rotating prism sheet as an optical image scanner," *Appl. Opt.*, **52** (2013) A182–A187.
- 20) T. Shimobaba, T. Ito, N. Masuda, Y. Ichihashi and N. Takada: "Fast calculation of computer-generated-hologram on AMD HD5000 series GPU and OpenCL," *Opt. Express*, **18** (2010) 9955–9960.
- 21) K. Matsushima and S. Nakahara: "Extremely high-definition full-parallax computer-generated hologram created by the polygon-based method," *Appl. Opt.*, **48** (2009) H54–H63.
- 22) T. Shimobaba, H. Nakayama, N. Masuda and T. Ito: "Rapid calculation algorithm of Fresnel computer-generated-hologram using look-up table and wavefront-recording plane methods for three-dimensional display," *Opt. Express*, **18** (2010) 19504–19509.
- 23) K. Matsushima, Y. Arima and S. Nakahara: "Digitized holography: Modern holography for 3D imaging of virtual and real objects," *Appl. Opt.*, **50** (2011) H278–H284.
- 24) P. Refregier and B. Javidi: "Optical image encryption based on input plane and Fourier plane random encoding," *Opt. Lett.*, **20** (1995) 767–769.
- 25) T. Nomura and B. Javidi: "Optical encryption system with a binary key code," *Appl. Opt.*, **39** (2000) 4783–4787.
- 26) K. Nakano, M. Takeda, H. Suzuki and M. Yamaguchi: "Evaluations of phase-only double random phase encoding based on key-space analysis," *Appl. Opt.*, **52** (2013) 1276–1283.
- 27) M. Naruse, H. Hori, K. Kobayashi, M. Ishikawa, K. Leibnitz, M. Murata, N. Tate and M. Ohtsu: "Information theoretical analysis of hierarchical nano-optical systems in the subwavelength regime," *J. Opt. Soc. Am. B*, **26** (2009) 1772–1779.
- 28) N. Tate, M. Naruse, T. Yatsui, T. Kawazoe, M. Hoga, Y. Ohyagi, T. Fukuyama, M. Kitamura and M. Ohtsu: "Nanophotonic code embedded in embossed hologram for hierarchical information retrieval," *Opt. Express*, **18** (2010) 7497–7505.
- 29) T. Nishimura, Y. Ogura and J. Tanida: "Reusable molecular sensor based on photonic activation control of DNA probes," *Biomed. Opt. Express*, **3** (2012) 920–926.
- 30) T. Nishimura, Y. Ogura and J. Tanida: "Fluorescence resonance energy transfer-based molecular logic circuit using a DNA scaffold," *Appl. Phys. Lett.*, **101** (2012) 233703.
- 31) Y. Ogura, Y. Kazayama, T. Nishimura and J. Tanida: "Large-area manipulation of microdroplets by holographic optical tweezers based on a hybrid diffractive system," *Appl. Opt.*, **50** (2011) H36–H41.
- 32) J. Tanida: "Smart fold computing: A distributed approach to overcome diffraction limit of light," *Technical digest of the First International Workshop on Information Physics and Computing in Nano-scale Photonics and Materials*, IPCN1-15 (2012).
- 33) H. Yamamoto, Y. Hayasaki and N. Nishida: "Securing information display by use of visual cryptography," *Opt. Lett.*, **28** (2003) 1564–1566.

(2013年8月16日受理)