

## 全視野高精度動的計測技術に関する調査研究

夏 鵬\*

(2016年12月27日受理)

## A survey on high precision 3-D measurement of dynamic object

Peng XIA

## Abstract

The deformation measurement is important for evaluating the mechanical properties of materials. Especially, the high-precision three-dimensional nondestructive method is required in many fields. In this paper, various three-dimensional measurement methods are investigated, such as the Light Section Method, Optical Coherence Tomography, Pattern Projection Method, Confocal Laser Microscope, and Digital Holography. The principle and characteristics of each typical method is described in this paper.

## 1. はじめに

近年、材料の機械的特性を評価するために、微小領域(数十マイクロメートル)での高精度(ナノメートルオーダー)な変形変位計測技術が要求されている。例えば、半導体チップに熱を与えた時に生じる形状変化や炭素繊維複合材料を引っ張る時に生じる微小変形などの計測が重要である。これまでに、多くの研究者によって様々な変形変位計測技術が提案されている。特に、アナログの写真フィルムの代わりにデジタルで画像を記録できるCCD (Charge Coupled Device) や CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) などのイメージセンサが開発された1980年代以降、定量的な評価が可能な計測技術の適用が盛んに行われるようになってきた。全視野である3次元計測手法として、光切断法<sup>1)-4)</sup>、共焦点顕微鏡<sup>5)-8)</sup>、縞投影法<sup>9)-11)</sup>、断層法<sup>12)-15)</sup>、複眼光学システム<sup>16)-19)</sup>、デジタルホログラフィ<sup>20)-22)</sup>などの非接触の光学手法が開発されている。共焦点顕微鏡と光切断法は測定物体の3次元情報を取得するために、光源の走査が必要であり、動的な物体の測定は不可能である。縞投影法はプロジェクターを利用して、測定物体に縞パターンを

投影し、撮影した投影画像の解析により測定物体の3次元形状を計測する。同技術の空間分解能はパターンの投影装置に依存するため、微小領域の計測精度は低い。各手法にはそれぞれ利点と欠点があり、本稿では、高精度3次元動的計測技術を調査し、各手法の原理と特徴を述べる。特に高精度3次元動的計測が可能なホログラフィ干渉法を中心に、off-axis デジタルホログラフィ<sup>23), 24)</sup>、in-line である位相シフトデジタルホログラフィ<sup>25)</sup> 及び並列位相シフトデジタルホログラフィ<sup>26)-29)</sup> の原理と特徴を紹介する。

## 2. ホログラフィ干渉法

ホログラフィ<sup>30)</sup> は、光の干渉と回折を利用して物体から来た光の波面を記録、再生できる技術である。その光の波面を写真乾板などの感光材料に記録したものをホログラムと呼ぶ。本技術は光波の振幅と位相の情報を記録、再生することができるため、形状計測や変形計測などに応用されている。近年、CCD や CMOS などのイメージセンサの画素密度の向上により、イメージセンサでホログラムを記録し、計算機で像を再生するデジタルホログラフィ<sup>20)-22)</sup> が近年盛んに研究されている。この技術は、従来のホログラフィにおける現像処理が不要で、

\* 分析計測標準研究部門非破壊計測研究グループ

計算機で物体の振幅と位相画像を両方再生することが可能である。数十マイクロメートルの視野の場合、再生された位相画像から物体のナノメートルオーダーの面外変形を測定することができる。さらに、本技術は機械的な焦点合わせなしで任意の奥行き位置における物体の情報を定量的に評価できる3次元計測技術である。物体光と参照光の入射角度により、off-axis デジタルホログラフィと in-line デジタルホログラフィの2種類に区別することができる。

## 2.1 Off-axis デジタルホログラフィ

Off-axis デジタルホログラフィでは、参照光を物体光に対して角度を成してイメージセンサに入射させる。Off-axis デジタルホログラフィの記録の一例を図1に示す。本技術は物体の再生像、0次回折光、共役像を空間的に分離できる。そのため、記録したホログラムをフーリエ変換し、フーリエ領域で物体の像のスペクトルを抽出する。その後、抽出したスペクトルを逆フーリエ変換し、回折積分計算することにより、物体像のみを再生することが可能である。Off-axis デジタルホログラフィにより記録したホログラムから物体の像を再生するまでの流れを図2に示す。具体的な手順は下記の通りである。

- ①ホログラムをフーリエ変換する。
- ②フーリエ領域でフィルタリングして物体光の成分を抜き出す。
- ③抜き出された領域を原点に平行移動させる。
- ④逆フーリエ変換を適用する。
- ⑤回折積分計算により像を再生する。

Off-axis デジタルホログラフィでは、物体光と参照光の角度が大きくなると、干渉縞が細くなる。できるだけ細かい干渉縞を記録するために、画素サイズが小さいカメラを用いる場合が多い。また高速に動く物体を記録する時、高速度カメラを利用する。一般的に高速度カ

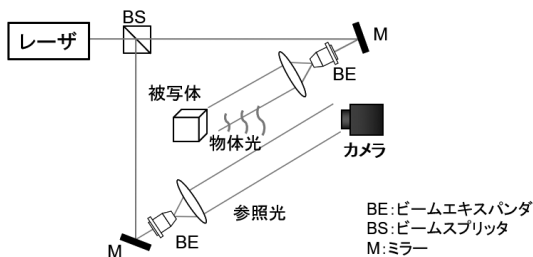


図1 Off-axis デジタルホログラフィの記録光学系の一例

メラの画素サイズは大きいいため、高速物体を記録する時、in-line デジタルホログラフィシステムがよく用いられる。

## 2.2 in-line デジタルホログラフィ

in-line 型のデジタルホログラフィでは、参照光と物体光はほぼ同じ角度でイメージセンサに入射させることから、原理的に0次回折光や共役像が不要な像として所望の像に重畳してしまう。そのため、鮮明な測定物体の再生像が得られず、高精度の計測が困難であるという問題がある。この問題を解決する手法として、位相シフトデジタルホログラフィ<sup>25)</sup>が提案されている。

### 2.2.1 位相シフトデジタルホログラフィ

位相シフトデジタルホログラフィは、位相シフトの手法<sup>25)</sup>を用いてイメージセンサ面上での物体の複素振幅分布を求め、計算機で回折現象を計算することにより、物体面の像を再生する。これにより、不要な像である0次回折光と共役像を除去して、物体の所望像だけを再生することができる。図3に位相シフトデジタルホログラフィの一例を示す。参照光側の光路中にはピエゾ素子、波長板、電気光学変調素子などの光路長を変化させる素子を挿入する。それらの素子を逐次的に変化させること

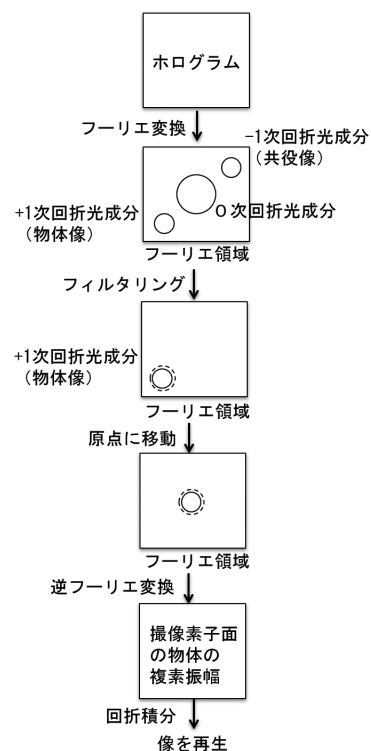


図2 Off-axis デジタルホログラフィによる像の再生の流れ

によって、参照光の位相をシフトした複数の干渉縞画像を順次計算機に取り込む。次にそれらの干渉縞画像を計算することで物体からの散乱光のイメージセンサ面上での複素振幅分布を求める。2005年に、和歌山大学の森本教授により、位相シフトデジタルホログラフィを用いた金属のナノメートルオーダーの面外変位計測が実証された<sup>31)</sup>。しかし、この技術は参照光の位相を変えた複数の干渉縞を逐次記録する必要があり、高速動画計測が困難である。この問題の解決手法として並列位相シフトデジタルホログラフィ<sup>26)</sup>が提案された。

### 2.2.2 並列位相シフトデジタルホログラフィ

並列位相シフトデジタルホログラフィ<sup>26)</sup>の原理を図4に示す。この技術は空間的に参照光の位相を変化させることで、1枚のホログラムに位相シフト法に必要な複数のホログラムの情報を記録し、物体像を再生する。これにより、従来の位相シフトデジタルホログラフィの欠点を補うことができる。この方法では、図5に示すような偏光子アレイをイメージセンサの前面に配置した偏光イメージングカメラを用いることで、ホログラムの空間分割多重記録が実現できる。記録したホログラムから像再生アルゴリズムを用いて再生像が得られる。記録された1枚のホログラムから参照光の位相シフト量が同

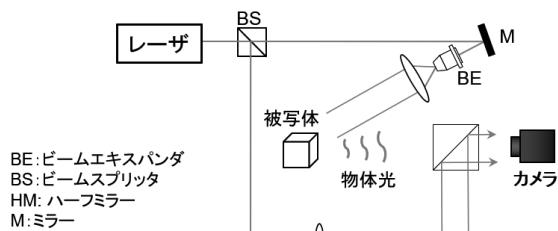


図3 位相シフトデジタルホログラフィの記録光学系

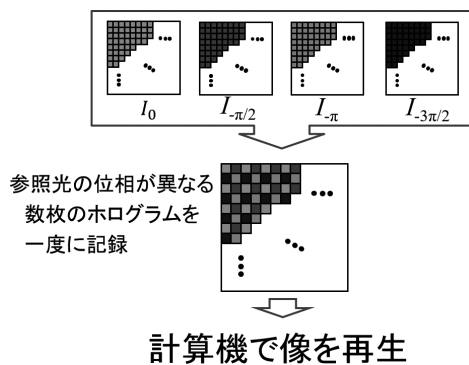


図4 並列位相シフトデジタルホログラフィの原理

じ干渉縞の情報をそれぞれ抽出する。欠落画素に対して、隣り合う全ての画素を用いて補間を施し、複数枚のホログラムを得る。得られたホログラムを用いて位相シフト法で計算処理し、計算によって得られた測定物体の複素振幅に回折計算を行うことにより、再生像を得る。

製造技術の進歩により、イメージセンサの画素毎に位相シフトのための偏光子を設けた偏光イメージングカメラが市販されている。例えば、日本国内のメーカーとして、フォトニックス社のPI110シリーズ、高速度カメラを生産するフォトロン社の高速偏光イメージングカメラPI-5とSAシリーズがある。海外のメーカーでは、米国の4Dテクノロジー社の広帯域用偏光カメラPolarCamシリーズがある。近年、多くの偏光を利用した並列位相シフトデジタルホログラフィシステムが報告されている<sup>32)-34)</sup>。この技術においては、1,000fps以上のマイクロメートルオーダーの形状計測が実証されている<sup>35)</sup>。しかし、並列位相シフトデジタルホログラフィに必要な偏光イメージングカメラは非常に高額(数百万円程度)であるため、本計測システムの普及は進んでいないのが現状である。

### 3. 他の光学計測法

形状変位計測では、光切断法、共焦点顕微鏡法、縞投影法、断層法、複眼光学システムなど、多くの非接触な光学手法が提案されてきた。しかしながら既存の技術では、全視野、高精度、高時間分解能に対する記録という要求全てを満たすことができない。

#### 3.1 光切断法

光切断法は<sup>1)-4)</sup>、スリット状の光を物体に照射し、光の投影像から三角測量の原理により物体の3次元形状を計測する手法である。スリット光の伝播方向に対して物体表面の高さにより、物体に投影されたスリット光の形状が変化する。したがって、投影された光のパターンをイメージセンサで取得すれば、三角測量の原理に基づいて物体表面の3次元形状を求めることができる。この方

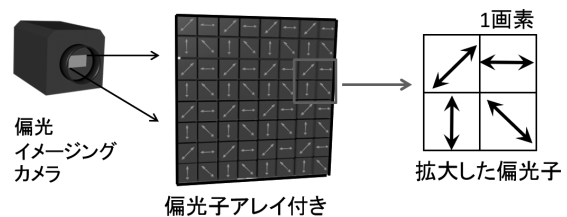


図5 偏光イメージングカメラの原理

法は物体を非接触、非侵襲で、さらにサイズの大きな物体の3次元形状計測が可能であるが、スリット光の走査により物体の3次元形状を計測するため、計測時間が長いという欠点がある。また、3次元形状計測の空間分解能および計測精度は計測対象の走査分解能およびラインレーザの幅に依存するため、微小な形状の計測の実現が困難である。

### 3.2 共焦点レーザ顕微鏡

共焦点顕微鏡<sup>5)~8)</sup>は、物体と光検出器の間のピンホールを利用して物体の3次元情報を取得する手法である。光源からの光を、顕微鏡対物レンズを通して物体へ照射し、物体からの散乱光を光検出器前のピンホールを通して検出装置で検出する。物体とピンホールとが共役な位置にある場合は、物体からの散乱光はピンホールで遮光されずに通過し、検出器において高い強度値が検出される。一方、物体がピンホールと共役な関係にない場合は、物体からの散乱光がピンホールで遮光されるため、検出される強度値は低くなる。物体に照射する光の位置を、顕微鏡対物レンズの光軸に対して垂直な面内で走査すれば、物体の奥行き位置の情報を取得できる。さらに、水平面で顕微鏡対物レンズを走査することで、物体の3次元形状情報を取得できる。本方法では一般的な光学顕微鏡より高い空間分解能が得られるが、点を走査して物体の3次元情報を取得するため、高速に動く物体へ適用することが困難である。

### 3.3 縞投影法

縞投影法<sup>9)~11)</sup>では、物体、光源、イメージセンサを予め設置し、プロジェクターから発せられる格子または正弦状の縞パターンを物体に照射し、イメージセンサで物体からの散乱光を記録する。物体の形状によって縞パターンが歪み、得られた画像に信号処理を施すことにより、シングルショットで物体の3次元形状の計測が可能である。近年では、毎秒4,000コマでの3次元形状計測が報告されている<sup>36)</sup>。しかしながら、本技術はプロジェクターの分解能に制約を受け、3次元計測の空間分解能は低いという問題がある。

### 3.4 光干渉断層法

光干渉断層法<sup>12)~15)</sup>は、可干渉距離が短い低コヒーレンス光源を利用して、物体の断層画像を取得する手法である。光源からの光を物体に照射し、物体からの散乱光と参照光とを干渉させ、その干渉縞画像をイメージセンサで記録する。光源は低コヒーレンス光源であるため、

物体からの散乱光のうち、深さ方向に可干渉距離内の光しか干渉できない。すなわち、ある深さ方向における物体の断面情報をもった物体光のみが参照光と干渉する。本方法では参照光側に配置された微動ミラーを奥行き方向に走査し、物体の3次元情報を取得できる。しかし、奥行き方向の空間分解能は光源の可干渉距離や参照光の走査の刻み幅によって制限される。更に、物体の3次元情報を取得するために走査を必要とするため、高速に動く物体へ適用することが困難である。

### 3.5 複眼撮像システム

複眼撮像システム<sup>16)~19)</sup>は、昆虫の複眼のようにイメージセンサの前にレンズアレイを配置し、複数のレンズによる視差情報を利用して、撮像された1枚の画像から物体の3次元像を再構成する。本方法はシングルショットで物体の3次元情報を記録することが可能であるが、奥行き方向の撮影範囲は視差情報の撮れる範囲までの制限があり、高い奥行き方向の高空間分解能は実現困難である。

### 3.6 各手法の比較

以上より、走査過程、複数回の撮像を必要とする光切断法、共焦点顕微鏡法、断層法では、時間分解能が低く、高速過渡現象に対する深い焦点深度での3次元動的計測が困難である。また、単一露光で3次元記録可能な技術である縞投影法、複眼光学システムでは、深さ方向の範囲、空間分解能において制約が大きい。並列位相シフトデジタルホログラフィでは、シングルショットで面外(深さ方向)ナノメートルオーダー高空間分解能の計測が実現できるが、本システムに必要な偏光イメージングカメラは非常に高額(数百万円程度)であり、計測システムの普及は進んでいない。一方、位相シフトデジタルホログラフィに必要な位相シフト装置であるピエゾ素子の性能が向上し、高速で繰り返し作動する低額なピエゾ素子が近年幅広く市販されるようになった。そのため、位相シフトデジタルホログラフィにおける毎秒数十コマの計測システムが低コストで構築することが可能になった。しかし、高分解能での3次元動的計測を行うためには、ピエゾ素子の動作精度の影響を考慮に入れた計測システムの設計と実証が課題として残されている。

## 4. まとめ

本稿では、全視野3次元計測技術を調査し、各技術の原理を紹介した。様々な分野において、ナノメートル・

マイクロメートルオーダーの3次元動的計測が要求されている。例えば生産ラインのMEMS部品の検査、電子デバイスの熱変形などがある。現在、毎秒数十コマ以上のナノメートルオーダーの3次元計測技術はホログラフィ干渉法しか存在しない。位相シフトデジタルホログラフィの測定スピードは、並列位相シフトデジタルホログラフィと比較すると約半分程度ではあるが、一般的な工業用途の要求を満たしている。さらに、システムのコストが安く、今後幅広い普及が期待できる。しかしながら、記録環境やピエゾ素子の動作精度から、正確な位相シフトが困難であり、計測システムが不安定であるという問題がある。今後の研究方針の第一歩としては、記録環境やピエゾ素子の動作精度に起因する参照光の位相ずれ量を検出し、干渉縞画像を補正することで安定な位相シフトデジタルホログラフィ計測システムの開発を行っていく。

また、ホログラフィ干渉法では、高時間分解能、高空間分解能の全視野計測の実現が可能であるが、面内空間分解能は光学顕微鏡と同様に、イメージセンサの画素ピッチと光学システムの開口数に依存するため、マイクロメートルオーダーの分解能しか実現できなかった。近年、ナノ構造や生命科学などの分野で測定物体の面内及び面外（深さ方向）の変形変位をナノメートルスケールで全視野動的計測する要求があり、同技術の開発は大きく期待されている。これまで、物体の強度画像を解析することにより、面内変位をナノメートルオーダーで測定可能なサンプリングモアレ法<sup>37)</sup>が盛んに研究されてきた。デジタルホログラフィは物体の振幅（強度）画像と位相画像を両方再生することが可能であるため、デジタルホログラフィとサンプリングモアレ法を融合することにより、面内及び面外（深さ方向）の変形変位をナノメートルスケールで全視野動的計測を実現することを目標に今後研究を展開していく。

## 謝辞

本調査研究を行うにあたり、分析計測研究部門 非破壊計測研究グループの津田浩グループ長、李志遠主任研究員、王慶華研究員から多くの助言をいただきましたことを深くお礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 井口 征士, 佐藤 宏介, “三次元画像計測,” 昭晃堂, 第5刷 (1996).
- 2) 山下 淳, 樋口 裕和, 金子 透, “光切断法による水中物体の3次元計測,” 精密工学会誌 **73**, 265 (2007).
- 3) M. Rioux, “Laser range finder based on synchronized scanners,” *Appl. Opt.* **23**, 3837 (1984).
- 4) W. Zhang, H. Zhao, and X. Zhou, “Multiresolution three-dimensional measurement system with multiple cameras and light sectioning method,” *Opt. Eng.* **49**, 123601 (2010).
- 5) K. Carlsson, P. E. Danielsson, R. Lenz, A. Liljeborg, L. Majlof, and N. Aslund, “Three-dimensional microscopy using a confocal laser scanning microscope,” *Opt. Lett.*, **10**, 53 (1985).
- 6) K. Matsuura-Tokita, M. Takeuchi, A. Ichihara, K. Mikuriya, and A. Nakano, “Live imaging of yeast Golgi cisternal maturation,” *Nature* **441**, 1007 (2006).
- 7) C. Egami, A. Ito, and Y. Liu, “Nonlinear confocal microscopy for high-resolution measurement,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **47**, 6826 (2008).
- 8) D. J. Gargas, M. E. Toimil-Molares, and P. Yang, “Imaging single ZnO vertical nanowire laser cavities using UV-laser scanning confocal microscopy,” *J. Am. Chem. Soc.* **131**, 2125 (2009).
- 9) D. M. Meadows, W. O. Johnson, and J. B. Allen, “Generation of Surface Contours by Moire Patterns,” *Appl. Opt.* **9**, 942 (1970).
- 10) M. Takeda, H. Ina, S. Kobayashi, “Fourier-Transform Method of Fringe-Pattern Analysis for Computer-Based Topography and Interferometry,” *J. Opt. Soc. Am. A.* **72**, 156 (1982).
- 11) Y. Ikeda, S. Yoneyama, M. Fujigaki, and Y. Morimoto, “Absolute Phase Analysis Method for 3D Surface Profilometry Using Frequency Modulated Grating,” *Opt. Eng.*, **42**, 1249 (2003).
- 12) D. Huang, E. A. Swanson, C. P. Lin, J. S. Schuman, W. G. Stinson, W. Chang, M. R. Hee, T. Flotire, K. Gregory, C. A. Puliafito, J. G. Fujimoto, “Optical Coherence Tomography,” *Science* **254**, 1178 (1991).
- 13) W. Drexler, U. Morgner, F. X. Kartner, C. Pitris, S. A. Boppart, X. D. Li, E. P. Ippen, and J. G. Fujimoto, “In vivo ultrahigh-resolution optical coherence tomography,” *Opt. Lett.* **24**, 1221 (1999).
- 14) T. S. Troutman, J. K. Barton, and M. Romanowski, “Optical coherence tomography with plasmon resonant nanorods of gold,” *Opt. Lett.* **32**, 1438 (2007).
- 15) R. Huber, D. C. Adler, V. J. Srinivasan, and J. G. Fujimoto, “Fourier domain mode locking at 1050 nm for

- ultra-high-speed optical coherence tomography of the human retina at 236,000 axial scans per second,” *Opt. Lett.* **32**, 2049 (2007).
- 16) 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**, 1806 (2001).
  - 17) Y. Kitamura, R. Shogenji, K. Yamada, S. Miyatake, M. Miyamoto, T. Morimoto, Y. Masaki, N. Kondou, D. Miyazaki, J. Tanida, and Y. Ichioka, “Reconstruction of a high-resolution image on a compound-eye image-capturing system,” *Appl. Opt.* **43**, 1719 (2004).
  - 18) R. Horisaki, S. Irie, Y. Ogura, and J. Tanida, “Three-dimensional information acquisition using a compound imaging system,” *Opt. Rev.* **14**, 347 (2007).
  - 19) 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**, 19367 (2010).
  - 20) J. W. Goodman and R. W. Lawrence, “Digital image formation from electronically detected holograms,” *Appl. Phys. Lett.* **11**, 77 (1967).
  - 21) M. A. Kronrod, N. S. Merzlyakov, and L. Yaroslavskii, “Reconstruction of a hologram with a computer,” *Sov. Phys. Tech. Phys.* **17**, 333 (1972).
  - 22) U. Schnars and W. Juptner, *Digital Holography* (Springer, New York, 2005).
  - 23) E. N. Leith and J. Upatnieks, “Wavefront Reconstruction with Continuous-Tone Objects,” *J. Opt. Soc. Am.* **53**, 1377 (1963).
  - 24) N. Verrier and M. Atlan, “Off-axis digital hologram reconstruction: some practical considerations,” *Appl. Opt.* **50**, H136 (2011).
  - 25) I. Yamaguchi and T. Zhang, “Phase-shifting digital holography,” *Opt. Lett.* **22**, 1268 (1997).
  - 26) Y. Awatsuji, M. Sasada, and T. Kubota, “Parallel quasi-phase-shifting digital holography,” *Appl. Phys. Lett.* **85**, 1069 (2004).
  - 27) P. Xia, T. Tahara, M. Fujii, T. Kakue, Y. Awatsuji, K. Nishio, S. Ura, T. Kubota, and O. Matoba, “Removing the residual zeroth-order diffraction wave in polarization-based parallel phase-shifting digital holography system,” *Appl. Phys. Express* **4**, 072501 (2011).
  - 28) T. Tahara, Y. Ito, P. Xia, Y. Awatsuji, K. Nishio, S. Ura, T. Kubota, and O. Matoba, “Space-bandwidth extension in parallel phase-shifting digital holography using a four-channel polarization-imaging camera,” *Opt. Lett.* **38**, 2463 (2013).
  - 29) M. Fujii, T. Tahara, P. Xia, T. Kakue, Y. Awatsuji, K. Nishio, S. Ura, T. Kubota, and O. Matoba, “A4-Sized Parallel Phase-Shifting Digital Holography System,” *IEEE/OSA J. Display Technol.* **10**, 132 (2014).
  - 30) D. Gabor, “A new microscope principle,” *Nature (London)* **161**, 777 (1948).
  - 31) Y. Morimoto, T. Nomura, M. Fujigaki, S. Yoneyama and I. Takahashi, “Deformation Measurement by Phase-shifting Digital Holography,” *Experimental Mechanics*, **45**, 65 (2005).
  - 32) T. Tahara, A. Maeda, Y. Awatsuji, T. Kakue, P. Xia, K. Nishio, S. Ura, T. Kubota, and O. Matoba, “Single-shot dual-illumination phase unwrapping using a single wavelength,” *Opt. Lett.* **37**, 4002 (2012).
  - 33) T. Tahara, Y. Lee, Y. Ito, P. Xia, Y. Shimozato, Y. Takahashi, Y. Awatsuji, K. Nishio, S. Ura, T. Kubota, and O. Matoba, “Superresolution of interference fringes in parallel four-step phase-shifting digital holography,” *Opt. Lett.* **39**, 1673 (2014).
  - 34) P. Xia, Y. Awatsuji, K. Nishio, and O. Matoba, “One million fps digital holography,” *Electron. Lett.* **50**, 1693 (2014).
  - 35) Y. Lee, Y. Ito, T. Tahara, J. Inoue, P. Xia, Y. Awatsuji, K. Nishio, S. Ura, and O. Matoba, “Single-shot dual-wavelength phase unwrapping in parallel phase-shifting digital holography,” *Opt. Lett.* **39**, 2374 (2014).
  - 36) Y. Gong and S. Zhang, “Ultrafast 3-D shape measurement with an off-the-shelf DLP projector,” *Opt. Express* **18**, 19743 (2010).
  - 37) Q. Wang, S. Ri, H. Tsuda, M. Kodera, K. Suguro, N. Miyashita, “Visualization and automatic detection of defect distribution in GaN atomic structure from sampling Moire phase “ *Nanotechnology* **28**, 455704 (2017)