

## 一から始めるデジタルホログラフィー

近年、学会や学術論文でデジタルホログラフィー<sup>1,2)</sup>に関する内容の発表が急増しており、機械工学、材料工学など他の専門分野の方々から興味をもたれ、筆者自身も質問される機会が増えました。その折に、光学系の調整、像再生アルゴリズムのソフトウェア実装など実践するまでに障害が多いと感じられるらしく、事細かく質問されることがあります。その背景には、現在詳しく書かれている雑誌は外国の図書で、専門和書<sup>3)</sup>では簡単に紹介される程度であるため、情報源に乏しいと感じられることがあるようです。そこで本稿では、初心者の方向けに、デジタルホログラフィーの一連の流れとともに、ホログラム取得時の調整方法の一例、代表的な像再生方法と望ましい撮像素子などを筆者なりに紹介したいと思います。

デジタルホログラフィーは、撮像素子を用いてホログラムを取得し、計算機で三次元像を再生する、干渉計測技術のひとつです。被写体が反射物体のときの光学系の一例を図1に示します。被写体によって光が回折、散乱した光を物体光、他方の物体を通過しない光を参照光とよびます。この2波が撮像素子面上で干渉縞の画像を形成し、これを記録しホログラムを得ます。干渉計を組む順序や具体的な組み方、干渉縞の安定度などに関しては記録乾板を用いるホログラフィーにも共通であり、詳細に記述されている著書<sup>3)</sup>がありますので、そちらをご覧

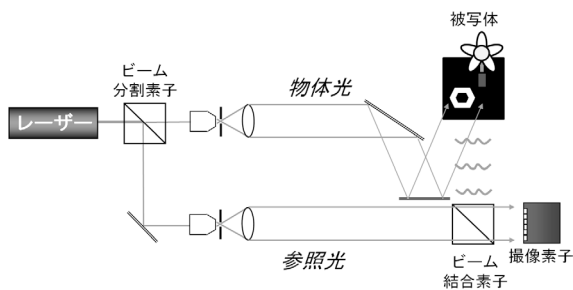


図1 デジタルホログラフィーの光学系の一例。

いただければと思います。

デジタルホログラフィーでは電子データとしてホログラムを取得することができるため、このホログラムを解析することから光学系調整にフィードバックすることが可能です。一例として、物体光と参照光の光軸を調整する場合について述べます。光学系を精度よく組めたと自分では思っている、実際には組んでからの微調整が再生像の画質のよしあしを分けます。粗面の反射物体においては、被写体の配置次第で干渉縞が細かくなったり粗くなったりします。ホログラムを見ただけでは被写体の配置は判別しにくく、とはいえホログラムごとに像を逐一再生したのでは多くの時間を要します。そこで筆者は、ホログラムを取得しフーリエ変換することで、被写体のおおよその面内方向の配置を調べています。取得したホログラムの一部を図2(a)~(c)、ホログラムのフーリエ変換画像を図2(d)~(f)に示します。2光波の軸がほぼ同一(in-lineとよばれます)であるとき、図2(a)のように干渉縞は粗くなり、このとき図2(d)に示す被写体の像、ゼロ次回折光、共役像の各成分が重なり合っています。図2(a)では軸がほぼ同一であるだけでわかりませんが、図2(d)を見ることで、どの被写体がどの位置に像再生されるかを予測することができます。同様に、

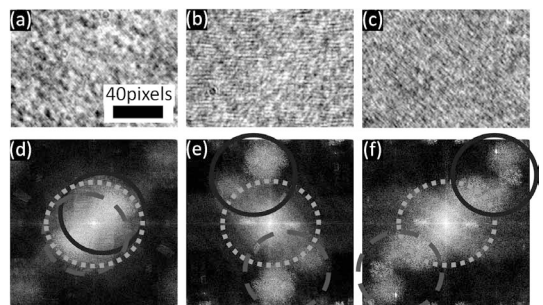


図2 ホログラムの一部とフーリエ変換画像。(a) in-line, (b) 垂直方向に off-axis, (c) 45° 方向に off-axis のときのホログラムの一部。(d)~(f) はそれぞれ (a)~(c) のフーリエ変換画像。実線は被写体の像、破線は共役像、点線はゼロ次回折光の空間スペクトル。

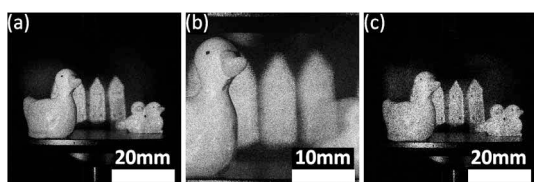


図3 画素間隔, 画素数が異なるときの再生像の一例.  
(a) 再生像, (b) (a)よりも画素間隔2倍のときの再生像,  
(c) (a)よりも画素数4分の1のときの再生像.

図2 (b), (c), (e), (f) を見ることで, 軸外し (off-axis とよばれます) によって各成分がどの程度分離し, どの程度重畳して像再生されるかが一目でわかります. この確認を踏まえて2波の光軸を微調整することで, 容易に所望の結果を得ることが出来ます. フーリエ変換は像再生でも用いられ, Image J などのフリーソフトでも可能です. また, 本稿では述べませんが, 被写体の像にゼロ次回折光と共役像が重畳すると画質が劣化します<sup>2)</sup>. その問題の解決には, off-axis デジタルホログラフィー<sup>1)</sup> にフィルタリング<sup>4)</sup> を用いる方法, 複数回の撮像を行い不要な像を除去する位相シフトデジタルホログラフィー<sup>5)</sup>, 1回の撮像で位相シフトデジタルホログラフィーを実施する技術<sup>6)</sup> などが提案されており, 目的に応じて使い分けいただければと思います.

次に, 像再生について述べます. デジタルホログラフィーでは回折積分の式より光波の逆伝搬を計算し, 任意の奥行き位置の合焦像を取得します. 回折積分の代表的な計算方法には, フレネル近似を用いる方法<sup>2,7)</sup> と, フレネル近似を用いずに厳密に計算する方法<sup>8,9)</sup> があります. 前者には, 1回のフーリエ変換だけで像再生可能な方法と2回必要な方法があり, 1回ですむ方法では逆伝搬の距離によって像再生範囲が変わるといった特徴があります. 近似のないほうがより正確な計算が可能ですが, 計算の量, 時間, 精度, 像再生範囲などを踏まえて, 撮像素子の開口よりも十分に大きな粗面被写体には, フ

レネル近似を適用して1回のフーリエ変換を行う方法がしばしば用いられます. 図3はフレネル近似し1回のフーリエ変換を行う方法による像再生結果であり, 粗面の被写体に対して, 図3 (a) と (b) の比較より, 撮像素子の画素間隔が短くなるとより広い範囲, 図3 (a) と (c) の比較より, 画素数が増えると高精細な三次元イメージング可能という特徴を表しています. とはいえ, 画素間隔が短ければ接写可能であり, 接写すれば高精細な情報を取得できるため, 画素数よりも画素間隔の短い撮像素子を優先して選ぶことをお勧めします.

以上, 一通りを述べる程度にとどまりましたが, ほかにも述べるべき内容は多くあり, 調べる際には引用した書物等を参照していただければと思います. 今回の内容が今後デジタルホログラフィーに着手しようという方に役立てれば幸いです.

(京都工芸繊維大学 田原 樹)

## 文 献

- 1) J. W. Goodman and R. W. Lawrence: "Digital image formation from electronically detected holograms," *Appl. Phys. Lett.*, **11** (1967) 77-79.
- 2) U. Schnars and W. Jueptner: *Digital Holography* (Springer, Berlin, 2005).
- 3) 久保田敏弘: 新版ホログラフィ入門 (朝倉書店, 2010).
- 4) M. Takeda, H. Ina and S. Kobayashi: "Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry," *J. Opt. Soc. Am.*, **72** (1982) 156-160.
- 5) I. Yamaguchi and T. Zhang: "Phase-shifting digital holography," *Opt. Lett.*, **22** (1997) 1268-1270.
- 6) Y. Awatsuji, M. Sasada and T. Kubota: "Parallel quasi-phase-shifting digital holography," *Appl. Phys. Lett.*, **85** (2004) 1069-1071.
- 7) T. M. Kreis, M. Adams and W. P. O. Jüptner: "Method of digital holography: A comparison," *Proc. SPIE*, **3098** (1997) 224-232.
- 8) J. W. Goodman: *Introduction to Fourier Optics* (McGarw-Hill, New York, 1996).
- 9) L. Yu and M. K. Kim: "Wavelength-scanning digital interference holography for tomographic three-dimensional imaging by use of the angular spectrum method," *Opt. Lett.*, **30** (2006) 2092-2094.