位相シフトデジタルホログラフィと最近の進展

山口 一郎, 横田 正幸

群馬大学工学部 電気電子工学科 (〒376-8515 群馬県桐生市天神町1-5-1)

Recent Advances in Phase-Shifting Digital Holography

Ichirou YAMAGUCHI and Masayuki YOKOTA

Faculty of Engineering, Gunma University 1-5-1 Tenjin-cho, Kiryu, Gunma 376-8515

(Received February 26, 2007)

Principles of digital holography and its recent advances are described. It is based on digital recording of hologram and digital reconstruction by a computer. Hence 3-d distributions of both amplitude and phase of optical fields are obtained automatically and quantitatively. Issues due to much lower resolution of CCD's than photographic materials can be overcome by an in-line setup with phase-shift of the reference beam for delivering complex amplitude of the object wave. Basic principles and applications of this method are presented for microscopy, color holography, polarization analysis, and measurement of surface shape, deformation, and vibration.

Key Words: Holography, Interferometry, Microscopy, Image processing

1. はじめに

デジタルホログラフィはホログラムを写真の代わりに撮像素子で記録し、再生を光でなく計算機で行う方法である。最初の提案は1967年にさかのぼるが¹⁾、大幅な進歩を遂げたのは、1990年以降の固体撮像素子とパソコンの大幅な高性能化と普及の後である²⁾。2000年に入ると、これらの機器の急激な進歩にいつそう触発されて論文も急増し、実用化も迫っている。本解説ではデジタルホログラフィの性能を大きく向上させた位相シフトデジタルホログラフィ³⁾を中心にして、その基本原理、3次元画像の伝送と表示、3次元顕微鏡、表面形状や変形の計測、偏光状態の計測などへの応用を述べる。

2. 基本原理

デジタルホログラフィではレーザーで作られた物体光と参照光の間の干渉パターン(ホログラム)をCCDで記録し、計算機に取り込んで回折計算を行って、3次元空間内の任意の位置での振幅と位相の値を求める。従って写真や非線形結晶などの記録材料を用いて光で再生する方法に比べ、記録感度、機動性、定量性で圧倒的に勝っている。また結像レンズのない簡便な光学系を使って、機械的な動きのない数値的な焦点調節により、振幅と位相の3次元分布が得られる。さらに2次元のホログラム情報を遠方に送信すれば、先方で3次元分布を自由に計算することができる。この意味でデジタルホログラフィは3次

元画像の生成と伝送および干渉計測に大きな転機を拓いたといえる。光学系の簡素化と解析の自動・定量化は光技術の実用化の重要な鍵となっているからである。

デジタルホログラフィの光学系にはまず写真記録の場合と同じく参照光と物体光の間に角度をつける軸外し(off-axis)配置が用いられた。これはホログラムから回折される3種類の光波を互いに横方向に分離させるためであった。しかしCCDの解像度は2画素分で10 μm 前後とホログラフィ乾板に比べて約2桁低いので、角度を数度以下に抑えることが必要となるので物体の大きさが著しく制限される。また再生像には0次像と共役像が同時に生じて一定の画素領域を占めるため、基本的にはCCDの全画素数の1/9が所要の物体像に使われるに過ぎない。これに対して位相シフトデジタルホログラフィでは同軸(in-line)の配置を使ってホログラムの空間周波数を低く抑える。ただしそのままの再生では0次像と共役像が重なってくるのでそれを消すために、参照光の位相をシフトさせて、少なくとも3枚のホログラムを記録して物体光の複素振幅を求める。ホログラフィの発明動機である光の複素振幅が求められないという事情が、計算機とデジタル干渉技術の進歩によっていま解消されたということもできる。この方法によれば全画素数が再生像に使われるために、より良好な画質が得られる。

鏡面やレンズの検査に使われているデジタル干渉法との関係でいえば、軸外しホログラフィに対応するのがフーリエ変換法であり、本法が位相シフト法に対応する。また従来の干渉計測が撮像素子に共役な平面上での

Fig. 1 Setup for phase-shifting digital holography.

位相分布からその面に近接する鏡面の形状を求めたのに対し、デジタルホログラフィでは3次元空間内の波動伝搬も考慮して任意の面上の振幅と位相の分布を与える。

2.2 ホログラムの記録

位相シフトデジタルホログラフィの基本的な記録配置をFig. 1に示す。

ピエゾ鏡を動かして、 $\pi/2$ ずつ位相シフトを与えたホログラムを少なくとも3枚記録し、コンピュータに入力して物体光の複素振幅分布を求める。これに回折積分であるFresnel変換を施すとCCD面から任意の距離にある平面上の複素振幅分布が得られる。すなわち各点の振幅と位相の値を知ることができる。従来の干渉縞解析では撮像面での位相分布しか求められなかったのが3次元空間内の分布まで得られるのが大きな特長である。

2.3 数値的像再生

フレネル変換の数値計算には高速フーリエ変換 (FFT) が使われる。ここでフレネル変換の積分式をフーリエ変換と見做すか、あるいは畳み込み (Convolution) 積分と見做すかによって、FFTの使用回数が変わってくる。前者では1回、後者では2回となる。前者をSingle FFT (SFFT)、後者をDouble FFT (DFFT)法と呼ぶことにする。SFFT法の再生像のサンプル間隔は波長と再生距離に比例するので、CCDから離れた物体ほど大きく再生される。これに対してDFFT法でのサンプル間隔は再生距離によらず、常にCCDのピッチに等しい。したがってSFFT法はCCDから離れた物体に適し、DFFT法は近い物体に適している。これらの関係をFig. 2に示す。 Z_c より小さい距離ではDFFT、より大きい距離ではSFFTを用いる。

Fig. 2 Sampling pitches for reconstruction algorithms.

3. 結像性能

ホログラフィは2段階の結像となっている。通常の結像におけるレンズの役割を果たすが、ホログラムを記録するCCDということになる。従ってデジタルホログラフィの解像限界を決めるのはCCDの大きさである。いっぽう物体の大きさを制限するのは、CCDの画素ピッチである。なぜならCCD上でもっとも細かい干渉縞のピッチは波長をそこからの物体見込み角で除した値に等しく、それが2画素分より大きいときに干渉縞は解像される。これより物体の大きさを解像限界で除した物体の分解点数は、CCDの画素数に等しくなることがわかる。ただし軸外し配置の場合の解像点数はこの値の1/3となる。この値は1方向に対するものであり、2次的には1/9となる。

デジタルホログラフィの焦点深度はレンズ系との類推により波長をCCDの開口角の2乗で除した値になる。

記録の階調数の効果は撮像素子のダイナミックレンジやメモリーや伝送容量と関係するので重要である。位相シフトデジタルホログラフィにおけるホログラム記録のビット数の影響⁴⁾、および複素振幅データのビット数が再生像の質に及ぼす影響が実験的に調べられ、拡散物体では3ビット程度でも良いことがわかった⁵⁾。さらに拡散物体では3ビット以上の位相情報だけでも満足な像が再生できることがわかった。

4. 顕微鏡

通常の光学顕微鏡で3次元物体を観察する際には、レンズの焦点を機械的に調節する必要がある。このため、生物などの動的な物体の観察は制限された。デジタルホログラフィでは数値的焦点合わせによって任意の位置での振幅と位相の分布が再生される。また通常の顕微鏡では観察できない透明物体も位相分布を再生することによって定量的に解析できる。

顕微鏡のための配置としては対物レンズを使いその焦点外れ像を記録する方法⁶⁾と、結像レンズを使わずに球面参照光を用いる方法⁷⁾ (Fig. 3)がある。後者においては参照光の波面の曲率が再生における結像レンズの働きを果たしている。CCDからの参照点光源の距離と物体の距離を等しくとることによって、ホログラムの空間周波数を低く抑えている。

Fig. 3 Setup for 3-d microscope using phase-shifting digital holography.

Fig. 4 Recording setup of color digital holography.

分解能は顕微鏡対物レンズや撮像素子の径で決まる理論値が得られている。

5. カラー像

従来のカラーホログラフィでは3波長のホログラムをそれぞれ別々に記録しそれを合成する必要があった。位相シフトデジタルホログラフィでは3波長を発振するレーザーとカラーCCDを使って1回でホログラムを記録する。再生計算はそれぞれの波長で行ない、合成する^{8,9)}。その際に波長感度などの補正を自由に施すことができる。用いた光学系をFig. 4に示す。この場合波長の相違による位相シフト誤差が懸念されるが、ほとんど無視できることが数値解析の結果により示された。またSFHT法による再生で生ずる波長による像のサンプル間隔のずれを補正するアルゴリズムが提案されている¹⁰⁾。

6. 偏光状態の分布像

参照光に偏光を用いることによって、それと同じ偏光の物体光の振幅と位相を求めることができる。直交する直線偏光成分の振幅比と位相差から物体各点の偏光状態が求められる。軸外しの配置において直交偏光の参照光を2方向から同時に入射させてそれぞれのホログラムを記録し、再生像が異なる位置に生ずることを利用して、物体の各部分の偏光状態の分布を求める方法が最初に提案された¹¹⁾。しかしこの方法では光学系が複雑になり、また二つの再生像の間の位置合わせが必要となる。これら

Fig. 5 Arrangement of polarization digital holography.

Fig. 6 Reconstructed amplitude of a quarter wave plate (a) and analyzed distribution of polarization (b).

の問題を解決するため、Fig. 5に示すように、参照光の一つにしてその偏光をファラデー効果を使った光ファイバー偏光変調器によって切り換える方法を考えた¹²⁾。ただし2回の露光の間に生ずる位相のドリフトを補正するために、物体の一部を偏光状態が既知の参照領域として用いることにより、測定精度を上げることができた。Fig. 6は1/4波長板の再生像と偏光分布で、左下を物体のない参照部としている。ここでは軸外し配置を採用した。

7. 表面形状と変形・振動の測定

7.1 表面形状の測定

デジタルホログラフィの数値的な位相再生機能は従来の干渉計測の目的を直接的に満たしている。従来の干渉計では物体を撮像素子上に結像するためのレンズが必要であったが、デジタルホログラフィではFig. 7に示すようにそれが不要なので光学系が簡単になる。これは液面形状の測定にもちいられた¹³⁾。

粗面の場合は反射波面には不規則な表面粗さによる変動が加わり、生ずる拡散反射光の振幅と位相は空間的に不規則に変動し、鏡面の場合のような規則的な干渉縞は生じない。表面粗さをならして得られる粗面の形状を求めるためには、表面粗さによる波面の細かい変動を除去する必要がある。そのためには物体照射光の入射角^{14,15)}または波長^{16,17)}を変える前後でホログラムを記録し、再生される位相の差をとる。こうして粗面の巨視的な形状の等高線が得られる。2入射角法による等高線感度は、高さの基準面に対する入射角を θ 、その変化を $\Delta\theta$ で表すと $\Delta h = \lambda/2\sin(\Delta\theta/2) = \lambda/\Delta\theta$ で与えられる。したがって角度変化を

Fig. 7 Measurement of liquid surface by phase-shifting digital holography.

Fig. 8 Contouring by dual wavelength phase-shifting digital holography.

1 degとすると40 μm の等高線感度を得る。この感度は2光束干渉縞の投影による等高線と等しい。いっぽう2波長法では $\Delta h = \lambda^2 / 2\Delta\lambda$ の等高線感度となり、半導体レーザーのモードホップで0.5 nmの波長差を得たときの感度は400 μm に等しい。Fig. 8にその配置を示す。

表面形状測定では等高線の基準面の方向が重要である。

Fig. 9 Results from surface shape measurement using dual wavelengths method. (a) Intensity and (b) phase of the reconstructed image. (c) Wrapped and (d) unwrapped phase difference. (e) 3-d display of shape.

2入射角法では基準面に対し常に斜入射をとる必要があり、得られる位相差からは基準面の傾きの分を引き去って はじめて視線に垂直な等高線が得られる。しかし二波長法においては基準面に垂直な入射光を使えるので、解析が容易でありしかも影のできる心配がない。この方法は従来の格子投影法や縞投影法が適用しにくい奥行き深い物体に適している。それらでは投影された格子像または縞の一部が焦点外れによってぼけてしまうからである。

干渉計測においては、差し引き後の位相変化が 2π を超える位置で0に戻るの、そこから 2π の値を加える位相接続が必要である。位相接続は縞解析で必ず必要となる手続きであるがノイズの影響を受けやすい。このため位相値の信頼性は振幅値が高いほど高まることを考慮して、位相接続の道筋を振幅値の積の値が最大になる方向に選ぶアルゴリズムが用いられる。Fig. 9に実験結果を示す。

7.2 変形測定

粗面が変形を受けるときの、表面各点の変位の等高線はホログラフィ干渉法やスペックル干渉法によって観察される。この場合の等高線感度は波長程度である。デジタルホログラフィでは変形前後の再生位相の差をとればよい、縞解析は位相接続だけとなって、簡単になる。しかもホログラフィ干渉法のように再生像を撮影する必要もない。光電的な記録を用いるスペックル干渉法と比較すると、結像レンズが不要なのでマイクロマシンのような顕微鏡的な小型物体や深い物体への適用が容易である。また形状と変形が同じ光学系で測定でき、3次元物体の応力解析への応用や有限要素法による計算結果との比較が容易である。これらの過程においては測定と解析が一体化され、必要なデータを得るまでの時間も短縮される。また光通信ネットワークを使って複素振幅分布を遠隔地に送り、そこで3次元分布を解析することもできる。

7.3 振動解析

物体が正弦振動する場合にはFig. 10の配置を使って参照光の各位相でホログラムを時間平均露光して複素振幅を求め、再生すると時間平均露光ホログラムからの再生像と同じ分布が得られる。すなわち振幅の値は振動振幅の0次Bessel関数で与えられる¹⁸⁾。再生位相の分布を使うと、Bessel関数の零点の位置を高分解能で求めることができ、

Fig. 10 Vibration analysis by phase-shifting digital holography.

Fig. 11 Shape and deformation measurement of larger object by image phase-shifting holography.

振幅の測定分解能が向上する。また光ファイバ位相変調器を使って、振動周波数で位相変調を与えると、大振幅も測定できるようになる。

8. 物体サイズの拡大

位相シフトデジタルホログラフィで撮影できる物体の見込み角は λ/p と与えられる。ただし p は撮像素子の画素ピッチである。したがって数十cmの距離に置いた物体の大きさは数cm以下に限られる。これを拡大するにはFig. 11のような結像配置を取ればよい。すなわち物体の縮小像をCCD上に結び、参照光と重ね合わせる。これはイメージホログラフィと呼ばれている配置である。この場合の像再生にはDFFT法を用いる。これにより大きな物体の形状と変形を測定できる¹⁹⁾。この配置はスペックル干渉計と同じであるが、数値的再生の機能により3次元物体の測定が可能なのが特徴である。

9. おわりに

デジタルホログラフィの機能を向上させた位相シフトデジタルホログラフィの原理と特長、3次元顕微鏡、カラー像の記録と再生、偏光解析、表面形状と変形の測定への応用を述べた。デジタルホログラフィにより、

従来のホログラフィの最大の問題であった写真記録の手間と定量的な自動測定の困難が一挙に解決された。現在の所要時間は3枚の干渉パターンの記録時間に合計1秒以下、1枚の像の再生時間に1秒以下となっており、写真のホログラフィを十分に凌駕している。また撮像素子の感度の向上も実用化のための追い風となっている。問題はCCDの画面サイズが小さいために記録できる物体サイズがCCDからの角度にして数度以下に限られることである。したがってもっとも適した応用は3次元的小型部品や生物の形状や動作試験や外部刺激に対する反応の解析であろう。しかしサイズに対する制限は結像レンズの導入により緩和することができる。また複素振幅分布を空間光変調器に入力して、レーザー光をあて、3次元像を実時間再生することもできる²⁰⁾。いずれにしても現在のCCDの素子数と感度の増大、コンピュータの高速化とメモリの増大によりデジタルホログラフィの実用の可能性はますます高まっていくであろう。

参考文献

- 1) J. W. Goodman and R. W. Lawrence: Appl. Phys. Lett. **11** (1967) 77.
- 2) U. Schnars and W. P. O. Jüptner.: Appl. Opt. **33** (1994) 4373.
- 3) I. Yamaguchi and T. Zhang: Opt. Lett. **22** (1997) 1268.
- 4) G. H. Mills and I. Yamaguchi: Appl. Opt. **44** (2005) 1216.
- 5) I. Yamaguchi, K. Yamamoto, G. A. Mills, and M. Yokota: Appl. Opt. **45** (2006) 975.
- 6) T. Zhang and I. Yamaguchi: Opt. Lett. **23** (1998) 1221.
- 7) I. Yamaguchi, J. Kato, S. Ohta, and J. Mizuno: Appl. Opt. **40** (2001) 6177.
- 8) I. Yamaguchi, T. Matsumura, and J. Kato: Opt. Lett. **27** (2002) 1108.
- 9) J. Kato, I. Yamaguchi, and T. Matsumura: Opt. Lett. **27** (2002) 1403.
- 10) F. Zhang, I. Yamaguchi, and L. P. Yaroslavsky: Opt. Lett. **29** (2004) 1668.
- 11) T. Colomb, P. Dahlgren, D. Beghuin, F. Cuche, P. Marquet, and C. Dipeursinger: Appl. Opt. **41** (2002) 27.
- 12) M. Yokota, Y. Terui, and I. Yamaguchi: Opt. Rev. **13** (2006) 405.
- 13) I. Yamaguchi, O. Inomoto, and J. Kato: *Fringe 2001, The 4th Int. Workshop on Automatic Processing of Fringe Patterns, Bremen, 2001* (Elsevier, 2001) p. 365.
- 14) I. Yamaguchi, J. Kato, and S. Ohta: Opt. Rev. **8** (2001) 85.
- 15) I. Yamaguchi, S. Ohta, and J. Kato: Opt. Lasers in Eng. **36** (2001) 417.
- 16) I. Yamaguchi, T. Ida, M. Yokota, and K. Yamashita: Appl. Opt. **45** (2006) 7610.
- 17) 井田 登士, 山口 一郎, 横田 正幸: 光学 **35** (2006) 596.
- 18) F. Zhang, J. D. R. Valera, I. Yamaguchi, M. Yokota, and G. Mills: Opt. Rev. **11** (2004) 297.
- 19) I. Yamaguchi, J. Kato, and H. Matsuzaki: Opt. Eng. **42** (2003) 1267.
- 20) O. Matoba, T. J. Naughton, Y. Frauel, N. Bertaux, and B. Javidi: Appl. Opt. **41** (2002) 6187.

レーザーワード

ホログラフィ (holography)

コヒーレント光を二つに分けて一方を参照光、他方を物体光として再び重ね合わせて生ずる干渉縞を写真乾板に記録しホログラムを作る。ホログラムに参照光だけをあてると、干渉縞による回折により物体光が再生され、ホログラムの奥に、まるで実物があるかのように観察される。基本原理は1948年にD. Gaborにより発明されたが水銀灯の可干渉性の不足と同軸配置による共役像の出現の

ため、良質の像は得られなかった。1960年代の前半にE. N. Leith and J. Upatniecksのレーザーを用いた軸外し法、およびY. Denisyukの体積型記録法の提案によって良好な再生像が得られたために、一躍注目が高まった。これまでに3次元像のディスプレイ、計測、光学素子、情報処理、セキュリティなどに広く使われている。

(山口 一郎)