ディジタルホログラフィの最近の進展

横田 正幸

島根大学 総合理工学研究科 (〒690-8504 島根県松江市西川津町1060)

Recent Progress in Digital Holography

Masayuki YOKOTA

Shimane University, 1060 Nishikawatsu-cho, Matsue, Shimane 690-8504

(Received August 19, 2013)

Digital holography is a technique in which an interference fringe pattern called a “hologram” is captured by a digital camera, and then it is reconstructed by calculating the Fresnel diffraction integral on a computer. Recently, many kinds of holographic applications, such as holographic interferometry, three-dimensional display, and microscopy, are being investigated in many fields. This paper reviews recent progress in digital holography and introduces some developments for industrial applications.

Key Words: Digital holography, Phase shifting method, Microscopy, GPU, Infrared

1. はじめに

1948年にD. Gaborによって発明されたホログラフィ¹⁾は、写真乾板に記録した干渉縞(ホログラム)にもう一度光を当てて3次元像を再生する技術である。その後、計算機の計算処理能力の向上やCCD(Charge Coupled Device)等の撮像素子の開発により、1994年にはホログラムをCCDで軸外し記録し、計算機で数値的に像再生する手法がSchnarsらにより報告されている²⁾。このようにディジタルカメラでホログラムを記録し、計算機で像再生するホログラフィは、今日ではディジタルホログラフィと呼ばれ、多くの周辺技術の発達やディジタル信号処理との融合により幅広い分野で多くの研究者により研究されるに至っている^{3,4)}。

現在ではホログラム記録に必要な光源の波長も紫外から遠赤外、THz領域にまで及び、撮像素子の受光範囲も同様な領域にわたっている。また、ディジタルホログラムの数値的再生では、計算機の処理能力向上に加え、画像処理用の演算素子(Graphics Processing Unit: GPU)の発展により並列計算処理が実行でき、像再生以外にも様々なポストプロセス処理の高速化が可能になっている。このように発展著しいディジタルホログラフィは、その応用分野が非常に広く多岐にわたる。よって、ここでは主に物体光の波面記録方式や遠赤外線的应用を含めた計測への応用を中心として、ここ数年のディジタルホログラフィの発展について紹介し、今後の展望について述べる。

2. 新しい位相シフト法

Fig. 1の光学系で、物体からの反射光と参照鏡からの反射光を同軸方向からCCDに入射し、生成した干渉縞を記録する。記録した画像データからFresnel回折積分を計算して像再生する場合、通常は0次光や共役像も一緒に再生される²⁾。この時、ピエゾ(PZT)鏡により参照光に一定の位相シフトを導入する位相シフト法を用いると、Fig. 2に示す1円硬貨の再生像のように物体光の振幅

Fig. 1 Setup for phase-shifting digital holography.

(a) Intensity image (b) Phase image

Fig. 2 Reconstructed images.

(強度)や位相のみが得られる。この再生像の振幅や位相の数値データを用いることで様々な計測が可能になる。しかし、ピエゾ鏡等により参照光の位相を一定量シフトさせてホログラムを記録する方式では、位相シフトに時間を要するためホログラム記録時間の制約から運動物体への適応は制限される。この欠点を克服するため、一度のホログラム記録で必要な位相シフトホログラムを得る1ショット位相シフト法がいくつか提案されており、運動物体への適用や超高速物理現象の記録などへ展開されている。

2.1 並列位相シフト法

ホログラムを記録するカメラの各画素に 2×2 画素を単位として異なる方位の偏光子を配置し、各画素で異なる位相シフト量のホログラムを取得する並列位相シフト法がAwatsujiらにより提案されている⁵⁻⁸⁾。この手法により1枚のホログラム記録で位相シフト法に必要なホログラム情報が得られるため、カメラのフレームレートでの測定が可能になる。

並列位相シフト法を用いて、対向したノズルから噴射されるガス流により生じる位相変化を180,000 fpsで超高速撮影した例⁶⁾や、フェムト秒レーザーのパルス光を用いて超高速撮影し、3次元情報の取得に成功した例が報告されている⁷⁾。並列位相シフト法の場合、ホログラムを空間分割多重記録するため像再生時に高空間周波数成分の一部を破棄したり、0次光や共役像が完全に除去できない問題があった。これを解消するためにフーリエ解析を用いた新しい再生アルゴリズムが提案され、空間周波数領域で共役像を除去している⁹⁾。

2.2 ランダム位相シフト法

並列位相シフト法ではカメラの画素毎に偏光子や波長板が必要になる。このような特殊なカメラを用いない1ショット位相シフト法として、参照光にランダムな位相光を用いる方式がNomuraらにより提案されている^{10,11)}。この方式では拡散板の透過光を参照光とすることで、カメラの撮像面に生じるスペックルパターンが持つランダムな位相分布を用いる。撮像面の 2×2 の画素上において参照光の強度が一定であると仮定し、あらかじめ平面波を参照光と干渉させて参照光の位相分布を求めておくことで、参照光の振幅、位相情報を基に 2×2 画素を1単位として物体光の複素振幅が求められる。参照光の個々のスペックルサイズが撮像素子の画素の大きさに近い場合に再生像の画質が向上することが報告されている。

さらに、物体光の情報を得るための計算アルゴリズムが改良され¹¹⁾、参照光の振幅、位相をあらかじめ位相シフト法により求めておくことで、より高精細な再生像を得ることに成功している。

2.3 Talbot効果を用いた位相シフト法

2次元格子のFresnel回折像中に生じるTalbot効果を利用して参照光の波面分布内に周期的な位相分布を持たせる

ことにより、位相シフトホログラムを空間分割多重記録する方式がMartinezらにより提案されている¹²⁾。この方式では、 $0, \pi/2, \pi$ ラジアン²⁾の2次元周期的な位相分布が得られるように間隔を設計した2次元格子を参照光路中に挿入し、カメラの撮像面でFresnel像が得られるように配置する。このような位相分布を持つ参照光と物体光を干渉させてホログラム記録することで、並列位相シフト法と同様に位相シフトホログラムが空間分割多重記録できる。数値計算と実験によりその有効性が確かめられている。

さらに同手法を拡張し、光源の波長を赤(R)、緑(G)、青(B)と多重化し、Fresnel像が波長により異なる位置に形成されることを考慮して位置を調整した3CCD型のカラーカメラによりカラーデジタルホログラフィが実現されている¹³⁾。この手法により1ショット位相シフト法だけでなく、1ショットカラーホログラフィも実現されている。

2.4 Doppler位相シフト法

上記のように位相シフトホログラムを空間分割多重記録する方式に加えて、Baradaらは参照鏡を一定速度で移動させることで生じるドップラー効果を利用したDoppler位相シフト法を提案している¹⁴⁻¹⁶⁾。この方式では500 fps以上の高速カメラを用いて一定時間間隔で高速記録したホログラムから、時間周波数領域において物体光の情報を取り出すことができる。この方法で光源の波長を多重化した場合、ドップラー効果が波長に依存するため、時間周波数領域でそれぞれの波長で記録したホログラム情報が分離可能であり、多波長化が容易になる利点を有している。

同研究グループでは、これに2波長法を組み合わせた形状計測法¹⁵⁾や3波長によるカラーデジタルホログラフィ¹⁶⁾も実現している。参照鏡の移動は一定速度でなくてもよく、振動などによっても同手法が適用できることから、1ショット位相シフト法と同じく耐環境性に優れた手段といえる。

以上の位相シフト法を比較すると、Table 1に示すような特徴を持っていることが分かる。今後の発展が期待される。

Table 1 Comparison of phase-shifting methods.

Method	Feature	Applicability
Parallel phase-shifting	Special camera is required (1-shot recording)	Both dynamic and static objects
Random phase-shifting	Reference wave with random phase (1-shot recording)	Both dynamic and static objects
Talbot effect phase-shifting	Reference wave with periodical phase map by Talbot effect (1-shot recording)	Both dynamic and static objects
Doppler phase-shifting	Moving reference mirror and Doppler effect	Static object

3. 記録波長域の拡大

近年では撮像素子として中・遠赤外線領域に感度を持つものが入手可能になり、発振波長 $10.6\text{ }\mu\text{m}$ の CO_2 レーザーを光源に使用したデジタルホログラフィの研究が進展しつつある¹⁷⁻²³。 CO_2 レーザーの波長は、可視光に比べて10倍以上の長さがある。これより撮像素子として良く用いられるパイロビジコンカメラやマイクロボロメータアレイの画素サイズが $25\text{ }\mu\text{m}$ 程度であるとしても、結果的に可視光の場合と比べて5~10倍程度大きな物体を対象としたホログラム記録が可能になる。

この分野ではFerraroらが精力的に研究を進めている。高さ 33 cm のブロンズ像を記録対象とし、光源に CO_2 レーザーを使い 640×480 ピクセルのASiサーマルカメラで記録したデジタルホログラムの再生を、空間光変調器と波長 $0.532\text{ }\mu\text{m}$ のDPSSレーザー光を使って実時間で行う方式が提案された¹⁷。最近では、炎の背後にいる人物を検出する実験結果が示されている¹⁸。通常の赤外線カメラでは、炎から生じる赤外線により背後の物体は全く見えないが、 CO_2 レーザーと50 fpsの高速マイクロボロメータアレイカメラを用いたデジタルホログラフィにより背後にいる人物の再生像が得られている。レーザーの長波長を活かして人物サイズの撮影に成功している点や、炎や煙の背後にいる人物を可視化した点で興味深い結果である。

近年では、 CO_2 レーザーを用いた遠赤外デジタルホログラフィに加えて、より周波数の低いテラヘルツ (THz) 光を用いたデジタルホログラフィに関する報告も増えている¹⁹⁻²⁰。 CO_2 レーザー励起によるTHzレーザーにより発振波長 2.52 THz のTHz光を得て、同軸配置によりGaborホログラムを記録した例がXueにより報告されている¹⁹。この場合、テフロン基盤上に設けた金属のストライプを物体として、 124×124 ピクセルのパイロカメラによりホログラム記録を行い、再生像の分解能 0.2 mm を得ている²⁰。今のところ CO_2 レーザーとマイクロボロメータアレイカメラの組み合わせを用いた遠赤外デジタルホログラフィは報告例が多くはないが、光源や撮像素子がさらに普及するにつれてこの分野の報告例も多くなると予想され、応用分野も広がるであろう。

4. 計測への応用展開

4.1 形状計測

デジタルホログラフィック干渉法を用いて物体の形状や変形を計測する手法は多くの研究者により報告されてきた。主な手法として、物体の照明方向や照明光の波長を多重化することで、それぞれの照明方位や波長に対する再生像の位相差から物体の等高縞を得るものである。例として、二つの波長 $0.65744\text{ }\mu\text{m}$ と $0.65795\text{ }\mu\text{m}$ で記録したホログラムの再生像の位相差から得られた100円玉の形状計測結果をFig. 3に示す。通常はFig. 3(a)に示すようにスペckルノイズが重畳されるが、フィルタ処理することでFig. 3(b)のような結果が得られる。さらに

Fig. 3 Profile measurement for a coin.

位相接続処理を施すと、Fig. 3(c)のような3次元形状が得られるので、様々な工業計測に応用できる。

照明方向を多重化する方式として、偏光イメージングカメラと軸外し記録を使い、照明方向の異なる2つの光を偏光により分離する1ショットホログラム記録により形状計測を行う手法がTaharaらにより提案されている²¹。また、照明方向ではなくホログラムを受光するカメラ位置を多重化して形状計測を行う手法がSchwedeらにより提案されている²²。この方式では、4台のカメラを異なる位置に配置してホログラム記録することにより、デジタルホログラフィと立体写真計測を組み合わせることで物体の3次元変位ベクトルを求めている。

これに対して、照明光の波長を変化させてホログラム記録を行う二波長法による形状計測は、多くの研究者が採用している²³⁻²⁸。物体照明光に二波長 λ_1, λ_2 を用いた場合、二波長に対する再生像の位相差から得られる等高縞は、Fig. 3のように二波長の合成波長 Λ によって得られる。この時、 Λ は次式で与えられる

$$\Lambda = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{|\lambda_1 - \lambda_2|} \quad (1)$$

ので、波長差が小さいほど大きな合成波長が得られ、より大きな物体や段差の測定が可能になる。最近の研究では、軸外し記録を用いて照明光の波長に対して軸外し角度を多重化し、二波長に対して1ショット記録をする手法が多く採用されている。この場合、1回のホログラム記録で二波長に対する再生像が得られるため、動的な物体に対する形状計測が可能になる。

Fuらは振動する板の計測にこの手法を適用して板の変形を測定している²³。また、Tankamらは赤色と緑色のレーザーを用いて、これを軸外し多重記録することでカラー画像を得ている²⁴。像再生時のFresnel回折積分の計算において、一回のフーリエ変換で行う場合に生じる再生像の大きさの違いを、ホログラムに0パディング処理を施すことで解消する手法を提案している。応用として、実装されたコンデンサの欠陥により生じた回路基板

の変形を測定し、電子部品の検査を行っている。

二波長法に対して使用する波長をさらに多重化すると、幅広い合成波長が得られるので形状計測のダイナミックレンジを拡大することができる。Carlらは外部共振器型の半導体レーザーを波長可変光源として使用し、これにより30 mm以上の長さの合成波長を得て、位相シフトデジタルホログラフィにより金属部品の形状計測を行っている²⁵⁾。大きな合成波長を得る場合、二波長の差をできる限り小さくすることが必要になる。この時、それぞれの波長誤差が合成波長に大きく影響し、結果的に計測誤差が大きくなってしまう。この論文では、参照光路中の一部に位相物体(BK7ガラス)を挿入し、ガラスを通った部分と通らない部分を再生像中に設けることにより、この部分の位相差を用いて合成波長を自動補正する手法を提案している。また、形状計測の結果を得るまでの像再生や上記の自動補正計算にGPUを用いることで計算処理の高速化を図っている。

このように多波長による形状計測では所望の波長が得やすいことから外部共振器型半導体レーザーを用いる例がよく見られる。Ishiiらも外部共振器型半導体レーザーを光源とした多波長デジタルホログラフィにより大型物体の形状計測を行っている²⁶⁾。また、既知の大きさの段差を用いることで合成波長の補正を行う手法も提案している。Yokotaらは通常の半導体レーザーを用いて注入電流により発振波長を変化させる手法により多波長を得て、パイプ内の形状計測と検査を行う手法を提案している^{27,28)}。

4.2 ホログラフィック顕微鏡

赤血球等の観察や微小物体を対象とした顕微鏡への応用も精力的に行われている。水中で光ピンセットによりトラップされた粒径200 nmのポリスチレン球の3次元位置を、低コヒーレンスin-lineデジタルホログラフィにより計測する手法がSatoらにより報告されている^{29,30)}。従来はテンプレートマッチングを用いてサブピクセル精度で2次元の位置推定を行っていたが²⁹⁾、これを軸方向にも適用し3次元位置をサブピクセル精度で推定することに成功している³⁰⁾。

生体への応用として、チューブ中を流れる赤血球のGaborホログラム再生像から、赤血球の速度ベクトルや軌道、空間分布などを調べる手法がChoiらにより報告されている^{31,32)}。この他にも赤血球の形状を分類し、その球度、乾燥質量、ヘモグロビンの密度などを推定する手法がMoonらにより報告されている³³⁾。

4.3 その他の応用

上記以外でも多くの分野でデジタルホログラフィの研究が精力的に行われている。赤(R)、緑(G)、青色(B)のレーザーを用いるカラーデジタルホログラフィにおいて、黄色(Y)のレーザー光を追加して4波長を用いてホログラムを記録し、スペクトル推定を行うことにより再生像の色再現性を向上させる手法がItoらにより報告されている³⁴⁾。塗装面からの反射光を位相シフト

デジタルホログラフィにより逐次記録し、隣接した記録時間における再生像の位相変化から塗料の乾燥状態を推定する手法がYokotaらにより報告されている^{35,36)}。塗料乾燥を非接触で定量的に評価でき、透明なクリア塗料に対しては重量測定と組合せることで蒸発して失われた溶剤の密度推定が可能であることも報告されている。

照明光の届かない物体の死角からは情報を得ることが難しい。そこで柔軟性のあるプラスチック(Plastic Optical Fiber: POF)イメージファイバを用いてホログラムを伝送する方式が提案されている³⁷⁾。USAFテストターゲットを物体として再生像の評価が行われ、7.0 lp/mm程度の分解能が得られている。

5. GPUの応用

GPUを汎用計算に使用する試みが様々な分野で行われており、デジタルホログラムの再生計算等にも適用される例が増えている。赤、青、緑色の3つのレーザーを用いたカラーデジタルホログラフィにおいて、ホログラムの再生計算とリサイズのためのポストプロセスにGPUを用いることで、計算時間をCPU単体による場合の70分の1程度に高速化した例がKowalczykらにより報告されている³⁸⁾。また、軸外し配置によるヘテロダインホログラフィにおいて、1024×1024ピクセルのホログラム再生計算以後のポストプロセスにGPUを使用し、24 fpsで結果表示を行う手法がSamsonらにより報告されている³⁹⁾。

今後もデジタルホログラフィを用いた計測において、その像再生やポストプロセスを含む結果表示にGPUを利用する例が増えると推測される。

6. まとめと今後の展望

近年、撮像素子の画素数の増加や高速化、光源や受光波長域の拡大、コンピュータの計算処理能力の向上やGPUの性能向上など、デジタルホログラフィを取り巻く環境は発展が著しい。これらの新規デバイスの導入や、従来からある干渉計測技術との融合が、デジタルホログラフィの応用分野の広がりや光学定盤外で使用可能な光学技術の発展につながるものと考えている。

実用化に関する展望としてホログラフィ干渉法による形状計測を例として考えると、高速カメラによる高速ホログラム記録とGPUを用いた並列計算処理によるポストプロセスの高速化により実時間の計測システムが実現されると思われる。従来は振動や空気揺らぎ等の外乱により、干渉計測は光学除振台の外で行うには制約が多く、気軽に扱えるものではなかったが、より実用化に近いシステム構築が容易になると予想される。干渉計測以外においても同様のことが言え、デジタルホログラフィを用いた応用技術は今後増々その存在感を増し、さらなる発展が期待される。

参考文献

- 1) D. Gabor: *Nature* **161** (1948) 777.
- 2) U. Schnars and W. Juptner: *Appl. Opt.* **33** (1994) 179.
- 3) U. Schnars and W. Juptner: *Digital Holography* (Springer, 2005) p. 2.
- 4) T. Kreis: *Handbook of holographic interferometry* (Wiley-VCH, 2005) p. 5.
- 5) Y. Awatsuji, T. Tahara, A. Kaneko, T. Koyama, K. Nishio, S. Ura, T. Kubota, and O. Matoba: *Appl. Opt.* **47** (2008) D183.
- 6) T. Kakue, R. Yonesaka, T. Tahara, Y. Awatsuji, K. Nishio, S. Ura, T. Kubota, and O. Matoba: *Opt. Lett.* **36** (2011) 4131.
- 7) T. Kakue, S. Itoh, P. Xia, T. Tahara, Y. Awatsuji, K. Nishio, S. Ura, T. Kubota, and O. Matoba: *Opt. Express* **20** (2012) 20286.
- 8) T. Tahara, Y. Ito, Y. Lee, P. Xia, J. Inoue, Y. Awatsuji, K. Nishio, S. Ura, T. Kubota, and O. Matoba: *Opt. Lett.* **38** (2013) 2789.
- 9) T. Tahara, Y. Shimozato, P. Xia, Y. Ito, Y. Awatsuji, K. Nishio, S. Ura, O. Matoba, and T. Kubota: *Opt. Express* **20** (2012) 19806.
- 10) T. Nomura and M. Imbe: *Opt. Lett.* **35** (2010) 2281.
- 11) M. Imbe and T. Nomura: *Appl. Opt.* **52** (2013) A161.
- 12) L. Martinez-Leon, M. Araiza-Esquivel, B. Javidi, P. Andres, V. Climent, J. Lancis, and E. Tajahuerce: *Opt. Express* **17** (2009) 12900.
- 13) M. Araiza-Esquivel, L. Martinez-Leon, B. Javidi, P. Andres, J. Lancis, and E. Tajahuerce: *Appl. Opt.* **50** (2011) B96.
- 14) Y. Kikuchi, D. Barada, T. Kiire, and T. Yatagai: *Opt. Lett.* **35** (2010) 1548.
- 15) D. Barada, T. Kiire, J. Sugisaka, S. Kawata, and T. Yatagai: *Appl. Opt.* **50** (2011) H237.
- 16) T. Kiire, D. Barada, J. Sugisaka, Y. Hayasaki, and T. Yatagai: *Opt. Lett.* **37** (2012) 3153.
- 17) M. Paturzo, A. Pelagotti, A. Finizio, L. Miccio, M. Locatelli, A. Gertrude, P. Poggi, R. Meucci, and P. Ferraro: *Opt. Lett.* **35** (2010) 2112.
- 18) M. Locatelli, E. Pugliese, M. Paturzo, V. Bianco, A. Finizio, A. Pelagotti, P. Poggi, L. Miccio, R. Meucci, and P. Ferraro: *Opt. Express* **21** (2013) 5379.
- 19) K. Xue, Q. Li, Y. Li, and Q. Wang: *Opt. Lett.* **37** (2012) 3228.
- 20) Q. Li, K. Xue, Y. Li, and Q. Wang: *Appl. Opt.* **51** (2012) 7052.
- 21) T. Tahara, A. Maeda, Y. Awatsuji, T. Kakue, P. Xia, K. Nishio, S. Ura, T. Kubota, and O. Matoba: *Opt. Lett.* **37** (2012) 4002.
- 22) R. Schwede, H. Babovsky, A. Kiessling, and R. Kowarschik: *Opt. Lett.* **37** (2012) 1943.
- 23) Y. Fu, G. Pedrini, B. M. Hennelly, R. M. Groves, and W. Osten: *Opt. Lasers Eng.* **47** (2009) 552.
- 24) P. Tankam and P. Picart: *Opt. Lasers Eng.* **49** (2011) 1335.
- 25) D. Carl, M. Fratz, M. Pfeifer, D. M. Giel, and H. Hofler: *Appl. Opt.* **48** (2009) H1.
- 26) Y. Ishii and K. Yoshida: *Proc. of SPIE* **7387** (Speckle 2010: Optical Metrology) p.73870P-1.
- 27) M. Yokota and N. Ishitobi: *Opt. Rev.* **17** (2010) 166.
- 28) M. Yokota and T. Adachi: *Appl. Opt.* **50** (2011) 3937.
- 29) T. Higuchi, Q. D. Pham, S. Hasegawa, and Y. Hayasaki: *Appl. Opt.* **50** (2011) H183.
- 30) A. Sato, Q. D. Pham, S. Hasegawa, and Y. Hayasaki: *Appl. Opt.* **52** (2013) A216.
- 31) Y. Choi and S. Lee: *Appl. Opt.* **48** (2009) 2983.
- 32) Y. Choi, K. Seo, M. Sohn, and S. Lee: *Opt. Lasers Eng.* **50** (2012) 39.
- 33) I. Moon, B. Javidi, F. Yil, D. Boss, and P. Marquet: *Opt. Express* **20** (2012) 10295.
- 34) Y. Ito, Y. Shimozato, P. Xia, T. Tahara, T. Kakue, Y. Awatsuji, K. Nishio, S. Ura, T. Kubota, and O. Matoba: *J. Display Technol.* **8** (2012) 570.
- 35) M. Yokota, I. Yamaguchi and T. Adachi: *Opt. Eng.* **49** (2010) 015801.
- 36) M. Yokota and Y. Kimoto: *Opt. Eng.* **52** (2013) 015801.
- 37) M. Yokota and N. Kawashiri: *Kogaku* **42** (2013) 144 (in Japanese).
- 38) A. Kowalczyk, M. Bieda, M. Makowski, M. Sypek, and A. Kolodziejczyk: *Appl. Opt.* **52** (2013) 4743.
- 39) B. Samson, F. Verpillat, M. Gross, and M. Atlan: *Opt. Lett.* **36** (2011) 1449.