

位置シフト撮影法を用いたハイブリッドホログラフィー

浅野 高史・大頭 仁

早稲田大学理工学部応用物理学科 〒169-0072 東京都新宿区大久保 3-4-1

Hybrid Holography Using Position Shift Imaging

Takashi ASANO and Hitoshi OHZU

Department of Applied Physics, School of Science and Engineering, Waseda University, 3-4-1, Okubo, shinjuku-ku, Tokyo 169-0072

Digital recording and numerical reconstruction holography, called hybrid holography, has the advantage of not requiring chemical processing and an optical reconstruction system. But, since the resolution of a present CCD camera is not sufficient to record a Fresnel off-axis hologram, there exists a strict limitation to separate a real image from zero-order and conjugate images. In this paper we propose a new recording technique, position shift imaging, which improves a resolution of a hologram and spreads the area of the reconstructed image, and demonstrate this method experimentally.

1. はじめに

ハイブリッドホログラフィーというのは光学的に発生させたホログラムを CCD (charge coupled device) などで電氣的に記録して、そのホログラムの回折像をコンピューター上で計算することによって再生像、すなわち振幅位相分布を得る手法で、ホログラムの現像処理や再生光学系を必要とせずに再生像を得ることができるという利点がある^{1,2)}。この手法の生まれた背景として、近年の CCD の高精細化と計算機の処理速度の向上があり、それにより高速な再生が可能となった。

しかしながら現時点では CCD の画素サイズがホログラムの撮影に十分なほど高精細ではない。一般的にホログラムを記録するためには 1 mm あたり千本~数千本という解像度が必要であるが、現在の CCD の解像度は 1 mm あたり百本程度である。そのために off-axis 型のホログラムを撮影する場合、物体光と参照光の角度は極めて小さい値しかとることができないという制限があり、結果として撮影物体が大きい場合にはゼロ次光、虚像と実像が重なってしまうという問題が発生する。この問題に対して、in-line 型でゼロ次光、虚像の重ならない再生像を得る位相シフト法^{3,4)}や off-axis 型で角度を小さくとり減算処理によってゼロ次光、虚像を除去する手法などが提案されている⁵⁾。

これらの手法はゼロ次光、虚像を除去することによって限られた画素数を有効に使う、という考え方に基づいている。それに対して今回提案するのはホログラムを撮影する際に位置シフト撮影法を導入することによってホログラムの解像度そのものを向上させて、それによって再生像の領域を拡大する、という手法である。つまり、限られた画素数を有効に使うのではなく CCD の画素数を増やす、という考え方であり、それがこれまでの手法とは根本的に異なる点である。

2. 理 論

2.1 ハイブリッドホログラフィーの原理

今回用いた光学系を Fig. 1 に示す。これはフーリエ変換型ホログラムを撮影する光学系で、ハーフミラーで反射される光は参照光として平面波のまま CCD に入射し、ハーフミラーを透過する光はレンズ L1 の前焦点面に置かれた物体を照射する。そして CCD の撮影面を L1 の後焦点面に合わせ、物体のフーリエ変換像と参照光 (平面波) との干渉縞、すなわちホログラムを撮影する。図では物体光と参照光が同じ角度で入射するように描かれているが、実際にはごくわずかに角度をとっている。

ハイブリッドホログラフィーでは撮影されたホログラムを光学的に再生するときと等価の回折計算を行うことによって再生像を得る。フレネル型のホログラムの場合はフレ

E-mail: 69910011@mn.waseda.ac.jp

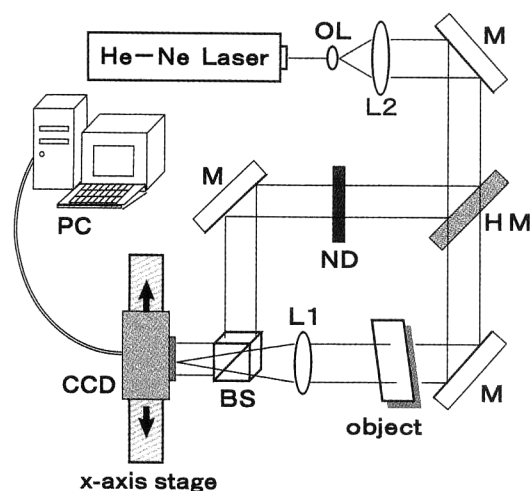


Fig. 1. Optical setup for hybrid holography: OL, object lens; L's, lenses; M, mirrors; HM, half mirror; BS, beam splitter; ND, neutral density filter.

ネル回折像を計算することによって再生像を得るが、今回は図のようにフーリエ変換型ホログラムで実験を行ったので、CCDで撮影された強度分布を逆フーリエ変換することによって再生像を得ることができる。

2.2 サンプリング定理

ハイブリッドホログラフィーでは、光学的に再生するときとは異なりその過程が離散的なフーリエ変換であるので、正しい再生像を得るためにはサンプリング定理が成立することが必要となる。サンプリング定理とは「離散的なフーリエ変換を行うときは、信号のもつ最も高い空間周波数より2倍以上細かいサンプリング間隔をとってやれば、逆変換によって元の信号に復元することができる」というもので、これは言い方を変えると、サンプリング定理が成立しないようなサンプリング間隔ではフーリエ面で繰り返し成分が重なってしまうということである。これはハイブリッドホログラフィーに当てはめて考えると、再生像面において実像と虚像の繰り返し成分が重なってしまうということに対応している。ハイブリッドホログラフィーにおけるサンプリング定理は、CCDの画素サイズがホログラムのもつ最も高い空間周波数成分、すなわち干渉縞の間隔よりも2倍以上細かいときに成立する。ホログラムの干渉縞の間隔は光源の波長や物体光と参照光の角度などに依存しており、光源にHe-Neレーザー、CCDの画素サイズが $10\mu\text{m}$ 程度であるとき、サンプリング定理を成立させるためには物体光と参照光の角度は1度程度しかとることができない。

サンプリング定理の成立するときとしないときの再生像についてシミュレーションを行った結果をFig. 2に示す。(a)が撮影するターゲットで(b)はサンプリング定理が

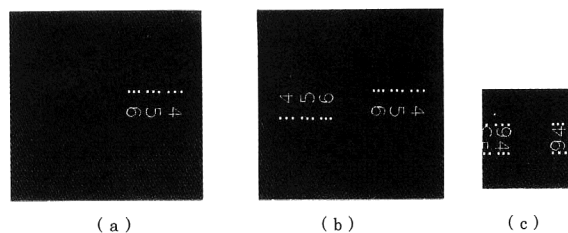


Fig. 2. (a) Input image and simulation results for (b) satisfying sampling theorem and (c) not satisfying sampling theorem.

Table 1. Resolution and width of a hologram and a reconstructed image.

	Resolution	Width
Hologram	Δw	H
Reconstructed image	$\lambda z/H$	$\lambda z/\Delta w$

成立する条件下での理想的再生像である。このシミュレーション結果を後に示す実験結果と同じ条件に対応させると(b)はCCDの画素サイズが $9\mu\text{m} \times 9\mu\text{m}$ 、画素数が 512×512 であるときの理想的な再生像に相当する。このようにサンプリング定理が成立していれば実像と虚像が重なることはない。それに対して(c)はCCDの画素サイズが $18\mu\text{m} \times 18\mu\text{m}$ 、画素数が 256×256 のときの理想的な再生像で、この場合にはサンプリング定理が成立しないために実像の上に折り返された虚像の成分が重なっている。このように、ハイブリッドホログラフィーではサンプリング定理の成立する範囲内の大きさをもつ物体しか撮影することができず、それ以上の大きさをもつ物体を撮影した場合には実像と折り返された虚像が重なってしまう。

2.3 解像度と領域の広さ

続いて再生像の解像度と領域の広さについて論じる。ホログラム面と再生像面はそれぞれフーリエ面と像面に対応しており、ホログラム面の広さを H 、解像度を Δw とするとき、再生像面の広さと解像度にはTable 1のような関係がある。ここで λ は光源の波長、 z はターゲットからホログラムまでの距離を表し、また、ホログラム面の広さはCCDの撮像エリアの広さに、解像度はCCDの画素サイズにそれぞれ対応している。Table 1をみるとわかるように、ホログラム面が広いほど再生像の解像度が向上し、ホログラム面の解像度が細かいほど再生領域が広がることになる。これらの間には簡単な逆比例の関係があり、ホログラムの解像度が2倍細くなれば再生領域が2倍広くなる。すなわち、より細かいものを撮影するためにはより撮像エリアの広いCCDが必要であり、また、より大きい

再生領域を得るためにはより解像度の細かい CCD が必要である。例えば先程のシミュレーション結果をみると、(b) と (c) はホログラム面の領域の広さは同じで解像度は (c) より (b) の方が 2 倍細かいことになる。よって、再生像の解像度、すなわち、(b)、(c) における 1 ピクセルに相当する実際の大きさは同じで、再生像の領域の広さは (b) の方が 2 倍広くなる。(c) の場合は再生領域が撮影物体 (a) よりも小さいために、はみ出した部分が繰り返し成分として重なってしまっている。この結果をみてもわかるように、サンプリング定理が成立しないために虚像が実像の上に重なってしまうという問題は、ホログラム面の解像度を向上させることによって解決できる。

2.4 ゼロ次光の除去

先程のシミュレーションでは実像、虚像成分のみを考えたが、実際に光学的に作成したホログラムの再生像ではゼロ次光成分も存在する。よって、再生像を得るためにはサンプリング定理が成立するだけでは不十分で、実像とゼロ次光が重ならないように物体光と参照光の角度をとることも必要となってしまう。そこで今回は減算によるゼロ次光の除去を行った。

物体光の複素振幅を O 、参照光の複素振幅を R とするとき CCD に記録されるホログラムの強度分布 I_H は次式のようになる。

$$I_H = |O+R|^2 = |O|^2 + |R|^2 + OR^* + O^*R \quad (1)$$

ただし*は複素共役を表す。式 (1) においてははじめの 2 項がゼロ次光成分、第 3 項、第 4 項がそれぞれ実像、虚像成分に対応している。よって物体光のみの強度分布 I_0 、参照光のみの強度分布 I_R をそれぞれ撮影してホログラムの強度分布から減算すると

$$I_H - I_0 - I_R = OR^* + O^*R \quad (2)$$

となり、ゼロ次光成分のみを除去することができる。光学的に減算処理を行うのは多少面倒であるが、ハイブリッドホログラフィーではホログラムをコンピューター上のデータとして扱うので、こうした処理を容易に行うことができる。これもハイブリッドホログラフィーの利点のひとつである。

2.5 位置シフト撮影法の原理

位置シフト撮影法というのは、CCD を動かして撮影した複数の画像の平均をとることによって画素サイズより細かい縞を再現するという手法で、この発想の元となったのはファイバー束による画像伝送の際にファイバーをランダムに動かして時間平均をとることによって画像の解像度が向上するという事実である⁹⁾。ファイバー束による画像伝送ではダイナミックスキャンと呼ばれていたが、CCD に

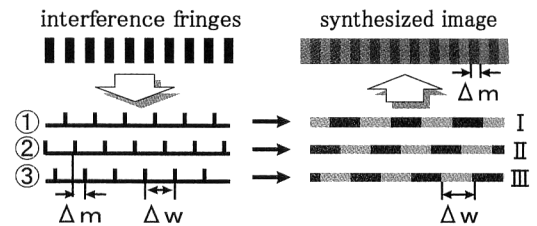


Fig. 3. Outline of position shift imaging (PSI).

適応させるにあたってシフトのさせ方や合成の仕方に変更があるため、位置シフト撮影法として別の呼び方をするようにした。なお、位置シフト撮影法(ダイナミックスキャン)を用いて撮影された画像の特性に関しては、ファイバーの本にて詳しい議論がなされている⁷⁾。

位置シフト撮影法の概略を Fig. 3 に示す。図中の左下のひと区切りが CCD の 1 画素に対応している。そこに図のように画素サイズよりも細かい干渉縞が入ってきた場合、例えば CCD が①の位置にあるときに記録される画像は右側の I のようになり、画素サイズより細かい縞を解像することはできない。位置シフト撮影法では②、③のように画素サイズを何等分かにして、その幅 (Δm) だけ CCD を動かして何枚かの画像を撮影する。その画像が右側の II, III で、当然 CCD の位置を変えても縞は記録できていないが、明暗の分布は変わる。そうして Δm ずつ動かして撮影した何枚かの画像 (図中では 3 枚) の平均をとると Fig. 3 右上のような分布が得られる。この図のように、元々の画像では解像できていなかった縞を位置シフト撮影法によって再現することができる。ただし、元の縞が完全に再現されるわけではなく、高周波成分ほどコントラストは低下する。このコントラストの低下についてのシミュレーション結果を Fig. 4 に示す。これは、縞の間隔の異なる正弦波分布を普通に CCD で撮影したときと、位置シフト撮影法によって解像度を向上させたときの画像についてのシミュレーション結果である。図の一番左の列は撮影する正弦波の分布で、ここでは縞の一周期の長さを D としている。左から 2 番目の列は、それらの正弦波を画素サイズ Δw の CCD で撮影したときの画像で、3 番目は同じ CCD で撮影位置を $\Delta w/2$ ずらしたときの画像である。右から 2 番目はそれら 2 枚の画像の強度分布の平均をとったもので、これは位置シフト撮影法によって解像度を $\Delta w/2$ に向上させた画像に対応する。そして一番右は画素サイズ $\Delta w/2$ の CCD によって撮影される画像である。これを見るとわかるように右から 2 番目の位置シフト撮影法によって解像度を向上させた画像は、解像度が向上するだけならば一番右側の画像と同じ分布になるはずなのに、縞の間隔

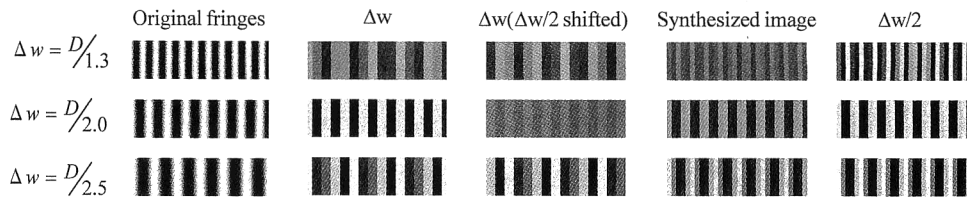


Fig. 4. Simulation results of PSI for various fringes.

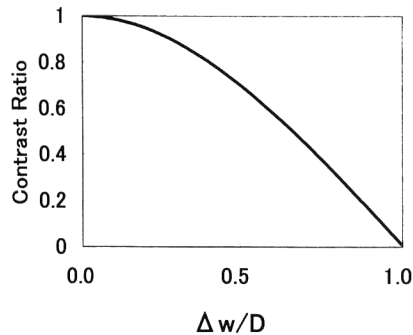


Fig. 5. The characteristic of PSI.

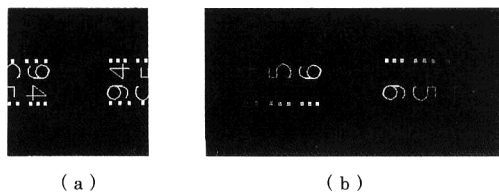


Fig. 6. Simulation results of reconstructed image (a) without PSI and (b) with PSI.

が細くなるにつれてコントラストが低下してしまっている。解像度 $\Delta w/2$ の CCD によって本来撮影されるはずの画像のコントラストに対する位置シフト撮影法を用いたときのコントラストの比を $\Delta w/D$ を横軸にグラフにまとめると Fig. 5 のようになる。位置シフト撮影法によって画像の解像度を向上させる場合、本当に正しい分布を得るためにはこの周波数特性を補正する必要がある。

2.6 位置シフト撮影法を用いたときの再生像

ホログラムの撮影の際にこの位置シフト撮影法を導入することでホログラム面の解像度を向上させることが可能で、それによって先程述べたサンプリング定理の成立する領域を拡大することができる。位置シフト撮影法によって解像度を向上させたホログラムの再生像のシミュレーション結果を Fig. 6(a), (b) に示す。(b) は CCD の画素サイズが $18 \mu\text{m} \times 18 \mu\text{m}$ 、画素数が 256×256 のときに横方向に関して 2 段階のシフトを行うことによって、画素サイズ $9 \mu\text{m}$ 、画素数 512 に向上させたときの理想的再生像で、今回は横方向に関してのみシフトを行ったので横方向のみ領域が拡大されている。

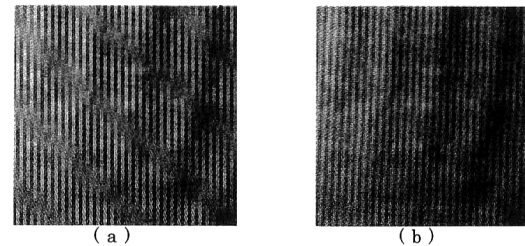


Fig. 7. Interference fringes recorded by (a) traditional method and (b) PSI.

しかし、先に述べたように、位置シフト撮影法によって撮影した画像は高周波成分ほどコントラストが低下しており、その結果として再生像面では外側ほど振幅が低下するという特性がある。そのことはシミュレーション結果 (b) にもみてとることができる。よって、ホログラムの撮影の際に位置シフト撮影法を行った場合、正しい再生像を得るためにはこの振幅の低下特性を補正する必要がある。この補正は Fig. 5 に示した特性の逆特性をかけることによって可能である。以上のように、再生像面での振幅低下特性は計算により求めることが可能であり、その逆特性をかけることによって補正することができる。

3. 実 験

3.1 位置シフト撮影法による干渉縞の撮影

今回用いた光源は He-Ne レーザー ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$) で CCD の画素サイズが $18 \mu\text{m} \times 18 \mu\text{m}$ 、一軸ステージの最小移動距離が $1 \mu\text{m}$ で、解像力テストチャートの一部をターゲットとして用いた。

はじめに、位置シフト撮影法による干渉縞の撮影の実験を行った。Fig. 1 の光学系においてターゲットを置かず L1 を取り除いた状態で平面波同士の干渉縞を発生させ、普通に撮影した場合と位置シフト撮影法を行った場合の結果を Fig. 7 に示す。(a) は普通に撮影した画像で干渉縞の間隔が CCD の画素サイズに近いので、モアレが生じている。(b) は横方向に関して 2 段階の位置シフト撮影法を行った結果で、これをみると位置シフト撮影法によって解像度が向上し、モアレが消えていることが確認できる。

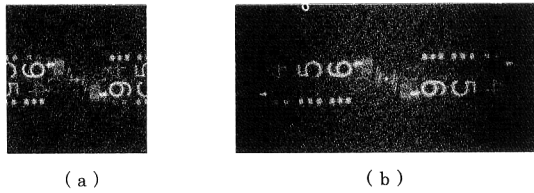


Fig. 8. Images reconstructed from hologram recorded by (a) traditional method and (b) PSI.

3.2 位置シフト撮影法による再生領域の拡大

実際に位置シフト撮影法によって解像度向上させたホログラムの再生像が Fig. 8(b) である。(a) はシフトを行わないときの再生像で、折り返された虚像が重なっている。(b) は横方向に2段階のシフトを行ったときの再生像で、重なっていた虚像成分は消え、確かに再生領域が拡大されることが確認された。

3.3 再生像の補正

先に述べた通り、位置シフト撮影法によって解像度を向上させたホログラムの再生像は外側にいくほど振幅が低下するという特性があり、そのことは実験結果 Fig. 8(b) にもみてとることができる。そこで、先程のシミュレーションにより振幅の低下特性は既知であるのでその逆特性をかけることによって再生像の補正を行った。結果を Fig. 9 に示す。(a) は補正前の実像部分で図の右側、すなわち外側ほど振幅が低下している。そして、(b) は逆特性をかけることによって補正を行った結果である。

ここで、補正された再生像にはひとつ問題がある。それは、補正された実像では外側ほどノイズが大きくなるということである。位置シフト撮影法では複数の画像を撮影して1枚のホログラムを作成するので、CCDのリードアウトノイズやシフトする際の移動量の誤差などにより再生像面においてもある程度のノイズが存在する。そして、補正の際には再生像面の外側ほど補正の効果が大きくなるので、結果としてノイズも増大させてしまうことになる。実験結果でも、補正を行った再生像では像の両端付近ではノイズの成分が実像成分よりも大きくなってしまっている。このことを考えると、確かに位置シフト撮影法によりホログラムの解像度が2倍向上し、再生領域が2倍拡大されたが、実際に補正も含めて拡大される領域は2倍よりも小さくなる。今回の実験では大体1.8倍程度の領域までは実像成分が十分ノイズよりも大きかった。

4. ま と め

今回は位置シフト撮影法により CCD の画素サイズより

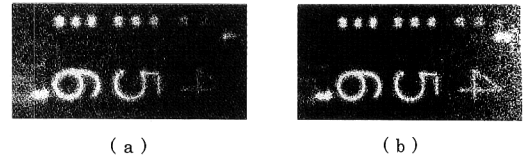


Fig. 9. Real image (a) without compensation and (b) with compensation.

細かい画像が撮影できることを示し、それをハイブリッドホログラフィーに適用することによって再生領域を拡大できることを実験的に確認した。ただし、再生像の解像度や大きさは Table 1 で示した通りホログラム面の解像度や大きさだけでなく、撮影物体からホログラム面までの距離 z にも依存している。今回の場合は実験条件として、再生像の解像度を一定にして位置シフト撮影法の処理を行ったので結果として再生像の領域が拡大されたが、それはあくまで相対的なものであり、本質的にはホログラム面の画素数が増えたことがこの手法の利点であり、特徴である。

今後はノイズの影響などを検討して、ステージ等の誤差がどの程度再生像や補正に影響があるかなどを検討し、①シフトする段回数を増やす、②横方向だけでなく2次元方向に拡張する、といったことを行っていく予定である。そして、今回はフーリエ変換型で面内の解像度、再生領域に関してのみ検討を行ったが、位置シフト撮影法をフレネル型に適用したときに奥行き方向の画質にどのような影響があるかも併せて検討していく予定である。

文 献

- 1) 山口一郎：“デジタルホログラフィーとその発展”，光技術コ
ンタクト，**37** (1999) 688-695.
- 2) Y. Takaki and H. Ohzu: “Fast numerical reconstruction
technique for high-resolution hybrid holographic micro-
scopy,” *Appl. Opt.*, **38** (1999) 2204-2211.
- 3) T. Zhang and I. Yamaguchi: “Three-dimensional micro-
scopy with phase-shifting digital holography,” *Opt. Lett.*, **23**
(1998) 1221-1223.
- 4) I. Yamaguchi and T. Zhang: “Phase-shifting digital holog-
raphy,” *Opt. Lett.*, **20** (1997) 1268-1270.
- 5) Y. Takaki, H. Kawai and H. Ohzu: “Hybrid holographic
microscopy free of conjugate and zero-order images,” *Appl.*
Opt., **38** (1999) 4990-4996.
- 6) N. S. Kapany, J. A. Eyer and R. E. Kein: “Fiber optics part
II. Image transfer on static and dynamic scanning with
fiber bundles,” *J. Opt. Soc. Am.*, **47** (1957) 423-427.
- 7) N. S. Kapany: *Fiber Optics*, 1st ed. (Academic Press, New
York, London, 1967) pp. 352-371.