HOKUGA 北海学園学術情報リポジトリ

学校法人北海学園 北 海 学 園 大 学 北 海 斎 科 大 学

タイトル	ディジタルホログラフィによるホログラフィ振動解析
著者	高井,信勝
引用	北海学園大学工学部研究報告,36:121-141
発行日	2009-02-20

ディジタルホログラフィによるホログラフィ振動解析

髙井信勝*

Holographic Interferometry of Vibrating Objects and its Simulation by Means of Digital Holography

Nobukatsu TAKAI*

Abstract

The optical holographic interferometry to be used for analyzing vibrating modes of objects is described to reveal the information of vibrations recorded in the holograms. The fringe patterns observed in the images reconstructed from holograms depend on not only the vibration modes but also the shutter function representing the exposure at the stage of recording the holograms. Such an optical technique is applied to the digital holography by the computer, and the simulation study on the vibration analysis is executed. The computer simulations with MATLAB are executed with respect to the time-average and the pulse-stroboscopic methods of holographic interferometry. The fringe patterns are analyzed by using histogram of intensity, and, in the pulse-stroboscopic method, it is revealed that the maxmum amplitude of vibration can be detected as the maximum point of the fringe contrast when the phase difference between the vibrating object and the illumination pulses is changed.

1. はじめに

一般に、光の場は複素振幅で記述され、その振幅と位相の両方によって光波が担う情報が与 えられる.しかし、ふつうの写真や映像は、光波の空間的な強度(振幅の絶対値の2乗)を画 像として記録したものであるので、位相情報は消失し、あるがままの光の場を再生することは できない.写真から立体像が得られない理由はここにある.つまり、真に光の場を再生するに は、光波の振幅と位相の両方の情報を完全に記録し、再生する必要がある.これが可能な技術 がホログラフィの技術¹¹であり、これによって光波を完全な形で再生できる.そして、その再

^{*} 北海学園大学工学部電子情報工学科

^{*} Department of Electronics and Information Engineering, Faculty of Engineering, Hokkai-Gakuen University

生波に別の光波を重ね合わせる干渉技術を用いることができる.この干渉技術がホログラフィ 干渉法^{2)~4)}である.

光波の干渉を利用すると、光の波長スケールの微少の変位・変形の測定だけでなく、振動す る物体の振動状態を干渉縞という視覚的でかつ定量化できる情報として得ることができる.し かし、通常の物体表面は、光の波長オーダーのスケールでは、ランダムな粗面であり、そこか ら出謝する光波(物体波という)の位相は確率過程として記述される.そのため物体波と基準 とする参照波との干渉強度は、ランダムな干渉縞が折り重なった複雑なパターンとなり、その 解析から物体情報を得ることは通常できない.

粗面のような拡散物体からのランダムな位相を持つ光波の干渉結果は,光学的なホログラフィの技術における記録媒体としてのホログラムそのものである.そして,ホログラフィでは, このホログラムから位相情報を含めた物体情報が完全な形で再現できる.

本稿では、まず、振動物体からの光波をホログラムとして記録し、物体の振動情報を干渉縞の形で検出する光学的なホログラフィ干渉法を記述する.続いて、ホログラフィ干渉法を MATLAB⁵⁰によるディジタルホログラフィ^{60~120}によって実現する手法を記述する.最後にディ ジタルホログラフィを用いる計算機シミュレーションによって振動物体を解析するホログラフ ィ干渉法を記述する.以下、2節では光学的なホログラフィ干渉法、3~5節ではディジタル ホログラフィ、6節~7節では振動物体のディジタルホログラフィ干渉法のシミュレーション 結果を記述する.



図1 振動物体のホログラム多重記録

2. 光学的なホログラフィ干渉

2.1 振動物体のホログラム干渉

振動物体のホログラフィ干渉法を,図1に示す面の振動を用いて説明する.いま,図にみら

れるように、対象とする振動物体の面が上下に振動しているとする.この振動面がある時刻に 上に凸になったときに、その面からの光波のホログラムを瞬時に記録し、つぎの時刻に、振動 面が反転して下に凸になった瞬時にその面を記録すると、二重(あるいは、多重に)に記録さ れたホログラムが作成される.像の再生段階では、この多重記録ホログラムからは、記録した 面の凹凸に比例する位相分布を持つふたつの光波が同時に出射し、互いの干渉強度を観測でき る.後述されるように、このときに観測される干渉縞は、2つの光波の位相差に依存するが、 同時に、干渉縞を記録するときの露光方法を記述するシャッター関数にも依存する.因みに上 で述べた多重記録法は、原理的に、振動に同期させてストロボ照明を行うパルスストロボ法に 等価な方法である.

このように、ホログラフィ干渉を用いて、2つの光波の位相差の空間分布が干渉縞として得 られ、それを利用することによって、面の変形の測定や振動物体の振動モードの解析などを実 行できる.つまり、異なる時刻のふたつの光波を、ひとつのホログラムとして記録すると、振 動面の振動振幅(変位)を解析することができる.

2.2 振動物体の光学的ホログラムとそれからの再生像

光学的なホログラフィでは、物体情報を記録した媒体をホログラムといい、これを作成する 基本的な光学系が図2である.この図にあるように、物体(対象)はコヒーレントなレーザー 光で照射され、それからの光波(物体波という)をおなじ光源から別ルートで導かれた参照波 と、観測面で、重ねて干渉強度を記録する.この記録がホログラムである.このとき、物体表 面がその面に垂直方向に振動していると、物体波は観測面の座標(ξ,η)の関数であるとともに 時間*t*にも依存する.したがって、物体波を*O*(ξ,η,*t*)と表し、簡単のために、参照波*R*は空 間座標にも時間にも依らずに一定とすると、これらの干渉強度は

$$I(\xi,\eta,t) = |O(\xi,\eta,t) + R|^{2} = |O(\xi,\eta,t)|^{2} + |R|^{2} + O(\xi,\eta,t)R^{*} + O^{*}(\xi,\eta,t)R$$
(1)

とかける.ここで、*は複素共役を意味する.ホログラム面の物体波 $O(\xi,\eta,t)$ と物体を出た 直後の光波の関係は、

$$O\left(\xi,\eta,t\right) = \Im\left[o\left(x,y\right)e^{i\theta\left(x,y,t\right)}\right]$$
(2)

とかける.ここで,o(x,y)が物体直後の光の振幅分布, $\theta(x,y,t)$ は物体の振動に伴って変化する位相分布である.また,演算子 3[...] は物体からホログラム記録面までの伝搬を表す時間に 無関係な空間演算子である.振動物体では,位相分布 θ は

$$\theta(x, y, t) = \alpha(x, y) \sin \omega t \tag{3}$$

とかけるので、式(2)の物体波は



図2 ホログラフィにおけるホログラム作成光学系

$$O\left(\xi,\eta,t\right) = \Im\left[o\left(x,y\right)e^{i\alpha\left(x,y\right)\sin\omega t}\right]$$

$$(4)$$

と表される.ここで、 α は物体の振動振幅をa(x,y)、光の波長を λ 、光学配置で決まる定数 ϵ_x とすると、

$$a(x,y) = 2\pi \varkappa a(x,y)/\lambda \tag{5}$$

で与えられる.また ω は物体振動の角振動数である.xは、物体照射光線と物体面のなす角度 を θ_1 、物体波の光線と物体面のなす角度をとすると θ_2 、 $x = \cos \theta_1 + \cos \theta_2$ で決まる定数であ る.

もし物体が振動していないならば,式(1)はホログラムとして記録される干渉強度そのもの である.しかし,時間に依存して変化する振動物体の場合では,記録される強度は,露光条件 できまる時間に関して瞬時強度を積分しなければならない.したがって,露光時間に関係する 時間関数を式(1)に乗じて時間積分した結果がホログラムとして記録される強度分布になる. このときに用いられる時間関数は,シャッター関数とよばれる.シャッター関数を式(1)に乗 じて,それを積分したものがホログラムになる.

式(1)の右辺は4つの項からなるが、よく知られているように、再生像として観測されるの は、ホログラムを回折格子と考えたときの1次の回折光である第3項の成分である。以下で は、シャッター関数をw(t)とし、この項に関してのみ時間積分強度を調べる.つまり、この 成分の時間積分ホログラム強度は

$$I_{h}(\xi,\eta) = \int w(t) I(\xi,\eta,t) dt = \int w(t) O(\xi,\eta,t) R^{*} dt$$
(6)



図3 ホログラフィにおける像再生光学系

とかける.これがホログラムとして記録される強度分布の一般的な表式である.なお,式(6) において積分範囲は、後述されるようにシャッター関数 *w*(*t*)で与えられる.

図3はホログラムから像を再生する光学配置である.ここにあるように,ホログラムに再生 波を乗じたときに出る光波の虚像が再生像を与える.その結果,再生像つまり虚像の強度分布 *I_R*(*x*,*y*)は,空間的な逆変換の後に強度をとることによって,

$$I_{R}(x,y) = |\mathfrak{T}^{-1}\{RI_{h}(\xi,\eta)\}|^{2}$$
(7)

と得られる.ここで、 3⁻¹{ } はホログラム面から像面までの光波の伝搬を記述する 3{ } の逆 演算子である.式(7)に式(5),(6)を用いると、

$$I_{R}(x,y) = |R|^{4} \left| \int w(t) \mathfrak{I}^{-1} \{ O(\xi,\eta,t) \} dt \right|^{2} = |R|^{4} |o(x,y)|^{2} \left| \int w(t) e^{i\theta(x,y,t)} dt \right|^{2}$$
(8)

となる.

式(8)の結果は、物体が振動しているときには、物体像強度 $|o(x,y)|^2$ だけが観測されるの ではなく、シャッター関数 w(t) と物体振動に関係する位相 $\theta(x,y,t)$ を含む積分が再生像の強 度分布を与えることを意味している.

2.3 シャッター関数と干渉縞

(1)時間平均法

図4には、ある場所での物体振動の振動波形とともに、時間平均法とパルスストロボ法で用いられるシャッター関数 w(t)を示してある.図4の中段にあるように、ホログラムに記録される干渉強度が、物体の振動周期より十分長い時間にわたって積分される場合を時間平均法という.これは、実効的に一周期にわたる時間平均に比例する.このとき再生像強度を与える式

(8)は、式(4)を適用し、一定因子を省略すると、

$$I_{R}(x,y) = |o(x,y)|^{2} \left| \frac{1}{T} \int_{0}^{T} e^{i\alpha(x,y)\sin\omega t} dt \right|^{2} = |o(x,y)|^{2} J_{0}^{2} (\alpha(x,y))$$
(9)

となる.ここで、0次の第1種ベッセル関数 Jo(...)の積分表示

$$J_0(\alpha) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{i\alpha \sin \omega t} dt$$
(10)

を用いた.式(9)の結果は,時間平均法では,ホログラフィ干渉の再生像に現れる干渉縞は, 実効的な物体の振動振幅 *a*(*x*,*y*)を変数とする 0 次のベッセル関数によって記述されることを 意味している.

(2) パルスストロボ法

シャッター関数が図4の下段のように周期的なパルス列で,その照明の露光によってホログ ラムに干渉強度が記録される場合をパルスストロボ法という.

パルスストロボ法では、照明光は、物体振動と同期をとり、振動周期 Tの半周期 T/2の間 隔で繰り返しパルス的に与える。その結果、物体波と参照波の瞬時の干渉強度が次々とホログ ラムとして多重記録される。しかし、周期ごとに同じ二重記録が繰り返しなされるので、ホロ グラムの平均強度は一周期に2度の干渉強度を重ねたものである。したがって、十分長い時間 にわたるパルス列の照明は、実効的に1周期に2個のパルス光を照明することに等価である。 そこで、時刻 $t = \tau \ge t = \tau + T/2$ に照射される2個の光パルスを δ 関数で表すと、式(8)で与 えられる再生像は一定因子をのぞいて



図4 物体の振動(上)に対する時間平均法(中)とパルスストロボ法(下)とのシャッター関数.

$$I_{R}(x,y) = |o(x,y)|^{2} \left| \int_{-T/2}^{T/2} \left[\delta(t-\tau) + \delta(t-\tau-T/2) \right] e^{i\alpha(x,y)\sin\omega t} dt \right|^{2}$$
(11)

とかけ、この積分を実行すると、

$$I_R(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = |o(\mathbf{x}, \mathbf{y})|^2 \cos^2\left(\alpha(\mathbf{x}, \mathbf{y})\sin\omega\tau\right)$$
(12)

127

が得られる.この結果は、パルスストロボ法では、実効的な振動振幅 $\alpha(x,y)$ の関数としてcos 関数の2乗で与えられる干渉縞が物体像 $|o(x,y)|^2$ に重畳して生じることを意味している.し かし、この場合には、パルスを照射する時刻 τ の選び方、つまり物体振動とパルス列の同期 の取り方に結果は強く依存することに注意しなければならない.



図5 振動振幅と干渉縞強度の関係.時間平均法(上)とパルスストロボ法(下).

図5に、時間平均法とパルスストロボ法とで得られる面の実効的な振動振幅 α と干渉縞強度 の理論的な関係、つまり、 $J_0^2(\alpha(x,y))$ と cos²($\alpha(x,y)$)の振る舞いを示す.これをみてわかる ように、パルスストロボ法では、振動振幅 α が増大すると、明暗の繰り返しがハイコントラ ストで変化する.一方、時間平均法では、 α が増大するとそれが小さいうちは急速に強度が減 少し、その後、振幅の増大とともに全体的に小さな(暗い)明暗の変動を繰り返す.このよう に、時間平均法では、干渉縞の変動は全体的に暗い変動になるけれども、この方法には「振動 振幅がゼロ、すなわち振動しない部分が最も明るい干渉縞」として得られるという、パルスス トロボ法にはない、大きな特徴がある.

3. ディジタルホログラフィ

3.1 ディジタルホログラムの作成と像の再生

前節までにおいて,振動物体の光学的ホログラムからシャッター関数に依存する形で物体振動の干渉縞が得られることを数式を用いて記述した.ここでは,ディジタルホログラフィによるホログラフィ干渉法を記述する.

ディジタルホログラフィは、前節で述べた光学的なホログラフィの手法をコンピュータ内部 で実現する技術である.このディジタルホログラムの作成手順を図6に示す.ここに示すよう に、3次元的な物体に代わってホログラフィの対象になるのは、通常、2次元画像である.そ して、実際の物体表面が粗面であることに倣って、入力画像は乱数を用いることによるランダ ム位相で変調される.さらに、物体波がホログラム記録面まで回折伝搬することを、2次元フ ーリエ変換として扱う.これは、フラウンホーファ回折の伝搬に代表されるように、実際の光 の回折が、基本的に光の場のフーリエ変換によって記述されることに倣っている.

図6にみられるように、参照波との干渉強度は入力画像のフーリエ変換面でとられるが、デ ィジタルホログラフィではそれ自体がホログラムではなく、像再生に関係しない部分を、後処 理によって、取り除いたものを最終的なディジタルホログラムとして取り扱う.つまり、ディ ジタルホログラフィでは、式(1)の右辺において再生像に関係しない第1項と第2項を除去し たものがディジタルホログラムになる.

ディジタルホログラムからの像の再生手順は簡単である.この手順を図7に示す.つまり, ディジタルホログラムに,適当な再生波を乗じ,その結果の2次元の逆フーリエ変換をとると 再生像が得られる.ただし,通常用いられるフーリエ変換の演算であるFFTによる逆フーリエ 変換の結果は,一般に複素数データとして得られるので,結果の絶対値が再生像となる.この 処理は,そもそも画像データは非負の実数データであるので,再生像データも非負でなければ ならないから何も問題はない.



図6 ディジタルホログラムの作成手順.F.T.は2次元フーリエ変換の演算である.



図7 ディジタルホログラムからの像再生の手順.ここで, I.F.T.は2次元逆フーリエ変換の演算である.

3.2 ディジタルホログラフィの数学的記述

ディジタルホログラフィの有効性や適用限界はそれを理論的に議論することで明らかになる.ここでは、その数学的記述を簡単に述べる.

図 6 にいて、入力画像を、g(x,y)ランダム位相を $\phi(x,y)$ とすると、ランダム位相変調を受けた結果は、

$$g(x,y)\exp[i\phi(x,y)] \tag{13}$$

とかける.したがって、この2次元フーリエ変換は

$$G\left(\xi,\eta\right) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g\left(x,y\right) \exp\left[i\phi\left(x,y\right)\right] \exp\left[-2\pi i\left(\xi x + \eta y\right)\right] dxdy$$
(14)

となる.これがフーリエ面 (ホログラム面)の振幅分布で,これに参照信号 (参照画像データ) $R(\xi,\eta)$ を加えて絶対値の自乗をとったものを $H_1(\xi,\eta)$ として求めると,

$$H_{1}(\xi,\eta) = |G(\xi,\eta) + R(\xi,\eta)|^{2}$$

= $|G(\xi,\eta)|^{2} + |R(\xi,\eta)|^{2} + G^{*}(\xi,\eta)R(\xi,\eta) + G(\xi,\eta)R^{*}(\xi,\eta)$ (15)

と得られる.ここで、*は複素共役を表す.これが通常の光学的なホログラムの干渉強度の式(1)に相当する.しかし、ディジタルホログラフィでは、式(15)の右辺において、位相を含む 像の再生に関係する項は最後の2項であるので、から第1項と第2項を差し引いた

$$H\left(\xi,\eta\right) = G^{*}\left(\xi,\eta\right)R\left(\xi,\eta\right) + G\left(\xi,\eta\right)R^{*}\left(\xi,\eta\right)$$

$$\tag{16}$$

を計算機上で扱うホログラムとする. つまり, これがディジタルホログラムでる. ここで, 参照信号を

$$R\left(\xi,\eta\right) = \exp\left[-2\pi i\left(a\xi + b\eta\right)\right] \tag{17}$$

と表すと、式(16)は、

$$H\left(\xi,\eta\right) = G^{*}\left(\xi,\eta\right)\exp\left[-2\pi i\left(a\xi+b\eta\right)\right] + G\left(\xi,\eta\right)\exp\left[2\pi i\left(a\xi+b\eta\right)\right]$$
(18)

と表される.ここで, *a*,*b* は参照波の位相をあたえるパラメータで,光学的な平面波においては,波面の傾きをあたえるパラメータである.

画像の再生のためには,一般には,

$$S\left(\xi,\eta\right) = \exp\left[i\phi_S\left(\xi,\eta\right)\right] \tag{19}$$

と表される再生信号(再生波)を式(18)に乗じる.ここでは、簡単のために、 $S(\xi,\eta)=1$ (つ まり $\phi_S(\xi,\eta)=0$)とすると、再生像 $g_R(x,y)$ は単に式(18)の2次元の逆フーリェ変換として

$$g_R(x,y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} H(\xi,\eta) \exp\left[2\pi i \left(\xi x + \eta y\right)\right] d\xi d\eta$$
(20)

と得られ、これに式(18)を代入し、式(14)を用いると、

$$g_{R}(x,y) = g^{*}(x-a,y-b) \exp\left[-i\phi(x-a,y-b)\right] +g\left[-(x+a), -(y+b)\right] \exp\left[-i\phi(x+a,y+b)\right]$$
(21)

が得られる.この右辺は、一見複雑に見えるが、ランダム位相 $\phi(x,y)$ をもつ式(13)とその複 素共役が、原点の周りに対称に現れることを示している.このように、再生段階で、互いに複 素共役な関係ある2つの像が原点の周りに対称に得られるが、おのおのの再生像は、原点から (a,b)および(-a,-b)だけ離れている.したがって、入力画像g(x,y)のサイズを制限し、かつ参照波の位相をあたえるパラメータa,bを適切に選ぶことによって、2つの像を空間的に完全に分離することができる.このときには、式(21)の再生像の絶対値は、2つの項のそれぞれの項の絶対値としてよく、

$$g_{R}(x,y) = |g_{R}(x,y)| = |g(x-a,y-b)| + |g[-(x+a), -(y+b)]|$$

= g(x-a,y-b) + g[-(x+a), -(y+b)] (22)

が得られる.ここで、画像データは非負の実数データであることを用いた.

この結果から再生像には,原点対称に二つの像が現れることがわかる.しかし,この二つが 重なり合うと,正しい再生像にならない.そのため,以下の二点に留意する必要がある.

- 対象とする入力画像は、2つの再生像の重なりが起きないようにサイズを制限する。
- また、同時に、参照光に関するパラメータa,bを適切な値に調節する.

3.3 ディジタルホログラフィの実行例

図8に,入力画像を組み込んだ原画像と,それを用いて作成されたフーリエ変換型のディジ タルホログラム,およびそのディジタルホログラムから得られた再生像を示す.この結果は, 付録の[プログラムリスト1]を実行した結果である.そこでは,対象とする入力画像を読み 込んだ後,図5および図6に示す手順で処理を行っている.つまり,

[1] 入力画像を読み込み、それを作成するホログラムのサイズをもつ領域に組み込む.

[2] 参照波および再生波の2次元位相分布を用意する.

[3] ランダム位相を作成し、ランダム位相変調した後フーリエ変換を行い、それに参照波信 号を加えてディジタルホログラムを作成する.

[4] 作成されたディジタルホログラムに再生波信号を乗じた後,フーリエ逆変換を実行して 再生像をえる.

入力画像は、図8(左)のように、大きな解析フィールドに組み込む.この解析フィールドと は、作成するホログラムのサイズと同じサイズの配列であって、初期値は全要素ゼロである. いまの場合は、入力画像のサイズは256×256であり、解析フィールドは512×512である.再生 像は組み込む位置に無関係であるから、入力画像を組み込む位置は、はみ出さない限り、この フィールドのどこでもよい.つぎに、入力画像を組み込んだ2次元のフィールドの全面に渡っ てランダム位相変調し、その結果をフーリエ変換する.ここでは、ランダム位相は標準偏差が 2πのガウス乱数によって与えた.

フーリエ変換された結果に、参照波画像を加える.その結果の強度、つまり絶対値の2乗を とり、再生像に関係しない量を取り除く後処理を経て図8(中央)のディジタルホログラムが得 られる.このようにして得られたディジタルホログラムは、全くランダムな位相分布からなる フーリエ変換場の2次元データ画像と参照波画像データの干渉強度の記録であって、ホログラ ム自体からは原画像の情報が全く知り得ないランダムな数値構造になっている.しかもその数 値は、プログラムの実行のたびに、ランダム位相変調に用いる乱数が違うので、その都度異な



図8 入力画像(左)とそのフーリエ変換型ディジタルホログラム(中)および再生像(右).

っている.

にもかかわらず,ディジタルホログラムの逆フーリエ変換の絶対値をとった結果は、ランダ ムなホログラム構造とは無関係に、図8(右)のように入力画像に一致する再生像としていつも 得られる.言い換えると、ランダムな数値構造を持つディジタルホログラムには、入力画像の 振幅と位相の完全な情報が全面に拡散した状態で分布している.そして、それらが再生段階で 再構築され入力画像データが復元される.このことは、光学的ホログラフィにおいて元来よく 知られているホログラム特有の性質である.

4. ディジタルホログラフィ干渉法による振動解析

4.1 シミュレーションプログラム

ディジタルホログラフィによる振動物体のホログラフィ干渉のシミュレーションは,基本的 には、図8の入力画像データを2次元振動板のデータに置き換えて実行できる.付録の[プロ グラムリスト2]は、振動物体のホログラフィ干渉のシミュレーションを実行するプログラム である.このシミュレーションプログラムでは、以下の手順で振動板のホログラフィ干渉を記 述している.

[1] 振動物体の振動変位の定義

ここでは、方形領域が2×3の部分に分かれて振動する関数を与えている.この振動の最大 変位は、位相値で6πである.図9は、この振動モードを3次元表示したものである.

[2] 参照波と再生波および物体表面のランダム位相データの定義

参照波の再生波も振幅は1としている.ただし参照波の位相は、2つの再生像が重ならない ように制御して与えている.再生波の位相はゼロである.また、物体表面のランダム位相はガ ウス乱数で与え、その標準偏差は2πである.

[3]時間平均法かパルスストロボ法かの選択

パラメータkeyが1のときが時間平均法,2のときにパルスストロボ法が選択される.

[4]時間積分ディジタルホログラムの作成

[3]の切り替えにしたがって、forループで記述される積分時間が変わる.時間平均法では、1周期が32分割された時間ごとにホログラムが計算され平均される.一方、パルスストロボ法では物体振動の半周期ずれた2つの時刻でホログラムが計算され加えられる.このとき、物体振動と2つの時間の同期関係によって干渉の結果は変わる.プログラムでは、この同期は選択して変えることができる.なお、時間変動する物体波の位相は、時間とともに振動する振幅を変位分布に乗じることで得ている.

[5] ディジタルホログラムからの像再生

ディジタルホログラムを逆フーリエ変換し、結果の絶対値をとることで再生像が得られる.

[6] 後処理としてのメディアンフィルタリング処理

結果の再生像を,最大値データを最大輝度(白),最小値データを最小値輝度のゼロ(黒) で表示するとき,結果に雑音が重畳していると,表示結果の印象が大きく変わる.このような 雑音をできるだけ抑制するためにメディアンフィルタリング処理を用いている.

[7] ディジタルホログラムと再生像の表示



図9 2×3の領域に分かれて振動する振動モードの変位分布.

4.2 時間平均法

プログラムでは,時間平均法とパルスストロボ法を選択して実行できる.まず,時間平均法 を選択して,プログラムを実行した結果を図10に示す.

図10(左)の入力画像は、一様な白地で示されている.これは、その部分が振動板の領域なの であるが、面外変位による振動変位および粗面からなる物体表面がいずれも位相変調として与 えられからである.つまり、反射率が一定の位相物体として振動板は扱われている.

時間平均法では、振動周期に比べて十分大きい時間にわたって時間平均ホログラム強度(積 分強度)を記録する.シミュレーションでは、1周期を32等分した間隔で瞬時瞬時のホログラ ム強度を計算し、2周期分の64ホログラムの平均として時間平均ホログラムを求めている.そ の結果が図10(中央)である.

図10(右)が、時間平均ホログラフィ干渉法の得られた再生像である.図8の静止物体の場合 と同様に原点の周りの点対称の位置に二つの再生像が得られ、そのおのおのに時間平均法に特 有なノードパターン(節のパターン)が最も明るい強度模様としてみられる.つまり、時間平 均法では、振動模様の明暗は実効的な振動振幅の関数として0次のベッセル関数で与えられる (式(9)).その結果、図5に示されているように、振動振幅がゼロの振動の節が最大強度とな り、振動振幅が増大すると、干渉縞の明暗が振動的に変化する.しかし、この明暗の変動の値 は小さく、干渉縞の像は一般に暗い.このような時間平均法の特徴がここでの再生像に明瞭に 現れている. 髙 井 信 勝



図10 入力画像である振動板の強度分布(左)とそのフーリエ変換型ディジタルホログラム(中)および時間平均法の再生像(右).

時間平均法の結果はすでに図10に示したが、そこに示された干渉縞の再生像を拡大して図11 (左)に示す.これにみられるように、干渉縞の明暗は、振動振幅がゼロの節の部分を除くとき わめて暗い.そこで、[0,255]の値に規格化されているこの干渉縞強度のヒストグラムを求め た.その結果が図11(右)である.ここにみられるように、ヒストグラム分布は、強度が100よ り小さいところに大きな山の分布があり、一方また、200を超える高い値のところに山の分布 が分極して現れる.この前者は、暗い干渉縞の低い値の部分、そして後者は振動の節の部分の 明るい領域の反映であって、時間平均法に特有なヒストグラム分布である.





時間平均法の再生像 Zmax=3 by VibrationHoloAnalysis.m

図11 時間平均法で得られた干渉縞(左)とその強度のヒストグラム分布(右). ヒストグラムの横 座標は [0,255] の範囲の強度値,縦座標は頻度.

4.2 パルスストロボ法

最後に、パルスストロボ法の実行結果を図12に示す.ここに示されている3つの結果は、物体の振動に対して2重パルスの同期関係が異なっていて、図12(左)は、物体振動と最初のパルスの同期が、位相差で0.1、(中央)は0.3、(右)は0.5だけずれている.干渉縞パターンにみ

られるように、位相差が小さいほど干渉縞の個数は少ない.この様子は、位相差がゼロの極端 な場合を考えると理解できる.つまり、この場合には、2つの連続する照明が物体の振動振幅 がいずれもゼロの位置でなされるので、ホログラムに記録されるパターンは同じで、そこから 再生される2光波はどこでも同位相になり、干渉縞は生じない.

一方,物体振動と最初の照明パルスの位相差が大きくなると,2度目のパルスは半周期おく れて与えられるので,物体変位の符号は逆で,ホログラムに記録される2つの光波の位相差は 増大する.その結果,図12(右)の結果のように干渉縞の密度は,2つの光波の位相差とともに 増大する.

図12のパルスストロボ法の結果は、物体振動と照明パルスの位相関係で干渉縞の個数が変化 するが、どの結果も鮮明な干渉縞として観察される.これらに対して、おのおのの干渉縞の強 度のヒストグラムを求めると、その位相関係に依存する図13の結果が得られた.ここに得られ た3つのヒストグラムは、いずれもゼロに近い値の領域から高い値の領域まで広く分布し、高 域になるにつれて大きくなる.しかし、位相差が小さいときには、強度値がゼロに近いところ に比較的強い分布があり、同時に強度値が200を超えるところの分布も大きくなっている.一 方、位相差が増大するにつれて、暗い低域部分の分布が減少し、同時に高域部分も小さくな る.このように、位相差の増大は全体的にヒストグラム分布を中央値領域に集める効果を示し ている.

そこで、位相値をもっと細かく変化させ、位相差の関数として、干渉縞強度の平均値、標準 偏差、およびコントラスト(つまり、標準偏差値を平均値で割った値)の変化を調べた.この 結果を図14に示す.ここにみられるように、干渉縞の平均値は、物体振動と照明パルスの位相 差がπ/2で最大になるが、標準偏差は逆にその値で最小になる.これらの結果として、コン トラストはπ/2で最小になる.このことは、干渉縞の明暗の鮮明の度合いは、π/2の位相差 で最も大きくなることを意味している.



図12 パルスストロボ法で得られた干渉モードを表す干渉縞.物体の振動と第一の照明パルスの位相 差が(左)0.1,(中)0.3,(右)0.5である.



図13 図12の干渉縞データのヒストグラム分布.(物体の振動と第一の照明パルスの位相差は(左)0.1, (中)0.3,(右)0.5である.ヒストグラムの横座標は[0,255]の範囲の強度値,縦座標は頻度.

振動振幅と照明パルスの位相差がπ/2であることの物理的な状況は,最初のパルスが振動 の山で位置であり,第2のパルスが振動の谷の位置であることである.結果として,この場合 にホログラムから出る2つの光波の位相差が最も大きいから,干渉縞の密度は最も大きくな る.そして,同時に,干渉縞のコントラストも最大になる.したがって,パルスストロボ法に よって振動モードの解析を行うとき,この2つの状態を求めることで,物体振動の未知の最大 振幅を得ることができる.



図14 振動物体との位相差を0~1.0の間で変えたときの干渉縞の平均強度(左),標準偏差(中), コントラスト(右).

5. おわりに

この研究では、従来から知られている光学的なホログラフィ振動解析の理論的な背景を記述 し、それに基づいて、ホログラフィ干渉法をディジタルホログラフィによる計算機シミュレー ションで実現する手法を記述した.ホログラフィ干渉法による物体の振動解析には、ホログラ ムとして干渉強度を記録するときのシャッター関数(露光関数)の選択により、時間平均法、 パルスストロボ法、正弦波変調ストロボ法^{31,4)}などの手法があるが、本研究では最初の二つの 手法に関してシミュレーションを実行することができた.その際、パルスストロボ法において 結果とし得てられた干渉縞強度のヒストグラムに着目し、その分析から干渉縞のコントラスト が最小になる同期パルスの照明によって物体振動の最大変位を見いだせることを明らかにした.

本研究は,戦略的研究基盤形成支援事業「電磁・光センシングを主体とする生体関連情報の 先進的計測・処理技術の開発と応用」の一環として行った。

【参考文献】

- 1) 久保田敏広: 「ホログラフィ入門」(朝倉書店 1995).
- 2) R.L.Powell and K.A.Stetson, Interferometric vibration analysis by wavefront reconstruction, J. Opt. Soc. Am. Vol.55, 1593 (1965).
- 3)高井信勝,山田正紀,井戸川徹:正弦波変調ストロボ法によるホログラフィ干渉,北海道大学工学部研究 報告,第77号,109-120 (1975).
- 4) N.Takai, M.Yamada and T.Asakura : Holographic interferometry using reference wave with a sinusoidally modulated amplitude, Optics and Laser Technology, Vol.8, 21–23 (1976).
- 5) 高井信勝: [MATLAB入門] (増補版) (工学社, 2002).
- 6) N.Takai and Y.Mifune : Digital watermarking by a holographic technique, Applied Optics, Vol.41, No.5, 865–873 (2002).
- 7) H.T.Chang and C.L.Tsan : Image watermarking by use of digital holography embedded in the discrete-cosinetransform domain, Applied Optics, Vol.44, No.29, 6211–6219 (2005).
- 8) 三船雄都,高井信勝:デジタルホログラフィを用いる電子透かし技術の研究,北海学園大学大学院工学研 究科紀要「工学研究」, No.2, pp.173-184 (2002.9).
- 9) 高井信勝:デジタルホログラフィと電子透かしへの応用,ホログラフィック・ディスプレイ研究会会報, 第22巻,第4号, pp.2-5 (2002.10).
- 高井信勝:拡散型ディジタルホログラフィにおける再生像の誤差評価,北海学園大学工学部研究報告,第 31号, pp.87-100 (2004.2).
- 11) 高井信勝: ディジタルホログラフィとその暗号化技術への応用,光技術コンタクト, Vol.42, No.6, 283 291 (2004.6).
- 12) 高井信勝:ディジタルホログラフィ暗号技術のホログラムキー,北海学園大学工学部研究報告,第32号, pp.147-158 (2005.2).

【付録】

[プログラムリスト1] ディジタルホログラムの作成と像再生

%Digital_Holography.m
clear; close all
% [1] 入力画像の読み込み,組み込みと表示
Ximage=imread('Lena256.bmp'); % 画像の読み込み
Ximage=double(Ximage); % 対象画像
N=512; % ホログラムのフィールドサイズ
X=zeros(N); % フィールドxの初期化

```
s=50; X(1+s:256+s,1+s:256+s)=Ximage; % 画像の組み込み
X0=X; % 表示のための置き換え
figure(1); imagesc(abs(X0)); axis image; colormap(gray); axis
off; title ('原画像');
```

※[2]参照波と再生波の位相の準備

end

end

```
8 [3] ランダム位相データによる変調,フーリエ変換ホログラムの作成と表示
```

```
RandPhase=2*pi*randn(N) ; % ランダム位相の2次元配列
X=X.*exp(i*RandPhase); % ランダム位相変調
FX=fft2(X); % フィールドxの2次元フーリエ変換
```

```
H=FX+exp(i*ReferencePhase); % フーリエ変換場十参照波
H=H.*conj(H); % ホログラム強度
H=H-abs(FX).^2-1; % 不要成分除去 >>>ディジタルホログラム
figure(2); imagesc(H); axis image; colormap(gray); axis off;
title ('デジタルホログラム')
```

```
% [4] ホログラムからの再生,表示
R=H.*exp(-i*ReconstPhase); % 再生波の乗算
R=ifft2(R); % フーリエ逆変換
R=abs(R); % <<<<<再生像
figure(3); imagesc(R); axis image; colormap(gray); axis off;
title ('再生像');
% End of file</pre>
```

138

[プログラムリスト2] ディジタルホログラフィ干渉法による振動解析

% File name : VibrationHoloAnalysis.m				
	clear; close all			
	M=256;	% 振動板のサイズ		
	N=M*2;	% ホログラムのフィールドサイズ		
olo	[1] 振動物体の振動変位の	定義		
	<pre>xmode=1 ; ymode=1.5 ; Zr</pre>	nax=3;		
	for n=1 : M			
	for m=1 : M			
	Z(m,n)=Zmax*sin	n(2*pi*m*xmode/M).*sin(2*pi*n*ymode/M);		
	end			
	end			
0 0	[2] 参照波と再生波データ	と物体表面のランダム位相データの定義		
	s=25; p=N-s; q=-N/2;			
	<pre>for x=1 : N ;</pre>			
	for y=1 : N;			
	ReferencePhase(x,y)=	=2*pi*(1*p*x/N+p*y/N); % 参照波の位相		
	ReconstPhase(x,y)=2*	pi*(0*q*x/N+0*q*y/N); % 再生波の位相(実際は1)		
	end			
	end			
	RandPhase=2*pi*randn(M); % ランダム位相の2次元配列		
olo	[3]時間平均法かパルスス	トロボ法かの選択		
	key=1; % key=1:	時間平均法 / key=2 :ストロボ法		
	T=64; %振動の周期	朝		
	if key==1; tt=[-T:T];	disp(''); disp('時間平均法です');		
	<pre>disp('') ; end</pre>			
	if key==2; dt=0.1;t1=	=T/2*dt;t2=t1+T/2; tt=[t1,t2];disp('');		
	disp('ストロス			

end

```
※ [4] 時間積分ディジタルホログラムの作成
 S0=25 ;
 H=zeros(N);
                                 ※初期のホログラム
 for t=tt ;
                                ※振動の時間変動
    A=sin(2*pi*t/T);
                                ※ ランダム位相十振動の位相
    phase=RandPhase+2*pi*A*Z;
    Xobj=exp(i*phase);
                                 % 物体画像 (Phase only ob-
                                   ject)
                                 ※フィールドXの初期化
    X=zeros(N);
    X(1+s0:N/2+s0,1+s0:N/20+s)=Xobj; % (位相)物体の組み込み
    FX=fft2(X); % フィールドxの2次元フーリエ変換(回折伝搬)
    ° ディジタルホログラム
    Ht=FX+exp(i*ReferencePhase); % フーリエ変換場十参照波
    Ht=abs(Ht).<sup>2</sup>-abs(FX).<sup>2</sup>-1; % t番目のディジタルホログラム
                                 ※ホログラムの重ね合わせ
    H=H+Ht/length(tt);
 end
```

» [5] ディジタルホログラムからの像再生

R=H.*exp(-i*ReconstPhase)	;	※ 再生波の乗算
R=ifft2(R);		%フーリエ逆変換
<pre>ReImage=abs(R(1:M,1:M));</pre>	;	◎ 再生像

% [6]後処理としてのメディアンフィルタリング処理

```
X=zeros(M);
for kx=2 : M-1
    for ky=2 : M-1
        W=ReImage(kx-1 : kx+1, ky-1 : ky+1);
        X(kx, ky)=median(W(:));
        end
end
ReImage=X(2 : M-1,2 : M-1);
ReImage=ReImage/max(ReImage(:))*255;
```

```
140
```

※ [7] ディジタルホログラムと再生像の表示

figure(1); imagesc(H); axis square; colormap(gray); axis off;

figure(2); imagesc(ReImage); axis square; colormap(gray);

axis off;

%End of file