

解 説

位相シフト粗面干渉計*

中 橋 末 三

理化学研究所光工学研究室 〒351-01 和光市広沢 2-1

(1988年7月6日受理)

Phase-Shifting Holographic and Speckle Interferometries

Suezou NAKADATE

Optical Engineering Laboratory, Institute of Physical and Chemical Research,
2-1, Hirosawa, Wako 351-01

1. ま え が き

物体の変形や振動振幅分布は、目標とする構造物の基本的な設計思想をも決定する場合もあるので、実時間で簡便な計測法に対する要求は強い。現在の変形・振動解析の主流は歪ゲージなどからの多次元電気信号を処理・解析するものである。しかし接触法では、検出素子の接着や素子の質量が被測定面におよぼす影響を無視できず、また物体の変形や振動が複雑になる場合では、被測定面全体の情報を得ることが不可欠となる。

このような要求を満たす測定法としてホログラフィー干渉法やスペckル干渉法などを用いた種々の手法が開発されてきた^{1,2)}。ホログラフィー干渉法を用いると画質の良い干渉縞が得られるが、銀塩乾板を用いる場合には化学現像処理が必要である。一方スペckル干渉法は高解像力の乾板を必要とせず、たとえばTVカメラなどを用いて実時間で変形や振動のようすを観察できる^{3,4)}。スペckル像の記録にデジタル方式を用いることにより2画像の位置合わせを正確に行なうことができ、また信号処理が柔軟に行なえるので干渉縞の画質が向上した^{5,6)}。これらの手法によれば物体面上に変形や振動を表わす縞模様を得られるが、干渉縞から定量的データを得るには縞次数の決定やデータの変換が必要であり、最終結果を得るまでに多大の時間と労力を要した⁷⁾。

このような欠点を解決する方法として Bruning らはトワイマン・グリーン干渉計で干渉縞の位相をシフトす

る方法を提案しレンズの特性評価などを行なった⁸⁾。この方法はその後 fringe scanning, phase-shifting, phase step 法などと呼ばれて、その後各方面で研究が行なわれている⁹⁻¹⁷⁾。

本報告では、ホログラフィーやスペckル干渉法の参照光の位相を変化させて画像を計算機に取り込み、演算・処理を行なって変位・振動振幅を画像解析する手法について述べる。これにより干渉縞のコントラストを大幅に改善できることや定量解析が可能であることを述べる¹¹⁻¹⁷⁾。

2. 変 形 測 定

2.1 ホログラフィー干渉法を用いるシステム

位相シフト法をホログラフィー干渉法に適用し物体の変形量を定量解析する手法について述べる⁹⁻¹¹⁾。測定システムの概略図を図1に示す。He-Ne レーザーからの光を半透鏡 (B. S.) で分け物体照明光と参照光とする。物体からの拡散光と参照光をホログラム面上で干渉させ、物体が変形する前にホログラムを作る。ホログラム乾板として銀塩材料などを用いる場合には、感材の伸縮などによる干渉縞が生ずる。この干渉縞をTVカメラで撮像し、ビデオ信号を8bitにA/D変換してデジタルフレームメモリに記録する。この画像をDMA転送により計算機の大容量記録装置に蓄える。縞の位相がそれぞれ、 $2\pi(i-1)/N$ ($i=1\sim N, N\geq 3$) となるようにPZTに加える電圧を制御して、干渉縞 $I_1\sim I_N$ を大容量メモリに記録する。 N 枚の画像を用いて次式により余弦(C)成分と正弦(S)成分を計算し、

* 本稿は昭和62年度光学論文賞受賞記念講演(1988年3月29日、法政大学)を骨子として、まとめたものである。

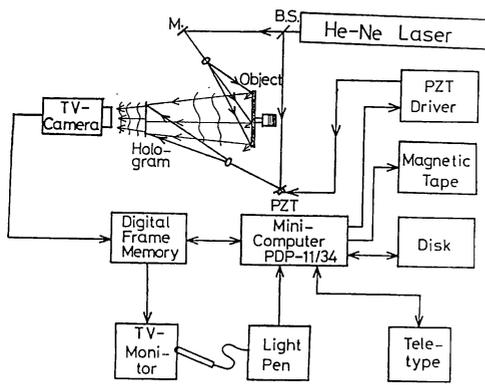


図1 位相シフトホログラフィー干渉計

$$C = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N I_i \cos \{2\pi(i-1)/N\} \quad (1)$$

$$S = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N I_i \sin \{2\pi(i-1)/N\} \quad (2)$$

これらの値を用いて次の逆正接を計算すると、

$$\psi_1 = \tan^{-1}(S/C) \quad (3)$$

乾板の伸縮による光の位相分布 ψ_1 が求まる。干渉縞を4枚使う場合には(3)式は次式のように簡単になる。

$$\psi_1 = \tan^{-1} \{(I_1 - I_2)/(I_1 - I_3)\} \quad (4)$$

次に物体を変形させて、上と同じように PZT の電圧を N 回変えながら干渉縞 $I_1 \sim I_N$ を求め、(1)~(3)式を用いて計算を行なうと、物体変形後の光の位相分布 ψ_2 が求まる。したがって、物体が視線方向のみに変形する場合には、物体変形前後の位相差 $\psi_2 - \psi_1$ を用いて次式により面外変形量 d_z が求められる。

$$d_z = \{\lambda/(1 + \cos \theta)\} \cdot \{(\psi_2 - \psi_1)/2\pi\} \quad (5)$$

ここで θ は物体照明光と観測方向のなす角であり、 λ は光の波長である。よって、 $\psi_2 - \psi_1$ が一義的に求めれば d_z が求まる。(3)式を計算した時点では、位相差は $-\pi$ から π までの値であるが、位相の飛びを補正してやる

と全画面での位相が一義的に求まる。実際には、TV カメラの散弾雑音およびスペckルの影響があると、この位相の飛びが激しく何回も起こるので、これを抑えるために、各画像に対して 3×3 サンプル点の局所平均を行なってから(3)式を計算する。

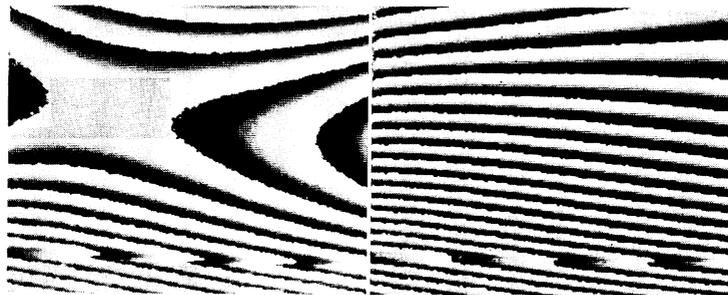
次に実験結果について述べる¹¹⁾。物体としては、縦横 9×6.7 cm 厚さ 1 mm の矩形のアルミニウム板を用い、下端を固定し上端の中央を押して変形させた。物体表面には艶消しの白スプレーを塗布した。実時間ホログラフィー干渉縞の位相を $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ と変え、これらの画像を 3×3 のサンプル点で局所平均を行ない(4)式により位相分布を求め、TV モニター上に表示したものを図2に示す。位相の $-\pi$ から π までを $0 \sim 255$ レベルで表示してある。図(a)がホログラム乾板の伸縮などによる位相差 ψ_1 であり、図(b)が物体を変形させた後の位相 ψ_2 である。入力した干渉縞には画像のシェイディングがかなりあり、また物体照明用の対物レンズの塵による照明光の強度ノイズがかなりあるが、図2に示すように位相分布にはそれらの影響はほとんどみられない。これがこの方法の一つの特徴になっている。

次に図中にみられるような位相の飛びの補正をし、図2(a),(b)の両方について全画面の位相接続を行ない(5)式により変形量を求める。変形量の鳥瞰図を図3に示した。物体上端中央付近の最大変形量は約 $6.5 \mu\text{m}$ である。図2(b)の位相分布では変形のようなすがわらないが、図3により物体が片持ち梁の変形をしているのが良くわかる。

2.2 スペckル干渉法を用いるシステム

ホログラムを用いずに、レーザー光照明された物体を直接結像する方法でも変形量を解析することができる。

スペckル干渉計を用いた面外変形測定システムの光学系の概略図を図4に示した¹²⁾。He-Ne レーザー光を対物レンズで広げた後に半透鏡で2光束に分け、被測定



(a) 変形前

(b) 変形後

図2 位相分布の表示

物体と参照面を照明する。各物体表面からの拡散光をレンズにより TV カメラの感光面上に結像させスペckル像を撮像する。TV 画像処理装置は 2.1 項で述べたものと同じである。測定は次のようにして行なう。物体変形前にスペckル像 P_0 を記録する。次に物体が変形した後に PZT の電圧を制御して参照面を $0, \lambda/8, \lambda/4, 3\lambda/8$ ずつ移動させ、それに対応した画像 $P_1 \sim P_4$ を記

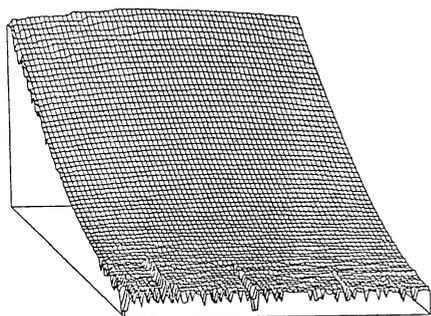


図 3 面外変形の解析結果 (鳥瞰図)

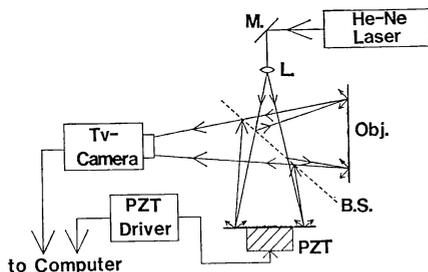


図 4 位相シフトスペckル干渉計

録する。次にそれらの画像の引算の自乗 $(P_i - P_0)^2$ ($i=1 \sim 4$) を計算すると、スペckル干渉縞 $f_1 \sim f_4$ が形成される。この画像にはスペckルが雑音として残っているので、これを除去するために低周波フィルタリング、たとえば 3×3 点の局所平均を 5 回行ないスペckルを低減する。この干渉縞を $I_1 \sim I_4$ とし(4)式を計算すると、物体の縦変形に比例した位相 ψ が求まる。 ψ は $-\pi$ から π までの値であり、 $-\pi$ および π の付近で位相が飛ぶ付近では複雑な振舞いをする。全画面で位相の飛びの補正をして絶対位相を決定するが、位相接続エラーによる霜降り雑音が残るので、 11×11 点でのメディアンフィルターを 8 回程度かけて雑音を除去する。

測定物体として直径 20 mm 厚さ 0.1 mm のアルミニウム円板を用い、これの中心部分の直径 14 mm が変形できるように周辺部分を接着固定した。この時変形を非対称に起こすために、接着部分下部の周辺長 3 mm は接着しなかった。変形は円板の中心に直径 5 mm の PZT を接着しこれに電圧を加えて行なった。物体変形用の PZT の電圧を 9 回変えて物体を変形させ、各状態で 4 枚合計 37 枚の画像を記録した。図 5 には物体変形後の低周波濾波したスペckル干渉縞を示す。(a) ~ (i) まで少しずつ変形していく様子がわかるが、変形が大きくなるにつれて縞の読み取りが困難になっていく。図 6 には各変形状態の一つ前の状態との位相差の分布を求めたものを表示した。この図中の位相の不連続点を補正した後 9 個の位相の加算を行なうと、最初の状態と最後の状態の変形差が測定できる。図 7 には、位相の不連続点を補正した後に 11×11 点の領域でメディアンフィ

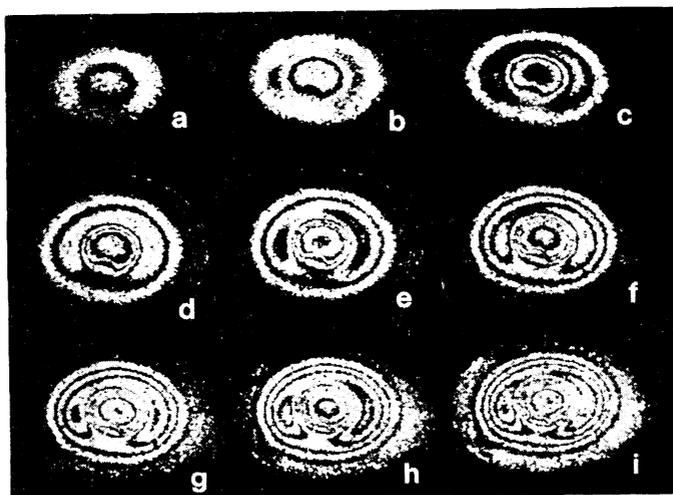


図 5 面外変位を示すスペckル干渉縞

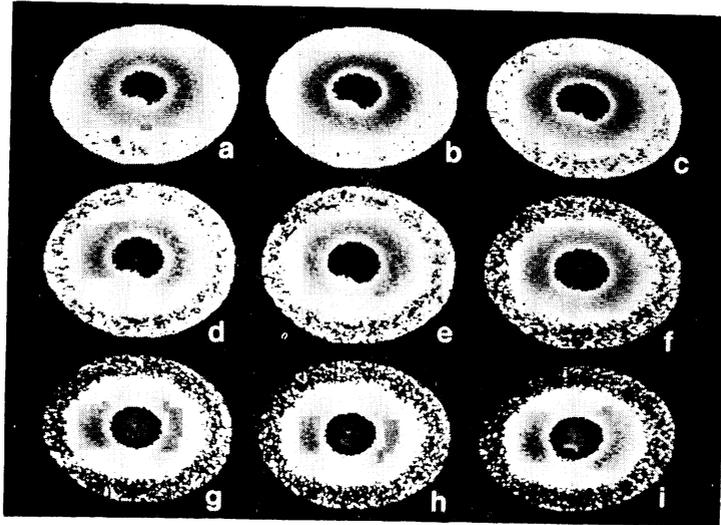


図6 一つ前の状態との位相差分布

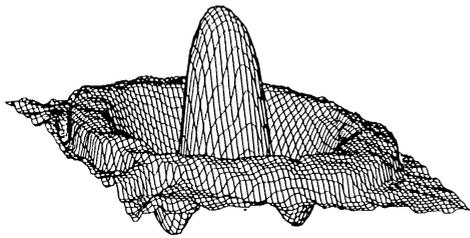


図7 メディアンフィルター後の変形量

ルターを8回行った結果を示す。この鳥瞰図から変形の凹凸の様子が良くわかるが、変形の最小値と最大値の差は約 $3\mu\text{m}$ である。

以上のように位相シフト粗面干渉計を用いると、物体の面外変形量を高精度で測定できるが、変形解析では面内変位の空間一次微分が歪や応力に比例するために、面内変形量も精度良く求めることが必要である。粗面干渉計で適当な光学配置を使うことにより、面内変形量も精度良く求めることができるが、それらについては適当な文献を参考にしてもらいたい^{11,12)}。

3. 振動測定

3.1 実時間時間平均ホログラフィー干渉法

ここでは位相シフト法を時間平均ホログラフィーに応用し振動解析を行なった結果について述べる¹⁴⁾。

実時間ホログラフィー干渉計において、物体が視線方向に振幅 a 、角周波数 ω で正弦振動すると、振動の周期より十分長い時間 T で観測したときの干渉縞 I_v は、

$$I_v = |\mathbf{O}|^2 T \{ \alpha + \beta \cos(\xi + \psi - \phi) J_0(Ka) \} \quad (6)$$

となる。ここで ξ は振動物体のバイアス変形量を表わし、乾板の伸縮および参照光の位相差をそれぞれ ψ, ϕ で表わした。さらに $|\mathbf{O}|^2$ は物体像の光強度を表わし、 α, β は空間的にはほぼ定数と考えることができる。 J_0 は第1種0次のベッセル関数であり、 K は $2\pi(1 + \cos\theta)/\lambda$ に等しく、 θ は物体法線と照明光のなす角である。(6)式から干渉縞はバイアス変形量などによる正弦波状の干渉縞が、振動振幅による項 $J_0(Ka)$ で変調されるのがわかる。したがって得られる干渉縞は振動振幅の等高線を表わさず複雑な形状となる。また干渉縞にバイアス項 $|\mathbf{O}|^2 T \alpha$ があるために縞のコントラストは低くなる。

ここで2.1項で述べたように参照光の位相を N 回変えて干渉縞を計算機に取り込み、(1)、(2)式の余弦(C)と正弦(S)成分および干渉縞強度の平均値 E を求めると次式のようなになる。

$$C = |\mathbf{O}|^2 T \beta \cos(\xi + \psi) J_0(Ka) \quad (7)$$

$$S = |\mathbf{O}|^2 T \beta \sin(\xi + \psi) J_0(Ka) \quad (8)$$

$$E = |\mathbf{O}|^2 T \alpha \quad (9)$$

したがってこれらの値を用いて次式を計算すると、

$$G = \sqrt{C^2 + S^2} / E = (\beta/\alpha) |J_0(Ka)| \quad (10)$$

となり、新たに得られる干渉縞は振動振幅のみの等高線となる。またホログラムからの再生像と物体からの直接像の強度分布が等しいとき(10)式の β/α は空間的に一定となり、縞強度から振動振幅を計算することもできる。また(7)、(8)式の C, S を用いて(3)式を計算すると、乾板の伸縮による位相とバイアス変形量による位相が得られるので、振動前に乾板による位相成分 ψ を

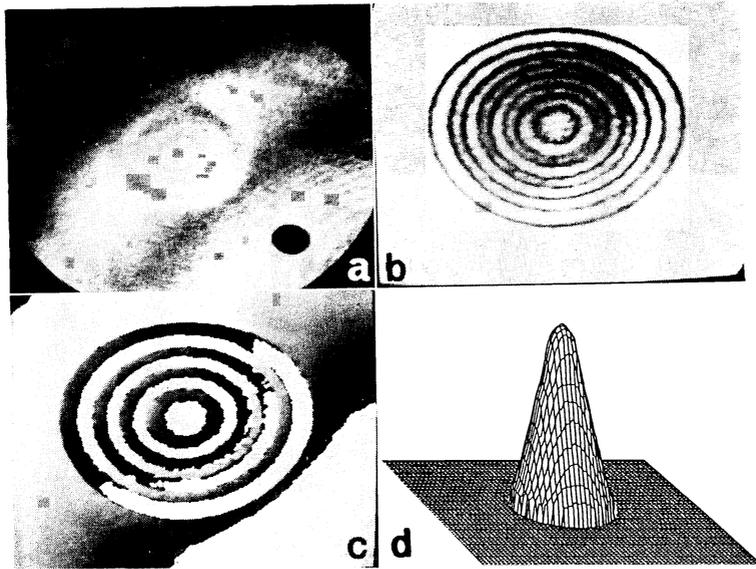


図 8 実時間ホログラフィー干渉計による振動測定
(a)入力干渉縞, (b)処理後の干渉縞, (c)位相分布, (d)振幅の鳥瞰図

求めておけば、バイアス変形量のみを求めることができる。この計算結果の位相分布には、(7)と(8)式からわかるように振幅の関数 J_0 が入っているので、 J_0 のゼロ点の前後で位相が π または $-\pi$ 飛ぶことになる。したがって新たに得られる干渉縞 G の暗干渉縞の中心線は、位相 π の飛びを検出して求めることができる。

次に実験結果について述べる。図 1 に示した実時間ホログラフィー干渉計を用いた。被測定物体としては直径 49 mm、厚さ 0.3 mm のアルミニウム板をスピーカーにより 650 Hz で振動させた。図 8 (a) には物体振動後の実時間ホログラフィー干渉縞を示した。この縞のコントラストは最も良いところで約 0.1 であり縞の画質が良くない。また干渉縞は振動振幅に対応していない。このような干渉縞を 4 枚計算機に取り込み、(10) 式を計算して得た縞模様を図 8 (b) に示した。振動振幅の等高線が縞として得られており、650 Hz はこの振動物体の基本モードであることが良くわかる。この縞のコントラストは約 0.9 である。図 (c) には位相分布を示したが、(b) の暗干渉縞の中心線で位相が π 飛んでいるのがわかる。この位相の飛びを検出し縞次数を決定した後補間して、最終的に得た振幅の鳥瞰図を図 8 (d) に示した。振幅の最大値は物体中央付近で約 $1.3 \mu\text{m}$ である。このように位相シフト法を用いると、コントラストの低い実時間の干渉縞を用いても振動振幅の定量解析ができる。

一方スペックル干渉計を用いても振動振幅の測定が行

なえる。物体振動前後のスペックル像の差の自乗を計算すると、デジタル方式のスペックル干渉法でも(6)式と類似した干渉縞を得ることができる^{6,15)}。したがってこの項で述べた位相シフト法を用いるとスペックル干渉縞の画質やコントラストを改善し、振動振幅の定量的解析を行なうことができるが、紙面の都合上割愛する¹⁵⁾。

3.2 ストロボホログラフィー干渉法

以上のような時間平均法を用いる測定法では、高いコントラストの干渉縞を計算で得ることができるが、縞次数を決定し補間しなければならない。ここでは位相シフト法をストロボホログラフィー干渉計に応用し、振動振幅を解析する方法について述べる¹⁷⁾。測定システムは図 1 とほぼ同じであるが、レーザーと半透鏡 (BS) の間にポッケルズセルと偏光板を挿入し、レーザー光をパルス変調できるようにしてある。このとき測定物体を加振している電気信号に同期して光パルスが発生するが、そのタイミングは任意に変えられるようにしてある。まず物体を加振する前の状態でホログラムを作り実時間ホログラフィー干渉縞を作る。次に物体を振動させながら光のパルス変調を行なうが、そのタイミングを変化させて、縞のコントラストが最良となる位置に設定する。次に参照光中に挿入した PZT に高電圧を印加して、ホログラフィー干渉縞の位相が $2\pi(i-1)/N$ ($i=1\sim N$) 異なる N 枚の干渉縞 $I_1\sim I_N$ を計算機に取り込み、(3) 式から位相差を求めると、振動振幅を振動の位相も含めて求める

ことができる。しかし物体が振動している場合には、光が照明されている間の干渉縞が平均されることになる。したがって光パルスのタイミングとその照明時間で干渉縞のコントラストが決定され、それが位相測定精度に影響する。

光パルスの幅を加振信号の1周期との比 P で表わし、パルスの位置を加振信号の初期位相 μ で表わすと、縞

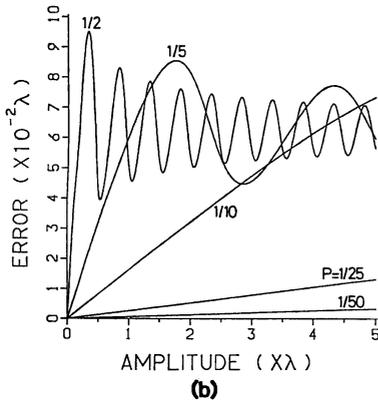
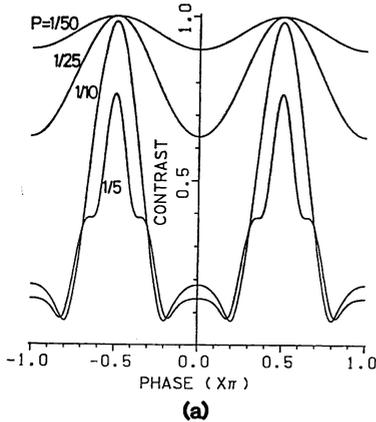


図9 干渉縞変化の影響
(a)干渉縞のコントラスト, (b)位相測定誤差

のコントラストと位相誤差を解析することができる¹⁷⁾。解析結果を図9に示した。図(a)は振幅が λ のときのコントラストであり、横軸が初期位相 μ に対応する。 $\mu = \pm\pi/2$ のとき干渉縞は一瞬静止することになり、したがってこのときが最もコントラストが高くなる。またパルス幅が小さいほどコントラストの変化が小さいことがわかる。図9(b)には位相誤差を示したが、横軸が振幅でありパルス位置 μ は $\pi/2$ である。パルス幅の比 P が $1/25$ 程度であるならば、 5λ の振幅でも位相誤差が $\lambda/100$ 以下になることがわかる。

次に実験結果について述べる。物体は直径 49 mm、厚み 0.3 mm のアルミニウム板を振動させた。図10には物体を 3.75 kHz で加振したときの縞から、位相差を算出した結果を示した。位相 $0 \sim 2\pi$ を $0 \sim 255$ レベルで表示した。このときの光パルス幅の比 P は約 $1/9.1$ であり、この値よりパルス幅を狭くすると画像が撮像しにくくなる。図10の位相分布の不連続点を補正し、振幅がゼロのときの乾板の伸縮による位相差を差し引いて

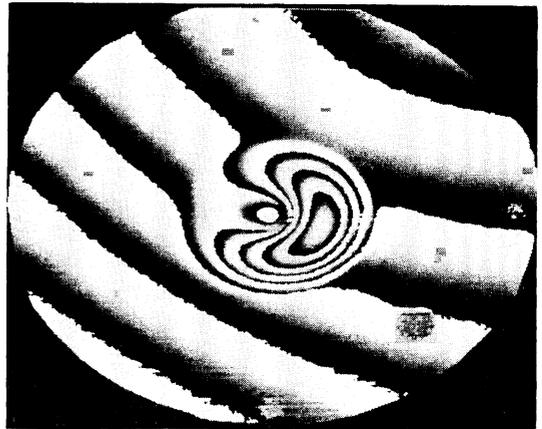
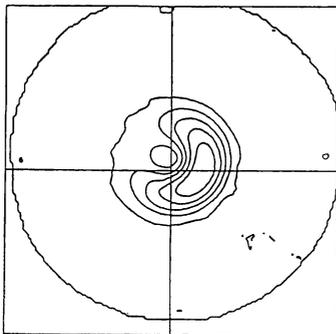
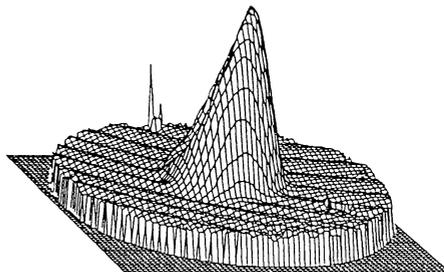


図10 物体振動後の位相分布



(a) 等高線 (間隔 $0.2 \mu\text{m}$)



(b) 鳥瞰図

図11 振動振幅分布 (3.75 kHz)

振動振幅に変換した結果を図 11 (a), (b)に示す。

(a)が等高線表示であり、等高線の間隔は $0.2 \mu\text{m}$ である。(b)が鳥瞰図であり振動のようすが物体全面で良くわかる。このように定常振動する物体ではストロボホログラフィー干渉法により振動を振動の初期位相を含めて定量解析することができる。

4. ま と め

ホログラフィーおよびスペckル干渉計の参照光の位相を制御して画像を計算機に取り込み、演算・処理することにより変形量や振動振幅を画像解析する手法について述べてきた。ホログラフィー干渉縞は雑音が少なく高可視度の縞であるので高精度の測定に適する。一方、スペckル干渉縞は、スペckル自身の影響により高精度の測定は期待できないが、ホログラム用感光材料が不要なこと、面内変形量などが直接求まることなどのほかに、多量のスペckル像が記録できれば、画面内の干渉縞の本数で制限されない測定が可能であるという特徴がある。

今後計算機の処理能力や画像の記録容量などが飛躍的に向上することが期待でき、また固体の撮像素子の高解像力化、高感度化や多機能化なども期待できる。したがって今後は、多量の画像を高速に演算・処理することが課題となるが、光学系や制御系の工夫や計算機プログラムの工夫などにより、多次元の情報の抽出や計測の実時間化などが可能になるとと思われる。

文 献

- 1) R. K. Erf, ed.: *Holographic Nondestructive Testing* (Academic Press, New York, 1974).
- 2) A. E. Ennos: "Speckle interferometry," *Laser Speckle and Related Phenomena*, ed. J. C. Dainty (Springer, Berlin, 1975) pp. 203-253.
- 3) J. N. Butters and J. A. Leendertz: "Speckle pattern and holographic techniques in engineering metrology," *Opt. Laser Technol.*, **3** (1971) 26-30.
- 4) O. J. Løkkberg, O. M. Holje and H. M. Pedersen: "Scan converter memory used in tv-speckle interferometry," *Opt. Laser Technol.*, **8** (1976) 17-20.
- 5) S. Nakadate, T. Yatagai and H. Saito: "Electronic speckle pattern interferometry using digital image processing techniques," *Appl. Opt.*, **19** (1980) 1879-1883.
- 6) S. Nakadate, T. Yatagai and H. Saito: "Digital speckle-pattern shearing interferometry," *Appl. Opt.*, **19** (1980) 4241-4246.
- 7) S. Nakadate, T. Yatagai and H. Saito: "Computer-aided speckle pattern interferometry," *Appl. Opt.*, **22** (1983) 237-243.
- 8) J. H. Bruning, D. R. Herriott, J. E. Gallagher, D. P. Rosenfeld, A. D. White and D. J. Brangaccio: "Digital wavefront measuring interferometer for testing optical surface and lenses," *Appl. Opt.*, **13** (1974) 2693-2703.
- 9) G. E. Sommargren: "Double-exposure holographic interferometry using common-path reference waves," *Appl. Opt.*, **16** (1977) 1736-1741.
- 10) P. Hariharan, B. F. Oreb and N. Brown: "Real-time holographic interferometry: a microcomputer system for the measurement of vector displacements," *Appl. Opt.*, **22** (1983) 876-880.
- 11) 中橋末三, 齊藤弘義: "縞走査粗面干渉法による変形量の計算機解析", *光学*, **13** (1984) 299-307.
- 12) S. Nakadate and H. Saito: "Fringe scanning speckle-pattern interferometry," *Appl. Opt.*, **24** (1985) 2172-2179.
- 13) K. Creath: "Phase-shifting speckle interferometry," *Appl. Opt.*, **24** (1985) 3053-3058.
- 14) S. Nakadate: "Vibration measurement using phase-shifting time-average holographic interferometry," *Appl. Opt.*, **25** (1986) 4155-4161.
- 15) S. Nakadate: "Vibration measurement using phase-shifting speckle-pattern interferometry," *Appl. Opt.*, **25** (1986) 4162-4167.
- 16) K. Creath: "Averaging double-exposure speckle interferograms," *Opt. Lett.*, **10** (1985) 582-584.
- 17) S. Nakadate, H. Saito and T. Nakajima: "Vibration measurement using phase-shifting stroboscopic holographic interferometry," *Opt. Acta*, **33** (1986) 1295-1309.