



縞走査粗面干渉法による変形量の計算機解析

中橋 末三・斎藤 弘義

理化学研究所光学計測研究室 〒351-01 和光市広沢 2-1

(1984年3月21日受理)

Fringe Scanning Holographic and Speckle Interferometers for Deformation Measurements

Suezou NAKADATE and Hiroyoshi SAITO

The Institute of Physical and Chemical Research, 2-1, Hirosawa, Wako 351-01

Computer holographic and speckle interferometry systems for deformation measurements of a diffuse object are presented, which are based on fringe scanning method with phase-shifted holographic and speckle interferograms. A PZT device is used as changing a phase of the reference light in these interferometers. In the case of holographic interferometry, an optical path difference of an object before and after deformation is calculated with four phase-shifted holographic interferograms. In speckle interferometry, four speckle interferograms are generated with one speckle pattern of an undeformed object and four speckle patterns after deformation. An optical path difference, which is proportional to the deformation, is calculated with these speckle interferograms. A spatial filtering for reducing a speckle noise, a correction of discontinuity of calculated phases and smoothing of the data are also discussed. Some experimental results with these interferometer systems are presented for the cases of out-of-plane and in-plane deformation measurements.

1. ま え が き

ホログラフィー干渉計やスペckル干渉計を用いると、粗面物体の変形量が光の波長程度の精度で測定できる。これらの方法の特徴は、非接触測定であることに加え、変形量の等高線が縞画像として得られることである^{1,2)}。ホログラフィー干渉法では、被測定物体の変形前後の光の波面が干渉するために良質の縞画像が得られる。ホログラムを記録するためには、高解像力の感光材料が必要であるが、それらの取扱いには熟練を要する。一方スペckル干渉計は、インライン型のホログラフィー干渉計とみなせるので、ホログラフィーと同様の測定ができるが、光学系を変えることによって、面内変形や変形の微分を直接縞画像として得ることができる²⁾。スペckル干渉法では、スペckルをある程度解像すればよいので、低解像力の撮像素子を使うことができ、実時間測定が可能である³⁻⁵⁾。しかし、スペckル干渉縞は、

で、スペckルが目立つ場合には、画質の悪い縞模様になってしまう。

最近、非破壊検査や光の波面計測では⁶⁻⁸⁾、干渉縞の処理に計算機システムが導入され、画像処理手法を用いて各種の干渉縞が解析されている。それにより、表面形状^{9,10)}、歪¹¹⁻¹⁶⁾、3次元変位¹⁷⁾、熱伝導の様子¹⁸⁾などが定量化される。縞の尾根、谷線を求める方法や、単独で高速性をねらったものでは、小領域内での縞の本数¹¹⁾や縞の形状¹⁴⁾から欠陥検査を行なった例もある。さらに高精度で縞次数の補間が自動的に行なえる手法として、Bruningらによる縞走査法や¹⁹⁾、武田らによるフーリエ変換法がある²⁰⁾。縞走査法のホログラフィー干渉への応用としては、Sommargren²¹⁾、Hariharan²²⁾やDändlikerら²³⁾などの報告があり高精度の測定結果が得られている。

本論文では、ホログラフィー干渉計およびスペckル干渉計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・処理を行なって変形量を自動解析するシス

テムについて述べる。そのときに問題となる、スペックル雑音低減のための空間フィルタリング、計算した光路差のとの補正方法および測定値の平滑化などについても述べることにする。

2. ホログラフィー干渉法を用いるシステム

2.1 面外変位の測定

システムのブロックダイアグラムを **Fig. 1** に示す。He-Ne レーザーからの光を半透鏡で分け、物体光と参照光とする。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。このときホログラム感材の収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、1 画面を 512×512 点にサンプリングし、濃度値は、8 bit 256 レベルに量子化して、1/30 秒で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 (DEC, PDP-11/34) の大容量記録装置、たとえば磁気テープやディスクに蓄える。この画像を I_1 とする。参照光の光路には、直径 20 mm の PZT にミラーを接着したものを挿入し、光路が高電圧により 1 波長/kV 程度変えられるようにしてある。次に、縞の位相がそれぞれ $\pi/2, \pi, 3\pi/2$ となるように PZT に加える電圧を制御して、干渉縞 $I_2 \sim I_4$ を大容量メモリに記録する。ここで、PZT の電圧とミラーの移動距離は比例するとした。これら $I_1 \sim I_4$ の 4 枚の画像を用いて次式を計算すると、

$$\phi_1 = \tan^{-1} \{ (I_4 - I_2) / (I_1 - I_3) \} \quad (1)$$

乾板の収縮による光の位相差 ϕ_1 が求まる²⁴⁾。次に物体を変形させて、上と同じように PZT の電圧を変えながら干渉縞 $I_1' \sim I_4'$ を計算機に入力し、(1)式を用いて計算を行なうと、物体変形後の光の位相差 ϕ_2 が求まる。

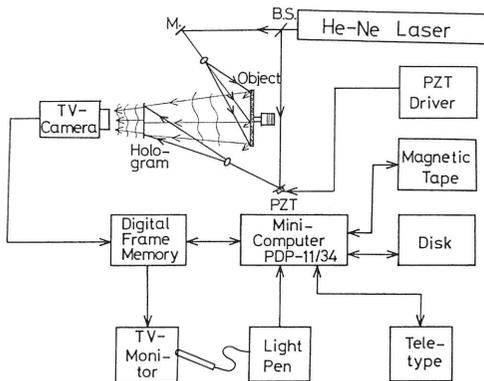


Fig. 1 Schematic diagram of fringe scanning holographic interferometer for out-of-plane deformation measurement.

したがって、物体の視線方向の変位すなわち面外変位 d_z は、物体変形前後の位相差 $\phi_2 - \phi_1$ を用いて、次式により求められる²⁵⁾。

$$d_z = \{ \lambda / (1 + \cos \theta) \} \cdot \{ (\phi_2 - \phi_1) / 2\pi \} \quad (2)$$

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 $\phi_2 - \phi_1$ が一義的にもとまれば d_z が自動的に求まる。(1)式の計算では、逆正接内の分母および分子の符号が求められるので、位相差は $-\pi$ から π までの値が求められる。 $-\pi$ から π および π から $-\pi$ までの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ックルの影響があると、この位相の飛びが激しく何回も起こるので、これを抑さえるために、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(1)式を計算した。位相の飛びの補正は次のようにして行なう。いま、縦または横方向一ラインのデータを切り出し、各点の位相を P_i ($i=1, 2, \dots, N$) とする。 i 番目の注目点の位相は次のようなアルゴリズムで決定する。まず位相のバイアス分 (BIAS) の初期値をゼロとする。次に i 番目の位相 P_i と $i-1$ 番目の位相 P_{i-1} との差 δP を計算し、 δP がある正の閾値 T より大きいときは BIAS を $BIAS - 2\pi$ で置き換え、もし δP が $-T$ より小さいならば BIAS を $BIAS + 2\pi$ で置き換える。 δP が上記の範囲外の場合は BIAS をそのままにする。次に位相の飛びが補正された位相として $P_i + BIAS$ を出力する。物体の変形がなめらかに起こっており、隣接サンプル点間の真の位相差が π より大きくない場合はノイズも考慮に入れると、閾値 T は π にするのがよい。このアルゴリズムを用いてまず横方向各ラインの位相の接続を行ない、次に縦方向 1 ラインの位相接続を行ない、これを基準として各横方向の位相を補正し、全画面の位相を決める。このようにして一義的に位相 ϕ_1, ϕ_2 を求めたのち(2)式により面外変位を算出する。

次に実験結果について述べる。物体としては、縦横 9×6.7 cm、厚さ 1 mm の矩形のアルミ板を用い、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白スプレーを塗布した。**Fig. 2** には物体を変形させたあとの実時間ホログラフィー干渉縞を示す。

Fig. 2 (a)~(d)には位相がそれぞれ、 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ のときの干渉縞を示す。TV カメラの散弾雑音やスペックルを取り除くために、これらの画像を 3×3 のサンプル点で局所平均を行ない、(1)式を計算して位相分布を表示したものを **Fig. 3** に示す。

$-\pi \sim \pi$ までを 0~255 レベルで表示してある。**Fig. 3**

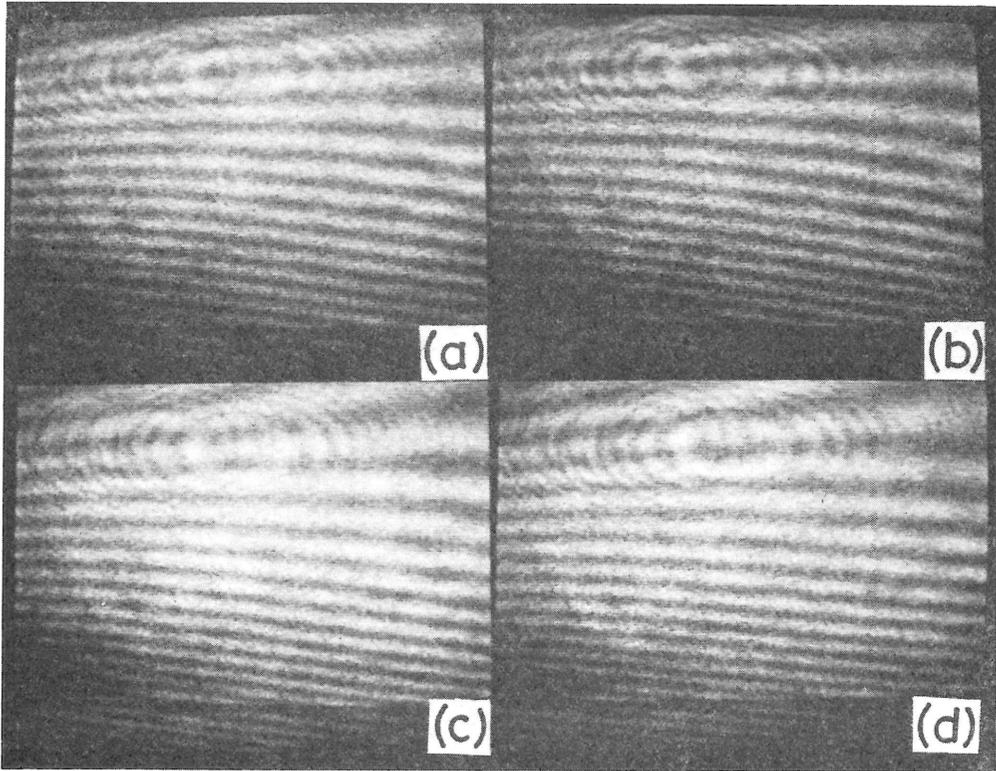


Fig. 2 Real-time holographic interferograms, (a)~(d), of a cantilever-like object after deformation, whose phases are 0 , $\pi/2$, π and $3\pi/2$, respectively.

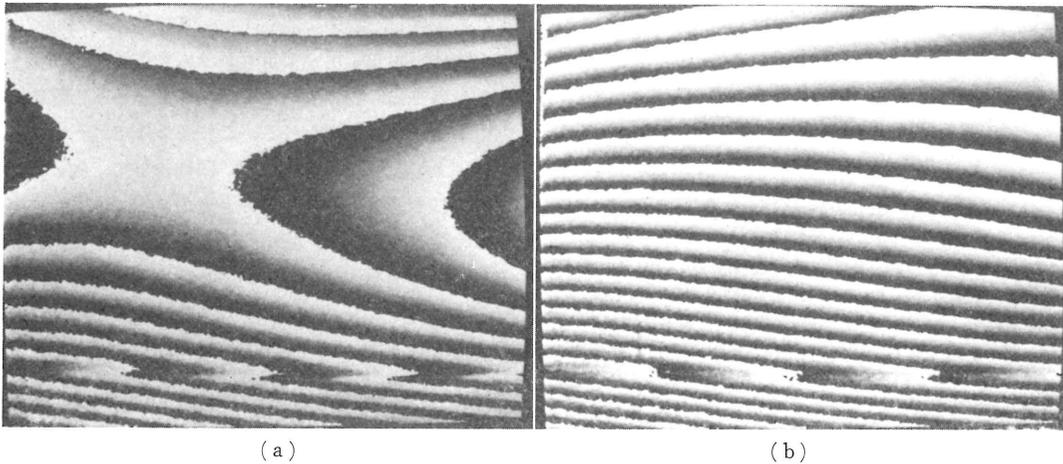


Fig. 3 Distributions of optical path differences of the cantilever-like object, (a) before deformation, (b) after deformation. Phases ranging from $-\pi$ to π are displayed as 0-255 levels.

(a)がホログラム撮影時に乾板の収縮などによる位相差 ϕ_1 であり, **Fig. 3**(b)が物体を変形させた後の位相 ϕ_2 である. **Fig. 3**(a), (b)について全画面の位相接続を行ない, (2)式を用いて変位量を求め表示したものを

Fig. 4 に示す.

図中の白い帯は, 右端上にある数字 (単位 μm) を中心に $\pm 0.05 \mu\text{m}$ 内にある変位量を表示したものである. **Fig. 3**(b)では変形の様子がわからないが, **Fig. 4**に

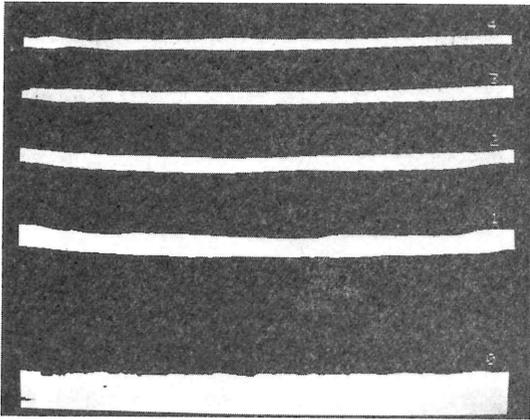


Fig. 4 Out-of-plane deformation of the cantilever-like object.

A white band depicts a deformation ranging from $x - 0.05 \mu\text{m}$ to $x + 0.05 \mu\text{m}$, where x is the number displayed nearby.

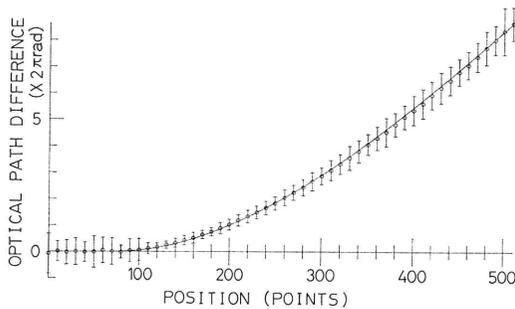


Fig. 5 Values of out-of-plane deformation of the cantilever-like object in the vertical direction in **Fig. 4**.

The abscissa shows a sample point from the bottom line of the object. The ordinate depicts an optical path difference proportional to the deformation. An error bar shows maximum and minimum values on a horizontal line in **Fig. 4**, and a circle is a mean value on the horizontal line. The solid line depicts a theoretical curve of a deformation of a cantilever.

より片持ち梁の変形をしているのがよくわかる。次に、**Fig. 4** の縦方向各ラインの、対応する10点ごとのサンプル点での最大、最小値および平均値を求めグラフにしたものを **Fig. 5** に示す。

横軸は下端から上端までのサンプル点数を表わし、縦軸は光路差を示している。**Fig. 5** は0~70点までが固定端でありこの部分の剛体変位成分を傾きとみなし、それを補正して表示したものである。実線は片持ち梁が変

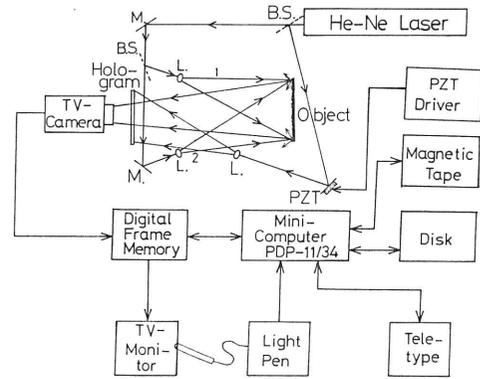


Fig. 6 Schematic diagram of fringe scanning holographic interferometer for the case of in-plane deformation measurement.

位するときの理論曲線であり、実験結果とよく一致している。

2.2 面内変位の測定

粗面物体の変形解析では、面内変位の空間1次微分が歪や応力に比例するために、面内変位を精度よく求めることが必要である。実時間ホログラフィー干渉法を用いた面内変位自動解析システムを **Fig. 6** に示す。

He-Ne レーザーからの光を半透鏡により、物体照明光と参照光に分ける。物体照明光をさらに半透鏡で2分割し、被測定物体の表面の法線方向に対して対称になるように配置し、物体を照明する。まず物体変形前に、2つの物体照明光を用いてホログラムを作る。次にホログラムを再生し、物体照明光1で物体を照らすと乾板の収縮による干涉縞が現われる。これを2.1で述べた方法により、光の位相 ϕ_1 を求める。同様に、物体照明光2により干涉縞を作り、このときの位相 ϕ_2 を計算する。次に物体を変形させ、物体照明光1および2によりそれぞれの干涉縞を作り、各方向の物体変形後の位相 ϕ'_1 と ϕ'_2 を求める。これらの位相の不連続点を2.1で述べた方法により補正して、全画面での位相を決定する。次にこれらの位相を用いて次式を計算すると、面内変位量 d_x が求まる²⁶⁾。

$$d_x = (\lambda/2 \sin \theta) \{(\phi'_1 - \phi'_2 + \phi_2 - \phi_1)/2\pi\} \quad (3)$$

ここで θ は、物体照明光1、2が物体表面の法線方向となす角である。

面内変位測定の実験結果について述べる。被測定物体として、幅102mm、高さ20mm、厚さ0.5mmのアルミ板の引張り試験片を用い、表面には艶消しの白スプレーを塗った。右端を固定し左端を引っ張った。**Fig. 7** には、物体照明光1を用いたときの、物体変形前と後の

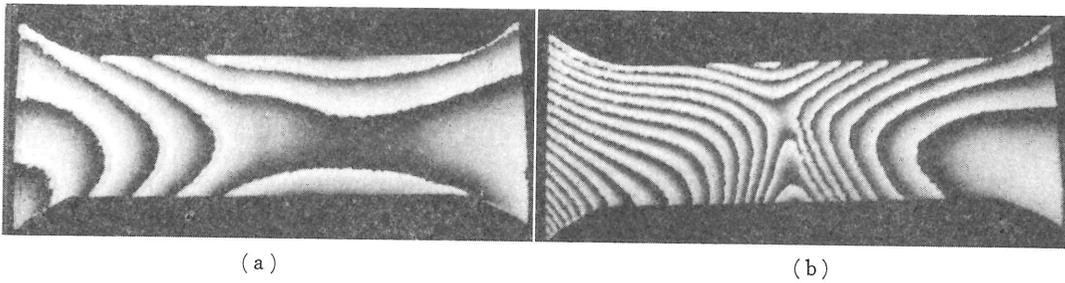


Fig. 7 Distribution of optical path differences of an aluminum plate subject to uniform tension at the left end for (a) before deformation and (b) after deformation. Phases ranging from $-\pi$ to π are displayed as 0-255 levels.

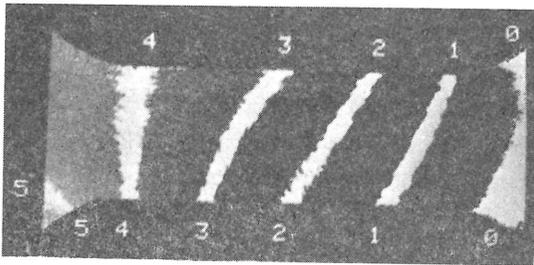


Fig. 8 In-plane deformation of the test pieces shown in **Fig. 7**.

A white band depicts a deformation ranging from $x-0.1 \mu\text{m}$ to $x+0.1 \mu\text{m}$, where $x(x \geq 1)$ is the number indicated in the figure. For the case of $x=0$, the white band shows the deformation within $\pm 0.2 \mu\text{m}$.

位相差 ϕ_1, ϕ'_1 の分布を示す。 $-\pi \sim \pi$ の位相を 0~255 レベルとして表示してある。

Fig. 8 には各方向の位相差を用いて、(3)式により計算して求めた面内変位量を示す。

Fig. 8 の白い帯は、図中の数字 (μm) を中心として $\pm 0.1 \mu\text{m}$ 内にある点を表示したものである。ただし、 $0 \mu\text{m}$ は $\pm 0.2 \mu\text{m}$ の幅で表示した。 **Fig. 8** の濃淡は変位量を最大値で規格化して 0~255 レベルで表示したものである。図8により物体上端より下端のほうがより強く引っ張られているのがよくわかる。

以上の処理はすべてミニコンで行なったが、その計算時間は、1枚の画像入力に約8秒、1画像の空間平均が約20分、(1)式の計算に5分および位相の補正が2分程度などであった。これは、ミニコンの容量不足や専用乗除算機などを保有していないことなどによるものであり、計算機のレベルアップや画像専用ハードウェアの採用などにより、十分解決できる問題であると考えている。

3. スペックル干渉法を用いるシステム

3.1 面外変位の測定

スペックル干渉計を用いた、面外変位測定システムの概略図を **Fig. 9** に示す。

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、被測定物体と参照面を照明する。各物体表面からの拡散光は、TVカメラのレンズにより感光面上に結像され、スペックル像となる。この画像をデジタルフレームメモリに記録した後、ミニコンピュータの磁気テープやディスクに蓄える。測定は次のようにして行なう。物体変形前にスペックル像 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 $P_1 \sim P_4$ を記録する。そして引き算の自乗、 $(P_i - P_0)^2$ ($i=1 \sim 4$) を計算すると、スペックル干渉縞 $f_1 \sim f_4$ が形成される。この画像にはスペックルが雑音として残っているので、これを除去するために、 3×3 点の局所平均を5回行ない、低周波フィルタリングをほどこした。

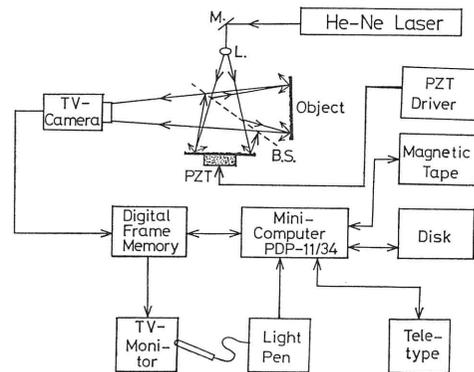


Fig. 9 Schematic diagram of fringe scanning speckle interferometer for the case of out-of-plane deformation measurement.

この干渉縞を $I_1 \sim I_4$ とし, (1)式を計算すると物体の縦変位に比例した位相 ϕ が求まる. ϕ は $-\pi$ から π までの値であり, $-\pi$ および π の付近で位相のとびを生ずる. スペックル干渉法では, スペックルの影響が完全には除去できないので, 位相がとび付近では複雑な振舞いをする. したがって, ホログラフィー干渉法で述べた手法を拡張して以下に述べる方法により全画面での位相を求める. まず(3)式で述べた位相接続の処理を $T=\pi$ とし, 縦横各ラインについて2回行なう. 閾値 T を π とする理由は, 位相のとびを補正した後でも, 2点間の位相差が π より大きくはならないからである. また, この処理を2回行なうのは, 位相のとびの補正処理が非可逆処理であり, 経験的に2回行なうほうが, 滑らかに位相接続される確率が高いことを確認したからである. 次に, 任意の点 (i, j) の位相を次のようにして決定する. 補正処理後の横方向および縦方向の各ラインの位相を $\theta H(i, j)$, $\theta V(i, j)$ ($i, j=1, 2, \dots, N$) とする. Fig. 10 に示したように, 縦方向の2ライン $X1, X2$ を決め, $\theta V(X1, j)$, $\theta V(X2, j)$ が滑らかに接続されているのを確認する. 次に, 横方向の2ライン $Y1, Y2$ を決め, $\theta H(i,$

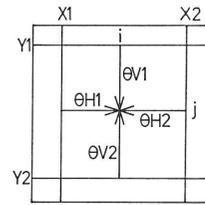


Fig. 10 Schematic illustration for the determination of an absolute fringe order in a surface of an object.

$Y1$ と $\theta H(i, Y2)$ が滑らかに接続されているのを確認する. 明らかに位相のとびが補正されていない場合は, 別の直線を指定する.

これら4基準線上すべての点の変位量に比例した位相は, ある1点の変位量に比例した位相がわかっているならば自動的に決定することができる. 一般には固定点を位相0とする. 次に Fig. 10 に示したように, $\theta H1 = \theta H(i, j) - \theta H(X1, j)$ などとすると, 任意の点 (i, j) の変位量に比例する位相は, $\theta 1 = \theta(X1, j) + \theta H1$, $\theta 2 = \theta(i, Y1) + \theta V1, \dots$ などの4個の推定値が求まる. ここで, $\theta(X1, k)$ などは基準線上の位相である. 任意点 (i, j) の位相

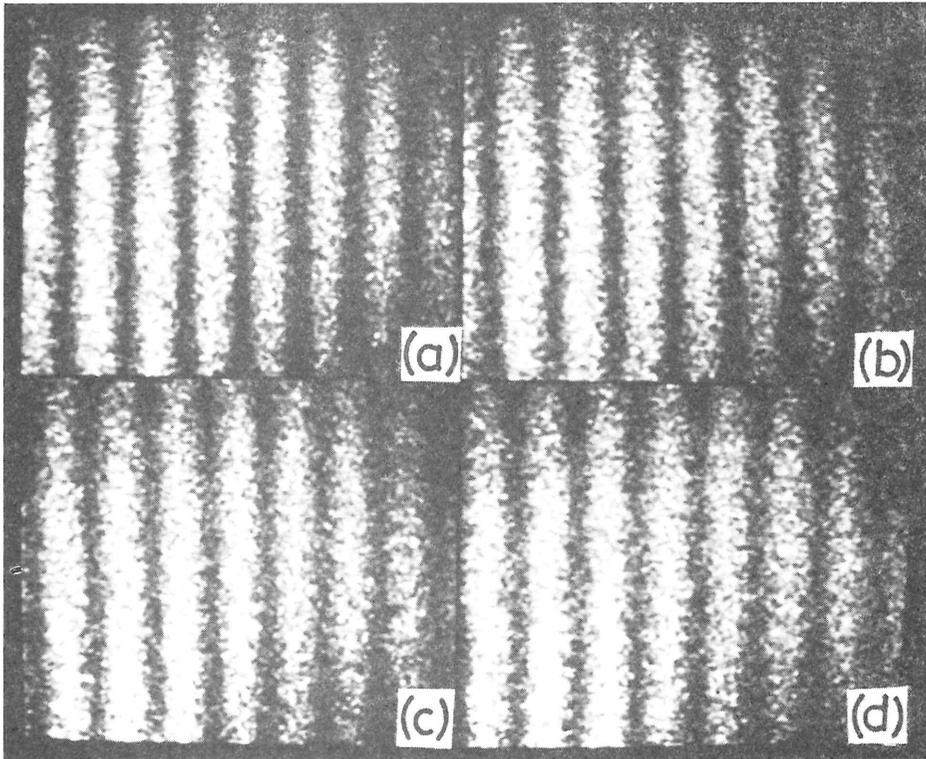


Fig. 11 Speckle interferograms of an acrylic plate subject to a tilt. (a)~(d) result from 5 times iteration of averaging within 3×3 sample points, whose phases are $0, \pi/2, \pi$ and $3\pi/2$, respectively.

$\theta(i, j)$ として最も確からしいのは, $\theta_1 \sim \theta_4$ までのなかで, いちばん近いものどうしと考えられる. したがって, それらの差の絶対値が最小な二つの値の平均値を $\theta(i, j)$ とした. このように全画面で変位置に比例した位相を決定した後スペckルの影響による霜降り雑音を取り除くために, 11×11 点でのメディアンフィルターを8回かけて霜降り雑音を除去した.

測定物体として, 縦横 50 mm, 厚さ 10 mm のアクリル板を用い, その表面に艶消しの白スプレーを塗布した. 参照面は, 直径 65 mm 厚さ 5 mm のアクリル円板を用い, その中心に直径 50 mm 厚さ 12 mm の PZT を接着し, 表面には白スプレーを塗布した. 物体にティルトを与えたときの縞の位相が, $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ のときのスペckル干渉縞を Fig. 11 に示す. 3×3 サンプル点の局所平均を5回行った後の干渉縞である. 縞の位相は, 参照面の PZT に電圧を加えて行なったときに, 実

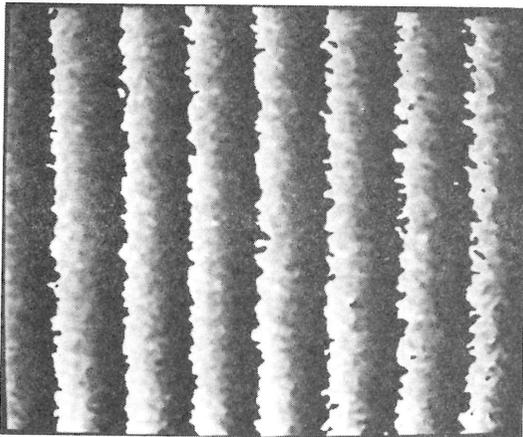


Fig. 12 Distribution of optical path differences calculated with four speckle interferograms shown in Fig. 11. Phases ranging from $-\pi$ to π are displayed as 0-255 levels.

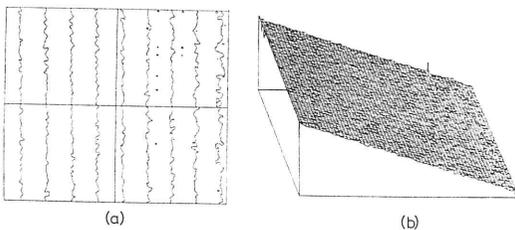


Fig. 13 Result from a correction of discontinuity of the phase shown in Fig. 12. (a) contour and (b) perspective representations. The interval between two contours is $0.25 \mu\text{m}$.

時間スペckル干渉縞がもとの位置に戻ったときの電圧を, 縞の位相が 2π のときの電圧とし, これを等分して決定した. Fig. 11 のスペckル干渉縞を用いて(1)式を計算し, 位相分布を求めたものを Fig. 12 に示す.

$-\pi \sim \pi$ までを 0~255 レベルとして表示してある.

Fig. 12 から縞のバイアスや強度むらがよく取り除かれるのがわかる. 前に述べた方法により位相のとびの補正を行ない, 位相の 2π が $0.32 \mu\text{m}$ として, 縦変位置になおしたものを Fig. 13 に示す. Fig. 13(a) は等高線表示であり, 線の間隔は $0.25 \mu\text{m}$ の変位差を表わす.

Fig. 13(b) は鳥瞰図表現であり, 縞の凹凸が決められていることがわかる. Fig. 14 には, Fig. 13 に 11×11 サンプル点でのメディアンフィルターを8回かけたものを示すが, Fig. 13 中にみられるスパイク状のノイズがよく取り除かれているのがわかる.

3.2 面内変位の測定

面内変位を測定するシステムを Fig. 15 に示した. レーザーからの光を2光束に分け, 被測定面の法線方向に対して対称な方向から照明する. 二つの照明光の一方に

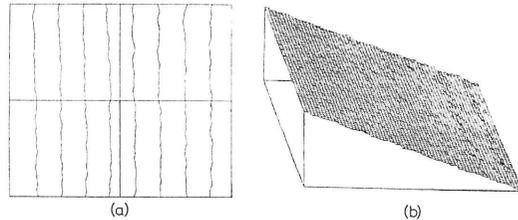


Fig. 14 Result from 8 times iteration of median filtering within an 11×11 sample area in Fig. 13.

(a) contour and (b) perspective representations. The interval between two contours is $0.25 \mu\text{m}$.

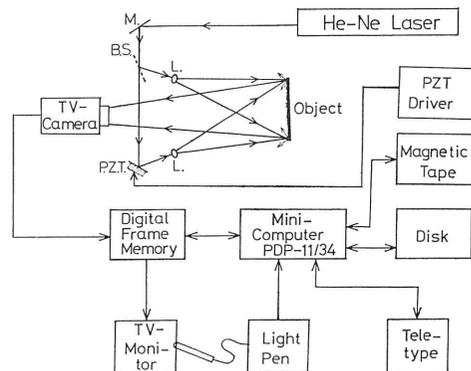


Fig. 15 Schematic diagram of fringe scanning speckle interferometer for the case of in-plane deformation measurement.

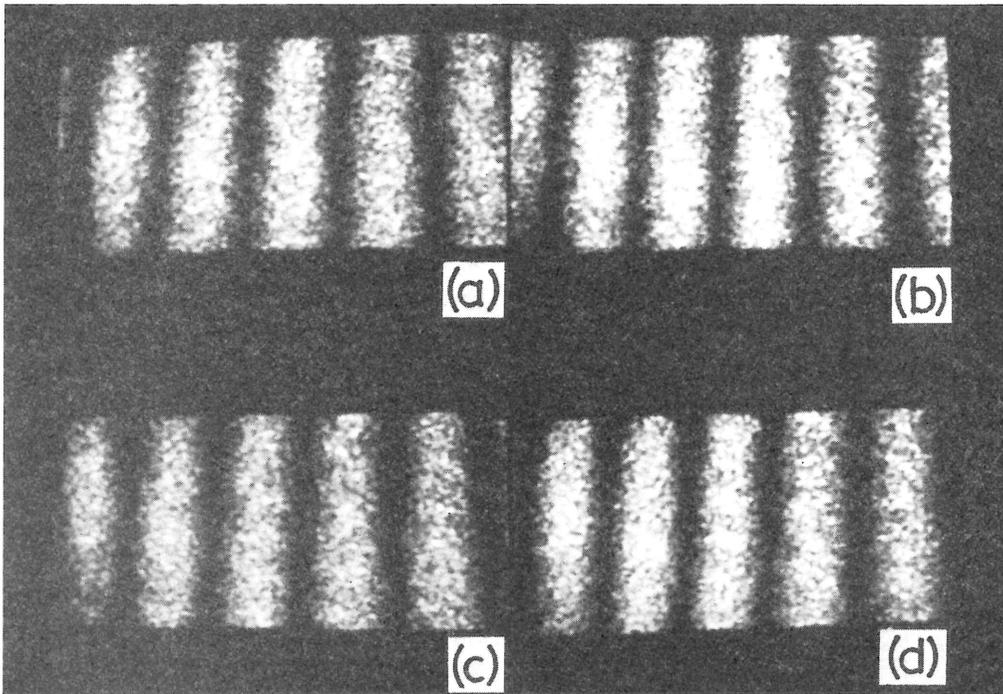


Fig. 16 Speckle interferograms of a brass plate subject to uniform tension at the right end. (a)~(d) result from 5 times iteration of averaging over 3×3 sample points, whose phases are $0, \pi/2, \pi$ and $3\pi/2$, respectively.

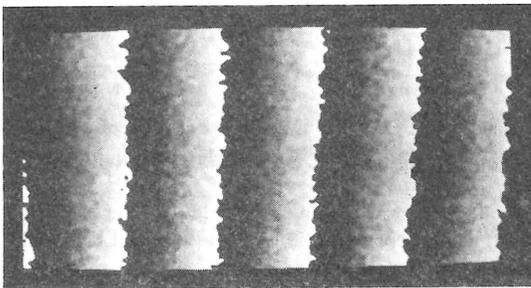


Fig. 17 Distribution of optical path differences calculated with four speckle interferograms shown in **Fig. 16**. Phases ranging from $-\pi$ to π are displayed as 0-255 levels.

PZT を挿入し、光路差を変えられるようにする。二つの照明光を同時に物体にあて、スペックル像を計算機に取り込む。記録した画像間の演算および処理は、3.1で述べた方法と同じである。照明光の物体法線となす角を θ とし、測定される縞の位相を ϕ とすると、面内変位量 d_x は次式より計算できる²⁷⁾。

$$d_x = (\lambda/2 \sin \theta)(\phi/2\pi) \quad (4)$$

被測定物体としては、2.2 節で述べた引張り試験片を

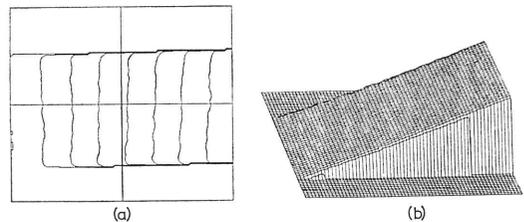


Fig. 18 Distribution of in-plane deformation which is obtained by a correction of phase discontinuity in **Fig. 17**, subsequently smoothed by 8 times iteration of median filtering within 11×11 sample points. (a) contour and (b) perspective representation. The interval between two contours is $0.5 \mu\text{m}$.

用いた。左端を固定し右端を引っ張った後に、PZT に電圧を加えて4枚のスペックル像を記録した。**Fig. 16** (a)~(d)には縞の位相が $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ のときの干渉縞をそれぞれ示したが、 3×3 点での局所平均を5回行った画像である。

Fig. 17 には **Fig. 16** の干渉縞を用いて(1)式を計算し、位相分布を表示した。 $-\pi \sim \pi$ までを 0~255 レベ

ルとして表現してある。

Fig. 18 には, Fig. 17 の位相のとびを補正した後にメディアンフィルターを通した後の結果を示す。Fig. 18 (a), (b) はそれぞれ等高線および鳥瞰表現であるが, 等高線の間隔は $0.5 \mu\text{m}$ に相当する。全画面で面内変位量が符号も含めて測定できているのがよくわかる。

以上の計算処理では, データの収集をミニコンピュータで行ない, 画像の演算・処理は富士通 M-380 の大型計算機を使いオフラインで行なった。大型計算機の CPU 時間は, 画像の入力から結果の表示まで約 10 分程度である。ミニコンのメモリー容量の拡大, 演算専用ハードウェア, たとえばアレイプロセッサなどの導入により, オンラインでも高速にデータ処理が可能であると考えられる。

4. ま と め

ホログラフィーおよびスペック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・処理を行なうことにより変形量を自動解析する手法およびシステム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。一方スペックル干渉縞は, スペックル自身の影響により高精度の測定は期待できないが, ホログラム感光材料が不要なこと, 面内変位量などが直接求まることなどの特徴のほか, 多量の画像が記録できれば, 上限が制限されない測定が可能であるという大きな特徴がある。測定精度は, 測定の回数を増やすことにより高くすることができるので, 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。

最後に, 種々の助言をしてくださった現筑波大の谷田貝豊彦氏と, 前半の実験を手伝ってくださった学習院大の提藤久君(現富士写真光機)に感謝いたします。

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*, Vol. 9, ed. J. C. Dainty (Springer, Berlin, 1975) pp. 203-253.
- 3) J. N. Butters and J. A. Leendertz: *Opt. Laser Technol.*, **3** (1971) 26.
- 4) O. J. Løkberg, O. M. Holje and H. M. Pedersen: *Opt. Laser Technol.*, **8** (1976) 17.
- 5) S. Nakadate, T. Yatagai and H. Saito: *Appl. Opt.*, **19** (1980) 1879.
- 6) A. T. Glassman and C. E. Orr: *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.*, **181** (1979) 64.
- 7) W. Augustyn: *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.*, **192** (1979) 128.
- 8) K. H. Womack, K. L. Underwood and D. Forbes: *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.*, **230** (1980) 168.
- 9) T. Yatagai, M. Idesawa, Y. Yamaashi and M. Suzuki: *Opt. Eng.*, **21** (1982) 901.
- 10) W. R. Funnell: *Appl. Opt.*, **20** (1981) 3246.
- 11) D. A. Tichenor and V. P. Madsen: *Opt. Eng.*, **18** (1979) 469.
- 12) Y. Seguchi, Y. Tomita and M. Watanabe: *Exp. Mech.*, **19** (1979) 362.
- 13) G. H. Kaufmann, A. E. Ennos, B. Gale and D. J. Pugh: *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, **13** (1980) 579.
- 14) O. R. Mitchell, E. J. Delp, T. P. Walle and W. K. Cadwallender: *Proceedings, Fifth International Conference on Pattern Recognition*, Miami, Dec. (1980) pp. 361-363.
- 15) A. P. M. Hurden: *Opt. Laser Technol.*, **14** (1982) 21.
- 16) S. Nakadate, T. Yatagai and H. Saito: *Appl. Opt.*, **22** (1983) 237.
- 17) 本田捷夫, 中樞末三, 馬込伸貴, 辻内順平: *応用物理*, **49** (1980) 279.
- 18) A. Choudry: *Appl. Opt.*, **20** (1981) 1240.
- 19) J. H. Bruning, D. R. Herriott, J. E. Gallagher, D. P. Rosenfeld, A. D. White and D. J. Brangaccio: *Appl. Opt.*, **13** (1974) 2693.
- 20) M. Takeda, H. Ina and S. Kobayashi: *J. Opt. Soc. Am.*, **72** (1982) 156.
- 21) G. E. Sommargren: *Appl. Opt.*, **16** (1977) 1736.
- 22) P. Hariharan, B. F. Oreb and N. Brown: *Appl. Opt.*, **22** (1983) 876.
- 23) R. Dändliker, R. Thalmann and J.-F. Wellemin: *Opt. Commun.*, **42** (1982) 301.
- 24) J. Schwider, R. Burow, K.-E. Elssner, J. Grzanna, R. Spolaczyk and K. Merkel: *Appl. Opt.*, **22** (1983) 3421.
- 25) 辻内順平: *固体物理*, **7** (1972) 279.
- 26) P. M. Boone: *Opt. Technol.*, **2** (1970) 94.
- 27) 中樞末三, 谷田貝豊彦, 斎藤弘義: *レーザー研究*, **9** (1981) 43.