コンピュータ画像処理によるヤングスフリンジの解析*

町 田 賢 司*¹, 菊 池 正 紀*¹
澤 芳 昭*¹, Fu-Pen CHIANG*²

Young's Fringe Analysis Using Computer Image-Processing System

Kenji MACHIDA, Masanori KIKUCHI,
Yoshiaki SAWA and Fu-Pen CHIANG

Two-dimensional Fourier transform analysis is presented as an advanced method for numerically processing the Young's fringes diffraction pattern from a double-exposure speckle photograph. The fringe spacing and orientation are determined using only one Young's fringes pattern without any other diffraction halo patterns. This algorithm is based on the 2-D FFT of the fringe pattern with 256×256 pixels. Therefore, it has enabled automatic analysis to be performed with noisy and poor fringe patterns. The measurement of deformation field by the laser speckle method can be carried out with higher accuracy, reliability and speed.

Key Words: Image Processing, Young's Fringes, Speckle Method, 2-D Fourier Transform, Automatic Analysis

1. 緒 言

応力-ひずみ場の光学的測定手法としては、光弾性法、光干渉法、モアレ法、ホログラフィ法、コースティクス法、スベックル法等がある。従来、光弾性法以外は2次元あるいは3次元的表面の変形測定に応用されてきた。しかし、実際の構造物は3次元的であり、物体内部の変位場を知る事は非常に重要である。レーザー・スベックル法は変位、ひずみ、振動、変形や表面粗さの測定に応用されている。特に、ひずみゲージやモアレ法の適用できない高温中での変位やひずみの測定が、非接触で行えるなど利用価値は非常に高い。面内変位の測定では、モアレ法より一桁オーダーの低い変位測定ができ、剛体変位、剛体回転などを組み合わせればサブミクロンの変位測定も可能である。近年、Chiangらは曲げを受ける片側き裂試験片内部の変形を調べる

ために埋め込みスベックル法を開発した。^{(1)~(4)} スベックルからの散乱光を変形の前後で、二重露光により同一のフィルム上に撮影する。これをスベックルグラムという。スベックルグラムにレーザービームを照射すると、スクリーン上にフラウンホーファー型の回折像が生成する。この回折へろに内接して変位の情報を持ったヤングスフリンジが現れる。これをポイントワイズフィルタリング法といい、変位のポイント測定に用いられる。ヤングスフリンジの縞間隔はスベックルパターンの変位に逆比例し、変位ベクトルは縞と直交している。

ヤングスフリンジは、概して不鮮明であり、多くの異なる点での変位測定には、多大の時間と労力を要する。そこで、コンピュータを用いた画像処理の研究が不可欠となる。CCDカメラの入手が容易になる前は、画像の取り込み自体にかなりの手数がかった。Madduxら⁽⁵⁾はフォトディテクタを、Kaufmannら⁽⁶⁾はフォトダイオードを、Ineichenら⁽⁷⁾はテレビカメラを用い、手動により画像の取り込みを行った。Robinson⁽⁸⁾

* 平成5年4月1日 第70期通常総会講演会において講演、原稿受付 平成5年5月6日。

*¹ 正員、東京理科大学理工学部 (〒278 野田市山崎 2641)。

*² ニューヨーク州立大学 (Stony Brook, NY 11794, U. S. A.)。

と Meynart⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾ は、テレビカメラにより 2 次元画像のデジタル化を行った。更に、種々のアルゴリズムを用いた解析手法が開発されている。^{(11)~(19)} Robinson は簡単なアルゴリズムを提案した。まず、縞の方位を決定し、その後 2 次元画像を縞と直交する面上に積分し、1 次元画像に圧縮し、その 1 次元画像から縞の間隔を求めている。Meynart は、全ての方向についての自己相関関数より縞の方位を決定し、その後、縞の間隔を求めている。Deng らは、低次の縞の場合でも解析できる新しいアルゴリズムを提案した。しかし、この方法も 1 次元画像から縞の間隔を求めている。Huntley は 2 次元周波数領域での解析システムを提案した。2 次元フーリエ解析は 1 次元解析よりも縞の間隔、方位ともに高い精度で求めることができる。従来の方法では、2 次元周波数画像を画像の中心部における断面に投影し、その投影された 1 次元周波数波形について解析している場合がほとんどであるが、本解析では 1 次元に縮退せず 2 次元周波数画像そのものについて解析を行っている。ヤングスフリンジは回折ヘロにより変調されており、低次の縞次数の場合ピーク値の間隔のみからでは、変位解析に誤差を生じる。したがって、回折ヘロの影響をいかに除去し、変位成分のみに関係する一定振幅の画像を抽出するかに、変位解析精度はかかっている。従来の方法では、回折ヘロの影響を除去するために、解析に先立ち多数の回折ヘロの平均値を求める必要がある。⁽¹⁶⁾⁽¹⁹⁾ しかし、本解析では、従来の方法とは全く異なるアルゴリズムにより、回折ヘロの影響が除去された、変位成分のみに関係する一定振幅の 2 次元画像の精度良い抽出を可能とした。エンジニアリングワークステーションの高性能化にともない、大配列の 2 次元フーリエ変換が短時間で実行できるようになった。そこで、256 × 256 画素の単一のヤングスフリンジパターンのみから変位と方向を求め、大量の画像の自動的かつ連続的処理が可能な、簡便で高精度なヤングスフリンジ画像処理アルゴリズムの開発を行った。

2. 理論的背景

回折パターンの強度分布は次式で示される。⁽¹⁹⁾

$$I_d(x, y) = I_0(x, y) + I_h(x, y) \left[1 + \gamma \cos \left(2\pi \frac{xu_x + yu_y}{\lambda L} \right) \right] \quad (1)$$

ここで、

$I_0(x, y)$ はヤングスフリンジ中心部の零次のスポット

$I_h(x, y)$ は単一露光スペックルグラムの回折ヘロ

γ はスペックル不相関に依存するフリンジコントラスト

(u_x, u_y) はスペックルの変位成分

λ はレーザー光の波長

L はフーリエ変換レンズの焦点距離

図 1 は一定変位を与え、二重露光により撮影したスペックルグラムの回折パターンの例である。図 1 (b) の強度分布は式 (1) の第二項に対応し、ヤングスフリンジのピークは回折ヘロに内接している。

回折ヘロの強度分布は次式で示される。⁽²⁰⁾

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \leq LD/q \text{ について}$$

$$I_h(x, y) = K' \left[\cos^{-1} \rho - \rho \sqrt{1 - \rho^2} \right]^2 \quad (2)$$

ここで、

K' は定数

$$\rho = \sqrt{x^2 + y^2} / (LD/q)$$

D は結像レンズの口径

q は結像レンズから結像面までの距離

零次のスポットをブロックし、回折ヘロで割ったものは次式で示される。⁽¹⁹⁾

$$I(x, y) = \frac{(I_d - I_0)}{I_h} = 1 + \gamma \cos \left[2\pi \frac{xu_x + yu_y}{\lambda L} \right] \quad (3)$$

離散的画素データについては次式で示される。⁽¹⁶⁾

$$G(m, n) = 1 + \gamma \cos [2\pi(k_m m + k_n n + C)/N] \quad (4)$$

ここで、

k_m, k_n は x 軸、y 軸を切るフリンジ数

(u_x, u_y に比例する)

C はヘロの位置に依存する定数

N は行、列の画素数

(a) ヤングスフリンジ画像 (b) 理論的強度分布

図 1 変形前後で二重露光撮影したスペックルグラムの回折パターン

3. アルゴリズム

ヤングスフリンジ画像処理プロセスを以下に示す。

1. CCDカメラにより $512 \times 512 \times 8bits$ のヤングスフリンジパターンを取り込む。
2. 512×512 画素データの2次元フーリエ変換には多くの時間を要する。そこで、隣接する4点の平均をとり、 256×256 画素に縮退する。
3. 実験より得られた画像は、概して図1(b)に見られるほど滑らかではない。そこで、 5×5 平滑化マトリックスにより平滑化を行う。
4. 画像の最も明るい点を探し、画像の中心を(128,128)の位置に移動する。
5. 中心部において行、列方向それぞれの強度の和を求める。行方向の和が列方向の和より大きい場合、列方向の積次数は行方向のそれより多くなっている。プロセス9、10は行方向について処理するようにしており、行方向の積次数が多い方がより高い精度が得られる。そこで、行方向の強度の和が大きい場合には、半時計方向に $\pi/2$ 画像を回転させる。
6. 中心よりリング状に領域を分割し、外側のバックグラウンドの強度を求める。
7. 各リング内の平均強度を求め、最小二乗法により中心からの距離に関する3次方程式近似を行い極値を求め、中心からその点までの距離 r を回折ヘロの半径 (r_{max}) とする。
8. 全てのデータからバックグラウンド強度を引く。
9. 各列毎に波形の谷を検出し、全ての列の谷部を求める。

実験より得られた実際の画像の断面の強度分布は図2のようである。図1(b)と異なり谷部が上昇している。これは γ が1.0より小さいことを意味している。式(1)の第2項は次式のように書き換えられる。

$$I'(m, n) = \gamma I_h(m, n) [1 + \cos(2\pi(k_m m + k_n n)/N)] + (1 - \gamma) I_h(m, n) \quad (5)$$

そこで谷部の強度分布が式(2)で表されるものとする。

$$r = \sqrt{m^2 + n^2} \leq r_{max} \text{ について}$$

$$G_v(m, n) = K'_v \left[\cos^{-1} \rho - \rho \sqrt{1 - \rho^2} \right]^2 \quad (6)$$

ここで、 $\rho = r/r_{max}$

上式の K'_v を最小二乗法により求め、求めた K'_v を用い上式より $G_v(m, n)$ を計算し、全てのデータから差し引く。求められた強度を $G'(m, n)$ とする。

10. 各列毎に波形のピークを検出し、全ての列のピークを求める。ピーク値の分布は $\gamma I_h(m, n)$ に対応している。そこで、この分布を次式で表す。

$$G_h(m, n) = K'_h \left[\cos^{-1} \rho - \rho \sqrt{1 - \rho^2} \right]^2 \quad (7)$$

プロセス9と同様に上式の K'_h を最小二乗法により求め、求めた K'_h を用い上式より $G_h(m, n)$ を計算し、次式により規準化を行う。回折ヘロの裾野近傍ではノイズの影響を受け、次式による規準化は誤差を引き起こす要因となるので、指定したノイズレベル以上の強度のみに次式を適用した。

$$G(m, n) = G'(m, n)/G_h(m, n) \times 255 \quad (8)$$

11. $G(m, n)$ について2次元FFTを行う。

$$H(k_x, k_y) = \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} G(m, n) \times \exp[-2\pi i(k_x m + k_y n)/N]$$

12. パワースペクトルの最大値を求め、その位置 (k_{x0}, k_{y0}) を求める。

$$\text{パワースペクトル} = |H(k_x, k_y)|^2$$

13. Huntleyの方法⁽¹⁶⁾に従い、格子間のパワースペクトルの最大の位置 (k_{x3}, k_{y3}) を求める。

2次元FFTにより求められた k_{x0}, k_{y0} は整数であり、実際のパワースペクトルの極値は格子間に存在する。したがって、

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial k_x} |H(k_x, k_y)|^2 &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial k_y} |H(k_x, k_y)|^2 &= 0 \end{aligned}$$

の条件を満たす k_x, k_y を求めればよい。

図2 本実験で得られたヤングスフリンジ画像の強度分布の模式図

まず、 (k_{x0}, k_{y0}) をスタートの値とし、領域指定した Newton-Raphson 法による収束計算を行う。

最終的に

$$k_x = k_{x3}, \quad k_y = k_{y3}$$

が求まる。

これより、ヤングスフリンジの間隔と角度が求まる。

4. 実験方法

スペックルグラム作成用試料として、直径 80mm のアクリル円盤を用いた。レーザー光が表面で均一に散乱するように、艶消し白色ペイントを表面に塗布した。実験に用いた光学装置の模式図を図 3 に示す。光源として出力 50mW、ビーム径 1.7mm の He-Ne ガスレーザーを用いた。レーザービームをビームエキスパンダーにより拡大し、円盤を均一な明るさで照射するように調節した。試料面に垂直方向から倍率 1.0 倍にて写真撮影を行う。円盤に 0.1° の微小回転を与え、回転前後に置いて、二重露光によりスペックルグラムを撮影した。使用したフィルムは Kodak 社製テクニカルパンフィルムであり、露光時間は $1/30$ 秒である。このようにスペックル法は光学系が単純であり、光干渉法のような特別な除振は不要である。照明方向や試料のサイズは任意であり、また感度も高く、モアレ法より一桁オーダーの低い変位の測定ができる。しかし、概してフリンジが不鮮明であり、剛体変位に弱いなどの欠点もある。

次に、スペックルグラムからの変位測定方法には全視野測定とポイント測定の 2 種類がある。図 4 はポイント測定法の模式図である。スペックルグラムの後方よりレーザーのスポット光を照射し、前方に置いたスリ硝子に画像を生成する。この等間隔の縞をヤングスフリンジという。このヤングスフリンジの x 方向、 y 方向の間隔 S_x, S_y が求まれば、次式によりレーザーのスポット光が当たっている点での変位が求まる。

図3 実験に用いた光学装置の模式図

$$u_x = (\lambda L)/S_x, \quad u_y = (\lambda L)/S_y$$

図5はヤングスフリンジ画像取り込み装置である。スクリーン上に生成したヤングスフリンジ画像をCCDカメラにより8bitsにデジタル化し、512×512のフレームメモリーに取り込んだ。ポイント測定には、スペックルグラムをX-Yステージに取り付け、コンピュータにより位置の制御を行った。画像解析にはエンジニアリングワークステーションTITAN3000を用いた。1画面の処理時間は約20秒である。

図4 ポイントワイズフィルタリング法によるヤングスフリンジの生成

図5 ヤングスフリンジ画像取り込み装置

5. 結果と考察

画像処理プロセスの一例を図6に示す。図6(a)は原画像と110列における強度分布である。原画像の中心は(123,136)にある。強度分布にも見られるように非常に乱れた分布をしており、原画像から人為的に縞の間隔と方位を正確に決定する事は困難である。図6(b)はプロセス9における画像と強度分布である。左図中の円はプロセス7より求められた回折ヘロの外周円である。右図は(a)図と同一断面の強度分布であるが、平滑化によりある程度滑らかな波形となっている。波形の谷部に最小二乗法より求められた式(6)の分布が示されている。図6(c)はプロセス10における画像と強度分布である。右図中には式(7)より求めた回折

へロの分布が示されている。図6 (d) の左図は式 (8) の画像である。断面の強度分布は256階調に規格化されている。ヤングスフリンジは回折へロにより変調されており、低次の稿次数の場合ピーク値の間隔のみからでは、変位解析に誤差を生じる。しかし、以上のプロセスにより、従来の方法とは全く異なるアルゴリズムにより、回折へロの影響が除去された変位成分のみ

ムにより、回折へロの影響が除去された変位成分のみに関係する一定振幅の画像が、精度良く抽出された。この画像データについてプロセス11以降の2次元FFTとNewton-Raphson法による収束計算を行い、得られた k_x 、 k_y より求めた解析結果が図中の実線である。実線は各稿の中心を正確に捕捉しており、本アルゴリズムの妥当性が立証された。

次に、稿次数、方位の異なる原画像と画像処理後のヤングスフリンジの解析例を図7に示す。 k_x, k_y とフリンジの方位(θ)は以下のようなものである。

$$(a) k_x = 0.26 \quad k_y = 7.01 \quad \theta = -2.11^\circ$$

$$(b) k_x = 10.00 \quad k_y = 23.00 \quad \theta = -23.51^\circ$$

図中の直線は2次元FFT解析より求められたものであり、ヤングスフリンジの間隔、傾きにかかわらず良く一致している。原画像にみられるように、スペクルパターンは粗くあまり判然としていない。

円盤の面内回転により生じた、円盤上の変位と方位の測定結果を図8に示す。スペクルグラムをX-Yステージに固定し、多数の異なる位置におけるヤングスフリンジ画像の取り込みを行った。中心からの距離に依存した物理的に求められる変位と、ヤングスフリンジの画像処理より求められた変位は良い対応を示している。同様に、角度についても良い対応が見られる。

(a) 原画像

(b) プロセス9

(c) プロセス10

(d) 最終結果

図6 画像処理プロセスの主要段階での画像と強度分布の一例

(a) $k_x = 0.26 \quad k_y = 7.01 \quad \theta = -2.11^\circ$

(b) $k_x = 10.00 \quad k_y = 23.00 \quad \theta = -23.51^\circ$

図7 稿次数、方位の異なる画像の解析例

測定精度は変位 $\pm 0.3\mu\text{m}$ 、角度 $\pm 0.2^\circ$ 以下と共に高い精度が得られた。図7に見られるように、本画像処理に用いた画像は、コントラストも低く、不鮮明であり、雑音もかなり大きい。

従来の解析方法では、まず、縞の方位を決定し、その後、縞に直交する面に2次元画像を投影し、1次元波形について縞の間隔を求めており、方位、間隔とも十分な精度を得るのは難しい。Huntley は 64×64 ピクセル画像データの2次元FFT解析より、コントラストの良い画像については変位は $0.1\mu\text{m}$ 、角度は 0.1° より高い精度が得られる事を示している⁽¹⁶⁾。本解析では 256×256 ピクセルの画像について2次元FFT解析を行っており、コントラストの良い鮮明な画像についてはより高い精度が得られるものと考えられる。変位測定精度の下限は撮影倍率やレンズのfナンバーに依存し厳密には言えないが、より高い撮影倍率を用いれば更に高い精度が得られるものと期待される。従来の画像処理システムでは多数の単一露光回折ヘロ強度の平均値を必要としたが⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾、本画像処理システムでは単一のヤングスフリンジ画像データのみから変

位と方向が求まる。したがって、大量の画像解析の連続的処理が可能である。現在パーソナルコンピュータで画像を取り込み、エンジニアリングワークステーションにより解析を行っているが、より高速処理システムの開発を進めている。

6. 結言

従来の方法とは異なるアルゴリズムを用い、回折ヘロにより変調されているヤングスフリンジパターンから、回折ヘロの影響を除去し、変位成分のみに関係する一定振幅の画像の抽出を可能とした。この処理画像を用い、2次元FFTとNewton-Raphson法の収束計算により、高精度の変位解析が行えた。変位は $\pm 0.3\mu\text{m}$ 、角度は $\pm 0.2^\circ$ 以下と高い精度を有している。本解析システムは単一のヤングスフリンジパターンのみを使用しており、大量の画像の自動的かつ連続的処理が可能である。現在使用しているエンジニアリングワークステーションTITAN3000により、約20秒で一枚の画像処理が行えるが、より高速度のワークステーションを用いれば、処理時間は更に短縮される。

7. 文 献

- (1) Chiang, F.P. and Lu, H., Tech. Report No.485, College of Eng. and Appl. Sci., SUNY, (1978).
- (2) Chiang, F.P. and Lu, H., ASME AMD-91(1988), 205.
- (3) 町田・ほか3名, 機軸論, 920-72(1992), 1.
- (4) Machida, K., ほか3名, Proc. APCFS'93, (1993), 175.
- (5) Maddux, G.E., ほか2名, U.S. Air Force Technical Report, (1978).
- (6) Kaufmann, G.H., ほか3名, J. Phys. E: Sci. Instrum, 13(1980), 579.
- (7) Ineichen, B., ほか2名, Appl. Opt., 19(1980), 2191.
- (8) Robinson, D.W., Appl. Opt., 22(1983), 2169.
- (9) Meynart, R., Rev. Sci. Instrum, 53(1982), 110.
- (10) Meynart, R., Appl. Opt., 22(1983), 535.
- (11) Chambless, D.A. and Broadway, J.A., Exp. Mech., 19(1979), 286.
- (12) Nakadate, S., ほか2名, Appl. Opt., 19(1980), 1879.
- (13) Isacson, S.A. and Kaufmann, G.H., Appl. Opt., 24(1985), 189.
- (14) Isacson, S.A. and Kaufmann, G.H., 文献(7)の1444ページ.
- (15) Navone, H.D. and Kaufmann, G.H., Appl. Opt., 26(1987), 154.
- (16) Huntley, J.M., J. Phys., E19(1986), 43.
- (17) Huntley, J.M., Appl. Opt., 25(1986), 382.
- (18) Chen, T.Y. and Taylor, C.E., Exp. Mech., 29(1989), 323.
- (19) Deng, N. and Yamaguchi, I., Appl. Opt., 29(1990), 296.
- (20) Khetan, R.P. and Chiang, F.P., Appl. Opt., 15(1976), 2205.

図8 円盤上の変位と方位の測定結果