D 2 0 7

スペックル干渉法による面外振動計測法の 数値的評価システム

山名田 信哉^{*} (京工繊大院), 村田 滋 (京工繊大), 田中 洋介 (京工繊大)

A numerical evaluation system of out-of-plane vibration measurement based on speckle interferometry

Shinya YAMANADA, Shigeru MURATA and Yohsuke TANAKA

ABSTRACT

This paper proposes a numerical evaluation system of out-of-plane vibration measurement based on speckle interferometry. The system simulates the deformation of an elastic object using a particle method. The object profile is represented with the position interpolated by cubic spline per pixel. Irregularity of the object surface is given to the object profile by random number sequence. Out-of-plane displacement of the object is obtained as fringes virtually generated by a speckle interferometry. Applying the present system to the vibration of a cantilever beam in numerical simulation, the resulting speckle fringes are in good agreement with the computed displacement of the beam by the particle method.

Keywords : Speckle interferometry, Particle method, Out-of-plane vibration

1. はじめに

近年, コンピュータを含む情報機器の進歩に伴って, 医療診断技術も進歩してきた。しかし心臓外科手術の際, 患部の心臓は治癒していることが確認できるにもかかわらず, 手術の際に切断した胸骨の治癒状態の評価が現在の非侵襲法では困難である事が指摘されている。著者らは骨折部付近の皮膚表面の面外振動を, 光散乱を利用した計測法であるスペックル干渉法によって計測し, 骨折治癒状態評価法への適用を試みている。既報^{1), 2)}ではアクリル平板をゲルシートで挟んだ単純な3層構造の模擬生体を対象物とし, スペックル干渉法に基づく観測システムを構築した。また実験に対応する対象物を粒子法によって表し, 数値解析によって提案手法の性能評価を行った。

本研究では, 模擬生体を用いた実験解析と粒子法による数値解析の定量的な比較を念頭に, 対象物の面外変位を粒子法によって数値的に表し, その面外変位をスペックル干渉法によって干渉縞として取得する数値的評価システムの構築を目的とする。面外方向に振動する片持ちはりを粒子法によって表し, その面外振動をスペックル干渉法によって評価することにより, 数値的評価システムの有用性の検討を行った。

2. スペックル干渉法

2.1 理論的表現

スペックルはレーザ光を粗面に照射した際に, 散乱した光によるランダムな干渉によって生ずる不規則な斑点である。スペックル干渉法は物体の変形の前後でスペックルパターンを取得し, これらのスペックルパターン間の強度分布の絶対値差を取ることにより, 面外変形を縞画像として得る。Fig. 1 に本研究の数値シミュレーションで対象としたスペックル干渉法の光学系を示す。

Fig.1 Optical layout.

スペックル干渉法の数値シミュレーションは以下のように行う。まず対象物の基準形状面を設定し, 基準形状面の上に面外方向である z 方向に 0mm から $5.0 \times 10^{-3}\text{mm}$

の間で変化する乱数を付加し、対象物の表面に凹凸を与える。次に対象物表面からの光分布から、レンズ前面の光分布を、式(1)の Fresnel-Kirchhoff の式³⁾

$$u(x_{out}, y_{out}) = \frac{1}{j\lambda} \int \int_{-\infty}^{\infty} g(x_{in}, y_{in}) \frac{e^{j2\pi r/\lambda}}{r} dx_{in} dy_{in} \quad (1)$$

$$r = \sqrt{z_{out}^2 + (x_{in} - x_{out})^2 + (y_{in} - y_{out})^2}$$

を用いて導出する。入力面の奥行き位置を $z=0$ 、面内の座標を (x_{in}, y_{in}) 、光分布を $g(x_{in}, y_{in})$ とする。また、出力面の奥行き位置を $z=z_{out}$ 、面内座標を (x_{out}, y_{out}) 、光分布を $u(x_{out}, y_{out})$ とする。面内座標の原点は光軸である。また λ は光の波長である。

次にレンズを通過する際、位相 $\phi(x_h, y_h)$ は

$$\left. \begin{aligned} \phi(x_i, y_i) &= \phi_0 - \frac{\pi r_i^2}{\lambda f} \\ r_i &= \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

の変化を生じる。ここでレンズ面内の座標は x_h, y_h 、 ϕ_0 は初期位相、 f はレンズの焦点距離である。上記の位相変化を与えてレンズ後面の光分布とする。そして絞りの効果として瞳関数 $h(x_a, y_a)$ を

$$\left. \begin{aligned} h(x_a, y_a) &= \begin{cases} 1 & (r_a < q) \\ 0 & (r_a \geq q) \end{cases} \\ r_a &= \sqrt{x_a^2 + y_a^2} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

のように定義し、レンズ面の光分布に瞳関数を掛けて、絞り効果を与える。ここで、絞りの面内座標は (x_a, y_a) 、絞りの半径は q である。そして絞りを通じた光分布を入力分布として、式(1)を用いて、対象物表面からレンズ前面までと同様に、撮像面の光分布を導出する。この光分布をここではスペックル場と定義する。

次にある乱数列を用いて決定した対象物表面を参照面と定義し、参照面における光分布から撮像面の光分布を上記と同様に導出する。この光分布をここでは参照スペックル場と定義する。そしてスペックル場と参照スペックル場を合わせて、スペックルパターンとして記録する。

最後に対象物の変形前後でスペックルパターンを記録し、変形前後のスペックルパターンの絶対値差画像を作成する。

2.2 信頼性の検討

128×128 画素の物体面領域に Fig. 2 のような面外変位

を与え、測定対象とした例を以下に示す。1 画素サイズは 12μm、レーザの波長が 632.8nm、対象物からレンズまでの距離は 100mm、レンズから撮像面までの距離は 100mm、レンズの焦点距離は 50mm とする。

Fig.2 Object profile.

絞りの大きさを変化させたスペックルパターンを Fig. 3 に示す。絞りの半径が小さい場合、Fig. 3(b)のようにスペックルサイズが大きくなる。一般にビーム照射領域が小さくなるか、レンズの絞りが小さくなると、スペックルサイズは大きくなるので、数値シミュレーション結果と一致する。撮像面で得られるスペックルパターンを Fig. 4 に示す。Fig. 4(a)は時刻 t 、Fig. 4(b)は時刻 $t+\Delta t$ におけるスペックルパターンであり、これらの絶対値差画像において Fig. 5 のような縞状のスペックルが現れ、2 波長分の面外変位差が空間分布することに対応している。

Fig. 6 は対象物の基準形状面の変形前後の面外変位分布であり、Fig. 5 の結果と対応する。以上の事から本研究で作成したスペックル干渉法による面外変位計測プログラムの信頼性を確認した。

(a)large size (b)small size

Fig.3 Difference between large and small sizes of aperture.

(a)Image at t (b)Image at $t+\Delta t$

Fig.4 Speckle patterns.

Fig.5 An absolute difference image.

Fig.6 Out-of-plane displacement.

3. 数値的評価システム

3.1 粒子法

対象物の変形を表すために、粒子法を用いた。粒子法は越塚ら^{4),5)}が提案した手法で、連続体を粒子の集まりとし、挙動を粒子間の相互作用によって離散化する。格子を用いないため、簡易に複雑な形状を計算出来るという特徴がある。等方性を仮定すると動的な厚肉弾性体の構成式は

$$\frac{\partial r_\alpha}{\partial t} = v_\alpha \quad (4)$$

$$\rho \frac{Dv_\alpha}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_\beta} (\lambda_i \varepsilon_{ij} \delta_{\alpha\beta} + 2\mu \varepsilon_{\alpha\beta}) + K_\alpha \quad (5)$$

である。ここで r_α は弾性体の座標、 v_α は弾性体の速度、 ρ は密度、 λ, μ はラーメ定数である。 $\varepsilon_{\alpha\beta}$ はひずみテンソル、 K_α は外力である。ただし添字 α, β は空間座標である。また、ひずみの適合条件式は

$$\varepsilon_{\alpha\beta} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u_\alpha}{\partial x_\beta} + \frac{\partial u_\beta}{\partial x_\alpha} \right] \quad (6)$$

である。粒子間の相互作用には式(7)の重み関数

$$w(r_{ij}) = \begin{cases} \frac{r_e}{r_{ij}} - 1 & (r_{ij} \leq r_e) \\ 0 & (r_{ij} > r_e) \end{cases} \quad (7)$$

を用いる。 r_e は粒子間パラメータ、 r_{ij} は粒子間の距離で

ある。

粒子法を用いて Fig.7 のような片持ちはりの振動をあらわし、本研究で作成した粒子法の解析プログラムの信頼性について検討した。材料は鋳物とし、ラーメ定数 $\mu = 3.8 \times 10^{10}$ Pa, $\lambda_i = 5.7 \times 10^{10}$ Pa, 密度 $\rho = 7.5 \times 10^3$ kg/m³ とした。また片持ちはり初期変位として、Fig.7(b)のように自由端の最大たわみが 300λ となるような、たわみ分布を与えた。粒子間パラメータ $r_e = 2.1$, 時間ステップ間隔を 1.0×10^{-6} sec とした。Fig.7(a)に表す片持ちはり、 $h = 50$ mm, $b = 10$ mm とし、 l を 500 mm ~ 900 mm まで 100 mm ずつ変化させた。初期粒子配置は 10 mm 間隔である。また固定端の粒子の位置は固定した。Fig.8 に自由端側の粒子の振幅を周波数解析した結果と、はりの形状から求められる固有振動数を示した。粒子法で求めた振動数と解析的なはりの固有振動数は 10% 程度の誤差はあるものの、近い値を取った。以上のことから本研究で作成した粒子法解析プログラムの信頼性を確認した。

Fig.7 Cantilever beam.

Fig.8 Frequency of cantilever beam.

3.2 数値モデル

本研究で行った数値的評価システムの処理手順は以下の通りである。

(1) $l = 500$ mm, $h = 50$ mm, $b = 10$ mm の大きさを持った、面外方向に振動する鋳物の片持ちはりを 3.1 節のように粒子法によって表した。片持ちはり初期変位として、自由端の最大たわみが 300λ となるような、たわみ分布を与えた。粒子間パラメータ $r_e = 2.1$, 時間ステップ間隔を 1.0×10^{-6} sec とした。

(2) 無負荷状態を時間ステップ 0, z 方向にたわみ分布を与えた状態を時間ステップ 1 として以後 535, 1070, 1605, ..., 16585 ステップまで, 535 ステップ毎に片持ちはり表面の粒子の位置 (x, z) を取得した。取得した粒子位置は, 無負荷状態では x 方向に対して, 10mm 間隔に配置しており, スペックル干渉法の数値シミュレーションで用いる物体面領域は 1 画素あたり $12\mu\text{m}$ であるため, x 方向に対して 3 次スプライン補間を行う事により, 1 画素間隔で対象物の位置を導出した。両端点は両端に配置した粒子の重心位置である $x=5\text{mm}$ および $x=495\text{mm}$ とし, 40833 の小区間で補間を行って各区間における z 座標を求めた。

(3) スペックル干渉法の対象領域面は 128×128 画素とし, $x=5\text{mm}$ の位置から 128 画素分, $x=6.536\text{mm}$ までを対象領域とする。対象領域における片持ちはりの位置をスペックル干渉法の対象物の基準形状面として用いた。そして基準形状面の面外方向に 0mm から $5.0 \times 10^{-3}\text{mm}$ の間で変化する乱数を付加して凹凸を与え, 対象物表面とした。2 章のようにスペックル干渉法によって対象物の面外振動計測の数値シミュレーションを行い, その結果を次節で示す。

3.3 解析結果

粒子法によって表された片持ちはりの面外振動において, 各時間ステップにおける無負荷状態からの面外変位を $x=5\text{mm}$ の面外変位が 0mm となるように規準化して Fig.9 に示した。対象領域は片持ちはりの自由端に近く狭い領域であるため, その面外変位は直線に近い分布となった。Fig.9(a) は 2.7 波長, (b) は 6.4 波長, (c) は 3.3 波長, (d) は 0.32 波長, (e) は 1.4 波長, (f) は 3.6 波長, (g) は 2.7 波長, (h) は 2.3 波長分の面外変位差が空間分布している。

次に無負荷状態である時間ステップ 0 のスペックルパターンを変形前のスペックルパターンとし, 各時間ステップにおけるスペックルパターンとの絶対値差画像を示したものが Fig.10 である。Fig.9 と比較すると, 面外変位勾配が大きい程, 縞数が多い結果となった。

Fig.9 Normalized out-of-plane displacement.

Fig.10 Absolute difference images.

4. まとめ

対象物の面外変位を粒子法によって数値的に表し, その面外変位をスペックル干渉法によって干渉縞として取得する数値的評価システムの構築を行った。面外方向に振動する片持ちはりを対象物として, 数値的評価システムを適用したところ, 対象物の面外変位に応じた干渉縞が得られ, 数値的評価システムの有用性が示された。

本研究を行うにあたり, 小野裕之京都工芸繊維大学助教に有益な助言を頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 山名田信哉, 村田滋: 時系列解析スペックル干渉法による骨折の非侵襲評価の研究, 日本機械学会山梨講演論文集, No.070-4(2007) pp.179-180.
- 2) 山名田信哉, 村田滋: スペックル干渉法を用いた骨折の非侵襲評価に関する実験および数値的研究, 日本機械学会 2008 年度年次大会講演論文集, Vol.6, No.08-1(2008) pp.149-150.
- 3) 飯塚啓吾: 光学, 共立出版, (1983) pp.33-37.
- 4) 越塚誠一: 粒子法, 丸善, (2007) pp.9-15, 51-55.
- 5) Yoshitaka, C., Seiichi, K., Yoshiaki, O.: A particle method for elastic and visco-plastic structures and fluid-structure interactions, Computational Mechanics 27 (2001) pp.97-106.