

第 I 部門

位相ベース動画解析手法を応用した微小振動下の構造物固有振動数計測

京都大学大学院工学研究科 学生員 ○赤尾栄士郎
 京都大学大学院工学研究科 正会員 古川 愛子

1. 研究背景と目的

構造物の振動計測では一般に、加速度センサが用いられる。しかし、構造物の環境によっては、加速度センサの設置自体が物理的に困難な場合もある。このような状況を踏まえ、近年では、デジタルカメラで撮影した動画を解析することにより、非接触で構造物の振動を計測する手法がいくつか提案されている。本研究では、位相ベース動画解析手法¹⁾を用いて固有振動数を計測することを試みる。この手法は、動画の各画素におけるフレーム間の位相差から変位波形を算出するものであり、変位振幅が小さい場合の計測に適しているとされている。しかし、風荷重や交通荷重が極めて小さい環境では、構造物の振動自体が微小となるため、計測ノイズの影響が顕著となり、位相ベース動画解析手法であっても高精度な計測が困難となる。そこで本研究では、このような極微小振動においても固有振動数の計測を可能とするために、長時間撮影した動画を複数の短時間動画に分割し、それぞれに対して変位波形を算出し、フーリエ変換したうえで平均をとることで、計測ノイズの影響を低減する手法を検討する。模型および照明柱を対象に、提案手法により安定した固有振動数の推定が可能かどうかを検証する。

2. 本研究で用いた動画解析手法の概要

位相ベース動画解析手法では、動画の各画素に対してフレーム間の位相の変分を計算し、そこからフレーム間の変位量を推定する。時間 t 、位置 (x, y) における輝度値を $I(x, y, t)$ とする。この輝度値に対し、空間スケール r 別、方向 θ 別の複素フィルタ $G_{r,\theta} + jH_{r,\theta}$ を通すことで、 r, θ 毎の局所振幅 $A_{r,\theta}(x, y, t)$ および局所位相 $\phi_{r,\theta}(x, y, t)$ を次式のように得ることができる。

$$A_{r,\theta}(x, y, t) \cdot e^{j\phi_{r,\theta}(x, y, t)} = (G_{r,\theta} + jH_{r,\theta}) \otimes I(x, y, t) \quad (1)$$

x, y 方向の速度をそれぞれ $u_r(x, y, t)$ 、 $v_r(x, y, t)$ とすると、局所位相の変化量 $\Delta\phi_{r,\theta}(x, y, t)$ は次式で表される。

$$\begin{aligned} \Delta\phi_{r,\theta}(x, y, t) &= \phi_{r,\theta}(x, y, t + \Delta t) - \phi_{r,\theta}(x, y, t) = \phi_{r,\theta}(x - u_r(x, y, t)\Delta t, y - v_r(x, y, t)\Delta t, t) \\ &= -\frac{\partial\phi_{r,\theta}}{\partial x} u_r(x, y, t)\Delta t - \frac{\partial\phi_{r,\theta}}{\partial y} v_r(x, y, t)\Delta t \end{aligned} \quad (2)$$

上式の両辺を時間間隔 Δt で割ることにより、局所位相の変化量と速度の関係を得る。

$$\frac{\Delta\phi_{r,\theta}(x, y, t)}{\Delta t} = -\frac{\partial\phi_{r,\theta}}{\partial x} u_r(x, y, t) - \frac{\partial\phi_{r,\theta}}{\partial y} v_r(x, y, t) \quad (3)$$

上式において、 $\theta = 0$ のときに $\partial\phi_{r,0}/\partial y = 0$ となる複素フィルタ $G_{r,0} + jH_{r,0}$ を用いると $u_r(x, y, t)$ が、 $\theta = \pi/2$ のときに $\partial\phi_{r,\pi/2}/\partial x = 0$ となる複素フィルタ $G_{r,\pi/2} + jH_{r,\pi/2}$ を用いると $v_r(x, y, t)$ が次式のように得られる。

$$u_r(x, y, t) = -\left(\frac{\partial\phi_{r,0}}{\partial x}\right)^{-1} \left(\frac{\Delta\phi_{r,0}(x, y, t)}{\Delta t}\right), \quad v_r(x, y, t) = -\left(\frac{\partial\phi_{r,\pi/2}}{\partial y}\right)^{-1} \left(\frac{\Delta\phi_{r,\pi/2}(x, y, t)}{\Delta t}\right) \quad (4)$$

以上のようにスケール毎に各方向の速度が求められ、これらを統合することで変位抽出が可能となっている。

3. 提案手法と検証実験

本研究では、図 1 に示す 2 階建て模型および図 2 に示す照明柱を対象に、一切の外力を加えずに約 15 分間の動画を撮影した。その動画を 75 秒ごとのセグメント 11 個に分割し、各セグメントに対して参照点の変位時刻歴を算出した後、フーリエ変換を実施した。得られた各セグメントの変位フーリエ振幅について平均をとり、振幅が卓越している振動数を固有振動数として抽出した。この結果を、構造物に人力で振動を加え、加速度センサで計測した加速度時刻歴からフーリエ変換によって求めた固有振動数と比較することにより、提案手法の推定精度を検証した。

4. 2 階建て模型と照明柱を用いた検証

まず、図 1 に示す 2 階建て模型を対象として、提案手法により推定された固有振動数を加速度センサによる推定結果と比較することで検証を行った。変位を追跡する参照点は 2 階のネジの位置に設定した。図 3 に、提案手法により得られた変位フーリエ振幅を示す。推定された固有振動数は 1 次モードが 2.64 Hz、2 次モードが 7.75 Hz であ

った。図3は2階ネジ位置であるため一方、加速度センサにより測定された固有振動数は1次モードが2.64 Hz、2次モードが7.78 Hzであり、提案手法による推定値との誤差は1次モードで0.001%、2次モードで0.87%であった。これにより、提案手法が非常に高い精度で固有振動数を推定できることが確認された。

続いて、京都大学桂キャンパスにある照明柱を対象に検証を行った。図2に変位参照点の位置を赤丸で示す。図4に示すとおり、提案手法によって推定された固有振動数は1次モードが3.91 Hzであり、さらに22 Hz付近に2次モードと推定されるピークが確認された。一方、加速度センサによる計測からは1次モードが3.89 Hzであることが確認された。なお、人力加振では2次モードを十分に励起できなかった可能性があるうえ、加速度センサを手が届く位置に設置したことも影響し、加速度センサによる計測では2次モードに対応するピークは確認されなかった。1次モードの固有振動数に関する誤差は0.34%であり、提案手法により高い精度で推定できていることが分かる。

2階建て模型と照明柱のいずれにおいても、個々のセグメントから得られた変位フーリエ振幅のみでは固有振動数を明確に読み取ることが困難であったが、各セグメントの変位フーリエ振幅を平均することで、固有振動数に対応するピークが明瞭となり、固有振動数の推定が可能となった。

5. 結論

本研究では、位相ベース動画画像解析手法を応用し、構造物を加振することなく固有振動数を推定する手法の有効性を検証した。長時間撮影した動画を複数のセグメントに分割し、それぞれから得られた変位フーリエ振幅の平均を用いることで、固有振動数を高精度に推定できることが確認された。

参考文献 1) N. Wadhwa, M. Rubinstein, F. Durand, W.T. Freeman : Phase-based video motion processing, ACM Transactions on Graphics, Vol.32, No.4, Article No.80, 2014.

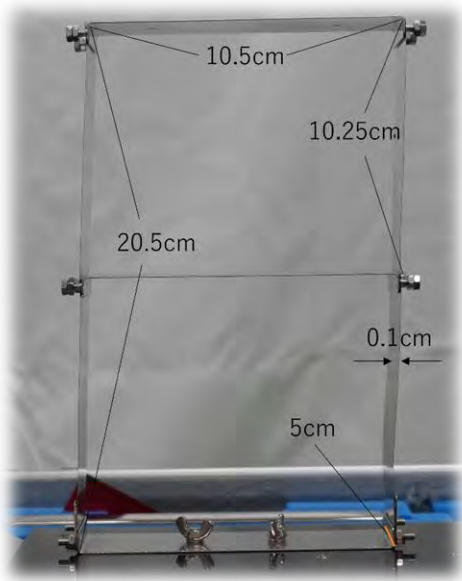


図1 2階建て模型



図2 照明柱および変位時刻歴の参照点

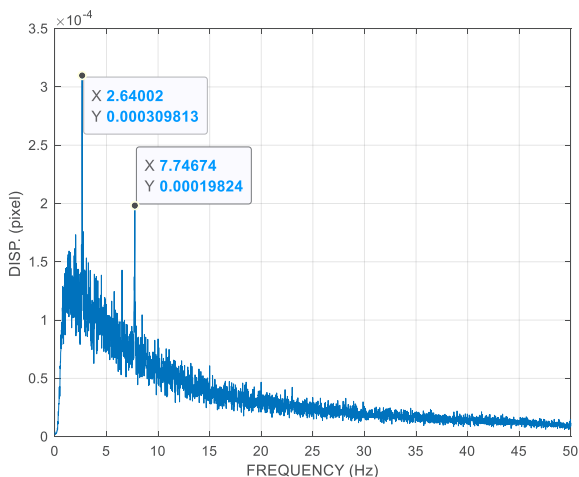


図3 2階建て模型における推定結果

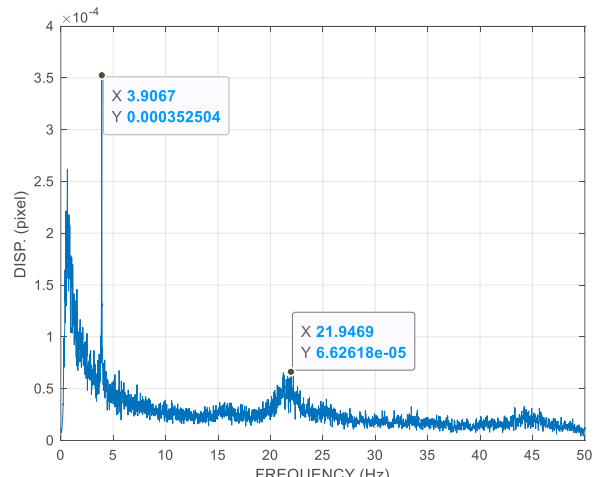


図4 照明柱における推定結果