

デジタルカメラを用いた振動解析の高周波化に関する研究

機械情報システム課 釣谷浩之、金森直希

1. 緒言

製品開発の際には、振動が製品に及ぼす影響を把握するために、振動解析が広く行われている。一般に振動計測には、加速度センサーが用いられるが、センサーを取付けた場所しか計測ができない、センサーの取付けが困難な場合がある、センサーの取付けによって振動特性が変化する場合がある、などの問題がある。この問題を解決するために、デジタル画像相関法を用いて、動画から振動計測を行う方法をこれまで開発してきた。しかし、動画を用いた解析では、動画のフレームレートにより解析できる周波数が制限され、通常のフレームレート(60fps)では、高い周波数の振動解析ができないという課題があり、これを解決するために、高価な高速度カメラを用いれば、利便性が損なわれてしまう。一方で、振動が一定で、振動周波数がある程度推定できる状況下では、アンダーサンプリングしたデータから高周波の解析を行うことが可能である²⁾。例えば、現実の場面でも、振動試験機を用いて強制加振した製品の応答特性を計測するような場合は、アンダーサンプリングデータから高周波振動特性を解析できると考えられる。本研究では、一般的な動画のフレームレートで撮影した画像から、高周波振動特性の解析を可能にすることで、デジタルカメラによる簡易な振動測定法の適用範囲を大きく拡大しようとするものである。本年度は、電子基板を対象にサンプリング周波数よりも高い周波数領域での振動特性の計測を試みた。

2. 実験方法

2.1 試験体および振動状態の撮影

Fig. 1 は試験体を示す。試験体は、縦 115 mm×横 160 mm×厚さ 1.2 mm のガラスコンポジット基板である。この試験体を四隅でアルミ製のスペーサーを介して6mmの隙間を空けて振動試験機に固定した。固定した試験体を

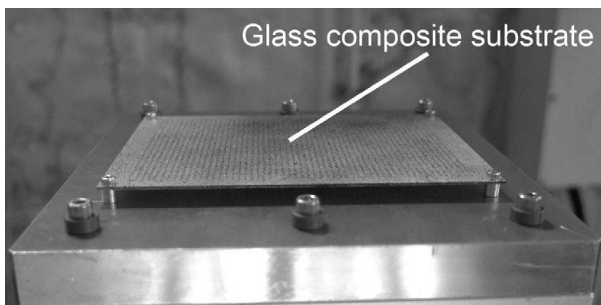


Fig. 1 Electronic substrate specimen

10 Hz ~ 190 Hz の間の任意の周波数で、速度振幅 0.1 m/s の一定振動で強制振動させ、デジタルカメラによって動画撮影を行った。動画の画像サイズは、縦 1,080 pixel×横 1,920 pixel、撮影間隔は、秒間 60 フレームとし、180 フレーム分、3 秒の画像を用いてデジタル画像相関法により変位を計測した。デジタル画像相関法による変位計測を確実にするため、試験体に黒色の塗料で薄く着色し、ランダムパターンを施した。

2.2 デジタル画像相関法による計測

デジタル画像相関法では、サブセットと呼ばれる一定のサイズの領域を決め、この領域単位で計算を行う。まず、粗探索により、残差が最小となる平行移動量(u_0, v_0)を各画素について求める。次に詳細探索を行い、1 pixel 未満の精度で変位を求める。詳細探索では、次式で示す相互相関式を基礎とした評価関数を用いる。

$$C = 1 - \frac{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M I_d(X+i, Y+j) I_u(x+i, y+j)}{\sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M I_d(X+i, Y+j)^2 \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M I_u(x+i, y+j)^2}} \dots (1)$$

X, Y は、次式で表され、剛体変形および一様ひずみまでを考慮している。

$$X = x + u + \frac{\partial u}{\partial x} i + \frac{\partial u}{\partial y} j, \quad Y = y + v + \frac{\partial v}{\partial x} i + \frac{\partial v}{\partial y} j \dots (2)$$

ここで、 (u, v) は、サブセットの中心における変位を示している。評価関数の未知数 $(u, v, \partial u/\partial x, \partial u/\partial y, \partial v/\partial x, \partial v/\partial y)$ を Newton-Raphson 法を用いて求めることで、高い精度で変位計測が可能になる。

2.3 アンダーサンプリングによるパラメータの推定

今、観察対象の振動が、次式で表される単一正弦波であることがわかっているものとする。

$$x(t) = A \cos(2\pi f t + \theta) + d \dots (3)$$

ここで、 A は振幅、 f は周波数、 θ は初期位相、 d は直流成分の大きさである。この振動を周波数 f_s でサンプリングし、標本値を得るものとする。このとき、連続した 4 標本を用いることで、Prony 法により各パラメータの推定値

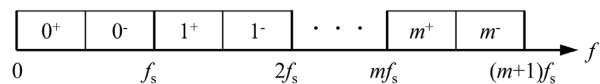


Fig. 2 Sampling mode definition

$(\tilde{A}, \tilde{f}, \tilde{\theta}, \tilde{d})$ を求めることができる。本研究では、1つの周波数あたり3秒、180標本について、計算を行った。実際の振動周波数 f に応じてサンプリングモードをFig.2のように定義すると、アンダーサンプリングで標準化したデータを用いた場合、Prony法により求めたパラメータの推定値と実際の振動のパラメータの間には、モードに応じて次の関係が成り立つ²⁾。

$$m^+ \text{モード} : \tilde{f} = f - mfs, \tilde{\theta} = \theta, \tilde{A} = A$$

$$m^- \text{モード} : \tilde{f} = (m+1)f_s - f, \tilde{\theta} = -\theta, \tilde{A} = A \quad \dots (4)$$

これにより、アンダーサンプリングにより得られたデータから実際の振動パラメータを推定した。

3. 実験結果

Fig.3は、撮影した動画から計測した試験体の振動特性を示す。試験体の任意の点において、3秒分、180標本について、連続する4標本を用いて求めた周波数と最大速度の中央値を示す。図から、110Hz付近で明瞭なピークが確認でき、この周波数が、試験体の一次共振周波数であることがわかる。一方で、グラフ上で×で示した、116Hz、118Hz、125Hzでは、周波数が正しく計測できなかった。Prony法では、サンプリング周波数の1/2の整数倍の周波数では、正しく計算が行うことができないため今回計測した周波数範囲では、30Hz、60Hz、90Hz、120Hz、150Hz、180Hz、を計算から除外しているが、周波数が高くなるに従って変位も小さくなるため、120Hz付近では、十分な精度の計測が行えず正しく計算できなかった可能性がある。160Hzについては、急に速度が大きくなっているが、近傍の周波数を細かく計測できていないため、これが二次共振点かどうかは、判断としない。また、170Hz、190Hzでは速度が非常に小さくなっている。これについては、反共振の影響が出ている可能性があるが、前述のとおり周波数が高くなるに従って変位振幅が非常に小さくなるため、正しく計測できていない可能性についても否定できない。

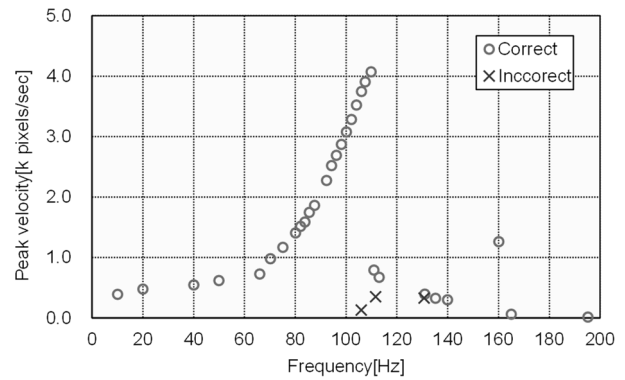


Fig. 3 Vibration character by under sampling

一次共振点については、明確なピークが確認できたが、高い周波数領域では、さらに細かく計測する必要がある。また、レーザー変位計など、別の手段による計測を行い検証する必要がある。

4. 結言

本研究では、デジタルカメラによる簡易な振動測定法の適用範囲を拡大するために、一般的な動画のフレームレートである60fpsで撮影した動画から、周波数特性の計測を試みた。その結果、サンプリング周波数よりも高い周波数の一次共振点を明瞭に確認することができた。一方で、120Hz付近の周波数では、計測できない周波数が何点かあった。また、160Hz以上の周波数領域については、データが不足しており、計測値が正しいかどうか判断がつかなかった。これについては、計測点を増やし、またレーザー変位計など、別の手段での計測も実施し、さらに検証を行う必要がある。

参考文献

- 1) 釣谷浩之ほか、富山県産業技術研究開発センター研究報告、No33(2019), pp.77-78
- 2) 久保和良、計測自動制御学会論文集、Vol.43, No.9(2007), pp.765-773

キーワード：デジタル画像相関法、振動計測、振動解析、アンダーサンプリング

Vibration Analysis from Undersampled Moving Images Based on Digital Image Correlation

Mechanics and Digital Engineering Section; Hiroyuki TSURITANI, Naoki KANAMORI

In this work, we tried vibration analysis from undersampled moving images. Electronic substrate fixed on plastic case was vibrated by vibration-testing machine. Moving images were recorded by digital camera that frame rate is 60 fps. Displacement distribution were measured from moving images by digital image correlation. Velocity and frequency of vibration were calculated from displacement distribution by Prony method. In the result, the primary resonance frequency was clearly detected.