

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。

2. 実験方法

2.1 試験体および振動状態の撮影

試験体は、縦 90.3 mm×横 50 mm×高さ 22.2 mm の ABS 樹脂製の管体の内部に FR-4 基板をネジで固定したものである。この試験体を振動試験機に固定し、周波数は、15Hz, 35Hz, 80Hz, 190Hz, 430Hz の 5 段階、速度振幅 0.1m/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 1,080pixel×横 1,920pixel、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、1pixel 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、剛体変形および一樣ひずみまを考慮している。

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

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 $(\tilde{A}, \tilde{f}, \tilde{\theta}, \tilde{d})$ 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.1 のように定義すると、アンダーサンプリングで標本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⁾。

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

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。

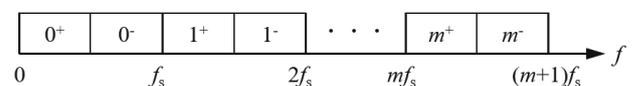


Fig. 1 Sampling mode definition

Table 1 Estimated Frequency from Moving Images

| 試験機 周波数 | 実測からの 推定周波数 | 乖離率 | 標準偏差 | 有効データ の割合 |
|------------|----------------|--------|-------|--------------|
| 15Hz | 15.03Hz | 0.19% | 4.21% | 99.44% |
| 35Hz | 35.23Hz | 0.65% | 5.13% | 96.05% |
| 80Hz | 79.97Hz | -0.04% | 1.60% | 97.18% |
| 190Hz | 190.95Hz | 0.50% | 1.94% | 66.10% |
| 430Hz | 434.90Hz | 1.14% | 0.59% | 53.67% |

3. 実験結果

Table 1 は、撮影した動画から推定した周波数を示す。変位の計測は、試験体の中央で行い、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を平均したものである。実際の振動周波数からの乖離率、標準偏差、計算できたデータの割合も併記してある。周波数については、どの周波数でも実際の周波数との乖離も小さく、概ね正しく計測できている。また、標準偏差が小さくバラつきも少ないことがわかる。ただ、比較的高い周波数の 190Hz および 430Hz では、計算できたデータ数が少なくなっている。Table 2 は、Table 1 で用いたものと同じ撮影データから推定した変位振幅を示す。Table.1 と同様に、3 秒分の変位振幅を平均したものを示す。振動試験機で設定された変位振幅、乖離率、標準偏差などを併記している。15Hz および 35Hz では、乖離率が小さく、正しく計測できていると考えられる。80Hz, 190Hz では、若干乖離が大きくなるものの、許容範囲であると考えられる。430Hz では、乖離が非常に大きく、変位振幅が正しく計測できているとは言えない。また、190Hz, 430Hz では、標準偏差が大きく、計測結果のバラつきが大きいことを示している。計算不能となるデータの増加やバラつきについては、標本数を増やすことで、ある程度対処が可能であると考えられる。430Hz で変位振幅が正しく計測できなかったのは、周波数が増加すると変位自体が非常に小さくなる

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 that frequency are 15Hz, 35Hz, 80Hz, 190Hz, and 430Hz. Moving images were recorded by digital camera that flame rate is 60 fps. Displacement distribution were measured from moving images by digital image correlation. Amplitude and frequency of vibration were calculated from displacement distribution by prony method. In the result, Frequency were precise calculated. But amplitude was not calculated at 430Hz.

Table 2 Estimated Amplitude from Moving Images

| 試験機 周波数 | 試験機 変位振幅 | 実測からの 推定変位振幅 | 乖離率 | 標準偏差 |
|------------|------------------------|------------------------|--------|--------|
| 15Hz | 1.061mm _{0-p} | 1.049mm _{0-p} | -1.2% | 3.03% |
| 35Hz | 0.455mm _{0-p} | 0.462mm _{0-p} | 1.6% | 19.51% |
| 80Hz | 0.199mm _{0-p} | 0.174mm _{0-p} | -12.5% | 10.72% |
| 190Hz | 0.084mm _{0-p} | 0.077mm _{0-p} | -7.6% | 60.10% |
| 430Hz | 0.037mm _{0-p} | 0.008mm _{0-p} | -77.7% | 53.64% |

ためと考えられる。

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、高周波の振動計測を試みた。15Hz~430Hz の任意の 5 周波数について計測を行った結果、周波数については、正しく計測することができた。変位振幅については、430Hz では、正しく計測することができなかった。これは、変位量が非常に小さくなったため、正しく計測できなかったものと考えられる。高い周波数では、慎重に、速度、加速度、変位の条件を選定する必要がある。また、周波数が高くなるに従って、計測不能なデータの割合が増加し、データのバラつきも大きくなることがわかった。これについては、充分な量の標本を使用することで、ある程度対処できるものと考えられる。

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