圧縮センシングDICと次数比分析を用いた自動車エンジン・車体の全視野振動計測手法*

Full-Field Vibration Measurement Method for Automotive Engines and Bodies Using Compressed Sensing DIC and Order Analysis

加藤　由幹 [1)] Yuki Kato　綿引　壮真 [2)] Soma Watahiki　大髙　政祥 [3)] Masayoshi Otaka

Measurement of automobile engine and body vibration has been widely conducted for the purpose of vibration control design. In this study, a low-cost/high-resolution visualization measurement method for high-speed vibration was developed by applying "compressive sensing," "digital image correlation," and "order-analysis" to images captured by a high-resolution low-speed camera using a random strobe flash.

KEY WORDS　**Vibration, Noise and Ride Comfort**
Digital Image Correlation, Visualization Measurement, Vibration Analysis [B3]

1 はじめに

自動車のエンジンと車体，ロボット，梁，柱などの構造物は，振動モードと呼ばれる振動しやすい変形形状と，固有振動数と呼ばれる振動しやすい周波数をもっている．この振動モードと固有振動数の計測には，加速度センサ等の接触型のセンサが用いられてきた．しかし，高次のモードの計測には多数の振動センサが必要であり，軽い構造物ではセンサの重量で振動モードが変化するなどの課題があった．そのため近年では，画像解析による構造物の振動計測手法が数多く提案されている．デジタル画像相関法（Digital Image Correlation：DIC）もその一つであり，画像解析を用いて物体の変位やひずみを非接触で計測する技術である．しかし，高周波振動をDICで計測するためには高速撮影が必須になるため解像度が低下し，変位の分解能が低くなることが問題であった[(1)]．

一方近年，計測データがある基底に対してスパース性を有すること，基底がインコヒーレントであること（≈ランダムサンプリングを実施すること）という条件を満たすなら，サンプリング定理のナイキスト限界を突破できる圧縮センシングと呼ばれる手法が開発された[(2)]．著者らはこの圧縮センシングとDICを組み合わせることで，低速カメラによる計測データから高周波の振動モードと固有振動数を同定する手法（圧縮センシングDIC）を開発している[(3)(4)]．この手法により，高周波振動計測時のコスト・データ容量の大幅削減と空間解像度向上を達成した．本稿では，自動車エンジン・ボンネットを対象として，今回手法の計測精度等を検証した結果について報告する．

2 手法

2.1 デジタル画像相関法（DIC）

DICは画像解析を用いて物体の変形を非接触で計測する技術である．測定対象物にパターンストラッキング用のランダムパターン（スペックルパターン）をペイントやシールで貼り付け，カメラで撮影した画像のピクセルの動きを相関関係で追跡して変位を測定する．DICは，カメラを用いた非接触計測システムであり，高所でも高距離からも広範囲にわたって，計測することができる．また，2台のカメラを用いることで，三次元の変位を計測することも可能である．DICはピクセル分解能をもつが，補間演算を用いた処理により，サブピクセル精度（一般的には1/10～1/50ピクセル）の変位を算出することができる．DICは広く利用されている技術であるため，他のアルゴリズム等の詳細は文献[*]を参照されたい．本研究では，DICソフトウェアとして，Carl Zeiss GOM Metrology GmbH社のGOM Correlate Professional 2021を使用した．なお，DICにおける計測値のノイズを低減するために，メディアンフィルタを適用した．各計測点の変位時系列をルークリッド法によるKLTアルゴリズム[*]により追跡し，中央値を内挿している．

2.2 圧縮センシングDICを用いた高速振動計測手法

圧縮センシングとDICを組み合わせた手法である[(3)(4)]の詳細は文献[*]にまとめられているため，ここでは概略を述べる．第1に撮影手法の概略説明を示す．まず初めに，DICにより計測した各方向の変位u,v,wについて，各方向の変位を順に連結した行列$\delta'(u,v,w)$を作成する．振動に着目して分析するために下式を用いて時間平均値を減算することで，変動成分を抽出する．

$$\delta'(u,v,w)=\delta(u,v,w)-\overline{\delta}(u,v,w) \quad (1)$$

この変動成分δ'に圧縮センシングを適用し高周波振動を復元する必要があるが，全計測点に対して圧縮センシングを実施すると計算コストが過大になる．よって，δ'に対して，前処理として Proper orthogonal decomposition（POD）[*]を実施し下式を得る．

$$\delta'(u,v,w)=\sum_{j}^{\alpha}\sqrt{\varepsilon_j}\,p_j(t)\,\xi_j(u,v,w) \quad (2)$$

ここで，$\xi_j(u,v,w)$は固有モード，ε_jはエネルギーレベル，$p_j(t)$は時間関数（振動信号）を表す．この場合，モードαにおけるエネルギー割合は，$\sum_{j=1}^{\alpha}\varepsilon_j/\sum_{j=1}^{\infty}\varepsilon_j$で定義される．このうち，支配的なモードの時間関数に対して圧縮センシングを実施し，高周波変動を再構成する．なお，PODモードは互いに直交しているが，振動モードは空間的と時間的に対して直交している．よって，質量が均一に分布する系であれば，振動モードとPODモードは一致することが知られている[*]．

圧縮センシングを用いた振動復元の概要を図2に示す．DICは撮影画像と参照位置画像間の相関により参照位置からの変位量を求める手法であるため，最大周波数をf_sとすると計測できる振動周波数はサンプリング定理より$f_s/2$以上の振動に関

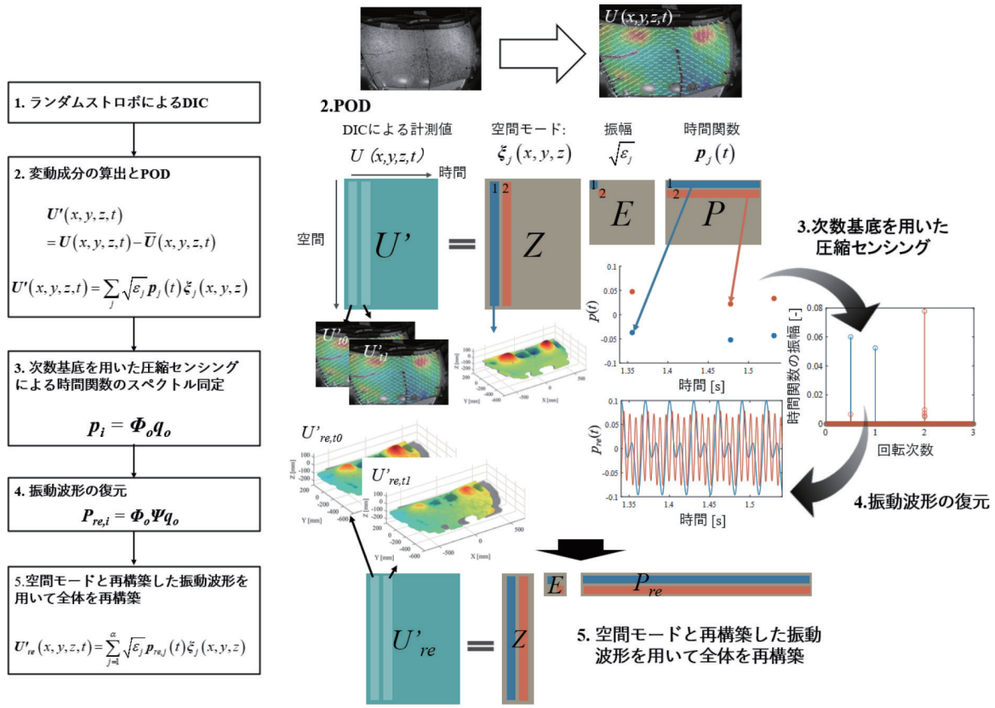

図1　圧縮センシングと次数分析を用いた振動再構成の概要