

圧縮センシング DIC を用いた高周波振動のマルチスケール計測

システム工学群

振動工学研究室 谷澤 光心

1 諸言

ロボット、梁、柱、車体、エンジンなどの構造物は、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持っている。従来では、加速度センサ等の接触型のセンサによる計測や、画像解析による非接触の計測がされてきた。しかし、センサ類は大量の設置が必要となったり、振動条件に影響を与えたりする問題があった。また、画像解析による計測では、高速振動の計測にはハイスピードカメラが必要となる。ハイスピードカメラは他のものより高価で、かつ変位分解能が小さくなる問題があった。そこで、高い周波数の振動を低い計測周波数でとらえることが可能な圧縮センシングと呼ばれる手法と変位計測手法の DIC を組み合わせることで低速、高解像度カメラの画像から高い周波数の振動モードを計測する手法が開発され、数千 Hz の定常高速加振を受けた梁の振動計測⁽¹⁾や数百 Hz で実稼働する自動車車体の定量的な振動計測に成功している⁽²⁾。しかし、ランダム加振試験などで、周波数ごとに一定の加振力を入力したものであっても、DIC で得られるのは変位であるため、各モード間で振幅が大きく変わるマルチスケールとなる課題がある。本研究では、圧縮センシング DIC における、振動のマルチスケール性の影響について評価した。

2 計測手法と装置

2.1 圧縮センシング DIC を用いた振動モード同定方法

圧縮センシング DIC を用いた周波数の同定方法については文献⁽¹⁾を参考にされたい。また、本手法の詳細は文献⁽⁴⁾に纏められているため、ここでは概要を述べる。

DIC で得られた全ての点で圧縮センシングを実施すると、計算負荷が非常に大きくなってしまふ。また、変位量が少ない点では、ノイズ等の影響で同定の精度が悪化する可能性が高い。よって、本研究では計測したデータ配列に対して POD を実施することで、振動モードと時間関数を分離して同定することとした。DIC により計測した変位行列を $y'(z,t)$ とすると POD は下式で表すことが出来る。

$$y'(z,t) = \sum_j \sqrt{e_j} a_j(t) \zeta_j(z) \quad (1)$$

ここで、 $a_j(t)$ は時間関数、 e_j はエネルギーレベル、 $\zeta_j(x,z)$ は空間モードである。POD を実施すると、モード 1 からエネルギー寄与率が大きい順に配列が生成される。本稿では、時間関数 $a_j(t)$ に対して圧縮センシングを適用することで周波数を同定した。同定したい周波数成分を含むモードについて $a_j(t)$ 、 e_j 、 $\zeta_j(x,z)$ をかけ合わせることで、時空間データを再構成できる。再構成した信号について、梁の軸方向各点の時系列に FFT を適用し、対象周波数における振幅分布を求めることでモード形状を得る。取得したモード形状の誤差は、FEM で得た形状との Modal Assurance Criterion (以下 MAC) 値をとり、評価した。MAC 値はモードベクトル: Φ_1 、 Φ_2 に対し、以下で計算できる。

$$MAC = \frac{|\Phi_1^H \Phi_2|^2}{(\Phi_1^H \Phi_1)(\Phi_2^H \Phi_2)} \quad (2)$$

ここで Φ_1^H 、 Φ_2^H は Φ_1 、 Φ_2 のエルミート転置である。

2.2 実験装置

提案手法を用いた構造物の振動モード計測手法の検証を行うために、図 1 に示す実験装置を設計した。試験体には、外径 18 mm、内径 13 mm、全長 1000 mm である硬質ポリ塩化ビニル管を用いた。中央に穴があり、M5 のボルトで加振器に固定している。撮影時の解像度は 0.167 mm/pixel であった。撮影した画像から DIC により各点における変位を求める。尚、バンドパスノイズによる加振によって、梁の軸方向の第 1~5 次のモードの固有振動数は、それぞれ 12 Hz、66 Hz、160 Hz、350 Hz、635 Hz であることが分かった。そのため、振幅を大きくするために、入力する周波数は 13、65、170、340、635 Hz に設定した。ここで、マルチスケール性を持たせるために複数の周波数の入力倍率を変化させて組み合わせ、加振した。DIC ソフトウェアには Ncorr⁽³⁾を用いた。

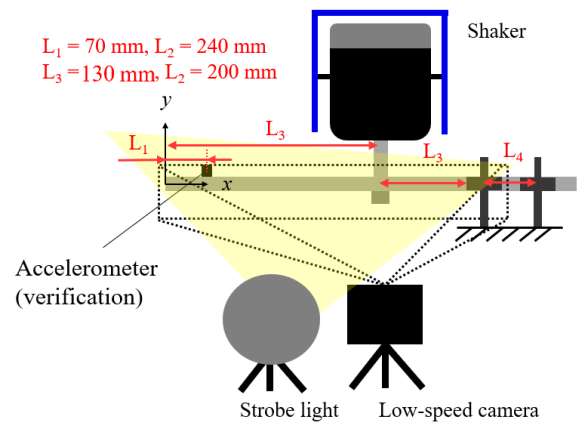


Fig.1 Overview of the experimental apparatus

3 実験結果

図 2 (a) には、振幅比に対する MAC の図、図 2 (b) には振幅に対する MAC 値の図をそれぞれ片対数グラフで示す。振幅比は、各条件について 13 Hz の振幅を基準にした各成分の振幅の比 M を計算した。尚、振幅倍率 M は振幅が離れるほど小さくなり可読性が低いため、本報告ではその逆数 $R = 1/M$ を用いて整理した。図 2 (b) には、カメラ撮影時の解像度と、サブピクセルを 1/10 とした場合の分解能を示している。図 2 (a) に実線で示した 2 つの成分では、周波数の同定ができなかった。この原因は、サブピクセル分解能を大きく下回る振幅であることや、DC 電源に起因するノイズ成分による影響が考えられる。上記以外の成分においては 10 Hz のサンプルデータから最大で 635 Hz の周波数同定が可能であった。図 2 (a) より、振幅比が大きい場合に、点線で示した成分において MAC 値が低下していることが確認でき

る。一方で、振幅比の増減に伴って MAC 値が単調に変化する明確な傾向は認められない。また、図 2 (b) より、振幅がサブピクセル分解能以上の場合、MAC が高い傾向が確認できる。また、先端振幅がサブピクセル分解能を下回る条件では、一部の周波数成分において MAC 値が低下する傾向が確認された。一方で、同程度の小振幅であっても高い MAC 値を示す条件が存在し、振幅の大小のみでは説明できない。そこで、図 3 には、振幅および振幅比を説明変数、MAC 値を応答として、MAC 値の分布をコンター図として示す。コンター図より、振幅比が増大する領域、ならびに振幅が小さくなる領域で MAC 値が低下する傾向が確認できる。一方で、高倍率・小振幅領域において高 MAC/低 MAC が混在しており、振幅比および振幅の単独指標のみでは MAC 値低下を一意に説明できないことが示唆される。ここで、図 2 (b) に示した単一加振における 65 Hz では比較的高い MAC 値が得られていることから、小振幅における低 MAC は特定条件に起因する特異な挙動である可能性がある。サブピクセル分解能以下の振幅で比較的高い MAC 値を示したのは、3 入力 170 Hz、340 Hz、635 Hz の各成分であった。3 入力 170 Hz 成分で精度が高い理由としては、他の高周波成分の影響が相対的に小さく、POD によりモード形状を分離しやすいことが考えられる。また 340 Hz、635 Hz で MAC が高いことについては、振動の大部分を支配している 13 Hz や 65 Hz の振動モードと空間形状の差異が大きく、分離が容易であった可能性がある。高倍率・小振幅領域において MAC 値が低下する原因として、実際の実験では加振部の結合条件により固有値が変動しうるが、その影響を FEM モデルに反映することは容易ではない。本報告では、加振周波数に一致する条件における FEM の実稼働応答形状と、実験で抽出したモード形状を比較して MAC を算出している。しかし、締結条件等により FEM の固有振動数が実機とずれると、加振周波数で算出した FEM の実稼働応答形状が固有モード形状から逸脱する可能性があり、MAC が過小評価される恐れがある。そこで今後は、実験で同定した固有振動数を基準に加振条件を設定し、比較

対象を FEM 固有値に基づく固有モード形状とした MAC を算出して再検証する予定である。

4 結論

マルチスケールな振動に対して POD のモード分解精度を評価した。その結果、マルチスケール性が同定精度を支配的に左右する傾向は確認できなかった。一方で、振幅や加振条件により MAC が低下する例がみられ、精度に影響する可能性が示唆された。ただし、本試験のみでは要因を特定できず、FEM 側の固有振動数整合の差異が MAC に影響した可能性もあり、今後の課題としたい。

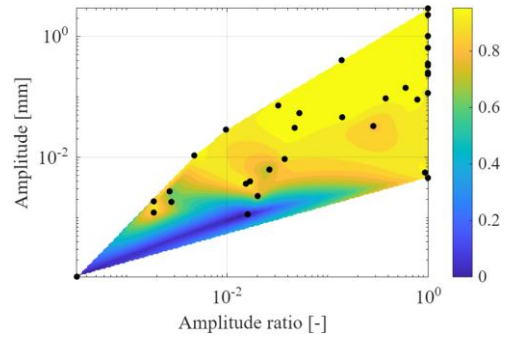
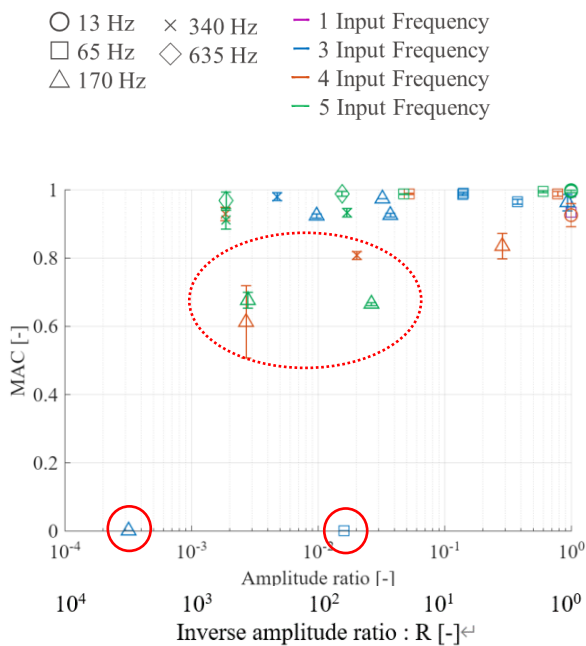


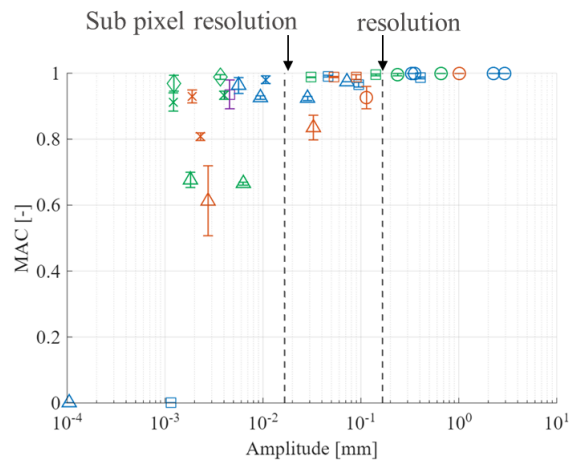
Fig.3 MAC response surface: amplitude ratio vs. amplitude

文献

- (1) Y. Kato, S. Watahiki, Mechanical System and Signal Processing , Vol . 199 , 2023 , 110495, <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2023.110495>
- (2) Y. Kato, S. Watahiki, Mechanical System and Signal Processing , Vol . 224 , 2025 , 112179 <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2024.112179>
- (3) J Blaber, B Adair, and A. Antoniou, "Ncorr: Open-Source 2D Digital Image Correlation Matlab Software." Experimental Mechanics (2015).
- (4) 谷澤光心, 加藤由幹, 綿引壮真: 圧縮センシング DIC を用いたランダム加振試験における構造物の全視野振動計測, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2025 講演論文集 , -OS3-3-2-03 pp.348-359,(2025-8).



(a) MAC value vs. amplitude ratio



(b) MAC value vs. tip amplitude

Fig.2 Quantitative Evaluation of Vibration Mode Measurements