

圧縮センシング DIC を用いた超音波振動子の可視化計測

Visualization measurement of ultrasonic transducers using compressed sensing DIC

システム工学群

振動工学研究室 安藤 陽史

1. 緒言

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、振動モードと固有振動数の計測には、加速度センサやレーザードップラー振動計などの点計測が実施されてきた。しかし、振動モードの計測には多数のセンサが必要となり、計測時間やコストをひっ迫することが問題になっていた。一方、振動計測の新しい方法として、画像解析を用いた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, 以降 DIC) もそのうちの 1 つであり、撮影したドットパターンを追跡することで物体の変位やひずみを非接触で計測する技術である。非接触なので対象物の振動挙動に影響を与えずに計測が可能で、大型構造物の広範囲の面的計測や遠距離計測も可能であるというメリットがある。しかし、超音波域の振動を計測するためにはハイスピードカメラが必須となる。ハイスピードカメラの解像度は比較的低いため、変位の分解能が低くなり、振幅が小さい超音波振動を計測することが難しいという課題があった¹⁾。したがって、高い周波数の振動モードを低速カメラで撮影した画像から復元する手法が求められている。

著者らは、ランダム行列とスパース同定を用いることでナイキスト周波数の突破が可能とする圧縮センシング²⁾と呼ばれる手法を DIC と組み合わせることで低速カメラの画像から高速振動モードを計測する手法 (CS-DIC) を開発した^{3),4)}。この手法を用いることで、解像度の良いカメラを使用できるため、超音波振動のような微小かつ高周波数の現象を計測可能となった。しかし、現状は 3kHz 以下の振動しか精度検証が実施できていない。そこで、本報告ではこの手法を 20kHz 以上の超音波域に拡張し、その計測精度を検討した。

2. 実験装置と解析手法

本研究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。我々の開発した手法は、変位計測手法である DIC と圧縮センシングを組み合わせたものである。図 1 に本手法の概略図を示す。DIC は撮影画像と初期位置画像間の相関により初期位置からの変位量を求める手法である。通常は連続光の下で一定の露光間隔により撮影した画像に対して相関処理を実施するため、算出される変位量は露光時間の平均移動量である。よって、露光間隔を T_e とすると、計測できる振動周期はサンプリング定理より $2T_e$ 以上の振動に限られる。そこで本手法 (CS-DIC) では、フラッシュの発光時間: T_f を極めて小さくし、それを時間方向にランダムに配置することで、時間方向にランダムな DIC の計測データ: X を取得した。この X に対して圧縮センシングを実施することで、従来手法で計測できる $2T_e$ よりもはるかに小さい振動周期である $2T_f$ 付近の振動を計測することが出来る。但し、 X の全空間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となり、かつノイズ耐性も悪い。よって、固有直交分解を用いて X を空間モード U (振動モードに関連する) と時間関数 V' に分解し、

V' に圧縮センシングをかけることで時間情報を復元し周波数同定を行った。なお、本研究では DIC のソフトウェアとして Ncorr⁵⁾ を用いた。

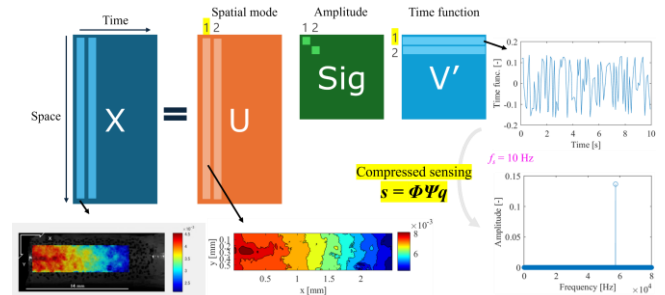


Fig.1 Overview of the CS-DIC

CS-DIC を用いた構造物の超音波域における振動モード計測手法の検証のために、図 2 に示す実験装置を設計した。試験体には、ボルト締めランジュバン型振動子 (富士セラミック製, FBL60152SS-FC) にホーンを取り付けたもの (FSHF60K1508) を使用した。ホーンの正面には、光ファイバ式距離センサ (PHIL TEC, D20-H2Q, 以降 ODS) を設置し、変位振幅を計測した。また、加振中の試験体の変位分布の変動を計測するために、ストロボ光源 (菅原研究所, X-1) と低速カメラ (Baumer 社, VCXU-123M) を設置した。ストロボ光源はマイコンにより制御されており、カメラの露光時間中にランダムに 1 回発光する。これにより、図 2 の右側にあるように時間方向にランダムな瞬間における、DIC 用のパターンが撮影される。

表 1 に今回の撮影体系における光学系の設定を示す。分解能が 7.1um/pix であるので、サブピクセル精度を考えると、DIC の変位分解能は 0.14-0.71 um/pix となる。このパターンに対して相互相関を取ることで、図 2 右下に示すように各位置における初期位置からの変位量を計測することが出来る。ODS やフラッシュタイミングなどの信号はデータロガー (GRAPHTEC, GL1700) を用いて、1us の時間分解能で計測した。尚、実験終了後にこのデータロガー内部のカウンタに 10 s ごとに線形で一定の時間遅れ ($\tau=14\mu\text{s}$) があることが判明したため、実験結果においてはこの時間遅れを補正している。

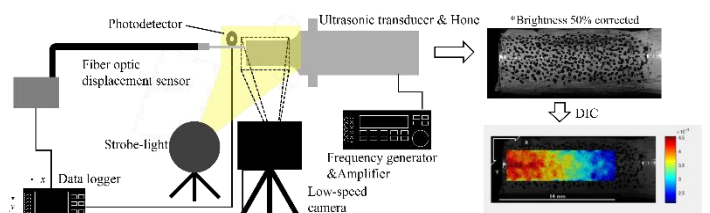


Fig.2 Overview of the experimental apparatus. Schematic diagram (left), captured images (upper right) and an example of DIC processing results (lower right).

Table 1 Optical conditions

Resolution	4096×3000 [pixel]
Optical resolution	7.1[μm/pix]
Exposure duration: T_e	100 [ms]
Flash duration: T_f	1.85 [μs]
Relaxation time: T_r	10 [ms]

振動子およびホーンの製造元から提供されたホーンの一次と二次の固有振動数は、それぞれ 57.4kHz および 74kHz である。そのため、本実験ではこれらに近い単一周波数による加振を行った。

3. 結果

まず、ホーンの特長として比較的振幅が大きくなることが分かっていた条件である加振周波数 57.4kHz において実験を行った。DIC による変位計測の結果に対して POD を実施したところ、第一モードのエネルギー寄与率: ϵ_1 は 99.9% であった。これは十分に大きい値であるので、第一モードのみで振動の大部分を記述できるものとして、以後は第一モードのみを評価することとした。POD により抽出した時間関数 $V^1(t)$ に対して、フーリエ基底を用いて圧縮センシングを行った。同定したフーリエ係数をもとに再構成した波形を再度 FFT で周波数同定したものを図 3 に示す。また、ODS により計測した振動子の速度波形 FFT し、変位振幅に直したものを併せて図 3 に示す。なお ODS のデータの FFT にはハニング窓を使用した。CS-DIC のスペクトルを見ると、ODS と同様に加振周波数である 57.4kHz でピークがあり、その他では目立ったピークが見られない。よって圧縮センシングによって振動周波数の同定が出来ていると考えられる。

振動子への入力電圧を変更して変位振幅を変え、同様に CS-DIC による変位スペクトルの同定を行い、ODS の計測値と比較した結果を図 4 に示す。

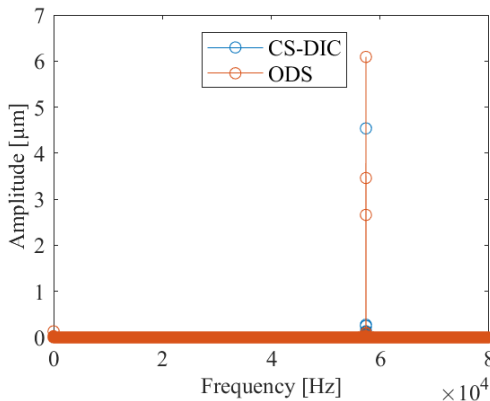


Fig.3 Comparison of displacement amplitude values obtained by ODS and reconstructed values obtained by CS-DIC

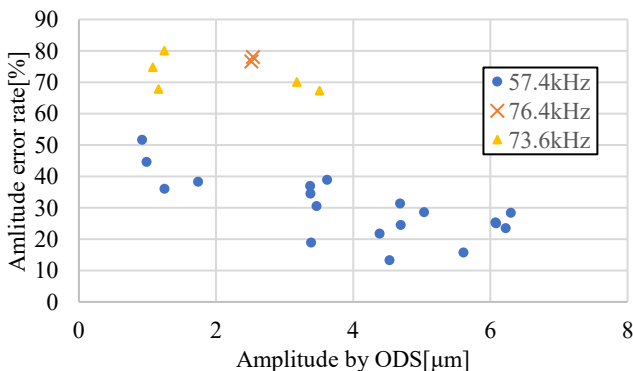


Fig.4 Relationship between measurement error and displacement amplitude in CS-DIC

尚、図 4 における結果では第一モードのエネルギー寄与率: ϵ_1 は 90% 以上であり、第一モードのみで振動の大部分を記述できると仮定ができる。しかし、どの条件においても CS-DIC による変位振幅が ODS の計測値よりも 20% 程度小さくなってしまった。図より、変位振幅が小さくなると誤差率が大きくなると読み取ることが出来る。これらの誤差の要因としては、変位振幅が非常に小さくなって DIC の変位分解能に近づいたことや、振動子が奥行方向に移動してピントがずれた可能性などが考えられる。

次に、振動モードの計測精度を評価した。モードの比較においては、3D-DIC ソフト DuoDIC[®]を用いてカメラを 2 台使い、2D と同様に計測を行った。これにより得られたモードと FEM による数値解の誤差評価を MAC (Modal Assurance Criterion, 値が 1 に近づくほど一致度合いが高い)を用いて行った。この結果を表 3 に示す。57.4kHz および 74kHz の二つの共振周波数においてそれぞれの MAC 値を比較したが、いずれも同周波数のモードでは 0.95 以上であり、他のモードとの MAC 値よりも高い値を示したことから、超音波域における振動についても、POD により振動モードが同定できていることが分かる。

Table.3 MAC Matrix Comparing DIC-Identified and FEM-Predicted Mode Shapes

FEM \ DIC	57.4kHz	73.6kHz
DIC	0.994	0.821
73.6kHz	0.904	0.959

4. 結論

低速カメラの撮影結果から高速振動する物体の変位計測が可能となる手法である CS-DIC を超音波振動に適用し、その性能評価を実施した。その結果、以下の結論を得た。

- CS-DIC を用いることで、10 Hz で撮影した画像から、57.4 kHz、73.6 kHz で振動する超音波振動子の振動モードと振動周波数を同定することが出来た。振動数は 0.1Hz 以下まで一致、振動モードの MAC 値は 0.95 以上であった。
- 振動の振幅についてはいずれの条件においても ODS における測定値よりも 20% 程度過小評価された。この原因については今後評価予定である。

文献

- (1) A.J. Molina-Viedma, L. Felipe-Sesé, E. López-Alba, F. Díaz, "High frequency mode shapes characterisation using Digital Image Correlation and phase-based motion magnification", Mechanical Systems and Signal Processing, Volume 102, 2018, Pages 245-261.
- (2) D. L. Donoho, IEEE Transactions on Information Theory, vol. 52, no. 4, pp. 1289-1306, April 2006.
- (3) Kato, Y., Watahiki, S., & Otaka, M. (2025). Full-field measurements of high-frequency micro-vibration under operational conditions using sub-Nyquist-rate 3D-DIC and compressed sensing with order analysis. Mechanical Systems and Signal Processing, 224, 112179.
- (4) Kato, Y., & Watahiki, S. (2023). Vibration mode identification method for structures using image correlation and compressed sensing. Mechanical Systems and Signal Processing, 199, 110495.
- (5) J Blaber, B Adair, and A Antoniou, "Ncorr: Open-Source 2D Digital Image Correlation Matlab Software." Experimental Mechanics (2015).
- (6) Dana Solav, Asaf Silverstein, "DuoDIC: 3D Digital Image Correlation in MATLAB" The Journal of Open Source Software (2022)