



圧縮センシングを用いた画像振動計測法を開発

～車体やエンジンの実稼働高速振動の高精度可視化計測を実現～

【概要説明】

- ① 従来、実稼働時の車体やエンジンのような高周波振動の可視化計測にはハイスピードカメラが用いられていたが、撮影速度を上げるほど解像度が低下するため、広範囲で微小な振動を計測することが不可能だった。
- ② 本研究では、低速高解像度カメラを用いて撮影した画像から微小変形を計測し、時間情報を圧縮センシング^{注1)}と次数比分析^{注2)}により復元することでこの課題を解決した。
- ③ これまで計測できなかった広範囲（1m²）・高周波（数百 Hz）・微小振幅（数μm）の実稼働振動の全視野計測を可能とする画像計測法を開発した。

【研究の背景】

自動車用エンジンやジェットエンジン等の回転機械は絶えず振動にさらされており、振動がそれらの性能や製品寿命、安全性を大きく左右します。そのため、設計・製造・保守といった現場においては振動の計測が不可欠です。これらの現場では、加速度センサと呼ばれる接触式のセンサによる計測を行うことが一般的です。しかし、センサは手作業で貼り付ける必要があり、設置や配線等にかかる手間と労力が課題となっていました。また、空間的な振動形状の把握が難しいことから、振動設計が困難となるケースがありました。

一方、マーカーの点をトラッキングするデジタル画像相関法（DIC）と呼ばれる画像計測技術を用いることで、センサを貼り付けることなく対象物の振動を非接触かつ面的に計測することが可能になります。しかし、高速振動の計測にはハイスピードカメラが必須であり、撮影速度を上げるほど画素数が低下するため、広範囲かつ微小な振動を計測できないという課題がありました。この課題を解決するため、高知工科大学 システム工学群 加藤 由幹講師らの研究グループは DIC に「圧縮センシング」と「POD」（モード分解手法の一種）という二つのデータサイエンス技術を組み合わせた新手法である **Compressed Sensing DIC** を開発しました^{注3)}。この手法により、図 1 に示すと

おり 10 Hz で撮影した画像をもとに 150-1130 Hz の高速振動を計測することに成功しています。しかし、この手法は振動試験において現れる単純な振動（図 1 右下参照。フーリエ基底で係数がまばらになる）は計測できますが、エンジンの実稼働振動のように振動成分の数が多くなると計測が困難になる課題がありました。

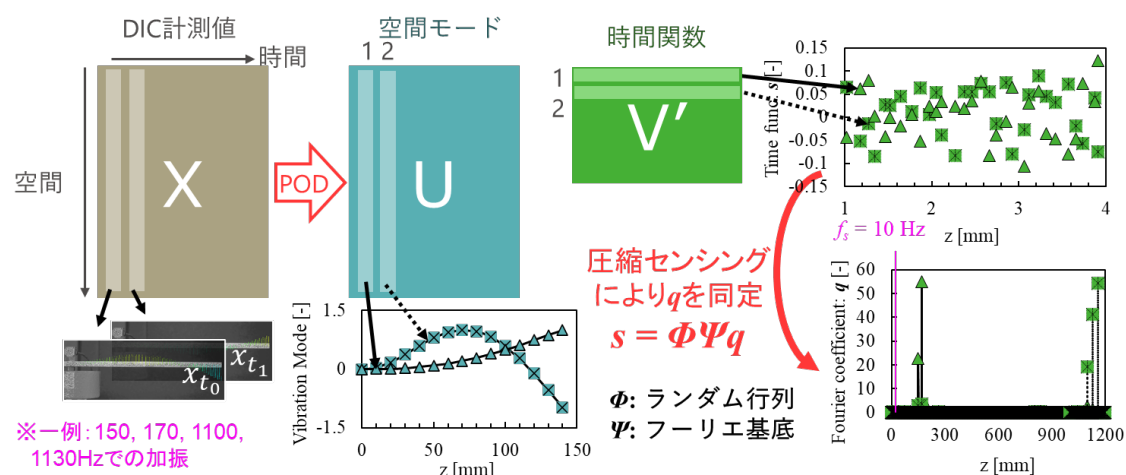


図 1 DIC による計測データに POD と圧縮センシングを適用することで、梁の振動情報を復元した結果。撮影速度より 100 倍以上高速な振動を復元できている。

【研究内容と成果】

本研究では、上述した課題を克服するために、図 2 に示すように回転計により計測した回転情報をもとに作成した回転次数基底による圧縮センシングを行う手法を考案しました。これにより、復元すべき変数をまばらにすることができ、実稼働エンジンのような複雑な振動を計測できるようになりました。

図 3 は、開発した手法によりエンジン吸気配管や自動車ボンネットを計測した結果です。同図中央部に示すとおり、吸気配管やボンネットの変形形状が詳細かつ広範囲に計測できていることが分かります。また、同図右側に示すとおり、加速度センサと同様な振動スペクトルを計測できていることが分かります。提案した次数基底を用いた手法の計測誤差は 1.9 %であり、従来法のフーリエ基底による観測による誤差 97.9%と比べて大幅に精度を改善することができました。ボンネットの振動については 26.2%と計測誤差が大きくなりましたが、これはサブマイクロメートル（可視光の波長と同じオーダー）の微小振動であったため、光の屈折などにより画像計測精度が悪化したことに起因すると推定されています。なお、この実験においては、試験設備運転や振動計測を株式会社小野測器が、DIC による画像変位計測を株式会社構造計画研究所が、圧縮センシングによる振動復元等のデータ分析を高知工科大学が担当しました。

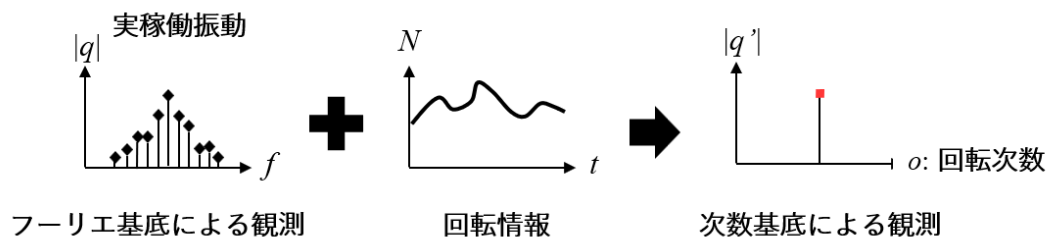


図 2 振動をフーリエ基底で観測した場合と次数基底で観測した場合の比較結果

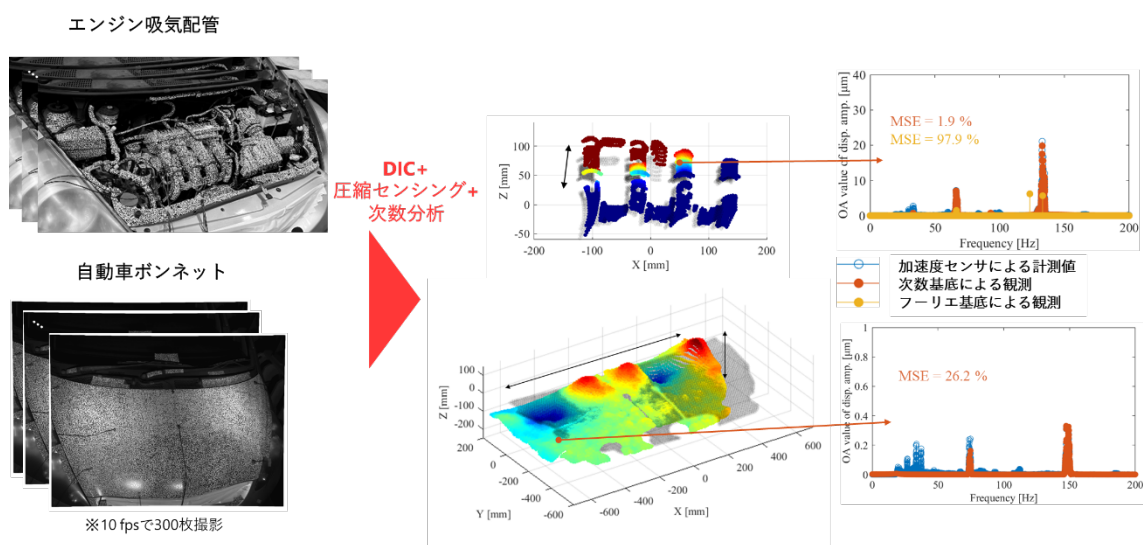


図 3 開発した手法によりエンジン吸気配管とボンネットの振動を計測した結果

【今後の展開】

今後は、開発した手法を拡張することで、構造物の固有振動数や固有モードの計測、数値計算モデルとの融合をめざします。これにより、エンジンや車体、構造物の振動設計の更なる高度化が期待できます。

また、本研究は構造計画研究所との共同研究の成果であり、同社では Compressed Sensing DIC の製品化に向けた開発を進めています。本技術の実用化により、これまで困難とされてきた広視野での高精度な振動計測や振動特性の詳細な解析が可能となることが期待されます。今後も、両者が緊密に連携し、更なる技術の改良や実証試験を重ねることで、計測精度や適用範囲を拡大し、幅広い分野への応用展開を加速していきます。

【用語解説】

注1) 圧縮センシング

少数のデータからより複雑な情報を抽出するデータサイエンス技術です。特定の基底で変数がまばらになる性質を利用した復元方法であり、MRI などの医療機器分野で用いられているほか、電波天文学の分野におけるブラックホールの可視化などでも実用化されています。

注2) 次数比分析

回転機械の振動を分析する際に使用される手法です。1 回転に 1 回発生する現象を回転 1 次成分、その n 倍を回転 n 次成分と定義して分析することで、回転に起因する振動の大きさを正確に評価できます。

注3)

参考文献はこちら

Kato, Y., & Watahiki, S. (2023). Vibration mode identification method for structures using image correlation and compressed sensing. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 199, 110495.

<https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2023.110495>

<https://www.kke.co.jp/release/14408>

【論文情報】

タイトル : Full-field measurements of high-frequency micro-vibration under operational conditions using sub-Nyquist-rate 3D-DIC and compressed sensing with order analysis (次数解析と圧縮センシング, 3D-DIC を用いた実稼働高速微小振動の全視野計測)

著 者 : Yuki Kato, Soma Watahiki, Masayoshi Otaka

掲載誌 : *Mechanical Systems and Signal Processing*

公開日 : 2025 年 2 月 1 日

D O I : <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2024.112179>

【研究に関するお問い合わせ先】

高知工科大学 システム工学群 講師 加藤 由幹
TEL. 0887-57-2732
E-mail : kato.yuki@kochi-tech.ac.jp

【広報に関するお問い合わせ先】

高知工科大学 広報課
TEL.0887-53-1080
E-mail : kouhou@ml.kochi-tech.ac.jp