

イベントカメラを用いた高周波振動モードの計測によるボルト締結部の異常検知

Anomaly Detection in Bolted Joints through Measurement of High-Frequency Vibration Modes Using Event Cameras

システム工学群
振動工学研究室 宮本 拓実

1 緒言

制振設計⁽¹⁾や構造物ヘルスマニタリング⁽²⁾を目的に、画像を用いた全視野振動計測手法が盛んに研究されている。これらの計測手法は従来の接触式センサと比べ、1つのカメラで詳細な振動モードの計測が可能という利点がある。しかし、高い周波数の振動現象を計測するためにはハイスピードカメラが必須となるため、データ容量が大きい、サイズや重量が大きい、計測コストが高いといった課題があった。そこで、これらの課題を解決する画像計測法が求められている。

近年、上記課題を解決する可能性があるイベントカメラが開発された。イベントカメラは明るさの対数変化にのみ反応する独立したピクセルを備えており、非同期で可変データレートのイベントストリームを出力する。従来のフレームベースカメラと比較して、イベントカメラは、高い時間分解能とダイナミックレンジを持っており、振動計測への応用も進んでいる。Dornらは、イベントカメラと位相ベースの手法を組み合わせて振動モードとそのスペクトルを検知する手法を開発した⁽⁴⁾。しかし、位相ベースの方法であるため、定量的な振幅の計測は難しかった。また、マーカー追跡による方法も開発されているが⁽⁵⁾、3ピクセル未満の振動では周波数の同定が難しくなっており、波形の観測もできていない。

そこで、本研究では、サブピクセル精度を達成するため、イベントカメラを用いたスクエアトラッキング法を開発した。事前に移動台を用いた Validation を実施することで、定量計測を実現している。また、既存研究ではイベント間のデータ補完には線形補完が用いられていたが、構造物振動における変位行列が有する性質である低ランク性を用いた補完を実装することで、分解能と計測精度の向上を行った。これにより、未知な複雑振動のスペクトルと振動モードを、イベントカメラにより高精度かつ定量的に計測することが可能となった。

2 解析手法

2.1 イベントカメラを用いた変位計測手法

イベントカメラは輝度値の対数変化のイベントのみを記録し、各ピクセルは時間的に同期されず独立にサンプリングされる。よって、輝度の変化情報を効率的に記録することができる。しかし欠点もあり、イベントの発生のみを検知する方式であるので、トラッキングポイントが移動した場合の対数輝度値変化とその時のイベント量の関係を校正する必要がある。

こちらの校正手法は本試験では、四角形の直上に付けられた加速度センサを用いて、変位とイベント量の関係を校正している。詳しくは参考文献を参考にされたい⁽⁶⁾。

補完方法については、線形補完とテンソル補完を用いた。詳しくは参考文献を参照されたい⁽⁷⁾。また、2つの振動形状間の相関関係を評価するために、FEM との Modal Assurance Criterion を計算した。

2.2 実験装置

イベントカメラ (CenturyArks 社製, SilkyEvCam HD, 解像度:1280×720 pix.) を用いて周波数スペクトルと振動モードの計測を行うために、図1に示す実験装置を製作した。図に示す通り、試験装置は1mの配管と左側の固定部から構成されている。試験対象は硬質ポリビニル管である。外形、内径、長さはそれぞれ22 mm, 16 mm, 1000 mm である。配管にはトラッキング点として長さ7.5 mm, 高さ5 mm, 間隔が18.5 mm の黒い四角形を印刷したシールを固定部Bから張り付けている。固定部Bを原点 $x=0$ とし、イベントカメラは $x=0-650$ mm 左側を撮影した。トラッキング点近傍の輝度値変化をイベントカメラが検出し、今回提案した方法を用いることによってトラッキング点の変位を計測することができる。

また、試験体の左から8番目のマーク位置にボルト穴を設けており、ナイロンスティンガー (東陽テクニカ社製, 2110G06) を通して加振機 (東陽テクニカ社製, SmartShaker) と接続している。固定位置や、加速度計の取り付け位置は、図5に記載している。計測精度の検証のために、圧電式加速度計 (A&D Company, Limited 製, SV1105) を右から2番目と8番目の四角形のマークの真上に取り付けた。これをそれぞれ加速度センサ No.2, No.8 とする。

照明条件を統一するために、イベントカメラと同じ方向からハロゲンライト (株式会社高儀社製 WLT-260) の光を試験配管に照射した。加振条件は表1に示すとおりであり、単一周波数加振試験を実施した。ノイズ加振より計算した FRF より試験対象配管の固有振動数が15, 80, 190 Hz 近傍であったため、周波数の条件は表1に示す通り固有振動数の近くに設定している。また、ボルト締結部の緩みを検知できるかを評価するために、右側の固定ボルトが外れた異常状態において、単一周波数加振を行った。

Table 1 Excitation frequency under each excitation condition

Single frequency vibration [Hz]	Single frequency vibration with Abnormal condition [Hz]
15, 80, 190	15, 80, 190

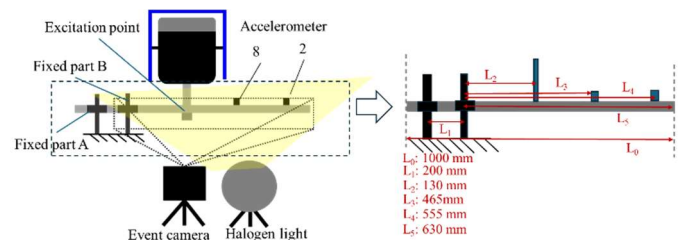


Fig.1 Overview of the experimental apparatus. Schematic diagram (left), Distance from each node (right)

3 実験結果

3.1 周波数スペクトル

図 2 に示すのは 15 Hz で加振した際の 0.28~0.38 秒の間である。赤色の丸で示しているのがイベントカメラで検知したイベントフラグから計算した計測値である。それに対して線形補完を行ったものが黄色の線であり、紫色の線は今回提案する、低ランク性を用いた補完を行った変位波形である。

全体的によく配管の変位計測がされているが、極大値、極小値近傍で変位波形が過小評価されている。

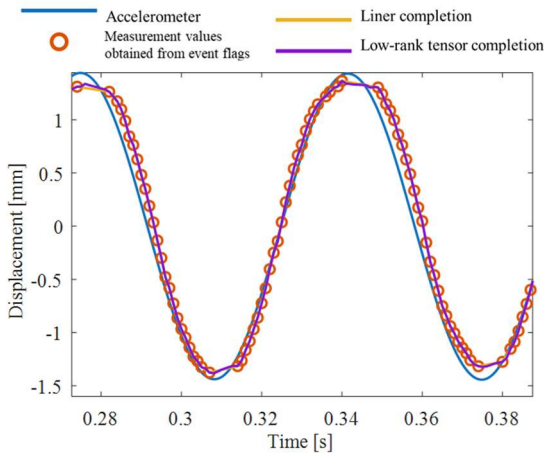


Fig2 Displacement waveform at 65Hz (0.3s~0.325s)

次に、周波数スペクトルにおいて加速度センサとイベントカメラによる計測値との間の MSE を評価した結果を図 3 に示す。横軸には加速度センサから求められた振幅、縦軸には各補完方法における MSE を記している。図より、1 pix である 0.516mm を上回る振動では MSE が小さく良好な結果が示された。しかし、解像度である 0.516 mm を下回る振動になるとの MSE は少しずつ悪化している。特に線形補完を用いると約 100%の MSE であった。これは、図 2 の極大値、極小値近傍の過小評価が影響した可能性が考えられる。ただし、低ランク性を用いた補完を行うと 1/10 pix の微小振動においても、周波数スペクトルの MSE は 10% 以下であった。

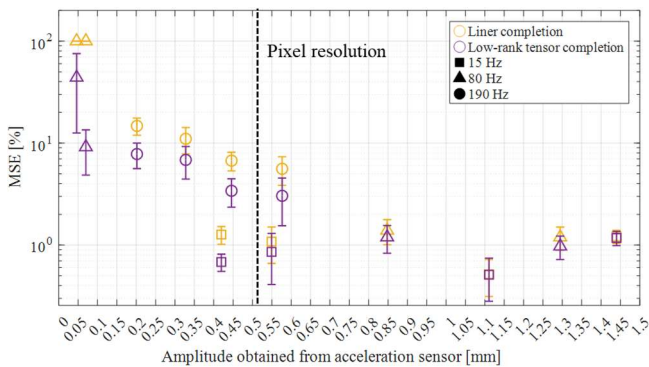


Fig.3 MSE vs amplitude of displacement with vertical error bars

3.2 振動モードについて

ここで、ボルト締結が緩んだ場合と緩んでいない場合の振動モードを比較した。ボルト締結の有無による振動モードの変化を計測していることがわかる。また、当該変化の方向性は FEM 解析と整合しており、モデルにより説明可能であった。したがって図 4 よりボルト固定部の緩みの異常は振動モードから検知可能であるということが示された。

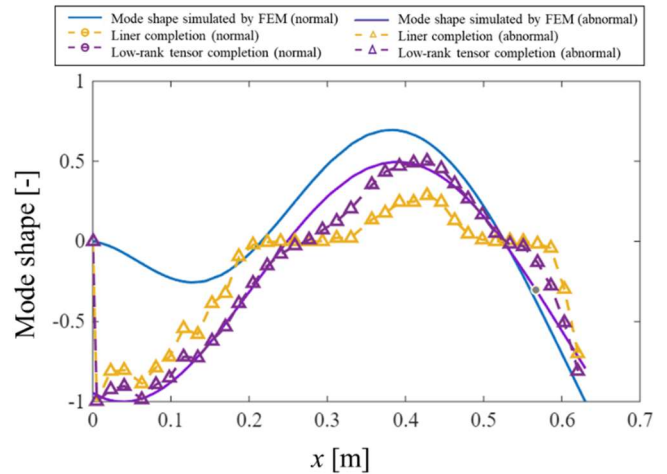


Fig.4 Normal and abnormal vibration modes at 170 Hz

4 結論

今回の実験において、以下のことが分かった。

- 本研究で提案する補完手法を周波数スペクトルに適用した結果、振動振幅が 1/5 pix の微小振動に対しても、MSE が 10% 以下となり、良好な一致を確認した。さらに、同条件において線形補完よりも低い誤差を示し、提案手法の優位性が示唆された。
- 正常状態と締結解除状態の比較により、振動モードの変化を確認した。この結果より、イベントカメラ計測を用いた締結部の異常検知が成立し得ることが示唆された。

- (1) B.F. Spencer Jr, S. Nagarajaiah, State of the art of structural control, J. Struct. Eng. 129 (7) (2003) 845–856.
- (2) Farrar, Charles R., and Keith Worden. "An introduction to structural health monitoring." Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 365.1851 (2007): 303-315.
- (3) Patrick Lichtsteiner, Christoph Posch, Tobi Delbruck, A 128_128 120 db 15 ls latency asynchronous temporal contrast vision sensor, IEEE J Solid-state Circuits 43 (2) (2008) 566–576.
- (4) Dorn, C., Dasari, S., Yang, Y., Farrar, C., Kenyon, G., Welch, P., & Mascareñas, D. (2018). Efficient full-field vibration measurements and operational modal analysis using neuromorphic event-based imaging. Journal of Engineering Mechanics, 144(7), 04018054.
- (5) Lv, Y., Zhou, L., Liu, Z., & Zhang, H. (2024). Structural vibration frequency monitoring based on event camera. Measurement Science and Technology, 35(8), 085007.
- (6) 宮本拓実, 加藤由幹: イベントカメラによる高周波振動モード計測を用いたボルト締結部の異常検知, 第 23 回評価・診断に関するシンポジウム, 講演論文集,-103 pp20-25,(2025-12)
- (7) 宮本拓実, 加藤由幹: 異常検知に向けたイベントカメラによる高周波振動モードの可視化計測,日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2025 講演論文集,-OS6-1-3-04 pp.650-661,(2025-8).