

画像拡大による目視で検知できない緩んだボルトの検出

京都大学工学研究科社会基盤工学専攻 教授 金 哲佑

1. はじめに

社会基盤施設の老朽化が進む中、社会基盤施設の安全性と使用性の確保は、近代社会の持続的な社会の構築のためにも重要な課題になっている¹⁾。社会基盤施設の維持管理は目視による定期点検を基本にしており、例えば橋梁の定期点検に着目すると5年に1度、土木技術者の近接目視により行うことが義務付けられている。一方で、膨大な数の構造物の定期点検には莫大な費用を必要とすることが明らかになっており、点検従事者の不足や点検結果のばらつきも課題になっている。このような目視を基本とする定期点検に代わって使えるあるいは従来の点検を補助できる技術開発が望まれており、センサーを用いるモニタリング技術に着目した構造ヘルスマニタリングの研究が注目されてきた。特に、河川や海を渡る橋梁構造物のモニタリングでは、固定点を必要とする変位の計測の制約が多く、構造物の振動を計測する加速度センサーによる振動モニタリングが注目されてきた²⁾。

近年の画像処理技術の発展、デジタルカメラの高解像度化、さらにはドローンのような無人飛行機(UAV)の発展により、デジタル画像を用いた研究も多く行われている。デジタル画像に着目したモニタリング技術は、構造物のひび割れ検知のような人が検知できる点検対象の点検効率向上を目的とした技術と、構造物のたわみのように人が目視で検知できない動きを検知しようとする技術に分類できる。しかしながら従来のデジタル画像処理技術でも微弱な振動や変位の検知には限界がある。

本研究では、ボルト接合が多い鋼構造物の点検項目としてボルトのゆるみに着目し、ゆるんだボルトのスクリーニング法として、ボルトの微動を撮影した動画からボルトのゆるみを検知する手法を検討する。橋梁などの大型構造物において、全てのボルトの緩みの有無を、個別に調査することは、構造物に足場を組むなど、大変な労力と費用を要することから、詳細調査の対象とするボルトの緩みを事前にスクリーニングできる技術が望まれる。

画像解析によるボルト緩みのスクリーニングを可能にするために、動画のような経時的な画像の空間的に微妙な変化を増幅する Eulerian Video Magnification 法 (オイラー画像拡大法)³⁾の改良手法である Phase-Based Video Processing 法 (位相差画像処理法)⁴⁾に着目している。オイラー画像拡大法は、動画の動きの時間的なエイリアシングを抑制し、小さな色の変化や微妙な動きを明らかにするために適用されてきた。しかしながら、画像拡大の観点からは、拡大倍率を上げるとノイズも大きく増幅されてしまい高い空間周波数では小さな拡大率しかサポートできない問題点がある。

位相差画像処理法は、画像空間における複素ステアラブル・ピラミッド (Steerable Pyramid)⁵⁾をベースにした新しいオイラー型の画像拡大法である。ステアラブル・ピラミッドにより原画像を逐次的に低い解像度を持つ複数の低い空間周波数の画像と低い解像度を持つ複数の高い空間周波数の画像を生成し、低周波画像と高周波画像の各々に対してノイズ除去処理を行うことで、高い空間周波数でもノイズの影響を低減した画像拡大が可能になる。このような拡大によって、知覚できない変化を視覚化することに加え、対象としない変化を減衰させることができる。すなわち、この手法では、動画像に空間フィルタを適用することで空間周波数別に分解される画像の各々のピクセル (画素) について、時間フィルタを適用することで必要な周波数帯域のピクセルのみを拡大し、動画内の微小な変化を視覚化することが可能となる。以上の位相差画像処理のプロセスを図-1⁴⁾に示す。

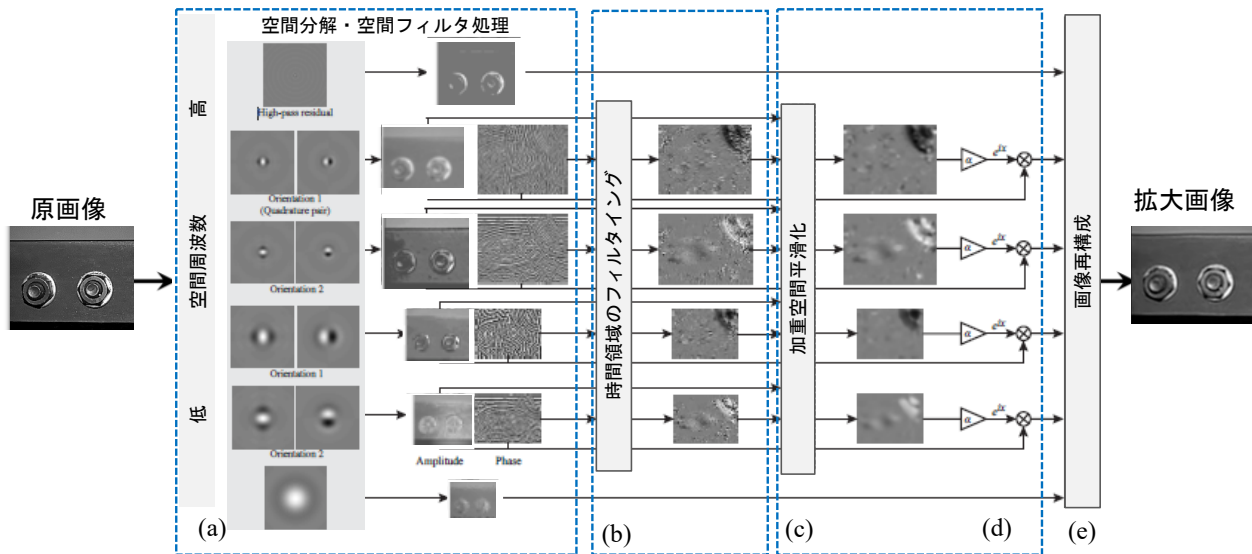


図-1 画像拡大プロセス：(a) 複素ステアラブルピラミッドによる動画の空間分解し，ローカルウェーブレットの振幅と位相分離；(b) 各位置，方向，スケールで独立して位相を時間的にフィルタリング；(c) 加重空間平滑化；(d) 時間的にバンドパスされた位相を増幅または減衰；(e) ビデオを再構成。

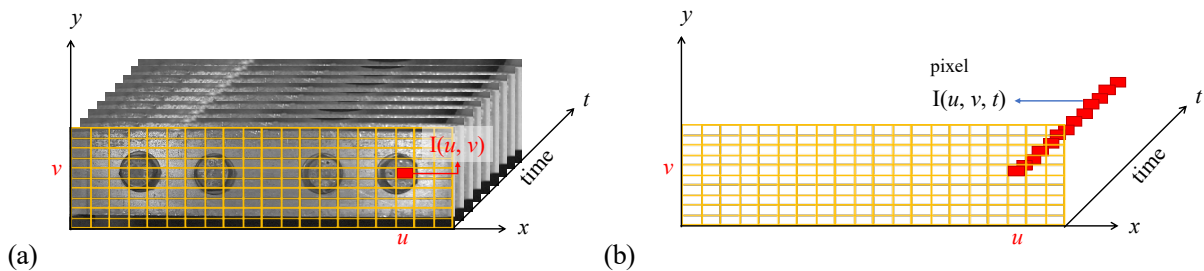


図-2 動画の空間および時間関数の概念：(a) 画像のピクセル，(b) 画像ピクセルの時間変化

提案手法の妥当性については，ゆるんだボルトを模型橋梁に装着し，模型車両走行による振動実験を行い，ボルトの微動を撮影した動画からボルトのゆるみを検知する手法の妥当性を検証する。

2. 画像拡大法の概要

位相差画像処理法を直感的に理解するために，フーリエ基底を使用した例を示す．図-2のように動画を時間軸に並べた例を考える．座標 $x = u, y = v$ での画像の輝度プロファイル $I(u, v)$ とし，ある時間でのその画像の輝度プロファイル $I(u, v, t)$ とする．説明を簡単にするために， $I(u, v)$ の時間軸に対する1次元的なピクセルの変化のみに着目し，図-2(a)の $I(u, v)$ を $f(x)$ とする．画像 $f(x)$ はフーリエ級数分解によって式(1)のように複素正弦波の和で表現できる．

$$f(x) = \sum_{\omega=-\infty}^{\infty} A_{\omega} e^{i\omega(x)} \tag{1}$$

時刻 t の画像フレームの画像のピクセルの変位関数を $\delta(t)$ とし，画像中のピクセルの移動は位相における変化のみに現れ，画像 $f(x)$ は移動後に $f(x + \delta(t))$ に変化し，式(2)になる．

$$f(x + \delta(t)) = \sum_{\omega=-\infty}^{\infty} A_{\omega} e^{i\omega(x+\delta(t))} \quad (2)$$

ここで ω は各帯域での単一周波数を示す。

式 (2) は、対象物の移動（振動）を表現するためには、基準フレームとある時刻のフレームとの位相差を計算すればいいことを意味する。また、式 (2) の $A_{\omega} e^{i\omega(x+\delta(t))}$ の各振動数 ω の複素正弦曲線を式 (3) のように定義する。

$$S_{\omega}(x, t) = A_{\omega} e^{i\omega(x+\delta(t))} \quad (3)$$

式(3)の S_{ω} の位相部分は画像の動きの情報が含まれているため、位相を変化させることで動きを変化させることができる。特定の時間周波数の動きを分離するために、直流バランスフィルタを使用し、位相 $\omega(x + \delta(t))$ を時間的にフィルタ処理する。導出を単純化するために、時間フィルタは直流フィルタ成分 ωx を除去する以外にほかの効果が無いと仮定する。この結果として、バンドパスフィルタを通した位相情報は式(4)となる。

$$B_{\omega}(x, t) = \omega \delta(t) \quad (4)$$

次に、位相 B_{ω} にサブバンド S_{ω} の位相をかけて、動きを拡大した特定振動数 ω の複素正弦曲線は式 (5) になる。

$$\hat{S}_{\omega}(x, t) := S_{\omega}(x, t) e^{i\alpha B_{\omega}} = A_{\omega} e^{i\omega(x+(1+\alpha)\delta(t))} \quad (5)$$

これにより入力の $1 + \alpha$ 倍の動きをもつ複素数正弦波となり、特定振動数 ω の複素正弦曲線 $S_{\omega}(x, t)$ の変動 $\delta(t)$ が強調されることが分かる。

分解された画像を再構成することで、特定振動数 ω の振動が拡大されたビデオを再構築できる。すなわち、すべての周波数帯域の複素正弦曲線を合計して、動きを拡大したシーケンス $f(x + (1 + \alpha)\delta(t))$ を取得することで特定の周波数の動きを α 倍した動画の拡大が可能である。

以上の方法のプロセスを以下にまとめる。

- ① 複素ステアラブル・ピラミッドによって、画像の特徴量が空間周波数の大きさ（スケール）と周波数の方向（オリエンテーション）ごとにウェーブレット分解される。各ウェーブレットは実部虚部の両方を保持しており、振幅 (A_{ω}) と位相 ($e^{i\omega(x)}$) に分解できる。これによってピクセルの位相が計算できる。
- ② これらの位相について一時的にバンドパスフィルタを通して、特定の構造物に関する特定の時間周波数を分離し、時間領域の直流成分を削除する。これらの時間的にバンドパスされた位相 ($e^{i\omega(x+\delta(t))}$) は、様々な空間位置と方向の動きに対応する。
- ③ これらの増幅された位相差を使用して、各フレームに各係数の位相を変更する ($A_{\omega} e^{i\omega(x+(1+\alpha)\delta(t))}$) ことにより、シーケンス内の動きを拡大・縮小することができる。

3. 実験概要

緩んだボルトの振動を検出するための位相差画像処理法の実現可能性を判断するために、実験室にて図-3に示す模型橋梁にボルトで締めた鋼材を用意する。その模型橋梁に車両(図-3(c))を走行させることにより橋梁が振動し、連動してボルトが振動するのを動画で撮影する。カメラはKeyenceVW-6000ハ

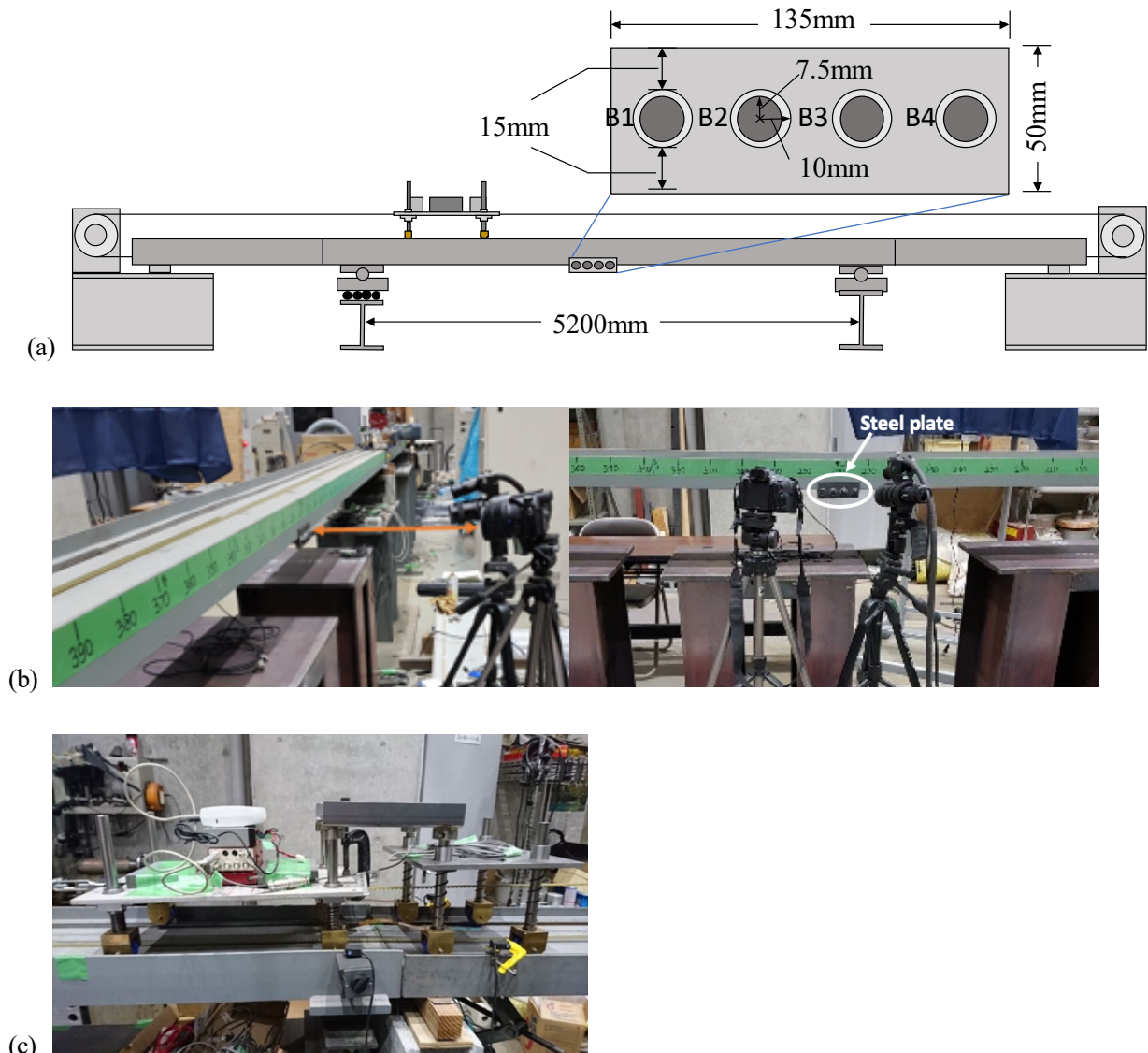


図-3 実験概要図

(a) 模型橋梁車両走行実験の模式図, (b) 検討対象のボルトで締結の鋼材, (c) 模型車両

イスピードカメラを用いた。フレームレートは緩んだボルトの振動を十分にとらえられるように設定し、1000fpsとする。なお、模型橋梁の1次モード固有振動数は3.64Hzである。

着目するボルトは、図-3(a)に示すボルト群の右から3つ (B1, B2, B3) を対象とし、B1, B2, B3ボルトの締め度合いをそれぞれ100%, 25%, 0%とする。ボルトおよび鉄板の詳細は図-3(a)に記載している。鉄板は縦15cm, 横13.5cm, ボルトはワッシャー部分を含め、1.5cm間隔で配置する。また、模型橋梁の詳細を図-3(b)に示す。支点間長5400mmであり、境界条件として、片方は固定、片方は橋軸方向の移動を自由としたローラーを設置している。カメラは十分な解像度を得られるように50cmほど供試体から離し、撮影対象ボルトである右から3つが十分映る画角で撮影を行う。

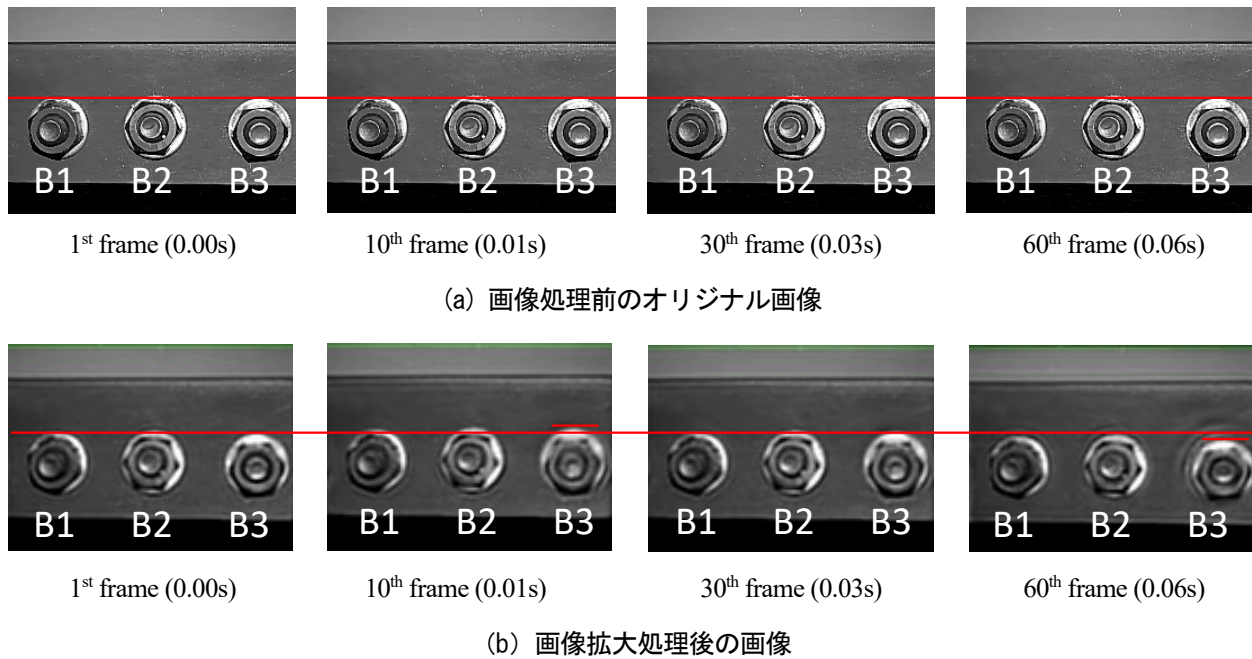


図-4 画像拡大前後の動画内の画像の例

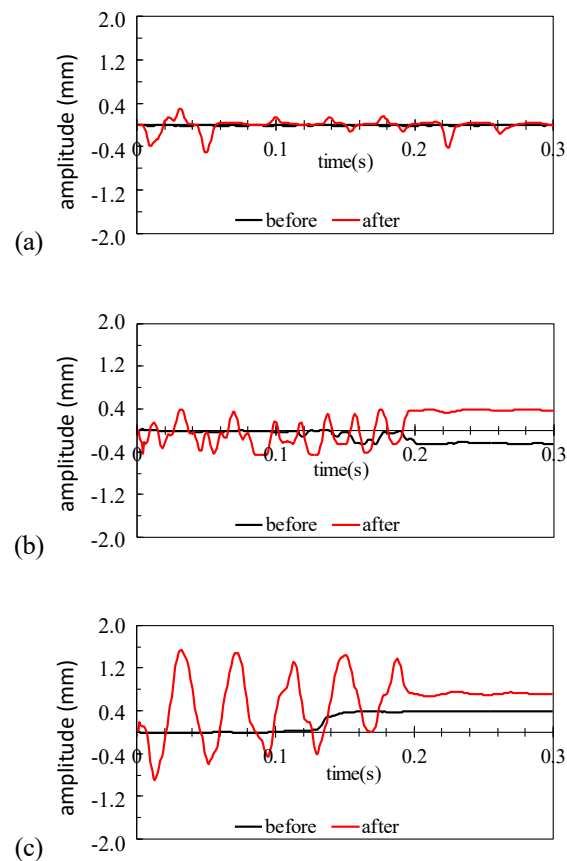
4. 画像拡大の適用結果

室内実験により得られるボルトの振動動画に位相差画像処理法を適用する．いくつかの動画に対して、位相差画像処理法を適用し、動きの変化が正常に観察された動画に関して考察を行う．また、位相差画像処理法の適用において、拡大倍率 $\alpha = 100$ とする．また、位相のバンドパスフィルタのカットオフ振動数は下限で $\omega_l = 24$ (Hz)、上限で $\omega_h = 28$ (Hz)とした．サンプリングは $f_s = 1000$ (fps)とした． f_s については、動画を撮影した際のフレームレートである． ω_l と ω_h は増幅させたい振動数帯を含むように設定する．

今回の実験ではボルトの揺れの振動数帯が事前に判明しておらず、実験的に ω_l と ω_h を変更しながら、位相差画像処理法を適用し、十分に対象ボルトの動きが増幅させるものを選択した． α の設定についてもパラメータの値を変更しながら最適なものを選択した．

図-4に、画像拡大を適用する前後の動画内の画像の一部を示す．なお、画像に関しては動画内のフレーム1, 10, 30, 60である．画像拡大を適用させ前の動画では、ボルトのゆるみは肉眼では認識できない．しかし、画像拡大を適用させた後の動画では、ボルトのゆるみ率が大きくなればなるほど、大きく振動していることが、肉眼で認識できるようになった．すなわち、フレームごとの画像を比較すると、画像拡大を適用する前はフレームによってボルトの動きは判断できないが、画像拡大を適用した後ではフレームが変わるにつれてボルトの位置が変わっていることがわかる．

この結果より、画像拡大によって肉眼では認識できなかった動画の変化を認識できるようになることが確かめられた．しかし、橋梁点検において、維持管理検査に利用するには、ボルトのゆるみを定量的に判断できることが必要である．そこで、次章において画像拡大を適用した動画を使用して、ボルトのゆるみを定量化する方法を提案する．



図ー5 ボルトのゆるみの定量化：(a) B1 ボルト，(b) B2 ボルト，(c) B3 ボルト

5. 画像拡大適用動画のボルト振動の定量化

変化が増幅されたボルトのゆるみの動画において、ゆるみを定量化する方法を提案する。

ハイスピードカメラで撮影した動画に対して、画像拡大によって振幅増幅させた動画に対して、ボルトゆるみ検知の精度を高めるために、適当な前処理を施す。まず、動画をフレーム分割することで、大量の画像を生成する。微小なボルトの振動を検出するためには、画素数を多くする必要があることから、双三次内挿法(Bi-Cubic補間)を用いて画素補間を行う。双三次内挿法とは、線形補間よりも高精度な補間法であり、16近傍の画素値から三次関数を用いて補間することができる。本研究では、10倍のスケールで画素補間を行った。例として、検討の動画では幅875画素、高さ656画素であったのが、画素補間をすることで、幅8750画素、高さ6560画素とした。

次に、画素補間を行うことで画質の低下した画像に対して、線形フィルタを用いノイズの除去を行った。まず、円滑なフィルタ処理を行うために、画像をグレースケールに変換する。次に、線形フィルタの一種であるウィナーフィルタを適応した。ウィナーフィルタは、分散が大きい部分では平滑化を行わないが、分散が小さい部分では平滑化を行うフィルタ処理を行うことから、画像のエッジを維持することができるため、より高い精度でエッジ間の動きを読み取ることができる。

この前処理を行った動画に関して、鉄板とボルトの境目（エッジ）のピクセル情報の移動を読み取ることによって定量化を目指す。グレースケールを前処理で行っているため、ピクセル情報の輝度によって比較的容易にボルトの位置を判断できる。この輝度の位置の変化をボルトの動きとみなし、ボル

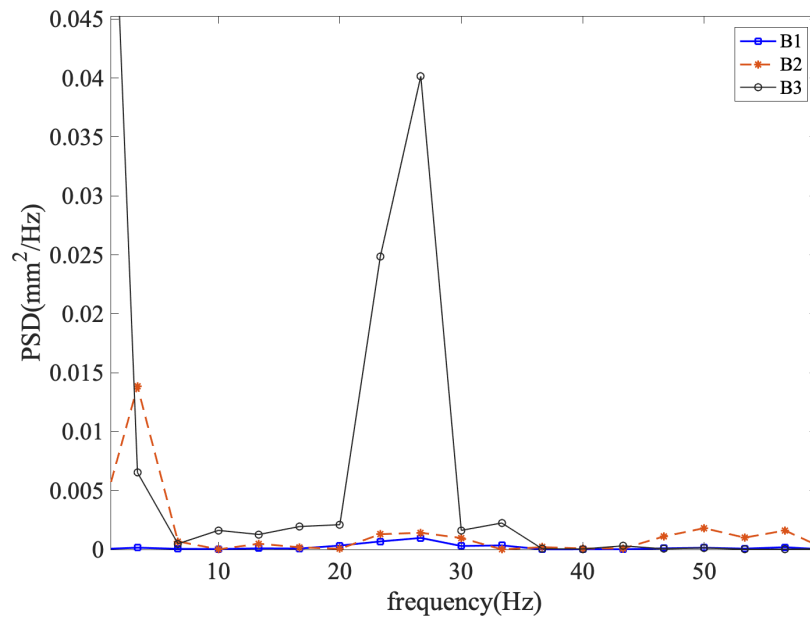


図-6 ボルト振動のPSD

トの振動を算出する．抽出した結果を図-5に示す．縦軸は相対変位，横軸は時間を示している．図-5からわかるように，B1ボルトの動きの推移は0.4 mmほどの最大振幅から徐々に減衰をしている．B2ボルトも0.4 mmほどの最大振幅を示しているが，B1ボルトに比べて振動している様子が確認できる．B3ボルトは，1.6 mmほどの最大振幅から，徐々に減衰していることがわかる．B1ボルトは締め度合いが100%，B2ボルトは締め度合いが20%，B3ボルトは締め度合いが0%であり，画像拡大を適用した動画の緩んだボルトの動きが相対変位として算出され，動画によってボルトのゆるみの可視化のみならず定量的に判断できることがわかる．

また，図-6に各ボルトの振動のフーリエスペクトル(PSD)を示す．付けられた鉄板上のボルトの振動は，鉄板自体の振動も含まれており，図-5に示している振動は母材の鉄板の振動に対する緩んだボルトの相対的な振動である．図-6からわかるように，すべてのボルトにおいて30Hz付近でPSDが卓越している結果となった．すなわち，緩んだボルトの動きのパワーが卓越していることは明らかである．

6. 結論

橋梁に締め付けているボルトの緩みを検出する方法として，画像拡大法に着目し，模型橋梁に備えられた鉄板にボルトを取り付け，ボルトの締め度合いを変更した上で，模型橋梁車両走行実験を実施した．対象ボルトをハイスピードカメラで撮影し，画像拡大法により画像処理された後，可視できないボルトのゆるみの可視化の可能性について検討を行なった．

画像拡大実施前の元の動画では，締め度合い0%の緩んだボルトでも振動を観察することで緩みを目視で判断することはできなかった．それに対して画像拡大法を適用した動画では，緩んだボルトの微弱な振動を拡大し可視化できることを確認した．また，締め度合いが異なるボルトを比較すると，当然ながら締め度合いが100%のボルトは画像拡大によって振動が大きく増幅された．一方で，締め度合いが20%のボルトに関しては，画像拡大法を適用しても緩みによるボルトの振動の可視化は難しいこ

とがわかった。締め度合い20%でも、摩擦によってボルトが振動してないことが原因の一つと考えられる。締め度合いが0%のボルトは、当然ながら緩みによる振動は観察されなかった。

ボルト間の緩みの定量化を図るために、ボルトのピクセル情報を追うことで基準点（本研究ではボルトが締め付けられた母材のエッジ）に対するゆるみによるボルトの相対変位を推定することができた。締め度合いが20%のボルトと締め度合いが0%のボルトの算出した相対変位を比較すると、予想通り締め度合いが20%のボルトのほうが、締め度合いが0%のボルトより変位振幅が大きい結果となった。すなわち、締め度合いによってボルト振動の母材振動に対する相対変位が異なることが確認できた。

ただし、画像拡大法の適用には、最適パラメータ値の決定法がなく、対象構造物ごとの経験則が必要となる。もちろん、パラメータの設定には繰り返しの試行錯誤で決めることができるが、自動化のためにも対象構造物別の最適パラメータのデータベースなどを検討しておくとう用性は高まると考えられる。あるいは、パラメータ決定に関して自動的に決定されるようなシステム構築が必要である。

画像拡大法により微視的な変化を可視化できることから、構造物の振動計測にも有効に適用できると考える。また、構造物の振動特性によっては一般のカメラで撮影された動画でも画像拡大法による構造物の振動の可視化が可能である。今後は、対象構造物を広げ研究を進める予定である。

参考文献

- 1) 国土交通省，道路局：道路メンテナンス年報，2020.
- 2) 金 哲佑：橋梁点検と構造ヘルスマニタリング，橋梁と基礎，Vol.54, pp.46-51, 2020.
- 3) H. Wu, M. Rubinstein, E. Shih, F. Durand, W. Freeman: Eulerian Video Magnification for Revealing Subtle Changes in the World, ACM Transactions on Graphics, Vol. 31, No. 4, Article No.65., 2012.
- 4) N. Wadhwa, M. Rubinstein, F. Durand, W.T. Freeman: Phase-based Video Motion Processing, ACM Transactions on Graphics, Vol. 32, No. 4, Article No.80, 2013.
- 5) A. Davis, M. Rubinstein, N. Wadhwa, G.J. Mysore, F. Durand, W.T. Freeman: The Visual Microphone: Passive Recovery of Sound from Video, ACM Transactions on Graphics, Article No.79, 2014.