

動画情報を用いた道路柱状構造物の 固有振動数の推定と異常検知の可能性

河邊 大剛¹・横山 拓海²・金 哲佑³

¹正会員 京都大学研究員 大学院地球環境学堂 (〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町)

E-mail: kawabe.daigo.2r@kyoto-u.ac.jp

²学生会員 京都大学修士課程 大学院工学研究科 (〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂)

E-mail: yokoyama.takumi.72a@st.kyoto-u.ac.jp

³正会員 京都大学教授 大学院工学研究科 (〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂)

E-mail: kim.chulwoo.5u@kyoto-u.ac.jp (Corresponding Author)

本研究の目的は、撮像装置から取得される動画を用いた道路柱状構造物の固有振動数の推定と異常検知である。実物大柱状構造物を用いて、動画から推定される固有振動数の精度検証を行う。また損傷シナリオとしてアンカーボルト緩解時の計測を実施し、固有振動数低下による異常検知の可能性を検討する。振動抽出には撮影動画の画角全体に処理を施し、特定の周波数帯域のみ拡大させる Phase-based motion magnification 法を適用し、特徴点の追跡により振動波形を抽出する。検討の結果、固有振動数推定値は精度に課題が残る一方で、損傷時の推定値の低下が確認され異常検知の可能性が示された。また撮影動画の背景情報が推定に影響を与える可能性を考慮し、CNNを応用した背景除去手法を導入し、動画処理後の動画に適用することで振動抽出精度向上の可能性について検討を行った。

Key Words: CNN, Eigen frequency, Motion magnification, Pole structures, Image processing

1. 序論

道路に敷設される柱状構造物は、標識柱をはじめ、照明灯、電柱など多岐にわたる。これらの倒壊や付属物の落下を未然に防ぎ、通行車両の安全を確保するためには、定期的な点検が欠かせない。しかしながらストックが膨大であることや、点検の際には高所作業車が欠かせないことなどから、点検に労力と時間を費やしている現状がある。そのため倒壊に至るような損傷を事前に検知し、詳細な点検を要する対象を抽出するスクリーニング技術が求められている。

スクリーニング手法として道路維持作業車のような定期的に巡回を行う走行車両等に計測機器を搭載して道路情報を得る Drive-by Inspection¹⁻³⁾の研究が進められている。Drive-by Inspection の利点は高頻度計測を実現できる点や、その導入の容易さなどであり広く研究が進められている。例えば、道路の路面形状を走行車両内に設置したセンサを用いて同定する手法³⁾などがある。車載カメラから得られる情報に着目すると、近年の画像処理技術の向上により、対象物の腐食やコンクリートひび割れを AI 技術

によって検知する研究も進められている^{4,5)}。

柱状構造物に着目すると、倒壊に至らしめる主な要因は鋼管基部の内部腐食が最も多く、基部溶接部の疲労亀裂や、アンカーボルトの緩みなどの損傷事例も多い⁶⁾。これらの損傷は構造物基部の変状を確認する必要があるため、周囲の植栽等による影響や、橋梁上の柱状構造物でブラケットが橋脚に設置されている場合等は、走行車両の車載カメラ等から鋼管基部の状態を直接視認することは困難である。

一方で、構造物の動的なパラメータの変化が構造物の異常検知に有効であることが知られており、センサ等からそれらの情報を得る構造ヘルモニタリングの研究が進められている。特に振動に着目した構造ヘルモニタリングは、加速度センサ等を用いて構造物の動的応答を計測し、その動的応答を数理モデルとして定式化することで、固有振動数・減衰定数・モード形状等の振動特性の同定を行い、その変化によって構造物の状態変化を推定する^{7,8)}。例えば疲労亀裂等による構造物の部材破断のような剛性の変動を構造全体の振動特性の変化として評価を行う手法が検討されている^{9,10)}。

そこで本研究では、走行車両の動画情報から柱状構造物の振動を抽出し、振動特性の変化から構造物の倒壊の恐れのある損傷を検知することを目標とし、最初に定点動画情報から振動情報を取得する予備検討を試みる。本研究では実験室に設置された実物大の道路標識柱を撮影して振動特性抽出の検討を行う。標識柱には振動特性の同定のために高感度 3 軸加速度センサを設置し、手押し加振時の計測値から固有振動数の真値を取得する。

動画情報には背景などの対象構造物以外の情報も含まれるため、振動を抽出するためには事前に対象構造物を特定する必要がある。デジタル画像相関法¹¹⁾は動画内から対象物の振動情報を抽出する手法として検討が進められているが、対象物にマーキングを事前に設置する必要がある点において労力の観点から課題がある。また深層学習によって動画内から対象構造物を自動抽出する手法もあるが、本研究のような基礎的な検討を行う場合には適切なデータセットの用意が別途要すると考えられる。

そこで本研究では、最初に画角全体を動画処理し、動画内の特徴的な振動帯域を増幅させることで対象の微小な振動を強調することができる Eulerian Video Magnification 法¹²⁾の改良手法である Phase-Based Motion Magnification 法¹³⁾(以下拡大法)を用いる。拡大法を適用した動画から特徴点検出と追跡技術を用いて経時的な変位の軌跡を取得し、固有振動数を推定する¹⁴⁾。さらに本研究では損傷状態として基部のアンカーボルト 1 本を完全に緩解した状態での計測も実施し、固有振動数推定値の変動に着目した異常検知の可能性について言及する。

なお拡大法は増幅させるバンドパス帯域を対象物の固有振動数付近に設定し、対象物以外の情報の増幅を抑えることが望ましい。しかしながら、損傷によって対象物の固有振動数が低下する場合、バンドパス帯域が狭いとその下限値を下回る可能性があり、固有振動数の推定に影響する可能性がある。そこで本研究では、損傷時の固有振動数の低下量も考慮してバンドパス下限値を設定する一方、ノイズとして増幅されると考えられる背景について、除去手法の併用による振動特性抽出精度の向上について検討を行う。

2. 標識柱振動特性の事前検討

(1) 室内実験概要

対象とする柱状構造物は図-1に示す先端梁を有する実物大の鋼製標識柱であり、高さ 5.9m、先端梁長さ 2.9m、主鋼管径 190.7mm である。先端梁と主鋼管は 4 箇所ボルト固定されている。主鋼管基部にはベースプレートが溶接され、6 箇所の三角リブで補強されている。主鋼管は基礎コンクリートを介して反力床に固定されており、

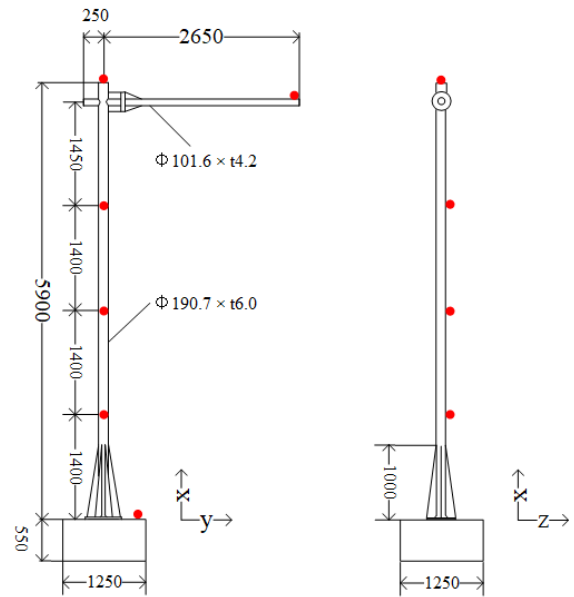


図-1 実験標識柱諸元と 3 軸加速度センサ設置位置図

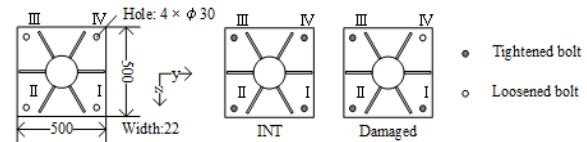


図-2 ベースプレート諸元と健全時(INT)、異常時(Damaged)のアンカーボルトの締結状態

ベースプレートと基礎コンクリートは計 4 本のアンカーボルトによって固定されている。なお基礎コンクリートは 6 本の異なるアンカーボルトによって固定されている。標識版は設置していない。

標識柱の固有振動数とモード形状推定のために、図-1に示す鋼管の位置に 3 軸加速度センサ (M-A352, EPSON) を計 5 点設置する。また基礎コンクリートが移動していないことを確認するために、基礎コンクリート上面にも追加で 1 箇所設置する。ベースプレートから高さ 1m の位置を計 20 回手押し加振する際の振動を計測し、それぞれの加振時の計測値から同定される振動特性の平均値を真値とする。

本研究では異常検知の損傷シナリオとして、アンカーボルトの緩みを検討する。健全時(INT)はアンカーボルトを全て締結した状態で振動および動画を計測し、異常時はアンカーボルト 1 本を完全に緩解した状態(Damaged)で計測を行う。図-2にベースプレートの諸元と、緩解させるアンカーボルトの位置を示す。

(2) 標識柱の振動特性同定

標識柱の加速度応答から振動特性を同定する手法として、時間領域のシステム同定手法として一般的な確率部

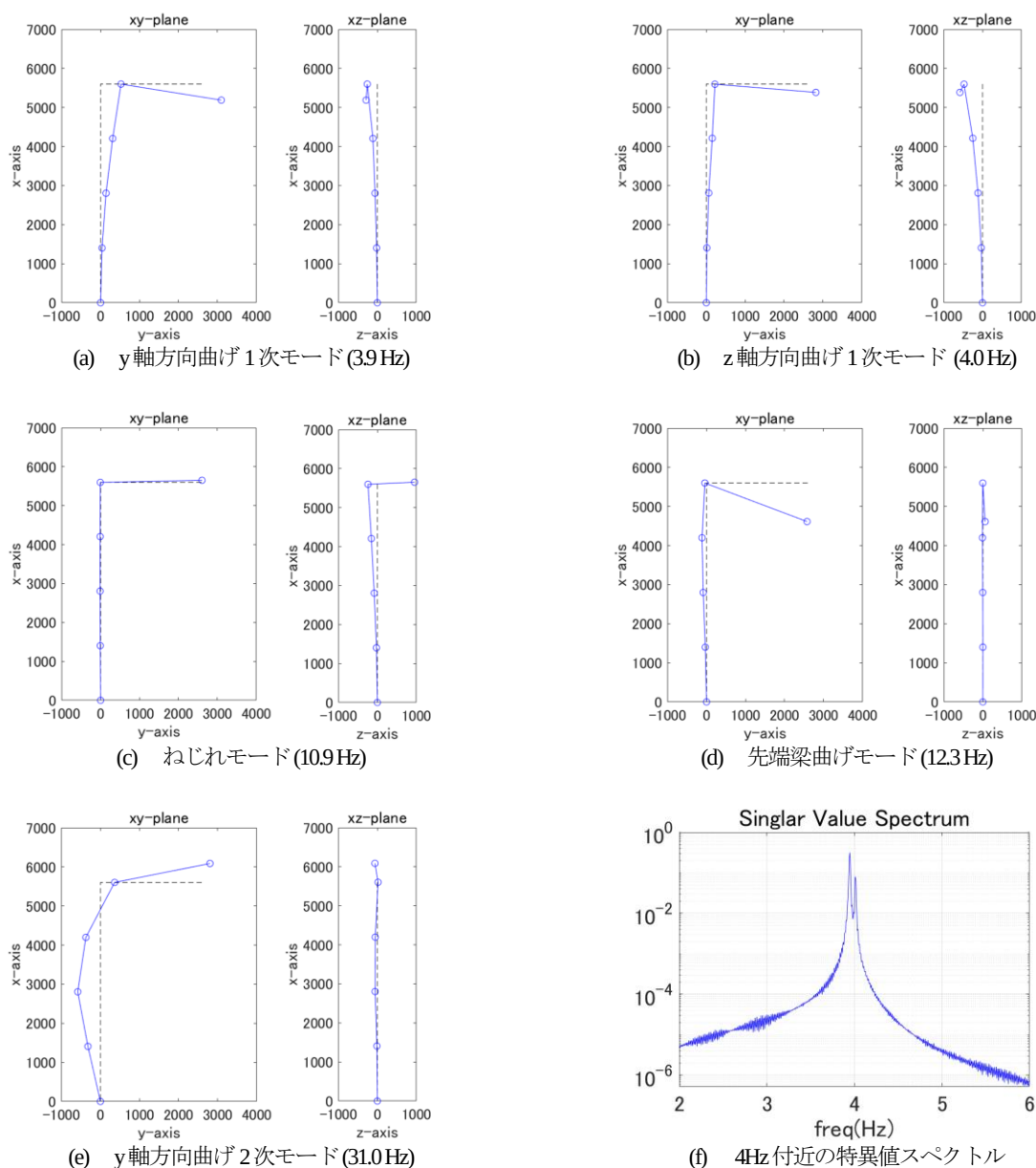


図-3 標識柱健全時の同定固有振動数, モード形状と4Hz付近の特異値スペクトル

分空間法(Stochastic Subspace Identification: SSI)¹⁵⁾を用いる。健全時の固有振動数推定値とモード形状を図-3に示す。ここで説明の都合上, モード形状図の xy , xz 平面内の変形をそれぞれ面内, 面外変形と呼称する。図-3 (a) (b)の固有振動数はそれぞれ 3.9Hz, 4.0Hz と近接している。そこで特異値スペクトルを図-3 (f)に示す。2つのピークが卓越しており異なる振動モードであることがわかる。さらに図-3 (a) (b)のモード形状に着目すると, (a)の主鋼管の面内変形が(b)より大きい一方, (b)の主鋼管の面外変形が(a)より大きいことがわかる。共に主鋼管頭頂部の変形が最も大きいことから, (a)が y 軸方向曲げ1次モード, (b)が z 軸方向曲げ1次モードと推定される。

図-3 (c)に着目すると, 面内変形はほとんど認められな

い一方で, 面外変形において先端梁が主鋼管と逆位相で振幅していることがわかる。そのため 10.9Hz はねじれモードと推定される。図-3 (d)に着目すると, 面外変形と主鋼管面内変形はほとんど認められない一方で, 先端梁の面内変形が顕著であることから, 12.3Hz は先端梁の曲げモードと推定される。図-3 (e)に着目すると, 主鋼管の面外変形はほとんど認められない一方で, 主鋼管中間部の面内変形が顕著であることから, 31.0Hz は y 軸方向の曲げ2次モードと推定される。

本研究では将来的には車載カメラの取得動画を用いることを想定しているため, xy 平面でのモード振幅が大きい 3.9Hz の y 軸方向曲げ1次モードと 31.0Hz の y 軸方向曲げ2次モードに着目して以後の検討を行う。なお

表-1 健全時(INT)と異常時(Damaged)の固有振動数推定値

	INT	Damaged
1 st bending mode of the pole in y-axis	3.9 Hz	3.5 Hz
Bending mode of the arm	12.3 Hz	12.2 Hz
2 nd bending mode of the pole in y-axis	31.0 Hz	29.7 Hz

12.4Hzの先端梁曲げモードについても同様にxy平面でのモード振幅が大きいと考えられるが、標識柱基部の状態変化に対して感度が低いと考えられることから本検討では考慮しないものとする。

次に健全時と異常時の固有振動数の推定値を表-1に示す。y軸方向曲げ1次モードの異常時の固有振動数の低減量が最も大きく健全時に対して0.89倍と推定された。これは標識柱基部の境界条件の変化に対し曲げ1次モードが最も影響を受けるものと示唆される。曲げ2次モードに関しても同様に固有振動数の低下が確認された。参考に先端曲げモードの固有振動数の推定値も示す。アンカーボルト緩解時の固有振動数は健全時12.3Hzに対して0.99倍と変動幅が微小であり、標識柱基部の境界条件の変化に対して、感度が低いことが裏付けられる。

3. 拡大法を用いた標識柱の固有振動数推定と異常検知

道路に敷設される標識柱等の柱状構造物は交通振動や風によって常時振動しているものの、その振幅は微小であるため、動画画像からその振動を抽出するためには高い分解能が要求される。そのため高性能な機材の利用やそれに伴う計算処理の肥大化など課題が多い。そこで本研究では動画処理によってあらかじめ設定された振動帯域のみを拡大して表示させる拡大法を用いて、対象標識柱の振動のみを動画上で強調させ、そこから振動抽出と異常検知を行う方法を検討する。

(1) Phase-based motion magnification

Phase-based motion magnification法¹³⁾(拡大法)はEulerian Video Magnification法¹²⁾の改良手法であり、ノイズも同様に強調される点を改善させた手法である。画像の空間分解、位相差の算出、バンドパスフィルタの適用、拡大処理、画像の再構成によって構築される。拡大法は空間分解の過程で複素数steerable pyramid¹⁴⁾を用いる。動画は画像を時間軸に並べることで表現されることから、ある画像の輝度を座標と時間を含めた $I(u, v, t)$ で表す。あるフレーム画像を $f(x) = I(u, v)$ とすると、フーリエ級数展開によって式(1)のように複素正弦和で表すことができる。

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

ここで ω は各帯域での単一周波数を示す。時刻 t において対象物に動きがあるとき、画像ピクセルの変位関数 $\delta(t)$ を導入することで式(2)のように表現される、

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

ここで画像内の対象物の動きは位相における変化のみに現れることに留意する。これは式(2)から対象物の動きを表現するためには、基準となる画像(本研究では $t = 1$ とする)とある時刻 $t = k$ との位相差を算出すればよいことを意味する。

式(2)における $A_{\omega} e^{i\omega(x+\delta(t))}$ の各振動数 ω の複素正弦波を式(3)とおく。

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

$S_{\omega}(x, t)$ の位相部分を変化させることで対象物の動きを変化させることができる。強調させたい振動帯域を分離するために、 $\omega(x + \delta(t))$ の位相部分に直流バランスフィルタを適用する。位相情報を $B_{\omega}(x, t)$ とすると式(4)で表される。

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

次に位相情報 B_{ω} にサブバンド S_{ω} の位相を乗じる時、強調させたい振動帯域 ω の複素正弦波は式(5)で表される。

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

式(5)より入力 $1 + \alpha$ 倍の動きを持つ複素正弦波となり、強調させたい振動帯域 ω の複素正弦波 $S_{\omega}(x, t)$ の変位量 $\delta(t)$ が拡大される。

以上により拡大された画像を再構築することで、強調させたい振動帯域 ω の振動が拡大された動画を構築することができる。

(2) 室内実験動画計測条件

本研究では、市販のミラーレスカメラ(SONY RX 10 IV)を使用する。カメラ設置位置を標識柱主鋼管から9mとし、三脚を用いて定点撮影を行う。ナイキスト周波数を考慮してカメラのフレームレートを120fpsに設定し、画角1920×1080で約10秒間撮影を行う。撮影動画の前後はカメラのシャッターボタンを押す振動が含まれることから、以後の解析においては撮影フレームの301枚目から600枚目までを用いる。健全時は2回、異常時は3回撮影を行った。

(3) 拡大法バンドパス設定

先行研究¹⁷⁾において対象となる柱状構造物の固有振動数値を中心に据えたバンドパス設定が、拡大法適用後の対象物の振幅が大きくなることが報告されている。対象物の固有振動数が既知の場合、狭めたバンドパス設定が

可能なので、対象構造物以外の情報の拡大を抑えることができる。そのため、拡大法適用後の動画から対象構造物の固有振動数を抽出するためには狭めたバンドパスを設定することが望ましい。一方でアンカーボルト緩解等による損傷によって固有振動数は健全時より低下するため、バンドパス下限値を下回る可能性がある。バンドパスを任意にシフトさせ、都度拡大法を適用する等の運用方法も考えられるが計算負荷の増加が懸念される。そこで本研究では損傷時の固有振動数が既知であることと、計算負荷を抑えることを理由に、健全時及び損傷時の固有振動数を含むバンドパスを設定することとする。ただし、バンドパスが通常より広域となり背景等の不要な情報も拡大されやすくなる可能性があるため、背景成分の除去に関する検討を第4章で行う。

(4) 拡大法適用結果

表-1 に示す固有振動数の低下量を考慮して、 y 軸方向曲げ 1 次モードを強調させるために、位相のバンドパスフィルタのカットオフ周波数の下限を 3.0Hz、上限を 4.5Hz に設定して拡大法を適用した結果を図-4 に示す。拡大倍率は $\alpha = 100$ とした。図-4 左図と右図はそれぞれ標識柱主鋼管が最も y 軸プラスとマイナス方向に振幅した時のフレーム画像を示す。主鋼管基部の中心位置から鉛直に破線を引いている。視認性のために図-4 の太枠で示す箇所を図-5(a)に示す。なお図-5(b)は比較のために元動画の同じフレーム番号における主鋼管頭頂部の拡大画像である。図-5(a)の左図と右図に着目すると主鋼管頭頂部がそれぞれ y 軸プラス方向とマイナス方向に振幅して

いることがわかる。一方で図-5(b)に着目すると、その変化はほとんど視認できない。紙面の都合上他位置での画像の比較は省略するが、拡大法を適用させることで y 軸方向曲げ 1 次モードが可視化されていることがわかる。

一方で y 軸方向曲げ 2 次モードを強調させるために、バンドパスフィルタ下限を 28Hz、上限を 33Hz に設定して拡大法を適用したものの、 y 軸方向曲げ 2 次モードは可視化されなかった。拡大倍率の変更や、バンドパス帯域の調整を行ったものの、可視化には至らなかった。動画を 30fps で再生する場合、120fps で撮影された動画は 4 倍スローモーションとなる。本研究では曲げ 1 次モードが約 4Hz の標識柱を 120fps で撮影しているので、動画を 30fps で再生する際には 1Hz の振動として表示される。一方で曲げ 2 次モードは約 30Hz であり、動画再生時には 7.5Hz の振動として表示されるため、振幅が最大となる画像は 2 フレームごとに得られる。そのため振動を可視化させるための 1 秒あたりのフレーム数が少ないと考えられ、高フレームレートで動画を撮影することにより曲げ 2 次モードが可視化される可能性がある。しかしながら撮像装置の要求性能も同時に高くなるため、検知する損傷に対して、損傷感度の高い振動モードを適切に設定することが必要である。

(5) トラッキング手法による振動波形抽出

拡大法適用後の動画から標識柱の振動を抽出し、振動特性を推定する。本研究では動画内で加速度センサが設置されている領域付近に着目し、領域内の特徴的な点の検出並びに追跡によって特徴点の軌跡を検出することと

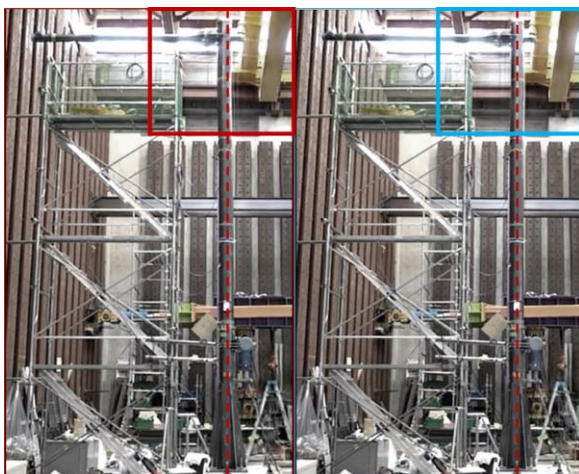


図-4 3.5Hz から 4.5Hz のバンドパスを設定した拡大法適用結果。左図右図は y 軸プラスとマイナス方向に振幅が最も大きい時のそれぞれのフレーム画像。



(a) 拡大法適用後のフレーム画像抜粋（図-4 の太枠箇所の拡大図）。



(b) 元動画のフレーム画像抜粋

図-5 拡大法適用後と元動画の主鋼管頭頂部のフレーム画像の比較。

する。図-6に設定した検出領域を赤枠で示す。それぞれの領域の位置に加速度センサが設置されており、センサ番号を併せて記している。なお領域は背景と対象物の境界も含めることで、特徴点検出の際に境界部が検出できるように設定している。本研究では特徴点検出手法としてコーナー検出法の一つである領域の勾配行列の最小固有値を算出する手法を用いる¹⁹⁾。センサ 63 の領域で検出された特徴点の一例を図-7に示す。この場合9点が特徴点として抽出されているが、標識柱と背景の境界部以外でも検出されていることに留意する。検出された特徴点群はオプティカルフローの一種である KLT (Kanade-Lucas-Tomasi) Tracker^{19,20)}を用いて追跡を行う。本研究では各フレーム画像における各領域の点群のサブピクセル値の平均を算出し、ゼロ点補正を行うことで、加速度センサ設置位置の標識柱の変位波形とする。なお前項の検討より、モード形状が可視化されたy軸方向曲げ1次モードを検討する。

図-8に健全時の撮影動画に拡大法を適用し、標識柱の加速度センサ位置の変位波形を抽出した結果を示す。縦軸がサブピクセル値、横軸がフレーム番号を表す。図-8(a)よりy軸方向(水平方向)の変位量は、主鋼管頭頂

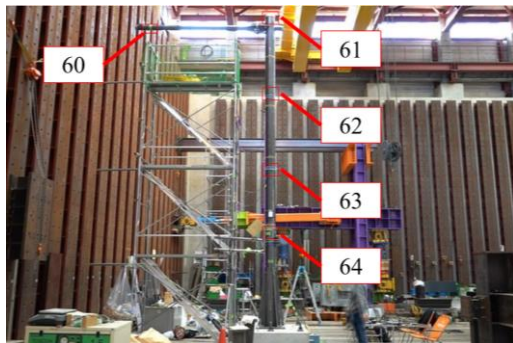


図-6 特徴点の抽出を行う領域(番号: 加速センサ番号)

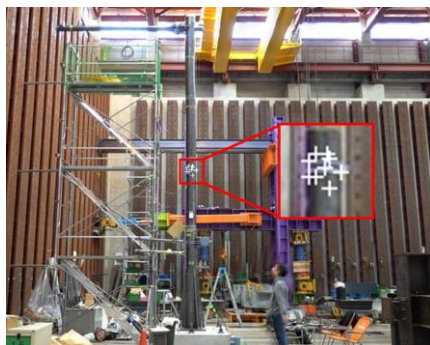
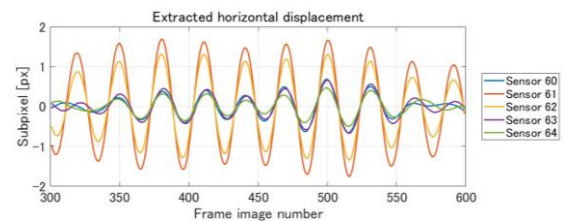


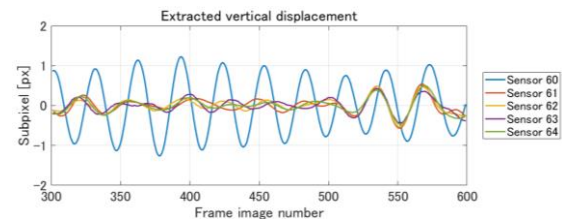
図-7 センサ 63 の領域における特徴点抽出の例。

部のセンサ 61 の位置が最も大きく、低いセンサ位置ほど小さいことがわかる。また図-8(b)よりx軸方向(鉛直方向)の振幅は先端梁先端部に設置されたセンサ 60 の位置の振幅が最も大きいのにに対して、主鋼管の振幅値は小さいことがわかる。このことから拡大法によってy軸曲げ1次モードが強調された動画から、特徴点抽出手法とトラッキング手法を用いて振動波形が抽出されているといえる。

以上の過程を経て得られた振動波形の主鋼管y軸方向(水平方向)波形に高速フーリエ変換を適用して得られたピーク値を固有振動数推定値として得ることとする。健全時を2回と損傷時を3回の撮影動画から推定される固有振動数推定値を表-2に示す。加速度センサから推定される固有振動数推定値に対して、健全時と損傷時ともに動画から抽出された固有振動数はいずれも高く推定された。理由として各領域の特徴点群の平均値を変位波形として検討を行っていることから、特徴点の異常な軌跡



(a) 抽出された水平方向の変位波形



(b) 抽出された鉛直方向の変位波形

図-8 健全時動画の拡大法適用後の抽出振動波形。

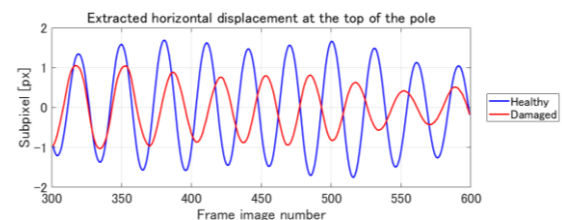


図-9 健全時1回目と損傷時1回目の主鋼管頭頂部の抽出された水平変位波形の比較。

表-2 健全時(INT)と異常時(Damaged)の拡大法適用後の動画から抽出された固有振動数推定値

	1 st recording	2 nd recording	3 rd recording	Estimated by accelerometer
INT	4.0 Hz	4.0 Hz		3.9 Hz
Damaged	3.6 Hz	3.6 Hz	3.6 Hz	3.5 Hz

が含まれる可能性が挙げられる。そのため、検出される特徴点を精査することで推定精度が改善される可能性がある。

一方で健全時と損傷時の推定結果を比較すると、全ての動画において損傷時の固有振動数推定値は健全時より低下していることがわかる。参考に健全時と損傷時の主鋼管頭頂部の振動波形を図-9に示す。青線と赤線はそれぞれ健全時1回目と損傷時1回目計測時の結果を表し、損傷時の周期が長いことがわかる。すなわち固有振動数が低下していることが確認できる。このことから、撮影動画に拡大法適用後、振動を抽出し固有振動数を推定することで標識柱の異常検知が行える可能性がある。ただし、健全時損傷時ともにサンプル数が少ないため、サンプル母数を増やし、推定値のばらつき程度を今後検証する必要がある。

4. 背景除去による対象物抽出と振動特性推定

前章において、固有振動数の低下を考慮してバンドパスを通常より広域に設定し、変位波形の抽出を行った。しかしながら、特に道路に敷設される柱状構造物を撮影する場合、背景の雲や木々の挙動がノイズとして影響することが考えられる。そこで本章では背景除去手法の適用を検討し、振動特性抽出精度改善の可能性を検討する。

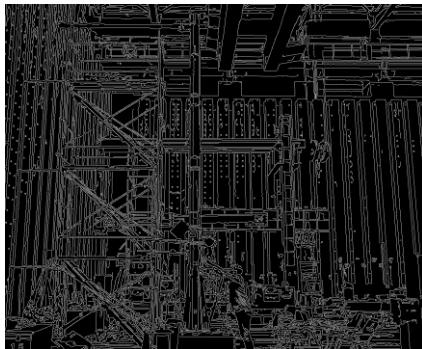


図-10 エッジ抽出の適用画像。

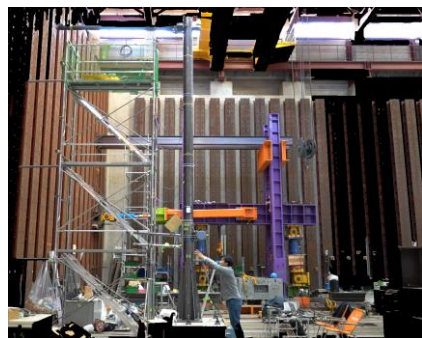


図-11 モルフォロジー処理を用いた背景除去の結果。

本研究では3つの対象物抽出手法を検討し最も精度の良い手法に対し、変位波形の抽出を試みる。

(1) エッジ抽出とモルフォロジー変換

不必要である情報を取り除き、必要な情報となる対象構造物の抽出のために、対象物と背景の境界点であるエッジの検出を行う。本研究では弱いエッジも検出し、一本の輪郭を抽出する Canny²⁰⁾のエッジ抽出法を用いて、バイナリマスクを作成する。この時、画像内におけるエッジかどうかの判断として threshold (感度の閾値)を設定する。本研究では背景を塗りつぶす後処理が含まれるため、エッジの輪郭が結合される必要がある。ここではその結合度を事前に確認し、threshold の下限値、上限値をそれぞれ 1, 10 に設定した。なお、画像内の情報により得られる結果が異なるため、この閾値の判断には対象物の撮影環境ごとに検討が必要であると考えられる。次に、エッジの膨張処理を行い、マスクの輪郭間の隙間を埋め合わせ、輪郭に囲まれた領域内を塗りつぶすことで、対象物のセグメントを行う。図-10、図-11 に拡大法適用後の動画の最初のフレーム画像のバイナリマスクと、膨張処理後の背景除去結果をそれぞれ示す。図-10 よりエッジ検出は正確にできているものの図-11 より多くの背景箇所が依然残っており、背景除去が適切になされていない。他のフレーム画像への適用結果も同様であった。これは背景が実験室の反力壁であり、情報が多く含まれており、領域内の塗りつぶしの過程で影響を与えている可能性がある。背景情報が少ないような条件下で動画情報を得ることで背景除去の精度向上が予想されるが、街路樹や建物など多くの情報を含む車載カメラからの動画を想定する場合、本手法適用への課題は依然多いといえる。

(2) セマンティックセグメンテーション

輪郭情報から対象物を抽出することに依然困難を伴うことから、画像内における対象物と背景の領域を分割し、各ピクセルをその周辺のピクセルの情報に基づき、ラベルやカテゴリ分類を行うセマンティックセグメンテーション

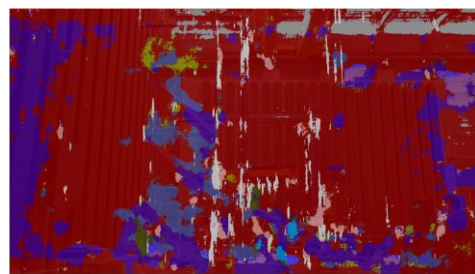


図-12 セマンティックセグメンテーションの適用結果。
(薄灰色が Pole のラベルを表す)

ョンを用いた対象物抽出方法を検討する。本研究では SegNet²²⁾ と呼ばれる Encoder-decoder 構造で、Encoder 部に VGG16²³⁾ と呼ばれる CNN (Convolutional Neural Network) を有する深層学習手法で分類を行い対象標識柱を抽出する。学習データは認識するグループに標識柱や照明灯が対象となる「Pole」を有する CamVid データセット²⁴⁾ を利用する。これは車内搭載ビデオカメラから得られた街中の映像が用意されており、本研究では縦480横360の画像サイズになおし、701枚の内、無造作に選ばれた421枚の訓練データと、クラス情報を含んだピクセルラベルのデータを用いて学習を実施した。図-12に拡大法適用後の動画の最初のフレーム画像への適用結果を示す。なお透過率を0.1として対象フレーム画像と各ラベル（人や道路、空など）に分類された画像を重ね合わせている。標識柱全体は「Pole（薄灰色）」としては認識されておらず、精度良くセグメンテーションが行われていない。これは学習データが街中で撮影された車載カメラ画像を用いており、実験室内の背景情報と一致しないため学習モデルにうまく反映されていないためと考えられる。深層学習による対象物の分類を行う際には教師データの整備も必要になってくるが、本研究のような基礎的な検討を進める際の利用には課題が多い。

(3) 反復セグメンテーション

前節より動画画像全体から標識柱を限定して抽出する精

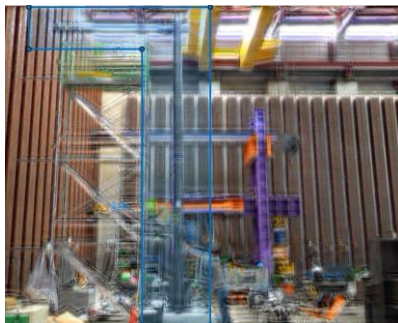


図-13 関心領域 (ROI) の適用範囲。

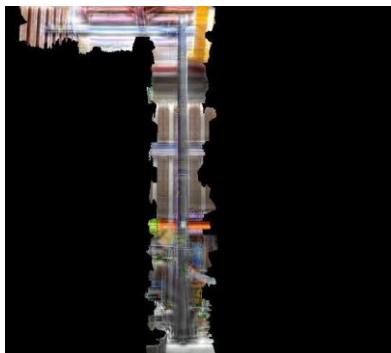


図-14 設定した ROI に基づく grabcut の適用結果。

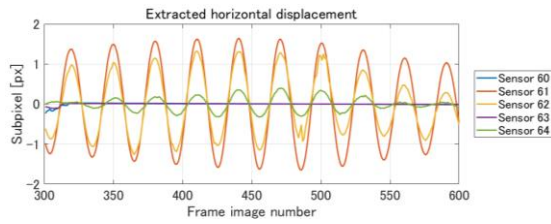
度が高くないことから、可能な限り少ない入力（初期値）を用い、画像中の前景領域（対象物）として抽出するアルゴリズムである Grabcut²⁵⁾ を適用する。最初に画像の情報量を減らして計算コストを低減するために、前処理として入力画像を superpixel に分割する。superpixel とは、色やテクスチャなどの性質が類似するピクセルをグルーピングした小さい領域のことである。今回は分割方法として演算の複雑度を低減し、対象物の抽出に適している SLIC 法²⁶⁾ を用いる。各フレームにおいて superpixel 数を 1000 に設定し、適用させる関心領域 (Region of Interests: ROI) を対象となる標識柱を囲むように青線で図-13 に示すように設定する。関心領域とは画像内におけるフィルターの適用や操作の対象として選択する領域のことである。本研究では動画画像内での標識柱の振幅を踏まえて、輪郭に近い位置に直線的に関心領域を設定し、マスクイメージを作成して元画像に反映させて背景除去を行なう。

図-14 に動画の最初のフレーム画像における適用結果を示す。前節までの手法と比較して背景除去は改善されたものの、背景の小領域も前景として判断されて残されている部分もあり、各フレームにおいて異なる領域が抽出された。superpixel 数を変更して同様の手法を適用させたが結果には大きな変化は見られなかった。なお、superpixel 数を増やすと計算コストが大きくなるため、小さい superpixel 数で適用させる必要がある。また、関心領域をより対象物に沿うような形状に変更させると、標識柱自体も背景領域として認識されてしまうケースが存在したため、標識柱の輪郭に近い関心領域を設定しても、背景除去の精度向上に繋がらないと考えられる。

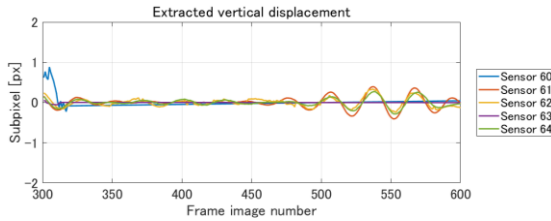
(4) 拡大法と反復セグメンテーションによる波形抽出

前節の反復セグメンテーションによる手法を利用し、拡大法適用後の動画画像に Grabcut を適用し、波形抽出の精度向上の可能性を検討する。3章5節と同様のトラッキング手法により波形パターンの抽出を行った結果を図-15 に示す。なお図-6 に示す領域で特徴点の抽出を行う。変位波形を抽出できている箇所がある一方で、センサ 60 やセンサ 63 などは直線を示しており、波形抽出ができていない。これは一部の画像フレームにおいて、対象標識柱を背景として認識しているフレームが存在するため、特徴点群の軌跡が途中で欠損していると考えられる。参考に標識柱を背景として認識している 139 目のフレーム画像を図-16 に示す。そのため特徴点の追跡のために欠損箇所の補間処理等を実施する必要がある。また Grabcut による対象物の抽出精度が波形抽出の精度に繋がると考えられるため、superpixel 数および SLIC 法のパラメータの設定や ROI の範囲の決定などをより詳細に検討することで背景除去の精度が改善する可能性がある。

以上を踏まえると、反復セグメンテーションを用いた



(a) 抽出された水平方向の変位波形



(b) 抽出された鉛直方向の変位波形

図-15 拡大法適用後, Grabcut を適用した抽出振動波形.

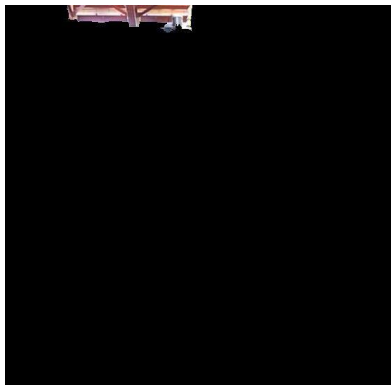


図-16 対象物を背景情報として認識している結果 (139 フレーム目)

背景除去手法が前節の検討手法と比較して背景除去精度が高かった一方で、フレーム画像ごとの背景検出領域が異なるため特徴点が欠損するフレーム画像がある可能性があり、標識柱の特徴点抽出領域の自動設定を行う上では依然改善を要する。

(5) 各背景除去手法の検討結果

3つの異なる背景除去による対象物抽出手法の検討結果について以下にまとめる。

- エッジ抽出により対象物の輪郭検出は正確性を有する一方で、エッジの膨張処理における対象物の背景の分離において、複雑な背景情報を有するために適切に対象物抽出ができていない。閾値の設定や対象物の輪郭が明確である撮影環境により精度の向上が見込める。
- 画像内でラベルやカテゴリの分類を行うセマンティックセグメンテーションを検討したが、対象標識柱は柱状構造物として認識されなかった。教師

データは街中の車載カメラで撮影された写真を用いて作成されており、実験室の背景が学習に反映されていないためと考えられる。正確な抽出を実現するためには、構造物に焦点を当てた教師データの整備が必要と考えられる。

- 初期値を使用した grabcut では、ROI の範囲とパラメータ設定により対象物の抽出は行われたが、背景の小領域も含まれる結果となった。また、抽出精度が低いフレームも一定数存在し、特徴点のトラッキングの際に欠損部分の補完処理を別途実施する必要がある。また、精度の高い反復セグメンテーションを行うには詳細な設定が求められる。

5. 結論

本研究では、実物大標識柱を対象としてまず動画情報から標識柱の固有振動数を推定する方法を検討した。固有振動数の真値は標識柱に設置された加速度センサの計測値を用いてシステム同定手法によって推定し、y 軸方向曲げ 1 次モードと曲げ 2 次モードを本研究の振動抽出の対象とした。動画内から対象となる標識柱を抽出する手法として、Phase-based Motion Magnification 法を用いて、動画全体に処理を施し、あらかじめ設定された振動帯域のみを拡大して対象標識柱の振動のみを動画上で強調させる手法を適用した。その結果、y 軸方向曲げ 1 次モードは動画上で強調され可視化されたものの、撮影に用いたカメラのフレームレート数が小さいことにより y 軸方向曲げ 2 次モードの可視化には至らなかった。

次に拡大法適用後の動画から振動を抽出する手法として、コーナー検出法の一つである領域の勾配行列の最小固有値箇所を特徴点群とし、オプティカルフローの一種である KLT Tracker を用いて特徴点群の追跡を行い、対象領域位置での変位波形の抽出を行った。さらに変位波形を高速フーリエ変換しそのピーク値を固有振動数推定値とした。その結果、y 軸方向曲げ 1 次モードと概ね一致する変位波形を得ることができた。一方で変位波形から得られる固有振動数は加速度センサから得られる推定値よりも高く推定され、推定精度に課題が残った。抽出される特徴点の精査や、撮影動画時間を増やすことで固有振動数推定値の精度を改善できる可能性があるが、計算処理負荷の増大なども併せて検討する必要がある。

本研究では異常検知の損傷シナリオとして標識柱基部のアンカーボルトを 1 本緩解させた状態で計測を行い、固有振動数の推定を行った。その結果、固有振動数推定値の低下が確認され、動画情報から得られる振動情報を用いた異常検知の可能性が示唆された。

また、本研究では背景除去手法の適用を行い、振動抽

出の精度を検証した。エッジ抽出, セマンティックセグメンテーション, 反復セグメンテーション手法を用いて拡大法を適用した後のフレーム画像の背景除去を行った。その結果, 反復セグメンテーション手法は相対的に背景除去精度がよかったものの, フレームごとに背景除去領域が異なることにより特徴点の欠損が生じた。そのため, 欠損値を考慮したトラッキング手法などを用いることで変位波形の抽出が改善される可能性がある。

謝辞 : 本研究はJSPS科研費21K20448の助成, 並びにJST, 未来社会創造事業, JPMJMI21I3 の支援を受けたものである。ここに記して謝意を示す。

REFERENCES

- 1) Davis, L. E. : Heavy Vehicle Suspensions - Testing and Analysis. A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy, 2010.
- 2) Harris, N. K., Gonzalez, A., O'Brien, E. J. and McGetrick, P. J. : Characterisation of pavement profile heights using accelerometer readings and a combinatorial optimisation technique, *Journal of Sound and Vibration*, Vol.329, No.5, pp.497-508, 2010.
- 3) 長谷川総一郎, 金哲佑, 藤士尚也, 張凱淳 : 走行車両の加速度を用いた路面形状同定手法の比較検討, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol. 76, No. 2(応用力学論文集 Vol. 23), I_77-I_88, 2020.
- 4) Luca, P., Tomas, M. Gonzalo, F., Stian, B.: Corrosion detection using AI: A comparison of standard computer vision techniques and deep learning model. *The Sixth International Conference on Computer Science, Engineering and Information Technology*, pp. 91-99, 2016.
- 5) Kim, C.W., Chang, K.C., Sasaka, Y., Suzuki, Y.: A feasibility study on crack identification utilizing images taken from camera mounted on a mobile robot, *Procedia Engineering*, Vol.188, pp. 48-55, 2017.
- 6) 玉越隆史, 星野誠, 市川明弘 : 道路付属物支柱等の劣化・損傷に関する調査, 国土技術政策総合研究所資料, 国総研資料第 685 号, ISSN1346-7328, 2012.
- 7) Doebling, S. W. S., Farrar, C. R., Prime, M. B., Shevitz, D. W.: Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: a literature review. *Los Alamos National Laboratory Report*, LA-13070-MS, 1996.
- 8) Salawu, O.S.: Detection of structural damage through changes in frequency: a review, *Engineering Structures* Vol.19, No. 9, pp. 718-723, 1997.
- 9) Chang, K. C., and Kim, C. W.: Modal-parameter identification and vibration-based damage detection of a damaged steel truss bridge, *Engineering Structures*, Vol.122, pp.156-173, 2016.
- 10) 三増拓也, 金哲佑, 五井良直, 林巖 : 実鋼桁橋の損傷前後における振動特性に関する考察, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol. 74, No. 2 (応用力学論文集 Vol. 21), I_513-I_522, 2018.
- 11) Chu, T. C., Ranson, W. F., Sutton, M. A., Peters, W. H.: Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics. *Experimental Mechanics*, Vol.25, No. 3, pp. 232- 244, 1985.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 竹村光平, 河邊大剛, 金哲佑 : 画像解析を用いたボルトのゆるみ検知手法の開発, 土木学会第 76 回年次学術講演会, 概要集 I-136, 2021.9.
- 15) Van Overschee, P., De Moor, B.: Subspace Identification for Linear Systems, Kluwer Academic Publishers, 1996.
- 16) Javier, P., Eero, P. S.: A parametric texture model based on joint statistics of complex wavelet coefficients, *International Journal of Computer Vision*, Vol.40, No. 1, pp. 49-71, 2000.
- 17) Kawabe, D. and Kim, C. W.: Fundamental study on extracting vibration of pole structure from vehicle footage, *European Workshop on Structural Health Monitoring*, pp.680-689, 2022.
- 18) Jianbo, S., Tomasi, C. Good features to track, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 593-600, 1994.
- 19) Lucas, B. D., Kanade, T.: An iterative image registration technique with an application to stereo vision, *Proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pp. 674-679, April, 1981.
- 20) Tomasi, C., Kanade, T.: Detection and tracking of point features, *Computer Science Department, Carnegie Mellon University*, 1991.
- 21) John, C.: A Computational approach to edge detection, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 6, pp. 679-698, 1986.
- 22) Badrinarayanan, V., Kendall, A. and Cipolla, R.: SegNet: A Deep Convolutional Encoder-Decoder Architecture for Image Segmentation, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 39, pp. 2481-2495, 2017.
- 23) Simonyan, K. and Zisserman, A.: Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition, *International Conference on Learning Representations*, 2015.
- 24) Gabrilic, J. B., Fauqueur, J. and Cipolla, R.: Semantic object classes in video: A high-definition ground truth database, *Pattern Recognition Letters*, Vol. 30, Issue 2, pp. 88-97, 2009.
- 25) Rother C., Kolmogorov, V., and Blake, A.: Grabcut – Inter-active Foreground Extraction using Iterated Graph Cuts, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 23, No. 3, pp. 309-314, 2004.
- 26) Achanta, R., Shaji, A., Smith, K., Lucchi, A., Fua, P., and Susstrunk, S.: SLIC Super-pixels Compared to State-of-the-art Superpixel Methods, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 34, Issue 11, pp. 2274-2282, 2012.

(Received June 30, 2022)
(Accepted August 31, 2022)

FEASIBILITY OF FREQUENCY IDENTIFICATION AND ANOMALY DETECTION OF A HIGHWAY POLE STRUCTURE FROM VIDEO FOOTAGE

Daigo KAWABE, Takumi YOKOYAMA and Chul-Woo KIM

This study is intended to discuss the feasibility of the frequency identification and anomaly detection of highway pole structures from video footage. The accuracy of the identified frequencies from video footage is investigated through a laboratory experiment on a full-scale pole structure. Loosening anchor bolt conditions are considered as a damage scenario. In order to extract vibration modes of the pole structure, this study applies Phase-based motion magnification method which processes to the whole image frame and expands the designated frequency bands. Then, vibration waves are extracted by tracking the featured points in the image frame. Although the accuracy of estimated frequency identified from the vibration modes extracted from the video footage still needs improvement, the decreasing tendency of the frequency due to the damage scenario was observed. This study also investigates ways to remove background in the video image for the purpose of reducing influences of noise and improving identification accuracy.