

論文 ノンターゲット画像計測による 橋梁変位推定可能箇所 の簡易評価法

四井 陽貴¹・松岡 弘大²・貝戸 清之³

¹学生会員 大阪大学大学院 工学研究科 地球総合工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

E-mail: h.yotsui@civil.eng.osaka-u.ac.jp

²正会員 公益財団法人鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

E-mail: matsuo.kodai.13@rtri.or.jp

³正会員 大阪大学准教授 大学院工学研究科 地球総合工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

E-mail: kaito@ga.eng.osaka-u.ac.jp (Corresponding Author)

ノンターゲット方式での画像計測は、桁へのアクセスが不要であるため近年広く検討されている。ただし、既往研究では変位応答波形の推定精度確保が困難な箇所の存在も指摘されている。画像処理に比較的時間を要する画像計測では、計測実施後に変位が推定困難であった場合、その効率性が大きく損なわれる。本研究では、デジタル画像相関法によるノンターゲット式画像計測における適用範囲の簡易な評価法として、2枚の画像のみで評価可能な誤差予測手法を構築する。また、鋼鉄道橋の撮影動画に提案手法を適用したうえで、変位推定を実施する。複数箇所に設定した計測点で得られる変位応答波形の事例をあげ、それらを比較することにより、提案手法により測定に適する計測点の抽出が可能であることを実証する。

Key Words: digital image correlation, optical measurement, subpixel estimation, railway bridge

1. はじめに

鉄道橋において、列車通過時の桁の変位は性能照査を実施する上での安全性や使用性の照査指標として設定されている¹⁾。一般に変位は支間中央において最大となるため、既設構造物の維持管理や新線開業時の開業監査では図-1に示すように様々な測定手法により支間中央の計測が行われている。しかしながら、従来から用いられてきたリング式変位計²⁾による計測は機器の設置位置に制約が存在するため、支間中央の計測が困難な場合が存在する。また、桁と固定点を接続する必要があり、計測点を一点設置する場合でも多大な労力を要する。このような課題を踏まえて、レーザードップラー速度計や画像を用いた非接触での計測手法と、それを用いた構造物の性能評価手法の開発が進められてきた³⁾⁴⁾。

画像を用いた計測は、ターゲットの設置有無によりターゲット式とノンターゲット式に分類できる。このうちターゲット式には、標識を設置することにより測定対象物表面のコントラストを明確にして、画像処理を容易にすることを目的としたものと、サンプリングモアレ法を利用するものがある。サンプリングモアレ法を用いた手

法では、計測対象箇所に規則的な白黒の模様を持つ標識を取り付けてデジタルカメラで撮影を行う。測定対象物に変位が生じたとき、モアレ現象により標識の模様にはモアレ縞が発生する。このモアレ縞の変形前後の位相差をもとに移動量を求める。この手法では、規則的な模様を活用することにより、画素の単位を大きく超える精度での計測が可能となる。栗林等⁵⁾はサンプリングモアレ法により列車通過時の桁たわみを求めるとともに、より高い精度での計測が要求されるたわみ角の算出を実施し、たわみ角を健全度指標として用いる手法を提案している。

一方でノンターゲット式は、桁へのアクセスが不要であるため、ターゲット式よりもさらに簡易な計測が可能であるという点に優位性がある。また、理論的には画像上の任意の画素を計測点に設定でき、それらの点の変位の同時計測が可能であるという特徴をもつ。松岡等³⁾は模型橋梁を用いた実験を通して、ビデオカメラを用いたデジタル画像相関法による変位計測の精度を検証した。画像上の位置による計測精度の変化はみられない一方で、白飛び箇所など変位応答波形の推定精度確保が困難な箇所が存在することを示した。さらに、鋼鉄道橋において桁の橋軸方向に複数の計測点を設定したたわみ形状を算

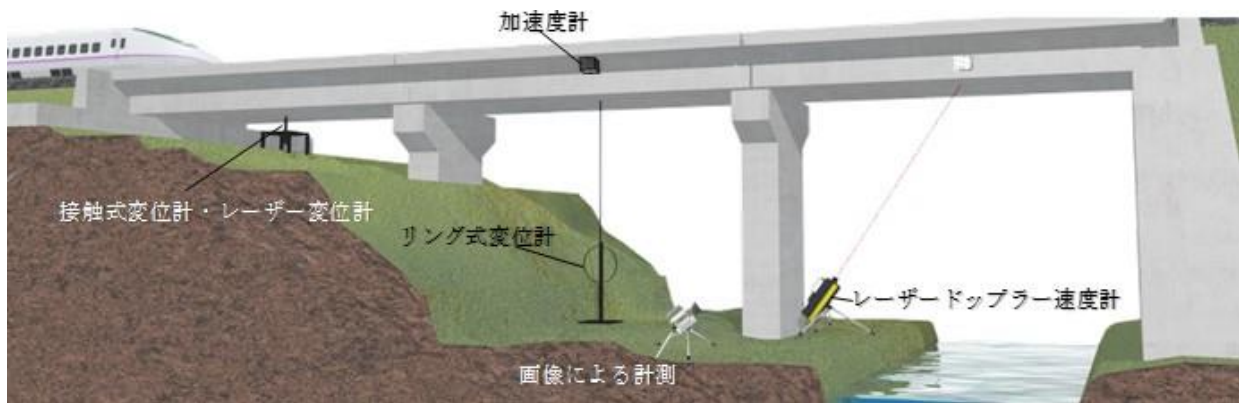


図-1 変位計測手法の一覧

出した。支間中央では、レーザードップラー速度計と同等の精度で変位応答波形が得られる一方で、それ以外の箇所では隣接計測点間で測定値が大きく変動する箇所が存在しており、計測精度が低下していることを指摘した。また、松岡等はノンターゲット式の橋梁桁たわみの画像計測に関して、高速鉄道のPC橋を対象とした検討も行っている⁹⁾。コンクリートは鋼と比較すると表面模様の変化が乏しく、コントラストが小さい箇所では計測精度が大きく低下することを指摘している。

画像処理に比較的時間を要する画像計測では、計測実施後に変位の推定が困難であった場合、効率性が大きく低下する。変位の測定に利用可能な計測点の存在範囲を撮影前に事前に評価する手法を構築できれば、手戻りの抑制および最適な計測位置の探索が可能となり、実務でのノンターゲット画像計測をより効率的かつ効果的に活用できると考えられる。本研究では、代表的なノンターゲット式の画像計測手法であるデジタル画像相関法における列車通過時の橋梁変位測定誤差の発生要因について、サブピクセル推定精度の観点から分析し、カメラをセットした状態で得られる2枚の画像から評価可能な変位測定可能箇所の抽出指標を提案する。

以下、デジタル画像相関法とサブピクセル推定法における推定精度の理論的な背景を述べたうえで、変位測定可能箇所の抽出指標を提案し、提案手法を実際の鋼鉄道橋の画像計測事例に適用する。

2. 検討方法

(1) デジタル画像相関法による変位推定

デジタル画像相関法⁷⁾は、測定対象物表面の模様ランダム性に基づいて対象物に生じる変位を算出する方法である。画像内の物体の移動量を追跡する代表的な手法であり、橋梁の変位推定以外にも金属片のひずみ計測等で数多くの適用事例が存在する。本研究では、テンプレートマッチングによる疎探索で1画素単位での移動量を

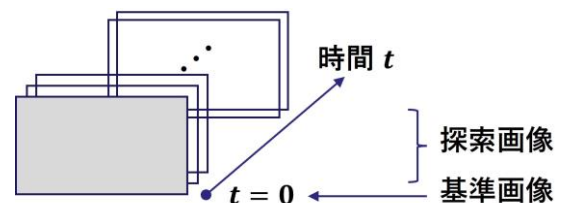


図-2 時刻歴応答の算出

算出した後に、サブピクセル推定を用いた精密探索により1画素未満の移動量を推定する。桁たわみの時刻歴応答の算出を目的とする本研究では、図-2に示すように、撮影した動画を構成する画像のうち、変位が生じていない状態が記録されている1フレーム目を基準画像として、2フレーム目以降との間で順次移動量を求める。

また、画像から得られる移動量はピクセル単位で表されるため、実寸値への変換が必要となる。ターゲット式の画像計測の場合には、ターゲットの格子間隔を用いることで正確なピクセル値の換算が可能である。一方でノンターゲット式では、画像上に存在する実寸値が既知であるとともに撮影時間中に寸法が変化しない箇所による変換、または事前のカメラキャリブレーションが必要である。本研究では既往研究³⁾と同様に橋梁の諸元を用いて算出する。具体的にはウェブ高さ 1,354 [mm] を利用して換算することにより、1ピクセルあたりの長さは 9.2 [mm/pixel] となる。

以下、a)においてテンプレートマッチングの概要を、b)においてサブピクセル推定の概要を述べる。

a) テンプレートマッチング

テンプレートマッチングは、ある画像から取り出したテンプレートと参照画像の最も類似する箇所を探索する手法である。2枚の画像間の類似度を評価する指標には、濃度差の総和である SAD (Sum of Squared Difference) や濃度差の2乗和である SSD (Sum of Absolute Difference) が存在する。SADやSSDは2枚の画像間で明るさが変動した場合に類似度が大きく変化するという欠点がある。列車通過時の主桁では、列車の影により画像上での明るさが

大きく変動する場合がある。したがって、SADやSSDを用いた場合には正しく類似度を求められない可能性が考えられる。一方で正規化相互相関NCC (Normalized Cross-Correlation) は相関値であるので、画像間で輝度値の線形変換が生じた場合でも、類似度は変化しない。すなわち、明るさが変動した場合でも類似度は一定である。さらに、各画素における輝度値から領域全体における輝度値の平均を差し引いてから求めた正規化相互相関である、零平均正規化相互相関ZNCC (Zero-mean Normalized Cross-Correlation) を用いることにより、ノイズ成分の影響を低減することができる。そこで本研究では、類似度の指標として式(1)で表されるZNCCを利用する。

$$R_{ZNCC} = \frac{A}{\sqrt{B}} \quad (1)$$

ただし、

$$A = \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} \{I_1(i, j) - \bar{I}_1(i, j)\} \{I_2(i, j) - \bar{I}_2(i, j)\}$$

$$B = \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} \{I_1(i, j) - \bar{I}_1(i, j)\}^2 + \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} \{I_2(i, j) - \bar{I}_2(i, j)\}^2$$

ここで、

$$\bar{I}_k(i, j) = \frac{1}{MN} \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} I_k(i, j) \quad (k = 1, 2)$$

ここで、 I_1, I_2 はともに $M \times N$ 画素の画像であり、 $I(i, j)$ は画像左上の画素を $(i, j) = (0, 0)$ としたときの位置 (i, j) における輝度値を表す。各移動位置での相関値 R_{ZNCC} を求めることにより、2次元相互相関関数が得られる。この相互相関関数の最大値から移動量を求める。

b) サブピクセル推定

テンプレートマッチングにおいて算出される移動量は1[pixel]単位であり、今回の事例では約9.2[mm]に相当するため変位推定に必要な精度を有しているとはいえない。輝度値は1画素単位の離散値であるので、サブピクセル推定による補間を行うことにより1画素未満の移動量を推定する。サブピクセル推定には、相関値の最大値と隣接する値に何らかの関数を用いて補間をおこなったうえで相関値の極値の位置を求める方法と、輝度分布を補間した後に類似度を算出し、ニュートン法などを用いて類似度の最大値を探索する方法が存在する⁸⁾。本研究では、鉛直および橋軸方向の変位が重複する可能性を想定し、鉛直と水平の2軸でのテンプレートマッチングおよびサブピクセル推定を実施する。具体的には、松岡等の既往研究³⁾と同様に相関値に2次曲面をフィッティングし、2次曲面の極大値位置からサブピクセル移動量を推定する手法を用いる。このサブピクセル推定2次曲面(以下、SPE2次曲面)の方程式は以下の式で表される。

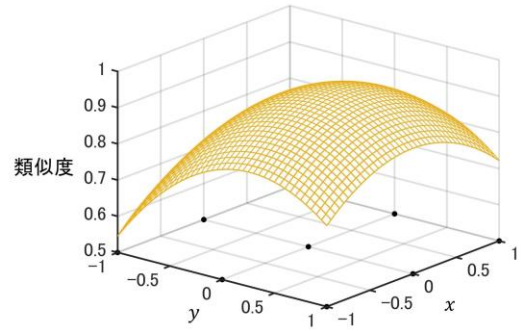


図-3 基準画像との正規化相関値のSPE2次曲面

$$f(x, y) = a_1 + a_2x + a_3y + a_4xy + a_5x^2 + a_6y^2 \quad (2)$$

SPE2次曲面のフィッティングは、ZNCCの最大値とその周辺8点の値を用いた最小二乗法により行う。ZNCCが最大値を取る点を、 $(x, y) = (x_0, y_0)$ とおく。このとき図-3に示すような $(x_0, y_0) = (0, 0)$ を原点とする座標を考えると、サブピクセル推定に用いる点の座標は、

$$P_1(x_1, y_1) = (-1, -1), P_2(x_2, y_2) = (-1, 0),$$

$$P_3(x_3, y_3) = (-1, 1), P_4(x_4, y_4) = (0, -1),$$

$$P_5(x_5, y_5) = (0, 0), P_6(x_6, y_6) = (0, 1),$$

$$P_7(x_7, y_7) = (1, -1), P_8(x_8, y_8) = (1, 0),$$

$$P_9(x_9, y_9) = (1, 1)$$

となる。9点における相関値 $f_1 \sim f_9$ を表すベクトルを $\mathbf{f} = [f_1, f_2, \dots, f_9]^T$ 、求めるSPE2次曲面の係数ベクトルを $\mathbf{a} = [a_1, a_2, \dots, a_6]^T$ とする。このとき9点での相関値 \mathbf{f} は次式で表される。

$$\mathbf{f} = \mathbf{X}\mathbf{a} \quad (4)$$

ここで、 \mathbf{X} は、

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & x_1y_1 & x_1^2 & y_1^2 \\ 1 & x_2 & y_2 & x_2y_2 & x_2^2 & y_2^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_9 & y_9 & x_9y_9 & x_9^2 & y_9^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

である。このとき求める係数ベクトル \mathbf{a} は、

$$\frac{\partial}{\partial \mathbf{a}} \|\mathbf{f} - \mathbf{X}\mathbf{a}\|^2 = 0 \quad (6)$$

を満たす。式を解いて得られる正規方程式を解くと、係数ベクトル \mathbf{a} は、以下の式(7)により算出される。

$$\mathbf{a} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{f} \quad (7)$$

最小二乗法により定めた極値の座標 $(x_{\text{peak}}, y_{\text{peak}})$ は、 $\partial f / \partial x = 0$ および $\partial f / \partial y = 0$ の条件により、

$$x_{\text{peak}} = \frac{2a_2a_6 - a_3a_4}{a_4^2 - 4a_5a_6}$$

$$y_{\text{peak}} = \frac{2a_3a_5 - a_2a_4}{a_4^2 - 4a_5a_6} \quad (8)$$

と計算できる。この極値の座標 $(x_{\text{peak}}, y_{\text{peak}})$ がサブピクセル移動量 (δ_x, δ_y) に対応する。

(2) ヘッセ行列による推定精度の評価法

画像上の中で上記のデジタル画像相関法により精度よ

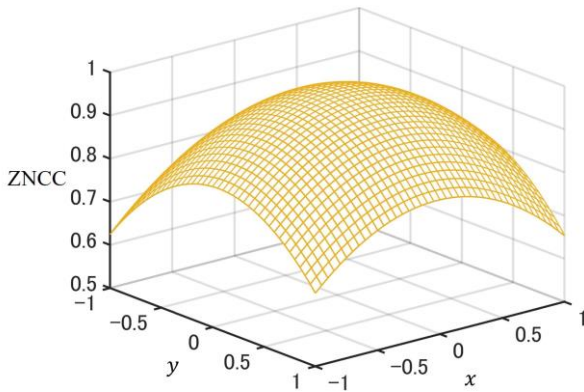


図4 SPE2次曲面：推定精度が高い場合

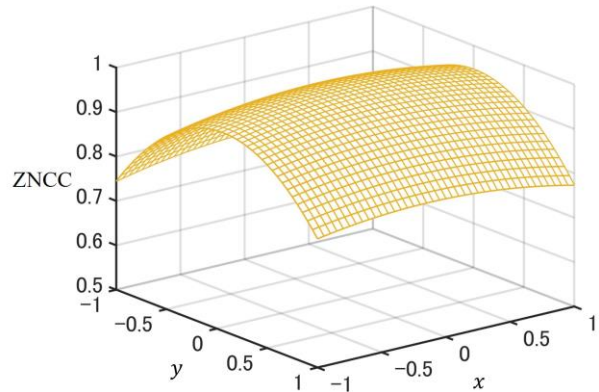


図5 SPE2次曲面：推定精度が低い場合

く変位推定が可能となる位置の評価手法について検討する。ここでは、変位推定の確からしさ、すなわち、サブピクセル推定における決定性の高さ、を指標として変位推定の可否を評価することを考える。2. (1) b)に示すサブピクセル推定は、2次曲面の最適化問題であるが、一般的な最適化問題と同様に、極値の確からしさは極値周辺の曲面性状による。例として、極値の確からしさが異なる2つのSPE2次曲面の例を図4および図5に示す。これらはいずれも後述する橋梁の変位推定におけるサブピクセル推定で得られたSPE2次曲面の例である。図4は式(2)で表される相互相関関数の近似曲面における a_5 および a_6 成分が大きく、極値が明確に表れる。この場合には、サブピクセル推定値として得られる値が高い信頼性を有する。一方で、図5は式(2)で表される相互相関関数の近似曲面においてx方向の2次項の係数 a_5 の値が0に近いために、x方向については極値周辺での傾きがなだらかとなる。この場合には、特にx方向のサブピクセル推定の信頼性が低下するとともに、極値が式(3)の探索範囲の外側に存在する場合にはサブピクセル推定が困難となる。

以上で示したようにサブピクセル推定における極値周辺の曲面性状により、変位推定の可否および精度の高さが大きく異なる。本研究では、特徴を利用して画像内の各位置で変位が推定可能かどうかを評価する。極値周辺の曲面性状は、一般的には式(9)で表される極値におけるSPE2次曲面 $f(x, y)$ の2階微分値であるヘッセ行列の行列式により評価される。

$$|H_f| = \begin{vmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial y \partial x} & \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \end{vmatrix} \quad (9)$$

SPE2次曲面の2階微分であるヘッセ行列は、1階微分である曲面の傾きの変化量、すなわち、極値の鋭さを意味する。

ここで、カメラの位置を変化させず、桁に変位が生じていない状態を撮影した2枚の画像間における変位推定

を考える。誤差のない理想的な状態では、正規化相互相関係数 R_{zncc} はラグ $(x_{lag}, y_{lag}) = (0, 0)$ で $R_{zncc} = 1$ となり、相互相関関数には明確なピークが現れる。一方で、変位測定対象位置において、サブピクセル推定精度が低く、サブピクセル推定が適切に行われていない状況では、上記の図4および図5の例にも示したように、

- 相関係数 R_{ZNCC} の値の低下
 - 隣接相関値との差の減少
 - $(x_{lag}, y_{lag}) = (0, 0)$ 以外での極値の発生
- のような現象が生じる。図4のようにサブピクセル推定における信頼性が高い点では、 a_5 および a_6 成分が大きくなり、SPE2次曲面の極大値におけるヘッセ行列の行列式 $|H_f|$ の値は大きくなる。一方で、サブピクセル推定が適切に機能しておらず、図5のようにSPE2次曲面のx方向の勾配がわずかでx方向の極大値が明確に表れない形状となる場合には、 $|H_f|$ の値は比較的小さな値をとることが想定される。なお本研究で利用した式(2)のSPE2次曲面におけるヘッセ行列の行列式 $|H_f|$ は、

$$|H_f| = \begin{vmatrix} 2a_5 & a_4 \\ a_4 & 2a_6 \end{vmatrix} = 4a_5a_6 - a_4^2 \quad (10)$$

と計算できる。

具体的な変位計測可否の事前評価手順を以下に示す。

- i. 撮影予定の位置にカメラを設置したうえで、動画と同じ画素・画角で2枚の写真を撮影する、もしくは短い時間の動画撮影を行う。
- ii. 画像内の変位測定予定箇所を選定し、1枚目の画像に対する2枚目の画像の移動量を2. (1)の方法で推定する。
- iii. サブピクセル推定で得られたSPE2次曲面の係数 a_4 、 a_5 および a_6 から式(10)により、ヘッセ行列の行列式の値を計算する。
- iv. 行列式の値が設定した閾値よりも大きければ、画像計測により変位を測定可能である。一方、設定した閾値を下回る場合にはサブピクセル推定の信頼性が低いため、撮影位置などを変更したうえで、再度i.からiv.を繰り返す。

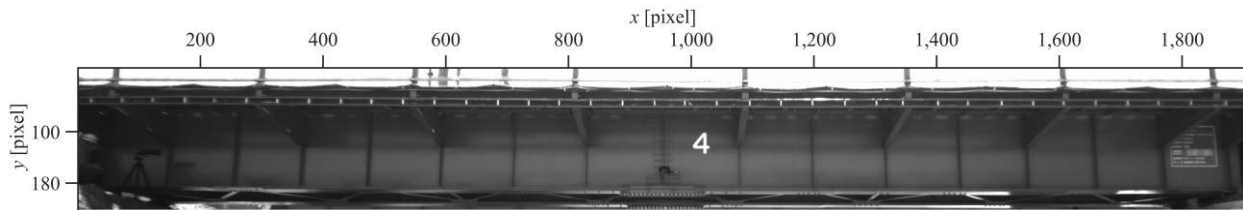


図-6 対象橋梁

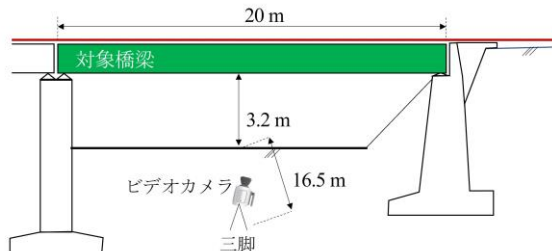


図-7 カメラ配置

表-1 ビデオ撮影の諸元

フレーム数	1,952枚
画素数	400 × 1,920画素
サンプリングレート	120Hz
テンプレート	23 × 23画素

表-2 通過列車諸元

両数	6両
速度	45 km/h

支間中央のみだけでなく、広い範囲での変位計測を行う場合には、例えば、橋軸方向に連続的に上記の評価を行い、撮影画像に結果を投影することで、画像内での変位計測可能位置を判断することができる。

3. 検討結果

(1) 対象橋梁と画像計測の概要

本研究では、文献³⁾で得られた鉄道橋の列車通過時の動画に提案手法を適用し、その有効性について検討した。

対象橋梁は文献³⁾と同様の図-6に示す鉄道用の単線開床式鋼桁橋である。支間長20[m]、桁高1.4[m]の鋼I桁が主構造部材であり、2本の主桁がガセットと対傾構により接続されている。また、主桁は2本の鋼I桁が支間中央部においてボルト接合により接続されている。図-7に示すように、列車通過時の動画が橋梁から16.5[m]離れた位置からビデオカメラにより撮影されている。ビデオ撮影の諸元を表-1に、通過列車の諸元を表-2にそれぞれ示す。撮影動画の画素数は400 × 1,920画素であるが、本研究では画像上部30画素をトリミングした図-6に示す座標を基準とし、以下の分析を行った。なお、支間中央部ではレーザードップラー速度計による測定も実施さ

表-3 テンプレートサイズと最大変位

テンプレートサイズ	最大変位 [mm]
23	-5.44
25	-5.13
27	-5.28
29	-5.36
U ドップラー	-5.47

れ、画像計測の精度を検証できるようになっている。なお、レーザードップラー速度計はUドップラーIを利用した。UドップラーIでは速度応答を積分することで変位を測定する。また、速度計自体に加速度センサを内蔵しており、速度計自体の揺れと測定応答を分離可能となっている。ここでは橋梁直下の3mから下フランジ下面に設置した反射シールの鉛直変位を500Hzサンプリングで計測している。

変位推定の精度にはテンプレートのサイズが大きな影響を与える。一般にテンプレートは大きいほうがノイズの影響が小さくなり精度が向上するものの、桁部材以外がテンプレートに混入することにより、精度が低下する可能性がある。そこで、今回はテンプレートの大きさを3 × 3画素から29 × 29画素まで変化させ、支間中央の最大変位の誤差と波形に混入するノイズが増大しなかった最も大きいテンプレートサイズとして23画素 × 23画素を採用した。なお表-3には、変化させたテンプレートサイズの一部を記載している。

既往研究⁹⁾では、コントラストの変化が大きい主桁下フランジの側面と底面の境界部に計測点を設定することにより、誤差が小さい波形が得られることを明らかにしている。また、得られた変位応答に移動平均を施すことにより、高周波のノイズ成分を低減できることを示している。そこで本研究でも同様に、コントラストの変化が大きいと考えられる下フランジとウェブの境界 $y = 180$ に着目する。 $x = 401 \sim 1,400$ において1[pixel]間隔で計1,000点の計測点を設定したうえで、10フレームごとの移動平均フィルタを適用する。また、得られた変位は列車進入前の変位0の状態に対応する、初期100フレームの計測値の平均値を差し引くことにより零点補正を行った。

計測点の抽出に用いる $|H_f|$ の算出には、列車の通過による変位が生じていない状態を撮影した2枚の画像が必

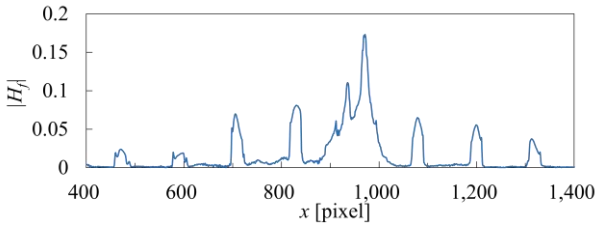


図-8 $y = 180$ における $|H_f|$ の分布

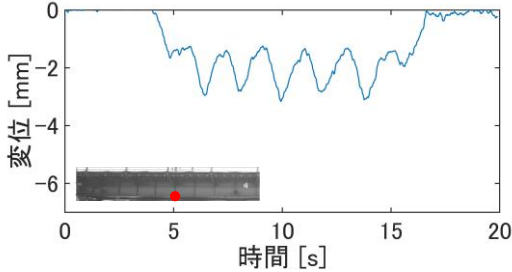


図-9 変位応答波形 ($x = 598, y = 180$)

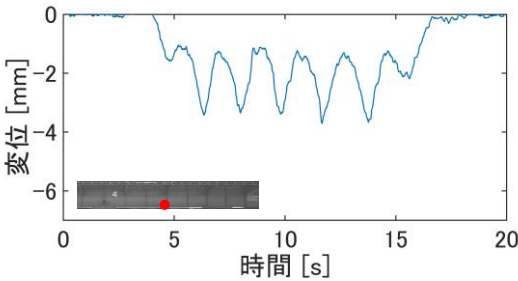


図-10 変位応答波形 ($x = 1313, y = 180$)

要である。本研究では、基準画像である1フレーム目と、探索画像の1フレーム目に相当する2フレーム目を用いる。このような2枚の画像を用いることにより、列車通過前の状態から計測点を抽出することが可能である。

(2) 下フランジ・ウェブ境界での $|H_f|$ の評価結果

図-8は2.(2)で示した手法により、下フランジとウェブの境界付近である $y = 180$ において、橋軸方向に沿って $|H_f|$ を網羅的に計算した結果を示す。 $|H_f|$ の値には、約120[pixel]間隔の規則的な極大値が確認できる。この位置は補剛材が存在し、テンプレート内の画像に特徴的なテクスチャが存在する箇所と一致する。

図-9および図-10に図-8で確認された8点の極大値箇所の変位応答波形の例($x = 598$ および $x = 1313$)を示す。いずれも走行列車の車軸位置に対応した波形が得られていることが確認できる。

また図-11および図-12に図-8で $|H_f|$ が小さい値を示した $x = 550$ および $x = 771$ の変位応答波形を示す。図-11はサブピクセルレベルの移動量が正しく算出されないことに起因した高周波のノイズ成分が重複する。また、図-12は、支間中央の最大変位5~6[mm]を大幅に超える変位が算出されている。 $|H_f|$ が小さい計測点では、このようにサブピクセル推定誤差が正常に機能せず、変位推定

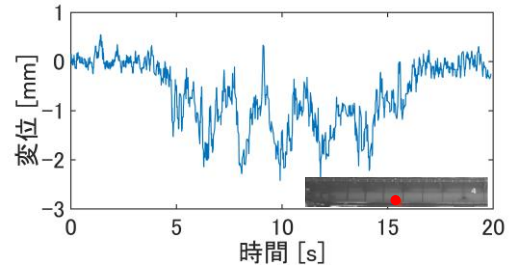


図-11 変位応答波形 ($x = 550, y = 180$)

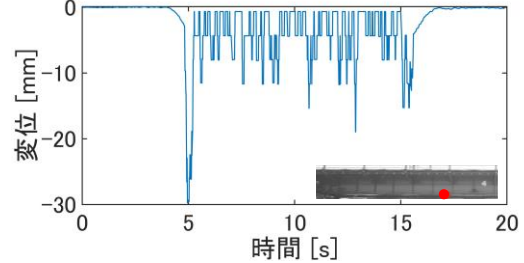


図-12 変位応答波形 ($x = 771, y = 180$)

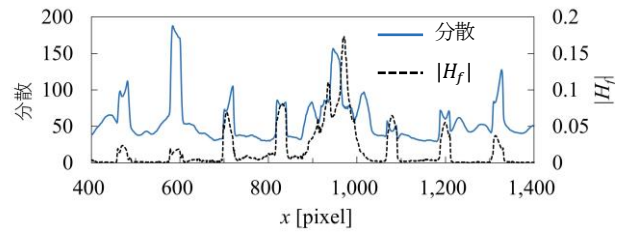


図-13 $y = 180$ における輝度値の分散の分布

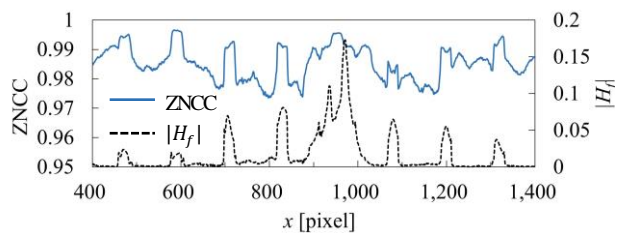


図-14 $y = 180$ におけるZNCC最大値の分布

誤差が増大する。なおこれらの誤差が大きい計測点は、 $|H_f| = 0.01$ を下回る範囲に分布したため、2.(2)で述べた閾値には0.01を採用した。

(3) 他の評価指標との比較

松岡等⁹⁾は測定位置の画像のコントラストが測定精度に影響することを指摘している。そこで、対象物表面のテクスチャの変化をテンプレートの輝度値の分散により評価した。 $|H_f|$ と同様の範囲($x = 401 \sim 1,400, y = 180$)における輝度値の分散の分布を図-13に示す。輝度の分散の極大の箇所は $|H_f|$ の場合と一致する。したがって、 $|H_f|$ による評価には一定の妥当性を確認できる。ただし、 $|H_f|$ がほぼ0となり、変位波形を算出できないような箇所でも、輝度値は一定の分散値を有しており、輝度値の分散を用いる場合には閾値の設定に課題があることがわかる。

また、図-14はテンプレートマッチングで用いた

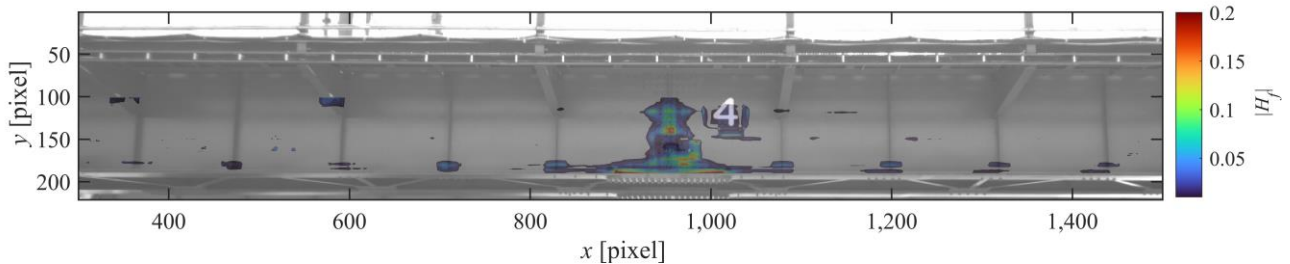


図-15 変位計測可能箇所の事前評価とその可視化

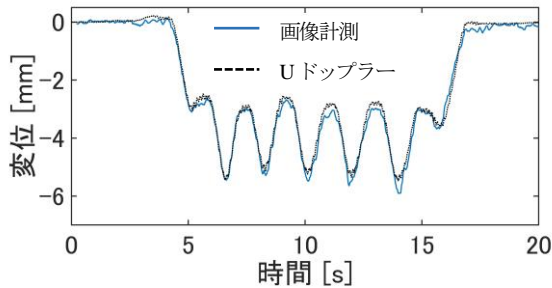


図-16 支間中央の変位計測結果

ZNCC の最大値の橋軸方向での変化を示している。ここで ZNCC の最大値とは、各計測点での変位応答波形の算出に用いた 1,951 組の画像でそれぞれ算出された 1,951 個の ZNCC の値の最大値を意味している。 $|H_f|$ や輝度値の分散と同様の箇所で極大値を取っていることが確認できる。誤差が大きい波形が得られる計測点では、周辺の点よりも類似度が若干低下している。しかしながら、ZNCC で評価される類似度の最大値そのものは、どの計測点においても輝度分布が完全に一致していることを示す 1 に近い値である。したがって、ZNCC のみからは評価が難しいサブピクセル推定の成否を、提案手法により評価できることがわかる。

(4) 抽出領域の可視化

下フランジとウェブの境界付近 $y = 180$ で得られた結果を踏まえて、 $|H_f| = 0.01$ を閾値として設定し、主桁の表面全体において測定に適する領域を抽出した。抽出結果を撮影画像に投影して可視化することにより、計測点として利用可能な点を変位推定前に把握できる。また、変位推定に適した撮影位置の探索にも活用できる。

抽出結果として得られた $|H_f| > 0.01$ の領域を撮影画像に投影した結果を図-15 に示す。なお、抽出された領域内での $|H_f|$ の大きさをコンターとして示している。抽出された領域は補剛材が存在する箇所に加えて、桁にペイントがされている部分や添接部のボルトが存在する支間中央など、画像上になんらかのテクスチャを有する箇所となっている。また、支間中央のボルト接合部では $|H_f|$ の値自体も大きいことを確認できる。ここで、本研究における変位推定精度を定量的に評価するため、ボルト添接部に位置しており、 $|H_f|$ が最も大きい $(x, y) =$

$(955, 150)$ で得られた変位応答波形を、U ドップラーによる測定値と比較した。図-16 に青線で示すノンターゲット式画像計測による変位応答波形は、点線で示す U ドップラーの計測結果と良好に一致していることが確認できる。

このような変位推定精度が高い箇所の傾向は、定性的には既往研究⁹⁾でも考察されているとともに、画像計測を行う技術者にとってもはいわゆるノウハウとして知られてきた。本研究では、このような定性的にはよく知られる現象を、定量的に評価可能とし、図-15 に示すように可視化することで、画像計測における暗黙的な知識の一部を形式化できたものと考えられる。

4. おわりに

本研究ではデジタル画像相関法を用いたノンターゲット式の変位計測を対象に、変位推定に利用可能な計測点を事前抽出する手法を提案した。具体的には、サブピクセル推定に用いる SPE2 次曲面の形状に着目したうえで、変位推定精度を表す SPE2 次曲面の極大値におけるヘッセ行列の行列式の値を指標として用いることを提案した。また、算出された値に閾値を設定することにより、測定に適する箇所を可視化した。提案手法により、変位推定を実施する前の段階で測定に利用可能な箇所を把握するため、実務への適用性が向上したと考えられる。

一方で、抽出された領域は補剛材の位置に限定されているため、ノンターゲット方式の画像計測の特徴である全視野計測が容易であるという特徴が活かされているとは言い難い。ノイズの小さい波形が得られる箇所が補剛材の位置に限定されているのは、水平方向のテクスチャの変化が小さいことも要因の一つである。サブピクセル推定では、水平方向の移動量も考慮した 9 点の相関値を用いて SPE2 次曲面をフィッティングしている。したがって、鉛直方向の変位を求める際にも、水平方向の影響が含まれる。誤差の低減を図るため、水平方向の影響を除去した変位推定手法の適用について現在検討を進めている。

また、本研究の結果は単一の鋼板桁橋に対する適用で

得られたものに留まっているため、コンクリート橋を始めとした、異なる形式の橋梁を対象とした分析も進める必要がある。コンクリート橋は、鋼桁橋とは異なりボルトや補剛材が存在しておらず、目立ったテクスチャを有していない。したがって、本研究での考察を踏まえると $|H_f|$ は小さく、鋼桁と比較するとノンターゲットでの画像計測が可能な箇所は少ないと考えられる。各計測点で得られる変位応答波形と $|H_f|$ の関係を分析することや、レーザードップラー速度計による測定で得られた変位応答波形との比較により、本研究では経験的に定めた $|H_f|$ の閾値についてさらなる検証を進める予定である。

REFERENCES

- 1) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説—変位制限，丸善，2006。[Railway Technical Research Institute: *Tetsudoukouzoubutsutou sekkeihyoujun & doukaisetsu - Heniseigen*, Maruzen, 2006.]
- 2) 杉崎光一，阿部雅人，鈴木修：連行荷重を受ける構造物の加速度計測による変位推定方法，土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)，Vol.69, No.3, pp.516-526, 2013。[Sugisaki, K., Abe, M. and Suzuki, O.: Displacement estimation method using acceleration measurement subjected to train load, *Journal of JSCE*, Ser. A1, Vol.69, No.3, pp.516-526, 2013.]
- 3) 松岡弘大，上半文昭，日下博也，今川太郎，野田晃浩：ノンターゲット光学式測定による桁たわみ形状測定の精度検証と適用性検討，土木学会論文集 A2 (応用力学)，Vol.74, No.2, pp.I_715-I_726, 2018。[Matsuoka, K., Uehan, F., Kusaka, H., Imagawa, T. and Noda, A.: Accuracy verification of girder deflection shape measurement by non-target optical measurement and its applicability, *Journal of JSCE*, Ser. A2, Vol.74, No.2, pp. I_715-I_726, 2018.]
- 4) Uehan, F.: Development of the U-Doppler Non-contact Vibration Measuring System for Diagnosis of Railway Structures, *Quarterly Report of RTRI*, Vol.49, No.3, 2008.
- 5) 栗林賢一，藤垣元治，木村元哉，丹羽雄一郎：たわみ角を管理指標として用いた鉄道橋の健全度評価手法に関する一考察，構造工学論文集，Vol.62A, pp. 617-629, 2016。[Kuribayashi, K., Fujigaki, M., Kimura, M., Niwa, Y.: A study of railway bridges soundness evaluation method using deflection angle as a management indicator, *Journal of Structural Engineering*, Vol.62A, pp. 617-629, 2016.]
- 6) Matsuoka, K., Uehan, F., Kusaka, H. and Tomonaga, H.: Experimental Validation of Non-Marker Simple Image Displacement Measurements for Railway Bridges, *Applied Sciences*, Vol.11, No.25, p.7032, 2021.
- 7) 出水亨，松田浩，戸次翔，森崎雅俊，内野正和，伊藤幸広，森田千尋：デジタル画像相関法のひずみ計測向上に関する基礎的研究，土木学会論文集 A2 (応用力学)，Vol.68, No.2, pp.I_683-I_690, 2012。[Demizu, A., Matsuda, H., Hetsugi, S., Morisaki, M., Uchino, M., Ito, Y. and Morita, C.: Fundamental Study on Improvement in Strain Measurement Accuracy of Digital Image Correlation Method, *Journal of JSCE*, Ser. A2, Vol.68, No.2, pp. I_683-I_690, 2012.]
- 8) Bruck, H., McNeill, S., Sutton, M. and Peters, W.: Digital image correlation using Newton-Raphson method of partial differential correction, *Experimental Mechanics*, Vol.29, pp.261-267, 1989.
- 9) 公益財団法人鉄道総合技術研究所，鉄道技術推進センター：鉄道橋の列車通過時の振動測定評価マニュアル，2019。[Railway Technical Research Institute, Railway Technology Promotion Center: *Tetsudoukyo no ressyatsukaji no shindousokutei hyouka manyuaru*, 2019.]

(Received April 1, 2022)

(Accepted June 3, 2022)

SIMPLE EVALUATION METHODS OF APPLICABLE POINTS FOR IMAGE DISPLACEMENT MEASUREMENT WITHOUT TARGET

Haruki YOTSUI, Kodai MATSUOKA and Kiyoyuki KAITO

Optical measurement of bridge displacements without target has been widely studied in recent years because it does not require the access to the girder. However, the previous study pointed out that some areas at the surface of girder has low accuracy of displacement response estimatio. When measuring displacements with optical methods, image processing requires relatively a long time. Therefore, if it turns out difficult to estimate the displacement after the measurement, the efficiency is significantly reduced. In this study, authors develop a simple method to predict the error of non-target image measurement with only two pictures. Moreover, the proposed method was allpied to an actual steel bridge image measurement and estimate its displacement when a train is passing. As the results, the error prediction results by the proposed method are consistent with the estimated displacement responses at each point of steel girder.