

第 I 部門

鉄道橋桁たわみのノンターゲット画像計測システムの精緻化

大阪大学工学部

学生員 ○四井 陽貴

公益財団法人鉄道総合技術研究所

正会員 松岡 弘大

大阪大学大学院工学研究科

正会員 貝戸 清之

1. はじめに

鉄道橋において、列車通過時の桁の変位は代表的な性能指標の一つであり、様々な測定手法の開発が進められてきた。ノンターゲット方式での画像を用いた計測¹⁾は、桁へのアクセスが不要であることに加え、画像内の任意位置を測定点に設定した多点の同時計測が可能であるため、近年広く検討されている。しかしながら、既往研究では変位応答波形の推定精度が低下する箇所²⁾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、推定精度の高い変位応答波形が得られる測定点を試行錯誤によって決定した場合、計測の効率性が大きく損なわれる。そこで本研究では、測定に利用可能な箇所を簡易に事前抽出する手法を構築するとともに、誤差の低減を図る手法を提案する。

2. 既往研究の概要

画像による橋梁の変位計測手法は、桁にターゲットを取り付けて撮影を行う手法と取り付けずに撮影を行うノンターゲット式に大別できる。松岡等¹⁾は、デジタル画像相関法を用いたノンターゲット方式での変位計測の精度と適用範囲を、模型橋梁と実橋梁を用いて検証した。支間中央の変位応答波形は、レーザードップラー速度計などの他の測定手法と同等の精度で算出できることを示した。一方で、白飛び箇所をはじめとした変位推定に適さない箇所も存在することを明らかにした。また、桁の橋軸方向に複数の測定点を設定した多点同時計測を実施し、桁のたわみ形状を算出した。しかしながら、隣接する測定点で値が大きく変動する場合があるなど、誤差が混入している可能性を指摘した。

3. 検討内容

デジタル画像相関法は、測定対象物表面のランダム性にもとづいて変位を推定する手法である。1画素単位での移動量を算出するテンプレートマッチングによる疎探索と、1画素未満の移動量を推定するサブピクセル推定による精密探索で構成される。テンプレートマッ

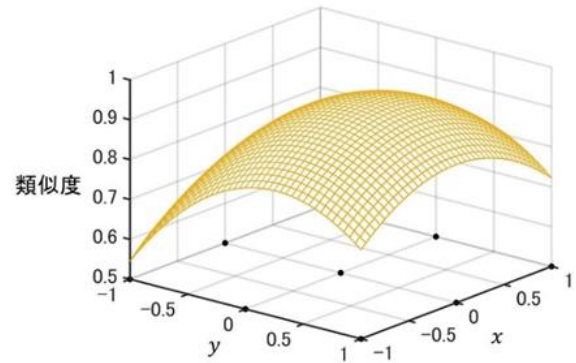


図-1 サブピクセル推定

チングでは、類似度の指標として式(1)で表される零平均正規化相互相関 (ZNCC) を用いる。

$$R_{ZNCC} = \frac{\sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} \{I_1(i,j) - \bar{I}_1\} \cdot \{I_2(i,j) - \bar{I}_2\}}{\sqrt{\sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} \{I_1(i,j) - \bar{I}_1\}^2 \cdot \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} \{I_2(i,j) - \bar{I}_2\}^2}} \quad (1)$$

ただし、

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

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。次に、相関値の最大値と周辺8点の9点に図-1に示す2次曲面 $f(x,y) = a_1 + a_2x + a_3y + a_4xy + a_5x^2 + a_6y^2$ をフィッティングし、 $f(x,y)$ の極大値の位置を求めることにより、1画素未満の移動量を推定する。算出される変位はピクセル単位であるため、寸法が既知のウェブ高さを用いて実寸値に換算する。

測定点の抽出には、サブピクセル推定に用いる2次曲面 $f(x,y)$ の極大値の形状に着目したうえで、ヘッセ行列の行列式 $|H_f|$ を用いる。2次元相互相関関数の値が一

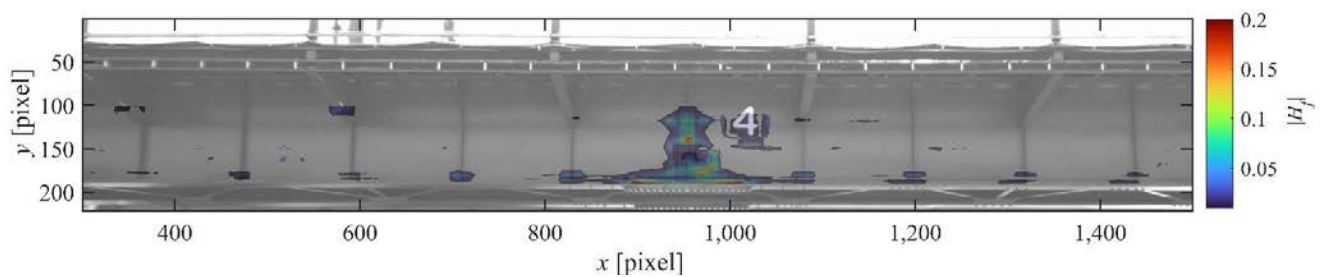


図-2 抽出領域

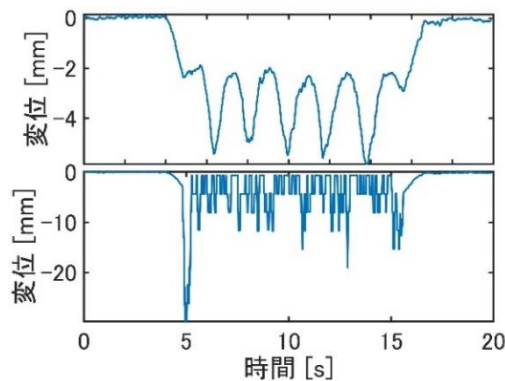


図-3 抽出領域内外の波形の比較

要素に集中し、 $f(x, y)$ の極大値における2階微分値の絶対値が大きい場合に推定精度が高いという前提のもと、 $|H_f|$ が大きいほど測定に適しているとする。桁に変位が生じていない状態を撮影した2枚の画像に提案手法を適用することにより、列車の通過前に測定に利用可能な測定点を抽出することが可能である。

4. 検討結果

$|H_f|$ の値により測定点を抽出した結果を図-2に示す。抽出領域内部の測定点においては、図-3上段のように通過列車の車軸の位置に対応した波形が得られる一方で、抽出領域の外部では、図-3下段に示すような信号処理上の誤差が大きい波形が得られる。抽出された領域は補剛材の位置を中心に分布しており、支間中央のボルトが多数存在する箇所や、ペイントが存在する箇所では値が大きくなっていることが確認できる。これらは表面模様の変化が大きい箇所と一致しているため、 $|H_f|$ を用いた抽出結果は妥当であると考えられる。

一方で、抽出された測定に適する箇所は限定的であり、ノンターゲット式計測の特徴である画像内の任意の位置を測定点に設定できるという点が活かされているとはいえない。そこで、既往研究での変位推定の手法を一部改良することにより、変位応答波形が得られる測定点を増加させることを試みる。サブピクセル推定では、極大値における2階微分値の橋軸方向の変化を

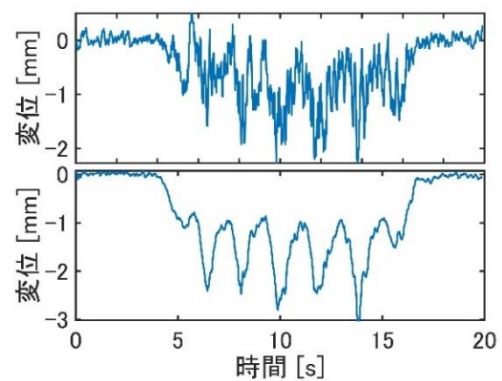


図-4 改良前後の波形の比較

分析することにより、水平方向のサブピクセル推定精度が低下することに起因して、鉛直方向の精度が低下していることが判明した。そこで、鉛直方向に限定したサブピクセル推定を適用した。また、テンプレートマッチングにおいて2次元相互相関関数の最大値を探索する範囲を限定することにより、図-3下段にみられるような過大な変位の算出の抑制を図った。その結果、下フランジ・ウェブ境界の位置に対応する $y = 180$ においては、信号処理上の誤差が小さい変位応答波形が得られる測定点が増加した。図-4は $(x, y) = (409, 180)$ での改良前後の波形の比較であり、通過列車の軸重に対応した形状が明確になったことが確認できる。

5. おわりに

本研究では、列車通過前の桁を撮影した画像を用いることにより、変位推定を実施する前に測定に利用可能な測定点を把握する手法を提案した。また、既往研究の手法に改良を加え、信号処理上の誤差の低減を図った。梁モデルの理論解を考慮した、統計的画像処理手法の構築が今後の課題である。

【参考文献】

- 1) 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, I_715-I_726, 2018.