

衛星 SAR 画像と気温データを用いた橋梁の異常変位検知手法

日本電気株式会社 正会員 ○木下 耕介
日本電気株式会社 非会員 山口 裕貴

日本電気株式会社 正会員 久村 孝寛
日本電気株式会社 非会員 田中 大地

1. はじめに

橋梁は日常生活や経済活動に不可欠な社会基盤のひとつである。日本では 1950 年代から高度経済成長期にかけて集中的に整備され、現在、道路橋は約 72 万橋存在する。一般に橋梁の寿命は 50 年程度であり、近年、多くの橋梁の老朽化が深刻な課題となっている。課題の解決のため、橋梁の計画的な維持管理を行う活動が活発化しており、平成 26 年には、道路法施行規則改正による 5 年に 1 回の定期点検が義務付けられた。しかし、点検員による近接目視点検では、作業にかかる人的・時間的コストが高い上、診断結果に点検員毎の主観的要素の介入や、損傷の見落としの発生リスクがある。一方、客観的指標かつ常時監視可能な手法として、固定センサによるモニタリングシステムが提案されている。しかし、検査対象とする橋梁数の増加に伴い、センサの設置・維持に掛かるコストは膨大になると予想され、予め対象とする橋梁・部位を選定する必要がある。更に、橋梁は置かれている環境要因（気温/日射量 等）により、上部構造等の特定部位が周期的に変位変動する性質が確認されている [1]。そのため、センシングにより得られた変位量だけでは、「環境依存の問題無い変位量」と「環境非依存の異常な変位量」との判断は困難と言える。

そこで、本稿では合成開口レーダ (Synthetic aperture radar; SAR) の画像と気温データを用いた異常変位検知手法を提案する。提案法では、長期間、衛星より撮像した橋梁全体の SAR 画像に対し、干渉解析を行うことで、時系列における橋梁の数 mm 単位の起伏 (変位量) を取得する。また、得られた変位量と気温との関係性をモデル化することで、観測された変位の異常性を検知する。これにより、橋梁に直接センサを設置することなく、遠隔から橋梁の健全性を診断可能なモニタリングシステムの実現を期待する。

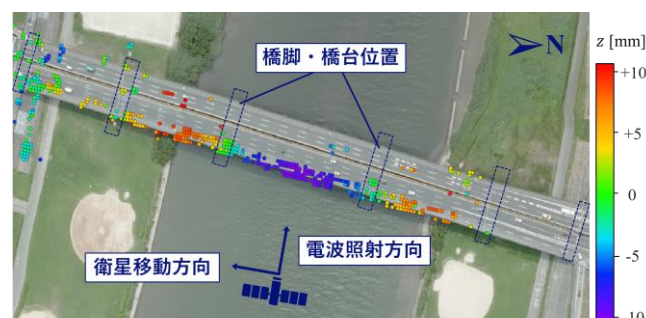


図 - 1 SAR の干渉解析データ (荒川 X 橋) [2]

2. SAR によるリモートセンシング技術

SAR は、人工衛星、航空機等の飛行体に搭載されたアンテナからマイクロ波を地上に向けて照射し、対象構造物からの反射波を用いて SAR 画像を生成する。また、異なる時期に撮像された SAR 画像ペアに対し、干渉解析を行うことで、片方の画像を基準とした相対的な位相差を算出する。これにより、画像ペア間に発生した、構造物の数 mm 単位の相対変位量を取得可能となる。図 - 1 では、荒川に架かる X 橋を対象に干渉解析を行った例を示す。ここで、 z は衛星の電波照射方向の相対変位量を表し、構造物が衛星に近づくと正、遠ざかると負の値をとる。図のように SAR では、地上に複数のセンサを設置する必要なく、構造物全体のわずかな変位を取得可能となる。

3. 異常変位検知手法の検討

気温と気温変化による変位量との相関関係は、損傷や修繕工事等のイベントが発生すると、一定期間、関係性が崩れることが確認されている [3]。そこで、当知見を参考に、気温による変位の予測値と観測値とを比較することで、支承の機能劣化や支持部材の破断などを原因とした変位の変化を検知可能な手法を検討する。検討にあたり、SAR には、観測誤差などの影響により、雑音成分を含む課題がある。そこで、変位量を、数理モデルにより近似することで、雑

キーワード 橋梁, 健全性診断, 異常変位検知, 合成開口レーダ (SAR), リモートセンシング

連絡先 〒211-8666 神奈川県川崎市中原区下沼部 1753 日本電気株式会社 玉川事業場 E-mail : kosuke-kinoshita@nec.com

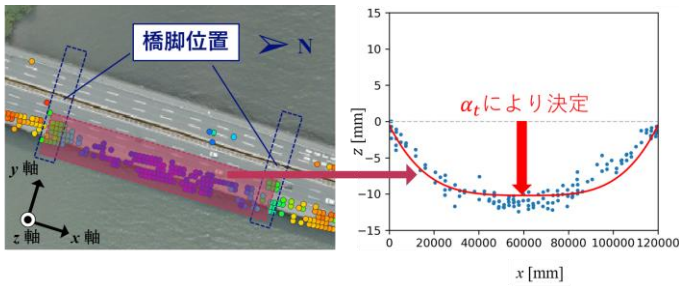


図 - 2 曲線近似の例（荒川 X 橋の中央径間） [2]

音成分の低減を図る．使用する数理モデルにはいくつか候補が挙げられるが，本稿では，以下の様にシンプルな多項式で定式化を行った．

$$g(x, t) = \alpha_t \sum_i C_i x^i + \varepsilon \quad (1)$$

ここで， x は橋軸長手方向の距離[mm]， t は SAR 画像の撮像日， i は多項式の次数， C_i は多項式の各未定係数， α_t は変位の近似曲線幅を調整する未定係数， ε は雑音成分である．図 - 2 では，荒川 X 橋の中央径間（赤枠内）のデータに対し，橋脚間の距離を x 軸，変位量を z 軸として，4 次多項式による曲線近似を適用した例を示す．ここで， C_i は全ての学習データに共通する近似曲線の概形を表し， α_t は各撮像日ごとの変位量の代表値と見なせる．そのため，提案法では，変位量の代わりに α_t が環境要因の影響により時系列変動すると仮定し，気温を説明変数とした α_t の予測モデルを構築する．これにより，予測値 $\hat{\alpha}_t$ と，観測値により推定された値を比較することで，環境非依存の異常な変位を検知する．

4. 実験

X 橋中央径間内のデータを対象に提案法の適用実験を行った．衛星データには，TerraSAR-X 衛星で撮像された 2010 年～2014 年の計 72 枚の SAR 画像（X-バンド）を使用する．また，2012 年 10 月 26 日の画像を基準として，他全ての画像と干渉解析を行い，2010 年 6 月～2012 年 12 月（計 49 枚）を学習データ，2012 年 12 月～2014 年 2 月（計 22 枚）を予測データとして分割した．更に， α_t の予測モデルには，東京気象台で観測された最低気温を説明変数として単回帰モデルを構築し，予測値 $\hat{\alpha}_t$ の 95% の信頼区間（予測区間）内の観測値を正常，それ以外を異常として検知する．尚，論文執筆時点では，データの期間内で目

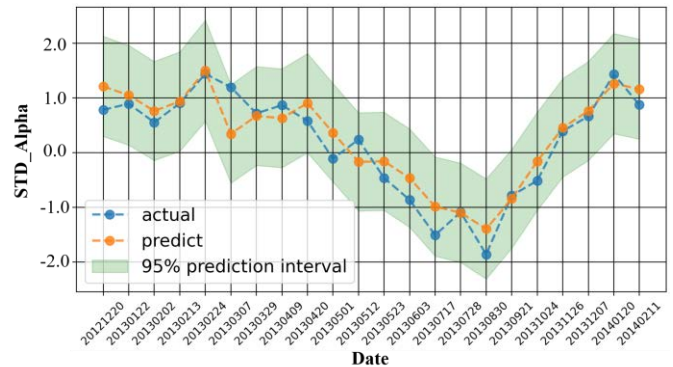


図 - 3 変位幅調整係数 α_t の予測値および予測区間，観測値（荒川 X 橋の中央径間）

立った損傷等が確認されなかったため，正常なデータとして，異常が検知されないかを調査した．図 - 3 に実際にモデルに適用した結果を示す．まず，モデルの当てはまり度合いを表す決定係数は 0.86 であり，気温のみを用いた単純な予測モデルでも，高い予測精度を得ることが確認できた．また，全ての観測値が予測区間内に収まったことから，正常なデータに対し，提案法が正しく判断可能であることがわかった．以上より，当予測モデルが異常変位検知の機能として有効に働くことが期待できる．ただし，X 橋では 2013 年に橋脚の耐震補強工事があったが，論文執筆時点ではどの橋脚が工事されたかは不明である．

5. おわりに

本稿では，遠隔から橋梁の健全性を診断可能な手法として SAR 画像と気温データを用いた異常変位検知手法を提案した．今後は，実際のイベント情報を参照した，本提案法の有効性検証を予定している．

参考文献

- 1) 小林裕介ら，“鈹床版箱桁橋梁の温度変形挙動を利用した健全度評価モニタリング，” 土木学会論文集 A，62 巻 4 号，pp. 794-807, 2006.
- 2) 国土地理院，地理院タイル「全国最新写真（シームレス）」をもとに著者が加工し作成．
- 3) 土木学会 技術推進機構，“垂井高架橋モニタリング評価委員会 最終報告書，”
https://committees.jsce.or.jp/opcet/system/files/monitoring_interim_report_final_1.pdf. (2022/1/11 閲覧).