

トランスフォーマー深層学習モデルを用いた橋の活荷重変位推定

日本電気株式会社 正会員 ○Petladwala Murtuza
日本電気株式会社 正会員 久村 孝寛

日本電気株式会社 正会員 矢島 義之
京都大学大学院 正会員 金 哲佑

1. はじめに

インフラ構造物の老朽化問題や構造物管理技術者の減少問題への対策の一つとして、センサを活用したインフラモニタリング技術が期待されている。変位応答は橋梁の維持管理を効果的に行うための重要なモニタリング指標のひとつとして注目され、各種センサを用いた計測および推定手法が提案されている¹⁾⁴⁾。理論的には加速度を2回積分して変位を得ることができる。しかし、雑音による誤差蓄積や積分初期値という制約があり、複数車両が走行するようなケースには適用困難という課題がある。この課題を解決するために深層学習による活荷重変位推定手法を提案する。

2. 提案手法

提案手法は、言語翻訳向けに発案されたトランスフォーマーモデルを利用し、その前後に振動データを周波数成分に分解および合成する処理を組み合わせる。周波数成分分解は振動の特徴を抽出し、トランスフォーマーは周波数成分ごとに推定を行い、周波数成分合成は推定結果を加算合成して最終的な活荷重変位推定値を得る。提案手法を図1に示す。以降、提案手法を VibFormer と呼称する。

2.1. 周波数成分分解と合成

画像や音声などを機械学習で扱う際に重要な点の特徴量の抽出方法である。推定対象の特徴と強い相関をもつ情報を入力データから抽出できれば高い推定性能が得られる。VibFormer においては、線形形の振動現象は周波数成分の加算合成で表現できること、

加速度と変位の間には微積分の理論的な関係があり強い相関を期待できること、という考えのもとづいて、入力データを周波数成分分解することで特徴量を抽出する。式(1)に示すように、FFTによる周波数成分分解によって、加速度あるいは変位の振動信号 $y(t)$ はゼロからナイキスト周波数までの周波数と位相情報からなるフーリエ級数として表現できる。

$$y(t) = A_i + \sum_{n=0}^{f_s/2} A_n \sin(2\pi f_n t + \varphi_n) \quad (1)$$

ここで、 f_s はサンプリング周波数、 t は時間、 f_n は第 n 番成分の周波数、 A_n は初期振幅、 φ_n は位相、をそれぞれ表す。VibFormer はこれら周波数成分を使って学習及び推論を行う。周波数成分ごと推定された変位成分は加算合成され、変位推定値が得られる。周波数成分の分解と合成による変位推定は、変位の静的成分および動変位成分の重ね合わせや、固有振動モードの重ね合わせの考え方にもとづくものである。

2.2. 変位推定

図1におけるトランスフォーマーモデルは、エンコーダとデコーダで構成されるオリジナルのアーキテクチャ⁵⁾に従っており、教師あり変位推定タスクを実行する。学習フェーズにおいて、トランスフォーマーモデルは、加速度と変位、2つの振動の関係を学習する。周波数分解された加速度データと変位データは、それぞれエンコーダとデコーダへ入力される。推論フェーズにおいては、Greedy Decoding 法にもとづいて、学習済みモデルは変位を反復的に推定する。エンコーダには周波数分解された加速度データが、デコーダには定数値が入力される。

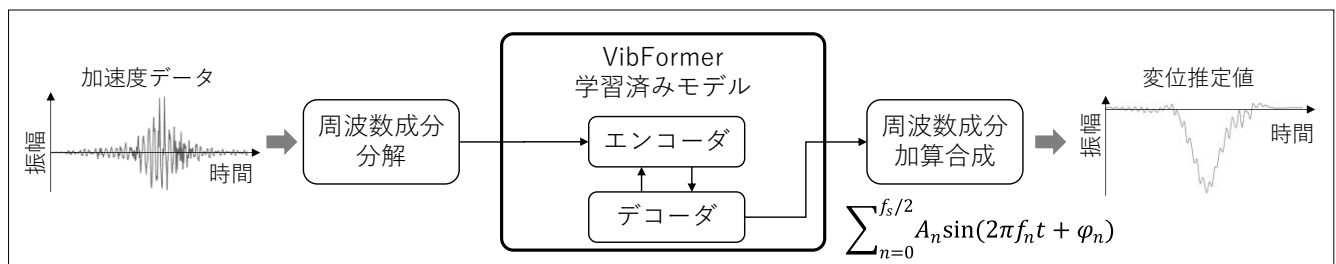


図1 提案手法 VibFormer のブロック図

キーワード 橋梁モニタリング, 活荷重変位, 加速度, 深層学習, トランスフォーマー

連絡先 〒211-8666 神奈川県川崎市中区下沼部 1753 日本電気株式会社 E-mail: murtuza@nec.com

表 1 実験概要

対象橋梁	7 径間連続ゲルバー橋 全長約 190m
対象径間	橋台に隣接する径間 支間長 22.2m 橋台から 16m の位置にヒンジあり
センサ位置	ヒンジ下部の橋桁に接触式変位センサおよび加速度センサを設置
データ選定	サンプルレート 200Hz の計測データから車両通過イベントを選定. 20Hz ヘダウンサンプルして使用. 単独車イベント 500 個, 各 8 秒 複数車イベント 275 個, 各 20 秒

表 2 実験結果：活荷重変位推定の評価結果

評価方法	単独車イベント		複数車イベント	
	CCC*	MAE**	CCC	MAE
積分法 FVSM ¹⁾	84%	15%	58%	21%
提案法 VibFormer	91%***	6%	87%	9%

*CCC: Cross correlation coefficient 真値との相互相関係数
**MAE: Maximum Absolute Error 真値に対する最大絶対値誤差
***太字は良い推定結果を表す.

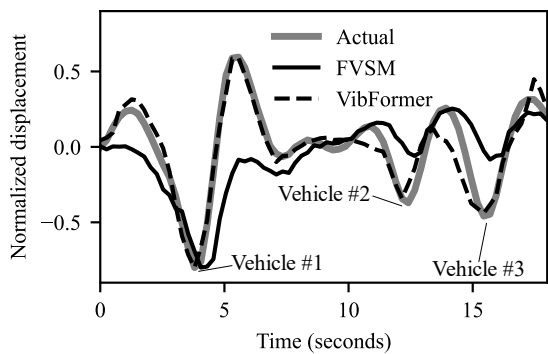


図 2 複数車両通過イベントの変位推定の例

3. 妥当性検討

実橋での計測データを使って VibFormer の推定性能を評価する。実験概要を表 1 に示す。比較のため、積分法(FVSM)¹⁾も使用して活荷重変位を推定する。FVSM では、簡単のため、変位がゼロである時間区間をもとに積分区間の境界を定める。一方で、VibFormer では、単独車イベントのデータを連結し、変位データを最大絶対値で割って正規化し、固定長の Sliding Time Window を適用しデータを抽出して学習および推論を行う。学習フェーズにおける損失関数は二乗平均平方根誤差である。性能評価の指標は、

変位の真値が最大絶対値となる時点における真値と推定値との相互相関係数(CCC)および平均絶対誤差(MAE)である。ランダム選択した単独車イベントで構成した学習データセットで学習した VibFormer の CCC と MAE の中央値は、それぞれ 98%と 7%である。トレーニングデータセットに使わなかった単独車イベントおよび複数車イベントのデータに対する性能評価結果を表 2 に示す。CCC と MAE いずれの指標でも VibFormer は FVSM を上回る結果となった。実験データを用いた検討結果によると、単独の車両通過のイベントだけでなく、複数の車両通過イベントに対しても、VibFormer が加速度データから変位データを推定できる可能性があると言える。図 2 は車両 3 台が通過するイベントにおける変位推定結果の例である。車両 3 台が通過するそのタイミングで変位が局所最大絶対値をとる様子を VibFormer が良好に推定できていることがわかる。

4. おわりに

深層学習モデルであるトランスフォーマーを用いて、加速度から橋の活荷重変位を推定する VibFormer を提案した。加速度および変位を周波数成分に分解して特徴抽出することで、複雑な振動データから変位に強い相関を持つ成分を抽出することによって推定効率を向上させた。単独車イベントでも複数車イベントでも、提案手法は既存手法よりも優れた推定性能をもつ可能性があることを示した。今後は、学習データセットを増やして汎化性能を向上させる予定である。

参考文献

- 1) 関谷ら, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol. 72, No. 1, pp.61-74, 2016.
- 2) 實成ら, 令和 2 年度全国大会第 75 回年次学術講演会, I-343, 2020.
- 3) 近藤ら, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol. 75, No. 2, (応用力学論文集 Vol. 22, I_51-I_62, 2019.
- 4) 加藤ら, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol. 76, No. 2, pp.356-375, 2020
- 5) A. Vaswani, et. al., "Attention is all you need," NeurIPS, 30, 2017.