橋梁振動波形の包絡線特徴量を用いたニューラルネットワークによる交通量推定

横浜国立大学　学生会員　○栗栖雄一
横浜国立大学　正会員　　西尾真由子

1. はじめに

既存橋梁の性能評価に実際の交通状況を反映することは適切な維持管理を行う上で重要である．そのために著者らは橋梁を通過する交通量を振動モニタリングデータから推定することを考えている．伊藤ら[1)]は橋梁振動の波形特徴量を使用した重回帰分析による交通量推定を行ったが，この方法は説明変数とする特徴量や回帰式の形などの選択に多くの意思決定を要する．センシング技術の進歩で可能となった実橋梁での常時モニタリングによる大量のデータは，機械学習による処理も適していると考えられる．そこで本研究では，橋梁の振動波形特徴量をニューラルネットワーク（NN）に適用して交通量推定を行うこととした．ここで，振動波形で車両通過を明確に判別するため波形包絡線に関する特徴量を提案し推定の高精度化を試みた．さらに，鋼橋を対象として車線別大型車交通量推定を行い，疲労照査で用いる車線別日平均大型車交通量（ADTT）の推定への適用性を考察した．

2. ニューラルネットワークによる回帰

NN[2)]は機械学習で扱われる計算アルゴリズムの 1 つである．入力層、隠れ層、出力層から構成され，入力に対する単純な変換の繰り返しで予測結果を出力する．本研究では MATLAB Neural Network toolbox を用いて NN を構築した．NN の設計では隠れ層の層数と学習に用いるアルゴリズムを選択する．隠れ層の層数は多いほど訓練データへの当てはまりが良くなるが，過学習が起きることがある．学習アルゴリズムは Levenberg Marquardt 法（LM 法），Bayesian 正則化法の 2 種類を選択しながら用いた．LM 法は二乗誤差を最小にするアルゴリズムであり，Bayesian 正則化法は訓練データが少ない時に有効で，汎化性能を高める学習方法である．

3. 包絡線波形特徴量による交通量推定の高精度化

はじめに，著者らの既往研究[1)]と同じ対象橋梁及びデータを基に，包絡線に関する波形特徴量を導入した NN によるモデルの構築を行った．橋梁は 4 径間連続 PC 箱桁橋で，うち 1 径間のスパン中央に設置した圧電型加速度センサ（サンプリング周波数 200Hz）で 2015/11/17～2015/11/26 の 10 日間常時データ取得した．交通量データはカメラ映像から，10 分間あたり総交通量と大型車交通量を上記の期間計測した．

既往研究[1)]では，通常供用時の橋梁振動波形が常時微動を含むランダム振動に車両通過による減衰振動が重ね合わされていると考え，波形特徴量に加速度データサンプルの正規分布からの逸脱量やサンプル全体の尖度などを用いた．本研究ではさらに，波形のピーク包絡線も利用し推定精度の向上を図った．包絡線では波形の振幅変化のうち低周波成分を取り出すことができ，人間が視覚的に認識している車両通過による減衰振動挙動の数を捉えられる．ここではヒルベルト変換に基づくアルゴリズムを用いて，橋梁振動波形に対して図 1 の赤線のような包絡線を求めた．

その上で，車種や交通パターンと加速度波形や包絡線形状の関係を交通データも用いて観察し，普通車に関する特徴量として，加速度波形が 20gal以上を記録した回数f_{20}と包絡線ピーク値が 20gal以上を記録した回数f_{E20}，大型車に関する特徴量として，加速度波形が 60gal以上を記録した回数f_{60}と包絡線ピーク値が 60gal以上を記録した回数f_{E60}を新たに設定した．また単独走行時に比べ車両連行時に振動加速度が低下する特徴を捉えるため，包絡線ピーク値が 10gal以上となるサンプル数f_{E10}，10gal以上 20gal未満となるサンプル数f_bも候補に加えた．さらに昼間 12 時間を 1，夜間 12 時間を 0 とする昼夜の交通状態の違いを表す変数f_tも含めた．

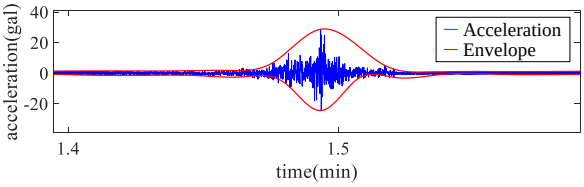

図 1 波形包絡線形状の様子

キーワード：交通量推定，ニューラルネットワーク，加速度波形，包絡線，日平均大型車交通量，疲労照査
連絡先：〒240-8501　横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5　TEL 045-339-4243，FAX 045-348-456

表 1 総交通量と大型車交通量の推定値の誤差（%）

日付	19(木)	20(金)	21(土)	22(日)	23(月)	24(火)	25(水)
総交通	0.63	0.09	0.85	4.23	-0.34	0.50	2.60
大型車	-2.03	11.17	29.63	197.07	-2.62	5.26	2.71

これらを NN に入力し，最も精度が高くなるようモデルを設計した結果を表 1 に示す．学習には総交通量ではf_{E10}，f_{20}，f_t，大型車交通量ではf_{20}，f_{E20}を用いた．平日の誤差の平均は総交通量が既往研究 [1] の 8.83%から 1.18%に，大型車交通量は 13.33%から 10.16%となり精度が向上した．ただし大型車交通量では交通パターンが変化する週末（11/21, 22）の精度が得られておらず，今後訓練データの構成などを検討する必要がある．

4. 鋼橋を対象とした車線別 ADTT の推定

橋梁の性能照査では ADTT が入力交通荷重に関するパラメータとして用いられる．現行の鋼橋疲労照査 [3]でも車線別 ADTT が用いられている．そこで既存鋼橋（下路式単純鋼床版鋼 3 箱桁橋，1 方向 2 車線）を対象に，振動データによる車線別大型車交通量の推定を実施した．加速度データは，各桁のスパン中央に無線加速度センサノードを設置し，2017/1/6～1/19 の 14 日間常時データ取得した．交通量データは 1/7(土)11:00-14:00，1/11(水)8:00-20:00，1/12(木)8:00-20:00，1/17(火)9:00-13:00，14:00-18:00，1/18(水)17:00-20:00 の計 38 時間，数取器で現場カウントした．尚，軽トラックを除く荷台のついた車両を大型車とした．特徴量の抽出には前章と同様に包絡線のピーク値を用い，包絡線ピーク値が対象橋梁の常時微動 1.5gal以上を記録する回数$f_{E1.5}$を設定した．これは車両が通過することで記録される常時微動以上の加速度のサンプル数が，重量の大きい大型車では普通車より多くなるとの考えからである．前章での推定と同様に NN を構築した結果，両車線ともに学習に用いたデータを除く 26 時間分（およそ 1 日あたり）総大型車交通量の実測値と推定値の誤差が 5%以下となった．学習には各車線下の桁での加速度データの尖度と，$f_{E1.5}$を用いた．図 2，図 3 に左右両車線における実測値と推定値を比較したグラフを示す．

疲労照査 [3]では式(1)，式(2)のように累積損傷度の算出に車線別 ADTT を用いる．

$$n_{ti} = \gamma_n \times 365 \times Y \times (ADTT)_{SL} \quad (1)$$

$$D = \sum_i \frac{n_{ti}}{N_{i,j}} \leq 1.0 \quad (2)$$

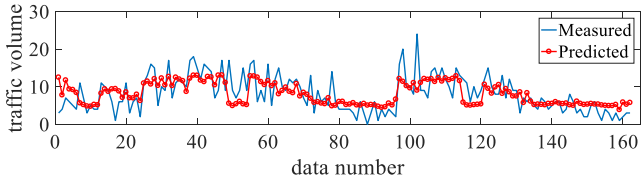

図 2 左車線の大型車交通量実測値と推定値の比較

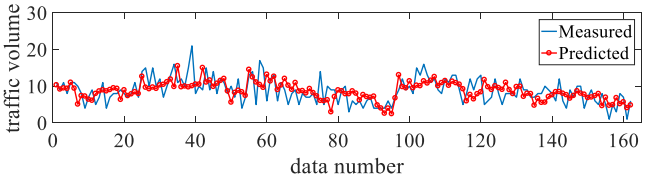

図 3 右車線の大型車交通量実測値と推定値の比較

ここでn_{ti}は載荷回数，γ_nは頻度補正係数，Yは設計供用年数，$N_{i,j}$は疲労寿命，Dは累積損傷度，$(ADTT)_{SL}$は車線あたりの ADTT である．

累積損傷度は疲労の蓄積度合いを表し，D=1 に達した時に疲労破壊に至る．対象橋梁の累積損傷度を概算すると，ADTT の誤差が 100 台の場合，損傷度の誤差はわずか 0.01 である．誤差の大きい左車線での大型車交通量を車線別 ADTT に換算した場合，実測値約 1310 台に対して誤差は約 54 台であったため，本研究での交通量推定は鋼橋疲労照査に十分適用可能だと考えられる．

5. 結論

本研究では振動モニタリングデータの波形特徴量を用いた NN での橋梁交通量の推定を行った．その結果，波形包絡線から得る特徴量を追加したことで総交通量と平日の大型車交通量の推定精度を向上できた．さらに鋼橋を対象として車線別大型車交通量推定を行い，26 時間総交通量で 5%以下の推定を実現し，鋼橋疲労照査への入力 ADTT として有効である可能性を示した．

謝辞

本研究では，実鋼橋での計測におきまして横浜市道路局橋梁課よりご協力を賜りました．また，無線加速度センサを用いたデータ取得におきまして，東京大学准教授長山智則先生と研究室の皆さまに多大なるご協力をいただきました．ここに感謝の意を表します．

参考文献

1）伊藤駿，西尾真由子：橋梁振動波形特徴量の重回帰分析による交通量推定式の構築，構造工学論文集，Vol.63A, pp.239-250，2016.

2）岡谷貴之：深層学習，講談社，pp.7-16，2015.

3）玉越隆史：道路橋示方書（鋼橋編）の疲労設計の考え方，第 6 回鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集，pp.13-20，2003.