

一般道の連続鋼箱桁橋における無線加速度計を利用した簡易 BWIM

東京大学大学院 正会員 ○加藤宗 長山智則 王浩祺 蘇迪
横浜国立大学大学院 西尾真由子

1. はじめに

実働活荷重を簡易に把握できれば既設道路橋維持管理の合理化や設計活荷重の検討において有効と考えられる。Bridge Weight-In-Motion(BWIM)は橋梁応答から通過車両重量を逆推定する手法であり、様々な橋梁形式、適用条件で実績のあるひずみ計測による方法だけでなく、より安価、簡易に計測可能な加速度計の利用検討が進んでいる¹⁾。この場合、桁端部応答の閾値処理による車両検知、加速度二階積分で得られる桁中央たわみから重量推定を行うことが考えられるが、低速走行車両を含む一般道では、閾値により精度よく車両検知を行うのは困難であり、また、その検知時間誤差、あるいは車両速度変化が重量推定に影響する。さらに、積分誤差の生じやすい複数車両同時走行への適用事例はみられない。本研究では、複数車両走行時にも適用可能なカルマンフィルタによる積分誤差の生じないたわみ推定法²⁾を利用し、速度変化を考慮した、時間誤差、速度変化に対応した重量推定法を提案する。次に、波形特徴を考慮できる畳み込みニューラルネットワーク(Convolutional Neural Network: CNN)を利用することで車両検知精度向上を試みる。最後に提案 BWIM 手法の一般交通への適用からその重量推定性能を明らかにする。

2. 計測概要

計測対象とした橋梁は片側一車線、二径間連続鋼箱桁橋である。図-1 に各センサーの配置を示している。教師データ作成、車両検知精度評価のために約 4 時間のビデオカメラ計測、重量推定精度比較のため約 1 時間の応力聴診器でのひずみ計測を行った。図-2 に示す無線加速度計は計 18 箇所に設置し 12 日間の 100Hz 連続計測を行った。

3. 重量推定手法の提案、試験車両走行での検証

支間中央部における計測たわみ $D_m(t)$ は、加速度橋軸方向成分から得られる傾斜角と鉛直加速度を観測量とするカルマンフィルタを利用することで²⁾推定する。解析たわみ $D_p(t)$ は計測モードパラメータに基づくモードモデルにより算出する。計測一解析たわみの差分で表される目的関数 $F(\mathbf{p}) = \int_{t_1}^{t_2} \sum_n |D_m^n(t) - D_p^n(t, \mathbf{p})|^2 dt$ (n : センサー位置、

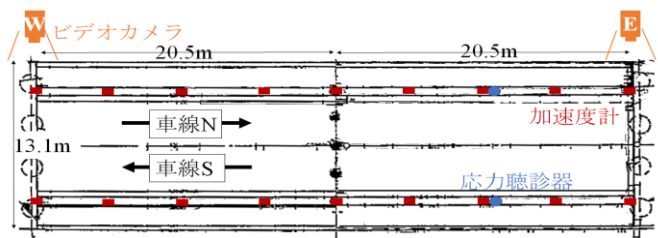


図-1 橋梁一般図，センサー位置



図-2 無線加速度計

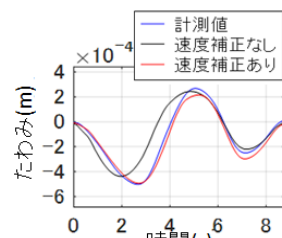


図-3 たわみ波形例

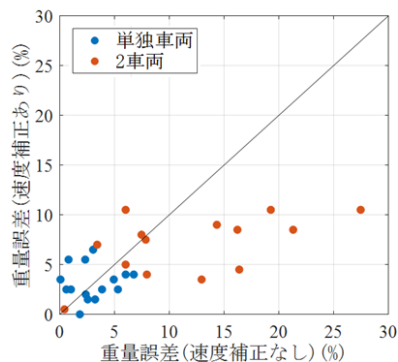


図-4 重量推定結果

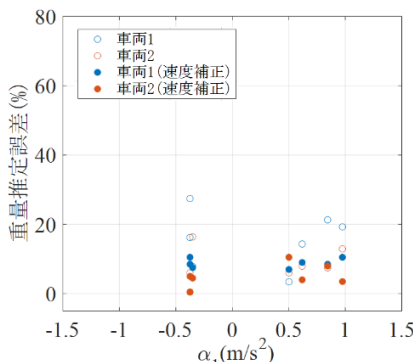


図-5 速度変化に対する誤差

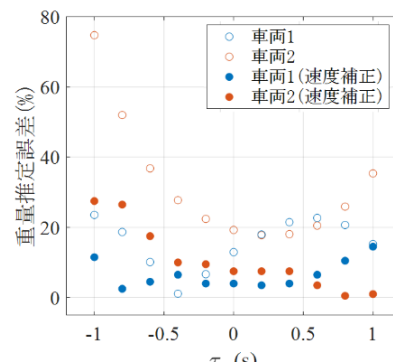


図-6 時間ずれに対する誤差

キーワード 無線加速度計, BWIM, 速度補正, ニューラルネットワーク

連絡先 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 東京大学橋梁研究室 TEL 03-5841-6097

p : 未知パラメータ)の最小化により重量推定を行うが、以下の二通りの方法で行う。一つは車両速度一定と仮定した場合であり($p=m$)、条件は線形行列方程式に帰着される。もう一つは車両速度に線形変化を仮定し速度補正する場合であり($p=m, \alpha$; α は速度変化パラメータ)、条件は非線形問題となるため遺伝的アルゴリズムを利用する。この手法を用いて 2t 程度の重量既知試験車両走行に対する重量推定を行った。図-3 に示すたわみ波形では、特に速度補正をした場合は計測値とよく一致している。図-4 の重量推定結果では複数車両走行時で特に速度補正による改善がみられ、その精度は 11%以内であった。図-5、図-6 はそれぞれ速度変化、入退出時間誤差に対する重量推定誤差を示しており、いずれも速度補正により誤差が低減していることがわかる。

4. ニューラルネットワークを利用した車両検知手法

図-7 に示した位置における桁端部加速度応答 $R_n(t)(n=1, 2, 3, 4)$ (図-8)から車軸通過時間、通過位置(J_1-J_4)を自動判定する。ビデオカメラから抽出した 90 分間、590 台の車両通過時間真値から対応する時間の加速度応答波形を教師データとして CNN により学習を行った。表-1 に 1 時間、403 台の車両走行に対する車両検知精度を示す。F 値に着目すれば、応答振幅の閾値処理による検知手法と比べ、波形全体を考慮した CNN では 30%程度改善した。

5. BWIM による車両重量分布推定

1 時間の車両走行について BWIM を実施した。図-10 から 5t 以上の車両に着目すれば、ひずみ計測での重量推定結果と比べ速度補正をした場合には誤差は 9.1%となることがわかった。図-11 から従来手法であるケース C と比べ、提案手法であるケース B では頻度分布の精度は 121 台分改善した。図-12 はある平日における推定重量分布である。10t 程度の路線バスによるピークがみられること、明らかに 25t を超える過積載車両がなかったことが読み取れる。

6. まとめ

速度補正により速度変化、時間誤差に対する重量推定誤差の影響が低減され、複数車両走行においても 11%程度の精度であること、CNN の利用により車両検知精度が 30%程度改善されることが確認された。提案 BWIM 手法によりひずみ計測による手法と同程度の精度での BWIM が可能であることが示され、対象路線の交通荷重特性が明らかにされた。

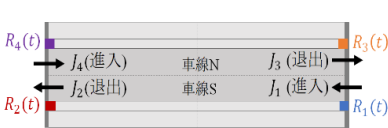


図-7 車両検知センサー

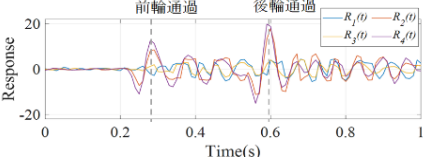


図-8 車両検知応答例

表-1 車両検知精度			
	再現率 (Recall)	適合率 (Presicion)	F 値
CNN	77.9	82.9	80.3
閾値	41.4	65.0	50.6

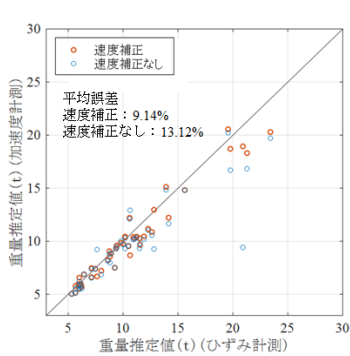


図-10 ひずみ計測との比較

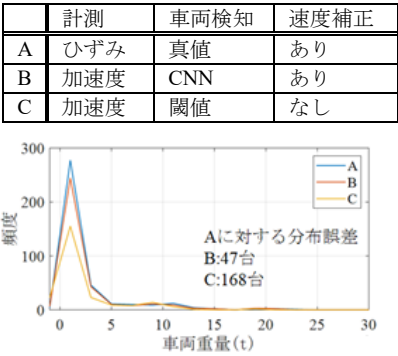


図-11 従来手法との比較

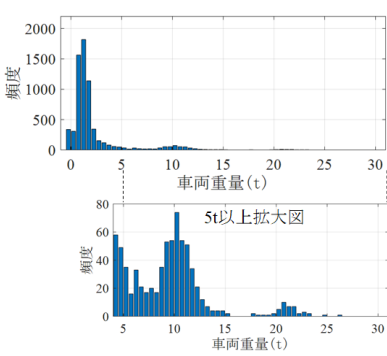


図-12 1 日分の重量分布

謝辞 本研究を進めるにあたり、横浜市道路局橋梁課 宮岸涼氏、大島尚樹氏に貴重なご意見を賜りました。ここに深く謝意を表します。

参考文献

1) 関屋英彦, 小西拓洋, 木ノ本剛, 三木千壽: MEMS 加速度センサを用いた変位計測に基づく Portable-Weigh-In-Motion システムの提案, 土木学会論文集 A1, Vol.72, No.3, pp. 364-379, 2016. 2) T. Nagayama, C. Zhang : A numerical study on bridge deflection estimation using multi-channel acceleration measurement, 構造工学論文集, Vol.63A, pp.209-215, 2017.