

■受領No.1369

機械学習を利用したセルフアップデート機能を有する 一般道路橋の B-WIM システム

代表研究者

竹谷 晃一

東京工業大学 環境・社会理工学院 特任講師



1. 研究目的

橋梁の劣化損傷の主要因である過積載車など重量車交通の状況の把握が求められており、橋梁の動的構造応答から通行車両の重量を分析する Bridge Weigh-in-Motion (B-WIM) の研究が進められているが、環境や構造変化に起因する長期的な精度の低下のほか、車両が複数走行する場合の検出精度など技術的課題が指摘されている。また、既往の B-WIM は試験車によるキャリブレーションが必須であり、コストや人員など社会的な課題も挙げられる。本研究は、振動センサから得られる構造応答波形の分析に加えて、カメラで撮影した動画像を用いた機械学習を取り入れることにより、試験車走行が不要な新しい B-WIM を開発することを目的とした。

2. 研究内容

2.1 対象橋梁と計測機器

対象橋梁は山梨県甲府市にある単純桁の一般道路橋である。図1と図2に対象橋梁の側面図と断面図および計測位置を示す。対象橋梁は片側1車線の対面交通であり、上下線の桁は独立して挙動している。側面図手前側の下り車線の交通を分析対象として、車両の走行方向を起点として第二径間 (P1-P2間, 支間10m) で計測を行った。たわみ応答ベースの B-WIM を想定しており、橋梁の加速度応答からたわみ応答を算出することを想定しているが、本報告では同位置で計測したたわみデータを直接用いた。

たわみ量の計測はレーザー変位計 (Keyence, LK-500) を三脚に設置して計測した (図3)。下り車線を通る車両の識別を行うため、ビデオカメラ (Sony, FDR-AX55) による撮影を行った。交通状況を確認できるように橋梁の A1 橋台から P3 橋脚までの範囲が撮影できる距離から撮影を行った。ビデオ画像から確認された対象橋梁上を走行する路線バスの外観を図4に示す。対象橋梁を通る路線バスの車種は、車両の年式やステップの有無、座席配置などの違いはあるが、大きく分けて2種類が確認された。

2.2 背景差分による車両位置の同定

動画像から車両を追跡し位置の取得を行うシステムを構築した。使用したソフトウェアは MATLAB 2018a である。混合ガウスモデルを利用した背景差分法により動体である前景を抽出し、モルフォロジー処理を利用してノイズ成分の除去を行った。背景モデルの初期学習では車両が通行していない60フレーム (2秒) 以上の画像を利用した。雲や雲の影、太陽光の角度の時間変化が背景に与える影響に対応するため、新たなフレームから背景モデルのパラメータの更新を行った。

次に、抽出したそれぞれの前景 (車両) に対してナンバリングを行うことで、複数の車両の同時追跡を行う。ナンバリングにはカルマンフィルタを利用した。等速度を仮定したカルマンフィルタから算出されるそれぞれの車両の予測位置と、実際に観測され

た前景の位置を照合することで各フレームの車両を同定して追跡を行った。本研究では位置の始点は P1 橋脚上として、車両の進行方向、すなわち P2 橋脚の方向を正方向としている。GMM とカルマンフィルタを利用した背景差分法による車両解析結果の一例を図 5 に示す。車両位置の時刻歴を自動抽出した上で、目視で判断した車軸の相対距離を用いることで車軸位置の時刻歴を取得した。

2.3 実測ベースの影響線の算出

背景差分法を用いた動画画像分析により取得した

車軸位置の時刻歴とたわみの時刻歴を同期させて、たわみの影響線の算出を行う。試験車両のかわりに動画画像から得られる路線バスや一般車両の車種情報を利用する。影響線の算出プロセスを図 6 に示す。はじめに、影響線 $L(x)$ と軸重 W のおおよそ値を初期値として設定する。対象とするすべての車両の合計軸数を N 、離散値で表す影響線のサイズを K とすると、影響線 $L(x)$ はサイズ $[K \times 1]$ のベクトルであり、軸重 W はサイズ $[N \times 1]$ のベクトルである。

次に、動画画像から得られる車軸位置の時刻歴データを基に、影響線 $L(x)$ を車軸毎に時間軸上に変換し、

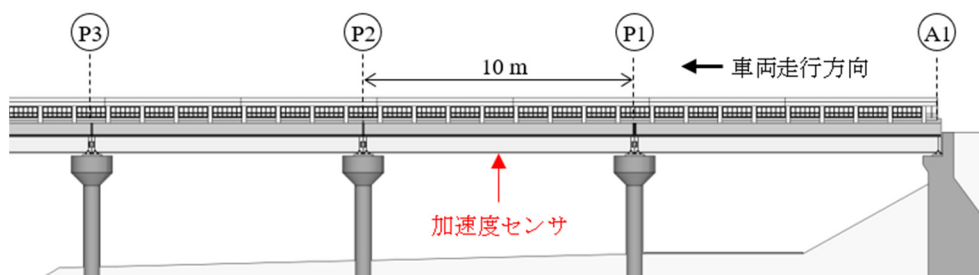


図 1. 対象橋梁の側面図および橋軸方向における加速度センサの設置位置

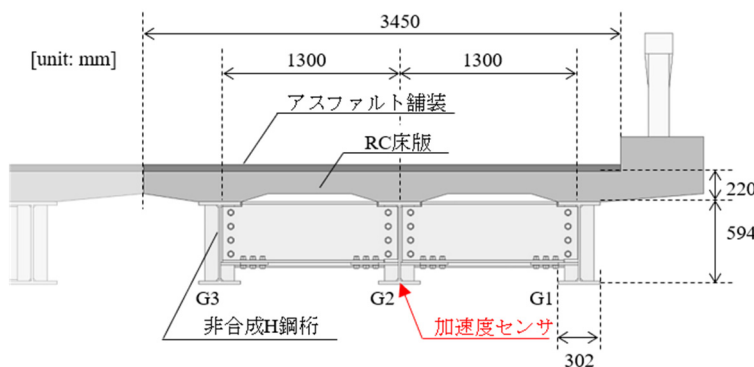


図 2. 対象橋梁の断面図および加速度センサの設置位置



図 3. P1-P2 径間の鉛直方向変位の計測



図 4. 橋梁上を通過する路線バスの一例

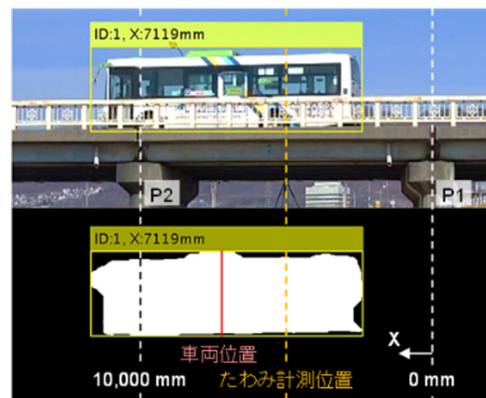


図 5. GMM を利用した車両位置の同定結果の一例

等間隔の時間でリサンプリングを行う。対象とする時間軸の長さを T とすると、時間軸上に変換した影響線 $L(t)$ はサイズ $[T \times N]$ の行列である。この影響線 $L(t)$ に軸重 W を乗じると影響線と軸重からたわみの時刻歴が算出される。算出したたわみの時刻歴と計測たわみ $D(t)$ のユークリッド距離を評価関数とし、評価関数が最も小さくなる影響線の形状 $L^*(x)$ と軸重 W^* を直接探索法により探索する。探索は複数回を行い、解が収束することを確認することで局所解を避けることができる。評価関数は時間軸上に変換された影響線と軸重および計測たわみを用いて次のように表される。

$$f(L(t), W, D(t)) = \|L(t) \cdot W - D(t)\| \quad (1)$$

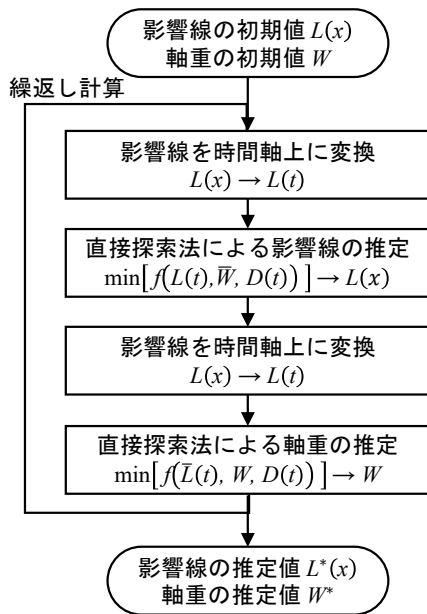


図6. 実測に基づく影響線の算出フロー

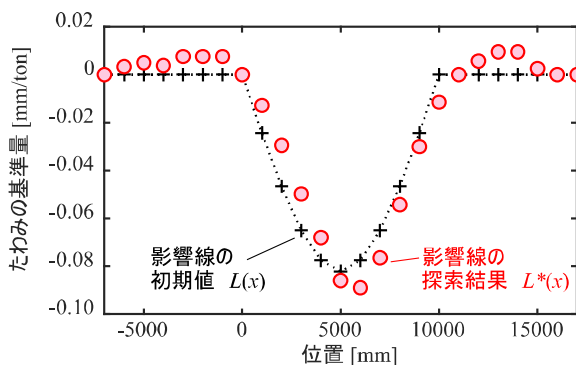


図7. たわみの影響線の初期値 $L(x)$ と探索結果 $L^*(x)$

本研究では影響線 $L(x)$ の初期値は梁理論に基づく値とし、軸重 W は車両重量を軸数で分割した値を初期値とした。影響線の算出で用いた車両は、2台の路線バスと2台の乗用車であり、合計の軸数 $N = 8$ である。動画像からは路線バスの乗客は確認されないため、乗客を含めない公称重量を用いている。また、本研究で対象とした橋梁は単純桁であるが、計測した第2径間主桁の鉛直たわみの分析から、他径間のたわみの影響を少なからず受けていた。そこで、P1橋脚上を水平方向の基準点 $x = 0\text{m}$ 、P2橋脚上が $x = 10\text{m}$ として、 $x = -7 \sim 17\text{m}$ 間を影響線の対象範囲とした。本研究では影響線 $L(x)$ を間隔 1m の離散値で表現している ($K = 25$)。

探索の結果得られた影響線を図7に示す。

2.4 車両重量の推定

算出した影響線と変位計測および画像解析による車両の位置同定を用いて軸重の算出を行った。図8は軸重の算出プロセスを示している。動画像から得られる対象車両の車軸の位置情報を用いて、車軸ごとに影響線を時間軸上に変換する。次に、式(1)で示した評価関数を用いて評価関数が最小となる軸重 W^* を算出する。ここで評価関数は非負の線形最小二乗問題である。

本研究では軸重を算出した後に車両の総重量を算出して公称重量との比較検討を行っている。路線バスを含む大型車両はサスペンションの影響で軸重が動的に作用しているため活荷重から推定する軸重はばらつきが大きくなる。一方、軸重の合計である総重量はほとんど変わらないため、総重量を用いて精度の検証を行った。提案するB-WIMによる車両毎の軸重及び総重量の算出結果を表1に示す。中型路線バスの軸重を算出しその総重量を公称重量と比較すると5.7%の誤差であった。また、大型路線バスDが通過するときは渋滞のため桁上で一旦停止するまでに速度が変化した。算出した総重量と重量の誤差は1%以下であった。大型路線バスとダンプトラックの外観と車軸位置を図9に示す。

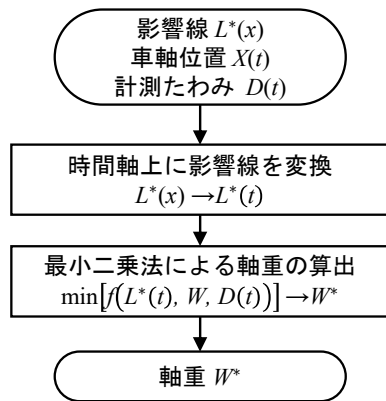


図 8. 軸重の計算プロセス

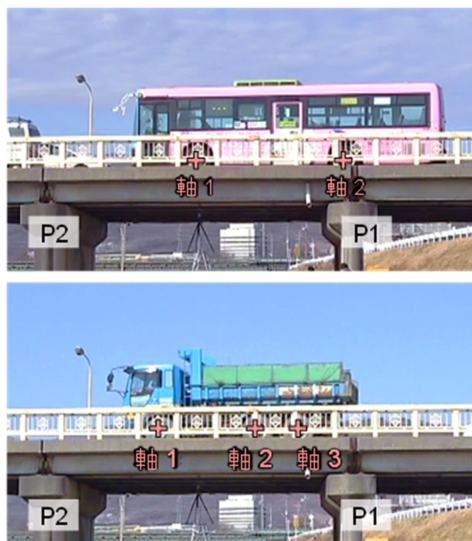


図 9. 重量推定の対象とした車両と車軸位置
(a) 大型路線バス (b) ダンプトラック

2.5 まとめと考察

本研究では画像解析とたわみ計測に基づく B-WIM の検討を行った結果、複数の路線バスや乗用車を用いた実測ベースの影響線の算出方法を構築した。カルマンフィルタを利用して複数の車両を同時に追跡することで、複雑な交通流にも対応できる B-WIM の構築を行った。複数の路線バスと乗用

車を利用し、カメラから得られる車両位置の時刻歴とたわみ計測のデータを統合することで、たわみの影響線を直接探索法と繰り返し計算によって算出する方法を提案した。今後は加速度応答の計測からたわみ応答を算出する方法について検討を行うとともに、カメラ画像から車両情報のラベリングを行い教師データとすることで、ニューラルネットワークを活用して加速度応答から車両情報を取得することを目指している。加速度応答からたわみの影響線や通行する車両の車種、重量等の情報を取得することが可能となれば、より実用的なシステムが構築できると考えている。

3. 発表 (研究成果の発表)

- 1) 竹谷晃一, 吉田純司: 一般自動車と動画画像分析を活用した低速走行車に対応した B-WIM の提案, 鋼構造年次論文報告集, Vol.27, No.85, pp.665-672, 2019.
- 2) K., Takeya, and J., Yoshida: Basic Study on Bridge Weigh-in-Motion using Optical Flow Analysis, 5th International Conference on Science, Engineering and Environment (Bangkok, Thailand), No.5604, pp.1-6, 2019.
- 3) K., Ota, S., K., Takeya, and J., Yoshida: Statistical Analysis of the Influence of Traffic and Environmental Disturbances on Damping in a Bridge, 5th International Conference on Science, Engineering and Environment (Bangkok, Thailand), No.5628, pp.1-6, 2019.
- 4) 竹谷晃一, 吉田純司: 動画画像解析を利用した簡易型キャリブレーションによる B-WIM の実験的検討, 土木学会第 74 回年次学術講演会 (香川), I-127, 2019.

表 1 走行車両の軸重と総重量の算出結果

車両(公称重量)	軸1	軸2	軸3	合計	誤差
中型路線バス (7,315 kg)	2,809 kg	4,090 kg	-	6,899 kg	-5.7 %
大型路線バス (10,630 kg)	4,118 kg	6,433 kg	-	10,551 kg	-0.7 %
ダンプトラック (不明)	3,548 kg	4,812 kg	2,692 kg	11,052 kg	-