

多点多軸加速度計測を利用した橋梁のたわみ推定

東京大学 正会員 ○長山智則

東京大学 学生会員 Chunbo Zhang

1. はじめに

橋梁のたわみは使用性の観点から限界値が規定されているだけでなく、橋梁上を走行する車両重量を推定する上でも有用な物理量であるものの、実たわみを測定することは容易ではない。リング式変位計などでたわみを直接推定するためには参照点が必要になるが、実橋梁では参照点が得られない場合も多い。光学式のたわみ計測も近年では現実的になってきたものの、カメラキャリブレーションが煩雑である場合もある。また、長期に渡りたわみ計測をする場合は電源確保が実務的な制約やコストとなることも多い。無線センサネットワークを利用して乾電池ベースで数ヶ月に渡り精緻に多点多軸加速度計測することが現実的になってきたことから、これを活用した加速度計測ベースのたわみ推定アルゴリズムを構築し、数値シミュレーションおよび現地計測によりそのたわみ推定性能を明らかにした。

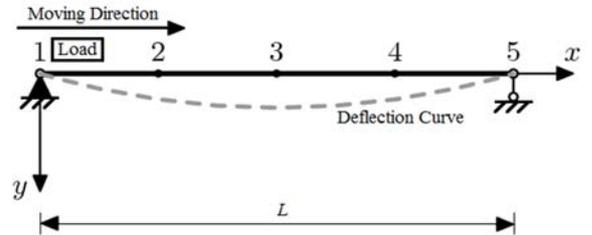


図 1 移動荷重下の単純支持梁と計測点

2. たわみ推定アルゴリズム

橋梁の傾斜角を加速度計測に基づいて以下のように推定する。ここで、 A_x は橋軸方向計測加速度、 g は重力加速度、 θ は傾斜角である。

$$\theta = \arcsin \frac{A_x}{g} \tag{1}$$

図 1 に示す単純支持梁のたわみを考える。以下の状態方程式によりたわみとその観測を定式化する。

$$X_k = FX_{k-1} + w_k \tag{2}$$

$$Z_k = HX_k + v_k \tag{3}$$

$$X = [q_1 \ \dot{q}_1 \ \ddot{q}_1 \ \cdots \ q_n \ \dot{q}_n \ \ddot{q}_n] \tag{4}$$

ここで、 X はモード座標を利用した状態ベクトル、 Z_k は観測量ベクトルでその要素には鉛直加速度あるいは式(1)で推定する傾斜角を含む。観測量に応じて、観測行列 H の各行は以下の H_{acc} 、 H_{inc} で表される。 $\phi_{x,i}$ は仮定した形状関数、 $C_{x,n}$ は n 次形状関数の場所 x における傾斜角である。

$$H_{acc} = [0 \ 0 \ \phi_{x,1} \ \cdots \ 0 \ 0 \ \phi_{x,n}] \tag{5}$$

$$H_{inc} = [C_{x,1} \ 0 \ 0 \ \cdots \ C_{x,n} \ 0 \ 0] \tag{6}$$

$$\phi_{x,i} = \sin\left(\frac{i\pi x}{L}\right) \tag{7}$$

この状態方程式をカルマンフィルタにより解くことで状態ベクトルの成分としてモード座標が推定でき、さらにモード座標から物理座標に変換することでたわみ量を推定できる。

3. 移動荷重下の単純支持梁への適用

図 1 に示す、移動荷重下の単純支持梁の応答に対して上述のたわみ推定アルゴリズムを適用した。観測量として、加速度のみ、傾斜角のみ、傾斜角と加速度の両方を仮定して、たわみ推定した所、加速度のみの場合はドリフト成分が大きく、また、傾斜角のみの場合は高周波数成分の推定精度が低い事がわかった。そこで、傾斜角に加えて加速度を観測量として設定した。仮定するモード次数に応じて可観測性を満たす計測点数が変わるが、ここでは

キーワード たわみ、無線センサ、カルマンフィルタ、傾斜角、加速度

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 03-5841-6098

梁の挙動を記述するために1-3次の3モードを採用し、それに応じて、3点以上の傾斜角計測と1点の鉛直加速度を利用することとした。図2に4つの移動荷重が通過する場合のたわみ量推定値を、真値とともに示す。加速度を2回積分し、ハイパスフィルターを適用した結果も合わせて示す。通過車両が1台の場合、車両進入・退出時のたわみが0であると仮定するなどして、2回積分でもたわみ推定は可能である。しかし複数車両が通過し積分時間が長くなる場合2回積分では推定精度が低い。一方で、提案手法では通過車両の台数に拘らず正確にたわみ量を推定できることが分かる。

4. 鋼箱桁道路橋への適用

鋼箱桁道路橋において無線センサネットワーク¹⁾を利用した振動計測を行い、本アルゴリズムを適用した。センサノードにはEpson社製加速度計M-A351が搭載されており、3軸加速度を計測できる。橋軸方向に加速度にローパスフィルターを適用し、傾斜角成分を抽出したものが図3である。橋軸方向に5台設置した無線ノードはたわみに応じて想定される傾斜角を出力している。

たわみ推定を適用した結果を図4に示す。レーザー変位計によるレフエレンス計測も実施しておりその比較も示す。加速度計測は乾電池を利用して2週間実施しているが、レファレンス計測等が利用可能でたわみ推定

可能なデータ4時間分程度について分析した。本提案手法では単純桁で想定される正のたわみ量を推定できている。しかし、レファレンス計測値による計測値とは差が確認できる。そこで、橋軸方向の加速度成分や形状関数の推定誤差に起因する誤差を補正する仕組みを導入し、図4に合わせて示す。これらの補正をしてもレファレンス値との差は説明できない。そこで、加速度計測値の短時間2回積分と比較すると、提案手法と整合的であり、レファレンス値とは一致しない事が確認できた。レファレンス計測値に誤差が含まれている可能性がある。

5. まとめ

加速度計測に基づいて橋梁のたわみを推定する手法を提案した。多数車両が連行したり、渋滞が生じたりしても原理上推定精度が低下しない手法である。シミュレーションおよび現地計測により本手法のたわみ推定性能を明らかにした。

謝辞：本研究の一部は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の「SIP インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」(管理法人：JST)および鋼橋技術研究会センシング技術を用いた構造評価に関する研究部会によって実施されました。横浜国大西尾真由子准教授、横浜市道路局橋梁課渡邊史氏には計測にあたり貴重なご助言を頂きました。ここに謝意を示します。**参考文献** 1) M Suzuki 他: Development and field experiment of routing-free multi-hop wireless sensor network for structural monitoring, Proc. the International Conference on Smart Infrastructure and Construction, Cambridge, UK. 27-29 June 2016.

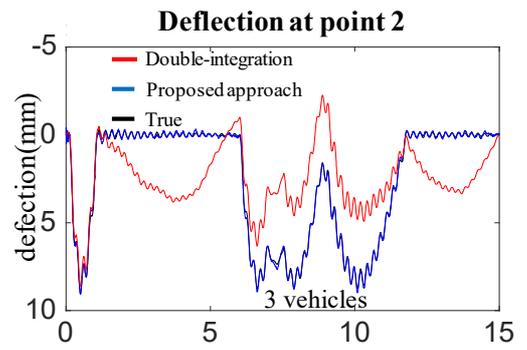


図2 たわみ推定値 (シミュレーション)

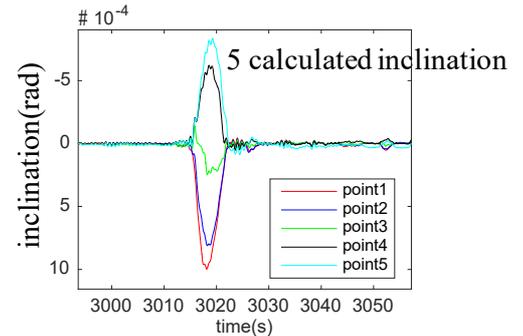


図3 断面振動モード、開閉モード形状、断面

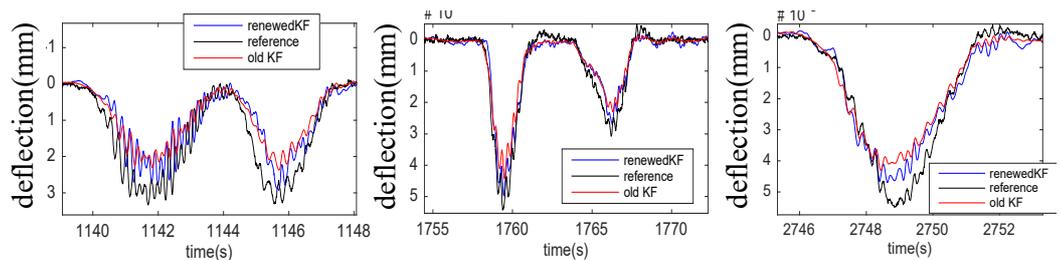


図4 たわみ推定値 (鋼箱桁橋野実測値)

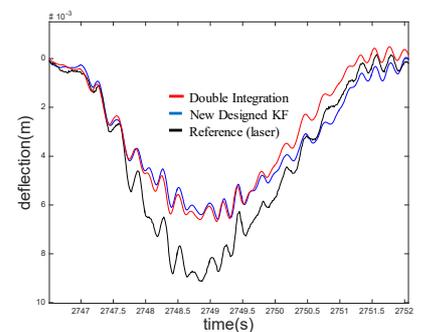


図5 提案手法と短時間加速度2回積