

令和 2 年 6 月 9 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03295

研究課題名(和文) 無線センサによる加速度・傾斜計測とデータ同化を活用した活荷重・衝撃力簡易推定

研究課題名(英文) live load and impact load estimation using wireless acceleration and angular velocity measurement and data assimilation techniques

研究代表者

長山 智則 (Nagayama, Tomonori)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・准教授

研究者番号：80451798

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,100,000円

研究成果の概要(和文)：まず、橋梁に設置した無線加速度計のみを用いて、交通荷重による橋梁のたわみを推定するアルゴリズムを開発し、実橋梁において実証実験を行った。傾斜角推定を利用することにより、数値積分を省略し、従来の加速度計測に基づくたわみ推定の課題を解消するものである。次に、推定されたたわみに基づいて、橋梁上を通過する車両の重量を推定するアルゴリズムを開発した。多数車両が同時に走行する場合であっても、個別車両の重量に分解して推定することが可能な仕組みである。最後に、車両側に設置したセンサにより車両応答を計測し、逆解析することで、車両から橋梁に作用する動的荷重を推定するアルゴリズムを開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

道路橋の疲労劣化においては構造物側の状態に加えて、作用荷重が支配的となる。5年に1度の定期点検において道路橋の状態評価がなされている一方で、過積載車両を含む活荷重実態は、それを効率的に把握する手法が限定的である。そこで、設置が容易な無線加速度計を利用して簡易に走行車両の重量を推定するアルゴリズムを開発するとともに、車両からタイヤを介して橋梁に作用する衝撃的荷重を評価する仕組みを提案した。

研究成果の概要(英文)：An algorithm to estimate bridge deflection due to traffic load by using wireless accelerometers was developed. The algorithm is then experimentally validated on a bridge. The algorithm utilizes inclination estimation and eliminates the necessity of numerical integration. The problem of numerical instability existing in conventional deflection estimation based on acceleration measurement is thus addressed. Then an algorithm to estimate the weight of vehicle driving on a bridge using the estimated deflection is developed. Even when multiple vehicles are running on a bridge, the weight of each vehicle can be decomposed and evaluated. Finally, vehicle responses measured by the sensors installed on a vehicles are inversely analyzed and the load transmitted through the tire to the bridge is evaluated.

研究分野：構造工学

キーワード：BWIM 活荷重評価 道路橋 疲労損傷 無線センサ 車両動揺

1. 研究開始当初の背景

我が国の道路橋では過積載車が走行し、疲労寿命を縮めていると懸念される。橋梁の点検・補修を如何にしようとも、過大な作用外力を把握・考慮しなくては効果的な維持管理は実現しない。しかし、活荷重(車両重量や静的軸重)の実態が把握されている橋梁は極一部である。部材の歪を計測して走行車両重量を推定する Bridge Weigh-In-Motion(BWIM)は、歪ゲージ貼付けや配線等に手間・時間を要し、導入・維持費が高いこともあり普及していない。加速度計を利用する簡易 BWIM も近年提案されているが、適用は限定的である。

さらに、衝撃荷重(動的作用外力)の実態も把握されていない。伸縮装置前後の床版は特に、不陸によって大きな衝撃が作用し、損傷も少なからず報告されている。衝撃係数でその影響を考慮するものの、衝撃荷重が特に大きい場所が存在する。この衝撃荷重の実態は把握されておらず、不陸調整の戦略や予防保全的維持管理において考慮できていない。

活荷重や衝撃荷重の簡易で現実的な評価手法が未だ存在しない。荷重および構造物の抵抗の実態を踏まえた性能評価・維持管理の実現・学術的展開に向けて、簡易荷重評価が欠かせない。

2. 研究の目的

一般橋梁に広く適用することを想定した、「新たな原理の簡易活荷重推定手法」と、「作用力」としての把握が困難であった衝撃荷重を車両応答から簡易推定する方法の開発を目的とした。

3. 研究の方法

まず、加速度計測データから橋梁のたわみを推定するアルゴリズムを、データ同化手法に基づいて開発した。研究着手以前に、シミュレーションに基づいて研究代表者が提案していた手法に改良を加え、実橋梁における検証試験を通して構築したものである。

次に、推定した橋梁たわみを逆解析することで通過車両の重量を推定するアルゴリズムを開発した。従来の方法では桁歪に対して同様の逆解析を適用していたが、ここではたわみに対して逆解析を適用した。車両重量推定においては車両の通過タイミングを推定することが必要になるが、これに機械学習を適用することで、計測加速度信号から自動的に車両通過タイミングを推定する仕組みを整えた。これを研究代表者らが開発してきた無線加速度計を利用した実橋梁モニタリングにより検証した。

最後に、車両に搭載したスマートフォンや MEMS 型センサを利用して車両応答を計測し、研究代表者がこれまで開発してきた車両応答逆解析手法を援用することで、タイヤを介して橋梁に作用する衝撃荷重を評価した。特にジョイント(橋梁と橋梁の間の伸縮装置)前後における衝撃荷重が大きいことから、ドライブレコーダ画像の機械学習処理により、ジョイント位置を判別し、この位置に対応する衝撃荷重を推定することとした。

4. 研究成果

(1) 無線加速度計による橋梁たわみの推定

加速度と傾斜角を観測量とし、モード変位、速度、加速度を状態変数とするカルマンフィルタを設計し、たわみ推定する方法を提案した。しかし、仮定したモード形と実モード形に乖離がある場合や橋軸方向加速度成分が大きい場合にたわみ推定に誤差が生じる。そこで、橋梁の有限要素モデルを構築し(図1)、提案手法の精度を明らかにするとともに、補正方法を検討した。短時間数値積分によるたわみ推定値と、カルマンフィルタによるたわみ推定値を比較し、モード形をキャリブレーションすることで推定精度の改善を確認した(図2)。

次にこの方法を用いて、実橋梁で検証実験を行った。1つ目は横浜市の鋼箱桁橋の大綱橋(支間長約23m)である(図3)。無線加速度計を設置し、提案手法を適用することでたわみを推定した。サンプリングモアレカメラを利用してたわみの基準値を得て、提案手法による推定値を比較したところ、高い精度でたわみ推定可能なことを確認できた。2つ目の橋梁は、九島大橋の側径間(支間長約140m)である(図5)。レファレンスとして、レーザードップラー速度計によるたわみ計測値を用いた。橋長が長い場合には、モード形の補正を行わずとも、高い精度でたわみ推定可能であることが明らかになった。

(2) 無線加速度計による車両重量の推定

走行車両の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し、数値シミュレーションによりその効果を検討した。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、車両が対象橋梁に進入、退出する時刻の検知を図った。さらに、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した。設置が容易な無線加速度計により、疲労損傷の支配要因である活荷重を簡易に評価することを可能とする手法である。

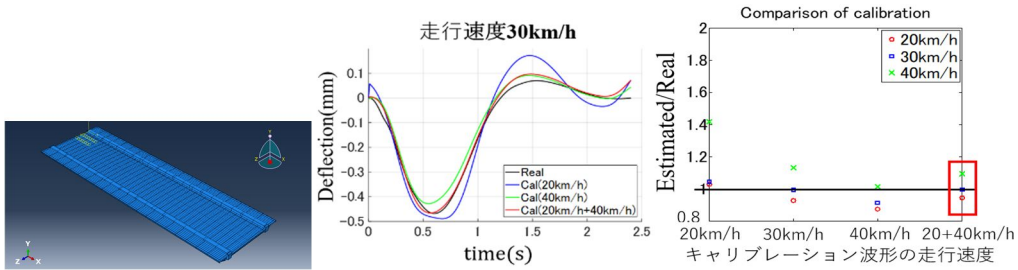


図 1 ABAQUS 解析モデル 図 2 波形のキャリブレーションによるたわみ推定結果



図 3 無線加速度計による橋梁応答計測

(a) 無線加速度計 (b) 設置の様子 (c) 桁に設置された無線加速度計

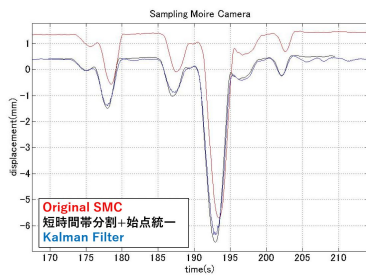


図 4 サンプリングモアレカメラによるたわみ計測基準値とカルマンフィルタによるたわみ推定値

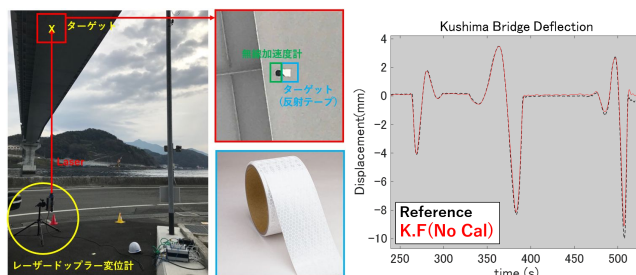


図 5 現地計測の様子と、たわみ推定値

車両重量推定法は、桁歪計測に基づく既往の BWIM と同様に、たわみに関する影響線をまず推定し、仮定した車両重量と影響線から求められるたわみ計算値が計測たわみに近づくように車両重量を逆算した。ただし、既往の BWIM では影響線を求めるために荷重車走行試験が必要なことから、走行速度が変わらない仮定が必要なことから、これらの改善・解消を図った。影響線を求めるためには、モーダルモデルを採用し、設計図書に記載されている死荷重を活用することで、荷重車走行試験を行わずに影響線を求める方法を開発した。走行速度が変動する場合を想定して、車両走行速度の変化、つまり加速度を、同定パラメータに加えて遺伝的アルゴリズムによりパラメータ同定することで走行速度変化を許容する車両重量推定法を提案した。

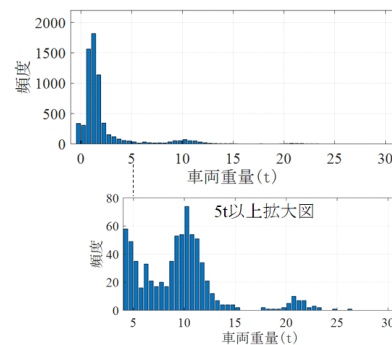


図 6 1 日分の車両重量分布

車両検知においては、桁端部に設置された加速度計の振幅を基準に車両通過タイミングを判別する試みがこれまで報告されているが、実橋梁での検証を行ったところ誤判定が多数発生した。そこで、畳み込みニューラルネットワーク(CNN)を利用した判別を適用した。具体的にはビデオカメラにより橋梁上を通過する車両を録画し、車両通過タイミングの真値を取得し、対応する加速度応答を教師データとした。これにより CNN を学習させ、残りのデータに適用することで 8 割程度の精度で車両通過タイミングを把握することができた。

約 2 週間にわたり、無線加速度計により連続計測した記録を分析したところ、平日と休日において明確に異なる車両重量分布を確認できた。当該路線では過積載車に相当する車両は、特に休

日ではほとんど確認されなかった。一方で、バス路線であることから、バス重量に相当する 10 トン前後の車両が平日、休日共に、多数検知された(図 6)。なお、車両重量推定アルゴリズムでは、全ての車両を二軸車と仮定して重量推定しているが、実際には 3 軸車、4 軸車等の多軸車が走行しており、この仮定の妥当性を検討した。ビデオ撮影画像から 3 軸車走行時のデータを抽出し、歪計測値に基づく既往の方法で 3 軸車として重量推定したものと、2 軸車を仮定した提案手法を比較したところ、その違いは 10% 以内であり、二軸車の仮定による誤差は限定的であることが確認された。

(3) 車両応答計測によるジョイントにおける衝撃荷重の推定

研究代表者の開発している、車両動揺逆解析に基づく路面評価アルゴリズムをベースに、タイヤの加速度応答を観測量に加えることで、タイヤを通じた橋梁への接地力を正確に推定する方法を開発した。図 7 に大学構内において行った走行試験における、タイヤ接触力の直接計測値(ロードセルによる)と、推定値の比較を示す。正確に推定できていることが分かる。

次いで、画像の機械学習処理により、ジョイント部の自動抽出を行った。Google Street View からジョイント部の写真を取得し教師データとし、Single MultiBox Detector モデルによる機械学習を適用した。8-9 割程度の精度でジョイントを抽出することができた。

ジョイント位置におけるタイヤ接地力を、ある路線について調査し、走行速度の違いによる衝撃力への影響を補正して、ジョイント接触力のヒストグラムを推定した(図 8)。維持管理の必要性の高いジョイントを、接触力の観点から抽出することができた。

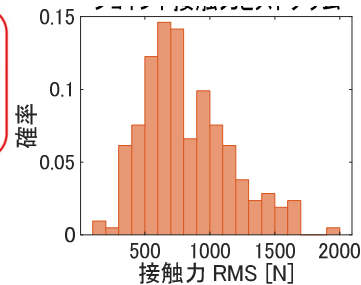
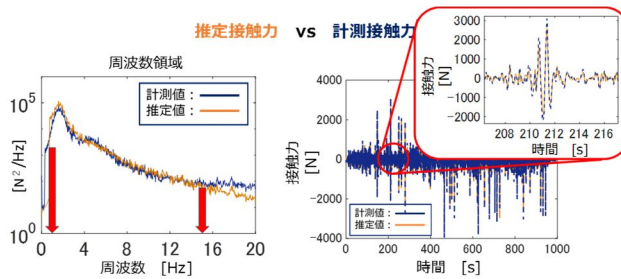


図 7 車両動揺計測に基づくタイヤ接地力の推定

図 8 ジョイント接触力ヒストグラム

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 H. Wang, T. Nagayama, D. Su	4. 巻 123
2. 論文標題 Estimation of dynamic tire force by measurement of vehicle body responses with numerical and experimental validation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Mechanical Systems and Signal Processing	6. 最初と最後の頁 369-385
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2019.01.017	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Wang Haoqi, Nagayama Tomonori, Su Di	4. 巻 188
2. 論文標題 Vehicle Parameter Identification through Particle Filter using Bridge Responses and Estimated Profile	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Procedia Engineering	6. 最初と最後の頁 64 ~ 71
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.458	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Wang Haoqi, Nagayama Tomonori, Zhao Boyu, Su Di	4. 巻 153
2. 論文標題 Identification of moving vehicle parameters using bridge responses and estimated bridge pavement roughness	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Engineering Structures	6. 最初と最後の頁 57 ~ 70
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.10.006	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Nagayama T., Reksowardojo A.P., Su D., Mizutani T.	4. 巻 150
2. 論文標題 Bridge natural frequency estimation by extracting the common vibration component from the responses of two vehicles	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Engineering Structures	6. 最初と最後の頁 821 ~ 829
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.07.040	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nagayama Tomonori, Zhang Chunbo	4. 巻 63
2. 論文標題 A numerical study on bridge deflection estimation using multi-channel acceleration measurement	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 構造工学論文集	6. 最初と最後の頁 209 ~ 215
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Wang Haoqi, Nagayama Tomonori	4. 巻 3
2. 論文標題 Two-step method for bridge modal mass identification using synchronously measured bridge and vehicle dynamic responses	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Lifecycle Performance Engineering	6. 最初と最後の頁 233 ~ 256
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://dx.doi.org/10.1504/IJLCPE.2019.103692	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計14件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 長山智則
2. 発表標題 Numerical Study on Vehicle Static and Dynamic Load Identification with Lane Detection from Bridge Acceleration and Inclination Data using Particle Filter Method
3. 学会等名 第 73 回土木学会年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 王浩祺
2. 発表標題 Tire Force Estimation through Measurement of Vehicle Body Acceleration and Angular Velocity
3. 学会等名 第 73 回土木学会年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tomonori Nagayama
2. 発表標題 Estimation of a continuous girder bridge's deflection using acceleration and inclination measurement
3. 学会等名 7th World Conference on Structural Control and Monitoring (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Haoqi Wang
2. 発表標題 Numerical study on dynamic tire force estimation from measurement of vehicle body responses
3. 学会等名 7th World Conference on Structural Control and Monitoring (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tomonori Nagayama
2. 発表標題 Deflection estimation of a steel box girder bridge using multi-channel acceleration measurement
3. 学会等名 IABSE Symposium (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Haoqi Wang
2. 発表標題 A Bridge Weigh-in-Motion Method by Moving Force Identification Using Augmented Particle Filter from Measured Bridge Acceleration and Inclination Data
3. 学会等名 ANCRiSST2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Tomonori Nagayama
2. 発表標題 High-accuracy Wireless Sensor Development and Its Application to Deflection Estimation of a Steel Box Girder Bridge
3. 学会等名 ANCRiSST2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 長山智則
2. 発表標題 多点多軸加速度計測を利用した橋梁のたわみ推定
3. 学会等名 第 72 回土木学会年次学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Tomonori Nagayama
2. 発表標題 Automatic vehicle passage detection using wireless accelerometers toward Bridge Weigh-In-Motion
3. 学会等名 ANCRiSST2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tomonori Nagayama
2. 発表標題 Vehicle weight estimation using wireless accelerometers on a steel-box girder bridge
3. 学会等名 20th IABSE Congress (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 蘇迪
2. 発表標題 車両応答計測と画像認識を用いた道路橋伸縮装置部接触力評価
3. 学会等名 第 74 回土木学会年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 蘇迪
2. 発表標題 加速度計測に基づく橋梁たわみ推定の高精度化と実橋梁における検証
3. 学会等名 第 74 回土木学会年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 加藤宗
2. 発表標題 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
3. 学会等名 第 74 回土木学会年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 王浩祺
2. 発表標題 Experimental Analysis on Moving Vehicle Force Identification from Bridge Responses Using an Extended Kalman Filter
3. 学会等名 第 74 回土木学会年次学術講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	宮下 剛 (Miyashita Takeshi) (20432099)	長岡技術科学大学・工学研究科・准教授 (13102)	