

令和 4 年 6 月 10 日現在

機関番号：12608
 研究種目：若手研究
 研究期間：2019～2021
 課題番号：19K15071
 研究課題名(和文)一般道路橋を対象としたセルフキャリブレーション機能を有するB-WIMの研究開発

研究課題名(英文) Research and development of B-WIM with self-calibration function for road bridges

研究代表者
 竹谷 晃一 (Takeya, Kouichi)

東京工業大学・環境・社会理工学院・特任講師

研究者番号：70803526

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は車が通過するときに生じる橋梁の振動応答を利用して車の重量を検知する Bridge Weigh-in-Motion(B-WIM)において課題となっていた計測方法の簡易化と基準となる橋の振動応答取得(キャリブレーション)を自動化するシステムを開発した。これまでのB-WIMは複数のセンサを設置する必要があったが、本研究では車が橋に入退出する時刻の検出を桁中央に設置した1つの加速度センサで行い、かつ重量推定についても同一の加速度データの積分によって行う方法を提案した。定期的に行走する路線バスに注目し、路線バスを橋の加速度から検知することでキャリブレーションを自動化させた。

研究成果の学術的意義や社会的意義
 多くの道路橋の劣化損傷とその補修が地方公共団体の大きな課題となっており、その主な原因となる交通荷重を把握することは効率的な維持補修計画のために非常に重要である。しかしB-WIMの運用には多くの作業員・初期費用・時間が必要なのが課題となっていた。本研究では、データ分析にAI技術を活用して車種、速度などの交通情報を橋の加速度データから判断し、加速度の数値積分とフィルタリングによる適切な補正によって得られる橋のたわみから車の重量推定やB-WIMシステムのキャリブレーションを常時行うことで、環境や構造応答の長期変動の影響を考慮した点に意義があると考えている。

研究成果の概要(英文)：This research has been an issue in Bridge Weigh-in-Motion (B-WIM), which detects traffic weight by using the vibration response of the bridge. We have developed a B-WIM (1) with simplified measurement equipment and (2) a system that automates the acquisition of the influence line of the bridge (calibration). In previous B-WIMs, number of required sensors Number of caused an increase in system maintenance costs. In this research, the car's enter-exit time in the bridge was detected by one accelerometer installed in the center of the girder. We proposed a method that estimates the axle weight of a traffic car by integrating the same acceleration data. Focusing on the route bus that runs regularly, the calibration was automated by detecting the route bus from the acceleration of the bridge.

研究分野：振動工学

キーワード：橋梁 B-WIM 振動応答 加速度 軸重 ニューラルネットワーク ウェーブレット変換 数値積分

1. 研究開始当初の背景

多くの道路橋の劣化損傷とその補修が地方公共団体の大きな課題となっており、その主な原因となる交通荷重を把握することは効率的な維持補修計画のために非常に重要である。橋梁の交通荷重を推定する手段として、車両が橋梁を通過したときに生じる橋梁の応答から車両重量を逆解析する Bridge Weigh-In-Motion (以下 B-WIM) がある。これまでひずみセンサや振動センサを用いた様々な B-WIM が提案されてきたが、B-WIM に共通する課題として、重量が既知の試験車を走行させるキャリブレーション試験が必要なが挙げられる。試験車の走行には交通規制が伴うこともあり、B-WIM の運用には多くの作業員・初期費用・時間が必要なことが課題となっている。長期的には橋梁をとりまく環境や構造状態が変化するため、定期的なキャリブレーションが必要でありシステムの維持が問題となる。加えて、従来の B-WIM は計測区間内で車両速度を一定と仮定して車両重量を分析するため、車両速度が変化しやすい一般道路橋での精度低下が課題である。

2. 研究の目的

本研究は、Bridge Weigh-In-Motion (B-WIM) の課題を克服するため、一般道路橋を対象とした B-WIM の新しい手法の構築を目指した。橋梁の構造応答の計測から交通情報分析と機械学習技術を応用することで、多数の乗用車を利用してセルフキャリブレーションを行う新しい B-WIM の提案と開発をすることを目的とした。具体的には、加速度センサで計測する橋梁の構造応答を入力データとし、交通情報の学習方法とその分析システムの検討を行った。その上で、加速度センサによる構造応答データを元に重量推定システムを自動キャリブレーションして環境の変化に対応できる長期 B-WIM の提案と実橋梁への適用を目指した。

3. 研究の方法

本研究は、大型車の重量を長期的に分析する B-WIM システムを目指す研究であり、実橋梁でのデータ収集を目的とした計測システムの構築、研究の核となる分析システムの開発、さらに実橋梁への適用の3つに大きく分けられる。

① 計測システムの構築

加速度センサを用いて橋梁の動的な構造応答を長期で計測するシステムを構築した。先行研究で使用した加速度センサは分解能やシステムの安定性に課題があったため、センサの改良のほか、電源設備の構築などを行った。本研究では、初期学習用に橋梁近くに設置するビデオカメラの動画像を用いるため、カメラによる計測システムの構築を行った。

② 機械学習を用いた分析プログラムの開発

構造応答計測のデータと画像から得られる交通情報を利用し、機械学習を用いた分析プログラムの開発を行った。効果的な学習を行うため、学習方法と入力データの検討を行った。単体の加速度センサから得られる構造応答データの分析によって走行車線や車種、速度などの交通情報を取得し、B-WIM による交通重量の推定を安定的かつ高精度に行うためのセルフキャリブレーション機能の研究開発を行った。

③ 実橋梁への適用

提案するセルフキャリブレーション機能を有する B-WIM の構築のためのデータ収集と、その適用性を示すために実橋梁での計測実験を行った。提案システムは地方自治体が管理する一般的な道路橋を想定しているため、一般的な構造である RC 床板鋼単純桁の道路橋を対象とした。

4. 研究成果

4.1 対象橋梁と計測機器の概要

対象橋梁は山梨県甲府市にある RC 床版単純鋼桁の一般道路橋である。図-1 と図-2 に対象橋梁の断面図と側面図および加速度センサ(Epson, M-A352)の設置位置と、加速度積分の検証用と

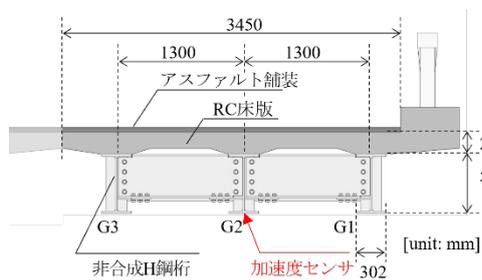


図-1 対象橋梁の断面図

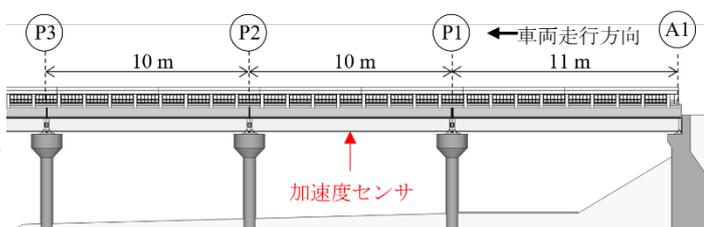


図-2 対象橋梁の側面図



図-3 P1-P2 径間の G2 桁中央の鉛直方向変位の計測の様子

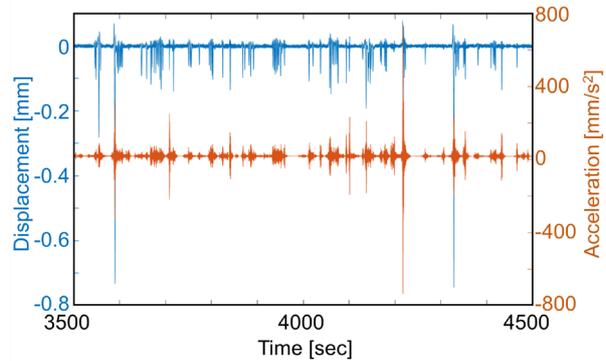


図-4 計測した加速度（朱色）とレーザー変位計による変位の正解値（青色）

して主桁たわみの計測位置を示す。計測を行った第2径間(P1-P2間)のスパン長は10 mである。桁中央のたわみ量はレーザー変位計(Keyence, LK-500)を三脚に設置して計測した(図-3)。加速度センサは Sonas 社のワイヤレス加速度センサユニット x02 を用いた。単一センサの利点として、無線計測で課題となりやすいセンサ間の同期精度を問わないため、より簡素なソフトウェア構成とすることも可能である。計測した加速度と検証用のたわみ波形を図-4 に示す。

4.2 加速度の数値積分と基線の二段階補正による桁変位の算出

本研究では時間領域での台形積分を行うが、データに含まれる約 1Hz 以下のセンサの自己ノイズによる誤差が原因で、積分結果の発散や基線が大きく変動する。その対策として基線を2段階で補正することでたわみ算出の高精度化を図った。本研究で提案する加速度積分と基線の2段階補正の計算フローを図-5 に示す。加速度積分は以下の3つのステップに分かれている。

- (a) 簡易的な基線補正を含む数値積分
- (b) 加速度データを用いた1次基線補正
- (c) 1次補正変位を用いた2次基線補正

はじめに、簡易的な基線補正を含む数値積分では、加速度の移動平均を減算することで低周波ノイズ成分を除去し、数値積分をする。これを二回繰り返すことによって加速度から変位を得る。算出した変位にはドリフト成分を除去するために(b), (c)において二つのレベルの閾値を用いて車両の有無を判断した補正マスクを作成し、それを用いてドリフト成分をトレースした基線を求める。この基線をそれぞれ変位から除くことでドリフト成分を除去した積分変位を求める。

(a) 簡易的な基線補正を含む数値積分

センサの自己ノイズによって積分結果の基線が大きく変動するため、FIR フィルターや移動平均で近似した曲線を差し引く基線補正がこれまでに提案されている。しかし、FIR フィルターによる低周波成分の除去は、積分結果のたわみ波形が正弦波のような形に歪みやすい。移動平均を用いる方法は、車両が橋梁上にない時は変位に起因する加速度と速度はゼロと想定して低周波成分を時間領域で除去するものである。加速度データのセンサ自己ノイズや温度ドリフトを効果的に除去しやすく、本研究でも台形積分の前処理として移動平均による基線補正を行った。

(b) 加速度データを用いた1次基線補正

車が連行する場合は積分区間が長くなり誤差が蓄積するため積分精度が落ちるが、対象を中小橋梁に限れば車が連行する場合でも車が対象スパン上にいない瞬間が存在しやすい。しかし、車がない時間を検知するためには、振動成分が車による強制振動なのか、車の通過後の自由振動なのかを精度よく判別する必要がある。そこで、複数の FIR フィルターを用いて閾値による車両検知を並列に行い、その結果を統合することでその精度を高める方法を採用した。フィルター処理後の加速度振幅の分布から閾値を設定する。フィルター処理後の加速度が閾値以下であれば自由振動または常時微動であるため、車が対象スパン上にいない時間である。非走行時間を検出したベクトルを補正マスクと呼ぶ。補正マスクは、強制振動と判定したところのデータを欠損させており、積分波形に補正マスクをかけると強制振動の時間を除いた変位の基線が得られる。数値積分で推定した変位の基線の差分をとることで1次補正変位が得られる。

(c) 1次補正変位を用いた2次基線補正

強制振動が生じていない瞬間をより厳密に検知するため、1次補正マスクを更新した2次補正

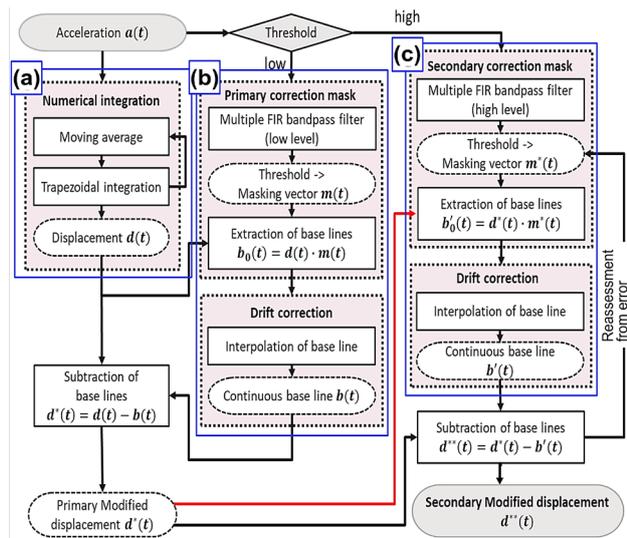


図-5 加速度積分と2段階基線補正のフロー

マスクを推定する。加速度振幅の閾値を1次基線補正よりも大きい値に設定することで誤検出は抑えられるが、加速度振幅の小さい一般車両は閾値未達となりやすく検出漏れが生じる。そこで、1次基線補正で算出した変位を参照することで、強制振動の検出漏れが予測される区間は補正マスクの更新を行わない。具体的には、まず1次基線補正で算出した変位が設定した閾値を超える場合は交通がある区間と断定する。例えば変位の閾値を -0.05mm と設定すると、乗用車以上の交通によるたわみは確実に検知できる。つぎに、交通がある区間より狭い区間を2次補正マスクが強制振動と推定した場合は、検出漏れが生じているとしてそれを採用しない。1次補正マスクと2次補正マスクの算出結果の比較を図-6に示す。自由振動による誤検出が修正されて1次補正マスクより常時微動成分と強制振動成分を厳密に判別できるようになっている。

得られた2次補正マスクを用いて変位の基線を取得し、変位との差分をとることで基線補正を行った。2次基線補正後の路線バス(2軸, 7.3ton)通過時の積分たわみを図-7に示す。

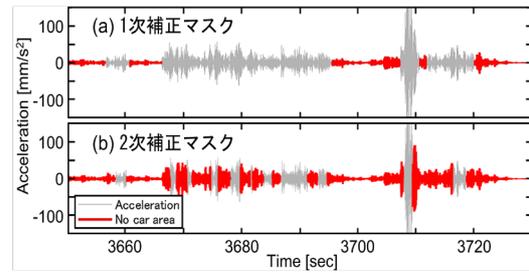


図-6 1次補正マスクと2次補正マスクによる非走行区間の検出結果の比較

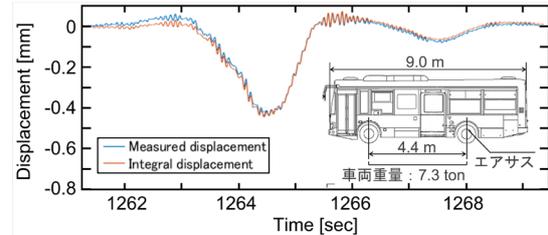


図-7 路線バス(2軸, 7.3ton)通行時の積分たわみ(朱色)と変位計の計測たわみ(青色)の比較

4.3 橋桁振動の加速度データ分析にAIを活用した通行車の識別

本研究では車両通行時の橋梁の加速度応答に対して、ウェーブレット散乱変換によって抽出した特徴量を入力データとしてニューラルネットワークによる車種の識別を試みた。図-8は計算フローを示しており、2つのニューラルネットワークによって段階的に車種の識別を行った。段階的に処理する理由としては、車種別の交通量に大きな偏りがあるためである。本研究の対象橋梁では、定義した車両ラベルにおいて普通車(Passenger car)が全体の90%以上を占めている一方、路線バス(Local bus)や試験車(Test truck)はいずれも1%未満であった。そこで、1段目のニューラルネットワーク(NN1)では、普通車(Passenger car)と大型車(Large vehicle)の識別を行う。大型車と識別された車両は2段目のニューラルネットワーク(NN2)によって細分化される。ニューラルネットワークの構成を表-1に示す。学習と検証に用いる交通車両のデータセットは、元のデータセットから無作為に抽出している。学習用のデータセットの車両の内訳を表-2に示す。車両毎の散乱係数を入力とし、対応した車両ラベルを教師データとして学習を行った。

表-3と表-4は各ニューラルネットワークにおけるテストデータの分類結果の混合行列を示している。混合行列の列方向が予測クラスの分類を示しており、行方向が真のクラスである。予測クラスのNULはNo Unique Labelの略であり、車両クラスの予測ができなかったものを示している。予測ラベルの集計を行って予測クラスを決定することで車両の誤分類を防ぐことが可能であった。

4.4 路線バスを利用した影響線の算出によるB-WIMのキャリブレーション

影響線の算出プロセスを図-9示す。はじめに影響線 $L(x)$ と軸重 W のおおよその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

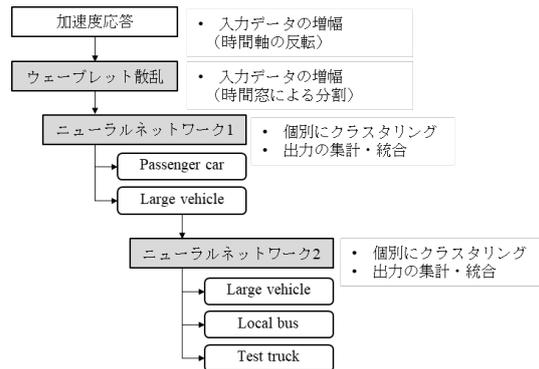


図-8 多段階のニューラルネットワークによる車両識別の計算フロー

表-1 ニューラルネットワークの構成

層数 (ノード数)	入力層: 1 (48) 中間層: 3 (すべて 50) 出力層: 1 (2 or 3)
活性化関数	中間層: Tan-Sigmoid 出力層: Softmax
学習関数	スケール共役勾配法 Scaled Conjugate Gradient (SCG)
重みの変更量 σ	1.0×10^{-4}
ヘッシアン調整量 λ_1	1.0×10^{-6} (初期値)
損失関数	交差エントロピー
入力データ (数)	ウェーブレット散乱係数 (48)
出力データ (数)	車両ラベル (2 or 3)

表-2 データセットの車両の内訳

	車両重量	台数	
		NN 1	NN 2
Passenger car	0.6-2.0 ton	785	-
Large vehicle	>2.0 ton		36
	Local bus	53	11
	Test truck	13.9 ton	6

表-3 ニューラルネットワーク1を用いた分類による予測クラスと真のクラスの比較

NN1		予測クラス		
		Passenger car	Large vehicle	NUL
真のクラス	Passenger car	154	-	3
	Large vehicle	-	9	1

とすると、影響線 $L(x)$ と軸重 W はサイズ $[K \times 1]$ と $[N \times 1]$ のベクトルである。

次に、車両検知と走行速度から求まる車軸位置の時刻歴データを基に、影響線 $L(x)$ を車軸毎に時間軸に変換し、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積分たわみ $D(t)$ 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。評価関数は時間軸に変換された影響線と軸重および積分たわみを用いて次のように表される。

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

影響線の算出で用いた車両は路線バスである。2020年1月から3月の中型路線バス通行時のデータから得られた影響線を図-10に示す。気温による最大値の変化は 0.001 mm/ton 以下であり、影響線の最大値に比べて約2オーダー小さく、気温の影響を受けにくい可能性が示唆された。

4.5 実橋梁における交通荷重の評価結果

構築したB-WIMシステムを実橋梁において適用した。本研究では影響線を路線バスより推定し、重量既知である試験車を正解値として逆推定する形で精度を評価した。交通荷重評価の結果の一部は表-5に示す通りである。正解値 13.9t に対して総重量はほとんどの車両で誤差10%以内であった。交通荷重の評価にて議論される誤差レベルは10%程度であることから、本手法によって評価される交通荷重は要求性能を満たしていることが分かる。車軸ごとの推定結果についても、概ね正しく評価できている。図-11は対称橋梁の交通特性を示すものである。交通特性のデータも情報として活用することが可能であると考えられる。

4.6 まとめ

目的であったセルフキャリブレーション機能を有するB-WIMの構築を多角的なデータ分析によって単体の加速度センサで実現できる可能性を示した。車両重量に加えて、車種や通行速度などの交通情報を取得できることから、橋梁を利用した新たな交通センサも期待できると考えている。

表-4 ニューラルネットワーク2を用いた分類による予測クラスと真のクラスの比較

NN2		予測クラス			
		Large vehicle	Local bus	Test truck	NUL
真のクラス	Large vehicle	5	-	-	1
	Local bus	-	3	-	-
	Test truck	-	-	1	-

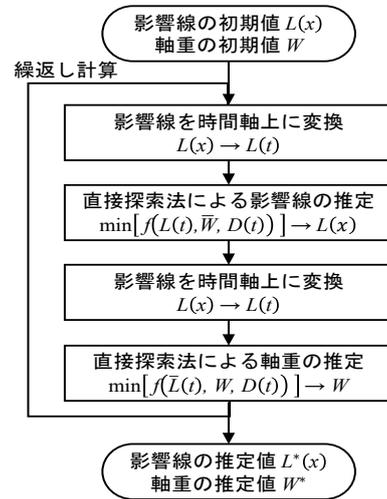


図-9 実測に基づく影響線の算出フロー

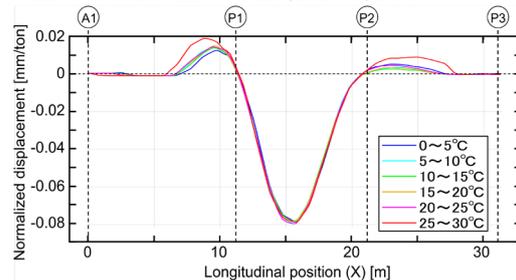


図-10 各気温での影響線の平均値の比較

表-5 交通荷重評価結果

	前輪 [ton]	後輪 [ton]	総重量 [ton]	誤差 [%]
Case1	3.635 (-0.07)	10.457 (+0.26)	14.093 (+0.19)	1.386
Case2	3.869 (+0.17)	9.935 (-0.27)	13.804 (-0.1)	-0.687
Case3	3.372 (-0.33)	9.644 (-0.56)	13.016 (-0.88)	-6.360
正解値	3.700	10.200	13.900	

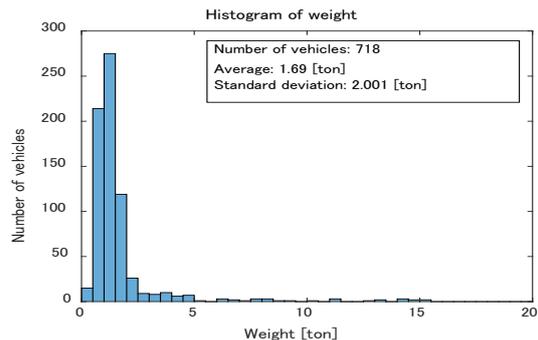


図-11 対称橋梁の交通特性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3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 竹谷 晃一, 佐々木 栄一	4. 巻 1
2. 論文標題 橋梁加速度のウェーブレット散乱変換とニューラルネットワークによる交通車両の分類	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 AI・データサイエンス論文集	6. 最初と最後の頁 158 ~ 167
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11532/jsceiii.1.J1_158	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 竹谷晃一, 吉田純司	4. 巻 27
2. 論文標題 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	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 鋼構造年次論文報告集	6. 最初と最後の頁 665-672
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 竹谷晃一, 吉田純司	4. 巻 27
2. 論文標題 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	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 鋼構造年次論文報告集	6. 最初と最後の頁 665-672
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 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件/うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Junki Mori
2. 発表標題 INVERSE ESTIMATION OF INFLUENCE LINE USING REGULAR TRAFFIC VEHICLES FOR BRIDGE WEIGH-IN-MOTION
3. 学会等名 IABSE Conference; Risk Intelligence of Infrastructures (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Koharu Ota
2. 発表標題 ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THERMAL ENVIRONMENT ON STRUCTURAL PARAMETERS FOR BRIDGE HEALTH MONITORING
3. 学会等名 IABSE Conference; Risk Intelligence of Infrastructures (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 太田 小春
2. 発表標題 ERAを用いた温度環境が橋梁の構造パラメータに及ぼす影響の分析
3. 学会等名 土木学会全国大会第75回年次学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 森 淳輝
2. 発表標題 動画像を利用した影響線の逆推定およびBridge Weigh-in-Motionの構築
3. 学会等名 土木学会全国大会第75回年次学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kouichi Takeya
2. 発表標題 Calculation of Influence Line using Regular Traffic for Improving Bridge Weigh-in-Motion under Variable Vehicle Speed
3. 学会等名 IABSE Congress; Resilient technologies for sustainable infrastructure (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kouichi Takeya
2. 発表標題 Basic Study on Bridge Weigh-in-Motion using Optical Flow Analysis
3. 学会等名 5th International Conference on Science, Engineering and Environment (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 竹谷晃一
2. 発表標題 動画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
3. 学会等名 土木学会第74回年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 竹谷晃一
2. 発表標題 一般自動車と動画解析を活用した低速走行車に対応したB-WIMの提案
3. 学会等名 鋼構造シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森 淳輝
2. 発表標題 構造応答の温度変動を考慮した橋梁ヘルスモ ニタリングの提案
3. 学会等名 土木学会全国大会第76 回年次学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 芦澤那南
2. 発表標題 単体加速度センサを用いた交通荷重評価法
3. 学会等名 第34 回日本道路会議
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Nanami Ashizawa
2. 発表標題 Development of simplified Bridge-Weigh-In-Motion based on displacement evaluation using an accelerometer
3. 学会等名 IABSE Symposium Prague (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 竹谷晃一
2. 発表標題 中小橋梁を対象とした単一加速度センサによるたわみ算出と影響線推定
3. 学会等名 第11 回土木学会西部支部沖縄会技術研究発表会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

東京工業大学 環境・社会理工学院 土木・環境工学系 佐々木栄一研究室
<http://www.sasaki.cv.ens.titech.ac.jp/>

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
研究協力者	森 淳輝 (Mori Junki)		
研究協力者	芦澤 那南 (Ashizawa Nanami)		
研究協力者	太田 小春 (Ota Koharu)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関