The PhD thesis's title: **Bridge health monitoring using automated FE model updating, signal processing, and machine learning.**

PhD student: **Nguyen Cong Duc**

Abstract in English:

Bridge health monitoring plays an important role in ensuring the safety, reliability, and longevity of the road and railway bridges. This thesis investigates bridge health monitoring using automated FE model updating, signal processing, and machine learning, which can be categorized as the following main points.

Intelligent data processing algorithms based on ANN and ANFIS are proposed to predict the dynamic behavior of Dębica railway steel arch bridge produced from dynamic responses of steel hangers during the passage of trains. Field data sets were collected from the vibration-based SHM system of the hangers and bridge deck over a nine-month period from December 2019 to September 2020. The input variables of the ANN and ANFIS models consist of RMS values of vibration signals installed on hangers, and the output is RMS values of dynamic responses on each of the two bridge spans. The optimization of the ANN architecture based on the genetic algorithm is implemented to determine the number of neurons in the hidden layers of the ANN regression models. Optimized ANN prediction models have been shown to outperform ANFIS regression models among the six proposed strategies.

Data-driven applications of wavelet transforms, orbit-shaped analysis and CNN using GoogLeNet are proposed for Dębica railway bridge health monitoring in Poland. Training and validation data sets are the dynamic behavior of the bridge deck recorded through an IEPE vibration sensor with a sampling frequency of 100 Hz from vibration-based SHM system during a nine-month period. Utilizing Morse, Morlet, and Bump wavelet, the vibration signal scalogram images are produced in the time-frequency domain as the input for CNN classification models, while the output is to predict health states based on the experimental tension force of eight hangers using label thresholds developed by calibrated finite element model. Moreover, the vibration-based orbit-shaped image patterns, acquired through a bidirectional sensor on each hanger are processed with CNN classification models for automated hanger health diagnostic.

Diagnostic load testing refers to the use of the historical measured responses of the structure in field data to better understand its dynamic and static structural behaviors. The calibration of the full-scale FE model of the existing bridges plays an important role, in which the representative FE model of the actual structure is determined from the optimization procedures. The optimization variables are applied, including the cross-sectional and material properties calibrated through the GA and PSO methods in the MATLAB software, which interfaces with the FE modeling in the scripting of the SOFISTIK TEDDY and ANSYS APDL softwares automatically using static and dynamic responses in the field tests. The final updated FE modeling is used to apply truck or train load configurations according to bridge design standards, specifications, or codes, which can predict the load limits and overloads of the existing bridge structure more accurately and reliably. These proposed approaches can be applied to the RC bridge, steel-concrete composite bridge as well as the railway steel arch bridge.

The developed approaches of the bridge FE model calibration using field load testing and monitoring can equip the engineer with a useful tool to make evaluation decisions that require less time and improve its cost effectiveness. The SHM system of the complex heavy bridges would be tested in a more reliable way when the updated FE models are applied. The machine learning algorithms integrated into the data-driven vibration-based SHM system are useful solutions to analyze intelligent data processing as well as to predict the structural behavior under the different load events. It can keep a "remote eye" on bridge structures with the smart alarm system.

Abstract in Polish:

Monitorowanie stanu mostów odgrywa ważną rolę w zapewnieniu bezpieczeństwa, niezawodności i trwałości mostów drogowych i kolejowych. Niniejsza praca dotyczy monitorowania stanu mostu za pomocą automatycznej aktualizacji modelu FE, przetwarzania sygnałów i uczenia maszynowego, które można podzielić na następujące główne punkty.

Zaproponowano inteligentne algorytmy przetwarzania danych oparte na ANN i ANFIS do przewidywania dynamicznego zachowania stalowego mostu łukowego kolejowego w Dębicy, powstałego na podstawie dynamicznych reakcji stalowych wieszaków podczas przejazdu pociągów. Zbiory danych terenowych zebrano z opartego na wibracjach systemu SHM wieszaków i pomostu w okresie dziewięciu miesięcy od grudnia 2019 r. do września 2020 r. Zmienne wejściowe modeli ANN i ANFIS obejmują wartości RMS sygnałów wibracyjnych zainstalowanych na wieszakach, a wynikiem są wartości RMS odpowiedzi dynamicznych na każdym z dwóch przęseł mostu. Zastosowano optymalizację architektury ANN w oparciu o algorytm genetyczny w celu określenia liczby neuronów w warstwach ukrytych modeli regresji ANN. Wykazano, że spośród sześciu proponowanych strategii zoptymalizowane modele predykcyjne ANN przewyższają modele regresji ANFIS.

Zaproponowano oparte na danych zastosowania transformat falkowych, analizy kształtu orbity i CNN z wykorzystaniem GoogLeNet do monitorowania stanu mostu kolejowego w Dębicy w Polsce. Zestawy danych szkoleniowych i walidacyjnych to dynamiczne zachowanie pomostu zarejestrowane za pomocą czujnika drgań IEPE z częstotliwością próbkowania 100 Hz z systemu SHM opartego na wibracjach przez okres dziewięciu miesięcy. Wykorzystując falkę Morse'a, Morleta i Bumpa, obrazy skalogramów sygnału wibracyjnego są generowane w dziedzinie czasu i częstotliwości jako dane wejściowe dla modeli klasyfikacji CNN, natomiast wynikiem jest przewidywanie stanów zdrowotnych w oparciu o eksperymentalną siłę rozciągającą ośmiu wieszaków przy użyciu progów etykiety opracowany przez skalibrowany model elementów skończonych. Co więcej, wzorce obrazu w kształcie orbity oparte na wibracjach, uzyskane przez dwukierunkowy czujnik na każdym wieszaku, są przetwarzane za pomocą modeli klasyfikacyjnych CNN w celu automatycznej diagnostyki stanu wieszaka.

Diagnostyczne testowanie obciążenia odnosi się do wykorzystania historycznych zmierzonych reakcji konstrukcji w danych terenowych w celu lepszego zrozumienia jej dynamicznych i statycznych zachowań konstrukcyjnych. Ważną rolę odgrywa kalibracja pełnowymiarowego modelu FE istniejących mostów, podczas której na podstawie procedur optymalizacyjnych wyznaczany jest reprezentatywny model FE rzeczywistej konstrukcji. Stosowane są zmienne

optymalizacyjne, w tym właściwości przekroju poprzecznego i materiału skalibrowane metodami GA i PSO w oprogramowaniu MATLAB, które łączy się z modelowaniem elementów skończonych w skryptach oprogramowania SOFISTIK TEDDY i ANSYS APDL, automatycznie wykorzystując odpowiedzi statyczne i dynamiczne w testy terenowe. Ostateczne zaktualizowane modelowanie FE służy do stosowania konfiguracji obciążenia samochodów ciężarowych lub pociągów zgodnie ze standardami, specyfikacjami lub przepisami projektowania mostów, co umożliwia dokładniejsze i bardziej niezawodne przewidywanie wartości granicznych obciążenia i przeciążeń istniejącej konstrukcji mostu. Proponowane podejścia można zastosować w przypadku mostu żelbetowego, mostu stalowo-betonowego zespolonego, a także kolejowego mostu łukowego ze stali.

Opracowane podejścia do kalibracji modelu mostu FE z wykorzystaniem testowania i monitorowania obciążenia w terenie mogą wyposażyć inżyniera w przydatne narzędzie do podejmowania decyzji oceniających, które wymagają mniej czasu i poprawiają efektywność kosztową. System SHM złożonych ciężkich mostów zostanie przetestowany w bardziej niezawodny sposób, gdy zostaną zastosowane zaktualizowane modele FE. Algorytmy uczenia maszynowego zintegrowane z opartym na danych systemem SHM opartym na wibracjach są użytecznymi rozwiązaniami do analizy inteligentnego przetwarzania danych, a także przewidywania zachowania konstrukcji w przypadku różnych zdarzeń obciążenia. Dzięki inteligentnemu systemowi alarmowemu może „zdalnie obserwować" konstrukcje mostowe.

Nguyen Cong Duc

Gliwice 15/5/2024

* wyłączenie jawności w zakresie danych osobowych oraz prywatności osoby fizycznej na podstawie art. 5 ust. 2 ustawy z dnia 6 września 2001 r. o dostępie do informacji publicznej (tj. Dz. U. z 2026 r. poz. 1764)
Marzena Gaura