

Abstract

Lightweight footbridges are usually elegant and pleasing in terms of their structural design; however, they are prone to high-vibration sensitivity under pedestrian traffic. Multi-modal active vibration control (AVC) techniques with sensors and actuators could be potential alternatives to decrease multi-modal vibrations and guarantee the pedestrian comfort. The research object is the stress-ribbon footbridge in the lab at the Chair of Conceptual and Structural Design of Technische Universität Berlin. The extremely low bending stiffness as well as the extremely low structural damping lead to an unusually high vibration sensitivity not only in the vertical direction but also in the spatial dimension. Additionally, pedestrian-induced vibration on the lightweight footbridge demonstrates multi-modal time-varying characteristics in both time-frequency analysis (TFA) and experimental modal analysis. A multi-modal AVC system (AVC 2.0) is applied and implemented on the stress-ribbon bridge with inertial sensors and pneumatic muscle actuators (PMAs) to reduce the multi-modal vibration in vertical and torsional modes.

First, state-space modelling approaches based on experimental system identification are proposed for the purpose of efficient and adaptive modelling for the AVC design, considering the three-dimensional (3D) vibration of the bridge. Experimental system identification, in comparison with theoretical modelling methods, is studied regarding both black-box and grey-box system identification methods, in which state-space models (matrixes A, B, C and D) can be directly identified based on measurement data in identification experiments. The grey-box system identification method, based on the prediction error method (PEM), combines the advantages both from theoretical modelling methods and from the black-box system identification method based on the subspace identification method (SIM). Superior state-space models that quantitatively describe the vibration modes of interest and the input/output characteristics can be fitted directly in a modal form based on a predefined grey-box model from measurement data.

Second, inertial sensors (including accelerometers and gyroscopes), which are self-contained and suitable for most locations of a bridge, are used to estimate the multi-modal state of the bridge in vertical and torsional modes. In the multi-modal estimation model based on a Kalman filter (KF), drift-free velocity and displacement estimation with acceleration measurements and sensor information fusion, including the acceleration and angular velocity, are considered. Moreover, optimal sensor positions for the minimal number of inertial sensors are designed for the multi-modal state estimation.

Furthermore, multi-modal AVC that considers possible time delays and multi-modal decoupling is analytically derived for the modal controller design based on two feedback laws: positive, delayed, modal velocity feedback control (PDMVFC) and negative, delayed, modal velocity feedback control (NDMVFC). The pneumatic action of the PMAs results in a time delay, which is not ignorable in the control loop and is considered in both system identification and the multi-modal controller design. Optimal controller parameters are obtained with the root locus analysis of each critical vibration mode of the bridge. The sensibility of the modal parameters corresponding to the time-varying modal characteristics of the bridge is studied to evaluate the stability performance of the designed controller.

Finally, experimental verifications for the AVC of resonance vibration in the case of each mode and in the case of multiple superposed modes are conducted to verify the damping efficiency and the control stability. Pedestrian-induced vibration is comparatively measured under conditions with AVC and without AVC to evaluate the improvement of the bridge's pedestrian comfort and to demonstrate the control efficiency of the designed multi-modal AVC.

Zusammenfassung

Leichte Fußgängerbrücken sind sehr filigran und elegant, haben jedoch eine hohe Schwingungsempfindlichkeit bei Fußgängerverkehr. Ein automatisiertes „Multi-Modal Active Vibration Control (AVC 2.0) System“ mit Inertialsensoren und pneumatischen Muskelaktuatoren (PMA) wird an einer Spannbandbrücke angewendet und implementiert, um die multimodalen Schwingungen zu reduzieren und den Benutzerkomfort zu gewährleisten. Als Forschungsobjekt dient die Spannbandbrücke im Labor des Instituts für Bauingenieurwesen der Technischen Universität Berlin. Die extrem niedrige Biegesteifigkeit sowie die extrem geringe Strukturdämpfung führen nicht nur in vertikaler Richtung, sondern auch in räumlicher Dimension zu einer ungewöhnlich hohen Schwingungsempfindlichkeit. Darüber hinaus zeigen die fußgängerinduzierten Schwingungen bei der leichten Fußgängerbrücke multimodale und zeitvariable Eigenschaften in der Zeit-Frequenz-Analyse und der experimentellen Modalanalyse.

Zunächst werden Modellierungsansätze für die experimentelle Systemidentifikation vorgeschlagen, um eine effiziente und adaptive Modellierung für die Schwingungskontrolle unter Berücksichtigung der dreidimensionalen Schwingungen der Brücke zu ermöglichen. Die experimentelle Systemidentifikation wird in Bezug auf die Black-Box Methode und die Grey-Box Methode untersucht, wobei jeweils der Vergleich zur analytischen Modellierung gezogen wird. In der Black-Box Methode können Zustandsraummodelle (Matrizen A , B , C , D) direkt basierend auf Messdaten von Identifikationsexperimenten identifiziert werden. Das Grey-Box Systemidentifikationsverfahren kombiniert die Vorteile sowohl von theoretischen Modellierungsmethoden als auch vom Black-Box Systemidentifikationsverfahren. Zustandsraummodelle, die die kritischen Schwingungsmoden und die Eingangs- und Ausgangseigenschaften quantitativ beschreiben, können auf einem vordefinierten Grey-Box Modell mit Messdaten angepasst werden.

Zweitens werden Inertialsensoren (einschließlich Beschleunigungsmesser und Gyroskop), die für die meisten Brückenstandorte geeignet sind, verwendet, um den multimodalen Zustand der Brücke in Biege- und Torsionsmodi zu beobachten. Der auf einem Kalman-Filter basierende multimodale Zustandsbeobachter beinhaltet sowohl eine driftfreie Geschwindigkeits- und Verschiebungsschätzung mit Beschleunigungsmessung als auch Sensorinformationsfusion einschließlich der Beschleunigung und der Winkelgeschwindigkeit. Es wird gezeigt, wie die optimalen Sensorpositionen gefunden werden können, um die multimodale Zustandsbeobachtung mit einer minimalen Anzahl von Inertialsensoren durchführen zu können.

Drittens wird eine multimodale AVC im Rahmen einer modalen Regelung analytisch abgeleitet, die mögliche Zeitverzögerungen und eine multimodale Entkopplung berücksichtigt. Diese basiert auf zwei Rückführungsgesetzen, die positiv verzögerte Modal-Geschwindigkeits-Rückführung und die negativ verzögerte Modal-Geschwindigkeits-Rückführung. Die pneumatische Wirkung von PMA führt zu einer Zeitverzögerung, die im Regelkreis nicht vernachlässigbar ist und bei der Systemidentifikation und dem multimodalen Reglerentwurf berücksichtigt wird. Optimale Reglerparameter können mit dem Wurzelortkurvenverfahren für alle kritischen Schwingungsmodi der Brücke ermittelt werden. Die Empfindlichkeit der modalen Parameter, die dem zeitvariablen Schwingungsverhalten der Brücke entsprechen, werden untersucht, um die Stabilität des entworfenen Reglers zu bewerten.

Schließlich werden experimentelle Verifizierungen für die aktive Schwingungskontrolle der Resonanzschwingung sowohl für die einzelnen als auch für überlagerte Modi durchgeführt, um die Dämpfungseffizienz und die Steuerstabilität zu verifizieren. Fußgängerinduzierte Schwingungen werden unter den Bedingungen (mit AVC und ohne AVC) vergleichsweise gemessen, um die Verbesserung des Fußgängerkomforts zu bewerten und die Effizienz des entwickelten multimodalen AVC zu demonstrieren.