

Diss. ETH N°. 23437

**DATA COMPRESSION TECHNIQUES FOR WIRELESS VIBRATION-BASED
MONITORING OF CIVIL STRUCTURES**

**A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES OF ETH ZURICH**

(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

ROMAN PAWEŁ KLIŚ

Master of Science, AGH University of Science and Technology, Kraków

born on 22.01.1984

citizen of Poland

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Eleni N. Chatzi, examiner
Dr. Glauco Feltrin, co-examiner
Prof. Dr. Mikael Sternad, co-examiner

2016

Abstract

Structural vibration monitoring has recently enjoyed a share of increased attention among the civil engineering community, as it allows the possibility of detecting and localizing hidden damage present within a monitored structure. This is enabled by means of a sensor-based monitoring system, which provides the infrastructure operator with unbiased structure condition measurements unlike the most commonly used inspection method in civil engineering; visual inspection. In the case of visual inspection, assessments results are inevitably biased according to the opinion, skill and experience of the inspecting engineer. Further drawbacks of visual inspection lay in its laboriousness and the associated costs needed for obtaining a unified assessment result. It should at this point be acknowledged, that a tremendous amount of information is delivered by visual inspections and forensic engineering, however a main argument of this thesis, is that there is much to be gained from exploiting sensory feedback, complementary to expert judgment.

Vibration-based monitoring can provide an unbiased assessment, on the basis of which objective damage indicators can be formulated, indicative of a component's or system's state. Amongst adopted measures for formulation of damage indicators, modal properties are the ones most commonly used. Within this context, modal characteristics such as natural frequencies, damping ratios and mode shapes, are utilized by practitioners and scientists to construct a damage indicator which describes the state of the monitored structure. Another important feature of the vibration-based monitoring system is the ability to perform continuous measurements. Once the monitoring system is deployed and operational it can perform close to on-line assessment of the state of the structure. Additionally, such instrumentation allows tracking of derived damage indicators over time, revealing its potential in the strategic planning of the Operation & Maintenance (O&M) of infrastructure systems. Simultaneous tracking of derived damage indicators and monitoring of the environmental conditions acting on the structure, such as traffic load intensity, wind load, temperature, humidity or the presence of chlorides, enables the detection of potential damage and deterioration phenomena, which might pose a threat to its the system's safety and robustness..

Unfortunately, such valuable information comes with a price. Conventional wired vibration monitoring systems are expensive and hard to implement. The main component influencing the price of the system is the communication infrastructure, which must be deployed on the monitored structure. For this reason, the scientific and engineering community has engaged upon investigation of more attractive alternatives such as Wireless Sensor Networks (WSN) which do not rely on tethered intercommunication subcomponents. However, the application field for existing WSN monitoring solutions is highly constrained due to problems associated with limited power storage. This limitation leads to the need for frequent battery replacement, which can be both expensive and labor intensive.

Utilization of wireless sensors for vibration-based monitoring results in transmission of long, time series acceleration information, inevitably leading to limitations, which may constrain the applicability of the monitoring system. The sensory feedback is conveyed in a large volume of data which requires transmis-

sion. This requirement inevitably translates to large energy costs which must be supplied from a limited source, such as a battery.

On the other hand, the application of the wireless sensor monitoring solution can also be beneficial in terms of associated costs, as the deployment costs of a WSN-based system are lower than those of a corresponding wired-based monitoring system. This is due to a shorter time required for the installation of the system, and therefore, a shorter interruption time to the normal operation of the structure. Additionally, it has been found that recent low-power consumption, high-efficiency electronics, operated by smartly designed embedded software allows for the creation of low-cost measurement devices, which enable continuous vibration monitoring of structures.

In materializing the goals of this dissertation, the author has focused on the required software and has investigated the data transmission problem associated with vibration monitoring carried out via WSN. In this thesis a solution to this problem is pursued via various implementations of data compression techniques.

In Chapter 2, an approach for data transmission reduction, rooted in the utilization of an explicitly known system, is implemented and experimentally validated using linear system models theory. In Chapter 3, the proposed model-based compression scheme is further utilized for conducting a continuous assessment of the state of a structure undergoing earthquake excitation. This chapter also explores the limits of applicability of WSN within this proposed scheme. In the following three chapters, the model-less compression scheme, relying on the reweighed basis pursuit, is investigated both numerically and experimentally. Chapter 4 presents the Hybrid Sensor Network approach for signal recovery using a limited number of observations and dedicated sensing nodes employed in continuous configuration. This concept is further extended in Chapter 5 where the Spectro-Temporal Compressive Sensing (STCS) paradigm is introduced. Chapter 6 provides an experimental validation of the proposed STCS method.

In more detail, the first attempt to resolve the energy sustainability of WSNs is carried out through the introduction of a model-based data compression technique. This technique is realized using a Multi-Rate Unscented Kalman Filter (MR-UKF). The filter employs the system representation extracted through the application of system identification techniques. This leads to incorporation of knowledge of the monitored structure into the transmitted information. Furthermore, the proposed model-based compression is assessed in its capacity for enabling both the signal reconstruction and the condition monitoring of the underlying observed system. This approach results in formulation of a non-linearity index which enables continuous assessment of the state of the structure.

Next, removal of the requirement for a prior system model for obtaining the signal reconstructions is attempted. As a means for realizing this, an approach is proposed in which the signal is reconstructed using a data interpolation technique, which relies on knowledge of the spectral content present within the signal to be reconstructed. This is accomplished with a Hybrid Sensor Network scheme where one of the designated sensors, a *leading node* of the deployment, provides the monitoring system with the spectral

information needed to appropriately reconstruct the recorded signals from some partial observations. The remaining sensors present in the deployment perform only partial temporal signal transmission. Next, based on the partially transmitted data and the spectral information, reconstructions are obtained. The reconstructions are carried out via application of the re-weighted basis pursuit denoising (rwBPDN) algorithm. Lastly, the proposed scheme for the recovery of dynamic response signals recorded by the WSN is enhanced in order to allow for the extraction of modal shapes from the reconstructed time series. The results of the proposed Spectro-Temporal Compressive Sensing scheme show that, in terms of modal shape extraction, the framework allows the user to obtain results close to the reference results, as is the case when the modal shape extraction is performed using a completely transmitted time series. Finally, the proposed scheme is validated using bridge deployment data.

This dissertation presents a solution to the data transmission problem, invariably associated with continuous vibration monitoring via WSNs. The results are obtained both for implementation of a model-based approach as well as a model-less approach. An effective methodological framework is established for reconstruction of vibration response data for monitoring of civil structures is presented. The scheme enables recovery of the vibration time series from partially transmitted WSN data and, one step further, extraction of information concerning structural condition (modal characteristics, performance indicator). The benefits and drawbacks of its approach, as well as the viability of the proposed monitoring scheme are discussed in the final Chapter termed "Conclusion and Outlook", where future steps and straightforward extensions are additionally discussed.

Zusammenfassung

In Bauingenieurkreisen wird der Schwingungsüberwachung von Bauwerken in letzter Zeit erhöhte Aufmerksamkeit geschenkt, da sich damit nicht sichtbare Schäden innerhalb von Strukturen erkennen und lokalisieren lassen. Im Gegensatz zu Zustandserhebungen durch Sichtprüfungen der gebräuchlichsten Inspektionsweise im Bauingenieurwesen - liefert hier ein sensorgestütztes Überwachungssystem unverzerrte Bauwerkszustandsdaten. Bei Sichtprüfungen hängen die Ergebnisse einer Bauwerksüberprüfung nämlich zwangsläufig von den Fachkenntnissen, der Erfahrung und persönlichen Beurteilung der ausführenden Person ab. Weitere Nachteile einer Sichtprüfung sind ihre Aufwändigkeit und die dadurch entstehenden hohen Kosten für eine Gesamtbewertung des Bauwerks. An diesem Punkt sollte angemerkt werden, dass durch Sichtprüfungen und ingenieurwissenschaftliche Ursachenanalysen natürlich auch eine grosse Anzahl von Daten erhoben werden können. Eine Hauptaussage dieser Dissertation ist jedoch, dass aus Sensormessdaten wichtige Erkenntnisse gewonnen werden können, die als Ergänzung zur Bewertung durch eine Fachperson dienen können.

Mit einer schwingungsgestützten Bauwerksüberwachung ist eine objektive Bauwerksbewertung möglich, mittels derer Schadensindikatoren hergeleitet werden können, welche den Zustand eines einzigen Bauteils oder des gesamten Systems anzeigen. Zur Formulierung der Schadensindikatoren werden häufig modale Eigenschaften wie Eigenfrequenzen, Dämpfungsgrad und Schwingungsformen verwendet. Aus diesen modalen Charakteristika entwickeln Fachleute und Wissenschaftler einen Schadensindikator, der den Zustand der überwachten Struktur beschreibt. Kontinuierliche Messungen durchführen zu können ist ein weiterer wichtiger Vorteil schwingungsgestützter Überwachungssysteme. Sobald das Überwachungssystem aufgebaut und betriebsbereit ist, kann der Zustand eines Bauwerks in Echtzeit bewertet werden. Weiters kann die Entwicklung der hergeleiteten Schadensindikatoren über einen längeren Zeitraum verfolgt werden, was besonders für die strategische Planung von Betrieb und Erhaltung von Infrastruktursystemen von grosser Bedeutung ist. Durch die gleichzeitige Verfolgung der Schadensindikatoren und Überwachung der Umgebungsbedingungen (wie Verkehrslasten, Windlast, Temperatur, Feuchtigkeit oder Vorhandensein von Chloriden) können mögliche Schäden und Alterungsanzeichen erkannt werden, welche die Sicherheit und Robustheit des Bauwerks beeinträchtigen könnten.

Die Gewinnung von so wertvollen Informationen hat jedoch auch ihren Preis. Herkömmliche verkabelte Schwingungsüberwachungssysteme sind teuer und zudem schwierig zu realisieren. Der teuerste Bestandteil eines solchen Systems ist die Kommunikationsinfrastruktur, welche direkt auf dem zu überwachenden Bauwerk angebracht werden muss. Aus diesem Grund versuchen Ingenieure und Wissenschaftler laufend, vorteilhaftere Alternativen zu finden, so wie z.B. drahtlose Sensornetzwerke (DSN), welche sich nicht auf verkabelte Kommunikations-Subkomponenten stützen. Aufgrund der beschränkten Möglichkeit der Stromspeicherung sind die Anwendungsmöglichkeiten existierender DSN-Überwachungssysteme allerdings extrem begrenzt. Es sind häufige Batteriewechsel nötig, was zu einem erhöhten Arbeitsvolumen und grösseren Kosten führt.

Bei der Verwendung von kabellosen Sensoren für die schwingungsgestützte Bauwerksüberwachung müssen lange Zeitreihen von Beschleunigungsdaten übertragen werden, was die Anwendungsbreite dieses Überwachungssystems begrenzen kann. Die grosse Datenmenge der Sensorinformationen erfordert sehr viel Energie, die aus einer Quelle mit beschränkter Kapazität wie z.B. einer Batterie bereitgestellt werden muss.

Bezüglich der Kosten kann andererseits eine Lösung mit kabelloser Sensorüberwachung auch Vorteile bieten. Die Installationskosten für das DSN-gestützte System sind geringer als jene für ein gleichwertiges verkabeltes Überwachungssystem, da die Installation eines kabellosen Systems eine kürzere Zeit beansprucht und deshalb der normale Betrieb des Bauwerks weniger lang unterbrochen werden muss. Ausserdem hat es sich gezeigt, dass die Verwendung von modernen, stromsparenden und hocheffizienten Elektronikkomponenten mit intelligenter eingebetteter Software die Entwicklung kostengünstiger Messsysteme für die kontinuierliche Schwingungsüberwachung von Bauwerken erlaubt.

Um die Ziele dieser Dissertation zu erreichen, hat der Autor sein Augenmerk auf die benötigte Software gelegt und die Problematik der Datenübertragung in der Schwingungsüberwachung durch drahtlose Sensornetzwerke untersucht. Mehrere Implementierungen von Datenkomprimierungstechniken werden in dieser Dissertation vorgestellt; die Vorgehensweise ist nachfolgend beschrieben. Kapitel 1 der Dissertation liefert eine Einführung in die Tools, die in der schwingungsgestützten Bauwerksüberwachung benützt werden. Kapitel 2 baut auf den Erkenntnissen der vorhergegangenen Kapitel auf. Es wird ein Ansatz zur Reduktion der Datenübertragungsmenge entwickelt, der auf der Verwendung eines explizit bekannten Systems basiert. Dieser Ansatz wird mithilfe der Theorie der linearen Systeme experimentell verifiziert. In Kapitel 3 wird mit dem vorgeschlagenen modellgestützten Komprimierungsverfahren eine kontinuierliche Zustandsbewertung eines Bauwerks unter Erdbebenbelastung durchgeführt. Weiters werden in diesem Kapitel die Grenzen der Anwendbarkeit von drahtlosen Sensornetzwerken für das vorgeschlagene System aufgezeigt. Das nicht-modellgestützte Komprimierungsverfahren, das auf dem Re-weighted Basis Pursuit Algorithmus basiert, wird in den drei darauffolgenden Kapiteln numerisch und experimentell untersucht. In Kapitel 4 werden hybride Sensornetzwerke zur Signalregenerierung vorgestellt, in welchen eine begrenzte Anzahl von Beobachtungen verwendet werden und dedizierte Sensorknoten in kontinuierlicher Konfiguration zum Einsatz kommen. Dieses Thema wird in Kapitel 5 noch erweitert, in dem das Konzept des spektrot temporalen Compressive Sensing (STCS) erläutert wird. In Kapitel 6 wird das vorgestellte STCS-Verfahren experimentell verifiziert.

In den nachfolgenden Absätzen wird auf die beschriebenen Themen in grösserem Detail eingegangen. In einem ersten Schritt wird versucht, das Problem der Stromversorgung von DSN mittels eines modellgestützten Datenkomprimierungsverfahrens zu lösen. In diesem Verfahren wird ein Multi-Rate Unscented Kalman-Filter (MR-UKF) verwendet, der eine Systemdarstellung benützt, die durch Systemidentifikationstechniken gewonnen wird. Dadurch gehen auch Informationen des überwachten Bauwerks in die übertragenen Daten ein. Weiters wird überprüft, ob mit dem vorgeschlagenen Ansatz der modellgestützten Komprimierung die Signalregeneration sowie die Zustandsüberwachung des Bauwerks möglich sind. Mittels dieses Ansatzes wird ein Nichtlinearitätsindex formuliert, mit dessen Hilfe

der Bauwerksbetreiber eine kontinuierliche Zustandsbewertung des Bauwerks ausführen kann. Weiters wurde untersucht, ob eine Signalrekonstruktion möglich ist, ohne dazu ein a-priori Systemmodell zu benötigen. Im vorgeschlagenen Ansatz wird das Signal mittels eines Dateninterpolationsverfahrens rekonstruiert, welches die Kenntnis des spektralen Inhalts des zu rekonstruierenden Signals voraussetzt. Dies wird durch den Einsatz eines hybriden Sensornetzwerks bewerkstelligt, in dem einer der designierten Sensoren – ein Hauptknoten des Systems – dem Überwachungssystem die spektralen Daten liefert, die es zur korrekten Rekonstruktion der aufgezeichneten Signale aus Teilbeobachtungen benötigt. Den übrigen Sensoren des Systems fällt lediglich die Rolle der partiellen Übertragung der zeitlichen Signale zu. Nun wird der Re-weighted Basis Pursuit-Entstörungsalgorithmus benützt, um die Rekonstruktionen aus den teilweise übertragenen Daten und der spektralen Information herzustellen. Zum Schluss wird das vorgeschlagene System zur Rekonstruktion der dynamischen Antwortsignale, die vom DSN aufgezeichnet wurden, noch weiter entwickelt, damit die Schwingungsformen aus den rekonstruierten Zeitserien gewonnen werden können. Die Schwingungsformen, die mittels des vorgeschlagenen spektrotemporalen Compressive Sensing ermittelt wurden, stimmen sehr gut mit den Referenzresultaten überein (z.B. Schwingungsformen, die aus einer vollständig übertragenen Zeitreihe ermittelt werden). Schlussendlich wird eine Verifizierung des Ansatzes mit Daten aus einer Brückenüberwachung durchgeführt.

In dieser Dissertation wird eine Lösung für die Problematik der Datenübertragung in drahtlosen Sensornetzwerken für die kontinuierliche Schwingungsüberwachung von Bauwerken vorgestellt. Dazu werden sowohl ein modellgestützter als auch ein nicht-modellgestützter Ansatz benützt. Geeignete Tools für die Rekonstruktion der Schwingungszeitreihen aus der Überwachung von Bauwerken werden präsentiert. Damit können aus teilweise übertragenen Daten von drahtlosen Sensornetzwerken die Schwingungszeitreihen und daraus wiederum die Schadensindikatoren oder die tatsächlichen Modaleigenschaften des überwachten Bauwerks rekonstruiert werden. Die Vor- und Nachteile dieses Ansatzes sowie die Durchführbarkeit des vorgeschlagenen Überwachungssystems werden im letzten Kapitel der Dissertation diskutiert, in dem auch weiterführende Schritte und Erweiterungen dieses Ansatzes vorgeschlagen werden.