

# **Wave-type based Real-Time Prediction of Strong Ground Motion**

Echtzeit-Wellenbasierte Modelle für die Vorhersage der  
Erdbebenbeschleunigung

## **Kurzfassung und Thesen**

zur an der Fakultät Bauingenieurwesen  
der Technischen Universität Dresden  
eingereichten

## **Dissertationsschrift**

zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

vorgelegt von  
MSc Amin Zahedi Khameneh  
geboren am 15. April 1978 in Mashhad, Iran

Dresden, 7. Oktober 2011

## Abstract

Several wave type based methods for real-time prediction of strong ground motion (SGM) accelerogram are developed. Real-time prediction of SGM is requested in building control systems to trigger and control actuator systems achieving the goal of reduction of structural deformations. It is well known that SGM is a classic example of non-stationary stochastic process with temporal variation of both amplitude and frequency characteristics.

In the suggested real-time predictors the main non-stationarity of the SGM process is considered by splitting the process in its dominant seismic phases, namely P phase from the combined S and coda phase. Therefore the prediction is performed according to a two-step approach. At the first step by the use of a real-time seismic phase detector, the dominant seismic wave phases are discriminated. In the second step, the wave-type based strong ground motion accelerogram is predicted for the each of the two seismic phases. In this thesis to perform the real-time prediction in each seismic phase two different model approaches are developed; the first is a group of Non-parametric soft-computing based prediction models and the other model is a stochastic parametric model. While the non-parametric soft-computing based model is built based on the training and learning paradigm in which the training dataset plays a very important role, the spectral modeling in the stochastic parametric model is performed only based on the measured data without any external learning memory.

The developed wave type based non-parametric models (NP) are built based on the non-homogeneity of the SGM process. Learning capability of Artificial Neural Networks is used to establish the real-time non-parametric prediction models. During the non-parametric modeling of SGM two distinguish approaches are followed; namely Phase-entire and Evolutionary prediction approaches.

The Phase-entire non-parametric model (NP1) is developed to perform the real-time prediction of the entire seismic phase; i.e. the early signals of the on-going seismic phase is used to predict the entire phase signals. Here by the use of the early signals collected of a wide number of SGM accelerograms two Neural Network predictors are trained; namely duration estimator and signal generator. The duration estimator is designed to estimate the length of the dominant seismic phase. To investigate the effectiveness of the networks four different neural networks structures are developed (Feedforward Backpropagation Neural Networks). It is expected that the non-parametric phase-entire model (NP1) can satisfy the non-homogeneity of the SGM process.

The evolutionary non-parametric model (NP2) is suggested to satisfy specially the non-stationary nature of the SGM process in real-time modeling. Through this modeling approach, prediction of seismic signal is performed by shifting a moving window segment by segment during the specified wave phase, which leads to predict the on-coming signals in time window  $t+\tau$  based on the measured signal in time window  $t$ . Three different windowing approaches are deployed; namely constant windowing (NP2.1), semi-adaptive (NP2.2) and adaptive windowing (NP2.3). During constant windowing approach (NP2.1), length of the sampling windows remains constant during the seismic phases. In contrast, lengths of the sampling windows are adjusted based on the frequency content of the signal in semi-adaptive (NP2.2) and adaptive windowing (NP2.3). Therefore one important part of the evolutionary non-parametric model is determining the length of the frequency-content based time-window. In evolutionary model (NP2) it is expected that the model can consider very well the

non-homogeneity as well as non-stationarity of the SGM signal, especially by the use of frequency content corresponding windowing approaches.

In the stochastic parametric model (SP) the non-homogeneity of the SGM process is achieved similar to the developed non-parametric model by splitting the process in its dominant phases, i.e., P, S-Coda. Since separating of the temporal amplitude and spectral non-stationary characteristics of SGM process increases the flexibility and ease in modeling and parameters estimation, two distinguish models for amplitude envelope and spectral content of SGM are developed. In order to model the spectral amplification of several layers and modes of resonance, multi Kanai-Tajimi filter (multi-KTF) is applied, which is the extended KTF by superposing multiple KTF according to the number of observed resonances to multi-KTF. The temporal stochastic evolutionary process of amplitude is modeled by using the relevant wave type based envelope functions. Parameters of the real-time predictor model are identified and estimated by continuously matching the model to the target accelerograms. The parameters of the amplitude envelope function are estimated by using the rising envelope curve of the measured data. It is expected that the stochastic parametric model can model very well the amplitude envelope function in evolutionary manner (amplitude non-stationarity). In frequency domain, the developed model is able to extract the parameters of multiple resonances and model the frequency content of on-coming signal using the extracted values.

## Theses

1. The buildings control systems are applied to improve the safety and to reduce the damage caused by the external loads like ground excitations. The basic task in the building control systems is to determine a control strategy that uses the measured structural responses or the strong ground motion excitation or both of them to calculate an appropriate control signal to send to the actuator that will enhance structural safety.
2. In reality, however, time has to be consumed in online data acquisition from the sensors and calculation of the control force and the transmission of the control force to the actuator. Thus, the time delay causes unsynchronized application of the control forces and this unsynchronization can not only render the control ineffective, but may also cause instability in the system.
3. One of the most effective solutions is to apply the predictive control approach. Accordingly, to realize an optimum and adaptive control of structures subjected to earthquake loading, simulation of uncertain input waves is conventionally conducted by the use of the pre-established earthquake spectrum models or real-time time-series predictors or etc.
4. Mismatching of the prescribed spectral models and lack of the physical background of the process during the modeling are the most significant drawbacks of the existing strong ground motion real-time prediction models.
5. As strong ground motion process is a non-homogenous process consisted of different wave types (P, S and Coda waves) and different propagation features, the non-homogeneity of the process should be considered by splitting the process in basically homogeneous sub processes.
6. According to the non-stationarity of the strong ground motion process in frequency domain, the real-time model must also be able to reflect properly the variance of frequency content of the process during the time.
7. The ground resonance including several resonance modes/layers which appear in the power spectrum as several peaks should be considered during the frequency modeling process which are fundamentally different for several seismic wave types.
8. To consider the amplitude non-stationarity, the strong ground motion simulation models have to apply the time-varying amplitude (variance) models which called envelope or stochastic modulating functions. The form of the envelope function is arrived from the temporal distribution of the energy throughout an accelerogram.
9. In order to perform the real-time prediction of strong ground motion two different paradigms are followed; namely non-parametric soft-computing based and parametric stochastic.
10. Several non-parametric soft-computing based real-time prediction models are developed which are built based on the learning capacity of artificial neural networks. The prediction models are trained and applied for every seismic phase separately using different categorizing criteria; Namely, the epicentral distance, the focal mechanism and the local soil condition.

11. The parametric stochastic model contains two separated sub-models: One to consider the non-stationary spectral amplification and the second to model the wave-type based time-related amplitude envelope of the process.
12. The real-time spectral amplification prediction model extracts the multi-resonance parameters from the measured signals to predict the frequency content of the oncoming signals.
13. The amplitude non-stationarity of the process is modeled during developing an evolutionary soft-computing based model. The soft-computing based model is trained to estimate the parameters of the wave-type based envelope functions during every sampling windows.

## Kurzfassung

Zur Echtzeitvorhersage der Erdbebenbeschleunigung wurden mehrere wellenbasierte Modelle entwickelt. Die Echtzeitvorhersage ist beim Einsatz von Steuerungssystemen von Gebäuden erforderlich, um Aktuatoren zur aktiven Bauwerkssteuerung rechtzeitig auslösen und ansteuern zu können. Es ist bekannt, dass Starkbodenbewegungen (Strong Ground Motion) bei Erdbebenereignissen ein klassisches Beispiel nicht-stationärer stochastischer Prozesse mit zeitlicher Variation der Amplitude und der Frequenz sind.

Bei dem entwickelten Echtzeitvorhersagemodell wird die Instationarität des Prozesses durch Dekomposition des Prozesses in seine dominanten Wellenphasen, nämlich P-Phase aus der kombinierten S und Coda-Phase erreicht. Deshalb wird die Vorhersage durch einem zweistufigen Ansatz durchgeführt. Im ersten Schritt durch den Einsatz eines Echtzeit-seismische Phasen-detektor, sind die dominierenden seismischen Wellen-Phasen unterschieden. Auf der zweiten Stufe wird die wellen-basierten Bodenbeschleunigung für die jeder der beiden seismischen Phasen vorhergesagt. Um die Echtzeitvorhersage der Erdbebenbeschleunigung durchzuführen, werden zwei unterschiedliche Modelle entwickelt: Eine Gruppe von nicht-parametrischen soft-computing basierten Vorhersagemodellen und ein stochastisches Modell. Während die nicht-parametrische Soft-Computing-Modell auf dem Training- und Lernen-Paradigma basiert, in dem die Trainings-Daten eine sehr wichtige Rolle spielt, wird die spektrale Modellierung in der stochastischen parametrischen Modell nur auf den gemessenen Daten ohne externe Lernens durchgeführt.

Die entwickelten Wellentyp-basierten nicht-parametrischen Modelle (NP Modelle), werden auf der Basis der Inhomogenität des SGM-Prozesses aufgebaut. Die Lernfähigkeit von Neuronalen Netzen wird verwendet, um die nicht-parametrischen Echtzeitvorhersage-Modelle abzubilden. Zur nicht-parametrischen Modellierung von SGM wurde zwei unterschiedliche Ansätze verfolgt, nämlich phasenübergreifende und evolutionäre Vorhersage.

Das phasenübergreifende nicht-parametrische Modell (NP1) wurde entwickelt, um die Echtzeit-Vorhersage der ganzen seismischen Phase durchzuführen, d.h. die Anfangssignale der laufenden seismischen Phase dienen dazu, den Beschleunigungszeitverlauf der gesamten Phase vorherzusagen. Durch die Nutzung der Anfangssignale einer großen Anzahl von SGM Zeitverläufen werden mittels zweier neuronaler Netze Prädiktoren trainiert: ein Schätzer der Dauer und der Signalerzeuger. Der Dauer-Schätzer ermöglicht es, die Länge der dominierenden seismischen Phase zu schätzen. Zur Untersuchung der Wirksamkeit des Modells werden vier verschiedene Strukturen von neuronalen Netzen entwickelt (Feed-Forward Backpropagation neuronale Netze). Es wird erwartet, dass das nicht-parametrische phasenübergreifende Modell (NP1) die Inhomogenität des SGM-Prozess abbilden kann.

Das evolutionäre nicht-parametrische Vorhersagemodell (NP2) wird vorgeschlagen, um speziell der nicht-stationären Eigenschaften des SGM-Prozesses in Echtzeit zu modellieren. Durch diese Modellierung wird die Vorhersage des seismischen Signals mittels Verschiebung eines beweglichen Fensters während der angegebenen Wellen-Phase durchgeführt. Folglich wird das Signal im Zeitfenster  $t+\tau$  auf das gemessene Signal in Zeitfenster  $t$  vorhergesagt. Hierzu werden drei verschiedene Fenstertechnik-Ansätze entwickelt, nämlich die konstante Fenstertechnik (NP2.1), die semi-adaptive (NP2.2) und die adaptive Fenstertechnik (NP2.3). Bei der konstanten Fenstertechnik (NP2.1), bleibt die Länge des Probenahme-Fensters während der gesamter seismischen Phasen konstant. Im Gegensatz dazu sind die Längen der Probenahme-Fenster bei der semi-adaptiven

(NP2.2) und adaptiven Fenstertechnik (NP2.3) auf den Frequenzinhalt des Signals abgestimmt. Ein wichtiger Teil des evolutionären nicht-parametrischen Vorhersagemodells ist die Bestimmung der Länge der frequenzbezogenen Zeitfenster. Beim evolutionären Modell wird erwartet, dass die Inhomogenität sowie Nicht-Stationarität des SGM-Signals sehr gut, vor allem durch den Einsatz des frequenzbezogenen Fenstertechnik-Ansatzes erfasst wird.

Im stochastischen parametrischen Modell (SP Modell) wird die Inhomogenität des SGM-Prozesses ähnlich wie beim nicht-parametrischen Modell erfasst, indem der Prozess in seine dominanten Phasen (P, S-Coda) aufgeteilt wird. Die Trennung der zeitabhängigen Amplitude von den nicht-stationären spektralen Eigenschaften des Prozesses erhöht die Flexibilität und Leichtigkeit bei der Modellierung und Parameterschätzung. Um die spektrale Verstärkung aus mehreren Schichten bzw. den Normalmoden des Resonanz-Modells zu berücksichtigen, wird der Multi-Kanai-Tajimi Filter (Multi-KTF) angewendet, der durch die Überlagerung mehrerer KTF Abhängigkeit der Zahl der beobachteten Resonanzen erweitert wird. Der evolutionäre zeitliche stochastische Prozess der Amplitude wird entsprechend der seismischen Wellenphasen durch die wahlweise Verwendung einer Normalverteilung und einer exponentiellen Formfunktion, entsprechend des Vorschlags von Shinozuka und Sato modelliert. Die Parameter des Echtzeitvorhersagemodells werden durch eine kontinuierliche Anpassung des Echtzeitvorhersagemodells an den Ziel-Beschleunigungszeitverlauf bestimmt. Es wird erwartet, dass das stochastische parametrische Modell die Amplitudeneinhüllende in evolutionärer Weise (die Amplituden-Nicht-Stationarität) sehr gut modellieren kann. Im Frequenzbereich ist das entwickelte Modell in der Lage, die Parameter für mehrere Resonanzen zu extrahieren und anhand der extrahierten Werte der Frequenzinhalt des nachfolgenden Signals zu modellieren.

## Thesen

1. Aktive Bauwerks-Steuerungssysteme werden in Bauwerken eingesetzt, um die Sicherheit zu verbessern und Schäden, die durch äußere Belastungen wie Erdbeben verursacht werden zu verringern. Die grundlegende Aufgabe bei den Steuerungssysteme ist es, eine Steuerungsstrategie festzulegen, die anhand der gemessenen strukturellen Antworten oder der starken Bodenbewegungen oder beidem, das entsprechende Steuersignal für die Aktuation ermittelt.
2. In der Realität entsteht ein nicht zu vernachlässigender Zeitverzug durch die Bearbeitung der Messdaten, die Online-Berechnungen zur Datenanalyse und die Ableitung der Steuerungskräfte sowie durch die Trägheit bei der Ausführung des Steuerungsantriebs. Die resultierende Zeitverzögerung führt zur ungewollten Verschiebung der Aktuation der Steuerungskräfte im Vergleich zur Einwirkung. Diese Verschiebung kann über die Unwirksamkeit der Steuerung hinaus sogar zur verstärkten Anregung des Bauwerks und damit letztendlich zur erhöhten Instabilität im System führen.
3. Eine der effektivsten Steuerungsmöglichkeiten ist die Prädiktivsteuerung. Dementsprechend erfordert die optimale und adaptive Steuerung von Bauwerken unter Erdbebenerregung, die Simulation der Eingangs-Wellen, die durch Verwendung der vorgegebenen spektralen Modelle oder Echtzeiten Zeitreihen-Prädiktoren etc. durchgeführt wird.
4. Fehlanpassungen der vorgegebenen spektralen Modelle, Modellierungsdefizite der physikalischen Phänomene des SGM-Prozesses und die Vernachlässigung der Inhomogenität und Instationarität des SGM-Prozesses sind die wichtigsten Nachteile bestehender Modelle.
5. Da der SGM-Prozess ein inhomogener Prozess ist, der aus verschiedenen Wellentypen (P, S und Coda-Wellen) und unterschiedlichen Laufzeiten besteht, sollte bei der Modellierung der Inhomogenität des Prozesses berücksichtigt werden.
6. Aufgrund der Instationarität des SGM-Prozesses im Frequenzbereich, muss das Echtzeit-Modell in der Lage sein, die Varianz des Frequenzinhaltes des Prozesses über die Zeit widerzugeben.
7. Die Bodenresonanz inklusive mehrere Resonanzmoden/Schichten, die im Leistungsspektrum als einzelne Spitzen erscheinen, sollte bei der Frequenz-Modellierung berücksichtigt werden, die sich grundlegend für die mehreren seismische Wellentypen unterscheiden.
8. Die Instationarität von Amplituden kann in SGM Simulationsmodellen durch zeitlich veränderliche Amplituden-Modelle abgebildet werden, die Hüllkurve oder stochastische modulierende Funktionen genannt werden. Die Form der Amplitudeneinhüllenden wird entsprechend der zeitlichen Energie-Verteilung bestimmt. Die Form der Hüllkurve wird aus der zeitlichen Verteilung der Energie über seinen Beschleunigungszeitverlauf abgeleitet.
9. Um die Echtzeit-Vorhersage von starken Bodenbewegungen zu führen, werden zwei verschiedene Paradigmen befolgt, nämlich nicht-parametrischen Soft-Computing-basierte und parametrische stochastische Paradigmen.

10. Mehrere nicht-parametrischen Soft-Computing-basierte Echtzeit-Vorhersage-Modelle wurden entwickelt, um anhand der Lernfähigkeit von den neuronalen Netzen die Vorhersage durchzuführen. Die Vorhersage-Modelle werden für jede seismische Phase separat mit unterschiedlichen Kategorisierung Kriterien trainiert und angewendet, nämlich die Epizentrum Entfernung, im Bruchmechanismus und die Bodenbeschaffenheit.
11. Das parametrische stochastische Modell enthält zwei getrennte Sub-Modelle; das Vorhersagemodell für spektrale Verstärkung und eines für Amplitudeneinhüllende.
12. Das Echtzeit-spektrale Verstärkungsmodell extrahiert die Multi-Resonanz-Parameter aus den gemessenen Signalen, um die Frequenzinhalt der kommenden Signale vorherzusagen.
13. Die Amplitude-Instationarität des Prozesses wird während der Entwicklung eines evolutionären Soft-Computing-Modell modelliert. Das Soft-Computing-Modell wird trainiert, um die Parameter des wellen-basierten Amplitudeneinhüllende für jedes Zeitfenster auf Basis der vorhergehenden Fenster neu zu schätzen.