



Doctoral Thesis

Polynomial chaos expansions for uncertain dynamical systems - applications in earthquake engineering

Author(s):

Mai, Chu V.

Publication Date:

2016

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010735932> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

DISS. ETH NO. 23822

POLYNOMIAL CHAOS EXPANSIONS FOR UNCERTAIN DYNAMICAL SYSTEMS.
APPLICATIONS IN EARTHQUAKE ENGINEERING

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

CHU VAN MAI

MSc. Mechanics of Materials and Structures, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées
born on 04.04.1988
citizen of Vietnam

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Bruno Sudret (ETH Zurich, Examiner)
Prof. Dr. Eleni Chatzi (ETH Zurich, Co-examiner)
Prof. Dr. Anthony Nouy (Ecole centrale de Nantes, Co-examiner)
Prof. Dr. Bozidar Stojadinovic (ETH Zurich, Co-examiner)

2016

Abstract

In modern science and engineering, the consideration of uncertainties has become indispensable. The framework of uncertainty quantification, which aims at identifying, quantifying and hierarchizing the sources of uncertainties and studying their effects on the outputs of computational models, has been developed in the last decades. To this end, polynomial chaos expansions (PCEs) represent a powerful and versatile tool which is commonly used in various research fields. The objective of this PhD work is to develop PCE methods that can be applied to dynamical systems with uncertain parameters and/or uncertain excitation.

Chapter 2 presents the general mathematical foundation of generalized PCEs and all the aspects associated with their practical computation. An original analytical formulation of derivatives of PCEs, which allows a straightforward computation of sensitivity measures, is introduced.

In Chapter 3, a literature review on PCE methods for uncertain dynamical systems is thoroughly presented. It opens discussions on why pure vanilla PCEs fail to represent the uncertain behaviour of dynamical systems and how to overcome this issue. Successful existing methods are examined, which reveals their common strategy. Nonetheless, most of those methods are intrusive by construction, meaning that they are developed to solve specific uncertain evolution equations. The findings constitute the guidance upon which two non-intrusive, general-purpose methods are proposed in the remaining of the manuscript.

Chapter 4 introduces a PC-based *stochastic time-warping* method to solve problems of random oscillations. The idea is to capture the dynamics characterized by the vibration frequency with the stochastic time-warping process before applying PCEs to represent the effects of uncertainties on the random amplitudes.

In Chapter 5, a more general method is investigated to solve problems of mechanical systems subject to stochastic excitations. The dynamics is handled with a stochastic nonlinear autoregressive with exogenous input (NARX) model, whose stochastic parameters are modelled with PCEs. The use of a sparsity-promoting regression technique is considered for selecting appropriate NARX terms and polynomial chaos functions.

Finally, Chapter 6 features applications of PC-based surrogate models in the context of earthquake engineering. Predictions of the transient structural responses obtained with the proposed surrogates are used to compute seismic fragility curves. Original non-parametric methods for computing these curves are introduced, which allows one to assess the accuracy of the commonly used parametric methods based on the lognormal format.

The manuscript focuses on applications of PCEs in structural dynamics. However, the developed methods can be easily extended and used in various contexts as some numerical case studies from chemical engineering will illustrate. More importantly, the strategy utilized in the manuscript appears to be a promising research path which differs significantly from existing approaches and shall attract more attention from the uncertainty quantification community.

Keywords: Polynomial chaos expansions, uncertain dynamical systems, earthquake engineering, surrogate modelling, time-warping, nonlinear autoregressive with exogenous input models, fragility curves.

Résumé

De nos jours, il est indispensable de considérer les effets des incertitudes sur les prédictions des modèles numériques. La quantification des incertitudes, qui a pour but d'identifier, de quantifier et de hiérarchiser les sources d'incertitudes ainsi que d'étudier leurs effets sur les sorties des modèles numériques, a été constamment développée durant les deux dernières décennies. A ce titre, la décomposition en polynômes de chaos (PCs) représente un outil puissant et générique utilisé dans de nombreux domaines. L'objectif de la présente thèse est de développer des méthodes basées sur les PCs pour les systèmes dynamiques ayant des paramètres incertains et/ou soumis à des excitations incertaines.

Le chapitre 2 présente les fondations mathématiques des PCs ainsi que tous les aspects associés à leur implémentation d'un point de vue pratique. Une formulation analytique originale des dérivées de PCs, qui permet une estimation directe des indices de sensibilité, est proposée.

Dans le chapitre 3, nous présentons une étude bibliographique des méthodes basées sur les PCs pour résoudre les problèmes de systèmes dynamiques incertains. Nous évoquons les raisons pour lesquelles les PCs classiques n'arrivent pas à représenter le comportement incertain des systèmes dynamiques et analysons les méthodes les plus performantes proposées récemment. Cependant, ces dernières sont intrusives dans la plupart des cas, c'est-à-dire qu'elles sont développées pour un système spécifique. L'étude bibliographique nous permet d'orienter notre recherche vers deux méthodes non-intrusives, qui sont détaillées dans la suite du rapport.

Dans le chapitre 4, nous introduisons une méthode basée sur les PCs et la technique de *time-warping* stochastique pour résoudre les problèmes d'oscillations aléatoires. L'idée est de capturer la dynamique caractérisée par la fréquence de vibration par le processus de *time-warping* avant d'appliquer les PCs pour représenter les effets des incertitudes sur les amplitudes incertaines.

Dans le chapitre 5, une méthode plus générale est étudiée afin de résoudre les problèmes des systèmes mécaniques soumis à des excitations stochastiques. La dynamique est ainsi capturée par un modèle auto-régressif non-linéaire stochastique dont les paramètres incertains sont modélisés par PCs. L'utilisation d'une technique favorisant des structures creuses permet de sélectionner les fonctions auto-régressives et les polynômes appropriés de façon optimale.

Le chapitre 6 présente les applications de modèles de substitution basés sur PCs dans le contexte du génie parasismique. Les prédictions des réponses structurales transitoires obtenues avec les méta-modèles sont utilisées pour calculer les courbes de fragilité. Deux méthodes non-paramétriques sont proposées pour ce calcul. Elles permettent d'évaluer la pertinence des méthodes classiques basées sur l'hypothèse de distribution lognormale.

Le manuscrit aborde principalement des applications en dynamique des structures. Il est néanmoins possible d'appliquer les méthodes développées dans des contextes variés comme le montrent les exemples issus de l'ingénierie chimique. La stratégie utilisée semble prometteuse. Elle est différente des approches classiques et mérite plus d'attention de la communauté scientifique travaillant sur le thème de la quantification des incertitudes.

Mot-clés: Polynômes de chaos, systèmes dynamiques incertains, génie parasismique, méta-modèles, time-warping, modèles auto-régressifs non-linéaires, courbes de fragilité.