

**Master thesis and internship[BR]- Master's thesis : Machine learning for
experimental bifurcation analysis[BR]- Integration internship**

Auteur : Bourdouch, Grégoire

Promoteur(s) : Kerschen, Gaëtan; Geurts, Pierre

Faculté : Faculté des Sciences appliquées

Diplôme : Master en ingénieur civil en aérospatiale, à finalité spécialisée en "aerospace engineering"

Année académique : 2024-2025

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/23382>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

Machine Learning for Experimental Bifurcation Analysis

Grégoire Bourdouch

Abstract

Understanding and predicting the dynamic vibrational response of mechanical systems remains a core challenge in structural dynamics. Real-world structures frequently exhibit nonlinear behaviour, resulting in complex phenomena such as primary and secondary resonances, multistability, and the emergence of unstable response branches. These features lie beyond the reach of standard experimental modal analysis (EMA), which, based on linear assumptions and typically relying on swept-sine excitation, can only capture the stable portions of the frequency response. As a result, crucial information about bifurcations and unstable dynamics remains experimentally inaccessible. Although control-based continuation methods have been developed to overcome this limitation, their practical application is hindered by the need for precise controller tuning and complex feedback architectures.

This thesis proposes a novel data-driven methodology that bridges this gap by combining standard EMA techniques with deep learning. Specifically, it investigates whether unstable branches of nonlinear frequency response curves (FRCs) can be predicted solely from experimental swept-sine measurements, which contain only the stable portions of the response. To the best of the author's knowledge, this is the first approach that enables the prediction of unstable branches of nonlinear frequency response curves from experimental swept-sine data alone.

To this end, a supervised learning framework is developed and applied to the Duffing oscillator, a one-degree-of-freedom nonlinear system with cubic stiffness. A convolutional neural network is trained on synthetic datasets, with input data generated from binary image representations of swept-sine envelopes. The model successfully predicts not only the fundamental resonance but also subharmonic and superharmonic resonances, effectively reconstructing the full FRC.

Crucially, the methodology is validated on an experimental electronic Duffing oscillator, confirming that unstable branches can indeed be predicted from swept-sine tests alone. The approach is then extended to other oscillator types and nonlinearity forms, demonstrating promising generalization capabilities.

Overall, this work presents a practical and effective alternative to control-based methods for the analysis of nonlinear experimental data. It demonstrates the feasibility of integrating standard EMA techniques with machine learning to predict otherwise inaccessible dynamic features.

Apprentissage automatique pour l'analyse expérimentale de bifurcation

Grégoire Bourdouch

Résumé

Comprendre et prédire la réponse vibratoire dynamique des systèmes mécaniques demeure un enjeu central en dynamique des structures. Contrairement aux systèmes linéaires, les structures réelles présentent souvent un comportement non linéaire, donnant lieu à des phénomènes complexes tels que les résonances primaires et secondaires, le multi-stabilité, ainsi que l'apparition de branches de réponse instables. Ces caractéristiques échappent aux méthodes classiques d'analyse modale expérimentale, qui, fondées sur des hypothèses linéaires et reposant généralement sur des essais de type balayage sinusoïdal, ne permettent d'identifier que les solutions stables de la courbe de réponse fréquentielle. Par conséquent, des informations cruciales concernant les bifurcations et les dynamiques instables restent inaccessibles expérimentalement. Bien que des méthodes de continuation expérimentale aient été développées pour accéder à ces régions, leur mise en œuvre reste limitée en raison de la complexité de la conception des contrôleurs et du réglage précis des gains.

Ce mémoire propose une méthodologie innovante, fondée sur l'apprentissage automatique, qui vise à combler cette lacune en exploitant des données issues de tests expérimentaux classiques. Plus précisément, l'approche vise à prédire les branches instables des courbes de réponse fréquentielle non linéaires à partir de mesures obtenues par balayage sinusoïdal. À la connaissance de l'auteur, il s'agit de la première méthode permettant de prédire les branches instables d'une courbe de réponse fréquentielle non linéaire à partir de ce seul type de mesure expérimentale.

Pour ce faire, une méthode d'apprentissage supervisé est développée et appliquée à l'oscillateur de Duffing, un système non linéaire à un degré de liberté caractérisé par une raideur cubique. Un réseau de neurones convolutifs est entraîné sur des données synthétiques, construites à partir d'images binaires représentant les enveloppes des réponses mesurées issues de balayages sinusoïdaux. Le modèle permet de prédire avec succès non seulement la résonance fondamentale, mais également les résonances secondaires comme les super-harmoniques et sous-harmoniques, reconstituant ainsi l'ensemble de la courbe de réponse fréquentielle.

La méthodologie est ensuite validée expérimentalement sur un oscillateur électronique reproduisant le comportement de l'oscillateur de Duffing, confirmant la capacité du modèle à reconstruire l'ensemble de la courbe de réponse fréquentielle, y compris ses branches instables, à partir de données expérimentales. Enfin, l'approche est étendue à d'autres types d'oscillateurs et de non-linéarités, mettant en évidence un potentiel de généralisation prometteur.

Ce travail constitue une alternative pratique et prometteuse aux méthodes de continuation expérimentale pour l'analyse des systèmes non linéaires. Il démontre la faisabilité d'intégrer des techniques classiques, telles que le balayage sinusoïdal, avec des approches d'apprentissage automatique, afin de prédire des dynamiques inaccessibles sans recours à des dispositifs de contrôle actif.