

Résumé (fr):

Le développement des métamatériaux intègre de plus en plus des réseaux de transducteurs, transformant les matériaux traditionnels en matériaux "intelligents" fonctionnels capables d'interagir avec des systèmes électromécaniques. Les transducteurs piézoélectriques jouent un rôle clé dans ces structures intelligentes, permettant la récupération d'énergie, la propagation d'ondes et le contrôle des vibrations pour résoudre des problèmes tels que l'inconfort humain, la fatigue des matériaux et l'instabilité des structures contrôlés. Ces éléments multiphysiques facilitent la conversion de l'énergie mécanique et électrique de manière réciproque, ce qui permet leur utilisation à la fois comme capteurs et actionneurs. Cependant, la conception de telles structures intelligentes adaptatives devient de plus en plus complexe avec l'intégration de multiples transducteurs, nécessitant l'ajustement de nombreux paramètres pour atteindre des performances optimales dans une approche souvent décentralisée.

Le contrôle des vibrations dans les structures intelligentes est traditionnellement réalisé à l'aide de méthodes classiques actives ou passives. Bien que ces approches soient efficaces pour des systèmes comportant un nombre limité de transducteurs, elles rencontrent des difficultés lorsque la complexité du système augmente. L'optimisation des paramètres de contrôle devient alors nettement plus difficile, en particulier lorsqu'il s'agit de résoudre des problèmes non convexes avec des incertitudes physiques. Pour relever ces défis, des recherches récentes se sont concentrées sur des méthodes de contrôle intelligent, notamment en utilisant des techniques de contrôle basées sur l'intelligence artificielle (IA). Conformément à la littérature récente, cette thèse explore l'utilisation d'algorithmes d'apprentissage par renforcement basés sur des réseaux de neurones pour ajuster les paramètres des lois de contrôle et atténuer divers signaux de perturbation sur des structures intelligentes expérimentales.

Dans ce travail, le contrôle actif et passif des vibrations à l'aide de transducteurs piézoélectriques shuntés est optimisé grâce à l'apprentissage par renforcement profond (Deep Reinforcement Learning, DRL). Les performances du DRL sont comparées à celles d'autres méthodes d'optimisation, notamment les approches analytiques, le simplex et les algorithmes génétiques. L'efficacité est évaluée en termes d'atténuation des vibrations, de stabilité structurelle et de coûts calcul.

Des analyses modales, à la fois numériques et expérimentales, sont réalisées sur différentes structures afin de garantir un impact mesurable de l'ajout d'un contrôle à l'aide de transducteurs piézoélectriques. La méthodologie DRL est d'abord introduite sur une structure unidimensionnelle modélisée par éléments finis. Ensuite, des expériences sont menées sur une poutre intelligente encastrée-libre équipée de deux transducteurs piézoélectriques colocalisés. Enfin, l'approche est étendue à des réseaux de transducteurs pour un contrôle distribué de structures plus grandes et beaucoup plus complexes.

Les résultats démontrent l'efficacité, les avantages et les limites de l'utilisation de l'IA pour le contrôle des vibrations. Pour que le DRL puisse ajuster efficacement les lois de contrôle, des composants tels que l'observation, l'action et la récompense doivent être soigneusement définis en accord avec les objectifs de contrôle, en utilisant des métriques représentatives de l'état vibratoire de la structure. Le DRL ajuste avec succès des lois de contrôle en boucle fermée multi-paramètres, optimisant l'atténuation des vibrations tout en garantissant la stabilité face à des signaux de perturbation variables. Contrairement à certaines méthodes traditionnelles, il permet de traiter des fonctions d'optimisation non convexes. Cependant, en raison du caractère aléatoire de l'initialisation et de l'entraînement des réseaux de neurones, le DRL peut parfois conduire à

des solutions sous-optimales ou même diverger. Des stratégies d'entraînement séquentiel sont développées pour exploiter les principes de mémoire des réseaux neuronaux, augmentant ainsi la robustesse de la méthode. Ces stratégies permettent également au système de s'adapter aux variations de l'environnement, telles que les changements de perturbations ou des modifications de la fonction objectif.

Summary (en):

The development of metamaterials increasingly incorporates networks of transducers, transforming traditional materials into functional "smart" materials capable of interacting with multiphysical systems. Piezoelectric transducers play a key role in these smart structures, enabling energy harvesting, wave propagation control, and vibration control to address issues such as human discomfort, material fatigue, and instability. These multiphysical elements facilitate the conversion between mechanical and electrical energy, allowing their use as both sensors and actuators. However, the design of such adaptive smart structures becomes more complex with the integration of multiple transducers, requiring the tuning of numerous parameters for optimal performance.

Vibration control in smart structures is traditionally achieved using classical active and passive methods. While effective for systems with a limited number of transducers, these approaches face challenges as system complexity increases. The optimization of control parameters becomes significantly harder, particularly when addressing non-convex problems with physical uncertainties. To overcome these challenges, recent research has focused on intelligent control methods, including artificial intelligence (AI)-based techniques. In line with recent literature, this thesis explores the use of reinforcement learning algorithms using neural networks to adjust control law parameters and mitigate various disturbance signals on experimental smart structures.

In this work, active and passive vibration control using shunted piezoelectric transducers is optimized through Deep Reinforcement Learning (DRL). The performance of DRL is compared with other optimization methods, including analytical approaches, simplex, and genetic algorithms. Efficiency is evaluated in terms of vibration damping, structural stability, and computational effort.

Modal analysis, both numerical and experimental, is performed on the various structures to verify their suitability for control using piezoelectric transducers.

The DRL methodology is first introduced on a 1D finite element structure. Then experiments are conducted on a smart cantilever beam featuring two collocated piezoelectric transducers. Subsequently, the approach is extended to networks of transducers for distributive control of larger and more complex structures.

The results demonstrate the effectiveness, advantages, and limitations of using AI in vibration control. For DRL to tune effective control laws, components such as observation, action, and reward must be carefully defined in alignment with the control objectives, using metrics representative of the structure's vibration state. DRL successfully tunes multi-parameter feedback control laws, optimizing vibration damping while ensuring stability under varying disturbance signals. Unlike some traditional methods, it allows for non-convex optimization functions. However, due to the randomness inherent in neural network initialization and training, DRL can occasionally lead to sub-optimal solutions or divergence. Sequencing training strategies are being developed that exploit the memory principles of neural networks, thereby increasing the robustness of the method. These strategies also allow

the system to adapt to environmental variations, such as changes in disturbances or objective functions.

- Composition du jury:

Berardengo Marta, Associate Professor, Universita di Genova, Examinatrice

Dion Jean-Luc, Professeur, Isae Supméca, Rapporteur

Gardiono Paolo, Professeur, Università degli Studi di Udine, Examineur

Meyer Yann, Professeur, Université Savoie Mont Blanc, Rapporteur

Chesné Simon, Professeur, INSA Lyon, Directeur de these

Collet, Manuel, Directeur de recherche CNRS, Ecole Centrale Lyon, Co-directeur de these

Rodriguez, Jonathan, Maitre de Conférences, INSA Lyon, Encadrant de these