



le cnam

University of Salerno
&
Conservatoire national des arts et métiers

PHD SCHOOL IN INDUSTRIAL ENGINEERING (UNISA) - Cycle XXXVIII
ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES DES MÉTIERS DE L'INGÉNIEUR (CNAM)

Department of Industrial Engineering (UNISA)
&
Laboratoire de Mécanique des Structure et des Systèmes Couplés (LMSSC/CNAM)

Field of Study: **Industrial Engineering**
Specialization: **Mechanical Engineering**

Doctoral Thesis in :

**Isogeometric approaches for fluid–structure coupling in
vibroacoustic**

Doctoral Thesis of:

Candidate : **LANDI Tommaso**

Supervised by:

Professor **CITARELLA Roberto**, UNISA

Professor **DEÛ Jean-François**, CNAM

and co-supervised by :

PhD **HOAREAU Christophe**, CNAM

Sommario

La presente tesi di dottorato propone una metodologia unificata per l'analisi vibroacustica basata sull'*Analisi Isogeometrica* (IGA), con l'obiettivo di integrare in modo diretto la fase di progettazione geometrica e quella di simulazione numerica. L'interesse scientifico e industriale di tale approccio risiede nella possibilità di superare le limitazioni intrinseche dei metodi tradizionali, come il *Metodo agli elementi finiti* (FEM) e il *metodo agli elementi di contorno* (BEM), che spesso soffrono di errori geometrici, discontinuità di campo e costi computazionali elevati.

La tesi sviluppa un quadro teorico e computazionale completo che coniuga fedeltà geometrica, efficienza numerica e integrazione software di modellazione (CAD), delineando un percorso di ricerca che va dai fondamenti fisico-matematici fino alle applicazioni industriali. Dopo aver definito le equazioni che governano i fenomeni vibroacustici e la relativa formulazione variazionale, il lavoro introduce una rappresentazione isogeometrica rigorosa dei campi strutturali e acustici, evidenziando come la continuità elevata delle funzioni NURBS permetta di ottenere soluzioni a più alto grado di continuità rispetto ai modelli FEM equivalenti.

Uno dei contributi centrali consiste nell'applicazione di un approccio ridotto su base modale, che consente di descrivere il comportamento vibroacustico accoppiato tramite un numero limitato di forme modali. Tale tecnica permette una drastica riduzione del costo computazionale, mantenendo elevata la fedeltà del modello rispetto alla soluzione a pieno ordine (FOM), come dimostrato dai confronti numerici sistematici con IGA e FEM.

Un secondo asse innovativo riguarda l'integrazione diretta tra CAD e IGA, perseguita attraverso un approccio immersivo di raffinamento adattativo basato su spline gerarchiche (HB-splines). In particolare, viene proposta una metodologia per la ricostruzione volumetrica del dominio fluido a partire dalle rappresentazioni di contorno CAD (B-Rep), che consente di estendere la descrizione

geometrica bidimensionale a un modello volumetrico compatibile con l'analisi isogeometrica. Il dominio così generato viene poi accoppiato a un modello strutturale di tipo Kirchhoff–Love, ottenendo un flusso di lavoro completamente automatizzato CAD-to-IGA.

La parte finale della tesi dimostra la validità e la versatilità del metodo attraverso applicazioni in ambiti industriali, in cui l'IGA immersa viene direttamente applicata su modelli CAD reali. I risultati confermano non solo la superiorità dell'IGA in termini di accuratezza nel rappresentare la dinamica del sistema, ma anche la fattibilità di un'integrazione effettiva tra progettazione e analisi, riducendo i tempi di modellazione e aumentando la robustezza del processo simulativo.

Nel suo complesso, la tesi rappresenta un contributo metodologico e applicativo originale nel campo della vibroacustica computazionale, dimostrando come l'Analisi Isogeometrica possa costituire un ponte efficace tra CAD e simulazione numerica. La ricerca apre la strada verso una nuova generazione di strumenti per l'ingegneria vibroacustica, capaci di combinare precisione geometrica, efficienza numerica e integrazione diretta con l'ambiente di progettazione industriale.

Parole chiave : Analisi Isogeometrica, Analisi agli elementi finiti, Vibroacustica computazionale, Accoppiamento struttura–fluido, Integrazione CAD–Analisi, Proiezione su base modale, Simulazione ingegneristica avanzata.

SOMMARIO

Résumé

Cette thèse de doctorat propose une méthodologie numérique pour les problèmes vibroacoustiques basée sur l'Analyse Isogéométrique (IGA), dans l'objectif d'intégrer directement les phases de conception géométrique et de simulation numérique. L'intérêt scientifique et industriel de cette approche réside dans sa capacité à surmonter les limites intrinsèques des méthodes traditionnelles telles que la Méthode des Éléments Finis (FEM) et la Méthode des Éléments de Frontière (BEM), qui souffrent souvent de difficultés liées à la reconstruction géométrique et à des coûts de calcul élevés. Après avoir défini les équations locales qui gouvernent les phénomènes vibroacoustiques et les formulations variationnelles associées, le travail introduit une représentation isogéométrique rigoureuse des champs de déplacement côté structure et champs de pression côté fluide acoustique, mettant en évidence la manière dont la continuité des fonctions NURBS permet d'obtenir des solutions plus régulières et plus précises que celles fournies par des modèles FEM équivalents. L'une des principales contributions réside dans l'application d'approches de réduction sur bases modales, qui permettent de décrire le comportement vibroacoustique couplé à l'aide d'un nombre limité de modes. Cette technique garantit une réduction drastique du coût de calcul tout en conservant une grande fidélité par rapport à la solution d'ordre complet, comme le démontrent les comparaisons numériques systématiques menées en IGA et en FEM. Une deuxième contribution novatrice concerne l'intégration directe entre la CAO et l'IGA, réalisée au moyen d'une stratégie de raffinement adaptatif immergé basée sur les B-splines hiérarchiques (HB-splines). En particulier, une méthodologie est proposée pour la reconstruction volumique du domaine fluide à partir de représentations frontières CAO (B-Rep), permettant d'étendre une description géométrique bidimensionnelle en un modèle volumique compatible avec l'analyse isogéométrique. Le domaine reconstruit est ensuite couplé à un modèle structural de coque de Kirchhoff-Love, aboutissant à une chaîne de traitement automatisée, de la CAO à l'IGA. La dernière partie de la thèse démontre la validité et la polyvalence de la méthode à travers des

applications à des géométries complexes, dans lesquels l'IGA immergée est appliquée directement à des modèles CAO réels. Les résultats confirment une intégration efficace entre conception et analyse vibroacoustique, réduisant le temps de modélisation et renforçant la robustesse du processus de simulation. Dans l'ensemble, la thèse constitue une contribution méthodologique et applicative originale dans le domaine de la vibroacoustique numérique, montrant comment l'Analyse Isogéométrique peut servir de passerelle efficace entre la CAO et la simulation numérique. Ce travail ouvre la voie à une nouvelle génération d'outils d'ingénierie vibroacoustique capables de combiner précision géométrique, efficacité numérique et intégration directe dans l'environnement de conception industriel.

Mots-clés: Analyse Isogéométrique, Méthode des Éléments Finis, Vibroacoustique numérique, Couplage fluide-structure, Intégration CAO-Analyse, Réduction modale, Simulation d'ingénierie avancée.

RESUME

Abstract

This PhD thesis proposes a numerical methodology for vibroacoustic problems based on Isogeometric Analysis (IGA), with the aim of directly integrating the geometric design and numerical simulation stages. The scientific and industrial relevance of this approach lies in its ability to overcome the intrinsic limitations of traditional methods such as the Finite Element Method (FEM) and the Boundary Element Method (BEM), which often suffer from a complex geometric reconstruction and high computational costs. After defining the local governing equations of vibroacoustic phenomena and the associated variational formulation, the work introduces a rigorous isogeometric representation of structural and acoustic fields, highlighting how the high continuity of NURBS functions enables smoother and more accurate solutions compared to equivalent FEM models. One of the main contributions lies in the application of reduced-order modal approaches, allowing the coupled vibroacoustic behaviour to be described through a limited number of modes. This technique guarantees a drastic reduction in computational cost while maintaining high model fidelity with respect to the full-order solution, as demonstrated by systematic numerical comparisons with both IGA and FEM. A second innovative contribution concerns the direct integration between CAD and IGA, pursued through an immersed adaptive refinement approach based on hierarchical B-splines (HB-splines). In particular, a methodology is proposed for the volumetric reconstruction of the fluid domain starting from CAD boundary representations (B-Rep), enabling the extension of a two-dimensional geometric description into a volumetric model compatible with isogeometric analysis. The reconstructed domain is then coupled with a Kirchhoff–Love structural shell model, achieving an automated CAD-to-IGA workflow. The final part of the thesis demonstrates the validity and versatility of the method through applications to complex geometries, in which immersed IGA is directly applied to real CAD models. The results confirm an effective integration between design and vibro-acoustic analysis reducing modeling time and enhancing the robustness of the simulation process. Overall, the thesis represents an original

ABSTRACT

methodological and applicative contribution to the field of computational vibroacoustics, showing how Isogeometric Analysis can serve as an effective bridge between CAD and numerical simulation. This research paves the way for a new generation of vibroacoustic engineering tools capable of combining geometric precision, numerical efficiency, and direct integration within the industrial design environment.

Keywords: Isogeometric Analysis, Finite Element Method, Computational Vibroacoustics, Fluid–Structure Coupling, CAD–Analysis Integration, Projection on the Modal Basis, Advanced Engineering Simulation.

