
Abstract

The topic of nonlinearity is gaining in interest in many research areas, particularly in dynamic mechanical modelling, since all physical systems are inherently nonlinear to a varying degree in nature. Nonlinearity in mechanical systems can be attributed to several sources. Among those sources, geometric and material nonlinearities are of more interest, since those types are the most evident in many physical systems.

Comprehensive understanding of nonlinearity types is very important for modelling, simulation and identification, i.e. system identification purposes. Characterization of mechanical systems is essential in wide range of applications, from design processes, predictive maintenance analysis to control engineering. Thus, the objectives of this thesis are to characterize the nonlinearity in mechanical systems and subsequently to implement appropriate identification techniques for certain classes of nonlinear systems. However, system identification not only depends on the knowledge of the type of nonlinearity sources, but also on the type of the signals involved in the identification steps.

In general, two different types of signal, namely ‘well-behaved’ and chaotic signals can be manifested as response of a mechanical system excited by a periodic input. The term ‘well-behaved’ is, usually, assigned to a regular signal, which has a discrete spectrum in the frequency domain. Chaotic data, on the other hand, have a broadband frequency spectrum similar to that of a random signal. However, unlike a random signal, chaotic data is deterministic.

In the first place, this thesis deals with the development of identification techniques for mechanical systems comprising geometric nonlinearity that yields ‘well-behaved’ response for periodic input, namely the skeleton method. Basically the method employs the instantaneous amplitude and frequency of the input and output of a system and analyzes those data to characterize the system. However, when the response of the system is chaotic, the aforementioned technique is no longer applicable. Therefore in the second place, this thesis tries to correlate some chaos quantification values to the parameters of the system.

Subsequently, this thesis investigates an efficient way to identify systems with material nonlinearity, in particular friction, utilizing some existing models and regression techniques. The obtained results from different models ranging from the classical to the most advanced models are compared and contrasted. Finally, in order to validate the results, model-based feedforward compensation is implemented to an electro-mechanical system utilizing the obtained models to improve the performance of the system in positioning tasks. In addition, having more detailed knowledge from the identification of the hysteresis behaviour in friction, efficient control strategies are constructed utilizing a gain scheduling control for compensating a positioning error, which is another contribution of this work.

As a practical case study, a harmonic drive representing a real mechanical component in which both nonlinearity sources (i.e. the geometric and material) are manifested is chosen. The unique design of the harmonic drive as a modern transmission system allows very high reduction ratio in a very compact package. However, as a price, a complex interaction in the internal gear components results in a hardening torsional stiffness with hysteresis makes the system hardly to understand. Making use of the knowledge of geometric and material nonlinearities, a simple yet effective model is proposed to capture the dynamic behaviour of harmonic drive system. Last, using this model together with control techniques developed, a high performance positioning control system is also developed for the harmonic drive system. The performance results validate the effectiveness both of the proposed model and the control technique.

Beknopte Samenvatting

“Niet-lineariteiten” zijn recent een onderwerp van interesse geworden in veel onderzoeksdomeinen, voornamelijk in dynamische mechanische modellering omdat elk fysisch systeem van nature uit niet lineair is. Bronnen die de oorzaak kunnen zijn van niet lineariteiten zijn legio, waarvan geometrische en materiaal- niet lineariteiten het meest interessant zijn vermits deze het meest vanzelfsprekend zijn in fysische systemen.

Het grondig begrijpen van het type niet lineariteit is van groot belang voor modelering, simulatie en identificatie, nl. voor systeemidentificatie. Het karakteriseren van mechanische systemen is essentieel in een groot scala van toepassingen, van ontwerpprocessen, voorspellende onderhoudsanalyse tot het ontwerp van controle. Dus het doel van deze thesis is het karakteriseren van niet lineariteiten in mechanische systemen en bijgevolg het implementeren van gepaste identificatietechnieken voor bepaalde klassen van niet lineaire systemen. Systeemidentificatie hangt niettegenstaande niet enkel af van het type niet lineariteit maar ook van het type signaal bij het gebruik tijdens de verschillende identificatiestappen.

In het algemeen kunnen er twee soorten signalen resulteren als respons op de excitatie van een mechanisch systeem met een periodische input, namelijk een ‘goed-gedragend’ en een chaotisch signaal. De term ‘goed-gedragend’ associeert men meestal met een gewoon signaal dat een discreet spectrum heeft in het frequentiedomein. Hiertegenover heeft een chaotisch signaal een breedband frequentiespectrum gelijkaardig aan dat van een random signaal. In tegenstelling tot een random signaal is een chaotisch signaal deterministisch.

Deze thesis gaat in de eerste plaats over de ontwikkeling van een identificatietechniek voor mechanische systemen die geometrische niet lineariteiten bevatten die resulteren in een ‘goed-gedragende’ respons, namelijk de skeleton methode. Als basis gebruik deze methode de ogenblikkelijke amplitude en de frequentie van de input en de output van het systeem en analyseert deze data om zo het systeem te kunnen karakteriseren. Wanneer de respons van het systeem chaotisch is, dan is deze methode niet meer toepasbaar. Hierdoor probeert men in de tweede plaats enkele chaotische quantificeringswaarden te correleren met de parameters van het systeem.

Vervolgens onderzoekt deze thesis een efficiënte manier voor het identificeren van materiaal- niet lineariteiten, voornamelijk wrijving, door gebruik te maken van bestaande modellen en regressietechnieken. De bekomen resultaten van de verschillende modellen, gaande van de klassieke tot de meer geavanceerde modellen, worden vergeleken en gecontrasteerd. Tot slot, voor het valideren van de resultaten, wordt modelgebaseerde feedforward compensatie in een elektromechanisch systeem geïmplementeerd, door gebruik te maken van de bekomen modellen, om zo de performantie van het systeem voor positioneringdoeleinden te verbeteren. Hierbij moet wel benadrukt worden dat de gedetailleerde kennis afkomstig van de identificatie van hysteresisgedrag gebruikt wordt voor de implementatie van een gain scheduling controlestrategie ter compensatie van positioneerfouten, hetgeen een extra bijdrage is van dit werk.

Als praktische case study wordt gekozen voor een harmonic drive. Dit is namelijk een mechanische component waar beide niet lineariteiten zich voordoen (zowel geometrische al materiaal-). Het unieke ontwerp van de harmonic drive, gebruikt als een moderne overbrenging, laat een zeer kleine overbrengingsverhouding zowel als een compact geheel toe. Ten koste hiervan treedt er een complexe interactie op in de interne overbrengingscomponenten met als gevolg een torsionele verstijving met hysteresis die het systeem moeilijk te begrijpen maakt. Door gebruik te maken van de kennis van de geometrische en materiaal- niet lineariteiten samen met de ontwikkelde controletechnieken, wordt hier een voorstel gedaan van een eenvoudig maar doeltreffend model om het dynamisch gedrag van een harmonic drive systeem te vatten. De performantieresultaten tonen tot slot de doeltreffendheid van het voorgestelde model en controletechniek aan.