
Model-based fault diagnosis in rotor systems with self-sensing piezoelectric actuators

Am Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt

zur

Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

vorgelegt von

Ramakrishnan Ambur Sankaranarayanan, M.Sc.

aus Tirunelveli, Indien

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Stephan Rinderknecht

Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Stefan Seelecke

Tag der Einreichung: 25.10.2016

Tag der mündlichen Prüfung: 15.12.2016

Darmstadt 2017

D 17



Forschungsberichte Mechatronische Systeme im Maschinenbau

Ramakrishnan Ambur Sankaranarayanan

**Model-based fault diagnosis in rotor systems
with self-sensing piezoelectric actuators**

Modellbasierte Fehlerdiagnose in Rotorsystemen
mit selbst-sensierenden piezoelektrischen Aktoren

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Aachen 2017

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2016

Copyright Shaker Verlag 2017

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5067-7

ISSN 2198-8536

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen

Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9

Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

ஓதுவது ஒழியேல்.
- ஓளவையார்

Never stop learning.
- Auvaaiyar



Acknowledgment

I would like to express my gratitude to Prof. Dr.-Ing. S. Rinderknecht for his guidance with which I could complete my doctoral thesis at Institute for Mechatronic Systems in Mechanical Engineering at Technische Universität Darmstadt. I thank Prof. Dr.-Ing. S. Seelecke (Universität des Saarlandes), for accepting to be the second examiner of my thesis and for his suggestions.

The entire research work was financed by the German Research Foundation (DFG) within their Research Training Group “GRK1344”, with support from Rolls-Royce Deutschland Ltd and Co. KG. I earnestly acknowledge and thank them here.

My sincere word of thanks goes also to all the colleagues of IMS for their help throughout my tenure. I thank Mr. Stefan Heindel, Mr. Fabian Becker and Ms. Xiaonan Zhao for their valuable technical inputs. Apart from scientific advices Mr. Philipp Zech and Mr. Daniel Plöger have also helped me to hone my thesis, for which am very grateful. Special thanks to Mr. Raja Vadamalu for his varied technical advises.

I am indebted to my parents for their support, offer *namaskarams* to Gurus and dedicate this work to the *Divine*.

Ramakrishnan Ambur Sankaranarayanan,
18.01.2017.



Abstract

Machines which are developed today are highly automated due to increased use of mechatronic systems. Fault detection and isolation are important features to ensure their reliable operation. This research work aims to achieve an integrated control and fault detection functionality with minimum number of components.

Piezomaterials can be used both as sensors and actuators due to their inherent coupling between electrical and mechanical properties. In this thesis, piezoelectric actuators which are being researched for active vibration control on flexible rotors, are also used as sensors. These self-sensing actuators reconstruct their mechanical deflection from the measured voltage and current signals. The systems under investigation are a numerical aircraft engine model and its scaled representation in a rotor test bench. Since the actuators are mounted in rotor bearings, their displacement represent the bearing deflection directly.

In this research work, the virtual sensor signals are utilised for model-based fault diagnosis in rotor systems, with focus on unbalances in rotors. Unbalance magnitude and phase were estimated in frequency domain using a parameter estimation method by least squares optimisation. The robustness of the estimates against signal outliers is improved by method of M-estimators. Identifying the fault location is also explored using the hypothesis of localization of faults.

In simulation, models of both systems (aircraft engine and test bench) were used to detect unbalance faults. In the former system, the influence of actuator placements in fault detection ability is examined. The fault detection method is also validated at the real test bench, as a first step. The unbalance detected using the measured virtual sensor signals is compared against results using available physical sensors. They are found to be in good agreement which proves sensing capability of the actuators. This sensor-minimal approach could be favoured in systems with space constraints.

As a further step, unbalances are detected with self-sensing piezoelectric actuators in closed loop with an adaptive algorithm for vibration minimisation. This combined control effort and fault detection as a strategy, is suitable to augment level of automation in a machine.



Kurzfassung

Der Automatisierungsgrad von Maschinen nimmt durch den vermehrten Einsatz mechatronischer Systeme weiter zu. Fehlererkennung und -Isolation sind wichtig, um ihren zuverlässigen Betrieb zu gewährleisten. Diese Forschungsarbeit strebt nach einer integrierten Regelungs- und Fehlererkennungsstrategie mit einer minimalen Anzahl an Komponenten.

Piezomaterialien können durch die physikalische Kopplung zwischen elektrischen und mechanischen Eigenschaften sowohl aktorisch als auch sensorisch eingesetzt werden. In dieser Arbeit werden Piezoaktoren, die hauptsächlich zur aktiven Schwingungsreduktion an flexiblen Rotoren zum Einsatz kommen, gleichzeitig auch als Sensoren verwendet. Diese selbstsensierenden piezoelektrischen Aktoren rekonstruieren ihre mechanischen Auslenkungen durch Messung der elektrischen Spannung und des Stroms. Die untersuchten Systeme sind Modelle eines Flugtriebwerkes und deren skalierte Ausführung im realen Prüfstand. Da die Aktoren am Rotorlager montiert sind, stellen die rekonstruierten Signale die Lagerauslenkung dar.

In dieser Forschungsarbeit werden diese Signale für die modellbasierte Diagnose der Rotoren eingesetzt. Amplitude und Phase der Unwucht konnten im Frequenzbereich mit parametrischen Ansätzen durch Verwendung der Methode der kleinsten Quadrate ermittelt werden. Zudem wurde die Robustheit der Verfahren gegen Ausreißer durch sogenannte M-Estimators verbessert. Die Identifikation der Unwuchtlage wurde mit einer Hypothese über die Fehlerlokalisierung untersucht.

In Simulationen wurde die Unwuchterkennung sowohl am Modell des Prüfstandes als auch an dem eines Flugtriebwerkes untersucht. In letztem Fall wurde ein Einfluss verschiedener Aktorpositionen auf die Güte der Fehlererkennung nachgewiesen. Die Anwendbarkeit der untersuchten Methoden wurde auch am realen Prüfstand gezeigt. Die detektierten Unwuchten aus den rekonstruierten Signalen und aus realen Messungen wurden abgeglichen. Sie zeigen eine gute Übereinstimmung, welche die Sensierungsfähigkeit der Aktoren nachweist. Darüber hinaus eignet sich der sensor-minimale Ansatz besonders für Systeme mit Bauraumeinschränkungen.

Weiterhin wurden auch die Unwuchten mittels selbstsensierender Piezoaktoren mit adaptiven Algorithmen für Schwingungsreduktion im geschlossenen



Regelkreis errechnet. Diese kombinierte Regelung und Fehlerdiagnose ist ein weiterer Schritt um den Automatisierungsgrad von Maschinen weiter zu erhöhen.

Table of Contents

Abstract	v
Kurzfassung	vii
List of Figures	xii
List of Tables	xv
Acronyms	xvii
Nomenclature	xviii
1 Introduction	1
1.1 Motivation	1
1.2 Structure of the thesis	4
2 State of the art and objectives	7
2.1 Fault diagnosis	7
2.2 Vibration control	11
2.3 Self-sensing of Piezoelectric actuators	13
2.4 Objectives and goals of the thesis	15
3 Rotor systems and their modelling	17
3.1 Fundamentals of rotordynamics	17
3.1.1 Equations of motion	17
3.1.2 Unbalance and its response	18
3.1.3 Gyroscopy and Campbell diagram	20
3.2 Test bench at Institute for Mechatronic Systems (IMS)	22
3.3 Model of rotor test bench	23
3.3.1 Modelling approaches	23
3.3.2 Finite Element (FE) model of rotor test bench	26
3.3.3 Integrated FE model	27
3.4 Model enhancement with measured data	30
3.4.1 Transfer function estimation from measured data	30
3.4.2 Model updating	35
3.4.3 Complete model of the test bench	37
3.5 Aircraft turbofan engine	37
3.5.1 Whole Engine Model (WEM)	39
3.5.2 Piezoelectric actuators in aircraft engines	40

4	Self-sensing piezoelectric actuator	43
4.1	Actuators	43
4.2	Piezoelectric actuators	44
4.2.1	Piezomaterials	44
4.2.2	Fundamentals of piezoelectricity	44
4.3	Signal reconstruction using self-sensing	46
4.3.1	Self-sensing	47
4.3.2	Self-sensing in piezoelectric actuators	47
4.3.3	Identification of actuator permittivity	48
4.3.4	Construct mechanical displacement	52
4.3.5	Validation of virtual sensor signals	52
4.4	Closed loop controller with self-sensing piezoelectric actuator	52
4.4.1	Vibration reduction in a narrow frequency band	54
4.4.2	Vibration reduction at a stationary operating point	55
5	Fault detection in rotor systems	59
5.1	Fault detection in time domain	59
5.2	Fault detection in frequency domain	62
5.2.1	Introduction to parameter estimation method	62
5.2.2	Rotor system in frequency domain	64
5.2.3	Fault detection	65
5.2.4	Relative residual	66
5.3	Fault detection in closed loop	67
5.4	Robust fault detection	68
5.4.1	Theory of M-estimators	69
5.4.2	Recursive method	71
6	Results and discussion	73
6.1	Fault detection in time domain	73
6.2	Fault detection in scaled rotor model in frequency domain	75
6.3	Fault detection using measured signals from test bench	78
6.3.1	Analysis at stationary operating points	78
6.3.2	Comparison of unbalance detection with other available sensors	83
6.3.3	Transient measurements	86
6.3.4	Unbalance detection with simultaneous actuation	88
6.4	Fault diagnosis in aircraft engine model	89
6.4.1	Active bearing in aircraft HP rotor	91

6.4.2	Active internal suspension of aircraft engine	95
6.5	Discussion	99
6.5.1	Observations from fault diagnosis in test bench	99
6.5.2	Observations from fault diagnosis in WEM	100
6.5.3	Final remarks	101
7	Conclusion and Outlook	103
7.1	Summary of the thesis	103
7.2	Inference	104
7.3	Future works	105
	Appendices	115
A	Positive Position Feedback (PPF) controller	116
B	Introduction to FxLMS algorithm	118
C	Simulation results from WEM unbalance detection	120