

TU Braunschweig – Niedersächsisches
Forschungszentrum für Luftfahrt

Berichte aus der Luft- und Raumfahrttechnik

Forschungsbericht 2020-03

Bearing Fault Detection and Quantification for Flight Control Electro-mechanical Actuators

Mohamed ISMAIL

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Flugsystemtechnik
Braunschweig

Diese Veröffentlichung wird gleichzeitig in der Berichtreihe
„NFL - Forschungsberichte“ geführt.

Diese Arbeit erscheint gleichzeitig als von der Fakultät für
Maschinenbau der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina
zu Braunschweig zur Erlangung des akademischen Grades
eines Doktor-Ingenieurs genehmigte Dissertation.

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.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2020

Copyright Shaker Verlag 2020

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 978-3-8440-7405-5

ISSN 0945-2214

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Phone: 0049/2421/99011-0 • Telefax: 0049/2421/99011-9

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



German Aerospace Center

Bearing Fault Detection and Quantification for Flight Control Electro-mechanical Actuators

*A thesis submitted in fulfillment of the requirements
for the degree of Doctor of Engineering (Dr.-Ing.)*

in the Mechanical Engineering

DLR (German Aerospace Center)
Institute of Flight Systems, Technical University of Braunschweig

Mohamed Alsayed Ahmed Mohamed ISMAIL

2020

Bearing Fault Detection and Quantification for Flight Control Electro-mechanical Actuators

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

Von: Mohamed Alsayed Ahmed Mohamed ISMAIL
Aus: Giza, Ägypten

eingereicht am: 03.09.2019
mündliche Prüfung am: 21.01.2020

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Stefan Levedag
Institut für Flugsystemtechnik,
DLR Braunschweig

Prof. Dr.-Ing. Enrico Stoll
Institut für Raumfahrtssysteme,
Technical Universität Braunschweig

2020

Dissertation an der Technischen Universität Braunschweig, Fakultät für Maschinenbau

Dedication

First and foremost, I feel always indebted to my God, the most gracious and most merciful. I'm proud to dedicate this work to my mother, to the soul of my father and to my brother Haytham. Mere words are insufficient to express my appreciation of my wife Amal and my children: Ibrahim, Hagar and Rokaya.

Acknowledgments

I express my deepest thanks and gratitude to my supervisor, Prof. Stefan Levedag, director of DLR Flight Systems Institute, for his encouragement and guidance throughout this research work. The outstanding resources and infrastructure greatly inspired me to conduct a scientific work to approach outstanding reputation of DLR institutes.

I am very grateful to Mr. Andreas Bierig, the head of the Safety Critical Systems and Systems Engineering (SSY) department, who supported me in solving many academic and personal challenges. I also appreciate the contributions of Mr. Holger Spangenberg, the former SSY department head for his guidance during my first two years. I also express my thanks to Jens Windelberg for his support in discussing key research challenges and for supporting me in the experimental work. I greatly appreciate the valuable comments from my colleagues Thu-Hien Pham, Robert Kowalski and all my SSY department colleagues. I appreciate active administration support from our secretary, Nina Stiller.

I acknowledge Mr. Wulf Mönnich, the coordinator of the institute review committee, for his efforts to guide me in writing scientific publications that fulfill DLR's expectation of quality. I further acknowledge the DLR Graduate Program for over a dozen workshops that positively influenced my research and communication skills. I thank the DAAD organization for coordinating and co-financing my PhD scholarship.

Finally, I am thankful to Dr. Nader Sawalhi, a senior scientist at SpectraQuest Inc., USA, for supporting my research through jointly publishing with me several research articles. I am grateful to my friend Dr. Nasser Hemdan, Siemens AG, for revising my thesis. Special thanks also go to Mr. Edward Balaban, a research leader at the Prognostics and Diagnostic group, NASA Ames Research Center, for our useful collaboration and for providing crucial datasets from NASA projects.

Abstract

This study aimed at investigating fault detection and quantification methods for flight control electro-mechanical actuators (EMAs) in support of predictive maintenance systems.

EMAs are a promising and energy-efficient technology for actuating flight control surfaces. However, limited EMA in-service experience necessitates intensive research to show that these actuators match the superior reliability levels of existing hydraulic systems. Recently, numerous studies have explored a reliability mitigation approach that uses a predictive maintenance system. Predictive maintenance could provide early detection of low-critical degradation prior to progression to crucial faults. Recent flight tests and accelerated-aging experiments have showed that the mechanical components of EMAs (e.g., gears, bearings, and ball screws) have significant potential for predictive maintenance. These components mainly degrade via two modes: wear-like and localized spalling (e.g., fatigue defect). Incipient forms of both modes can be identified early via vibrational noise. A significant research gap related to the limited knowledge of detecting spall and jam faults exists considering the wide loading conditions in which they operate, including no-load pre-flight check. In addition, fault quantification studies of EMAs are limited to the wear mode, and no prior research exists on quantification of the spall mode.

The fault detection contribution involves an investigation into physical signal models that simulate vibration transients from jam faults, ball screw spalls, and ball bearing spalls. These models led to a new vibration-based method for detecting jam and spall faults via one accelerometer sensor and without an initial fault-feature learning stage. A set of health characterization signatures was theoretically derived based on EMA ball screw kinematics. These theoretical signatures were compared to signatures extracted from measured vibration signals from EMA test stands. The jam detection method has been successfully validated on fault-injected data sets collected from the NASA Ames Research Center Flyable Electro-Mechanical Actuator test stand.

The fault quantification work is related to spall quantification for ball screws and ball bearings. Several quantification methods originally developed for industrial applications are intensively reviewed. These methods, however, were developed for specific forms of fault transients to match constant-speed applications. Such methods are inadequate for EMAs for which a wide variety of transient fault types occurs. A new vibration-based quantification method has been developed to estimate spall size for ball screws and ball bearings within EMAs. The principle is based on locating geometric features on the vibrational jerk rather than direct acceleration measurements. The jerk is numerically derived from acceleration data using a Savitzky-Golay differentiator, which provides signal enhancement to accurately identify spall-related geometric features and their physical size. Fault quantification investigations were experimentally validated using fault-injected data sets collected from three dissimilar EMA test stands, two provided by the German Aerospace Center (DLR) and one by the NASA Ames Research Center Flyable Electro-Mechanical Actuator test stand.

Kurzfassung

Diese Studie zielt darauf ab, Fehlerdetektions- und Quantifizierungsmethoden für elektromechanische Aktoren (EMAs) zur Unterstützung von Predictive Maintenance Systemen zu untersuchen.

Bei EMAs handelt es sich um eine energieeffiziente Technologie zum Antrieb von Flugsteuerflächen. Da die Erfahrung mit EMAs während des Betriebes recht begrenzt ist, bedarf es intensiver Forschung um zu zeigen, dass diese Aktoren ebenso zuverlässig arbeiten, wie bestehende, hydraulische Systeme. Neuere Flugtests und beschleunigte Alterungsexperimente haben gezeigt, dass die mechanischen Komponenten von EMAs (z. B. Zahnräder, Lager und Kugelgewindespindel) ein signifikantes Potenzial für Predictive Maintenance haben. Diese Komponenten verschlechtern sich hauptsächlich auf zwei Arten: Verschleiß und lokales Abplatzen (z. B. Ermüdungsdefekt). Beginnende Formen beider Modi können frühzeitig über Vibrationsrauschen identifiziert werden. In Anbetracht der umfassenden Belastungsbedingungen, in denen sie arbeiten, einschließlich der Prüfung ohne Last vor dem Flug, besteht eine erhebliche Forschungslücke in Zusammenhang mit den begrenzten Kenntnissen über das Erkennen von Abplatz- und Blockierungsfehlern. Zusätzlich sind Studien zur Fehlerquantifizierung der EMAs auf den Verschleißmodus beschränkt. Eine frühere Studie zur Quantifizierung des Splittermodus existiert nicht.

Die Fehlererkennung umfasst eine Untersuchung physikalischer Signalmodelle, die Schwingungstransienten von Stauffehlern, Kugelgewindespindeln und Kugellagerspalten simulieren. Diese Modelle führten zu einem neuen schwingungsbasierten Verfahren zur Erkennung von Blockier- und Abplatzungsfehlern über einen Beschleunigungssensor und ohne eine anfängliche Fehlermerkmal Lernstufe. Eine Reihe von Signaturen zur Charakterisierung der Gesundheit wurde, basierend auf der EMA-Kugelschraubenkinematik, theoretisch abgeleitet. Diese theoretischen Signaturen wurden mit Signaturen verglichen, die aus gemessenen Vibrationssignalen von EMA-Testständen extrahiert wurden. Die Stauererkennungsmethode wurde erfolgreich anhand von fehlerinjizierten Datensätzen des NASA Ames Research Center Flyable Electro-Mechanical Actuator Prüfstandes validiert.

Die Arbeit der Fehlerquantifizierung ist eng verwandt mit der Splitterquantifizierung von Kugelgewindespindeln und Kugellagern. Mehrere, ursprünglich für industrielle Anwendungen entwickelte, Quantifizierungsmethoden werden intensiv untersucht. Diese Verfahren wurden jedoch für spezifische Formen von transienten Fehlern entwickelt, um Anwendungen mit konstanter Geschwindigkeit zu entsprechen. Solche Verfahren sind für EMAs ungeeignet, für die eine Vielzahl von transienten Fehlertypen auftritt. Eine neue schwingungsbasierte Quantifizierungsmethode wurde entwickelt, um die Abplatzungsgröße für Kugelgewindetriebe und Kugellager in EMAs zu schätzen. Das Prinzip beruht auf der Lokalisierung von geometrischen Merkmalen auf dem Vibrationsruck und nicht auf direkten Beschleunigungsmessungen. Der Ruck wird numerisch aus Beschleunigungsdaten unter Verwendung eines Savitzky Golay Differenzierers abgeleitet, der eine Signalverstärkung bereitstellt, um Splitterbezogene geometrische Merkmale und ihre physikalische Größe genau zu identifizieren.

Fehlerquantisierungsuntersuchungen wurden experimentell validiert, wobei die fehlerinjizierten Datensätze von drei verschiedenen EMA-Testständen gesammelt wurden, von denen zwei vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) bereitgestellt wurden, und einer vom NASA Ames Research Center Flyable Electro-Mechanical Actuator Prüfstand.

Contents

Acknowledgements	ix
Abstract	xi
Kurzfassung	xiii
List of Figures	xxii
List of Tables	xxiii
Abbreviations	xxvi
1 Introduction	1
1.1 Motivation	1
1.2 Aircraft Maintenance Cost – A Summary	2
1.3 Problem Statement	4
1.4 Research Question	6
1.5 Summary of Contributions	7
1.6 List of Publications	7
1.7 Thesis Structure	9
2 Literature Review	11
2.1 Flight Control Actuators	11
2.1.1 Introduction	11
2.1.2 Technology and Reliability Requirements	12
2.1.2.1 Hydraulic actuators	12
2.1.2.2 Electro-mechanical actuators	14
2.2 Degradation and Failure Types	17
2.2.1 Operational Failures	17
2.2.2 Maintenance Faults	18
2.3 EMA Health Monitoring	19
2.3.1 Condition-based Maintenance Architecture	19
2.3.2 Reliability of EMA Components	20
2.3.3 Main Degradation Modes	22
2.3.3.1 Localized faults	22
2.3.3.2 Distributed faults	25
2.3.3.3 Excessive backlash and jam	26

2.3.4	Fault Diagnosis	27
2.3.5	Fault Prognosis	32
2.4	Literature Summary	34
3	Fault Detection Methods	37
3.1	Overview	37
3.2	Vibration Analysis Approaches	37
3.3	Ball Bearings	39
3.3.1	Introduction	39
3.3.2	Vibration Response of Healthy Condition	41
3.3.3	Vibration Response of Localized Spalls	43
3.3.3.1	Kinematic signatures	43
3.3.3.2	Dynamic signatures	46
3.3.4	Vibration Response of Distributed Faults	51
3.4	Ball Screw Mechanism	52
3.4.1	Introduction	52
3.4.2	Kinematic Analysis	54
3.4.3	Vibration Response of Healthy Condition	58
3.4.4	Vibration Response of Spall Faults	59
3.4.5	Vibration Response of Partial Jam Fault	60
3.5	Fault Detection Performance Metrics	62
3.6	Summary	63
4	Fault Quantification Methods	65
4.1	Overview	65
4.2	Ball Spall Mechanisms	65
4.3	Spall Quantification Methods	71
4.4	Vibration Jerk: New Spall Quantification Method	76
4.4.1	Principles	76
4.4.1.1	Detecting average changes of successive transients	76
4.4.1.2	Spectral properties of numerical differentiators	80
4.4.2	Savitzky-Golay Differentiators	83
4.4.2.1	Introduction	83
4.4.2.2	Spectral characteristics	85
4.5	Summary	87
5	Experimental Work	89
5.1	Overview	89
5.2	FP7-Actuation 2015 Data	90

5.2.1	Test Stand and Data Description	90
5.2.2	Health Characterization	92
5.2.2.1	PSD features	93
5.2.2.2	Spectral kurtosis features	95
5.2.3	Spall Quantification	99
5.2.3.1	Tuning differentiator parameters	99
5.2.3.2	Quantification example	101
5.2.3.3	Overall results	106
5.3	NASA-FLEA Data	111
5.3.1	Test Stand and Data Description	111
5.3.2	Health Characterization	116
5.3.3	Spall Quantification	122
5.3.3.1	Tuning differentiator parameters	122
5.3.3.2	Detailed example	122
5.3.3.3	Overall results	125
5.4	Lufo-OMAHA Data	126
5.4.1	Test Stand and Data Description	126
5.4.2	Health Characterization	130
5.4.3	Spall Quantification	135
5.4.3.1	Ball screw noise	135
5.4.3.2	Detailed example	137
5.4.3.3	Overall results	141
5.5	Summary	146
6	Conclusions and Future Work	147
6.1	Conclusions	147
6.1.1	Fault Detection and Classification Challenges	148
6.1.2	Spall Quantification Challenges	148
6.2	Future Work	150
A	Signal Characterization Methods	151
A.1	PSD Features	151
A.2	Spectral Whitening	152
	Bibliography	157