INTELLIGENT FAULT DIAGNOSIS STRATEGIES ON ROTATING MACHINES FOR INDUSTRY 4.0

TAUHEED MIAN

CENTRE FOR AUTOMOTIVE RESEARCH AND TRIBOLOGY

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

OCTOBER 2024

Intelligent Fault Diagnosis Strategies on Rotating Machines for Industry 4.0

by

Tauheed Mian

Centre for Automotive Research and Tribology

Submitted

in fulfillment of the requirements of the degree of Doctor of Philosophy

to the

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

October 2024

Dedicated to My Parents and Teachers

Certificate

This is to certify that the thesis entitled **"Intelligent Fault Diagnosis Strategies on Rotating Machines for Industry 4.0"**, submitted by **Mr. Tauheed Mian (Entry Number: 2018ITZ8549)** to the Indian Institute of Technology Delhi, for the award of the degree of **Doctor of Philosophy**, is a record of the original, bonafide research work carried out by him under my supervision and guidance. The thesis has reached the standards fulfilling the requirements of the regulations related to the award of the degree.

The results contained in this thesis have not been submitted in part or in full to any other University or Institute for the award of any degree or diploma to the best of my knowledge.

Prof. S. Fatima
Associate Professor
Centre for Automotive Research and Tribology,
Indian Institute of Technology Delhi.
New Delhi- 110016, India

Date:
Place: New Delhi

Acknowledgements

I am delighted to get this excellent opportunity to present my sincere gratitude to **Dr. S Fatima**, my Ph.D. supervisor, for her consistent guidance throughout my Ph.D. work. Her motivational and kind attitude always helps me to move towards the inception and formation of objectives and their successful accomplishments. I am highly obliged to my DRC chairperson **Prof. B.K. Panigrahi** for his valuable mentorship and guidance throughout this research work. I am highly thankful to other DRC members including **Prof. R. K. Pandey** from the mechanical engineering department as an external expert, and **Prof. Deepak Kumar** as an internal expert for their constructive suggestions and recommendations during this research work.

I am thankful to my seniors and other lab mates for their valuable support and kindness. I especially thank **Mr. Anurag Choudhary** for his help. I am thankful to **Dr. Manish Raj**, **Ms. Sunali**, **Mr. Rismaya Kumar Mishra**, **Mr. Jonty Mago**, and **Mr. Afroz Ahmad** for their motivational words and help. I would also be grateful to respected lab assistants **Mr. Ashok Kumar**, **Mr. Shripal**, and **Mr. Ved Singh** for their support.

I am highly thankful to my parents and wife **Sumaiya Dabeer** for standing with me in all kinds of situations during the Ph.D. journey.

Finally, I would like to thank the **Almighty** for giving me this chance and my family members for consistent motivation and inspiration.

Tauheed Mian

Abstract

In any industrial system, rotating machines play a key role in seamless production. The reliable operation of rotating machines is ensured by their maximum availability through continuous health monitoring. In the present industrial scenario, due to intense market competition, industries are constrained to keep machinery maintenance costs to a minimum. Effective fault diagnosis is crucial to increase the reliability and availability of rotating machinery, minimize catastrophic loss, and reduce maintenance costs. Research and innovations in sensor systems, signal processing, Artificial Intelligence (AI), and internet-based technologies can be coupled as a comprehensive solution to address the demand for efficient and economical fault diagnostics within the context of Industry 4.0.

In this research work, an effort is made to develop a framework for intelligent fault diagnosis employing the growth of sensor technology, artificial intelligence, and cyber-physical systems by investigating in-situ edge computing and internet-based technology. To implement various strategies for intelligent fault diagnosis in rotating machines, the exploration of the most feasible sensor modalities in different working conditions is crucial. Experimentation for this exploration with contact and non-contact professional sensors is necessary to diagnose various faults. The information collected through professional sensors helps in building physics-based information regarding the faults through data-driven approaches. However, an important aspect of these sensors is the associated cost. The intense market competition in the present industrial scenario created a compulsion for industries to use economic sensors over professional sensors. The advancement in sensor technology opens the door to utilizing Micro Electro Mechanical System (MEMS) based sensors for intelligent, economical, and remote fault diagnosis using AI and the Internet of Things (IoT).

In this work, both contact and non-contact professional sensors are explored along with their fusion for the diagnosis of various faults in rotating machines. The faults simulated for this research are bearing faults, rotor unbalance, shaft misalignment, eccentricity, and gear faults. In this work, the development of intelligent fault diagnosis strategies is done using a data-driven approach due to its universality for simple and complex systems. Vibration is used as the contact modality, and radiated heat and sound are used as a non-contact modality.

Initially, vibration and Infrared Thermography (IRT) are explored for different bearing faults by adopting a sensor fusion-based strategy. Different statistical features are extracted, and further dimensionality reduction is done through Neighborhood Component Analysis (NCA) to cope with the curse of dimensionality in fusion. A support Vector Machine (SVM) with optimal features is used for the diagnosis of faults. With a fusion-based approach, better diagnosis results are obtained in terms of accuracy and detection quality. Further sound, which is another non-contact sensor modality, is explored in terms of its qualitative aspect for the diagnosis of faults. Substantially good results are observed using the sound quality features. The increase in fault severity needs robust features to get more accurate diagnosis information. For this purpose, image-based spatial information is used from vibration and IRT data using a deep learning-based strategy through Convolutional Neural Network (CNN) based deep feature extraction. Different combinations of faults are diagnosed with substantially better accuracy through this strategy.

Finally, after descriptively exploring different sensor modalities toward feasibility for economic and remote fault diagnosis, vibration monitoring is adopted, and an Artificial Intelligence of Things (AIoT) based package is developed. This is done by an integrated pulp of dedicatedly developed hardware, edge computing, AI, and IoT. The developed system is successfully validated with different fault conditions of rotating machine components. Moreover, the built AIoT-based system effectively illustrates real-time and remote fault detection and control for rotating machinery.

सार

किसी भी औद्योगिक प्रणाली में, घूमने वाली मशीनें निर्बाध उत्पादन में महत्वपूर्ण भूमिका निभाती हैं। घूमने वाली मशीनों का विश्वसनीय संचालन निरंतर स्वास्थ्य निगरानी के माध्यम से उनकी अधिकतम उपलब्धता द्वारा सुनिश्चित किया जाता है। वर्तमान औद्योगिक परिदृश्य में, तीव्र बाजार प्रतिस्पर्धा के कारण, उद्योग मशीनरी रखरखाव लागत को न्यूनतम रखने के लिए विवश हैं। घूमने वाली मशीनरी की विश्वसनीयता और उपलब्धता बढ़ाने, विनाशकारी नुकसान को कम करने और रखरखाव की लागत को कम करने के लिए प्रभावी दोष निदान महत्वपूर्ण है। उद्योग 4.0 के संदर्भ में कुशल और किफायती दोष निदान की मांग को पूरा करने के लिए सेंसर सिस्टम, सिग्नल प्रोसेसिंग, कृत्रिम बुद्धिमत्ता और इंटरनेट-आधारित प्रौद्योगिकियों में अनुसंधान और नवाचारों को एक व्यापक समाधान के रूप में जोड़ा जा सकता है।

इस शोध कार्य में, इन-सीटू एज कंप्यूटिंग और इंटरनेट-आधारित प्रौद्योगिकी की जांच करके सेंसर प्रौद्योगिकी, कृत्रिम बुद्धिमत्ता और साइबर-भौतिक प्रणालियों के विकास को नियोजित करते हुए बुद्धिमान दोष निदान के लिए एक रूपरेखा विकसित करने का प्रयास किया गया है। घूमने वाली मशीनों में बुद्धिमान दोष निदान के लिए विभिन्न रणनीतियों को लागू करने के लिए, विभिन्न कामकाजी परिस्थितियों में सबसे व्यवहार्य सेंसर तौर-तरीकों की खोज महत्वपूर्ण है। विभिन्न दोषों के निदान के लिए संपर्क और गैर-संपर्क पेशेवर सेंसर के साथ इस अन्वेषण का प्रयोग आवश्यक है। पेशेवर सेंसर के माध्यम से एकत्र की गई जानकारी डेटा-संचालित दृष्टिकोण के माध्यम से दोषों के संबंध में भौतिकी-आधारित जानकारी बनाने में मदद करती है। हालाँकि, इन सेंसरों का एक महत्वपूर्ण पहलू संबंधित लागत है। वर्तमान औद्योगिक परिदृश्य में तीव्र बाजार प्रतिस्पर्धा ने उद्योगों के लिए पेशेवर सेंसरों के बजाय आर्थिक सेंसरों का उपयोग करने की मजबूरी पैदा कर दी है। सेंसर प्रौद्योगिकी में प्रगति ने आर्टिफिशियल इंटेलिजेंस (एआई) और इंटरनेट ऑफ थिंग्स (आईओटी) का उपयोग करके बुद्धिमान, किफायती और दूरस्थ दोष निदान के लिए माइक्रो इलेक्ट्रो मैकेनिकल सिस्टम (एमईएमएस) आधारित सेंसर का उपयोग करने का द्वार खोल दिया है।

इस कार्य में, घूमने वाली मशीनों में विभिन्न दोषों के निदान के लिए उनके संलयन के साथ-साथ संपर्क और गैर-संपर्क पेशेवर सेंसर का पता लगाया जाता है। इस शोध के लिए सिम्युलेटेड दोष असर दोष, रोटर असंतुलन, शाफ्ट मिसलिग्न्मेंट, विलक्षणता और गियर दोष हैं। इस कार्य में, सरल और जटिल प्रणालियों के लिए इसकी सार्वभौमिकता के कारण डेटा-संचालित दृष्टिकोण का उपयोग करके बुद्धिमान दोष निदान रणनीतियों का विकास किया जाता है। कंपन का उपयोग संपर्क साधन के रूप में किया जाता है, और विकिरणित गर्मी और ध्वनि का उपयोग गैर-संपर्क साधन के रूप में किया जाता है।

प्रारंभ में, सेंसर फ़्यूज़न-आधारित रणनीति अपनाकर विभिन्न असर दोषों के लिए कंपन और इन्फ्रारेड थर्मोग्राफी (आईआरटी) का पता लगाया जाता है। विभिन्न सांख्यिकीय विशेषताएं निकाली जाती हैं, और संलयन में आया-मीता के अभिशाप से निपटने के लिए नेबरहुड कंपोनेंट एनालिसिस (एनसीए) के माध्यम से आयामीता में और

कमी की जाती है। दोषों के निदान के लिए इष्टतम सुविधाओं वाली एक सपोर्ट वेक्टर मशीन (एसवीएम) का उपयोग किया जाता है। फ़्यूज़न-आधारित दृष्टिकोण के साथ, सटीकता और पता लगाने की गुणवत्ता के मामले में बेहतर निदान परिणाम प्राप्त होते हैं। इसके अलावा ध्वनि, जो एक अन्य गैर-संपर्क सेंसर पद्धति है, दोषों के निदान के लिए इसके गुणात्मक पहलू के संदर्भ में पता लगाया जाता है। ध्वनि गुणवत्ता सुविधाओं का उपयोग करके काफी अच्छे परिणाम देखे गए हैं। दोष की गंभीरता में वृद्धि के लिए अधिक सटीक निदान जानकारी प्राप्त करने के लिए मजबूत सुविधाओं की आवश्यकता है। इस प्रयोजन के लिए, कन्वोल्यूशनल न्यूरल नेटवर्क (सीएनएन) आधारित गहन फीचर निष्कर्षण के माध्यम से गहन शिक्षण-आधारित रणनीति का उपयोग करके कंपन और आईआरटी डेटा से छवि-आधारित स्थानिक जानकारी का उपयोग किया जाता है। इस रणनीति के माध्यम से दोषों के विभिन्न संयोजनों का काफी बेहतर सटीकता के साथ निदान किया जाता है।

अंत में, आर्थिक और दूरस्थ दोष निदान के लिए व्यवहार्यता की दिशा में विभिन्न सेंसर तौर-तरीकों की वर्णनात्मक खोज के बाद, कंपन निगरानी को अपनाया जाता है, और एक आर्टिफिशियल इंटेलिजेंस ऑफ थिंग्स (एआईओटी) आधारित पैकेज विकसित किया जाता है। यह समर्पित रूप से विकसित हार्डवेयर, एज कंप्यूटिंग, एआई और आईओटी के एकीकृत पल्प द्वारा किया जाता है। विकसित प्रणाली को घूर्णन मशीन घटकों की विभिन्न दोष स्थितियों के साथ सफलतापूर्वक मान्य किया गया है। इसके अलावा, निर्मित एआईओटी-आधारित प्रणाली घूर्णन मशीनरी के लिए वास्तविक समय और दूरस्थ दोष का पता लगाने और नियंत्रण को प्रभावी ढंग से दर्शाती है।

Contents

List of Figures

List of Tables

Abbreviations

AI	**A**rtificial **I**Intelligence
AIoT	**A**rtificial **I**ntelligence of **T**hings
CNN	**C**onvolutional **N**eural **N**etwork
CQT	**C**onstant **Q**-**T**ransform
CWT	**C**ontinuous **W**avelets **T**ransform
ML	**M**achine **L**earning
HATS	**H**ead and **T**orso **S**imulator
IoT	**I**nternet of **T**hings
IRT	**I**nfrared **T**hermography
MEMS	**M**icro **E**lectro **M**echanical **S**ystem
MFS	**M**achine **F**ault **S**imulator
DL	**D**eep **L**earning
NCA	**N**eighbourhood **C**omponent **A**nalysis
PCA	**P**rinciple **C**omponent **A**nalysis
ROI	**R**egion of **I**nterest
SBC	**S**ingle **B**oard **C**omputer
SQ	**S**ound **Q**uality
SVM	**S**upport **V**ector **M**achine

Symbols

s	Vibration signal	σ	Stefan-Boltzmann constant
s_a	Analytic signal	ϕ	Contact angle
Q	Total heat energy	Q_h	Convection heat energy
Q_r	Radiation heat energy	c	Specific heat
ε	Emissivity	T	Absolute temperature
L	Loudness	L'	Specific loudness
L_L	Loudness level	F_s	Fluctuation strength
F'_s	Specific fluctuation strength	z	Bark scale
R_g	Roughness	R'_g	Specific roughness
S_h	Sharpness	A_rI	Articulation Index
ψ	Mother wavelet	ψ^*	Complex conjugate of mother wavelet
τ	Translational factor	β	Scale factor
w_0	Center of support	I_{2D}	Total number of 2D images
Z	Total number of data points	w	Window size
r	Overlap factor	n	Frequency bin
K_n	Window length	f_n	Center frequency
f_s	Sampling frequency	χ	Bins per octave