WEARABLE ASSISTIVE TECHNOLOGIES AND AI-DRIVEN APPROACHES FOR SLEEP APNEA DETECTION AND MONITORING

AMIT BHONGADE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI
AUGUST 2025

WEARABLE ASSISTIVE TECHNOLOGIES AND AI-DRIVEN APPROACHES FOR SLEEP APNEA DETECTION AND MONITORING

by

AMIT BHONGADE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING

Submitted

in fulfillment of the requirements of the Degree of Doctor of Philosophy

to the

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

AUGUST 2025

Dedicated to

My Beloved
Father and Mother -

who always inspire me to dream big

"It is better to live your own destiny imperfectly than to live an imitation of somebody else's life with perfection"

—*Bhagavad Gita*

Certificate

This is to certify that the thesis entitled **"Wearable Assistive Technologies and AI-Driven Approaches for Sleep Apnea Detection and Monitoring "** being submitted by **Mr. Amit Bhongade** to the Department of Electrical Engineering, Indian Institute of Technology-Delhi, for the award of the degree of **Doctor of Philosophy** is the record of the bonafide research work carried out by him under our supervision. In our opinion, the thesis has reached the standards fulfilling the requirements of the regulations relating to the degree.

The work contained in this thesis have not been submitted either in part or in full to any other university or institute for the award of any degree or diploma.

(**Prof. Tapan Kumar Gandhi**)
Dept. of Electrical Engineering
Indian Institute of Technology-Delhi
Hauz Khas, New Delhi 110016
INDIA

(**Prof. Prathosh AP**)
Dept. of Electrical Communication Engineering
Indian Institute of Science Bengaluru
Bangalore, 560012
INDIA

Acknowledgements

First and foremost, I would like to express my gratitude to the Almighty for providing me with the strength, wisdom, and perseverance to complete this thesis. Without His guidance and blessings, this thesis would not have been possible.

I extend my profound gratitude to my advisor, Prof. Tapan Kumar Gandhi, whose persistent supervision and insightful feedback have shaped this thesis in countless ways. I am equally grateful to my co-advisor, Prof. Prathosh AP, for his timely and invaluable inputs that have significantly contributed to the work's quality.

In no particular order, I would like to thank my SRC members, Prof. Kolin Paul, Prof. Sumantra Dutta Roy, and Prof. Lalan Kumar, for their valuable comments on my research work.

I would like to thank the Ministry of Education, Government of India for providing financial support during my Ph.D. (2021-2025). I gratefully acknowledge the travel support from the Research Scholar Travel Award (RSTA) and contingency fund, which has given me the wonderful opportunity to participate in national and international conferences and workshops and present my work across the globe.

I sincerely thank my esteemed collaborator, colleague, and friend, Dr. Rohit Gupta, for his constant support, valuable feedback, and collaborative spirit. His innovative approach to complex problems and insightful discussions have greatly influenced the direction of my research and contributed significantly to my personal and academic growth. I am also profoundly thankful to my other research collaborators in the Neurocomputing Lab, Chandra Bhushan Kumar and Chayan Majumder. Their dedicated efforts and contributions to their respective areas of research have greatly enriched the overall research ecosystem within the lab. Their expertise, enthusiasm, and collaborative mindset have not only enhanced my own work but have also fostered an environment of shared learning and progress. Working along-

side them has been a rewarding and intellectually stimulating experience. I would like to thank all my lab members at the Neurocomputing Lab, IIT Delhi: Dr. Kritika, Raghav, Sapna, Dr. Shefali, Prerna, Dr. Sangita, Dr. Chetan, Dr. Taranjit, Anupam, Siddhant, Prakash, Vivek, and Rakesh. Your engaging discussions, collaboration, and moral support have been invaluable throughout my journey. The camaraderie and encouragement within the lab have made this experience truly special, and I am deeply grateful for the moments of learning, collaboration, and friendship we've shared.

I am deeply grateful to my grandparents, the Late Mr. Gulabrao Bhongade and the Late Mrs. Laxmibai Bhongade, for their love, support, and encouragement. Their belief in me and their inspiring words continue to guide me in pursuing my dreams with confidence and determination. Their blessings and cherished memories continue to guide me in every step I take. I extend my deepest gratitude to my parents, Mr. Gangadhar Bhongade and Mrs. Sindhu Bhongade, for their unwavering support, love, and encouragement have been my constant source of strength throughout this journey. Your sacrifices, belief in my potential, and guidance have shaped me into who I am today. This milestone is as much yours as it is mine. I would like to thank my brother, Sumit Bhongade, for his unwavering support and for taking care of our family while I was pursuing my Ph.D. His selflessness and dedication have been a tremendous help, and I am deeply grateful for his presence in my life. To my dear friend, Ms. Linkita Dewangan, for your invaluable help in proofreading my thesis—thank you for your unwavering support, patience, and encouragement throughout this journey. Your belief in me and the joy you bring to my life have made all the difference. I am truly grateful for your presence and inspiration every day.

At last, I would like to pay my sincere gratitude to one and all who have directly or indirectly helped me throughout this journey.

Amit Bhongade

Abstract

Sleep disorders, such as obstructive sleep apnea (OSA), pose serious health risks, impacting cardiovascular, neurological, and cognitive functions. OSA, one of the most prevalent sleep disorders, is characterized by repeated episodes of partial or complete airway obstruction during sleep, leading to intermittent hypoxia, sleep fragmentation, and excessive daytime sleepiness. If left untreated, OSA is associated with an increased risk of hypertension, stroke, heart failure, metabolic disorders, and impaired cognitive function. Traditional diagnostic methods, such as polysomnography (PSG), are expensive, complex, and inconvenient for large-scale screening or home-based monitoring. This thesis addresses these challenges by developing wearable sensor-based systems and employing machine and deep learning models to improve the detection and early prediction of sleep disorders using various physiological signals.

One of the primary contributions of this research is the development of a wearable respiration monitoring system that utilizes an Inertial Measurement Unit (IMU), Electrocardiogram (ECG), and Photoplethysmogram (PPG) sensors to capture the corresponding physiological signals related to sleep apnea. The system's performance was validated through extensive experimental trials, demonstrating its effectiveness in detecting subtle respiratory variations associated with OSA. The temporal parameters derived from IMU, ECG, and PPG were benchmarked against traditional PSG-based methods, and signal processing techniques were employed to minimize noise and improve signal quality. A comparative analysis was conducted using statistical, machine learning, and deep learning models to evaluate the contribution of each sensor modality to sleep apnea detection. The findings indicate that integrating multiple physiological signals significantly enhances the accuracy and reliability of respiration estimation, offering a promising alternative to traditional PSG-based diagnosis.

In addition to respiration-based analysis, this thesis introduces a novel feature-engineering approach for sleep apnea detection using single-lead ECG signals. A comprehensive machine learning framework was developed to extract key cardiac features such as heart rate variability (HRV) and R-R intervals. Furthermore, previously underutilized features (time domain, time-frequency domain, and nonlinear entropy-based features) were incorporated to enhance the discriminatory power of the model. The framework was tested with multiple machine learning classifiers across independent datasets, and the results demonstrated its robustness and reliability in detecting sleep apnea in diverse scenarios. The lightweight nature of the model ensures efficient real-time processing, making it highly suitable for integration into wearable and home-based diagnostic systems.

Building upon machine learning methodologies, this research further explores the application of deep learning techniques to automate sleep apnea detection. Various architectures, including Convolutional Neural Networks (CNNs), Recurrent Neural Networks (RNNs), and Transformer-based models, were evaluated for their effectiveness in processing physiological signals. Unlike traditional methods that rely on manually extracted features, deep learning models can automatically learn and extract intricate patterns from raw physiological data, leading to improved classification performance. The models were optimized for real-time deployment, ensuring seamless integration into wearable devices for continuous, non-invasive sleep monitoring. The results underscore the effectiveness of deep learning in sleep apnea detection, providing a scalable and robust solution for real-world applications.

Beyond sleep apnea detection, this thesis also presents a preliminary study on sleepwalking detection using a wearable IMU-based gait analysis system. Sleepwalking is a complex parasomnia disorder characterized by abnormal nocturnal movements, yet its objective detection remains challenging. In this study, an IMU sensor mounted on the shank was used to monitor gait phases and events in healthy individuals. Three machine learning classifiers—Support Vector Machine (SVM), K-Nearest Neighbor (KNN), and Linear Discriminant Analysis (LDA)—were employed to identify gait events and temporal parameters. The system demonstrated stable performance across different sensor locations and individual variations, highlighting its robustness. While this study was conducted on healthy participants,

the findings lay the foundation for future research aimed at detecting sleepwalking episodes in individuals with diagnosed sleep disorders. This research paves the way for a non-invasive, home-based diagnostic tool that could aid clinicians in assessing and managing sleepwalking more effectively.

The overarching goal of this thesis is to bridge the gap between traditional sleep disorder diagnostics and modern wearable technology by developing accessible, cost-effective, and efficient solutions for real-world implementation. The integration of wearable sensor technology with machine learning and deep learning models has the potential to transform sleep disorder diagnosis, enabling real-time monitoring, early detection, and large-scale screening. The findings from this work have significant implications for clinical practice, as they provide alternative methodologies for diagnosing and managing sleep disorders without the need for complex and expensive PSG-based assessments. By offering a scalable, user-friendly approach, this research contributes to the growing field of digital health and telemedicine, paving the way for future advancements in sleep disorder diagnosis and management.

सार

ऑब्सट्रक्टिव स्लीप एपनिया (ओएसए) जैसे नींद संबंधी विकार गंभीर स्वास्थ्य जोखिम पैदा करते हैं, जो कार्डियोवैस्कुलर, न्यूरोलॉजिकल और संज्ञानात्मक कार्यों को प्रभावित करते हैं। ओएसए, सबसे प्रचलित नींद विकारों में से एक, नींद के दौरान आंशिक या पूर्ण वायुमार्ग बाधा के बार–बार एपिसोड की विशेषता है, जिससे रुक–रुक कर हाइपोक्सिया, नींद विखंडन और दिन में अत्यधिक नींद आती है। यदि अनुपचारित छोड़ दिया जाता है, तो ओएसए उच्च रक्तचाप, आघात, हृदय की विफलता, चयापचय संबंधी विकारों और बिगड़े संज्ञानात्मक कार्य के बढ़ते जोखिम से जुड़ा हुआ है। पॉलीसोम्नोग्राफी (पीएसजी) जैसे पारंपरिक नैदानिक तरीके महंगे, जटिल और बड़े पैमाने पर जांच या घर–आधारित निगरानी के लिए असुविधाजनक हैं। यह थीसिस पहनने योग्य संवेदक–आधारित प्रणालियों को विकसित करके और विभिन्न शारीरिक संकेतों का उपयोग करके नींद विकारों का पता लगाने और प्रारंभिक भविष्यवाणी में सुधार करने के लिए मशीन और गहन शिक्षण मॉडल को नियोजित करके इन चुनौतियों का समाधान करता है।

इस शोध के प्राथमिक योगदानों में से एक पहनने योग्य श्वसन निगरानी प्रणाली का विकास है जो स्लीप एपनिया से संबंधित शारीरिक संकेतों को पकड़ने के लिए एक जड़त्वीय मापन इकाई (आईएमयू) इलेक्ट्रोकार्डियोग्राम (ईसीजी) और फोटोप्लेथिस्मोग्राम (पीपीजी) सेंसर का उपयोग करता है। प्रणाली के प्रदर्शन को व्यापक प्रयोगात्मक परीक्षणों के माध्यम से मान्य किया गया था, जो ओएसए से जुड़े सूक्ष्म श्वसन विविधताओं का पता लगाने में इसकी प्रभावशीलता का प्रदर्शन करता है। आईएमयू, ईसीजी और पीपीजी से प्राप्त अस्थायी मापदंडों को पारंपरिक पीएसजी–आधारित तरीकों के खिलाफ बेंचमार्क किया गया था, और सिग्नल प्रोसेसिंग तकनीकों को शोर को कम करने और सिग्नल की गुणवत्ता में सुधार के लिए नियोजित किया गया था। स्लीप एपनिया का पता लगाने में प्रत्येक संवेदक पद्धति के योगदान का मूल्यांकन करने के लिए सांख्यिकीय, मशीन लर्निंग और डीप लर्निंग मॉडल का उपयोग करके एक तुलनात्मक विश्लेषण किया गया था। निष्कर्षों से संकेत मिलता है कि कई शारीरिक संकेतों को एकीकृत करने से श्वसन आकलन की सटीकता और विश्वसनीयता में काफी वृद्धि होती है, जो पारंपरिक पीएसजी–आधारित निदान के लिए एक आशाजनक विकल्प प्रदान करता है।

श्वसन–आधारित विश्लेषण के अलावा, यह शोध प्रबंध एकल–लीड ईसीजी संकेतों का उपयोग करके स्लीप एपनिया का पता लगाने के लिए एक नए फीचर–इंजीनियरिंग दृष्टिकोण का परिचय देता है। हृदय गति परिवर्तनशीलता

(एचआरवी) और आर–आर अंतराल जैसी प्रमुख हृदय संबंधी विशेषताओं को निकालने के लिए एक व्यापक मशीन लर्निंग ढांचा विकसित किया गया था। इसके अलावा, मॉडल की भेदभावपूर्ण शक्ति को बढ़ाने के लिए पहले कम उपयोग की गई विशेषताओं (टाइम डोमेन, टाइम–फ्रीक्वेंसी डोमेन और गैर–रैखिक एन्ट्रापी–आधारित विशेषताएं) को शामिल किया गया था। फ्रेमवर्क का परीक्षण स्वतंत्र डेटासेट में कई मशीन लर्निंग क्लासिफायर के साथ किया गया था, और परिणामों ने विविध परिदृश्यों में स्लीप एपनिया का पता लगाने में इसकी मजबूती और विश्वसनीयता का प्रदर्शन किया। मॉडल की हल्की प्रकृति कुशल वास्तविक समय प्रसंस्करण सुनिश्चित करती है, जिससे यह पहनने योग्य और घर–आधारित नैदानिक प्रणालियों में एकीकरण के लिए अत्यधिक उपयुक्त हो जाता है।

मशीन लर्निंग पद्धतियों के आधार पर, यह शोध आगे स्लीप एपनिया डिटेक्शन को स्वचालित करने के लिए डीप लर्निंग तकनीकों के अनुप्रयोग की खोज करता है। शारीरिक संकेतों को संसाधित करने में उनकी प्रभावशीलता के लिए कन्वोलुशनल न्यूरल नेटवर्क (सी. एन. एन.), आवर्ती न्यूरल नेटवर्क (आर. एन. एन.) और ट्रांसफॉर्मर–आधारित मॉडल सहित विभिन्न संरचनाओं का मूल्यांकन किया गया। पारंपरिक विधियों के विपरीत जो हाथ से निकाली गई विशेषताओं पर भरोसा करते हैं, डीप लर्निंग मॉडल स्वचालित रूप से कच्चे शारीरिक डेटा से जटिल पैटर्न सीख सकते हैं और निकाल सकते हैं, जिससे वर्गीकरण प्रदर्शन में सुधार होता है। मॉडल को वास्तविक समय पर लगाने के लिए अनुकूलित किया गया था, जिससे निरंतर, गैर–आक्रामक नींद की निगरानी के लिए पहनने योग्य उपकरणों में निर्बाध एकीकरण सुनिश्चित किया जा सके। परिणाम स्लीप एपनिया का पता लगाने में डीप लर्निंग की प्रभावशीलता को रेखांकित करते हैं, जो वास्तविक दुनिया के अनुप्रयोगों के लिए एक स्केलेबल और मजबूत समाधान प्रदान करते हैं।

स्लीप एपनिया का पता लगाने के अलावा, यह थीसिस पहनने योग्य आईएमयू–आधारित चाल विश्लेषण प्रणाली का उपयोग करके स्लीपवॉकिंग का पता लगाने पर एक प्रारंभिक अध्ययन भी प्रस्तुत करता है। स्लीपवॉकिंग एक जटिल पैरासोमनिया विकार है जो असामान्य निशाचर गतिविधियों की विशेषता है, फिर भी इसका उद्देश्यपूर्ण पता लगाना चुनौतीपूर्ण बना हुआ है। इस अध्ययन में, स्वस्थ व्यक्तियों में चाल के चरणों और घटनाओं की निगरानी के लिए शैंक पर लगे एक आईएमयू सेंसर का उपयोग किया गया था। तीन मशीन लर्निंग क्लासिफायर–सपोर्ट वेक्टर मशीन (एसवीएम) के–नियर नेबर (केएनएन) और लीनियर डिस्क्रिमिनेंट एनालिसिस (एलडीए)–को चाल की घटनाओं और अस्थायी मापदंडों की पहचान करने के लिए नियोजित किया गया था। प्रणाली ने विभिन्न संवेदक स्थानों और व्यक्तिगत विविधताओं में स्थिर प्रदर्शन का प्रदर्शन किया, जो इसकी मजबूती को उजागर करता है। जबकि यह अध्ययन स्वस्थ प्रतिभागियों पर आयोजित किया गया था, निष्कर्ष भविष्य के शोध की नींव रखते हैं जिसका उद्देश्य निदान किए गए नींद विकारों वाले व्यक्तियों में नींद में चलने के प्रकरणों का पता लगाना है। यह शोध एक गैर–आक्रामक, घर–आधारित नैदानिक उपकरण का मार्ग प्रशस्त करता है जो स्लीपवॉकिंग का अधिक प्रभावी ढंग से आकलन और प्रबंधन करने में चिकित्सकों की सहायता कर सकता है।

इस थीसिस का व्यापक लक्ष्य वास्तविक दुनिया के कार्यान्वयन के लिए सुलभ, लागत प्रभावी और कुशल समाधान

विकसित करके पारंपरिक नींद विकार निदान और आधुनिक पहनने योग्य तकनीक के बीच पुल बनाता है। मशीन लर्निंग और डीप लर्निंग मॉडल के साथ पहनने योग्य संवेदक प्रौद्योगिकी के एकीकरण में नींद विकार के निदान को बदलने की क्षमता है, जो वास्तविक समय की निगरानी, जल्दी पता लगाने और बड़े पैमाने पर स्क्रीनिंग को सक्षम बनाता है। इस काम के निष्कर्षों के नैदानिक अभ्यास के लिए महत्वपूर्ण निहितार्थ हैं, क्योंकि वे जटिल और महंगे पीएसजी–आधारित मूल्यांकन की आवश्यकता के बिना नींद विकारों के निदान और प्रबंधन के लिए वैकल्पिक कार्यप्रणाली प्रदान करते हैं। एक मापनीय, उपयोगकर्ता के अनुकूल दृष्टिकोण की पेशकश करके, यह शोध डिजिटल स्वास्थ्य और टेलीमेडिसिन के बढ़ते क्षेत्र में योगदान देता है, जिससे नींद विकार के निदान और प्रबंधन में भविष्य की प्रगति का मार्ग प्रशस्त होता है।

Contents

List of Figures

List of Tables

Abbreviations

OSA	Obstructive Sleep Apnea
IMU	Inertial Measurement Units
WRMS	Wearable Respiration Monitoring System
EQO2	Equivital system
MAE	Mean Absolute Error
BREA	Breathing Rate Estimation Accuracy
RMSE	Root Mean Square Error
DCNN	Deep Convolution Neural Network
SB	Sensor Belt
TI_{PP}	Time Interval Between Peak to Peak
PPG	Photoplethysmography
PR	Predicted Respiration
RR	Respiration Rate
PSG	Polysomnography
SFFS	Sequential Forward Feature Selection
ECG	Electrocardiogram
TFD	Time and Frequency Domain
EDR	Electrocardiogram-derived Respiratory
HRV	Heart Rate Variability
MSDA	Multiscale Dilation Attention
WLTD	Weighted-loss Time-Dependent
PMCR	Phase-Modulated Continuous Wave Radar
WT	Wavelet Transform
cd1	Details Coefficients 1

SBD	Sleep Breathing Disorder
rc1	Auto-regressive Coefficients
AR	Autoregressive
EEG	Electroencephalogram
ML	Machine Learning
DL	Deep Learning
CNN	2D convolutional neuralnetwork
BN	batch normalization
MP	Pooling layer,
FC	Fully Connected Layer
FSR	Force Sensitive Registance