ABSTRACT

Modern robotic systems require wireless, battery-free, and energy-efficient approaches for sensing and communication systems to detect human interaction and environmental changes during operation. However, conventional sensing approaches, such as capacitive arrays, infrared sensors, and camera-based systems, often require complex wiring, high power consumption, and dense sensor networks, which limit their scalability and flexibility in robotic applications. This dissertation presents the design of wireless-powered RF resonant circuits for sensing and communication in human–collaborative robots. The proposed work is based on resonance-driven sensing using Single-Conductor Power Transfer (SCPT) and Surface Wireless Power Transfer (SWPT), where conductive surfaces and resonant structures are simultaneously utilized for wireless power transfer, passive sensing, and low-power communication. Unlike conventional wireless systems that require dedicated return paths or multiple interconnections, the proposed approach operates using a single excitation conductor, while the surrounding environment acts as a distributed capacitive return path, which provides a more flexible power source compared to traditional two-wire systems.

A GaN-based RF power amplifier operating at 13.56 MHz is used to excite conductive surfaces, while a distributed resonant receiver coil is employed to harvest power at its SRF. Compact passive resonant receivers harvest RF energy through capacitive coupling and operate without local batteries or a return ground wire connection. The resonant receiver includes an RF-DC converter circuit that rectifies the signal from the receiver coil into DC, which is then processed through a low-pass filter and a buck-boost converter to provide stable power to the load. The system is capable of supporting a wide range of operating conditions, from heavy loads (>20 W) to ultra-low-power loads (<50 μW). The proposed SCPT and SWPT-based resonant receiver circuit is designed for sensing and communication in human–collaborative robotic applications. The sensing circuit detects environmental interactions, including human proximity, touch, force, and conductive object presence. These interactions perturb the resonance characteristics of the system, producing measurable variations in voltage amplitude and SRF. These resonance variations are then utilized for sensing and low-data-rate communication.

The proposed framework is experimentally validated through multiple sensing platforms for human–collaborative robot (HCR) applications. A wireless-powered passive resonant omnidirectional sensing system is presented for proximity and contact detection in HCRs. The system utilizes SWPT-based wireless-powered receivers operating near 3.6 MHz, with

negligible idle power consumption on the order of nW and passive circuit dissipation of approximately 29 μW. The resonant receiver detects both conductive objects and human presence under proximity and direct-contact conditions by monitoring resonance-frequency variations. In addition, the system supports simple one-bit digital communication while enabling multiple passive receivers to be powered from a single transmitter, thereby improving maneuverability and scalability in robotic environments. For lower-power operation, a Resonance-Based Object Sensing System (ROSS) is developed for soft robotic skin applications in HCRs. High-Q resonant coils ($Q > 550$), integrated into compliant robotic skins, operate at 1.4 MHz with ultra-low excitation power levels ranging from −16 dBm to −56 dBm. The passive RF-DC converter front-end generates sufficient DC output for direct interfacing with microcontroller units without external amplification. The system distinguishes between insulating materials, conductive objects, and human interaction, while also differentiating gentle touch from higher applied forces exceeding 21 N. This enables improved safety and selectivity for robotic arm end effectors and robotic fingers.

Second, a resonance-based sensing approach on large-surface for human–machine interaction (HMI) is developed. In this method, the entire conductive surface functions as a sensor by varying its resonance characteristics in response to object interactions. The surface is excited using a single conductor powered by a resonant coil, which provides a passive voltage gain at -16 dBm input power. The entire conductive surface operates as a distributed sensor at 13.56 MHz in the ISM band. A secondary resonant coil is employed to amplify voltage variations caused by human touch on the surface. The system delivers a high-voltage output signal that can be directly interfaced with a computing platform through an ADC, thereby eliminating the need for external amplifiers or analog filters. This technique offers a cost-effective, low-power, and large-area sensing solution for HCR. The proposed system can be seamlessly integrated into machines or robotic platforms for HMI sensing applications.

Finally, this dissertation investigates scalable implementation strategies and the nonlinearity of receivers in distributed sensing systems. High-Q resonators are adapted for multilayer printed circuit board (PCB) and CMOS-compatible integration to enable compact and manufacturable sensing nodes. In addition, SCPT-based sensor testing in aquatic environments is explored to achieve low-cost and safer near-field sensing, while ensuring aquatic mammal safety. By combining wireless power transfer, passive circuit-based RF resonance sensing, and low-power communication within a unified resonant framework, this work establishes a scalable and energy-efficient platform for next-generation 6G/7G communication, human–collaborative robots, smart surfaces, and distributed sensing environments.

सार

आधुनिक रोबोटिक प्रणालियों में मानव-रोबोट अंतःक्रिया (HRI) तथा गतिशील पर्यावरणीय परिवर्तनों को सटीक रूप से पहचानने के लिए तार-रहित , बैटरी-रहित और ऊर्जा -कुशल संवेदन एवं संचार प्रणालियों की अत्यंत आवश्यकता है। हालांकि, वर्तमान में प्रचलित संवेदन तकनीकें, जैसे धारिता सरणी (capacitive arrays), अवरक्त विकिरण (IR) और कैमरा-आधारित संवेदन प्रणालियों के लिए अक्सर जटिल तारों, उच्च बिजली की खपत तथा संवेदक की सरणी आधारित प्रसारण तंत्र आवश्यकता होती है, जो रोबोटिक अनुप्रयोगों में उनकी विस्तार क्षमता और अनुकूलता को सीमित करते हैं। यह शोध प्रबंध मानव-सहयोगी रोबोटों (HCR) हेतु संवेदन और संचार के लिए तार रहित रेडियो-आवृत्ति अनुनाद संचालित विद्युत परिपथों की रूपरेखा प्रस्तुत करता है। प्रस्तावित शोध में एकल-चालक विद्युत शक्ति स्थानांतरण (SCPT) तथा सतही तार-रहित विद्युत शक्ति स्थानांतरण (SWPT) पर आधारित अनुनाद-संचालित संवेदन तकनीक का उपयोग किया गया है। इसमें चालक सतहों और अनुनादी संरचनाओं को तार-रहित विद्युत ऊर्जा स्थानांतरण, निष्क्रिय संवेदन (passive sensing) और कम विद्युत ऊर्जा संचार के लिए एकीकृत किया गया है। पारंपरिक तार-रहित विद्युत ऊर्जा स्थानांतरण प्रणालियों के विपरीत, जिन्हें समर्पित वापसी पथ या कई अंतर्संबंध की आवश्यकता होती है, प्रस्तावित प्रणाली एक विद्युत उत्तेजना चालक का उपयोग करके संचालित होता है, जबकि आसपास का वातावरण एक वितरित धारितीय मार्ग के रूप में कार्य करता है, जो पारंपरिक दो-तार प्रणालियों की तुलना में अधिक कुशल विद्युत ऊर्जा स्रोत प्रदान करता है।

13.56 मेगाहर्ट्ज पर संचालित गैलियम नाइट्राइड (GAN) ट्रांजिस्टर आधारित रेडियो-आवृत्ति शक्ति प्रवर्धक का उपयोग चालक सतहों को उत्तेजित (excite) करने के लिए किया गया है, जबकि वितरित अनुनाद ग्राही कुण्डली को उसकी स्व-अनुनादी आवृत्ति (SRF) पर ऊर्जा संग्रहण हेतु नियोजित किया गया है। धारिता निष्क्रिय अनुनाद ग्राही कुण्डली संधारित्र युग्मन के माध्यम से स्व-अनुनादी आवृत्ति ऊर्जा प्राप्त करते हैं और स्थानीय बैटरी या वापसी भू-तार संयोजन के बिना काम करते हैं। अनुनाद ग्राही में रेडियो-आवृत्ति से प्रत्यक्ष धारा परिवर्तक परिपथ शामिल है, जो प्राप्तकर्ता कुंडली से प्राप्त सिग्नल को प्रत्यक्ष धारा (DC) में परिवर्तित करता है। इसके बाद निम्न-आवृत्ति छनित्र (Low-Pass Filter) तथा अवरोही-उरोही परिवर्तक (Buck-Boost Converter) के माध्यम से विद्युत-भार को स्थिर शक्ति प्रदान की जाती है। यह प्रणाली भारी विद्युत-भार (>20 W) से लेकर अत्यंत निम्न विद्युत-भार (<50 μW) तक विस्तृत परिचालन स्थितियों का समर्थन करने में सक्षम है। प्रस्तावित तार-रहित विद्युत शक्ति स्थानांतरण आधारित अनुनाद ग्राही विद्युत परिपथ को मानव-सहयोगी रोबोटिक अनुप्रयोगों में संवेदन और संचार के लिए रूपरेखित किया गया है। संवेदी परिपथ मानव निकटता, स्पर्श, बल और चालक वस्तु उपस्थिति सहित पर्यावरणीय अंतःक्रियाओं का पता लगाता है। ये अंतःक्रियाएँ प्रणाली की अनुनाद विशेषताओं को प्रभावित बाधित करती हैं, जिससे वोल्टेज आयाम और SRF में मापने योग्य भिन्नताएँ पैदा होती हैं। इन अनुनाद भिन्नताओं का उपयोग तब संवेदन और कम-डेटा-दर संचार के लिए किया जाता है।

प्रस्तावित ढांचे को मानव-सहयोगी रोबोट (HCR) अनुप्रयोगों के लिए कई संवेदी प्लेटफार्मों के माध्यम से प्रयोगात्मक रूप से सत्यापित किया गया है। HCRs में निकटता और संपर्क का पता लगाने के लिए एक तार-रहित -संचालित निष्क्रिय अनुनाद सर्वदिश संवेदी प्रणाली प्रस्तुत की गई है। सिस्टम 3.6 मेगाहर्ट्ज के पास काम करने वाले SWPT-

आधारित तार-रहित संचालित ग्राही का उपयोग करता है, और जिनकी निष्क्रिय शक्ति खपत नैनोवाट (nW) के क्रम की होती है तथा निष्क्रिय परिपथ अपव्यय लगभग 29 μW होता है। अनुनाद ग्राही अनुनाद-आवृत्ति भिन्नताओं की निगरानी करके निकटता और प्रत्यक्ष-संपर्क स्थितियों में चालक वस्तुओं तथा मानव उपस्थिति दोनों का पता लगाता है। इसके अतिरिक्त, यह प्रणाली सरल एक-बिट डिजिटल संचार का समर्थन करती है, जबकि कई निष्क्रिय ग्राही को एकल प्रेषक से संचालित करने में सक्षम बनाती है, जिससे रोबोटिक वातावरण में गतिशीलता और मापनीयता में सुधार होता है। कम-शक्ति संचालन हेतु, कोमल: रोबोटिक त्वचा (Soft Robotic Skin) अनुप्रयोगों के लिए अनुनाद-आधारित वस्तु संवेदन प्रणाली (ROSS) विकसित की गई है। उच्च- गुणवत्ता गुणांक अनुनाद कुण्डली (Q> 550) जो लचीली रोबोटिक त्वचा में एकीकृत हैं, 1.4 मेगाहर्ट्ज पर-16 dBm से-56 dBm तक के अत्यंत कम उत्तेजना शक्ति स्तरों के साथ काम करते हैं। निष्क्रिय RF-DC प्रारंभिक चरण परिवर्तक बाहरी प्रवर्धन के बिना माइक्रोकंट्रोलर से जोड़ा जा सकता है और पर्याप्त DC निर्गम उत्पन्न करता है। यह प्रणाली अवरोधक सामग्री, चालक वस्तुओं और मानव अंतःक्रिया के बीच अंतर करती है, जबकि 21 N से अधिक उच्च लागू बलों से कोमल स्पर्श को भी अलग करती है। यह रोबोटिक भुजा का अंतिम प्रभावक और रोबोटिक उंगलियों के लिए बेहतर सुरक्षा और चयनात्मकता को सक्षम बनाता है।

दूसरे चरण में, मानव–मशीन अंतःक्रिया (HMI) के लिए बड़े-सतह पर अनुनाद-आधारित संवेदी पद्धति विकसित किया गया है। इस पद्धति में पूरी चालक सतह वस्तुओं की अंतःक्रिया के प्रति अपनी अनुनाद विशेषताओं में परिवर्तन करके संवेदक के रूप में कार्य करती है। एक अनुनाद कुंडल द्वारा संचालित एकल चालक का उपयोग करके सतह को उत्तेजित किया जाता है, जो-16 dBm प्रवेश शक्ति पर एक निष्क्रिय प्रवर्धक वोल्टेज लाभ प्रदान करता है। सम्पूर्ण प्रवाहकीय सतह औद्योगिक, वैज्ञानिक एवं चिकित्सीय बैंड में 13.56 मेगाहर्ट्ज पर वितरित संवेदक के रूप में कार्य करती है। सतह पर मानव स्पर्श के कारण होने वाले वोल्टेज भिन्नताओं को बढ़ाने के लिए एक द्वितीयक अनुनाद कुंडल का उपयोग किया जाता है। सिस्टम एक उच्च-वोल्टेज निर्गम संकेत प्रदान करता है जिसे प्रत्यक्ष धारा के माध्यम से एक ADC से सीधे कंप्यूटिंग प्लेटफ़ॉर्म से जोड़ा जा सकता है, जिससे बाहरी एम्प्लीफायर या एनालॉग फ़िल्टर की आवश्यकता समाप्त हो जाती है। यह तकनीक HCR के लिए कम-लागत, कम-शक्ति और बड़े-क्षेत्र संवेदी समाधान प्रदान करती है। प्रस्तावित प्रणाली को HMI संवेदी अनुप्रयोगों के लिए मशीनों या रोबोटिक प्लेटफार्मों में सहज रूप से एकीकृत किया जा सकता है।

अंततः, यह शोध प्रबंध वितरित संवेदन परिवेशों (Distributed Sensing Environments) में ग्राही परिपथों की अरेखीयता तथा विस्तारयोग्य कार्यान्वयन विधियों का अध्ययन करता है। उच्च-Q अनुनादकों को बहुस्तरीय मुद्रित परिपथ पट्ट (PCB) तथा CMOS-संगत एकीकरण के अनुरूप अनुकूलित किया गया है, जिससे संक्षिप्त एवं निर्माण-योग्य संवेदन नोड विकसित किए जा सकें। इसके अतिरिक्त, कम-लागत एवं सुरक्षित निकट-क्षेत्र संवेदन (Near-Field Sensing) प्राप्त करने तथा जलीय स्तनधारियों की सुरक्षा सुनिश्चित करने के उद्देश्य से जलीय परिवेश में SCPT-आधारित संवेदकों के परीक्षण का अध्ययन किया गया है। वायरलेस शक्ति स्थानांतरण, निष्क्रिय परिपथ-आधारित RF अनुनाद संवेदन तथा निम्न-शक्ति संचार को एकीकृत अनुनादी संरचना में संयोजित करके, यह कार्य अगली पीढ़ी की 6G/7G संचार प्रणालियों, मानव–सहयोगी रोबोटों, स्मार्ट सतहों (Smart Surfaces) तथा वितरित संवेदन परिवेशों के लिए एक विस्तारयोग्य एवं ऊर्जा-कुशल मंच स्थापित करता है।