EFFICIENT ARCHITECTURES AND NETWORKS FOR ENERGY HARVESTING SYSTEMS

PRIYANKA SINGLA

AMAR NATH AND SHASHI KHOSLA SCHOOL OF INFORMATION TECHNOLOGY
INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI
JULY 2023

EFFICIENT ARCHITECTURES AND NETWORKS FOR ENERGY HARVESTING SYSTEMS

by

PRIYANKA SINGLA

AMAR NATH AND SHASHI KHOSLA SCHOOL OF INFORMATION TECHNOLOGY

Submitted

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

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI
JULY 2023

Certificate

This is to certify that the thesis titled **EFFICIENT ARCHITECTURES AND NETWORKS FOR ENERGY HARVESTING SYSTEMS** being submitted by **Ms. PRIYANKA SINGLA** for the award of **Doctor of Philosophy** in Information Technology is a record of bonafide work carried out by her under my guidance and supervision at the Amar Nath and Shashi Khosla School of Information Technology, Indian Institute of Technology Delhi. The work presented in this thesis has not been submitted elsewhere, either in part or full, for the award of any other degree or diploma.

Smruti Ranjan Sarangi
Professor
Department of Computer Science and Engineering
Indian Institute of Technology Delhi
New Delhi - 110016

Acknowledgements

I want to start by expressing my gratitude to Prof. Smruti Sarangi for his exemplary guidance, encouragement, and all the help during my PhD. I am greatly indebted for his support during my difficult times.

I am grateful to my student research committee members: Prof. Kolin Paul, Prof. Shouribrata Chatterjee, and Prof. Bijaya Ketan Panigrahi for their insightful comments on my work.

I want to thank all of my friends at IITD for all the wonderful discussions we have had, both technical and non-technical.

I am incredibly appreciative of my family for being my steadfast supporters and for inspiring me to strive harder. Without them, this feat would not have been possible.

I thank God, for all and everything.

Priyanka Singla

Abstract

Energy harvesting devices (EHDs) are replacing battery-powered Internet of Things (IoT) devices and are increasingly gaining prominence because they have a nearly infinite lifespan and extremely low power consumption. The coming decade will see the pervasiveness of EHDs as they are being deployed in a wide variety of applications ranging from smart homes to environmental and structural health monitoring in hazardous and difficult-to-reach remote locations. Although ambient energy is abundant, using EHDs is challenging due to the intermittent and unpredictable nature of the ambient sources. Therefore, in order to effectively use EHDs, it is important to characterize and then optimize their architecture and functioning. Then, one must focus on both hardware and software aspects in order to address the shortcomings of these devices. We systematically look at the limitations of these devices and provide architectural solutions in this thesis.

Due to fluctuations in the incoming ambient energy, an EHD may turn off while in use, losing its state. As a result, checkpointing approaches are the subject of extensive research in order to preserve the run-time state of EHDs. We survey and characterize the literature on existing checkpointing techniques. We discovered that despite the extensive study in this field, the checkpointing problem lacks a formal definition that would let new researchers fully comprehend the issue and obtain a theoretically optimal solution. Thus, we formulate the checkpointing problem as a quadratically constrained linear program (QCLP). Then, extending this work, we provide a SW+HW checkpointing approach wherein the checkpointing decisions are made based on forecasts of incoming ambient energy. Our approach could achieve a performance that is within 3-5% of the optimal solution and with a miniscule area overhead accounted for by our hardware predictor (0.006 mm^2). During our survey, we also observed that there is no single checkpointing approach that works for all devices and ambient sources; rather, the right checkpointing method should be selected based on the characteristics of the ambient source and device. So, we perform comprehensive experimental analysis and provide a recommendation system to assist novice researchers in choosing the best checkpointing approach as per their requirements.

The limited memory and computational capability are other significant limitations of an EHD. Additionally, EHD applications frequently have to deal with enormous amounts of streaming data. An EHD typically comes with 2-8 KB of SRAM and 64 KB of FRAM. It is not practical to increase the amount of memory as the price of the nonvolatile memory component dominates. Moreover, even if memory is expanded, memory will still be a valuable resource because as technology develops, so do the applications that operate on these devices. Furthermore, many applications are being deployed on these devices, each of which has its own memory requirements. Therefore, it is imperative to find methods for effectively exploiting the memory that is present in these devices. Additionally, with efficient memory utilization, we may create devices with reduced memory sizes, which will lower the price of the devices. We propose two solutions in this direction. Our first solution is based on the fact that a lot of EHD applications can tolerate a slight amount of inaccuracy. We propose an approximate computing-based method to provide quick answers with significantly lower memory consumption. We propose to use sketching algorithms and present a generic hardware architecture that can be instantiated with several sketching implementations that can outperform state-of-the-art software implementations in terms of energy (4-10$\times$) and time (10$\times$). In contrast to the first solution, our second solution preserves data in a lossless yet compressed form. We propose to use compact data structures that could reduce applications' memory-footprint by up to 3.5$\times$ without significantly increasing the energy or time overheads. Additionally, we propose a novel hardware template that can be used to realize a wide range of data structures frequently employed in EHD applications.

These devices are typically used in distributed settings. We consider a representative scenario in which each node periodically senses its surroundings and relays the corresponding data to a distant sink node, which then computes some spatiotemporal statistics on the acquired system snapshot. Sadly, messages from different nodes do not reach the sink at the same time due to network congestion and different node-distances from the sink. Furthermore, it is difficult to synchronize all the nodes because they have different duty cycles owing to variable ambient energy. So, to get an effective snapshot at the sink, we propose a hybrid (centralized and distributed) algorithm wherein the nodes adapt their sensing periods in accordance to their physical positions, ambient energy profiles, and network dynamics.

In this thesis, we propose a systematic and holistic approach to address the drawbacks of EHDs operating in standalone and distributed modes. We provide a combination of hardware and software solutions that help create a fast, energy-efficient, memory-efficient, and reliable EHD system.

संक्षेप

ऊर्जा संचयन उपकरण (ईएचडी) बैटरी से चलने वाले इंटरनेट ऑफ थिंग्स (आईओटी) उपकरणों की जगह ले रहे हैं और तेजी से प्रमुखता प्राप्त कर रहे हैं क्योंकि उनके पास लगभग अनंत जीवनकाल है और बेहद कम बिजली की खपत। आने वाले दशक में ईएचडी की व्यापकता देखी जाएगी क्योंकि उन्हें स्मार्ट घरों से लेकर पर्यावरण और संरचनात्मक स्वास्थ्य निगरानी तक खतरनाक और दुर्गम स्थानों तक पहुंचने वाले विभिन्न प्रकार के अनुप्रयोगों में तैनात किया जा रहा है। हालांकि परिवेशी ऊर्जा प्रचुर मात्रा में है, लेकिन परिवेशी स्रोतों की रुक-रुक कर और अप्रत्याशित प्रकृति के कारण ईएचडी का उपयोग करना चुनौतीपूर्ण है। इसलिए, ईएचडी का प्रभावी ढंग से उपयोग करने के लिए, उनकी वास्तुकला और कार्यप्रणाली को चिह्नित करना और फिर उनका अनुकूलन करना महत्वपूर्ण है। फिर, इन उपकरणों की कमियों को दूर करने के लिए हार्डवेयर और सॉफ्टवेयर दोनों पहलुओं पर ध्यान देना चाहिए। हम इन उपकरणों की सीमाओं को व्यवस्थित रूप से देखते हैं और इस थीसिस में वास्तु समाधान प्रदान करते हैं।

आने वाली परिवेश ऊर्जा में उतार-चढ़ाव के कारण, उपयोग में होने पर एक ईएचडी बंद हो सकता है, अपनी स्थिति खो सकता है। नतीजतन, ईएचडी की रन-टाइम स्थिति को संरक्षित करने के लिए चेकपॉइंटिंग दृष्टिकोण व्यापक शोध का विषय हैं। हम मौजूदा चेकपॉइंटिंग तकनीकों पर साहित्य का सर्वेक्षण और विशेषता बताते हैं। हमने पाया कि इस क्षेत्र में व्यापक अध्ययन के बावजूद, चेकपॉइंटिंग समस्या में औपचारिक परिभाषा का अभाव है जो नए शोधकर्ताओं को इस मुद्दे को पूरी तरह से समझने और सैद्धांतिक रूप से इष्टतम समाधान प्राप्त करने देगा। इस प्रकार, हम चेकपॉइंटिंग समस्या को द्विघात विवश रैखिक कार्यक्रम (क्यूसीएलपी) के रूप में तैयार करते हैं। फिर, इस काम का विस्तार करते हुए, हम एक एसडब्ल्यू + एचडब्ल्यू चेकपॉइंटिंग दृष्टिकोण प्रदान करते हैं जिसमें आने वाली परिवेश ऊर्जा के पूर्वानुमानों के आधार पर चेकपॉइंटिंग निर्णय किए जाते हैं। हमारा दृष्टिकोण एक ऐसा प्रदर्शन प्राप्त कर सकता है जो इष्टतम समाधान के ३-५% के भीतर है और हमारे हार्डवेयर प्रेडिक्टर

(०.००६मिमी^२) के हिसाब से एक छोटे से क्षेत्र के ऊपरी हिस्से के साथ है। हमारे सर्वेक्षण के दौरान, हमने यह भी देखा कि कोई एकल चेकपॉइंटिंग दृष्टिकोण नहीं है जो सभी उपकरणों और परिवेश स्रोतों के लिए काम करता है; इसके बजाय, परिवेश स्रोत और डिवाइस की विशेषताओं के आधार पर सही चेकपॉइंटिंग विधि का चयन किया जाना चाहिए। इसलिए, हम व्यापक प्रयोगात्मक विश्लेषण करते हैं और नौसिखिए शोधकर्ताओं को उनकी आवश्यकताओं के अनुसार सर्वोत्तम चेकपॉइंटिंग दृष्टिकोण चुनने में सहायता करने के लिए एक सिफारिश प्रणाली प्रदान करते हैं।

सीमित मेमोरी और कम्प्यूटेशनल क्षमता ईएचडी की अन्य महत्वपूर्ण सीमाएं हैं। इसके अतिरिक्त, ईएचडी अनुप्रयोगों को अक्सर बड़ी मात्रा में स्ट्रीमिंग डेटा से निपटना पड़ता है। एक ईएचडी आमतौर पर २ - ८ के.बी स्थिर रैम और ६४ के.बी फेरोइलेक्ट्रिक रैम के साथ आता है। रैम की मात्रा को बढ़ाना व्यावहारिक नहीं है क्योंकि गैर-वाष्पशील रैम अवयव की कीमत हावी है। इसके अलावा, भले ही मेमोरी का विस्तार किया गया हो, फिर भी मेमोरी एक मूल्यवान संसाधन होगी क्योंकि जैसे-जैसे तकनीकी विकसित होती है, वैसे ही इन उपकरणों पर काम करने वाले एप्लिकेशन भी विकसित होते हैं। इसके अलावा, इन उपकरणों पर कई एप्लिकेशन तैनात किए जा रहे हैं, जिनमें से प्रत्येक की अपनी मेमोरी आवश्यकताएं हैं। इसलिए, इन उपकरणों में मौजूद मेमोरी का प्रभावी ढंग से दोहन करने के तरीकों को खोजना अनिवार्य है। इसके अतिरिक्त, कुशल मेमोरी उपयोग के साथ, हम कम मेमोरी आकार वाले उपकरण बना सकते हैं, जिससे उपकरणों की कीमत कम हो जाएगी। हम इस दिशा में दो समाधान प्रस्तावित करते हैं। हमारा पहला समाधान इस तथ्य पर आधारित है कि बहुत सारे ईएचडी एप्लिकेशन थोड़ी सी अशुद्धि को सहन कर सकते हैं। हम काफी कम मेमोरी खपत के साथ त्वरित उत्तर प्रदान करने के लिए एक अनुमानित कंप्यूटिंग-आधारित पद्धति का प्रस्ताव करते हैं। हम स्केचिंग कलन विधि का उपयोग करने का प्रस्ताव करते हैं और एक सामान्य हार्डवेयर आर्किटेक्चर प्रस्तुत करते हैं जिसे कई स्केचिंग कार्यान्वयन के साथ त्वरित किया जा सकता है जो ऊर्जा (४ - १०×) और समय (१०×) के मामले में अत्याधुनिक सॉफ़्टवेयर कार्यान्वयन को बेहतर बना सकते हैं। पहले समाधान के विपरीत, हमारा दूसरा समाधान डेटा को परिशुद्ध लेकिन संपीड़ित रूप में संरक्षित करता है। हम कॉम्पैक्ट डेटा संरचनाओं का उपयोग

करने का प्रस्ताव करते हैं जो अनुप्रयोगों के मेमोरी-फुटप्रिंट को ३.५× तक कम कर सकते हैं, बिना ऊर्जा या समय के ओवरहेड को बढ़ाए। इसके अतिरिक्त, हम एक नए हार्डवेयर टेम्पलेट का प्रस्ताव करते हैं जिसका उपयोग ईएचडी अनुप्रयोगों में अक्सर नियोजित डेटा संरचनाओं की एक विस्तृत श्रृंखला को महसूस करने के लिए किया जा सकता है।

इन उपकरणों का उपयोग आमतौर पर वितरित सेटिंग्स में किया जाता है। हम एक प्रतिनिधि परिदृश्य पर विचार करते हैं जिसमें प्रत्येक नोड समय-समय पर अपने परिवेश को महसूस करता है और संबंधित डेटा को दूर के सिंक नोड से रिले करता है, जो तब अधिग्रहित सिस्टम स्नैपशॉट पर कुछ स्पोटियोटेम्पोरल आँकड़ों की गणना करता है। अफसोस की बात है कि नेटवर्क की भीड़ और सिंक से अलग-अलग नोड-दूरी के कारण विभिन्न नोड्स के संदेश एक ही समय में सिंक तक नहीं पहुंचते हैं। इसके अलावा, यह मुश्किल है सभी नोड्स को सिंक्रनाइज़ करें क्योंकि उनके पास परिवर्तनीय परिवेश ऊर्जा के कारण अलग-अलग कर्तव्य चक्र हैं। इसलिए, सिंक पर एक प्रभावी स्नैपशॉट प्राप्त करने के लिए, हम एक हाइब्रिड (केंद्रीकृत और वितरित) एल्गोरिथ्म का प्रस्ताव करते हैं, जिसमें नोड्स अपनी भौतिक स्थिति, परिवेश ऊर्जा प्रोफाइल और नेटवर्क की गतिशीलता के अनुसार अपनी संवेदन अवधि को अनुकूलित करते हैं।

इस थीसिस में, हम स्टैंडअलोन और वितरित तरीके में काम कर रहे ईएचडी की कमियों को दूर करने के लिए एक व्यवस्थित और समग्र दृष्टिकोण का प्रस्ताव करते हैं। हम हार्डवेयर का संयोजन प्रदान करते हैं और सॉफ़्टवेयर समाधान जो तेज़, ऊर्जा-कुशल, स्मृति-कुशल और विश्वसनीय ईएचडी सिस्टम बनाने में मदद करते हैं।

Contents

List of Figures

List of Tables