

Mastering imperfect and partial information in wireless sensing systems

Doctoral Thesis

Author(s):

Keller, Matthias

Publication date:

2013

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-009958164>

Rights / license:

In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

Originally published in:

TIK-Schriftenreihe 139

Diss. ETH No. 21474

Mastering Imperfect and Partial Information in Wireless Sensing Systems

A dissertation submitted to
ETH Zurich

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by
MATTHIAS KELLER
M.Sc. TUM
born April 22, 1983
citizen of Germany

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Lothar Thiele, examiner
Prof. Dr. Kay Römer, co-examiner
Dr. Jan Beutel, co-examiner

2013

Abstract

Wireless sensor networks (WSNs) are networks of self-organizing, autonomously operating, resource-constrained computing devices. Typical designs of such so called mote-class devices integrate a low-power microcontroller (MCU), a radio chip, external memory and a radio frequency (RF) front-end on an area of a few square centimeters in size. Multi-year operation from small batteries is achieved by utilizing energy-saving low-power states and switching off currently not used components, *e.g.*, the radio chip, whenever possible.

The most prominent use of such networks are so called sense-and-send applications. In a sense-and-send application, nodes are regularly sampling data that is then transmitted to a sink node. To date, the vast majority of published sensor network deployments employs a multi-hop routing protocol for communication. Such protocols create and maintain a dynamic routing tree, packets are forwarded over multiple hops until they are eventually received by a sink.

Wireless communication is not perfect, but subject to well-known phenomena such as multi-path propagation, interference, and loss. Additionally, the resource-scarcity found in systems that are built from mote-class devices limits the amount of capabilities that can be added to a system. For example, in contrast to Internet networks, implementing services such as active network monitoring and network time synchronization can add a considerable, even harmful overhead to a low-power wireless system.

Overall, known properties of wireless communication, common properties of distributed systems, and resource constraints specific to low-power wireless networks altogether negatively impact the quality of data obtained from such a system. Similarly, mentioned characteristics also render debugging low-power wireless networks as a very demanding task. System state first of all being distributed among the network, deployed systems also lack the resources needed for making that state accessible.

In the context of a scientific, multi-year, multi-site permafrost and rock kinematics monitoring effort, this thesis presents algorithms and systems for establishing wireless data collection systems as dependable and precise scientific instruments. Theoretical results obtained are backed by strong empirical evidence, *i.e.*, evaluated in simulation, in testbed experiments on real hardware, and on up to 270 million packets that originate from deployed wireless sensor networks.

The contributions of this thesis are presented in four interconnected parts. First, this thesis contributes to the state-of-the-art by presenting algorithms for the mitigation of data imperfections that are introduced by phenomena common to wireless multi-hop communication. Second, this thesis presents a system for visualizing large sensor network data sets and thus making sensor data more accessible. The third contribution of this thesis tackles the problem of wireless sensing systems on the one hand maintaining vast amounts of distributed state while on the other hand being too resource-scarce for this state being transferred out of the network. Results of the presented network tomography algorithm are then used for building a minimally active system for monitoring network health, the fourth and final contribution of this thesis.

Zusammenfassung

Drahtlose Sensornetzwerke sind Kommunikationssysteme, die aus sich selbst organisierenden, autonom arbeitenden, an Ressourcen beschränkten Rechengerten bestehen. Typische Sensorknoten bestehen aus einem stromsparenden Mikrokontroller, einem Funkmodul, und einem Speicherchip. Alle Komponenten sind auf einer Fläche von wenigen Quadratzentimetern untergebracht. Ein mehrjähriger Betrieb aus einer einzigen Batterieladung wird durch die Verwendung von energiesparenden Betriebsmodi und insbesondere durch das dynamische Ein- und Ausschalten von Teilkomponenten erreicht.

Die am meisten verbreitete Anwendung von drahtlosen Sensornetzwerken ist die regelmässige Durchführung von Messungen. Die Resultate dieser Messungen werden unmittelbar nach der Aufnahme drahtlos an eine zentrale Senke übertragen. Nahezu alle bekannten Installationen verwenden dabei ein sogenanntes Multi-Hop Routing Protokoll. Hierbei organisieren sich alle Sensorknoten selbstständig in einer Baumstruktur. Pakete von weiter entfernten Sensorknoten werden über mehrere Stationen weitergeleitet bis sie die Senke erreichen.

Bei drahtloser Kommunikation können allgemein bekannte Effekte wie Mehrpfadverbreitung, Interferenz und Paketverlust auftreten. Der Betrieb von funkbetriebenen Sensornetzwerken wird zusätzlich durch den Mangel an Systemressourcen erschwert. So können zum Beispiel im Internet weit verbreitete Dienste wie die aktive Überwachung von Netzwerken als auch Netzwerk-Zeitsynchronisation nicht ohne weiteres in drahtlosen Funknetzwerken implementiert werden. Der in drahtlosen Sensornetzwerken im Vergleich zu den verfügbaren Ressourcen sehr hohe Aufwand für die Implementierung derartiger Dienste kann bis zur Degradierung des gesamten Systems führen.

Die bekannten Eigenschaften von kabelloser Übertragung, bekannte Herausforderungen in verteilten Systemen sowie für funkbetriebene Sensornetzwerke spezifische Ressourcenbeschränkungen können die Qualität der erhaltenen Sensordaten negativ beeinflussen. Gleichzeitig erschweren die genannten Charakteristiken die Untersuchung von Sensornetzwerken. Während der Zustand des Gesamtsystems einerseits über das Netzwerk verteilt ist, so erschwert der Mangel an Systemressourcen ausserdem die Zusammenführung des verteilten Systemzustandes an einem zentralen Ort.

Die geleisteten Beiträge der vorliegenden Arbeit haben das Ziel drahtlose Sensornetzwerke als zuverlässige und präzise Messinstrumente

für wissenschaftliche Kampagnen tauglich zu machen. Vorgestellte Algorithmen werden anhand ausführlicher Analysen von Messdaten, die aus Simulationen, aus Testläufen auf realer Hardware und von Produktivsystemen stammen, validiert und bestätigt.

Die Beiträge dieser Dissertation erstrecken sich über vier zusammenhängende Teile. Der erste Teil dieser Arbeit präsentiert Algorithmen für die Entfernung von Datenartefakten, die typisch für drahtlose Multi-Hop Kommunikation sind. Der zweite Teil befasst sich mit einem System zur Visualisierung von großen Datenmengen. Ein Algorithmus zur Durchführung einer Tomographie in einem energiesparenden Sensornetzwerk wird im dritten Teil dieser Arbeit präsentiert. Der vorgestellte Algorithmus verwendet nur bereits vorhandenen Netzwerkverkehr und belastet das ressourcenarme Sensornetzwerk daher nicht. Ein minimal aktives System zur Netzwerküberwachung auf Basis der im vorherigen Kapitel vorgestellten Netzwerktomographie wird im vierten Teil dieser Arbeit vorgestellt.