

DISS. ETH NO. 19901

TIK-Schriftenreihe Nr. 128

Wireless Embedded Systems: Time, Location, and Applications

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

Philipp Alexander Sommer

MSc ETH EEIT, ETH Zurich

born December 29, 1982

citizen of

Sumiswald BE

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Roger Wattenhofer, examiner

Prof. Dr. Ákos Lédeczi, co-examiner

Prof. Dr. John Stankovic, co-examiner

2011

Abstract

Wireless embedded systems combine sensors and actuators with processing, storage and communication capabilities. Networks of small, low-power wireless devices, so called nodes, offer the potential to collect observations of the physical world at unprecedented fidelity and scale.

Time and *location* are of fundamental importance in the context of wireless sensor networks. Accurate time and location information are crucial for many tasks, e.g., sensor data fusion, spatiotemporal coordination, low-power operation, and wireless medium access.

In the first part of this dissertation, we study the problem of *time synchronization*. As clock sources in wireless embedded systems often exhibit severe *drift*, and message exchange is subject to a *delay*, sophisticated algorithms are mandatory to keep clocks in synchronization. Existing time synchronization algorithms are designed to provide *network-wide* synchronization, i.e., between arbitrary nodes in the network. However, as we demonstrate in this dissertation, large synchronization errors may become visible with increasing distance from a reference node, but also close-by nodes in a network may be synchronized poorly. To address these issues, we propose two clock synchronization protocols: the *Gradient Time Synchronization Protocol* to achieve *local* synchronization, and the *PulseSync* protocol for *global* synchronization. We evaluate the performance of both protocols by simulations and experiments in different wireless sensor network testbeds.

The second part of this thesis is dedicated to the question how we can provide accurate location information in the context of wireless embedded systems. We present the *SpiderBat* platform, which provides *node localization* for sensor nodes using ultrasound pulses. By employing multiple transmitters and receivers, we can estimate the distance and angle between neighboring nodes. Using both distance and angle information allows to localize nodes with an accuracy of a few centimeters, even in sparse networks where other approaches fail.

In the third part, we discuss design considerations for the architecture of future wireless embedded systems, as they have evolved from pure research tools to ubiquitous smart things. To this end, we present a resource-oriented approach to facilitate the connection between heterogeneous devices and services, and a novel wearable sensor platform that utilizes mobile phones for personalized sensing applications.

Zusammenfassung

Drahtlose, eingebettete Systeme vereinen Sensoren und Aktoren mit Möglichkeiten für Verarbeitung, Speicherung und Kommunikation. Netzwerke bestehend aus kleinen, stromsparenden, drahtlosen Geräten, sogenannte Sensorknoten, eröffnen neue Möglichkeiten zur Beobachtung der physikalischen Welt in bisher unerreichter Genauigkeit und Ausmass. *Zeit* und *Ort* sind von fundamentaler Bedeutung im Kontext drahtloser Sensornetzwerke. Präzise Zeit und Ortsinformation sind entscheidend für zahlreiche Aufgaben, beispielsweise zur Fusion von Sensordaten, raum-zeitlicher Koordination, energiesparendem Betrieb und drahtlosem Kanalzugriff. Im ersten Teil dieser Dissertation beschäftigen wir uns mit dem Problem der Zeitsynchronisation. Da Uhren in eingebetteten, drahtlosen Systemen oft eine starke Drift aufweisen und der Austausch von Nachrichten Verzögerungen unterliegt, bedarf es technisch ausgereifter Algorithmen, um die Synchronisation der Uhren zu erhalten. Bestehende Algorithmen zur Zeitsynchronisation sind darauf ausgerichtet beliebige Knoten in einem Netzwerk miteinander zu synchronisieren. Diese Arbeit legt dar, dass mit grösser werdendem Abstand von einem Referenzknoten, aber auch zwischen benachbarten Knoten, grosse Ungenauigkeiten in der Synchronisation auftreten können. Um diese Probleme zu beheben schlagen wir zwei Synchronisationsprotokolle vor: das “Gradient Time Synchronization Protocol” für lokale Synchronisation und das “PulseSync“-Protokoll für globale Synchronisation. Wir untersuchen das Verhalten beider Protokolle mittels Simulationen und Experimenten in verschiedenen Testumgebungen für drahtlose Sensornetzwerke.

Der zweite Teil dieser Arbeit behandelt die Fragestellung, wie präzise Ortsbestimmung im Kontext drahtloser, eingebetteter Systemen erreicht werden kann. Wir stellen die Plattform *SpiderBat* vor, welche mit Hilfe von Ultraschall die exakte Position von Sensorknoten bestimmt. Durch Verwendung mehrerer Sender und Empfänger können wir sowohl die Distanz als auch den Winkel zwischen benachbarten Knoten bestimmen. Der Einsatz dieser Informationen erlaubt die Lokalisierung von Knoten mit einer Genauigkeit von wenigen Zentimetern, auch bei geringer Verteilungsdichte wo andere Verfahren misslingen.

Im dritten Teil diskutieren wir anhand welcher Gesichtspunkte die Architektur von zukünftigen drahtlosen, eingebetteten Systemen entworfen werden soll, da sich diese von reinen Forschungsobjekten zu allgegenwärtigen intelligenten Objekten entwickelt haben. Dazu stellen wir einen Ansatz vor, welcher den Zusammenschluss von verschiedenartigen Geräten und Dienstleistungen vereinfacht. Ausserdem präsentieren wir eine neue, tragbare Sensorplattform, welche Mobiltelefone für personalisierte Sensorapplikationen nutzt.