

Time synchronization and localization in sensor networks

Doctoral Thesis

Author(s):

Römer, Kay Uwe

Publication date:

2005

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005061381>

Rights / license:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

Diss. ETH No. 16106

Time Synchronization and Localization in Sensor Networks

A dissertation submitted to the
Swiss Federal Institute of Technology Zurich (ETH Zurich)

for the degree of
Dr. sc. ETH Zurich

presented by
Kay Römer
Diplom-Informatiker, University of Frankfurt/Main, Germany
born June 16, 1972
citizen of Germany

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Friedemann Mattern, examiner
Prof. Dr. Paul J. M. Havinga, co-examiner

2005

Abstract

So-called sensor nodes combine means for sensing environmental parameters, processors, wireless communication capabilities, and autonomous power supply in a single compact device. Networks of these untethered devices can be deployed unobtrusively in the physical environment in order to monitor a wide variety of real-world phenomena with unprecedented quality and scale while only marginally disturbing the observed physical processes.

Due to the close integration of sensor networks with the real world, the categories time and location are fundamental for many applications of sensor networks, for example to interpret sensing results (c.g., *where* and *when* did an event occur) or for coordination among sensor nodes (e.g., *which* nodes can *when* be switched to idle mode). Hence, *time synchronization* and *sensor node localization* are fundamental and closely related services in sensor networks.

Existing solutions for these two basic services have been based on a rather narrow notion of a sensor network as a large-scale, ad hoc, multi-hop, unpartitioned network of largely homogeneous, tiny, resource-constrained, mostly immobile sensor nodes that would be randomly deployed in the area of interest. However, recently developed prototypical applications indicate that this narrow definition does not cover a significant portion of the application domain of wireless sensor networks.

Our thesis is that *applications of sensor networks span a whole design space with many important dimensions. Existing solutions for time synchronization and node localization do not cover important parts of this design space. Substantially different approaches are required to support these regions adequately. Such solutions can actually be provided.*

We support this thesis by proposing a design space of wireless sensor networks where concrete applications can be located at different points of the space. We identify two important regions in the design space that are not appropriately supported by existing methods for time synchronization and node localization. We also propose, implement, and evaluate new solutions that cover these regions. The practical feasibility of our approaches is demonstrated by means of a typical sensor network application which requires time synchronization and node localization.

Our approach to time synchronization supports applications where network connectivity is intermittent. The idea underlying our *Time-Stamp Synchronization* method is to avoid proactive synchronization of the clocks of all nodes in a network. Instead, the clocks of the sensor nodes run unsynchronized, each defining its own local time scale. Only if clock readings are exchanged among nodes as time stamps

contained in network messages, these time stamps are transformed from the time scale of the sender to the time scale of the receiver. This approach is scalable, since time is only synchronized on demand where and when needed by the application. The approach is also resource efficient, since it piggybacks on existing message exchanges.

Our approach to node localization supports tiny sensor nodes known as Smart Dust. The *Lighthouse Location System* is based on a single beacon device that emits particular optical signal patterns. Sensor nodes can autonomously infer their location by passively observing these signals. This approach is scalable, since each node infers its location independent of other nodes. A single beacon device emits long-range signals in broadcast mode and can support arbitrary network densities. The approach is resource efficient, since the sensor nodes do not actively emit any signals. Only a tiny, energy-efficient optical receiver is needed to infer locations.

Zusammenfassung

Sensoren zur Erfassung von Umweltparametern, Prozessoren, drahtlose Kommunikationseinheiten sowie autarke Energiequellen sind in sogenannten Sensorknoten auf kleinstem Raum integriert. Netze aus vielen solchen Knoten können unaufdringlich in die Alltagswelt ausgebracht werden, um eine Reihe verschiedener Umweltphänomene grossräumig und mit hoher Genauigkeit zu erfassen, ohne die beobachteten Vorgänge wesentlich zu beeinflussen.

Aufgrund der Einbettung von Sensornetzen in die reale Welt spielen die Kategorien Raum und Zeit eine fundamentale Rolle für viele Anwendungen, beispielsweise zur Interpretation von Beobachtungen (z.B. *wo* und *wann* wurde ein Ereignis festgestellt) oder für die Koordination der Sensorknoten untereinander (z.B. *welche* Knoten können *wann* in einen energiesparenden Schlafzustand geschaltet werden). Daher sind *Zeitsynchronisation* und *Lokalisierung* von Sensorknoten grundlegende und eng verwandte Dienste in Sensornetzen.

Bestehende Ansätze zur Realisierung dieser Dienste gehen von einer vergleichsweise engen Definition eines Sensornetzes aus, derzufolge ein Sensornetz aus einer sehr grossen Zahl von homogenen, winzigen und daher ressourcenbeschränkten Knoten besteht, die vorwiegend immobil sind, nachdem sie zufällig im Zielgebiet verteilt wurden. Ferner geht man davon aus, dass Sensornetze unpartitionierte Multi-Hop-Ad-Hoc-Netze sind. In jüngerer Zeit wurde jedoch eine Vielzahl prototypischer Anwendungen von Sensornetzen vorgestellt, denen eine solche enge Definition nicht gerecht wird.

Unsere These ist daher, dass *Applikationen von Sensornetzen einen umfangreichen Entwurfsraum aufspannen, der eine Vielzahl wichtiger Dimensionen umfasst. Bisher existierende Methoden zur Zeitsynchronisation und Lokalisierung decken wichtige Bereiche dieses Entwurfsraums nicht ab. Vielmehr benötigt man neuartige Herangehensweisen, um diese Bereiche adäquat zu unterstützen. Entsprechende Techniken können tatsächlich bereitgestellt werden.*

Wir untermauern diese These, indem wir den Entwurfsraum von Sensornetzen explizit machen und zeigen, dass konkrete Applikationen tatsächlich verschiedenen Punkten in diesem Raum zugeordnet werden können. Wir identifizieren zwei spezifische Bereiche im Entwurfsraum, welche nicht hinreichend durch bestehende Ansätze zur Zeitsynchronisation und Lokalisierung unterstützt werden. Um diese Bereiche abzudecken, schlagen wir neue Lösungsansätze vor, zeigen prototypische Realisierungen auf und evaluieren diese. Die praktische Umsetzbarkeit dieser Methoden zeigen wir anhand einer konkreten Applikation, die Synchronisation und

Lokalisierung voraussetzt.

Unser Ansatz zur Zeitsynchronisation unterstützt Anwendungsszenarien, in denen Netzverbindungen nur sporadisch bestehen. Die grundlegende Idee für das Verfahren der *Zeitstempelsynchronisation* besteht darin, die Uhren der Sensorknoten *nicht* zu synchronisieren, so dass die lokale Uhr eines jeden Knotens eine unabhängige Zeitskala definiert. Zeitstempel, die durch Auslesen der lokalen Uhr entstehen, haben daher zunächst nur lokale Gültigkeit. Wird ein solcher Zeitstempel jedoch als Teil einer Nachricht im Netz verschickt, so wird dabei der Zeitstempel von der Zeitskala des Senders in die Zeitskala des Empfängers transformiert. Dieser Ansatz ist skalierbar, da Synchronisation nur dann stattfindet, wenn sie tatsächlich von der Applikation benötigt wird. Ferner kann diese Methode effizient implementiert werden, da die für die Zeitstempeltransformation notwendige Kommunikation in vielen Fällen Huckepack auf bereits existierenden Nachrichten realisiert werden kann.

Unser Ansatz zur Lokalisierung unterstützt winzige, sehr ressourcenarme Sensorknoten, die unter dem Namen “Smart Dust” bekannt sind. Unser Verfahren mit dem Namen *Leuchtturmlokalisierung* verwendet eine spezielle Basisstation, die spezifische optische Signale aussendet. Sensorknoten können allein durch passive Beobachtung dieser Signale autonom ihre Position mit hoher Genauigkeit bestimmen. Dieser Ansatz ist skalierbar, da jeder Knoten völlig unabhängig von anderen Knoten seine Position bestimmt. Eine einzige Basisstation kann daher beliebig dichten Netzen zur Lokalisierung dienen. Da die Sensorknoten für die Lokalisierung selbst keinerlei Signale aussenden müssen, ist das Verfahren auf der Seite der Sensorknoten sehr ressourceneffizient. Sensorknoten benötigen nur einen einfachen optischen Empfänger, der auf kleinstem Raum realisiert werden kann.