

DISS. ETH NO. 24267

**Mobile Sensing:  
GPS Localization, WiFi Mapping, Applications,  
and Risks**

A thesis submitted to attain the degree of  
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH  
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by  
*PASCAL BISSIG*

*M. Sc., ETH Zurich, Switzerland*

born on 15.07.1987  
citizen of  
Switzerland

accepted on the recommendation of  
*Prof. Dr. Roger Wattenhofer, examiner*  
*Prof. Dr. Jie Liu, co-examiner*

2017

## Abstract

Localization is a fundamental feature of mobile systems such as smartphones, airplanes or self-driving cars. Albeit current smartphones include GPS receivers, accelerometers, and gyroscopes, localization is still difficult in certain environments such as indoors. First we show how WiFi signal strength measurements and motion data recorded with smartphones can be used to create accurate signal strength maps. The maps are created from data collected by a user walking around with a smartphone in the trouser pocket. From this data, we can accurately observe how the person moves by linking sensor measurements to how people walk. Exploiting the signal strength distributions recorded along the way, we show how the error that aggregates from inaccuracies in the motion estimation can be reduced. The signal strength maps are useful for localization indoors when GPS is unavailable.

In Chapter 3 we introduce a GPS receiver design which allows for aggressive duty cycling. This means that the RF front end only has to be turned on for a very short time to collect enough data for localization. From the short signal recordings we compute accurate position fixes efficiently even if the uncertainty on position and time are larger than what can be expected from synchronization and localization using cell towers. The receiver design can be tailored for different applications. For example, short signal recordings can be stored without computing a position right away. This allows for low power and long term tracking as well as instant position annotation for photos or other data. Alternatively, the short signal duration allows for fast initial position estimation for connected devices.

Chapters 4 and 5 are focused on device motion rather than device location. We discuss how motion data can be used to infer personal data such as pins or passwords. Our large scale user study reveals that, in uncontrolled environments, touch input on smartphone screens can be inferred from the same devices' motion data. We also show how motion data can be used constructively to recognize gestures and sequences thereof. For gesture recognition, we use motion data from people writing on whiteboards wearing smartwatches. Albeit the high recognition accuracy of isolated letters, sequences of letters are hard to segment. The built in microphone picks up the sounds caused by the pen which can help to segment the input into individual letters.

In the two final chapters, we localize sound sources in the environment of smartphones. This can be especially useful for discussion analysis or discussion diarisation. We first discuss how a single device can be used to deliver basic functionality. Adding more devices that collaborate, we arrive

at a system that works in most real situations, overcoming clock inaccuracies and device heterogeneity.

## Zusammenfassung

Lokalisierung ist in vielen Geräten und Situationen nützlich, wie zum Beispiel in Smartphones, Flugzeugen oder selbstfahrenden Autos. Smartphones sind oft mit GPS Receivern, Beschleunigungssensoren und Gyroskopen ausgestattet. Dennoch ist es in Umgebungen wie in Gebäuden schwierig, solche Geräte genau zu lokalisieren.

Im ersten Kapitel zeigen wir, wie Messungen der WiFi-Signalstärke und Bewegungsdaten, die mit Smartphones aufgezeichnet wurden, verwendet werden können, um Signalstärkeverteilungen zu kartografieren. Die dazu nötigen Daten können mit einem Smartphone aufgezeichnet werden, welches in der Hosentasche getragen wird. Die Bewegung der tragenden Person kann genau verfolgt werden, wenn ein Smartphone in der Hosentasche getragen wird. Gleichzeitig können die Signalstärken der sichtbaren WiFi-Infrastruktur aufgezeichnet werden. Diese verwenden wir, um sich akkumulierende Ungenauigkeiten in der Bewegungsmessung zu reduzieren. Die resultierenden räumlichen Signalstärkeverteilungen sind nützlich für die Lokalisierung in Räumen, die keinen GPS-Empfang zulassen.

In Kapitel 3 stellen wir einen GPS-Empfänger der kurze Arbeitszyklen zulässt. Dies bedeutet, dass der Empfänger lediglich sehr kurze Signalaufzeichnungen benötigt, um eine exakte Position berechnen zu können. Dies ist auch dann möglich, wenn die wirkliche Position nur bis auf einige hundert Kilometer genau bekannt ist. Solch eine ungenaue Positionsschätzung ist durch Mobilfunk oder die letzte bekannte Position einfach zu erreichen. Der Empfänger kann für verschiedene Anwendungen angepasst werden. Zum Beispiel können die sehr kurzen Signalaufzeichnungen direkt gespeichert werden, ohne eine Position zu errechnen. Dies erlaubt es uns, mit wenig Energie für lange Zeit die Position des Empfängers zu verfolgen oder Fotos sofort mit Positionsdaten zu annotieren. Alternativ dazu kann der Empfänger die Zeit für die erste Positionsberechnung herkömmlicher GPS-Empfänger verkürzen, falls eine Netzwerkverbindung vorhanden ist.

In Kapitel 4 und 5 behandeln wir, wie die Bewegung eines Smartphones verwendet werden kann, um auf persönliche Daten wie Pins oder Passwörter zurückzuschliessen. Unsere Benutzerstudie zeigt, wie in unkontrollierten Umgebungen Eingaben auf Touchscreens aus den entsprechenden Bewegungsdaten abgeleitet werden können. Bewegungsdaten können auch konstruktiv verwendet werden, um Benutzergersten zu erkennen. Für die Gestenerkennung benutzen wir Bewegungsdaten, die mit Smartwatches aufgezeichnet werden, während eine Person an ein Whiteboard schreibt. Obwohl die Erkennung einzelner Buchstaben gute Ergebnisse liefert, ist es schwierig, Sequenzen von Buchstaben korrekt zu segmentieren. Audiodaten helfen dabei,

sequenzen von Buchstaben zu unterteilen und dadurch die Segmentierung zu vereinfachen.

In den zwei letzten Kapiteln lokalisieren wir Geräuschquellen in der Umgebung von Smartphones. Dies ist besonders nützlich, um Diskussionen zu analysieren. Wir zeigen zuerst, wie ein einzelnes Gerät diese Funktionalität bereitstellen kann. Wenn wir mehrere kooperierende Geräte verwenden, können wir in den meisten realistischen Situationen gute Ergebnisse erzielen. Wir präsentieren dazu Lösungen der praktischen Probleme wie Ungenauigkeiten der Uhren und Geräteinhomogenität.