

Diss. ETH No. 19147

Location Fingerprinting for Ultra-Wideband Systems

The Key to Efficient and Robust Localization

A dissertation submitted to the
ETH Zurich

for the degree of
Doctor of Sciences (Dr. sc. ETH Zurich)

presented by
CHRISTOPH STEINER
Dipl.-Ing., Graz University of Technology
born March 11, 1980
citizen of Austria

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Armin Wittneben, examiner
Prof. Dr. Moe Z. Win, co-examiner

2010

Abstract

In this thesis, a novel position location concept is proposed and studied, which provides accurate position estimates in dense multipath and non-line-of-sight propagation environments. The main idea is to apply the location fingerprinting paradigm of position location to channel impulse responses with ultra-wide bandwidth. The large bandwidth enables a fine temporal resolution of the multipath propagation channel, which in turn acts as a unique location fingerprint of the positions of transmitter and receiver.

In the first part of this thesis, a location fingerprinting framework is developed from a communication theoretic perspective. The position location problem is formulated as hypothesis testing problem, such that fundamental methods from statistical detection theory can be applied. Location fingerprints are modeled by parameterized probability density functions. Different hypotheses are distinguished by these parameters, which have to be estimated during a training phase. This framework generalizes a wide class of location fingerprinting approaches and enables the systematic derivation of optimal classification rules and theoretical performance analysis.

In the second part, location fingerprinting with two specific ultra-wideband receiver structures is studied in detail. The first receiver is able to perform channel estimation. The corresponding location fingerprints are chosen as Nyquist sampled versions of the estimated channel impulse responses. The second receiver is a low complexity generalized energy detection receiver, where the energy samples at the output of the analog front-end serve as location fingerprints. In order to derive optimal classification rules, it is necessary to establish a stochastic description of the location fingerprints. This stochastic modeling is performed on the basis of measured data and a model selection criterion. The position location performance of both receiver structures is analyzed theoretically and experimentally with measured data. It is shown that decimeter accuracy is achievable with both receiver structures in dense multipath and non-line-of-sight propagation environments.

However, the performance analysis reveals also a major shortcoming of the proposed method: In order to achieve high position location accuracy, a large amount of training

data is required. This issue is addressed in the third part of this thesis, where two promising techniques are proposed, which increase the efficiency of the training phase. At first, the position location problem is reformulated, such that the training phase can be combined with the localization phase in an iterative manner. Results from the localization phase are used as additional training data. Based on experimental performance results it is shown that the required amount of training data can be significantly reduced. The second technique is even more promising. Only very few measured channel impulse responses - theoretically only three per hypothesis for two-dimensional localization - are required during the training phase for parameter estimation. This efficient training phase is based on a geometrical channel model and exploits a priori knowledge about the geometry of the propagation environment. An experimental performance evaluation shows the high potential of this approach to achieve minimal training phase complexity.

The thesis concludes with a summary of the major findings and with a list of interesting future research topics in the field of location fingerprinting for ultra-wideband systems.

Kurzfassung

In dieser Arbeit wird eine neuartige Methode zur Ortung von drahtlosen Kommunikationsgeräten präsentiert und analysiert. Das Verfahren verspricht eine genaue und zuverlässige Positionsbestimmung, insbesondere für einen Übertragungskanal mit dichter Mehrwegeausbreitung und für den Fall, dass keine direkte Sichtverbindung zwischen Sender und Empfänger besteht. Die grundsätzliche Idee besteht darin, die Impulsantwort des Übertragungskanals als *Fingerabdruck* für die Positionen von Sender und Empfänger zu verwenden. Eine feine zeitliche Auflösung des Übertragungskanals ist dabei ausschlaggebend. Dies kann durch eine hinreichend grosse Signalbandbreite erreicht werden. Dieser örtliche Fingerabdruck wird im Folgenden als *Location Fingerprint* bezeichnet. Lokalisierung mittels Location Fingerprints wird *Location Fingerprinting* genannt.

Diese Dissertation beginnt mit der Entwicklung eines theoretischen Grundgerüsts zur systematischen Beschreibung und Analyse von Location Fingerprinting. Das Ortungsproblem wird als Hypothesentest formuliert, wodurch die Anwendung von Methoden aus der statistischen Entscheidungstheorie ermöglicht wird. Die stochastische Modellierung der Location Fingerprints erfolgt über eine parametrisierte Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion, wobei die Parameter einzelne Hypothesen voneinander unterscheiden und während einer Trainingsphase empirisch geschätzt werden müssen. Mit diesem theoretischen Grundgerüst können viele andere, in der Literatur vorgeschlagene, Location Fingerprinting Ansätze beschrieben und analysiert werden. Ausserdem ermöglicht dieses Grundgerüst die systematische Herleitung von optimalen Entscheidungsregeln und die theoretische Analyse von Fehlerwahrscheinlichkeiten.

Im zweiten Teil wird die Lokalisierung mit zwei unterschiedlichen Empfängerstrukturen behandelt. Zunächst wird ein kohärenter Empfänger betrachtet, der Kanalimpulsantworten mit grosser Bandbreite schätzen kann. Die zeitlich gefensterter Kanalimpulsantwort wird mit Nyquist-Rate abgetastet, um den entsprechenden Location Fingerprint zu erhalten. Als zweiter Empfänger wird ein verallgemeinerter Energiedetektor untersucht. Die Abtastwerte am Ausgang des analogen Frontends bilden den entsprechenden Location Fingerprint. Damit

statistische Methoden angewendet und optimale Entscheidungsregeln abgeleitet werden können, wird eine genaue stochastische Beschreibung der Location Fingerprints benötigt. Die Auswahl des stochastischen Modells basiert auf der statistischen Analyse von gemessenen Daten.

Die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Positionsbestimmung wird theoretisch und experimentell untersucht. Mit beiden Empfängerstrukturen kann in sehr vielen Fällen eine Genauigkeit im Bereich von wenigen Dezimetern erreicht werden, obwohl alle gemessenen Übertragungskanäle eine dichte Mehrwegeausbreitung und einige Übertragungskanäle keine direkte Sichtverbindung zwischen Sender und Empfänger aufweisen. Diese experimentelle Analyse offenbart aber auch eine grosse Schwäche: Es werden sehr viele Trainingsdaten zur empirischen Parameterschätzung benötigt, um eine hohe Genauigkeit zu erreichen.

Der dritte Teil dieser Arbeit widmet sich dieser Schwäche. Zwei vielversprechende Methoden zur Verbesserung der Effizienz der Trainingsphase werden vorgestellt und analysiert. Zunächst wird das Ortungsproblem so umformuliert, dass die Trainingsphase mit der Lokalisierungsphase kombiniert werden kann. Iterativ werden Resultate der Lokalisierungsphase dazu verwendet, um die Trainingsergebnisse zu verbessern. Bessere Trainingsergebnisse bedeuten wiederum genauere Ortungsergebnisse. Die experimentelle Analyse zeigt, dass die benötigte Anzahl an Trainingsdaten dadurch erheblich reduziert werden kann. Die zweite Methode ist noch vielversprechender. Theoretisch werden für eine zweidimensionale Lokalisierung nur drei gemessene Kanalimpulsantworten pro Hypothese zur Parameterschätzung während der Trainingsphase benötigt. Diese effiziente Trainingsphase basiert auf einem geometrischen Kanalmodell und nutzt a priori Wissen über die Geometrie des Raumes. Eine experimentelle Analyse dieser Parameterschätzmethode zeigt deren grosses Potential, um die Komplexität der Trainingsphase auf ein Minimum zu reduzieren.

Als Abschluss dieser Abhandlung werden alle Ergebnisse resümiert, Schlussfolgerungen gezogen, und interessante weiterführende Forschungsfragen diskutiert.