

# Adaptation of activity recognition systems

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of  
Doctor of Sciences

presented by

KILIAN FÖRSTER

Dipl.-Ing. TU Ilmenau  
MEngSt University of Auckland  
born July 23, 1980  
citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Gerhard Tröster, examiner  
Prof. Dr. José del R. Millán, co-examiner

2011

# Abstract

Advances in mobile computer systems, signal processing and sensing technology enable new computing applications to support the user anywhere and anytime. One such application is activity aware computing where the user's activities are taken into account to provide appropriate assistance.

The crucial element enabling this assistance is activity recognition. Human motion patterns, associated with a specific activity, have to be found in signals captured from motion sensors. These sensors are on the user's body or within their environment. Activity recognition systems are usually trained during the design phase with prerecorded, annotated examples of typical activity patterns. Accounting for all possible user or sensor characteristics, potentially resulting in non-stationary motion signals, would be costly and requires a vast amount of training data. New characteristics might also be developed throughout the ongoing usage of the system, which cannot be captured in training data.

The objective of this thesis is to explore adaptive techniques with the goal of overcoming the restrictions posed by static, trained at design time only, activity recognition systems. We focus on adaptive learning, which has shown potential in different recognition tasks with non-stationary signal characteristics.

Ideally, the activity recognition system adapts continuously to the current signal characteristics, actively guided by the user. Supervision, where the user consciously provides ground truth information, is deemed obtrusive and may interfere with the target application. We therefore investigate incremental learning techniques with particular focus on reducing the amount of supervision required.

One step in this direction is an unsupervised self-calibration strategy, which allows for classifier adaptation. The key benefit of this approach is the reduction of obtrusive supervision required from the user. Validation on two datasets has shown an average recognition accuracy improvement of up to 33.3% and 13.4% for displaced motion sensors. However, improvement can not be guaranteed for each individual case.

The user can also be taken in the loop to indicate system's recognition errors. Indicating recognition errors is less obtrusive compared to providing ground truth, yet enables supervision according to the user's intention. We evaluate two approaches capitalizing on this form of su-

pervision, firstly an incremental learning k-Nearest-Neighbor classifier, and secondly a reinforcement learning method. The adaptation of the recognition system, to a new user, results in an accuracy increase of 10.3% and 36% respectively.

Another possibility, to reduce obtrusiveness of supervision, is to detect system recognition errors implicitly through the user's brain signals. The adaptation of an activity recognition system to a specific user, capitalizing on brain based error feedback, results in an accuracy improvement of 6.8%.

Finally we investigate the influence of an adaptive activity recognition system on the user behavior. In an online gesture recognition experiment users interact with a static as well as an adaptive recognition system. We found indications that the interaction with the adaptive recognition system not only increases the recognition performance, but also enables the users to perform gestures in a way most convenient and natural to them.

# Zusammenfassung

Die Miniaturisierung von Computersystemen und Sensoren, sowie Fortschritte in der Signalverarbeitung, erlauben die Nutzung dieser Technologien nahezu jederzeit und an jedem Ort. Dies erschließt neue Anwendungsbereiche, in denen das Computersystem den Benutzer kontinuierlich und situationsabhängig unterstützt. Ein wichtiger Baustein für eine situationsabhängige Unterstützung ist die Erkennung und Verarbeitung von Aktivitäten, die vom Benutzer ausgeführt werden.

Ein Aktivitätserkennungssystem misst die Bewegungen des Benutzers mit Hilfe von Sensoren und durchsucht die resultierenden Signale nach spezifischen Bewegungsmustern. Die Bewegungssensoren können hierbei sowohl am Körper des Benutzers als auch in dessen Umgebung angebracht sein. Die Zuordnung von Bewegungsmustern zu Aktivitätsklassen wird in der Regel basierend auf vorab aufgezeichneten Datensätzen durch Lernalgorithmen erstellt. Um alle möglichen Benutzer- und Sensorcharakteristiken in das Lernen mit einbeziehen zu können, sind umfangreiche Lerndatensätze nötig, deren Erstellung sehr aufwendig ist. Des Weiteren können Signalcharakteristiken, die erst in der Zukunft auftreten, nicht durch einen solchen Lerndatensatz abgedeckt werden.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, adaptive Lernmethoden zur Aktivitätserkennung zu untersuchen, um Bewegungsmuster nicht nur einmalig zu lernen, sondern bei Bedarf auch anpassen zu können. Hierbei liegt der Fokus auf adaptiven Lernalgorithmen, die in ähnlicher Form bereits in andere Mustererkennungsanwendungen eingesetzt werden. Im Idealfall passt sich das Aktivitätserkennungssystem kontinuierlich an die Charakteristiken des Eingangssignals an, was durch inkrementelle Lernalgorithmen ermöglicht wird.

Der Benutzer kann die Adaption direkt steuern, indem er zu jeder Zeit angibt, welche Aktivitäten er gerade ausführt. Die Bereitstellung zusätzliche Informationen ist jedoch störend für den Benutzer und schränkt die Benutzbarkeit eines adaptiven Aktivitätserkennungssystems ein. Aus diesem Grund befasst sich ein weiterer Teil dieser Arbeit mit der Frage, wie die zusätzliche Informationsmenge, die zur Adaption benötigt wird, sowie der Aufwand für deren Bereitstellung reduziert werden können.

Eine Möglichkeit der Adaption, bei der vom Benutzer keine

zusätzlichen Informationen benötigt werden, ist eine Selbstkalibrierung der Aktivitätserkennung. Die Validierung dieses Ansatzes wird auf zwei Datensätzen durchgeführt, bei denen sich die Signalcharakteristiken durch unterschiedliche Sensorpositionen am Körper ändern. Die Adaption der Aktivitätserkennung auf eine neue Sensorposition mit Hilfe der Selbstkalibrierung führte zu einer Verbesserung der Erkennungsrate um 33.3% bzw. 13.4% auf den beiden Datensätzen.

In einem weiteren Lernansatz werden Informationen über Erkennungsfehler, die vom Benutzer identifiziert und angegeben werden, für die Adaption genutzt. Verglichen mit der Angabe der tatsächlich ausgeführten Aktivität ist die Angabe von Erkennungsfehlern einfacher und weniger störend. Zwei verschiedene Ansätze zur Nutzung der Erkennungsfehler werden untersucht - ein erweiterter 'k-Nearest-Neighbor-Klassifizierer' sowie eine 'Reinforcement Learning' Methode. Die Adaption des Aktivitätserkennungssystems auf die spezifischen Charakteristiken eines neuen Benutzers resultierte in einer Verbesserung der Erkennungsrate um 10.3% mit dem 'k-Nearest-Neighbor-' bzw. 36% mit dem 'Reinforcement Learning' Ansatz.

Statt einer expliziten Angabe der Erkennungsfehler durch den Benutzer können diese auch indirekt über dessen Hirnströme ermittelt werden. Ein so auf einen neuen Benutzer adaptiertes Aktivitätserkennungssystem ergab eine Verbesserung der Erkennungsrate um durchschnittlich 6.8%.

Abschließend wird untersucht, wie sich eine Adaption des Aktivitätserkennungssystems auf das Verhalten des Benutzers auswirkt. Im Rahmen eines Experiments werden Handgesten des Benutzers vom Aktivitätserkennungssystem erkannt, welches in verschiedenen Durchgängen sowohl mit wie auch ohne Adaption betrieben wird. Die Nutzung des adaptiven Aktivitätserkennungssystems führt zu einer Verbesserung der Erkennungsrate. Außerdem gibt es Anzeichen dafür, dass der Benutzer bei aktivierter Adaption seine Gesten anpassen kann, so dass diese komfortabler und natürlicher ausgeführt werden können.