

Unsichtbare Erkennung menschlicher Aktivitäten in Smart Living Umgebungen mit Kapazitiven Sensoren

Invisible Human Sensing in Smart Living Environments using Capacitive Sensors

Andreas Braun, Fraunhofer IGD, Darmstadt, Deutschland, andreas.braun@igd.fraunhofer.de

Silvia Rus, Fraunhofer IGD, Darmstadt, Deutschland, silvia.rus@igd.fraunhofer.de

Martin Majewski, Fraunhofer IGD, Darmstadt, Deutschland, martin.majewski@igd.fraunhofer.de

Kurzfassung

Smart Living Umgebungen versuchen ihre Bewohner bei der Bewältigung alltäglicher Aufgaben zu unterstützen. Wünsche und Notwendigkeiten werden dynamisch erkannt und eine angemessene Reaktion erzeugt. Dies benötigt mehrere Sensoren, deren Daten intelligent kombiniert werden, um eine Vielzahl von Situation zu erkennen. Häufig greift man hierbei auf Kameras und Bewegungsmelder zurück, die sich nur schwer unsichtbar in der Umgebung anbringen lassen. Kapazitive Sensoren messen Änderungen in elektrischen Feldern und können durch nicht-leitende Materialien hindurch Messungen vornehmen. In den letzten Jahren stieg ihre Popularität in Forschung und am Markt; insbesondere der fingerkontrollierte Touchscreen ist ein populäres Beispiel. In dieser Arbeit führen wir diese Art von Sensorik ein und stellen vor, inwiefern mit diesen menschliche Aktivitäten in Smart Living Umgebungen gemessen werden können. Wir stellen verschiedene Anwendungen in den Bereichen der Aktivitätserkennung und Mensch-Maschine-Interaktion vor, diskutieren Möglichkeiten und Herausforderungen der kapazitiven Sensorik und stellen zukünftige Forschungsrichtungen vor.

Abstract

Smart Living environments aim at supporting their inhabitants in daily tasks by detecting their needs and dynamically reacting accordingly. This generally requires several sensor devices, whose acquired data is combined to assess the current situation. Capturing the full range of situations necessitates many sensors. Often cameras and motion detectors are used, which are rather large and difficult to hide in the environment. Capacitive sensors measure changes in the electric field and can be operated through any non-conductive material. They gained popularity in research in the last few years, with some systems becoming available on the market. In this work we will introduce how those sensors can be used to sense humans in smart living environments, providing applications in situation recognition and human-computer interaction. We will discuss opportunities and challenges of capacitive sensing and give an outlook on future scenarios.

1 Einführung

Die Auswahl von Sensoren für intelligente Umgebungen ist in den vergangenen Jahren stark gewachsen [1]. Es existiert eine große Zahl von kaufbaren Systemen die Bewegung, Temperatur, Präsenz, Luftqualität, oder Aktivitäten messen [2]. Insbesondere in den letzten beiden Jahren zeigten diverse Übernahmen von IT-Riesen, wie z.B. Google und Samsung, das steigende Interesse am Bereich Smart Homes [3], [4]. Schon seit vielen Jahren propagieren Ubiquitous Computing und Ambient Intelligence ein Ensemble von Sensoren, die sich unauffällig in unseren Alltag integrieren [5]. Während es bei der Anzahl und der Möglichkeit der Interkonnektivität große Fortschritte gab, wurde der Bereich Unauffälligkeit nur marginal behandelt. Die Sensoren heben sich bisher deutlich von ihrer Umgebung ab. Streitz et al. führten daraufhin den „disappearing computer“ ein, der sich aus unserem direkten Sichtfeld bewegt und nur noch durch Ein- und Ausgabekanäle zu Tage tritt [6]. Smartphones und auch Tablets sind ein deutlicher

Schritt in diese Richtung. Jedoch bleiben unsichtbare Sensorsysteme eine Herausforderung.

Es gab in den vergangenen Jahren viele Forschungstätigkeiten in diese Richtung. Adib et al. stellten beispielsweise ein Herz- und Atemfrequenzmesssystem über Radiowellen vor [7]. In der Umgebung angebrachte Antennen analysieren die Radiosignale, die vom menschlichen Körper reflektiert werden und nutzen Signalverarbeitung um feine Variationen in der Bewegung des Körpers zu erkennen. Aus einem Abstand von mehreren Metern können so physiologische Signale gemessen werden. Ein weiteres System ist WiSee von Pu et al., welche Signalreflektion im 2.4GHz-Band nutzt, um Gesten eines stehenden Anwenders zu erkennen [8]. Diese Messungen im Radiofrequenzbereich sind ein Beispiel für Sensortechnologien die kontaktfrei funktionieren und zudem hinter zahlreichen Materialien versteckt werden können. Beispielsweise könnten diese in die Wand oder Mobiliar integriert werden. Sie sind also ein Beispiel für unsichtbare Sensorik. Diese haben zwei Haupteigenschaften. Das Messverfahren kann nicht von menschlichen Sinnen wahrgenommen werden, wir können

ihre Messungen also nicht fühlen und die Messverfahren sind nicht in der Umgebung exponiert und somit unsichtbar für das menschliche Auge. Diese nahtlose Integration von unsichtbaren Sensoren bietet die Möglichkeit Smart Living Umgebungen zu revolutionieren, insbesondere die Funktionalität und Akzeptanz durch den Nutzer. Neben Radiofrequenz-Verfahren gibt es noch weitere Kategorien von Sensoren, welche diese Voraussetzungen erfüllen. In dieser Arbeit fokussieren wir uns auf kapazitive Sensoren, die schwache elektrische Felder nutzen, um die Anwesenheit menschlicher Körper in einem Abstand von bis zu einem Meter zu erkennen. Wir zeigen, warum diese als unsichtbarer Sensor in Smart Living Umgebungen gelten können und geben einen Überblick über unseren bisherigen Forschungsergebnisse in diesem Bereich. Auf den folgenden Seiten werden wir die Technologie kurz einführen und bekannte Anwendungen vorstellen. Wir führen zwei interessante Szenarien im Bereich Smart Living ein: Aktivitätserkennung und Mensch-Maschine-Interaktion in intelligente Umgebungen. Wir stellen Beispielsysteme, sowie Verarbeitungsverfahren vor und diskutieren Möglichkeiten und Herausforderungen dieser Technologie, bevor wir einen Ausblick auf zukünftige Entwicklungen geben.

2 Kapazitive Sensorik



Bild 1 Beispiele verschiedener Elektrodenmaterialien für Selbstkapazitätsmessungen: (von links nach rechts) Kupferelektrode, leitende Farbe, leitender Faden, leitender Stoff und leitende Farbe auf Stoff [9]

Der menschliche Körper besteht zum größten Teil aus ionisiertem Wasser, dessen Unterschiede in verschiedenen Geweben spezifische elektrische Eigenschaften hervorrufen, die sich unterscheiden lassen. Daher können wir externe elektrische Felder nutzen, um den Einfluss eines sich bewegendem, menschlichen Körpers auf diese Felder zu messen. Als alternatives Verfahren nutzen wir die induzierten Felder des Körpers und messen diese. Eine frühe Anwendung ist das elektronische Musikinstrument Theremin, welches von Leon Theremin um 1920 entwickelt wurde [10]. Eine klassische Arbeit der neueren Zeit über kapazitive Abstandssensoren ist die Dissertation "Electric Field Imaging" von Joshua Smith, welche die Arbeiten über kapazitive Sensoren am MIT Media Lab in den 1990ern zusammenfasst. Hier wurden auch zuerst die verschiedenen Messmethoden kapazitiver Abstandsmessung explizit genannt [11].

Diese Methoden sind Selbstkapazitäts-Modus und gemeinsamer Kapazitäts-Modus. Erster benötigt nur eine einzelne Elektrode, die als Sender und Empfänger dient, während der gemeinsame Kapazitäts-Modus zwei dedizierte Elektroden nutzt; eine als Sender und eine als Empfänger. Der Selbstkapazitäts-Modus misst die Änderungen des Feldes zwischen der Elektrode und einem beliebigen geerdeten Objekt in der Umgebung, während der gemeinsame Kapazitäts-Modus die Änderungen des Feldes zwischen zwei Elektroden misst, die durch das Einbringen eines Objektes hervorgerufen werden. In vielen unserer bisherigen Arbeiten und weiteren Arbeiten, die Objekte über einen gewissen Abstand messen, ist der Selbstkapazitäts-Modus häufiger zu finden [12], [13], [14], [15], [16]. Auch bei der Nutzung flexibler Elektroden ist dieser Modus häufig anzutreffen [17], [18],[19].

In mehreren vorherigen Arbeiten wurden verschiedene Materialien und Formen von Elektroden für kapazitive Anwendungen in intelligenten Umgebungen untersucht [9], [20]. In Bezug auf die Elektrodengröße ist insbesondere die geplante Anwendung relevant. Sollte die Größe nicht begrenzt sein, sollte diese in etwa der Größe des zu detektierenden Objekts entsprechen. Dies führt zu einer maximierten Änderung der Kapazität, bei sich änderndem Abstand. In Bezug auf das Material haben die meisten leitenden Materialien ähnliche Eigenschaften. Jedoch gibt es einige Polymere, die deutlich schlechter reagiert haben [21]. Bei verschiedenen flexiblen Elektrodenmaterial konnte erwiesen werden, dass diese auch geeignet sind für eine flexible Anwendung von kapazitiven Sensoren [9].

Basierend auf Literaturrecherchen konnten zwei Anwendungsbereiche im Bereich Smart Living identifiziert werden, die sich besonders für unsichtbare Sensorsysteme eignen. Die erste Anwendung ist Aktivitätserkennung, die von zusätzlicher Sensorik in der Umgebung profitiert. Die zweite ist Interaktion in intelligenten Umgebungen, bei welcher sich unsichtbare Sensoren zum Aufbau interaktiver Oberflächen und Zonen eignen, mit welchen sich verschiedene Funktionen der Smart Living Umgebung steuern lassen. In den folgenden Abschnitten geben wir einen kurzen Einblick in diese Gebiete, bevor wir unsere Arbeiten der vergangenen Jahre einführen.

3 Aktivitätserkennung

Im Bereich von Smart Living Umgebungen ist Aktivitätserkennung eine der wichtigsten technologischen Komponenten. Der Ansatz ist die Erkennung von Aktivitäten des täglichen Lebens (ADLs), um eine sinnvolle und gezielte Unterstützung zu bieten. Dies sind strukturierte Tätigkeiten, die unterschieden und klassifiziert werden können. Eine bekannte Arbeit in diesem Bereich stammt aus den frühen 2000ern von Autoren des MIT, die verschiedene ADLs mit einfachen Sensoren aufgenommen und klassifiziert haben [22]. Es existieren allerdings noch weitere Ansätze, um diese Aktivitäten zu erkennen, z.B. mit Hilfe von tragbaren Sensoren. Lara und Labrador geben einen guten

Überblick über Technologien und Methoden in diesem Bereich [23]. Sie evaluierten 28 Systeme und haben eine Taxonomie von Lern- und Klassifizierungsverfahren erstellt. Die meisten Systeme nutzen maschinelles Lernen um Aktivitäten zu erkennen. Verschiedene Muster in Zeit- oder Frequenzdomäne werden aus den Sensordaten extrahiert und an ein Lernsystem weitergeleitet. Hier können entweder einzelne Sensoren genutzt werden, oder die Daten von mehreren Sensoren fusioniert werden [24]. Dies lässt sich noch feiner in beaufsichtigtes und unbeaufsichtigtes Lernen unterteilen. Bei der ersten Variante werden die Muster von Menschen oder spezialisierten Systemen automatisch den Sensordaten zugeordnet, während bei der zweiten die Lernmethode selbst versucht signifikante Muster zu erkennen, die in einem weiteren Prozess den ADLs zugeordnet werden können.

Unsichtbare Sensoren können ADLs erkennen, indem sie in alltägliche Objekte in der Umgebung integriert werden. Unsere Arbeiten fokussieren sich auf Möbel in intelligenten Umgebungen, konkrete Beispiele sind ein Stuhl, Bett, und Tisch. Sie werden von den Oberflächen komplett verdeckt, oder unauffällig in das Material integriert. Die Sensoren sind somit nicht direkt mit den zu messenden Körpern der Nutzer verknüpft und müssen daher auf einen gegebenen Abstand messen. Daher ist es notwendig mehrere Systeme in der Umgebung zu verteilen, und zwar an solchen Objekten, an welche eine häufige Annäherung stattfindet. Kapazitive Sensoren sind gut für eine verteilte Nutzung geeignet, da sie nur einen geringen Energieverbrauch haben. Die Daten von diesen lassen sich ebenfalls fusionieren.

4 Interaktion in intelligenten Umgebungen

Das zweite Anwendungsfeld für unsichtbare Sensoren sind Interaktionssysteme in Smart Living Umgebungen. Dies sind alle Verfahren, mit welchen Menschen ihre Umgebung kontrollieren. Dies kann klassische Interaktionsgeräte beinhalten, wie Maus, Keyboard, oder berührungsempfindliche Geräte wie Smartphones. Des Weiteren gibt es spezielle Gestensteuerungssysteme wie z.B. die Microsoft Kinect oder Leap Motion [25], [26]. Es ist weiterhin auch möglich diese Interaktionssysteme in alltägliche Objekte zu integrieren. Dieses Konzept nennt man auch interaktive Oberflächen. Beispiele sind Tische, die mit Sensoren erweitert werden, oder Sensorsysteme, die Interaktion mit einem angeschlossenen Objekt erkennen [27], [28]. Eine Herausforderung ist hier die Wiedergabe eines passenden Feedbacks, sobald eine Interaktion stattgefunden hat. Dies führte zu Konzepten wie beweglichen Projektoren, oder Laserpointer, die Objekte in der Umgebung markieren [29]–[31].

Unsichtbare Sensoren können genutzt werden um eine Vielzahl verschiedener interaktiver Oberflächen zu erstellen.

5 Anwendungen und Szenarien

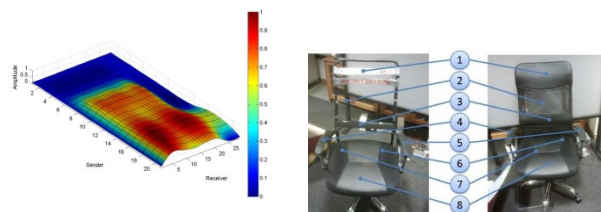


Bild 2 Links: Sensorwerte einer Person, die auf dem Smart Bed sitzt [32], Rechts: Sensorlayout des Capacitive Chair [13].

In diesem Abschnitt beschreiben wir drei Aktivitätserkennungs-Systeme. Das Smart Bed ist ein Stück Stoff, welches mit einem Netz von Sensoren ausgestattet wurde, die im gemeinsamen Kapazitäts-Modus operieren. Es wird genutzt, um die Liegeposition einer Person zu erkennen [32]. Dies ist insbesondere im Bereich der Intensivpflege relevant, da durch die Erkennung von Art und Dauer der Liegeposition, Effekte von Dekubitus-Wunden vermieden werden können. Das System erkennt fünf Posen mit einer Genauigkeit von mehr als 90%, basierend auf einer Nearest-Neighbor-Klassifikation. Bild 2 zeigt auf der linken Seite die resultierenden Sensorwerte bei einer schweren Person, die auf dem Smart Bed sitzt. Das System könnte Pflegekräfte alarmieren, wenn eine Person zu lange in einer Position liegt, oder den Verlauf der Liegepositionen darstellen, so dass die Pflegekräfte entscheiden können, welche Aktion als nächstes ausgeführt werden sollte.

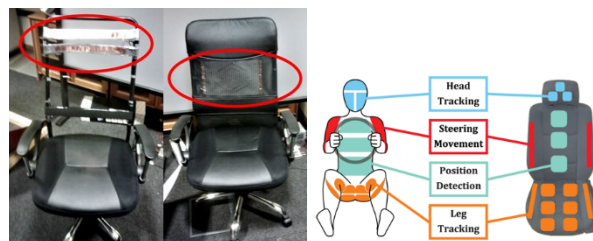


Bild 3 Links: Prototyp des Capacitive Chair [13]. Rechts: Autositz mit Sensorpositionen bezüglich der Position des Fahrers

Das zweite System ist der Capacitive Chair, der für eine Posenerkennung, sowie die Detektion von Arbeitsaktivitäten genutzt werden kann. Dieser ist in Bild 2 auf der rechten Seite dargestellt [13]. Er nutzt acht kapazitive Sensoren im Selbstkapazitäts-Modus, die unter dem Sitz, an den Armlehnen, sowie unter der Rückenlehne angebracht werden können. Dieses Setup kann dazu dienen, die sitzende Person zu animieren, häufigere Positionswechsel auszuführen, oder sogar zur Verfolgung von Übungen auf dem Stuhl eingesetzt werden, wie es von uns in einem späteren System umgesetzt wurde [12]. Die Genauigkeit der Posenerkennung bei vier Posen lag über 98%. Die Erkennung der Arbeitsaktivitäten unterschied die Intensität von Bewegungen über einen längeren Zeitraum, um zwischen Nichtbelegung des Stuhls, inaktiven Tätigkeiten (z.B. Lesen am

Bildschirm, oder aktiven Tätigkeiten (z.B. einem Telefongespräch) zu unterscheiden. Ein ähnliches System wurde in einen Autositz eingebaut, wie in Bild 3 auf der rechten Seite dargestellt [33]. Die Posenerkennung wird genutzt, um den Sitz basierend auf der Anthropometrie des Fahrers einzustellen, damit eine Position gefunden wird, die auf längeren Fahrten komfortabel ist. Es werden auch Sicherheitssysteme unterstützt, indem beispielsweise Sekundenschlaf anhand charakteristischer Bewegungen des Kopfs erkannt werden kann.

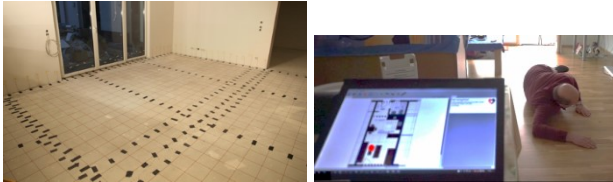


Bild 4 Links: Verlegung von CapFloor in einem Neubau - Rechts: Beispiel eines erkannten Sturzes.

Das dritte System ist CapFloor, ein System zur Lokalisierung in Innenräumen und zur Sturzerkennung. Es nutzt ein Netz von Sensoren das unter dem Boden angebracht wird, während kapazitive Sensoren am Rand die Feldmessung registrieren [34]. CapFloor unterscheidet mehrere Nutzer und erkennt liegende Personen anhand ihrer Größe. Dies kann beispielsweise in Seniorenwohnheimen eingesetzt werden, zum Einen um im Zweifelsfall Hilfe zu rufen, und andererseits um über gezielte Licht- oder Heizungsabschaltung Energie zu sparen.

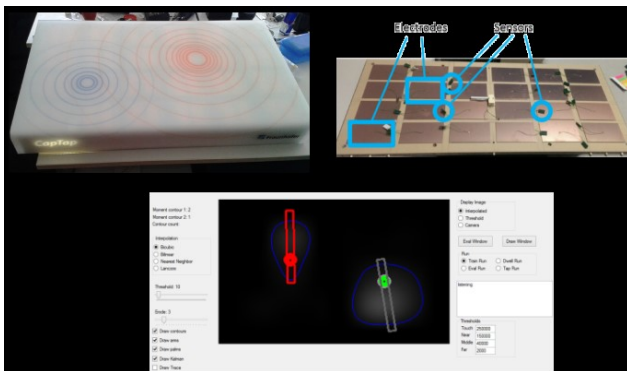


Bild 5 Oben links: Mobiler CapTap Prototyp - Oben rechts: Aufbau von Elektroden und Sensoren - Unten: Erkennung mehrerer Hände und Sensordatenvisualisierung

Wir werden zwei Beispielsysteme interaktiver Oberflächen vorstellen. Das erste ist CapTap, ein kapazitiver, interaktiver Tisch, der 24 Selbstkapazitäts-Sensoren nutzt, um die Position von zwei Armen über der Oberfläche zu verfolgen [35]. Zudem ist ein Mikrophon installiert, welches verschiedene Berührungen erkennen und klassifizieren kann [36]. Zur Erkennung der Arme können Verfahren des Maschinellen Lernens genutzt werden. Ein mobiler Prototyp, sowie der Aufbau der Sensoren in einem festen

Tisch und ein Beispiel der Sensordatenverarbeitung sind in Bild 5 dargestellt.



Bild 6 Links: Curved-Interaktionsgerät zur Freiform-Interaktion - Rechts: Unterstützung der Interaktion über die Annäherung der Oberfläche an die natürlichen Armbewegung in Virtual Reality Umgebungen.

Das zweite Interaktionsgerät ist Curved, das kapazitive Sensoren zur Gestenerkennung nutzt, und so konzipiert wurde, dass es der natürlichen Bewegung von Armen und Händen gerecht wird [14]. Selbstkapazitäts-Sensoren sind unter der frei geformten Oberfläche verbaut und erkennen Bewegungen der Arme in einem gewissen Abstand. Ein erster Prototyp ist speziell für Anwendungen in Virtual Reality gedacht.

Bei beiden Systemen sind auch Anwendungen in Smart Living, oder Active & Assisted Living denkbar. So ist es beispielsweise möglich, Interaktionssysteme zu bauen, die speziell auf Personen mit motorischen Störungen wie z.B. Amputationen zugeschnitten sind. Außerdem können die Systeme dynamisch angepasst werden und zum Beispiel andere Formen von Gesten erkennen. Beide Anwendungsfälle werden aktuell im europäischen Forschungsprojekt POSEIDON getestet [37]. In Zukunft soll Curved noch dynamischer, in Form von proaktiver Oberflächenanpassung, auf unterschiedliche Personen angepasst werden können.

6 Möglichkeiten und Herausforderungen

Unsichtbare Sensoren in Smart Living Umgebungen, die auf kapazitiver Sensorik basieren, bieten zahlreiche Möglichkeiten. Jedoch gibt es auch verschiedene Herausforderungen die berücksichtigt werden müssen, wenn eine neue Anwendung entstehen soll.

Jede Anwendung kann unsichtbar umgesetzt werden, indem die Elektrode von nicht-leitenden Materialien verdeckt wird. Anwendung, bei denen leitende Oberflächenmaterialien verwendet werden, können sehr unauffällig realisiert werden. Die Sensortechnologie wird von verschiedenen Umwelteinflüssen, wie beispielsweise Licht, nicht gestört. So können zum Beispiel Kameras in den Bereichen ersetzt werden, in denen solche Störungen häufig auftreten. Zudem benötigen die Sensoren keine große Rechenleistung, da nur wenige Werte pro Messintervall übermittelt werden. So können leistungsschwache und günstige Mikroprozessoren verwendung finden. Zuletzt ist auch der Energieverbrauch sehr niedrig, so dass die Sensoren über längere Zeit per Batterie betrieben werden können.

Es gibt jedoch mehrere Herausforderungen. Die Auflösung der Sensoren ist begrenzt. Soll ein gewisser Erkennungsabstand erzielt werden, bedarf es größerer Elektrodenoberflächen, was es schwerer macht mehrere Elektroden für eine gleichzeitige Erhöhung der Auflösung auf kleinem Raum unterzubringen. Somit werden deutlich weniger Daten generiert, was dazu führt, dass intelligente Datenverarbeitungsverfahren genutzt werden müssen, um eine gute Aktivitäts- und Objekterkennung zu ermöglichen. Während die Systeme von Licht und akustischen Signalen nicht gestört werden, gibt es andere Umgebungsfaktoren, wie beispielsweise Temperatur und Luftfeuchtigkeit, die elektrische Felder beeinflussen. Eine große Herausforderung sind Systeme die Funkwellen emittieren, die teilweise auch in den Bereichen liegen, die zur Messung notwendig sind. Dies muss beim Design der Systeme berücksichtigt werden, zum Beispiel durch adäquate Schirmung. Zuletzt erkennen die Abstandssensoren indirekte Berührungen nicht besonders gut, sprich, wenn die Elektrode nicht exponiert ist. Eine offene Hand in der Nähe der Elektrode kann dasselbe Signal erzeugen, wie ein einzelner Finger, der die Elektrode berührt. Dies entspricht allerdings demselben Effekt einer kamerabasierten perspektivischen Aufnahme, bei der ein großes Objekt in größerem Abstand dieselbe Bildfläche einnehmen kann, wie ein kleines Objekt in Kameranähe. Dennoch muss dieser Umstand bei der Auslegung der Elektroden berücksichtigt werden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit haben wir das Konzept von unsichtbaren kapazitiven Sensoren zur Messung menschlicher Aktivitäten in Smart Living Umgebungen eingeführt. Bei einem geeigneten Einsatz, sind diese in der Lage Systeme zur Erkennung von Aktivitäten und Interaktionsgeräte aufzubauen. Wir haben mehrere Systeme zur Aktivitätserkennung präsentiert, die Posen, Stürze oder Arbeitsaktivitäten erkennen. Zwei interaktive Oberflächen wurden vorgestellt, die neuartige Interaktionsmöglichkeiten bieten. In Zukunft möchten wir Möglichkeiten erkunden, die sich bieten, wenn unsichtbare mit tragbaren Sensoren kombiniert werden. Zudem können diese Sensoren genutzt werden, um Knoten für das Internet of Things zu erweitern, so dass diese die Präsenz von Menschen erkennen können. Des Weiteren ist die Fusion mit Sensornetzwerken in Smart Home Umgebungen ein interessanter Anwendungsfall. Während einzelne unsichtbare Sensoren noch nicht die Präzision anderer Sensoren, wie z.B. Kameras erreichen können, kann die Kombination von vielen Sensoren Abhilfe schaffen. Zuletzt möchten wir die Integration eines neuen Sensortyps erforschen - des elektrischen Potentialsensors. Dieser misst Änderungen im ambienten elektrischen Feld, die durch Bewegungen von geladenen Objekten, wie z.B. dem menschlichen Körper, entstehen.

8 Literatur

- [1] D. J. Cook, "How smart is your home?," *Sci. (New York, NY)*, vol. 335, no. 6076, p. 1579, 2012.
- [2] D. Cook and S. Das, *Smart environments: Technology, protocols and applications*, vol. 43. John Wiley & Sons, 2004.
- [3] Google Inc., "Google to Acquire Nest – Investor Relations – Google," *Google Inc.*, 2014. [Online]. Available: <http://investor.google.com/releases/2014/0113.html>. [Accessed: 09-Nov-2015].
- [4] B. X. Chen, "Samsung Acquires SmartThings, in Embrace of the Smart Home," *NY Times*, 2014. [Online]. Available: http://bits.blogs.nytimes.com/2014/08/14/samsung-acquires-smarthings-in-embrace-of-the-smart-home/?_r=0. [Accessed: 09-Nov-2015].
- [5] M. Weiser, "The Computer for the 21st Century," *Sci. Am.*, vol. 265, no. 3, pp. 94–104, 1991.
- [6] N. Streitz and P. Nixon, "The disappearing computer," *Commun. ACM*, vol. 48, no. 3, pp. 32–35, 2005.
- [7] F. Adib, H. Mao, Z. Kabelac, D. Katabi, and R. C. Miller, "Smart Homes that Monitor Breathing and Heart Rate," in *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2015, pp. 837–846.
- [8] Q. Pu, S. Gupta, S. Gollakota, and S. Patel, "Whole-home gesture recognition using wireless signals," in *Proceedings MobiCom*, 2013, pp. 27–38.
- [9] S. Rus, M. Sahbaz, A. Braun, and A. Kuijper, "Design Factors for Flexible Capacitive Sensors in Ambient Intelligence," in *Ambient Intelligence*, Springer, 2015, pp. 77–92.
- [10] A. Glinsky, *Theremin: Ether music and espionage*. University of Illinois Press, 2000.
- [11] J. R. Smith, "Electric field imaging," Massachusetts Institute of Technology, 1999.
- [12] A. Braun, I. Schembri, and S. Frank, "ExerSeat - Sensor-Supported Exercise System for Ergonomic Microbreaks," in *Ambient Intelligence*, 2015, pp. 1–16.
- [13] A. Braun, S. Frank, and R. Wichert, "The Capacitive Chair," in *Proceedings DAPI*, 2015.
- [14] A. Braun, M. Majewski, S. Zander-Walz, and A. Kuijper, "Curved - free-form interaction using capacitive proximity sensors," 2015.
- [15] M. Haescher, D. J. C. Matthies, G. Bieber, and B. Urban, "CapWalk : A Capacitive Recognition of Walking-Based Activities as a Wearable Assistive Technology," pp. 1–8.
- [16] L. Kaila, H. Raula, M. Valtonen, and K. Palovuori, "Living Wood – a Self-Hiding Calm User Interface," pp. 267–274.
- [17] R. De Janeiro and H. Fuks, "Hairware : The

- Conscious Use of Unconscious Auto-contact Behaviors,” pp. 78–86, 2015.
- [18] G. Singh, A. Nelson, R. Robucci, C. Patel, and N. Banerjee, “Inviz : Low-power Personalized Gesture Recognition using Wearable Textile Capacitive Sensor Arrays.”
- [19] A. Nelson, G. Singh, R. Robucci, C. Patel, and N. Banerjee, “Adaptive and Personalized Gesture Recognition using Textile Capacitive Sensor Arrays,” *IEEE Trans. Multi-Scale Comput. Syst.*, no. 1, pp. 1–1, 2015.
- [20] A. Braun, R. Wichert, A. Kuijper, and D. W. Fellner, “Capacitive proximity sensing in smart environments,” *J. Ambient Intell. Smart Environ.*, vol. 7, no. 4, pp. 1–28, 2015.
- [21] T. Grosse-Puppenthal, Y. Berghoefer, A. Braun, R. Wimmer, and A. Kuijper, “OpenCapSense: A rapid prototyping toolkit for pervasive interaction using capacitive sensing,” in *2013 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications, PerCom 2013*, 2013, pp. 152–159.
- [22] E. M. Tapia, “Activity Recognition in the Home Setting Using Simple and Ubiquitous Sensors,” *Technology*, vol. LNCS 3001, pp. 158–175, 2004.
- [23] O. D. Lara and M. A. Labrador, “A survey on human activity recognition using wearable sensors,” *Commun. Surv. Tutorials, IEEE*, vol. 15, no. 3, pp. 1192–1209, 2013.
- [24] H. B. Mitchell, *Multi-sensor data fusion*. Springer, 2007.
- [25] F. Weichert, D. Bachmann, B. Rudak, and D. Fisseler, “Analysis of the Accuracy and Robustness of the Leap Motion Controller,” *Sensors*, vol. 13, no. 5, pp. 6380–6393, 2013.
- [26] J. Shotton, A. Fitzgibbon, M. Cook, T. Sharp, M. Finocchio, R. Moore, A. Kipman, and A. Blake, “Real-time human pose recognition in parts from single depth images,” *Commun. ACM*, vol. 56, no. 1, pp. 116–124, Jun. 2013.
- [27] M. Ono, B. Shizuki, and J. Tanaka, “Touch & activate: adding interactivity to existing objects using active acoustic sensing,” in *Proceedings UIST*, 2013, pp. 31–40.
- [28] J. Rekimoto, “SmartSkin: an infrastructure for freehand manipulation on interactive surfaces,” in *Proceedings CHI*, 2002, pp. 113–120.
- [29] A. Wilson and H. Pham, “Pointing in intelligent environments with the worldcursor,” in *Proceedings International Conference on Human Computer Interaction*, 2003.
- [30] M. Majewski, A. Braun, A. Marinc, and A. Kuijper, “Providing Visual Support for Selecting Reactive Elements in Intelligent Environments,” *Trans. Comput. Sci. XVIII*, vol. 7848, pp. 248–263, 2013.
- [31] A. Wilson, H. Benko, S. Izadi, and O. Hilliges, “Steerable augmented reality with the beamatron,” *Proc. 25th Annu. ACM Symp. User interface Softw. Technol.*, 2012.
- [32] S. Rus, T. Grosse-Puppenthal, and A. Kuijper, “Recognition of Bed Postures Using Mutual Capacitance Sensing,” in *Ambient Intelligence*, Springer, 2014, pp. 51–66.
- [33] A. Braun, S. Frank, M. Majewski, and X. Wang, “CapSeat: Capacitive Proximity Sensing for Automotive Activity Recognition,” in *Proceedings of the 7th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, 2015, pp. 225–232.
- [34] A. Braun, H. Heggen, and R. Wichert, “CapFloor – A Flexible Capacitive Indoor Localization System,” in *Proceedings Evaluating AAL Systems Through Competitive Benchmarking. Indoor Localization and Tracking*, 2012, pp. 26–35.
- [35] A. Braun, S. Zander-Walz, S. Krepp, S. Rus, R. Wichert, and A. Kuijper, “CapTap - Combining Capacitive Gesture Recognition and Knock Detection,” 2015.
- [36] A. Braun, S. Krepp, and A. Kuijper, “Acoustic Tracking of Hand Activities on Surfaces,” in *Proceedings of the 2Nd International Workshop on Sensor-based Activity Recognition and Interaction*, 2015, pp. 9:1–9:5.
- [37] J. C. Augusto, T. Grimstad, R. Wichert, E. Schulze, A. Braun, G. M. Rødevand, and V. Ridley, “Personalized smart environments to increase inclusion of people with down’s syndrome,” in *Ambient Intelligence*, Springer, 2013, pp. 223–228.