

Drahtlose Sensornetzwerke mit Lokalisierungsfunktion für Anwendungen im betreuten Wohnen

Prof. Dr. Christof Röhrig, Fachbereich Informatik, Fachhochschule Dortmund, Emil-Figge-Str. 42, 44227 Dortmund, Deutschland, E-Mail: christof.roehrig@fh-dortmund.de

Kurzfassung

Der Beitrag beschreibt den Einsatz eines speziellen drahtlosen Sensornetzwerkes mit Lokalisierungsfunktion im betreuten Wohnen. Dabei sollen bestehende Wohnungen leicht nachgerüstet werden können, um den betreuten Personen möglichst lange ein sicheres Leben im gewohnten Umfeld zu ermöglichen. Das Sensornetzwerk dient der Erhöhung des Sicherheitsgefühls und der Lebensqualität älterer oder behinderter Menschen im eigenen Haushalt durch Erfassung von Sensordaten und Überwachung sicherheitsrelevanter Aspekte. Durch die Lokalisierungsfunktion des drahtlosen Sensornetzwerkes und ein kontinuierliches Monitoring von Vitaldaten können Parameterabweichungen in Verhaltensmustern erkannt und als Notsituationen rechtzeitig behandelt werden. Weiterhin wird durch die Lokalisierungsfunktion die Selbstinbetriebnahme und die automatische Konfiguration des drahtlosen Sensornetzwerkes erleichtert.

1 Einführung

Ein drahtloses Sensornetzwerk ist ein Funknetz aus Kleinstrechnern zur Messdatenerfassung, das aus vielen, dicht verteilten Sensorknoten besteht. Die Einsatzgebiete reichen dabei vom Umweltmonitoring, über das Detektieren von Bränden in Gebäuden, bis hin zum Einsatz im Ambient Assisted Living (AAL). In AAL-Anwendungen werden drahtlose Sensornetzwerke zur Erfassung von Sensordaten der Umgebung genutzt. Im Vergleich zu drahtgebundenen Sensornetzwerken können diese leichter in Gebäuden nachgerüstet werden. Zudem besteht die Möglichkeit durch das Einbinden von Body Area Networks, Vitaldaten von Patienten zu erfassen und damit Telemonitoring zu ermöglichen. Durch Anbindung an ein Gateway können die Daten über das Internet oder ein Mobilfunknetz abgerufen bzw. im Notfall direkt versendet werden.

Für eine Reihe von AAL-Anwendungsszenarien ist die Kenntnis des Ortes der Sensoren oder der mittels Telemonitoring erfassten Personen von Bedeutung. Die weit verbreitete Satellitenortung per Global Positioning System (GPS) ist für drahtlose Sensornetzwerke in AAL-Anwendungen ungeeignet, da GPS für Anwendungen in Gebäuden nicht eingesetzt werden kann. Hinzu kommt, dass der Stromverbrauch für den dauerhaften Batteriebetrieb zu hoch ist.

In den letzten Jahren wurden eine Reihe von neuen Verfahren und Produkten zur Lokalisierung in drahtlosen Sensornetzwerken entwickelt [1]. Aufbauend auf dem Funkstandard IEEE 802.15.4 wurden als neue Physical Layer UltraWide Band (UWB) und Chirp Spread Spectrum (CSS) in IEEE 802.15.4a definiert, um eine Entfernungsbestimmung zu anderen Knoten genauer 1 m zu ermöglichen [2]. CSS wird von der Firma Nanotron Technologies¹ im nanoLOC-System zur Distanzmessung und Kommunikation eingesetzt [3]. Das dabei verwendete Ranging-Verfahren „Symmetrical Double-Sided Two Way Ranging“ (SDS-TWR) gestattet eine funk-

basierte Abstandsmessung anhand der Signallaufzeiten und bietet die Grundlage für eine metergenaue Positionsbestimmung eines mobilen Objektes. Die drahtlose Kommunikation sowie das Ranging-Verfahren sind in einem einzigen Chip integriert. Der Vorteil von SDS-TWR liegt darin, dass keine zeitliche Synchronisierung zwischen den Knoten erforderlich ist. Die CSS-Modulation bietet neben der Möglichkeit der Lokalisierung von mobilen Knoten zusätzlich den Vorteil, dass diese Modulation besonders energieeffizient ist. Damit eignet sie sich in besonderem Maße für einen Batteriebetrieb. Ein Sensornetzwerk mit nanoLOC-Funktechnologie bietet damit besondere Möglichkeiten für den Einsatz in AAL-Applikationen. Im Gegensatz zur passiven RFID-Technik können die Sensorknoten innerhalb einer Wohnung auch über eine größere Distanz geortet werden. Um eine Person mit RFID-Technik raumgenau lokalisieren zu können, muss an jeder Tür ein RFID-Lesegerät mit vergleichsweise großer Antenne und hohem Energieverbrauch angebracht werden. Bei Sensornetzwerken mit nanoLOC-Technologie ist der Installationsaufwand wesentlich geringer und es können Sensorknoten batteriebetrieben werden.

Durch die Lokalisierungsfunktion des Sensornetzwerkes können eine Reihe von bisher nicht realisierbaren Funktionen ermöglicht werden. So können z. B. die Bewohner metergenau lokalisiert werden, um über das Verhalten Komfortfunktionen zu steuern oder bei Verhaltensänderungen ggf. Alarme auszulösen. Vor dem Hintergrund dieser Möglichkeiten werden an der Fachhochschule Dortmund Anwendungsszenarien im Bereich von Smart Living und betreutem Wohnen untersucht. Im Szenario betreutes Wohnen wird ein drahtloses Sensornetzwerk mit nanoLOC-Funkkommunikation aus mobilen und stationären Knoten aufgebaut und für diese Anwendung optimiert.

¹<http://www.nanotron.de>

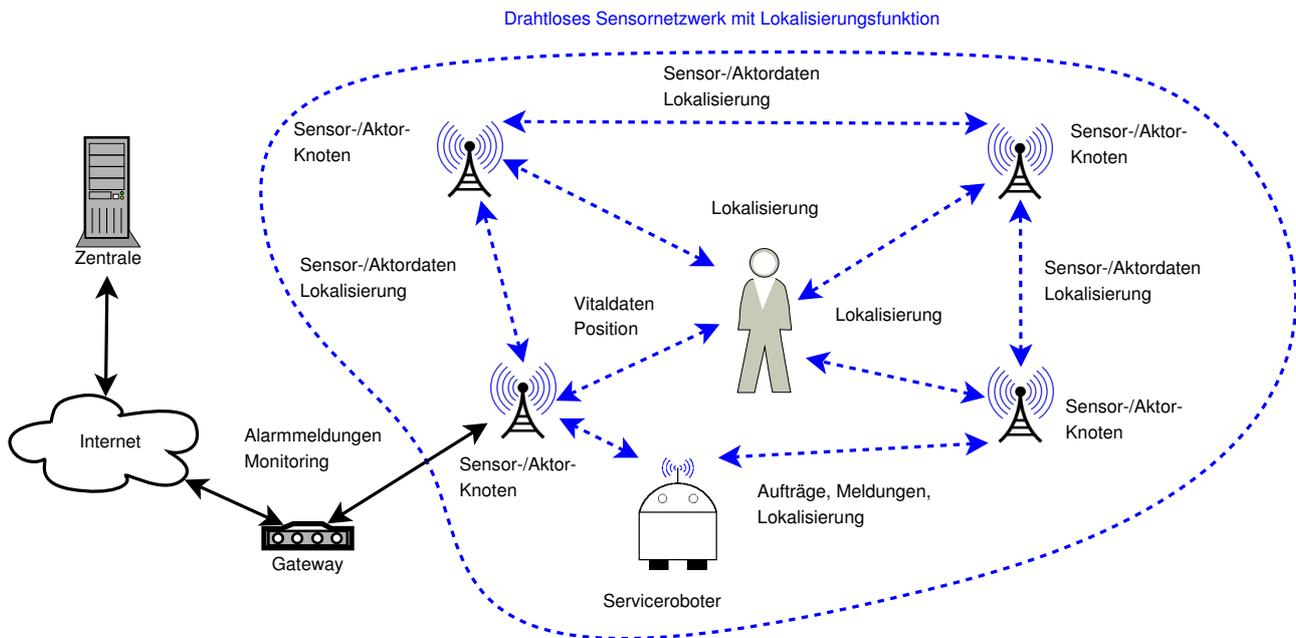


Bild 1: Intelligente Umgebung für Anwendungen im betreuten Wohnen

2 Einsatz von Sensornetzwerken mit Lokalisierungsfunktion im betreuten Wohnen

Für Anwendungen im betreuten Wohnen wird eine intelligente Umgebung durch ein drahtloses Sensornetzwerk mit Lokalisierungsfunktion realisiert. Die intelligente Umgebung ist gekennzeichnet durch eine Anzahl von Sensoren und Aktoren, welche über drahtlose Sensorknoten vernetzt sind. Jeder Knoten des drahtlosen Sensornetzwerkes ist Bestandteil der intelligenten Infrastruktur. **Bild 1** zeigt die intelligente Umgebung für das betreute Wohnen. Die intelligente Umgebung besteht aus einem drahtlosen Sensornetzwerk, welches aus stationären und mobilen Knoten besteht. Die stationären Knoten sind fest positioniert und dienen zur Erfassung von Sensordaten und zur Interaktion mit der Umgebung durch ihre Aktoren. Die betreute Person selbst ist über einen mobilen Sensorknoten in das drahtlose Sensornetzwerk integriert. Über das Sensornetzwerk können dabei die Position des Bewohners sowie seine Vitaldaten abgefragt werden. Das Sensornetzwerk ist über ein Gateway mit dem Internet verbunden, so dass darüber Telemonitoring von Wohnung und Bewohnern durchgeführt werden kann. Die intelligente Umgebung bietet auch die Möglichkeit, Serviceroboter zu integrieren. Als preiswerte Unterstützung im Haushalt kann ein Staubsaugroboter in das drahtlose Sensornetzwerk eingebunden werden. Der Staubsaugroboter kann selbst mit Sensorik ausgestattet werden, um als mobiler Sensorknoten Überwachungsaufgaben zu übernehmen.

Um eine gute Nachrüstbarkeit zu gewährleisten, wird ein modulares Konzept für die Integration der Sensorknoten gewählt. Das Sensornetzwerk soll je nach Bedarf von einem Pflegedienstleister oder aber auch von den Angehörigen der Endbenutzern installiert werden können. Stationäre Sensorknoten können sowohl über das Stromnetz betrieben werden

und können dann auch komplexere Aufgaben, wie Routing-Funktionen übernehmen oder sie werden batteriebetrieben und z. B. in Rauchmelder integriert. Durch die Distanzmessung zwischen den Sensorknoten ist eine Lokalisierung und damit eine automatische Inbetriebnahme der Knoten realisierbar. Dadurch wird das Nachrüsten von vorhandenen Wohnungen ohne hohen Installations- und Inbetriebnahmeaufwand vergleichsweise kostengünstig ermöglicht. Eine einfache Möglichkeit der Nachrüstung von netzbetriebenen Knoten ist durch die Installation als Zwischenstecker in Steckdosen gegeben, wobei die angeschlossenen Verbraucher darüber auch überwacht und geschaltet werden können. Über batteriebetriebene Funk-Rauchmelder ist ebenso eine leichte Nachrüstung zu realisieren. Batteriebetriebene Geräte werden um Strom zu sparen, die meiste Zeit in den Schlafzustand versetzt. Mittels Zeitgeber wird der Knoten zyklisch geweckt, so dass in regelmäßigen Zeitabständen Sensordaten erfasst und an die netzbetriebenen Knoten gesendet werden können. Die Batterielebensdauer kann somit auf mehrere Jahre verlängert werden. Die Sensordaten werden dann über netzbetriebene Knoten zum Gateway geroutet und dort akkumuliert. Im Alarmfall werden diese über das Internet an eine Alarmstelle gesendet.

2.1 Szenarien und Funktionalitäten

Um die Anforderung an ein längeres selbstbestimmtes Leben im gewohnten Umfeld zu ermöglichen, müssen eine Reihe von Funktionalitäten erfüllt werden. Dabei müssen verschiedene Anforderungen, Wünsche, Voraussetzungen und finanziellen Möglichkeiten berücksichtigt werden. So sollten Lösungen für unterschiedliche Zielgruppen in unterschiedlichen Lebensphasen erbracht werden, die auch einen sanfter Übergang ermöglichen. So kann ein Einstieg über Komfortfunktionen für nicht pflegebedürftige Menschen erreicht werden. Es können aber auch Lösungen einer um-

fassenden Pflegeversorgung bis hin zur telemedizinischen Betreuung realisiert werden.

Durch die Lokalisierungsfunktion des Sensornetzwerkes können eine Reihe von bisher nicht realisierbaren Funktionen ermöglicht werden. Verhaltensmuster der Bewohnen können durch die Lokalisierung im Zusammenhang mit Sensorik an Schranktüren und Fenstern leichter und präziser bestimmt werden. Abweichungen davon können frühzeitig erkannt werden. Nimmt eine erkrankte Person beispielsweise bestimmte alltägliche Verrichtungen wie Zähneputzen oder Waschen nicht mehr selbständig vor, kann dies auf eine verschlechterte Demenz oder eine Depression hindeuten. Auch ein ständiges Wiederholen von den gleichen Handlungen kann ein Hinweis auf eine Verschlechterung von psychischen Erkrankungen sein.

Erkennung von Gefahrensituationen – Die Sensoren spielen in Hinsicht auf die persönliche oder das Umfeld betreffende Sicherheit eine Rolle. Durch Vernetzung und Fusion können Sensoren spezifische Notfallmaßnahmen schnell und automatisiert auslösen. Durch Rauchmelder kann einen Brand erkannt werden und sofort ein Alarm ausgelöst werden. Ein vergessenes Bügeleisen kann dadurch erkannt werden, dass der Benutzer den Raum für längere Zeit verlassen hat. Das Bügeleisen kann dann abgeschaltet werden. Ähnlich wie beim Bügeleisen kann auch ein vergessener Topf auf dem Herd dadurch erkannt werden, dass der Bewohner längere Zeit nicht in der Küche ist. Durch einen Rauchmelder in der Küche ist weiterhin sofort eine Gefahr durch verbranntes Essen erkennbar. In beiden Fällen kann der Strom des Herdes abgeschaltet werden. Bodenfeuchtigkeit z. B. das Überlaufen einer vergessenen, gerade einlaufenden Badewanne kann erkannt und die Wasserzufuhr dann abgeschaltet werden. Verlässt ein Bewohner die Wohnung und sind gefährliche Verbraucher eingeschaltet oder ein Wasserzufluss wird erkannt, kann die Gefahrensituation durch Abschalten von Strom bzw. Wasser gelöst werden. Der von den Bewohnern getragene Sensorknoten kann auch mit Beschleunigungssensoren ausgestattet werden, so dass Stürze erkannt und alarmiert werden können.

Telemonitoring, Telemedizin – Aus medizinischer Sicht kann es sinnvoll sein, den betreuten Menschen mit Sensorik auszustatten, um Vitaldaten zu erfassen. Diese Vitaldaten können z. B. Blutdruck, Puls, Schweißsekretion und Atemfrequenz sein. Über das Monitoring dieser Sensordaten können bestimmte Krankheitsprogressionen schneller erkannt werden. Im einfachsten Fall können Patienten mit einer Uhr mit Sensorknoten ausgestattet werden, die den Puls misst und überträgt sowie den Patienten in der Wohnung lokalisiert. Eine etwas weitergehende Sensorik ist ein Brustgurt, der ein 1-Kanal EKG aufnimmt. Durch das 1-Kanal EKG können Herzrhythmusstörungen erkannt und eine Alarmmeldung ausgelöst werden. Mehrkanalige EKGs bieten weitere Diagnosemöglichkeiten, verringern jedoch den Tragekomfort. Durch die Aufzeichnung und Übertragung der EKGs kann eine telemedizinische Diagnose durchgeführt werden.

Komfortfunktionen – Durch Fensterkontakte und Erkennung des Verhaltens der Bewohner kann die Heizungssteuerung

optimal an das Wohnverhalten angepasst werden. Die Nachtabsenkung kann an die Schlafphasen der Bewohner adaptiert werden. Serviceroboter (im einfachsten Fall Staubsaugroboter) können Hilfestellung bei der Reinigung der Wohnung geben. Weiterhin können diese zur Inspektion von Räumen bei Gefahrensituationen und Alarmen verwendet werden.

2.2 Sensordatenerfassung und Aktorik

Um die vorher beschriebenen Funktionalitäten abzudecken, müssen nachstehende Sensordaten mit den drahtlosen Sensorknoten erfasst werden:

- Licht
- Temperatur
- Rauch
- Luft-/Bodenfeuchtigkeit
- Wasserdurchfluss
- Verbraucher ein/ausgeschaltet (Stromsensor)
- Fenster-/Türöffnung (Magnetkontakt)
- Geräusche/Lautstärke
- Bettanwesenheit

Um mit der Umgebung zu interagieren, sind die drahtlosen Sensorknoten zusätzlich über Aktoren zur Steuerung der Haustechnik verbunden. Diese Aktoren können beispielsweise sein:

- Licht ein-/ausschalten
- Jalousie herauf-/herunterfahren
- Fenster, Tür öffnen/schließen
- Heizung ein-/ausschalten, Raumtemperatur regeln

3 Funklokalisierung mit nanoLOC

Nanotron Technologies vertreibt das nanoLOC-System, welches eine drahtlose Kommunikation und Echtzeit-Lokalisierung ermöglicht. Das dabei verwendete Ranging-Verfahren „Symmetrical Double-Sided Two Way Ranging“ (SDS-TWR) gestattet eine funkbasierte Abstandsmessung anhand der Signallaufzeiten und bietet die Grundlage für eine metergenaue Positionsbestimmung eines mobilen Objektes. Die drahtlose Kommunikation sowie das Ranging-Verfahren sind in einem einzigen Chip, dem Transceiver nanoLOC TRX, integriert. Dieses Hochfrequenz-Funkmodul arbeitet in dem weltweit verfügbaren ISM-Band von 2,4 GHz. Die drahtlose Kommunikation basiert auf der von Nanotron patentierten Chirp-Modulationstechnik Chirp Spread Spectrum (CSS). (vgl. [4])

Der Vorteil von SDS-TWR liegt darin, dass keine zeitliche Synchronisierung zwischen den Knoten erforderlich ist und

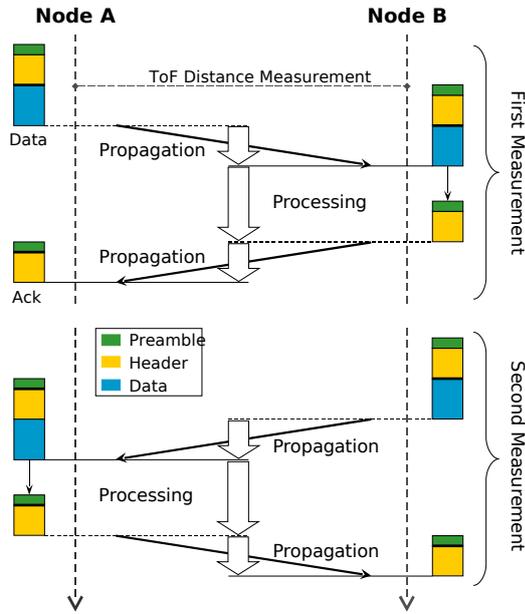


Bild 2: Symmetrical Double-Sided Two Way Ranging [4]

dadurch bekannte Probleme anderer zeitbasierter Lokalisierungsverfahren behoben werden. Das Verfahren basiert auf RTof, wobei dieses symmetrisch und doppelseitig ausgeführt wird. Der genaue Ablauf wird in der **Bild 2** dargestellt. Bei SDS-TWR wird die Signalübertragungszeit in zwei Richtungen gemessen (Two-Way Ranging). Dabei entstehen zwei Zeitspannen: Die Signallaufzeit (Signal Propagation Delay), die benötigt wird, um ein Frame von Knoten A zu B zu übermitteln und eine Bestätigung zurückzusenden, wird von Knoten A gemessen. Die Zeit um das eintreffende Datenpaket zu verarbeiten, die Bestätigung zu generieren und um das Versenden vorzubereiten, wird als Verzögerungszeit (Processing Delay) bezeichnet und von Knoten B gemessen. Die Differenz der beiden Zeitangaben (Signallaufzeit - Verzögerungszeit) beschreibt somit die zweifache Signalübertragungszeit. Zudem wird eine doppelseitige Messung (Symmetrical Double-Sided) durchgeführt, um den Fehler der Uhrenabweichungen (Clock Drift) zu beseitigen. Dazu wird das gleiche Verfahren in umgekehrter Laufrichtung durchgeführt, also von Knoten B zu A und zurück zu B. (vgl. [5])

Die Berechnung der Signallaufzeit t_d ergibt sich wie folgt

$$t_d = \frac{(T_1 - T_2) + (T_3 - T_4)}{4}, \quad (1)$$

wobei T_1 und T_4 von Knoten A gemessen werden und T_2 und T_3 von Knoten B gemessen werden. Über die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Funksignals (Lichtgeschwindigkeit) kann damit die Distanz zwischen den beiden Knoten berechnet werden.

3.1 Positionsbestimmung mittels Trilateration

Sind die Distanzen zu mindestens drei ortsfesten Knoten bestimmt, kann mit der Trilateration eine Position im zweidimensionalen Raum berechnet werden. Im Gegensatz zur

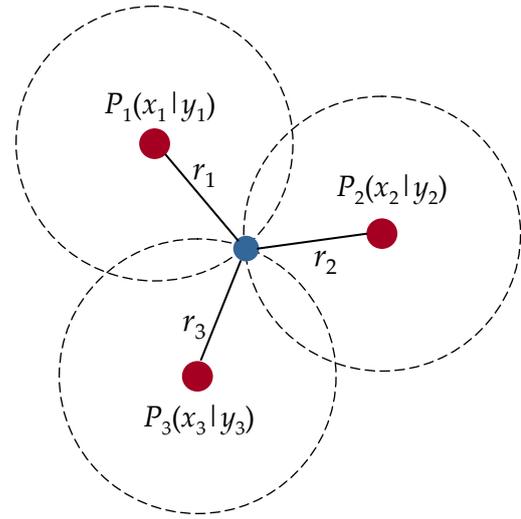


Bild 3: Trilateration mit drei ortsfesten Sensorknoten

Triangulation werden bei der Trilateration nur die Entfernungen zu den ortsfesten Knoten benötigt, dadurch ist dieses Verfahren deutlich leichter zu implementieren, da die Anforderungen an eine Hardware zur Distanzmessung deutlich geringer als die für die Bestimmung des Einfallswinkels eines empfangenen Signals sind.

Bild 3 zeigt die Trilateration mit drei nicht kollinearen Positionen der ortsfesten Knoten und den Entfernungen zu diesen. Für die gemessenen Distanzen zu den ortsfesten Knoten gilt:

$$r_i = \sqrt{(p_x - x_i)^2 + (p_y - y_i)^2}, \quad i \in \{1, 2, 3\}. \quad (2)$$

Die Position des mobilen Knotens p_x, p_y lässt sich damit aus den gemessenen Distanzen r_i und den bekannten Positionen der drei ortsfesten Knoten (x_i, y_i) mit Gleichungssystem (3) berechnen.

$$\begin{pmatrix} p_x \\ p_y \end{pmatrix} = \mathbf{H}^{-1} \cdot \mathbf{z} \quad \text{mit} \quad \mathbf{H} = \begin{pmatrix} 2 \cdot x_1 - 2 \cdot x_2 & 2 \cdot y_1 - 2 \cdot y_2 \\ 2 \cdot x_1 - 2 \cdot x_3 & 2 \cdot y_1 - 2 \cdot y_3 \end{pmatrix}$$

$$\text{und} \quad \mathbf{z} = \begin{pmatrix} r_2^2 - r_1^2 + x_1^2 - x_2^2 + y_1^2 - y_2^2 \\ r_3^2 - r_1^2 + x_1^2 - x_3^2 + y_1^2 - y_3^2 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Werden Distanzen zu mehr als drei Ankerknoten gemessen, so kann Gleichungssystem (3) entsprechend erweitert und mit dem Verfahren der kleinsten Fehlerquadrate gelöst werden.

3.2 Positionsbestimmung unter Verwendung von Filteralgorithmen

Neben der direkten Berechnung der Position aus drei Distanzmessungen mit Gleichung (3), können auch Filteralgorithmen zur Positionsbestimmung genutzt werden. Der Vorteil beim Einsatz von Filteralgorithmen liegt in der Berücksichtigung von Messfehlern und Bewegungsmodellen. Ein häufig für die Positionsbestimmung eingesetzter Algorithmus ist das Kalman-Filter. Das Kalman-Filter beschreibt

ein rekursives Verfahren, um den Zustand eines dynamischen Systems aufgrund von verrauschten Messungen zu schätzen, mit dem Ziel, den mittleren quadratischen Fehler der Schätzung zu minimieren. Die Grundform des Filters, das Diskrete Kalman-Filter (DKF), schätzt den internen Systemzustand in dem Fall, dass der gesamte Prozess durch lineare Gleichungen dargestellt wird. In dem Fall, dass Prozesszustände geschätzt werden sollen, die durch ein zeitdiskretes, nichtlineares System beschrieben werden, kommt das Erweiterte Kalman-Filter (EKF) zum Einsatz. Da die Distanzmessungen nichtlinear von der zu schätzenden Position abhängen, wird zur Positionsbestimmung ein EKF eingesetzt. Für die Beschreibung der Algorithmen beider Kalman-Filter-Varianten wird auf [6] verwiesen. Das Kalman-Filter setzt normalverteilte Messfehler voraus. Bei der Funklokalisierung treten Messfehler durch Mehrwegeausbreitung und „Non-Line-of-Sight“ auf, die nicht der Normalverteilung entsprechen. In diesem Fall müssen die Messfehler entweder vorverarbeitet werden [7] oder es wird ein Monte Carlo Partikelfilter eingesetzt, bei dem angepasste Sensor- und Bewegungsmodelle Anwendung finden [8].

4 Zusammenfassung

Drahtlose Sensornetzwerke werden für Anwendungen wie Umweltmonitoring, Detektieren von Bränden in Gebäuden, aber auch im AAL eingesetzt. In AAL-Anwendungen werden drahtlose Sensornetzwerke zur Erfassung von Sensordaten der Umgebung genutzt. Im Vergleich zu drahtgebundenen Sensornetzwerken können diese leichter in Gebäuden nachgerüstet werden. Zudem besteht die Möglichkeit durch das Einbinden von Body Area Networks Vitaldaten von Patienten zu erfassen und damit Telemonitoring zu ermöglichen. Durch Anbindung an ein Gateway können die Daten über das Internet oder ein Mobilfunknetz abgerufen bzw. im Alarmfall direkt versendet werden.

Für eine Reihe von AAL-Anwendungsszenarien ist die Kenntnis des Ortes der Sensoren oder der mittels Telemonitoring erfassten Menschen von Bedeutung. Die weit verbreitete Satellitenortung GPS ist für Sensornetzwerke ungeeignet, da der Stromverbrauch und der technische Aufwand dafür zu hoch ist und zudem GPS für Anwendungen in Gebäuden nicht eingesetzt werden kann. Das nanoLOC-System bietet durch funkbasierte Distanzmessungen die Möglichkeit, Sensorknoten zu orten. Es wurde ein drahtloses Sensornetzwerk vorgestellt, was durch seine Lokalisierungsfunktion neue Möglichkeiten für Anwendungen im betreuten Wohnen bietet. So können z. B. die Bewohner lokalisiert werden, um über das Verhalten Komfortfunktionen zu steuern oder bei Verhaltensänderungen ggf. Alarmer auszulösen.

5 Literatur

- [1] RÖHRIG, C.: Lokalisierungsverfahren für drahtlose Sensornetzwerke. In: SIECK, J. (Hrsg.) ; HERZOG M.H. (Hrsg.): *Wireless Communication and Information – Radio Engineering and Multimedia Applications*. Boizenburg, Deutschland : Verlag Werner Hülsbusch, 2009, S. 81–97
- [2] SAHINOGLU, Z. ; GEZICI, S.: Ranging in the IEEE 802.15.4a Standard. In: *Proceedings of the IEEE Annual Wireless and Microwave Technology Conference, WAMICON '06*. Clearwater, Florida, USA, Dezember 2006, S. 1–5
- [3] SCHLICHTING, F.: nanoLOC TRX: Präzise Abstandsbestimmung und Lokalisierung mittels Laufzeitmessung (RTOF) durch Einsatz der 2,4 GHz Chirp Spreiztechnologie (CSS). In: *Tagungsband Wireless Automation: Funkgestützte Kommunikation in der industriellen Automatisierungstechnik*, VDI Verlag GmbH, Februar 2008 (VDI-Berichte 2010), S. 61–70
- [4] NANOTRON TECHNOLOGIES GMBH: nanoLOC TRX Transceiver (NA5TR1). Berlin, Germany, April 2008 (NA-06-0230-0388-2.00). – Datasheet
- [5] NANOTRON TECHNOLOGIES GMBH: Real Time Location Systems (RTLS). Berlin, Germany, April 2007 (NA-06-0248-0391-1.02). – White paper
- [6] SPIEKER, S.: *Lokalisation in der Lagerverwaltung – Nutzenpotentiale drahtloser Sensornetzwerke zur Positionsbestimmung sowie Genauigkeitsoptimierung mit dem Kalman-Filter*. Saarbrücken : Verlag Dr. Müller, 2008
- [7] RÖHRIG, C. ; MÜLLER, M.: Indoor Location Tracking in Non-line-of-Sight Environments Using a IEEE 802.15.4a Wireless Network. In: *Proceedings of the 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2009)*. St. Lous, USA, Oktober 2009, 552-557
- [8] RÖHRIG, C. ; BÜCHTER, H. ; KIRSCH, C.: Monte Carlo Lokalisierung Fahrerloser Transportfahrzeuge mit drahtlosen Sensornetzwerken. In: *Tagungsband 21. Fachgespräch Autonome Mobile Systeme*. Karlsruhe, Deutschland, Dezember 2009