

Lokalisierungsverfahren für drahtlose Sensornetzwerke

Christof Röhrig

Fachbereich Informatik, Fachhochschule Dortmund,
Emil-Figge-Str. 42, 44227 Dortmund

Zusammenfassung

Ein drahtloses Sensornetzwerk ist ein Funknetz aus Kleinstrechnern zur Messdatenerfassung, das aus vielen kleinen, dicht verteilten Sensorknoten besteht. Die Einsatzgebiete reichen dabei vom Umweltmonitoring, über das Detektieren von Bränden in Gebäuden, bis hin zum Einsatz in der Logistik. Für eine Reihe von Anwendungsszenarien ist die Kenntnis des Ortes einzelner Sensorknoten von Bedeutung. Im Beitrag werden die Grundlagen der Positionsbestimmung in drahtlosen Netzwerken erläutert. Dabei werden Verfahren wie Trilateration und Triangulation sowie Fingerprinting vorgestellt. Den Schwerpunkt des Beitrags bilden die Ergebnisse eigener Untersuchungen, die mit dem nanoLOC-System der Firma Nanotron Technologies GmbH durchgeführt wurden. Abschließend werden experimentelle Ergebnisse präsentiert, die zeigen, dass mit dem nanoLOC-System eine Positionsbestimmung mit einem Fehler kleiner als 0,5 m erreichbar ist.

1 Einführung

Ein drahtloses Sensornetzwerk ist ein Funknetz aus Kleinstrechnern, das aus vielen kleinen, dicht verteilten Sensorknoten besteht. Beispielhafte Einsatzgebiete sind neben dem Umweltmonitoring, die Robotik [GABB08] und die Logistik [Sch08], [RS08]. Für eine Reihe von Anwendungsszenarien ist die Kenntnis des Ortes einzelner Sensorknoten von Bedeutung. Die weit verbreitete Satellitenortung per Global Positioning System (GPS) ist allerdings 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. In drahtlosen Sensornetzwerken werden deshalb verschiedene Funklokalisierungsverfahren verwendet. Diese Verfahren basieren auf Daten, die durch die Übertragung mittels Funktechnologie gewonnen werden. Zum Einsatz kommen hierbei Verbindungsinformationen (Cell-ID, Cell of Origin), Winkelinformationen (Angle of Arrival), Laufzeitinformationen (Time of Arrival, Time Difference of Arrival) und empfangene Signalstärke (Received Signal Strength).

2 Funklokalisierung

Die genaue Ortsbestimmung in drahtlosen Sensornetzwerken gewinnt eine zunehmende Bedeutung. In den letzten Jahren wurden eine Reihe von Verfahren und Produkten zur Lokalisierung in drahtlosen Sensornetzwerken entwickelt. Aufbauend auf dem Funkstandard IEEE 802.15.4 wurden als neue Physical Layer Ultra Wide Band (UWB) und Chirp Spread Spectrum (CSS) in IEEE 802.15.4a definiert, um eine Entfernungsbestimmung zu anderen Knoten besser 1 m zu ermöglichen [SG06]. CSS wird von der Firma Nanotron Technologies¹ im nanoLOC-System zur Distanzmessung und Kommunikation eingesetzt. Im Folgenden werden zuerst die Grundlagen der Funklokalisierung erläutert, um darauf aufbauend das nanoLOC-System zu beschreiben und eigene experimentelle Ergebnisse vorzustellen.

2.1 Lokalisierungsverfahren

Für die Bestimmung der Position mittels Funktechnologien existieren unterschiedliche Verfahren. Diese Verfahren können nach den Informationen, die sie für die Positionsbestimmung verwenden, eingeteilt werden:

- Verbindungsinformationen (CoO)
- Empfangswinkel der Signale (AoA)
- Empfangszeitpunkte der Signale (ToA)
- Bidirektionale Umlaufzeit des Signals (RToF)
- Zeitdifferenzen der eingehenden Signale (TDoA)
- Signalstärken der eingehenden Signale (RSSI)

Die nachstehende Abb. 1 ordnet die Messverfahren anhand der gewonnenen Informationen. Neben der Bestimmung von Distanz, Winkel und Nachbarschaft können die ermittelten Informationen auch mit einer vorher bestimmten Radio-Map verglichen werden. Dieses Verfahren wird auch Fingerprinting genannt.

Verbindungsinformationen sind fast in jedem drahtlosen Funknetz vorhanden. Die Genauigkeit hängt bei diesem Verfahren mit der Granularität und Größe der Zellen im verwendeten Funknetz zusammen. Bei diesem, auch „Cell of Origin“ (CoO) genannten, Verfahren wird die Position anhand der mit dem mobilen Knoten assoziierten ortsfestem Knoten bestimmt. Jedem ortsfesten Knoten und damit auch der Zelle ist eine eindeutige Identifizierung (Cell-ID) zugeordnet. Die Positionen der ortsfesten Knoten müssen bekannt sein.

Das AoA-Verfahren (Angle of Arrival) verwendet die Einfallswinkel der empfangenen Signale. Dabei werden mindestens zwei ortsfeste Knoten mit Richtantennen benötigt. Mit den empfangenen Signalen von einem mobilen Knoten kann der Einfallswinkel des Signals bestimmt

¹<http://www.nanotron.de>

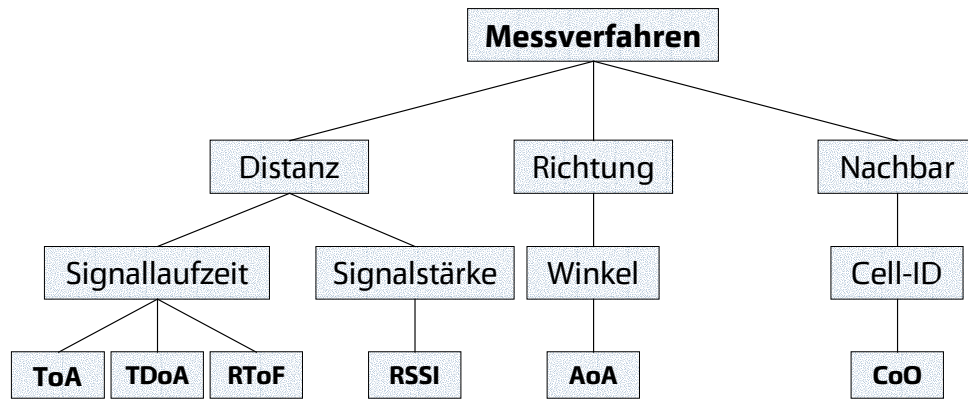


Abb. 1: Techniken zur Funklokalisierung

werden. Die Berechnung der Distanz zu den bekannten Positionen der ortsfesten Stationen erfolgt mittels Triangulation. Dabei werden die Winkelbeziehungen innerhalb eines Dreiecks ausgenutzt. Abb. 2 zeigt ein Dreieck mit der unbekannt Position des mobilen Knotens (C) und den bekannten Positionen der ortsfesten Knoten (A, B). Über die bekannte Distanz zwischen den ortsfesten Knoten und den beiden gemessenen Einfallswinkeln kann die Position des mobilen Knotens berechnet werden.

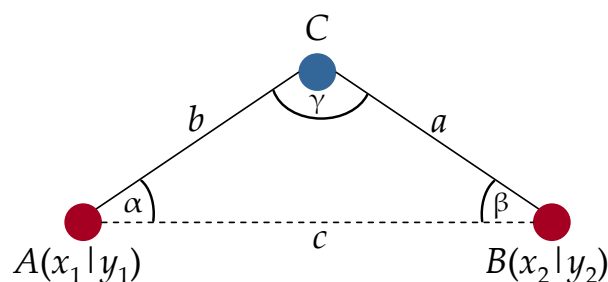


Abb. 2: Triangulation

Die Techniken „Time of Arrival“ (ToA), „Time Difference of Arrival“ (TDoA) und „Round-trip Time of Flight“ (RToF) bestimmen die Distanz zwischen zwei Knoten durch Signallaufzeitmessung (siehe Abb. 3). Aus den Distanzen zu mindestens drei ortsfesten Knoten kann mittels Trilateration die Position eines mobilen Knotens bestimmt werden.

Das ToA-Verfahren bestimmt anhand der Signallaufzeit eines Signals die Distanz zwischen zwei Knoten (siehe Abb. 3(a)). Im gesendeten Frame ist die Sendezeit t_0 mit enthalten, so dass im Empfänger der Abstand d aus der Empfangszeit t_1 und der Signalausbreitungsgeschwindigkeit c (Lichtgeschwindigkeit) bestimmt werden kann. Voraussetzung für ToA ist eine hochgenaue Synchronisation der Uhren auf beiden Knoten, damit die Laufzeit exakt bestimmt werden kann. Da Sensorknoten in der Regel nicht über hochgenaue synchronisierte Uhren verfügen, wird dieses Verfahren in drahtlosen Sensornetzwerken nicht eingesetzt.

Als TDoA werden zwei unterschiedliche Verfahren bezeichnet. Bei dem einen TDoA-Verfahren sendet ein Knoten gleichzeitig zwei Signale mit unterschiedlicher Signalausbreitungsgeschwindigkeit aus (siehe Abb. 3(b)). Aus den unterschiedlichen Empfangszeitpunkten t_0 und t_1 kann

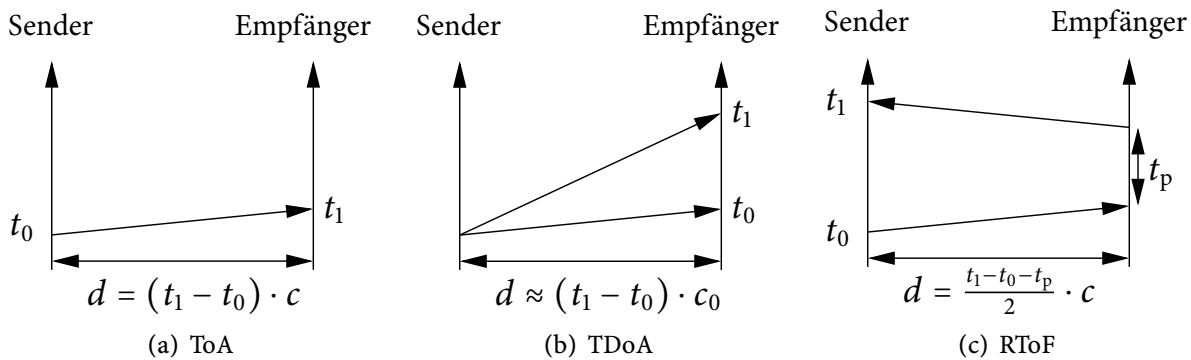


Abb. 3: Distanzmessung mittels Signallaufzeitmessung

im Empfänger die Distanz zum Sender bestimmt werden. Typischerweise wird neben einem Funksignal ein Ultraschallsignal verwendet. Da die Lichtgeschwindigkeit c wesentlich größer als die Schallgeschwindigkeit c_0 ist, kann die Laufzeit des Funksignals bei der Berechnung des Distanz d vernachlässigt werden. Dieses Verfahren wird in drahtlosen Sensornetzwerken beim Cricket Lokalisierungssystem, welches vom MIT entwickelt wurde und von Crossbow² vertrieben wird, eingesetzt [PMBT01]. Dem Vorteil der Vermeidung der Uhrensynchronisation steht der Nachteil eines höheren Hardware-Aufwandes in den Knoten gegenüber.

Bei dem anderen TDoA-Verfahren berechnen die ortsfesten Empfänger die Position eines mobilen Senders aus der Differenz der Empfangszeitpunkte des Signals. Dieses Verfahren wird im Mobilfunk auch als „Observed Time Difference of Arrival“ (OTDoA) bezeichnet. Der Vorteil gegenüber ToA liegt darin, dass keine Synchronisation zwischen den mobilen Knoten und den ortsfesten Knoten vorhanden sein muss. Somit wird keine hochpräzise Uhr in den mobilen Knoten benötigt. Das Ubisense System³, welches an der Cambridge Universität entwickelt wurde, verwendet diese Variante des TDoA zusammen mit AoA zur Lokalisierung von mobilen Knoten [Cad03].

Beim RToF-Verfahren wird die Umlaufzeit eines Signals gemessen (siehe Abb. 3(c)). Der Empfänger bestätigt den Empfang des Signals mit einem Acknowledgement-Frame, indem auch die Verarbeitungszeit im Empfänger t_p enthalten ist. Eine Synchronisation der Uhren der Knoten ist nicht notwendig, da keine absoluten Zeiten zwischen Sender und Empfänger benötigt werden. Für die Erzeugung des Acknowledgement-Frames wird im Empfänger im Vergleich zur Signallaufzeit eine relativ große Zeitspanne benötigt. Die führt zu einem Messfehler, falls die Uhren beider Knoten während der Messung auseinander laufen (Clock Drift). Dieser Fehler kann ausgeglichen werden wenn RToF von beiden Seiten aus initiiert wird (siehe Abschnitt 2.2). Das Symeo System⁴ verwendet RToF zusammen mit der Transpondertechnik zu Lokalisierung mobiler Knoten [FMV08].

Sind die Distanzen zu mindestens drei ortsfesten Knoten bestimmt, kann mit der Trilateration eine Position im zweidimensionalen Raum berechnet werden. Im Gegensatz zur Triangulation werden bei der Trilateration nur die Entfernungen zu den ortsfesten Knoten benötigt, da-

²<http://www.xbow.com>

³<http://www.ubisense.net>

⁴<http://www.symeo.com/>

durch 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. Abb. 4 zeigt die Trilateration mit drei nicht kollinearen Positionen der ortsfesten Stationen und den Entfernungen zu diesen.

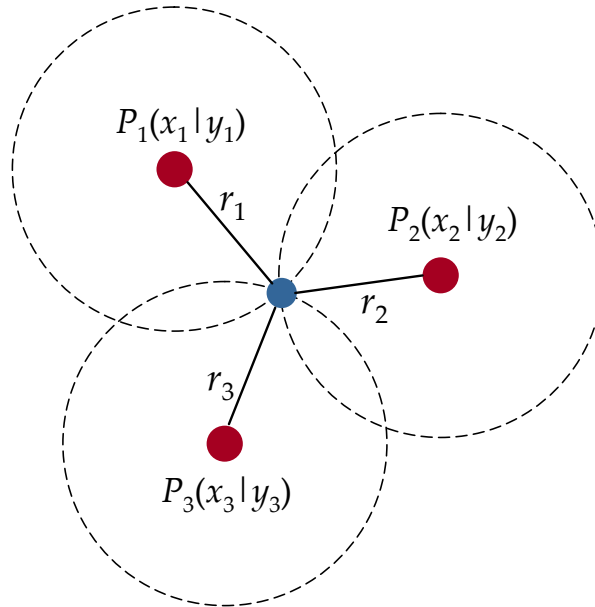


Abb. 4: Trilateration mit drei Sendestationen

Für die gemessenen Distanzen zu den ortsfesten Knoten gilt:

$$r_i = \sqrt{(p_x - x_i)^2 + (p_y - y_i)^2} \quad (1)$$

Die Position des mobilen Knotens p_x, p_y lässt sich damit aus den gemessenen Distanzen r_1, r_2, r_3 und den bekannten Positionen der drei ortsfesten Knoten mit Gleichungssystem (2) berechnen.

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

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

Verfahren die empfangene Signalstärken für die Positionsbestimmung verwenden, werden RSSI-Verfahren (Received Signal Strength Indicator) genannt. Die Distanz zu einem ortsfesten Knoten kann über das logarithmische Distanzverlustmodell berechnet werden. Dabei wird die Freiraumdämpfung berücksichtigt, die besagt, dass die Signalstärke mit der Distanz zum Sender quadratisch abnimmt. Über die Trilateration kann dann die Position des mobilen

Knotens im zweidimensionalen Raum berechnet werden. Der von Texas Instruments entwickelte ZigBee-Lokalisierungs-Baustein CC2431⁵ verwendet RSSI-basierte Distanzmessung zur Lokalisierung von mobilen Knoten.

Eigene Untersuchungen haben gezeigt, dass die Mehrwegeausbreitung der Funksignale innerhalb von Gebäuden die Anwendung des logarithmischen Distanzverlustmodells für eine genaue Positionsbestimmung ungeeignet macht [GRH⁺06]. Aus diesem Grunde verwenden RSSI-Verfahren zur Lokalisierung in Gebäuden meist Fingerprinting. Ein Fingerprinting-Verfahren verwendet eine Radio-Map, in der die Signalstärken mit einer Position abgespeichert werden. Das Verfahren ist in zwei Phasen unterteilt. In der Kalibrierungsphase werden die empfangenen Signalstärken an vorher definierten Positionen in der Radio-Map abgespeichert. In der Lokalisierungsphase, bewegt sich der mobile Knoten in der gleichen Umgebung, dabei werden die aktuell gemessenen Signalstärkewerte mit denen aus der Radio-Map verglichen. Metriken für den Vergleich der Signalstärkewerte sind der Euklidische Abstand, der Bayes-Algorithmus oder die Delaunay-Triangulation mit konstanten Signalstärkekennlinien. Der größte Nachteil dieser Verfahren ist der manuelle Aufwand die Radio-Map in der Kalibrierungsphase zu erstellen. Das Verfahren der Delaunay Triangulation mit Interpolation (Isolinienverfahren), ermöglicht Radio-Maps mit einer geringen Anzahl an Referenzpunkten und reduziert so den manuellen Aufwand in der Kalibrierungsphase [RK08].

2.2 Das nanoLOC System

Nanotron Technologies entwickelt und 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. [nan08])

Der Vorteil von SDS-TWR liegt darin, dass keine zeitliche Synchronisierung zwischen den Knoten erforderlich ist und 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 Abb. 5 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.

⁵<http://www.ti.com/corp/docs/landing/cc2431/>

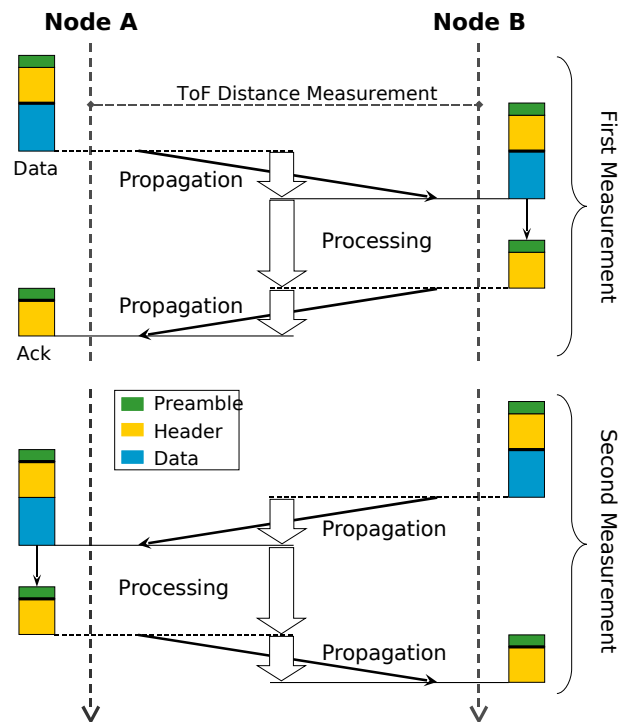


Abb. 5: Symmetrical Double-Sided Two Way Ranging [nan08]

Zudem wird eine doppelseitige Messung (Symmetrical Double-Sided) durchgeführt, um den Fehler der Uhrenabweichungen (Clock Drift) zu eliminieren. Dazu wird das gleiche Verfahren in umgekehrter Laufrichtung durchgeführt, also von Knoten B zu A und zurück zu B. (vgl. [nan07])

Zusammen mit dem Mikrocontroller ATmega128L und dem nanoLOC TRX bietet das Developmentkit ein einsatzfähiges Sensornetzwerk zur drahtlosen Distanzmessung und Lokalisation. Das Sensornetz besteht aus vier fest positionierten Ankerknoten, die als Referenzpunkte innerhalb eines zweidimensionalen Koordinatensystems fungieren, sowie aus einem zu lokalisierenden Tag (mobilen Knoten). In der Abb. 6 beschreibt $p(p_x, p_y)$ die Tagposition, $p(a_{x,i}, a_{y,i})$ die Ankerpositionen und r_i die Distanzen zwischen den Ankern und dem Tag.

Für die Positionsbestimmung stellt Nanotron zudem eine Auswertungssoftware sowie eine Basisstation, die die Schnittstelle zwischen dem Sensornetzwerk und dem Auswertungscomputer darstellt, zur Verfügung. Der Tag sendet die gemessenen Abstandswerte an die Basisstation, woraufhin die Software über einen nicht veröffentlichten Algorithmus die Position des Tags berechnet. Neben der Tagposition werden auch noch die Distanzmessungen des Tags zu den Ankern zur Verfügung gestellt, so dass eigene Algorithmen zusammen mit dem nanoLOC-Developmentkit eingesetzt werden können.

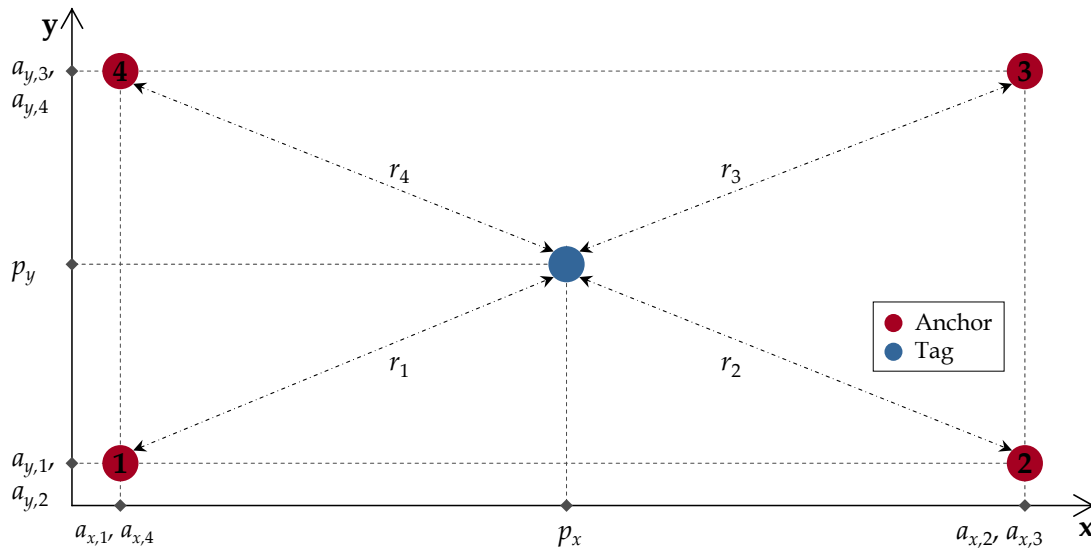


Abb. 6: Positionsbestimmung im nanoLOC-Developmentkit

3 Positionsbestimmung mit Distanzmessungen unter Verwendung des Erweiterten Kalman-Filters

Neben der direkten Berechnung der Position aus drei Distanzmessungen mit Gleichung (2), kann auch ein Erweitertes Kalman Filter zur Positionsbestimmung genutzt werden. 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. Für die Beschreibung der Algorithmen der beiden Filter-Varianten wird auf [Spi08] verwiesen. Da die Distanzmessungen nichtlinear von der zu schätzenden Position abhängen, wird zur Positionsbestimmung ein EKF eingesetzt.

3.1 EKF Entwurf

Mit dem EKF können die sich verändernden Positionen sowie die Geschwindigkeit eines mobilen Knotens (Tags) auf Basis der gemessenen Abstände zu den vier ortsfesten Knoten (Ankern) ermittelt werden (siehe Abb. 6). Basierend auf der Trilaterationsgleichung gilt folgende Berechnung für die Ankerdistanzen mit $i \in \{1, 2, 3, 4\}$:

$$r_i = \sqrt{(p_x - a_{x,i})^2 + (p_y - a_{y,i})^2} \quad (3)$$

Um die unbekannte Position des Tags zu ermitteln, werden die vier Gleichungen aus (3) nach p_x und p_y umgestellt und in die folgende Matrixdarstellung transformiert:

$$\mathbf{H} \cdot \begin{pmatrix} p_x \\ p_y \end{pmatrix} = \mathbf{z} \text{ mit } \mathbf{H} = \begin{pmatrix} 2 \cdot a_{x,1} - 2 \cdot a_{x,2} & 2 \cdot a_{y,1} - 2 \cdot a_{y,2} \\ 2 \cdot a_{x,1} - 2 \cdot a_{x,3} & 2 \cdot a_{y,1} - 2 \cdot a_{y,3} \\ 2 \cdot a_{x,1} - 2 \cdot a_{x,4} & 2 \cdot a_{y,1} - 2 \cdot a_{y,4} \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\text{und } \mathbf{z} = \begin{pmatrix} r_2^2 - r_1^2 + a_{x,1}^2 - a_{x,2}^2 + a_{y,1}^2 - a_{y,2}^2 \\ r_3^2 - r_1^2 + a_{x,1}^2 - a_{x,3}^2 + a_{y,1}^2 - a_{y,3}^2 \\ r_4^2 - r_1^2 + a_{x,1}^2 - a_{x,4}^2 + a_{y,1}^2 - a_{y,4}^2 \end{pmatrix}$$

Das Gleichungssystem ist überbestimmt und kann mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate gelöst werden:

$$\begin{pmatrix} \hat{p}_x \\ \hat{p}_y \end{pmatrix} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \cdot \mathbf{z} \quad (5)$$

Die Lösung des Gleichungssystems ist die ungefilterte Position, welche für die Initialisierung des Anfangszustandes des EKF genutzt werden kann. Beim EKF wirken nichtlineare Funktionen auf das System ein, durch die der interne Systemzustand \mathbf{x}_k und die Beobachtungen am System \mathbf{y}_k beschreiben werden:

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{x}}_{k+1} &= \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}_k, \mathbf{u}_k, \mathbf{w}_k) \\ \tilde{\mathbf{y}}_k &= \mathbf{h}(\tilde{\mathbf{x}}_k, \mathbf{v}_k). \end{aligned} \quad (6)$$

Der Zustandsvektor \mathbf{x}_k repräsentiert die zu schätzende Position des Tags und der Ausgangsvektor \mathbf{y}_k die gemessenen Abstände zu den vier Ankern. Für die Schätzung einer Bewegung enthält der interne Systemzustand \mathbf{x}_k neben den Positionen p_x und p_y zusätzlich die jeweilige Geschwindigkeit v und Beschleunigung a :

$$\mathbf{x}_k = (p_x \quad v_x \quad a_x \quad p_y \quad v_y \quad a_y)^T \quad (7)$$

Die Störgrößen \mathbf{w}_k und \mathbf{v}_k repräsentieren das Prozess- und Messrauschen mit gegebenen Kovarianzmatrizen \mathbf{Q}_k und \mathbf{R}_k . Die Messfunktion \mathbf{h} fungiert als Bindeglied zwischen \mathbf{x}_k und \mathbf{y}_k . Die Prozessfunktion \mathbf{f} setzt den vorherigen Systemzustand zum Zeitpunkt k mit dem zum Zeitpunkt $k + 1$ in Beziehung. Da das Bewegungsmodell mit Geschwindigkeit und Beschleunigung durch lineare Gleichungen beschrieben werden kann, kann die Prozessfunktion \mathbf{f} über ein lineares Gleichungssystem mit der Transitionsmatrix \mathbf{A} dargestellt werden:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x}_k + \mathbf{w}_k \text{ mit } \mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & T & T^2/2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & T & T^2/2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

Zur Bestimmung der Startposition $p_0(x_0, y_0)$ wird der anfängliche Systemzustand \mathbf{x}_0 über die Gleichung (4) ermittelt. Für die anschließende Schätzung der Tagpositionen, werden die Funktionswerte der nichtlinearen Funktion \mathbf{h} an die realen Tagpositionen $p(x_k, y_k)$ approximiert. Die Funktion \mathbf{h} beinhaltet dabei die Trilaterationsgleichungen aus (3) und berechnet den approximierten Systemausgang \mathbf{y}_k , mit dem die aktuelle Schätzung \mathbf{x}_k korrigiert wird.

$$\mathbf{y}_k \approx \tilde{\mathbf{y}}_k + \mathbf{C}_k \cdot (\mathbf{x}_k - \tilde{\mathbf{x}}_k) + \mathbf{V}_k \cdot \mathbf{v}_k$$

Die zugehörige Jacobi-Matrix \mathbf{C}_k beschreibt die partiellen Ableitungen der Funktion $\mathbf{y}_k = \mathbf{h}(\mathbf{x}_k)$ nach den Elementen von \mathbf{x}_k :

$$\begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \\ r_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{(p_x - a_{x,1})^2 + (p_y - a_{y,1})^2} \\ \sqrt{(p_x - a_{x,2})^2 + (p_y - a_{y,2})^2} \\ \sqrt{(p_x - a_{x,3})^2 + (p_y - a_{y,3})^2} \\ \sqrt{(p_x - a_{x,4})^2 + (p_y - a_{y,4})^2} \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$\mathbf{C}_k = \begin{pmatrix} \frac{\partial r_1}{\partial p_x} & 0 & 0 & \frac{\partial r_1}{\partial p_y} & 0 & 0 \\ \frac{\partial r_2}{\partial p_x} & 0 & 0 & \frac{\partial r_2}{\partial p_y} & 0 & 0 \\ \frac{\partial r_3}{\partial p_x} & 0 & 0 & \frac{\partial r_3}{\partial p_y} & 0 & 0 \\ \frac{\partial r_4}{\partial p_x} & 0 & 0 & \frac{\partial r_4}{\partial p_y} & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \text{mit} \quad \begin{aligned} \frac{\partial r_i}{\partial p_x} &= \frac{p_x - a_{x,i}}{\sqrt{(p_x - a_{x,i})^2 + (p_y - a_{y,i})^2}} \\ \frac{\partial r_i}{\partial p_y} &= \frac{p_y - a_{y,i}}{\sqrt{(p_x - a_{x,i})^2 + (p_y - a_{y,i})^2}} \end{aligned} \quad (10)$$

Mit den gemessenen Ankerabständen als Eingabeparameter in das Filter können die sich kontinuierlich ändernden Tagpositionen erfasst werden und in Verbindung mit den Geschwindigkeitsangaben als Trajektorie dargestellt werden. Der gesamte EKF-Algorithmus ist in der Abb. 7 dargestellt. Für jede Position wird zuerst ein Systemzustand vorhergesagt, der anschließend anhand der bekannten Fehlerkovarianzen sowie der Messwerte korrigiert wird.

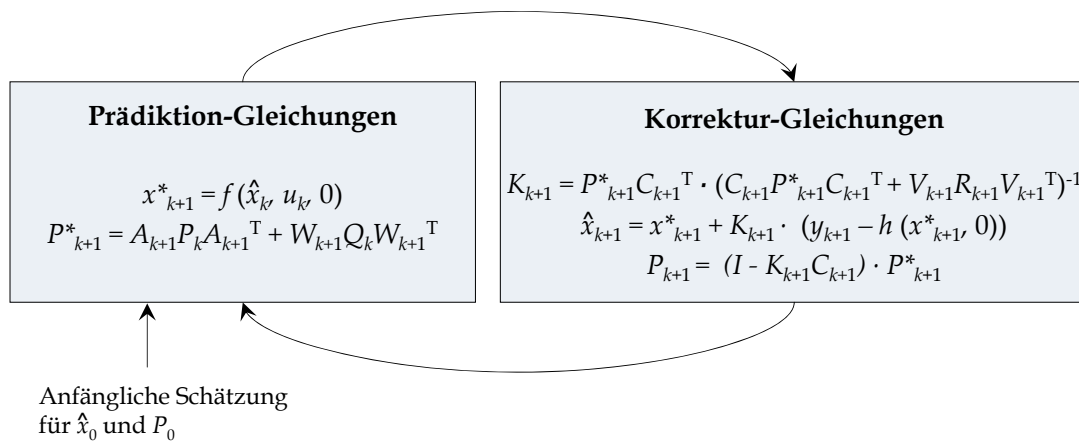


Abb. 7: Zyklus des Erweiterten Kalman-Filters [Spi08]

3.2 Experimentelle Ergebnisse

Die oben beschriebene Lokalisierung wurde mit einem Fahrerlosen Transportfahrzeug (FTF) und einem nanoLOC Sensornetzwerk getestet. Dabei wurden die Ankerknoten entlang der Fahrbahn des FTFs so installiert, dass die Fahrspur komplett eingeschlossen ist. Um eine

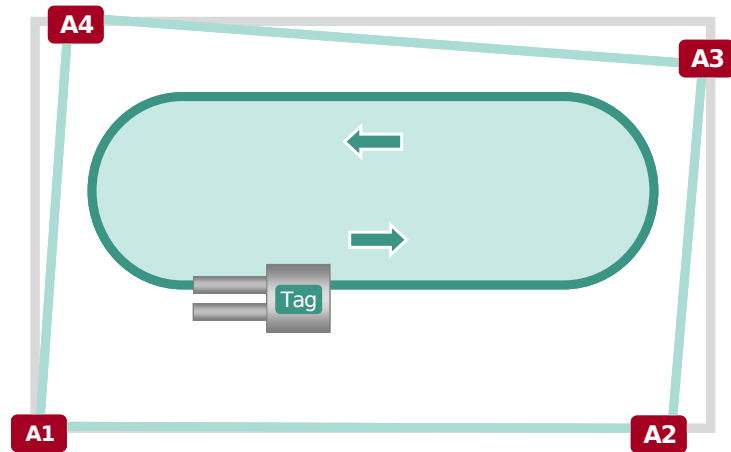


Abb. 8: Fahrkurs des FTF

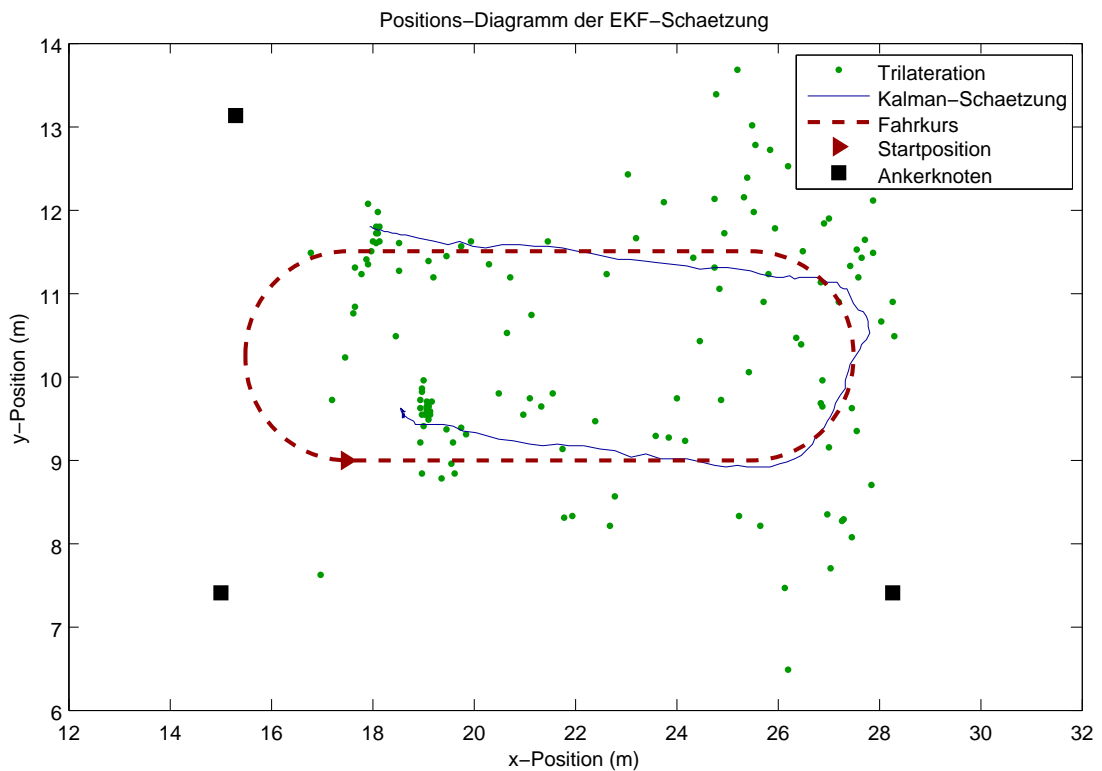


Abb. 9: Lokalisierungsergebnisse

robuste Kommunikation zu ermöglichen, besteht Sichtkontakt zwischen allen Hardwarekomponenten (Line-of-sight) und die Antennen sind in dieselbe Richtung ausgerichtet.

In dem Versuchsszenarium fährt das FTF ein U auf einer ovalen Kreisbahn ab. Die gestrichelte Linie in der Abb. 9 stellt den Verlauf der U-förmig gefahrenen Strecke dar. Die durchgezogene Linie stellt die EKF-Schätzung, die einzelnen Punkte die Trilaterationsberechnung dar. Das Kalman-Filter reduziert das Rauschen deutlich, der Schätzfehler ist auf dem gesamten Kurs kleiner als 0,5 m.

4 Zusammenfassung

Drahtlose Sensornetzwerke werden für Anwendungen wie Umweltmonitoring und Logistik eingesetzt. Für eine Reihe von Anwendungsszenarien ist die Kenntnis des Ortes einzelner Sensorknoten 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. In drahtlosen Sensornetzwerken werden deshalb verschiedene Funklokalisierungsverfahren verwendet. Es existiert eine Reihe von Produkten unterschiedlicher Hersteller, die verschiedene Funklokalisierungsverfahren einsetzen. Es hängt von den Anforderungen der Applikation ab, welche Produkte einsetzbar sind. Es wurde exemplarisch das nanoLOC-System von Nanotron Technologies beschrieben und es wurden eigene Untersuchungen damit vorgestellt. Für die Positionsbestimmung von Transportfahrzeugen in einem Lager wurde ein Erweitertes Kalman-Filter (EKF) verwendet, das aus den Abstandsdaten zu festen Ankerknoten mittels Trilateration die Position und Geschwindigkeit des bewegten Sensorknotens an einem Transportfahrzeug ermittelt. Das EKF erhöht die Genauigkeit der Schätzung durch Reduzierung des Messrauschens der Abstandsmessungen. Die experimentellen Ergebnisse zeigten, dass eine Positionsbestimmung mit einem Fehler kleiner als 0,5 m möglich ist.

Literatur

- [Cad03] CADMAN, J.: Deploying Commercial Location-aware Systems. In: *Proceedings of the 2003 Workshop on Location-Aware Computing*. Seattle, USA, Oktober 2003, S. 4–6
- [FMV08] FUENTES MICHEL J. C. ; MILLNER, H. ; VOSSIEK, M.: A Novell Wireless Forklift Positioning System for Indoor and Outdoor Use. In: *In Proceedings of the 5th Workshop on Positioning, Navigation and Communication (WPNC 2008)*. Hannover, Germany, März 2008, S. 219 – 227
- [GABB08] GRÄFENSTEIN, J. ; ALBERT, A. ; BIBER, P. ; BOUZOURAA, M.E.: Verteiltes Sensornetzwerk für die Navigation eines mobilen Roboters. In: *atp - Automatisierungstechnische Praxis* 50 (2008), März, Nr. 3, S. 56–61
- [GRH+06] GROSSMANN, U. ; RÖHRIG, C. ; HAKOBYAN, S. ; DOMIN, T. ; DALHAUS, M.: WLAN Indoor Positioning based on Euclidian Distance and Interpolation (Isobars). In: *Proceedings of the 8th Wireless Technologies Kongress*. Dortmund, Germany, 2006, S. 296–305
- [nan07] NANOTRON TECHNOLOGIES GMBH: Real Time Location Systems (RTLS). Berlin, Germany, April 2007 (NA-06-0248-0391-1.02). – White paper
- [nan08] NANOTRON TECHNOLOGIES GMBH: nanoLOC TRX Transceiver (NA5TR1). Berlin, Germany, April 2008 (NA-06-0230-0388-2.00). – Datasheet
- [PMBT01] PRIYANTHA, N. B. ; MIU, A. K. L. ; BALAKRISHNAN, H. ; TELLER, S.: The Cricket Compass for Context-aware Mobile Applications. In: *Proceedings of the 7th Annual*

International Conference on Mobile Computing and Networking. Rome, Italy, Juli 2001, S. 1–14

- [RK08] RÖHRIG, C. ; KÜNEMUND, F.: WLAN based Pose Estimation for Mobile Robots. In: *Proceedings of the 17th IFAC World Congress*. Seoul, Korea, Juli 2008, S. 10433–10438
- [RS08] RÖHRIG, C. ; SPIEKER, S.: Tracking of Transport Vehicles for Warehouse Management using a Wireless Sensor Network. In: *2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2008)*. Nice, France, September 2008, S. 3260–3265
- [Sch08] SCHIER, A.: *Drahtlose Sensornetzwerke in der Logistik – Einsatz drahtloser Sensornetzwerke zur dezentralen Lagerhaltung*. Saarbrücken : Verlag Dr. Müller, 2008
- [SG06] 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
- [Spi08] SPIEKER, S.: *Lokalisation in der Lagerverwaltung – Nutzenpotentiale drahtloser Sensornetzwerke zur Positionsbestimmung sowie Genauigkeitsoptimierung mit dem Kalman-Filter*. Saarbrücken : Verlag Dr. Müller, 2008