

Monte Carlo Lokalisierung Fahrerloser Transportfahrzeuge mit drahtlosen Sensornetzwerken

Christof Röhrig¹, Hubert Büchter² und Christopher Kirsch¹

¹ Fachhochschule Dortmund, Fachbereich Informatik,
Emil-Figge-Str. 42, 44227 Dortmund

² Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML
Joseph-von-Fraunhofer-Str. 2-4, 44227 Dortmund

Zusammenfassung. Ein drahtloses Sensornetzwerk ist ein Funknetz aus Kleinstrechnern, das aus vielen kleinen, dicht verteilten Sensorknoten besteht. Neben den klassischen Anwendungen wie z.B. dem Umweltmonitoring kann es auch zur Lokalisierung von Objekten verwendet werden. Der Beitrag beschreibt die Lokalisierung von Fahrerlosen Transportfahrzeugen mit dem drahtlosen Sensornetzwerk nanoLOC des Herstellers Nanotron Technologies. Aufbauend auf einem angepassten Monte Carlo Algorithmus wird ein Sensormodell entwickelt, welches eine Lokalisierung durch Entfernungsmessung zu ortsfesten Sensorknoten ermöglicht. Es werden experimentelle Ergebnisse präsentiert, die zeigen, dass mit dem nanoLOC-System eine Positionsbestimmung eines Fahrerlosen Transportfahrzeugs mit einem Fehler kleiner als 0,5 m erreichbar ist.

1 Einführung

Fahrerlose Transportfahrzeuge (FTF) gelten in der Automatisierung des innerbetrieblichen Materialflusses als die Technologie, die dem Anwender/Betreiber ein Höchstmaß an Flexibilität bietet. FTF können sich unabhängig von einem physischen Transportnetz bewegen und Güter transportieren. Sie bieten die Möglichkeit, Systeme mit geringem Aufwand an neue, veränderte oder erweiterte Aufgabenstellungen oder veränderte Umgebungsbedingungen anzupassen. Ziel aktueller Forschungsarbeiten ist es, herkömmliche Stetigfördertechnik durch eine Gruppe kompakter und kostengünstiger FTF – quasi ein Schwarm von FTF – zu ersetzen [1]. Das von Kivasystems¹ entwickelte und bereits eingesetzte „KIVA Mobile Fulfillment System“ (Kiva MFS) zeigt, dass der Einsatz von kleinen kostengünstigen Fahrzeugen in der Intralogistik ein hohes kommerzielles Potenzial besitzt. Beim Kiva MFS transportieren mobile Roboter innerhalb eines Kommissioniersystems Regale zum manuellen Kommissionierer. Es wurden von Kivasystems bereits mehrere Systeme, darunter ein Distributionszentrum von Staples in Chambersburg, Pennsylvania mit 500 mobilen Robotern, realisiert [2].

Derzeit bekannte und eingesetzte Lokalisierungsverfahren für FTF sind für einen FTF-Schwarm nicht geeignet, da diese Verfahren entweder zu unflexibel (Leitdraht) oder zu teuer (Lasernavigation) sind. Beim Kiva MFS wird eine Kombination aus Odometrie und optischen Bodenmarken eingesetzt. Als optische Bodenmarken werden

¹ <http://www.kivasystems.com>

2D-Barcodes eingesetzt, die mit preisgünstigen Kameras von den mobilen Robotern aus gelesen werden können. Die optische Erkennung ermöglicht so eine globale Positionsbestimmung der Roboter, solange sich diese genau über einer Bodenmarke befinden. Für die relative Lokalisierung zwischen den Bodenmarken werden die Radencodes der Roboter genutzt. Um den Lokalisierungsfehler gering zu halten, bewegen sich die mobilen Roboter auf einem festen Raster, welches durch die Bodenmarken vorgegeben wird. Die Verwendung von optischen Bodenmarken hat den Nachteil, dass diese manuell auf den Boden angebracht werden müssen und sie gegenüber Verschmutzung anfällig sind. Durch die Verwendung eines festen Rasters geht auch ein Teil der Flexibilität der mobilen Roboter verloren. Aus diesen Gründen werden alternative kostengünstige Lokalisierungsverfahren untersucht.

2 Funklokalisierung

Ein mögliches kostengünstiges Lokalisierungsverfahren ist die Funklokalisierung mit einem drahtlosen Sensornetzwerk, bei dem die für die Datenübertragung notwendige Funkkommunikation gleichzeitig zur Positionsbestimmung genutzt wird. Drahtlose Sensornetzwerke bieten neben den typischen Anwendungen wie z.B. dem Umweltmonitoring auch das Potential zu Lokalisierung mobiler Roboter [3]. Funklokalisierungsverfahren haben sich jedoch bisher noch nicht bei der Lokalisierung von FTF durchgesetzt. Dies liegt einerseits in der noch relativ kurzen Zeit, in der derartige Systeme verfügbar sind, und andererseits in der im Vergleich zur Lasernavigation geringeren Genauigkeit.

2.1 Stand der Technik

Es sind mehrere Verfahren zur Funklokalisierung bekannt, wobei die empfangene Signalstärke, die Signallaufzeit oder der Einfallswinkel eines Signals als Information für die Positionsbestimmung genutzt werden kann. Die empfangene Signalstärke ist in den meisten Funktechnologien als Informationsquelle verfügbar und kann dazu genutzt werden, die Entfernung zu einem Sender zu bestimmen. Im Innenbereich ist diese Distanzbestimmung durch Störungen wie Reflektionen und Dämpfungen jedoch sehr ungenau, so dass meist die genaueren Radio-Map-basierten Methoden Anwendung finden [4]. Allerdings ist hierbei der manuelle Aufwand für die Generierung der Radio-Map recht hoch, außerdem liegt die Genauigkeit von Radio-Map-basierten Verfahren bestenfalls im Bereich weniger Meter und ist damit für die Lokalisierung von FTF zu ungenau. Modellbasierte Ansätze, die die empfangene Signalstärke nutzen, sind deshalb auf den Außenbereich beschränkt [3]. Durch Winkelmessung empfangener Signale kann wie bei der Laser-Triangulation die Position und Orientierung bestimmt werden, wobei auch hier der technische Aufwand und somit die Investitionskosten sehr hoch sind. Laufzeitbasierte Verfahren bieten die höchste Genauigkeit bei relativ geringem technischem Aufwand. Hierbei wird durch Laufzeitmessung die Distanz zu stationären Referenzknoten bestimmt und mittels Trilateration die Position des mobilen Knotens berechnet. Diese Technik findet mittlerweile auch Einzug in drahtlose Sensornetzwerke. Aufbauend auf dem Funkstandard IEEE 802.15.4 wurden die neuen Physical Layer Ultra Wide Band (UWB) und Chirp Spread Spectrum (CSS) in IEEE 802.15.4a definiert, um

eine Entfernungsbstimmung zu anderen Knoten besser 1 m zu ermöglichen [5]. CSS wird von der Firma Nanotron Technologies² im nanoLOC-System zur Distanzmessung und Kommunikation eingesetzt. Das nanoLOC-System ermöglicht als preiswerte Technologie neben der Lokalisierung einzelner Knoten die Funkkommunikation mittels eines einzigen Bausteins [6].

Laufzeitbasierte Distanzmessungen unterliegen bei Innenraumanwendungen Messfehlern, die durch Reflektionen und Mehrwegeausbreitung verursacht werden. Die von Nanotron angegebene Lokalisierungsgenauigkeit des nanoLOC-Systems liegt im Innenbereich bei 2 m, was für Applikationen in der Intralogistik nicht ausreichend ist. Eigene Untersuchungen haben gezeigt, dass sich diese Fehler durch Einsatz eines Erweiterten Kalman Filters reduzieren lassen [7]. Da die auftretenden Messfehler jedoch nicht normalverteilt sind, bietet ein Monte Carlo Partikelfilter bessere Möglichkeiten, ein angepasstes Sensormodell zu integrieren.

2.2 Funklokalisierung mit dem nanoLOC System

Das nanoLOC-System ermöglicht gleichzeitig eine drahtlose Kommunikation und Echtzeit-Lokalisierung. Das dabei verwendete Ranging-Verfahren „Symmetrical Double-Sided Two Way Ranging“ (SDS-TWR) gestattet eine funkbasierte Distanzmessung 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).

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 „Roundtrip Time of Flight“ (RTof), wobei dieses symmetrisch und doppelseitig ausgeführt wird. 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 eliminieren. Dazu wird das gleiche Verfahren in umgekehrter Laufrichtung durchgeführt, also von Knoten B zu A und zurück zu B.

² <http://www.nanotron.de>

3 Monte Carlo Funklokalisierung

Die verwendete Monte Carlo Methode ist ein Partikelfilter und kann zur Positionsbestimmung von mobilen Robotern genutzt werden. Für die Positionsbestimmung durch den Monte Carlo Algorithmus werden über den Zustandsraum, in welchem sich der Roboter aufhalten kann, eine endliche Menge von Partikeln verstreut. Diesen Partikeln wird innerhalb des Algorithmus mit Bezug auf die Position und auf Sensormessungen eine Wahrscheinlichkeit zugeordnet. Diese Wahrscheinlichkeit spiegelt die Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Roboters für genau diesen Punkt wieder. Diese Wahrscheinlichkeit wird auch als Bewertung bezeichnet und mit den Sensormessungen basierend auf einem Sensormodell durchgeführt. Nach jeder Bewertung findet eine Neuverteilung der Partikel statt und nach jeder Bewegung findet eine Verschiebung mit dem Bewegungsmodell des Roboters statt [8].

Die Monte Carlo Lokalisierung wurde an die Anforderungen der Funklokalisierung mit dem nanoLOC-System angepasst. Es wurde ein Sensormodell entwickelt, welches die Wahrscheinlichkeit $p_d(d_k | x_t)$ angibt. Dies ist die Wahrscheinlichkeit der Distanzmessung d_k von dem zu lokalisierenden FTF an der Position x_t zu einem Anker k . Die Position x_t wird dabei durch einen Partikel repräsentiert.

3.1 Anfangsverteilung der Partikel

Vor der ersten Bewegung des FTF müssen Partikel im Zustandsraum des FTF platziert werden. Um den Bereich einzugrenzen, in welchem die Partikel verstreut werden, wird am Anfang eine Ankerbox erstellt. Die Ankerbox grenzt den Bereich ein, indem sich das Fahrzeug befinden kann. Die Ankerbox bildet ein Rechteck um die Schnittfläche der Kreise, die durch die gemessenen Distanzen zu den Ankerknoten gebildet werden. Die Berechnung der Ankerbox lehnt sich an ein Verfahren an, das in [9] vorgestellt wird. Dabei werden die Eckpunkte der Ankerbox wie folgt berechnet:

$$\begin{aligned}x_{\min} &= \max_{k=1}^K(x_k - d_k), & x_{\max} &= \min_{k=1}^K(x_k + d_k), \\y_{\min} &= \max_{k=1}^K(y_k - d_k), & y_{\max} &= \min_{k=1}^K(y_k + d_k),\end{aligned}\tag{1}$$

dabei stehen x_k und y_k für die Position des Ankers k und d_k für die Distanzmessung zum Anker k , K ist die Anzahl der Ankerknoten.

3.2 Sensormodell der Distanzmessung

Eigene Untersuchungen haben gezeigt, dass das nanoLOC-System in Innenraumanwendungen infolge der Mehrwegeausbreitung der Funksignale in der Regel zu große Entfernungen liefert [7]. Die Messfehler hängen dabei von der Umgebung und der Anordnung der Sensorknoten ab. Wird für die Lokalisierung ein Kalman Filter eingesetzt, führt dies zu Fehlern in der Positionsschätzung. Eine Möglichkeit den Positionsfehler durch Mehrwegeausbreitung zu reduzieren, bietet das Biased Kalman Filter [10]. Ein Monte Carlo Partikelfilter bietet allerdings noch bessere Möglichkeiten, das Sensormodell an die Verteilung der Messfehler anzupassen.

Zur heuristischen Bestimmung des Sensormodells wurde eine Messfahrt mit einem FTF in der Demonstrationshalle des Fraunhofer IML durchgeführt. Es wurden die Messfehler der Distanzmessungen zu sechs fest installierten Ankerknoten aufgenommen. Abb. 1 zeigt die Häufigkeit der Messfehler exemplarisch für vier Ankerknoten. Daraus ist ersichtlich, dass die größte Häufigkeit bei einem Messfehler von 1,5 - 2 m liegt, wobei auch noch deutlich größere Messfehler auftreten.

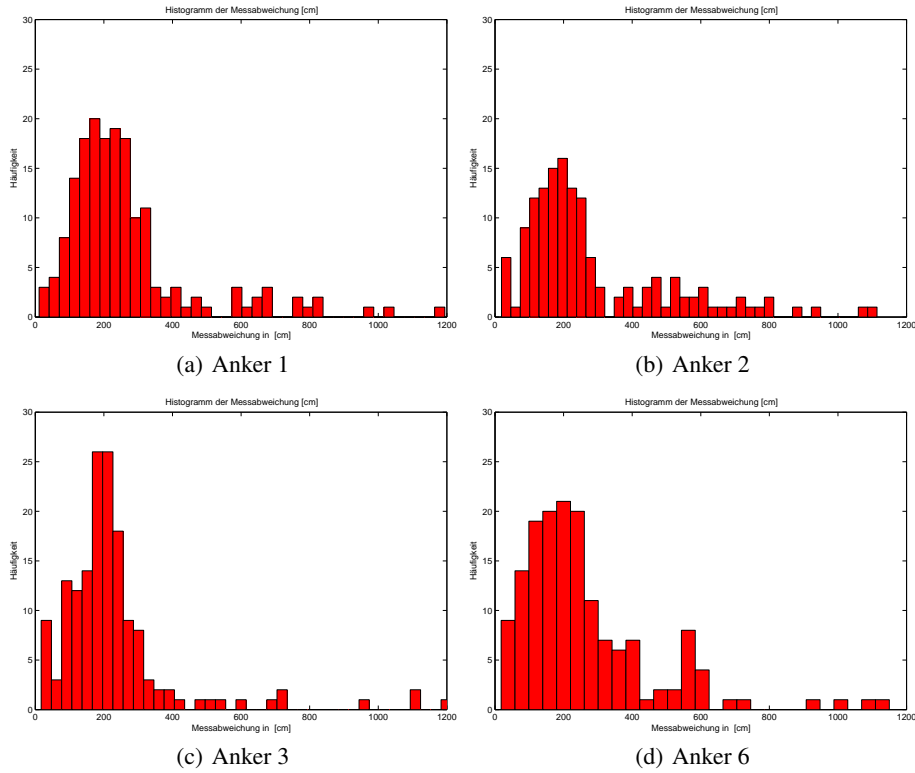


Abb. 1. Fehlerhäufigkeit bei verschiedenen Sensorknoten

Aufbauend auf den Messungen wurde ein Sensormodell entwickelt, welches über die Wahrscheinlichkeit $p_d(d_k | x_t)$ die gemessene Häufigkeitsverteilung approximiert. $p_d(d_k | x_t)$ ist die Wahrscheinlichkeit der Distanzmessung d_k von dem zu lokalisierenden FTF an der Position x_t zum Anker k . Um $p_d(d_k | x_t)$ im Monte Carlo Algorithmus zu berechnen, wird der Euklidische Abstand d_t^{k*} zwischen dem Partikel an der Position x_t und dem Anker k mit der gemessenen Distanz d_k verglichen. Der Euklidische Abstand d_t^{k*} wird nach Gl. 2 berechnet:

$$d_t^{k*} = \sqrt{(x_k - p_x)^2 + (y_k - p_y)^2}, \quad (2)$$

dabei sind x_k und y_k die kartesischen Koordinaten des Ankers k und p_x und p_y die kartesischen Koordinaten des Partikels x_t . Die Wahrscheinlichkeit $p_d(d_k | x_t)$ wird als unsymmetrisch Gaußverteilung modelliert:

$$p_d(d_k | x_t) = \begin{cases} c_s \mathcal{N}(d_k, d_t^{k*} + d_c^k, \sigma_s) & \text{falls } 0 \leq d_k < d_t^{k*} + d_c^k \\ c_l \mathcal{N}(d_k, d_t^{k*} + d_c^k, \sigma_l) & \text{falls } d_t^{k*} + d_c^k \leq d_k \leq d_{\max} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (3)$$

dabei ist d_c^k eine ankerspezifische Rangingkonstante, die den Zentralwert des Messfehlers darstellt, d_{\max} ist die maximal mögliche Distanz, c_s und c_l dienen zur Normierung und σ_s, σ_l sind die Standardabweichungen der Gaußverteilungen. Die Gaußverteilung ist gegeben durch:

$$\mathcal{N}(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right)^2\right) \quad (4)$$

Zur oben angegebenen Wahrscheinlichkeit wird noch eine Grundwahrscheinlichkeit p_{rand} addiert, um Messfehler zu modellieren. Unter der Annahme, dass die Messungen zu den einzelnen Ankerknoten unabhängig voneinander sind, lässt sich die Gesamtwahrscheinlichkeit eines Partikels wie folgt angeben:

$$p_g = \prod_{k=1}^K p_d(d_k | x_t) \quad (5)$$

3.3 Experimentelle Ergebnisse

Die oben beschriebene Monte Carlo Lokalisierung wurde mit einem FTF und einem nanoLOC Sensornetzwerk getestet. Dabei wurden sechs Ankerknoten entlang der Fahrbahn des FTFs installiert. Das FTF bewegt sich dabei entlang einer 10 m langen Geraden. Es wurde davon ausgegangen, dass die Anfangsposition des FTF unbekannt ist. Da mittels Trilateration die Orientierung des FTF nicht bestimmt werden kann, muss die Anfangsorientierung der Partikel anders ermittelt werden. Es wird davon ausgegangen, dass die Orientierung mittels Sensorik bestimmt werden kann, so dass allen Partikeln die richtige Orientierung vorgegeben wurde. Die Orientierung lässt sich z.B. mittels Magnetfeldsensoren oder in einem Funknetz auch mittels Richtantenne und Signalstärkemessung bestimmen [4].

Grundsätzlich ist durch Bewegung des FTF und Positionsbestimmung auch eine Bestimmung der Orientierung des FTF möglich. Experimente haben gezeigt, dass dazu mehrere Meter Fahrstrecke notwendig sind. Da die Bewegung des FTF in eine noch unbekannt Richtung erfolgt, ist dieses Verfahren für viele industrielle Applikationen ungeeignet. Als Bewegungsmodell für das mit einem Differentialantrieb ausgestattete FTF wurde das Odometriemodell aus [8] entnommen, welches sowohl die Unsicherheit in der Position als auch in der Orientierung berücksichtigt.

Abb. 2 zeigt die Ergebnisse der Lokalisierung. In Abb. 2(a) wird die Anfangsverteilung der Partikel durch die Ankerbox mit schwarzen Punkten dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass sich der Startpunkt der Bahn (rote Gerade) innerhalb der Ankerbox

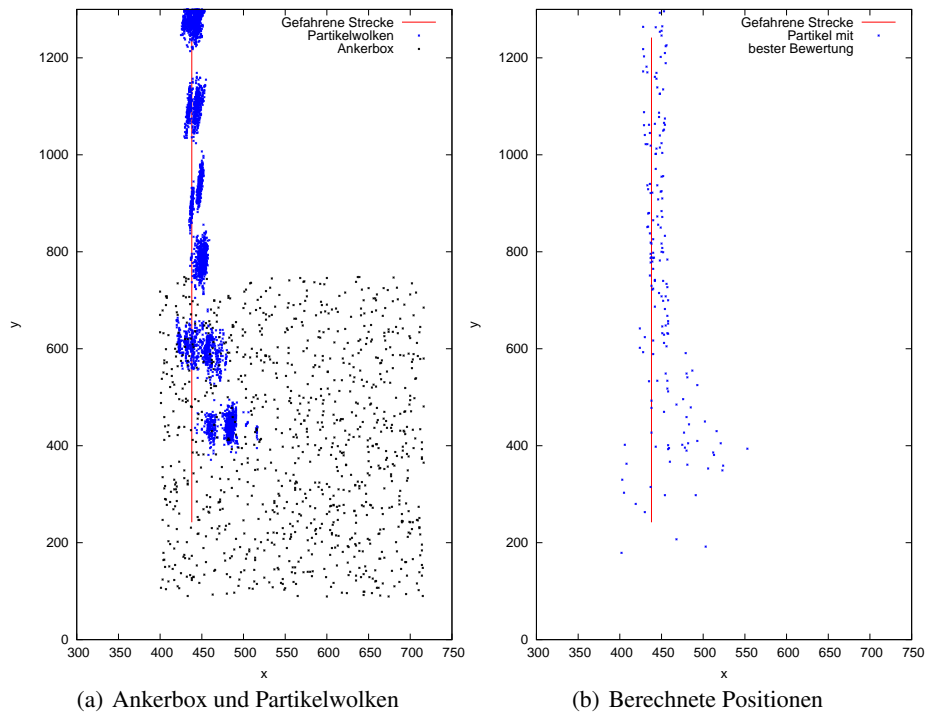


Abb. 2. Ergebnisse einer Fahrt entlang einer Geraden von 10 m Länge

befindet. Abb. 2(a) zeigt weiterhin sechs Partikelwolken (in blau) während der Bewegung. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich die Partikelwolken mit der zurückgelegten Strecke weiter konzentrieren. Abb. 2(b) zeigt die geschätzte Position des FTF, die durch den am besten bewerteten Partikel angegeben wird. Anfangs weicht die geschätzte Position noch deutlich von der realen Position auf der Bahn ab, nach etwa der Hälfte der Bewegung pendelt sich der Fehler auf weniger als 0,3 m ein.

4 Zusammenfassung

Für die Positionsbestimmung von FTF wurde ein Monte Carlo Partikelfilter verwendet, das aus den Distanzdaten zu festen Ankerknoten die Position des FTF ermittelt. Dazu wurde ein Sensormodell der nanoLOC-Distanzmessung entwickelt, das die Wahrscheinlichkeit einer Distanzmessung bei vorgegebener Position ermittelt. Die experimentelle Ergebnisse zeigen, dass eine Positionsbestimmung mit einem Fehler kleiner als 0,5 m möglich ist. Diese Genauigkeit ist für die Bewegung der FTF auf einer freien Fläche ausreichend, aber für Andockvorgänge zur Lastübergabe muss eine höhere Genauigkeit im Bereich von wenigen cm erreicht werden. Mit einem Funklokalisierungssystem ist derzeit diese Genauigkeit wohl nicht erreichbar. In aktuellen Untersuchungen werden die

Distanzmessungen deshalb mit weiteren Messdaten, wie z.B. einem Laserabstandssensor fusioniert um die Genauigkeit zu erhöhen. Die zusätzliche Sensorik muss sich dabei nicht zwangsläufig auf dem FTF selbst befinden, sie kann auch ortsfest installiert sein und ihre Messdaten per Funk an das FTF übermitteln.

Literaturverzeichnis

1. TEN HOMPEL, M. ; NAGEL, L.: Zellulare Transportsysteme – Den Dingen Beine machen im „Internet der Dinge“. In: *it – Information Technology* 50 (2008), Nr. 1, S. 59–65
2. GUIZZO, E.: Three Engineers, Hundreds of Robots, One Warehouse. In: *IEEE Spectrum* (2008), Juli, S. 26–34
3. 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
4. RÖHRIG, C. ; KÜNEMUND, F.: Estimation of Position and Orientation of Mobile Systems in a Wireless LAN. In: *Proceedings of the 46th IEEE Conference on Decision and Control*. New Orleans, USA, Dezember 2007, S. 4932–4937
5. 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
6. 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
7. RÖHRIG, C. ; SPIEKER, S.: Tracking of Transport Vehicles for Warehouse Management using a Wireless Sensor Network. In: *Proceedings of the 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2008)*. Nice, France, September 2008, S. 3260–3265
8. THRUN, S. ; BURGARD, W. ; FOX, D.: *Probabilistic Robotics (Intelligent Robotics and Autonomous Agents)*. MIT Press, 2005
9. BAGGIO, A. ; LANGENDOENA, K.: Monte Carlo localization for mobile wireless sensor networks. In: *Ad Hoc Networks* 6 (2008), Juli, Nr. 5, S. 718–733
10. 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. Louis, USA, Oktober 2009