



Veranstalter:

Technische Universität Darmstadt
DIGITAL

- **Mechatronische Produkte**
(neue Funktionalitäten, Industrie 4.0, Kosteneffizienz, Zuverlässigkeit, ...)
- **Innovative Konzepte und digitale Geschäftsmodelle**
(Modelle, Regelung, Optimierung, Eco-Systeme, ...)
- **Serienanfertigung mechatronischer Produkte**
(Fallbeispiele, Komponenten, Architektur, Qualitätsmanagement, ...)
- **Systemvernetzung und Systemintegration**
(Konzepte, Verfahren, ...)
- **Ressourceneffizienz**
(Energie, Material, ...)
- **Smarte Aktoren**
(Konzepte, Beispiele, ...)
- **Nutzerfreundlichkeit und Akzeptanz**
(Assistenzsysteme, Schnittstellen, Interaktion, Gesetzgebung, ...)
- **Automatisierte Mobilität**
(Konzepte, Modelle, Sensorik, ...)
- **Systems Engineering und Entwicklungsmanagement**
(Prozesse, Verfahren, Software, ...)
- **Robotik**
(Kooperation, Kollaboration, Perzeption, ...)

Digital-Fachtagung MECHATRONIK 2021 Darmstadt, 24.-25.03.2021

Herausgeber: T. Bertram, B. Corves, K. Janschek, S. Rinderknecht



2. Auflage

www.VDI-Mechatroniktagung.de

Der Tagungsband, der die Vorträge der Fachtagung enthält, erscheint als nichtredigierter Manuskriptdruck. Die einzelnen Beiträge geben die auf persönliche Erkenntnisse beruhenden Ansichten und Erfahrungen der jeweiligen Vortragenden bzw. Autoren wieder.

Printed in Germany.

Veröffentlicht unter CC-BY 4.0 International
<https://creativecommons.org/licenses>

Fein-Positionierung mit reflektierenden Markern

Fine-Positioning with Reflective Markers

Stefan-Octavian Bezrucav M.Sc., Tobias Haschke M.Sc., Markus Schmitz M.Sc., Simon Klamt B.Sc., Institut für Getriebetechnik, Maschinendynamik und Robotik, RWTH Aachen University, 52066 Aachen, Deutschland, {haschke, bezrucav, schmitz, klamt}@igmr.rwth-aachen.de

Dr.-Ing Jascha Paris, Dr.-Ing Stefan Kurtenbach, TRAPO AG, Industriestraße 1, 48712 Gescher, Deutschland, {jparis, skurtenbach}@trapo.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Burkhard Corves, Institut für Getriebetechnik, Maschinendynamik und Robotik, RWTH Aachen University, 52066 Aachen, Deutschland, corves@igmr.rwth-aachen.de

Kurzfassung

Eine präzise Lokalisierung fahrerloser Transportsysteme (FTS) ist eine Grundvoraussetzung für Logistikaufgaben in Produktionsstätten. Besonders in herausfordernden Situationen, wie dem Anfahren von Förderern, kann ein geringer Lokalisierungsfehler über den Erfolg des Be- und Entladevorgangs des FTS entscheiden. Aus diesem Grund werden im Rahmen der Arbeit zwei gesonderte Methoden zur präzisen Lokalisierung und anschließender Positionierung von FTS vorgestellt. Diese wurden für das *TRAPO Transport Shuttle* (TTS) der TRAPO AG entwickelt. Die Methoden basieren auf der Nutzung eines LiDAR-Sensors zur Detektion der Umgebung und reflektierenden Markern als Umgebungsmerkmal. Reflektierende Marker können das Licht des Sensors mit einer bestimmten Intensität reflektieren, sodass die Messpunkte auf den Markern aus den Messdaten herausgefiltert werden können. Im Anschluss kann die Pose, also die Position und Orientierung des Roboters mittels Laser-Triangulation berechnet werden.

Abstract

Precise localization of autonomous guided vehicles (AGVs) is a basic requirement for logistics tasks in production plants. Especially in challenging situations, such as the positioning in front of conveyors, a small localization error can decide on the success of the loading and unloading process of AGVs. For this reason, two separate methods for the precise localization and positioning of AGVs are presented in this thesis. These were developed for the *TRAPO Transport Shuttle* (TTS) of the TRAPO AG. The methods are based on the use of a LiDAR sensor for sensing the environment and reflective markers as environmental features. Reflective markers can reflect the light of the sensor with a specific intensity to filter out the measurement points on the markers from the measurement data. Afterwards the pose, i.e. the position and orientation of the robot can be calculated by laser triangulation.

1 Einleitung

Für die fehlerfreie Zusammenarbeit von hochautonomen Maschinen im Rahmen von Industrie 4.0 ist die Lokalisierung mobiler Systeme von großer Bedeutung. Besonders in kritischen Bereichen, wie zum Beispiel in der Nähe von Förderbändern, kann die aktuelle Pose, also die Position und Orientierung des Roboters über den Erfolg des Be- und Entladevorgangs entscheiden. Aus diesem Grund sind in den letzten Jahren einige Ansätze zur Lokalisierung und anschließender Positionierung von fahrerlosen Transportsystemen (FTS) entwickelt worden [1]. Zwei Ansätze, welche auf dem Einsatz eines LiDAR-Sensors und reflektierenden Markern als Umgebungsmerkmal basieren, werden in dieser Arbeit erläutert und miteinander auf Genauigkeit und Robustheit gegen Messungenauigkeiten verglichen. Im Anschluss werden diese Methoden mit dem *TRAPO Transport Shuttle* (TTS), dem FTS der TRAPO AG, validiert. Zuvor wird auf existierende Methoden zur Lokalisierung mobiler Roboter eingegangen.

2 Bestehende Methoden

Die Lokalisierung von Transportsystemen ist in Produktionsanlagen der Industrie 4.0 ausschlaggebend. Daher gibt es für die *Indoor-Lokalisierung* verschiedene Ansätze. Diese lassen sich in statische und flexible Lokalisierungsmethoden unterteilen. Die Unterschiede, sowie deren Vor- und Nachteile werden im Folgenden erläutert.

2.1 Statische Lokalisierungsmethoden

Unter statischen Lokalisierungsmethoden versteht man die Lokalisierung des FTS durch eine vordefinierten Route. Die Route wird dabei vor dem Start des eigentlichen Roboters definiert und während der Fahrt des Roboters nicht geändert. Eine verbreitete Methode im Bereich der Intralogistik ist das induktive Spurführungssystem, bei welchem die Pfade durch Leiterbänder im Boden der Produktionshalle festgelegt werden. Durch Magnete, welche an der Unterseite des Roboters montiert sind, wird ein Magnetfeld induziert, sobald dieser über die Leiterbänder fährt [2]. Dadurch ist eine Orientierung für den mobilen Roboter möglich. Neben dem induktiven Spurführungssystem ist die Definition des Pfades ebenfalls mit einem auf dem Boden befestig-

ten Magnetband möglich. Der Roboter kann sich wiederum mit einem Magneten an dem verlegten Magnetband orientieren [1].

In modernen FTS werden die statischen Lokalisierungs- und Navigationsmethoden jedoch selten eingesetzt. Obwohl die Implementierung der Methoden einfach ist, fehlt es den Methoden an Flexibilität [1].

2.2 Flexible Lokalisierungsmethoden

Die flexiblen Lokalisierungsmethoden sind im Gegensatz zu den statischen Verfahren vielseitig einsetzbar. Die Lokalisierung findet in diesem Fall ohne vordefinierten Weg statt. Der Roboter ist dementsprechend nicht an eine definierte Spur gebunden, sondern orientiert sich mit dem Einsatz verschiedener Sensoren in der Umgebung. Im Falle einer blockierten Spur ist die Umplanung des Pfades möglich. Daher können die Hindernisse ohne hohen Effizienzverlust umfahren werden. Aus diesem Grund werden in dynamisch wechselnden Umgebungen flexible Lokalisierungs- und Navigationsmethoden für Industrieroboter eingesetzt [2]. Allerdings ist zu beachten, dass die flexiblen Lokalisierungsmethoden im Vergleich zu den statischen Methoden einen Genauigkeitsverlust mit sich bringen können. Je nach Sensor (optisch, akustisch, etc.) können unterschiedliche Methoden zur Lokalisierung des FTS eingesetzt werden [3]. Eine mögliche Art der Lokalisierung ist die Lokalisierung mittels RFID-Chips. Der Roboter kann die RFID-Chips in der Umgebung registrieren und sich anhand der Chips orientieren [5]. Anstelle der RFID-Chips können Laser-Orientierungspunkte, sowie ein Laser-Sensor zur Lokalisierung des FTS eingesetzt werden. Anhand der Orientierungspunkte kann das FTS die aktuelle Pose relativ zu den Orientierungspunkten bestimmen. [1] Im Rahmen der Arbeit wird auf dieses Verfahren zurückgegriffen. Die Methoden, welche im Folgenden vorgestellt werden, nutzen einen LiDAR, *Light Detection and Ranging*-Sensor und reflektierende Marker in der Umgebung, um das FTS präzise zu lokalisieren.

3 Voraussetzungen

Für die Berechnung der aktuellen Pose des FTS werden Annahmen getroffen, um die Lokalisierung des Roboters zu vereinfachen. Da in dieser Arbeit Methoden zur präzisen Lokalisierung mit anschließender Positionierung vorgestellt werden, kann angenommen werden, dass sich der Roboter bereits in der Nähe des definierten Ziels befindet. Aus diesem Grund wird die Pfadplanung im Ganzen, also mit Vermeidung von Hindernissen etc. in diesem Paper als gegeben vorausgesetzt. Des Weiteren wird für die Lokalisierung eine genaue Platzierung der reflektierenden Markerpaare an den Rollerförderern als gegeben angenommen. Ein Markerpaar entspricht zwei reflektierenden Markern, welche beide zur Lokalisierung des FTS benötigt werden. Um eine hohe Genauigkeit der Methoden zu erzielen, müssen die Marker mit einem geringen Abstand am Rollerförderer angebracht werden. Auf die Positionierung der reflektierenden Markerpaare wird im weiteren Verlauf näher eingegangen.

4 FTS Lokalisierung

Im Folgenden werden zwei Methoden zur präzisen Lokalisierung fahrerloser Transportsysteme vorgestellt. Beide Lokalisierungsmethoden basieren auf der Nutzung eines LiDAR-Sensors zur Erforschung der Umgebung und reflektierenden Markern als Umgebungsmerkmal. Die Daten des LiDAR-Sensors werden im Anschluss an die Detektion der Umgebung für die Berechnung der aktuellen Pose $\chi = (x \ y \ \theta)^T$ des FTS in Referenz zu einem Koordinatensystem, definiert im Referenzpunkt M , verwendet. Die Methoden unterscheiden sich in der Berechnung der aktuellen Pose χ des Roboters. Zum besseren Verständnis werden in dieser Arbeit Koordinatensysteme in dem Sensor, dem Roboter, dem vorgegebenen Ziel, sowie dem Referenzpunkt M definiert. Mit Hilfe von homogenen Transformationen lassen sich die Translationen, sowie Rotationen der Koordinatensysteme beschreiben. Die gesuchte Pose χ , also die Pose zwischen dem Roboter und dem Referenzsystem M , lässt sich ebenfalls als homogene Transformation ${}^R T_M$ beschreiben. Diese Transformation lässt sich aus mehreren homogenen Transformationen zusammensetzen:

$${}^R T_M = {}^R T_S {}^S T_M \quad (1)$$

${}^R T_S$ entspricht der Transformation zwischen dem LiDAR-Sensor S und dem Roboter R und ${}^S T_M$ der Transformation zwischen dem Referenzpunkt M und dem Sensor. Dabei kann die Transformation ${}^R T_S$ als gegeben angenommen werden. Des Weiteren kann auch die Transformation ${}^M T_Z$, also die Transformation zwischen dem Ziel Z und dem Referenzpunkt M vorausgesetzt werden. Somit wird lediglich die Transformation ${}^S T_M$ zur Berechnung benötigt. Diese ist durch die Lokalisierungsmethoden, welche im Folgenden vorgestellt werden, zu bestimmen. Die Koordinatensysteme und deren Transformationen ist Abbildung 1 zu entnehmen.

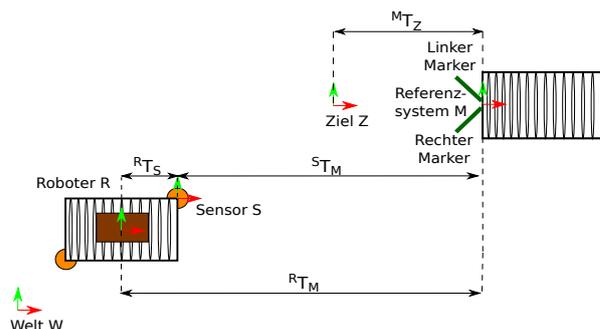


Abbildung 1 Definition der Koordinatensysteme und homogenen Transformationen

Für die Berechnung der Transformation ${}^S T_M$ nutzen die Lokalisierungsmethoden die Daten des LiDAR-Sensors. Aufgrund von Messungenauigkeiten des Sensors ist eine vorzeitige Aufbereitung der Daten nötig, um somit valide Lokalisierungsergebnisse zu erzielen. Die Aufbereitung wird durch Filter, welche in Reihe geschaltet sind, umgesetzt:

1. Intensitätsfilter: Da die reflektierenden Marker das

Licht mit einer bestimmten Intensität reflektieren, können die reflektierenden Marker innerhalb der Punktwolke des LiDAR-Sensors registriert werden. Der Intensitätsfilter nutzt diese Erkenntnis aus, um die Marker aus der Punktwolke herauszufiltern.

2. Ggf. Winkel- und Reichweitenfilter: In Produktionsstätten ist eine Identifizierung von mehreren Markerpaaren durchaus möglich. Somit ist die eindeutige Identifizierung des richtigen Markerpaares schwierig. Mit Hilfe des Winkel- und Reichweitenfilters wird der Bereich, in dem sich das Markerpaar befindet, eingeschränkt.
3. Ggf. Glättungsfilter: Aufgrund von Messungenauigkeiten des LiDAR-Sensor schwankt die Approximation der Pose. Aus diesem Grund werden Glättungsfilter, wie zum Beispiel der *Moving Average*-Filter zur Glättung der Messdaten verwendet.

4.1 Marker-Mittelpunkt Lokalisierung

Die Bestimmung der aktuellen Pose des Roboters in Relation zu den reflektierenden Markern ist mit Hilfe der Mittelpunkte der reflektierenden Marker möglich. Zur Berechnung der Mitte jedes Markers werden die Koordinaten der äußersten Punkte der Marker anhand trigonometrischen Gleichungen berechnet. Dies ist möglich, da wir durch die Messdaten des Sensors sowohl eine gemessene Weite R , sowie einen Winkel α für jeden Laserpunkt erhalten. Die äußersten Punkte auf der rechten und linken Seiten der zwei Marker P_{rr}, P_{rl}, P_{lr} und P_{ll} lassen sich, wie in Abbildung 2 beschrieben, berechnen:

$$P_i = \begin{pmatrix} R_i \cos(\alpha_i) \\ R_i \sin(\alpha_i) \\ 0 \end{pmatrix}, i \in \{rr, rl, lr, ll\} \quad (2)$$

Mit Hilfe der Eckpunkte der Marker ist die Berechnung der Mitte jeden Markers möglich. Die Position des Referenzsystems M kann im Anschluss aus den Markerzentren approximiert werden. Die Position wird in der Mitte zwischen den Mittelpunkten der Marker definiert. Hierbei wird angenommen, dass sich der Mittelpunkt der Marker genau im Zentrum zwischen den berechneten Eckpunkten P_{rr} und P_{rl} bzw. P_{lr} und P_{ll} liegt:

$$M = \begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{(P_{rl,x} + P_{rr,x}) + (P_{ll,x} + P_{lr,x})}{4} \\ \frac{(P_{rl,y} + P_{rr,y}) + (P_{ll,y} + P_{lr,y})}{4} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Die Koordinaten des Systems M stimmen mit der Translation der Transformation ${}^S T_M$ überein, da der Ursprung des Sensor-Koordinatensystems exakt in der Laserquelle definiert ist. Neben der Translation wird für die Berechnung der homogenen Transformation ${}^S T_M$ eine Rotation der Koordinatensysteme zueinander gesucht. Für die genannte Problemstellung kann lediglich eine Rotation um die vertikale bzw. z -Achse vorliegen. Der damit verbundene Winkel, der sogenannte Gier-Winkel γ , lässt sich anhand

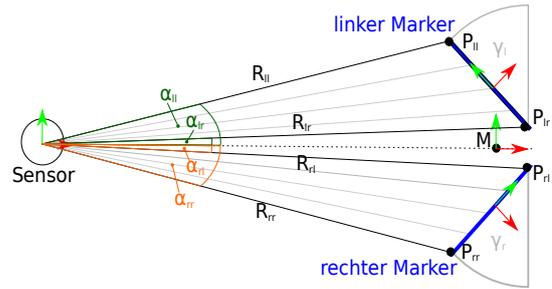


Abbildung 2 Funktionales Model der Marker-Mittelpunkt Lokalisierung

der Eckpunkte der Marker mittels Triangulation berechnen:

$$\Delta x_r = P_{rl,x} - P_{rr,x}, \quad \Delta x_l = P_{ll,x} - P_{lr,x} \quad (4)$$

$$\Delta y_r = P_{rl,y} - P_{rr,y}, \quad \Delta y_l = P_{ll,y} - P_{lr,y} \quad (5)$$

$$\gamma_r = \text{atan}\left(\left|\frac{\Delta x_r}{\Delta y_r}\right|\right), \quad \gamma_l = \text{atan}\left(\left|\frac{\Delta x_l}{\Delta y_l}\right|\right) \quad (6)$$

$$\gamma_{total} = \begin{cases} \frac{\gamma_l - \gamma_r}{2}, & \Delta x_r > 0, \Delta x_l < 0 \\ \frac{\gamma_r - \gamma_l}{2} + \frac{\pi}{2}, & \Delta x_r < 0, \Delta x_l < 0 \\ \frac{\gamma_r - \gamma_l}{2} - \frac{\pi}{2}, & \Delta x_r > 0, \Delta x_l > 0 \\ \frac{\pi}{4}, & \Delta x_r = 0 \\ -\frac{\pi}{4}, & \Delta x_l = 0 \end{cases} \quad (7)$$

Die Winkel γ_r bzw. γ_l repräsentieren die Winkel der approximierten Marker. Die Berechnung von γ_{total} hängt davon, wie der Sensor positioniert ist. Aus diesem Grund wird zwischen fünf möglichen Fällen unterschieden, welche in (7) definiert sind. Eine Visualisierung der Winkel lässt sich der Abbildung 2 entnehmen. Dabei ist anzumerken, dass der Winkel γ_{total} zwischen -45° und $+45^\circ$ gültig ist. Des Weiteren wird angenommen, dass die approximierten Winkel γ_r und γ_l kleiner als 90° sind. Diese Annahme ist möglich, da die Marker ansonsten nicht vom Sensor hätten detektiert werden können. Insgesamt lässt sich daher die Transformation zwischen dem Sensor und dem Referenzsystem M wie folgt beschreiben:

$${}^S T_M = \begin{pmatrix} \cos(\gamma_{ges}) & -\sin(\gamma_{ges}) & 0 & M_x \\ \sin(\gamma_{ges}) & \cos(\gamma_{ges}) & 0 & M_y \\ 0 & 0 & 1 & M_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

Um aus der Transformation im Anschluss die gesuchte Pose χ zu erhalten, muss in einem ersten Schritt die Transformation ${}^R T_M$ berechnet werden. Anschließend kann die Pose χ aus der Transformation extrahiert werden. Eine Visualisierung der Marker-Mittelpunkt Lokalisierung lässt sich Abbildung 2 entnehmen.

Die beschriebene Methode bringt eine Ungenauigkeit mit sich, da die Annahme getroffen wurde, dass die Mittelpunkte der Marker exakt zwischen den äußersten Messpunkten zu finden sind. In der Realität ist das nicht zwingend der Fall. Aus diesem Grund lässt die Methode einen

Fehler zu, welcher Einfluss auf die Genauigkeit der Lokalisierung hat.

4.2 Marker-Schnittpunkt Lokalisierung

Zur Beseitigung des zuvor beschriebenen Lokalisierungsfehler wird ein weiteres Konzept zur Schätzung der aktuellen Pose zwischen dem Sensor und den Markern herangezogen. Die Marker-Schnittpunkt Lokalisierung benutzt im Gegensatz zur Marker-Mittelpunkt Lokalisierung alle Laserpunkte, welche auf die reflektierenden Marker treffen, um Pose in Relation zum Referenzsystem M zu berechnen. Dazu basiert die Methode auf der Approximation linearer Gleichungen, durch welche die reflektierenden Marker angenähert werden sollen. Die Geraden lassen sich durch folgende Gleichungen beschreiben:

$$y_r = a_r x_r + b_r \quad (9)$$

$$y_l = a_l x_l + b_l \quad (10)$$

Die Parameter a_r, a_l, b_r, b_l können zur Beschreibung der linearen Gleichungen mit Hilfe der Laserpunkte mittels linearer Regression berechnet werden:

$$\begin{aligned} b_r &= \frac{\sum_{i=1}^{n_r} (x_{r,i} - \bar{x}_r)(y_{r,i} - \bar{y}_r)}{\sum_{i=1}^{n_r} (x_{r,i} - \bar{x}_r)^2}, & a_r &= \bar{y}_r - b_r \bar{x}_r \\ b_l &= \frac{\sum_{i=1}^{n_l} (x_{l,i} - \bar{x}_l)(y_{l,i} - \bar{y}_l)}{\sum_{i=1}^{n_l} (x_{l,i} - \bar{x}_l)^2}, & a_l &= \bar{y}_l - b_l \bar{x}_l \end{aligned} \quad (11)$$

Hierbei entspricht $x_{r,i}$ bzw. $y_{r,i}$ der x-Koordinate bzw. y-Koordinate des i-ten Laserpunktes auf dem rechten Marker und $x_{l,i}$ bzw. $y_{l,i}$ der x-Koordinate bzw. y-Koordinate des i-ten Laserpunktes des linken Markers. Des Weiteren entspricht \bar{x}_r und \bar{y}_r den Durchschnittswerten der x- und y-Koordinaten des rechten Markers. Folglich entsprechen \bar{x}_l und \bar{y}_l den Durchschnittswerten des linken Markers. Für die Bestimmung der Pose zwischen dem Sensor und dem Referenzsystem M wird bei der Marker-Schnittpunkt Lokalisierung der Schnittpunkt zwischen den zuvor bestimmten Geraden berechnet:

$$M = \begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{b_l - b_r}{a_r - a_l} \\ a_r \left(\frac{b_l - b_r}{a_r - a_l} \right) + b_r \\ 0 \end{pmatrix} \quad (12)$$

Hierbei ist darauf zu achten, dass die Pose des Referenzsystems M nicht mit dem Referenzsystem der Marker-Mittelpunkt Lokalisierung übereinstimmt. Die Position des Referenzsystems ist für die anschließende Positionierung ohne Relevanz, solange die Kenntnis über die verwendete Methode an die Positionierung weitergegeben wird. Die Koordinaten des Punktes M entsprechen, wie bei der Marker-Mittelpunkt Lokalisierung, der Translation der Transformation ${}^S T_M$. Neben der Translation sind Kenntnisse über die Orientierung bzw. der Rotation für die Bestimmung der Transformation ${}^S T_M$ notwendig. Die Rotation wird, genauso wie bei der Marker-Mittelpunkt Lokalisierung, durch einen Rotationswinkel, dem sogenannten Gierwinkel γ beschrieben. Dieser Gierwinkel kann aus den Schnittwinkeln der zuvor bestimmten Geraden berechnet

werden:

$$\gamma_r = \text{atan}(|a_r|), \quad \gamma_l = \text{atan}(|a_l|) \quad (13)$$

$$\gamma_{total} = \begin{cases} \frac{\gamma_r - \gamma_l}{2}, & b_r < 0, b_l > 0 \\ \frac{\gamma_r - \gamma_l}{2} + \frac{\pi}{2}, & b_r > 0, b_l > 0 \\ \frac{\gamma_r - \gamma_l}{2} - \frac{\pi}{2}, & b_r < 0, b_l < 0 \\ \frac{\pi}{4}, & \sum_{i=1}^{n_r} (x_{r,i} - \bar{x}_r)^2 = 0 \\ -\frac{\pi}{4}, & \sum_{i=1}^{n_l} (x_{l,i} - \bar{x}_l)^2 = 0 \end{cases} \quad (14)$$

Bei der Berechnung des Gier-Winkels γ_{total} muss ebenfalls, wie bei der Marker-Mittelpunkt Lokalisierung, zwischen verschiedenen Fällen unterschieden werden. Dies ist davon abhängig, wie der Sensor zu den Markern orientiert ist. Die unterschiedlichen Fälle sind in (14) definiert.

Die gesuchte Pose χ lässt sich anschließend wiederum aus der Transformation ${}^R T_M$ extrahieren. Ein funktionales Modell der Marker-Schnittpunkt Lokalisierung lässt sich der Abbildung 3 entnehmen.

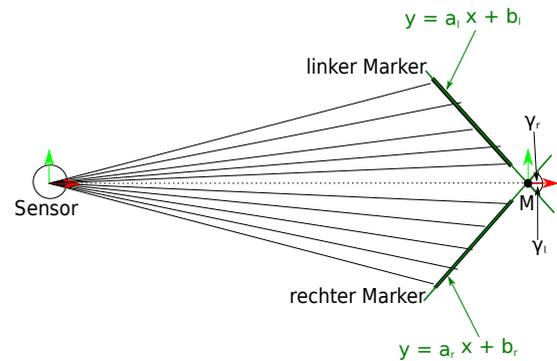


Abbildung 3 Funktionales Modell der Marker-Schnittpunkt Lokalisierung

5 FTS Positionierung

Neben der Bestimmung der aktuellen Pose des Roboters in Relation zum Referenzpunkt M , muss das FTS präzise an dem vorgegebenen Ziel positioniert werden. Dazu wird das Positionierungsmodul verwendet, welches mit Hilfe eines P-Reglers umgesetzt wurde. Dieser Regler berechnet zuerst die Differenz zwischen der aktuellen Pose χ und der Zielpose χ_{Ziel} , welche sich aus der Transformation ${}^M T_G$ extrahieren lässt. Der P-Regler nutzt die berechnete Differenz, um die Geschwindigkeitswerte für die x- und y-Richtung, sowie die Rotationsgeschwindigkeit $\dot{\theta}$ zu regeln:

$$\dot{\chi} = \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} = f(\Delta\chi) = K_p \cdot \begin{pmatrix} x_{Ziel} - x \\ y_{Ziel} - y \\ \theta_{Ziel} - \theta \end{pmatrix} \quad (15)$$

Für die Regelung der Geschwindigkeitswerte $\dot{\chi}$ werden Regelparameter, welche in der Diagonalmatrix K_p definiert sind, als gegeben angenommen. Im Anschluss werden die berechneten Geschwindigkeitswerte $\dot{\chi}$ an die Robotersteuerung weitergegeben.

6 Validierung

Die Methoden zur Lokalisierung und Positionierung wurden mit dem *Robot Operating System*, ROS, für das fahrerlose Transportsystem TTS der TRAPO AG implementiert [7]. Beide Module lassen sich innerhalb von ROS eigenständig aufrufen, wobei die FTS-Lokalisierung als eigenständiger Knoten und die FTS-Positionierung als Plugin des ROS-Paketes *Move Base* implementiert ist [8].

6.1 Das TTS der TRAPO AG

Anwendung finden die Module zur präzisen Lokalisierung mit anschließender Positionierung in autonomen Systemen der TRAPO AG. Das TTS entspricht einem flexiblen, modularen FTS, welches mit Mecanum-Rädern, also einem omnidirektionalen Antrieb, ausgestattet ist [9]. Wird dem TTS ein neues Ziel vorgegeben, wird der Roboter zuerst mittels Pfadplanung in die Nähe des Ziels navigiert. Sobald sich das FTS in der Nähe des Ziels befindet, werden die zuvor beschriebenen Module zur präzisen Lokalisierung und Positionierung verwendet. Um die Korrektheit der Methoden zu überprüfen, werden die Methoden im Folgenden mit Hilfe von simulativen, sowie realen LiDAR-Sensormesswerten validiert. Für die Validierung mit realen Sensormesswerten wurde ein FTS der TRAPO AG verwendet. Dieses FTS ist in der Abbildung 4 dargestellt.



Abbildung 4 Das TTS mit Rollenförderer-Modul

6.2 Ergebnisse

Die Validierung erfolgt mit simulierten Messwerten, wie auch mit realen Messwerten eines LiDAR-Sensors. Die Ergebnisse der Validierung werden im Folgenden erläutert.

6.2.1 Simulierte Bedingungen

Für die Validierung mittels simulierten LiDAR-Sensordaten wurde die Simulationsumgebung *Gazebo* für die Generierung der Messdaten des LiDAR-Sensors verwendet [6]. Um die Messwerte möglichst realistisch darzustellen, werden Messungenauigkeiten in die Simulation integriert. Dazu wurde auf die simulierten Messwerte eine Normalverteilung $N(\mu, \sigma^2)$ gelegt. Zur Validierung der Lokalisierungsmethoden wurde der Sensor aus unterschiedlichen Distanzen vor dem Markerpaar platziert. Die Entfernung reicht von circa 0,25 Meter bis 2,5 Meter. Die Markerpaare waren dabei in einem 90° Winkel zueinander platziert und der Winkel zwischen der Referenzebene und den Marker betrug jeweils 45° . Des Weiteren wurde für die

Validierung eine Markerbreite von 15 Zentimetern angenommen. Der Approximationsfehler der Position, welche für beide Methoden durch die Messungenauigkeiten des Sensors entsteht, ist für circa 500 Iterationen pro Methode und pro Distanz in Abbildung 5 dargestellt.

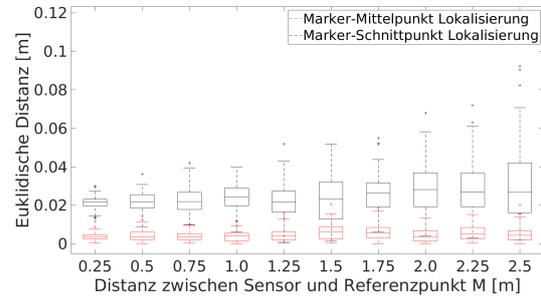


Abbildung 5 Ergebnisse der simulierten Positionsschätzung

Anhand der Boxplots in Abbildung 5 lässt sich erkennen, dass die Marker-Mittelpunkt Lokalisierung für die Approximation der Position robuster als die Marker-Schnittpunkt Lokalisierung gegen Messungenauigkeiten ist. Der zuvor beschriebene Fehler, welcher durch die Definition der Marker-Mittelpunkt Lokalisierung entsteht, hat demnach einen geringen Einfluss auf die Genauigkeit der Lokalisierung.

Für die Approximation des Gier-Winkels ist die Marker-Schnittpunkt Lokalisierung genauer und robuster gegen Messungenauigkeiten. Hierbei muss allerdings gesagt werden, dass die Ergebnisse der Marker-Schnittpunkt Lokalisierung von externen Faktoren, wie der Positionierung der reflektierenden Marker oder der Markerbreite abhängig sind. Des Weiteren ist auch der Winkel zwischen den Markern für die Genauigkeit der Marker-Schnittpunkt Lokalisierung ausschlaggebend. Die Ergebnisse der simulativen Validierung lassen sich Abbildung 6 entnehmen.

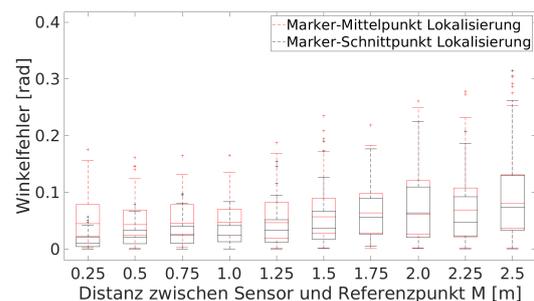


Abbildung 6 Ergebnisse der Schätzung des Gier-Winkels

6.2.2 Reale Bedingungen

Um das Verhalten der Methoden unter realen Bedingungen zu validieren, wurden des Weiteren reale LiDAR-Sensordaten zur Lokalisierung eines FTS verwendet. Da in diesem Fall die exakte Position des Roboters nicht bekannt ist, ist die Berechnung eines Fehlers nicht möglich. Dennoch können die zwei Methoden miteinander auf

Robustheit gegen Messunsicherheiten verglichen werden. Für den Vergleich wurde das Markerpaar in einer Entfernung von 1 Meter vor dem LiDAR-Sensor platziert. Die reflektierenden Marker, mit einer Markerbreite von circa 10 Zentimeter, wurden in einem 90° Winkel zueinander angeordnet. Anhand der Abbildung 7 lassen sich die zu-

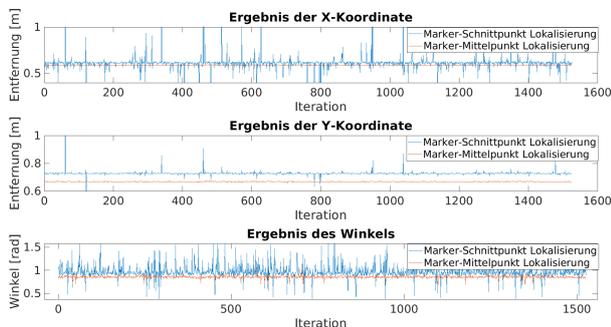


Abbildung 7 Ergebnisse der Lokalisierung mittels realen Messwerten

vor getroffenen Aussagen größtenteils bestätigen. Die Bestimmung der Position ist mit der Marker-Mittelpunkt Lokalisierung im Vergleich zur Marker-Schnittpunkt Lokalisierung robuster gegen Messungenauigkeiten. Mit realen Messwerten besitzt die Marker-Schnittpunkt Lokalisierung sowohl für die Positions-, sowie die Orientierung, größere Schwankungen als die Marker-Mittelpunkt Methode. Das kann daran liegen, dass externe Faktoren, wie zum Beispiel die Breite des Markers, einen Einfluss auf die Berechnung des Winkels mittels Marker-Schnittpunkt Lokalisierung haben. Aus diesem Grund ist die Marker-Mittelpunkt Methode der Marker-Schnittpunkt Methode zur Lokalisierung eines FTS für die zuvor beschriebenen Bedingungen zu bevorzugen. Die Ergebnisse der Validierung unter realen Bedingungen lassen sich der Abbildung 7 entnehmen.

7 Zusammenfassung

Eine präzise Indoor-Lokalisierung und -Positionierung von fahrerlosen Transportsystemen in kritischen Bereichen, wie zum Beispiel in der Nähe von Förderbändern, ist eine große Herausforderung der Industrie 4.0. Aufgrund hoher Flexibilitätsansprüche werden heutzutage flexible Lokalisierungsmethoden bevorzugt. Die Methoden bringen im Vergleich zu den statischen Methoden einen Genauigkeitsverlust mit sich, welcher in kritischen Situationen, wie zum Beispiel beim Be- und Entladen der Transportsysteme, zu Problemen führen kann. Aus diesem Grund werden gesonderte Methode in kritischen Bereiche, sogenannte Feinlokalisierung und -positionierung, eingesetzt. In dieser Arbeit wurden zwei Methoden zur präzisen Lokalisierung und Positionierung von FTS vorgestellt und auf Genauigkeit und Robustheit gegen Messungenauigkeiten miteinander verglichen. Beide Methoden benutzen zur Lokalisierung einen LiDAR-Sensor und reflektierende Marker als Umgebungsmerkmal. Anhand von Validierungen konnte gezeigt werden, dass die Marker-Mittelpunkt Lokalisierung der Marker-Schnittpunkt Lokalisierung zur präzisen

Bestimmung der Pose eines FTS zu bevorzugen ist. Dabei ist anzumerken, dass die Genauigkeit der Methoden von externen Faktoren, wie zum Beispiel der Markerposition, der Markerbreite oder der Intensitäten der Umgebung, beeinflusst werden, sodass die Ergebnisse von diesen Faktoren abhängig sind.

8 Ausblick

Die beschriebenen Methoden zur präzisen Lokalisierung und Positionierung bieten Potenzial zur Verbesserung. Hierzu lässt sich zum Beispiel eine robustere Berechnung der Pose durch genauere Filter erreichen. Neben der Robustheit der Methoden ist ebenfalls die Anwendbarkeit von großer Bedeutung. Die Methoden lassen sich lediglich mit den Sensordaten eines Sensors ausführen. Eine Erweiterung auf mehrere Sensoren wäre wünschenswert, um die gesamte Umgebung des FTS in die Lokalisierung und Positionierung mit einzubeziehen.

9 Literatur

- [1] Sheiner, M. & Bostelmann, R. (Hrsg.): *Literature Review of Mobile Robots for Manufacturing*. US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, 2015, S. 8ff.
- [2] Ullrich, G. (Hrsg.): *Fahrerlose Transportsysteme, Eine Fibel*. Wiesbaden: Springer-Verlag, 2014 ISBN 978-3-8348-2591-9, S. 4ff.
- [3] Hesse, S. & Schnell, G. (Hrsg.): *Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation*. Plauen: Springer-Verlag, 2014 ISBN 978-3-658-05866-1, S. 25ff.
- [4] Biswas, J. & Veloso, M. (Hrsg.): *Depth Camera Based Indoor Mobile Robot Localization and Navigation* 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation, RiverCentre, Saint Paul, Minnesota, USA, May 14-18, 2012
- [5] Luimula, M. & Säskilähti, K. & Partala, T. & Pieskä, S. & Alaspää J. *Remote navigation of a mobile robot in an RFID-augmented environment* Springer-Verlag, 06.06.2009, DOI 10.1007/s00779-009-0238-3
- [6] Open Source Robotics Foundation: *Gazebo, Robot simulation made easy* <http://gazebo.org>, aufgerufen am: 23.12.2020
- [7] Quigley, M. & Conley, K. & Gerkey, B. & Faust, j. & Foote, T. & Leibs, J. & Wheeler, R. & Ng, A. Y. *ROS: an open-source Robot Operating System* 2009, ICRA Workshop on open source software, Band 3, Ausgabe 3.2, Seiten 5 <http://robotics.stanford.edu/~ang/papers/icra09-ROS.pdf>
- [8] ROS Move Base: *Move Base* http://wiki.ros.org/move_base, aufgerufen am: 23.12.2020
- [9] TRAPO AG: *TRAPO AG - We move your success* <https://www.trapo.de/>, aufgerufen am: 23.12.2020