

Kosteneffiziente Verfahren zur Navigation von FTS

# Die Sensorik steht im Fokus

Durch die Nutzung neuer Navigationsverfahren werden Fahrerlose Transportsysteme (FTS) in Zukunft flexibler und kostengünstiger. Methoden, die in den letzten Jahren zur Steuerung von mobilen Robotern und unbemannten Drohnen entwickelt worden sind, können dazu beitragen, dass es den Fahrzeugen mittel- bis langfristig sogar möglich ist, ihnen unbekannte Areale zu durchqueren. Damit wird der Aufwand für die Abdeckung weitläufiger Einsatzumgebungen oder späterer Anpassungen und Erweiterungen des Systems erheblich reduziert.

■ Christian Connette

Eine der zentralen Komponenten in Fahrerlosen Transportsystemen (FTS) ist das Navigationssystem. Seine Aufgabe besteht darin, die aktuelle Position und Orientierung des Fahrzeugs zu bestimmen und – davon ausgehend – die zur Erreichung eines vorgegebenen Ziels notwendigen Fahrkommandos zu erzeugen. Dabei kommen meist hochwertige Sensoren zum Einsatz. Häufig machen diese einen erheblichen Teil der Kosten eines Fahrerlosen Transportfahrzeugs (FTF) aus. Die Möglichkeiten, die solche hochwertigen Sensoren bieten, werden jedoch nur selten voll ausgenutzt. Nachfolgend wird ein knapper Überblick über Verfahren gegeben, die kurz- bis mittelfristig einen erheblichen Mehrwert bei der Verwendung etablierter Sensoren bieten und mittel- bis langfristig eine deutliche Kostensenkung durch den Einsatz günstigerer Sensoren versprechen.

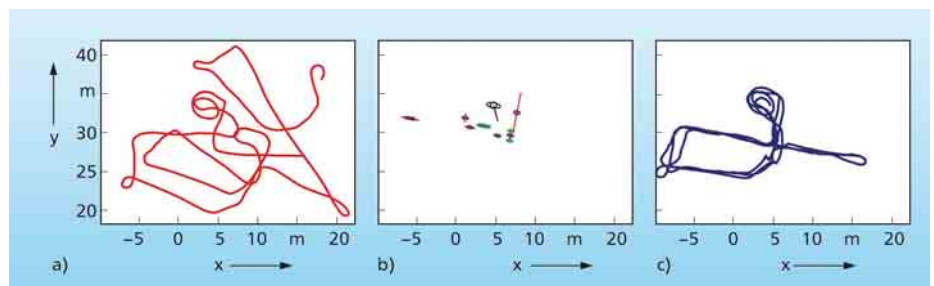
### Etablierte Verfahren

Grundlage der Positionsbestimmung ist heute meistens die Odometrie. Dabei wird auf Basis der Anzahl der Radumdrehungen die vom FTF zurückgelegte Strecke und letztlich die aktuelle Position des FTF berechnet. Vorteilhaft an diesem Verfahren ist, dass die benötigten Sensoren vergleichsweise kostengünstig sind, keine Kenntnis oder Änderung der Umgebung notwendig ist und die Messungen nicht durch äußere Einflüsse, wie zum Beispiel wechselnde Lichtverhältnisse, gestört werden können. Allerdings ist dieses Verfahren nicht langzeitgenau. Da die momentane Orientierung des Fahrzeugs sowie Fehlmessungen durch rutschende Räder nicht-linear in die Berechnungen eingehen, wird die Positionsschätzung mit der Zeit immer schlechter. Daher wird zur Positionsbestim-

mung im Normalfall zusätzlich auf Verfahren, wie optische oder induktive Leitlinien, magnetische Bodenmarken oder Reflektormarken, zurückgegriffen. All diese Verfahren sind mittlerweile langjährig erprobt und äußerst robust. Allerdings erfordert der Einsatz von Leitlinien und Bodenmarken einen erheblichen Installationsaufwand und im Fall von aufgemalten optischen Leitlinien eine kontinuierliche Wartung wegen Abnutzung. Dadurch werden die Erstinstallationen gerade bei weitläufigen Anlagen oft teuer. Ein weiterer Nachteil ist, dass die Fahrzeuge strikt an ihre Fahrspuren gebunden sind und somit spätere Anpassungen der Anlage einen zusätzlichen Aufwand erfordern. Der Einsatz von Reflektormarken zusammen mit über Kopfhöhe montierten Laserscannern bietet hier Abhilfe. Zwar ist auch hier zunächst ein gewisser Installationsaufwand nötig. Dafür bietet dieser Ansatz aber eine vergleichsweise große Flexibilität. Eine feste Bindung an vorab festgelegte Fahrspuren ist hier nicht mehr notwendig. Damit kann die gewünschte Bahn des FTF in begrenztem Umfang auch nach der Installation noch angepasst werden. Allerdings steigen durch den Einsatz des zusätzlichen Laserscanners die Kosten des Einzelfahrzeugs deutlich.

### Sensordatenfusion

Diese Kostensteigerung kann vermieden werden, wenn auf den Einsatz eines zusätzlichen Sensors verzichtet und stattdessen auf ohnehin am System vorhandene Komponenten zurückgegriffen wird. Beispielsweise können zum Personenschutz vorgesehene Laserscanner gleichzeitig zur Navigation genutzt werden. Aufgrund ihrer Montageposition knapp über dem Boden ist hier allerdings mit weit mehr Störungen, wie verdeckten Markern oder Reflexionen durch Gegenstände in der Umgebung, zu rechnen. Diesem Umstand muss durch die Nutzung entsprechend robuster Algorithmen, wie Kalman-Filter oder Partikel-Filter, Rechnung getragen werden. Diese Filter beruhen auf dem Konzept der Bayesschen Netze und Markow-Ketten und ermöglichen es, die Messunsicherheiten unterschiedlicher Sensoren in eine gemeinsame Schätzung von Position und Orientierung des Fahrzeugs zu fusionieren. Dabei wird die Kenntnis über das Systemverhalten sowie die Stärken und Schwächen der eingesetzten Sensoren genutzt. Über Schätzung von Mittelwert und Varianz wird die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Roboterposition errechnet. Geht eine Positionsmessung von einem weiteren Sensor ein, wird diese mit der gegenwärtigen



- a) nur mit Odometrie, ohne weitere Stützung
- b) momentane Abbildung der geschätzten lokalen Karte (grün: Kanten, blau und rot: Position und Ausdehnung von Wänden)
- c) resultierende Position mit Odometrie und Stützung durch lokale Merkmale (ohne vorab erstellte Karte)

① **Inspektions-roboter MIMROex für den Einsatz im Offshore-Bereich**



② **Prototyp einer „Mobilen Minibar“ auf FTF-Basis für das Hotel der Zukunft**

(Bilder: MLR, Fraunhofer-IPA)

gen Vorhersage abgeglichen. Auch hier werden wieder Mittelwert und Varianz betrachtet und unter Einbeziehung dieser Größen ein optimaler Kompromiss bestimmt. Der Filter zeigt damit ein situationsabhängiges Bandpassverhalten. So werden zum einen Langzeitfehler der Odometrie korrigiert, zum anderen werden Sprünge in der Positionsmessung, wie sie beispielsweise bei Fremdrelexion oder Verdeckung von Landmarken auftreten können, gefiltert.

### Navigation...

#### ...mithilfe natürlicher Landmarken

Solche Algorithmen bilden auch die Grundlage für Methoden, die auf eine Modifikation der Umgebung vollständig verzichten können. Sind aktuelle Informationen über den Grundriss des Gebäudes bzw. den Arbeitsbereich des FTS vorhanden, ist die Orientierung an „natürlichen“ Merkmalen möglich. Aus dem Entfernungsbild des Laserscanners können zum Beispiel Linien, Kanten oder Kreise extrahiert werden. Werden diese bestimmten markanten Punkten, wie z. B. Wandsegmenten, Ecken oder Rohrleitungen, zugeordnet, so kann der Roboter über einen Abgleich seiner Messungen mit der Karte seine Positionsschätzung korrigieren. Kritisch ist dabei meist der Abgleich zwischen Messungen und Karte. Weicht die tatsächliche Position des Roboters erheblich von der erwarteten ab oder befinden sich unbekannte Objekte, wie beispielsweise eine achtlos abgestellte Palette, in der Umgebung, kann es zu fehlerhaften Assoziationen kommen. Dort, wo hohe Genauigkeit gefragt ist, empfiehlt es sich demzufolge, zusätzliche Maßnahmen, wie Reflektor- oder Bodenmarken, vorzusehen. Wenn es dagegen darum geht, weite Strecken zu überbrücken, möglichst flexibel bei der Gestaltung der Fahrspuren zu sein oder eine Modifikation der Umgebung schlichtweg unerwünscht ist, bietet der Rückgriff auf natürliche Merkmale eine optimale Alternative. So wurde für die Navigation des vom Fraunhofer-IPA entwickelten Prototyps eines mobilen Roboters für die Inspektion von Offshore-Anlagen (MIMROex, Bild ①; s. S. 432) auf eine Kombination von natürlichen Landmarken und Reflektormarken zurückgegriffen. Auch die von der MLR System GmbH Ludwigsburg zusammen mit dem Fraunhofer-IPA für den Einsatz im Hotelbetrieb entwickelte „Mobile Minibar“ (Bild ②) navigiert mithilfe natürlicher Landmarken, um Modifikationen in der Umgebung zu vermeiden.

#### ...in unbekannter Umgebung

Mit neuen Entwicklungen lassen sich die Konzepte noch weiter ausbauen. Eines der zentralen Szenarien für die Forschung im Bereich der künstlicher Intelligenz und Robotik war in den vergangenen zwei Jahrzehnten die Steuerung mobiler Roboter in vollständig unbekanntem Umgebungen. Die in den zurückliegenden zehn Jahren entwickelten Ansätze sind u. a. die Grundlage für die autonome Navigation von Fahrzeugen, wie sie beispielsweise bei der Darpa Grand Challenge demonstriert wird. Zwar gilt dieses Problem mittlerweile als theoretisch gelöst, doch die gegenwärtigen Ansätze sind noch zu störanfällig, um im industriellen Umfeld zum Einsatz zu kommen. Einige der entwickelten Methoden könnten aber schon heute das Funktionsspektrum von FTF erheblich erweitern. So lässt sich die Odometrie z. B. durch das simultane Verfolgen von Position des Roboters und der relativen Position markanter, vorab unbekannter Merkmale in seiner näheren Umgebung erheblich verbessern. Damit können auch längere Strecken ohne zusätzliche Stützung zurückgelegt werden, und die Abstände zwischen Markern lassen sich vergrößern (Bilder ③ und ④). Sind die Umgebungsverhältnisse günstig und die Anforderungen an die Genauigkeit der Positionsschätzung nicht allzu hoch, können sogar ausgedehnte unbekannte Bereiche durchquert werden. Kartierung oder Anbringung von Markern wäre dann nur noch dort nötig, wo höhere Genauigkeit erforderlich ist. Voraussetzung für die Anwendung solcher Verfahren ist allerdings, dass das Navigationssystem des Fahrzeugs und damit auch die Planungs- und Regelroutinen eine Bewegung in unbekannter, sich dynamisch ändernder Umgebung ermöglichen. Auf dem vom Fraunhofer-IPA entwickelten Care-O-bot® 3 kommt beispielsweise eine Kombination aus globalem Planer und lokaler Bahnanpassung zum Einsatz. Dadurch wird es möglich, Engstellen unter Berücksichtigung der Geometrie des Fahrzeugs zu passieren und unbekannte statische und sich bewegende Hindernisse zu umfahren.

#### ...mit kostengünstigen Sensoren

Steht eher eine Kostensenkung als eine Erweiterung des Funktionsumfangs im Vordergrund, so können die o. a. Algorithmen genutzt werden, um mit preiswerteren, eventuell stärker fehlerbehafteten Sensoren vergleichbare Resultate wie mit sonst üblichen, hochwertigen Sensoren zu erzielen.

Mittlerweile werden beispielsweise 3D-Kameras für deutlich unter 1 000 € angeboten. Allerdings ist die Reichweite dieser Sensoren (rd. 7 m) kurz im Vergleich zu Laserscannern, und die Messungen sind deutlich stärker verrauscht. Um solche Sensoren zur Navigation einzusetzen, muss daher eine entsprechend dichte dreidimensionale Umgebungskarte vorliegen. Da die manuelle Anfertigung solcher Karten einen unverhältnismäßig großen Aufwand erfordern würde, kommen dafür nur automatische oder zumindest teilweise automatische Verfahren in Frage. Das gilt umso mehr, wenn Navigationsverfahren betrachtet werden, die sich auf natürliche Merkmale und Farbkameras stützen. In den letzten Jahren sind die Preise für hochauflösende Kameras erheblich gesunken. Gleichzeitig sind mächtige, frei zugängliche Programmbibliotheken wie OpenCV entstanden, die von Entwicklern und Wissenschaftlern aus Industrie und Forschung aktiv gepflegt und erweitert werden. Vorteilhaft ist auch, dass die von Farbkameras gelieferten Texturdaten komplementär zu den von Laserscannern oder 3D-Kameras bereitgestellten Entfernungsinformationen sind. Durch eine Kombination dieser Sensoren ließe sich daher die Robustheit der Navigation erheblich steigern. Langfristig liegt im Einsatz von Farbkameras bei Verzicht auf Laserscanner ein immenses Einsparpotenzial. Prinzipiell lässt sich festhalten: Je geringer die Anforderungen an die Positioniergenauigkeit sind, desto flexibler und letztlich günstiger kann die Navigation gestaltet werden. □

**Dipl.-Ing. Christian Connette**  
ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) in Stuttgart

