

# Kollaboration von autonomen Transportrobotern

03.02.2016, InSystems Automation GmbH, Dipl. Ing. Henry Stubert, MBA

## Einleitung

Transportroboter sind fahrerlose Transportfahrzeuge, welche nicht nur automatisiert fahren, sondern auf Grund ihrer Navigation mittels Umgebungsmerkmalen keine feste Spurführung haben. Den Transportrobotern wird lediglich der Zielpunkt übermittelt, zu dem sie fahren sollen. Den aktuellen Startpunkt, den optimierten Weg zum Ziel und die Geschwindigkeiten auf diesem Weg ermittelt der Transportroboter mit seiner eigenen Steuerung und an Hand der Karte der Umgebung autonom.

Transportroboter und fahrerlose Transportfahrzeuge werden hauptsächlich in der Produktionslogistik eingesetzt, um automatisch das richtige Material zum optimalen Zeitpunkt dem passenden Produktionsprozess zur Verfügung zu stellen oder zu entsorgen.

## Vorteile von autonomen Transportrobotern

Genau wie die seit etwa 2 Jahrzehnten etablierten Fahrerlosen Transportfahrzeuge FTF hat auch der Einsatz von Transportrobotern einige grundsätzliche Vorteile gegenüber stationärer Fördertechnik auf Basis von Bändern oder Rollenbahnen.

### ✓ Skalierbarkeit



### ✓ Wandelbarkeit



### ✓ Redundanz



### ✓ Platzbedarf



Abbildung 1: Vorteile FTF oder Transportroboter vs. stationärer Fördertechnik

Ein Flotte Transportroboter kann durch Hinzufügen weiterer Roboter leicht skaliert werden. Bei stationärer Fördertechnik bedeutet dies fast immer einen erheblichen Eingriff in die bereits installierte Technik und verursacht Stillstände des installierten Systems und somit der Produktion.

Besonders mit autonomen Transportrobotern ist der Wandel des Layouts der Produktionsprozesse leicht durchzuführen, da für diese ja lediglich die neuen Umgebungsmerkmale aufgenommen und die Zielpunkte verändert werden müssen.

Selbst ein geringfügiger teilweiser Ausfall einer Baugruppe (Antrieb, Sensor) der stationären Fördertechnik blockiert meist den gesamten Materialfluss. Bei fahrerlosen Transportfahrzeugen verteilt sich der Materialfluss zwar auf mehrere Fahrzeuge, auf Grund der festen Spurführung können defekte Fahrzeuge aber nicht immer umfahren oder überholt werden. Autonome Transportroboter dagegen werden mit den Algorithmen der Pfadplanung immer versuchen, eine Ausweichroute zu finden.

Für stationäre Fördertechnik muss dediziert Platz zur Verfügung gestellt werden. Transportroboter hingegen teilen den Platz auf den Gängen und vor den Maschinen mit den Menschen und temporären Hindernissen. Auf Grund der autonomen Pfadplanung, den kollaborierenden Fähigkeiten und einem standardisierten Personenschutz können Menschen und Hindernisse umfahren werden.

## Lokalisierung

Autonome Transportroboter lokalisieren sich direkt an Merkmalen der Umgebung. Ein im Roboter integrierter 2D Laser scannt stetig die Umgebung (Wände, Maschinen, usw.) Dabei ist der Laser in maximal 200 mm Höhe im Roboter montiert und parallel zum Boden ausgerichtet.

Übliche verwendete Laserscanner sind die Typen Sick S300 und Omron OS32C. Beide Typen können über einen Erkennungswinkel von maximal 270° ein 2D Profil ihrer Umgebung aufzeichnen und als Datenarray an den Steuerungs- PC des Transportroboters kommunizieren. Dabei wird je Winkelauflösung des Scanners (Omron 0,4°, Sick 0,5°) ein Wert für die Entfernung zu einem noch sichtbaren Objekt (maximal mögliche Messentfernung je Typ 15 bis 30 m) zugeordnet. Der Messfehler in der Entfernung zum Objekt liegt etwa bei 3% für beide Lasertypen. Die 2D Profile der Umgebung kann der Laser etwa alle 80ms zur Verfügung stellen.

Beide Typen von Laserscannern sind ursprünglich für den Personenschutz entwickelt und zertifiziert worden. Lediglich als Zusatzfunktion geben sie die für die Lokalisierung so interessanten 2D Daten der Umgebung mit aus. Bei allen Transportrobotern, welche nach Europeanorm EN1525 „Sicherheit von Flurförderzeugen - Fahrerlose Flurförderzeuge und ihre Systeme“ zertifiziert sein müssen, wird unabhängig von der Lokalisierungsfunktion auch die Personenschutzfunktion verwendet.

Zur relativen Positionierung muss jeder Transportroboter noch ein Odometriesystem besitzen. Es besteht aus den relativen Weginformationen der Inkrementalgeber der Antriebsräder sowie aus der relativen Winkeländerung des Roboters, welche aus einem gyroskopischen Sensor gelesen werden. Da die Ergebnisse der Odometrie sehr fehlerempfindlich sind, werden sie mit den Daten der oben beschriebenen Laserlokalisierung kombiniert.

Zur Inbetriebnahme wird der Transportroboter im manuellen Modus (zum Beispiel mit einem Joystick) in der Umgebung verfahren, in welcher er sich später automatisch bewegen soll. Dabei werden alle von Laser empfangenen 2D Profile in der Software aufgezeichnet und mit Hilfe der relativen Weginformationen aus der Odometrie zu einer Karte zusammengesetzt, welche die vom Roboter sichtbaren Objektkonturen der Umgebung in der Höhe des Lasers darstellt. Diese Karte kann vom Roboter heruntergeladen und mit entsprechenden Editoren nachbearbeitet werden. Mit einem Editor können der Karte unter anderem Einbahnstraßen und „NoGo“ Linien / Bereiche hinzugefügt werden. Hauptsächlich werden mit dem Editor aber die Zielpunkte positioniert. Jeder Zielpunkt erhält einen eindeutigen Namen sowie die Koordinaten (X, Y, Winkel).

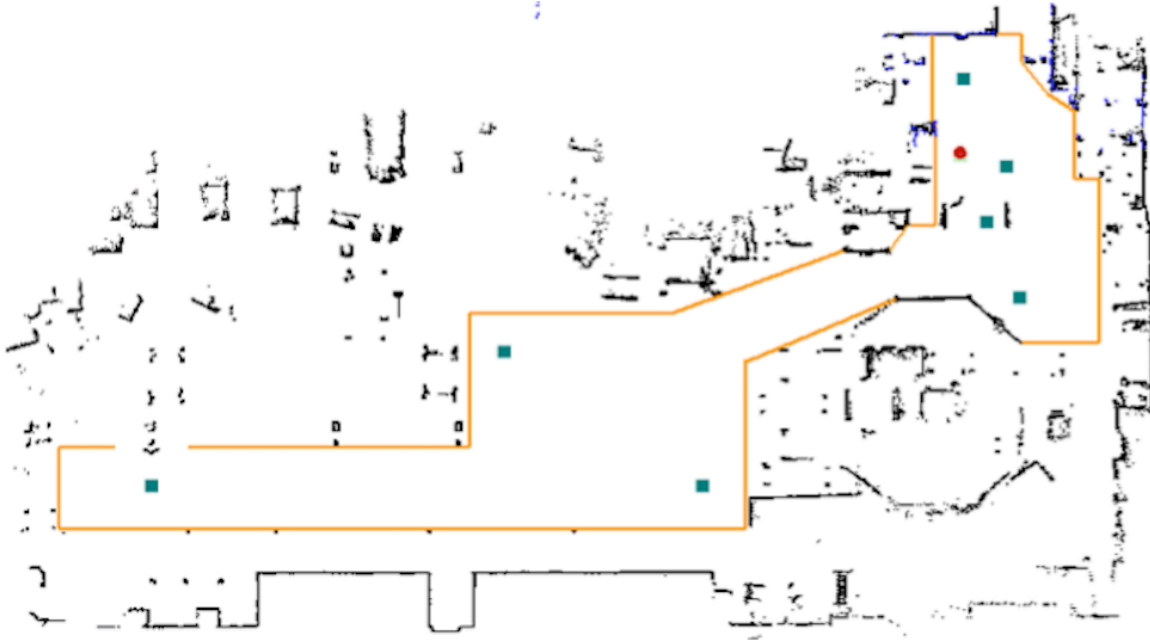


Abbildung 2: Karte mit Konturen, NoGo Linien und Zielpunkten (grün)

Die bearbeitete Karte mit den Zielpunkten wird anschließend in alle Roboter der Flotte geladen. Danach startet jeder Roboter eine initiale Lokalisierung um seinen aktuellen Standort zu ermitteln. Dabei sucht ein Algorithmus nach Übereinstimmung des aktuell von Laser empfangenen 2D Profil mit einem zusammenhängenden Teil der Umgebungskonturen in der Karte. Um Ungenauigkeiten zu kompensieren und das 2D Profil zu verbessern, wird das aktuelle 2D Profil grundsätzlich immer mit mehreren Samples der Laserdaten optimiert. Bei der initialen Lokalisierung ist die Anzahl dieser Samples meistens zusätzlich höher. Das Ergebnis des Algorithmus für die Übereinstimmung des Laserprofils mit einem Ausschnitt der Umgebungskonturen in der Karte sind nicht nur die Positionsdaten, sondern auch die Lokalisierungswahrscheinlichkeit (0 – 100%). Dieser Wert kann mit verschiedenen Schwellwerten für verschiedene Funktionen genutzt werden. So zum Beispiel für die erfolgreiche initiale Lokalisierung oder auch zur Detektion für das Verlieren der Lokalisierung.

Wenn der Roboter nun eine automatische Fahrt durchführt, wird abhängig von den relativen Weginformationen der Odometrie in zeitlichen Intervallen der oben beschriebene Lokalisierungsalgorithmus abgearbeitet. So lange dabei die Lokalisierungswahrscheinlichkeit über einem eingestellten Schwellwert liegt wird die aktuelle absolute Position des Roboters in der Karte als richtig angenommen und entsprechend zyklisch aktualisiert. Damit ist der Roboter stetig in der Karte lokalisiert.

## Pfadplanung

Im automatischen Betrieb wird dem Transportroboter von einer übergeordneten Software per WLAN ein Zielpunkt für eine automatische Fahrt mitgeteilt. Der Roboter muss nun an Hand der aktuellen Position und der Informationen aus der Karte autonom den besten Weg zum Zielpunkt planen.

Ein wichtiger Parameter für die Pfadplanung ist der Robotergröße (Breite in Fahrtrichtung). Der Algorithmus der Pfadplanung teilt die Karte mit einem Gitter in Planquadrate mit definierter Größe auf. Diese Größe sollte nicht größer als die Hälfte der Roboterbreite sein oder besser jeweils um ein vielfaches kleiner der Roboterbreite. An Hand der Konturen und den editierten Informationen in der Karte wird grundsätzlich festgestellt welche Quadrate frei befahrbar oder besetzt sind. Jedes besetzte Quadrat und alle dort angrenzenden Quadrate innerhalb der halben Robotergröße können nicht für den Weg geplant werden. Für alle frei befahrbaren Quadrate werden Kosten veranschlagt, welche progressive abnehmen, je weiter sie von besetzten Quadraten entfernt sind. Ab einer bestimmten Distanz von den besetzten Quadraten sind die Kosten gleich Null. Als Pfad wird nun ein möglichst glatter Spline auf den Quadraten mit den geringsten Kosten berechnet.



Abbildung 3: Transportroboter mit geplanten Pfad (lila Spline)

Da der Transportroboter in einer dynamischen Umgebung fährt und mit dieser kollaborieren soll, muss er auch möglichst dynamisch auf Hindernisse reagieren, welche nicht mit Hilfe der Karte planbar sind. Dafür wird die Strategie des „Dynamic Window Approach“ kurz DWA genutzt. Wenn der Roboter während der Fahrt in einem bestimmten Abstand Hindernisse erkennt, die nicht in der Karte sind, so werden diese Planquadrate ebenfalls als besetzt markiert und es werden Kosten verteilt. Da der Roboter aber weiter auf diese Hindernisse zufährt, muss die Kostenfunktion dynamisch abhängig von der aktuellen Geschwindigkeit und Beschleunigung sein. Mit dieser Dynamik soll unter Vermeidung von Kollisionen mit Hindernissen eine möglichst schnelle Anfahrt zum Zielpunkt erreicht werden.

Da Menschen oder andere Roboter noch dazu bewegte Hindernisse sind, wird die DWA zyklisch ausgeführt und auch der geplant Pfad immer wieder neu berechnet. Damit der Pfad nicht zu stark schwankt, wird der zuletzt berechnete Pfad kostentechnisch reduziert und somit bevorzugt. Auf Grund der Rechenintensität der Pfadplanung und der eingeschränkten Weitsicht wird nicht der gesamte Pfad bis zum Ziel berechnet sondern maximal bis zur Sichtweite des Lasers.

Letztlich kurz vor dem Ende einer Fahrt muss dann der Zielpunkt sichtbar frei von Hindernissen sein, da dort dann keine alternativen Pfade mehr möglich sind. Um den Zielpunkt möglichst genau zu erreichen, wird kurz vorher die Zusammenarbeit mit der Odometrie verstärkt.

## Zentrale Auftragsverwaltung

Unabhängig von der autonomen Lokalisierung und Pfadplanung koordiniert eine übergeordnete Software "Auftragsverwaltung" die Roboter der Flotte mit Transportaufträgen von Punkt zu Punkt im Layout. Sie überwacht auch den Batteriezustand und kann Aufträge zum automatischen Laden generieren.

Die Auftragsverwaltung verfügt über ein automatisches oder manuelles Interface zu den Produktions- und Lagerprozessen. Sie kann so Anforderungen zur Materialversorgung oder Entsorgung entgegennehmen. Wenn das Material, der Prozess und ein Transportroboter verfügbar sind, wird die Software einen konkreten Transportauftrag generieren und entsprechende Befehle an das Lager, den Prozess und einen dedizierten Transportroboter senden. Mit einigen Handshake Messages kann die Software dann auch die korrekte Ausführung und Reihenfolge der Transportaufträge überwachen. Die Zeiten und der Status aller Teilabläufe jedes Transportauftrags werden detailliert und dauerhaft in einer Datenbank gespeichert.

Eine optimale Auftragsverwaltung sollte aber nicht nur einfach Transportaufträge generieren und überwachen, sondern auch für eine optimale Abarbeitung der Aufträge und für eine maximale Auslastung der Flotte sorgen. Dabei geht es wesentlich auch um die Vermeidung von Leerfahrten. Je besser und zuverlässiger eine Flotte ausgelastet wird, umso geringer kann die Größe der Flotte sein. Damit verringern sich die Anschaffungskosten und die Kosten für den Unterhalt der Flotte.

Mit den folgenden Informationen kann die Auftragsverwaltung Regeln zur Optimierung der Flotte ausführen und auf deren Grundlage die Transportaufträge an die einzelnen Transportroboter verteilen:

- Aktueller Auftrag und Position der Transportroboter:
  - o Wenn leer: Aktuelle Position relativ zur Position des nächsten Auftrags
  - o Wenn beladen: Zielposition relativ zur Position des nächsten Auftrags
- Grundsätzliche Verkehrssituation aus der Karte (Engstellen, Einbahnstraßen)
- Intervall der Aufträge von bestimmten Prozessen und bestimmten Materialien (schwanken stark je nach Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit der Prozesse)
- Priorität bestimmter Aufträge (meist festgelegt)
- Kapazität der Batterie aus dem Roboter (ausreichend für den Auftrag?, kann mit dem Auftrag ein Nachladen kombiniert werden?)
- Aktuelle Verkehrssituation aus dem Roboter (Stau, Hindernisse)

Sowie eine Anforderung für einen Transportauftrag ansteht, prüft die Software, ob alle Voraussetzungen vorliegen und es einen freien Transportroboter in der Flotte gibt. Dann sendet die Software den Auftrag an den zur Verfügung stehenden Roboter. Gibt es mehrere freie Transportroboter in der Flotte, prüft die Software weiterhin welcher Roboter die besten Konditionen für den Auftrag haben könnte. Eine vorausschauende Vergabe von Aufträgen an einen Roboter, welcher gerade noch einen Auftrag abarbeitet, gibt es dabei nicht. Der Grund dafür ist die Komplexität der dann notwendigen Regeln und schwer vorher-sagbare dynamische Veränderungen im System nach der Vergabe der Transportaufträge. Gerade durch Staus und Hindernisse schwanken die Transportzeiten sehr stark und scheinbar chaotisch. Das heißt, die Vergabe von Aufträgen an bestimmte Roboter müsste eigentlich zyklisch immer wieder in Frage gestellt werden.

## Kollaborierende Auftragsverwaltung

Die Idee dieser Auftragsverwaltung besteht darin, dass die Transportroboter kollaborierend selbst die Transportaufträge annehmen. Dabei kommt der zentralen Software im Wesentlichen die Aufgabe zu, das meist sehr kundenspezifische Interface zum Prozess darzustellen. Sie nimmt die Anforderungen zur Materialversorgung oder Entsorgung entgegennehmen und postet sie in einem Broadcast an alle Transportroboter der Flotte. Die Roboter sollten dann auf Grund ihrer jeweils eigenen Informationen ermitteln, zu welchen Kosten sie diesen potentiellen Auftrag durchführen könnten. Jeder Roboter postet per Broadcast seine Kosten für den potentiellen Auftrag. Der Roboter mit den geringsten Kosten nimmt den Auftrag verbindlich an. Jeder Roboter verwaltet eine Tabelle aller potentiellen und verbindlichen Aufträge der Flotte. Zu jedem Auftrag kennt er die jeweils günstigsten Kosten der anderen Roboter. Selbst überprüft er zyklisch die eigenen Kosten für jeden Auftrag in der Tabelle, da sich diese auf Grund der Dynamik in der Umgebung ständig ändern können. Ändern sich dann die Kosten eines Auftrags, den der Roboter bereits verbindlich besitzt, so muss er das der Flotte mitteilen und die Kosteninformationen für alle aktualisieren sich. Für potentielle Aufträge besteht die Mitteilungspflicht nur, wenn die Kosten unter die Kosten des Roboters sinken, welcher den Auftrag verbindlich besitzt. Somit kann es zu einem dynamischen Auftragswechsel kommen, welcher optimierend auf das Gesamtsystem wirkt.

Die Verfügbarkeit von Robotern muss nicht mehr zentral an- oder abgemeldet werden. Roboter die aus bestimmten Gründen nicht verfügbar sind, werden keine Kostenmeldung abgeben und stehen somit einfach nicht in den Tabellen der Auftragsverwaltung.

Die Idee unterstützt auch den Vorteil der Skalierbarkeit einer Flotte von Transportrobotern. Beim Hinzufügen von weiteren Robotern muss das nicht durch eine zentrale Auftragsverwaltungssoftware berücksichtigt werden. In Zukunft könnten Weiterentwicklungen von Robotern beim Skalieren zu einer inhomogenen Flotte aus Transportrobotern mit verschiedenen Eigenschaften und Fähigkeiten (Lastaufnahme, Geschwindigkeit, Ladezeit,...) führen. Diese würden dann aber durch die unterschiedlichen Kosten sofort im Gesamtsystem berücksichtigt und führen automatisch zu einer optimierten Kollaboration zwischen „alt und jung“.

## CrEst

Ob die Idee der kollaborierenden Auftragsverwaltung funktioniert und welches Optimierungspotential in ihr liegt, soll unter anderem durch das Projekt „Collaborative Embedded Systems“ kurz „CrEst“ erforscht werden.

Die Softwarefunktionen der kollaborierenden Auftragsverwaltung sollen durch eine Simulation getestet werden. Um das tatsächlich mögliche Optimierungspotential für eine Flotte abzuleiten, wird InSystems Automation die Testergebnisse mit einem realen System eines Kunden in der Industrie abgleichen. Dabei soll auf einen 3 jährigen Datenbestand (SQL DB) tatsächlich stattgefundenen Transportaufträge mit einer Flotte von 8 Transportrobotern an 16 Produktionsmaschinen zurückgegriffen werden.

Die Daten der Anforderungen zur Materialversorgung oder Entsorgung können als Input für die Simulation der kollaborierenden Auftragsverwaltung auf den Robotern genutzt werden. Als Output der Simulation sollten wiederum alle simulierten Transportaufträge in eine identische Datenbank geschrieben werden. So kann letztlich mit der Analyse beider Datenbanken die Effizienz des aktuell zentral verwalteten Transportsystems mit der Effizienz des simulierten kollaborierenden Transportsystems verglichen werden.