

Jan Schattenberg, Thomas Dopichay und Thorsten Lang

comRoBS – Flexible Forschungsplattform für den kooperativen Maschinenbetrieb

Ernteszenarien sind ein anschauliches Beispiel für die intensive Zusammenarbeit mehrerer Maschinen. Zur Erforschung der grundlegenden Strukturen im kooperativen Maschinenbetrieb verfügt das Institut für Landmaschinen und Fluidtechnik (ILF) der TU Braunschweig über mehrere autonome Feldroboter. Mit ihnen werden die am ILF erarbeiteten Strategien und Algorithmen praktisch erprobt. In einem ersten Projekt ist das Ernteszenario eines Mähdreschers sowie eines Feldhäckslers abgebildet worden. Neben Algorithmen zur kooperativen Steuerung der Fahrzeuge, geeigneten Kommunikationsstrukturen und Ansätzen zur Bahnplanung bei mehreren Maschinen auf einem Feld sind auch Möglichkeiten zur Parallelführung einer Erntemaschine und eines Transportgespanns untersucht worden.

Schlüsselwörter

Fahrzeugführung, Kommunikationsstrukturen, kooperativer Maschinenbetrieb, Mehrmaschinenbedienung, Robotik, Relativpositionierung

machines, suitable communication structures, approaches for path planning of several machines on the same field as well as systems for the parallel guidance of a harvester and a transportation unit.

Keywords

Vehicle guidance, communication structures, cooperating machinery, multi machine control, robotic, relative positioning

Abstract

Schattenberg, Jan; Dopichay, Thomas and Lang, Thorsten

comRoBS – a flexible platform for research on cooperating machinery

Landtechnik 65 (2010), no. 3, pp. 217-219, 3 figures, 1 table, 2 references

Harvesting scenarios are an obvious example for the intensive cooperation of several machines. For research on basic structures of cooperative machine operations the Institut für Landmaschinen und Fluidtechnik der TU Braunschweig (ILF) has available several autonomous field robots, which have been used to prove the developed strategies and algorithms. A harvesting scenario for a combine as well as for a forage harvester has been illustrated in a first project. In focus of research were: algorithms for the cooperative control of the

Die zunehmende Automatisierung mobiler Maschinen fördert die Intention, auch den kooperativen Maschinenbetrieb zu automatisieren. Um diese Idee weiter zu verfolgen, wurde am Institut für Landmaschinen und Fluidtechnik der TU Braunschweig eine Roboter-Plattform sowie eine erste Applikation zur Erforschung der grundlegenden Zusammenhänge im kooperativen Maschinenbetrieb entwickelt. Im ersten Teil dieses Artikels wird der mechanische Aufbau und das Sensor- und Softwarekonzept der Roboter-Plattform kurz vorgestellt. Im zweiten Teil wird auf die Applikation zur Umsetzung des kooperativen Maschinenbetriebs eingegangen.

Aufbau und Technik der comRoBS

Die comRoBS (cooperating mobile Robots Braunschweig) sind eine Eigenentwicklung des ILF und ermöglichen den Einsatz in unterschiedlichsten Umgebungen sowohl im Indoor- als auch im Outdoorbereich [1]. Die wesentlichen technischen Daten können **Tabelle 1** entnommen werden.

Das elektronische System der comRoBS lässt sich in einen High-Level- und einen Low-Level-Bereich unterteilen, die über einen CAN-Bus miteinander verbunden sind. Die Rechenleistung des High-Level-Bereichs ist auf eine MicroAutoBox (Fa. dSPACE) und einen Mini-PC auf Intel-Atom-Basis aufgeteilt. Im Low-Level-Bereich werden standardisierte Eigenent-

Tab. 1

Technische Daten der comRoBS

Table 1: Technical specifications of comRoBS

Länge Length	600 [mm]	Motorleistung Engine power	250 [W]
Breite Width	350 [mm]	Antrieb Drive	Allrad 4WD
Leergewicht Empty weight	20 [kg]	Geschwindigkeit Velocity	max. 5,5 [m/s]
Zuladung Payload	max. 20 [kg]	Einsatzdauer Operating time	max. 4 [h]
Lenkung Steering	Allrad All-wheel	Bordspannung On-board voltage	24 [V]

wicklungen, sogenannte Low-Level-Boxen, eingesetzt, welche die Hardware ansteuern und die Sensordaten einlesen. Für die Kommunikation zwischen den Fahrzeugen wird der ZigBee Funknetz-Standard genutzt, welcher aufgrund der geringen Latenzen auch zum Austausch von Steuerungsdaten zwischen mehreren Robotern genutzt werden kann. Ein 2-D-Positionsbestimmungssystem (LPR, Fa. Symeo) liefert neben der reinen Ortsinformation in XY-Koordinaten auch Informationen zur Ausrichtung und zur Geschwindigkeit. Zur zweidimensionalen Umgebungserfassung ist an jedem Fahrzeug ein Laserscanner (Firma Sick) montiert (**Abbildung 1**).

Kooperativer Maschinenbetrieb

Die comRoBS werden genutzt, um Algorithmen und Kommunikationsstrukturen für die kooperative und autonome Zusammenarbeit mehrerer Maschinen während eines Ernteprozesses zu entwickeln und zu untersuchen. In einem ersten Projekt wurden die Ernteprozesse eines Mähdreschers (sequenzielles Überladen) sowie eines Feldhäckslers (kontinuierliches Überladen) mit jeweils einer zugehörigen Transporteinheit betrachtet und abgebildet [2]. Dafür waren grundlegende Möglichkeiten zur koordinierten Steuerung der beteiligten Fahrzeuge zu entwickeln mitsamt den zugehörigen Kommunikationsregeln, den Strategien zur Bahnplanung unter Beachtung einer Kollisionsvermeidung sowie den Methoden zur automatischen bzw. autonomen Parallelführung während des Überladens.

Abb. 1



Flexible Forschungsplattform comRoBS. Foto: ILF

Fig. 1: Flexible platform for research comRoBS

Steuerung

Die Erntemaschine fungiert als Master, welcher der Transporteinheit, dem Slave, relevante Informationen und Steuerbefehle übermittelt. Alle das Feld beschreibenden Parameter sind zentral auf dem Master hinterlegt und werden vor Aufnahme der Feldbearbeitung an den Slave gesendet. Im Anschluss begibt sich der Master zur ersten Fahrspur, die zu bearbeiten ist und beginnt den Erntevorgang. Unter Verwendung fiktiver Bestands- und Maschinenparameter sowie der zurückgelegten Fahrtstrecke wird ein virtueller Füllstand gebildet. Ähnliche Berechnungsvorschriften werden im Umkehrschluss genutzt, um den Zeitpunkt und den Ort zu berechnen, an dem der Tank vollständig gefüllt sein wird und an dem somit ein Überladeprozess spätestens beginnen muss. Diese Informationen sendet der Master an den Slave, der daraufhin seine Bahn zu den Koordinaten des Rendezvous und den Zeitpunkt seiner Anfahrt berechnet. Im Fernbereich berechnen demnach beide Fahrzeuge ihre jeweiligen Bahnen selbstständig.

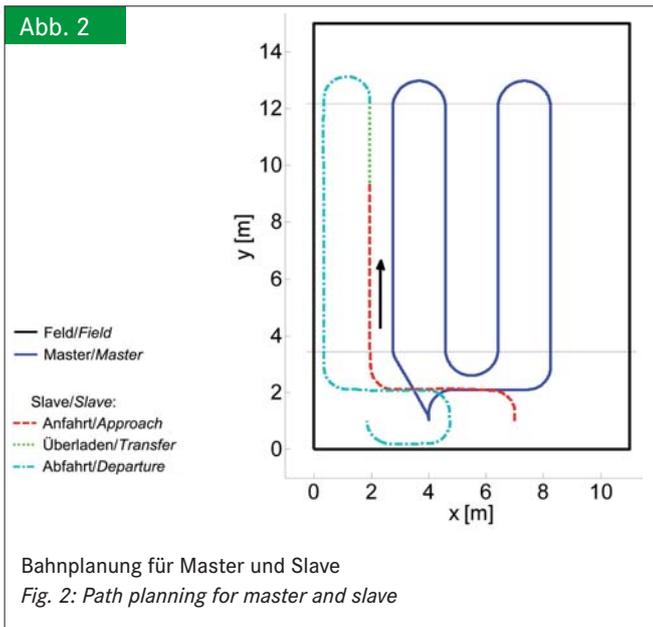
Im Nahbereich ist das sichere Rendezvous der Fahrzeuge von besonderer Bedeutung. In der letzten Phase seiner Anfahrt nähert sich der Slave dem Master auf einer parallelen Bahn von hinten. Aufgrund seiner höheren Fahrgeschwindigkeit überholt der Slave den Master und kann mit dem Laserscanner des Masters erkannt werden. Mit dem Erkennen ist das Rendezvous vollzogen und der Master übernimmt bis zum Ende des Überladens die Steuerung des Slaves. Nach der vollständigen Entleerung seines Tanks beendet der Master den Überladevorgang und der Slave begibt sich selbstständig zurück zum Vorgewende. Dort übergibt er seine Ladung an ein weiteres Transportfahrzeug und steht im Anschluss für einen erneuten Überladevorgang zur Verfügung.

Zur Erprobung aller Algorithmen und Funktionen wurde unter Matlab/Simulink ein Simulationsmodell entwickelt, in welchem die comRoBS über parametrierbare Einspurmodelle abgebildet sind. Dies ermöglicht eine einfache Analyse des gesamten Systemverhaltens im geschlossenen Regelkreis und damit ein frühzeitiges Erkennen sowie Beheben von Fehlfunktionen vor dem eigentlichen Einsatz auf den comRoBS.

Bahnplanung und Kollisionsvermeidung

Unter Berücksichtigung der bekannten Feldgeometrie, der Arbeitsbreite der Erntemaschine sowie der Mindest-Wenderadien der beteiligten Fahrzeuge wird das Feld in die Bereiche „Vorgewende“ und „zu bearbeitendes Feld“ eingeteilt. Für jeden Bereich lässt sich eine Mindestanzahl möglicher Fahrmanöver bestimmen, aus denen alle Bahnen für den Master und den Slave zusammengesetzt werden können. Zu Beginn des Einsatzes berechnet der Master seine Bahn zur Feldbearbeitung vollständig. Diese ist somit für weitere Applikationen nutzbar, wie z. B. die Kollisionsvermeidung. Der Slave berechnet seine Bahn hingegen für jede An- und Abfahrt neu und kann damit auf veränderte Randbedingungen reagieren. **Abbildung 2** zeigt exemplarisch die vollständige Bahn des Masters und die Bahn des Slaves für dessen erste An- und Abfahrt.

Abb. 2



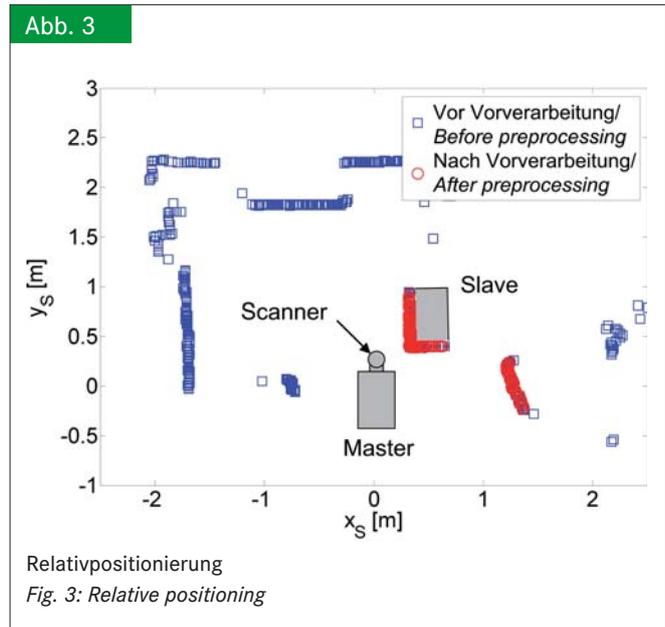
Die Kollisionsvermeidung umfasst drei Ebenen. Zunächst werden im Rahmen der Bahnplanung die Fahrgassen zur An- und Abfahrt des Slaves so gelegt, dass sich möglichst wenige Schnittpunkte zur bekannten Bahn des Masters ergeben. Ist ein Kreuzen der Bahnen unvermeidbar, so wartet der Slave auf die Freigabe des kritischen Bahnabschnitts durch den Master. Nutzen beide Fahrzeuge über einen längeren Zeitraum ähnliche Fahrwege, so werden in der zweiten Ebene die Geschwindigkeiten durch eine übergeordnete Steuerung gezielt gestaffelt. Indem die Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs höher gewählt wird als die des folgenden, werden Kollisionen vermieden. Auf der dritten und untersten Ebene wird permanent der Abstand beider Fahrzeuge berechnet und die Maschinen bei Kollisionsgefahr gestoppt.

Parallelführung

Ab dem Zeitpunkt eines Rendezvous bis zum Ende des Überladens steuert der Master den Slave. Zur Ermittlung der Relativposition nutzt er den an seiner Fahrzeugfront befestigten Laserscanner. In einer Vorverarbeitung der Scannerdaten werden zunächst alle unwichtigen Messpunkte ausgeschlossen. Dies sind beispielsweise Punkte, die weit vom Master entfernt sind und nicht auf der aktuellen Überladeseite liegen. **Abbildung 3** zeigt das Ergebnis in einer stark strukturierten Umgebung. In den verbleibenden, rot dargestellten Messpunkten werden im Anschluss mit einem Split-And-Merge-Algorithmus Geraden gesucht. Im letzten Schritt wird deren Länge und relative Lage mit der bekannten Kontur des Slaves verglichen. Ist die Kontur des Slaves im jeweiligen Datensatz enthalten, sind dessen relative Ausrichtung und die relative Lage seines Bezugspunkts berechenbar.

Die Steuerbefehle für den Slave werden auf Basis einer Punktverfolgung und einer Längsregelung generiert. Durch die Punktverfolgung wird der Slave auf einen imaginären Zielpunkt ausgerichtet, der eine bestimmte Distanz vor der Soll-Po-

Abb. 3



sition liegt. Die Geschwindigkeit des Slaves ergibt sich aus zwei Anteilen. Zum einen wird die theoretische Sollgeschwindigkeit aus der bekannten Geschwindigkeit des Masters und der aktuell befahrenen Bahnkrümmung berechnet und vorgesteuert, zum anderen wird die Abweichung zur Sollposition permanent berechnet und einem Positionsregler zugeführt.

Schlussfolgerungen

In einem ersten Projekt konnten die comRoBS aufgrund Ihres flexiblen Aufbaus und Ihres breit aufgestellten Sensorkonzeptes erfolgreich zur Erforschung und Erprobung verschiedener kooperativer Szenarien eingesetzt werden. Es wurde ein Master-Slave Konzept zur Steuerung der beteiligten Maschinen entwickelt, in Simulationen getestet und mittels der comRoBS im praktischen Versuch erprobt. Neben Ansätzen zur Bahnplanung und Kollisionsvermeidung, welche auf einer Trennung der geplanten Fahrwege basiert, wurden auch Methoden zur Parallelführung während des Überladevorgangs betrachtet. Die Ergebnisse sind viel versprechend und lassen sich besonders im Bezug auf die Themen Kommunikation und kooperative Bahnplanung auf reale Szenarien und Maschinenschwärme übertragen.

Literatur

- [1] Robert, M.: Konzeption einer Steuerung von autonomen Feldrobotern für kooperative Arbeitsprozesse. Diplomarbeit. Technische Universität Braunschweig, 2008
- [2] Dopichay, T.: Kooperative automatische Fahrzeugführung für landwirtschaftliche Prozesse. Diplomarbeit. Technische Universität Braunschweig, 2009

Autoren

Dipl.-Ing. Jan Schattenberg und **Dipl.-Ing. Thomas Dopichay** sind wissenschaftliche Mitarbeiter am Institut für Landmaschinen und Fluidtechnik (ILF) der TU Braunschweig (Leiter: **Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. H.-H. Harms**), Langer Kamp 19a, 38106 Braunschweig, E-Mail: j.schattenberg@tu-bs.de und t.dopichay@tu-bs.de

PD Dr.-Ing. Thorsten Lang ist Privatdozent und stellvertretender Leiter des ILF