

Xi Zhang, Marcus Geimer, Ludwig Grandl, Markus Ehrl und Patrick Noack

Elektronische Deichsel für landwirtschaftliche Arbeitsmaschinen

Der folgende Artikel stellt eine elektronische Deichsel für landwirtschaftliche Arbeitsmaschinen vor. Damit kann ein unbemanntes landwirtschaftliches Fahrzeug einem Führungstraktor folgen und die gleichen landwirtschaftlichen Arbeiten leisten. Es wurde nicht nur das Parallelfahren mit vorgegebenem seitlichem Versatz untersucht, sondern auch das Umfahren von Hindernissen und das Wenden am Vorgewende. Die mithilfe der RTK-GPS-Systeme bestimmten Positionen des Führungstraktors wurden verwendet, um die Referenzlinie für das geführte Fahrzeug zu berechnen. Ein Spurregler sorgte für die genaue Führung der unbemannten Maschine entlang der Referenzlinie. Zusätzlich zur Untersuchung der Spurführung wurde ein Sicherheitskonzept entworfen.

Schlüsselwörter

GPS-Navigation, Maschinenführung und -steuerung

Keywords

GPS navigation, machine guidance and control

Abstract

Zhang, Xi; Geimer, Marcus; Grandl, Ludwig; Ehrl, Markus and Noack, Patrick

Electronic towing bar system for agricultural machines

Landtechnik 65 (2010), no. 4, pp. 256-260, 5 figures, 1 table, 6 references

This paper presents an electronically controlled towing bar system, which will enable a driverless agricultural vehicle to follow a leading tractor to accomplish the same farming process. Considered have been not only the follow-up motions with given lateral and longitudinal offsets but also the problems such as avoiding obstacle and turning at the end of the field. With the aid of RTK-GPS-systems the position of the leading tractor was determined in order to calculate the desired course for the following one. A tracking controller was responsible for an accurate guidance of the driverless following tractor along the desired course. Considerations about the safety of the whole towing bar system were issued in this paper, too.

Der globale Wettbewerb um eine höhere Produktivität in der Landwirtschaft erfordert Effizienzsteigerungen durch Automatisierung von landwirtschaftlichen Arbeitsprozessen. Unter anderem muss die Zusammenarbeit zwischen Maschinen während der Produktionsprozesse weiterentwickelt werden. In diesem Zusammenhang wird die GPS-Navigation immer intensiver in der modernen Landtechnik eingesetzt, um den Anforderungen an präzises Arbeiten zu entsprechen und um eine automatische Führung der landwirtschaftlichen Arbeitsmaschinen zu ermöglichen.

In den vergangenen zehn Jahren wurden zahlreiche Forschungsarbeiten zur Entwicklung automatisierter landwirtschaftlicher Arbeitsmaschinen durchgeführt. So wurde ein automatisches Lenksystem entwickelt, um einen John Deere 7800 Traktor entlang einer vorgegebenen geraden Linie mit einem durchschnittlichen Spurfehler von ca. 2 cm zu führen [1]. Ein anderer Ansatz war, einen autonomen Feldroboter mithilfe von RTK-GPS und Gyroskop zu entwickeln [2]. Solche Feldroboter mit automatischen Spurführungssystemen sind zwar in der Lage, entlang einer Leitlinie zu navigieren; allerdings beschränkt sich die Anwendung bisher ausschließlich auf das Laborumfeld, wo Hindernisse und andere sicherheitsrelevante Probleme beherrschbar sind.

Um eventuelle Sicherheitsprobleme in der realen landwirtschaftlichen Umgebung in den Griff zu bekommen, wurden viele Hightech-Sensoren zur Überwachung des Umfelds verwendet. In [3] wurde ein Navigationssystem vorgestellt, das auf maschinellem Sehen basiert. Dabei wurde in der Fahrerkabine einer autonomen Erntemaschine eine Kamera installiert. In den letzten Jahren wurden in selbstfahrenden Fahrzeugen aus Sicherheitsgründen immer mehr Laser (Light amplification by stimulated emission of radiation) und Ladar (Laser detection and ranging) zur Erkennung von Hindernissen angewendet.

In [4] wurde Ladar zur Navigation eines kleinen Feldroboters durch eine Obstplantage eingesetzt. Dennoch haben sich die meisten Lösungen nur unter Laborbedingungen bewährt. Tests unter realen Feldbedingungen haben gezeigt, dass eine automatisch geführte Landmaschine zwar den Fahrer unterstützen, ihn aber aus Sicherheitsgründen nicht komplett ersetzen konnte. Einige Lösungen, deren Robustheit im Feldtest nachgewiesen wurde, sind sehr teuer und deswegen noch weit entfernt von einer Vermarktung.

Vor diesem Hintergrund wird ein elektronisch gesteuertes Deichselssystem aus zwei Landmaschinen als Zwischenschritt auf dem Weg zur vollautonomen landwirtschaftlichen Arbeitsmaschine gesehen. Da ein Fahrer in einem der beiden Landmaschinen sitzt, lässt sich das oben genannte Sicherheitsproblem einfach lösen, ohne auf teure Sensoren oder komplizierte Algorithmen angewiesen zu sein. Im Folgenden wird eine Methode zur Entwicklung eines solchen Deichselystems für landwirtschaftliche Arbeitsmaschinen vorgestellt. Basis dafür sind zwei handelsübliche Traktoren, die über eine Funkstrecke miteinander gekoppelt werden. Im Einsatz auf dem Feld verrichten der bemannte Führungstraktor und der unbemannte Folgetraktor in einem festgelegten seitlichen Abstand und Versatz nach hinten die gleiche Arbeit; normalerweise sind hierfür zwei Fahrer erforderlich.

Ausrüstung und Methode

Abbildung 1 zeigt eines der beiden Versuchsfahrzeuge, die für die Entwicklung der elektronischen Deichsel eingesetzt wurden. Der führende sowie der geführte Traktor sind beide Fendt-Modelle vom Typ 936 Vario mit 265 kW und Allradantrieb; beide sind 5,65 m lang, 2,75 m breit und 3,37 m hoch. Das Gerät zur Ermittlung der Position des führenden Traktors unterscheidet sich von dem des geführten Traktors. Der führende Traktor verwendet ein Trimble Navigationssystem der Firma geo-konzept GmbH. Mit dem AgGPS 252 GPS-Empfänger, der auf dem Dach der Fahrkabine angebracht wurde, und dem 450 MHz Funkgerät, das die RTK-Korrektursignale in 1 Hz Datenrate empfängt, erreicht die Positionsermittlung eine Genauigkeit mit Abweichungen von weniger als 2,5 cm. Anhand der Daten aus dem GPS-Empfänger und aus den internen Sensoren

werden die Positionsdaten weiter durch den Navigationscontroller in der Fahrkabine korrigiert, wodurch die Roll-, Nick- und Gierbewegungen der Landmaschine während der Messung ausgeglichen werden können.

Im geführten Traktor war bereits vor Versuchsbeginn ein proprietäres Navigationssystem der Firma Fendt zur Messung der Fahrzeugposition installiert. Dieses System ist eine optionale Ausrüstung des Fendt 936 Vario Traktors und kann den von der Neigung des Bodens verursachten Positionierungsfehler korrigieren. Ein Gyroskop ist auch in diesem Auto-Guide-System integriert, sodass die Positionierung die gleiche Genauigkeit wie das Trimble-System erreichen kann. Beide Traktoren verfügen über einen Industrie-PC, der das GPS-Messgerät mit dem Traktorsteuergerät verbindet. Dieser Industrie-PC setzt sich aus einer 1 GHz PowerPC Prozessorkarte und einigen I/O Karten zusammen, die über CAN-BUS (Controller Area Network) bzw. serielle Schnittstellen mit externen Geräten kommunizieren können. Mithilfe einer am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) entwickelten Software kann eine dSPACE-Autobox die Datenerfassung, Zustandüberwachung und -steuerung in Echtzeit ausführen.

In **Abbildung 2** wird die Methode zur Realisierung des Deichselsystems für zwei Traktoren illustriert. Dabei wird eine virtuelle Koppelung zwischen den beiden Traktoren hergestellt, um die Beziehung zwischen einem führenden und einem unbemannten, geführten Traktor anschaulich darzustellen. Die Koppelung funktioniert durch eine speziell entwickelte Steuerung, mit der die bestehende Steuerung in den Traktoren ergänzt wird. Der führende Traktor empfängt seine Positionsdaten von GPS-Satelliten und sendet diese über Funk an den geführten Traktor, der diese Navigationsdaten zur eigenen Spurplanung verwendet.

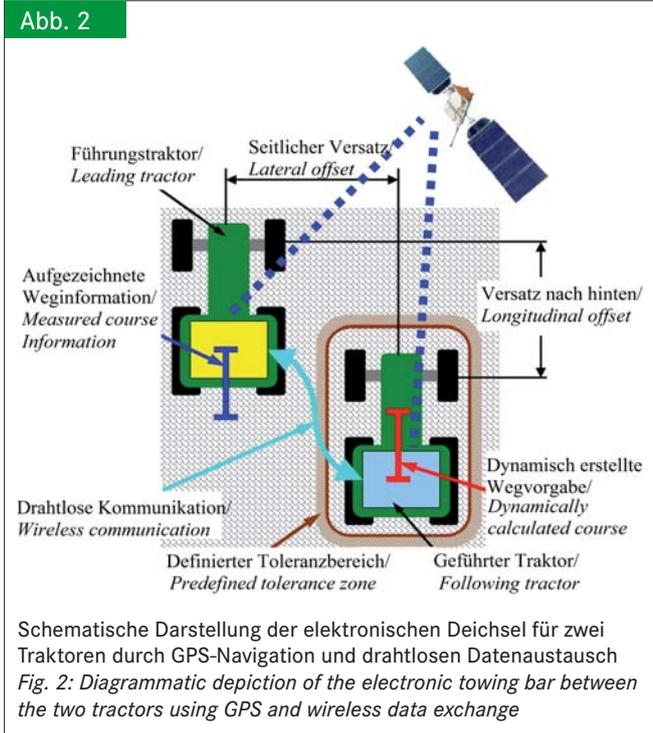
Zum Aufbau eines solchen Deichselsystems mit zwei Traktoren sind vier unterschiedliche Arbeitspakete zu absolvieren:

- ein Algorithmus zur Pfadplanung des geführten Traktors
- ein Spurführungsregler, um den unbemannten Traktor auf der durch Pfadplanung berechneten Leitlinie zu führen
- eine drahtlose Verbindung zwischen beiden Traktoren zur Gewährleistung eines echtzeitfähigen Datenaustausches



Fendt 936 Vario Traktor und seine Kabine mit Trimble Navigationsmonitor. Fotos: KIT

Fig. 1: Fendt 936 Vario tractor and its cabine with navigation monitor from Trimble



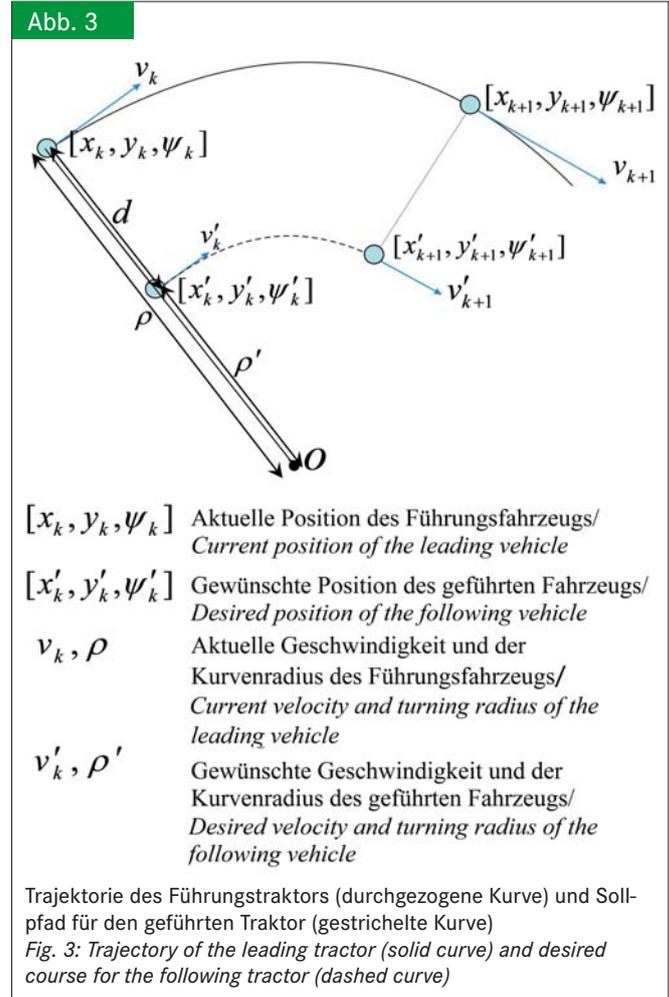
zwischen ihnen und zur Koordination ihrer Arbeitsprozesse ein Programm zur Überwachung der Zustände der unbemannten Maschine, um den Sicherheitsanforderungen gerecht zu werden

Pfadplanung

Die gewünschte Leitlinie zur Navigation des unbemannten Traktors wurde anhand der durch GPS-Messung am Führungstraktor festgestellten Positionsdaten berechnet (**Abbildung 3**). Die durchgezogene Linie stellt die gefahrene Kurve des Führungstraktors dar. Die abgebildeten Punkte auf der gestrichelten Linie liegen auf der Normale der durchgezogenen Kurve und folgen den Positionen des Führungstraktors mit einem seitlichen Versatz der Größe d . Der Punkt O ist der gemeinsame Momentanpol des führenden und des folgenden Traktors. Die gewünschte Fahrgeschwindigkeit des geführten Traktors v'_k kann nach seinem Kurvenradius ρ' und der aktuellen Fahrgeschwindigkeit des führenden Traktors v_k bestimmt werden. In der Pfadplanung wurde nicht nur berücksichtigt, dass der geführte Traktor dem Führungsfahrzeug folgt, sondern auch, dass er Ausweichmanöver bei Hindernissen und Wendemanöver an der Feldgrenze durchführt.

Spurführung

Im Rahmen der Untersuchung wurde eine Regelstruktur aus einer Kaskadenregelung mit Vorsteuerung entworfen, um den unbemannten Traktor an der gewünschten Spur entlangzuführen und den Spurfehler zu minimieren [5]. **Abbildung 4** stellt die Struktur für die Geschwindigkeitsregelung dar, mit der die Geschwindigkeit des geführten Traktors so geregelt werden kann, dass sein Abstand zum führenden Traktor kon-

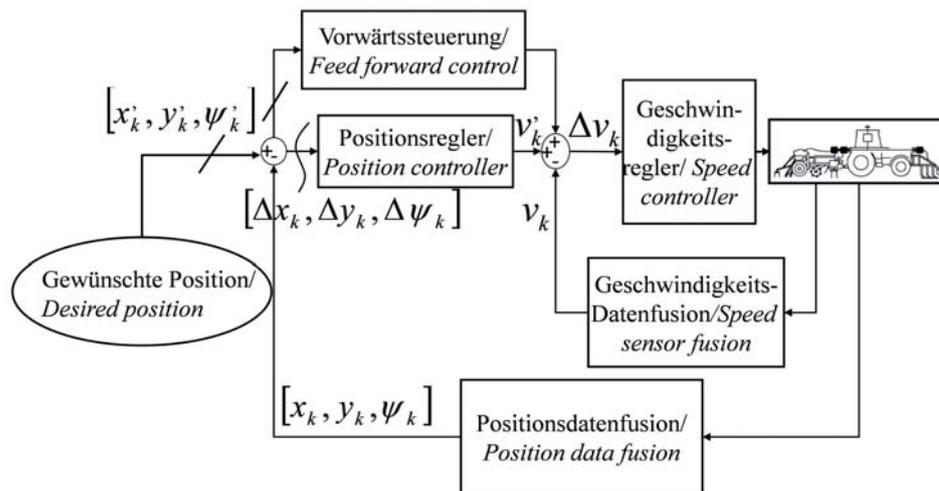


stant bleibt. Ähnlich aufgebaut ist die Struktur zur Regelung des Lenkwinkels. In diesem Fall wird der Positionsregler durch einen Gierwinkelregler ersetzt, während der Geschwindigkeitsregler durch einen Lenkwinkelregler ersetzt wird.

Drahtlose Kommunikation

Hardware: Eine der wichtigsten Voraussetzungen für die elektronische Deichsel bei Landmaschinen ist, dass die führende und die geführte Maschinen durch eine sogenannte drahtlose CAN-Brücke verbunden sind. Über die drahtlose CAN-Brücke werden die Informationen aus einem CAN-BUS (Controller Area Network) an einer Maschine gesammelt, per Funk übertragen und an den CAN-BUS der anderen Maschine verschickt. Die üblicherweise großen Feldflächen erfordern ein mobiles Kommunikationsgerät mit einer großen Reichweite, um die Anforderungen an robuste drahtlose Kommunikation zu erfüllen [6]. Als Funkschnittstelle dient ein XBee-Pro Modul der Firma Maxstream mit einem IEEE 802.15.4 Standard Chip. Das Modul arbeitet in 2,4 GHz ISM-Frequenzband und erreicht einen theoretischen Datendurchsatz von 250 kbps. Seine große Bandbreite ist ausreichend für die Übertragung aller Navigations- und Steuerungsdaten im Takt von 100 Millisekunden, die in dem Datenprotokoll definiert sind. Mit einer maximalen Reichweite von 1,6 km im Freien ist es möglich, eine robuste Punkt-zu-Punkt-Kommunikation innerhalb der Sichtverbindung aufzubauen.

Abb. 4



Struktur des Kaskadenreglers mit Vorsteuerung für die Geschwindigkeitsregelung

Fig. 4: Structure of the cascade controller with feed forward control for the speed regulation

Datenprotokoll: Im Rahmen der hier vorgestellten Arbeit wird ein Datenprotokoll entwickelt, das den Datentyp und die Datenstruktur für alle durch das Funkmodul zu übertragenden Informationen definiert, um die Kommunikationsdaten mit verschiedenen Inhalten und verschiedenen Prioritäten zu unterscheiden. In **Tabelle 1** sind die Positionsdaten des Führungstraktors in einem Datenframe von 32 Bytes und mit einem Identifier (Frame-ID) von 2 definiert. Der Frame-ID deutet darauf hin, dass diese Information eine relativ hohe Priorität innerhalb der gesamten Datenliste hat. Dies spiegelt offensichtlich die Tatsache wider, dass die Positionsdaten entscheidend für die Sicherheit des geführten Traktors sind. Ohne diese Information kann die unbemannte Maschine nicht richtig geführt werden, Kollisionsgefahr ist die Folge.

Sicherheitskonzept

Ein wichtiger Aspekt bei der Entwicklung autonom fahrender Landmaschinen ist die Sicherheit. In einem solchen Deichselsystem erhöht der Fahrer des Führungsfahrzeuges durch Überwachung die Sicherheit des Systems in gefährlichen Situationen. Er behält durch eine zusätzlich eingebaute Multifunktions-

armlehne mit digitaler Anzeige und Bedienelementen ständig die Kontrolle über das geführte Fahrzeug. Das Programm zur Sicherheitsüberwachung wurde in die Software integriert, um den Fahrer von der Überwachung von Routinearbeiten zu entlasten und ihn bei der Entscheidungsfindung zu unterstützen. Als Rückfallebene der Überwachungssoftware hat der Fahrer immer die Möglichkeiten, den Not-Stopp auszulösen, um den geführten Traktor in einer unvorhersehbaren, gefährlichen Situation sofort anzuhalten. In sicherheitskritischen Situationen bekommt der Fahrer sofort ein Warnsignal am Bedienterminal, z.B. wenn die Funkverbindung zwischen den beiden Traktoren unterbrochen ist oder wenn der Abstand zwischen dem Führungsfahrzeug und dem geführten Fahrzeug zu gering ist.

Im Führungstraktor gibt es ein Rückmeldesystem bezüglich der kabellosen Verbindung zwischen den zwei Maschinen. Ein Echtzeit-Thread in der Software für die Systemüberwachung sendet zyklisch ein „Alive“-Signal vom führenden zum geführten Traktor. Fehlende Signale deuten auf eine Unterbrechung der kabellosen Verbindung hin, und der Echtzeit-Thread stoppt in diesem Fall alle Operationen am geführten Traktor.

Tab. 1

Datenprotokoll mit Positions- und Bewegungsinformationen der führenden Arbeitsmaschine

Table 1: Data protocol for the position and motion information about the leading machine

Feld/Field	Delimiter	Frame-ID	UTC	Longitude	Latitude	Heading	Speed	Direction	Date
Bytes/Bytes	1	1	4	6	6	2	2	2	4
Daten/Data	0xFF	0x02	xxxx	xxxxxx	xxxxxx	xx	xx	xx	xxxx

Delimiter: Anfangsbyte des Frames/Check byte for the start of the frame

Frame-ID: Identifier des Datenframes, 2 steht für Positionsdaten/Identification for the data frame, 2 stands for the position data frame

UTC: Koordinatenuniverselle Zeit/Coordinated universal time

Longitude: Längsgrad der aktuellen Position des Führungstraktors/Longitude of the current position of the leading vehicle

Latitude: Breitengrad der aktuellen Position des Führungstraktors/Latitude of the current position of the leading vehicle

Heading: Winkel zwischen der Bewegungsrichtung des Fahrzeugs und Nord/Angle where the leading vehicle is pointing compared to the true north

Speed: Geschwindigkeit des Führungstraktors/Velocity of the leading vehicle

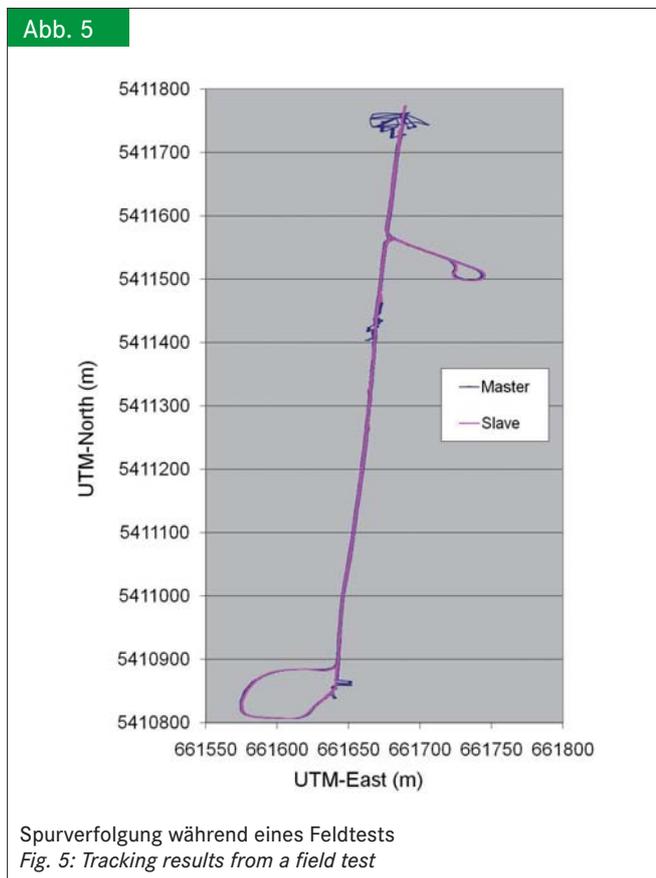
Direction: Bewegungsrichtung des Führungstraktors/Direction in which the leading vehicle is moving

Date: Datum, an dem die GPS-Informationen aufgezeichnet werden/Data when the GPS-information is recorded

Einer der wichtigsten Sicherheitsaspekte ist die Überwachung des Abstands zwischen der führenden und der geführten Maschine. Dem geführten Fahrzeug wird vorbeugend ein virtuelles Toleranzfeld (**Abbildung 2**) vorgegeben, um eventuelle Übertragungsfehler der drahtlosen Verbindung zu überbrücken bzw. innerhalb dieser die Fahrspur interpolieren zu können. Innerhalb des virtuellen Toleranzfeldes „Puffer“ darf sich das geführte Fahrzeug gefahrlos weiter bewegen. Erst wenn ein Überschreiten des zulässigen Toleranzfeldes droht, muss das Fahrzeug gestoppt werden. Das virtuelle Toleranzfeld wird auf Basis der vom Führungstraktor vorgegebenen Navigationsstrecke berechnet. Fährt der geführte Traktor über die Grenzen des Toleranzfeldes hinaus, wird ein Not-Stopp-Befehl aktiv und der Traktor hält sofort an.

Experimentelle Ergebnisse

Verifikationstests wurden sowohl auf Asphalt- als auch auf Ackergelände durchgeführt. Die Ergebnisse der Spurverfolgung aus einem Test auf Ackergelände sind in **Abbildung 5** gezeigt. In diesem Test wurde die Trajektorie des führenden Traktors vom Trimble Navigationssystem gemessen und mittels kabelloser Kommunikation an den geführten Traktor gesendet. Diese Information samt der Information über den geführten Traktor selbst wurden von der CAN-Überwachungssoftware aufgezeichnet und in einer UTM-Koordinaten-basierten Abbildung dargestellt. Das Ergebnis weist



darauf hin, dass auf der gefahrenen Spur die seitliche Abweichung meistens kleiner als 0,1 m war. Große Abweichungen kommen nur dann vor, wenn der Führungstraktor ungenaue Positionsdaten liefert.

Schlussfolgerungen

Mit der dargestellten Methode kann eine unbemannte Landmaschine automatisiert werden, um landwirtschaftliche Aufgaben, wie z. B. Pflügen und Säen, gemeinsam mit einem anderen Führungstraktor durchzuführen. Im Vergleich zu autonomen Feldrobotern, die noch weit von der Serienreife entfernt sind, wurde die elektronische Deichsel an zwei Prototypen getestet und soll weiterentwickelt werden. Ein interessanter und neuartiger Aspekt der Untersuchung ist der virtuelle Toleranzbereich, welcher die Bewegung der autonom fahrenden Landmaschine überwacht. Große Herausforderungen liegen darin, die Größe eines solchen Toleranzbereiches zu bestimmen und die unbemannte Landmaschine so exakt zu steuern, sodass sie immer in diesem Toleranzbereich bleibt. Der Vorteil des vorgestellten Systems liegt in der Überwachung des gesamten Systems durch einen Fahrer. Vorläufige Ergebnisse sowohl aus der Rechnersimulation als auch aus dem Feldtest haben gezeigt, dass der geführte Traktor dem Führungstraktor mit zufriedenstellendem Ergebnis folgen kann.

Literatur

- [1] O'Connor, M.; Bell, T.; Elkaim, G.; Parkinson, B.W. (1996): Automatic steering of farm vehicles using GPS. Proceedings of the third international conference on precision agriculture, Minneapolis, MN, June 23-26, 1996, pp.767-778
- [2] Noguchi, N.; Reid, J.F.; Zhang, Q.; Will, J.D.; Ischii, K. (2001): Development of robot tractor based on RTK-GPS and gyroscope. ASAE Paper 01-1195
- [3] Benson, E.R.; Reid, J.F.; Zhang, Q. (2003): Machine vision-based guidance system for agricultural grain harvesters using cut-edge detection. Biosystems Engineering 86 (4), pp. 389-398
- [4] Tsubota, R.; Noguchi, N.; Mizushima, A. (2004): Automatic guidance with a laser scanner for a robot tractor in an orchard. Proceedings of the automation technology for off-road equipment conference, Kyoto, Japan
- [5] Gao, Y.; Zhang, Q. (2006): A comparison of three steering controllers for off-road vehicles. Proceedings of the automation technology for off-road equipment conference, September 1-2, 2006, Bonn, Germany, pp.289-301
- [6] Murakami, N.; Ito, A.; Will, J.D.; Steffen, M.; Inoue, K.; Kita, K.; Miyaara, S. (2008): Development of a teleoperation system for agricultural vehicles. Computers and electronics in agriculture, vol. 63, pp. 81-88

Autoren

Dipl.-Ing. Xi Zhang ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für mobile Arbeitsmaschinen, Karlsruher Institut für Technologie KIT (Leiter: **Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer**), Gotthard-Franz-Str. 8, 76131, Karlsruhe, E-Mail: xi.zhang@kit.edu

Dr. agr. Patrick O. Noack ist Mitarbeiter der Firma geo-konzept. Er ist für den Vertrieb von GPS-Systemen und die Entwicklung von kundenspezifischen GI-Systemen zuständig.

Dipl.-Ing. Ludwig Grandl ist Mitarbeiter der Firma AGCO GmbH in Marktoberdorf. In der Abteilung „Entwicklung Elektrik/Elektronik“ bearbeitet er das Forschungsprojekt „Elektronische Deichsel“.

M.Sc. Dipl. Wirt.-Ing. Markus Ehrl ist Mitarbeiter der Firma AGCO GmbH in Marktoberdorf. In der Abteilung „Entwicklung Elektrik/Elektronik“ ist er für die Themen ISOBUS und VarioDoc verantwortlich.

Danksagung

Die Autoren möchten sich für die Förderung des Forschungsprojekts durch das Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz und die Betreuung durch die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung bedanken.