

Matthias Müter, Lutz Damerow und Peter Schulze Lammers

Kameragesteuerte mechanische Unkrautbekämpfung in Pflanzenreihen

Am Institut für Landtechnik der Universität Bonn wurde ein Anbaugerät zur mechanischen Unkrautkontrolle von Reihenkulturen entwickelt und getestet. Ziel war es, den Bereich zwischen den Kulturpflanzen in der Reihe (intra-row) zu bearbeiten, ohne diese zu beschädigen. Als Schwerpunkt des Forschungsprojektes wurde die Pflanzenerkennung mithilfe einer kamerabasierten Bildverarbeitung entwickelt. Dabei sollten standardisierte Industriekomponenten und Kommunikationsstandards verwendet werden. Für den Antrieb der Hackwerkzeuge wurden elektrische Servomotoren gewählt. Die Ansteuerung erfolgt über ein echtzeitfähiges EtherCAT-Bussystem, welches an einen Echtzeit-Controller angeschlossen ist. Dieser Aufbau ermöglicht die mechanische Unkrautbekämpfung bis zu einer Fahrgeschwindigkeit von 7,2 km/h.

eingereicht 19. Februar 2014

akzeptiert 12. Mai 2014

Schlüsselwörter

Mechanische Unkrautregulierung, Bilderkennung, intra-row, Zuckerrübe

image processing was developed. The machine should be assembled from standardized industrial components off the shelf. Therefore, electrical servo motors were selected to actuate the hoeing tools. An EtherCAT bus system allows a real-time closed-loop control by a real-time controller. This design enables a mechanical weed control with a forward speed up to 7.2 km/h.

Keywords

Mechanical weed control, image processing, intra-row, sugar beet

Abstract

Müter, Matthias; Damerow, Lutz and Schulze Lammers, Peter

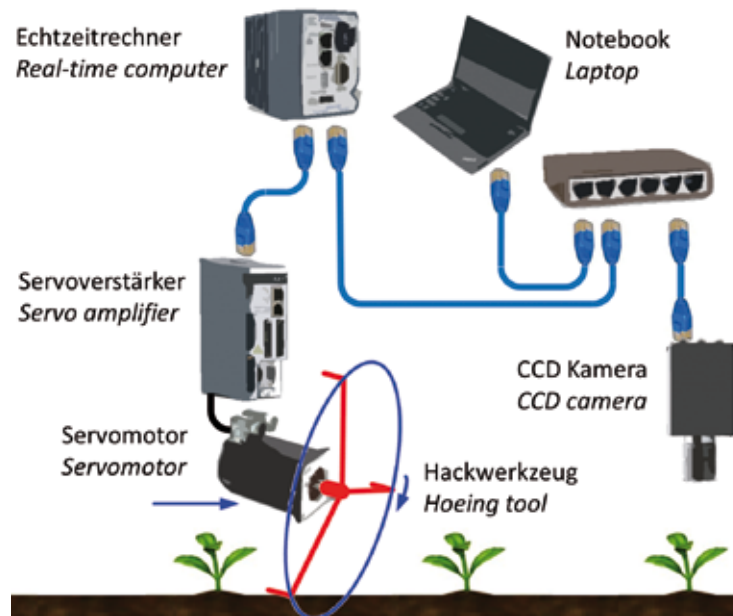
Camera controlled mechanical intra-row weed regulation

Landtechnik 69(3), 2014, pp. 120–124, 3 figures, 7 references

A tractor mounted implement for mechanical weed control in the intra-row area of row crops was developed and tested at the Institute of Agricultural Engineering at the University of Bonn. The aim was to hoe the area between the crop plants in the row (intra-row) without damaging them. The main task was the detection of the row crops. For this a camera-based

■ Durch das politisch formulierte Ziel der Reduzierung von Herbiziden und den zunehmenden Ökolandbau wird die mechanische Unkrautbehandlung in Reihenkulturen, wie Zuckerrüben, immer wichtiger. Marktübliche Hackgeräte für den Bereich zwischen den Pflanzenreihen (inter-row) bearbeiten bis zu 80 % der Fläche [1]. Um ein Maximum an Qualität und Ertrag zu erzielen, müssen auch die Unkräuter innerhalb der Kulturpflanzenreihe entfernt werden. Während das Hacken zwischen den Reihen ohne großen technischen Aufwand möglich ist, ist innerhalb der Reihe eine aufwendige Sensortechnik erforderlich, um die Führung des Werkzeugs zu ermöglichen und gleichzeitig die Nutzpflanze so wenig wie möglich zu beschädigen. Dazu gibt es bereits verschiedene Ansätze [2; 3; 4; 5]. Einen weiteren Ansatz stellt die Rotationshacke dar [1], auf der die vorliegende Arbeit aufbaut. Ziel war es, das im Labor getestete Gesamtsystem in ein feldtaugliches Gerät zu überführen und bei einer in der landwirtschaftlichen Praxis üblichen Fahrgeschwindigkeit zu testen. Der Schwerpunkt lag dabei auf der Entwicklung eines echtzeitfähigen Bilderkennungsalgorithmus zur Pflanzenerkennung.

Abb. 1



Schematischer Aufbau des Versuchsträgers. Als Bindeglied zwischen Kamera und Servomotor verarbeitet ein Echtzeit-Prozessor die Eingangsdaten zu einem Ausgangssignal zur Ansteuerung des Motors.

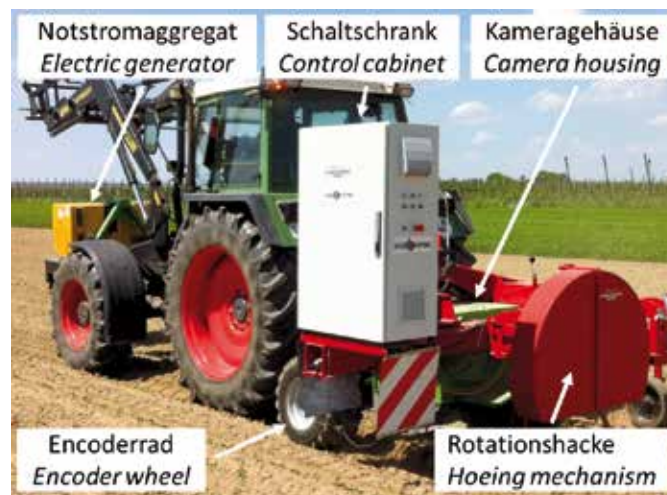
Fig. 1: Basic setup of the test device. As a link between camera and servomotor, a real-time processor calculates new setpoints for the motor position.

Aufbau der Maschine

Der schematische Aufbau des Versuchsträgers ist in **Abbildung 1** zu sehen. Eine CCD-Kamera nimmt ein Bild von der Pflanzenreihe auf. Aus den Bilddaten werden die Positionen der Nutzpflanzen errechnet. Die Pflanzenabstände und die Position des Schleppers werden als Eingangsgrößen im Echtzeitprozessor verarbeitet und ergeben zusammen die Führungsgröße des Motorregelkreises. Daraus wird eine Soll-Position des Servomotors errechnet und als Befehl an diesen weitergeleitet. Der Servomotor verfügt über einen Digital-Encoder, der die Ist-Position

an den Controller und somit an den Regelkreis zurückmeldet. Die Kommunikation erfolgt über ein echtzeitfähiges EtherCAT-Bussystem, welches niedrige Zykluszeiten ($\leq 100 \mu\text{s}$) und einen niedrigen Jitter aufweist. Dies ermöglicht eine Synchronisierung von Servomotor und Encoderrad ohne Instabilitäten. Die Hackwerkzeuge sind starr an der Motorachse befestigt, sodass die Position der einzelnen Werkzeuge anhand der Winkelposition der Motorachse errechnet werden kann. Bei erfolgreicher Nutzpflanzenerkennung werden die Bahnkurven der Hackwerkzeuge so berechnet, dass die Werkzeuge den Boden

Abb. 2



An einem Traktor angebaute Versuchsträger (Foto: Mütter)

Fig. 2: Test machine on a conventional tractor

zwischen den Nutzpflanzen in der Reihe bearbeiten und einen Schutzabstand rund um die Nutzpflanze belassen.

Abbildung 2 zeigt den an einen Traktor angebauten Versuchsträger. Der Servomotor zum Antrieb der Rotationshacke ist an einem Parallelogramm-Rahmen befestigt. Dadurch kann die Rotationshacke über ein Tastrad in der Höhe geführt werden. Die CCD-Kamera ist in einem Gehäuse zur Abschirmung von äußeren Lichteffekten montiert. Zur Beleuchtung innerhalb des Gehäuses werden LEDs in Kombination mit einem LED-Blitz-Controller eingesetzt, der genau wie die Kamera über ein Trigger-Signal aktiviert wird. Die Erzeugung des Trigger-Signals wird vom Encoderrad gesteuert, sodass jeweils im Abstand von 300 mm ein Bild aufgenommen wird. Der Controller erlaubt eine Übersteuerung der LED-Module, sodass die Anzahl der LEDs gegenüber einem Dauerbetrieb um 80 % reduziert werden kann. Neben dem Bauraum wird dadurch auch der Energieverbrauch reduziert. Echtzeit-Controller, Servoverstärker und Notebook sind in einem staub- und spritzwassergeschützten Schaltschrank untergebracht. Die Stromversorgung wird über einen Generator sichergestellt, der an die Fronthydraulik angebaut ist und bis zu 8 kW elektrische Leistung zur Verfügung stellen kann. Eine direkte Versorgung über den 12-V-Generator des Traktors ist nicht möglich, da die übertragbare Leistung für die Elektronik und den Motor (max. 3,7 kW) nicht ausreicht.

Bildverarbeitung

Für die Pflanzenerkennung wird eine CCD-Kamera eingesetzt, die orthogonal auf den Boden und die Pflanzenreihe ausgerichtet wird. Ein Triggersignal, das abhängig von der Position des Encoderrades in fest definierten Abständen an die Kamera und die Beleuchtung gesendet wird, signalisiert der Kamera, ein Bild aufzunehmen und an den Controller zu senden. Das Bild wird mit einem Wegstempel versehen, der die genaue Position der Aufnahme in der Pflanzenreihe festhält. Die Bilder beinhalten eine Vielzahl von Informationen in Form von Farbmustern, aus denen die Koordinaten der Nutzpflanzen berechnet werden. Für diese Aufgabe wird das Programmiersystem Labview verwendet. Die entwickelten Labview-Algorithmen werden auf dem Laptop und auf dem echtzeitfähigen CompactRio-Controller verarbeitet.

Im ersten Schritt werden die aufgenommenen Bilder (**Abbildung 3, a**) mithilfe einer Wavelet-Transformation komprimiert, um die Verarbeitungszeit bei den folgenden Operationen zu verkürzen. Als nächstes wird das Farbbild mit der Schwellenwertmethode in ein Binärbild verwandelt (**Abbildung 3, b**). Dabei wird der HSL-Farbraum benutzt, bei dem jedem Pixel ein Farbwert (H: hue), eine Farbsättigung (S: saturation) und ein relativer Helligkeitswert (L: lightness) zugeordnet werden. Um das Farbbild in ein Binärbild zu segmentieren, werden für die drei Werte Minimal- und Maximalwerte von 0 bis 255 vergeben. Wenn die drei Parameter eines Pixels alle in einem vorher definierten Bereich liegen, wird das Pixel einer Pflanze zugeordnet. Sobald nur ein Wert nicht im definierten Bereich liegt, wird das Pixel im Binärbild der Umgebung zugeordnet. Über die Farbe können bereits Unkräuter herausgefiltert werden, die sich farblich stark von den Nutzpflanzen unterscheiden; Unkräuter mit ähnlicher Farbe verbleiben jedoch im Binärbild. Bei Prüfaufgaben in der Industrie, z. B. bei der Kontrolle von Zahnrädern, würden die verbliebenen Objekte nun mit Beispielen aus einer Bilddatenbank verglichen. Da sich aber selbst Pflanzen einer Spezies sehr deutlich unterscheiden – abhängig von Wind, Sonne, Niederschlag und dem Nährstoffgehalt des Bodens –, müsste statt einer Beispieldatenbank eine Datenbank mit tausenden Beispielpflanzen erstellt werden, um einen sinnvollen Abgleich vornehmen zu können. Die verfügbare Rechenleistung reicht derzeit für ein Online-Verfahren nicht aus, sodass ein einfacherer Ansatz verfolgt wurde.

Zuerst wird mithilfe einer schnellen Fourier-Transformation (Fast Fourier transform, FFT) eine Tiefpassfilterung durchgeführt, sodass kleinere Fragmente herausgefiltert und die Konturen der verbleibenden Objekte geglättet werden. Die Einstellung des Frequenzbereiches muss dabei an die Wachstumsphase angepasst werden. Anschließend werden Objekte, deren Oberflächen deutlich kleiner oder größer als die der Nutzpflanze sind, aus dem Bild entfernt. Im nächsten Schritt werden filigrane Objekte wie Gräser oder Unkräuter mit Fiederblättern, wie beispielsweise Kamille, aus dem Bild entfernt. Im letzten Schritt werden alle verbliebenen Pflanzen einer statistischen Untersuchung unterzogen. Dabei spielen der beim Säen eingestellte Sollabstand zwischen den Pflanzen und die Koordinaten



Originalaufnahme (a), Binärbild nach Schwellenwertverfahren (b), Binärbild mit markierter Pflanzenposition (c), (Foto: Mütter)
 Fig. 3: Original image (a), binary image after thresholding (b), image with identified plant position (c)

der letzten erkannten Nutzpflanzen eine Rolle. Anhand dieser Daten werden die verbliebenen Objekte auf dem Bild in Nutzpflanzen und Unkräuter aufgeteilt. In **Abbildung 3** (c) ist nur noch eine Pflanze zu sehen, die als Nutzpflanze erkannt wurde und deren errechnete Mittelpunktkoordinaten durch ein Fadenkreuz verdeutlicht werden. Die Daten der erkannten Nutzpflanzen werden in einer Datenbank gespeichert. Neben den Koordinaten werden auch weitere Eigenschaften wie die Blattgröße gespeichert. Diese sind für die Ansteuerung des Servomotors uninteressant, können aber für Ertragskartierungen oder nachfolgende statistische Untersuchungen eingesetzt werden.

Feldversuche

Die Versuche wurden auf Versuchsflächen des Campus Klein-Altendorf durchgeführt. Die Aussaat der Zuckerrüben erfolgte mit einer Standard-Einzelkornsämaschine, wie sie im Zuckerrübenanbau üblich ist. Der Abstand zwischen den Reihen betrug 450 mm und zwischen den Pflanzen in der Reihe 200 mm. Die Länge für die Auswertung einer Pflanzenreihe wurde auf 40 m begrenzt. Um die stetig veränderten Bilderkennungsalgorithmen zu testen, wurden die Zuckerrüben im zweiwöchigen Rhythmus auf unterschiedlichen Parzellen ausgesät. So konnten auch die Versuche in den frühen Entwicklungsstadien von April bis Oktober durchgeführt werden. Die Versuche wurden im Zwei-, Vier-, und Sechsstadium sowie kurz vor Reihenschluss durchgeführt. Eine Behandlung mit Pflanzenschutzmitteln fand nicht statt. Die Tests wurden mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten von 0,72 bis 7,2 km/h durchgeführt. Um die Bilderkennung zu bewerten, erfolgte eine zusätzliche visuelle Bonitur. Dabei wurden die Originalbilder auf Unkräuter und Zuckerrüben untersucht und Bild für Bild mit den Ergebnissen der Bildverarbeitungssoftware verglichen. So konnten die Anzahl der nicht erkannten Zuckerrüben und auch die Anzahl der fehlerhaft erkannten Zuckerrüben bestimmt werden. Um die Genauigkeit der Mittelpunktbestimmung zu analysieren, wurden die Positionen der Zuckerrüben manuell vermessen und mit den Ergebnissen der Software-Erkennung verglichen.

Ergebnisse und Diskussion

Die ersten Hackversuche in Zuckerrüben konnten bereits im Zweiblattstadium durchgeführt werden [6]. In diesem Stadium ist eine korrekte Erkennung noch sehr schwierig, da sich die Unkräuter teilweise im selben Wachstumsstadium befinden wie die Nutzpflanzen. Bei den abschließenden Versuchen im Jahr 2012 wurde im Zweiblattstadium insgesamt eine Wegstrecke von ca. 320 m mit 1558 Zuckerrüben untersucht. Dabei wurden durchschnittlich 81,6 % der Zuckerrüben erkannt. Im Vierblattstadium stieg der Anteil auf 91,1 % bei einer Wegstrecke von ca. 200 m mit 866 Zuckerrüben. Gleichzeitig wurden aber auch einige Unkräuter vom System als Zuckerrübe fehlklassifiziert. Wird die Anzahl der realen Zuckerrüben als Grundwert genommen, traf dies auf 15,8 % im Zweiblattstadium und 15,6 % im Vierblattstadium zu. Dies führt nicht zwangsläufig dazu, dass die Hacke Kulturpflanzen beschädigt, da die nach

der Bildverarbeitung folgenden Statistikalgorithmen die Fehler in den meisten Fällen kompensieren.

Für eine präzise Unkrautregulierung ist neben der Pflanzenerkennung auch die Bestimmung des Pflanzenmittelpunktes notwendig. Dies stellt im Zweiblattstadium noch kein Problem dar, mit zunehmender Blattgröße wird die Bestimmung jedoch komplexer. Aufgrund von Wind und unterschiedlichen Lichtverhältnissen drehen sich die Blätter sowohl horizontal als auch vertikal um den Pflanzenmittelpunkt. Um die Pflanzenerkennung bei unterschiedlichen Algorithmen zu bewerten, wurden die Pflanzenpositionen manuell gemessen und mit den Werten der Bildverarbeitung verglichen. Im Vierblattstadium sind Abweichungen bis zu 34,4 mm zu verzeichnen. Der Median liegt bei 4 mm. Im Sechsstadium beträgt die maximale Abweichung 22,5 mm und der Median liegt mit 5,4 mm etwas über dem Wert aus dem Vierblattstadium. Die Ergebnisse im Sechsstadium sind etwas schlechter, da sich die größeren Blätter oftmals überlappen und eine Mittelpunktbestimmung erschweren. Die Ergebnisse der Mittelpunktbestimmung zeigen, dass die Abweichung der berechneten von der realen Pflanzenposition mit dem Wachstumsstadium ansteigt und somit auch der notwendige Sicherheitsabstand größer werden muss. Eine Vergrößerung des Sicherheitsabstands hat jedoch keinen negativen Einfluss auf die Hackergebnisse, da mit dem Pflanzenwachstum die Blattfläche und somit die Verschattung zunimmt, sodass der Unkrautdruck in direkter Nähe sinkt.

Aufgrund des echtzeitfähigen Controllers und der echtzeitfähigen Bussysteme konnten die Tests mit einer Geschwindigkeit bis zu 7,2 km/h gefahren werden, ohne dass die Ergebnisse der Bildverarbeitung beeinträchtigt wurden. Erst bei höheren Geschwindigkeiten kam es vor, dass die Zeit zur Berechnung der einzelnen Bilder nicht ausreichte. Eine fest definierte maximale Geschwindigkeit kann nicht angegeben werden, da die Berechnungszeit von der Komplexität der einzelnen Bilder abhängt und daher sehr stark variiert.

Schlussfolgerungen

Mit dem Versuchsträger konnte gezeigt werden, dass die mechanische Unkrautregulierung in der Reihe mit industriellen Standardkomponenten durchgeführt werden kann. Der Trend zu elektrischen Antrieben in der Automobil- und der Landtechnikindustrie wurde hier aufgegriffen.

Bei rotatorischen Hackwerkzeugen bieten elektrische Servomotoren gegenüber hydraulischen Antrieben eine bessere Dynamik und Genauigkeit. Damit sich diese Antriebe in der Serie durchsetzen, müssen aber auch die Voraussetzungen zur mobilen elektrischen Leistungsversorgung geschaffen werden. Ansätze der Traktorenhersteller dazu gibt es bereits [7]. Die größte Herausforderung war die Entwicklung der Bildverarbeitung, da es noch keine passenden Algorithmen für die Erkennung von Nutzpflanzen gab. Im Freilandversuch lieferte das erarbeitete Programm bei einer Vorfahrtgeschwindigkeit bis 7,2 km/h gute Ergebnisse. Diese Geschwindigkeit erlaubt eine Kombination mit einer konventionellen Hacke für den

Bereich zwischen den Reihen, sodass eine flächendeckende mechanische Unkrautregulierung ohne zusätzlichen Arbeitszeitaufwand möglich ist.

Trotzdem steht die Entwicklung passender Algorithmen noch am Anfang. Für eine Anwendung in der Praxis müssen diese anpassungsfähiger werden, sodass der Bediener weniger Parameter einstellen muss und die Maschine in unterschiedlichen Pflanzenkulturen einsetzen kann. Eine bedienerfreundliche Lösung würde dann wenige Parameter wie Pflanzenart und Wachstumsstadium abfragen. Die Arbeiten an dem System sollen deshalb fortgesetzt werden.

Literatur

- [1] Gabor, Z. (2007): Development of a novel mechatronic system for mechanical weed control of the intra-row area in row crops based on detection of single plants and adequate controlling of the hoeing tool in real-time. Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn
- [2] Åstrand, B. (2005): Vision based perception for mechatronic weed control. Dissertation, Chalmers University of Technology, Göteborg, p. 107
- [3] Griepentrog, H. W. (2005): Weed Control by Autonomous Vehicle Systems. In: Workshop Proceedings Precision Farming - Sensing and Robotics, 18.10.2005, Hohenheim, pp. 6-9
- [4] Bakker, T.; Asselt, C. v.; Bontsema, J.; Müller, J.; Straten, G. v. (2006): Autonomous navigation with a weeding robot. In: Proceedings of the International Conference ATOE, Automation Technology for Off-road equipment, 1-2 September 2006, Bonn, pp. 51-57
- [5] Dedousis, A. P.; O'Dogherty, M.J.; Godwin, R.J.; Tillett, N. D.; Brighton, J.L. (2006): A novel approach to precision mechanical weed control with a rotating disc for inter and intrarow weed hoeing. In: Proceedings of the 17th Triennial Conference of the International Soil Tillage Research Organisation, Kiel, pp. 123-129
- [6] Heyland, K.-U.; Diepenbrock, W.; Fischbeck, G.; Knauer, N. (1999): Spezieller Pflanzenbau. 3. Auflage, Stuttgart, UTB Verlag, S. 203
- [7] Agco (2013): Fendt X Concept. <http://www.fendt.com/int/7710.asp>, Zugriff am 23.1.2014

Autoren

Dipl.-Ing. Matthias Müter ist wissenschaftlicher Mitarbeiter, **Dr.-Ing. Lutz Damerow** ist Akademischer Oberrat und **Prof. Dr.-Ing. Peter Schulze Lammers** ist Leiter der Sektion Systemtechnik in der Pflanzenproduktion am Institut für Landtechnik der Universität Bonn, Nussallee 5, 53115 Bonn, E-Mail: mueter@uni-bonn.de

Hinweise

Die Forschungsarbeit wurde im Zuge des USL-Projekts „Automatisierte mechanische Unkrautbekämpfung in Reihenkulturen“ angefertigt und durch das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen gefördert. Das Thema wurde auf der VDI-Tagung LAND.TECHNIK 2013, Hannover, 8.-9. November 2013, vorgestellt und eine Kurzfassung im VDI-Bericht veröffentlicht (Bd. 2193, S. 295-300).