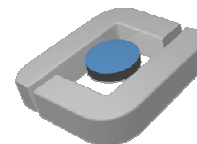

INSTITUT FÜR AGRARTECHNIK
BORNIM e.V.

ATB

FACHHOCHSCHULE
OSNABRÜCK



**COMPUTER-BILDANALYSE
IN DER LANDWIRTSCHAFT
- WORKSHOP 2002 -**

Computerised Image Analysis
in Agriculture
- Workshop 2002 -

BORNIMER AGRARTECHNISCHE BERICHTE
Heft 31

Potsdam-Bornim / Osnabrück 2002

Herausgeber:

Institut für Agrartechnik Bornim e.V.
Max-Eyth-Allee 100
14469 Potsdam-Bornim
☎ (0331)-5699-0
Fax.: (0331)-5699-849
E-mail: atb@atb-potsdam.de
Internet: <http://www.atb-potsdam.de>

in Zusammenarbeit mit

Fachhochschule Osnabrück
Interdisziplinärer Forschungsschwerpunkt Intelligente Sensorsysteme (ISYS)
Albrechtstr. 30
49076 Osnabrück
☎ (0541)- 969-2090
Fax.: (0541)- 969-2936
E-mail: a.ruckelshausen@fhos.de
Internet: <http://www.fh-osnabrueck.de>

September 2002

Redaktion:

Bernd Herold, ATB Potsdam-Bornim
Arno Ruckelshausen, FH Osnabrück

Typografische Gestaltung:

Andrea Gabbert, ATB

Herausgegeben vom Institut für Agrartechnik Bornim e.V. (ATB) mit Förderung des Bundesministeriums für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft und des Ministeriums für Landwirtschaft, Umwelt und Raumordnung des Landes Brandenburg und gleichzeitig als CD ROM von der FH Osnabrück mit Förderung durch das Niedersächsische Ministerium für Wissenschaft und Kultur.

Für den Inhalt der Beiträge zeichnen die Autoren verantwortlich.

Eine Weiterveröffentlichung von Teilen ist unter Quellenangabe und mit Zustimmung des Instituts für Agrartechnik Bornim e.V. möglich.

ISSN 0947-7314

© Institut für Agrartechnik Bornim e.V., Potsdam-Bornim 2002
FH Osnabrück, Forschungsschwerpunkt ISYS, Osnabrück 2002

Inhaltsverzeichnis	Seite
<i>Table of contents</i>	<i>page</i>
Vorwort <i>Preface</i>	4
Dynamik von Wachstum und Wasserhaushalt – Quantitative Untersuchung räumlich-zeitlicher Prozesse mittels Bildsequenzanalyse <i>Dynamics of growth and water relations – quantitative analysis of spatio-temporal processes by image sequence analysis</i> Schurr U	5
Methodischer Ansatz zur optischen Erfassung entomologischer Befallsdichten <i>Optical sensor approach for determination of entomological pest densities</i> Bauch Chr, Rath Th	15
Schnelle Bildverarbeitung zur online Erfassung, Verfolgung und Beobachtung von Kleinstlebewesen <i>Fast image processing for online detection, tracing and observing of microorganisms</i> Battmer S, Ellermann N, Linz A, Ruckelshausen A, Ruhnau U, Tovar K, Weidner G	22
Erzeugung und Auswertung von 2D Druckverteilungsbildern <i>Generation and analysis of 2D pressure distribution frames</i> Mulugeta E, Truppel I, Geyer M	31
An Agricultural Mobile Robot for Mechanical Weed Control <i>Ein landwirtschaftliches Roboterfahrzeug zur mechanischen Unkrautbekämpfung</i> Baerveldt A-J, Åstrand B	41
Image analyse evaluation of Fusarium culmorum infection on selected Polish wheat varieties <i>Bildauswertung von Befall durch Fusarium culmorum an ausgewählten polnischen Weizensorten</i> Kubiak A, Wiwart M	58
Intra-row weed control <i>Unkrautbekämpfung in der Reihe</i> Bontsema J, van Asselt K, Groot T	64
Entwicklung von standardisierten thermografischen Mess- und Auswertverfahren zur Beurteilung der Wärmeverluste von Gewächshäusern <i>Development of standardized thermo graphic methods to measure and evaluate the heat loss of greenhouses</i> Rath T, Gehrling D	73
Bewertung von Arbeitsprozessen im Gartenbau mit Hilfe der 3D Bewegungsanalyse <i>Evaluation of work operations in horticulture by means of 3D motion analysis</i> Jakob M, Ivanov V, Geyer M	83

Vorwort

Der im vorigen Jahr erstmals praktizierte Ortswechsel hat zweifellos frischen Wind in die Workshopreihe gebracht. Die Einladung an die Fachhochschule Osnabrück in diesem Jahr wurde durch rege Beteiligung sehr gut angenommen. Lage und Kontakte der FH führten zu einer Bereicherung des Workshops durch interessante Beiträge aus den Niederlanden und Schweden. Darüber hinaus bestätigte sich, dass die Demonstration von bildanalytischen Versuchseinrichtungen vor Ort den Teilnehmern wertvolle Zusatzinformationen bietet.

Die organisatorischen Aufgaben zur Vorbereitung, Durchführung und Nachbereitung wurden zwischen ATB Potsdam-Bornim und FH Osnabrück aufgeteilt. Der nunmehr vorliegende Tagungsband, diesmal ergänzt durch eine CD ROM, wird folglich wieder gemeinsam herausgegeben.

Die Beiträge zu diesem Workshop hatten sehr verschiedene Themen zum Inhalt und machten somit die breiten Einsatzmöglichkeiten der Computer-Bildanalyse deutlich. Anwendungen für grundlegende Untersuchungen an Pflanzen, (Klein-)Tieren und technischen Systemen überwogen deutlich die wenigen praxisnahen Beispiele, die sich mit Verfahren zur Unkrautkontrolle befassten.

Insgesamt vermittelte der Workshop wieder eine Fülle von Anregungen und wurde nicht zuletzt auch dank der hervorragenden Organisation und Atmosphäre in Osnabrück zu einem Erfolg.

Osnabrück und Potsdam-Bornim im Mai 2002

Prof. Dr. Arno Ruckelshausen

Dr. Martin Geyer

Dynamik von Wachstum und Wasserhaushalt – Quantitative Untersuchung räumlich-zeitlicher Prozesse mittels Bildsequenzanalyse

Dynamics of growth and water relations – quantitative analysis of spatio-temporal processes by image sequence analysis

Schurr U

Institute for Phytosphere Research (ICG-III), Forschungszentrum Jülich, 52425 Jülich, Germany
e-mail: u.schurr@fz-juelich.de

Kurzfassung: Wachstum und Wasserhaushalt verändern sich in charakteristischen Mustern während der Gewebeentwicklung und unter Stress. Die Basis der hier dargestellten quantitativen Auswertungen stellt der Strukturtensor dar. Dieser auf Ansatz des „optischen Flusses“ basierende Algorithmus eignet sich hervorragend, um Bewegungs- und Wachstumskartierungen durchzuführen. Exemplarisch werden Implementierungen für Blatt- und Wurzelwachstum dargestellt. Die differentielle Thermographie ist eine weitere Anwendung auf Basis von Bildsequenzen. Sie liefert Karten der Transpirationsrate und des Wassergehalts von Blättern.

Keywords: Bildsequenzanalyse, Blattwachstum, Wurzelwachstum, bildgebende Spektroskopie, Thermographie

Summary: *Growth and water relations vary in characteristic patterns with differentiation of plant tissues and stress. The quantitative analysis presented here are based on the so-called “structure tensor”. This approach used the idea of “optical flow” to map motion and growth in plant tissues. Exemplary we show implementations for dicot leaf growth and root expansion. Differential thermography is another application based on image sequences. Maps of transpiration rates and water content in individual leaves can be gained.*

Keywords: *image sequence analysis, leaf growth, root growth, imaging spectroscopy, thermography*

1. Einleitung

Wachstum ist ein zentraler Ertragsfaktor von Kulturpflanzen. Dies betrifft nicht nur das Wachstum des zu erntenden Pflanzenteils, sondern auch das Blatt- und Wurzelwachstum. Wachstum und die Differenzierung wachsender Gewebe schafft die funktionellen und anatomischen Strukturen, über die Pflanzen Nährstoffe, Wasser, Kohlenstoff aber auch Schadstoffe und Pflanzenschutzmittel mit der Umwelt austauschen und erschließt neue Akquisitionsräume. Aufgrund des hohen Substanz- und Energiebedarfs bestimmen Wachstumsprozesse ganz wesentlich Ferntransport und Allokation von Substanzen in der Pflanze. Neben ihrer wichtigen Rolle für Wachstumsprozesse und –steuerung bestimmen Parameter des Wasserhaushalts wie Transpiration und Wassergehalt wesentlich Ertragsbildung und Wassernutzungseffizienz von Kulturpflanzen und sind wichtige Größen in der Nachernte.

Wachstum und Wasserhaushalt zeichnen sich durch komplexe räumlich-zeitliche Heterogenität aus, so dass Punktmessungen zu einer bestimmten Zeit nur unzureichend Auskunft über Wachstumsaktivität, Transpiration oder Wassergehalt geben. Verschiedene pflanzliche Wachstumszonen lassen sich aufgrund ihrer räumlichen Organisation in linear, flächig oder im Volumen wachsend einteilen. Die räumlich-zeitliche Organisation von Wachstumszonen und Wasserhaushalt hat aber nicht nur akademischen Wert, sondern ist von großer praktischer Relevanz, beispielsweise für die Identifikation von Zielparametern für die Züchtung von Pflanzen, die Optimierung der Ressourcen-Nutzung (insbesondere von Wasser und Nährstoffen) aber auch für die Steuerung von Bewässerungsanlagen. Hier entwickelt sich ein wichtiges Anwendungsfeld für die Bildanalyse, neben ihrer zentralen Bedeutung für die Untersuchung grundlegender Mechanismen der Pflanzenphysiologie.

Die Bildanalyse hat sich im vergangenen Jahrzehnt zu einem wichtigen Hilfsmittel in der landwirtschaftlichen Praxis und Forschung entwickelt. In vielen klassischen Verfahren werden dabei relevante Informationen aus Einzelbildern gewonnen. Für derartige Anwendungen existieren eine Vielzahl von robusten und allgemein verfügbaren Algorithmen. Biologische Prozesse sind allerdings durch ihre räumlich-zeitliche Dynamik charakterisiert und lassen sich besser mit räumlich-zeitlich strukturierten Datensätzen von Bildsequenzen analysieren. Spezielle Algorithmen und Implementierungen sind notwendig, um quantitative Daten aus Bildsequenzen zu extrahieren (Jähne 1997). Diese bieten dann oft auch qualitativ bessere Daten, da das Signal-Rausch-Verhältnis über die Einbeziehung der Informationen aus einer Bildfolge deutlich gesteigert werden kann.

Grundlage quantitativer Bildsequenzanalyse ist neben der Algorithmik der hierauf optimierte Aufbau zur Erfassung geeigneter Datensätze. Durch die schnelle technische Entwicklung stehen inzwischen auch spezielle Kameras zur Verfügung, die bei physikalisch korrekter Verwendung wesentliche Beiträge zur Untersuchung von Pflanzen liefern können. Die DFG-Forschergruppe FOR240 „Bildsequenzanalyse zum Studium dynamischer Prozesse¹“ hat sich zur Aufgabe gestellt, in einem ausgesprochen multidisziplinären Ansatz durch Entwicklung von spezifisch auf Bildsequenzen ausgerichtete Algorithmenentwicklung und auf Basis eines gemeinsamen Hardware-Pools innovative Lösungen zur quantitativen Bildsequenzanalyse in Naturwissenschaft und Technik zu erarbeiten. Der vorliegende Beitrag will Prinzipien darstellen und anhand einiger aus der botanischen Applikation stammenden Anwendungen, das Potential von Bildsequenzanalyse darzustellen.

2. Wachstums- und Bewegungsdetektion in Bildsequenzen – optischer Fluss und Aufbau

Zeitrafferaufnahmen sind seit langem ein bewährtes Hilfsmittel, um Wachstum und Bewegung von Pflanzen zu visualisieren. Bildserien werden auch schon lange zur Identifikation von räumlichen und zeitlichen Mustern der Wachstumsprozesse verwendet. Allerdings waren die Ansätze hierzu im wesentlichen auf die Identifikation der Verschiebung von einigen künstlichen oder natürlichen Markierungen auf den Oberflächen angewiesen. Bei flächig wachsenden Organen wie z. B. dikotylen Blättern wurden zumeist ohne Rücksicht auf die tatsächlichen Wachstumsrichtungen rechtwinklige Punktgitter aufgetragen und deren Verziehung und Expansion mit der Zeit bestimmt. Dies ist ein sehr zeitaufwendiges und arbeitsintensives Verfahren. Alternative Verfahren (z. B. biometrische Verfahren oder Messungen mit linearen Weggebern) bieten zumeist keine oder nur sehr schlechte räumliche Auflösung (Schurr 1997).

Der Ansatz des „optischen Flusses“ (Horn und Schunk 1981) ist ein alternativer Weg, der kürzlich durch die Implementierung des sogenannten Strukturensors in Verfahren der Wurzel- und Blattwachstumsanalyse eingeführt wurde (Schmundt et al. 1997, Walter et al. 2002). Hiermit können Karten der Expansionsaktivität mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung gleichzeitig erhalten werden. Grundlage des Basisalgorithmus ist die sogenannte „brightness constraint equation“ (BCE, Formel 1)

¹ <http://klimt.iwr.uni-heidelberg.de/PublicFG/index.html>

$$\frac{dg}{dt} = v_x \frac{\partial g}{\partial x} + v_y \frac{\partial g}{\partial y} + \frac{\partial g}{\partial t} = 0 \quad (\text{Formel 1})$$

Dieses einfache Modell geht davon aus, dass alle Veränderungen der Grauwerte im Bild auf Basis von Bewegung geschehen (Haußecker und Spies 1999). Anschaulich lässt sich die Umsetzung der BCE anhand der Grauwertstrukturen beschreiben, die in einem Bildstapel entstehen, wenn sich Objekte im Raum bewegen (Bild 1A). Inzwischen implementierte Erweiterungen des Strukturtensors sind auch in der Lage, Wachstum direkt quantitativ zu bestimmen.

Während der Aufnahme der Bildsequenz darf sich das Objekt (hier das Blatt) nur aufgrund des Wachstums in der Blattebene verschieben, so dass vertikale Bewegungen über den Aufbau verhindert werden müssen. Zudem werden die Aufnahmen im nahen Infrarot aufgenommen, um die Physiologie der Pflanze durch Belichtung in der Dunkelphase nicht zu verändern (Bild 1B).

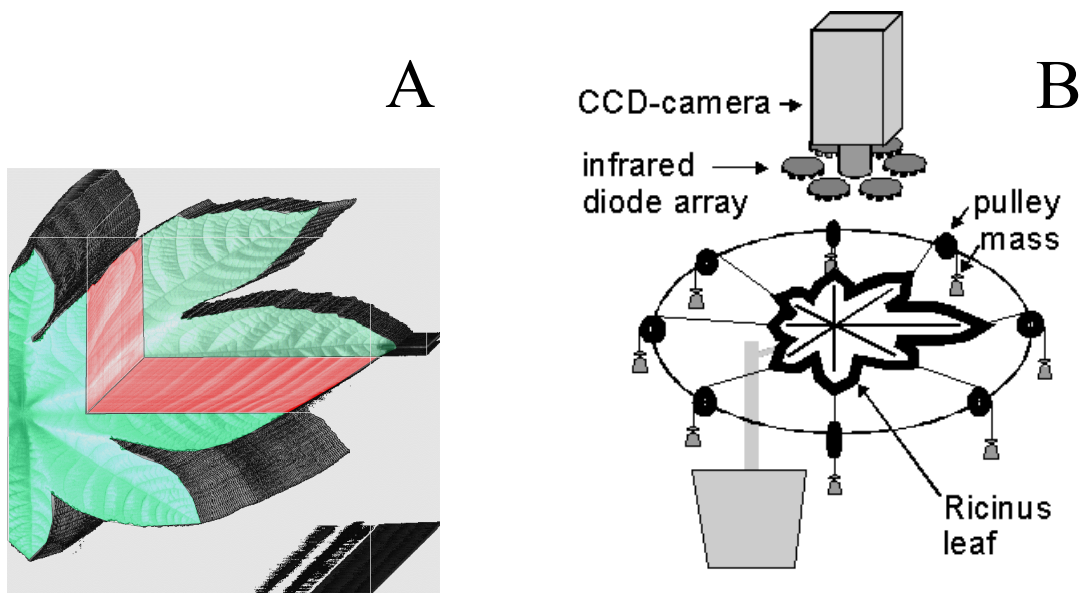


Bild 1: A: x-y-t-Darstellung einer Bildsequenz eines wachsenden Ricinus-Blattes. Im oberen rechten Teil wurde ein Würfel virtuell entfernt. Hierdurch werden die Grauwertstrukturen in den verschiedenen Schnittflächen (rot eingefärbt) freigelegt, die durch die Wachstumsbewegungen relativ zur fixierten Blattbasis entstehen.

B: Aufbau zur Akquisition von Bildserien von Blättern für die quantitative Kartierung von Blattwachstum.

3. Wachstumsdynamik von dikotylen Blättern

Mit Hilfe des bildsequenz-analytischen Verfahrens konnten Karten der Verteilung von Expansionswachstum mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung erstellt werden (Schurr et al. 2000). Die absolute Auflösung hängt von den optischen Eigenschaften des Aufbaus und der Geschwindigkeit der Wachstumsbewegung ab (Jähne 1997). Typische Werte bei der Analyse der kompletten Wachstumszone eines Tabakblattes liegen bei einer räumlichen Auflösung von 1 mm bei einer Analysenfrequenz von 1 Karte pro 10 Minuten. Die Software bietet in einem „Display“-Modul die Möglichkeit, die Verteilung der Wachstumsraten farblich kodiert darzustellen (Bild 2A). Erste Ergebnisse zeigen, dass Blätter verschiedener Arten einen starken Tagesgang des Wachstums aufweisen, der die gesamte zuwachsende Blattfläche betrifft und entlang des Basis-Spitze-Gradienten von Blattwachstum und -differenzierung unterschiedlich stark ausgeprägt ist (Walter und Schurr 2000, Bild 2B).

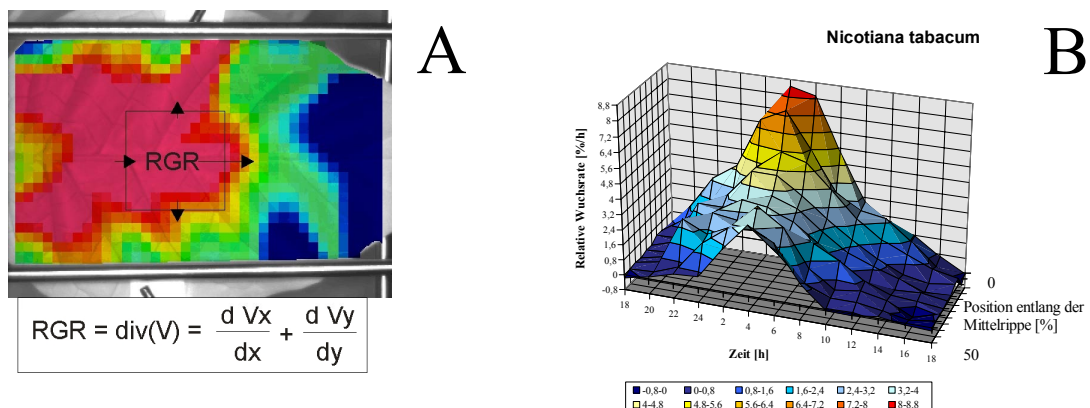


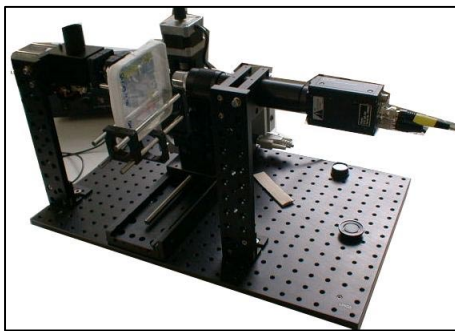
Bild 2: Kartierung der Dynamik der Blattexpansion mittels Bildsequenzanalyse.

A: Momentaufnahme der Wachstumsverteilung eines Tabak-Blattes in Falschfarben-Kodierung (rot: 8 %/h, dunkelblau: 2 %/h)

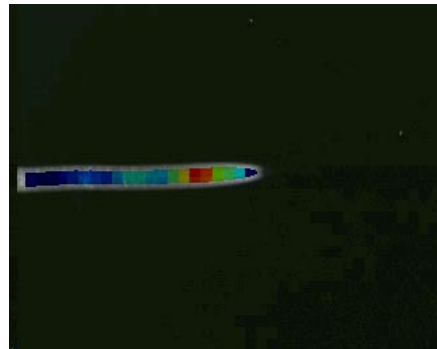
B: Tagesgang der Wachstumsverteilung entlang der Mittelrippe von Tabak. Gezeigt ist der Gradient der Wachstumsraten von der Blattbasis bis zu 50 % der Blattlänge während eines kompletten Tagesgangs. Die Dunkelperiode dauerte 12 h.

4. Wachstumsdynamik von Wurzelspitzen

Die Verteilung von Wurzelwachstum wird klassischerweise über künstlich aufgebrachte Markierungen der Wurzelspitzen erfasst, deren Position in nacheinander aufgenommenen Bildern ausgemessen wird. Die räumliche und zeitliche Auflösung wird hierbei insbesondere durch den hohen Aufwand bei der Vermessung der Positionen der Marken in den Bildern bestimmt. Die Implementierung des Strukturtensor-Algorithmus in ein Verfahren zur Kartierung von Wurzelwachstum hat hier eine erhebliche Steigerung der räumlichen und zeitlichen Auflösung erlaubt (Walter et al. 2002). Das Verfahren folgt dabei analog der für das Blattwachstum beschriebenen Vorgehensweise (Bild 3A). Karten der Wachstumsverteilung über die gesamte Wachstumszone von *Zea mays* (Bild 3B) basieren dabei auf etwa 800 Pixeln im Wurzelabbild, in denen die Geschwindigkeit bestimmt wurde, bei einer Bildaufnahmefrequenz von 1 Bild/Minute.



A



B

Bild 3: A: Aufbau zur Erfassung von Bildsequenzen der Wurzel von *Arabidopsis thaliana*. Die Wurzeln wachsen oberflächlich auf einer Agrarschicht und werden von einer CCD-Kamera (Sony XC 75) im Wellenlängenbereich über 930 nm abgebildet. Die Szene wird über Infrarot-Dioden beleuchtet, um die Wurzeln unter Ausschluss von physiologisch relevantem Licht beobachten zu können.
B: Farbkodierte Wachstumskarte einer Wurzelspitze von *Zea mays*.

5. Thermographie von Blättern

Die Transpirationsrate bestimmt wesentlich den Wasserverlust von Pflanzenteilen. Sie wird bislang v. a. über Küvettenverfahren ermittelt, in denen bei bekannter Gasdurchflussmenge die Konzentration von Wasserdampf vor und nach der Küvette quantifiziert wird. Eine intrinsische Fehlerquelle bei diesem Verfahren ist die Veränderung – teilweise komplette Beseitigung - der Grenzschicht an der Blattoberfläche, die erheblich zum Ge-

samtwiderstand gegen den Wasserverlust beitragen kann. Im Rahmen der DFG-Forschergruppe Bildsequenzanalyse wurden deshalb Anstrengungen unternommen, die Transpirationsrate eines Blattes in einem „remote sensing“-Verfahren zu erfassen, das die Grenzschicht unbeeinflusst lässt. Aufgrund der Größe der Wärmeflüsse, die nicht unmittelbar mit dem durch die Transpiration verursachten latenten Wärmefluss verbunden sind, und deren nicht einfach kontrollierbarer Dynamik wurde die differentielle Thermographie entwickelt und theoretisch abgeleitet (Kümmerlen et al. 1999).

In der differentiellen Thermographie werden die Oberflächentemperaturen von transpirierenden Blättern und Blattarealen mit den Temperaturen von Objekten gleicher Wärmekapazität und IR-optischen Eigenschaften bestimmt (Bild 4) und verrechnet, um auf den latenten Wärmefluss zu schließen. Die zugehörige Theorie (Kümmerlen et al. 1999) sagt bei Vernachlässigung schneller Veränderungen von Strahlungseinflüssen eine lineare Funktion zwischen Temperaturdifferenz des transpirierendem Objekt/Blatt und Referenzkörper mit der Transpiration voraus. Diese Beziehung konnte experimentell bestätigt werden.

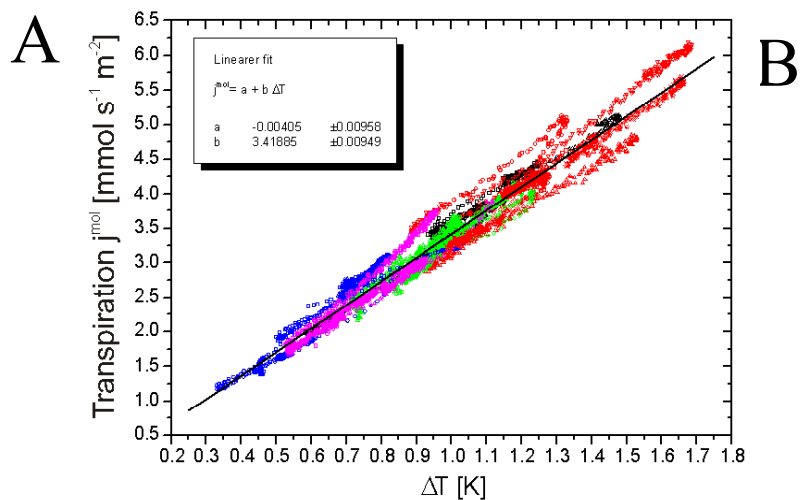
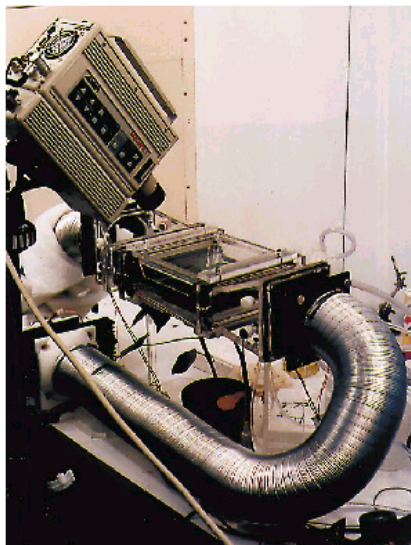


Bild 4: A: Aufbau zur Bestimmung der Transpirationsrate von Blättern mittels Thermographie. Die Küvette, in der sich das beobachtete Blatt befindet, wird zur Eichung der Methode gegenüber klassischen Methoden der Gaswechsellmessung verwendet.

B: Lineare Beziehung zwischen der über Küvettenmessungen erfassten Transpirationsrate und der Temperaturdifferenz zwischen einer nicht transpirierenden Referenzfläche und der transpirierenden Blattfläche. Die unterschiedlichen Farben entsprechen verschiedenen Blättern, die untersucht wurden.

Eine ortsauflösende Bestimmung der Transpirationsrate bedarf allerdings der Kartierung der Wärmekapazität auf dem Objekt/Blatt, die durch die sogenannte aktive Thermographie nicht destruktiv bestimmt werden kann. Blätter werden hierzu definierten Änderungen der Wärmeflüsse ausgesetzt und in Bildsequenzen die resultierende Temperatur der Blattbereiche mit einer IR-Kamera erfasst. Die Variation der Wärmeflüsse kann dabei stufenweise erfolgen; die Wärmekapazität drückt sich dann in der Halbwertszeit aus, bis die neue Blatttemperatur erreicht ist (Bild 5A). Bei oszillierender Variation des von extern aufgeprägten Wärmeflusses ergibt sich die Wärmekapazität aus der Phasenverschiebung und der Amplitudendämpfung des Temperatursignals der Blattoberfläche (Bild 5B; Kümmerlen et al. 1999).

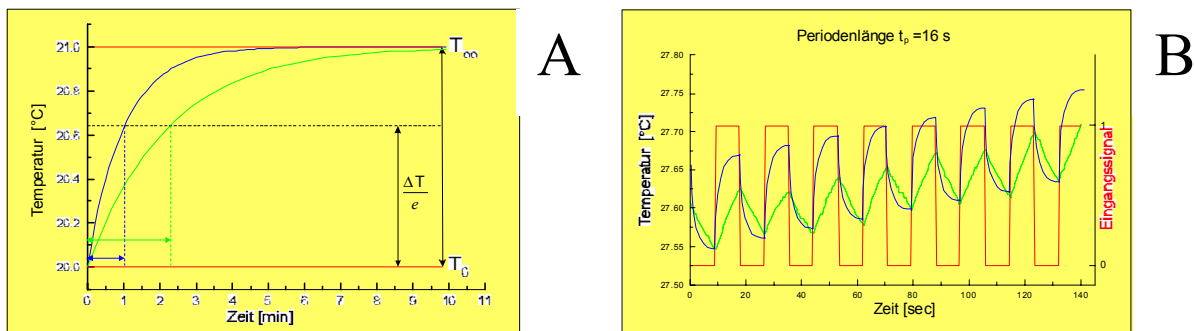


Bild 5: Schematische Gegenüberstellung der Temperaturverläufe von Bereichen hoher (grün) und niedriger (blau) Wärmekapazität auf einem Blatt bei (A) stufiger Veränderung eines externen Wärmeflusses und (B) oszillierender Variation des externen Wärmeeintrags über ein Peltier-Element. Rot: Verlauf der Temperatur des Peltier-Elements (zu beachten ist, dass das Eingangssignal in Bild B nur in relativen Einheiten eingezeichnet wurde und dass die absoluten Änderungen der Blatttemperatur im Zehntel-Grad Bereich liegen.)

Die Verteilung der Wärmekapazität kann in eine äquivalente Wasserschichtdicke umgerechnet werden, die in erster Näherung gut mit mikroskopisch bestimmten Blattstärken übereinstimmt (Bild 6).

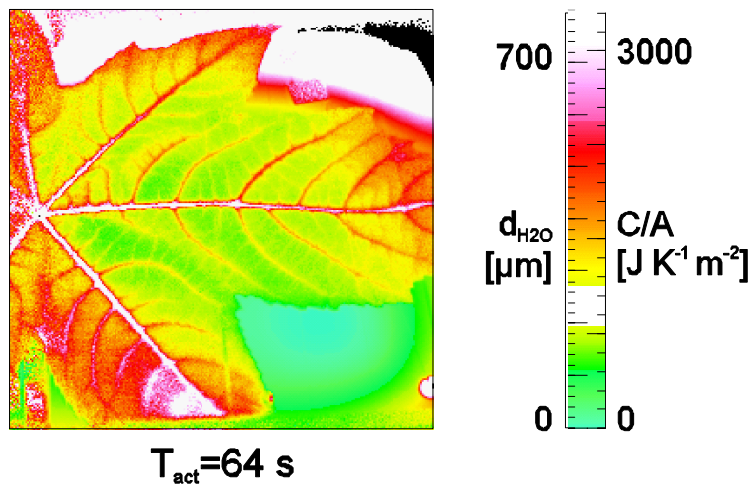


Bild 6: Karte der Wärmekapazität eines Rizinus-Blattes bei Anregung durch eine externe Wärmequelle mit einer Phase von 64 Sekunden. Die Legende gibt gleichzeitig die Umrechnung in eine äquivalente Wasserschichtdicke an.

6. Fazit

Bildsequenzen bieten interessante Möglichkeiten räumlich-zeitliche Prozesse abzubilden und quantitativ auszuwerten. Auflösung und Qualität der quantitativen Auswertung können erheblich gesteigert werden, wenn Algorithmen eingesetzt werden, die spezifisch für die quantitative Auswertung von Bildsequenzen entwickelt wurden. Im vorliegenden Beitrag wurde zum Einen das Potential des sogenannten Strukturtensors zur Erfassung von Bewegungen und Wachstum dargestellt. Hierdurch konnten neue Einblicke in die Steuerung von Wachstumsprozessen von Blatt und Wurzel gewonnen werden. In einem zweiten Beispiel wurde die quantitative Auswertung von thermographischen Bildfolgen dargestellt. Auf Basis der Ableitung der Theorie der differentiellen Thermographie konnten sowohl die Transpirationsrate als auch die Wärmekapazität kartiert werden.

Die aufgezeigten Anwendungen zeigen exemplarisch, wie durch Kombination von speziellen Aufbauten, Spezialkameras und auf Bildsequenzen basierenden Algorithmen quantitativ relevante pflanzenbauliche Parameter und deren Dynamik erfasst werden können. Mit der zunehmenden Verfügbarkeit der Bildsequenzanalyse eröffnet sich ein neues Feld auch für die Anwendung in landwirtschaftlichen Anwendungen.

7. Literaturverzeichnis

- Haußecker H, Spies H (1999)** Motion. In: Handbook of Computer Vision and Applications, Vol. 2, Kap. 13, Academic Press
- Horn BKP, Schunk B (1981)** Determining optical flow. Artificial Intelligence 17, 185 – 204
- Jähne B (1997)** Digital image analysis. Springer Verlag, Heidelberg
- Kümmerlen B, Dauwe S, Schmundt D, Schurr U (1999)** Thermography to measure water relations of plant leaves. In: Handbook on Computer Vision and Applications (eds B.Jähne, H.Haußecker, & P.Geißler), Volume III, pp. 763-781. Academic Press, New York
- Schmundt D, Stitt MN, Jähne B, Schurr U (1998)** Quantitative analysis of local growth rates of dicot leaves at high temporal and spatial resolution, using image sequence analysis. Plant Journal 16, 505-514
- Schurr U (1997)** Growth Physiology: Approaches to a spatially and temporally varying problem. (eds H.-D.Behnke et al.), pp. 355-373. Springer Verlag, Berlin
- Schurr U, Heckenberger U, Herdel K, Walter A, Feil R (2000)** Leaf development in *Ricinus communis* during drought stress – dynamics of growth processes, of cellular structure and of sink-source-transition. Journal of Experimental Botany 51, 1515-1529
- Walter A, Schurr U (2000)** Spatial variability of leaf development, growth and function. In: Leaf Development and Canopy Growth (eds B. Marshall & J. Roberts), Sheffield Academic Press, Sheffield
- Walter A, Spies H, Terjung S, Küsters R, Kirchgeßner N, Schurr U (2002)** Spatio-temporal dynamics of expansion growth in roots: automatic quantification of diurnal course and temperature response by digital image sequence analysis. Journal of Experimental Botany 53, 689-698

Methodischer Ansatz zur optischen Erfassung entomologischer Befallsdichten

Optical sensor approach for determination of entomological pest densities

Christian Bauch und Thomas Rath
Institut für Technik in Gartenbau und Landwirtschaft
Universität Hannover

Zusammenfassung: Für die Erfassung von kleinräumigen Heterogenitäten entomologischer Schaderreger innerhalb von Pflanzenbeständen wird ein methodischer Ansatz entwickelt, welcher eine automatisierbare, klassische Boniturmethode mit einer computerbildanalytischen Auswertungseinheit koppelt. Das zu entwickelnde System soll in der Lage sein, eine repräsentative Anzahl an Schaderregern (Weiße Fliege) aus einem Pflanzenbestand (Tomatenpflanzen) mechanisch zu lösen, aufzunehmen und vor eine Farb-CCD-Kamera zu transportieren. Anschließend sollen die gewonnenen Objekte optisch erfasst und durch den Einsatz der digitalen Bildanalyse in "Zielorganismus" (entomologischer Schaderreger) und biotische bzw. abiotische "Fehlerfassung" (Fremdorganismus, Staub, Pflanzenteile) differenziert werden. Die Erfassungseinheit wurde konstruiert und die prinzipielle Funktionsfähigkeit im Versuch getestet.

Deskriptoren: Computerbildanalyse; Populationsdichte; heterogene Befallsstärke; entomologische Schaderreger

Summary: *To collect small entomological pests heterogeneities within a plant population a simple, but automated classification which comes along with a computer image analysing unit is to be developed. Firstly the system should be able to take a representative number of pests (white fly) from the plant population (tomato plants) and carry it to an optical input unit (color CCD camera). Subsequently the obtained objects will be optically registered and divided into "goal organism" (entomological pests) and biotic and/or abiotic "error items" (other organisms, dust, plant parts) with the use of digital image analysis. The collection unit is designed and the operability in principle was tested.*

Keywords: *computer image analysis; population density; heterogeneous infestation strength; entomological pests*

1. Einführung

Selektiver Pflanzenschutz gehört zu den grundlegenden Forderungen sowohl im konventionellen als auch im ökologischen Land- und Pflanzenbau. Um ökologische und ökonomische Belange der Pflanzenproduktion besser als bisher berücksichtigen zu können, stehen spezielle situationsbezogene, phytosanitäre Maßnahmen, welche an die vorhandenen Schaderregerdichten angepasst werden können, im Mittelpunkt des Interesses.

In der Praxis erfolgt die Bestimmung der entomologischen Schaderregerdichte durch den Anbauer. Dieser führt an einigen, ausgewählten Punkten innerhalb seines Pflanzenbestandes eine Bonitur hinsichtlich der Befallsstärke durch. Auf der Grundlage der gewonnenen Daten, wird für die komplette Fläche die Notwendigkeit einer Pflanzenschutzmaßnahme bestimmt. Aufgrund variierender Umweltbedingungen neigen entomologische Schaderreger zu einer inhomogenen und zeitlich variierenden Verteilung innerhalb der pflanzenbaulichen Nutzfläche. Diese Heterogenität sorgt in vielen Fällen dafür, dass eine bestimmte Schadschwelle nur an bestimmten Stellen oder aber zu einer bestimmten Zeit im Bestand überschritten wird. Eine ganzflächige, nicht-situationsbezogene Maßnahme im Rahmen des Pflanzenschutzes liegt somit außerhalb eines ökologischen und ökonomischen Optimums. Aufgrund dieser Tatsache besteht ein dringender Handlungsbedarf, etwaige phytosanitäre Maßnahmen an die tatsächlichen oder regionalen vorhandenen Schaderregerdichten anzupassen.

Da eine ständige Befallskartierung der gesamten Anbaufläche durch den Anbauer auf Grund ökonomischer Restriktionen (hoher Zeit- und Arbeitsaufwand) nicht in Frage kommt, soll in dem hier näher beschriebenen Projekt die Möglichkeit untersucht werden, den Anbauer bei der Befallsermittlung mit Hilfe der Computerbildanalyse zu unterstützen.

2. Material und Methoden

Es gilt einen methodischen Ansatz zu entwickeln, welcher eine automatisierbare, klassische Boniturmethode mit einer computerbildanalytischen Auswertungseinheit koppelt. Das zu entwickelnde System soll im ersten Schritt in der Lage sein, eine repräsentative Anzahl von Schaderregern aus dem Pflanzenbestand mechanisch zu lösen, aufzunehmen und vor eine bildgebende Einheit zu transportieren (siehe Bild 1). Im zweiten Schritt sollen die gewonnenen Objekte optisch erfasst und durch den Einsatz der digitalen Bildanalyse in

"Zielorganismus" (entomologischer Schaderreger) und biotische bzw. abiotische "Fehlerfassung" (Staub, Pflanzenteile) differenziert werden. Hierbei wird angestrebt, mit Hilfe der digitalen Bildverarbeitung, quantitative Aussagen über die entomologische Befallsdichte treffen zu können.

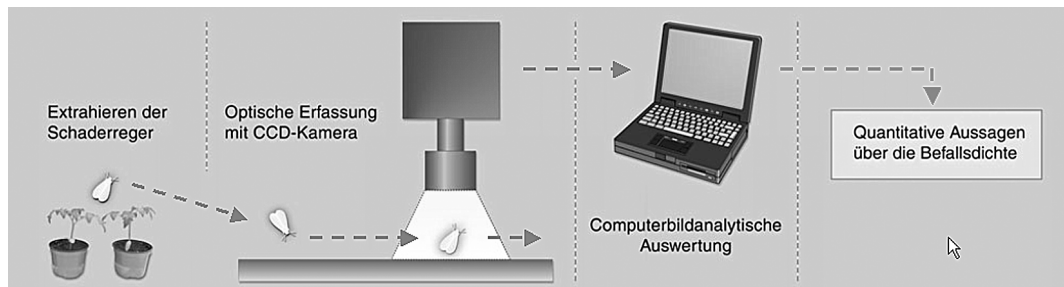


Bild 1: theoretischer Prozessablauf

Für erste einführende Untersuchungen wurde die Weiße Fliege (*Trialeurodes vaporariorum* und *Bemesia tabaci*) als entomologischer Schaderreger ausgesucht. Kriterien für diese Wahl waren:

- gartenbaulich relevanter Schädling mit hohem Schadpotential,
- Vorhandensein einer breiten entomologischen und phytosanitären Wissensbasis,
- markantes morphologisches Erscheinungsbild der adulten Individuen,
- relativ einfache Haltung und Zucht in Tageslichtversuchsanlagen,
- geringe mechanische Verankerung der adulten Individuen im Pflanzenbestand.

Als Versuchskultur mit gartenbaulicher Relevanz wurde die Tomate (*Lycopersicon lycopersicum*) ausgewählt. Die Kultivierung der einzelnen Pflanzen erfolgte unter Glas in 10 l Containern, welche mit einem Erdesubstrat aufgefüllt werden. Die Bewässerung erfolgt durch eine automatisierte Tropfbewässerung. Eine Besonderheit in der Kulturführung besteht darin, dass die Pflanzen nicht ausgegeizt werden. Dadurch wird ein buschiger Habitus erzielt, welcher für einen dichteren Pflanzenbestand sorgt.

Der experimentelle Versuchsaufbau sieht für den ersten Versuchsdurchlauf drei Reihen mit jeweils 56 Tomatenpflanzen vor, welche entlang der Reihe zu 8 Gruppen von je 7 Pflanzen angeordnet werden. Jede Gruppe wird durch einen 2 m langen, 1 m hohen und 0,7 m breiten Käfig abgedeckt. Die Käfigkonstruktion ist mit einem Insektenschutznetz (Econet SF) (Ludvig Svensson, 2002) bespannt, welches für die adulten Individuen der Weißen Fliege eine Aus- und Eintrittsbarriere darstellt. Dieser konstruktive Aufbau

ermöglicht es, vier individuelle Faktorabstufungen mit unterschiedlichen Populationsdichten aufzubauen. Der Faktor Populationsdichte wird im ersten Versuchsdurchlauf wie folgt abgestuft:

- hohe Befallsdichte (20 Individuen/Pflanze),
- mittlere (10 Individuen/Pflanze),
- geringe (5 Individuen/Pflanze),
- kein Befall (0 Individuen/Pflanze).

Die geplante Versuchsdurchführung sieht vor, dass zum Zwecke einer rechnergestützten Populationsdichtenbestimmung jeder Käfig mit der unten beschriebenen Erfassungseinheit analysiert wird.

3. Ergebnisse und Diskussion

3.1 Erfassungseinheit

Bild 2 zeigt den experimentellen Aufbau der Erfassungseinheit. Das entwickelte System gliedert sich in fünf funktionelle Baugruppen:

1. untere Unterdruckkammer
2. obere Unterdruckkammer
3. Saugschlauch
4. Transporteinheit
5. bildgebende Erfassungseinheit

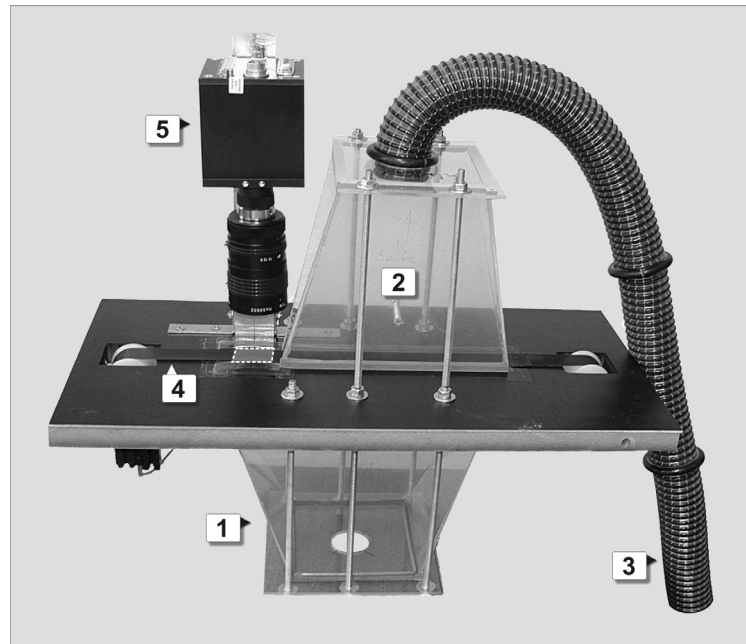


Bild 2: Experimenteller Aufbau der Erfassungseinheit

An die untere Unterdruckkammer wird ein Vakuumsauger angeschlossen. Dieser erzeugt durch Absaugen der Luft einen Unterdruck im unteren Behälter. Das entstehende Luftvolumendefizit kann durch nachströmende Luft, welche durch einen ca. 2 cm breiten und 15 cm langen Schacht in der sonst dicht abschließenden Trägerplatte nachfließen kann, ausgeglichen werden. Dadurch wird in der oberen Unterdruckkammer, welche ebenfalls luftdicht mit der Trägerplatte verbunden ist, ein Unterdruck erzeugt. Das für diesen Druckausgleich benötigte Luftvolumen fließt über einen ca. 3 m langen Kunststoffschlauch mit einem Rohrdurchmesser von ca. 10 cm in den oberen Behälter nach. Am freien Rohrende des Schlauches entsteht somit durch die einströmende Luft ein Sogeffekt. Die freie Öffnung des Saugschlauches wird bis auf ca. 5 bis 10 cm an den oberen Rand des Pflanzenbestandes herangeführt. Die effektive Saugleistung dieses Systems reicht aus, um fliegende und nicht mechanisch verankerte Insekten und Partikel aus dem oberen Bereich (10 – 15 cm) des Pflanzenbestandes zu lösen und aufzunehmen. Die eingesaugten Objekte gelangen, dem Luftstrom folgend, in die obere Unterdruckkammer und anschließend auf die Transporteinheit des Systems. Bei der Transporteinheit handelt es sich um eine luftdurchlässige Förderbandkonstruktion mit Partikelfilterfunktion. Als Material für das Transportband wird ein schwarzes, sehr feinmaschiges Insektenschutznetz (Econet SF) (Ludvig Svensson, 2002) eingesetzt, welches in der Lage ist, Partikel von einem Durchmesser $> 0,5$ mm aus dem durchströmenden Luftstrom herauszufiltern. Die herausgefilter-

ten Objekte werden durch die vorherrschende Sogkraft auf dem Transportband fixiert und mit einer kontinuierlichen Geschwindigkeit (von derzeit ca. 8 cm/s) aus der oberen Unterdruckkammer heraus und an der bildgebenden Einheit vorbeitransportiert. Als optische Erfassungseinheit wird eine 1 CCD-Chip Farbkamera mit progressiv Scanverfahren (TheimagingSource, 2001) verwendet. Die Bilderfassung kann dabei mit bis zu einer Frequenz von 12 fps erfolgen. Die gewonnenen Bilddaten werden für die anschließende digitale Computerbildanalyse an einen PC gesandt und dort zwischengespeichert (Bild 3). Im Anschluss an die Bilderfassung verlassen die extrahierten Objekte die fixierende Unterdruckzone und werden vom Transportband aktiv entfernt.

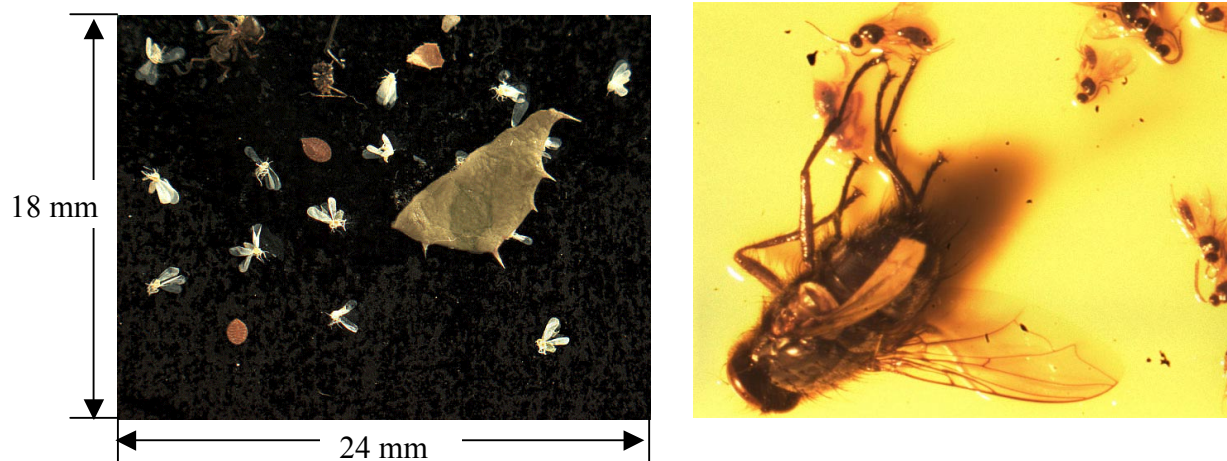


Bild 3: Beispielaufnahme der Erfassungseinheit. Links: weiße Fliege und Störobjekte, rechts zum Größenvergleich: Stubenfliege

3.2 Computerbildanalytische Auswertung

Erste experimentelle Aufnahmen der bildgebenden Einheit zeigten sehr häufig ein Konglomerat aus Ziel- (adulte weiße Fliege) und biotischen bzw. abiotischen Nichtzielobjekten (Fremdorganismen, Staub, Pflanzenteile). Bei der computerbildanalytischen Auswertung kommt es somit besonders auf eine korrekte Klassifizierung der Zielobjekte an. Es gilt daher, in einer der zukünftigen Untersuchungen festzustellen, welche Merkmale für eine eindeutige Objektklassifizierung herangezogen werden können. Es wird hierbei ein Ansatz angestrebt, welcher speziell auf typische Form- und Farbparameter des Zielorganismus abgestimmt werden kann. Im Anschluss an eine erfolgreiche Klassifizierung sollen die erkannten Zielorganismen gezählt werden.

3.3 Schädlingserfassung

Die Entwicklung der Erfassungseinheit (Prototyp) wurde abgeschlossen. Erste Untersuchungen zum prinzipiellen Einsatz bei weißer Fliege in Tomatenbeständen wurden erfolgversprechend durchgeführt. Arbeiten zur Objektklassifizierung und Objektauswertung werden folgen.

4. Literatur

Ludvig Svensson (2002) Insektenschutznetz Econet SF, Hellevoetsluis, Niederlande

TheimagingSource (2001) Produktinformation: Digitalkameras, DxD Serie, DFD 4023, TheimagingSource, Bremen

Schnelle Bildverarbeitung zur online Erfassung, Verfolgung und Beobachtung von Kleinstlebewesen

Fast image processing for online detection, tracing and observing of microorganisms

S Battmer¹, N Ellermann¹, A Linz¹, A Ruckelshausen¹ U Ruhnau², K Tovar², G Weidner²

¹Fachhochschule Osnabrück / Interdisziplinärer Forschungsschwerpunkt Intelligente Sensorsysteme ISYS

²EleGene AG, Martinsried

Kurzfassung: Die genetische Struktur von *C. elegans* ist gut bekannt und ähnelt der genetischen Ausstattung des Menschen. Hierdurch ist der Mikroorganismus prinzipiell gut geeignet, um beispielsweise neue Schmerzmittel zu erproben. Hierbei wird die Reaktion des Fadenwurms auf eine laserinduzierte thermische Belastung beobachtet. Die Ermittlung statistisch signifikanter Daten bedingt eine Automatisierung dieser "Thermal Avoidance Reaction". Mit einer CMOS-Kamera wird über eine spezielle Optik das Bild aufgenommen und die einzelnen Fadenwürmer identifiziert, wobei von Seiten der Bildverarbeitung eine flächenbezogene Methode ("Center-of-area") sowie ein linienorientierter Ansatz ("Skeleton") verwendet wurden. Vor und nach der kameragesteuerten thermischen Anregung des Fadenwurms durch einen Laser werden die Bewegungsparameter – z.B. die Bewegungsrichtung – erfasst. Mit Hilfe des automatisierten Bildverarbeitungssystems ergeben sich deutlich verbesserte technische Rahmenbedingungen für die zukünftige Erprobung von Schmerzmitteln.

Deskriptoren: Medikamentenforschung, *C. elegans*, CMOS-Kameras, Bildverarbeitung, Laser

Summary: *The well known genetic structure of C. elegans is very similar to that of human's. As a consequence this microorganism is principally a good candidate for the invention of new medicaments, as for example pain-relievers. This can be realized by analysing the reaction of the worm followed by a thermal activation via laser. Statistically significant data can, however, only be obtained by the automation of this "thermal avoidance reaction". A CMOS-camera in combination with a special optics is used to identify the worms, thereby applying an area-related image processing method ("Center-of-area") as well as a line-oriented software algorithm ("Skeleton"). The significant parameters (like direction of movement) are analysed before and after the thermal camera-controlled activation of a laser beam. The automated system offers strongly improved technical options in the field of the development of pain-relievers.*

Keywords: *Pharmaceutical research, C. elegans, CMOS-cameras, image processing, laser*

1. Einleitung

Nematoden eignen sich gut, die Wirkung pharmakologischer Substanzen zu erproben. Insbesondere sind die genetischen Strukturen des Fadenwurms *Caenorhabditis elegans* (*C. elegans*) sehr gut bekannt. Von besonderem Interesse ist dabei, dass sich die Ergebnisse solcher an Modellorganismen durchgeführten Tests relativ gut auf den Menschen übertragen lassen (Tovar 2001). Grund dafür ist die Tatsache, dass die genetische Ausstattung des Fadenwurms *C. elegans* der des Menschen sehr ähnlich ist. Über 60 Prozent der bisher beim Menschen in Verbindung mit Krankheiten identifizierten Gene sind bei *C. elegans* nahezu identisch vorhanden. Ausführliche Informationen, wissenschaftliche Veröffentlichungen und weitere Quellen findet man auf dem *Caenorhabditis elegans* WWW Server (<http://elegans.swmed.edu/>).

Ein weiterer Vorteil von *C. elegans* ist - verglichen mit klassischen Versuchstieren wie Mäusen oder Ratten - seine einfachere Haltung und Züchtung, da sich die Würmer schneller vermehren und erwachsen werden (die Tiere sind nach 3 Tagen geschlechtsreif). Dies bietet prinzipiell die Möglichkeit, durch Tests an einer Vielzahl untersuchter Fadenwürmer statistisch signifikante Resultate zu erzielen und Nebenwirkungen mit geringer Auftrittswahrscheinlichkeit zu detektieren.

Das TAV-Assay (**T**hermal **A**voidance **R**eaction) soll der Identifizierung und ersten Erprobung neuartiger Substanzen zur Schmerzlinderung dienen. Da die meisten Medikamente auch heute noch nach dem ‚trial and error‘ Verfahren entwickelt werden, war der Grundgedanke hierbei, möglichst schnell eine große Anzahl von Substanzen auf ihre Wirksamkeit hin untersuchen zu können.

Zur Durchführung solcher Tests wird auf die Nematoden ein Wärmereiz aufgebracht, der bei den Tieren ohne Schmerzmittelbehandlung zu einem Rückzugsreflex führt. Wenn die Tiere einem zu untersuchenden Schmerzmittel ausgesetzt worden sind, unterscheidet sich ihre Wärmevermeidungsreaktion vom normalen Reflexverhalten. Es lässt sich daher anhand der über die Wärmevermeidungsreaktion gewonnenen Bewegungsdaten eine Aussage über die schmerzlindernde Wirkung einer pharmakologischen Substanz treffen. Erste Tests wurden erfolgreich durchgeführt, wobei sich die Positionierung des Lasers ("per Hand") sehr zeitaufwendig gestaltet. Auch ergibt sich eine schlechte Reproduzierbarkeit.

Ziel und Zweck des Assays war es nun, eine geeignete Apparatur zu entwickeln, die in der Lage ist, automatisch die Tiere auf einer Oberfläche zu erkennen. Die Bewegungsdaten der Nematoden sollen rechnergestützt erfasst werden können und die Position für die

Wärmeimpulse zur Verursachung der Rückzugsbewegung punktgenau bestimmt und ausgelöst werden, um die Untersuchung von zu testenden Substanzen möglichst schnell und wirtschaftlich durchführen zu können.

2. Experimenteller Aufbau

Da der Wurm nur etwa 1 mm lang und ca. 80 μm breit ist, wird zur Erzeugung der lokalen Wärmemaxima ein Laser eingesetzt. Ein Laser bietet hierbei den Vorteil einer starken Fokussierung, so dass kleine Bereiche im Kopfbereich des Wurmes schnell und präzise erwärmt werden können, ohne sofort die komplette Umgebung zu erhitzen, was das Ergebnis verfälschen würde. In der automatisierten Ausführung der entwickelten Apparatur ist der Laser fest montiert und der Strahl wird von einem Galvanometer-Scanner auf der gewünschten Stelle positioniert (siehe Bild1).

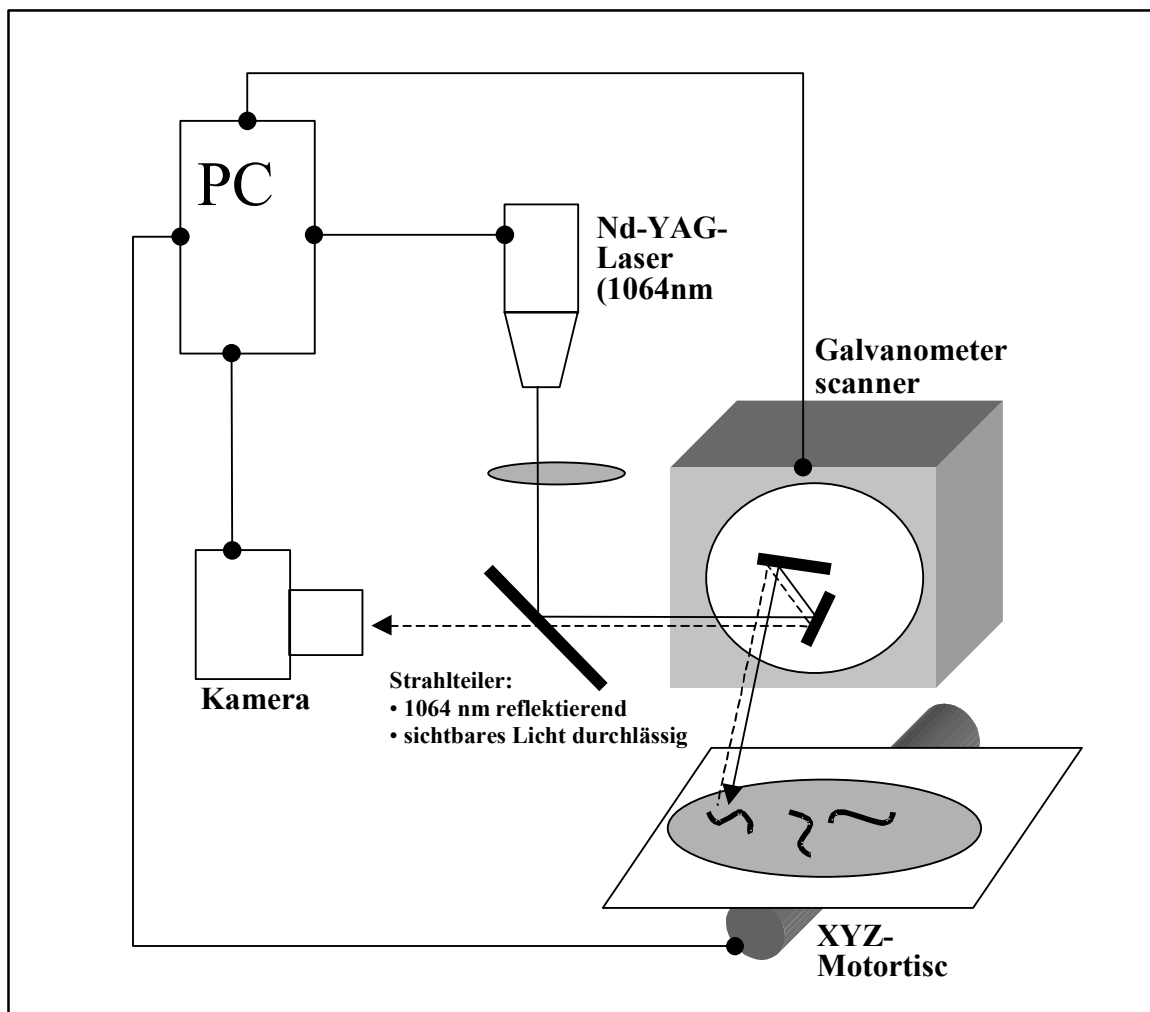


Bild 1: Schema zum experimentellen Aufbau des automatisierten TAV- Assays

Die Bewegungsebene der Würmer wird via Strahlteiler (sichtbarer Bereich) mittels einer Kamera aufgenommen. Es wurde eine lineare CMOS-Kamera der Firma PixeLink (PL-A 633) mit einer Auflösung von 1280 x 1024 Pixel, einer C++ - Entwicklungsumgebung und einem FireWire Interface eingesetzt (siehe auch www.pixelink.com). Der Einsatz von CMOS-Kameras bietet im Vergleich zu CCD-Kameras die Möglichkeit zur Erhöhung der Bildrate (frames per second) über das Auslesen bestimmter Bildbereiche: "region-of-interest" (Ruckelshausen und Linz, 2000).

Die Bilder werden an den PC übertragen, und dort mit Hilfe einer geeigneten Bildverarbeitungssoftware ausgewertet (siehe unten). Anhand der erhaltenen Daten über die Positionen der jeweils zu testenden Würmer können dann die Positionen für die Laserimpulse berechnet und abgegeben werden. Der Scanner übernimmt hierbei die Aufgabe der Positionierung des Laserstrahls auf der Ebene mit den Würmern. Er verfügt über zwei Ablenkspiegel für x- und y-Richtung. Diese können vom PC aus gesteuert und so der Lichtimpuls auf den Wurm gebracht werden. Vor, während und nach dem Auslösen des Wärmeimpulses wird jeder Wurm in Echtzeit von der Software verfolgt, und sämtliche Positionsdaten werden gespeichert. Mittels eines X-Y-Motortisches können Platten mit 96 einzelnen Flächen, auf denen jeweils mehrere Würmer aufgebracht sind, der Reihe nach getestet werden. Durch den hohen Automatisierungsgrad des Gesamtsystems kann eine beträchtliche Anzahl von Substanzen in verhältnismäßig kurzer Zeit getestet werden.

3. Bildverarbeitung

Die Software zur Realisierung des TAV-Assays wurde komplett in einer C++ - Umgebung mit folgenden Teilaspekten realisiert:

- Bildvorverarbeitung (z.B.: Rauschreduktion, inhomogene Beleuchtung, Pixelfehler)
- Laser: Kalibrierung relativ zur Kamera, Ansteuerung
- Objektidentifikation, -verfolgung und Parametrisierung (2 Methoden)

Zur benutzerfreundlichen Anwendung des Gesamtaufbaus wurde eine grafische Oberfläche programmiert (Bild 2), wobei auf der rechten Seite die Parameter zur Bildverarbeitung und Objektverfolgung angeordnet sind, im unteren Bereich des Fensters stehen die Steuerungselemente zur Bilddarstellung und Laserkontrolle zur Verfügung.

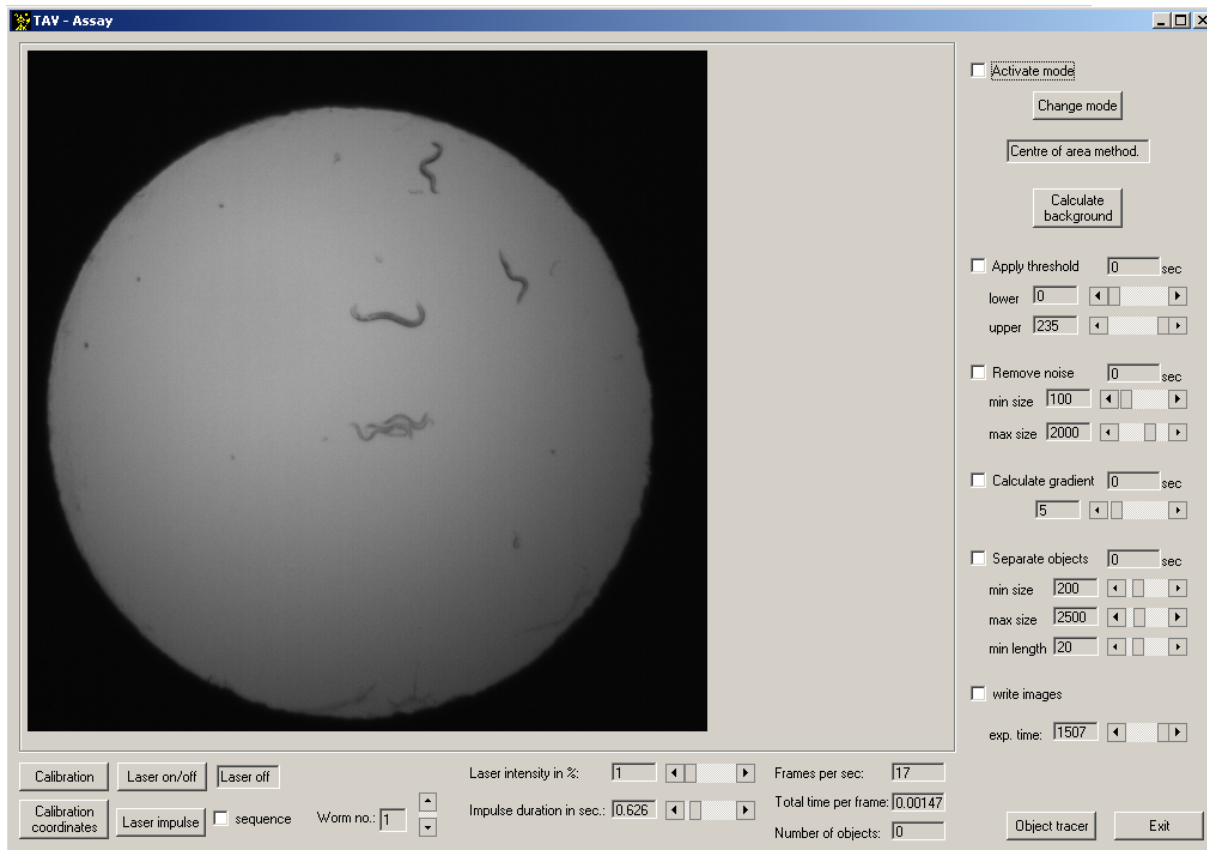


Bild 2: Grafische Benutzeroberfläche

Bildvorverarbeitung

Die Anwendung eines einfachen Schwellwertverfahrens zur Unterscheidung der Würmer vom Hintergrund ist in den meisten Fällen aufgrund der inhomogenen Beleuchtung des Testareals nicht möglich (siehe auch Bild 2). Weiterhin stören auch die Gefäßränder. Es wird daher zunächst ein Testbild aufgenommen und über eine berechnete Beleuchtungsfunktion das Originalbild korrigiert, wobei insbesondere die ungleiche Beleuchtung und die für die Bildverarbeitung störenden Strukturen (z.B. Gefäßrand, Luftblasen der Oberfläche) kompensiert werden.

Es folgen nun weitere Korrekturen zur Verbesserung der Selektivität. Hierbei wird ein Schwellwert gesetzt, das Rauschen reduziert sowie defekte Pixel (insbesondere "white pixels") korrigiert. Durch Verändern von Bildverarbeitungsparametern kann der optimale Kontrast über die Benutzeroberfläche eingestellt werden.

Laser

Die Positionen von Laser und X-Y-Tisch müssen aufeinander justiert werden. Hierzu wird zunächst das Bild des Nd: YAG-Lasers mit der Kamera aufgenommen. Anschließend werden Punkte einer geometrischen Teststruktur erfasst und auf den Laserstrahl positioniert. Die entsprechenden Scannerkoordinaten und Pixelkoordinaten der Kamera werden über ein Polynom zweiten Grades abgebildet.

Die Laserintensität sowie die Pulsdauer können durch entsprechende Buttons in der grafischen Benutzeroberfläche variiert werden. Weiterhin können – nach der Detektion und Kennzeichnung der Würmer – die einzelnen Würmer direkt über den X-Y-Tisch positioniert werden.

Objektidentifikation, -verfolgung und Parametrisierung

Zur Objektidentifikation wurden zwei verschiedene Verfahren verwendet, die auf der Benutzeroberfläche aktiviert werden können (siehe auch: Gonzales 1987, Soille 1998). In der "**Centre-of-area-method**" werden auf Basis von vorgegebenen minimalen und maximalen Flächen die Würmer selektiert. Die "**Skeleton-method**" reduziert die Geometrie des Wurms auf eine Kurvenstruktur. In beiden Verfahren werden zusätzliche Algorithmen zur Problematik überlappender Würmer sowie dem Auffinden des Kopfes angewendet.

Bild 3 zeigt das Ergebnis einer Objektidentifikation nach einer Bildvorverarbeitung und der Anwendung der "Skeleton-method". Die einzelnen Objekte werden durchnumeriert, auch werden markante Punkte angezeigt, die zur Positionierung des Lasers dienen sowie der Auswertung der Bewegungsabläufe des Wurms vor und nach dem Laserimpuls.

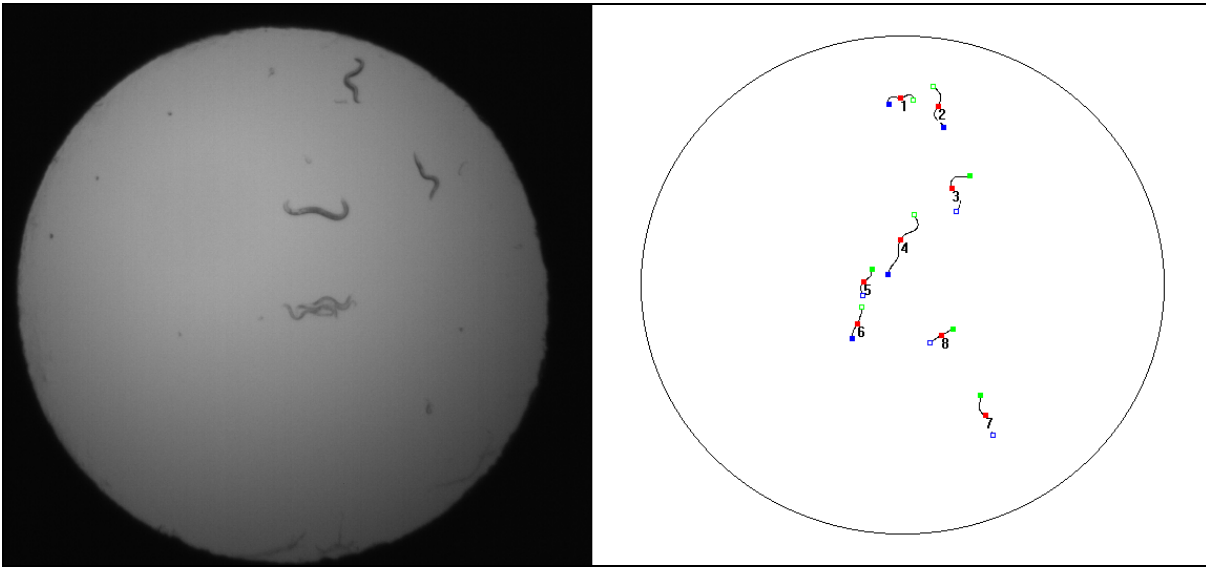


Bild 3: Unverarbeitetes Bild (links), verarbeitetes Bild nach der "Skeleton-method" (rechts)

Die gesammelten Daten über die Bewegung einzelner (oder aller) Tiere können wahlweise online oder auch nachträglich dargestellt werden. (siehe z.B. Bild 4).

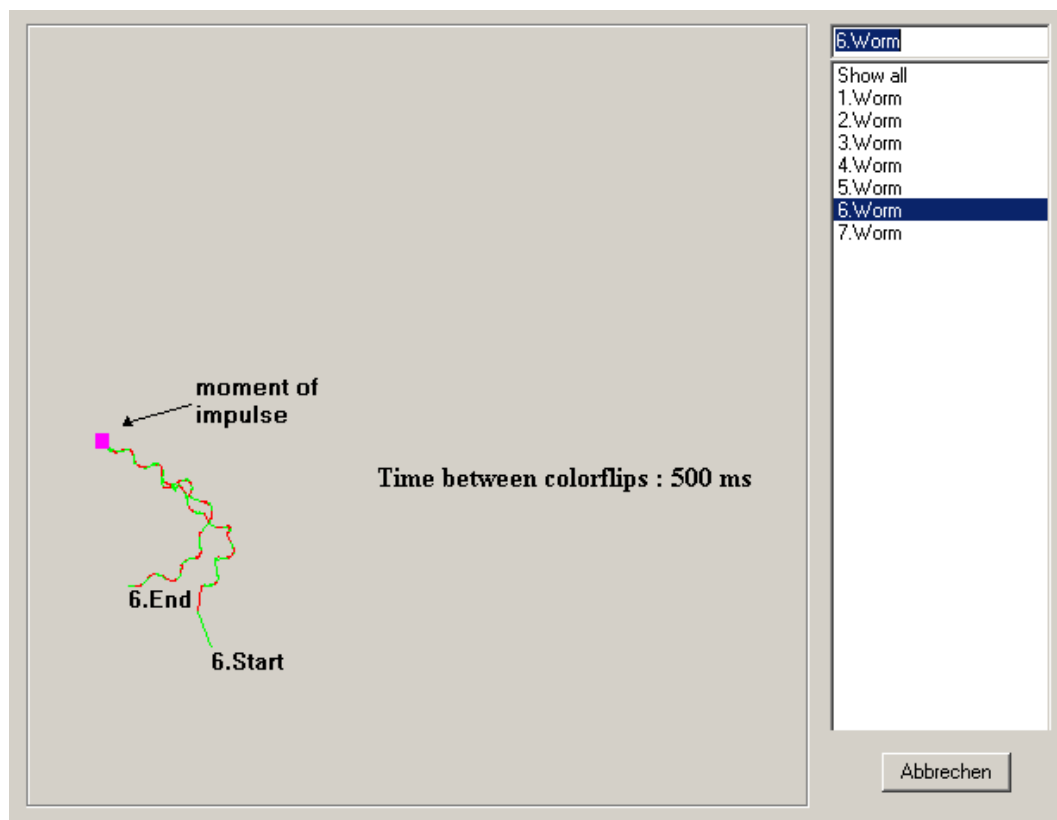


Bild 4: Auswertung der erhaltenen Bewegungsdaten

4. Ergebnisse und Ausblick

Zur Automatisierung des TAV-Assays steht eine erste Version funktionsfähig zur Verfügung. Hierbei werden die Kalibrierung von Laser, Kamera und X-Y-Tisch, die Bildvorverarbeitung sowie die Objektidentifikation via PC gesteuert, wobei verschiedene Optionen eingestellt werden können. Typische Bildverarbeitungszeiten lagen zwischen 3 und 60 Millisekunden. Zusammenfassend zeigen die Vorversuche für die Anwendung der "Skeleton-method" etwas erfolgversprechendere Resultate (siehe Tabelle 1). Die Bildverarbeitungszeit kann bei Bedarf durch die "Region-of-interest"-Methode bei CMOS-Kameras weiter reduziert werden, hierzu wurden Voruntersuchungen vorgenommen.

Tabelle 1: Qualitativer Vergleich der beiden Methoden

	Skeleton Method	Centre-of-area Method
Processing Time	0	+
Quality of Results	+	-
Influence of Picture quality	0	+
Preference	x	

Die Zuverlässigkeit der Apparatur muss zunächst anhand von größeren Versuchsreihen evaluiert werden. Eine dauerhafte Unterscheidung mehrerer Würmer auf engstem Raum ist problematisch und würde die Entwicklung weiterer Algorithmen erfordern. Eine Beschränkung auf eindeutig identifizierte Einzelwürmer erscheint pragmatischer. Weiterhin muss die Empfindlichkeit gegenüber Schwankungen der Lichtintensität sowie Einflüssen der Luftfeuchtigkeit betrachtet werden.

In der nächsten Entwicklungsstufe der Apparatur muss – vor einer Weiterentwicklung der Bildverarbeitung – zunächst das Verhalten des Wurms auf thermische Reizung genauer erforscht werden, um zu brauchbaren Aussagen über die von der Apparatur erhaltenen Daten zu gelangen. Hierbei wird es insbesondere wichtig sein, dass man zu dauerhaft reproduzierbaren Ergebnissen gelangt, anhand derer dann das Testen potentiell pharmakologisch wirksamer Substanzen automatisiert möglich wird.

Die Marktentwicklung im Bereich der Computerprozessoren und der CMOS-Kameras wird zu immer leistungsfähigeren Systemen bei gleichbleibenden oder sinkenden Kosten führen. Daher werden in absehbarer Zeit auch noch leistungsfähigere Bildverarbeitungsalgo-

rithmen eingesetzt werden können, ohne dass die notwendige Bildrate Gefahr läuft unterschritten zu werden.

Die gesammelten praktischen Erfahrungen lassen in Kombination mit der Marktentwicklung und der Einschätzung der technologischen Entwicklung den Schluss zu, dass sich im Bereich der Medikamentenforschung mit Modellorganismen die Bedeutung der Computer-Bildanalyse deutlich erhöhen wird.

5. Literatur

Gonzalez RC, Wintz P (1987) Digital Image Processing, Addison-Wesley Publishing Company, ISBN: 0-201-11026-1

Ruckelshausen A, Linz A (2000) CMOS-Kameras zur online Erfassung spektraler und geometrischer Signaturen von Pflanzen und Pflanzeigenschaften, Bornimer Agrartechnische Berichte, Heft 25, S.101-110

Soille P (1998) Morphologische Bildverarbeitung; Springer Verlag, ISBN: 2-540-64323-0

Tovar K (2001) A Small Worm with Great Potential, Screening Trends in Drug Discovery, 2/2001, S. 36-40, GIT Verlag, Darmstadt

Erzeugung und Auswertung von 2D-Druckverteilungsbildern

Generation and analysis of 2 D pressure distribution frames

Ermyas Mulugeta, Ingo Truppel und Martin Geyer
Institut für Agrartechnik Bornim e.V., Max-Eyth-Allee 100, 14469 Potsdam

Kurzfassung: Mit Hilfe eines Foliensensors wurde die Druckbelastungsverteilung auf der Aufprallfläche durch den Strahl ausgewählter Düsen gemessen. Das Messverfahren bietet Möglichkeiten für die Untersuchung der Reinigungseffektivität der Düsen und Beschädigungsgrenzen verschiedener Gemüsearten durch die gezielte Variation der Betriebs- und Düsenparameter. Dabei kann die Verteilung der Kraftbelastung räumlich detailliert erfasst und analysiert werden. Im Zusammenhang der Analyse der Düsen mittels der erfassten Kraftdaten wurde im ATB ein Auswerteprogramm entwickelt. Am Fallbeispiel einer Flachstrahldüse LU 90-04, die zur Erprobung der erarbeiteten Bewertungsverfahren eingesetzt wurde, sind Aussagen zu relevanten Parametern aus den Messdaten abgeleitet worden.

Deskriptoren: Düse, Drucksensor, Aufpralldruckverteilung, Gemüsewäsche

Abstract: *By using a thin-film sensor the impact pressure distribution on the impact surface by the water jet of selected nozzles was measured. The measuring process increases the potential for evaluating the nozzle cleaning effectiveness, as well as for analysing of the damaging limit of different vegetable sorts by varying the operating and nozzle parameters. Thereby, the impact pressure distribution can be measured and analysed spatially in a detailed way. In this context, a programme for handling of measured data was developed. Examples of relevant results, which were derived from the pressure data measured for the flat fan nozzle LU 90-04 used to test the evaluation methods obtained, are presented.*

Keywords: *nozzle, impact pressure sensor, impact pressure distribution, vegetable washing*

1. Allgemeines

Das Reinigen von pflanzlichen Oberflächen mit Wasserstrahlen ist ein wissenschaftlich wenig untersuchtes Arbeitsgebiet. Über die Reinigungsparameter von Waschdüsen, welche den Reinigungsprozess maßgeblich beeinflussen, ist nur wenig bekannt. Sie zu ermitteln ist ein wesentliches Ziel des Projektes „Entwicklung von Waschdüsen für eine effizientere Wäsche von Gemüse und Speisekartoffeln“.

Dieses BMBF-Projekt zielt letztendlich auf die Optimierung der Parameter Reinigungswirkung, Frischwasser- und Energieverbrauch an Gemüsereinigungsmaschinen mit Spritzdüsen. Im Zusammenhang werden:

- Grundlagen für Auswahlkriterien zum Einsatz von optimierten, auf die Verschmutzung und das Produkt abgestimmten Spritzdüsen erstellt und
- Vorschläge zur Modifikation sowie Neuentwicklung von wassersparenden und energetisch optimalen Zweistoffdüsen hinsichtlich des Reinigungsgrades erarbeitet.

Die Arbeiten im ATB begannen mit der Erarbeitung einer Untersuchungsmethodik zur Erfassung der hydromechanischen Eigenschaften des Strahls unterschiedlicher Düsen am Versuchsstand. Im Rahmen der Ermittlung der Zusammenhänge von Wasserstrahlkraft und Reinigungswirkung ist ein standardisiertes Prüfverfahren erarbeitet worden.

Durch den Einsatz verschiedener messtechnischer Verfahren werden wichtige Informationen zur Herstellung von Beziehungen zwischen den verschiedenen Einflussparametern auf den Reinigungsprozess und der Reinigungswirkung gewonnen. In dem Zusammenhang wird u.a. die räumlich aufgelöste Verteilung der Strahlkraft über die Aufprallfläche erfasst. In diesem Beitrag sollen einige Lösungsansätze zur Gewinnung dieser projektrelevanten Parameter mit dem Tekscan-Drucksensor vorgestellt werden.

2. Theoretische Grundlagen / Kenntnisstand

Beim Reinigen mittels Düsen sind die physikalischen Strahl- und Tropfeneigenschaften, u.a. das Größen-, und das Geschwindigkeitsspektrum der Tropfen, für die entstehende Tropfenenergie und den Tropfenschlageffekt (impact-pressure) ausschlaggebend. Ein definierter Einsatz an Tropfenenergie ist notwendig, um die Haftkraft zwischen Gemüseoberfläche und Schmutz zu überwinden.

Die Möglichkeit der simultanen Erfassung von Tropfengrößen und Tropfengeschwindigkeiten gestattet eine energetische Betrachtung der Tropfen.

In der Praxis wird durch die subjektive Auswahl unterschiedlicher Düsen vorbestimmt, wie die von einer Pumpe gelieferte hydraulische Leistung P_h (Vetter, 1990)

$$P_h = p \cdot \dot{V} \quad (1)$$

in die Anteile Spritzdruck p und Volumenstrom \dot{V} aufgeteilt wird. Die optimale Paarung dieser Größen begünstigt die Reinigungswirkung des erzeugten Spritzstrahls.

Mit Hilfe der Impulsgleichung

$$I = m \cdot v = \int F \cdot dt \quad (2)$$

werden die Zusammenhänge zwischen den Parametern Aufprallkraft F , Spritzdruck und Volumenstrom wie folgt beschrieben:

$$F \sim \rho \cdot \dot{V} \cdot \sqrt{p} ; \text{ für } v \sim \sqrt{p} \quad (3)$$

Mit der Gleichung (1) ergibt sich

$$F \sim P_h / \sqrt{p} \quad \text{bzw.} \quad F \sim \sqrt{\dot{V} \cdot P_h} \quad (4)$$

Das heißt, dass bei gleichbleibender Gesamtleistung der Pumpe mit der Erhöhung des Durchflusses die gesamte Aufprallkraft steigt. Dagegen ruft die Erhöhung der Spritzdruckes eine Absenkung der gesamten Strahlkraft hervor.

Wenn der aus einer Düse austretende Waschwasserstrahl auf eine Oberfläche auftrifft, so übt er auf die Oberfläche eine Druckkraft aus. Durch Einsetzen von

$$\dot{V} = A \cdot v \quad (5)$$

aus der Kontinuitätsgleichung in Impulsgleichung (2) ergibt sich die Gleichung

$$F = \rho \cdot A \cdot v^2, \quad (6)$$

die die aus der Aufprallkraft resultierende Druckbeanspruchung der Oberfläche beschreibt. Die Steigerung des Spritzdruckes ist verbunden mit einem vergrößerten Volumenstrom. Infolge des dadurch größeren Impulses der Tropfen können sie in Abhängigkeit ihrer Größe und Geschwindigkeit räumlich unterschiedliche Druckkräfte auf die Aufprallobfläche hervorrufen. Auf der anderen Seite verstärkt sich jedoch der Trend zum Tropfenzerfall, der mit einer Impulsverringern verbunden ist. Vetter, (1990) stellt bei seiner Untersuchung mit Hochdruckreinigern fest, dass mit zunehmendem Durchfluss, hervorgerufen durch die Spritzdruckerhöhung, der Strahlwinkel und damit die Spritzbreite

bzw. –fläche geringfügig größer wird. Dabei entsteht die Frage nach der Dominanz der verschiedenen Mechanismen und deren Auswirkung auf die Strahlkraftverteilung durch praxisübliche Spritzdrücke für die Gemüsewäsche.

Die Untersuchungen von Rose (1997) haben ergeben, dass entsprechend dem Impulssatz die gesamte Aufprallkraft in Abhängigkeit vom Spritzdruck mit zunehmendem Abstand der Spritzdüse zur Aufprallfläche erhalten geblieben ist.

Impulssatz: *Bei Systemen von Massenpunkten ist der Gesamtimpuls, der gleich dem mit der Gesamtmasse multiplizierten Vektor der Schwerpunktgeschwindigkeit ist, gleich der Summe der einzelnen Impulsvektoren. Das Zeitintegral über die äußeren Kräfte des Massenpunktsystems ist gleich der Differenz aller Impulse. Sind keine äußere Kräfte vorhanden, so bleibt der Gesamtimpuls erhalten.*

In eigenen Untersuchungen wurden unter Zugrundelegung der ermittelten Tropfengrößen- und Tropfengeschwindigkeitswerte die Impulse der Einzeltropfen betrachtet. Der Gesamtimpuls nimmt bei den untersuchten Düsen mit zunehmender Entfernung unterhalb der Düse geringfügig ab. Die Abnahme des gesamten Impulses ist mit steigendem Spritzdruck aufgrund der erhöhten Wechselwirkung Tropfen – Umgebungsluft ausgeprägter. Durch die höhere Relativgeschwindigkeit zur Umgebung bei den höheren Spritzdrücken verstärkt sich der Trend zum Tropfenzerfall, der eine stärkere Impulsverringerung des Einzeltropfens hervorruft.

Bei einem Düsenabstand (a) von 100 mm und einem Spritzdruck von 8 bar wurde für die Flachstrahldüse LU 90-04 ein Gesamtimpuls von 1,08 kg m/s errechnet, während bei $a = 200$ mm ein Gesamtimpuls von 0,89 kg m/s ermittelt wurde. Somit ergibt sich ein Impulsverlust von ca. 20 %.

Die Messungen zur Flüssigkeitsverteilung durch Variation des Düsenabstandes ergaben, dass eine Verdopplung des Düsenabstandes mit der zweiten Potenz in die vom Strahl erfasste Fläche eingeht. Damit ändern sich die Strahlkennwerte pro Flächeneinheit (Volumen-, Tropfenstromdichte und Impulsflussdichte) stark mit den entsprechenden Auswirkungen auf die Aufprallkraft an der Spritzfläche. Die Aufprallkraft je Flächeneinheit nimmt mit zunehmendem Düsenabstand um ein Vielfaches ab. In Abhängigkeit des Spritzdruckes ist bei einer Verdopplung des Düsenabstandes eine Abnahme der mittleren Volumenstromdichte bzw. Impulsflussdichte (\sim Aufpralldruck) [Nienhaus (1983)] um 72 bis 73 % zu beobachten.

Die Inhomogenität der Tropfen im Spritzstrahl hinsichtlich ihrer Größe und ihrer Geschwindigkeit ruft räumliche Variabilität der Aufprallkraft der Einzeltropfen sowie der Aufprallkraft pro Flächeneinheit (Impulsflussdichte) innerhalb der Aufprallfläche hervor (siehe Bild 5). Mit dem Tekscan-Sensor lässt sich die Verteilung der Aufprallkraft bzw. der Aufpralldrücke über die Sensorfläche, die aus den unterschiedlichen Strömungsverhältnissen bei der Tropfenentstehung und aus der Beeinflussung der Tropfen durch die Umgebungsluft resultiert, feststellen.

3. Erfassung der Strahlkraftverteilung mittels Tekscan-Sensor

Zum Aufbau des Sensors und zum Messsystem wird auf die Arbeit von Herold, Geyer & Studman, 2001 verwiesen. Der Tekscan-Sensor Typ 5051 erlaubt die Erfassung der Druckkraftverteilung auf einer Fläche mit einer punktuellen Auflösung von 44×44 , mit je $1,27 \times 1,27 \text{ mm}^2$ großen Pixeln. Der eingesetzte Sensor misst auf einer 8-bit-Skala maximal $0,05 \text{ MPa}$ (7 psi) mit einer Auflösung von ca. $0,2 \text{ kPa}$. Die Pixel eines Kraftverteilungsbildes werden 100 mal in der Sekunde ausgelesen (100 Hz -Framerate).

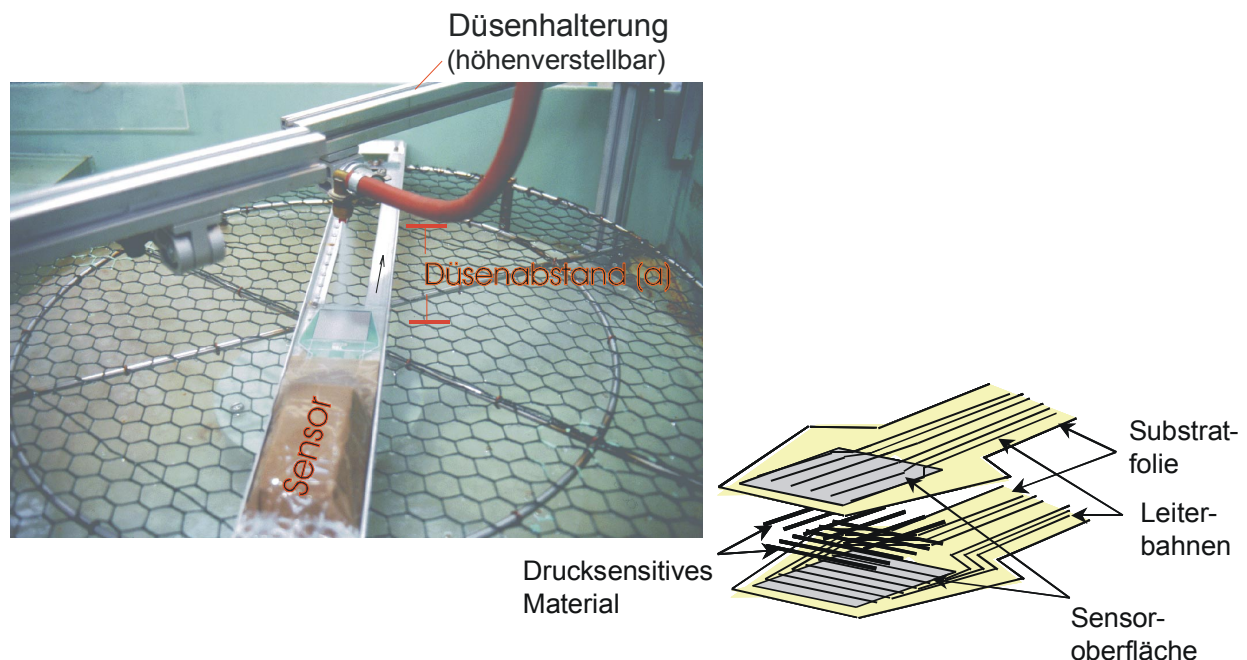


Bild 1: Schematischer Aufbau des Sensors und dessen Anordnung zur Bestimmung der Aufprallkraft des Strahls am Versuchsstand

Die Tropfenhäufigkeit liegt deutlich über der Abtastfrequenz und ist mit dieser nicht synchronisiert. Die Wahrscheinlichkeit, mit einer einzelnen Aufnahme den maximalen Druck

an einem Ort des Sensors zu erfassen, ist gering und von der Tropfenhäufigkeit, der Abtastfrequenz, der Wirkdauer des Tropfenaufpralldruckes und der Integration je Pixel (ca. 3 μ s) abhängig.

Mit der Zahl der Abtastungen (Framezahl) erhöht sich die Wahrscheinlichkeit das gesuchte Maximum zu erfassen. Daher wurden verschieden lange Aufzeichnungen (Belastungsbildfolgen) erzeugt und aus allen Bildern jede Bildfolge durch Vergleich und Substitution jeweils ein resultierendes Maximalbelastungsbild erzeugt. Für die durchgeführten Messungen interessiert vor allem der an jedem Pixel auftretende maximale Druck, der durch den Tropfenimpuls hervorgerufen wird. Das erzeugte Bild stellt für jedes Pixel die maximal aufgetretene Kraft dar. Die Schlagwirkung der Tropfen bzw. die Beschädigung der Gemüseoberfläche durch den Tropfenschlag ist von der Maximalkraft abhängig. Die kleineren Messwerte werden vernachlässigt, da aufgrund der Funktionsweise des Sensors nicht ersichtlich ist, ob sie während des Druckaufbaus eines Tropfens bestimmt worden sind oder tatsächlich Maxima kleiner Tropfen darstellen.

Trägt man für diese Maximalkraftbilder jeweils die Summe über alle Pixel (bzw. den mittleren Maximaldruck) über der Messdauer auf, so zeigt sich erwartungsgemäß ein ansteigender Verlauf mit Übergang in die Sättigung, d.h. nach einer bestimmten Mindestmesszeit ist die Wahrscheinlichkeit, dass quasi für jeden Pixel der Maximaldruck mindestens einmal erfasst wurde nahezu 1.

Zum sicheren Erreichen dieses Sättigungsverhaltens wurde für die weiteren Untersuchungen eine Mindest-Messzeit von 120 s (~ 12 000 Frames) festgelegt.

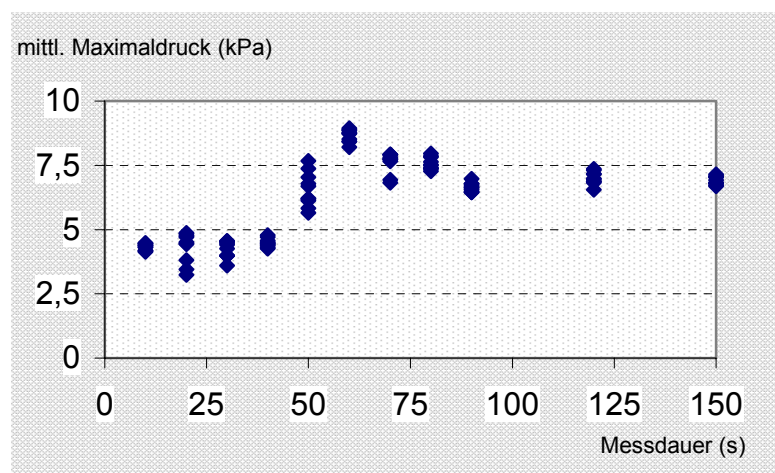


Bild 2: statistische Stabilität der Messergebnisse
(Spritzdruck: $p = 5$ bar; $a = 100$ mm; Flachstrahldüse: LU 90-04)

Die Messungen wurden in zwei ausgewählten Entfernungen (a) von der Düse vorgenommen, wobei die gesamte Aufprallfläche des Strahls in der jeweiligen Messebene durch das Verschieben des Sensors in Schritten von 32 mm gescannt wurde. Die vom Meßsystem erzeugten Rohdaten (binäre Zahlen zwischen 0 und 256) werden mittels eines im ATB entwickelten Kalibrieralgorithmus Truppel, (2001) in pixelbezogene Kraftwerte (N) umgerechnet.

4. Messdatenauswertung

Mit Hilfe des für die Auswertung entwickelten Programms werden nacheinander folgende Aufgabenstellungen, die aus den Problemen bei der Ableitung projektrelevanter Parameter aus den Rohdaten resultieren, abgearbeitet:

- Umrechnung der registrierten Binärwerte in Kraftwerte durch die Implementierung der berechneten mittleren Kalibrierfunktion der Einzelpixel in das Auswerteprogramm
- Bereinigung der Messdaten von defekten Pixeln mit Dauersignalen durch Subtrahieren eines vor Beginn des Messvorganges aufgenommenen, belastungsfreien Nullbildes
- Bildung eines resultierenden Belastungsbildes mit pixelbezogenen Maximalwerten aus den gesamten Bildern über dem vorbestimmten Schwellenwert
- Zusammenfügen der überlappten Teilbilder einer Spritzfläche. Die Spritzfläche kann durch die Sensorfläche nicht mit einem Mal erfasst werden. Die gesamte Aufprallfläche des Strahls wurde durch das Verschieben des Sensors gescannt. Anschließend wurden die Einzelbilder zu einem Belastungsbild zusammengesetzt.

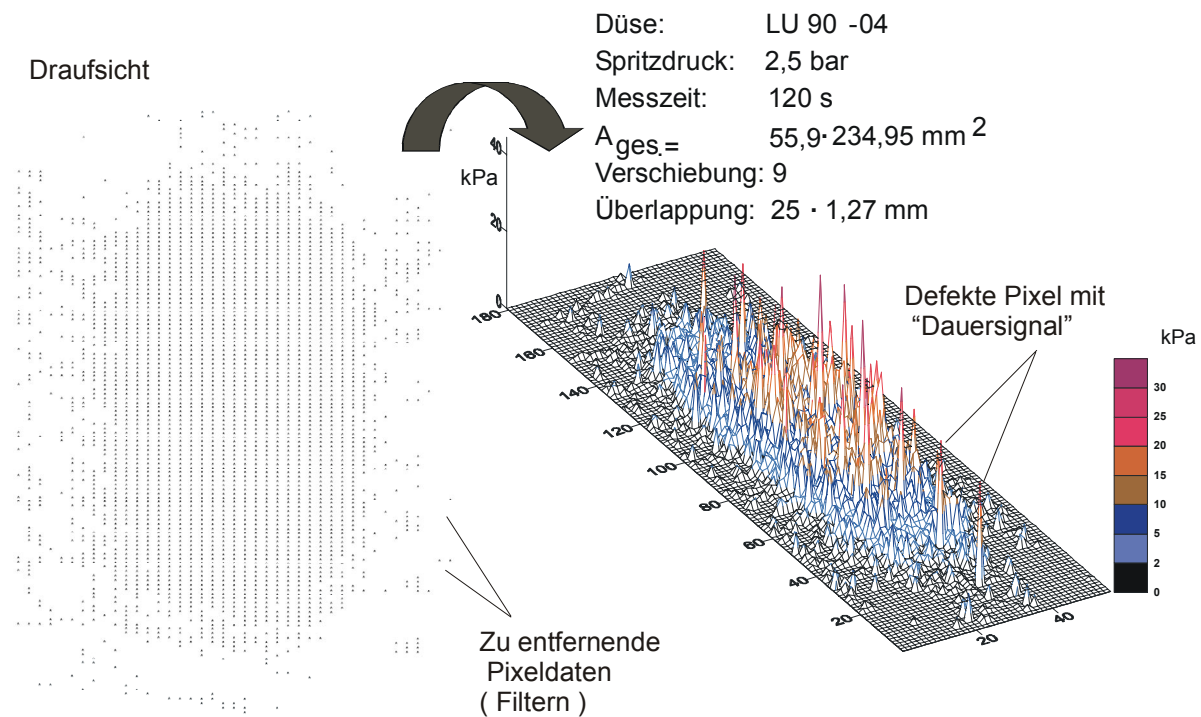


Bild 3: Darstellung eines zusammengefügteten Belastungsbildes mit der Maximalkraftverteilung, unbereinigt und ungefiltert

- Bestimmung der projektrelevanten Strahlparameter (Größe und Umriss der wirksamen Spritzfläche mit der Angabe der Spritzbreite und –tiefe) nach einer Filterung des Belastungsbildes mit einer Dichtefunktion. Eine Filtermaske in der Größe von 5×5 Pixeln wird über das Belastungsbild geschoben und somit eine Dichte für die Flächengröße der Filtermaske errechnet. Die Pixel, deren Dichtewerte einer Schwelle (20 % der maximal an einem Pixel vorhandenen Dichte) unterschreitet, werden vernachlässigt. Das heißt, von den umliegenden 24 Pixeln aus der Filtermaske müssen mindestens weitere 4 Pixel belegt sein. Die übriggebliebenen von Null verschiedenen werden auf jeweils den Wert eins gesetzt und bilden damit eine binäre Maske zur Selektion der auszuwertenden Pixeldaten (Kraftwerte).

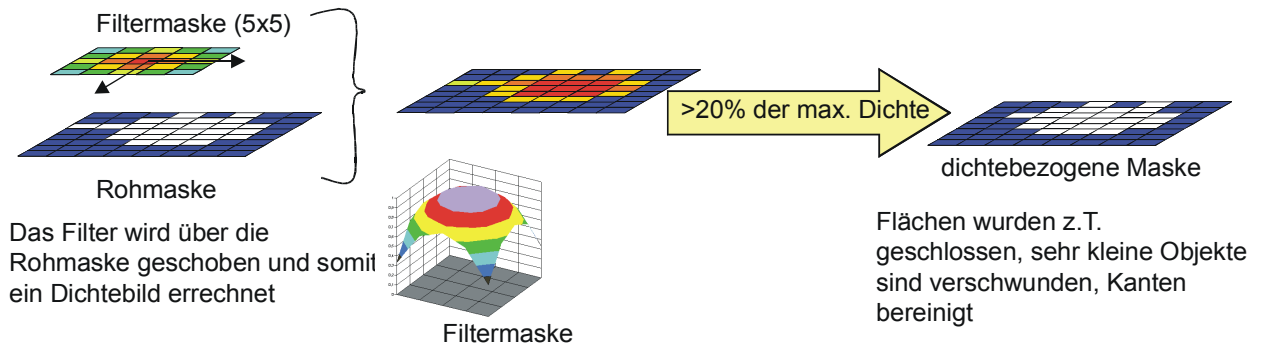


Bild 4: Schematische Darstellung der Arbeitsweise mit der Filtermaske im Programm

Die Filterfunktion schließt kleine Löcher in Flächen und entfernt die nicht-verbundenen Einzelpixel, Spritzer, außerhalb der Hauptspritzfläche. Ein nach-geschalteter Algorithmus entfernt kleine Pixelcluster außerhalb der wirksamen Spritzfläche. Anschließend wird die wirksame Spritzfläche aus der mit Kraftwerten belegten Pixelzahl errechnet.

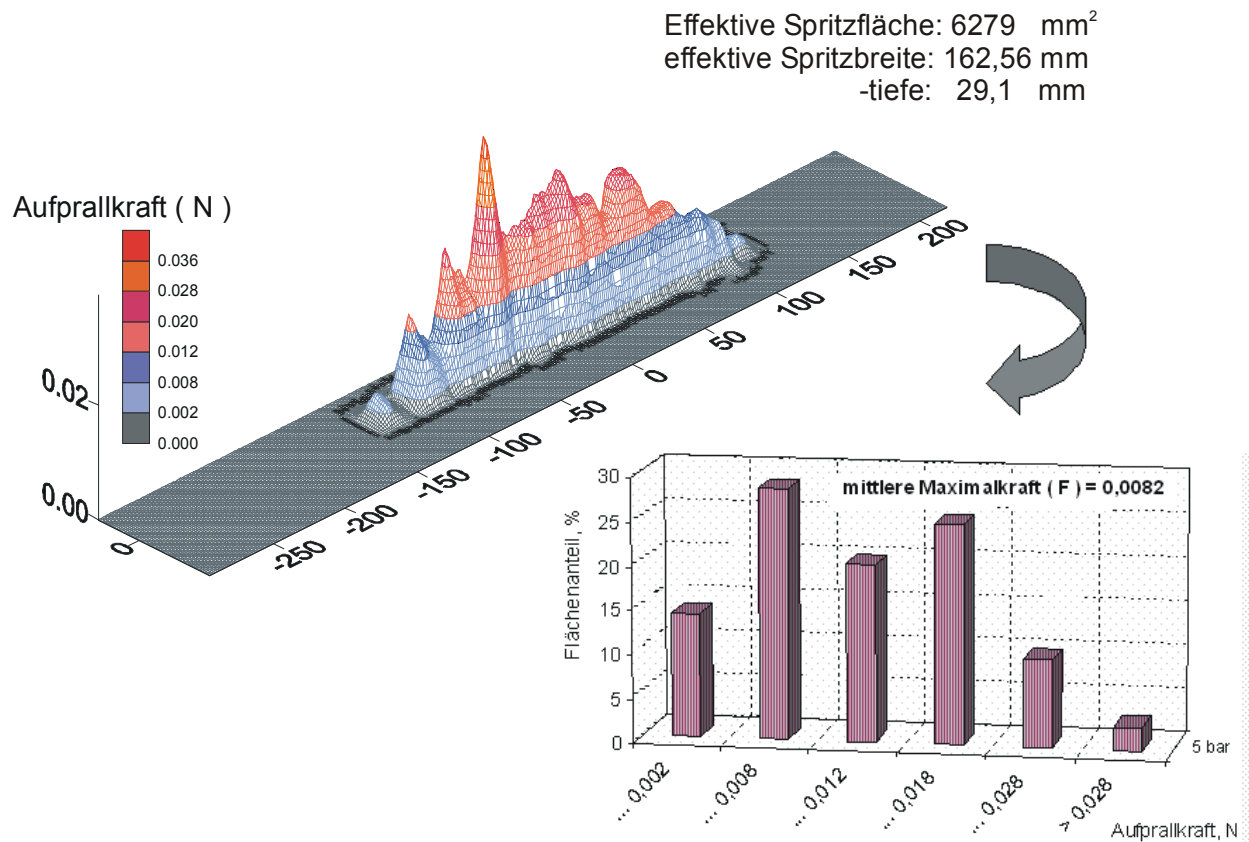


Bild 5: Auswertergebnis einer Strahlkraftmessung mittels Tekcan-Sensor, Flachstrahldüse LU 90-04, Spritzdruck p=5 bar, Düsenabstand a=100 mm

Im Ergebnis liegen die für die wirksame Spritzfläche repräsentative sowohl räumlich aufgelöste Strahlkraft/-druckverteilung als auch globale Informationen bezüglich des mittleren Maximaldrucks vor.

Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung durch das Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMBF) (BEO) Kennziffer 033 9992

5. Literatur

Herold B, Geyer M, Studman CJ (2001) Fruit contact pressure distributions equipment, Computers and electronics in agriculture, 32, p. 167-179

Rose G (1997) Untersuchung zur Reinigung bei der Feldverpackung von Frischgemüse, Dissertation, Universität Hohenheim

Truppel I (2001) Kalibrierung des taktilen Foliensensors TEKSCAN. unveröffentl., ATB Potsdam

Vetter K (1990) Verbesserung der Reinigungstechnologie beim Einsatz von Hochdruckreinigern mit dem Ziel der Wassereinsparung und Wasserwiederverwendung. BMFT-Forschungsbericht (02WT 8728/5), Winnenden

Nienhaus K (1983) Ein Beitrag zur Gesteinzerstörung durch Höchstdruckwasserstrahlen. Reinisch-Westfälische Technische Hochschule, Aachen

An Agricultural Mobile Robot for Mechanical Weed Control

Ein landwirtschaftliches Roboterfahrzeug zur mechanischen Unkrautbekämpfung

Björn Åstrand and Albert-Jan Baerveldt

Halmstad University, Halmstad Sweden, Bjorn.Astrand@ide.hh.se

Halmstad University, Halmstad Sweden, Albert-Jan.Baerveldt@ide.hh.se

Summary: In this paper the design of an autonomous agricultural mobile robot for mechanical weed control in outdoor environments is presented. The robot employs two vision systems. One vision system is able to recognise the row structure formed by the crops and is able to guide the robot along the rows. The second, colour-based vision system is able to identify a single crop among weed plants. This vision system controls a weeding-tool, which is able to remove the weed within the row of crops. The row-recognition system is based on a novel algorithm and has been tested extensively in outdoor field tests and proven to be able to guide the robot with an accuracy of ± 2 cm. It has been shown that colour vision is feasible for single plant identification, i.e. discriminating between crops and weeds. The system as a whole has been verified, showing that the subsystems are able to work together effectively. A first trial in a greenhouse showed that the robot is able to perform weed control within a row of crops.

Keywords: mobile robot, weed control, vision system, row structure, plant identification

Kurzfassung: In diesem Beitrag wird die Konstruktion eines autonomen landwirtschaftlichen Fahrroboters zur Unkrautbekämpfung im Freiland vorgestellt. Der Roboter arbeitet mit zwei visuellen Systemen. Ein visuelles System erkennt die Reihenstruktur der Kulturpflanzen und führt den Roboter entlang der Reihen. Das zweite, Farbkamera gestützte System identifiziert eine einzelne Kulturpflanze unter Unkräutern. Dieses visuelle System steuert ein Hackwerkzeug, das Unkraut in der Pflanzenreihe entfernt. Das Reihenerkennungssystem verwendet einen neuartigen Algorithmus und wurde umfangreichen Tests im Freiland unterzogen, wobei eine Steuerungsgenauigkeit von ± 2 cm erreicht wurde. Das Farbkamerasystem ist in der Lage einzelne Pflanzen zu identifizieren, d.h. zwischen Kulturpflanzen und Unkraut zu unterscheiden. Das Gesamtsystem wurde verifiziert, indem das effektive Zusammenwirken der Subsysteme gezeigt werden konnte. Ein erster Test in einem Gewächshaus ergab, dass der Roboter geeignet ist, die Unkrautbekämpfung in der Reihe durchzuführen.

Deskriptoren: Fahrroboter, Unkrautbekämpfung, Visuelles System, Reihenstruktur, Pflanzenidentifikation

1. Introduction

The world-wide problem of environmental pollution caused by excessive use of herbicides and the increasing cost of chemicals calls for alternative methods of crop protection. A potential way to reduce chemicals is by the use of precision techniques for various types of agricultural operations so that chemicals can be placed where they have an optimal effect at a minimum quantity. For some operations it will even be possible to abandon the use of chemicals and apply other methods, e.g. mechanical weed control. There is political interest in the European Union to increase the amount of ecologically grown products. The goal is that about 5-10 % of the total field area should be processed by organic farming methods by the year 2005. Organic farming is not only a political goal; there is also a push from the market. More and more customers are asking for products that are organically grown. This has led to a problem for companies that need to increase their supplies of organically grown products to meet customer demands. For example, it is difficult to extend the amount of organically grown sugar beets at present, because weed control in the seedling of sugar beet is done by human labour, which implies high costs and difficulties in recruiting workers. The motivation for the work reported here is to reduce the amount of herbicides used for crop protection in agriculture by replacing chemical weed control by mechanical weed control. The elimination of chemical weed control is one of the requirements for the nomination "ecologically grown". The goal of this paper is to present a vision-guided mobile robot, figure 1, able to perform mechanical weed control between the plants in the seedling of sugar beets plants, thus totally eliminating the need for chemical weed control. The fulfilment of the goals will result in considerable savings both in ecological and economic terms.



Figure 1: Mobile robot

In section 2 the design of the mobile robot, which employs two vision systems, is presented. One vision system recognises the row structure in the field and is able to guide the robot along the rows of sugar beet plants. The row-following system is presented in section 3. The other vision system, which is based on colour images, is able to recognise the sugar beet plants among weeds and controls the weed removing system. This vision system is presented in section 4. Finally, preliminary results of a field test are presented.

2. Design of the mobile robot

Approach

Sugar beet plants are cultivated in rows, which divides the problem of weed control into two parts: weed control between and weed control within the rows, i.e. in the seed line between crop plants. Weed control between the rows only requires the recognition of a row structure whereas weed control within the row requires the recognition of individual sugar beet plants among weed, which is a more complex perception task. As most crops are cultivated in rows, the focus of the vision-oriented research in general for guiding agricultural implements has been to obtain an estimate of the row position. There have been a number of publications of successful implementations of row-following [1, 2, 3, 4]. However, there have only been published a few systems for individual plant recognition tested in field. Tillett *et al.* [5] developed an autonomous robot for precision spraying in a transplanted cauliflower field. Their robot has two driving wheels, with one motor for each wheel, at the front and two passive wheels at the rear. A camera is placed between the front axle, viewing an area of 2 m². The same vision system is used for the row-guidance information as plant position estimation. Segmentation is achieved by several steps of image processing, based on near-infrared images, to be able to discriminate weeds from crops [6]. Slaughter *et al.* [7] have developed a system based on machine vision for precision spraying of in-row weeds in tomato fields. The system is mounted on a vision-guided row cultivator [4], which is able to track the centre of the seed line of the crop. Separate cameras are used for row recognition and for single crop recognition. The reason for this is the often-reported problem with non-uniform illumination. By employing two cameras, the vision system for plant recognition can be encapsulated and thus control over illumination can be taken.

The systems described above has focused on precision spraying and not mechanical weed control for in-row weeds, which is the aim of this work. Another important aspect of our work is that the organically grown cultivation we aim at, implies a relatively high number of up-to twelve weed-plants per crop (in our case sugar beet plants). Moreover, as sugar beet plants are sown and not planted the crop and weed have about the same size, see figure 2. Both these two factors make the recognition task of both the row structure and individual plants much more difficult. Existing algorithms for row-recognition were not sufficient for our application [1, 2, 3, 4]. Therefore we decided to develop both a new row-recognition algorithm and a new plant recognition algorithm which fit the requirements imposed by organically grown farming of sown crops.



Figure 2: *Above:* When crops are sown the weed and crop, encircled, have about the same size (ecological grown). *Below:* compared to transplanted crops below.

Our approach is to separate the task of finding rows and the task of plant identification. A forward-looking camera with a near-infrared filter is used to find the position of the row, see figure 3. A colour camera system is then used for single plant identification. It is mounted inside the robot to be able to control the illumination, as shown in figure 3. A colour camera system is especially sensitive to changing illumination as it causes colour shifts, thus making classification harder. Therefore, taking control over illumination will most likely increase the classification rate.

Mechanical design

The robot is designed to intra-row cultivate one row at the time. The forward looking camera looks at two rows at the same time and looks at a segment of about 5 meters long. Looking at such a relatively large area makes the row-recognition system robust to missing plants and to a relatively high weed pressure, typical for ecological farming. The down-looking camera looks perpendicular to the ground in a window of 45 x 80 cm

along one row structure. This means that there appear at least four sugar beet plants in each image, as the distance between the plants is about 17 cm. The row-distance in sugar-beet fields is about 48 cm, which restrict the physical width of the robot to about 70 cm. The length of the robot is about 120 cm and the steering mechanism is an Ackerman-steering controlled with a DC-servo-motor. A potentiometer is used for calibration while an encoder, which has an approximate resolution of 700 pulse/degree, determines the current position of the steering-motor. To prevent the steering mechanism from being damaged by the motor there are two end switches attached for blocking the steering motor if the steering angle is out of range. The robot has two driving wheels at the rear, equipped with encoders with an approximately resolution of 24000 pulse/m. For safety reasons the driving motors are equipped with brakes, which are electrically controlled (breaks if power off). The robot is powered by batteries for indoor testing and by a combustion-engine driven generator for field tests. The mechanical weeding tool is a rotating wheel that is rotated perpendicular to the row line. The tool processes only the area between crops in the seed line. If a crop appears, the tool is fast lifted up by a pneumatic cylinder and lowered directly after the crop is passed. The down-looking camera identifies and localises the position of every sugar-beet plant. The position is then sent to the controller of the weeding-tool. To minimise the time delay between the time of the position estimation and the time the crop reaches the weeding-tool, the tool should be located as close as possible to the border of the field of view of the camera. Therefore the weeding tool is located at the rear of the robot directly after the rear driving-axle.

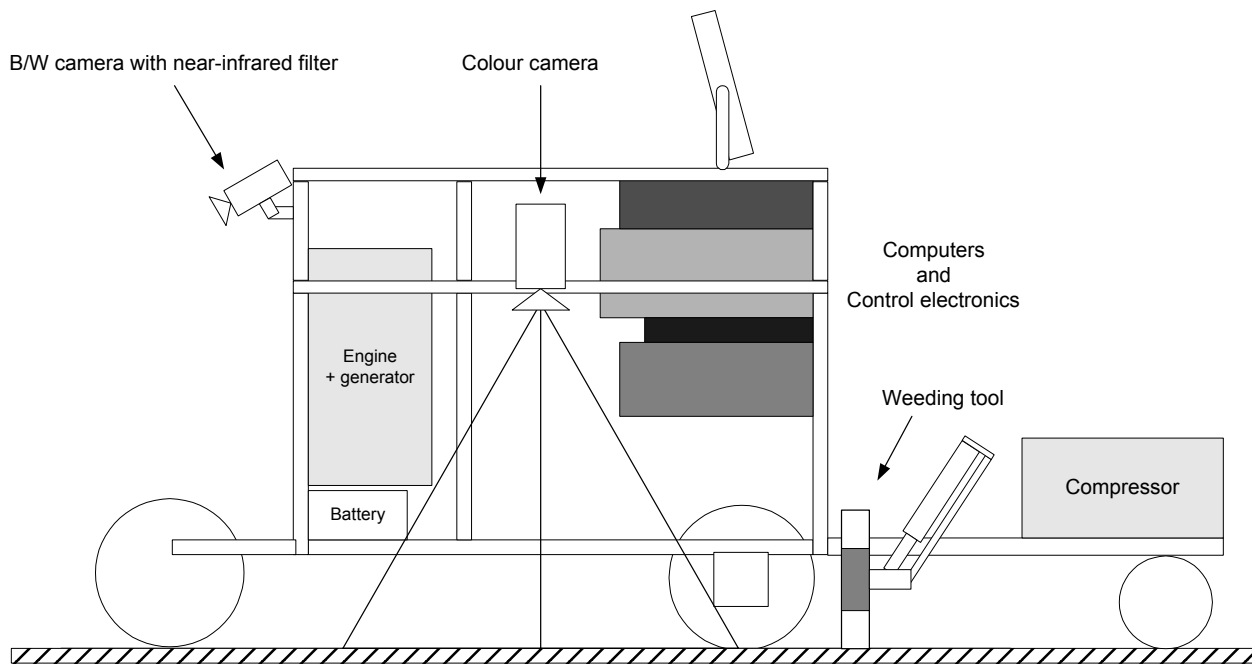


Figure 3: Mobile robot with weeding tool at the rear

Hardware and sensors

The robot has two main sensors, the vision system for row following and the vision system for plant identification. Each of those systems has industrial-PC-based hardware for grabbing and processing the images. A third computer, the main computer, is running under QNX, which is a real-time operation system, and controls all systems and actions of the robot. It is equipped with two IO-cards for digital and analog input and output. There is also an IO-card for interfacing the encoders of the motors. The robot is also equipped with two emergency buttons for quick shut down of the system and a joystick for manually driving the robot. All communication between the main computer and the vision subsystems is done over a serial line.

Software architecture

The software architecture is based on the blackboard architecture [8]. This means that all sensor data is available through a blackboard and in principle assessable by all tasks, as shown in figure 4, which is the main advantage of the approach as it is very difficult to predict which data that might be needed in the future by which task. A special kind of blackboard architecture was designed in our case to make sensor data public. It is usual to use a blackboard architecture, which places data in a shared memory, but here, a multi-client server platform was created. In this architecture data of each sensor

or group of sensors has its own server process. Every process that needs this data can request them from the appropriate server. The advantage of this is that a blackboard server for a new sensor, for example in our case GPS, which we aim to integrate in the future, easily can be created (without changing the source code of the existing part of the blackboard which would be the case if a centralised blackboard that serves all data was employed). Another advantage is that a blackboard system uncouples the data representation from the sensor. This means, that it is possible to filter the data from the sensor before it is made public, resulting in the advantage that this filtering only needs to be done once. However, a drawback with this type of architecture is the overhead resulting from additional context switching. Another drawback is, as the sensor data is not directly read from sensor, that the age of data has to be checked. This is solved by adding a time stamp to all data.

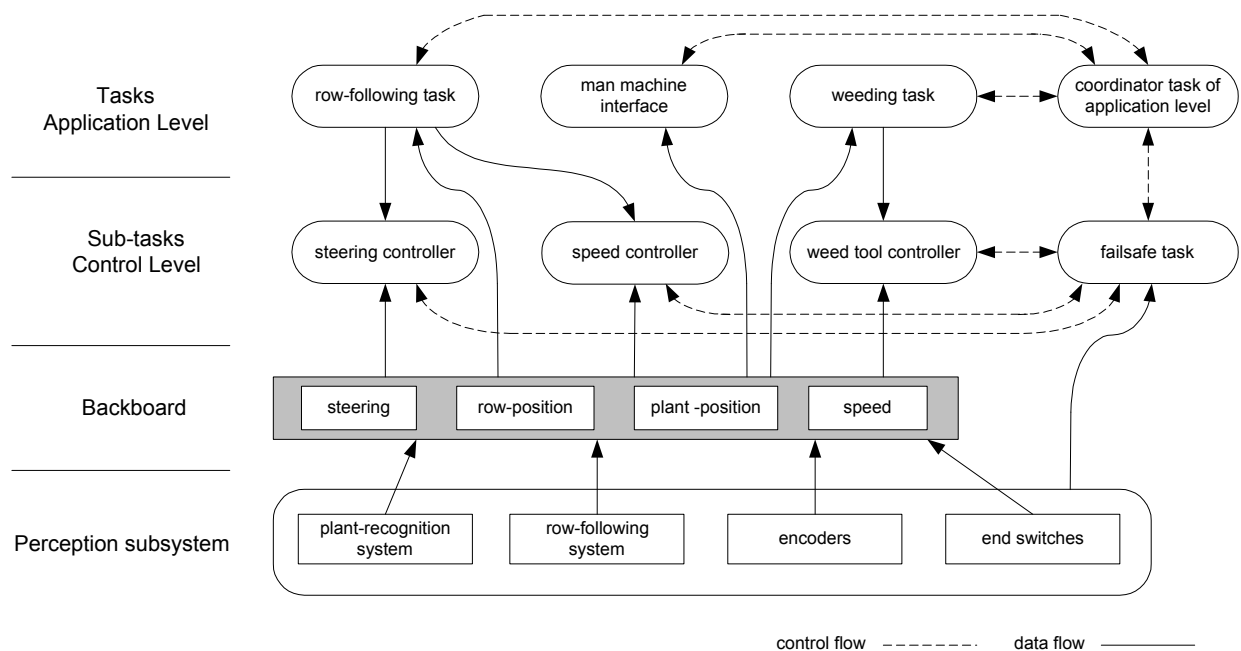


Figure 4: Control layer and application layer receiving sensor data from a blackboard

Exchanging data between different tasks in the system is a very important issue when designing the software architecture. Since controllers should not be suspended, waiting for a new desired value, asynchronous communication is necessary. This is the second reason to why server processes are used in this design. Every task that wants to send data asynchronously to another process writes this data into a so-called *buffer task*, that stores the data until it is overwritten or consumed by the other task. A consumer always

reads the oldest data. The software architecture is divided into two layers, see figure 4: a control layer and an application layer. The motivation for the two-layer approach is to make the control level, which contains a speed-, weeding and steering controller, independent from the application layer. That means that the interface to the control layer is fixed and changes in the application layer should not affect the control layer [9].

3. Row following

As said in the previous section, existing algorithms for row-recognition were not sufficient for our application. No system has been reported to work on high weed pressure, up to twelve weeds/crop, with sown crops. Therefore, a new algorithm for row-recognition was developed to satisfy these requirements. A forward-looking grey-scale camera with a near-infrared filter is used to find the position of the row. Using near-infrared filter gives a high-contrast image, where living plant material is bright and the soil is dark [10]. To decrease the effect of different light conditions an opening operation is performed on the image and the result is subtracted from the original image. This results in an intensity-independent gray-level image from which a binary image can be derived with a fixed threshold. In the resulting binary image, plant material from both weeds and crops is white and the rest, coming from soil, stones and residues is black. Based on the binary image the next step is to detect the row of crops in the image. To control for example a mobile robot or other tool, the offset s and the heading angle α of the camera relative to the row structure must be known. The Hough transform is a well-known and robust method to find lines, especially if the lines cover the whole image as in our case [11]. Normally the lines are found with their equation in the image space e.g. $y_i = ax_i + b$, where the coefficients a and b are found with the Hough transform. This could also be done based on the binary image of plant material. All pixels coming from the crops contribute to the line and all pixels from the weeds are just noise. However, as shown in [12] by using perspective transformation, there is a linear relation between offset to the row s and the angle to the row α for a given pixel (x_i, y_i) . (See equation 1, where the constants A , B and C are functions of (x_i, y_i)).

$$A\alpha + Bs + C = 0 \quad (1)$$

This means that the Hough transform directly can be performed for s and α . The Hough-space, $H(s, \alpha)$, is then an accumulator where each pixel coordinate (x_i, y_i) in the binary image, which is on, contributes (even if it is belonging to a weed plant). Every such pixel (x_i, y_i) forms a straight line in the Hough-space. The recognition of the row of crops among the weeds is achieved due the fact that weeds are uniformly distributed in the field, whereas all the crops grow exactly in a row, thus leading to a peak in the Hough-space, as shown in figure 5.

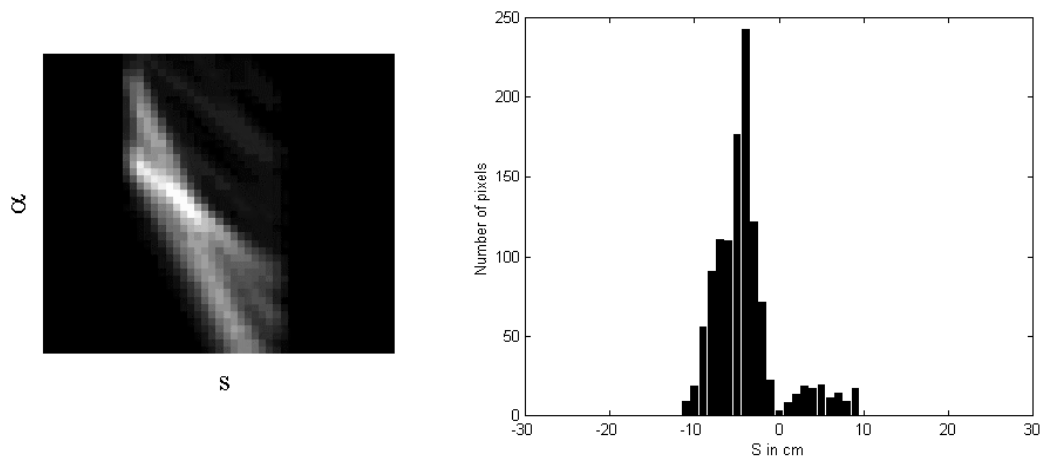


Figure 5: Hough space accumulator and distribution of s for a specific α .



Figure 6: Rectangular box corresponds to a number of adjacent s -cells

The novelty of this algorithm is that we model a plant row with a rectangular box instead of a line. The width of the box is equal to the average width of the plants and the length of the box is "unlimited" as it fills the whole image. The rectangular box can be de-

scribed by a set of parallel adjacent lines, which appear in the image as a set of lines which intersect in one virtual point outside the image, as shown figure 6, due to perspective geometry. The number of lines is the width of the box divided by the line thickness, which is determined by the pixel size of the image. In our Hough-space this means that for one value of α the rectangular box corresponds to a number of adjacent s-cells. By summing up the contributions of the adjacent s-cells we obtain the support for a rectangular box, i.e. for the row of plants. The best estimate of s and α is found by searching for the maximum of the sum of adjacent s-cells in our Hough-space. Adaptation to different size of the plants can easily be done, by reducing or increasing the number of adjacent s-cells.

Figure 5 shows an example of the Hough-space and the corresponding distribution of s for the correct value of α . In this example the sum of three adjacent s-cells is calculated to find the most likely values of s and α .

If more than one row is used each row has then its own corresponding Hough-space. Information from the different rows can be fused together by calculating the average of s and α derived from the individual Hough-spaces. Another possibility is to sum up the contributions from all Hough spaces for each cell (s, α), thus forming a common Hough-space and extract the most likely value of s and α from this one. The resolution of the Hough-space, i.e. the size of the cell (s, α) must be chosen carefully, where the resolution of the camera plays a major role. The size of s and α are chosen so that this corresponds to at least one pixel difference. In this implementation the resolution of s was set to 1 cm and of the heading angle, α , to 0.2 degrees.

Performance of the system

To evaluate the row-recognition system a number of real images were used to verify the system [12]. Three sets of images from sugar-beet plants at three different stages of growth were included. Also one set of images from a rape field was used. From each set of images a subset of 70 spatially distributed images was chosen. For all images, the real position of the camera relative to the rows was estimated by a human observer. The result of this test-set showed that the row-recognition system has a good performance ranging from 0.6 cm standard deviation of error to 1.2 cm, depending on plant size. Moreover, it is shown that by using two rows instead of one the accuracy is improved significantly. The row recognition system has been implemented on an inter-row cultivator [13]. The system consists of a tractor that the farmer drives along the rows

with the cultivator mounted at the rear of the tractor. A steering-unit based on a very thin steering wheel, which cuts through the soil, is used to control the position of the cultivator based on the input of the row recognition system. Extensive field tests have shown that the system is sufficiently accurate and fast to control the cultivator in a closed-loop fashion with a standard deviation of the position between 2.0 and 2.4 cm. The vision system is also able to detect exceptional situations by itself, for example the occurrence of the end of a row [14].

Implementation on the robot

The robot should be able to follow a row of plants guided by the row-following vision system. To evaluate the row recognition system a number of tests were performed both indoor and outdoor. For the indoor tests a number of artificial plants were placed in a corridor. The camera for the row recognition system was mounted at the front of the robot looking at two rows simultaneously. At the weeding position, at the rear of the robot, see figure 3, a second camera was mounted to measure the actual position offset to the row of the robot. During the test the robot was driving at 0.2 m/s. The error of the lateral offset measured by the vision-system was ± 1 cm and the error measured with the down looking camera at the weeding-tool position was ± 0.5 cm, as illustrated in figure 7.

The system was even tested outdoors on a rape field for about 80 meters. The typical offset error was about ± 2 cm during this test as measured by the row-recognition vision system. So at the tool position half of this value can be expected according to the results obtained indoors, which is sufficient for our application.

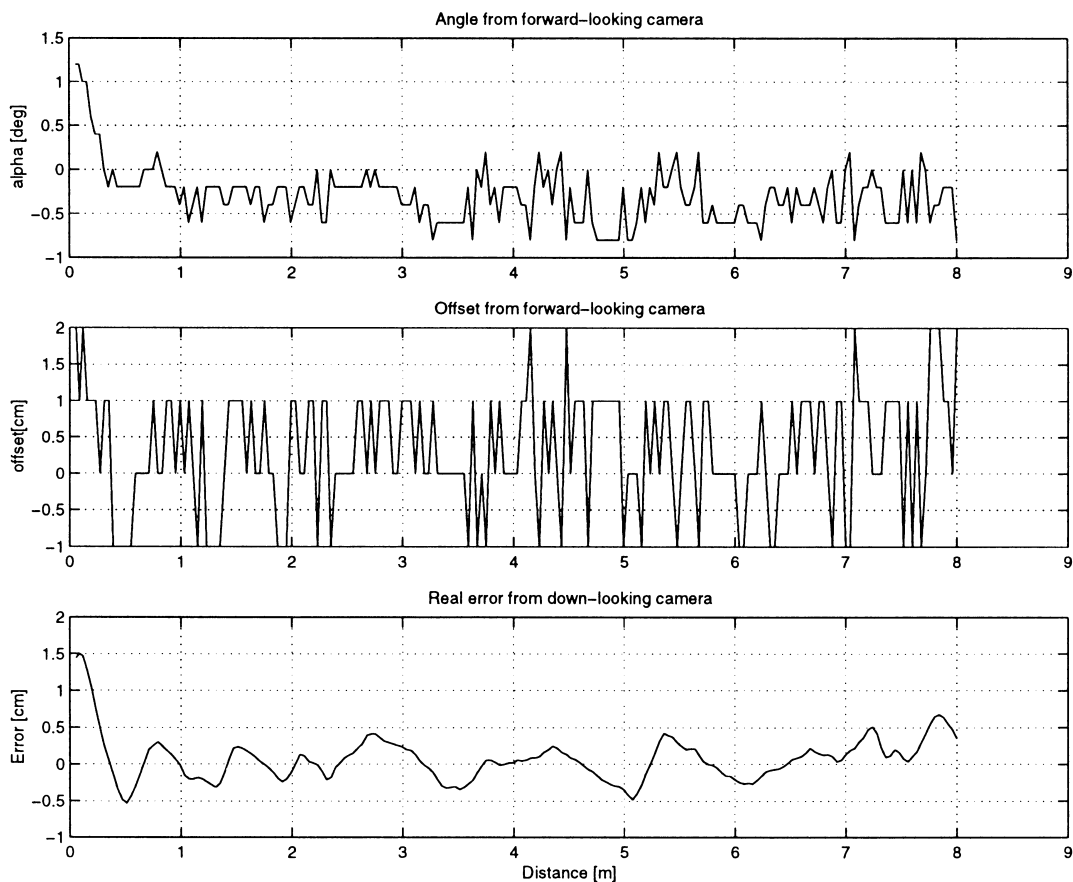


Figure 7: Results from indoor test/

4. Recognition of individual plants

To be able to perform intra-row weeding the position of each sugar beet plant must be determined. This means that plants have to be classified into two classes, i.e. sugar beet or weed. The approach is to recognise sugar beet plants among weeds, where the vision systems analyses one plant at the time and decides whether this plant is a sugar beet plant or weed. Figure 8 shows an example of three different types of how the input image looks like. A number of colour images were collected from different fields: a total of 214 of sugar beet plants and 373 of weeds. The pictures were taken with a normal colour photo-camera. Different classifier such as Bayes-Quadratic, Neural Networks and k-Nearest Neighbour were tested. Totally 19 features were selected, such as colour, shape and size, of which all or a subset were evaluated. With three features a classification rate of 96 % was obtained with a 5-Nearest Neighbour classifier [15]. Table 1 shows the distribution of nearest neighbours using three features. The features are one

colour feature, green mean, and two size independent ones, compactness ($\text{area}/\text{perimeter}^2$) and elongatedness ($\text{area}/\text{thickness}^2$). The numbers in the table 1 are all rounded to integer. 77 % of the sugar beets can be classified with the highest degree of confidence (all neighbours are sugar beets) while 6 % of them can be classified with the lowest degree of confidence.

Table 1: Distribution of the nearest neighbours for all weeds and sugar beets (3 features) with 5NN.

Number of Neighbours	5	4	3	2	1	0
Sugar beet (%)	77	15	6	1	0	1
Weed (%)	87	6	3	1	2	1

Employing only three features has the advantage that the classifier can be implemented in a look-up table, leading to almost no computational costs for the classification process. The success rate of 96 % looks satisfying at first sight. However, the process of extraction of individual plants out of a scene has been done manually. In a final system, this should also be done by the vision system. This will reduce the success rate with about 10 to 15 % according to preliminary results. Currently, we are focussing our efforts to improve the recognition algorithms. An extended description of this section about recognition of individual plants can be found in [16].



Figure 8: An image with two sugar-beet plants, left and middle, and an example of weed to the right

5. Preliminary results

An important milestone during the development of a robotic system is the first time all sub-systems work together. It is not so critical that all subsystems are fully implemented and optimised but when closing the loop, the functionality at the system level can be

verified. The robot consists of four major systems: the robot control system, the row-recognition system, the plant identification system and the weeding system. All these systems are implemented on the robot, while the plant-identification system is implemented with some simplifications, as described below.

Plant identification system

The plant identification system was implemented with only a few features and a simplified classifier. The features that were implemented were mean green-level, area (plant size), and position offset to the row of the plant in the image. An object that was too far from the centre of the image was rejected, i.e. too far from the expected plant row. Finally, to be classified as sugar beet plant, the mean-green level and the area of the plant should be within a pre-defined range.

The plant recognition system works as follows: All objects in the image are classified based on the features as mentioned above. If an object is classified as sugar beet, the position of the object is calculated. Every time a new object classified as sugar beet enters the shadowed area, see figure 9, a new index and position is sent to the weed controller. This means that the weed controller has a table of the last known position of the sugar beet plant. Upon receiving the index and the position of a sugar beet plant, the controller estimates, based on the actual speed and the processing latency, at which robot position the tool should be activated, which includes one position for lifting and one position for lowering the weeding tool. The values are stored in a table and continuously compared with the actual robot position as measured by the encoders.

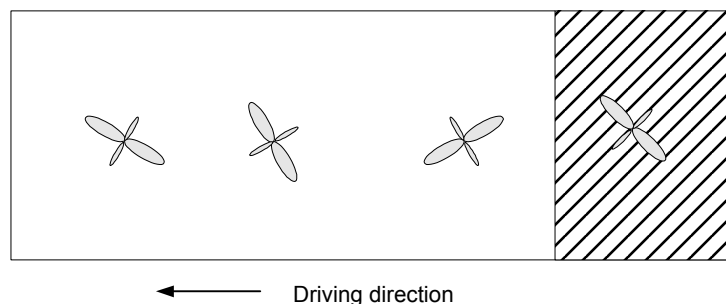


Figure 9: The position of the last object classified as sugar beet is send to the weed controller

Test in a greenhouse

Due to the short season to do outdoor field tests, sugar beet crops were sown in a greenhouse. As first test there were no weeds and the sugar beet plants were in their first true-leaf stage at the time for testing (about 5 cm in diameter). The weed-controller was tuned to lift the weeding tool 5 cm before the plant and lowered 5 cm after. The distance between the plants was about 17 cm. The tests showed that all sub-systems worked well and that the design concept proved to have a good potential. The robot was able to recognise all the sugar beet plants and the weeding tool worked well.

6. Conclusion and outlook

In this paper a design of an agricultural mobile robot for mechanical weed control in ecologically grown fields has been presented. The system consists of the following parts:

- A forward-looking camera system for crop row position estimation, based on a new row-recognition algorithm that is able to recognise crop rows at high weed pressure (12 weeds/crop) even if the crops and weeds have about the same size.
- A down-looking camera system for single plant identification and position estimation.
- A four-wheeled mobile robot based on the Ackerman-steering principle.
- A sensor blackboard software-architecture.
- A mechanical weeding tool for in-row weeding.

The row-recognition system has been tested extensively in outdoor field tests and proven to be able to guide the robot with an accuracy of ± 2 cm.

It has been shown that single plant-recognition, based on colour vision, is feasible with three features (green mean, compactness, elongatedness) and a 5-Nearest Neighbour classifier.

The system as a whole has been verified on a design level showing that the subsystems are able to work together effectively. A first trial in a greenhouse showed that the robot is able to perform weed control in the seed line between the crops in a sugar-beet row.

Future work will concentrate on the development of robust and high-performance algorithms to distinguish between plants and weeds. Future work will also include extensive field tests at different farms.

7. Acknowledgements

This work was carried out in the Mech-Weed project, which has been a co-operative effort between Halmstad University and Danisco Sugar AB. The project was sponsored by the Swedish foundation Stiftelsen för Kunskaps- och Kompetensutveckling. Currently, the project is sponsored by Skogs- och jordbrukets forskningsråd, SJFR. Thanks to Bernd Becker for his work with the mobile robot platform.

8. References

- [1] **Marchant JA (1996)** Tracking of Row Structure in Three Crops Using Image Analysis, *Computer and Electronics in Agriculture*, Elsevier, (15), pp. 161-179
- [2] **Marchant JA, Brivot R (1995)** Real-Time Tracking of Plant Rows Using a Hough Transform, *Real-Time Imaging*, Academic Press Limited, (1), pp. 363-371
- [3] **Billingsley J, Schoenfisch M (1995)** Vision-Guidance of Agricultural Vehicles, *Autonomous Robots*, Kluwer Academic Publishers, Boston, (2), pp. 65-76
- [4] **Slaughter DC, Chen P, Curley RG (1997)** Computer Vision Guidance System for Precision Cultivation, ASAE Meeting Presentation, Minneapolis, Minnesota, August 10-14, 1997
- [5] **Tillett ND, Hague T, Marchant JA (1998)** A robotic system for plant-scale husbandry, *Journal of Agricultural Engineering Research*, vol. 69, pp. 169-178
- [6] **Brivot R, Marchant JA (1996)** Segmentation of plants and weeds for a precision crop protection robot using infrared images, *Proceedings of the IEE, Vision, Image and Signal Processing*, vol. 143, no. 2, pp. 118-124
- [7] **Lee WS, Slaughter DC, Giles DK (1997)** Robotic weed control systems for tomatoes using machine vision system and precision chemical applications, *Proceedings of the ASAE Annual International Meeting*, Minneapolis, Minnesota, August 10-14, 1997, paper no. 97-3093
- [8] **Harmon SY, Bianchini GL, Pinz BE (1986)** Sensor Data Fusion through a Distributed Blackboard, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, San Francisco CA, April 7-10, 1986, *Proceedings* pp 1449-1454
- [9] **Becker B (1999)** Development of the Real Time Software for an Agricultural Robot, Diploma Thesis in Computer Science, Halmstad University - Fachhochschule Ulm

-
- [10] **Baerveldt AJ (1997)** "Vision-Guided Mechanical Weed-Control", The 2nd International Workshop on Mechatronical Computer Systems for Perception and Action (MCPA'97), Pisa, Italy, February 10-12, 1997, pp. 135-138
- [11] **Shapiro LG, Haralick RM (1992-1993)** Computer and robot vision volume I and II, Addison-Wesley Publishing Company Inc.
- [12] **Åstrand B, Baerveldt AJ (1999)** Mechatronics in Agriculture - robust recognition of plant rows, The 2nd International Conference on Recent Advances in Mechatronics, ICRAM'99, Istanbul, Turkey, May 24-26, 1999, pp 135-141
- [13] **Åstrand B, Baerveldt AJ (1999)** Robust Tracking of Plant Rows using Machine Vision, The Sixth International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice, September 1-3, 1999, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, pp 95-101
- [14] **Åstrand B, Baerveldt AJ (2000)** A Vision Based Row-Following System for Agricultural Robots, Proceedings of The Symposium on Image Analysis, Swedish Society for Automated Image Analysis (SSAB), Halmstad, Sweden, March 7-8, 2000, pp. 113-117
- [15] **Bondesson F, Minas M, Winberg U (1998)** Classification of Sugar-beet Plants among Weeds Using Machine Vision, Master Project Electrical Engineering, Halmstad University
- [16] **Åstrand B, Baerveldt AJ (2002)** "An agricultural mobile robot with vision-based perception for mechanical weed control", Special issue on agricultural robotics - Autonomous Robots, Vol. 13, Nr. 1

Image analysis evaluation of *Fusarium culmorum* infection on selected Polish wheat varieties

Bildauswertung von Befall durch Fusarium culmorum an ausgewählten polnischen Weizensorten

Aleksander Kubiak¹, Marian Wiwart²

¹Department of Process Engineering and Equipment, University of Warmia and Mazury, Oc-
zapowskiego 7, 10-725 Olsztyn, Poland, e-mail: Aleksander.Kubiak@uwm.edu.pl

²Department of Plant Breeding and Seed Science, University of Warmia and Mazury, Plac Łódzki
3, 10-724 Olsztyn, Poland, e-mail: Marian.Wiwart@uwm.edu.pl

Summary: The colour changes in appearance of five Polish wheat varieties to the infection of *Fusarium culmorum* were investigated with the application of colour image analysis system. The backpropagation neural network (NN) was used for infection evaluation of wheat grain. Applied in the experiment NN technique with Delta rule method (recognition reliability) made it possible to diagnose cases of Fusarium infection of samples at 93 % level of accuracy. The Delta rule procedure used with NN approach created the basis for further research towards the elaboration of a completely automatic system for color image analyze of grain.

Keywords: Wheat, fusarium infection, colour changes, image analysis, neural network

Kurzfassung: Änderungen in der Ausfärbung von fünf polnischen Weizensorten bei Befall durch *Fusarium culmorum* wurden mit Hilfe eines Farbbildanalyse-Systems untersucht. Zur Bewertung des Befalls der Weizenkörner wurde ein neuronales Netz (NN) mit back propagation Algorithmus verwendet. Die im Versuch verwendete NN Technik mit der Methode der Delta Regel ermöglichte Fusariumbefall mit 93 % Genauigkeit zu erkennen. Die NN Technik mit der Methode der Delta Regel bildet die Basis für künftige Forschungen zur Entwicklung eines vollautomatisierten Farbbildanalyse-Systems für Getreide.

Deskriptoren: Weizen, Fusariumbefall, Farbänderungen, Bildanalyse, Neuronales Netz

1. Introduction

Fusarium Head Blight (FHB) caused by *Fusarium sp.* is a disease of wheat and barley that reduces grain yield and affects grain quality. Losses in food grain quality can be caused by mycotoxin produced by the fungus, specifically vomitoxin (deoxynivalenol=DON). Vomitoxin can have a detrimental effect on animal and human health (Chelkowski, 1989). Primary, inoculum is provided by ascospores or conidiospores which are wind borne or splashed to healthy plants during warm moist weather. Secondary, inoculum is provided mainly by conidiospores produced on infected heads. When combined with wet weather conditions that coincide with the effects of grain quality (Nelson et al. 1981). *Fusarium* infections of small grains have been a persistent problem in Europe (Parry et al. 1995, Wiwart and Korona, 1998) and USA in recent year (Ruan et al. 1998).

2. Objective

The specific objective of this project was image analysis application for evaluation of *Fusarium culmorum* infection in selected Polish wheat varieties.

3. Materials and methods

Five Polish wheat varieties were selected for this experiment: Hena, Helia, Broma, Torka, Kontesa. Inoculation was performed at the full flowering stage. Thirty heads of each variety, chosen randomly, were treated by aqueous suspension of conidia of *Fusarium culmorum* (concentration of 500 000 spores/cm³). Inoculated heads were immediately covered with polyethylene bags for 48 hours. All inoculated and control heads were harvested manually after they reached full maturity state.

4. Image analyze set up

The CCD colour camera Panasonic and IBM computer (Pentium 200 processor) with image analysis card (Matrox Electronics System Ltd., USA) were used for images acquisition. Two images of infected and not infected (control) wheat grain samples placed on a \varnothing 94 mm polystyrene Petri's dishes were collected (Fig. 1). The samples were illuminated with four halogen bulbs of 3500°K colour temperature.



a)

b)

Fig. 1: Samples of wheat grain: a) infected wheat; b) control (not infected) wheat

Each image was entered into the MultiScan[®] Software, where a stereological grid (5x5 square grid meshes, each of which was a separate replication), was applied on it. For each mesh, average values of the three primaries: red (R), green (G) and blue (B) were determined and used (after scaling from 0 to 1) for the calculation of the three colour components: H, S, I (hue, saturation, intensity) (Fornter and Meyer 1997):

if $0 < R, G, B < 1$, then

$$H = \arctan\left(\frac{\sqrt{3}(G-B)}{2R-G+B}\right) \quad (1)$$

$$S = 1 - \min(R, G, B) \quad (2)$$

$$I = R + G + B \quad (3)$$

Values of hue, saturation and intensity of each sub-image were collected (500 data) and used after normalization for NN calculation.

5. Results

The digital analysis of the colour images of kernels revealed great variation in the values of the three colour components, HSI, between the control and inoculated objects (Table 1).

Table 1: Mean values of HSI (bold) for the colour of grains after artificial inoculation of heads (min.+max.) in comparison to non-inoculated control

Variety		H min – max	S min – max	I min – max
Hena	Control	30,47 (25,97-34,72)	0,677 (0,625-1,000)	1,200 (1,070-1,352)
	Inoculated	34,69 (27,64-40,15)	0,642 (0,602-0,672)	1,342 (1,234-1,500)
Helia	Control	34,44 (24,79-52,24)	0,665 (0,613-0,707)	1,256 (1,121-1,422)
	Inoculated	31,83 (25,97-42,52)	0,627 (0,582-0,668)	1,327 (1,207-1,465)
Broma	Control	32,23 (26,58-38,51)	0,680 (0,652-0,707)	1,142 (1,035-1,230)
	Inoculated	32,30 (22,07-72,22)	0,618 (0,426-0,660)	1,320 (1,188-1,785)
Torka	Control	33,08 (29,18-37,74)	0,674 (0,641-0,707)	1,203 (1,102-1,332)
	Inoculated	30,56 (23,02-39,37)	0,651 (0,605-0,676)	1,226 (1,137-1,371)
Kontesa	Control	32,40 (29,19-36,93)	0,670 (0,625-0,703)	1,251 (1,137-1,414)
	Inoculated	34,07 (26,58-40,23)	0,642 (0,602-0,672)	1,260 (1,176-1,379)

For two wheat cultivars (Helia and Torka) the average value of colour of the inoculated kernels, compared with the control, was lower in hue and for the other three cultivars (Hena, Broma and Kontesa) the hue value was bigger for inoculated kernels in comparison with the control. Values of saturation (S component) were lower for inoculated samples than for control, what indicated lower saturation of the colour of inoculated kernels. Values of I (intensity) were higher for all samples obtained from the inoculated heads, which means that this grain was lighter than from the control objects.

5.1 Neural Network application

The backpropagation neural network used for calculation in this experiment consisted of 3 layers. The input layer was formed by 3 neurons reflecting the number of input neuron components (H,S,I). The number of neurons in the hidden layer has been determined experimentally, by testing 20 networks of various number of elements in the hidden layer.

The network's output layer consisted of two neurons, one for each class to be recognized (infected, not infected). The best results have been obtained for a network containing 7 neurons in the hidden layer. The remaining parameters have been set as follows: learning rate for the hidden layer 0.3, learning rate for the output layer 0.15, the momentum parameter 0.3 delta learning rule and sigmoidal transfer function. The number of presentations was set to 100000. The learning set consisted of randomly selected 300 data (150

data for each class) and test set consisted of the rest 200 data. The recognition results of wheat grain have been analyzed by determining the difference of the values produced by the output layer neurons:

$$\text{Delta} = y_1 - y_2 \quad (4)$$

The Delta value (*recognition reliability*) was compared to a certain, predetermined value. In the case when the difference was greater than the given value the neuron's answer was taken into account, otherwise it was rejected. The recognition results for learning and test sets for selected Delta values are presented in Table 2.

Table 2: Recognition results (%) for: a) learning set; and b) test set; using the recognition reliability

a)

Learning set	Delta=0.0	Delta=0.4	Delta=0.6	Delta=0.8
Infected	98.0 %	99.0 %	100.0 %	100.0 %
Control	75.0 %	85.0 %	90.0 %	93.0 %
Average	86.5 %	92.0 %	95.0 %	96.0 %
Rejection	0.0 %	12.0 %	21.0 %	34.0 %

b)

Test set	Delta=0.0	Delta=0.4	Delta=0.6	Delta=0.8
Infected	75.0 %	81.0 %	87.0 %	90.0 %
Control	91.0 %	97.0 %	99.0 %	100.0 %
Average	83.0 %	89.0 %	93.0 %	95.0 %
Rejection	0.0 %	16.0 %	27.0 %	48.0 %

The average recognition level was 86.5 % for learning set and 83 % for test set. The use of Delta values allowed to recognize correctly the samples of wheat grain infected by *Fusarium culmorum* and not infected wheat grain at the level exceeding 90 % (95 % and 93 % for Delta value equal 0.6 and 96 % and 95 % for Delta=0.8 for learning set and test set, respectively). Taking into account the fact that five wheat varieties were involved in the research, often exhibiting diversity within each variety, and between varieties, such a recognition level should be regarded as reasonably good, which makes a good prospect for future application.

7. References

- Chełkowski J (1989)** Formation of mycotoxins produced by *Fusarium* in heads of wheat, triticale and rye. In: J. Chełkowski (eds.): *Fusarium – Mycotoxins, Taxonomy and Pathogenicity*. Elsevier, S. 63-84
- Fornter B, Meyer TE (1997)** Number by Colors. Springer-Verlag, Telos
- Nelson PE, Toussoun TA, Cook RJ (1981)** *Fusarium*, Biology and Taxonomy. The Pennsylvania State University
- Parry DW, Jenkinson P, McLeod L (1995)** *Fusarium* head blight (scab) in small grain cereals – a review. *Plant Path.* 44, S. 207-238
- Ruan R, Ning S, Song A, Ning A, Jones R, Chen P (1998)** Estimation of *Fusarium* Scab in Wheat Using Machine Vision and a Neural Network. *Cereal Chem.* 75 (4) S. 455-459
- Wiwart M, Korona A (1998)** Application of a colour image analysis of kernels in evaluation of the infection of triticale grown in different cultivation systems. *Pl. Breed. Seed Sci.* 42, 1, S. 69-79

Intra-row weed control

Unkrautbekämpfung in der Reihe

Jan Bontsema¹, Kees van Asselt², Theo Groot³

¹ IMAG B.V., Wageningen, The Netherlands; email: j.bontsema@imag.wag-ur.nl

² Wageningen University, Wageningen, The Netherlands

³ Inventicon B.V., Schagerbrug, The Netherlands

Abstract: A fully automated system for mechanical weed control in a row of plants is described and discussed. The performance of the system is shown by laboratory experiments.

Keywords: Mechanical weed control, signal processing

Kurzfassung: Ein vollständig automatisches System für mechanische Unkrautbekämpfung in der Pflanzenreihe wird beschrieben und diskutiert. Anhand von Laborexperimenten wird die Leistung des Systems gezeigt.

Keywords: Mechanische Unkrautbekämpfung, Signalverarbeitung

1. Introduction

At present weed control in agricultural production is mainly done by using herbicides. In crops, which are grown in rows also mechanical weed control by hoeing is performed. However accurate weed control in the row without damaging the crop is hardly known. Only weeder harrows and brushes are used, but with these methods one cannot prevent that the crop is damaged. For certain crops like sugar beet the plants in the row grow on a more or less regular distance from each other, since they are sowed by a precision-sowing machine. Also certain vegetables and trees are planted at regular distance in the row. In order to be able to perform mechanical weed control in the row one needs an accurate detection system to locate the plants in the row. Furthermore the mechanical device to remove the weeds between the plants should be able to move very fast in and out of the row.

In this paper a description of the detection system and the digital signal processor (DSP) is given, the mechanical device for the weed control is discussed and the results of experiments with the complete system in a laboratory set-up are shown and discussed.

2. Signal processing

In practice sugar beet is sowed with a precision drill, so the distance between the plants will be approximately the same. From Gego, 1968 it follows that the distances between the plants in the row have a Gaussian distribution with mean equal to the sowing distance of the precision drill and a standard deviation of 10 % of this distance. In figures 1 the result of a sowing experiments is given.

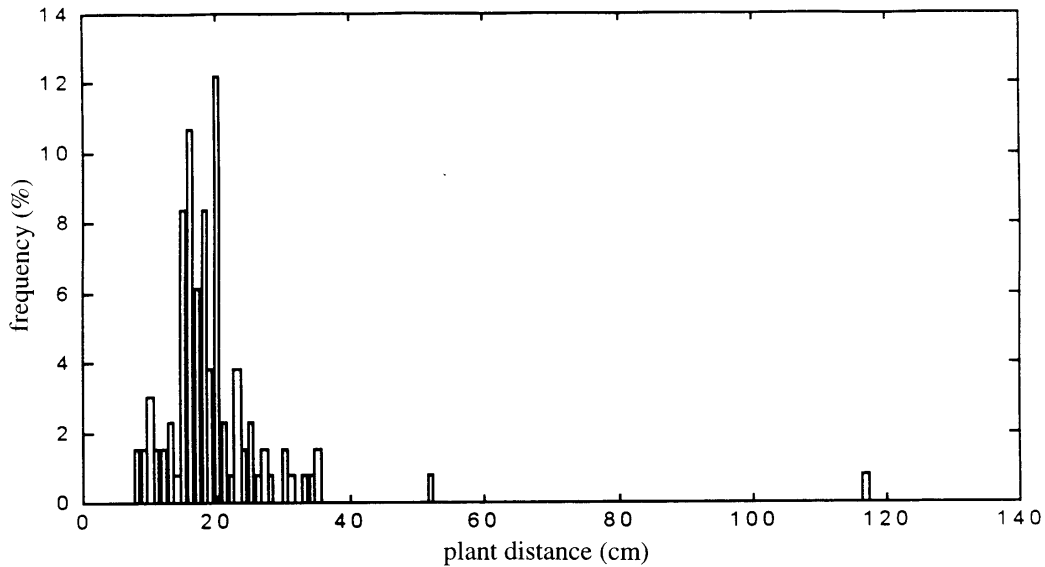


Fig. 1: Sowing experiment 1

In this experiment 64 % of the seed shoot up and the standard deviation of the plant distances is 24 %.

The figure shows clearly that the distances are more or less normally distributed.

This fact will be used for the signal processing. If the plants would all have mutual distance equal to the pre-set sowing distance and one would detect the plants with a light source and a photoelectric cell one gets a periodic signal with period equal to the sowing distance. Determining the frequency spectrum of this signal with for instance the Fast Fourier Transform, this spectrum consists of only one line at the frequency equal to the inverse of the sowing distance. Reasoning in this way one can expect that the spectrum of a real measured signal of a row of plants will have the largest contribution near the frequency of the inverse of the pre-set sowing distance. In the field the weed plants in the row will also contribute to the detection signal. But the contribution to the spectrum is less and will take place at all frequencies, if one assumes that the position where weed occurs is more or less randomly.

For details on simulated rows of plants and weed see Bontsema et al. 1998.

3. The detection system

The detection system is schematically shown in figure 2.

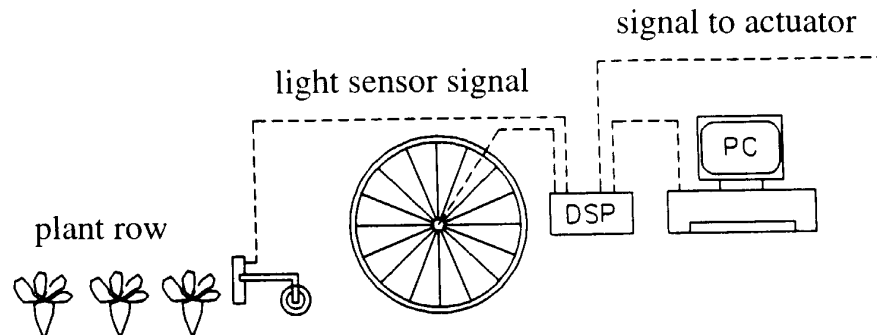


Fig. 2: The detection system

The heart of the detection system is a digital signal processor (DSP). The DSP is a single chip microprocessor (ADSP-2101) which is especially designed to perform on a fast and efficient way typical signal processing techniques. The DSP can easily be programmed in C-code and is delivered with a large variety of built-in functions.

Furthermore the detection system consists of three sensors placed above each other in a gantry, which moves at a constant height along the row with plants. Each sensor is a combination of an infrared transmitter and a receiver. On the axis of a non-driven wheel, which is attached to the system, an encoder is placed. This encoder gives 2048 pulses per revolution of the wheel. Every pulse of the encoder is an interrupt for the DSP to read the binary signals of the light sensors. In the DSP a weighted summation of the three signals of the light sensors results in a single signal on which a Fast Fourier Transform is performed. After a filtering as discussed in section 2, this filtered signal is transformed back and after a triggering this results in a signal which is sent to the actuator. The PC is only for research purposes. It is used for downloading of programs in the DSP and to read the registers of the DSP in order to check the results of the calculations in the DSP.

Since filtering based on Fast Fourier Transform is a non-causal operation, the actuator should be placed at a certain distance behind the sensors.

4. Mechanical weed control device

The mechanical device for removing the weed in the row is shown in figures 3.

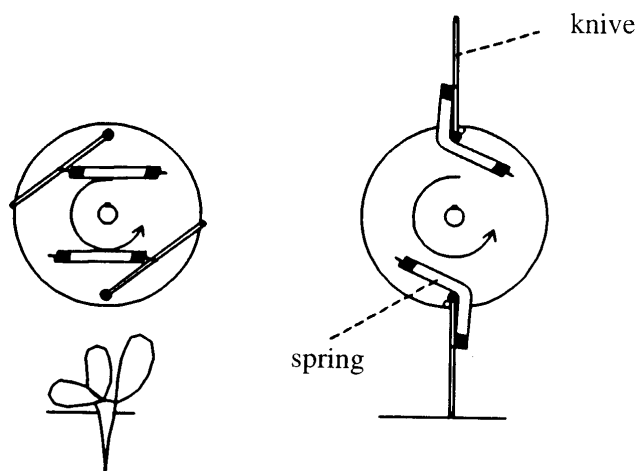


Fig. 3: The mechanical device for the weed control, front view

It consists of a vertical rotating disk on which two knives are attached with springs. The disk is actuated by a hydraulic motor and the number of revolutions of the motor is controlled by a hydraulic controller. The DSP sends its decision signal towards this controller. The motor is permanently rotating on 850 rev/min and then the knives are folded out, due to the fact that the centrifugal force is larger than the spring force. If the detection systems detects a beet plant, the number of revolution is set to 700 rev/min and the knives almost immediately are folded in, since by acceleration or in this case deceleration, also the inertia force plays a role. Due to our construction we have a bi-stable situation, the only positions are either the knives are folded in or are folded out. Measurements showed that it takes less than 40 ms to go from one position to the other. More details can found in Lempens, et al. 1996.

5. Experimental results

In the laboratory the plants and (artificial) weed were placed in a rectangular bin. Beside the bin there are rails on which an electric car can move. At this car the gantry with the sensors and the mechanical weed control device is mounted. Figure 4 shows the laboratory set-up.

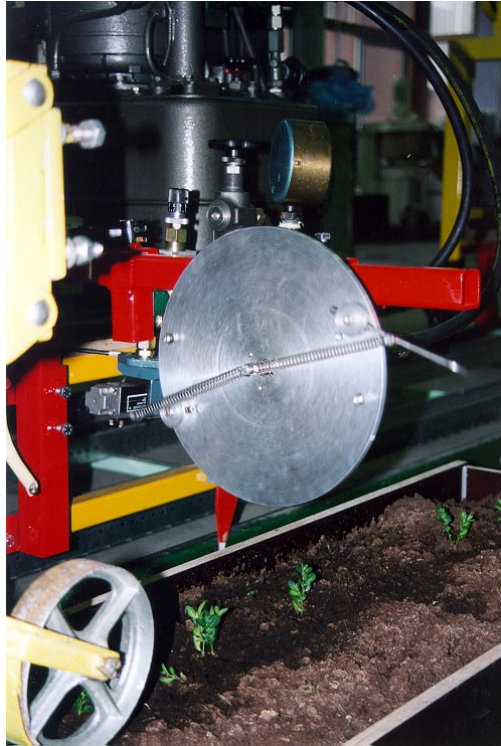


Fig. 4: The laboratory set-up

In figure 5 the measured signal of a part of the row is shown. The mean distance of the plants is 17 cm and the actual distance is varying from 14 to 20 cm. The weed is placed at random in the row.

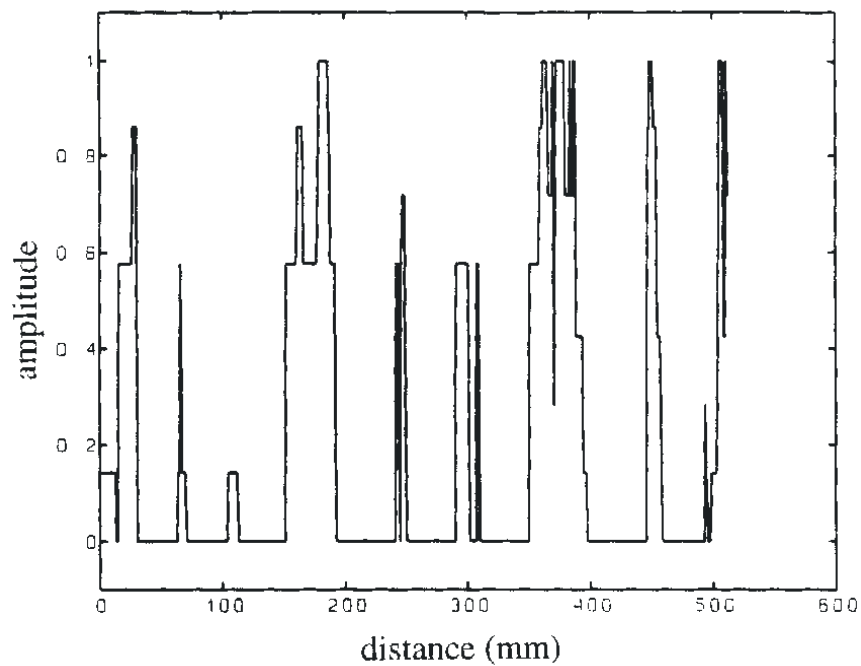


Fig. 5: Measured signal of a row of plants and weed

In figure 6 the spectrum of this signal is shown.

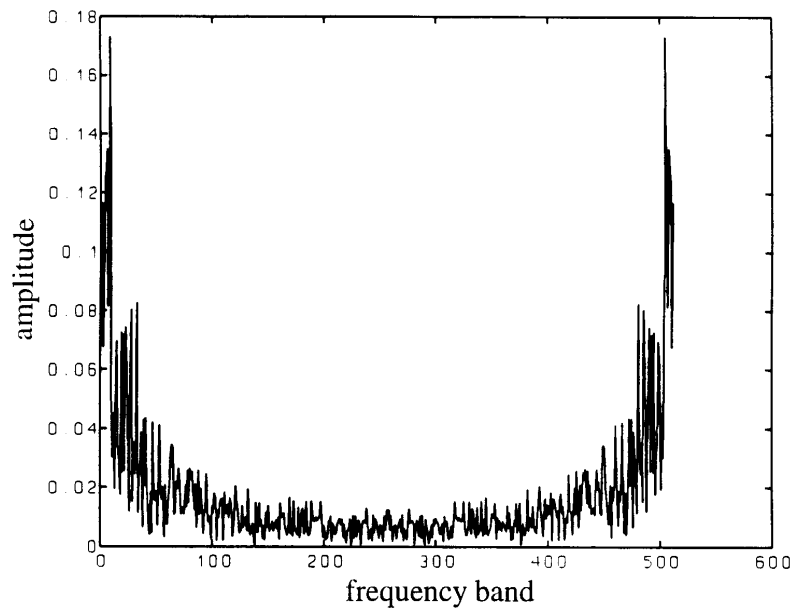


Fig. 6: The spectrum of the measured signal

Only the frequency bands 2, 3, 4 and 509, 510, 511 are retained and this signal is then transformed back. After a triggering this results in the actuating signal of figure 7. In this figure amplitude of 1 means that the knives of the mechanical device are folded in and a 0 means that the actuator is in working position to remove the weed.

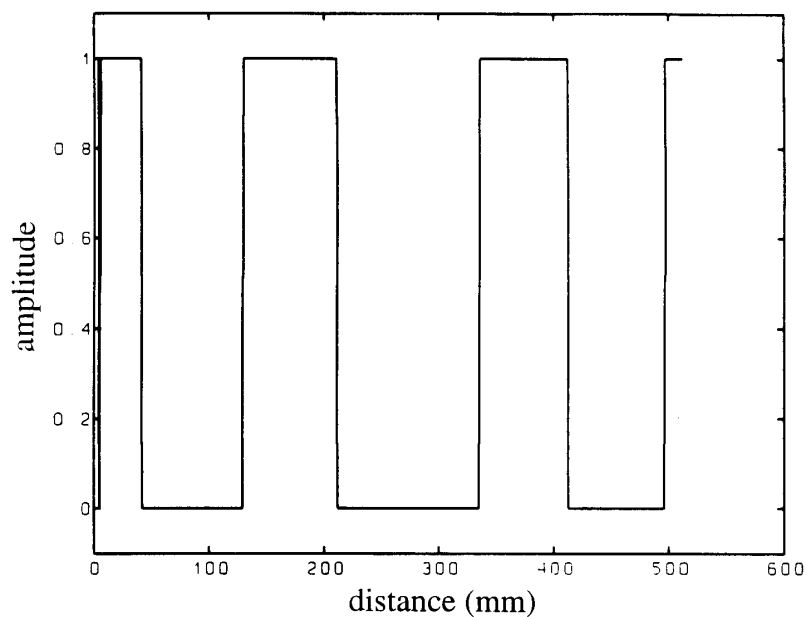


Fig. 7: The actuating signal generated by the DSP

In figure 8 the same row is shown after the weed is removed by the actuator.

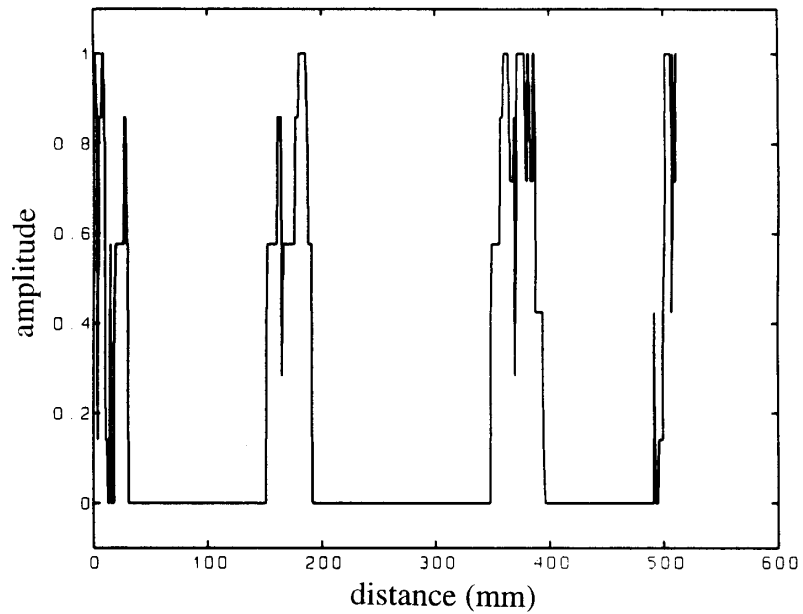


Fig. 8: Measured signal of the row after the weed has been removed

It is clear that the system accurately predicts the position of the plants.

With the set-up of figure 9 field experiments were performed.



Fig. 9: The mechanical weed control device for field experiments

The results on regularly drilled rows of sugarbeet were excellent. If in a row 4 or more plants in succession are missing the device will remove 2 or more of the next plants. This is a consequence of how the signal processing algorithm is working.

6. Conclusions

In this paper it has been shown that it is in principle possible to perform accurate and safe mechanical weed control in a row of plants. The detection system is cheap and fast, due the sophisticated possibilities of the used digital signal processor (DSP). The mechanical weed control device is simple, but is able to move the knives very fast in and out of the row.

The practical usability tested in field experiments was promising.

7. References

- Bontsema J, Grift T, Pleijsier K (1991)** Mechanical weed control in sugar beet growing: the detection of a plant in a row. In Y. Hashimoto and W. Day (Eds.), *Mathematical and Control Applications in Agriculture and Horticulture*, IFAC workshop series, no. 1, Pergamon Press, Oxford, pp. 207-212
- Bontsema J, Van Asselt CJ, Lempens PWJ, Van Straten G (1998)** Intra-row weed control: a mechatronics approach. In N. Sigrimis and P. Groumpos (Eds.), *Proceedings 1st IFAC Workshop on Control Applications and Ergonomics in Agriculture*, 14-17 June 1998, Athens, Greece, pp. 93-97
- Gego A (1968)** Ein Beitrag zum Problem der gesteuerten maschinellen Vereinzelung von Zuckerrüben, Aachen
- Lempens PWJ, Bontsema J, Van Asselt CJ, Van Straten G (1996)** Actuator for use in an agricultural machinery for cultivation of crops growing in rows. Patent application, no. OA 1004479 Ned., (In Dutch)

Entwicklung von standardisierten thermografischen Mess- und Auswerteverfahren zur Beurteilung der Wärmeverluste von Gewächshäusern

Development of standardized thermo graphic methods to measure and evaluate the heat loss of greenhouses

Thomas Rath und Diana Gehrling
Institut für Technik im Gartenbau und Landwirtschaft, Universität Hannover

Zusammenfassung: Die gegenwärtige Situation im heizintensiven Unterglasgartenbau in Deutschland ist geprägt durch eine ungünstige Entwicklung der Energiepreise, welches zu schwierigen ökonomischen Betriebssituationen führt. Es ist sowohl aus ökonomischen, als auch ökologischen Gesichtspunkten heraus zwingend gegeben, den Heizenergieverbrauch von Gewächshausanlagen zu optimieren und durch entsprechende Maßnahmen zu reduzieren. Ein einheitliches Verfahren der energetischen Bewertung von Gewächshäusern vor Ort ist nicht vorhanden. Eine schnelle und handhabbare Energie-Check-Methode fehlt.

Ziel des Vorhabens ist es, mit Hilfe von thermografischen Messungen den Energieverbrauchsstatus von Gewächshäusern abzuschätzen. Im folgenden sollen erste Voruntersuchungen und Arbeitsziele erläutert werden.

Deskriptoren: Thermographie, Wärmeverluste am Gewächshaus, Emissionskoeffizient

Summary: *The current situation for heat intensive greenhouse production in Germany is strongly directed by an unfavourable development of the energy prices, which lead to difficult economic situations. It is compellingly given both from economic, and from ecological criteria to optimise and reduce by suitable measures the heating energy consumption of greenhouse units. A uniform technique of the "right away" energy evaluation for greenhouses does not exist. A fast and manageable energy-check-method is missing.*

The aim of this project is to estimate the state of the energy consumption of greenhouses using thermo graphic measurements. In the following first results and work goals are to be described.

Keywords: *thermo graphic, heat loss of greenhouses, emissions coefficient*

1. Einleitung

1.1 Bedeutung von thermographischen Gebäudebewertungen für Gewächshäuser

Die gegenwärtige Situation im Unterglasgartenbau in Deutschland ist im wesentlichen geprägt durch enormen Kostendruck durch ausländische Konkurrenten sowie durch steigende Produktionskosten. Neben den Arbeitskosten spielen durch die gegenwärtige Energiepreissituation zunehmend die Energiekosten eine bedeutende Rolle. Bisher lag der Aufwand für die Heizenergie im Unterglasgartenbau bei 5-15 % des Betriebsertrages. Durch die wesentliche Verteuerung der Energiepreise wird in Zukunft dieser Anteil steigen bzw. er ist bereits gestiegen. Dieses kann bei zahlreichen Betrieben zu Existenz bedrohenden Situationen führen, da die Gewinnspannen relativ gering sind. Neben dem einzelbetrieblichen ökonomischen Problem steigender Energiepreise, ist die ökologische Bedeutung des Heizenergieeinsatzes im Unterglasgartenbau zu berücksichtigen. Da die erzeugten Produkte zu einem hohen Anteil auf der Basis der Verbrennung von fossilen Energieträgern erzeugt werden, trägt die gartenbauliche Produktion in einem zwar gesamtwirtschaftlich geringen Ausmaß (< 1 % der Primärenergienutzung), im Verhältnis zur Wertschöpfung aber zum beträchtlichen Ressourcenverbrauch und damit verbundener Emissionsbelastung bei. Es ist sowohl aus ökonomischen als auch aus ökologischen Gesichtspunkten heraus zwingend gegeben, den Heizenergieverbrauch von Gewächshausanlagen zu optimieren und durch entsprechende Maßnahmen zu reduzieren. Wesentlicher Faktor hierbei ist die Optimierung der Gewächshaushülle und der damit in Verbindung stehenden Komponenten, wie z.B. Energieschirme, Abdichtungen oder Isolierungsmaterialien. Obwohl die Zusammenhänge zwischen dem Zustand der Gewächshaushülle und dem Energieverbrauch bekannt sind und sehr gut berechnet werden können (z.B. HORTEX-Programm (Rath 2001)), zeigen Untersuchungen und Beratungsvorhaben immer wieder, dass die Umsetzung in die gärtnerische Praxis unzureichend bzw. schwierig ist, da ein einheitliches Verfahren der energetischen Bewertung von Gewächshäusern vor Ort nicht vorhanden ist. Eine schnelle und handhabbare Energie-Check-Methode fehlt.

Neuere technische Entwicklungen ergeben neue Möglichkeiten, die sich bereits in der allgemeinen Gebäudetechnik zunehmend durchsetzen. Besonders hervorzuheben ist die Gebäudebewertung mit Blower-Door-Verfahren und mit thermographischen Messungen. Bisherige Arbeiten, ähnliche Verfahren auch auf gartenbauliche Gebäude zu übertragen, wurden sowohl am Institut für Technik in Gartenbau und Landwirtschaft der Universität Hannover (Luftwechsellmessungen, Transmissionsmessungen, Materialmessungen etc.)

als auch in den Niederlanden durchgeführt. Bezüglich der Thermographie werden folgende Hauptprobleme genannt:

- Abschätzung und Verwendung der "richtigen" Emissionskoeffizienten
- Interpretation und Nachbearbeitung der Ergebnisbilder
- Beeinträchtigung der Messungen durch Fremdstrahler (z.B. Sonneneinstrahlung, Störquellen)

1.2 Grundlagen thermografischer Energiebewertung

Das Verfahren der Infrarot-Strahlungstemperaturmessung, als welches die quantitative Infrarot-Thermographie auch bezeichnet wird, beruht auf dem physikalischen Prinzip, dass Körper mit einer Temperatur oberhalb des absoluten Nullpunktes elektromagnetische Strahlung aussenden (Wärmestrahlung). Bestimmt man deren Intensität, ist man in der Lage, Rückschlüsse auf die Oberflächentemperatur zu ziehen. Das heißt, Objekte werden aufgrund ihrer Wärmestrahlung durch Thermographiesysteme abgebildet. Sie liefern eine Temperaturverteilung der vermessenen Oberfläche und Informationen über mögliche Wärmeverluste.

Im Gegensatz zu der berührenden Temperaturmessung, muss bei der Thermographie das Messobjekt vom Messgerät aus sichtbar sein. Die zu messende Strahlung wird von Optiken auf einen Detektor fokussiert und in elektrische Signale umgewandelt. In der Regel werden zwei Wellenlängenbereiche genutzt: das Wellenband im mittleren Infrarot mit 2-5 μm (NIR) und das Wellenband im fernen Infrarot mit 8-12 μm (LIR). Zur Vermeidung von Messstörungen durch die thermische Energie der Umgebung müssen die Detektoren während des Betriebes auf eine bestimmte Arbeitstemperatur gekühlt werden (Temperaturbereich -70°C bis -100°C für NIR-Detektoren und -170°C bis -200°C für LIR-Detektoren). Ein Analog-Digital-Wandler tastet die vom Detektor erzeugten elektrischen Signale ab und wandelt sie in diskrete Bildpunkte (Pixel) um. Über Rechner wird mit Hilfe von Kalibrierungskennlinien jedem Pixel ein Temperaturwert zugeordnet. Gleichzeitig wird die Temperatur farbig kodiert und als Wärmebild dargestellt. Es können verschiedene Farbskalen gewählt werden. Dem Anwender stehen heute leistungsstarke, kompakte und handliche (vergleichbar mit Videokameras) Infrarotkamera-Systeme zur Verfügung, die bei laufendem Betrieb Temperaturinformationen liefern. Der Messbereich liegt zwischen -20°C und 2000°C .

Die Auswertung der Wärmebilder erfolgt entweder vor Ort oder am PC. Spezielle Softwaresysteme ermöglichen eine Nachkorrektur der Bilder sowie die optimale Darstellung der Falschfarbenbilder inkl. der Angabe von Minimum- und Maximumtemperaturen, sowie einfachen statistischen Operationen. Neben diesen Vorzügen bestehen jedoch besonders im Hinblick auf Messungen an Glasgebäuden folgende Probleme:

- Neben der von der Oberfläche emittierten Wärmestrahlung wird gleichzeitig auch die von der Oberfläche reflektierte Wärmestrahlung gemessen. Dieses kann bei reflektierenden Oberflächen zu Fehlinterpretationen führen.
- Um von der emittierten Wärmestrahlung auf die tatsächliche Temperatur schließen zu können, muss die Emissionseigenschaft der Oberfläche bekannt sein und mit einem Parameter quantifiziert werden.
- Nachberechnungen und Interpretationen werden softwareseitig normalerweise mit dem gesamten Bild berechnet. Liegen jedoch unterschiedliche Materialien mit unterschiedlichen Emissions-, Transmissions- und Reflexionseigenschaften vor, müssen die Nachberechnungen für die unterschiedlichen Materialien getrennt durchgeführt werden.

Gewächshäuser weisen in der Praxis sehr vielfältige Strahlungseigenschaften auf. Die Infrarot Emission eines Objektes kann in Abhängigkeit seiner Temperatur durch das Stefan-Boltzmann-Gesetz und das Wiensche Verschiebungsgesetz dargestellt werden. Das Stefan-Boltzmann-Gesetz beschreibt die gesamte vom Objekt ausgesandte Strahlung (durch Integration der spektralen Strahlungsintensität über alle Wellenlängen) und eignet sich deshalb sehr gut für grobe Abschätzungen zum Beispiel bei der Berechnung des Wärmehaushaltes von Objekten.

$$M_r = \sigma \cdot T^4 \quad \text{Gl. 1}$$

M_r = abgestrahlte Wärmeenergie [W/m^2]

σ = Stefan-Boltzmann-Konstante [$5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$]

T = Temperatur des Objektes [K]

Das Stefan-Boltzmann-Gesetz gilt absolut genommen nur für das Modell des Schwarzen Strahlers. Die meisten anderen Körper geben immer nur einen Teil der Strahlung ab. Daher muss das Gesetz durch den Emissionsgrad ergänzt werden. Dieser Wert ist abhängig von dem Material und dessen Oberfläche.

$$M_r = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad \text{Gl. 2}$$

ε = Emissionskoeffizient des Objektes [-, ≤ 1]

Des weiteren muss bei der praktischen Anwendung des Gesetzes die Temperaturdifferenz zwischen Objekt und dem Sensor der Kamera beachtet werden. Als weitere Grundlage der thermographischen Energiebewertung gilt das Wiensche Verschiebungsgesetz. Aus dem Planckschen Strahlungsgesetz lässt sich ableiten, dass die Wellenlänge, bei der die ausgesandte Strahlung des Modellkörpers ein Maximum aufweist, sich bei variierender Temperatur verschiebt. Das Strahlungsmaximum verschiebt sich bei Objekten mit geringer Temperatur hin zu größeren Wellenlängen.

$$\lambda_{\max} = \eta / T \quad \text{Gl. 3}$$

λ_{\max} = Wellenlänge der maximalen Energieausstrahlung [μm]

η = Wiensche Konstante [2884 $\mu\text{m}\cdot\text{K}$]

T = Temperatur des Körpers [K]

2. Projektbeschreibung

Bisher wurden Thermographie-Auswertungen im wesentlichen an festen Gebäuden (Beton oder Stein) durchgeführt. Hier ist ein hoher Grad an Nutzungspotential erreicht. Als schwierig gelten im allgemeinen die Auswertungen von Glasbauteilen, da dort die reflektierte Umgebungsstrahlung aufgenommen und fehlinterpretiert werden kann. Bei Glasgewächshäusern kommt erschwerend hinzu, dass die Glasflächen unterschiedlich geneigt zur Umgebung und in der Regel zur Aufnahmekamera vorliegen. Aus wissenschaftlicher Sicht ist es daher ein wesentliches Arbeitsziel, die Interpretation von Thermoaufnahmen von Glasgewächshäusern zu realisieren.

Zur Auswertung der Thermographieaufnahmen sind interpretierende Werkzeuge und Algorithmen notwendig. Eine Kopplung von Bildanalysewerkzeugen, intelligenten Algorithmen und Thermographietechnik scheint daher zwingend und notwendig. Wesentliches Arbeitsziel des Projektes ist somit die intelligente Interpretation der Gewächshausbilder unter Berücksichtigung und Zuhilfenahmen entsprechender Bildanalysealgorithmen.

Das Projekt kann hauptsächlich in folgende Teilbereiche untergliedert werden.

- Analyse der Winkelabhängigkeit des Strahlungsverhaltens,
- Wahl und Differenzierung geeigneter Emissionskoeffizienten,
- Optimierung der Aufnahmeposition und
- automatische, statistische Bildanalyse der Wärmebilder.

Zunächst sollen die wesentlichen Einflussfaktoren unter Laborbedingungen ermittelt und quantifiziert werden. Für die Messung an Gewächshäusern stehen folgende Parameter im Vordergrund:

- Innentemperatur
- Umgebungstemperatur
- Neigungswinkel des Messobjektes zum Messgerät

Besondere Beachtung finden dabei die Fehlereinflüsse auf die Messanordnung. Jede Messung ist mit einem Basisfehler behaftet und muss korrigiert werden. Für die Thermographie ist dieser Wert im allgemeinen erheblich höher und bedarf besonderer Beachtung. Neben gerätebedingten Fehlern, sind unter anderem auch folgende Fehlerquellen in Betracht zu ziehen:

- Fehleinstellung des Emissionsgrades und der Umgebungstemperatur an der Kamera
- Reflexion von Störstrahlungsquellen aus dem Vordergrund des Messobjektes
- Transmission von Störstrahlungsquellen aus dem Hintergrund des Messobjektes
- Vernachlässigung der verschiedenen Materialoberflächen und Neigungswinkel bei der Auswertung der Wärmebilder
- Strahlungsverluste durch Abschwächung auf der Übertragungsstrecke

Aus Kostengründen wird für die Messungen ein Infrarotkamarasystem mit einem kurzwelligen atmosphärischen Fenster verwendet. Diese birgt den Nachteil, dass die Transmission der Atmosphäre erheblich geringer als im langwelligen Bereich ist. Nach Raicu (1999) sind Systeme mit langwelligen atmosphärischen Fenstern für Messungen im Freien und über große Entfernungen geeignet, während im kurzwelligen Bereich beispielsweise Absorptionsbanden von Wasserdampf und Kohlendioxid thermographische Messungen bereits bei Entfernungen von einigen Metern deutlich beeinflussen können.

Alle gewonnenen Parameter der Einzelmessungen sollen anschließend über statistische Simulationsmodelle verknüpft und an die Praxis angepasst werden. Die resultierenden Kenngrößen werden anschließend in Gartenbaubetrieben angewandt und überprüft.

3. Qualitative Voruntersuchungen zur Bedeutung von Störstrahlung und Emissionskoeffizient

Bild 1 (rechts) zeigt deutlich die mögliche Problematik von Störstrahlungsquellen bei der thermographischen Messung. Hier wurde ein Gewächshaus mit Dunkelstrahlern ausgestattet. Die Rohre verlaufen parallel im Dachraum. Die Reflexion der Strahlung der Dunkelstrahler an den Tischrinnen kann zu einer Fehlinterpretation des Wärmebildes führen. Die hohen Strahlungswerte der Tische innerhalb der zwei Streifen sind nicht Ursache von Temperaturunterschieden auf den Tischen. Sie resultieren aus der reflektierten Wärmestrahlung der Strahlerrohre. Eine andere Störstrahlungssituation ist in Bild 1 (links) dargestellt. Der vermessene Gewächshausglasverbinder weist an den Scheiben keine Beschädigung auf, dennoch ist durch die Aufnahme eine Wärmeverlustquelle identifiziert (Pfeil). In 10 cm Abstand hinter der Glasscheibe verläuft ein Heizungsrohr, welches an dieser Stelle unter Umständen nicht ausreichend isoliert ist und die Glasfläche punktuell aufheizt.

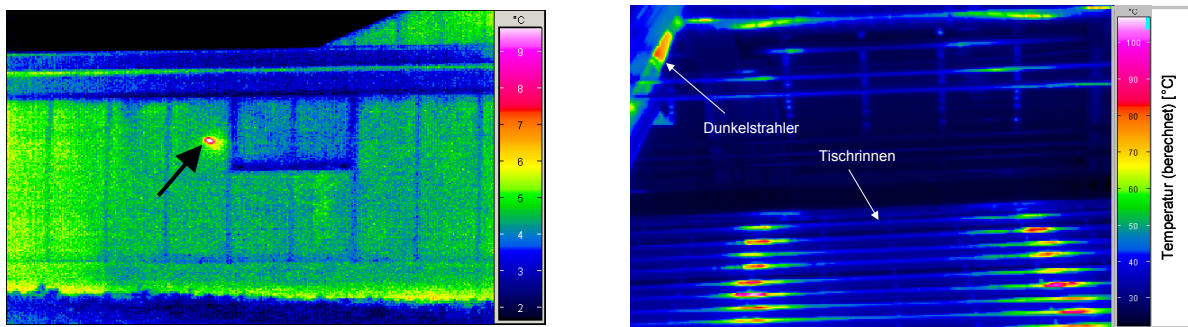


Bild 1: Störstrahlungsquellen bei der thermographischen Messung links: Wärmebild eines Gewächshausglasverbinders (außen); rechts: Tischtemperatur beim Einsatz von Dunkelstrahlern in Gewächshäusern, Aufnahme aus dem Dachraum

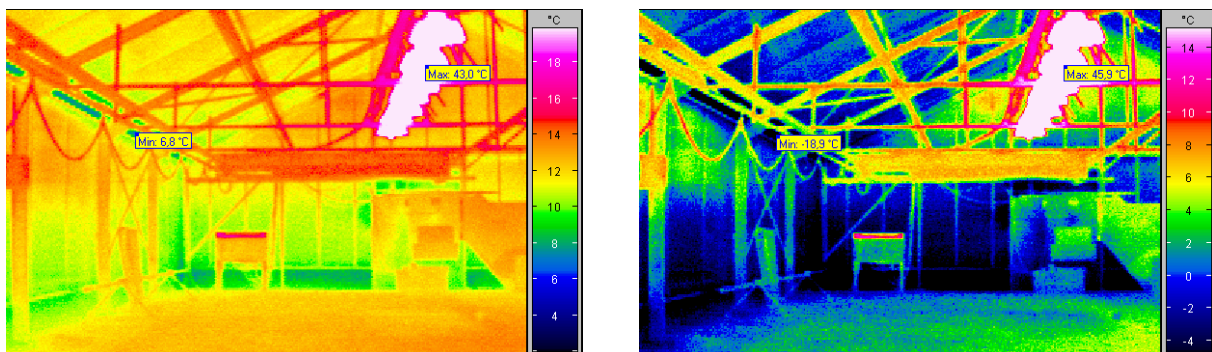


Bild 2: Wärmebilder eines Gewächshauses (Innenansicht) mit Assimilationsbelichtung, links: berechnete Temperatur mit maximalen Emissionskoeffizient, rechts: berechnete Temperatur mit reduziertem Emissionskoeffizient

Neben der Störstrahlung kommt dem gewählten Emissionskoeffizienten große Bedeutung zu.

Bild 2 veranschaulicht dieses. Die ausgesandte Strahlung des Messobjektes ist zum einen von der eigenen Temperatur, zum anderen von der Oberfläche und dem Material des Messobjektes abhängig. Die Eigenschaften der Oberfläche und des Materials werden in der dimensionslosen Größe des Emissionskoeffizienten beschrieben. Tabelle 1 gibt einige für die Thermographie an Gewächshäusern interessierende Emissionskoeffizienten wieder. Sie wurden in den Wellenlängenbereichen $2\ \mu\text{m} - 12\ \mu\text{m}$ gemessen und gelten in der Regel für diese Materialien bei Zimmertemperatur.

Tabelle 1: Emissionskoeffizienten verschiedener Materialien und Oberflächen (Karstädt et al. 1998)

Material	Emissionskoeffizient
Glas	0,94 – 0,97
Aluminium (poliert)	0,05 – 0,09
Aluminium (verwittert)	0,83 – 0,94
Aluminium (rau)	0,18
Beton	0,92 – 0,94
Wasser	0,96

4. Detailuntersuchungen an Gewächshausmaterialien

Bartens (2001) untersuchte die Winkelabhängigkeit von Thermographiemessungen an Versuchsgewächshäusern am Institut für Technik in Gartenbau und Landwirtschaft der Universität Hannover. Diese Voruntersuchung und erste Ergebnisse eines Versuches in einem speziellen Messstand im Rahmen dieses Projektes haben einen deutlichen Einfluss des Dachneigungswinkels und der Witterungsverhältnisse gezeigt. Untersucht wurden Dachneigungswinkel zwischen 10° und 90° (senkrecht zum Messgerät). Die theoretische mittlere Glastemperatur näherte sich bei zunehmender Gradzahl an den tatsächlichen Wert der Umgebungstemperatur an (Bild 3). Die Umgebungstemperatur betrug im Messstand konstant -6°C .

Anwender und Experten empfehlen möglichst einen Winkel von 90° zwischen Messobjekt und Messgerät einzuhalten. Die Untersuchungen bestätigen diese Aussage. In der Praxis ist diese Forderung nicht zu erfüllen.

Ein genereller Einfluss der Witterungsverhältnisse auf die Messanordnung wurde ebenfalls nachgewiesen, kann anhand der ersten Messungen aber noch nicht quantifiziert werden.

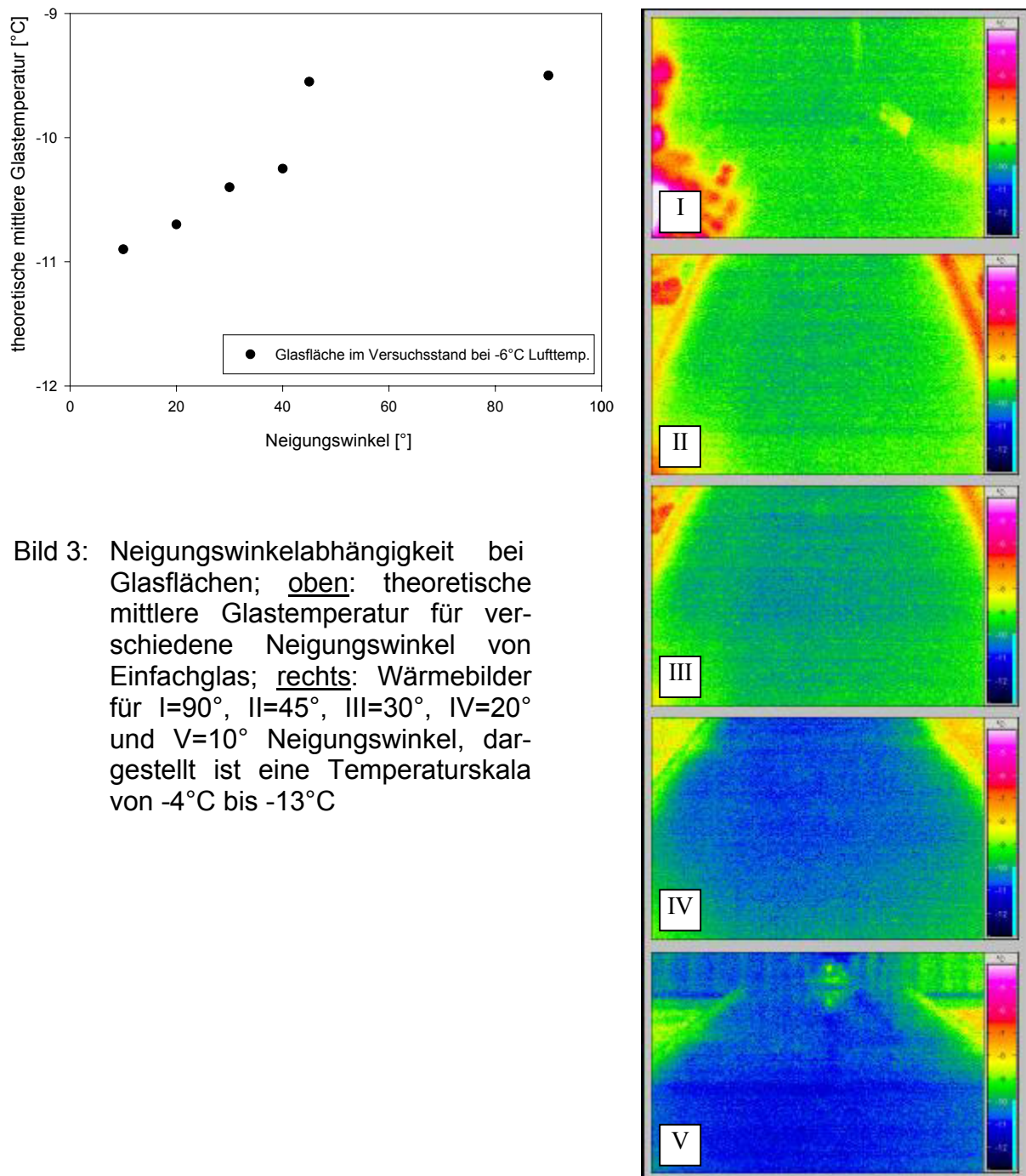


Bild 3: Neigungswinkelabhängigkeit bei Glasflächen; oben: theoretische mittlere Glastemperatur für verschiedene Neigungswinkel von Einfachglas; rechts: Wärmebilder für I=90°, II=45°, III=30°, IV=20° und V=10° Neigungswinkel, dargestellt ist eine Temperaturskala von -4°C bis -13°C

5. Ausblick

Die bisherigen Arbeiten stellen nur erste Untersuchungen zur angegebenen Thematik dar. In weiteren Schritten müssen einzelne Störgrößen und Messparameter weiter un-

tersucht und standardisiert werden. Hierzu werden sowohl Messungen im Versuchsstand, an Versuchsgewächshäusern und auch in der gartenbaulichen Praxis stattfinden. Parallel dazu sollen bildanalytische Algorithmen entwickelt werden, die eine halbwegs automatische Auswertung der Bilder ermöglichen. Im Idealfall können die Bilder auf flächenbezogene k' -Werte verdichtet werden, die mit Hilfe von Simulationssoftware exakten Aufschluss über die Energieverbrauchssituation im Gewächshaus geben.

Dieses Projekt wird durch das Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft gefördert.

6. Literatur

Bartens J (2001) Untersuchungen zur Winkelabhängigkeit von Thermographiemessungen an Gewächshäusern. Studienarbeit Institut für Technik in Gartenbau und Landwirtschaft, Universität Hannover, unveröffentlicht

Karstädt D, Möllmann K-P, Pinno F, Vollmer M (1998) Sehen im Infrarot: Grundlagen und Anwendung der Thermographie. Physik in unserer Zeit 29, 6-15

Raicu A (1999) IR-Thermographie im Bauwesen – Aufstellung eines Leitfadens zur Anwendung der Infrarotthermographie bei stationären Temperaturverhältnissen zur Feststellung versteckter Baufehler. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, Freiburg

Rath T (2001) Hortex 3.0 - grafisches Softwaresystem zur Planung der Energieversorgung von Gewächshausanlagen. <http://www.itg.uni-hannover.de/software/hortex.htm>, 26.6.2001

Bewertung von Arbeitsprozessen im Gartenbau mit Hilfe der 3D-Bewegungsanalyse

Evaluation of work operations in horticulture by means of 3D motion analysis

Martina Jakob, Vladimir Ivanov, Martin Geyer
Institut für Agrartechnik Bornim e.V., Max-Eyth-Allee 100, 14469 Potsdam
e-mail: mjakob@atb-potsdam.de

Zusammenfassung: Charakteristisch für Arbeitsplätze im Gartenbau ist ein hoher Anteil an Handarbeit. Die Möglichkeiten der Verbesserung handarbeitsintensiver Systeme mit Hilfe des Extrac-Systems, einem digitalen Kamerasystem, welches Bewegungslinien in Form von x,y,z Koordinaten aufzeichnet, werden dargestellt. Die Kenntnis der exakten Lage ausgewählter Körperpunkte zu jedem Zeitpunkt macht es möglich, Wege und Geschwindigkeiten von Körperteilen im Raum zu berechnen und damit Arbeitsplätze zu bewerten. Der Stand des von der DFG geförderten Projektes wird vorgestellt.

Deskriptoren: 3D Bewegungsanalyse, Arbeitsplatzgestaltung, objektive Bewertung

Summary: *Horticultural work places are characterised by a high percentage of manual work. The potential of a method, that digitally records movements and describes them as x,y,z spatial coordinates, is described. The knowledge of the exact location of selected points of the body at any time gives the opportunity to calculate distances or speeds of these and to compare different working situations objectively. The project is financed by the German Research Foundation (DFG).*

Keywords: *3D motion analysis, work place design, objective evaluation*

1. Einleitung und Problemstellung

Arbeitsplätze im Gartenbau sind auch heute noch charakterisiert durch einen hohen Teil an Handarbeit. Die Heterogenität und die Empfindlichkeit der Naturprodukte erschweren die Mechanisierung bzw. machen sie kostenintensiv.

Viele der gartenbaulichen Arbeiten erfolgen in ungünstigen Körperhaltungen, beispielsweise gebückt bei der Ernte auf dem Feld. Auch müssen häufig größere Gewichte von Hand bewältigt werden, sowohl auf dem Feld, als auch im Produktionsablauf der Nachernte. Die geringe Bezahlung und die schwere oder eintönige Arbeit machen es immer schwieriger, motivierte deutsche Saisonkräfte zu finden.

Diese Rahmenbedingungen erfordern eine Optimierung handarbeitsintensiver Systeme unter wirtschaftlichen und menschengerechten Vorgaben. Die Entwicklung solcher Systeme erfordert eine objektive Bewertung vorhandener und neuer Betriebsabläufe.

Im Rahmen des Projektes soll gezeigt werden, ob sich die digitale Bewegungsanalyse für die objektive arbeitswissenschaftliche Bewertung einzelner Tätigkeiten, für die menschengerechte Anpassung von Arbeitsplätzen aber auch für die ergonomische Beurteilung von Bewegungen eignet.

2. Stand des Wissens

Die Effizienz eines Arbeitssystems ist von einer Vielzahl von Einflussfaktoren abhängig. Prozesse laufen nebeneinander und nacheinander ab, die im Vergleich hinsichtlich ihrer optimalen Ausführung untersucht werden müssen (Stoffert 1967).

Eine im Gartenbau gängige Methode, verschiedene Arbeitssysteme und –methoden miteinander zu vergleichen, sind die Zeitstudien (Stoffert und Rohlfing 1980). Je schneller ein Arbeitsvorgang erledigt wird, desto geringer sind die Lohnkosten. Die Zeitdauer als Vergleichswert ist jedoch nur ein grobes Maß. Detailliertere Aussagen ermöglicht die Analyse von Spurbildaufnahmen allerdings nur in Form eines subjektiven Vergleichs der aufgezeichneten Bilder (Motografie). Erst die digitale Aufzeichnung von Bewegungen ermöglicht die Ermittlung vergleichender numerischer Werte.

Dabei können einerseits am Körper befestigte Signalgeber geortet und digital aufgezeichnet werden und andererseits mit Markern versehene Versuchspersonen per Videoaufzeichnungen nachträglich über Mustererkennungsalgorithmen bewegungsanalytisch untersucht werden.

Systeme, die bestimmte Signalgeber orten, aufzeichnen und ihre Lage in Form von dreidimensionalen Raumkoordinaten beschreiben, sind eine Weiterentwicklung in Richtung objektiver Bewertung der Bewegungen. Die meisten bisher verfügbaren Systeme setzen eine direkte Sichtbarkeit bzw. Ortung der Marker voraus (siehe Tabelle 1).

Aufnahmefrequenz der Marker und Lagetreue der Raumkoordinaten sind charakteristische Größen für eine Methode, ebenso wie die erfassten Merkmale und die Art ihrer Darstellung. Die Methoden gliedern sich in zwei Gruppen, die Ortung von aktiven Markern sowie das bildverarbeitungstechnische Verfolgen markierter Punkte auf Videofilmen.

Eine entscheidende Voraussetzung für die Interpretation der Bewegungslinien ist die Software zur Auswertung der gewonnenen Koordinaten, die im Rahmen dieses Projektes für **arbeitswissenschaftliche** Kenngrößen entwickelt wird.

Die erfolgreiche Anwendung der Bewegungsanalyse im Bereich der Medizin und im Sport zeigt, dass sie wichtige sowie neue Erkenntnisse bringt (u.a. Schreiber 1980, Datta 2001). In beiden Bereichen ist die Fragestellung anders bzw. nur teilweise relevant für die Arbeitswissenschaften. Die Art der Bewegung (z.B. Techniken im Sport, Rehabilitationserfolge oder Ganganalyse in der Medizin) steht im Vordergrund der Betrachtung. In Tabelle 1 sind einige der erhältlichen Bewegungsanalyssysteme aufgelistet.

Tabelle 1: Auswahl von Methoden zur Aufzeichnung von Bewegungslinien

Methoden	Hersteller	Art der Erfassung der Daten	Erfasste Merkmale
Motografie		Spurbilder durch Langzeitbelichtung, analog	Bewegungslinie der beleuchteten Punkte
Online-Motografie bzw. Extrac	Wente/Thiedig, Braunschweig	Digitale Erfassung der Raumkoordinaten von IR-Leuchtdioden	Bewegungslinien, Raumkoordinaten, Video
Elektromagnetische Bewegungsanalyse	Isotrak II, Polhemus Inc., Colchester, VT (Datta 2001)	Digitale Erfassung der Raumkoordinaten über elektromagnetische Marker	Raumkoordinaten
ZEBRIS	Zebris Medizintechnik GmbH, Isny	Digitale Erfassung der Raumkoordinaten von Ultraschallsendern	Bewegungslinien, Raumkoordinaten
Analyze	Mikromak GmbH, Erlangen	Software zur Verfolgung von Markern auf digitalen Videosequenzen	Bewegungslinien
Covilas (Computer-Video Laufanalyse)	www.ietec.de		
Measurand „Shape Tape“	Fa. Measurand, Fredericton, Canada www.measurand.com	Faser-optischer Sensor, digital	Bewegungsbild, Raumkoordinaten innerhalb des Messkörpers

3. Methode

Das im Rahmen des Projektes verwendete Extrac-Verfahren (Fa. Wente/Thiedig, Braunschweig), das auch als Online-Motografie bezeichnet wird, ist ein Bewegungsanalysesystem, welches mit Infrarot-Leuchtdioden markierte Punkte aufzeichnet. Das Aufblitzen der IR-Leuchtdioden erfolgt mit einer Taktfrequenz von 50 Hz. Es können maximal acht Leuchtdioden verwendet werden. Diese werden nacheinander gepulst, wofür eine Verbindung der Arbeitsperson mit dem Signalgeber notwendig ist. Je mehr Leuchtdioden verwendet werden, desto niedriger ist die Aufnahmefrequenz der einzelnen Dioden. Die Aufnahme der Lichtpulse erfolgt über zwei CCD-Kameras, die links und rechts in ein Aluminium-Profil eingebaut sind. Die erfolgreiche Errechnung einer Raumkoordinate setzt die Sichtbarkeit der Leuchtdiode für beide Kameras voraus.

In der Mitte des Aluminium-Profiles ist eine Videokamera angeordnet, die den untersuchten Vorgang ebenfalls aufzeichnet, um Arbeitsabläufe und Bewegungen später nachvollziehbar zu machen.

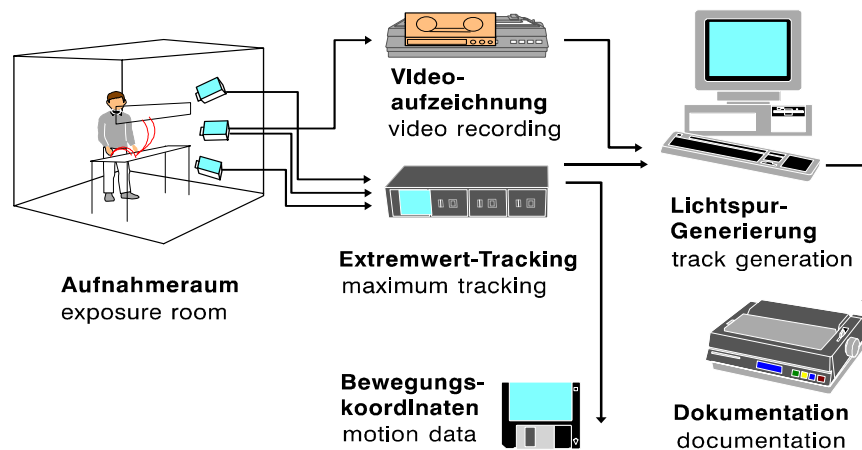


Bild 1: Schematischer Aufbau des Extrac-Systems

Die ermittelten Raumkoordinaten der einzelnen IR-Leuchtdioden werden als ASCII-Daten vom Messcomputer gespeichert.

Die Auswertung der Rohdaten sowie weitere grafische Darstellungsmöglichkeiten werden mit einer speziellen im Rahmen des Projektes entwickelten Software erreicht.

4. Beschreibung des derzeitigen Entwicklungsstandes der Auswertesoftware

Das Programmieren der Auswertesoftware erfolgt in Anlehnung an die arbeitswissenschaftlichen Anforderungen in der auf die ASCII-Daten zurückgreifenden Programmiersprache IDL (Interactive Data Language, Research Systems, Inc.). Dadurch ist die Auswertesoftware auch für andere im ASCII-Format vorliegende Raumkoordinaten zu verwenden.

Die Software gliedert sich in zwei funktionale Bereiche: Ein Bereich ermöglicht eine umfangreiche **grafische Darstellung** der Bewegungen, der andere Bereich die **Errechnung der Kenngrößen**.

4.1 Grafische Darstellung

Vor Errechnung der arbeitswirtschaftlich relevanten Kenngrößen werden die Bewegungslinien zunächst nach ihrem optischen Eindruck beurteilt. Die Ansicht der Bewegungslinien ermöglicht dem Arbeitswissenschaftler eine grobe Einschätzung der Arbeitssituation. Der Vergleich einzelner Bilder ergibt jedoch nur subjektive Einzelergebnisse.

Räumliche Darstellung der Bewegungslinien

Gegenüber der im Messcomputer dargestellten zweidimensionalen Ansicht der Bewegungsspuren ermöglicht die neue Software eine dreidimensionale Ansicht der Bewegungslinien. Dabei können entweder die Ansichten im Menu gewählt oder durch Anklicken und Ziehen des Mauszeigers in jede beliebige Position gebracht werden. Für das Zurechtfinden im Raum bieten sich die voreingestellten Ansichten der Bewegungslinien an, Ansicht von vorn („Front“), Ansicht von oben („From top“) und die Ansicht von rechts („From right side“).

Messkanalweise Darstellung der Bewegungslinien

Die Bewegungslinien werden einzeln für jeden Kanal abgebildet oder alle gemeinsam, wobei jeweils ein Kanal im Auswertungsmodus steht. Für das bessere Verständnis der Lage im Raum wird ein Bezugsobjekt abgebildet, welches durch eine Eichmessung vor jeder Messreihe nach genauen Vorgaben gebildet wird. Diese Vorgaben sind im Programm abgelegt.

Jede Bewegungsmessung kann pro Kanal in ihrer Gesamtheit abgebildet werden oder unter Vorgabe einer bestimmten Abbildungslänge den Prozess durchlaufen. Auch eine Bewegung im Track von Punkt zu Punkt ist möglich.

Die Bewegungslinien lassen sich wahlweise als Gesamtbild oder in definierter Länge als Teilstücke darstellen. Durchläuft man den Track, so kann jederzeit gestoppt und schrittweise vor oder zurück gegangen werden. Es können auch alle Kanäle gleichzeitig durchlaufen werden.

Visualisierung von Geschwindigkeiten einzelner Bewegungsabschnitte innerhalb des Arbeitsvorganges

Die Bewegungslinien können in unterschiedlichen Farben abhängig nach Geschwindigkeiten dargestellt werden. Die Farben werden in einem Menüpunkt nach Bedarf ausgewählt. Die Geschwindigkeiten sind in fünf Stufen unterteilt und orientieren sich innerhalb einer Messdatei an der schnellsten und langsamsten Bewegung. Das heißt, für jeden Prozess

werden alle Farbabstufungen dargestellt. Dadurch sind die Geschwindigkeiten zwischen Messungen jedoch nicht vergleichbar.

Für den Vergleich verschiedener Messungen wurde eine Funktion realisiert, welche die Darstellung der absoluten Geschwindigkeiten ermöglicht (Bild 2).

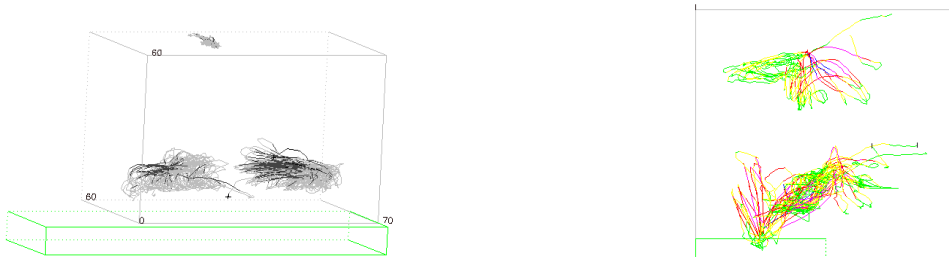


Bild 2: Räumliche Darstellung der Bewegungslinien der linken und rechten Hand von vorn in geschwindigkeitsabhängiger Färbung (linkes Bild) und mit Abbildung des Kopfes von rechts (rechtes Bild)

Bestimmung des Arbeitsbereiches im Raum

Neben der relativen Geschwindigkeit der Bewegungen lässt sich auch die relative zeitliche Verteilung der Koordinaten in definierten Bereichen darstellen. Dafür wird der gemessene Raum in Quader beliebig auszuwählender Größe unterteilt, die Gesamtaufenthaltsdauer in diesen Quadern errechnet und in unterschiedlichen Graustufen dargestellt. Diese Darstellung ist zweidimensional, das heißt man betrachtet entweder von oben oder von vorn. Das Ergebnis kann dem Abgleich zwischen geplantem und tatsächlichem Arbeitsbereich dienen und einen Abgleich mit ergonomischen Daten ermöglichen.



Bild 3: Relative Verweildauer einer Hand im Arbeitsprozess; je dunkler desto länger ist die Verweildauer (Maßangaben in cm)

Ermittlung der Länge einzelner Bewegungen

Um beispielsweise eine typische Weglänge zwischen zwei Wendepunkten zu ermitteln, lassen sich die Bewegungen in Abschnitte unterteilen, die eine definierte Richtungsänderung von Punkt zu Punkt nicht überschreiten. Nach Angabe einer frei wählbaren Länge in cm sucht die Funktion alle Bewegungsabschnitte, die der angegebenen Länge entsprechen oder kürzer sind. Die Bewegungsabschnitte werden mit markiertem Anfangs- und Endpunkt grafisch dargestellt oder ihre Länge in einer Tabelle aufgelistet.

Darstellen der Abstände zwischen ausgewählten Kanälen

Kontinuierlich werden beim Durchlaufen des Tracks die beiden aufeinanderfolgenden Punkte zweier ausgewählter Kanäle mit einer Linie verbunden, um beispielsweise die Krümmung der Wirbelsäule oder die Beugung eines Armes darzustellen.

4.2 Definition von Kenngrößen

Während der Entwicklung der Software wurde eine Auswahl an Fragestellungen aus der Arbeitswissenschaft untersucht, um zukünftig einen vielfältigen Einsatz der Software und damit des Exrac-Systems zu gewährleisten.

Die Ermittlung der Raumkoordinaten sowie der Bewegungslinien allein ermöglicht noch keinerlei objektive Aussagen zur Bewertung von Arbeitsverfahren. Hierfür ist es notwendig, Vergleichsparameter zu definieren, die im folgenden als Kenngrößen bezeichnet werden.

Neben der bereits beschriebenen umfangreichen grafischen Darstellung der Bewegungslinien, sollen aus den ermittelten dreidimensionalen Raumkoordinaten für eine Bewertung relevante Kenngrößen ermittelt werden, um einen objektiven Vergleich unterschiedlicher Arbeitsabläufe zu ermöglichen und eine Reproduzierbarkeit und statistisch abgesicherte Ergebnisse zu liefern. Verschiedene arbeitswissenschaftliche Fragestellungen erfordern unterschiedliche Kenngrößen.

Zeit

Die am häufigsten genutzte Kenngröße ist die Zeit, die in der Arbeitswissenschaft zum Vergleich von Arbeitsprozessen üblicherweise eingesetzt wird. Sie ist als Größe vielfach ausreichend und leicht zu ermitteln. Durch die Arbeit vom REFA (Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e.V.) hat die Arbeitszeitanalyse noch an Wert gewonnen, in dem auch der Leistungsgrad des arbeitenden Menschen mit einbezogen wird.

Die Gesamtzeit ist ein grobes Maß für die Beurteilung eines Arbeitsprozesses. Die Software errechnet die Gesamtarbeitszeit automatisch anhand der aufgezeichneten Messwerte.

Bewegungssumme

Die Bewegungssumme versteht sich als Summe aller Einzelstrecken zwischen zwei Raumkoordinaten. Sie wird für jeden Kanal separat errechnet. Sie stellt die Länge des zurückgelegten Weges der markierten Punkte im Arbeitsprozess dar. Diese Funktion bietet die Möglichkeit, die Bewegung an beispielsweise der rechten und der linken Hand zu vergleichen, um daraus begründete Vorschläge für die Änderung eines Arbeitssystems, beispielsweise der Arbeitsmittelanordnung am Arbeitsplatz zu entwickeln.

Anzahl der Bewegungen

Die gemessene Anzahl der Bewegungen ist davon abhängig, wie sich eine Bewegung definiert. In der Literatur ist keine eingeführte Definition für eine Bewegung zu finden. Die Auswertesoftware bietet daher die Möglichkeit, mit zwei unterschiedlichen Definitionen zu arbeiten. In einer Untersuchung von Datta et al. (2001) zur Beurteilung der technischen Fertigkeiten von Chirurgen wurde eine Bewegung als beendet definiert, wenn sich die Bewegungsgeschwindigkeit verändert. Eine andere Möglichkeit eine Bewegung als beendet zu betrachten ist, wenn sich die Bewegungsrichtung deutlich ändert. Als Bemessungsgrundlage für eine deutliche Richtungsänderung wurde zunächst ein Winkel von $\geq 45^\circ$ angenommen. Es muss untersucht werden, welche der beiden Definitionen die geeignetere ist und in wieweit die Eignung von der Arbeitsaufgabe abhängt.

Streckenlänge zwischen zwei Punkten (siehe 4.1)

Um beispielsweise die Körperhaltung zu beurteilen, wurde eine Funktion programmiert, die kontinuierlich den Abstand zwischen zwei Leuchtdioden unterschiedlicher Kanäle ermittelt. Es handelt sich dabei um ein eher qualitatives Kriterium der Arbeitsgestaltung. Dazu werden die annähernd zeitgleichen Punkte zweier auszuwählender Kanäle auf dem kürzesten Wege miteinander verbunden und durch eine Linie auf dem Bildschirm dargestellt. Die jeweiligen Abstände werden außerdem als Minimum, Durchschnitt und Maximum in der automatischen Statistikdatei gespeichert.

Erzeugen einer automatischen Statistikdatei

Die derzeit für die Auswertung wichtigsten Kenngrößen lassen sich für alle Kanäle aus einer separat generierten Statistikdatei ablesen. Aus dieser Datei ist auch ersichtlich, wie

sich das Verhältnis gemessener zu errechneten Distanzen verhält, da bei Nichtsichtbarkeit von Lichtpulsen zwischen dem letzten und ersten wieder sichtbaren Messwerten interpoliert wird (siehe 4.3).

4.3 Grenzen der Messtechnik

Die Ermittlung der dreidimensionalen Raumkoordinaten setzt voraus, dass die IR-Leuchtdiode zum Aufnahmezeitpunkt von beiden Kameras gesehen wird. In dynamischen Prozessen lässt sich das nicht zu jedem Zeitpunkt realisieren. Fehlende Messwerte können bis zu einem gewissen Grad interpoliert werden. Viele Ausfälle machen eine Messung jedoch unbrauchbar. Dieses tritt insbesondere dann auf, wenn die Dioden auf den Händen befestigt werden und diese Drehbewegungen ausführen.

Ein weiteres Problem wird deutlich, wenn ein sehr kleiner Arbeitsbereich mit langsamen Bewegungen untersucht wird. Die Messgenauigkeit der Raumkoordinaten liegt nur bei etwa einem Zentimeter. Bei kleinen Abständen wird eine gerade Bewegung als Zickzack-Linie abgebildet, weil die vom System erkannten Koordinaten durch den Messfehler nicht mehr auf einer Linie liegen.



Bild 4: Darstellung der entstehenden Bewegungslinie bei zufälligem Verbinden von Punkten innerhalb der die Genauigkeit darstellenden Fläche

In Bild 4 wird das Entstehen einer solchen Linie deutlich, denn die Raumkoordinate befindet sich für jeden Messpunkt irgendwo in einem Kreis mit ca. einem Zentimeter Durchmesser (die Größe des Durchmessers entspricht der Genauigkeit des Systems). Damit ist die gemessene Strecke im Durchschnitt länger als die wirklich zurückgelegte Strecke. Der Fehler ist um so größer, je geringer der Abstand zwischen zwei Messpunkten ist (Tabelle 2). Diese Ungenauigkeit ist sowohl bei der Versuchsplanung als auch bei der Nutzung der Kenngrößen zu berücksichtigen. Eine hohe Genauigkeit der gemessenen Bewegungssumme ist folglich erst ab einer Bewegungslänge zwischen den Punkten von etwa 2,5 – 3 cm gegeben.

Tabelle 2: Prozentuale Zunahme der gemessenen Streckenlänge zum wirklichen Abstand

Tatsächlicher Abstand zwischen zwei Punkten (cm)	Durchschnittlicher gemessener Wert des Systems (cm)	Fehler (%)
0,0	0,51	51,47
0,5	0,69	38,39
1,0	1,10	10,03
1,5	1,57	4,43
2,0	2,05	2,66
2,5	2,54	1,50
3,0	3,03	0,99
4,0	4,03	0,71
5,0	5,02	0,41
6,0	6,02	0,38
7,0	7,02	0,25
8,0	8,01	0,16
9,0	9,01	0,10

5. Ergebnisse und Diskussion

Um die Aussagekraft der Kenngrößen zu überprüfen bzw. neue Anforderungen für die Programmierung zu definieren, wurden Versuche mit verschiedenen für den Gartenbau relevanten arbeitswissenschaftlichen Fragestellungen durchgeführt:

- Vergleich verschiedener Anordnungen von Arbeitsmitteln
- Vergleich verschiedener Arbeitsmittel
- Arbeitshaltung in Abhängigkeit der Lage des Arbeitsgegenstandes
- Beurteilung des Übungsgrades

Alle bisher durchgeführten Versuche erfolgten an Versuchsständen im Ergonomielabor des ATB.

Die Möglichkeiten der Analyse werden beispielhaft an einem Versuch aufgezeigt.

5.1 Stechen von Spargel

Zum Stechen von Spargel wurden mehrere in der Fragestellung sehr unterschiedliche Versuche durchgeführt. Die Arbeitsaufgabe bestand darin, an einem Versuchsdamm Plastik-Spargelstangen zu stechen. Die Stechtechnik wurde von der Probandin eingeübt und entspricht einer in der Praxis weit verbreiteten Methode. Mit gegrätschten Beinen wird der Oberkörper soweit hinuntergebeugt, dass die Hände die Dammoberfläche erreichen. Die linke Hand gräbt den oberen Teil des Spargels einmal frei, anschließend wird gestochen und die Stange abgelegt. Beim Blindstechen wurde auf das Graben verzichtet.

Eine Stechhilfe (Spargelfrettchen) und zwei Spargelmesser wurden miteinander verglichen, in dem pro Durchgang immer zehn Stangen Spargel gestochen wurden.

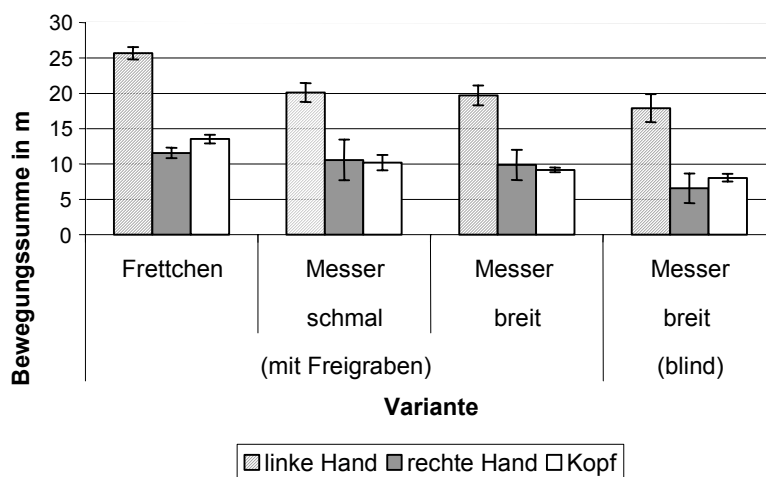


Bild 5: Bewegungsaufwand der linken und rechten Hand und des Kopfes beim Stechen von zehn Stangen Spargel im Labor beim Vergleich verschiedener Messer/Hilfen und Techniken

Die gemessenen Zeiten korrelierten mit den Bewegungssummen, d.h. beim Frettchen waren sowohl die Bewegungssummen als auch die Zeitdauer am höchsten. Das Blindstechen bedeutete eine Reduzierung der Zeitdauer gegenüber dem Stechen mit herkömmlichen Messern und leichtem Freigraben um etwa 8 % und gegenüber dem Frettchen um fast 30 %. Der Mehraufwand der linken Hand beim Frettchen beträgt sogar 44 % im Vergleich zum Blindstechen. Unter den gegebenen Versuchsbedingungen ist das Frettchen eine Stechhilfe, die den Arbeitsprozess negativ beeinflusst. Hände und Kopf wurden stärker bewegt, das Stechen dauerte länger. Die größere Kopfbewegung beim Frettchen verdeutlicht den Einsatz des gesamten Körpers, der notwendig ist, um das Frettchen in den Boden zu bringen. Im Vergleich zur Zeitmessung ist es möglich, die Körperteile einzeln zu betrachten und Problembereiche aufzuzeigen.

In einem weiteren Versuch wurde die Frage untersucht, ob jede Stange Spargel einzeln im Korb abzulegen ist, oder ob mehrere Stangen erst auf dem Damm gesammelt und dann abgelegt werden.

Es ergab sich beim Ablegen jeder Stange im Korb eine um 28,5 % höhere Bewegungssumme für die linke Hand, d.h. unter den im Versuch herrschenden Bedingungen ist ein Sammeln der Stangen zu bevorzugen. Die zeitliche Zunahme betrug nur 5 %, d.h. der Vorgang des Ablegens wird schneller ausgeführt als die Bewegungen beim Stechen. Dieses wurde bereits bei der geschwindigkeitsabhängigen Färbung der Bewegungslinien deutlich. Das genaue Ausmaß der Änderung des Arbeitsvorganges wird erst durch die Errechnung der Bewegungssummen deutlich. Da es sich beim Stechen von Spargel um eine ergonomisch ungünstig zu bewertende Arbeitshaltung handelt, ist eine Reduzierung der Bewegung, wie sie durch Sammeln mehrerer Stangen erfolgt, für die Arbeitskraft sehr vorteilhaft.

Ein stark gebeugter Oberkörper beim Stechen ist unvermeidbar. Die Beurteilung der Variation innerhalb dieser Körperhaltung erfolgte durch Anbringen dreier IR-Leuchtdioden auf dem Rücken der Probanden. Es konnte gezeigt werden, dass in Abhängigkeit der Lage des Spargels im Damm mit zunehmender Entfernung des Spargels vom Körper eine Verlagerung des Kopfes nach hinten zur Gleichgewichtsstabilisierung erfolgt (Bild 6).

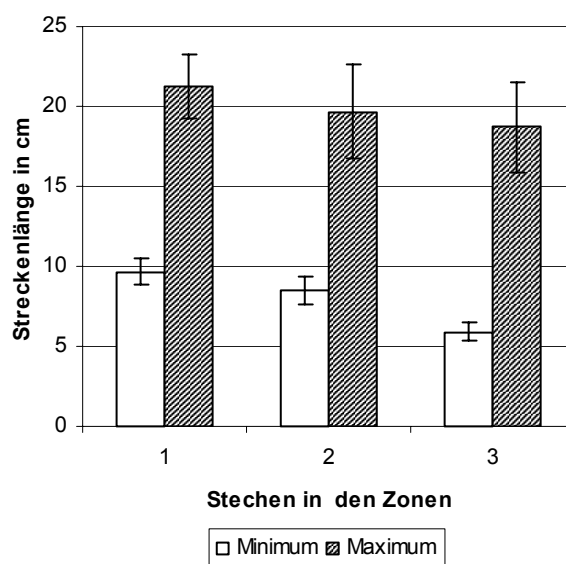


Bild 6: Abstände zwischen Kopf und Schulterblatt beim Stechen von Spargel in drei Zonen des Spargeldamms (Zone 1 nahe dem Körper, Zone 2 Dammmitte, Zone 3 gegenüberliegende Dammsseite)

Die Ergebnisse zeigen, dass es mit Hilfe des im Rahmen des Projektes weiterentwickelten digitalen Bewegungsanalysesystems möglich ist, sehr detaillierte Aussagen zu den Bewegungen einzelner Körperteile zu treffen. Neben dem Vergleich des Bewegungsaufwandes ist auch die ergonomische Bewertung der Arbeitshaltung im dynamischen Prozess gelungen.

6. Schlussfolgerung

Der Wissenszuwachs durch Ermitteln dreidimensionaler Raumkoordinaten mit dem Extrac-System über das reine Bild der Bewegungslinien hinaus bedeutet, dass objektive Vergleichsgrößen zur Interpretation der Bewegungslinien vorliegen. In den beispielhaft vorgestellten Versuchen konnten Ergebnisse erzielt werden, die der reinen und bisher im Gartenbau üblichen Zeitmessung klar überlegen sind. Kenngrößen ermöglichen die Ermittlung statistisch abgesicherter und damit objektiver Ergebnisse. Ein Einsatz des Systems ist sowohl für die Arbeitsgestaltung als auch für die Entwicklung von Maschinen möglich.

7. Literatur (Auswahl)

- Datta V, Mackay S, Mandalia M, Darzi A (2001)** The Use of Electromagnetic Motion Tracking Analysis to Objectively Measure Open Surgical Skill in the Laboratory-Based Model. *Journal of the American College of Surgeons*, Vol. 193, No. 5, pp. 479-485, November
- REFA-Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e.V. (1992)** Methodenlehre des Arbeitsstudiums Teil 2. Datenermittlung. 7. Auflage, Carl Hanser München
- Schreiber TU (1998)** Anwendung der 3-D Bewegungsanalyse bei Funktionsstörungen der Wirbelsäule, 7. Interdisziplinärer Wirbelsäulenkongress, Jena
- Stoffert G (1967)** Der Vergleich von Arbeitsverfahren und Kulturverfahren im Erwerbsgartenbau, Berlin und Hamburg, Paul Parey
- Stoffert G, Rohlfing H-R (1980)** Arbeitszeitbedarf zur Erzeugung von Topf-Chrysanthemem. *GbGw*, Heft 35: S. 773-776

In der Reihe

Bornimer Agrartechnische Berichte

sind bisher erschienen:

Heft 1	Technik und Verfahren der Landschaftspflege	1992
Heft 2	Beiträge zur Lagerung und Verarbeitung pflanzenbaulicher Produkte	1993
Heft 3	Technik und Verfahren in der Tierhaltung	1993
Heft 4	Technik und Verfahren der Landschaftspflege und für die Verwendung der anfallenden Materialien	1994
Heft 5	Verfahrenstechnik der Aufbereitung, Lagerung und Qualitätserhaltung pflanzlicher Produkte	1994
Heft 6	Biokonversion nachwachsender Rohstoffe und Verfahren für Reststoffbehandlung	1994
Heft 7	Preußische Versuchs- und Forschungsanstalt für Landarbeit und Schlepperprüffeld in Bornim 1927 bis 1945	1995
Heft 8	Qualitätssicherung und Direktvermarktung	1996
Heft 9	Konservierende Bodenbearbeitung auf Sandböden	1996
Heft 10	Anwendung wärme- und strömungstechnischer Grundlagen in der Landwirtschaft	1996
Heft 11	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft (Workshop 1996)	1996
Heft 12	Aufbereitung und Verwertung organischer Reststoffe im ländlichen Raum	1996
Heft 13	Wege zur Verbesserung der Kartoffelqualität durch Verminderung der mechanischen Beanspruchung	1997
Heft 14	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft (Workshop 1997)	1997
Heft 15	Technische und ökonomische Aspekte der Nutztierhaltung in großen Beständen	1997
Heft 16	11. Arbeitswissenschaftliches Seminar	1997

Heft 17	Nachwachsende Rohstoffe im Land Brandenburg - Stand Aktivitäten und Perspektiven einer zukunftsfähigen und umweltgerechten Entwicklung	1998
Heft 18	Qualität von Agrarprodukten	1998
Heft 19	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft (Workshop 1998)	1998
Heft 20	Beiträge zur teilflächenspezifischen Bewirtschaftung	1998
Heft 21	Landnutzung im Spiegel der Technikbewertung – Methoden Indikatoren, Fallbeispiele	1998
Heft 22	Kriterien der Nachhaltigkeit in der Verfahrensentwicklung für die Nutztierhaltung	1999
Heft 23	Situation und Trends in der Landtechnik / Erneuerbare Energien in der Landwirtschaft	1999
Heft 24	Institut für Landtechnik der Deutschen Akademie der Landwirtschaftswissenschaften zu Berlin 1951 bis 1965	1999
Heft 25	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 1999 / 2000	2000
Heft 26	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2001	2001
Heft 27	Approaching Agricultural technology and Economic Development of Central and Eastern Europe	2001
Heft 28	6 th International Symposium on Fruit, Nut, and Vegetable Production Engineering	2001
Heft 29	Measurement Systems for Animal Data and their Importance for Herd Management on Dairy Cow Farms	2002
Heft 30	Produktion, Verarbeitung und Anwendung von Naturfasern	2002

Interessenten wenden sich an:

Institut für Agrartechnik Bornim e.V.
Max-Eyth-Allee 100
D 14469 Potsdam

Tel.: (0331) 5699-820
Fax.: (0331) 5699-849
E-mail: atb@atb-potsdam.de

Schutzgebühr: 13,- €