Gartenbauwissenschaft, **67** (4). S. 121–127, 2002, ISSN 0016–478X. © Verlag Eugen Ulmer GmbH & Co., Stuttgart

Entwicklung eines Versuchsstandes zur bildanalytisch gestützten Robotersteuerung im Pflanzenbau

Development of a test stand for vision based robotics in plant production

Kawollek, M., H. J. Tantau und T. Rath
(Institut für Technik in Gartenbau und Landwirtschaft, Universität Hannover)

Zusammenfassung

Am Institut für Technik in Gartenbau und Landwirtschaft der Universität Hannover wurde ein Versuchsstand zur bildanalytisch gestützten Robotersteuerung im Pflanzenbau entwickelt.

Die Anlage besteht im wesentlichen aus einer Transportstrecke, zwei Industrierobotern, zwei (wahlweise drei) Videokameras und einem Belichtungssystem. Alle Komponenten der Anlage können zentral über eine speziell entwickelte Software gesteuert werden. Die Koordination der Robotersysteme erfolgt über optische Sensoren, deren Daten mit Hilfe bildanalytischer Verfahren bearbeitet und ausgewertet werden. Die Positionsbestimmung der Arbeitsobjekte geschieht mittels Stereobildanalyse. Zur Kalibrierung des Systems wurde ein automatisiertes Verfahren entwickelt, welches durch einen geringen Arbeitsaufwand gekennzeichnet ist. Eine flexible Gestaltung des Gesamtsystems erlaubt den Einsatz für verschiedenste Arbeitsabläufe wie zum Beispiel die Ernte von Schnittblumen oder die Bearbeitung von *in vitro* Kulturen.

Der entwickelte Versuchsstand kann für Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf dem gesamten Gebiet der gartenbautechnischen Automatisierung genutzt werden und steht auch anderen Forschungseinrichtungen oder Firmen zur Verfügung.

Summary

At the Institute of Horticultural and Agricultural Engineering, University of Hanover, a test stand for robotic control in agriculture by use of image processing was developed. The main parts of the test stand are a transport unit, two industrial robots, two video cameras (for special applications three) and an artificial light system. All components can be controlled by a specially developed software module.

The robot control is done by analysing data from optical sensors with image processing. The positions of the objects of interest are determined by stereo-vision.

For the system calibration an automated procedure was developed to reduce the calibration time. The flexible design of the whole system enables various tasks like harvesting cut flower or manipulation of tissue culture systems. The developed test stand can be used for research in a wide field of horticultural automation. The system is also available for other research institutions or companies.

Einleitung und Zielsetzung

Handhabungssysteme und Roboter sind in der Industrie zu wesentlichen Bausteinen rationeller Produktion geworden. Die steigende Akzeptanz in der Wirtschaft basiert auf der steigenden Flexibilität, neuen Entwicklungen der Peripherie sowie vereinfachter Bedienung und Programmierung. Bis zum heutigen Zeitpunkt ist der Robotereinsatz in der Industrie jedoch im Wesentlichen durch fest vorgegebene Arbeitsabläufe geprägt. So werden z.B. Greif- und Arbeitspositionen von Montagerobotern innerhalb eines sogenannten „Teaching-Vorganges“ fest vorgegeben und nach Einprogrammierung immer wieder in gleicher Weise wiederholt (siehe hierzu auch VDMA 2000). Insbesondere durch Neuentwicklungen im Bereich der computergesteuerten Bildanalyse und der bildgebenden Sensorik werden allerdings immer breitere Einsatzfelder der Roboteranwendung erschlossen (siehe RADEMACHER und KÜHBAUCH 2001).

Die zukünftige gartenbauliche Produktion wird durch einen hohen Automatisierungsgrad gekennzeichnet sein. Neben dem Einsatz einfacher Automaten werden komplexe und flexible Systeme zum Einsatz kommen, die stationär oder beweglich arbeiten. Ein wichtiges Kriterium dabei ist die autonome Arbeitsweise der Systeme, das heißt, die Pflanzenobjekte, die eine hohe Variabilität und Inhomogenität aufweisen, müssen individuell erkannt und manipuliert werden. Aus diesem Grunde sind neben den eigentlichen robotischen Systemen auch aufwändigere Sensorsysteme und bildanalytische Verfahren für die Robotersteuerung notwendig.

Untersuchungen zum mobilen oder stationären Robotereinsatz besonders im intensiven gärtnerischen Pflanzenbau existieren für verschiedene Teilbereiche. Zahlreiche Untersuchungen wurden zur automatisierten Ernte im Gemüse- und Obstbau durchgeführt, so z.B. für Gurken und Tomaten (KONDO et al. 1996a, SON 1998, VAN HENTEN et al. 2001), Orangen (FORTUNGA et al. 1996, GRASSO und REECE 1997), Pfirsiche (VASSURA 1991) und Äpfel (HARRELL et al. 1988). TILLET et al. (1990), KAIDU et al. (1998) und SOBEY et al. (1997) untersuchten Systeme zur Gewinnung und Verarbeitung von kleinen Pflanzen bzw. Gewebematerial für die *in vitro* Kultur. Ferner wurden einige Arbeiten zur automatischen Stecklingsverarbeitung und Veredlung veröffentlicht (KONDO et al. 1996b, SIMONTON und PEASE 1993, ROSIER et al. 1996, DIJKSTRA 1994, NISHIURA et

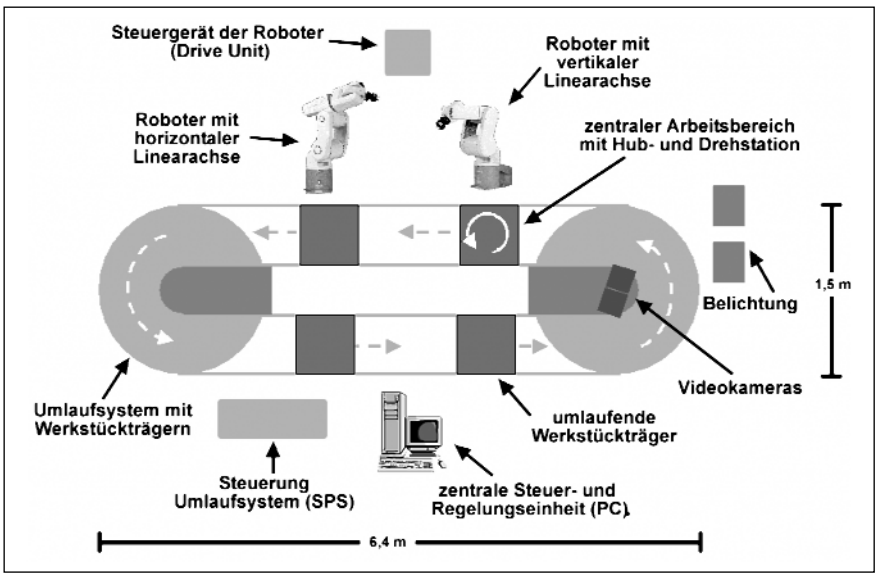


Abb. 1. Schematische Darstellung der Versuchsanlage
Schematic overview of the test stand

al. 1995, ZHANG und WIE 1999a, b). Zum Teil werden auch Simulationstechniken zur Optimierung und zur Analyse des Robotereinsatzes eingesetzt (siehe z.B. VAN HENTEN et al. 2000). Kommerziell genutzte nicht autonome Automaten im Bereich der Topf- und Pikieranlagen für Zierpflanzen beschreibt SCHOCKERT (2000).

Für eine intelligente Roboteransteuerung muss die Lage der Arbeitsobjekte im Raum bekannt sein. Die Ermittlung der Positionen erfolgte in bisherigen Untersuchungen nach verschiedenen Methoden wie z.B. der Stereobildverarbeitung (KOSAKA und KAK 1999) und trinokularen Methoden, welche alle auf dem Prinzip der Triangulation beruhen. Die bildgebende Sensorik wurde dabei entweder fest installiert oder mobil am Endeffektor des Roboters montiert (HEMMING 2001). Als bildgebende Sensorik wurden in den meisten Fällen gewöhnliche CCD-Kameras (z.B. KONDO et al. 1996a) oder solche mit hoher IR-Sensitivität verwendet (z.B. ZHANG und WIE 1999a). Gute Ergebnisse erzielten SUBATRA et al. (1997) auch mittels verschiedenwelliger Lasersensoren.

Eine praxisreife vollständige Automatisierung des Robotereinsatzes oder ein koordinierter Einsatz mehrerer Robotersysteme ist zur Zeit für den Gartenbau nicht verfügbar. Ein wesentlicher Grund ist die fehlende Integration von bildgebender Sensorik und damit verbunden die nicht ausreichende Intelligenz und Autonomie der Robotersteuerung. Ferner wurden bisherige Ansätze nur auf einfache Handhabungsprobleme, die mit einem Roboterarm vollzogen werden können, bezogen. Komplexe Arbeitsvorgänge, wie sie z.B. in der *in vitro* Vermehrung anfallen, sind ohne einen zweiten Greifer wahrscheinlich nicht zu automatisieren.

Am Institut für Technik in Gartenbau und Landwirtschaft der Universität Hannover wurde in Zusammenarbeit mit Industriepartnern ein Roboterversuchsstand mit integrierter Bildsensorik entwickelt. Das Ergebnis ist die Bereitstellung einer Versuchseinrichtung, mit der Untersuchungen, Softwareentwicklungen und Analysen zur gartenbaulichen Automatisierung durchgeführt werden können. Um eine möglichst große Flexibilität für spätere Aufgaben zu erzielen, wurden zwei Industrieroboter mit einem Umlaufsystem konzipiert und installiert. Das Konzept der Anlage geht über bisherige Industrieanwendungen hinaus, da die Robotersteuerung autonom mit Hilfe von Kamerasystemen durchgeführt wird und somit variable Objekte selbstständig bearbeitet werden können.

Konzeption und Aufbau der Roboter- und Transportkomponenten

Allgemeines

Bei der Konzeption der Roboter- und Transportkomponenten des Versuchsstandes stand eine möglichst hohe Flexibilität des Gesamtsystems im Vordergrund. Die einzelnen Teile der Versuchsanlage wurden deshalb so ausgelegt, dass eine Adaption an die verschiedensten Arbeitsabläufe möglich ist. Der schematische Aufbau des gesamten Versuchsstandes ist in Abb. 1 dargestellt.

Das Umlaufsystem

Für den Transport und die Bereitstellung des zu untersuchenden Pflanzenmaterials wurde ein Umlaufsystem der Firma Mannesmann Dematic installiert. Das Umlaufsystem besteht aus zwei parallel angeordneten Förderstrecken, welche durch zwei Umlenker miteinander verbunden sind. Die Transportgeschwindigkeit der Förderstrecke auf der Seite der Roboter ist regelbar.

Der Transport der Versuchsobjekte erfolgt auf Werkstückträgern, von denen bis zu vier gleichzeitig eingesetzt werden können. Die Werkstückträger können an insgesamt vier Positionen des Umlaufsystems mittels pneumatisch betriebener Vereinzeler angehalten und freigegeben werden.

Zusätzlich wurde an einer der Haltepositionen eine Hub- und Drehstation integriert. Sie ermöglicht das Ausheben und anschließende Drehen der Werkstückträger um 360° und somit eine variable Positionierung der Arbeitsobjekte. Die Halteposition stellt den zentralen Arbeitsbereich dar.

Sämtliche Teile des Umlaufsystems werden über eine SPS (speicherprogrammierbare Steuerung) gesteuert.

Alle Funktionen können über einen PC angesprochen werden.

Die Roboter

Am Arbeitsbereich des Umlaufsystems sind zwei Industrieroboter RV-E4NM („Kurzarm-Typ“) bzw. RV-3NLM („Langarm-Typ“) der Firma Mitsubishi montiert. Bei beiden handelt es sich um 6-Achsen-Roboter, die sich lediglich in der maximalen Reichweite (724 mm bzw. 933 mm) unterscheiden. Aufgrund der hohen Achsenanzahl ist eine ausreichende Beweglichkeit und Flexibilität für die verschiedensten Arbeitsabläufe gewährleistet.

Zur Erweiterung des Arbeitsbereiches wurden beide Roboter zusätzlich auf Linearachsen angebracht. Dabei wurde der Roboter mit geringerer Reichweite am zentralen Arbeitsbereich vor der Hub- und Drehstation auf einer vertikalen Achse montiert, der mit der größeren Reichweite auf einer horizontalen Achse. Auf diese Weise können beide Roboter sowohl in einem gemeinsamen als auch in getrennten Arbeitsbereichen agieren.

Beide Roboter sind mit pneumatischen Greifern ausgestattet, deren Greifkraft stufenlos verstellt werden kann, so dass eine Anpassung an die Druckempfindlichkeit der Arbeitsobjekte möglich ist. Die Greifer der Roboter können an die jeweilige Arbeitsaufgabe adaptiert werden.

Die Steuergeräte (Drive Units) der beiden Roboter sind über die RS232-Schnittstelle mit einem PC verbunden.

Konzept und Aufbau der Bildverarbeitungskomponenten

Allgemeines

Zur Lösung der an die Versuchsanlage gestellten Anforderungen (autonome und an die jeweilige Pflanze angepasste Steuerung) ist ein Konzept notwendig, in dem optische Sensoren eng mit der Robotersteuerung zusammenarbeiten. Es müssen exakte dreidimensionale Informationen (d.h. ein partielles dreidimensionales Modell) über das zu bearbeitende Objekt vorliegen. Anhand dieses Modells werden die Ansteuerungen der Roboter mit Hilfe von Entscheidungsregeln vorgenommen. Das in bisherigen industriellen Anwendungen vorherrschende Konzept des robot-vision (Bildverarbeitung und Robotics) muss somit um eine intelligente Komponente und um Pflanzenwissen erweitert werden (siehe Abb. 2). Im Einzelnen müssen die Schritte „Objektidentifikation“, „Positionsbestimmung, Positionierung“ und „Greifpunktermittlung, Aktorsteuerung“ realisiert werden.

Der notwendigen Bildverarbeitung kommen sowohl Aufgaben der reinen Bildbewertung als auch der Modellbildung zur Robotersteuerung zu. Notwendige Arbeitsschritte sind in Abb. 3 dargestellt: Die beiden in Stereoposition angeordneten Kameras erzeugen von dem Bearbeitungsobjekt dreikanalige (R-G-B-Farbkanäle) Farbbilder. Anschließend werden diese Bilder binarisiert und segmentiert und es werden markante Objektpunkte (z.B. Endpunkte der Pflanzenstiele) detektiert. Im nächsten Schritt erfolgt eine 3-dimensionale Modellierung der zu bearbeitenden Objekte mit anschließender Interpretation mit Hilfe von gartenbauspezifischen Entscheidungsregeln, woraus sich die jeweiligen Koordinaten für die Robotersteuerung ergeben. Entscheidend ist, dass auf diese Art und Weise nicht nur die einzelnen Greif- oder Schnittpunkte für die direkte Robotersteuerung berechnet werden können, sondern es liegen auch Informationen vor, welche Bereiche der Roboter nicht tangieren darf, da es sonst zu Schädigungen an den Pflanzen kommt. Je nach

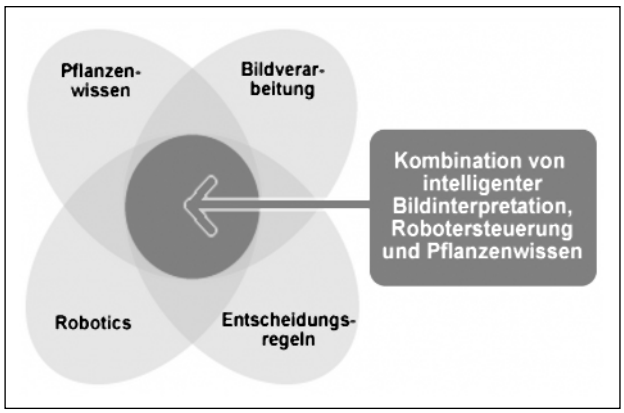


Abb. 2. Erweiterung des Konzeptes des Robot-Vision für Anwendungen im Gartenbau
Expansion of the robot-vision for the use in horticultural production

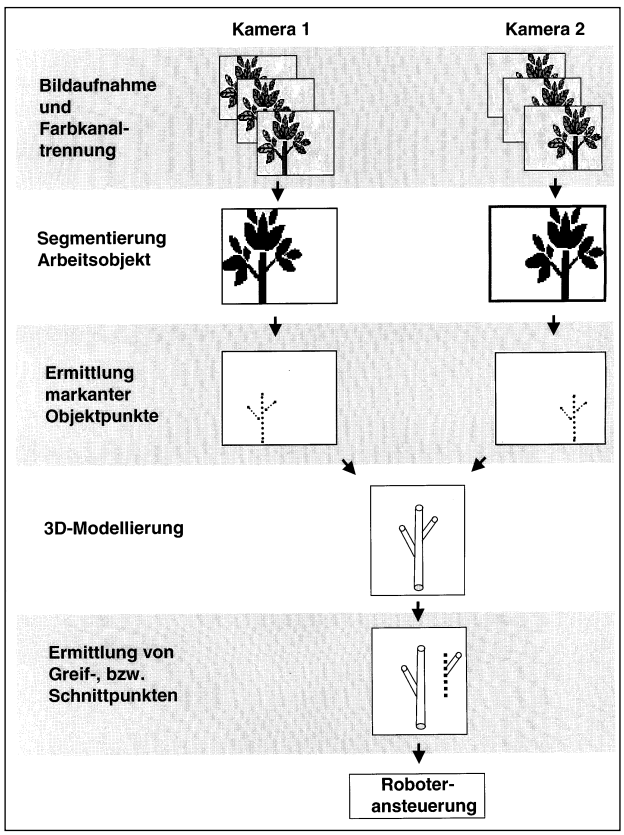


Abb. 3. Arbeitsschritte zur bildgestützten, intelligenten Robotersteuerung mit zwei Kameras
Operation tasks for vision based, intelligent robot control with two cameras

Komplexität des zu untersuchenden Objektes sind eine oder mehrere Aufnahmepositionen auszuwerten. Mit Hilfe der Transporteinheit und besonders mit der Hub- und Drehstation lassen sich die unterschiedlichen Positionen realisieren.

Kameras und Belichtung

Zur Realisierung der Bild gebenden Sensorik wurden zwei (wahlweise drei) hochauflösende digitale Fullframe-CCD Kameras DFD 4023 (THEIMAGINGSOURCE 2000) installiert. Sie arbeiten weitestgehend im sichtbaren Wellenlängenbereich, wobei auch im nahen Infrarotbereich noch Signale empfangen werden. Farbinformationen werden über einen Mosaikfilter auf den Chip platziert. Es erfolgt keine weitere Aufbereitung der Daten innerhalb der Kameras. Die physikalische Auflösung beträgt 1300 x 1030 Pixel, sie reduziert sich jedoch durch Verrechnung von je vier Grauwertpixeln mit unterschiedlicher Farbintensität (1*Rot, 2*Grün, 1*Blau) zu einem RGB-Wert auf 650 x 515 Pixel. Die maximale Bildrate ist 12 Bilder s^{-1}. Es können wahlweise unterschiedliche Objektive vorgeschaltet werden. Blendeneinstellungen, Belichtungsdauer und Auslösung (Shutterfunktionen) können über externe Signale bzw. über Softwareereignisse ausgelöst bzw. synchronisiert werden. Der Bilddatentransfer sowie die Ein- und Ausgabe der Steuerdaten erfolgt über drei digitale PCI-Framegrabberkarten (THEIMAGINGSOURCE 2000).

Für spezielle Untersuchungen stehen optische Sperrfilter zur Verfügung, welche auf die Objektive der Kameras aufgeschraubt werden können. Die Filter lassen Strahlung erst ab einer Wellenlänge von ca. 780 nm passieren.

Um Fremdeinflüsse bzgl. der Belichtung so klein wie möglich zu halten, wurde der gesamte Versuchsstand von natürlicher Globalstrahlung abgeschirmt. Die Belichtung der Anlage erfolgt wahlweise mit Blitzlicht, Gleichstromlicht (Halogenlampen) oder handelsüblichen Assimilationslichtanlagen (Metallhalogendampflampen).

Konzeption und Aufbau der Softwarekomponenten

Software zur Steuerung der Versuchsanlage

Die Steuerung der Versuchsanlage erfolgt zentral über einen PC. Für die Versuchsanlage wurde in Zusammenarbeit mit der Firma ANT (ANT 2001) ein eigenständiges Programm entwickelt. Dieses Programm ermöglicht sowohl die Ansteuerung der einzelnen Teile der Versuchsanlage als auch die Durchführung der eigentlichen Bildverarbeitungsschritte über eine gemeinsame visuelle Oberfläche.

Die Software wurde mit C++ unter Windows NT Workstation 4.0 (MICROSOFT 2001a) erstellt, als Entwicklungsumgebung und Compiler kam Microsoft Visual C++ 6.0 (MICROSOFT 2001b) zum Einsatz.

Für die verschiedenen Teile der Versuchsanlage und ihre grundlegenden Funktionen wurden eigene Programmmodule entwickelt, welche für die verschiedenen Aufgabenbereiche weiterverwendet werden können.

Im Einzelnen lassen sich unter anderem folgende Funktionen der Versuchsanlage über die Software steuern:

Umlaufsystem: Taktung der Werkstückträger, Geschwindigkeit der Bearbeitungsstrecke, Steuerung der Hub- und Drehstation (ausheben, drehen)
Roboter: Positionierung inklusive Linearachsen, Geschwindigkeit, Bezugskoordinatensystem, Greifer (auf/zu), Greifkraft
Videokameras: Bildaufnahme und Anzeige, Trigger auf externes Signal (z.B. Lichtschranke), Belichtungszeit

Bildverarbeitung

Die Auswertung der Bilddaten erfolgt mit dem Softwaretool HALCON 5.2.3 (MVTEC 2001). Halcon ist eine Software-Lösung für die industrielle Bildverarbeitung. Es stellt eine Bibliothek von über 900 Operatoren bereit, welche unter anderem unter C++ implementiert werden können. Die bereitgestellten Operatoren decken ein breites Spektrum ab wie z.B. Bildaufbereitung, Segmentierung, Kamerakalibrierung, Farbbildanalysen (siehe hierzu auch RATH 1997). Ein spezielles Interface zur Unterstützung der verwendeten Framegrabber-Karten wurde entwickelt.

Die Berechnung von dreidimensionalen Lageinformationen, welche später für die Ermittlung der Greifpunkte der Roboter verwendet werden, erfolgt an der Versuchsanlage mittels Stereobildverarbeitung. Dabei wird das Arbeitsobjekt mit zwei horizontal versetzten Kameras (fast) zeitgleich aufgenommen. Die Kameras (Abstand zwischen den Kameras 8 cm) wurden hier im Rahmen erster Versuche in ca. 1,4 m Entfernung von der zentralen Arbeitsstation mit Blick auf den Arbeitsbereich stationär positioniert.

Im Anschluss an die Bildaufnahme und die Bildverarbeitungsoperationen zur Segmentierung und Auswahl relevanter Objekte aus den Bildern lässt sich die Position dieser Objekte mittels Triangulation korrespondierender Bildpunkte berechnen (siehe hierzu auch KAWOLLEK und RATH 2001 oder KLETTE et al. 1998).

Systemkalibrierung

Für die Realisierung einer bildgestützten Robotersteuerung ist die Gewinnung von dreidimensionalen Lageinformation und der Abgleich der Systemkomponenten (Kameras und Roboter) eine notwendige Voraussetzung. Ungenauigkeiten in der Abstimmung zwischen optischer Sensorik und mechanischen Roboteraktoren führen unwiderruflich zu Fehlfunktionen der gesamten Anlage, im Extremfall zur Zerstörung von Pflanzenmaterial oder technischem Inventar (die Roboter greifen an den Objekten vorbei und bewegen sich unkontrolliert im Raum). Der Systemkalibrierung kommt daher überragende Bedeutung zu (zum Einfluss von Kalibrierfehlern siehe auch HEMMING 2001). Sie muss in regelmäßigen Abständen durchgeführt werden, da z.B. Erschütterungen oder thermische Einflüsse die Kalibrierwerte verändern.

Für die Kalibrierungsvorgänge am Teststand wurde eine Kalibriertafel (40 cm x 40 cm) mit aufgedruckten Passmarken konstruiert und am Greifer des Roboters montiert. Diese Tafel wird innerhalb der Kalibrierung aus unterschiedlichen Positionen mit den Kameras simultan aufgenommen (siehe Abb. 4). Aus den Korre-

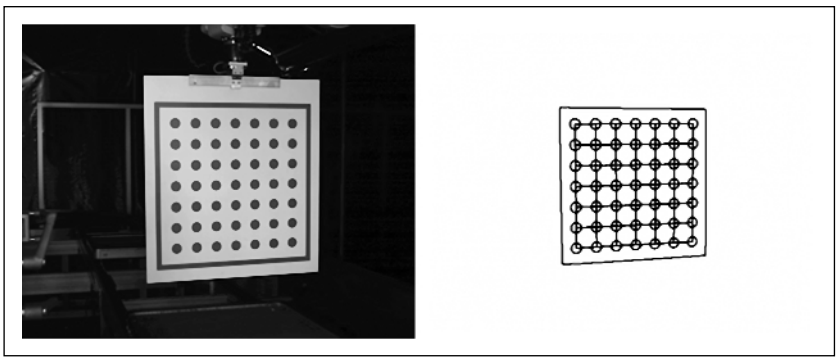


Abb. 4. Aufnahme der am Robotergreifer montierten Kalibriertafel (links) und aus dem Bild extrahierte Eichkörpermarken (rechts).
Video image of the calibration table mounted at the robot manipulator (left) and extracted calibration marks (right).

spondenzen zwischen den im Bild detektierten Marken und dem bekannten Modell der Kalibriertafel lassen sich durch simultane Auswertung einer Mehrzahl von Bildern (Multibildkalibrierung) die Kameraparameter mittels eines Bündelausgleichverfahrens errechnen (siehe LANSER et al. 1995). Als Kameramodell wurde das einer Lochkamera mit radialer Verzerrung verwendet (siehe LANSER et al. 1995). Der gesamte Kalibriervorgang wurde in einem Softwareprogramm implementiert, welches einen automatisierten Ablauf ermöglicht.

Während eines Kalibriervorganges werden vom Roboter ca. 30 verschiedene Positionen angefahren, so dass die Kalibriertafel im Blickfeld der beiden Kameras in den verschiedenen Positionen zu sehen ist. Von jeder Position werden mit beiden Kameras automatisch Aufnahmen gemacht und die Eichkörpermarken im Bild extrahiert. Als Ergebnis werden Parameter berechnet, die die aktuelle Orientierung bzw. Lage der Kameras in Bezug auf ein Weltkoordinatensystem beschreiben (Rotationsmatrix und Translationsvektor), sowie die aktuellen inneren Parameter der Kameras wie die effektive Brennweite, Verzerrung, Skalierung und die Lage des optischen Zentrums.

Der Zeitaufwand für den eigentlichen Kamerakalibrierungsvorgang konnte durch das automatisierte Verfahren mit dem Roboter auf insgesamt ca. fünf Minuten reduziert werden. Im Gegensatz dazu betrug der Zeitaufwand bei einer „manuellen" Vorgehensweise, bei der der Kalibrierkörper für jede Aufnahme per Hand neu positioniert werden muss und die Bildaufnahme manuell ausgelöst wird, ca. 20 Minuten. Auf diese Weise konnten die Rüstzeiten beim Betrieb der Anlage deutlich minimiert werden.

In einem zweiten Schritt wird analog die Hand-Auge-Kalibrierung durchgeführt (Anfahren verschiedener Positionen und Kameraaufnahme der Kalibriertafel). Als Ausgabeparameter erhält man eine Schätzung der relativen Lage des Roboterkoordinatensystems in Bezug zum Kamerakoordinatensystem.

Für eine Abschätzung der Kalibriergüte wurden für die errechneten Kameramodelle anhand des mittleren ermittelten Modellfehlers die resultierenden Lageabweichungen bei der späteren Positionsbestimmung von Objekten im Raum berechnet.

Für den verwendeten Versuchsaufbau ergibt sich dabei bei einem Kameraabstand von 80 mm und einem Objektabstand von 1300 mm, der in etwa der Entfernung der Kameras zum Arbeitsbereich entspricht, in Blickrichtung der Kamera (Z-Achse) ein Fehler von ca. 2 mm. Die Fehler in horizontaler und vertikaler Richtung (X- bzw. Y-Achse) liegen dabei deutlich unter 1 mm.

Zu den Ungenauigkeiten des Kamerasystems muss im nächsten Schritt noch der Fehler berücksichtigt werden, welcher bei der Hand-Auge-Kalibrierung auftritt. Hierbei wird die Genauigkeit der relativen Position des Roboterkoordinatensystems zur Kamera abgeschätzt. Diese liegt beim beschriebenen Aufbau bei ca. 1,5 mm.

Insgesamt ergibt sich für den bildgestützten Greifvorgang damit ein mittlerer Modellfehler von ca. 3,5 mm. Dieser Fehler ist für den Anwendungszweck tolerierbar, da aufgrund der Dimensionen des Greifers am Roboterarm keine Probleme zu erwarten sind.

Inwieweit dieser theoretische Fehler in der späteren Anwendung durch andere Faktoren verstärkt wird (Ungenauigkeiten in der Korrespondenzanalyse, Veränderungen der Kameraparameter durch thermische Einflüsse oder mechanische Erschütterung zwischen zwei Kalibriervorgängen), hängt von den jeweiligen Anwendungsfällen ab.

Anwendungsfelder und zukünftige Einsatzbereiche

Durch die Kombination der Bildverarbeitung mit zwei unabhängigen Robotermanipulatoren eröffnen sich zahlreiche Anwendungsfelder. Besonders komplexe und von Seiten der Handhabung komplizierte Arbeitsvorgänge können mit vergleichbaren oder ähnlichen Robotersystemen automatisiert werden. Die entsprechenden Softwareprogramme zur Bildauswertung und die Einbindung der Entscheidungsregeln zur Ansteuerung und Ausprägung der Greifer sind jedoch speziell für jede Aufgabe zu entwickeln bzw. nur zu adaptieren, da es sich um jeweils ähnliche Anwendungen handelt. Momentan werden Versuche zur Ernte von geometrisch einfachen pflanzenbaulichen Objekten (Blütenstielen von *Gerbera jamesonii*) durchgeführt. Versuche zur Ernte komplexerer Strukturen (Stecklingsernte an verzweigten Mutterpflanzen) sollen folgen.

Denkbare weitere Anwendungsbereiche sind die Veredlung oder die Stecklingsproduktion. In beiden Fällen handelt es sich um arbeitsintensive Vorgänge mit einem hohen Arbeitskostenanteil. Durch den Einsatz der Computerbildverarbeitung in Kombination mit zwei Manipulatoren könnten in diesen Bereichen Rationalisierungen stattfinden.

Neben Anwendungen im konventionellen Gartenbau werden in Zukunft Anwendungen im Bereich der Pflanzenbiotechnologie eine zunehmende Bedeutung erlangen. So betragen z.B. bei der *in vitro* Vermehrung die Arbeitskosten über 80 % der Produktionskosten. Dabei stehen die *in vitro* Labors im internationalen

Wettbewerb mit der Produktion in Niedriglohnländern, so dass eine Senkung der Produktionskosten in diesem Bereich eine große Bedeutung hat. Für die Automatisierung der *in vitro* Vermehrung ist der Einsatz der Computerbildverarbeitung in Kombination mit zwei oder mehr Manipulatoren unabdingbar. Durch die Automatisierung können neben der Senkung der Produktionskosten auch die Probleme mit Infektionen reduziert werden, da Geräte einfacher und besser sterilisiert werden können als Menschen. Der Einsatz von Robotern im Bereich der *in vitro* Vermehrung bedingt allerdings auch eine weitgehende Umstellung und Anpassung der Produktionsverfahren. So sind für die Automatisierung große Kulturgefäße von Vorteil. Es ist auch zu überlegen, ob nicht – ähnlich wie bei der Chip-Produktion – die Produktion in Reinsträume verlagert wird. Damit entfällt die Notwendigkeit für geschlossene Kulturgefäße. Ein entsprechender Ansatz kann bereits in Japan an der Chiba Universität (KOZAI 2000) besichtigt werden. Dort werden in großer Menge Süßkartoffeln in einem Reinstraum produziert. Allerdings erfolgt die eigentliche Vermehrung noch von Hand.

Die Wirtschaftlichkeit solcher Entwicklungen steht bei entsprechenden Laufzeiten außer Frage, da die erforderliche Hardware immer preiswerter und – was für diese Anwendungen besonders wichtig ist – immer leistungsfähiger wird. Problematisch sind auch in Zukunft die Entwicklungskosten für die Software. Mit dem vorgestellten Roboterversuchsstand können die erforderlichen Arbeiten forciert werden, indem für die Computerbildverarbeitung neue Methoden entwickelt werden, die dann in den verschiedenen Einsatzbereichen angewendet werden können. Der entwickelte Versuchsstand soll für die weiteren Entwicklungen intensiv genutzt werden. Er steht auch anderen Forschungseinrichtungen oder Firmen für die verschiedensten Untersuchungen und Entwicklungen zur Verfügung.

Literatur

ANT 2001: Homepage der Applied New Technologies AG. http://www.ant-ag.net, 11.12.2001.

DIJKSTRA, J. 1994: Application of digital image processing for pot plant grading. Thesis, Wageningen.

FAUGERAS, O. 1993: Three-dimensional computer vision: a geometric viewpoint. The MIT Press, Massachusetts.

FORTUNGA, L., G. MUSCATO, G. NUNNARI und A. PANDOLFO 1996: Application of neural control in agriculture: an organge picking robot. Acta Horticulturae **406**, 441–450.

GRASSO, G. M. und M. REECE 1997: Scene analysis for an orange harvesting robot. AI-Applications **11** (3), 9–15.

HARRELL, R. C., P. D. ADSIT, T. A. POOL und R. HOFFMANN 1988: The Florida robotic grove-lab. ASAE-paper no. **881578**, 14.

HEMMING, J. 2001: Bildanalyse für die robotisierte Ernte von Gewächshausgurken. In: Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft – Workshop 2001. Gartenbautechnische Informationen, Heft **53** / Bornimer Agrartechnische Berichte, Heft **26**, 42–52, Potsdam, Hannover.

VAN HENTEN, E. J., G. VAN DIJK, M. C. KUYPERS, B. A. J. VAN TUIJL und L. G. G. VAN WILLIGENBURG 2000: Motion planing for a cucumber picking robot. Agricontrol 2000, International Conference on Modelling and Control in Agriculture, Horticulture and Post-harvested Processing. Wageningen, Netherlands, 76–81.

VAN HENTEN, E., J. HEMMING, B. VAN TUIJL und J. BONTSEMA 2001: Automaten und Roboter auf dem Vormarsch. Taspo Magazin 2, 9, 26–28.

KAIDU, Y., T. OKAMOTO und T. TORII 1998: Robotic system for sorting and transplanting orchid seedlings in tissue culture. Jorunal of the Japanese Society of Agricultural Machinery **60**, 55–62.

KAWOLLEK, M. und T. RATH 2001: Stereobildanalyse zur Robotersteuerung bei Arbeiten an der Pflanze. In: Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft – Workshop 2001. Gartenbautechnische Informationen, Heft **53** / Bornimer Agrartechnische Berichte, Heft **26**, 33–41, Potsdam, Hannover.

KLETTE, R., K. SCHLÜNS und A. KOSCHAN 1998: Computer vision: three-dimensional data from images. Springer-Verlag, Singapore.

KONDO, N., Y. NISHITSUJI, P. P. LING und K. C. TING 1996a: Visual feedback guided robotic cherry tomato harvesting. Transactions of the ASAE **39**, 2331–2338.

KONDO, N., Y. OGAWA, M. MONTA und Y. SHIBANO 1996b: Visual sensing algorithm for chrysanthemum cutting sticking robot system. Acta Horticulturae **440**, 383–388.

KOSAKA, A. und A. C. KAK 1999: Stereo Vision for industrial applications. In: SHIMON, Y.(ed.):Handbook of industrial robotics. John Wley & Sons, Inc., New York.

KOSCHAN, A. 1991: Eine Methodenbank zur Evaluierung von Stereo-Vision-Verfahren, Technischer Bericht **91–09**, Technische Universität Berlin, Berlin.

KOZAI, T. 2000: Closed Transplant Production Systems with Artificial Lighting for Production of High Quality Transplants with Environment Conservation and Minimum Use of Resource. Preprints of the 15th Workshop on Agricultural Structures and ACESYS (Automation, Culture, environment & System) IV. Conference, Tsukuba, Ibaraki, Japan

LANSER, S., C. ZIERL, und R. BEUTLHAUSER 1995: Multibildkalibrierung einer CCD-Kamera. 17. DAGM Symposium, Bielefeld. In: SAGERER, G., S. POSCH und F. KUMMERT (Hrsg.): Mustererkennung 1995, 481–491, Informatik aktuell, Springer-Verlag, Berlin.

NISHIURA, Y., H. MURASE, N. HONAMI und T. TAIRA 1995: Development of plug-in grafting robotic system. Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation: Nagoya Congress Center, May 21–27, 1995, Nagoya, Aichi, Japan, 2510–2517.

MICROSOFT 2001a: Windows NT Workstation http://www.microsoft.com/ntworkstation/, 11.12.2001.

MICROSOFT 2001b: Visual C++ 6.0 http://msdn.microsoft.com/visualc/, 11.12.2001.

MVTEC 2001: Halcon Documentation. MVTec Software GmbH, http://www.mvtec.com, 11.12.2001.

RADEMACHER, I. F. und W. KÜHBAUCH 2001: Trends und Zahlen zur Entwicklung der Computer-Bildanalyse in der pflanzenbaulichen Forschung – Ergebnisse einer Literaturstudie. In: Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft – Workshop 2001. Gartenbau-

technische Informationen, Heft **53** / Bornimer Agrartechnische Berichte, Heft **26**, 105–109, Potsdam, Hannover.

RATH, T. 1997: Methoden zur computerbildanalytischen Pflanzenidentifikation am Beispiel dendrologischer Bestimmungen. Gartenbautechnische Informationen, Heft **42**. Institut für Technik in Gartenbau und Landwirtschaft. University of Hanover, Germany.

ROSIER, J. C., R. SNEL und E. J. GOEDVOLK 1996: Automated harvesting of flowers and cuttings. Information, intelligence and systems / 1996 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Beijing, China, October 14–17.

SCHOCKERT, K. 2000: Verpflanzmaschinen. Deutscher Gartenbau **14**, 37–40.

SOBEY, P., B. HARTER, und A. HINSCH 1997: Automated micro-propagation of plant material. Proceedings / Fourth Annual Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice, Toowoomba, Australia, September 23–25, 1997, 60–65.

SUBATRA, I., T. FUJIURA, S. NAKAO, H. YAMADA, M. HIDA, und T. YUKAWA 1997: 3-D vision sensor for cherry tomato harvesting robot. Japan Agricultural Research Quarterly **31**, 258–264.

SIMONTON, W. und J. PEASE 1993: Orientation independent machine vision classification of plant parts. Journal of Agricultural Engineering Research **54**, 231–243.

SON, J.Y. 1998: Development of a recognition system for tomato harvesting by image processing. Journal of Farm Management and Agricultural Engineering **40**, 200–208.

THEIMAGINGSOURCE 2000: Produkt-Information: Digital-Kameras, DxD Serie. TheImagingsource, Bremen.

TILLET, R. D., F. R. BROWN, C. M. MCFARLANE, C. M. ONYANGO, P. F. DAVIS und J. A. MARCHANT 1990: Image-guided robotics for the automation of micropropagation. Proceedings: IROS '90, IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems '90; towards a new frontier of applications, July 3–6, 1990, Mechanical Engineering Research Laboratory, Hitachi Ltd., Tsuchiura, Ibaraki, Japan, 265–270.

VASSURA, G. 1991: Fruit-swalloing oesephagus for a peach-picker robot arm: a feasibility study. The Second Workshop on Robotics in Agriculture and the Food Industry. 79–91. Italy, DIST University of Genova.

VDMA 2000: Robotik und Automation 2000/2001. Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. Fachgemeinschaft Robotik + Automation, Frankfurt.

ZHANG, T. Z. und J. T. WIE 1999a: Study on vision system of vegetable grafting robot. I. Searching for growth point of cucurbit seedling with morphological method. Journal of China Agricultural University **4**, 45–47.

ZHANG, T. Z. und J. T. WIE 1999b: Study on vision system of vegetable grafting robot. II. Searching for growth point of pumpkin seedling with geometrical method. Journal of China Agricultural University **4**, 48–50.

Eingereicht: 28.12.01/08.05.02

Anschrift der Verfasser: M. Kawollek, Prof. Dr. H. J. Tantau und Prof. Dr. T. Rath, Institut für Technik in Gartenbau und Landwirtschaft, Universität Hannover, Herrenhäuser Str. 2, 30419 Hannover, Germany, e-mail: kawollek@itg.uni-hannover.de