

Einsatz des FUGA15C xy-Photodiodenarrays zur Erfassung von Pflanzenmerkmalen

A. LINZ¹, S. KLAMT², T. BERG¹, T. DZINAJ¹, S. KLEINE HÖRSTKAMP¹, A. RUCKELSHAUSEN¹, V. SPERSCHNEIDER², M. WÜBBEN¹

¹ Fachhochschule Osnabrück; Fachbereich Elektrotechnik, Albrechtstr. 30, 49076 Osnabrück;

² Universität Osnabrück, Fachbereich Mathematik/Informatik, Neuer Graben/Schloss, 49069 Osnabrück

Email: ruckel@wap1.et.fh-osnabrueck.de

(gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt)

Zusammenfassung

Das FUGA15C-System stellt ein in CMOS-Technologie gefertigtes xy-Photodiodenarray mit 512 X 512 Pixeln dar. Neben den geringen Kosten, der einfachen Handhabung, der digitalen und analogen Schnittstelle, der hohen Empfindlichkeit im nahen Infrarotbereich sowie der automatischen Belichtungskontrolle stellt die freie Adressierbarkeit jedes einzelnen Pixels (random access) einen wesentlichen Vorteil des Systems dar. Diese hohe Flexibilität ermöglicht das Auslesen und die Analyse ("Bildverarbeitung") von wenigen Pixeln, was einen deutlichen Geschwindigkeitsvorteil im Vergleich zu herkömmlichen CCD-Kameras zur Folge hat. Hierdurch eröffnet sich die Möglichkeit, "Kameras" zur on-line Erfassung geometrischer Pflanzenmerkmale einzusetzen.

Der Einsatz des xy-Kamerasystems als "Kreuzsensor" zur Erfassung von Blattformen und deren Orientierung (Maispflanzen im Zweiblattstadium) wird beschrieben. Weiterhin werden Ergebnisse zum Erkennen geometrischer Pflanzenmerkmale auf Basis verschiedener mathematischer Methoden vorgestellt (vektorielle und vergleichende Verfahren, Neuronales "Hopfield-Netz").

Stichwörter: Mais, Bildverarbeitung, CMOS-Bildaufnehmer, Unkrautregulierung

Summary

Use of the FUGA15C xy-photodiode-array for the recognition of plant features

The FUGA 15C-System represents an xy-photodiode array of 512x512 pixels produced in CMOS technology. It stands out for its low cost, simple handling, digital and analog interface, its high sensitivity in the near infrared spectrum as well as the automatic exposure control. Beyond this, the free adressability of each pixel (random access) represents a major advantage of this highly flexible system. This feature allows for selection and analysis of only a few pixels, which results in a distinctive advantage over conventional CCD-cameras. It furthermore facilitates implementation of camera systems for on-line recording of geometrical plant features.

The application of xy-camera systems as a "cross-shaped sensor" to record leaf shapes and their orientation/alignment (maize plants with two leafs) is described. In addition results are shown related to recognition of geometrical plant features on the basis of different mathematical methods (vector and comparative methods, neural "Hopfield Net").

Keywords: Maize, image processing, CMOS-Imagers, weed control

I Einleitung

Die Unterscheidung von Nutzpflanzen und Beikräutern sowie deren Identifikation spielt sowohl im Hinblick auf die Reduktion der Anwendung von Pflanzenschutzmitteln als auch für differenzierte Düngungsmethoden eine wichtige Rolle. Die Bildverarbeitung ist zwar bei statischen Analysen von Bedeutung, konnte jedoch aufgrund der langen Signalverarbeitungszeiten für Echtzeit-Verfahren zur lokalen Pflanzenanalyse bisher nicht eingesetzt werden (KÜHBAUCH 1996). Zwar wurden bei der Entwicklung der Verfahren Fortschritte erzielt (z.B. MASSEN 1996), jedoch bestehen aufgrund der - in den meisten Fällen - verwendeten Kameras nach der Fernsehnorm Nachteile bzgl. einer schnellen Bildaufnahme. In TV-Kameras mit CCD-Sensoren muß das gesamte Bild ausgelesen werden bevor eine entsprechende Bildanalyse erfolgen kann. Aufgrund der Fortschritte in der Technologie hochintegrierter Schaltungen stehen jedoch seit kurzem xy-Photodiodenarrays zur Verfügung, die eine freie Programmierung der auszulesenden Pixel ermöglichen (IEEE 1997). Hierdurch ergibt sich neben einer hohen Flexibilität des Systems - z.B. im Zusammenwirken mit anderen Sensoren (DZINAJ 1998) - auch die Möglichkeit einer im Vergleich zur Fernsehnorm schnelleren Informationsaufnahme.

Da die xy-Photodiodesysteme in CMOS-Technologie hergestellt werden, ergeben sich gegenüber konventionellen Kameras deutliche Preisvorteile ("low cost"). Weiterhin benötigen die digitalen Ausgangssignale des integrierten Schaltkreises keine weitere Signalaufbereitung (Frame Grabber) zur Vorbereitung der Bildverarbeitung.

Im Rahmen eines Vorhabens zur sensorischen Unterscheidung von Beikräutern und Nutzpflanzen werden xy-Photodiodesysteme zur Erfassung von Pflanzenmerkmalen eingesetzt.

II Material und Methoden

CMOS xy-Photodiodesarrays

Das Hauptmerkmal eines xy-Sensors ist die freie Adressierbarkeit jedes einzelnen Pixels (random-accessability). Dies ist möglich, da jedes Pixel über eine eigene x- und y-Adresse innerhalb des Detektorfeldes verfügt. Somit beschränkt sich das Auslesen nicht nur auf 'rechteck'-förmige Bildausschnitte, ebenso lassen sich Strukturen beliebiger und benötigter Formen darstellen bzw. "detektieren". Durch diese Eigenschaft wird eine hohe Flexibilität bezüglich des Einsatzes der xy-CMOS Kameras erzielt. Insbesondere wird durch das Auslesen einer beschränkten Anzahl von Pixeln ein großer Geschwindigkeitsvorteil gegenüber einer CCD-Kamera erzielt.

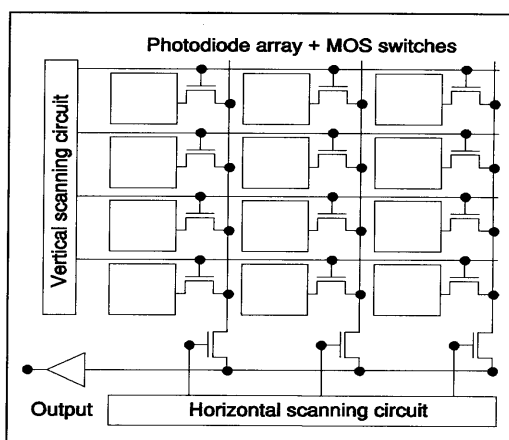


Abb. 1: Aufbau eines xy-CMOS Bildaufnehmers (THEUWISSEN 1995)

Fig. 1: Architecture of a CMOS Imager

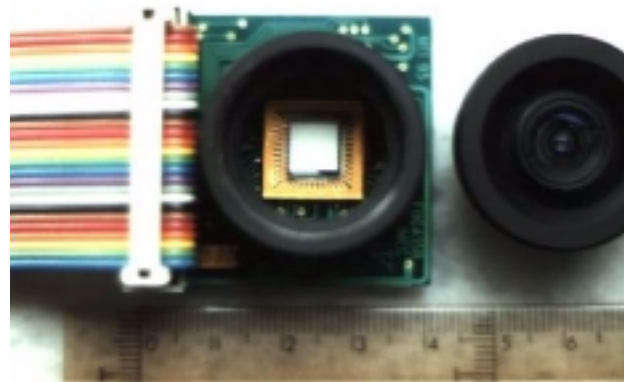


Abb. 2: FUGA15c Sensor (FUGA 1997)

Fig. 2: FUGA15c sensor

Jedes Pixel eines xy-CMOS Sensors besteht aus einer Si-Photodiode und MOSFET-Transistoren (siehe Abb. 1), die durch Ansteuerung über x- und y-Adreßleitungen das analoge Signal der Photodiode durchschalten. Über eine 'vertikal-scanning-unit' wird eine Zeile des Sensors ausgewählt, so daß alle MOS-Transistoren der Zeile die analogen Signale der Photodioden dieser Zeile durchschalten. Im nächsten Schritt wird durch die 'horizontal-scanning-unit' eine Spalte ausgewählt und der zugehörige Transistor legt das analoge Signal der somit durch eine x- und eine y-Adressierung ausgewählten Photodiode auf den Ausgang.

Die Herstellung der xy-Sensoren in CMOS-Technologie ermöglicht die Integration des Detektorfeldes, der Analog-Digital-Wandler und weiterer Komponenten auf einem Siliziumchip. Hierdurch wird ein 'Camera-on-a-chip'-System erzeugt, d.h. es werden kaum noch externe Baugruppen benötigt, um ein Bild auszulesen. Es wird nur noch die Adresse des Pixels an den Chip gelegt, und der digitale Grauwert des Pixels zurückgeliefert.

Einsatz des FUGA15c-Systems als "Kreuzsensor"

Eine Besonderheit der Maispflanze im Zwei-Blatt bis Sechs-Blatt-Stadium ist die Spreizung der paarweise gewachsenen Blätter in einem Winkel von etwa 180° zueinander. Diese Eigenschaft wird zwar nicht von jeder Maispflanze erfüllt, dennoch ist sie ein markantes Unterscheidungskriterium, da kaum ein auf Maisanbauflächen wachsendes Beikraut dieses Merkmal aufweist.

In der Draufsicht erscheint der Mais somit in einer länglichen, elliptischen Struktur. Die Arbeitsweise des Kreuzsensors (KÖSTERS & HACKMANN 1997) beruht auf diesem Merkmal. Er besteht aus zwei im rechtwinkligen Kreuz angeordneten Reihen von Photodioden (siehe Abb. 3), welche die Auswertung der reflektierten Lichtstrahlung der Pflanze (Wellenlänge >700 nm) ermöglichen. Bedingt durch die Anordnung der Photodioden erhält man für die Maispflanze einen typischen Signalverlauf (Abb. 4).

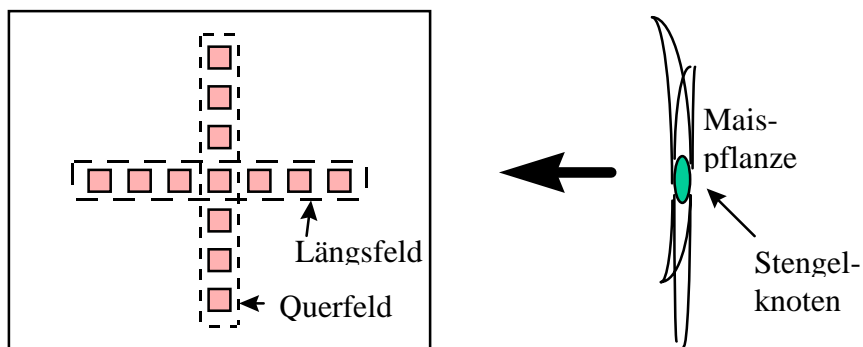


Abb. 3: Anordnung der Photodioden des Kreuzsensors
Fig. 3: Setup of photo diodes for the cross shaped sensor

Bei dem statisch mit Photodioden aufgebauten Kreuzsensor kann eine Maispflanze immer dann eindeutig detektiert werden, wenn sie in Längs- oder Querrichtung zum Sensor steht. Die in Abb. 4 dargestellte Messung wurde bei einem idealen Winkel der Maispflanze zum Querfeld von 0° durchgeführt.

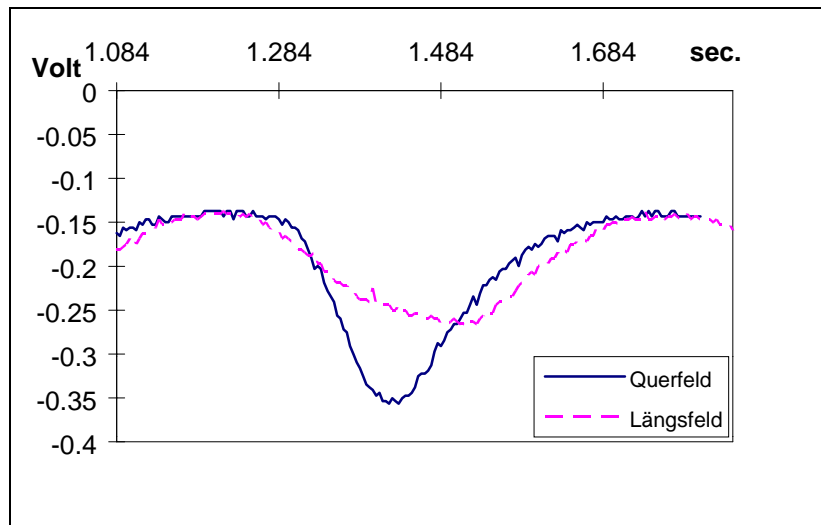


Abb. 4: Ausgangssignale des Kreuzsensors .
Fig. 4: Output signal of the cross shaped sensor .

Um sich der Orientierung einer beliebig angeordneten Pflanze anpassen zu können, müßte der Kreuzsensor um die eigene Achse rotiert werden, was einen hohen mechanischen Aufwand und eine höhere Anfälligkeit des Systems bedeutet. Eine Alternative dazu bietet der FUGA Sensor, der es ermöglicht, ein rotierendes Kreuz über die Ansteuerung eines Mikrocontrollers softwaremäßig zu realisieren (siehe Abb. 5, BERG & WÜBBEN 1997). Die Anzahl der benutzten "Photodioden" kann dabei für jede Achse im Bereich zwischen 1 und 512 frei gewählt werden.

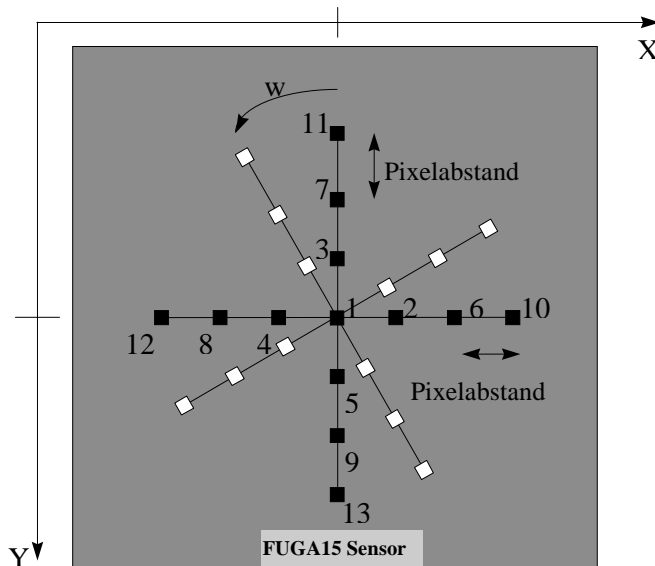


Abb.5: Konzept eines dynamischen Kreuzsensors. Der Abstand zwischen den Pixeln kann frei definiert werden. 'w' entspricht dem Winkel zur vertikalen Achse.

Fig. 5: Concept of the dynamical cross shaped sensor. The distance between pixels can be defined freely.

'w' denotes the angle with the vertical axis

Hauptkomponentenanalyse

Neben dem Vorteil einer - im Vergleich zur Fernsehnorm - extrem schnellen Auswertung durch eine Reduktion der Pixel ermöglicht die Kamera die Vorgabe der Auflösung (via Software). Für on-line Anwendungen bietet sich weiterhin die Umwandlung der Grauwerte in ein Binärbild an, da Segmentierungen, d.h. das Abgrenzen von Objekten, wesentlich zeitaufwendiger sind. Insbesondere bei der Unterscheidung von Pflanzen und Boden stehen ausreichend hohe Kontraste durch die unterschiedlichen Reflexionseigenschaften zur Verfügung. Die entsprechenden Schwellwerte werden festgelegt, bzw. können auf Basis einer Referenzstruktur durch die Ermittlung eines Minimums der Grauwerte verteilt automatisch bestimmt werden.

Abb. 6 zeigt die kombinierte Anwendung der Variation der Sensorauflösung mit Schwellwerten. Eine Auflösung von 32 x 32 Pixel stellt einen Kompromiß zwischen dem verfügbaren Informationsgehalt und den Anforderungen bzgl. einer on-line Bildverarbeitung dar. Weiterhin wird hierdurch der Einsatz neuronaler Netze ermöglicht.

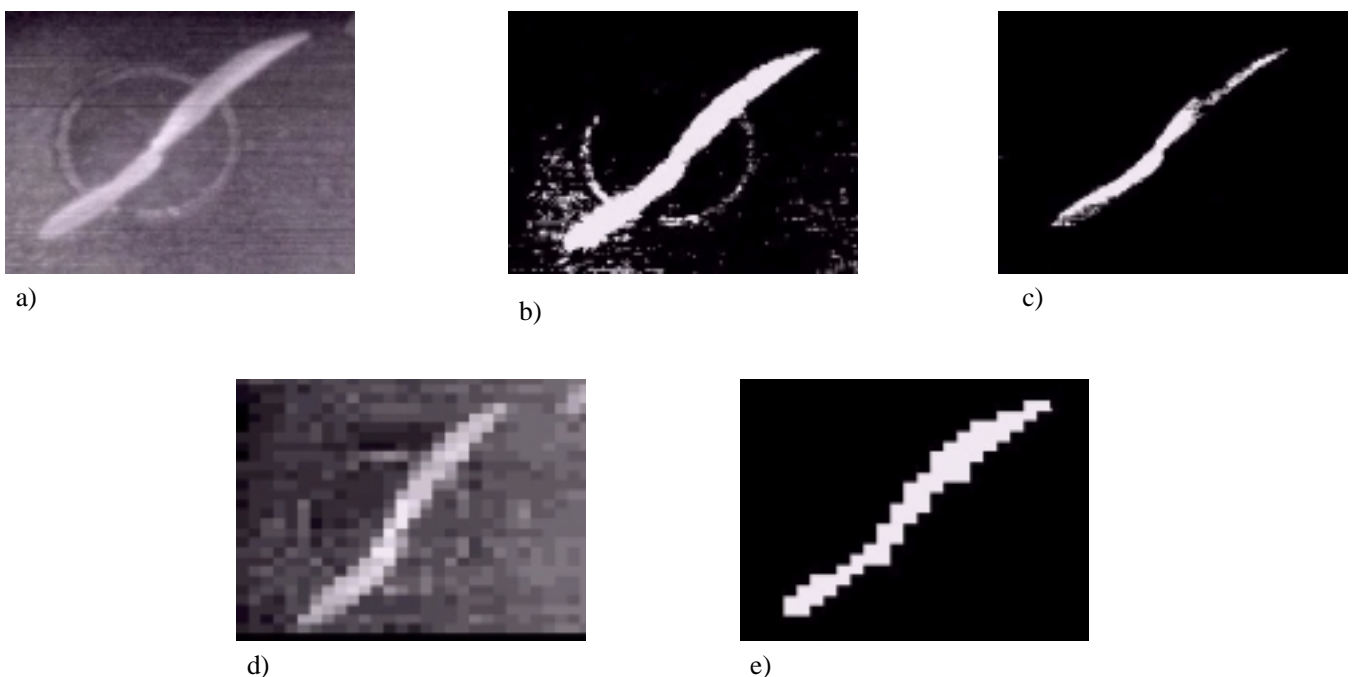


Abb. 6: Aufnahme einer Maispflanze aus der Draufsicht mit der FUGA15C Kamera

- a) Auflösung: 512 x 512, alle Graustufen
- b) Auflösung: 512 x 512, Graustufenschwellwert: 140
- c) Auflösung: 512 x 512, Graustufenschwellwert: 200
- d) Auflösung: 32 x 32, alle Graustufen
- e) Auflösung: 32 x 32, Graustufenschwellwert: 200

Fig. 6 :Picture of a maize plant, top view, with FUGA15c camera

- a) Resolution: 512 x 512, all greylevels*
- b) Resolution: 512 x 512, greylevel threshold:140*
- c) Resolution: 512 x 512, greylevel threshold: 200*
- d) Resolution: 32 x 32, all greylevels*
- e) Resolution: 32 x 32, greylevel threshold: 200*

Die Trennung von Pflanze und Boden im Binärbild kann durch einen entsprechenden Algorithmus verbessert werden (“Entrauschen”). Hierzu wird jedes Pixel relativ zu seinen Nachbarn analysiert. Entsprechende “Maskenoperationen” unter Berücksichtigung von 8 Nachbarn des jeweiligen Pixels benötigen für eine 32 x 32 Matrix etwa 0,5 ms. Weiterhin kann zur Bildvorverarbeitung der Bildschwerpunkt der “weißen” Pixel berechnet werden und das Bild in dem zu analysierenden Bereich zentriert werden.

Bei der Bildverarbeitung bietet sich die beim ‘‘Kreuzsensor’’ (siehe oben) genutzte Analyse der Asymmetrie der Maisblatter an. Es ist daher sinnvoll, einen Parameter aus dem Binärbild zu gewinnen, der das Verhältnis von Länge zu Breite eines Objektes angibt. Einen Ansatz hierzu bietet die aus der Statistik stammende Hauptkomponentenanalyse. Das Prinzip besteht darin, aus einer Menge von mehrdimensionalen Punkten (hier: 2 Dimensionen, betrachtet werden nur die Objektpixel - also nur die weißen) einen Vektor zu gewinnen, der in die Richtung der höchsten Varianz aller Punkte zeigt (diese Richtung wäre dann hier die Langssachse der Maispflanze). Man nennt diesen Vektor die 1.Hauptkomponente (HK).

Die zweite Hauptkomponente ergibt sich automatisch aus der Bedingung der Orthogonalität. Bildet man nun den Quotienten aus der Varianz der 1. und 2. HK, so bekommt man damit das gewünschte Verhältnis von Länge zu Breite des abgebildeten Objektes. Dieser ist mindestens 1, da nach Voraussetzung die 1. HK eine größere Varianz hat.

Bei in der Draufsicht ausgeprägt langgestreckten Objekten kann der gewonnene Parameter leicht größer als 20 werden, bei eher quadrat- oder kreisförmigen liegt der Wert meist unter 2. Der Zeitaufwand liegt unterhalb von 0.5 msec.

Auch durch die erreichte Rotations-Skalierungs- und Translations-Invarianz ist dieses Formmerkmal sehr wertvoll und ermöglicht schnell eine grobe Strukturanalyse des Objektes.

Abb.7 zeigt an einem Beispiel das Prinzip des Verfahrens.

Hopfield-Netze

Neuronale Netze spielen in der Bildverarbeitung und Mustererkennung eine wichtige Rolle, insbesondere bei Klassifikationsaufgaben (HABERÄCKER 1985, ZELL 1994). Ihr Wesen besteht darin, daß sie bei geeigneten Problemen aus einer Menge von (bekannten) Trainingsdaten über Anpassung eigener Parameter einen Sachverhalt intern abbilden (Generalisierung) und damit auch für unbekannte Datensätze Prognosen abgeben können.

Hopfield-Netze repräsentieren eine spezielle Art von Neuronalen Netzen, die als Assoziativspeicher Bedeutung erlangten. Dazu wird jedem Pixel eines Bildes ein Neuron zugeordnet. Die Neuronen sind untereinander über gewichtete Leitungen miteinander verbunden. Die Hopfield-Netze sind in der Lage, über die Gewichte der gedachten Verbindungen eine Menge von Mustern (hier: binäre Bilder von Maispflanze) zu speichern. Die Gewichte werden in Trainingslaufen ermittelt, bei denen die zu speichernden Muster gelernt werden. Ihren Beinamen ‘‘Assoziativspeicher’’ haben sie daher, daß sie in der Lage sind, beliebige Eingabemuster mit einem der intern gespeicherten Muster zu assoziieren. Dazu erfolgt ein dynamischer iterativer Prozeß (Relaxation genannt), bis eine Stabilitätsbedingung erreicht ist. Im allgemeinen wird das Netz zu einem Muster tendieren, das dem Ausgangsbild am hahnlichsten ist. Hat man also ein Muster, das einem gelernten Muster hahnlich ist, so wird das Hopfield-Netz dieses Muster wieder-

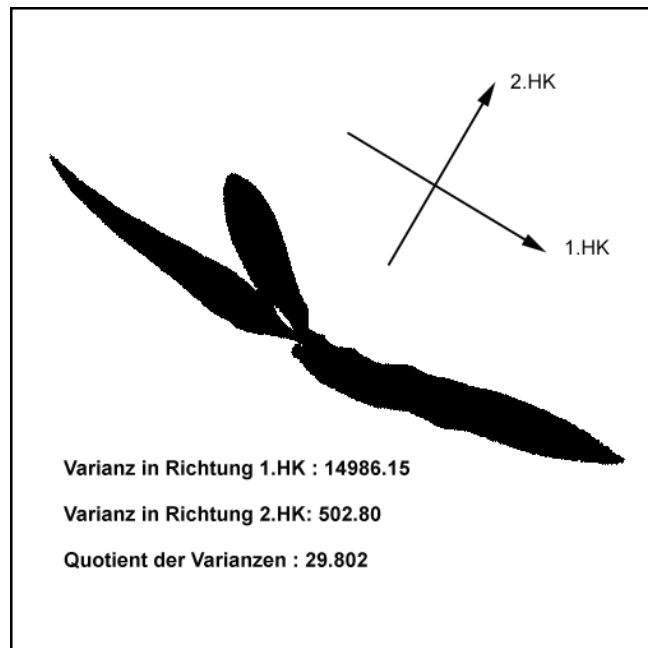


Abb. 7 : Hauptkomponentenanalyse zur Formerkennung in einem (invertierten) Binärbild einer Maispflanze

Fig. 7: Main-component-analysis for the detection of the shape of a maize plant (inverse binary picture)

erkennen und zuordnen. Der iterative Prozeß benötigt um so mehr Iterationen, je stärker sich das eingegebene Muster von dem angelaufenem unterscheidet (es wird aber auf jeden Fall immer ein assoziierendes Muster gefunden). Bei guter Übereinstimmung ergeben sich entsprechend weniger Iterationen. Somit kann die Anzahl der Iterationsschritte als Indikator für die “Ähnlichkeit mit einer Maispflanze” verwendet werden, wenn vorher repräsentative Maismuster gelernt wurden.

Zu beachten ist dabei, daß das Netz nicht rotations- und translationsinvariant ist. Deshalb müssen die zu lernenden Maismuster zentriert gelernt, die zu testenden Aufnahmen zentriert eingegeben und die Maispflanzen bei der Erstellung der Lernmuster in unterschiedlichen Winkeln aufgenommen werden.

Pattern-Matching

Die recht einfache Struktur der zu erkennenden Maispflanzen, sowie der geringe Umfang zugrundeliegender Referenzmuster erlauben einen eher simplen Lösungsansatz, nämlich Pattern Matching. Auch hier geht es darum, einmal aufgenommene Referenzbilder mit der aktuellen Aufnahme in Beziehung zu setzen. Es werden die Übereinstimmungen in den Pixeln des aktuellen Bildes und denen des Referenzmusters gezählt. Am Schluß erfolgt eine Normierung (Übereinstimmungen bei weißen und schwarzen Pixeln im Verhältnis zu den jeweils in beiden Mustern tatsächlich vorhandenen). Jedes Referenzmuster bekommt somit einen Wert zugewiesen, der um so größer ist, je besser die Übereinstimmung ist. Ein Muster wird dann zum “Gewinner”. Ist dessen Wert eher gering, so hat es nur geringe Übereinstimmung mit dem aktuellen Bild (und alle anderen erst recht, da sie einen noch schlechteren Wert haben), ist er groß, so ist die Wahrscheinlichkeit, daß es sich um eine Maispflanze handelt, entsprechend höher.

III Ergebnisse

Die FUGA15C-Kamera wird in Kombination mit anderen Sensoren zur Merkmalerfassung von Pflanzen (DZINAJ, 1998) eingesetzt. Abb. 8 zeigt eine Maispflanze (Draufsicht) und das entsprechende Ansprechverhalten der Kamera in der Funktion eines rotierenden Kreuzsensors. Die Orientierung zur Querrichtung unter 30° wird deutlich erkannt. Die Signalverarbeitungszeit durch eine Ansteuerung mit einem PIC-Mikrocontroller betrug insgesamt 277µs. In ähnlicher Weise lassen sich die Resultate der Hauptkomponentenanalyse verwenden.

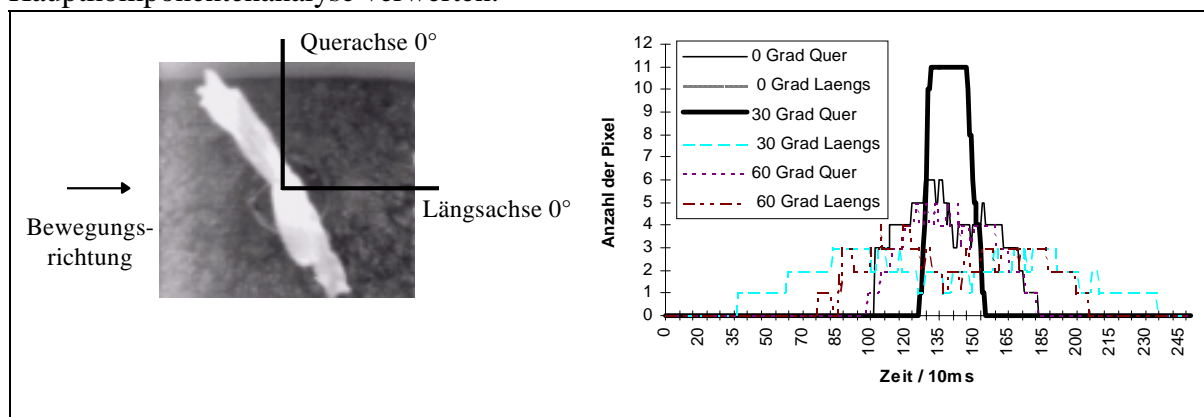


Abb. 8: Zeitabhängige Signale (FUGA15C, Querrichtung) für verschiedene Winkelorintierungen (siehe Abb.5)

Fig. 8: Time-dependent signals (FUGA15C, horizontal component) for different orientations of the sensors (see fig. 5)

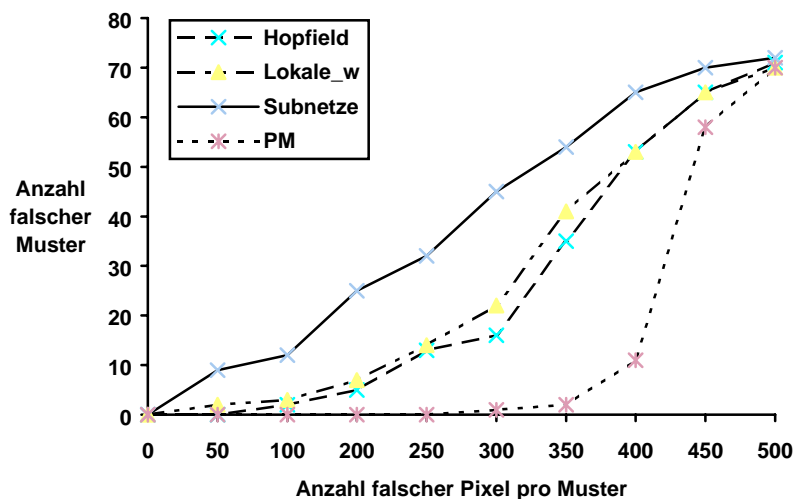


Abb. 9: Vergleich der Verfahren bezüglich der Anzahl nicht erkannter Muster bei unterschiedlicher Verrauschung

Fig. 10: Comparison of the different methods with respect to the number of wrong patterns as a function of the number of noisy pixels.

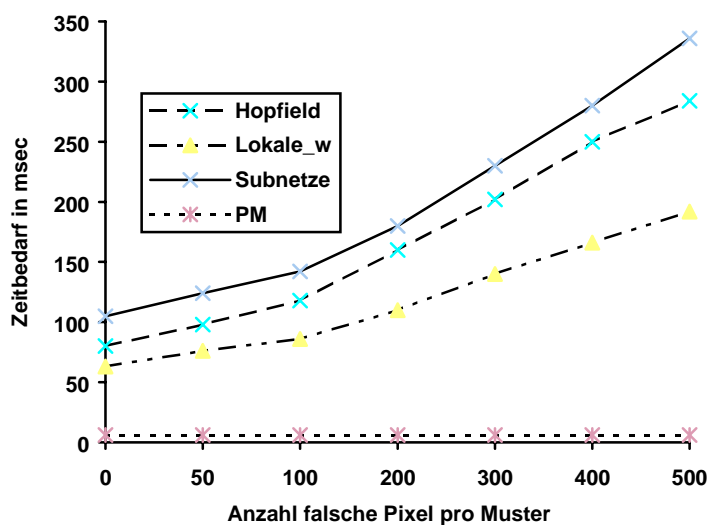


Abb. 10: Zeitbedarf für die einzelnen Verfahren in Abhängigkeit des Verrauschungsgrades (durchschnittlicher Zeitbedarf je Muster)

Fig. 10: Computing time for the various methods as a function of the number of noisy pixels.

Zum Testen des Hopfieldnetzes wurden insgesamt 120 Muster von 5 typischen Maispflanzen (jeweils um 15° gedreht, daher 24 Bilder pro Exemplar) einem Hopfield-Netz gelernt (einmaliger Prozeß). Tendenziell ist dieses nun in der Lage, ein Eingabemuster über Angabe der Iterationsschritte bis zur Relaxation hinsichtlich der Frage “Ähnlichkeit mit Mais ?” zu bewerten. Es wurden verschiedene Varianten von Hopfield-Netzen implementiert und getestet, um den Relaxationsprozeß so schnell wie möglich zu machen (ca. 80 ms, Pentium 200 MHz).

Der Mustervergleich (“Pattern-Matching”) als relativ einfache Methode lieferte sehr gute Testergebnisse (Wiedererkennung von Mustern nach Verrauschen). Bei Tests mit 120 Referenzmustern wurden selbst Muster mit einem Verrauschungsgrad von 40% noch richtig dem Ausgangsmuster zugeordnet. Die Rechenzeit ist gering, sie liegt bei dem Vergleich eines Bildes mit 120 Referenzmustern bei etwa 10 msec. Auch hier ist eine Vorab-Zentrierung des zu bewertenden Bildes sowie der Referenzmuster

notwendig (Translationsunabhängigkeit) und in den Referenzmustern müssen die verschiedenen möglichen Anordnungen der Pflanzen (im Winkel) berücksichtigt werden.

Abb.9 vergleicht die Ergebnisse des Pattern-Matching mit verschiedene Varianten neuronaler Netze. Es wurden jeweils 72 Maismuster gelernt bzw. als Vergleichsmuster abgespeichert. In Abhängigkeit der Anzahl falscher Pixel pro Muster ("Verrauschung") wurde die Häufigkeit einer Nichterkennung aufgetragen. Weiterhin ist der Zeitbedarf in Abhängigkeit der Anzahl falscher Pixel pro Muster aufgetragen (Abb.10). Insgesamt schneidet das Pattern-Matching erheblich besser ab als die verschiedenen Varianten neuronaler Netze, wobei hier mit reduzierten Verbindungsstrukturen ("lokale_w") noch die besten Ergebnisse erzielt werden.

Die Gesamtzeit zum Mustervergleich unter Einbeziehung der Bildaufnahme und Bildvorverarbeitung beträgt ca. 14 ms und liegt damit unterhalb der Auslesezeit eines Halbbildes nach der Fernsehnorm.

IV Diskussion

Die hohe Flexibilität der low-cost xy-Photodiodensysteme bietet interessante Anwendungspotentiale der on-line Bildverarbeitung. Insbesondere eine schnelle Signalverarbeitung mit geringer Pixelzahl und Binarisierung ermöglicht die Erfassung und Analyse von Pflanzenmerkmalen, wobei in Verbindung mit Mikrocontrollern komplette Verarbeitungszeiten unterhalb einer Millisekunde erreicht werden. Für die Bildverarbeitung hat sich der Mustervergleich als erfolgreichere Variante im Vergleich zu Hopfield-Netzen herausgestellt. Dies betrifft sowohl die Qualität des Ergebnisses bei verrauschten Eingangssignalen als auch die Verarbeitungszeit. Allerdings bieten Hopfield-Netze einen interessanten Ansatz, dessen Vorteile bei größerer Komplexität und Abstraktion zum Tragen kommen. Da die technische Entwicklung im Bereich der xy-Systeme zur Zeit sehr intensiv verläuft, erscheint die Verwendung der Systeme zur kostengünstigen on-line Erfassung von Pflanzenmerkmalen sehr attraktiv.

LITERATUR

- BERG, TH. & WÜBBEN, M., 1997. Diplomarbeit: Optoelektronische Sensor-Arrays zur Erfassung von Pflanzenmerkmalen, Fachhochschule Osnabrück, Fachbereich Elektrotechnik
- BIERBAUM, U. & PREUTH, H., 1997. Diplomarbeit: Sensorunterstützte Pflanzenerkennung mit Hilfe Neuronaler Netze, Fachhochschule Osnabrück, Fachbereich Elektrotechnik, Betreuer: T.Gervens
- DZINAJ, T., KLEINE HÖRSTKAMP, S., LINZ, A., RUCKELSHAUSEN, A., BÖTTGER, O., KEMPER, M., MARQUERING, J., NAESCHER, J., TRAUTZ, D., WIBERODT, E., Multi-Sensor-System zur Unterscheidung von Nutzpflanzen und Beikräutern, 19. Deutsche Arbeitsbesprechung über Fragen der Unkrautbiologie und -bekämpfung, 10.-12.03.98, Stuttgart-Hohenheim
- FUGA 1997, DATASHEETS 3/97, <http://www.imec.be/fuga/datasheets.html>.
- HÄBERÄCKER, P. 1985. Digitale Bildverarbeitung, München, Hanser-Verlag, 1. Auflage
- IEEE Workshop on Charge-Coupled Devices & Advanced Image Sensors, 1997, Brugge.
- KÖSTER, K.-H. & HACKMANN, M., 1997. Diplomarbeit: Entwicklung und Anwendung optoelektronischer Systeme zur Pflanzenerkennung, Fachhochschule Osnabrück, Fachbereich Elektrotechnik
- KÜHBAUCH, W., 1996. Anwendungsperspektiven der sensorgesteuerten Unkrautkontrolle, KTBL Arbeitspapier 236, S.9-21.
- MASSEN, R., 1996. Colour Brain - eine neue Echtzeit-Farbbildverarbeitungstechnologie für komplexe Erkennungsaufgaben bei der Unkrautbekämpfung, KTBL Arbeitspapier 236, S.35 - 40
- THEUWISSEN, A.J.P., 1995. Solid-State Imaging with Charge-Coupled Devices, Kluwer Academic Publishers.
- ZELL, A. 1994. Simulation Neuronaler Netze, Addison-Wesley-Verlag, 1. Auflage