Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 80 (1989)

Heft: 1

Artikel: Computer Vision und Künstliche Intelligenz in der Mechatronik

Autor: Ade, F.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-903619

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Computer Vision und Künstliche Intelligenz in der Mechatronik

F. Ade

Roboter mit visuellen und taktilen Sensoren sowie mit Subsystemen zur Auswertung der Daten und zur Aktionsplanung gehören mit zu den komplexesten, der Mechatronik zugerechneten Systemen. Bei heute käuflichen Robotern ist eine solche Ausstattung oft nur ansatzweise vorhanden. In den Labors werden aber bereits bedeutend komplexere und leistungsfähigere Systeme erprobt, in deren Hard- und Software sich die raschen Fortschritte auf den Gebieten der Sensorik und der Künstlichen Intelligenz widerspiegeln.

Un robot avec des capteurs visuels et tactiles et avec des sous-systèmes pour l'évaluation des données et pour la planification de ses actions peut servir d'exemple d'un système mécatronique complexe. Les robots qu'on peut acheter à présent ne correspondent que très sommairement à cette description. Cependant, une nouvelle génération de robots est en train d'être étudiée dans les laboratoires, dont le matériel et le logiciel réflètent les progrès rapides dans les domaines surtout des capteurs et de l'intelligence artificielle.

Adresse des Autors
Dr. *Frank Ade*, Institut für Kommunikationstechnik, Fachgruppe Bildwissenschaft, ETH-Zentrum, 8092 Zürich.

Mechatronische Systeme sind dadurch gekennzeichnet, dass sie Signale aus ihrer Umwelt aufnehmen, verarbeiten, interpretieren und als Folge davon aufgaben- und situationsgerechte Handlungen durchführen. Diese Maschinen einer neuen Generation weisen also im Vergleich zu ihren Vorgängern eine weitergehende Auswertung der Sensorsignale auf, was ihnen im Umgang mit ihrer Umwelt eine gewisse «Intelligenz» verleiht. Dadurch können sie eine grössere Vielfalt von Aufgaben lösen; sie sind universeller einsetzbar.

Die Mechatronik findet viele anspruchsvolle Aufgabenstellungen im Bereich der industriellen Automatisierung. Beispiele sind die Manipulation und Bearbeitung von Werkstücken, sowie Montage- und Inspektionsaufgaben. Bei den drei erstgenannten Aufgaben werden heute noch in grossem Masse «blinde» Roboter eingesetzt, die repetitive, starre Aktionssequenzen durchführen. Bei Inspektionsaufgaben steht dagegen bereits der Erkennungsteil im Vordergrund, während der Handlungsteil, die Aussortierung defekter Werkstücke oder die Markierung defekter Teilbereiche in Materialien, weniger ins Auge fällt.

In Zukunft jedoch werden auch Roboter in der Fertigung vermehrt mit visuellen Sensoren oder anderen Sensoren ausgestattet sein und über komplexe Subsysteme zur Auswertung und Interpretation den gewonnenen Daten und zur Planung ihrer Aktionen verfügen. Die Robotik eignet sich also sehr gut als Illustrationsbeispiel für die Rolle der Computer Vision und der Künstlichen Intellligenz in zukünftigen mechatronischen Systemen.

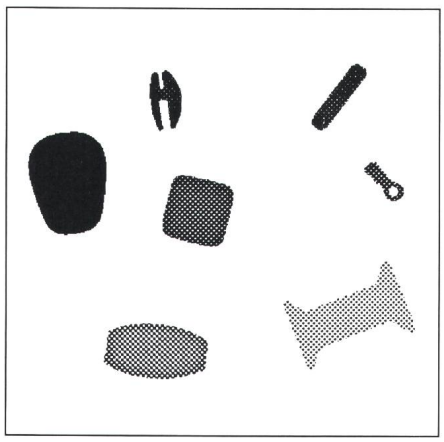
Wo steht die industrielle Robot Vision heute?

Eine der häufigsten Aufgaben der industriellen Robot Vision ist die Erkennung von Werkstücken und die Bestimmung ihrer Position und Orientierung. Die Erkennungsaufgabe (Recognition) verlangt, dass im Computer ein mehr oder weniger komplexes Objektmodell gespeichert ist, mit dem das aktuelle Objekt verglichen wird.

Sehr viele der heute praktisch eingesetzten Systeme arbeiten mit einer Darbietung einzelner Werkstücke vor einem stark konstrastierenden Hintergrund. Unter solchen Bedingungen ist die Binärisierung mit einem Schwellwert kein Problem und kann auch bereits bei der Bildaufnahme erfolgen. Binärisierung bedeutet Informationsverlust. Wenn aber die auf diese Weise erhaltenen Silhouetten noch genügend charakteristisch für die betreffenden Werkstücke sind, lassen sich aus ihnen leicht und effizient globale Merkmale wie Flächenmomente, Elongation, Eulerzahl[1] usw. berechnen. Auch die Objektmodelle können in diesem Fall sehr einfach gehalten werden. Sie sind verkörpert durch die entsprechenden Merkmalsgesamtheiten geeignet ausgewählter Referenzobjekte. Die Erkennung der Objekte in Binärbildern erfolgt mit Hilfe quantitativer und qualitativer Merkmale nach den Methoden der klassischen statistischen Mustererkennung. Wenn im Bildfeld gleichzeitig mehrere, aber voneinander getrennte Objekte vorhanden sind, werden diese vorgängig durch einen zusätzlichen Prozessschritt, die «Markierung zusammenhängender Komponenten», gekennzeichnet und nacheinander abgearbeitet (Fig. 1).

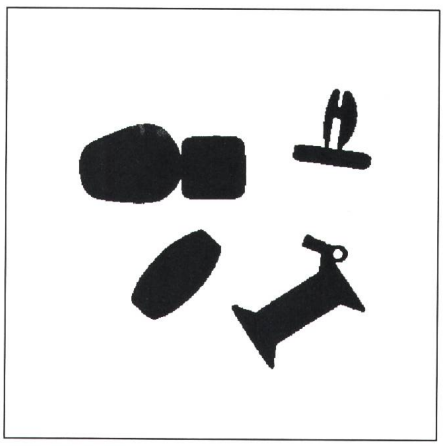
Die Situation ändert sich grundsätzlich, wenn man zulässt, dass sich die Objekte berühren oder sogar überlappen (Fig. 2). Dann ist es ohne besonde-

[1] Topologischer Begriff



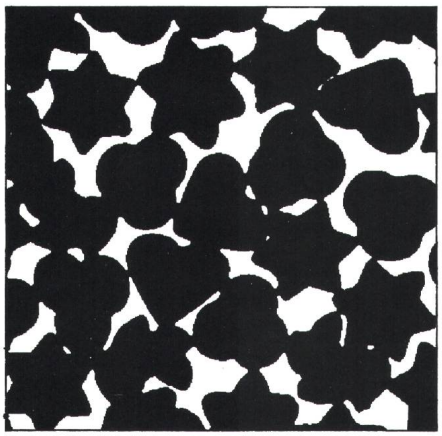
Figur 1 Kollektion von Objekten, die sich nicht berühren

Sie können markiert (durch verschiedene Grautöne angedeutet) und dann jedes für sich aufgrund globaler Formmerkmale erkannt werden.



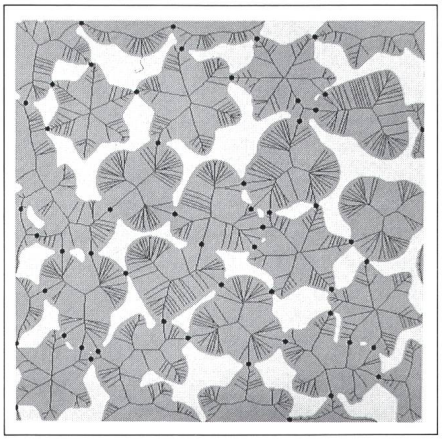
Figur 2 Sich berührende und überlappende Objektsilhouetten

Globale Formmerkmale sind nicht mehr ohne weiteres anwendbar.



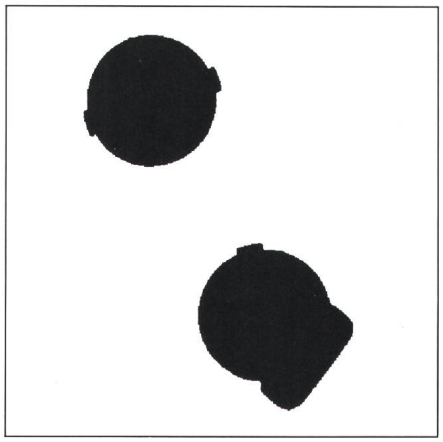
Figur 3 Sich berührende Objekte

Wie Figur 4 zeigt, ist in diesem Fall noch eine Lösung möglich.



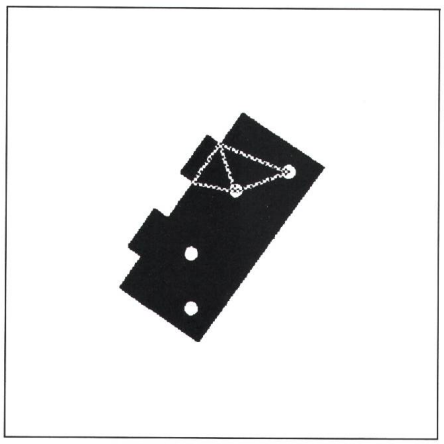
Figur 4 Voronoi-Skelette erlauben die Stellen aufzufinden, wo die Gesamtsilhouette eingeschnürt ist

An den durch Sternchen (nur noch als Punkte sichtbaren) gekennzeichneten Stellen wird aufgetrennt, so dass Einzelobjekte vorliegen, die dann anhand globaler Formmerkmale erkannt werden können.



Figur 5 Benutzung von Sequenzen geometrischer Konturmerkmale zur Erkennung von Objekten

Unverdecktes und teilweise verdecktes Objekt.



Figur 6 Benutzung von Clustern geometrischer Merkmale zur Objekterkennung

Die durch graue Linien verbundenen Merkmale gehören zu einem Cluster. Es werden mehrere solcher Cluster pro Objektmodell definiert.

re Vorkehrungen nicht mehr möglich, globale Merkmale der Objekte zu verwenden. Bei sich lediglich berührenden Objekten können unter gewissen Umständen Einschnürungen der Gesamtsilhouetten ermittelt werden, sodass durch Auftrennen an diesen Stellen Einzelsilhouetten erhalten werden, die dann wie zuvor verarbeitete werden können. Die dazu notwendige mathematische Methode (Voronoi-Skelettierung der Gesamtsilhouette) ist allerdings äusserst komplex (Fig. 3 und 4). Insbesondere besteht keine Aussicht, sie auch in allgemeineren Situationen anwenden zu können.

Erfolgversprechender ist es, die Objekterkennung nicht auf globalen Merkmalen zu basieren, sondern Konstellationen geometrischer Merkmale zu verwenden. Es ist zum Beispiel möglich, die Sequenz geometrischer Primitive, die zusammen die Kontur einer Objektsilhouette bilden, als Objektmodell zu verwenden. In Figur 5 wäre das die Sequenz: Kreisbogen, Ecke, Ecke, Geradenstück, Ecke, Ecke, Kreisbogen, Ecke, Ecke, Geradenstück, Ecke, Ecke. Mit Vorteil werden die genannten Primitive noch mit Attributen wie Länge, Winkel usw. ausgestattet. Unter Umständen sind bereits Teilsequenzen charakteristisch genug für das Objekt, so dass auch nur stückweise sichtbare Konturen in einem Bild schliesslich zur Objektidentifikation ausreichen. Dazu wird versucht, eine im Bild beobachtete Teilsequenz auf der Sequenz des Objektmodells zu verschieben, bis ein «Match» zu verzeichnen ist (oder auch nicht). Falls dies in einem oder mehreren Fällen gelingt, kann man eine oder mehrere Hypothesen bezüglich anwesender Objekte aufstellen. Es schliesst sich ein Verifikationsschritt an.

Noch robuster ist die Verwendung von geometrischen Merkmalen nicht nur des Objektrandes, sondern auch des Objektinneren sowie der geometrischen Beziehungen zwischen ihnen (Fig. 6). Mit Vorteil wird im Objekt nach «Clustern» nahe beieinander liegender geometrischer Merkmale ge-

sucht, die möglichst diskriminierend sein sollen, d.h. geeignet, verschiedene Objekte auseinander zu halten. Geeignete Cluster werden in einer vor der eigentlichen Objekterkennung liegenden Trainingsphase ermittelt. Auch mit dieser Methode ist es grundsätzlich möglich, teilweise überlappende Objekte zu erkennen (Fig. 7). Sie wurde in einem kommerziellen Robot-Vision-System implementiert. Es werden Erkennungzeiten unter einer Sekunde pro Objekt erreicht.

Die Attraktivität der zuletzt dargestellten Methode geht aber weit über ihre Verwendung bei der Analyse von Binärbildern hinaus. Dies beruht darauf, dass sie ohne weiteres sowohl auf allgemeine Grauwertbilder als auch auf echte 3D-Probleme mit Tiefendaten angewendet werden kann.

Die drei vorgestellten Methoden unterscheiden sich nicht nur in der Art der für die Objekterkennung verwendeten Merkmale, sondern auch in der Objektmodellierung und der Methode der Objektidentifikation, die (in der Reihenfolge der Darstellung) immer komplexer wird. Bei der ersten Methode, die sich auf globale Merkmale der Silhouette stützte, waren die Entscheidungsmethoden der klassischen statistischen Mustererkennung adäquat. Bei den objektrand-basierten und mehr noch bei den merkmals-cluster-basierten Methoden beginnen bereits Methoden der Künstlichen Intelligenz Verwendung zu finden: Suchverfahren, Hypothesenerzeugung und -verifikation usw. Diese aufwendigeren, aber auch leistungsfähigeren Methoden führen im allgemeinen zu höheren Erkennungszeiten. Man sollte natürlich versuchen, da, wo dies möglich ist, die einfacheren schnellen Methoden zu verwenden. Wenn die Objekte also im wesentlichen flach sind oder wenigstens nur einige wenige stabile Lagen haben, in denen sie charakteristische Silhouetten aufweisen, und wenn es darüber hinaus möglich ist, sie einzeln darzubieten, dann sollte man eine der Silhouettenmethoden anwenden. Allgemein gesagt gibt es einen Tradeoff zwischen dem Aufwand bei der Objektdarbietung und dem Aufwand für das Vision System. Wenn man die Werkstückzuführung im Extremfall so gestaltet, dass der Roboter genau weiss, wo und in welcher Orientierung er das Werktück erwarten kann, dann braucht man überhaupt kein Vision System. Wenn die Objekte aber ungeordnet in einer Kiste unter nicht kontrollierten Beleuchtungsverhältnissen dargeboten werden, muss man ein Vision System installieren, das über weitgehende Fähigkeiten zur Analyse komplexer Szenen verfügt (Fig. 8). Diese Fragen werden im industriellen Bereich (zu Recht) mit wirtschaftlichen Argumenten entschieden.

Neben derartigen Vision Systemen, die mit binären oder einfachen, «flachen» Grauwertbildern arbeiten, werden bereits auch solche, die mit strukturiertem Licht arbeiten, eingesetzt. Dies ist eine einfache Möglichkeit, Tiefendaten zu erhalten. Im einfachsten Fall wird die Spur, die eine schräge Lichtebene auf Objekten hinterlässt, mit einer Kamera von oben aufgenommen (Fig. 9). Aus den Bildkoordinaten einzelner Punkte dieser Spur kann zusammen mit der Kenntnis der Gleichung der Lichtebene die Höhe

Einige Begriffe

Computer Vision: In Deutschland oft als rechnergestütztes Sehen bezeichnet.

Computer Vision System: Rechner-Sichtsystem

Sensoren: Signalaufnehmer, sozusagen die Sinnesorgane mechatronischer Systeme (Kameras, Mikrophone usw.)

Effektoren: Die Teile eines mechatronischen Systems, durch die es (meist mechanisch) auf seine Umgebung einwirkt (Greifer usw.)

Grauwertbild: Bild, in dem die Helligkeitswerte der aufgenommenen Szene unter Abstrahierung vom Farbton durch Zahlenwerte, meist im Bereich 0...255, dargestellt sind.

Binärbild: Bild, in dem nur zwei Grauwerte, meist schwarz und weiss, vorkommen. Kann aus jedem Grauwertbild durch Anwendung eines Schwellwerts gewonnen werden.

Eulerzahl eines Objekts: 1 minus Anzahl der Löcher des Objekts.

Cluster: Häufungen.

Objektklasse: Gesamtheit von Objekten, die bezüglich einer bestimmten Fragestellung als äquivalent angesehen werden (z.B. Birnen).

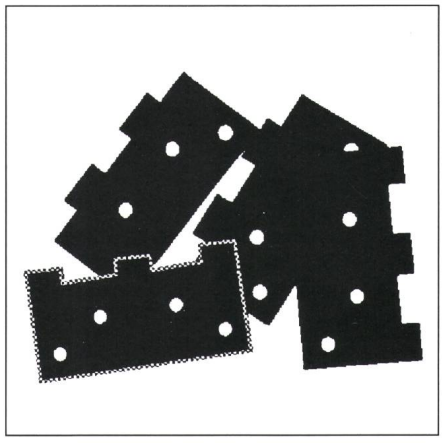
Objektmodell: Idealisierter Repräsentant einer Objektklasse, auch Referenzmuster oder Prototyp genannt.

Segmentierung: Aufteilung eines Bildes in Teile, die bezüglich eines bestimmten Kriteriums homogen sind und die bei der Objekterkennung nützlich werden können.

Disparitäten: Beschreibung der unterschiedlichen Abbildung einer Szene im linken und im rechten Auge. Grundlage der Tiefenwahrnehmung.

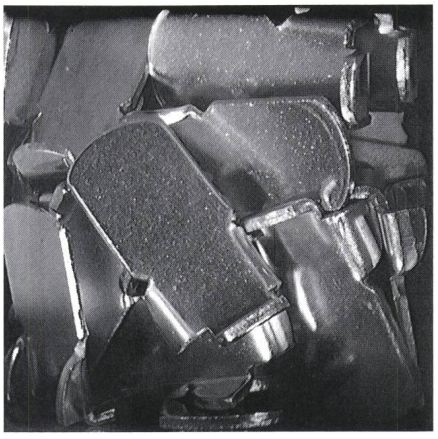
Textur: Musterung von Objektflächen, die mittels geeigneter statistischer oder struktureller Merkmale charakterisiert werden kann.

Tabelle I



Figur 7 Sich teilweise verdeckende Objekte

Ihre Erkennung mit Merkmals-Clustern ist möglich (Objekt unten links; die anderen Objekte sind noch nicht erkannt). Allerdings ist es in diesem Fall prinzipiell unmöglich, festzustellen, welches der überlappenden Objekte oben, welches unten ist.

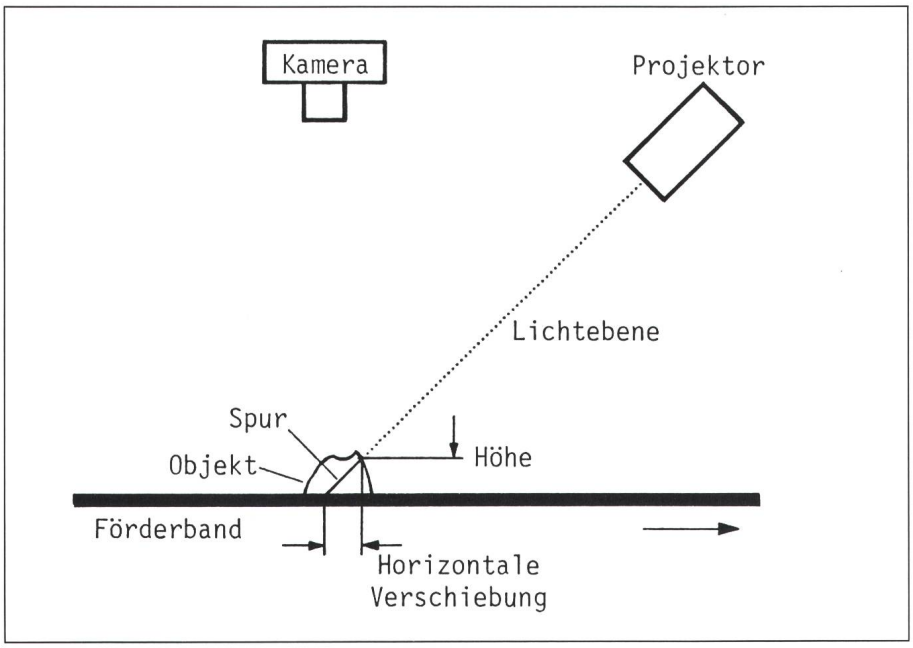


Figur 8 Der «Griff in die Kiste», eine der schwierigsten Aufgaben bei der industriellen Objekterkennung

Die Objekte liegen nicht mehr flach auf dem Boden, sondern in Positionen, die dreidimensional charakterisiert werden müssen. Die Beleuchtung ist nicht kontrolliert. Es treten unter anderem störende Reflexe auf.

des entsprechenden Objektpunkts leicht berechnet werden. Eine mehr oder weniger vollständige Höhenkarte des Objekts wird erhalten, wenn das Objekt schrittweise durch den Lichtvorhang durchgezogen und in jeder Position die Spur ausgewertet wird. Das Resultat ist ein Tiefenbild der Szene, in dem von jedem Objektpunkt, der sowohl von der Lichtebene erreichbar war als auch von der Kamera erfasst wurde, dreidimensionale Koordinaten bekannt sind. In diesem «Bild» treten an Objekträndern Diskontinuitäten der Tiefe auf, deren Verlauf im Bild als Grundlage der Objekterkennung, analog zu dem weiter oben für Binärbilder geschilderten Vorgehen, dienen kann. Das volle Potential von Tiefendaten kann aber nur zusammen mit der Verwendung echt dreidimensionaler Objektmodelle genutzt werden.

Es ist offensichtlich, dass die eben dargestellten einfachen Systeme bei industriellen Aufgaben stark eingeschränkte Einsatzmöglichkeiten haben. Die Navigation autonomer Fahrzeuge gar ist nur mit Systemen möglich, die mindestens über die Fähigkeit der Verarbeitung von Grauwertbildern verfügen.



Figur 9 Ermittlung der Raumkoordinaten von Punkten auf einer Objektoberfläche mit Hilfe strukturierten Lichtes

Auf der Schwelle zur Anwendung

Graubildverarbeitende visuelle Systeme sind potentiell in der Lage, die bei komplexeren Aufgaben sichtbar werdenden Beschränkungen der binärbildverarbeitenden Systeme zu durchbrechen. Ihre Stärke gründet vor allem darauf, dass mit ihnen eine neue Art von Information verfügbar wird: Man kann jetzt in den Bildern Verdekkungsverhältnisse erkennen, also welche Objekte vor anderen stehen oder auf anderen liegen. Diese Information ist für das Greifen von Objekten durch einen Roboter wichtig.

Hier soll nun ein System besprochen werden, das kurz vor der Anwendung in der Produktion zu stehen scheint. Bei Siemens (München) wurde von *P. Rummel* über mehrere Jahre hinweg ein vollständiges graubildverarbeitendes System zur Anwendung hauptsächlich bei Montageaufgaben entwikkelt. In einem Grauwertbild vom Arbeitsbereich des Roboters (z.B. flache Kisten mit teilweise geordneten Teilen) werden Kanten extrahiert und eine komprimierte Darstellung derselben durch Geradenstücke, Ecken und Kreisbögen erzeugt. Zusätzlich können flächige Merkmale wie mittlerer Grauwert oder Texturmerkmale in kleinen Bereichen an bestimmten Orten der Objektfläche bestimmt und mitverwendet werden. Ein Objektmodell besteht aus einer Teilmenge dieser Merkmale und ihren gegenseitigen geometrischen Relationen. Allerdings sind sie hier nicht in mehrere «Cluster» unterteilt. Im zu analysierenden Bild werden entsprechende Merkmale detektiert, und es wird durch ein mit Heuristiken arbeitendes Suchverfahren versucht, konsistente, durch eines der Objektmodelle vorhergesagte Merkmalsmengen aufzufinden. Danach kann die Bestimmung der Lage des Objekts und die Berechnung der Greifpunkte erfolgen.

Bei diesem System wurde sehr grosser Wert auf eine effiziente Hardware-Implementation der unteren Stufen der Bildanalyse gelegt (Gradientenperationen, Kurvenapproximation usw.), um die angestrebte Marke von ungefähr einer Sekunde Erkennungszeit pro Teil zu erreichen. Der Gestaltung des Interface zur Robotersteuerung wurde ebenfalls grosse Aufmerksamkeit gewidmet. Der Zeitbedarf für das Training zur Akquisition eines neuen Objektmodells liegt je nach Komplexität des Objekts zwischen 10 Minuten und einigen Stunden.

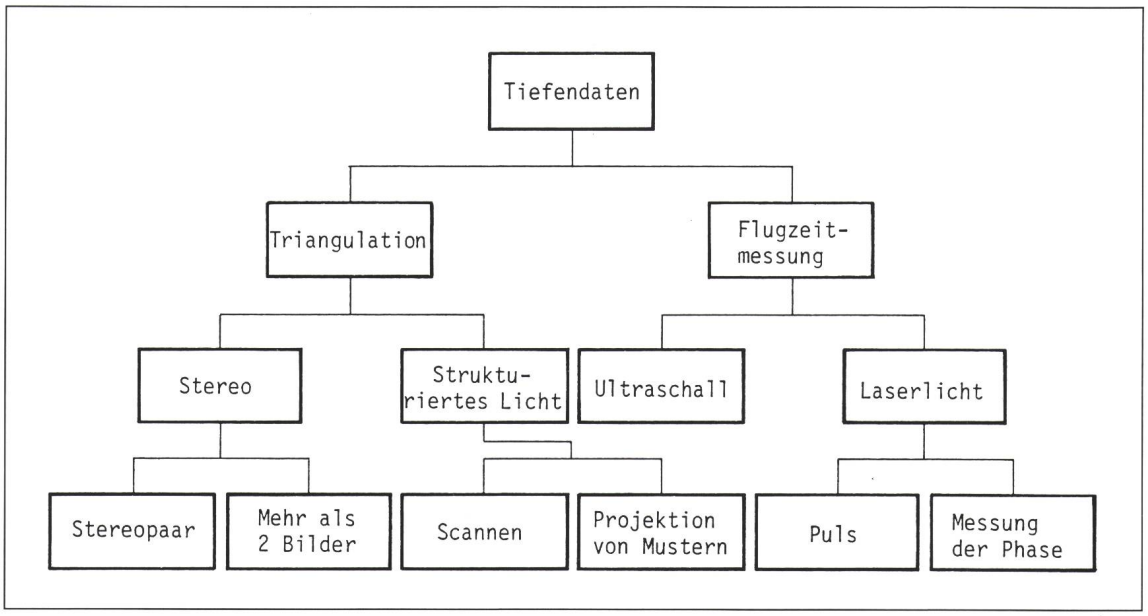
Das System wurde mit verschiedenen Objektklassen unter produktionsähnlichen Verhältnissen getestet. Etwa 10 Systeme wurden gebaut und werden jetzt teils firmenintern, teils in anderen Firmen, einer Dauererprobung unterzogen.

Neues aus den Labors

In den Labors von Hochschulen, privaten Forschungsinstituten und der Industrie wird schon seit langer Zeit an fortgeschritteneren Systemen gearbeitet; insbesondere wird der Übergang zur echt dreidimensionalen Computer Vision und Robot Vision vorbereitet.

Die Sensorik macht grosse Fortschritte, insbesondere auf dem Gebiet der Sensoren für Tiefendaten (Fig. 9), wo die zur Aufnahme eines Tiefenbildes notwendige Zeit allmählich auch für Echtzeitanwendungen interessant wird. Dies betrifft vor allem das Gebiet der aktiven Tiefensensoren, von denen immer neue Versionen entwikkelt werden: Laserabstandmesser nach dem Triangulationsprinzip oder mit Flugzeitmessung, kodiertes strukturiertes Licht, mit dem die Markierung vieler Lichtebenen gleichzeitig möglich wird, Ultraschall (Fig. 10). Grauwert- und Farbkameras hoher geometrischer Auflösung werden immer preiswerter.

Das Gebiet der Sensorik hat eine gewisse Reife erreicht. Es zeichnet sich ab, dass eine neue Ingenieurdisziplin,



Figur 10
Taxonomie der Methoden zur aktiven Gewinnung von Tiefendaten

«Perception Engineering», im Entstehen ist. Sie befasst sich mit den Gemeinsamkeiten, die der Datenakquisiton und Dateninterpretation - unabhängig von der Sensormodalität - zu eigen ist und hat den Überblick über die Vielfalt der zur Verfügung stehenden Sensoren, sodass es möglich wird, Sensoren für spezifische Aufgabenstellungen massgeschneidert auszuwählen.

Auf der Seite der Methodenentwicklung geschieht auch einiges. Die passive Tiefendatengewinnung durch binokulares Stereo wird laufend verbessert. Zusätzlich zu den bekannten Verfahren der Korrelation flächiger Elemente zur Ermittlung der Disparitäten gewinnt die Korrelation von geometrischen Merkmalen Bedeutung. Oft werden nicht nur Bildpaare, sondern bis zu 8 Bilder aus verschiedenen Richtungen verwendet. Die Arbeit an Segmentationsverfahren geht weiter mit einem neuen Schwerpunkt auf Tiefendaten. Es wird versucht, das Konzept des Scale Space (Verwendung von Auflösungspyramiden) für die Computer Vision nutzbar zu machen (Robustheit, Effizienz). Die Analyse von Bildsequenzen hat sich kräftig entwickelt. Es wird allmählich erkannt, dass die Integration der Daten mehrer Sensormodalitäten (z.B. visuelle, taktile und Abstandsdaten) entscheidende Fortschritte bezüglich der Erkennungssicherheit von Merkmalen und Objekten ermöglichen wird. Hier ist allenfalls ein merkliches Theoriedefizit festzustellen.

Und die Künstliche Intelligenz?

Von ihren Anfängen an lebt die Computer Vision in enger Symbiose mit der Künstlichen Intelligenz. Einerseits hängt die Computer Vision von der Künstlichen Intelligenz ab, da die Interpretation der visuell wahrnehmbaren Welt Methoden aus dem Arsenal der Künstlichen Intelligenz benötigt, Problemlösungsstrategien etwa und Methoden der Repräsentation von Wissen, um nur zwei Beispiele zu nennen. Auf der anderen Seite verdankt die Künstliche Intelligenz viele ihrer interessantesten Fragestellungen der Compter Vision: Die Repräsentation strukturierten Wissens durch Frames ist ein Beispiel, die Schlussfolgerung aufgrund von unsicherem Wissen ein anderes.

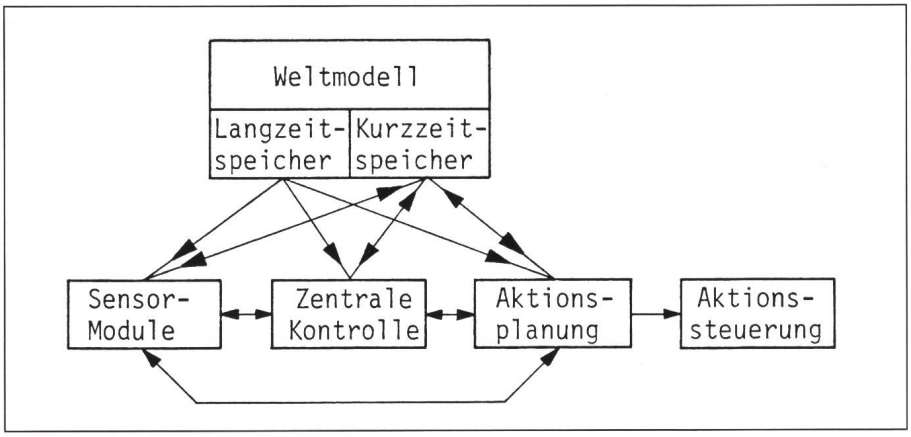
Aber der Beitrag der Künstlichen Intelligenz zur Robotik und damit zur Mechatronik beschränkt sich nicht auf das Gebiet des Erkennens von Objekten und des Verstehens einfacher Szenen. Bei zukünftigen Robotikanwendungen wird sich die Wissensbasis nicht auf eine Kollektion von Objektmodellen und ein relativ starres Schema für den Ablauf einer Szeneninterpretation beschränken. Vielmehr wird eine relativ vollständige Beschreibung des Arbeitsbereichs des Roboters (Weltmodell) wesentlich sein. Der Ablauf einer Szeneninterpretation wird flexibler sein, die Resultate mehrerer Wissensquellen werden kombiniert werden können und es wird vielfältige Möglichkeiten zur Revision von Zwischen- und Endresultaten geben.

Das bei einer Szeneninterpretation neu gewonnene Wissen muss mit dem bisherigen Zustand des Weltmodells verglichen und dieses gegebenenfalls aufdatiert werden. Das in der Künstlichen Intelligenz wohlbekannte Problem der *Truth Maintenance* erscheint in der Robotik als das Problem der Aufrechterhaltung der Konsistenz des Weltmodells über alle Aufdatierungen hinweg. Neben dem Unterhalt des quasistatischen Weltmodells muss der Roboter aber auch die Fähigkeit aufweisen, plötzlich auftretende und für ihn bedeutungsvolle Ereignisse zu erkennen und auf sie zu reagieren.

Bezüglich der Darstellung von Objekten muss gefordert werden, dass ein und dasselbe Objekt auf verschiedene Art und Weise dargestellt wird, je nach Verwendungszweck. Ein Objektmodell für den Zweck der Hypothesenerzeugung kann als eine Struktur aus geometrischen Merkmalen gesehen werden; für den Zweck der Hypothesenverifikation ist eventuell eine auf Grenzflächen basierende Darstellung (Boundary representation) vorteilhafter, und für die Bearbeitung eines Werkstücks müssen in der computerinternen Darstellung wieder andere Aspekte betont werden. Für das Weltmodell, aufgrund dessen sich der Roboter ohne Zusammentösse sicher bewegen soll, kommt man möglicherweise mit einer etwas gröberen Objektdarstellung aus. Die Konversion zwischen

all diesen verschiedenen Darstellungen muss gut unterstützt werden.

Ein drittes Mal kommt die KI bei der Roboterplanung zum Zuge, wenn also im Einklang mit vorgegebenen Zielen oder mit Zielen, die sich aus dem sensoriellen Rückkopplungs-Loop ergeben, Aktionssequenzen für die Effektoren des Roboters abgeleitet werden müssen. Dabei ist es wichtig, dass jederzeit und rasch zu den für die Entscheidungen oder die Aktionsplanung notwendigen Informationen sowohl im Langzeitspeicher als auch im Kurzzeitspeicher zugegriffen werden kann (Fig. 11).



Figur 11 Wissensbasis sowie Informations- und Kontrollfluss eines mit einem Vision-Modul ausgestatteten Roboters

Schlussbetrachtung

Die obigen Ausführungen haben wohl gezeigt, dass Robotik und Robot Vision trotz des gelegentlich gemächlich erscheinenden Tempos ihres Vordringens in den industriellen Bereich dynamische Forschungs- und Entwicklungsgebiete sind. Weltweit dürften weit über 10 000 Wissenschafter, Ingenieure und Techniker in diesen Disziplinen am Werk sein. Der Hauptgrund dafür, dass die im Labormassstab erprobten Methoden nicht schneller in die Fabriken eindringen, besteht sicher darin, dass die Systeme welche sie anwenden, verglichen mit dem Vorteil, den sie zu bringen versprechen, noch zu teuer und nicht robust genug sind. Der Forscher unterschätzt gewöhnlich die Zeit und den Aufwand, den es braucht, ein prinzipiell funktionierendes System fabriktauglich zu machen. Viele der im Labor erprobten Systeme zur Objekterkennung erreichen ohne Schwierigkeiten eine Fehlerrate von nur wenigen Prozenten; die Fertigung verlangt aber Fehlerraten im Promillebereich und darunter. Dennoch wird sich eine Haltung grundsätzlicher Skepsis auf die Dauer nicht durchhalten lassen. Es ist sicher, dass Roboter und andere Maschinen mit Sensorik und «Intelligenz» Industrie und andere Bereiche unseres Lebens immer stärker durchdringen werden. Diskutabel ist nur das Tempo, mit der dies geschehen wird.

In der Schweiz wurden gerade in letzter Zeit neue interdisziplinäre, relativ umfangreiche ETH-Projekte auf dem Gebiet der Mechatronik bzw. Robotik in Angriff genommen. Der Rahmen für weitere Projekte mit dem Thema der Wechselwirkung zwischen Robotik und Künstlicher Intelligenz wurde vom Nationalfonds vorbereitet. Ausserdem wird die Schweiz in Zukunft auch an Eureka-Projekten, welche dieselbe Stossrichtung haben, teilnehmen. Es wird auch immer wichtiger werden, dass man die in den Labors laufenden Entwicklungen besser bekannt macht. Ein moderner Produktionsingenieur sollte einen guten Überblick über den aktuellen Stand der Entwicklung haben und in der Lage sein, Möglichkeiten und Aussichten von Roboter- und Robot-Vision-Systemen realistisch einzuschätzen.