

Mitteilung Nr. 110

2D- UND 3D-OBJEKTBECHREIBUNG FÜR SICHTSYSTEME

BERND RADIG

IFI-III-M 110/83

August 1983

FACHBEREICH INFORMATIK

UNIVERSITÄT HAMBURG

Schlüterstraße 70

D-2000 Hamburg 13

ZUSAMMENFASSUNG

Sichtsysteme erweitern den Anwendungsbereich automatischer Fertigungs- und Transportsysteme. Die vom visuellen Sensor erfaßte Szene bildet die Grundlage für den Aufbau eines systeminternen Modells. Ein wesentlicher Teil des Modells ist die Beschreibung der zu manipulierenden oder zu prüfenden Gegenstände. Je nach Aufgabenstellung reichen dabei entweder zweidimensionale Objektmodelle aus, oder es müssen dreidimensionale Modelle verwendet werden.

Dieser Beitrag diskutiert die grundsätzlichen Anforderungen an Sichtsysteme und skizziert ihr Einsatzgebiet. Zum Aufbau des internen Modells werden Objektbeschreibungen auf mehreren Repräsentationsebenen angelegt; die Ebenen der Bild-, Gegenstands- und Szenenbeschreibung werden dargestellt. Eine ausgezeichnete Rolle spielen Referenzmodelle, die zur Identifikation und Lagebestimmung der vom Sensor erfaßten Gegenstände benutzt werden. Auf verschiedene Verfahren zum Vergleich von Objekt- und Referenzmodellen wird hingewiesen. Ein Ausblick auf mögliche Weiterentwicklungen von Sichtsystemen schließt den Beitrag ab.

2D- UND 3D-OBJEKTBE SCHREIBUNG FÜR SICHTSYSTEME

BERND RADIG

Fachbereich Informatik der Universität Hamburg
Schlüterstraße 70, 2000 Hamburg 13

1. Phänomenologie

Die Automatisierung von Transport- und Fertigungsvorgängen wird vereinfacht und für weitere Anwendungsbereiche überhaupt erst möglich, wenn das Förder- oder Handhabungsgerät mit einem Sichtsystem gekoppelt ist. Die Aufgaben, die ein Sichtsystem innerhalb des industriellen Prozesses zu erfüllen hat, bestimmen die systeminterne Beschreibungsweise der vom visuellen Sensor erfaßten Umwelt, der zu manipulierenden Gegenstände und der Aufgabenstellung. Die zahlreichen Randbedingungen, die bei der Konzeption und Realisierung eines Sichtsystems zu beachten sind, und die Vielfalt von Lösungsansätzen zur Erzeugung von Objektbeschreibungen aus den Sensordaten, wobei die Vorzüge, Nachteile und Grenzen der Verfahren oft nur experimentell und im Nachhinein feststellbar sind, rücken eine Theorie der Sichtsysteme in weite Ferne. Zur Weiterentwicklung visuell gesteuerter Maschinen kann deshalb im Augenblick nur eine Phänomenologie der Anforderungen und Lösungsansätze beitragen.

2. Grundsätzliche Anforderungen

"The competence of any vision system is limited by the representations it uses to describe the world and the knowledge available for manipulating and transforming them" [Tenenbaum..79].

Die maschinelle Bildverarbeitung [Kazmierczak80] hat inzwischen im industriellen Bereich ein weites Spektrum von Anwendungen gefunden. Die erzielten Fortschritte auf dem Gebiet der digitalen Bildverarbeitung und der frei programmierbaren Handhabungssysteme ließen schon seit Mitte der sechziger Jahre die Vorteile einer Kombination beider Techniken erkennen [Minsky66].

[McCarthy..68], [Feldmann..69], [Ambler..75]. Die erste internationale Konferenz über Künstliche Intelligenz fand 1969 statt, das erste internationale Symposium über industrielle Roboter 1970; es dauerte mehr als zehn Jahre bis zur Einrichtung der internationalen Konferenz über "Robot Vision" 1981.

Bei der Ausstattung eines Manipulators oder einer Fördereinrichtung mit einem visuellen System wird die Fähigkeit eines solchen Roboters gesteigert, auf Vorgänge in der Umwelt zu reagieren. Die Beschränkung kann damit überwunden werden, einer vorgegebenen Trajektorie folgen zu müssen, die höchstens bei der Verwendung von Kontakt- [Raibert&Tanner82a], [Raibert&Tanner82b] oder Näherungssensoren [Okada82] [Taylor..82] [Abele&Sturz82] korrigiert oder bei Ansprechen eines Störmelders verlassen wird [Salmon&d'Auria79]. Ein Sichtsystem wird benutzt, um ein Modell der Umwelt des Roboters aufzubauen, mit dessen Hilfe das Robotersystem selbständige Entscheidungen übernehmen kann, die zum erfolgreichen Abschluß einer Aufgabe beitragen. Weltmodelle müssen zur impliziten Programmierung von Robotern [Blume&Dillmann81] und zur Anwendung von Entscheidungs- und Planungstechniken [Brooks82a], [Lozano-Perez82a] aus dem Bereich der Künstlichen Intelligenz [Fikes72] aufgebaut werden. Ein Arbeitsschritt eines Roboters muß nicht durch explizite Programmierung jeder Bewegung, sondern kann durch Vorgabe eines Zielzustandes des Modells definiert werden [Luh83], [Lozano-Perez82b]. Der Anschluß eines Sichtsystems gestattet es, Teile eines solchen Modells automatisch zu generieren und zu aktualisieren. Über visuelle Information beeinflussbare Modelldaten betreffen

- Objektposition und Orientierung,
- Form- und Oberflächenbeschreibung,
- Roboterposition und Orientierung,
- Beziehungen zwischen Objekten sowie
Objekt und Roboter, beziehungsweise Effektor.

Das Modell ist nicht statisch, die Umwelt ändert sich teilweise durch Aktionen des Roboters - hier kann ein Sichtsystem überprüfen, ob die Aktion zu dem gewünschten Erfolg geführt hat - und teilweise durch von außen in das modellierte System eingebrachte Änderungen, beispielsweise:

- Transportanlagen bringen Gegenstände herbei oder räumen bearbeitete Werkstücke beiseite.
- Menschen betreten den Aktionsbereich eines Manipulatorarmes.
- Bearbeitungsmaschinen beenden einen Vorgang, brechen ihn auf Grund einer

Störung ab, produzieren gute oder eventuell fehlerhafte Teile.

Der visuelle Sensor ist in solchen Fällen das geeignete Mittel, um eine unerwartete Situation zu analysieren. Sicherlich kann ein taktiler Sensor feststellen, ob eine Roboterhand ein Werkstück an der Sollposition vorgefunden und ergriffen hat. Ist das Greifen jedoch mißlungen, kann bildliche Information dazu beitragen, den Grund aufzudecken und einen alternativen Plan für erfolgversprechende Aktionen zu verfolgen.

Die Aufgabe eines Sichtsystems innerhalb eines zu automatisierenden Prozesses ist es demnach, die vom visuellen Sensor gelieferten Daten in Begriffe des Weltmodells zu übersetzen, es also teilweise zu generieren und zu aktualisieren. Neben der statischen Beschreibung von bekannten, aber auch von überraschend auftretenden Objekten müssen auch Vorgänge in der realen Welt erfaßt und im Weltmodell repräsentiert werden. Das Sichtsystem erfüllt in einem Robotersystem die klar abgrenzbare Teilaufgabe, das systeminterne Weltmodell - oft im Verbund mit anderen Sensoren - so mit Daten zu versorgen, daß vom Roboter die gestellte Aufgabe bewältigt werden kann. Das Weltmodell bildet die Schnittstelle zwischen den das Modell aktualisierenden Prozessen der Sensorsignalverarbeitung und den steuernden Prozessen des Robotersystems. Das Entstehen eines eigenen Industriezweiges zur Herstellung von Sichtsystemen [Chen&Milgram82], [Villers82], [Bitter82], [Rohde82], [Hewkin&Fuchs82], die sich für eine große Zahl von Automatisierungsaufgaben ohne wesentliche Anpassungsarbeit an das Robotersystem eignen, ist ein Indiz für den Erfolg dieser Anschauung [Kinnucan81], [Kinnucan83]. An dieser Stelle treffen zwei Ansprüche aufeinander, nämlich ein hinreichendes Weltmodell zu verwenden und dabei den Aufwand für das Sichtsystem minimal zu halten [Pugh82].

- Je präziser und vollständiger das Weltmodell die reale Welt beschreibt, um so
 - zuverlässiger kann der Roboter seine Aufgabe erfüllen,
 - autonomer kann er auf unvorhergesehene Ereignisse reagieren,
 - flexibler kann er sich an Änderungen der Aktionen anpassen.

- Präzision und Vollständigkeit des Weltmodells erfordern hohen Aufwand im Sichtsystem:
 - Punkte im Raum müssen mit hoher Auflösung lokalisierbar sein,
 - die Verarbeitung großer Sensordatenmengen erfordert den Einsatz von dedizierten (Spezial-) Prozessoren [Reddy&Hon79], um mit dem

Fertigungsprozess schritthalten zu können,

- Verfahren zur Erstellung von Objektbeschreibungen durch ihr Volumen, ihre Oberfläche und ihre Oberflächeneigenschaften müssen optimiert werden, um ihre Ergebnisse
 - * in kurzer Zeit,
 - * mit vertretbarem Hardware-Aufwand und
 - * zuverlässigbereitzustellen.

Beide Forderungen nach hinreichendem Weltmodell und minimalem Sichtsystem im industriellen Einsatz aufeinander abzustimmen, gelingt vorerst nur bei Aufgabenstellungen, die mit einem hauptsächlich zweidimensionalen Weltmodell und der Darstellung von Oberflächeneigenschaften durch Binärbilder auskommen und die nicht wesentlich kürzere Taktzeiten als eine Sekunde erfordern. Die Fortschritte auf dem Gebiet der Sensortechnik (Halbleiter, Zeilen- und Matrix-Sensoren, Laser-Entfernungsmesser), der Prozessoren (Multi-Mikroprozessor-Systeme, sensorintegrierte Arrayprozessoren) und der Programmierung von Bildanalyseverfahren lassen eine schnelle Vergrößerung der Kompetenz von Sichtsystemen erwarten. Anforderungen von Seiten der automatischen Prüf-, Transport- und Produktionssysteme sind in genügender Breite vorhanden.

3. Aufgabengebiet der Sichtsysteme

Je nach der Aufgabenstellung, die durch den zu überwachenden Prozeß bestimmt ist, variieren die eingesetzten Sensoren, Verfahren und Weltmodelle. Einige Anwendungsgebiete sind hier exemplarisch aufgezählt, die zum Teil schon von Rosen [Rosen79] und Ossenberg [Ossenberg 80] erwähnt wurden:

- Sicherheitsüberwachung, Notabschaltung, Lenkung
 - Schutz von Geräten, Anlagen, Manipulatoren, vor Beschädigungen durch fremde Objekte oder durch den Roboter selbst;
 - Schutz von Personen, die in den Arbeitsbereich von Manipulatoren eintreten [Haass..82];
 - Lenkung von mobilen, fliegenden, rollenden oder gehenden Robotern, um Hindernissen auszuweichen [Moravec80], [Ferrer..81].

Kameras überwachen den Arbeitsbereich, in dem eine Gefährdung durch den

Roboter oder des Roboters möglich ist. Das Weltmodell beschreibt relativ grob Ort und Volumen von Gegenständen, die gefährdet sind oder gefährden können. Die Beschreibung eines realen Objektes kann häufig durch umhüllende Quader, Kugeln, konvexe Polyeder oder generalisierte Zylinder [Brooks82b], [Brooks&Lozano-Perez82], [Brooks&Lozano-Perez83], [Lozano-Perez82b] angenähert werden und schließt einen Volumenzuschlag ein, um den Bremsweg des Roboters berücksichtigen zu können. Eine genauere Analyse eines fremden Objektes, das in die Gefahrenzone eintritt, ist zeitlich oft nicht möglich und für unbekannte Objekte können im Weltmodell nur sehr allgemeine Modellierungsvorschriften gegeben werden, etwa im Sinne von Fischlers "Generischer Klassifikation" [Fischler78]. Bei stationären Robotern, wie es die meisten Handhabungsgeräte sind, genügt für Überwachungsaufgaben eine zweidimensionale Beschreibung des von der Kamera gelieferten Bildes. Da Kameraparameter und -standort bekannt und fixiert sind, kann das auf Grund der im Weltmodell vorhandenen Objektbeschreibung zu erwartende Bild antizipiert werden, wobei natürlich durch den Roboter veranlaßte Änderungen sich im Weltmodell widerspiegeln müssen.

Bei der Lenkung mobiler Systeme mit eingebautem Sensor ist die Tiefeninformation direkt zu messen oder aus den Bildern zu erschließen. Besonders die Bewegung in unebenem, unbekanntem Gelände erfordert einen hohen Aufwand [Yakimosky&Cunningham76], der wohl zur Zeit nur im speziell eingeschränkten Bereich der Navigation militärischer Flugkörper getrieben werden kann und in Kauf genommen wird. Hierbei besteht das Weltmodell aus einem Geländemodell der geplanten Flugbahn, mit dessen Hilfe unter Auswertung von Radarmessungen der Standort bestimmt wird.

● Sichtprüfung, Qualitätskontrolle, Erfolgskontrolle

- Vermessen von Rohmaterial, Werkstücken und Werkzeugen (Abnutzung).
- Prüfen auf Vollständigkeit (beispielsweise einer montierten Baugruppe) [Bertelsmeier&Hille79] und Beschädigung von Werkzeugen, Werkstücken, Fertigteilen [Decker81].
- Lesen und Identifikations- oder Positions-Markierungen an Teilen.
- Identifizieren von Gegenständen zum Sortieren oder Palettieren [Perkins78].
- Prüfen der Oberflächenbeschaffenheit auf Fehlstellen, Risse, Verschmutzung, Vollständigkeit und Gleichmäßigkeit der Beschichtung oder Lackierung [Levi&Weirich83], [Wahl..81],

[Jentner&Schmidberger82] [Batchelor..82].

In diesem Einsatzgebiet können zeilenförmige Sensoren (Fotodioden-Zeilen mit einer typischen Ortsauflösung zwischen 64 und 4096 Punkten) eingesetzt werden, wenn die Variation in der zweiten Dimension durch die Translation (Fließband) oder Rotation (Drehtisch) [Bertelsmeier&Hille79] des Prüflings erzeugt wird. Binärbilderzeugung und -verarbeitung ist ausreichend, wenn die Silhouette des Werkstückes genügend Information liefert, oder die Fehlstellen beziehungsweise Markierungen auf der Oberfläche zuverlässig detektierbare Intensitätsvariationen erzeugen.

● Handhabung einzelner Gegenstände

- Gegenstände werden in genügendem Abstand voneinander, in stabilen Lagen ruhend, auf einem Fließband transportiert und in Bewegung ergriffen [Foith..80], [Holland..79], [Patzelt82].
- Gegenstände werden durch Flurförderungssysteme in einen Bereitstellungsraum gebracht, abgesetzt und ergriffen [Ahrens..82].
- Gegenstände baumeln an Hängeförderungssystemen und müssen von dort abgenommen werden.

Im Weltmodell sind Referenzmodelle für die zu erwartenden Gegenstände enthalten. Die Modelle enthalten auch eine Beschreibung der Kontaktflächen für den Greifer. Kommen mehrere Sorten von Gegenständen vor, so sind sie vom Sichtsystem zu identifizieren. Die Lage und Orientierung der beobachteten Gegenstände ist zu bestimmen, damit die räumliche Lage der Kontaktflächen dem Manipulator mitgeteilt werden kann. Bei ruhenden Gegenständen kann die Manipulatoraktion direkt ablaufen, wobei das Sichtsystem eventuell den Bereitstellungsraum überwacht, um festzustellen, ob und wann der Gegenstand entfernt wurde. Bei der Fließbandförderung muß, nachdem das Objektmodell im Sichtsystem aufgebaut ist, aus der Position des Gegenstandes zur Zeit der Bildaufnahme und aus der Geschwindigkeit des Fließbandes der Ort für das Zugreifen extrapoliert werden. Die Erzeugung des Objektmodells muß so schnell vor sich gehen, daß der Gegenstand den Aktionsbereich des Manipulators innerhalb der benötigten Zeit noch nicht verlassen hat. Die Extrapolationsmöglichkeit fehlt bei Objekten an Hängeförderern, wenn sie typischerweise nur an einem Punkt aufgehängt sind und schwingen oder sich drehen. Da der Freiheitsgrad hängender Gegenstände größer ist als auf dem Band liegender, muß Tiefeninformation vom Sichtsystem gewonnen

werden, um ein dreidimensionales Objektmodell mit den Referenzmodellen vergleichen zu können. Dieser Vorgang dauert unter Verwendung der heutigen Verfahren so lange, daß eine über das Sichtsystem rückgekoppelte Regelung des Zugreifens im allgemeinen Fall nicht möglich ist.

● Entnahme von Gegenständen aus Behältern

- Gegenstände sind geordnet auf Paletten oder in Magazinen [Warnecke..82], [Ahrens..82].
- Gegenstände sind ausgerichtet aber dicht, eventuell in mehreren Lagen gepackt [Hermann82].
- Gegenstände liegen ungeordnet in Behältern [Boissant&Germain81], [Berman..82], [Bolles&Cain82a], [Bolles&Cain82b].

Im ersten Fall kann nach der Orts- und Orientierungsbestimmung des Behälters sowie einer eventuellen Überprüfung auf Vollzähligkeit blind zugegriffen werden. Im zweiten Fall genügen im allgemeinen wenige Merkmale, um mit Hilfe eines Referenzmodells (bekanntes Objekt in einer stabilen, annähernd bekannten Lage) den Zugriff zu steuern. Der dritte Fall läßt sich auf das Ergreifen aus einem Bereitstellungsraum zurückführen, wenn die Gegenstände erst einmal vereinzelt sind. Dazu aber muß das Sichtsystem nicht nur die Sorte und die Orientierung des Gegenstandes aus Ansichten beliebiger Lagen bestimmen, sondern auch die räumliche Konfiguration aller sichtbaren und verdeckten Teile, um die Auswahl des als nächsten zu ergreifenden Gegenstandes zu bestimmen. Das Weltmodell muß so präzise und vollständig aus der visuellen Information erzeugt werden, daß entschieden werden kann, welcher Gegenstand zuoberst liegt und Kontaktflächen für den Greifer bietet. Neben der Forderung nach Identifikation teilweise verdeckter Gegenstände [Hättich81] kommt erschwerend hinzu, daß die Beleuchtung praktisch nicht so eingestellt werden kann, daß Schatten, Glanzlichter oder kontrastarme Partien im Bild vollständig vermieden werden können. Die Entnahme von ungeordneten Gegenständen aus einem Behälter ist allgemein noch ein ungelöstes Problem. Vereinfacht wird die Situation, wenn es sich um identische, hochsymmetrische Gegenstände handelt (Kugeln) oder wenn sie so robust sind, daß sie durch magnetische [Geißelmann80] oder sich anschmiegende pneumatische Greifer [Bancon&Huber82] vereinzelt werden können.

● Bearbeitung

- Polieren [Graham&Choong81], Lackieren, Dekorieren [Cronshaw82].
- Abdichten, Versiegeln, Klebstoffbeschichtung.
- Schleifen, Entgraten.
- Schneiden, Stanzen, Pressen.

Zwei Betriebsarten sind zu unterscheiden, je nach dem, ob der Manipulator das Werkzeug führt (die Spritzpistole beim Lackieren, die Schleifscheibe beim Entgraten, den Laserkopf beim Schneiden) oder das Werkstück hält (etwa beim Stanzen). Die möglichen Aufgaben eines Sichtsystems liegen hierbei in der Überwachung, ob das Werkstück korrekt ergriffen wurde oder sich in der richtigen Position befindet und ob der Bearbeitungsvorgang mit dem gewünschten Erfolg abgeschlossen wurde. Da das Weltmodell üblicherweise eine präzise Beschreibung der Bearbeitungsvorgabe enthält (etwa den Verlauf von Graten an einem Gußteil), kann die eigentliche Aktion ohne Zuhilfenahme des Sichtsystems ablaufen. Manchmal ist darüberhinaus das Identifizieren einer Werkstücksorte notwendig - beispielsweise beim Dekorieren von verschiedenen Pralinen [Cronshaw82] - zur Auswahl der richtigen Aktionsschablone.

● Montage

- Teileidentifikation.
- Bewegungs- und Ablaufplanung unter Berücksichtigung von Hindernissen.
- Kontrolle der Passung und des Fügevorganges.
- Befestigung durch Punkt- und Lichtbogenschweißen [Niepold80], [Clocksin..82], [Niepold&Brümmer82], Nieten, Verbolzen, Verschrauben, Nageln, Klammern, Kleben, Einstecken [Asano..82], Löten.
- Montageüberwachung auf Korrektheit, Vollständigkeit, Intaktheit.

Die Stärke von Sichtsystemen bei dieser Aufgabe liegt in der Fähigkeit, eine Unsicherheit in der Identität von Teilen oder in der relativen Lage von zu verbindenden Elementen [Uno..79] aufklären zu können. Da die Ortsauflösung von Sichtsystemen, beispielsweise zur Positionierung für Schraubvorgänge, unzureichend sein kann, übernehmen nachgiebige Handgelenks-Kupplungen [Mason82], Näherungs- oder Kraft- beziehungsweise Drehmomentsensoren die Kontrolle der Feinpositionierung [Abele&Sturz82], [Okada82], [Salmon&d'Auria79], [Schweizer&Haaf80] [Taylor..82]. Das

Weltmodell enthält eine dreidimensionale Beschreibung der Szene im Handhabungsbereich, das von einem Sichtsystem aktualisiert wird, wenn es gilt, den Montagefortschritt zu überwachen oder nicht einplanbaren Situationen zu begegnen. Solche Situationen treten auf, wenn die Außenwelt in unvorhergesehener Weise in das Montagesystem einwirkt etwa dadurch, daß Teile in der falschen Reihenfolge, zu schnell, beschädigt oder verbogen zugeliefert werden.

Allen bisher aufgeführten Aufgabenbereichen für Sichtsysteme ist gemeinsam, daß aus den Sensordaten eine flächige oder räumliche Beschreibung von Objekten erzeugt werden muß. Obwohl Transformationen im Signalraum hierbei vorbereitend hilfreich sein können, liegt die eigentliche Schwierigkeit im Übergang in den Symbolraum, aus dem das Robotersystem die benötigten Informationen bezieht. Die Methoden, die bei diesem Übergang einzusetzen sind, und die Repräsentationsform der Objekte und ihrer gegenseitigen Beziehungen lassen sich bisher noch nicht systematisch aus der Aufgabenstellung und den Randbedingungen (Sensor, Prozessor, Zeittakt, Fehlertoleranz, Adaptierbarkeit, Programmierbarkeit etc.) ableiten.

4. Objektbeschreibung

Das Erstellen von Objektbeschreibungen und die systeminterne Repräsentation von Objektmodellen sind gekennzeichnet von Versuchen, für die Aufgabenstellung des Gesamtsystems optimale Formen zu entwickeln. Ein Beispiel ist die häufig angestrebte frühzeitige Reduzierung der Intensitätsinformation auf Binärbilder und die Verwendung von zweidimensionalen Objektmodellen mit einer minimalen Ausstattung. Die Fixierung auf spezialisierte Beschreibungsmethoden, die durch stark variierende Randbedingungen wie Aufgabenstellung und Systemleistung (Leistung=Arbeit/Zeit) geprägt sind, verstellt den Blick auf übergeordnete Prinzipien bei der Beschreibung der externen Welt durch ein internes Modell. Langfristig anzustreben ist eine allgemeine Theorie der Objektbeschreibung, aus der durch Approximation und Spezialisierung die Anpassung an Aufgabe und Randbedingung des Sichtsystems gewonnen wird. Ein für die Konstruktion und Steuerung von Robotern grundlegendes und hilfreiches Gebäude, wie die Klassische Mechanik [Goldstein50], [Hollerbach82], steht für Sichtsysteme noch nicht zur Verfügung.

4.1 Repräsentationsebenen

Der für die Sichtsysteme relevante Teil des Weltmodells in einem Robotersystem stellt den Teil der Szene dar, der sich im Blickfeld des visuellen Sensors befindet. Aus den Sensordaten werden Objektmodelle als interne Repräsentation der realen Objekte erzeugt. Die Objektmodelle enthalten alle zur Lösung der dem Sichtsystem gestellten Aufgabe erforderlichen Angaben. Eingeschlossen sind geometrische und funktionale Beziehungen zwischen Objekten [Brooks82c]. Die Beschreibung der Objekte und ihre Beziehungen können sich als Funktion der Zeit ändern und in einem dynamischen Szenenmodell zusammengefaßt werden. Folgende Repräsentationsebenen lassen sich unterscheiden [Marr78], [Tenenbaum..79]:

- Das Szenenmodell enthält die Beschreibung des Raumes, der vom Sensor erfaßt wird, einschließlich der darin befindlichen Gegenstände. Beziehungen zwischen Gegenständen werden dargestellt. Falls sich Gegenstände in der realen Welt bewegen, muß die Dynamik der Szene repräsentiert werden. Das Szenenmodell kann eine Beschreibung der Lichtquellen enthalten. Falls sich der Sensor selbst bewegt, etwa weil er auf einem mobilen Roboter angebracht ist, muß seine Trajektorie (Position, Geschwindigkeit, Beschleunigung, etc. als Funktion der Zeit) in einem Weltkoordinatensystem darstellbar sein [Bruss&Horn83].
- Der Raum wird von dreidimensionalen Objekten bevölkert. Die mathematischen Grundlagen für ihre Beschreibung sind bekannt. Die Entwicklung von CAD-Systemen hat die Forschung auf dem Gebiet der rechnerinternen Repräsentation von Objekten gefördert [Faux&Pratt79]. Die Wahl der Darstellungsform hängt wesentlich davon ab, ob die im Sichtsystem notwendigen Berechnungen effizient durchführbar sind [Requicha80], [Faugeras..82], [Faugeras&Ponce83], [Jackins&Tanimoto80], [Srihari81], [Srihari82], [Meagher82].
- Die Bausteine, aus denen die Objektmodelle konstruiert werden, sind Linien, Oberflächen und Volumen. Typisch ist die Approximation der realen Strukturen durch Komposition von einfachen Elementen [Ballard&Brown82], [Hunter&Steiglitz79], [Lee&Fu82], [Turner74], beispielsweise Linien durch Polygone, Kreissegmente, Splinekurven, Flächen durch Ebenen und quadratische Funktionen [Bolle..82], [McPherson..82], Volumen durch Würfel, Quader, Polyeder (Oktaeder [Gibson&Lucas82]), Kugeln, Kegel, generalisierte Zylinder [Brooks83], [Brooks82c], [Brooks82b], [Brooks81].

- Voraussetzung für die Beschreibung der Objekte ist die Kenntnis folgender Größen für jeden Punkt des Bildes [Binford81], [Barrow&Tenenbaum78]:

- Tiefe kann direkt über Laser-Entfernungsmesser gewonnen werden. Damit ist eine große Genauigkeit erreichbar, die Abtastung dauert jedoch lange. Sogenannte aktive Stereoanordnungen verwenden gesteuerte Punkt- oder Streifenbeleuchtung, die von einer Kamera beobachtet wird [Shirai79], [Kazmierczak80], [Kreis..82]. Die Genauigkeit und Aufnahmedauer hängen von der Auflösung der Kamera und der Dichte des Punkt- bzw. Streifenrasters ab [Levi..83]. Bei passiven Stereoverfahren wird die Szene von zwei oder mehr Kameras beobachtet [Neumann81]. Die Genauigkeit hängt von der Auflösung der Kamera und von dem Unterschied ihrer Blickwinkel ab [Jarvis83]. Die Bilder sind schnell verfügbar, die Berechnung der Tiefeninformation aus den projizierten Bildern ist jedoch aufwendig [Grimson81].
- Die Orientierung von Oberflächen läßt sich aus den Tiefenangaben erschließen [Ishii&Nagata76]. Bei Annahmen über die Reflektanz der Oberflächen und bei Kenntnis der Beleuchtung können Flächennormalen direkt aus Intensitätsdaten gewonnen werden [Horn75], [Ikeuchi&Horn81], [Woodham81]. Die Analyse oberflächeneigener oder durch Beleuchtung aufgeprägter Textur liefert ebenfalls Hinweise zur Oberflächenorientierung [Witkin81]. Das Konzept des Gradientenraumes [Horn75], [Mackworth73] und des stereografischen Raumes [Ikeuchi&Horn81] ist geeignet zur Beschreibung von Vektorfeldern der Normalen.
- Die Ermittlung von Bewegung wird durch ein Vektorfeld unterstützt, das durch den Vergleich von mindestens zwei Bildern gewonnen werden kann. Jedem Bildpunkt wird ein Verschiebungsvektor zugeordnet, der die Translation des projizierten Objektpunktes von einem zum nächsten Bild angibt [Nagle82], [Nagle83a], [Nagle83b]. Der optische Fluß als Vektorfeld der Punktgeschwindigkeiten enthält Information über die Tiefe und Bewegung von Oberflächen relativ zum Beobachter [Prazdny 80], [Horn&Schunk81], [Glazer81], [Lee80], [Jain82], [Jain83].

- Die Reflektanz [Horn77] der Oberfläche ist die Eigenschaft, die besonders bei der Sichtprüfung von Werkstücken interessiert. Sie kann bei bekanntem Beleuchtungs- und Kameramodell sowie der Oberflächenorientierung aus Intensitätsdaten berechnet werden [Lee&Rosenfeld83]. Oft müssen jedoch nur relative Reflektanzänderungen erkannt werden, um Fehlstellen in Oberflächen oder Objektgrenzen zu ermitteln. Eine diffuse, Schatten vermeidende Beleuchtung wird bei dreidimensionalen Szenen verwendet. Zur Inspektion ebener Oberflächen sind auch Punktlichtquellen mit evtl. streifendem Lichteinfall gebräuchlich.
- Auf Intensitäts-, Tiefen-, Orientierungs-, Verschiebungs- und Reflektanzdaten baut die Segmentation der Bilder auf. Durch die Zerlegung des Bildes in zusammenhängende Bereiche, die Oberflächen mit Uniformität in einem oder mehreren dieser fünf Merkmale besitzen, wird das Bild vom Signal- in den Symbolraum transformiert [Hille81], [Rosenfeld&Davis79]. Relationengebilde sind ein geeigneter Formalismus, um die Eigenschaften von Symbolen, ihre Beziehungen untereinander und ihre Gruppierung zu Objekten auszudrücken [Radig82], [Radig83], [Ballard&Brown82], [Pavlidis77].
- Die Signale vom visuellen Sensor werden als Intensitätsbilder (oder Tiefenbilder bei Entfernungssensoren) durch ein- oder zweidimensionale Matrizen repräsentiert. Gebräuchliche Intensitätsquantisierungen sind 2 und 256 Stufen, die minimale Ortsauflösung liegt bei 1% des Bildfeldes (typisch 128x128 Bildpunkte) und muß für Präzisionsmessungen auf 4096x4096 Punkte gesteigert werden [Warnecke&Melchior82].

In dieser Vollständigkeit werden Szenenmodelle in industriellen Sichtsystemen praktisch nicht aufgebaut. Entweder erfordert es die Aufgabenstellung nicht oder auf Grund der vorgegebenen Randbedingungen muß die Leistungsfähigkeit des Sichtsystems und damit des Roboters eingeschränkt bleiben. Der "Griff in die Kiste" gehört eben noch nicht zum Standardrepertoire sichtgesteuerter Roboter.

In vielen industriellen Anwendungsbereichen lassen sich die Bedingungen optimieren, unter denen das Sichtsystem eingesetzt wird. Außerdem kann eine Menge von Wissen über den Aufbau der zu erwartenden Szene aus dem industriellen Prozeß verfügbar gemacht werden.

4.2 Referenzmodell

Das visuelle System kann sich auf Aufgaben stützen, die auf andere Weise - entweder durch Einbringen von Vorwissen oder über andere Sensoren - zur Verfügung stehen. Diese Art Information ist häufig nur implizit durch Auswahl und Ausprägung der verwendeten Methoden zur Bildauswertung im System eingebettet. Zur Oberflächenprüfung beispielsweise drücken sich Annahmen und Wissen über die Reflektanz der Oberfläche, ihre Tiefe, ihre Beleuchtung und Bewegung oft nur in einem expliziten Parameter aus, nämlich dem Schwellenwert zur Umwandlung des Intensitätsbildes in ein Binärbild.

Explizit im Weltmodell angesiedelte Repräsentationen finden sich erst in Form von Referenzmodellen auf der Objekt- und Szenenebene. Die Wahl der systeminternen Darstellung von Referenzobjekten hängt ab von der Art, wie die Modelle in das System eingebracht werden (durch Zeigen [Foith..80], [Andree&Wernersson82], Übernahme aus CAD-Systemen, Auswertung technischer Zeichnungen [Idesawa73], [Bocquet&Tichkiewitch82] etc.), und von den Verfahren, die benutzt werden, um vom Sichtsystem aufgebaute Objektmodelle mit den Referenzmodellen zu vergleichen.

Die Beschreibung durch Merkmalsvektoren ermöglicht die Verwendung von Klassifikationsmethoden [Röcker75]. Eine Grammatik erlaubt den Einsatz syntaktischer Verfahren, wobei seit einigen Jahren die Forschung intensiviert wird, die das Ziel hat, auch gestörte Objektmodelle fehlertolerant analysieren zu können [Tsai&Fu83], [Walter&Tropf83], [Fu82], [Fu81]. Produktionensysteme steuern die Gruppierung primitiver Symbole zu Objekten [Stein83]. Relationale Beschreibungsformen ermöglichen beim Vergleich zwischen Objektmodell und Referenzmodell nicht nur die Berücksichtigung von Objektmerkmalen, sondern auch ihrer inneren Struktur und ihrer Beziehung zu anderen Objekten [Haralick78], [Hwang&Hall82], [Kitchen80], [Bunke&Allermann83], [Shapiro&Haralick81], [Bolles81], [Enderle81]. Dabei müssen möglichst umfassende Zuordnungen zwischen den Konstituenten des Referenzmodells und des Objektmodells gefunden werden [Cheng&Huang82]. Die Zuordnungen lassen sich als Komorphismen [Radig83] zwischen Relationengebilden definieren, die größte gemeinsame Substrukturen zwischen Objekt und Referenz aufeinander abbilden. Die Suche nach Komorphismen läßt sich beschleunigen, wenn die Modelle hierarchisch, basierend auf primitiven Bildsymbolen, aufgebaut sind [Radig82]. Die strenge Trennung zwischen Objektbeschreibung und der Methode des Modellvergleiches gestattet den Aufbau von Sichtsystemen, die leicht an neue Aufgaben angepaßt werden können.

5. Perspektiven

Die Voraussetzungen für einen erfolgreichen Einsatz von Sichtsystemen in einer industriellen Umgebung beschreibt Pugh [Pugh82]:

- Niedriger Anschaffungspreis,
- Zuverlässigkeit
- Grundsätzliche Einfachheit
- Schnelle Bildverarbeitung
- Einfache Beleuchtung

Fortschritte in allen Komponenten von Sichtsystemen sind notwendig, um diese Bedingungen zu erfüllen:

- Sensoren müssen eng mit (integrierten) Prozessoren gekoppelt werden, um Operationen auf der Signalebene zu beschleunigen [Duff82], [Mimaroglu82].
- Spezialprozessoren für die Transformation vom Signal- in den Symbolraum sind zu entwickeln. Für Binärbildauswertung existieren schon Systeme zur schnellen Markierung und Beschreibung von Zusammenhangskomponenten.
- Verfahren zur modellgesteuerten Auswertung der Intensitäts- und Tiefeninformation sind zu standardisieren. Durch Kombination von Standardmodulen ist eine preiswerte und flexible Anpassung an die Aufgabenstellung des Sichtsystems möglich. Die Leistungsfähigkeit und Korrektheit der Module sollte durch Prüfverfahren und vergleichende Bewertung (Benchmarks) dokumentiert werden.
- Die systeminterne Objektbeschreibung muß explizit im Sichtsystem lokalisierbar sein und sich einer einheitlichen Formalisierung bedienen. Neben einer klaren Struktur des Sichtsystems ergeben sich als Vorteile, daß über die Schnittstelle "Weltmodell"
 - das Sichtsystem Information aus anderen Komponenten des Robotersystems in die Objektbeschreibung einbeziehen kann, um seine eigene Leistungsfähigkeit zu erhöhen,
 - das Sichtsystem in definierter Weise Informationen an das Robotersystem weitergeben kann und so Modifikationen in einem der

beiden Systeme vom anderen isoliert werden,

- der Bezug von Referenzmodellen aus einem CAD/CAM-System oder Simulations- und Trainingssystem sowie von Datenbanken erleichtert wird.

Datenstrukturen, die an verschiedene Teilaufgaben

- Klassifikation,
- Übergang von zwei- auf dreidimensionale Objektbeschreibungen,
- Vergleich von Objekt- und Referenzmodellen,
- Trajektorienplanung

angepaßt sind, sollten aus einer einheitlichen Modellrepräsentation abgeleitet werden und nicht isoliert nebeneinander bestehen.

In der aufgeführten Literatur wird leider belegt, daß sich erst kleine Schritte in Richtung der Verwirklichung dieser Ziele abzeichnen; "Robot Vision" ist eben noch ein sehr junges und anspruchsvolles Gebiet.

Literaturverzeichnis

[Abele&Sturz82]

E. Abele, W. Sturz: "Sensoren zur adaptiven Steuerung von Industrierobotern beim Entgraten", in [IPA82], pp. 79-92

[Ahrens..82]

U. Ahrens, W. Friedrich, S. Deliev: "Sensoreinsatz beim Be- und Entladen von Paletten mit Industrierobotern", in [IPA82], pp. 105-116

[Ambler75]

A.P. Ambler, H.G. Barrow, C.M. Brown, R.M. Burstall, R.J. Popplestone: "A Versatile System for Computer-Controlled Assembly", *Artificial Intelligence* 6 (1975) 129-156

[Andree&Wernersson82]

D.Andree, A. Wernersson: "Linear Vision for Finding the Orientation of Parts: Learning Procedures", in [RV82], pp. 147-158

[Asano..82]

T. Asano, S. Maeda, T. Murai: "Vision System of an Automatic Inserter for Printed Circuit Board Assembly", in [RV82], pp. 63-72

[Ballard&Brown82]

D.H. Ballard, C.M. Brown: "Computer Vision", Prentice-Hall, Englewood Cliffs/NJ USA, 1982

[Bancon&Huber82]

G. Bancon, B. Huber: "Depression and Dual Grippers with their Possible Applications", in [ISIR82], pp. 321-325

[Barrow&Tenenbaum78]

H.G. Barrow, J.M. Tenenbaum: "Recovering Intrinsic Scene Characteristics from Images", in [Hanson&Riseman78], pp. 3-26

[Batchelor..82]

B.G. Batchelor, S.M. Cotter, P.W. Heywood, D.H. Mott: "Recent Advances in Automated Visual Inspection", in [RV82], pp. 307-326

[Berman..82]

S. Berman, P. Parikl, C.S.G. Lee: "Computer Recognition of Overlapping Parts Using a Single Camera", in [PRIP82], pp. 650-655

[Bertelsmeier&Hille79]

R. Bertelsmeier, G. Hille: "Anwendungen von Bildanalysetechniken zur automatischen Sichtkontrolle von Bauteilen in Automobilen", in [Foith79], pp. 330-340

[Binford81]

T.O. Binford: "Inferring Surfaces from Images", in [Brady81], pp. 205-244

- [Bitter82]
K.H. Bitter: "Anwendung von optoelektronischen Bildsensoren", in [IPA82], pp. 39-62
- [Blume&Dillmann81]
C. Blume, R. Dillmann: "Frei programmierbare Manipulatoren", Vogel-Verlag, Würzburg 1981
- [Bocquet&Tichkiewitch82]
J.C. Bocquet, S. Tichkiewitch: "An 'Expert System' for Reconstruction of Mechanical Object from Projections", in [PRIP82], pp. 491-496
- [Boissonnat&Germain81]
J.D. Boissonnat, F. Germain: "A New Approach to the Problem of Acquiring Randomly Oriented Workpieces out of a Bin", in [IJCAI81], pp. 796-802
- [Bolle..82]
R.M. Bolle, D.B. Cooper, B. Cernuschi-Frias: "Three Dimensional Surface Shape Recognition by Approximating Image Intensity Function with Quadric Polynomials", in [PRIP82], pp. 611-617
- [Bolles81]
R.C. Bolles: "Robust Feature Matching Through Maximal Cliques", *SPIE* 182 (1980) 140-149
- [Bolles&Cain82a]
R.C. Bolles, R.A. Cain: "Recognizing and Locating Partially Visible Workpieces", in [PRIP82], pp. 498-503
- [Bolles&Cain82b]
R.C. Bolles, R.A. Cain: "Recognizing and Locating Partially Visible Objects: The Local-Feature-Focus Method", *Robotics Research* 1 3(1982) 57-82
- [Brady81]
J.M. Brady (Hrsg.): "Computer Vision", North-Holland, Amsterdam, 1981; siehe auch *Artificial Intelligence* 17 (1981)
- [Brady..82]
M. Brady, J.M. Hollerbach, T.L. Johnson, T. Lozano-Peres, M.T. Mason: "Robot Motion: Planning and Control", MIT Press, Cambridge/MA USA, 1982
- [Brooks81]
R.A. Brooks: "Symbolic Reasoning Among 3-D Models and 2-D Images", in [Brady81], pp. 285-348
- [Brooks82a]
R.A. Brooks: "Symbolic Error Analysis and Robot Planning", *Robotics Research* 1 4(1982) 29-68
- [Brooks82b]
R.A. Brooks: "Solving the Find-Path Problem by Representing Free Space as Generalized Cones", A.I. Memo No. 674, MIT Cambridge/MA USA 1982

- [Brooks82c]
 R.A. Brooks: "Representing Possible Realities for Vision and Manipulation",
 in [PRIP82], pp. 587-592
- [Brooks83]
 R.A. Brooks: "Solving the Find-Path Problem by Good Representation of Free
 Space", *IEEE Trans. SMC-13* (1983) 190-196
- [Brooks&Lozano-Perez82]
 R.A. Brooks, T. Lozano-Perez: "A Subdivision Algorithm in Configuration
 Space for Findpath with Rotation", A.I. Memo No. 684, MIT, Cambridge/MA USA
 1982
- [Brooks&Lozano-Perez83]
 R.A. Brooks, T. Lozano-Perez: "A Subdivision Algorithm in Configuration
 Space for Findpath with Rotation", in [IJCAI83], im Druck
- [Bruss&Horn83]
 A.R. Bruss, B.K.P. Horn: "Passive Navigation" *Computer Vision, Graphics,
 and Image Processing* 21 (1983) 3-20
- [Bunke&Allermann83]
 H. Bunke, G. Allermann: "Inexact Graph Matching for Structural Pattern
 Recognition", *Pattern Recognition Letters* 1 (1983) 245-253
- [Chen76]
 C.H. Chen (Hrsg.): "Pattern Recognition and Artificial Intelligence",
 Academic Press, New York 1976
- [Cheng&Huang82]
 J.K. Cheng, T.S. Huang: "Recognition of Curvilinear Objects by Matching
 Relational Structures", in [PRIP82], pp. 343-348
- [Chen&Milgram82]
 M.J. Chen, D.L. Milgram: "A Development System for Machine Vision", in
 [PRIP82], pp. 512-517
- [Clocksin..82]
 W.F. Clocksin, J.W. Barratt, P.G. Davey, C.G. Morgan, A.R. Vidler:
 "Visually Guided Robot Arc-Welding of Thin Sheet Steel Pressings", in
 [ISIR82], pp. 225-230
- [Cronshaw82]
 A.J. Cronshaw: "Automatic Chocolate Decoration by Robot Vision", in
 [ISIR82], pp. 249-257
- [Decker83]
 H. Decker: "Elastischer Bildvergleich am Beispiel der automatischen Prüfung
 von Aluminiumgußteilen", 5. DAGM-Symposium 1983, dieser Band

- [Dodd&Rossol79]
 G.G. Dodd, L. Rossol (Hrsg.): "Computer Vision and Sensor-Based Robots",
 Plenum Press New York London 1979, Proc. Symposium in Warren/MI USA, Sept.
 1978
- [Duff82]
 M.J.B. Duff: "Special Hardware for Pattern Processing", in [ICPR82],
 pp. 368-379
- [Enderle82]
 E. Enderle: "Automatische Analyse von Binärbildern aufgrund relationaler
 Modelle", in [Radig81], pp. 55-60
- [Faugeras..82]
 O.D. Faugeras, F. Germain, G. Kryse, J.D. Boissonnat, M. Hebert, J. Ponce:
 "Toward a Flexible Vision System", in [ISIR82], pp. 67-78
- [Faugeras&Ponce83]
 O.D. Faugeras, J. Ponce: "Prism Trees: A Hierarchical Representation for
 3-D Objects", in [IJCAI83], im Druck
- [Faux&Pratt79]
 I.D. Faux, M.J. Pratt: "Computational Geometry for Design and Manufacture",
 Ellis Horwood, Chichester/England, 1979
- [Feldman69]
 J.A. Feldman et al.: "The Stanford Hand-Eye Project", [IJCAI69] pp. 521-526
- [Ferrer..81]
 M. Ferrer, M. Briot, J.C. Talon: "Study of a Video Image Treatment System
 for the Mobile Robot HILARE", in [RV81], pp. 59-71
- [Fischler78]
 M.A. Fischler: "On the Representation of Natural Scenes", in
 [Hanson&Riseman78], pp. 47-52
- [Fikes72]
 R. Fikes, P. Hart, N.Nilsson: "Learning and Executing Generalised Robot
 Plans", *Artificial Intelligence* 3 (1972) 251-288
- [Foith79]
 J.P. Foith (Hrsg.): "Angewandte Szenenanalyse", 2. DAGM-Symposium,
 Karlsruhe 1979, Informatik Fachberichte 20, Springer-Verlag Berlin
 Heidelberg New York 1979
- [Foith..80]
 J.P. Foith, C. Eisenbarth, E. Enderle, H. Geißelmann, H. Ringshauser, G.
 Zimmermann: "Optischer Sensor für Erkennung von Werkstücken auf dem
 laufenden Band, realisiert mit einem modularen System", in [Steusloff80],
 pp. 135-155

- [Fu81]
K.S. Fu: "Syntactic Models for Image Analysis", in [Radig81], pp. 271-295
- [Fu82]
K.S. Fu: "Syntactic Pattern Recognition and Applications", Prentice Hall, Englewood Cliffs/NJ USA 1982
- [Geißelmann80]
H.Geißelmann: "Griff in die Kiste durch Vereinzelnung und optische Erkennung", in [Steusloff80], pp. 156-165
- [Gibson&Lucas82]
L. Gibson, D. Lucas: "Spatial Data Processing Using Generalized Balanced Ternary", in [PRIP82], pp. 566-571
- [Glazer81]
F. Glazer: "Computing Optical Flow", in [IJCAI81], pp. 644-647
- [Goldstein50]
H. Goldstein: "Classical Mechanics", Addison-Wesley, Reading/MA USA, 1950
- [Graham&Choong81]
D. Graham, Y.C. Choong: "Robot Vision in Automated Surface Finishing", in [RV81], pp. 113-123
- [Grimson81]
W.E.L. Grimson: "From Images to Surfaces: A Computational Study of the Human Early Visual System", MIT Press Cambridge/MA USA 1981
- [Haass..82]
U.L. Haass, H.-B. Kuntze, W. Schill: "Ein Überwachungssystem zur Hinderniserkennung und Kollisionsverhütung im Arbeitsraum von Industrierobotern", in [IPA82], pp. 179-189
- [Hättich81]
W. Hättich: "Hierarchische Kombination eines strukturellen und numerischen Verfahrens zur Erkennung und Lagebestimmung überlappender Werkstücke", in [Radig81], pp. 61-67
- [Hanson&Riseman78]
A. Hanson, E. Riseman (Hrsg.): "Computer Vision Systems", Academic Press New York 1978
- [Haralick78]
R.M. Haralick: "Scene Analysis, Arrangements, and Homomorphisms", in [Hanson&Riseman78], pp. 199-212
- [Hermann82]
J.-P. Hermann: "Pattern Recognition in the Factory: An Example", in [ISIR82], pp. 271-280

[Hewkin&Fuchs82]

P.F. Hewkin, H.-J. Fuchs: "Neue Fähigkeiten des OMS Sichtsystems", in [IPA82], pp. 165-178

[Hille81]

G. Hille: "Methoden und Modelle in der Bildsegmentation: Eine Übersicht", Bericht IfI-HH-B80/81 des Fachbereichs für Informatik der Universität Hamburg, 1981

[Holland..79]

S.W. Holland, L. Rossol, M. R. Ward: "CONSIGHT-I: A Vision-Controlled Robot System for Transferring Parts from Belt Conveyors", in [Dodd&Rossol79], pp. 81-97

[Hollerbach82]

J.M. Hollerbach: "Dynamics", in [Brady..82], pp. 51-71

[Horn75]

B.K.P. Horn: "Obtaining Shape from Shading Information", in [Winston75], pp. 115-155

[Horn77]

B.K.P. Horn: "Understanding Image Intensities", *Artificial Intelligence* 8 (1977) 201-231

[Horn&Shunck81]

B.K.P. Horn, B.G. Shunck: "Determining Optical Flow" in [Brady81], pp. 185-204

[Hunter&Steiglitz79]

G.M. Hunter, K. Steiglitz: "Operations on Images Using Quad Trees", *IEEE Trans. PAMI-1* (1979) 145-153

[Hwang&Hall82]

J. J. Hwang, E. L. Hall: "Matching of Featured Objects Using Relational Tables from Stereo Images", *Comp. Graphics Image Proc.* 20 (1982) 22-42

[ICPR82]

6th Intern. Conference on Pattern Recognition Oct. 1982, München IEEE Computer Society Press, Silver Spring/MD, USA 1982

[Idesawa73]

M. Idesawa: "A System to Generate a Solid Figure from Three Views", *Bulletin of the JSME* 16 (1973) 216-225

[IJCAI69]

Proc. Intern. Joint Conference on Artificial Intelligence May 1969, Washington/DC USA, Univ. Microfilms Intern., Ann Arbor/MI USA

[IJCAI81]

Proc. 7th Intern. Joint Conference on Artificial Intelligence, August 1981, Vancouver/BC Canada, AAAI, Menlo-Park/CA USA 1981

- [IJCAI83]
Proc. 8th Intern. Joint Conference on Artificial Intelligence, August 1983, Karlsruhe, im Druck
- [Ikeuchi&Horn81]
K. Ikeuchi, B.K.P. Horn: "Numerical Shape from Shading and Occluding Boundaries", in [Brady81], pp. 141-184
- [IPA82]
Sensorsysteme zur Automatisierung der Produktion, 15. IPA Arbeitstagung, Nov. 1982 Stuttgart, IFS Ltd. Kempston/Bedford England, 1982
- [Ishii&Nagata76]
M. Ishii, T. Nagata: "Feature Extraction of Three-Dimensional Objects and Visual Processing in a Hand-Eye System Using Laser Tracker", *Pattern Recognition* 8 (1976) 229-237
- [ISIR82]
12th International Symposium on Industrial Robots; 6th International Conference on Industrial Robot Technology, Juni 1982 Paris, IFS Ltd. Kempston/Bedford England, 1982
- [Jackins&Tanimoto80]
C.L. Jackins, S.L. Tanimoto: "Oct-trees and their Use in Representing 3-D Objects", *Comp. Graphics Image Proc.* 14 (1980) 249-270
- [Jain82]
R. Jain: "Segmentation of Moving Observer Frame Sequences", *Pattern Recognition Letters* 1 (1982) 115-120
- [Jain83]
R. Jain: "Segmentation of Frame Sequence Obtained by a Moving Observer", Bericht GMR-4247 General Motors Research Lab. Warren/MI USA 1983
- [Jarvis83]
R.A. Jarvis: "A Perspective on Range Finding Techniques for Computer Vision", *IEEE Trans. PAMI-5* (1983) 122-139
- [Jentner&Schmidberger82]
W. Jentner, E.J. Schmidberger: "Lösung von Aufgaben industrieller Qualitätsprüfung mittels Bildverarbeitungssystemen", in [IPA82], pp. 191-202
- [Johnston81]
E. Johnston: "Spray Painting Random Shapes Using CCTV Camera Control", in [RV81], pp. 187-192
- [Kazmierczak80]
H. Kazmierczak (Hrsg.): "Erfassung und maschinelle Verarbeitung von Bilddaten", Springer-Verlag, Wien New York 1980

- [Kinnucan81]
 P. Kinnucan: "How Smart Robots becoming Smarter", *High Technology*,
 Sept./Oct. 1981, 32-40
- [Kinnucan83]
 P. Kinnucan: "Machines that see", *High Technology*, April 1983, 30-36
- [Kitchen80]
 L. Kitchen: "Relaxation Applied to Matching Quantitative Relational
 Structures", *IEEE Trans. SMC-10* (1980) 96-101
- [Kreis..82]
 T. Kreis, H. Kreitlow, W. Jüptner: "Kantenfindung mit Hilfe eines
 kombinierten Lichtschnittverfahrens", in [IPA82], pp. 11-20
- [Lee80]
 D.T. Lee: "The Optical Flow Field: The Foundation of Vision", *Phil. Trans.
 Royal Soc. London*, B290 (1980) 169-179
- [Lee&Fu82]
 H.C. Lee, K.S. Fu: "A Computer Vision System for Generating Object
 Description", in [PRIP82], pp. 466-472
- [Lee&Rosenfeld83]
 C.-H. Lee, A. Rosenfeld: "Albedo Estimation for Scene Segmentation",
Pattern Recognition Letters 1 (1983) 155-160
- [Levi&Weirich83]
 P. Levi, E. Weirich: "Lasergestützte Qualitätskontrolle mit synthetischen
 Bildern", 5. DAGM-Symposium 1983, dieser Band
- [Levi..83]
 P. Levi, H. Stiefvater, L. Vajta: "Integriertes Laser-Kamera System für die
 industrielle Bilderfassung", 5. DAGM-Symposium 1983, dieser Band
- [Lozano-Perez82a]
 T. Lozano-Perez: "Task Planning", in [Brady..82], pp. 473-498
- [Lozano-Perez82b]
 T. Lozano-Perez: "Automatic Planning of Manipulator Transfer Movements", in
 [Brady..82], pp. 499-535
- [Luh83]
 J.Y.S. Luh: "An Anatomy of Industrial Robots and Their Controls", *IEEE
 Trans. AC-28* (1983) 133-152
- [Mackworth73]
 A.K. Mackworth: "Interpreting Pictures of Polyhedral Scenes", *Artificial
 Intelligence* 4 (1973) 121-137

- [Makhlin82]
A.G. Makhlin: "Vision Controlled Assembly by a Multiple Manipulator Robot", in [RV82], pp. 83-92
- [Marr78]
D. Marr: "Representing Visual Information - a Computational Approach", in [Hanson&Riseman78], pp. 61-80
- [Mason82]
M.T. Mason: "Compliant Motion", in [Brady..82], pp. 305-322
- [McCarthy 68]
J. McCarthy et al.: "A Computer with Hands, Eyes and Ears", AFIPS Conf. Proc. FJCC 1968, pp. 329-338
- [McPherson..82]
C.A. McPherson, J.B.K. Tio, F.A. Sadjadi, E.L. Hall: "Curved Surface Representation for Image Recognition", in [PRIP82], pp. 363-369
- [Meagher82]
D.J. Meagher: "Efficient Synthetic Image Generation of Arbitrary 3-D Objects", in [PRIP82], pp. 473-478
- [Mimaroglu82]
T. Mimaroglu: "A High-Speed Two-Dimensional Hardware Convolver for Image Processing" in [PRIP82], pp. 386-389
- [Minsky 66]
M.L. Minsky: "An Autonomus Manipulator System", Project MAC Progress Report 111, MIT, Cambridge/MA, 1966
- [Moravec80]
H.P. Moravec: "Obstacle Avoidance and Navigation in the Real World by a Seeing Robot Rover", Ph.D. Dissertation Stanford AIM-340, Stanford Univ. Sept. 1980
- [Nagel82]
H.-H. Nagel: "On Change Detection and Displacement Vector Estimation in Image Sequences", *Pattern Recognition Letters* 1 (1982) 55-59
- [Nagel83a]
H.-H. Nagel: "Displacement Vectors Derived from Second-Order Intensity Variations in Image Sequences", *Computer Vision, Graphics, and Image Processing* 21 (1983) 85-117
- [Nagel83b]
H.-H. Nagel: "Constraints for the Estimation of Displacement Vectorfields from Image Sequences", in [IJCAI83], im Druck
- [Neumann81]
B. Neumann: "3D-Information aus mehrfachen Ansichten", in [Radig81], pp. 93-111

- [Niepold80]
 R. Niepold: "Ein Fernsensoren zur Überwachung und Regelung von Schweißprozessen", in [Steusloff80], pp. 166-183
- [Niepold&Brünner82]
 R. Niepold, Brünner: "Ein optisches System zur Überwachung und Regelung von Lichtbogenschweißprozessen", in [IPA82], pp. 117-132
- [Okada82]
 T. Okada: "Development of an Optical Distance Sensor for Robots", *Robotics Research* 1 4(1982) 3-14
- [Ossenberg80]
 K. Ossenberg: "Optische Sensorsysteme für industrielle Anwendungen", in [Steusloff80], pp. 97-126
- [Patzelt82]
 W. Patzelt: "A Robot Position Control Algorithm for the Grip onto an Accelerated Conveyor Belt", in [ISIR82], pp. 391-399
- [Pavlidis77]
 T. Pavlidis: "Structural Pattern Recognition", Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1977
- [Perkins78]
 W.A. Perkins: "A Model-Based Vision System for Industrial Parts", *IEEE Trans. C-27* (1978) 126-143
- [Prazdny80]
 K. Prazdny: "Egomotion and Relative Depth Map from Optical Flow", *Biological Cybernetics* 36 (1980) 87-102
- [PRIP82]
 Proc. Conference on Pattern Recognition and Image Processing, IEEE Computer Society Press, Silver Spring/MD, USA 1982
- [Pugh82]
 A. Pugh: "Second Generation Robotics", in [ISIR82], pp. 1-8
- [Radig81]
 B. Radig (Hrsg.): "Modelle und Strukturen", 4. DAGM-Symposium, Hamburg 1981, Informatik Fachberichte 49, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1981
- [Radig82]
 B. Radig: "Symbolische Beschreibung von Bildfolgen I: Relationengebilde und Morphismen", Bericht IfI-HH-B90/82 des Fachbereiches für Informatik der Universität Hamburg, 1982
- [Radig83]
 B. Radig: "Image Sequence Analysis Using Relational Structures", *Pattern Recognition* (im Druck); Mitteilung IFI-HH-M-106 des Fachbereiches für Informatik der Universität Hamburg, 1983

- [Raibert&Tanner82a]
M.H. Raibert, J.E. Tanner: "A VLSI Tactile Array Sensor", in [ISIR82], pp. 417-425
- [Raibert&Tanner82b]
M.H. Raibert, J.E. Tanner: "Design and Implementation of a VLSI Tactile Sensing Computer", *Robotics Research* 1 3(1982) 3-18
- [Reddy&Hon79]
D.R. Reddy, R.W. Hon: "Computer Architecture for Vision", in [Dodd&Rossol79], pp. 169-185
- [Requicha80]
A.A.G. Requicha: "Representation for Rigid Solids: Theory, Methods and Systems", *Computing Surveys* 12 (1980) 437-464
- [RV81]
Robot Vision and Sensory Controls, Proc. 1st Intern. Conference April 1981, Stratford-upon-Avon, UK, IFS Ltd. Kempston/Bedford England, 1981
- [RV82]
Robot Vision and Sensory Controls, Proc. 2nd International Conference Nov. 1982, Stuttgart, IFS Ltd. Kempston/Bedford England, 1982
- [Röcker75]
F. Röcker: "Zum Problem der automatischen Analyse dreidimensionaler Szenen", Dissertation, Universität Karlsruhe, Nov. 1975
- [Rohde82]
A. Rohde: "Anwendung eines Bildanalysators in der Qualitätskontrolle", in [IPA82], pp. 29-38
- [Rosen79]
C.A. Rosen: "Machine Vision and Robotics: Industrial Requirements". in [Dodd&Rossol79], pp. 3-20
- [Rosenfeld&Davis79]
A. Rosenfeld, L. S. Davis: "Image Segmentation and Image Models", *Proc. IEEE* 67 (1979) 764-772
- [Salmon&d'Auria79]
M. Salmon, A. d'Auria: "Programmable Assembly System", in [Dodd&Rossol79], pp. 153-163
- [Schweizer&Haaf80]
M. Schweizer, D. Haaf: "Taktile Sensoren und ihre Anwendung in programmierbaren Montagesystemen", in [Steusloff80], pp. 184-199
- [Shapiro&Haralick81]
L. G. Shapiro, R. M. Haralick: "Structural Descriptions and Inexact Matching", *IEEE Trans. PAMI-3* (1981) 504-519

- [Shirai79]
Y. Shirai: "Three-Dimensional Computer Vision", in [Dodd&Rossol79],
pp. 187-205
- [Srihari81]
S.N. Srihari: "Representation of 3-D Digital Images", *ACM Comput. Surveys*
13 (1981) 399-424
- [Srihari82]
S.N. Srihari: "Hierarchical Data Structures and Progressive Refinement of
3-D Images", in [PRIP82], pp. 485-490
- [Stein83]
G. Stein: "Automatische Strukturanalyse von Bildsignalen aufgrund
rechnerinterner Modelle aus lokalen Formmerkmalen", 5. DAGM-Symposium 1983,
dieser Band
- [Steusloff80]
H. Steusloff (Hrsg.): "*Wege zu sehr fortgeschrittenen Handhabungssystemen*",
Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1980
- [Taylor..82]
P.M. Taylor, K.K.W. Selke, G.E. Taylor: "Closed Loop Control of an
Industrial Robot using Visual Feedback from a Sensor Gripper", in [ISIR82],
pp. 79-86
- [Tenenbaum79]
J.M. Tenenbaum, H.G. Barrow, R.C. Bolles: "Prospects for Industrial
Vision", in [Dodd&Rosol79], pp. 239-256
- [Tio..82]
J.B.K. Tio, C.A. McPherson, E.L. Hall: "Curved Surface Measurement for
Robot Vision", in [PRIP82], pp. 370-378
- [Tsai&Fu83]
W.H. Tsai, K.S. Fu: "Subgraph Error-Correcting Isomorphisms for Syntactic
Pattern Recognition", *IEEE Trans. SMC-13* (1983) 48-61
- [Turner74]
K.J. Turner: "Computer Perception of Curved Objects Using a Television
Camera", Dissertation, Dept. of Machine Intelligence, University Edinburgh,
1974
- [Uno..79]
T. Uno, S. Ikeda, H. Ueda, M. Ejiri, T. Tokumaga: "An Industrial Eye that
Recognizes Hole Positions in a Water Pump Testing Process", in
[Dodd&Rossol79], pp. 101-114
- [Villers82]
P. Villers: "Present Industrial Use of Vision Sensors for Robot Guidance",
in [ISIR82], pp. 291-302

[Wahl..81]

F. Wahl, H. Giebel, L. Abele: "Texturanalyseverfahren zur Fehlermessung bei Glasbehältern", in [Radig81], pp. 303-309

[Walter&Tropf83]

I. Walter, H. Tropf: "Erweiterte Übergangnetze als Modell zur 3-D Erkennung von Werkstücken in Einzelbildern", 5. DAGM-Symposium 1983, dieser Band

[Warnecke&Melchior82]

H.-J. Warnecke, K. Melchior: "Bildverarbeitung als Mittel zur Automatisierung", in [IPA82], pp 1-10

[Warnecke..82]

H.-J. Warnecke, M. Schweizer, I. Schmidt: "Computer Controlled Magazing System", in [ISIR82], pp. 197-216

[Winston75]

P.H. Winston (Hrsg.): "Psychology of Computer Vision", McGraw-Hill, New York, 1975

[Witkin81]

A. P. Witkin: "Recovering Surface Shape and Orientation from Texture", in [Brady81], pp. 17-45

[Woodham81]

R. J. Woodham: "Analyzing Images of Curved Surfaces", in [Brady81], pp. 117-140

[Yakimovsky&Cunningham76]

Y. Yakimovsky, R. Cunningham: "DABI - A Data Base for Image Analysis with Nondeterministic Inference Capability", in [Chen76], pp. 554-592