

Entnahmestrategien zur Objektvereinzelung
mittels Industrierobotern

Picking Strategies for Object Singularization
using Industrial Robots

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

der Fakultät für Informatik
der Universität Karlsruhe (Technische Hochschule)

vorgelegte

D i s s e r t a t i o n

von

Dipl.-Ing. Markus Müller

aus Herxheim

Tag der mündlichen Prüfung: 15. Mai 2001

Erster Gutachter: Prof. Dr.-Ing. H. Wörn

Zweiter Gutachter: Prof. Dr.rer.nat. H. Steusloff

Müller, Markus:

Entnahmestrategien zur Objektvereinzelung mittels Industrierobotern =

Picking Strategies for Object Singularization using Industrial Robots [online].

Karlsruhe, Univ., Fak. für Informatik, Diss., 2001.

<http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/cgi-bin/psview?document=2001/informatik/2>

CD-ROM inliegend. - 2001

© Markus Müller, Hauptstraße 31, 76863 Herxheimweyher, Germany

Das Werk ist in allen seinen Teilen urheberrechtlich geschützt. Vervielfältigungen sind für Forschungs- und Entwicklungszwecke bei offizieller und offensichtlicher Zitierung erlaubt. Gewerbliche Vervielfältigungen erfordern die ausdrückliche Zustimmung des Autors. Der Autor haftet nicht für eventuelle Schäden, welche sich bei Anwendung der in diesem Werk beschriebenen Strategien ergeben.

Kurzfassung

Die automatisierte Objektentnahme aus ungeordneten Anhäufungen ermöglicht wirtschaftlich vorteilhafte Abläufe in der Industrie und eröffnet neue Anwendungsbereiche für die Service-Robotik. Ausgehend von einer neuen Klassifizierung bisheriger *Robotersysteme zur Objektentnahme* (RO) aus Entwicklersicht in vier Generationen stellt die vorliegende Dissertation eine neue Strategie zur Objektentnahme vor und leitet somit die fünfte Generation von ROs ein. Das Besondere an der neuen Strategie ist das zuvor unerreichte hohe Maß an Sicherheit für die Objekte in der Szene gegen schwere Kollisionen und unbeabsichtigtes Mitaneben bei gleichzeitig sehr großer möglicher Objektvielfalt. Einige wesentliche eingesetzte Methoden sind

- die explizite Bestimmung, inwieweit sich der Roboter bei der Ausführung von Entnahmeoperationen im sicherlich freien, im durch Objekte größtenteils belegten bzw. im unbekanntem Bereich befindet,
- die optimierte Auswahl von Greifwerkzeugen und Griffen,
- die Ausführung von Untersuchungsoperationen (UO) zur Gewinnung von Beziehungsinformation zwischen Objektteilen, welche durch in Bildern der Szene segmentierte Szenenbereichshinweise beschrieben werden,
- die Entwicklung eines neuen Weltmodells, welches neben der Darstellung der Beziehungsinformation auch die direkte Integration bisheriger Strategien erlaubt,
- die Propagation von Beziehungsinformation zur Einsparung von UOs
- sowie die gezielte Überwachung hinsichtlich ungewollter Mitbewegung von Objektteilen, welche mit dem gegriffenen Objektteil kein gemeinsames reales Objekt bilden.

Zahlreiche experimentelle Ergebnisse sowie die erfolgreiche Erprobung im Rahmen eines Benchmarking-Prozesses unterstreichen die Bedeutung der vorgestellten Strategie und Algorithmen.

Abstract

The automated picking of objects from unstructured heaps enables profitable applications in industry and opens new scopes for the service robotics. Starting from a new classification of previous *robot systems for object picking* (RO) into four generations according to the developers view, the dissertation presents a new strategy for object picking and initiates the fifth generation of ROs. The particularity of the new strategy is the high degree of reliability for a very big variety of different objects in the scene against grave collision and unintended lifting, which has not been reached before. Some of the essentially applied methods are:

- the explicit determination of the sections of the grasp trajectory, in which the robot has to move in free, object or unknown regions,
- the optimized choice of grippers and grasps,
- the execution of exploratory tasks in order to acquire connectivity information about object parts, which are described by scene domain cues, the latter being segmented in images of the scene,
- the development of a new world model, which renders possible the direct integration of previous strategies in addition to the representation of the connectivity information,
- the propagation of the connectivity information in order to save exploratory tasks,
- as well as the execution of verification tasks for the detection of undesired liftings of neighbouring, not grasped objects.

Numerous experiments as well as the successful test in a benchmarking process underscore the significance of the presented strategy and algorithms.

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Prozeßrechentechnik, Automation und Robotik (IPR) der Universität Karlsruhe (TH) in der Zeit von März 1997 bis Mai 2001.

Meinem verehrten Lehrer, Herrn Professor Dr.-Ing. Heinz Wörn, danke ich herzlich für die praxisnahe fachliche und sehr persönliche Betreuung meiner Arbeit sowie für die Übergabe der Konzeption und Koordination zahlreicher Industrieprojekte, welche meine persönliche Weiterentwicklung deutlich über die Grenzen dieser Arbeit hinaus förderte. Ebenso danke ich Herrn Professor Dr.rer.nat. Hartwig Steusloff, Leiter des Fraunhofer-Instituts für Informations- und Datenverarbeitung (IITB), für seine wertvollen und über die reine Technik hinausgehenden Anregungen sowie für die Übernahme des Korreferats.

Bedanken möchte ich mich auch bei Herrn Dr.-Ing. Derk Rembold für die gute Zusammenarbeit innerhalb des vom Bmb+f^{V.1} geförderten Verbundprojekts KORINNA^{V.2}, aus dem diese Arbeit hervorging. Für die Unterstützung bei der verwaltungstechnischen Koordination des Verbundprojekts danke ich Herrn Dr.-Ing. Thomas Längle.

Den zahlreichen Kollegen, Studenten und Mitarbeitern der im Verbundprojekt mitgewirkten Firmen, die insbesondere zur erfolgreichen Realisierung des Demonstrators beigetragen haben, bin ich sehr dankbar. Insbesondere erwähnen möchte ich Herrn Frank Beeh (Schnittstelle zur Robotersteuerung, Lektorat der Arbeit), Herrn Sven Fahrer (Greiferkonstruktion und -fertigung bei der Fa. IPR GmbH), Herrn Roland Heinemann (Mechanische Sensorintegration), Herrn Martin Leisener (Benchmarking), Herrn Juan Antonio Bueno Mendieta (Integration taktiler Sensorfolien), Herrn Marco Metzger (Schnittstelle zur Greifersteuerung), Herrn Dirk Osswald (Lektorat der Arbeit), Herrn Stefan Pruchniewski der Fa. Quelle AG (Peripheriegestaltung des Demonstratoraufbaus), Herrn Hartmut Regner (Mechanische Präzisionsarbeiten), Frau Evelyn Remde (Mathematische Formalisierungen), Herrn Alexander Schönbohm (Kommunikationsnetz), Herrn Manfred Schedl der DLR (Bereitstellung des miniaturisierten Laserscanners), Herrn Hartmut Schubert der Fa. Vitronic GmbH (Aufbau des Laserscanners über der Szene), Herrn Sergej Stepanov (Schnittstelle zu RobCAD, vielfältige softwaretechnische Hinweise), Herrn Steffen Tritschler der Fa. AMS GmbH (Aufbau der Greifersteuerung) und Herrn Ye Xu (Sensorintegration).

Herzlich danken möchte ich meinen lieben Eltern für ihre stetige Begleitung und frühe Richtungsweisung auf meinem Lebensweg. Die zahllosen Abende und Wochenenden, an denen ich in den vergangenen vier Jahren forschte, entwickelte und die Arbeit verfaßte, waren jedoch nur möglich durch die Motivation und Unterstützung meiner geliebten Ehefrau Daniela, der ich hiermit – auch für die Geburt unserer Tochter Marla – außerordentlich danke.

Herxheimweyher, Mai 2001

Markus Müller

^{V.1} Bundesministerium für Bildung und Forschung der Bundesrepublik Deutschland

^{V.2} Komponenten für Roboter in innovativen Anwendungen

Für Marla

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Einführung | 1 |
| 1.1 | Motivation und Problemstellung | 1 |
| 1.2 | Einordnung und Abgrenzung der Arbeit | 3 |
| 1.2.1 | Anwendung | 3 |
| 1.2.2 | Objektspektrum | 3 |
| 1.2.3 | System für Objektentnahme | 4 |
| 1.3 | Zielstellung | 4 |
| 1.4 | Vorgehensweise zur Problemlösung und Gliederung der Arbeit | 5 |
| 1.5 | Zusammenfassung der Einführung | 7 |
| | | |
| 2 | Stand der Forschung | 9 |
| 2.1 | Herkömmliche Unterscheidung von <i>Robotersystemen zur Objektentnahme</i> (RO) nach Problemklassen | 9 |
| 2.2 | Neue Klassifizierung in <i>Generationen von Robotersystemen zur Objektentnahme</i> (GRO) nach verschiedenen Strategien | 10 |
| 2.2.1 | Interpretationszyklus | 11 |
| 2.2.2 | Erste Generation: „Blindes Entnehmen“ | 17 |
| 2.2.3 | Zweite Generation: „Suche nach Greifpunkten“ | 18 |
| 2.2.4 | Dritte Generation: „Objektidentifikation mittels passiven Sehens“ | 21 |
| 2.2.5 | Vierte Generation: „Objektidentifikation mittels aktiver Wahrnehmung“ | 25 |
| 2.3 | Diskussion und daraus resultierende weitere Vorgehensweise zur Problemlösung | 27 |
| 2.4 | Zusammenfassung des Kapitels | 28 |
| | | |
| 3 | Entwicklung eines Robotersystems zur Warenentnahme bei der Kommissionierung | 29 |
| 3.1 | Warenfluß in der Kommissionierzelle | 29 |
| 3.2 | Auswahl und Anordnung der Hardware | 30 |
| 3.3 | Systemarchitektur. | 35 |
| 3.4 | Simulation und Bedienung der Kommissionierzelle | 37 |
| 3.5 | Zusammenfassung des Kapitels | 38 |
| | | |
| 4 | Entwicklung von Benchmarks für <i>Robotersysteme zur Objektentnahme</i> (RO) | 39 |
| 4.1 | Benchmarking-Zyklus | 39 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 4.2 | Beim Benchmarking zu vermeidende Fehler | 41 |
| 4.3 | Kriterien zur Beschreibung von ROs | 42 |
| 4.4 | Entwicklung von Benchmarks zur Überprüfung der Leistungsfähigkeit verschiedener ROs | 46 |
| 4.4.1 | Benchmark „Verdeckter Bereich“ | 46 |
| 4.4.2 | Benchmark „Greiferwechsel“ | 47 |
| 4.4.3 | Benchmark „Ungewolltes Mitaneben“ | 48 |
| 4.5 | Zusammenfassung des Kapitels | 49 |
| 5 | Entwicklung einer neuen Greifplanung für ein RO der zweiten Generation | 51 |
| 5.1 | Neue Bestimmung von Griffen für die zuverlässige Objektentnahme bei Berücksichtigung verdeckter Bereiche | 51 |
| 5.1.1 | Bestimmung symbolischer Griffe und der Greiftrajektorie | 53 |
| 5.1.2 | Aufteilung der Szene in Frei-, Objekt- und Unbekannt-Bereiche | 55 |
| 5.1.3 | Modellierung der Greifwerkzeuge | 58 |
| 5.1.4 | Algorithmus zur Bestimmung möglicher numerischer Griffe | 61 |
| 5.1.5 | Sonderfälle bei der Überprüfung auf Kollisionen | 64 |
| 5.2 | Optimierte Auswahl von Griffen für die Objektentnahme | 67 |
| 5.3 | Experimente zur Überprüfung der entwickelten Greifplanungsalgorithmen | 70 |
| 5.3.1 | Benchmark „Verdeckter Bereich“ | 70 |
| 5.3.2 | Benchmark „Greiferwechsel“ | 71 |
| 5.3.3 | Benchmark „Ungewolltes Mitaneben“ | 73 |
| 5.3.4 | Demonstrator im realen Versandhandelsumfeld | 74 |
| 5.4 | Vergleich mit einem RO der dritten Generation | 75 |
| 5.4.1 | Benchmark „Verdeckter Bereich“ | 76 |
| 5.4.2 | Benchmark „Greiferwechsel“ | 76 |
| 5.4.3 | Benchmark „Ungewolltes Mitaneben“ | 78 |
| 5.5 | Bewertung der experimentellen Ergebnisse | 79 |
| 5.6 | Zusammenfassung des Kapitels | 80 |
| 6 | Entwicklung einer neuen Strategie zur Objektentnahme: RO der fünften Generation | 81 |
| 6.1 | Neue Strategie zur Objektentnahme | 81 |
| 6.1.1 | Zielstellung | 81 |
| 6.1.2 | Lösungskonzept | 82 |
| 6.1.3 | Abstrakte Darstellung der Vorgehensweise | 85 |
| 6.2 | Weltmodell zur Darstellung von Beziehungen zwischen Primitiven | 86 |
| 6.2.1 | Beziehungen zwischen Primitiven | 86 |
| 6.2.2 | Darstellung in Graphen | 90 |
| 6.2.3 | Darstellung in Matrizen | 91 |
| 6.2.4 | Gleichmäßigkeit der Untersuchungen | 91 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 6.2.5 | Clusterung | 94 |
| 6.3 | Propagation von Bewertungen | 97 |
| 6.3.1 | Konstruktion des Propagationsoperators | 98 |
| 6.3.2 | Verallgemeinerung auf Propagation über längere Kantenzüge | 99 |
| 6.3.3 | Eigenschaften des Propagationsoperators | 99 |
| 6.3.4 | Arbeitsersparnis bei Diagonal- und Triagonalpropagation | 101 |
| 6.3.5 | Durchführung der Propagation in der Matrixdarstellung | 103 |
| 6.3.6 | Optimales Untersuchungsmuster | 105 |
| 6.4 | Allgemeines Sensorkonzept für ROs der fünften Generation | 111 |
| 6.4.1 | Abgrenzung des Konzepts gegenüber bisherigen Ansätzen | 111 |
| 6.4.2 | Sensorintegration und -fusion | 111 |
| 6.4.3 | Anforderungen an die Sensorik | 112 |
| 6.4.4 | Beispiele für Untersuchungs- und Überwachungsoperationen | 113 |
| 6.4.5 | Regeln zur Anordnung und Auswahl von Sensoren | 117 |
| 6.5 | Entwicklung eines ROs der fünften Generation | 118 |
| 6.5.1 | Anwendung auf die Warenentnahme bei der Kommissionierung | 118 |
| 6.5.2 | Integration vorhandener Zusatzinformation | 119 |
| 6.5.3 | Gesamtablauf der Warenentnahme | 120 |
| 6.5.4 | Umgang mit flexiblen und gekrümmten Objekten | 122 |
| 6.6 | Abschätzungen zur Wirtschaftlichkeit | 122 |
| 6.6.1 | Methodik zur Wirtschaftlichkeitsabschätzung | 122 |
| 6.6.2 | Einflußfaktoren | 123 |
| 6.6.3 | Effektive Kosten für eine Objektentnahme | 125 |
| 6.6.4 | Gegenüberstellung der Kosten | 127 |
| 6.6.5 | Beispiele für Abschätzungen zur Wirtschaftlichkeit | 127 |
| 6.7 | Experimentelle Ergebnisse | 129 |
| 6.7.1 | Benchmark „Ungewolltes Mitaneben“ | 129 |
| 6.7.2 | Beurteilung der Versuchsergebnisse | 140 |
| 6.7.3 | Vergleich mit ROs der zweiten und dritten Generation | 140 |
| 6.8 | Zusammenfassung des Kapitels | 140 |
| 7 | Zusammenfassung und Ausblick | 141 |
| 7.1 | Zusammenfassung der Arbeit und neue Beiträge zum Stand der Forschung | 141 |
| 7.2 | Ausblick auf sinnvolle Weiterentwicklungen | 143 |
| 8 | Summary of the Dissertation in English | 145 |
| 8.1 | Goals of the Dissertation | 145 |
| 8.2 | State of the Art | 145 |
| 8.3 | Developments | 146 |
| 8.3.1 | Planning of Feasible Grasp Configurations in Unstructured Scenes | 146 |
| 8.3.2 | Optimized Gripper and Grasp Choice | 146 |

| | |
|--|-----|
| 8.3.3 A New Picking Strategy: RO of the Fifth Generation | 147 |
| 8.4 Experimental Results | 147 |
| 8.5 Potentials | 147 |
| 8.6 Perspectives | 148 |

Anhang A

Bildauswertung zur Segmentierung eines Tiefenbilds der Szene in ebene

| | |
|---|------------|
| Flächenstücke nach M. Trobina | 149 |
| A1 Überblick | 149 |
| A2 Vorverarbeitung | 149 |
| A3 Plazierung von Keimzellen und Regionenwachstum | 149 |
| A4 Nachbearbeitung und Kantenglättung | 150 |
| A5 Experimentelle Ergebnisse | 150 |

Anhang B

Lokalisation von in Folie verpackter Weichware zwischen Hartware

| | |
|--|-----|
| B1 Überblick | 153 |
| B2 Regeln zur Lokalisation von in Folie verpackter Weichware | 154 |
| B3 Experimentelle Ergebnisse | 155 |

Anhang C

Verdeckungsrobustes Wiedererkennen ebener Flächenstücken im 3D-Raum

| | |
|--|-----|
| C1 Überblick | 157 |
| C2 Verfahren zum Wiedererkennen ebener Flächenstücke | 157 |
| C3 Experimentelle Ergebnisse | 159 |

Literaturverzeichnis

Lebenslauf des Autors

161

173

Kapitel 1

Einführung

1.1 Motivation und Problemstellung

"Wenn wir aufhören, besser sein zu wollen, hören wir auf, gut zu sein."
Alfred Herrhausen

Seit mehr als 20 Jahren werden Robotersysteme, welche in der Lage sind, Objekte von einem ungeordneten Haufen zuverlässig zu entnehmen, intensiv erforscht und entwickelt. Man sollte annehmen, daß es somit zahlreiche leistungsfähige käuflich verfügbare Robotersysteme zur Objektentnahme (ROs) gibt. Aber der Schein trügt! Keines der bisher realisierten Systeme erfüllt gleichzeitig wichtige Anforderungen an Flexibilität und Zuverlässigkeit, um universell einsetzbar zu sein. Beispielsweise ist es bisher unvorstellbar, daß ein RO von einem Warentisch in einem Kaufhaus, auf dem im Schlußverkauf verschiedenste Gegenstände liegen, einzelne Waren kollisionsfrei entnimmt, und dabei auch noch gewährleisten kann, daß nicht irgendwelche benachbart daliegenden Waren an dem vom RO gegriffenen Gegenstand hängen bleiben und quasi versehentlich mit entnommen werden. Ähnliche ungeordnete Warenhaufen sind in verschiedenen wirtschaftlich bedeutenden Branchen anzutreffen bzw. wären logistisch sinnvoll, wenn es geeignete ROs zur flexiblen und zuverlässigen Objektentnahme gäbe.

Da es bisher kein solches RO gibt, wird bei der Logistikplanung von Produktionsanlagen, Transportvorgängen und in der Lagerhaltung quasi selbstverständlich darauf geachtet, daß die Objekte, welche bearbeitet, sortiert oder transportiert werden sollen, nicht durcheinander bzw. übereinander liegen und schon gar nicht gemischt auftreten, sondern automatisierungsfreundlich geordnet vorliegen. Dazu werden in aufwendiger Weise spezielle Lager- und Transportschalen entworfen und in großer Stückzahl gebaut, in denen oftmals jedes einzelne Objekt seinen eigenen Platz hat. Der Zugriff auf die geordneten Objekte und die Zuführung für weitere Verarbeitungsschritte kann dann durch Maschinen vorgenommen werden, welche durch feste Programmierung die Position und Orientierung der Objekte genau kennen und so die Objekte greifen können. Schlimmstenfalls müssen kleine Toleranzen über eine geeignete Sensorik oder durch passive Nachgiebigkeit ausgeglichen werden bzw. muß erkannt werden, ob das erwartete Objekt überhaupt an seinem Platz liegt. Wenn sich ungeordnete Objekthäufungen mit vielen verschiedenen a priori unbekanntem Objekten gar nicht vermeiden lassen, müssen bisher Menschen die gewünschten Objekte vom Haufen entnehmen.

Mit dem fortwährend ansteigenden Wettbewerbsdruck steigt auch die Forderung nach höchstmöglicher Automatisierung von Produktions- und Transportvorgängen, weshalb in zunehmendem Maße versucht wird, die Menschen bei diesen Entnahmevorgängen durch Maschinen zu ersetzen. Es wird in wirtschaftlich bedeutenden Branchen wie z.B. der Lagerhaltung im Lebensmittelhandel auch immer schwieriger, Menschen zu finden, die dazu bereit sind, schwere Lasten tagtäglich von Paletten oder Warenhaufen zu entnehmen und an anderer Stelle abzulegen. In manchen Gegenden beispielsweise der USA ist es inzwischen unmöglich, trotz extrem hoher Gehälter Arbeiter für diese Aufgaben zu finden. Dementsprechend steigt die Nachfrage nach universell einsetzbaren Maschinen zur zuverlässigen Objektentnahme.

Aufgrund des bisherigen Mangels an flexibel einsetzbaren zuverlässigen ROs versucht die Logistikplanung, Objekte erst gar nicht in Unordnung gelangen zu lassen. Wenn Unordnung von Objekten jedoch zugelassen werden kann, z.B. für eine chaotische gemischte Lagerhaltung, dann ist es unter Umständen möglich, wirtschaftlich Vorteile zu erzielen. Beispielsweise wird im Versandhandel ein großer Anteil der versendeten Ware von den Kunden wegen Nicht-Gefallens wieder zurückgesandt. Nach einer kurzen Sicht- oder Funktionsprüfung ist die Ware wieder für den Versand bereit. Logistisch kann sich ein Vorteil ergeben, wenn häufig versandte Retourenware nicht erst wieder in das Hauptlager zurückgebracht wird, sondern nach möglichst kurzer Zwischenlagerung wieder kommissioniert und versendet wird. Wenn die Waren geordnet und somit sortenrein zwischengelagert werden sollten, dann müßten bei der gewaltigen Warenvelfalt von mehreren Hundertausend verschiedenen Produkten großer Warenhäuser auch sehr viele Zwischenlagerplätze eingerichtet werden. Diese Zwischenlagerplätze würden erstens einen unangemessen großen Platz in Anspruch nehmen, welcher zunehmend teurer wird. Zweitens wären zahlreiche Zwischenlagerplätze meistens nur spärlich gefüllt, und drittens würden schon in diesem Zwischenlager enorme Transportwege entstehen. Deshalb kann in diesem Beispiel, welches aufgrund von E-Commerce in Zukunft sicherlich noch wesentlich an Bedeutung gewinnen wird, die chaotische gemischte Lagerung von Waren mit bedeutend weniger Zwischenlagerplätzen wirtschaftlich vorteilhaft sein.

Neben den wirtschaftlichen Vorteilen ungeordneter Objektanhäufungen gibt es vor allem im Servicebereich unzählige Beispiele, in denen die Unordnung von Objekten überhaupt nicht zu vermeiden ist. Beispielsweise wären Roboter wünschenswert, welche ein Zimmer aufräumen können, ohne Teile ihrer Umgebung zu zerstören oder ständig in unlösbare Situationen zu gelangen, weil ihnen die Objekte in ihrer Umgebung unbekannt sind. Als unlösbar wird hier eine Situation verstanden, in der sich die Umgebung anders verhält, als vom RO erwartet wird, beispielsweise wenn eine unerwartete Kollision auftritt, so daß die aktuelle Aufgabe mit der ausgewählten Strategie nicht gelöst werden kann und das RO deshalb die weitere Arbeit einstellt. Als weiteres Beispiel sind die großen Wannen allgemein bekannt, in die man in der Cafeteria sein Tablett mit dem Geschirr legen kann, wobei meistens die Teller oder Tassen beim Ablegen verrutschen. In der Küche steht dann Personal, welches das Geschirr wieder aus der Wanne entnimmt und in die Geschirrspülmaschine einlegt. Es gibt bisher keine Maschine, die das Entnehmen und Einräumen zuverlässig ausführen kann. Spätestens wenn jemand neben dem Geschirr auch noch irgendeinen anderen großen, komplex geformten Gegenstand in die Wanne legt, ergeben sich bei Verwendung bisher realisierter Maschinen wegen der ihnen unbekanntem Objekte im allgemeinen unlösbare Situationen.

Nicht zuletzt wird der Einsatz von ROs in Zukunft wirtschaftlich auch dadurch interessant, daß in den vergangenen Jahren die Preise für wichtige Komponenten von ROs wie Roboter, Prozessoren und Sensoren stark gesunken sind, während die bisher zur Vermeidung von Unordnung eingesetzten Lagerschalen, Magazine und Spannvorrichtungen noch immer

unflexibel und entsprechend teuer sind. Außerdem ermöglichen die heutzutage zur Verfügung stehenden schnellen Prozessoren die Ausführung komplexer Algorithmen in Echtzeit, also in einer Zeit, welche die Ausführung der Anwendung nicht bremst. Auch ist z.B. die Aufnahme von 3D-Bildern, aufgrund derer beispielsweise eine zuverlässige Greifplanung möglich ist, in den vergangenen Jahren drastisch beschleunigt worden und ist heute in Videoechtzeit, also mit 25Hz, möglich [Schroeder et al. 98].

Zusammenfassend kann festgehalten werden, daß es bisher keine Robotersysteme bzw. Maschinen gibt, die zuverlässig Objekte von einem ungeordneten Haufen entnehmen können und dabei so flexibel sind, daß sie auch mit Objekten und Situationen zurechtkommen, welche ihnen a priori nicht bekannt sind. Aber gerade durch solche Robotersysteme könnten zahlreiche Abläufe in Transport, Produktion, Lagerhaltung und im Servicebereich überhaupt erst automatisiert werden und erhebliche wirtschaftliche Vorteile erbringen.

1.2 Einordnung und Abgrenzung der Arbeit

1.2.1 Anwendung

In dieser Arbeit werden Systeme und Strategien untersucht, erforscht und entwickelt, welche dazu dienen, Objekte von ungeordneten Haufen zu entnehmen.

Die hier betrachteten Objekthaufen sind statisch. Die Strategien und Systeme sind also nicht darauf ausgerichtet, Objekte beispielsweise optimiert von Fließbändern zu entnehmen. Diese Annahme schränkt jedoch nicht die Möglichkeit ein, die Ergebnisse dieser Arbeit für bewegte Objekthaufen anzuwenden bzw. auszuweiten. Hierbei wäre lediglich eine Bewegung der Objektkoordinatensysteme zu berücksichtigen. Sehr wohl wird in dieser Arbeit berücksichtigt, daß sich der Objekthaufen selbst z.B. aufgrund lokaler Instabilitäten verändern kann bzw. daß noch Objekte hinzukommen können. Um jedoch eine erfolgreiche Entnahmeausführung zu begünstigen, sollte das Hinzukommen neuer Objekte zwischen einer visuellen Szenenaufnahme und dem Entnahmevorgang z.B. über Lichtschranken überwacht werden. Veränderungen der Szene könnten dann bereits in die Entnahmeplanung mitaufgenommen werden, so daß nicht erst während des Entnahmevorgangs eine problematische Situation erkannt und behoben werden muß, was zwar möglich aber ineffektiv ist.

Was mit den entnommenen Objekten anschließend geschieht, ist nicht Schwerpunkt dieser Arbeit. Beispielsweise kann sich ein Identifikations- bzw. Lokalisationsprozeß anschließen, um die entnommenen Objekte z.B. montieren oder präzise in Verarbeitungsmaschinen einlegen zu können.

1.2.2 Objektspektrum

Die zu entnehmenden Objekte sind im allgemeinen kein Schüttgut, also beispielsweise keine Haufen kleiner Schrauben oder Nägel. Solche Objekte dürfen herunterfallen und hochgeworfen werden. Diese Eigenschaft wird durch die weit verbreitet eingesetzten Schwingförderer genutzt, welche durch geeignete Bauformen und Vibrationen eine zuverlässige Vereinzelung der durcheinander liegenden Objekte ermöglichen.

Die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Objekte können beispielsweise verpackte Waren aus dem Versandhandel, Büro- oder Haushaltsgegenstände sein. Während der Entnahme sollen weder die gegriffenen Objekte selbst noch benachbarte Objekte herunterfallen, da sie dadurch selbst beschädigt werden oder aber anderen Objekten Schaden zufügen könnten.

In dieser Arbeit wird die Entnahme quasi starrer sowie flexibler oder biegeschlaffer Objekte untersucht. Einige Strategien zur zuverlässigen Objektentnahme sind hier auf quasi starre Objekte beschränkt, können jedoch auch auf die zuverlässige Entnahme flexibler Objekte ausgeweitet werden.

1.2.3 System für Objektentnahme

Gemäß der Problemstellung wird ein System benötigt, welches die flexible Handhabung quasi beliebiger Objekte in beliebiger Lage ermöglicht. Es gibt bisher keine Universalgreifer, welche das Greifen beliebiger Objekte, also kleiner, großer, starrer, flexibler, gekrümmter, usw. Objekte ermöglichen und dabei so schlank gebaut sind, daß sie kollisionsfrei überall hineingreifen können. Deshalb ist es sinnvoll, mehrere verschiedene Greifer zu verwenden. Roboter sind durch Austauschsysteme in der Lage, verschiedene Werkzeuge zu verwenden. Ein weiterer Vorteil insbesondere von Industrierobotern mit sechs oder mehr Achsen ist ihre Fähigkeit, mit dem Werkzeug, z.B. einem Greifer, jede beliebige Lage innerhalb ihres Arbeitsraumes einzunehmen.

Deshalb werden in dieser Arbeit Systeme zur Objektentnahme betrachtet und entwickelt, welche Roboter als Hauptkinematik verwenden.

1.3 Zielstellung

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung flexibler Strategien, Algorithmen und Systeme zur zuverlässigen Entnahme von Objekten von ungeordneten Haufen. Im folgenden wird näher beschrieben, was hierbei unter „flexibel“ und „zuverlässig“ verstanden wird.

Flexibilität bedeutet hier, daß die Objektentnahme nicht auf ein begrenztes a priori festgelegtes Objektspektrum beschränkt sein soll:

- Auch dem System unbekannte Objekte sollen entnommen werden können.
- Weiterhin soll die Entnahme bekannter Objekte nicht durch das Vorhandensein von dem System unbekanntem Objekten unmöglich werden.

Dem Begriff der Zuverlässigkeit werden hier insbesondere zwei Aspekte zugeordnet:

- Erstens soll das zu entnehmende Objekt sicher und zerstörungsfrei gegriffen, angehoben und durch den Roboter zum Zielort bewegt werden können. Dazu gehören unter anderem, daß kollisionsfreie An- und Abrückbewegungen für den Greifer geplant, die Greifposition und -kraft geeignet gewählt und instabile Griffe sowie unerwartete kritische Situationen wie Kollisionen oder Verklemmungen erkannt werden.
- Zweitens soll Sicherheit für Nachbarobjekte gewährleistet werden. Dazu gehört neben kollisionsfreien Roboterbahnen die Vermeidung von großen Verschiebungen in der Szene, welche im allgemeinen zu Instabilitäten und somit zum Herunterfallen von Objekten führen. Außerdem ist es wichtig, daß das System unbeabsichtigtes Mitaneheben von nicht gegriffenen Nachbarobjekten erkennt und geeignet darauf reagiert. Denn bei solch einem

Mitanheben kommt es in der Regel zum Herunterfallen des mitgehobenen Objekts mit der Folge der Beschädigung des Objekts selbst oder auch anderer Objekte und Peripherieelemente.

Ein Robotersystem, das die genannten Anforderungen erfüllt, soll entwickelt werden. Dabei müssen die Algorithmen sehr allgemein einsetzbar sein. Einschränkungen in der Objektvielfalt können sich durch die zur Verfügung stehende Sensorik und Aktuatorik ergeben. Als Aktuatoren sind Roboter mit Greifwerkzeugen einzusetzen. Über Sensorik wie beispielsweise Kameras oder Kraft-Momenten-Sensoren soll die erforderliche Information über die Szene und den Verlauf der Objektentnahme gewonnen werden.

1.4 Vorgehensweise zur Problemlösung und Gliederung der Arbeit

Aufgrund einer Vielzahl bisheriger Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf dem Gebiet der Robotersysteme zur Objektentnahme (ROs) ist ein intensives Studium des Stands der Forschung Grundvoraussetzung für jegliches weitere Vorgehen.

Bisherige Einstufungen von ROs wurden durchweg nach den lösbaren Problemklassen vorgenommen. Dabei wurde jedoch nie klar herausgestellt, welche System- und Strategietypen für welche Problemklassen geeignet sind. Vielmehr wurden beispielhaft Systeme und Strategien zur Lösung bestimmter Probleme vorgestellt. An solch einem Überblick bisheriger Forschungsarbeiten muß kritisiert werden, daß sich die genannten Beispiele von Systemen und Strategien durch geringfügige Abänderungen oder Erweiterungen auch auf ganz andere Problemklassen erfolgreich anwenden lassen. Es ist also keine eindeutige Abbildung von Problemklassen auf Systemtypen möglich. Eine Einstufung nach Problemklassen bietet somit keine wissenschaftliche Grundlage zur Diskussion über ROs und deren konstruktive Verbesserung. Als eine Folge dieser Situation ist es auch für Experten oftmals schwierig, verschiedene Systeme überhaupt zu unterscheiden. Noch gravierender ist die Tatsache, daß ein Großteil der bisherigen Forschung nur einen Systemtyp akzeptiert und alle anderen Ansätze lediglich als Varianten ansieht. Bei dem Systemtyp wird versucht, die Objekte in der Szene komplett visuell zu identifizieren, bevor der Roboter ein Objekt entnimmt.

Der in Kapitel 2 vorgestellte Stand der Forschung ist danach ausgerichtet, Systeme und Strategien danach zu unterscheiden, welches Vorwissen ein System benötigt, welche Information über die Szene auf welche Art und Weise erlangt wird, und wie diese Information zur Ausführung von Strategien verarbeitet wird. Alle studierten Arbeiten lassen sich in vier verschiedene Gruppen einteilen. Aufgrund der zeitlichen Abfolge ihrer Entstehung sowie der aufsteigenden Komplexität der jeweiligen Informationsgewinnung- und -verarbeitung ist es gerechtfertigt, die vier Gruppen als vier Generationen von ROs zur Objektentnahme zu bezeichnen.

Zum Erreichen der Zielstellung der Arbeit mußte eine vollkommen neue Strategie entwickelt werden, welche infolge ihrer grundlegenden Verschiedenheit von den bisherigen Strategien in eine neue, die fünfte Generation von ROs zur Objektentnahme einzustufen ist. In Kapitel 6 werden neben der Entwicklung auch experimentelle Ergebnisse beschrieben, welche ein bisher unerreichtes Maß an Zuverlässigkeit für die Nachbarobjekte gegen unbeabsichtigtes Mitaneben bei gleichzeitiger Flexibilität hinsichtlich des Bekanntheitsgrads der Objekte in der Szene aufweisen.

Neue Systemarchitekturen, Strategien und Algorithmen gewinnen durch erfolgreiche experimentelle Erprobung wesentlich an Glaubwürdigkeit und Bedeutung. Innerhalb dieser Arbeit wurde ein komplettes RO zur Entnahme von Versandwaren bei Kommissionieraufgaben entwickelt, realisiert und mehrere Wochen lang im realen Versandhandelsumfeld eines großen deutschen Versandhauses getestet. Alle in dieser Arbeit vorgestellten Algorithmen konnten im realen Test erfolgreich erprobt werden. Auf die Anwendungen, die Systemarchitektur und die realisierten Komponenten wird in Kapitel 3 näher eingegangen.

Erklärtes Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines ROs zur flexiblen und zuverlässigen Objektentnahme von ungeordneten Haufen. Neuentwicklungen oder Verbesserungen ergeben sich häufig dadurch, daß die Leistungsfähigkeiten verschiedener Systeme miteinander verglichen werden. Benchmarking ist ein weit verbreitetes und anerkanntes Instrument zum Auffinden von Schwachstellen und zur Ableitung von Verbesserungsvorschlägen, welches auch im Rahmen dieser Arbeit erfolgreich zum Erreichen der vorgestellten Ergebnisse eingesetzt wurde.

Dazu wurden drei Benchmarks definiert für die Messung und den Vergleich der Leistungsfähigkeit von ROs in wichtigen kritischen Situationen:

- Als eine Unteraufgabe zum Erreichen des Ziels, Zuverlässigkeit zu gewähren, wurde in Abschnitt 1.3 die kollisionsfreie Bahnplanung genannt. Aufgrund der gleichzeitig bedeutenden Zielstellung der Flexibilität hinsichtlich unbekannter Objekte und Hindernisse kann aufgrund von Vorwissen nicht sicher darauf geschlossen werden, daß ein für ein Kamerasystem nicht einsehbarer Spalt frei ist. Der Benchmark „Verdeckter Bereich“ erlaubt das Testen des Verhaltens von ROs, wenn solche quasi unbekannt Bereiche in der Szene vorhanden sind.
- Flexibilität eines ROs bedeutet unter anderem, daß ein geeigneter Greifer verwendet werden muß. Aufgrund des Mangels eines universellen Greifers müssen geeignete Greifer eingewechselt werden. Der Benchmark „Greiferwechsel“ ermöglicht die Überprüfung, inwieweit bei ROs die Greiferauswahl optimiert ist mit dem Ziel, die Häufigkeit von Greiferwechsel und somit den erheblichen Zeitbedarf für das Wechseln zu reduzieren.
- Als ein weiteres wesentliches Ziel wurde die Zuverlässigkeit für Nachbarobjekte genannt, also das Vermeiden des ungewollten Mitanebens nicht gegriffener Objekte. Der Benchmark „Ungewolltes Mitaneben“ wurde eingeführt, um die Leistungsfähigkeit von ROs in dieser kritischen Situation überprüfen zu können.

Die drei Benchmarks sowie eine strukturierte Auflistung von Merkmalen zur Beschreibung von ROs für eine objektive Beurteilung der Benchmark-Ergebnisse werden in Kapitel 4 eingeführt.

Zahlreiche Algorithmen zur Planung kollisionsfreier Griffe wurden in den vergangenen beiden Jahrzehnten vorgestellt. In Abhängigkeit der vorliegenden Modellierung der zu greifenden Objekte und ihrer Umgebung können jeweils nur bestimmte Algorithmen verwendet werden. Andere Algorithmen lassen sich dann häufig dadurch einsetzen, daß zunächst künstlich die Modellierung der Szene in die erforderliche Form gebracht wird. Beispielsweise werden deshalb unvollständige Szenenbeschreibungen zunächst künstlich, möglicherweise unter Verwendung von Heuristiken, vervollständigt. Kapitel 5 beschreibt die Entwicklung und die experimentellen Ergebnisse eines neuen Algorithmus zur Greifplanung, welcher kein analytisches Modell der Szene erfordert, sondern direkt unter Verwendung der Rohdaten eines Tiefenbilds Kollisionsvermeidung durchführt. Es handelt sich also um einen stark datengetriebenen Ansatz, welcher die Zielstellung der Flexibilität unterstützt, also die

Möglichkeit, Situationen mit unbekanntem Objekten erfolgreich zu behandeln. Da nicht erst ein vollständiges analytisches Modell der Szene künstlich erzeugt werden muß für die Verwendung in einer anschließenden Kollisionsvermeidung, kann erheblich Rechenzeit eingespart werden. Erstmals werden explizit die Bereiche berechnet, in denen sich der Greifer während einer Entnahmeoperation im Frei-, Unbekannt- bzw. im Objekt-Bereich befindet. Diese Information trägt wesentlich zu einer schnellen und dennoch zuverlässigen Ausführung einer Objektentnahme sowie zur optimierten Greiferauswahl bei.

Kapitel 7 faßt die erreichten Ergebnisse der Arbeit nochmals strukturiert zusammen und gibt einen Ausblick auf die für sinnvoll erachteten Erweiterungsmöglichkeiten des erreichten Stands der Arbeit.

In Anhang A wird die in dieser Arbeit eingesetzte Tiefenbildauswertung beschrieben, welche sich stark an die Dissertation [Trobina 95] anlehnt. Anhang B stellt ein in dieser Arbeit entwickeltes Verfahren vor, welches die Lokalisation von in Folien verpackten Textilien zwischen Kartons unter Verwendung eines mit einem Laserscanner aufgenommenen Tiefenbilds der Szene erlaubt. Anhang C erläutert den Algorithmus, welcher in dieser Arbeit dazu verwendet wird, um ebene, im Raum geneigte Flächenstücke, sehr robust gegen visuelle Verdeckungen und gegen Sensorrauschen in verschiedenen Tiefenbildern wiederzuerkennen und eine eventuelle Verschiebung oder Verdrehung zwischen den Bildaufnahmen zu bestimmen.

1.5 Zusammenfassung der Einführung

Es konnte bisher noch kein Robotersystem entwickelt werden, welches Objekte von ungeordneten Haufen zuverlässig, das heißt unter anderem kollisionsfrei und ohne das ungewollte Mitaneben benachbarter Objekte, entnehmen kann, und welches dabei auch noch so flexibel ist, mit weitgehend unbekanntem Objekten umgehen zu können. Solch ein System könnte in zahlreichen wirtschaftlich bedeutenden Anwendungen gewinnbringend eingesetzt werden. Ausgehend von dieser Problemstellung wurden in diesem Kapitel die Ziele der Arbeit, nämlich eine Strategie und Algorithmen für die flexible und dennoch zuverlässige Objektentnahme, sowie die Realisierung eines Demonstrator-Systems, eingeführt. Die Inhalte der Arbeit wurden konkret eingegrenzt. Beispielsweise liegt der Schwerpunkt in der Objektentnahme, jedoch nicht darin, was mit den Objekten im Anschluß daran geschieht. Basierend auf der Problemstellung und der Definition der Ziele wurde der Weg zur Problemlösung skizziert unter Angabe der Kapitel, in denen der jeweilige Schritt zur Problemlösung näher beschrieben wird.

Kapitel 2

Stand der Forschung

2.1 Herkömmliche Unterscheidung von Robotersystemen zur Objektentnahme (RO) nach Problemklassen

Bisher wurden ROs gewöhnlich aus der Anwendersicht nach der Leistungsfähigkeit in verschiedenen Problemklassen unterschieden. Beispielsweise werden in [Wolter et al. 86] fünf verschiedene in Abbildung 2.1 dargestellte Problemklassen bei der Entnahme von Montageteilen von mehr oder weniger ungeordneten Haufen unterschieden.

| | Geometrie des Zielobjekts | Lage des Zielobjekts | Geometr. lokaler Hindernisse | Konfiguration Zielobj.-Hindern. |
|-----------------|---------------------------|----------------------|------------------------------|---------------------------------|
| Problemklasse 1 | Unbekannt | Unbekannt | Unbekannt | Unbekannt |
| Problemklasse 2 | Bekannt | Unbekannt | Unbekannt | Unbekannt |
| Problemklasse 3 | Bekannt | Bekannt | Teilweise bek. | Bekannt |
| Problemklasse 4 | Bekannt | Unbekannt | Bekannt | Bekannt |
| Problemklasse 5 | Bekannt | Bekannt | Bekannt | Bekannt |

Abbildung 2.1: Problemklassen bei der Objektentnahme nach [Wolter et al. 86]

Die Information über die Problemklassen, für welche ein RO eingesetzt werden kann, ist für einen Käufer eines ROs sehr wohl eine wichtige Information. Ein bestimmtes RO kann jedoch durch relativ geringfügige Abänderungen oder Erweiterungen oftmals auch in ganz anderen Problemklassen eingesetzt werden kann, und eine eindeutige Abbildung von der Problemklasse auf das Robotersystem und die eingesetzten Algorithmen ist nicht möglich. Eine Klassifizierung in Problemklassen sagt über das RO selbst also sehr wenig aus.

Somit steht keine allgemeingültige Klassifizierung der ROs selbst und somit auch keine gemeinsame Basis zur wissenschaftlichen Diskussion über ROs zur Verfügung. Selbst Experten haben oftmals Schwierigkeiten, verschiedene Strategien zu unterscheiden und zu beurteilen, ob es sich nur um Varianten handelt, oder ob grundlegende Strategieunterschiede vorliegen. Das konnte dann dazu führen, daß ein Großteil der bisherigen Forschung überhaupt nur eine Strategie, nämlich die komplette visuelle Identifikation aller Objekte in der Szene vor einer Objektentnahme, zuläßt und alle anderen Ansätze als Varianten ansieht. Da die Einteilung nach Problemklassen also nicht das Verständnis für die Systeme und Strategien selbst fördert, ist auf solchem Wege kein konstruktiver Fortschritt zu erwarten.

2.2 Neue Klassifizierung in Generationen von Robotersystemen zur Objektentnahme (GRO) nach verschiedenen Strategien

In dieser Arbeit werden die bekannten ROs aus Entwicklersicht danach unterschieden, welche und wieviel Information auf welche Art und Weise über die Szene gewonnen wird, und wie die Information für die Planung und Ausführung von Entnahmeoperationen verarbeitet wird [Müller & Wörn 2000a]. Durch solch eine neue Klassifizierung kann ein grundlegendes Verständnis für die Systeme und Strategien selbst gewonnen werden. Somit wird eine gemeinsame wissenschaftliche Basis für die Diskussion über ROs geschaffen, wodurch konstruktiver wissenschaftlicher Fortschritt zu erwarten ist.

Es gibt zwar eine allgemeine Einteilung von Robotersystemen in drei Generationen [Dillmann & Huck 91], [Müller 92], jedoch kann diese allgemeine Einteilung die Besonderheiten verschiedener ROs nicht charakterisieren. Robotersysteme der allgemeinen ersten Generation verfügen über keine externe Sensorik, während Robotersysteme der allgemeinen zweiten Generation Sensordaten von externen Sensoren beispielsweise dazu nutzen können, kartesische Bahnen zu korrigieren. Robotersysteme der allgemeinen dritten Generation verfügen über ein leistungsfähiges Sensorsystem, verbunden mit einem System der Künstlichen Intelligenz und einer Wissensbasis mit expliziter Information über den Roboter und die Umgebung, und können autonom Handlungen planen. Alle im Rahmen dieser Arbeit studierten und entwickelten ROs gehören aufgrund ihrer Komplexität und ihrer autonomen Entnahmeplanung zur allgemeinen dritten Generation von Robotersystemen.

Alle bekannten ROs werden in dieser Arbeit neu klassifiziert in vier verschiedene Generationen von Robotersystemen zur Objektentnahme (GRO). Bei dieser Gruppierung ist es gerechtfertigt, von Generationen zu sprechen, da die vier GROs deutlich nacheinander entstanden sind, wie aus Abbildung 2.2 ersichtlich ist. Die vier Sterne markieren für jede GRO jeweils das Jahr, in dem die Häufigkeit der öffentlich vorgestellten ROs die mittlere Häufigkeit erstmals überschritt.

In den Abschnitten 2.2.2 bis 2.2.5 werden die Systemarchitekturen und Strategien der vier GROs detailliert eingeführt und anhand zahlreicher beispielhafter Arbeiten erläutert. Dabei tauchen wenige Arbeiten in mehreren GROs auf, da sie aus mehreren Teilsystemen bestehen, welche in verschiedene GROs einzuordnen sind.

Bei der Beschreibung der Systeme und Strategien der verschiedenen GROs wurde Wert darauf gelegt, keine Begriffe neu zu erfinden oder zu definieren für Elemente, welche bereits standardmäßig mit bestimmten Begriffen bezeichnet werden. Im folgenden Abschnitt wird deshalb ein Grundgerüst zur Einführung der GROs erläutert, welches sich im Bereich der Bildauswertung als standardmäßiger Rahmen zur Diskussion verschiedener Ansätze durchgesetzt hat.

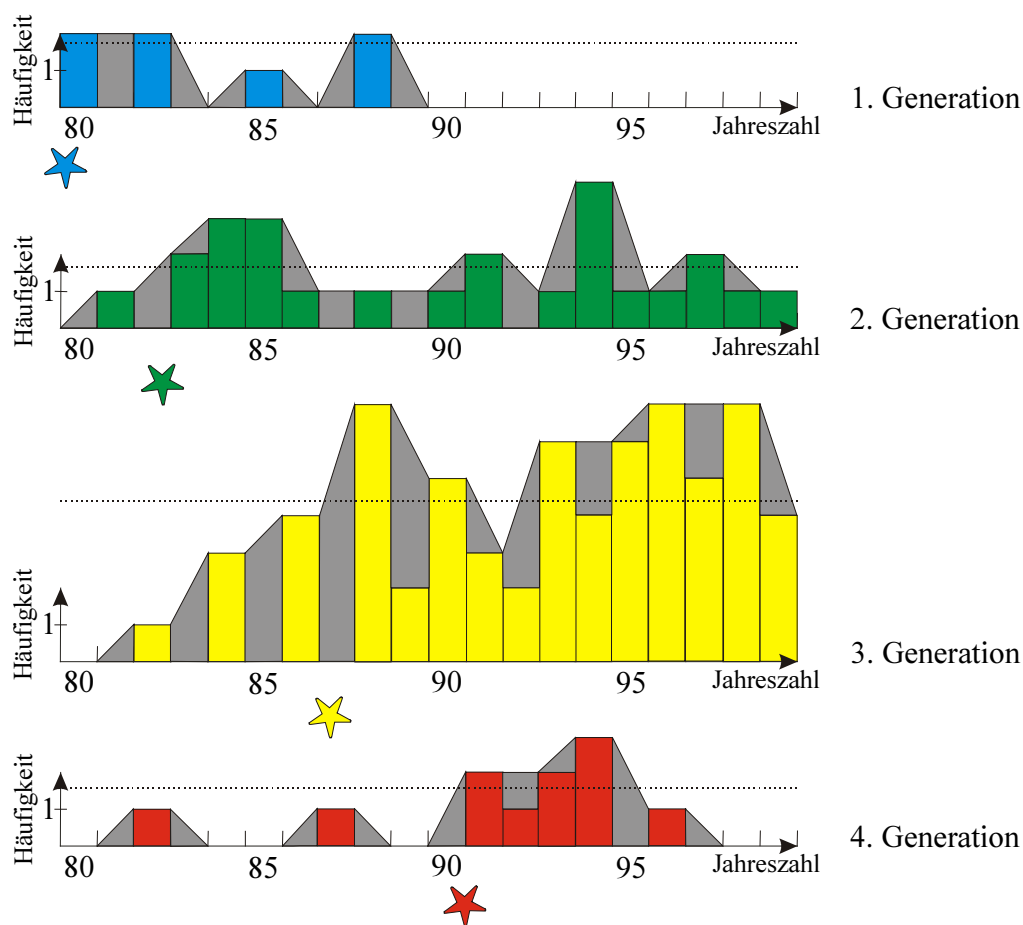


Abbildung 2.2: Häufigkeitsverteilung der GROs^{2.1}

2.2.1 Interpretationszyklus

Der von Kanade [Kanade 78] eingeführte und durch Nagel [Nagel 79] erweiterte Interpretationszyklus beschreibt die Vorgehensweise bei der Bildauswertung in einer allgemeingültigen Form^{2.2}. Über bildgebende Sensoren gewinnen Robotersysteme zur Objektentnahme die Hauptinformation über die Szenenstruktur. Deshalb bietet sich der Interpretationszyklus von Nagel hervorragend als Grundgerüst für die Einführung von Objektentnahmezyklen zur Beschreibung der GROs an^{2.3}.

^{2.1} Die farbigen Säulen geben jeweils die Anzahl der in dem Jahr veröffentlichten verschiedenen Arbeiten an. Da sich die Forschung nicht auf das jeweilige Veröffentlichungsjahr beschränkt, sind die Häufigkeiten in den grauen Flächen interpoliert. Die durchschnittliche Häufigkeit über den Jahren, in denen überhaupt zur jeweiligen Generation eine Arbeit veröffentlicht wurde, ist gepunktet eingezeichnet. Die Sterne geben für jede GRO an, wann diese durchschnittliche Häufigkeit erstmals überschritten wurde.

^{2.2} Ziel der Diskussion des Interpretationszyklus durch Nagel [Nagel 79] war es, „... einen Rahmen zur Verfügung zu stellen, innerhalb dessen sich die bei speziellen Ansätzen zur Bilddeutung auftretenden Probleme erkennen und beschreiben lassen ...“.

^{2.3} Nicht jede Anwendung kann starr in diesen Rahmen gezwängt werden. Beispielsweise muß er manchmal dadurch variiert werden, daß manche Verarbeitungsschritte mehrfach mit verschiedenen Eingangsdaten ausgeführt werden, bevor der Zyklus nach einem Fusionsschritt der Ergebnisdaten weiter voranschreitet. Dieser

Abbildung 2.3 zeigt eine in der Darstellung etwas erweiterte Version des Interpretationszyklus^{2,4}. Für die Erläuterungen der GROs in den folgenden Abschnitten wird der Interpretationszyklus jeweils nach Bedarf um einige Elemente reduziert oder erweitert, so daß sich Objektentnahmezyklen ergeben. Da bei der Objektentnahme die Szene, also die reale Welt, verändert wird und somit durchweg in allen Objektentnahmezyklen auftaucht, wird dieser Bereich schon in Abbildung 2.3 in blauen Kästchen als „Realer Weltausschnitt“ und „Szenenabbildung“ mit dargestellt. Verschiedene ursprüngliche Formen des Interpretationszyklus sind in der angegebenen Literatur zu finden.

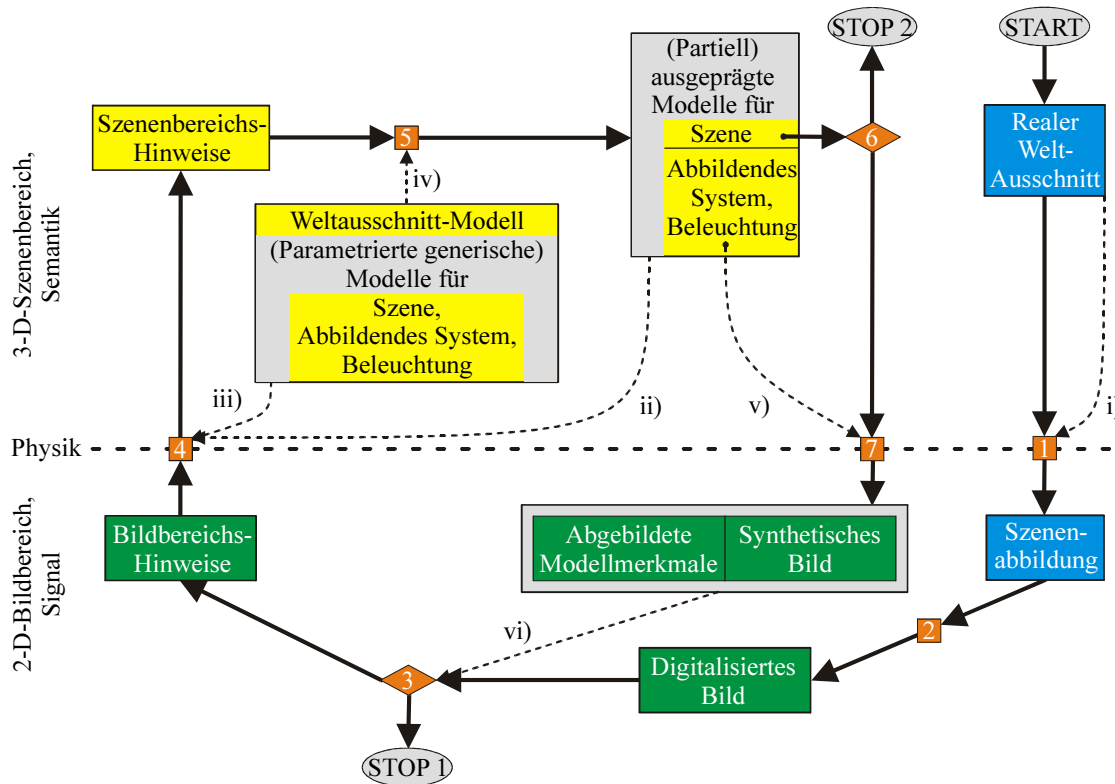


Abbildung 2.3: Interpretationszyklus zur Auswertung von Bildern nach [Kanade 78] mit inhaltlichen Modifikationen nach [Nagel 79] und Erweiterungen der Darstellung für die Einführung von Objektentnahmezyklen in dieser Arbeit

Die Darstellung der Teilschritte und Teilergebnisse bei der Bildauswertung sind unterteilt in zwei Halbebenen, nämlich den in der unteren Halbebene dargestellten „2D-Bildbereich“ und den in der oberen Halbebene dargestellten „3D-Szenenbereich“. Getrennt sind die beiden Halbebenen durch die physikalischen Vorgänge. Der „Reale Weltausschnitt“ ist im 3D-Szenenbereich angeordnet und umfaßt die Szene selbst, die reale Beleuchtung sowie das reale abbildende System, also die Kamera(s). Bei Beleuchtung der Szene mit Licht fällt das in Richtung einer Kamera reflektierte Licht eines von der Kamera erfassbaren Raumvolumens im allgemeinen durch ein optisches System in Übergangsschritt Nr. 1 auf eine lichtempfindliche Schicht der Kamera, wo es die reale 2D-„Szenenabbildung“ darstellt und in ein elektronisches

Rahmen ist jedoch bestens dafür geeignet, verschiedene Systeme zu analysieren und ihre Charakteristiken deutlich herauszustellen, so daß ihre Vor- und Nachteile klar erkennbar werden.

^{2,4} Die Beschreibungen des Interpretationszyklus in diesem Abschnitt basieren auf dem Verständnis, welches aus Information in [Kanade 78], [Nagel 79], [Nagel 87], [Tonko 97] und [Gengenbach 90] gewonnen wurde.

Signal umgesetzt werden kann. Diese Abbildung ist ein physikalischer Vorgang gemäß den durch Zweig Nr. 1 eingekoppelten realen Beleuchtungs- und Abbildungsgegebenheiten und trennt den 3D-Szenenbereich vom 2D-Bildbereich, welcher aufgrund des Vorliegens der Information in Signalform auch Signalebereich genannt wird. Der 3D-Szenenbereich wird auch Semantikbereich genannt, weil er den realen Weltausschnitt beziehungsweise Modelle zur Beschreibung der Objekte, des abbildenden Systems sowie der Beleuchtung in diesem Weltausschnitt umfaßt.

Die verschiedenen Signalformen im 2D-Bildbereich sind in grünen Kästchen dargestellt. Der reale von der Kamera erfassbare Weltausschnitt sowie die reale Szenenabbildung sind in blauen Kästchen abgebildet. Die verschiedenen Formen des Modellwissens im 3D-Szenenbereich sind in gelben Kästchen mit grauen Rahmen illustriert. Die Übergänge zwischen den Zuständen sind durch orangefarbene Kästchen auf durchgezogenen Pfeilen markiert. Gestrichelte Linien geben an, daß Zusatzinformation oder Randbedingungen für den eigentlichen Übergangsschritt eingebunden werden. In weiteren Abbildungen dieser Arbeit, nämlich den Objektentnahmezyklen, werden weiterhin Roboteraktionen dargestellt, welche ähnlich wie die Übergangskästchen auch auf durchgezogenen Pfeilen, jedoch in roten Kästchen dargestellt werden. Sie bewirken Übergänge zwischen Zuständen in der realen Welt. Übergänge, welche Entscheidungen für die Auswahl weiterer Schritte beinhalten, sind durch rautenförmige Kästchen gekennzeichnet.

Übergang 1

Das Licht, welches in die Kamera fällt, ist eine analoge physikalische Größe und bildet das „Szenenabbild“.

Übergang 2

Durch die matrixförmige Rasterung der lichtempfindlichen Schicht kann die Intensität des auftreffenden Lichts aufgetrennt nach den Zellen des Rasters als Zahlenwerte angegeben werden. Zusätzlich werden diese Zahlenwerte digitalisiert, wodurch sich ein „Digitalisiertes Bild“ im 2D-Bildbereich ergibt.

Der von Kanade vorgestellte und von Nagel modifizierte Interpretationszyklus zur Auswertung von Bildern beginnt bei dem "Digitalisierten Bild".

Übergang 3

Zunächst erfolgt eine ikonische Bildauswertung, welche Verarbeitungsschritte umfaßt, die als Eingang eine Bildmatrix verwenden, und deren Ergebnis wiederum eine Bildmatrix ist. Operationen dieser Art dienen zum einen dazu, bestimmte durch das Aufnahmesystem verursachte Störungen zu korrigieren, und zum anderen dazu, charakteristische Strukturen, welche weitgehend unabhängig von den Beleuchtungsverhältnissen sind, durch geeignete Operationen hervorzuheben.

Die anschließende symbolische Bildauswertung baut auf den Ergebnissen der ikonischen Bildauswertung auf und umfaßt die Suche nach „Bildbereichs-Hinweisen“, also Merkmalen im digitalisierten Bild, auch Segmentation genannt. Sie erfolgt bottom-up, d.h. nur elementares Wissen über die reale Welt und über den Bildentstehungsprozeß wird benutzt.

Bildbereichshinweise können z.B. Bildbereiche mit hohen Grauwertänderungen sein, also z.B. Konturpunkte, Bildecken, Kanten (Ellipsen, Polygone, Splines, Funktionen höherer

Ordnung) oder aber Bildbereiche mit homogenen Grauwertverhältnissen, also Regionen im 2D-Bild.

Die ikonische und symbolische Bildauswertung sind im Übergang Nr. 3 zusammengefaßt. Im ersten Durchlauf wird keine Information über den Zweig Nr. vi) eingekoppelt. Falls bei der symbolischen Bildauswertung keine Bildbereichs-Hinweise zu finden sind, dann endet der Zyklus bereits an dieser Stelle, die mit „Stop 1“ markiert ist.

Übergang 4

Beim Übergang Nr. 4 vom Bildbereich in den Szenenbereich werden Bildbereichs-Hinweisen oder Strukturen von Bildbereichs-Hinweisen sogenannte „Szenenbereichs-Hinweise“ oder Strukturen von Szenenbereichs-Hinweisen zugeordnet. Beispiele für Szenenbereichshinweise sind Kanten, Regionen oder Volumenprimitive mit im Raum bekannter Lage. Im 3D-Szenenbereich spielt das „Weltausschnitt-Modell“ eine zentrale Rolle. Es ist ein parametrisiertes, generisches Modell für die Szene, das abbildende System und die Beleuchtung und beschreibt somit in einer allgemeinen Form, welche Objekte im realen Weltausschnitt in welcher Konfiguration auftreten können. Ziel des Interpretationszyklus ist die Bestimmung einer „Ausprägung“ dieses Modells, welche nicht zwangsläufig vollständig, sondern auch „partiell“ sein kann, da z.B. nur eine Seite der Szene sichtbar ist. Vorhandenes ausgeprägtes Modellwissen insbesondere des abbildenden Systems muß in Übergang Nr. 4 verwendet werden, was über den Zweig Nr. ii) dargestellt wird. Falls bereits eine Ausprägung des Szenenmodells vorliegt, dann kann diese hier beispielsweise dazu verwendet werden, bei bekannter Lage eines Szenenuntergrunds, z.B. des Erdbodens, nicht auf Szenenbereichs-Hinweise unterhalb dieses Untergrunds zu schließen. Bei diesem Übergang wird auch das Weltausschnitt-Modell über Zweig Nr. iii) verwendet, um grundsätzlich zu wissen, welche Szenenbereichs-Hinweise, also welche Primitive im dreidimensionalen Raum überhaupt auftreten können.

Die Modellierung des abbildenden Systems umfaßt neben der Projektionsart mit den beschreibenden Parametern auch die Lage, also Position und Orientierung, relativ zur Szene. Die Notwendigkeit der Beleuchtungsmodellierung wird häufig dadurch vermieden, daß Schattenbildung durch den Einsatz möglichst diffuser Lichtquellen vermieden wird. Die Modellierung der Beleuchtung ist z.B. in industriellen Umgebungen mit Schweißanwendungen oder bei Außenszenen mit vorbeiziehenden Wolkenfeldern schwierig. Absolut erforderlich ist die Modellierung der Beleuchtung beispielsweise, wenn aus Helligkeitswerten unter Zuhilfenahme von Reflektionskarten Orientierungsinformation über Objekte gewonnen werden soll [Horn 93] oder z.B. bei strukturierter Beleuchtung bzw. der Anwendung des Lichtschnittverfahrens zur Gewinnung von Tiefeninformation^{2,5}.

^{2,5} Im folgenden wird ein komplexes Beispiel zum Verständnis des Übergangs Nr. 4 erläutert. In Kapitel 3 wird eine Laserscanneranordnung vorgestellt, welche die Szene in einzelnen vertikal ausgerichteten Scheiben abscannt. Für jede Scheibe wird jeweils ein 2D-Bild aufgenommen, in dem Konturpunkte und Kanten als Bildbereichs-Hinweise extrahiert werden können. Unter der Kenntnis der aktuellen Beleuchtung durch den Laser, also die Information, welche Raumscheibe gerade gescannt wurde, und der Kenntnis des abbildenden Systems über Zweig Nr. ii), kann für diese Raumscheibe im Übergangsschritt Nr. 4 ein Kantenzug im 3D-Szenenbereich, also ein Höhenprofil berechnet werden. Für die Bestimmung eines kompletten Tiefenbilds müssen z.B. mehrere hundert solcher Scheiben abgescannt und somit mehrere hundert 2D-Bilder aufgenommen werden. Unter der Annahme, daß die Höhenprofile für die einzelnen Scheiben voneinander unabhängig bestimmt werden, können die vielen hundert Höhenprofile nebeneinander angeordnet werden, so daß sich direkt eine Menge von Kantenzügen im 3D-Szenenbereich ergeben, also eine Struktur von Szenenbereichshinweisen. Diese Struktur von elementaren Szenenbereichshinweisen kann unter Verwendung des generischen Weltausschnitt-Modells zusammengefaßt werden zu wenigen Szenenbereichshinweisen, z.B. zu Regionen, also Flächenstücken

Übergang 5

Der wichtige Übergangsschritt Nr. 5 stellt die Interpretation der Szenenbereichs-Hinweise dar. Dabei werden Hypothesen aufgestellt, welche als Ausprägungen (instantiated models) der Modelle des Weltausschnitts-Modells insbesondere die Szene konsistent beschreiben. Diese Ausprägungen müssen also kompatibel mit den Szenenbereichs-Hinweisen sein. Dazu wird über den Zweig Nr. iv) das Weltausschnitt-Modell verwendet, welches im allgemeinen in generischer, parametrierter Form angibt, was in dem Weltausschnitt überhaupt vorkommen kann.

Das Weltausschnitt-Modell, bestehend aus Modellen für Szene, Beleuchtung und abbildendes System, kann im Grad der Detaillierung je nach Anwendung sehr unterschiedlich sein. Die Modelle für die Objekte in der Szene können geometrisch exakt in Form eines CAD-Modells vorliegen, wobei durch die Bildauswertung nur Position und Orientierung in der Szene als freie Parameter bestimmt werden. Im Gegensatz zu diesen expliziten Modellen stehen generische Modelle, bei denen Listen von Parametern zur Beschreibung der Ausprägungen von Objektklassen verwendet werden. Beispielsweise wird in [Rembold 2000] vorausgesetzt, daß neben vollkommen zerklüfteten geometrisch nicht genau beschreibbaren Objekten (in Folie verpackte Textilien) ausschließlich quaderförmige Objekte, also Objekte mit acht Ecken, ebenen Oberflächen und ausschließlich rechten Winkeln zwischen Objektkanten auftreten. Freie Parameter zur Szenenbeschreibung sind dabei für jedes quaderförmige Objekt jeweils die Lage im Raum sowie Länge, Breite und Höhe des Objekts. In [Müller 92] wird eine noch allgemeinere Beschreibung für die Szenenmodellierung im Weltausschnitt-Modell verwendet. In jener Arbeit wird nur noch vorausgesetzt, daß ausschließlich polyedrische Körper in der Szene vorkommen. Die Ausprägung des Modells besteht dabei aus einer kompletten geometrischen Beschreibung des detektierten Objekts bzw. Objekthaufens.

Übergang 6

Wenn von vornherein überhaupt nur ein Durchlauf des Interpretationszyklus vorgesehen ist, dann wird der Ablauf an dieser Stelle beendet. Ansonsten schließen sich Schritte zur Verbesserung der Bildinterpretation an.

Übergang 7

Im allgemeinen ist es in Übergangsschritt Nr. 5 im ersten Zyklusdurchlauf nicht möglich, eine vollständige und eindeutige Beschreibung der Szene zu erhalten. Um eine Verbesserung bzw. Vervollständigung der hypothetischen, meist partiellen Ausprägung aus einem Bild erreichen zu können, erfolgt die Rückprojektion dieser Ausprägung in den Bildbereich in Übergangsschritt Nr. 7. Bei der Rückprojektion eines umfangreichen ausgeprägten Modells ergibt sich ein „Synthetisches Bild“. Bei nur teilweisem Wissen über die Modelle oder bei Einschränkungen der Rechenleistung bzw. der zur Verfügung stehenden Zeit werden manchmal nur bestimmte Merkmale der Objektmodelle in den 2D-Bereich zurückprojiziert, wodurch sich die „Abgebildeten Modellmerkmale“ ergeben. In diesem Schritt müssen die

mit bekannter 3D-Lage. In diesem Beispiel werden die Übergangsschritte Nr. 1 bis 3 wiederholt ausgeführt, bevor in Übergangsschritt Nr. 4 die relativ wenigen Szenenbereichshinweise, also z.B. die Regionen, bestimmt werden. Wenn die in diesem Beispiel getroffene Annahme der unabhängigen Zuordnung elementarer Szenenbereichs-Hinweise zu den Bildbereichs-Hinweisen der vielen Einzelbilder nicht gewährleistet ist, dann muß jedoch der ganze Zyklus, wie im folgenden beschrieben, wiederholt ausgeführt werden zur Auswertung der Einzelbilder.

vorhandenen Ausprägungen der Modelle von Beleuchtung und abbildendem System über Zweig Nr. v) verwendet werden.

Übergang 3 in wiederholtem Zyklusdurchlauf

Durch Vergleich in Übergangsschritt Nr. 3 im neuen Zyklus des durch Zweig Nr. vi) eingekoppelten synthetischen Bildes des ausgeprägten Szenenmodells mit dem digitalisierten ursprünglichen real aufgenommenen Bild lassen sich Doppeldeutigkeiten und Fehlhypothesen bei der Interpretation der Szenenbereichs-Hinweise basierend auf einer ikonischen Repräsentation detektieren. Zum Vergleich zwischen synthetischem Bild und ursprünglichem Bild, welches auch Eingabebild genannt wird, sind klassische Verfahren der Bildverarbeitung wie z.B. die Kreuzkorrelation anzuwenden. Genügt das Modellwissen nicht zur Erzeugung eines synthetischen Bildes oder wird die dazu erforderliche Rechenzeit zu groß, so kann der Vergleich in Schritt Nr. 3 auch basierend auf symbolischer Repräsentation, also zwischen den abgebildeten Modellmerkmalen und den aus dem digitalisierten real aufgenommenen Bild extrahierten Bildmerkmalen erfolgen. Die Segmentierung in Schritt Nr. 3, also die Suche nach Bildbereichshinweisen im ursprünglichen digitalisierten Bild, kann nun also durch Zweig Nr. vi) modellgesteuert top-down verifiziert oder erleichtert werden. Bereits gefundene Bildbereichs-Hinweise können verifiziert werden, und es kann nach weiteren Bildbereichshinweisen gesucht werden. Es lassen sich also aus den hypothetischen Ausprägungen Annahmen ableiten, die einen Verifikationsprozeß zulassen bzw. einen Suchprozeß erleichtern.

Der Interpretationszyklus eines Bildes schließt sich durch Extraktion neuer Bildbereichs-Hinweise in Schritt Nr. 3, der erneuten Zuordnung zu Szenenbereichs-Hinweisen in Schritt Nr. 4, gefolgt von der Aufstellung einer aktuellen hypothetischen Ausprägung in Schritt Nr. 5, welche in einem weiteren Interpretationsdurchlauf bestätigt oder verworfen werden kann. Sobald davon ausgegangen wird, daß die hypothetische Szenenausprägung anwendungsabhängig gut genug mit der realen Szene übereinstimmt, wird in Schritt Nr. 6 der Ablauf des Interpretationszyklus erfolgreich beendet, was durch „Stop 2“ angedeutet ist.

In diesem Absatz wird noch herausgestellt, inwiefern Nagel den durch Kanade eingeführten Interpretationszyklus modifiziert und erweitert hat. Im Gegensatz zu Kanade erfaßt Nagel die Modelle für Beleuchtung und abbildendes System nicht implizit, sondern explizit mit eigenen Ausprägungen. Außerdem hat Nagel den Interpretationszyklus von Kanade erweitert durch die Rückprojektion entweder der abgebildeten Modellmerkmale, welche auch als Szenenskizze bezeichnet werden, und/oder eines Synthetischen Bildes statt nur einer Szenenskizze.

Es sei nochmals erwähnt, daß die Darstellung des von Kanade aufgestellten und von Nagel modifizierten Interpretationszyklus weder explizit den realen Weltausschnitt noch die reale Abbildung der realen Szene in Übergangsschritt Nr. 1 auf die reale Szenenabbildung umfaßt. Die Darstellung dieser Komponenten wurde hier hinzugenommen, da sie in dieser Arbeit für die Einführung von Objektentnahme-Zyklen benötigt werden. Bei den Objektentnahme-Zyklen wird nämlich durch Roboter direkt die reale Welt gezielt modifiziert. Da die Szene nicht komplett bekannt ist, können die Ergebnisse dieser aktiven Modifikationen der Szene

nicht eindeutig vorhergesagt werden, weshalb erneute Bildaufnahmen aktuelle, veränderte Information über den Weltausschnitt liefern können^{2.6}.

2.2.2 Erste Generation: „Blindes Entnehmen“

ROs der ersten Generation sind dadurch gekennzeichnet, daß sie keine globale Information über die Szene gewinnen. Es wird also kein Bild von der Szene aufgenommen. Das Greifen und Entnehmen eines Objekts erfolgt demnach „blind“ unter Verwendung passiver oder aktiver Mechanismen zur Anpassung der Greiferlage und -konfiguration an die Objekte.

Im Objektentnahmezyklus in Abbildung 2.4 fehlt demnach gegenüber dem in Abschnitt 2.2.1 vorgestellten Interpretationszyklus also der komplette Abbildungs- und Bildauswerteteil. Eine „Objektentnahme“ wirkt sich auf den „Realen Weltausschnitt“ aus, da Objekte im allgemeinen verschoben oder entnommen werden. Wenn bei einem Entnahmeversuch festgestellt wird, daß kein weiteres Objekt entnommen werden kann, weil z.B. die Szene leer ist, oder weil der vorhandene Greifer für kein weiteres Objekt geeignet ist, dann ist der Objektentnahmezyklus abzubrechen, um Endlosschleifen zu vermeiden, was durch „Stop“ im Zyklus gekennzeichnet ist.



Abbildung 2.4: Objektentnahmezyklus der ersten Generations von ROs

Wie aus Abbildung 2.2 ersichtlich ist, haben Anfang der achtziger Jahre zahlreiche Wissenschaftler ROs ohne Bildaufnahme- und Bildauswertesysteme entwickelt. Vakuumgreifer zum Entnehmen starrer Objekte [Tella et al. 80], [Tella et al. 82] oder auch flexibler Objekte [Gore et al. 88] oder Magnetgreifer für Metallstücke [Geißelmann 80] paßten sich zumeist passiv über nachgiebige Befestigungen am Roboter oder durch Aufhängung an einem durch den Roboter geführten Faden an zufällig berührte Objekte an. Aktive Anpassung der Greifer an die Objekte erfolgte beispielsweise durch taktile Sensoren in

^{2.6} Auch Gengenbach [Gengenbach 94] hat beispielsweise Bildfolgen bei Demontageaufgaben verwendet. Jedoch ging er von einer statischen, unveränderlichen Szene aus, weshalb er den realen Welt-Ausschnitt in einem erweiterten Interpretationszyklus nicht explizit darstellen mußte.

den zwei [Hirata et al. 85] oder drei [Sakata 82] Fingern von Backengreifern. [Schraft et al. 88] erreichte die Vereinzelnung des zufällig gegriffenen Teils, indem es an rotierenden Bürsten vorbeigezogen wurde. Manche Systeme setzten Näherungssensoren ein, um die Roboterbewegung kurz vor Berührung mit einem Objekt abbremsen zu können.

Eine eventuell für die weitere Verarbeitung erforderliche Objektidentifikation muß bei ROs dieser Generation im Anschluß an die Objektentnahme erfolgen.

Beispiele für durch solche ROs in Experimenten von Haufen entnommenen Objekte sind Gußteile [Geißelmann 80], große Bolzen [Hirata et al. 85], mit Flanschen versehene Stangen [Sakata 82], flexible Runddichtungen [Schraft et al. 88] oder Plastiksäcke [Gore et al. 88].

Mit ROs dieser Generation ist es nicht möglich, die Stabilität der gesamten Szene zu gewährleisten oder das unbeabsichtigte Mitaneheben nicht gegriffener Objekte zu vermeiden, falls eine größere Objektvielfalt vorausgesetzt wird, oder wenn sogar unbekannte Objekte in der Szene liegen können. Ein weiterer Nachteil der meisten solcher ROs ist der enorme Zeitbedarf der Entnahmevorgänge, da sich der Roboter im allgemeinen langsam an die Objekte herantasten muß, um Beschädigungen zu vermeiden.

2.2.3 Zweite Generation: „Suche nach Greifpunkten“

ROs der zweiten Generation suchen in einem oder mehreren Bildern der Szene nach Merkmalen, welche zum Greifen mit den vorhandenen Greifern geeignet sind. Dabei findet jedoch keine Identifikation der Objekte statt.

Im Objektentnahmezyklus in Abbildung 2.5 fehlt somit der Übergangsschritt Nr. 5 des Interpretationszyklus, also die Interpretation der Szenenbereichshinweise. Da keine Interpretation stattfindet und somit aus der Bildinformation auch keine Ausprägung des Szenenmodells bestimmt wird, ist die Rückprojektion, also Schritt Nr. 7 auch nicht sinnvoll und fehlt deshalb in Abbildung 2.5. Sehr wohl kann jedoch beispielsweise a priori vorhandenes Wissen über Hindernisse in der Szene über Zweig Nr. ii) beim Übergang vom 2D- in den 3D-Bereich verwendet werden.

Geeignete Merkmale für die vorhandenen Greifer können im 2D- oder auch im 3D-Bereich gefunden werden. Demnach wird entweder nach Bildbereichs-Hinweisen oder nach Szenenbereichs-Hinweisen gesucht, welche zum Greifen geeignet sind. Diese zwei Möglichkeiten sind durch die in Abbildung 2.5 mit a) und b) gekennzeichneten parallel verlaufenden Stränge dargestellt und werden im folgenden mit zahlreichen Beispielen noch näher erläutert.

Die Objektentnahme durch den Roboter wirkt sich auf den realen Weltausschnitt aus. Falls kein weiteres Objekt mehr entnommen werden kann, ist der Objektentnahmezyklus zu beenden, was durch „Stop 2“ dargestellt ist.

Seit den achtziger Jahren bis heute werden Kamerasysteme verwendet, um mit Hilfe von ROs der zweiten Generation greifbare Objektteile zu lokalisieren und von ungeordneten Haufen zu entnehmen. Wenn in einer Anwendung jedoch Objektidentifikation erforderlich ist, dann muß die Identifikation ähnlich wie bei ROs der ersten Generation in einem anschließenden Schritt oder in einem separaten Prozeß während der Ausführung der Objektentnahme erfolgen und gehört nicht zum Objektentnahmezyklus von ROs der zweiten Generation.

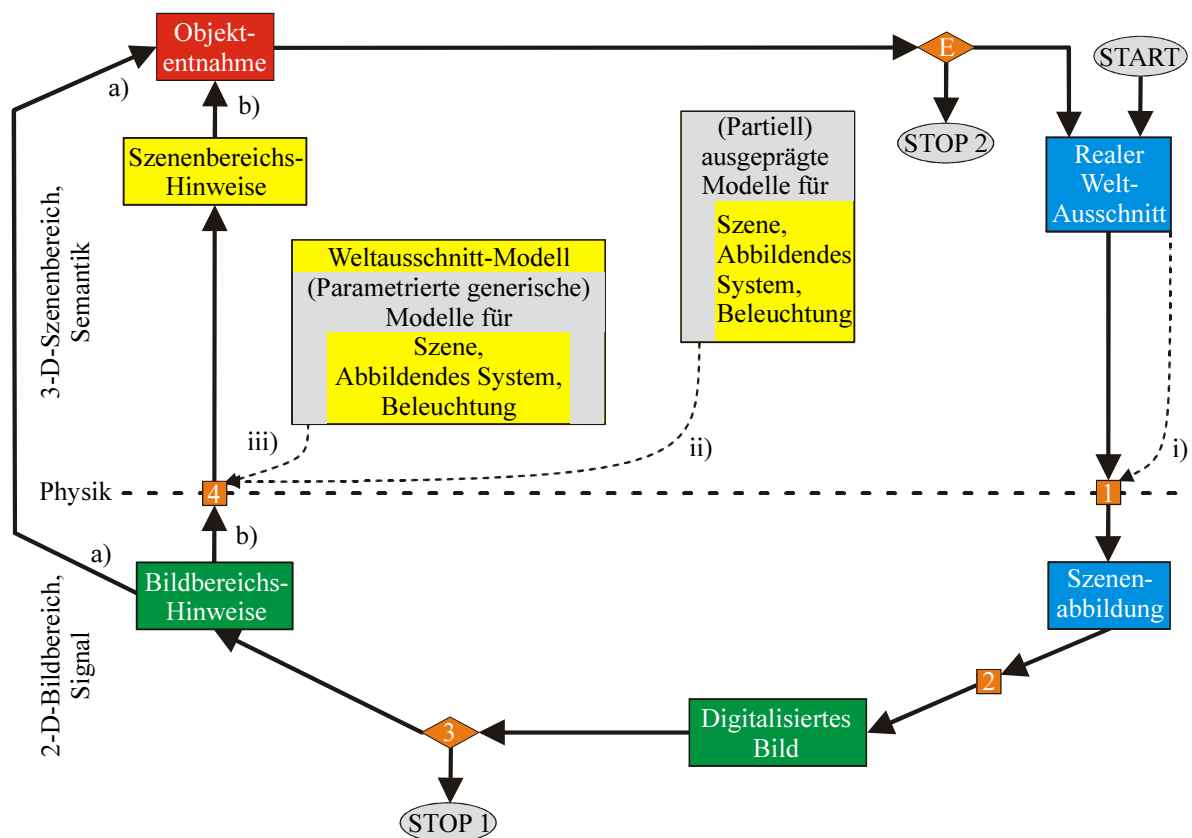


Abbildung 2.5: Objektentnahmezyklus der zweiten Generation von ROs

Merkmalsbestimmung im 2D-Bildbereich (Zweig a))

Zunächst werden ROs der zweiten Generation vorgestellt, die nach Bildbereichs-Hinweisen suchen, um Objekte zu entnehmen. Da die Lageinformation der Objektteile, welche den Bildbereichs-Hinweisen entsprechen, nur teilweise zur Verfügung steht, werden oftmals Näherungssensoren verwendet, um den Greifer an dem zu greifenden Objekt auszurichten [Balek & Kelley 85], [Walter 84].

Die Auswertung von binären 2D-Bildern [Raymond et al. 83] mit dem Ziel, Greifpunkte für Vakuumgreifer zu segmentieren, ist einfach möglich durch Anwendung des „Shrinking Algorithm“, eines „Schrumpfalgorithmus“ [Birk et al. 81], [Kelley et al. 83], [Kelley 84]. Jedoch ist die Auswahl des erforderlichen Schwellwerts für die Binarisierung kritisch, und ein Großteil der im Bild vorhandenen Information wird durch die Binarisierung quasi verworfen.

Die „Collision Fronts“-Technik [Kelley et al. 83], [Kelley 84] ist eine Erweiterung für die Verarbeitung von Grauwertbildern zur Bestimmung von Griffen für Parallel-Backen-Greifer. Diese Technik ist aber auch sehr empfindlich für Rauschen.

„Matched Filters“ [Dessimoz et al. 84], [Kelley et al. 85], von denen einige Fuzzy-Techniken verwenden [Kim et al. 91], suchen nach hellen Bildregionen, welche durch dunkle, freie Bereiche beschreibende Regionen umgeben werden. Diese Filter arbeiten nur solange korrekt, wie der Hintergrund dunkel ist.

„Edge Detection“ und „Region Growing“, auch in Kombination mit „Residual Analysis“, wird von zahlreichen Forschern angewendet [Al-Hujazi & Sood 90], [Rubarth et al. 96], [Sanz et al. 97]. [Cipolla & Hollinghurst 97] wendet „Visual-Servoing“ von Kantenmerkmalen an, das heißt eine Regelung der Merkmalslage im 2D-Bild, um einen

günstigen Greifpunkt zu erreichen, während das zu greifende Objekt durch einen menschlichen Bediener ausgewählt wird.

Einige Recycling-Systeme führen eine Spektralanalyse aus während der Beleuchtung der Szene mit Infrarotlicht [Lucht et al. 93] oder der Erzeugung eines elektrischen Blitzes [Seidel 94], um Kunststoffabfälle innerhalb eines Abfallhaufens zu lokalisieren. Nahrungsmittel, welche Steine oder Metallteile enthalten, sind durch Röntgenstrahlung lokalisierbar [Patel et al. 94].

Merkmalsbestimmung im 3D-Szenenbereich (Zweig b)

Nun werden ROs der zweiten Generation vorgestellt, welche für die Objektentnahme nach Szenenbereichs-Hinweisen suchen. Trotz der Bestimmung von Greifmerkmalen im 3D-Szenenbereich werden die Objekte nicht identifiziert, denn es erfolgt keine Interpretation der Szenenbereichshinweise.

Zur Erlangung von 3D-Information wie z.B. 2½D-Tiefenbildern oder sogar 3D-Bildern werden beispielsweise passive Stereokamerasysteme eingesetzt. Eine andere Möglichkeit zur Erzeugung von 2½D- bzw. 3D-Bildern besteht im Einsatz aktiver Systeme, welche beispielsweise Kameras aktiv bewegen bzw. durch Zoomen die Brennweite verändern, strukturiertes Licht oder auch Laserlicht auf die Szene projizieren, und beispielsweise über Stereoskopie, also prinzipiell über Triangulation, Bildfolgenauswertung, oder auch über Laufzeitmessung bzw. Phasenverschiebung, 3D-Information gewinnen.

Kraftschluß-Griffe für Mehrfingergreifer und segmentierte Greifmerkmale werden häufig unter der Annahme eines bekannten Haftreibungskoeffizienten berechnet [Belforte et al. 86], [DeCurtins & Mulgaonkar 88], [Faverjon & Ponce 91], [Seitz et al. 95], [Wang et al. 94].

[Coleman & Sampson 85] sucht nach Greifpunkten durch die Lösung des allgemeineren Problems, beim Abbilden des Greifermodells auf die Objektoberflächen jeweils zwei Oberflächen einander anzupassen.

Für die Planung von Griffen auf komplex oder unregelmäßig geformten Objekten werden dichte 3D-Daten benötigt [Sujan & Dubowsky 99], sowie fortgeschrittene Algorithmen [Kossov 98] wie z.B. Sensorfusion über künstliche neuronale Netze oder die Approximation der Oberfläche durch Funktionen höheren Grades [Baader & Hirzinger 94].

Einige der durch ROs der zweiten Generation beider Varianten experimentell gegriffenen Objekte sind Bremstrommeln [Belforte et al. 86], Rohrleitungsverbindungen, Kleiderbügel, Rohrabdeckungen [Birk et al. 81], Gashebel [Walter 84], unbekannte Postpakete [DeCurtins & Mulgaonkar 88], verunreinigte Nahrungsmittel [Patel et al. 94], Recycling-Kunststoffteile [Rubarth et al. 96] und Kaffeetassen [Seitz et al. 95].

Ein Vorteil solcher ROs ist die direkte und somit schnelle Art und Weise der Problemlösung, denn es wird auf eine evtl. komplizierte Objektidentifikation verzichtet. Ein anderer Vorteil besteht in der Robustheit gegen visuelle Verdeckungen aufgrund von Objektüberlappungen, da nur der Objektteil sichtbar sein muß, der vom Roboter gegriffen wird.

Jedoch können diese ROs die Szenenstabilität nicht gewährleisten oder gar das unbeabsichtigte Mitaneheben benachbarter Objekte verhindern, da weder das gegriffene noch die umliegenden Objekte dem System bekannt sind.

2.2.4 Dritte Generation: „Objektidentifikation mittels passiven Sehens“

ROs der dritten Generation versuchen, die Objekte in der Szene durch die Auswertung von Bildern der Szene zu identifizieren. Wenn die Objektidentifikation, und somit die Bestimmung eines ausgeprägten Modells für die Szene, erfolgreich verläuft, dann ist vollständige oder zumindest umfangreiche Szeneninformation vorhanden, so daß sichere Greif- und Entnahmevorgänge unter Vermeidung des ungewollten Mitanebens benachbarter Teile geplant werden können.

In Abbildung 2.6 ist der entsprechende Objektentnahmezyklus dargestellt. Er entspricht von allen in dieser Arbeit vorgestellten Objektentnahmezyklen am weitestgehenden dem in Abschnitt 2.2.1 beschriebenen Interpretationszyklus. Der einzige Unterschied besteht in der Entscheidung in Schritt 6 über die weitere Vorgehensweise, wenn die bereits gewonnene Information über die Szene, also die Qualität des ausgeprägten Modells, ausreichend ist, und somit keine Rückprojektion der Szenenausprägung in den 2D-Bereich mehr erforderlich ist. Der Interpretationszyklus wird in diesem Fall beendet. Hier erfolgt jedoch eine Entnahmeoperation durch den Roboter, falls sich noch Objekte in der Szene befinden. Wenn in Schritt 6 festgestellt wird, daß sich in der Szene keine zu entnehmenden Objekte mehr befinden, dann muß der Objektentnahmezyklus beendet werden, was durch „Stop 2“ gekennzeichnet ist.

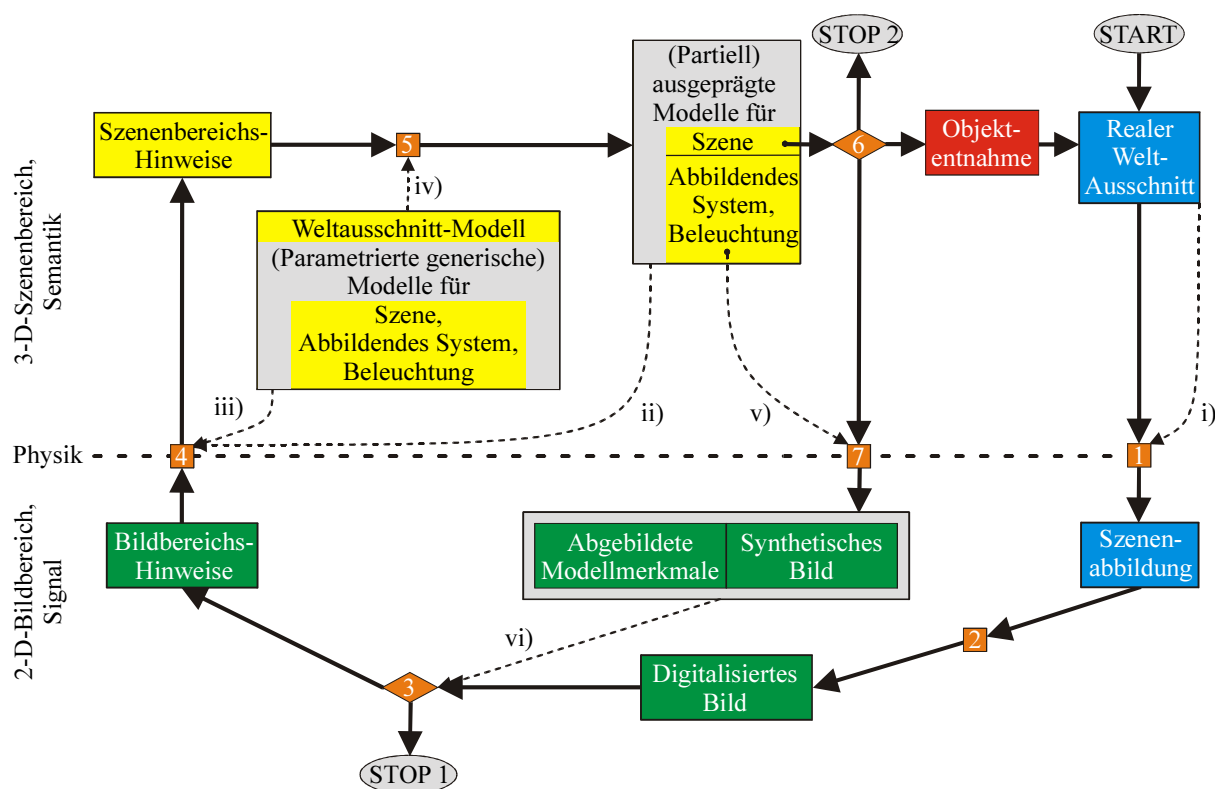


Abbildung 2.6: Objektentnahmezyklus der dritten Generation von ROs

Die vollständige Identifikation der Szene unter Verwendung von Bildern, bevor der Roboter ein Objekt entnimmt, wurde durch zahlreiche Forscher während der letzten beiden Jahrzehnte als das wichtigste zu lösende Problem bei der Entwicklung von ROs angesehen [Chin & Dyer 86]. Andere Ansätze, welche nicht die komplette Szeneninformation vorab aus

Bildern gewinnen, wurden in diesem Zusammenhang oftmals als unvollkommene Varianten deklariert.

Um eine zutreffende Ausprägung des Modells der Szene zu erhalten, verwenden solche ROs umfassende Modelle der Objekte, welche in der Szene vorkommen können. Wenn durch einen hohen Freiheitsgrad bei der Objektmodellierung im Weltausschnitt-Modell jedoch Mehrdeutigkeiten bei der Interpretation in Schritt Nr. 5 möglich sind, dann wird mit den ausgeprägten Modellen auch die Zuverlässigkeit der Entnahmeplanungen verschlechtert. Das ist auch der Fall, wenn eventuell sogar Heuristiken zur Aufstellung von Hypothesen über die Szene verwendet werden müssen, oder wenn die Modelle im Weltausschnitt-Modell nicht den tatsächlich auftretenden Objekten entsprechen.

Im folgenden werden zahlreiche Beispiele von ROs der dritten Generation erläutert, wobei eine Einteilung vorgenommen wurde in ROs, welche Wissensbasen mit genauen Objektbeschreibungen für die Interpretation verwenden, ROs, welche generische Objektmodelle zugrundelegen und ROs, welche mittels Heuristiken eine Szenenrekonstruktion vornehmen.

Verwendung einer Wissensbasis umfassender Objektmodelle zur Identifikation

Für die Zuordnung von Objektmodellen aus einer Wissensbasis zu Objekten in Bildern der Szene können Verfahren unterschieden werden, welche lokale bzw. globale Merkmale verwenden oder welche auf die Verwendung solcher Merkmale verzichten.

Weitverbreitet ist der Einsatz lokaler Merkmale für die Identifikation von Objekten, da die Objekte dabei nicht zwangsläufig vollständig sichtbar sein müssen und somit ein hoher Grad an Robustheit gegen visuelle Verdeckungen erreicht werden kann.

Lokale Merkmale sind beispielsweise Kreise bei rohrförmigen oder runden Objekten [Kawasaki Ltd. 99], [Lehmann & Klaiber 99], [Wang et al. 94], [Watanabe et al. 90], oder Referenzebenen auf komplex geformten Objekten [Kim et al. 94], [Onda et al. 95]. Die Kombination mehrerer lokaler Merkmale, nämlich Haupt- und Nebenmerkmale mit wohldefinierten Beziehungen, erhöht die Zuverlässigkeit der Objektidentifikation [Besl 88], [Bolles & Cain 82], [Fujiwara et al. 98], [Ohba & Ikeuchi 97], [Rahardja & Kosaka 96], [Röhrdanz & Wahl 97], [Röhrdanz 98], [Schmult 92], [Stockman et al. 88], [Tonko 97]. In [Bhanu & Faugeras 84] wird ein wahrscheinlichkeitsbasiertes Abbilden von Teilen der Kantenzüge der Berandung polygonaler Objekte zur Objektidentifikation eingesetzt.

Um den Verzerrungen bei der Abbildung von Kreisflächen oder durch Menschen hergestellte Gegenstände zu begegnen, werden in [Wang & Ben-Arie 99] affine Transformationen durchgeführt.

Mehrere Methoden wurden vorgestellt mit dem Ziel, die exponentielle Komplexität bei der Zuordnung zwischen Modellmerkmalen und Szenenmerkmalen zu reduzieren, wie z.B. die Abbildung von Merkmalsgraphen in Kombination mit einer Baumsuche [Faugeras 93] oder vorzeitige Beendigung der Zuordnung von Merkmalen in Verbindung mit einer Auswahl von Merkmalsunterräumen [Grimson 91]. Die Anwendung der Hough-Transformation [Faugeras 93], [Stockman et al. 88] führt zu einer Reduzierung der Komplexität durch die Verwendung des Parameterraums und wird sogar für die Berechnung kollisionsfreier Bahnen verwendet, wobei Szenenbereiche mit einer niedrigen Identifikationssicherheit als Kollisionsbereiche eingestuft werden [Takenouchi et al. 98].

Der Vorteil der Verwendung globaler Merkmale zur Objektidentifikation liegt in der Einfachheit der Zuordnung zwischen Modell- und Szenenmerkmalen. Jedoch scheitern

Zuordnungsverfahren unter Verwendung globaler Merkmale, wenn visuelle Verdeckungen vorhanden sind. Somit können solche Verfahren allein zur Identifikation eines Objekts nur dann zuverlässig eingesetzt werden, wenn sich die Objekte in der Szene nicht überlappen, oder wenn zumindest das zu identifizierende Objekt z.B. oben auf dem Objekthaufen liegt.

Als globale Merkmale von Flächenstücken werden häufig der geometrische Schwerpunkt, die Orientierung der Hauptachse sowie der Umfang verwendet [Cronshaw 90], [Gengenbach 90], [Li & Lee 96], [Schroeder et al. 98], [Yang & Kak 86]. Manchmal werden globale und lokale Merkmale kombiniert verwendet. Beispielsweise verwendet [Kim et al. 98] globale Merkmale zur Überprüfung auf Untersegmentierung, während zur Identifikation lokale Merkmale eingesetzt werden.

Die „Eigen-Space Analysis“ ist eine effektive Methode zum Einlernen der Modelle glänzender Objekte für die spätere Identifikation der vollständig sichtbaren Objekte. Als eine Modifikation dieser Methode erlaubt die „Eigen-Window Methode“ selbst die Identifikation teilweise verdeckter Objekte [Ohba & Ikeuchi 96a], [Ohba & Ikeuchi 96b], [Okada et al. 97], auch unter Verwendung von Farbinformation [Ohba et al. 97].

In [Ghosh et al. 96] werden über künstliche Landmarken wie beispielsweise drei aufgemalte kleine Kreisflächen Objekte zunächst identifiziert, um anschließend einen Roboter mittels einer Methode der zweiten GRO über Visual Servoing relativ zu diesen auszurichten.

Ein bedeutender Nachteil von Merkmalsmethoden zur Objektidentifikation ist, daß sie einen Großteil der in Bildern enthaltenen Information im allgemeinen nicht verwenden. Im Gegensatz dazu sind z.B. in „Extended Gaussian Images“ (EGI), welche aus sogenannten „Needle Maps“ (Verteilungen der Oberflächennormalen) gewonnen werden, auch Informationen über Oberflächenkrümmungen enthalten und erlauben eine robuste Objektidentifikation. Zur Erstellung der „Needle Maps“ reicht eine relativ grobe Bildauflösung aus, während Methoden unter Verwendung insbesondere lokaler Merkmale Bilder mit sehr viel höheren Auflösungen erfordern, um die einzelnen Merkmale klar erkennen zu können [Horn 93]. Die „Needle Maps“ können beispielsweise durch „Photometrische Stereoverfahren“, also Verfahren unter Verwendung der Reflektionsinformation der Objekte bei einer bestimmten Beleuchtungsrichtung in Abhängigkeit der Objektneigung, gewonnen werden [Caponetti et al. 86], [Distante et al. 88], [Horn 93], [Ikeuchi et al. 84], [Ikeuchi et al. 86]. Nach der Identifikation über „Photometrische Stereoverfahren“ werden für die Planung kollisionsfreier Bahnen beispielsweise relativ grobe Tiefenbilder verwendet, welche sich für die Objektidentifikation durch Merkmalsmethoden nicht eignen würden. Es besteht auch die Möglichkeit, die „Needle Maps“ direkt aus etwas dichteren Tiefenbildern zu gewinnen [Arai & Umeda 93], [Umeda & Arai 94].

Eine weitere modellbasierte Methode zur Objektidentifikation besteht in der Verwendung von „Distributed Associative Memory“ (DAM), welches über Laplace- und Fourier-Transformationen gebildet wird. Diese Methode ist sehr robust gegen Rauschen und Verdeckungen [Jacobson & Wechsler 84], [Wechsler & Zimmermann 89].

Verwendung generischer Modelle zur Objektrekonstruktion

Ein sehr fortschrittliches Verfahren zur generischen Rekonstruktion beliebiger polygonaler Objekte unter Einsatz der Sugihara-Methode wird in [Müller 92] vorgestellt.

Andere Arbeiten schränken die mögliche Objektvielfalt im allgemeinen sehr viel stärker ein. Oftmals werden quaderförmige Objekte vorausgesetzt, wobei die rekonstruierten

Ausprägungen der Modelle der sichtbaren Objekte in den für das Sichtsystem verdeckten Bereichen in den meisten Arbeiten künstlich verlängert werden, bis es zu einem Widerspruch kommt, da andere Objekte oder die Peripherie durchdrungen würden [Frederick et al. 88], [Grimson et al. 93], [Kooijman & Wel 88], [Lee & Glickman 88], [Mulgaonkar & DeCurtins 89], [Rembold 2000], [Vayda & Kak 90], [Vayda & Kak 91]. Methoden zur generischen Rekonstruktion sind nur anwendbar für bestimmte Objekte mit regelmäßiger Form.

Verwendung von Heuristiken zur Objektrekonstruktion

Eine im allgemeinen gefährliche, jedoch oftmals einfach zu realisierende Methode zur Objektrekonstruktion ist die Verwendung von Heuristiken. Die dabei hauptsächlich verwendete Eigenschaft ist die Konvexität von Objekten [Rutishauser 95].

In [Trobina & Leonardis 95], [Trobina 95] wird ein Verfahren vorgestellt, welches zunächst nach konvexen Objektteilen sucht. Die Frage, welche dieser konvexen Teile zusammen ein reales Objekt bilden, wird durch die Anwendung einer Heuristik beantwortet. Konvexe Teile werden dann als zusammengehörig angesehen, wenn sie mindestens einen konvexen Übergang haben. In Abbildung 2.7 ist diese Heuristik illustriert. Im linken Teil kann das L-förmige Objekt durch zwei Quader beschrieben werden. Zwischen den Flächen c und d, welche zu den verschiedenen Quadern gehören, wäre zwar ein direkter konkaver Übergang. Allerdings gibt es z.B. über den mittels roten Pfeilen eingezeichneten Pfad durch die gemeinsame Fläche a einen konvexen Übergang. Somit wird das gesamte Objekt als ein einziges Objekt angesehen. Im rechten Teil der Abbildung können zwischen dem grünen und dem gelben Quader keine konvexen Übergänge gefunden werden, und somit werden die beiden Quader als voneinander getrennt rekonstruiert.

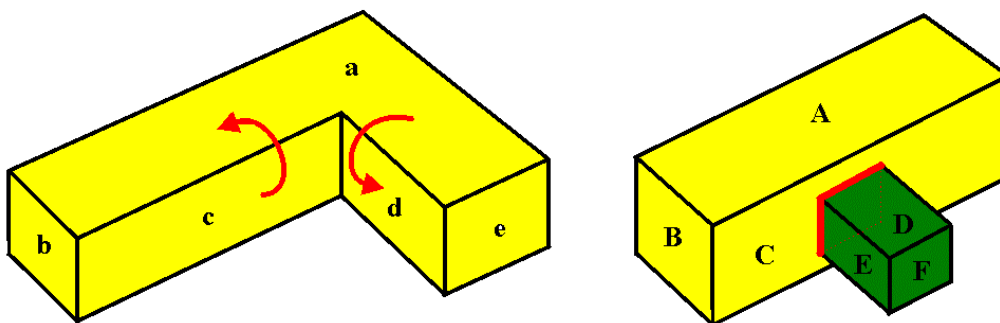


Abbildung 2.7: Heuristik zur Rekonstruktion von Objekten

In [Mattone et al. 98a], [Mattone et al. 98b], [Wolf 99] wird neben Konvexität als Kriterium zur Trennung von Objekten auch nach Höhengsprüngen zwischen verschiedenen Objekten gesucht.

In Arbeiten aller drei vorgestellten Methoden zur Identifikation bzw. Rekonstruktion von Objekten können auch Systeme gefunden werden, welche nicht vollautomatisch funktionieren, sondern die Hinzuziehung eines menschlichen Bedieners erfordern. Beispielsweise muß ein Mensch in [Swietlik 94] nach der bildbasierten Segmentierung der Szene dem System Objekteigenschaften und Objektbeziehungen mitteilen.

Teilweise setzen ROs der dritten Generation auch Sensoren ein, um während Entnahmeoperationen kritische unerwartete Zustände zu erkennen, welche nicht mit der gewonnenen Szenenausprägung vereinbar sind. Beispielsweise werden Laser-Triangulations-Sensoren am Greifwerkzeug [Laugier et al. 90] oder Näherungssensoren in den Fingerspitzen [Baerveldt 93], [Baerveldt 95] integriert.

Einige der in durchgeführten Experimenten eingesetzten Objekte sind Rohrverbindungsstücke [Fujiwara et al. 98], Autoreifen [Lehmann & Klaiber 99], Gußteile [Onda et al. 95], Generatorgehäuse [Rahardja & Kosaka 96], Teile von Telefonapparaten [Schraft et al. 93], Motorblöcke und Zylinderköpfe [Svensson 88], Kurbelwellen [Watanabe et al. 90], Pralinen [Cronshaw 90], gefrorene Hähnchen und Fischfilets [Li & Lee 96], Kartoffeln [Stockman et al. 88], Postpakete [Kooijman & Wel 88], [Lee & Glickman 88], [Vayda & Kak 90], [Vayda & Kak 91], Tischtennisbälle [Schroeder et al. 98] und verschiedene Haushaltsgegenstände [Trobina & Leonardis 95], [Trobina 95].

2.2.5 Vierte Generation: „Objektidentifikation mittels aktiver Wahrnehmung“

ROs der vierten Generation inspizieren aktiv die Szene mit dem Ziel, die Objekte zu identifizieren oder zu rekonstruieren. Dazu wird mobiler Sensoreinsatz und/oder Manipulation der Szene durch den Roboter genutzt. Dadurch können materielle, geometrische und kinematische Objekteigenschaften durch das Robotersystem erfaßt werden, welche den ROs der dritten Generation verborgen bleiben.

Abbildung 2.8 zeigt den Objektentnahmezyklus für ROs der vierten Generation. Er entspricht größtenteils dem Objektentnahmezyklus für ROs der dritten Generation, das heißt daß der komplette Interpretationszyklus integriert ist. Die bedeutende Erweiterung besteht darin, daß zur Verbesserung der ausgeprägten Modelle der Szene nicht nur die Rückprojektion über Schritt Nr. 7 möglich ist, sondern daß insbesondere auch eine gezielte „Vereinzlung“ oder auch „Modifikation“ der Szene durch den Roboter ausgeführt werden kann. Dies wirkt sich in einer Veränderung des realen Weltausschnitts aus, weshalb der Zyklus in dem Fall durch eine erneute Bildaufnahme und die darauffolgenden Schritte Nr. 2, 3, 4 und 5 geschlossen werden muß.

[Bajcsy & Campos 92] führte in einer allgemeinen Form das Konzept der aktiven Wahrnehmung ein. Angesichts der großen Variationsbreite von Objekten und der häufigen Ähnlichkeiten im Erscheinungsbild ist es oftmals schwierig, Objekte zu identifizieren. Bei Verwendung einer Menge von Merkmalen basierend auf Bildern von einem Zeitpunkt von einer festen Kamerakonfiguration wird dies noch weiter erschwert. Um zuverlässige und erweiterte Information über die Szene zu erlangen, kann es sinnvoll sein, die Sensoren zu bewegen, also z.B. weitere Bilder aus vorteilhafteren Positionen aufzunehmen [Tonko 97] oder die Szene durch Roboter Manipulation zu verändern. Dadurch kann Untersegmentierung erkannt werden, und zusätzliche Objekteigenschaften wie z.B. Elastizität, Textur, Temperatur sowie weitere lokale Merkmale lassen sich bestimmen. Hierzu können taktile oder Kraft-Momenten-Sensoren eingesetzt werden [Dario et al. 93], [Dario et al. 94a], [Dario et al. 94b], [Rucci & Dario 94]. Die zusätzlich gewonnene Information wird dazu benutzt, die Zuordnung von Objekten in der Szene zu Objektmodellen einer Wissensbasis zu erleichtern oder die Rekonstruktion zu verbessern.

Beim Einsatz einer Roboter Manipulation werden noch nicht eindeutig erkannte Objekte oder darauf liegende bekannte Objekte beispielsweise in eine Richtung verschoben, in der sich noch keine anderen Objekte befinden. Somit kommt es zu einer Vereinzlung vor der

Objektentnahme, was die Identifikation oder Rekonstruktion zwar wesentlich erleichtert, aber gleichzeitig einen erheblichen Freiraum benötigt, der nicht zu sehr von Berandungen begrenzt sein darf. In [Tsikos 87], [Tsikos & Bajcsy 91] wird der Objekthaufen durch einen Graphen modelliert, in dem die Kanten „Liegt-auf“-Beziehungen zwischen den in den Knoten dargestellten Objekten repräsentieren. Ziel jener Arbeit ist die Aufhebung der Kanten, also Vereinzelung durch Schiebeoperationen, so daß der Graph vollständig zerfällt, was einer kompletten Vereinzelung entspricht.

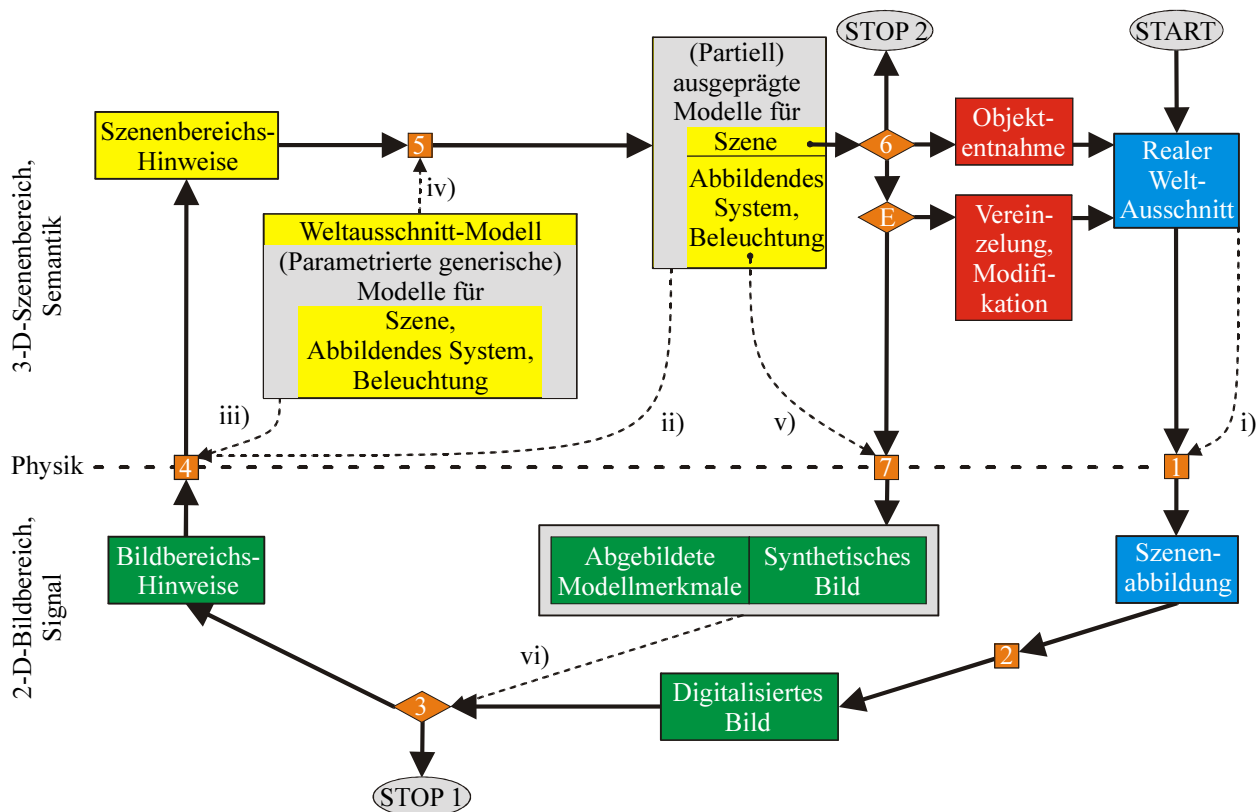


Abbildung 2.8: Objektentnahmezyklus der vierten Generation von ROs

Aktive Wahrnehmung kann auch zur Untersuchung materieller und kinematischer Objekteigenschaften wie Reibung und Stabilität eingesetzt werden. In [Gandolfo et al. 91] beispielsweise werden Objekte leicht angestoßen. Durch die Beobachtung der resultierenden Bewegungen unter Verwendung von Optical Flow Methoden kann aus der Schwingungsamplitude und -frequenz auf die Lagestabilität und aus dem Verrutschen auf die Reibung zwischen Objekt und Untergrund geschlossen werden.

[Mason 82] stellt ein grundlegendes Konzept zur Planung und Analyse von Schiebeoperationen vor, welches auch die Extraktion von Objekteigenschaften erlaubt. Jedoch wird dort nicht die Problematik der Objektentnahme betrachtet. In [Spreng 93] werden Überprüfungsoperationen geplant, welche der Bestätigung von Hypothesen über Kontakte zwischen den modellierten Objekten dienen.

Durch ROs der vierten Generation wurden in Experimenten beispielsweise Postpakete [Tsikos 87], [Tsikos & Bajcsy 91] oder Haufen von Gegenständen nach dem Ausleeren von Damenhandtaschen [Rucci & Dario 94] sortiert.

Es soll an dieser Stelle abschließend nochmals betont werden, daß ROs der vierten Generation zwar Information über die Szene erlangen können, welche ROs der dritten Generation verborgen bleibt, aber ihr grundlegendes Ziel ist ganz klar die Identifikation oder

Rekonstruktion der Objekte inklusive der wesentlichen Objekteigenschaften, insbesondere der geometrischen Objektgestalt.

2.3 Diskussion und daraus resultierende weitere Vorgehensweise zur Problemlösung

Bei der Diskussion des Stands der Forschung wird von der in Abschnitt 1.3 vorgestellten Zielstellung der Arbeit ausgegangen. Ein RO soll realisiert werden, welches flexibel und zuverlässig ist. Unter Flexibilität wird dabei verstanden, daß die Objektentnahme nicht auf ein a priori festgelegtes Teilespektrum beschränkt sein soll.

Zunächst kann klar festgestellt werden, daß keines der studierten Systeme die genannten Anforderungen auch nur annähernd erfüllt.

ROs der ersten Generation stellen relativ einfach zu realisierende Lösungen zur Objektentnahme dar. Da jedoch neben dem a priori Wissen überhaupt keine Information über die nicht gegriffenen Objekte in der Szene vorliegt, können solche ROs im allgemeinen keinerlei Zuverlässigkeit gegen das Mitanheben nicht gegriffener Objekte gewähren.

Bisherige ROs, welche unter Berücksichtigung der Stabilität der Gesamtszene und des Zustands von Nachbarobjekten fortgeschrittene Entnahmeplanungen vornehmen [Schmolt 92], [Schweikard & Schwarzer 97], erfordern exakte, z.B. in Wissensbasen erfaßte Objektmodelle, was die Flexibilität der Systeme quasi zunichte macht. Die Rekonstruktion der Objektmodelle mittels generischer Modelle oder Heuristiken birgt derart mannigfaltige und nur sehr bedingt abschätzbare Gefahren der Fehlmodellierung in sich, so daß diese Ansätze sich nicht mit der Forderung nach Zuverlässigkeit vereinbaren lassen. Von dieser Problematik sind die ROs der dritten und der vierten Generation betroffen, deren oberstes Ziel ja die Identifikation oder Rekonstruktion der Objekte ist. Deshalb sollen die Objektentnahmezyklen der ROs der dritten und vierten Generation nicht als Basis dieser Arbeit verwendet werden.

Bisherige ROs, welche sehr flexibel sind, also quasi beliebige Objekte greifen und entnehmen können, berücksichtigen derzeit nicht, was mit den nicht gegriffenen Objekten während der Entnahme geschieht. Als einzige Ausnahme hiervon kann die Gewichtsmessung des gegriffenen Objekts genannt werden, welche bei bekanntem gegriffenen Objekt auf das Mitanheben anderer Objekte schließen läßt. Diese einfache Überwachung ist aber bereits unmöglich, wenn das gegriffene Objekt entweder vollkommen unbekannt ist oder auch, wenn nur die genaue Gewichtsinformation in keiner Wissensbasis erfaßt ist. Hinzu kommt die große Problematik, daß die Gewichtsmessung mit heute zur Verfügung stehenden Kraft-Momenten-Sensoren während einer Roboterbewegung bei Verzicht auf zeitintensive Filterung oder Mittelung über zahlreiche Meßwerte derart mit Rauschen versehen ist, daß eine kleine Masse eines mitangehobenen Objekts überhaupt nicht eindeutig erkannt werden kann. Systeme dieser Art können innerhalb der zweiten Generation von ROs gefunden werden.

Es ist sinnvoll, die Lösung des gestellten Problems schrittweise anzugehen. Erstens kann dadurch die enorme Komplexität des Gesamtproblems auf eher überschaubare Teilprobleme verteilt werden. Zweitens besteht durch eine abschnittsweise Problemlösung und eine damit verbundene schrittweise Realisierung die Möglichkeit, während der Problemlösung noch Erfahrungen zu sammeln und eventuell Teilprobleme zu erkennen, welche zunächst gar nicht berücksichtigt wurden.

Aufgrund der durch bisherige ROs der zweiten Generation bereits erreichten und für das Ziel dieser Arbeit wichtigen Eigenschaft, sehr flexibel auch weitgehend unbekannte Objekte greifen und entnehmen zu können, wird in dieser Arbeit vom Objektentnahmezyklus der ROs der zweiten Generation ausgegangen.

Zunächst wird ein RO der zweiten Generation realisiert. Eine Beispielanwendung im Versandhandel sowie die dazu verwendete Hardware, die Systemarchitektur, die Entwicklungsumgebung und die Bedienschnittstelle werden in Kapitel 3 eingeführt.

Anschließend werden in Kapitel 4 drei Benchmarks definiert, welche die Überprüfung der Fähigkeit zulassen, entsprechend der Zielstellung wichtige Probleme bei der zuverlässigen Objektentnahme zu lösen. Diese Benchmarks werden im weiteren Verlauf der Arbeit zum Vergleich mit anderen ROs und somit insbesondere zur wesentlichen Verbesserung des in dieser Arbeit entwickelten Systems verwendet.

Kapitel 5 erläutert detailliert eine neue Greifplanung, welche die zentrale Hauptkomponente des in dieser Arbeit im ersten Schritt entwickelten ROs der zweiten Generation bildet. Die ROs in den studierten Arbeiten, welche flexibel auch weitgehend unbekannte Teile handhaben können, verwenden bis auf eine Ausnahme nur einen Greifer. Werden mehrere Greifer eingesetzt, dann hat jeder Greifer eine bestimmte Aufgabe z.B. in festen Montageabläufen. Da es in absehbarer Zeit keine Universalgreifer für alle möglichen Objekte geben wird, sollte in ein fortschrittliches flexibles RO ein Greiferwechselsystem integriert sein. In [Rembold 2000] wird erstmals ein Ansatz zur optimierten Greiferauswahl vorgestellt. Jedoch liegt in jener Arbeit der Schwerpunkt auf der möglichst automatischen Erzeugung von Greifplanungsalgorithmen für einzelne Greifer. Auf die Unterschiede zwischen jenen Algorithmen und den in dieser Arbeit entwickelten Greifplanungsalgorithmen zur optimierten Greiferauswahl wird in Kapitel 5 unter Verwendung der in Kapitel 4 definierten Benchmarks ausführlich eingegangen.

Ausgehend von den bei der Realisierung eines ROs der zweiten Generation gemachten Erfahrungen und einer Schwachstellenanalyse aufgrund der Benchmarkergebnisse wird in Kapitel 6 die Entwicklung einer vollkommen neuen Strategie zur Objektentnahme erläutert, welche zuverlässig die Vermeidung des ungewollten Mitanebens benachbarter Objekte erlaubt. Gleichzeitig bleibt das flexible Greifen weitgehend unbekannter Teile durch die Verwendung der in Kapitel 5 vorgestellten Greifplanungsalgorithmen möglich.

2.4 Zusammenfassung des Kapitels

Der Stand der Forschung wurde in diesem Kapitel nicht wie in den bisherigen Arbeiten nach den lösbaren Problemkonfigurationen gegliedert, da solch eine Gliederung hier nur bedingt zum konstruktiven wissenschaftlichen Fortschritt beiträgt. Statt dessen wurde eine neue Klassifizierung von Robotersystemen zur Objektentnahme (ROs) in vier verschiedene Generationen von ROs (GROs) vorgenommen. Es ist dabei gerechtfertigt, von Generationen zu sprechen, da sie zeitlich versetzt zum ersten Mal auftraten, und da die Komplexität der Erfassung und Verarbeitung von Szeneninformation in der Reihenfolge der vier Generationen ansteigt. Ausgehend von den in einer Diskussion der studierten ROs analysierten Eigenschaften der vier GROs wurde die weitere Vorgehensweise der Arbeit hinsichtlich des Erreichens der in Abschnitt 1.3 formulierten Ziele der Arbeit begründet.

Kapitel 3

Entwicklung eines Robotersystems zur Warenentnahme bei der Kommissionierung

3.1 Warenfluß in der Kommissionierzelle

Die Logistik und somit der Warenfluß in den Lager- und Kommissionierbereichen großer Versandhäuser unterliegt einem ständigen Wandel. Trotzdem konnten in dem Versandhaus, in welchem der Demonstrator aufgebaut wurde, drei Anwendungen identifiziert werden, welche bisher manuell ausgeführt wurden und in verschiedenen Bereichen mit vielfältigen Funktionen anzutreffen sind.

Das linke Bild in Abbildung 3.1 zeigt, wie Menschen einzelne Waren aus ungeordneten Warenhaufen von der Ablagefläche am Ende einer Warenrutsche entnehmen, um sie anschließend auf freie Schalen eines vorbeilaufenden Sorters abzulegen. Das mittlere Bild zeigt die gleiche Entnahmesituation, jedoch müssen die Waren in Kartons verpackt werden. Im rechten Bild sind die Waren ebenfalls in Kartons abzulegen, in dieser Anwendung aber von den Schalen eines Sorters zu entnehmen. In dieser Arbeit konzentriert sich die Realisierung eines Demonstrators auf die ersten beiden Aufgaben, da dort bei der Entnahme der Waren von ungeordneten Haufen die in der Zielstellung der Arbeit erläuterten Probleme zu lösen sind. Bei den Waren auf den Sorterschalen in der dritten Anwendung ist dies nicht der Fall, da diese im allgemeinen bereits vereinzelt vorliegen.

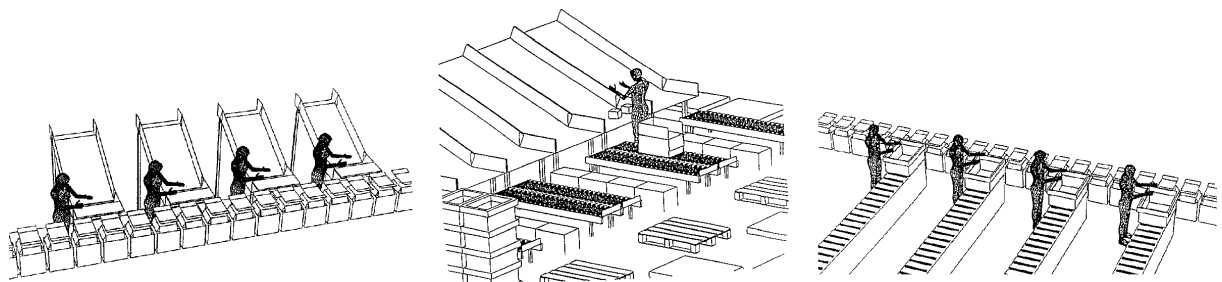


Abbildung 3.1: Drei Anwendungen für ROs bei der Kommissionierung von Waren
 Links: Von Rutsche auf Sorter; Mitte: Von Rutsche in Karton; Rechts: Von Sorter in Karton

3.2 Auswahl und Anordnung der Hardware

Abbildung 3.2 zeigt ein Bild einer mit RobCAD realisierten Simulation der Demonstrator-Zelle, wie sie im Institut aufgebaut wurde. Die Waren liegen ungeordnet und übereinander auf der Ablage einer Rutsche (Nr. 1)^{3.1}. Ein Kamerasystem (Nr. 2) nimmt ein Bild der Szene auf, woraufhin die Ausführung einer geeigneten Entnahmestrategie geplant wird. Anschließend entnimmt ein Industrieroboter (Nr. 3) mit dem aus einer Greifer-Ablagestation (Nr. 4) ausgewählten Greifer eine Ware von dem Haufen und legt sie in eine Wanne (Nr. 5) ab. Ein zweiter Roboter (Nr. 6) wird bei fortgeschrittenen zuverlässigen Entnahmevorgängen eingesetzt, auf die in Kapitel 6 ausführlich eingegangen wird. Abbildung 3.8 in Abschnitt 3.4 zeigt ein Simulationsbild des Demonstrator-Aufbaus im realen Versandhandelsumfeld. Dort wird die Ware auf einen Sorter abgelegt. Somit werden beide im vorangegangenen Abschnitt ausgewählten Aufgaben im Versandhandel behandelt.

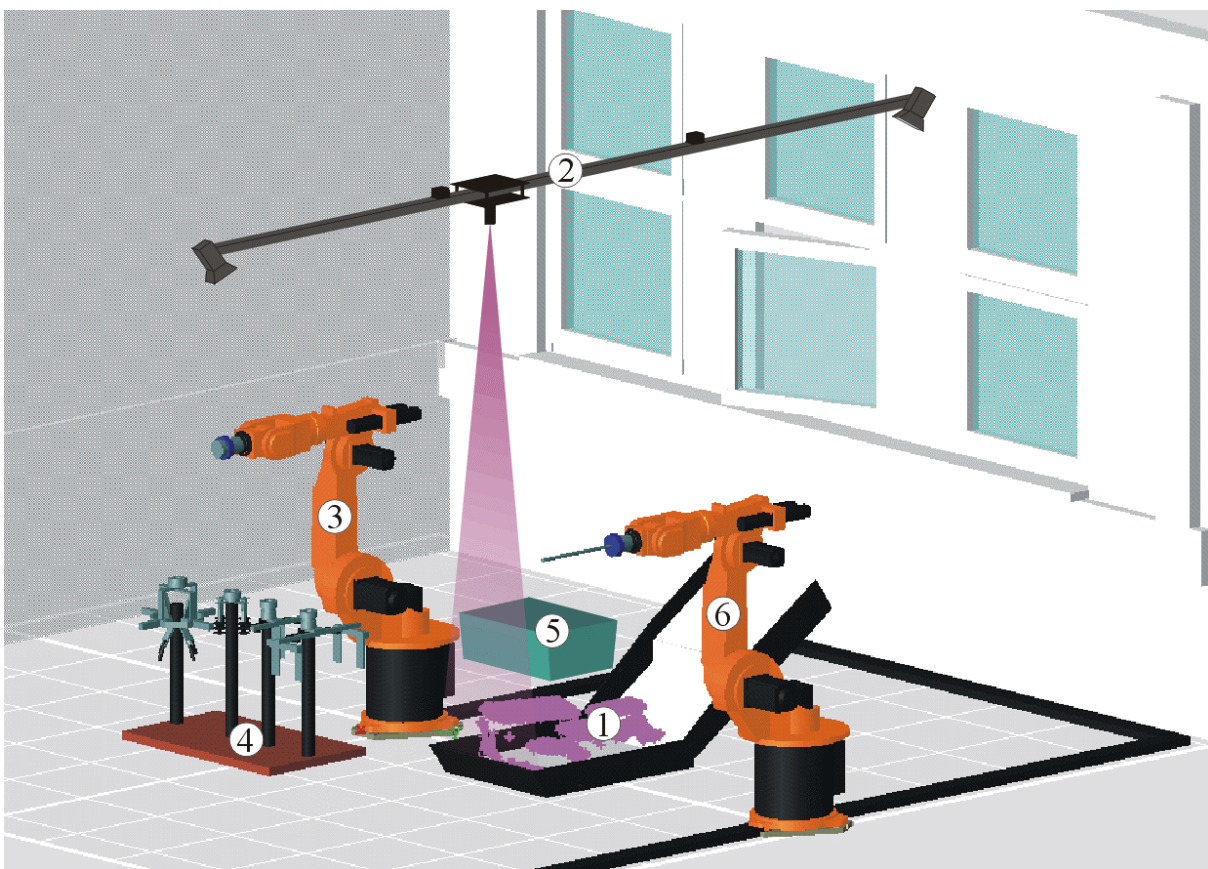


Abbildung 3.2: RobCAD-Simulation einer Demonstrator-Roboterzelle

In Abschnitt 2.3 hat es sich bei der Vorgehensweise zur schrittweisen Problemlösung als sinnvoll herausgestellt, zunächst ein RO der zweiten Generation zu realisieren. Gemäß dem Objektentnahmezyklus von ROs der zweiten Generation in Abbildung 2.5 muß zunächst ein Bild der Szene aufgenommen werden. Es können basierend auf 3D-Bildern aufgrund der hohen Informationsdichte unter anderem zuverlässigere Griffe geplant werden als mit 2D-Bildern. Deshalb wird Variante b) des Objektentnahmezyklus ausgewählt, was bedeutet, daß Szenenbereichshinweise im 3D-Bildbereich segmentiert werden.

^{3.1} In der Abbildung 3.2 sind keine Objektmodelle dargestellt. Statt dessen ist das durch ein Kamerasystem erstellte Tiefenbild der Szene als violette Punktwolke zu sehen.

Um in industrieller Umgebung weitgehend unabhängig von Fremdlichteinflüssen zu sein, wird das Bild aktiv mit Laserlicht beleuchtet. Die Abbildungen 3.2, 3.3 und 3.4 zeigen die Projektion des zu einem Lichtvorhang aufgefächerten Lichts einer Laserdiode auf die Szene. Über zwei Kameras wird der Verlauf der projizierten Linie aufgenommen. Eine Kamera würde prinzipiell ausreichen für die Aufnahme eines Tiefenbilds. Durch den Einsatz mehrerer Kameras lassen sich jedoch die visuellen Verdeckungen reduzieren. Wenn die Laserdiode an einer Position steht, kann das Höhenprofil für die gerade beleuchtete senkrecht stehende Schnittebene bestimmt werden. Durch das Verfahren der Laserdiode mit Hilfe einer Lineareinheit und Aufnahmen zahlreicher Bilder läßt sich ein Tiefenbild für die gesamte Szene erstellen. Der Einsatz von Hochgeschwindigkeitskameras (1kHz) erlaubt das Abscannen von einem Meter der Szene in einer Sekunde bei einer Auflösung von einem Millimeter in Verfahrrichtung der Laserdiode. Damit diese Auflösung auch tatsächlich erreicht wird, muß die Optik in Abhängigkeit der Bildmatrix (256 x 256 Pixel), der Größe der Szene sowie der räumlichen Entfernungen und Anordnungen geeignet gewählt werden. Bei relativ großen Szenen oder hohen Anforderungen an die Auflösung sind mehrere Kameras nebeneinander anzuordnen. Da nur die relativ leichte Laserdiode, nicht jedoch die Kameras verfahren werden, kann eine relativ günstige Lineareinheit eingesetzt werden.

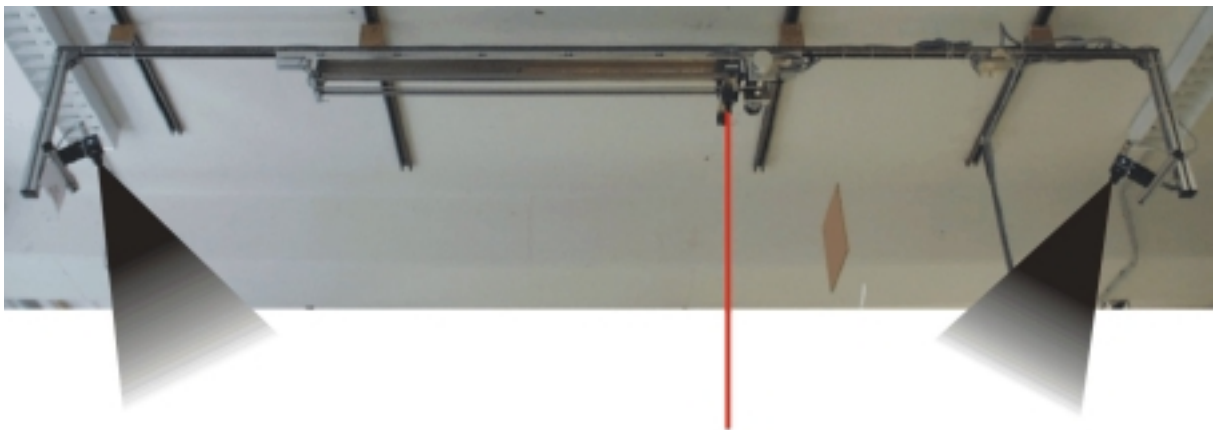


Abbildung 3.3: Seitenansicht des Laserscanners für die Tiefenbildaufnahme

Das Anbringen des Kamerasystems an der Decke außerhalb des Arbeitsbereichs des Roboters bietet einige Vorteile gegenüber der Befestigung beispielsweise am Roboterflansch. Am wichtigsten ist, daß eine erneute Bildaufnahme bereits erfolgen kann, während der Roboter ein entnommenes Teil wegtransportiert und z.B. ablegt. Ein weiterer Vorteil dieser Anordnung liegt darin, daß der Roboter und das Kamerasystem nicht miteinander kollidieren können. Auch durch Menschen, beispielsweise Bediener oder Putzfrauen, wird das System nicht versehentlich berührt und dekalibriert oder sogar beschädigt. Durch die Montage an der im allgemeinen massiven Decke erübrigt sich die aufwendige Konstruktion eines schwingungs- und vibrationsfreien Gerüsts. Schließlich ergeben sich durch die sehr großen Entfernungen der Beleuchtung und der Kameras von der Szene bei gleichzeitiger Verwendung von Abbildungsoptiken mit relativ langen Brennweiten Strahlengänge, die im Rahmen der Genauigkeit des Gesamtsystems bei entsprechender Dimensionierung als annähernd parallel angesehen werden dürfen. Dadurch können Vereinfachungen bei Bildauswertung und Planungen zur Kollisionsvermeidung vorgenommen werden. Die großen Entfernungen haben jedoch auch den Nachteil, daß relativ viel Platz für die Montage benötigt

wird. Auch wirken sich bereits kleine Schwingungen oder Vibrationen der Laserdiode beim Verfahren in einem deutlich erhöhten Rauschen aus.



Abbildung 3.4: Projektion des Laserlichts auf die Szene

Der Roboter muß in der Lage sein, verschiedene Greifer von der Ablage aufzunehmen und in beliebiger Orientierung daliegende Objekte zu greifen. Ein Robotereinsatz ist dann besonders wirtschaftlich, wenn er neben einer Bearbeitungs-, Entnahme- oder Montageoperation auch den Transport von Objekten erlaubt, so daß zusätzliche Transporteinrichtungen wie z.B. Fließbänder entfallen können. Das heißt, daß der Arbeitsraum des Roboters recht ausgedehnt sein sollte. Diese Anforderungen erfüllen im allgemeinen Industrieroboter, welche nach der DIN EN ISO 8373 Norm [DIN 96] folgendermaßen definiert sind:

Ein Industrieroboter ist ein automatisch gesteuerter, frei programmierbarer Mehrzweck-Manipulator, der in drei oder mehr Achsen programmierbar ist und zur Verwendung in der Automatisierungstechnik entweder an einem festen Ort oder beweglich angeordnet sein kann.

Die überwiegend eingesetzten Industrieroboter verfügen über sechs Achsen und erlauben die Bewegung eines montierten Greifers in sechs Freiheitsgraden. Es sind heute auch zunehmend sogenannte Langarm-Roboter unter Verwendung von Leichtbaumaterialien käuflich erhältlich, welche große Transportwege über mehrere Meter hinweg bei einer hohen absoluten Genauigkeit von deutlich unter einem Millimeter im gesamten Arbeitsraum erlauben.

Die Greifer können über ein Wechselsystem mit einer pneumatisch angesteuerten mechanischen Verriegelung, pneumatischen Durchleitungen und elektrischen Kontakten an den Roboter angeflanscht werden.

Drei verschiedene Greifer wurden für das Greifen der im Demonstrator-Versandhandel vorkommenden Waren [Fahrer 97] entwickelt. Aufgrund einer Analyse des Warenspektrums bilden Kartonverpackungen den Großteil der zu greifenden Waren. In der Regel weisen solche Kartons einander gegenüberliegende parallele, ebene Flächen auf, weshalb sich Parallel-Backen-Greifer zum Greifen anbieten. In Abbildung 3.5 sind die beiden realisierten Parallel-Backen-Greifer zu sehen, welche sich in ihren Hubbereichen ergänzen. Der größere Greifer (Nr. 1) hat pro Greiferbacke zwei Finger, insgesamt also vier Finger, um auch sperrige Objekte stabil greifen zu können. Der kleinere Greifer (Nr. 2) hingegen hat pro Backe nur einen Finger, insgesamt also zwei Finger, welche sich beim vollständigen Schließen des Greifers berühren. Angetrieben werden die Backen durch Gleichstrommotoren.

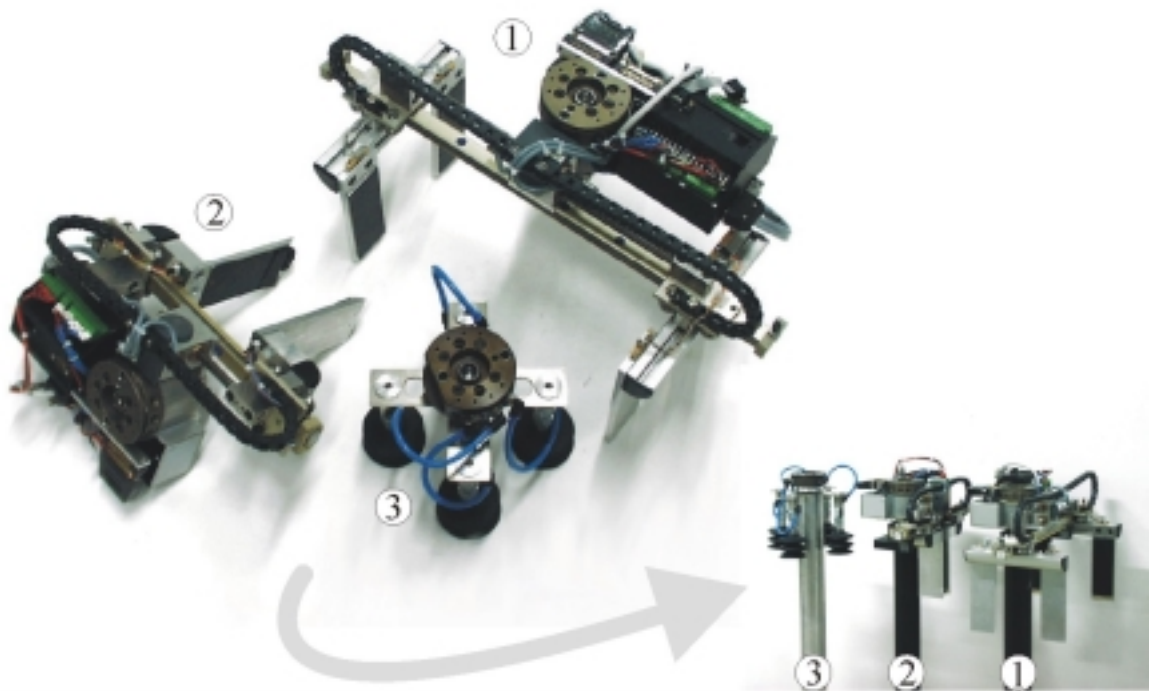


Abbildung 3.5: Parallel-Backen-Greifer und Vakuumbreifer

Die schwarzen Gehäuse auf den Greifern in Abbildung 3.5 beinhalten die Greifersteuerungen. Von einem übergeordneten Rechner werden komplexe Befehle wie z.B. „Schließen bis Objektberührung und Nachgreifen“ an den mechatronischen Greifer gesendet [Müller et al. 99d]. Über taktile Sensoren in den Greiferfingern können Berührungskräfte an den Fingerinnenseiten äußerst empfindlich erkannt und gemessen werden. Abbildung 3.6 zeigt die Komponenten der Finger, links für die vier Finger des großen Greifers und rechts für die beiden Finger des kleinen Greifers. In ausgefrästen Vertiefungen der Finger liegen mehrere taktile Lowcost-Sensoren, Halbleiterfolien, deren elektrischer Widerstand sich bei Druckänderung verändert. Die schwarzen Schaumstoffstücke zwischen den Sensorfolien und der Abdeckplatte verbessern wesentlich die Möglichkeit, neben einer binären Information auch die ausgeübte Kraft messen zu können. Durch diesen Aufbau und eine elektronische Schaltung wurde eine Linearisierung der Signalverläufe erreicht.

Aufgrund der Meßwerte der taktilen Sensoren in den Greiferfingern ist es möglich, die relative Lage, also die Position und die Orientierung zwischen Greifwerkzeug und zu greifendem Objekt nachzuregeln. Somit läßt sich die Greiffläche, also die gesamte Berührungsfläche zwischen Greifwerkzeug und Objekt, maximieren, so daß im Vergleich zu einem Griff mit nur kleiner Berührungsfläche die für stabiles Greifen erforderliche Greifkraft relativ klein eingestellt werden kann.

Der in Abbildung 3.5 gezeigte Vakuumbreifer (Nr. 3) eignet sich sehr gut zum Greifen glatter ebener Oberflächen wie z.B. Kartonoberflächen oder gestraffter Folien. Er muß beispielsweise dann eingesetzt werden, wenn Kartons für die Parallel-Backen-Greifer zu groß sind. Der Einsatz ist oftmals auch schneller, da das Eingreifen mit Greiferfingern in möglicherweise enge Spalten entfällt. Dieses Eingreifen muß nämlich relativ langsam

erfolgen, um über lokalen Sensoreinsatz schwere unerwartete Kollisionen vermeiden zu können^{3,2}.

Der realisierte Vakuumgreifer eignet sich nicht für das Greifen von Textilien, die in losen Folien eingepackt sind. Dafür müßten anders geformte Saugnäpfe eingesetzt werden [Gore et al. 88]. Solche Waren werden durch den Demonstrator dieser Arbeit mit dem kleinen Parallel-Backen-Greifer gegriffen. Sehr gut eignen sich zum Greifen solcher Waren auch Winkelgreifer, deren gummiüberzogene Fingerspitzen die Folie beim Schließen etwas aufrollen [Büschel et al. 99].

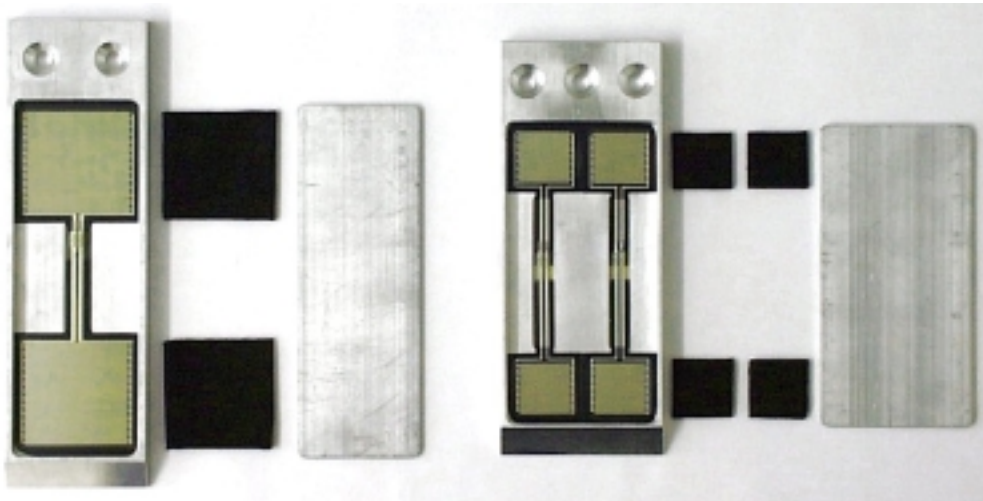


Abbildung 3.6: Taktile Sensoren in den Greiferfingern

Über einen Kraft-Momenten-Sensor am Flansch des Roboters, also zwischen dem Roboter und dem Greifer, können die wirkenden Kräfte in Richtung dreier aufeinander orthogonal stehender Achsen und die wirkenden Momente um diese Achsen gemessen werden. Über diesen Sensor lassen sich beispielsweise Kollisionen des montierten Greifers mit der Umgebung erkennen. Gemäß [Weigl et al. 95], [Weigl et al. 96], [Weigl 97] können aus den wirkenden Kräften Bewegungen zur kraftgeführten Umgehung eventueller Hindernisse berechnet und ausgeführt werden. Oftmals müssen auch gezielt Kollisionen herbeigeführt werden. Beispielsweise wird in dieser Arbeit der kleine Parallel-Backen-Greifer zum Greifen einer Textilie vor dem Schließen der Finger etwas in diese Weichware hineingedrückt. Auch sind gezielt herbeigeführte Kollisionen oftmals hilfreich zur Bestimmung der Situation, in welcher der Roboter sich gerade befindet. Weiterhin sind kritische Situationen wie Verklemmungen und Verhakungen erkennbar. Darüberhinaus läßt sich das Gewicht von gegriffenen Objekten bestimmen, z.B. für die Überprüfung, ob überhaupt ein Objekt gegriffen und angehoben wurde. All diese kraftgeregelten und -überwachten Algorithmen wurden für den Demonstratoraufbau realisiert. Sie bilden jedoch nicht das Hauptthema dieser Dissertation und werden hier deshalb nicht näher erläutert.

Zwischen dem Roboter und dem Kraft-Momenten-Sensor ist noch eine Überlast-Schutz-Dose montiert, welche bei eventuellen schweren Kollisionen die durch sie gebildete starre Verbindung auflöst und somit den Greifer frei am Roboter hängen läßt. Dabei wird eine pneumatisch angepreßte Scheibe verdreht und läßt den Überdruck entweichen. Ein integrierter

^{3,2} Derzeit ist in der Industrie jedoch ein Trend zu erkennen, daß von Vakuum-Greiftechnik auf den Einsatz von Elektrogreifern übergegangen wird, da durch Undichtheit des Pneumatik-Netzes bis zu ca. 10% Energie verloren geht, und da Vakuumgreifer bei z.B. in Versandhäusern häufig staubiger Umgebung sehr störanfällig sind.

Entfernungssensor läßt das Wegkippen der normalerweise angepreßten Scheibe erkennen und schaltet durch die Einkopplung in den Not-Aus-Kreis das System ab.

Auf weitere Hardwarekomponenten wie einen am zweiten Roboter angebrachten Sensor, einen miniaturisierten Laserscanner am Handgelenk des Roboters sowie eine passive Kinematik wird nach der Erläuterung ihres Verwendungszwecks in Kapitel 6 eingegangen.

3.3 Systemarchitektur

Abbildung 3.7 zeigt die Systemarchitektur des realisierten Demonstratorsystems [Müller et al. 99a]. Planende und koordinierende Komponenten sind durch grüne Kästchen, Sensoren durch blaue und Aktoren durch gelbe Kästchen unterlegt. Die Pfeile geben an, welche Komponenten miteinander kommunizieren. Im Demonstrator sind die verschiedenen Komponenten auch tatsächlich auf verschiedene Rechner und Module verteilt. Mit steigender Prozessorleistung können die Algorithmen der verschiedenen Komponenten jedoch sehr wohl als verschiedene Prozesse auf einem oder wenigen Rechnern ausgeführt werden. Entsprechend den Anforderungen an Echtzeit bzw. Umfang der zu übertragenden Daten wird entweder der Feldbus CAN mit dem DeviceNetTM-Protokoll [DeviceNet 97] oder aber ein lokales, vom Netz abgetrenntes Ethernet mit dem TCP/IP-Protokoll zur Kommunikation verwendet. Als Rechner werden PCs, Silicon Graphics und Mikrocontroller genutzt. Die Betriebssysteme Windows 95, Windows NT 4.0, VxWorks und Solaris kommen zum Einsatz. Die Programme wurden mit den Sprachen C/C++, Assembler und KRL (Kuka Robot Language) erstellt.

Eine zentrale Rolle nimmt die Planung und Verwaltung des Gesamtablaufs ein. In diese zentrale Komponente sind die Haupt-Bedienchnittstelle und die Visualisierung von Simulationen sowie des Verlaufs von Roboteroperationen integriert. Von hier aus werden Anforderungen an das Kamerasystem gesendet, Tiefenbilder aufzunehmen. Basierend auf deren Auswertung wird die Ausführung einer Strategie geplant. Roboter-Aktionspläne, welche die jeweilige Aufgabe mit zahlreichen Parametern wie Zielkoordinaten, erforderlichem Sensoreinsatz sowie Information zum Verhalten in kritischen Situationen beinhalten, werden an einen Rechner gesendet, welcher die Ausführung des Plans koordiniert. Nach der Ausführung werden die erreichten Ergebnisse und Statusinformationen zurückgemeldet, so daß der Gesamtablauf zum Erfüllen der Aufgabe weiter verwaltet werden kann.

An den Koordinationsrechner der Roboteraktionen sind die Robotersteuerungen, Kraft-Momenten-Sensoren, Lichtschranken und Entfernungssensoren gekoppelt. Die zentrale Greifersteuerung koppelt das Greiferwechselsystem vom Zellen-Kommunikationsnetz ab. Probleme wie Totzeiten beim Ankoppeln eines Greifers, der erst bei mechanischer Verbindung mit dem Roboter mit Strom versorgt wird und bei direkter Integration in ein globales Kommunikationsnetz erst erkannt werden müßte, werden über diese zentrale Greifersteuerung behandelt. Befehle an die Parallel-Backen-Greifer werden bei Vorhandensein des gewünschten Greifers an die auf dem mechatronischen Greifer montierte Steuerung weitergeleitet. Die Ansteuerung der Pneumatikventile für den Greiferwechsel sowie für das Greifen und Abstoßen von Objekten mit dem Vakuumgreifer wird direkt von der zentralen Greifersteuerung aus vorgenommen.

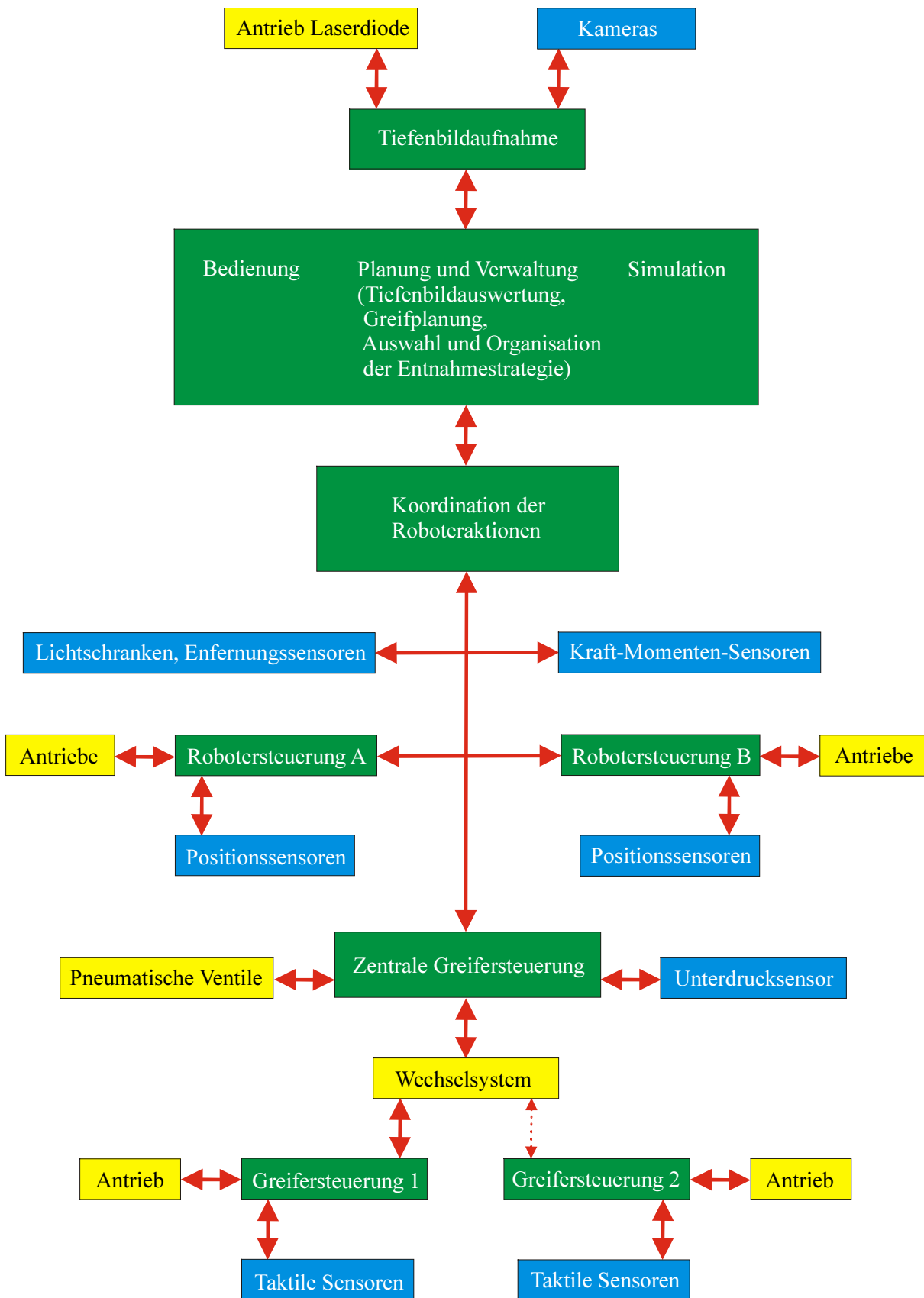


Abbildung 3.7: Systemarchitektur der Roboterzelle
 (Datenverarbeitung Sensorik Aktuatorik)

Eine komplette Trajektoriengenerierung wurde auf der Robotersteuerung über eine vorhandene Sensorschnittstelle implementiert, welche das Abfahren fortgeschrittener Fahrprofile wie z.B. Splines oder auch das kartesische Durchfahren von Singularitäten [Paul 82] erlaubt. Die Schnittstelle zwischen Robotersteuerung und dem Koordinationsrechner wurde sehr flexibel gestaltet. Beispielsweise können Listen von Befehlen an die Robotersteuerung gesendet werden, welche dort in eine Warteschleife eingetragen und nacheinander abgearbeitet werden. Jederzeit ist das Löschen oder Einfügen von Befehlen an beliebiger Stelle möglich. Unterbrechungen der Ausführungen erlauben das Reagieren auf überraschend eingetretene Ereignisse. Korrekturbewegungen aufgrund von Sensorinformation können im Betrieb eingearbeitet werden. Insbesondere ist zu betonen, daß die Ausführung der Roboterbefehle mit der Ausführung entsprechender Greiferbefehle synchronisiert werden kann.

3.4 Simulation und Bedienung der Kommissionierzelle

Die Hauptschnittstelle zur Bedienung des ROs ist in eine Oberfläche des Simulationssystems RobCAD der Firma Technomatix integriert. Abbildung 3.8 zeigt einen Screenshot dieser Oberfläche. In der rechten Spalte sind zahlreiche Bedienelemente angeordnet zum Initialisieren und Beenden der Prozesse, zum Einstellen von mehr als 40 Parametern, zur Ausführung von Einzelaufgaben wie z.B. Bildaufnahme oder Greifplanung, zur Auswahl der zu verwendenden GRO und Strategie sowie zum Starten und Beenden des Automatikbetriebs.

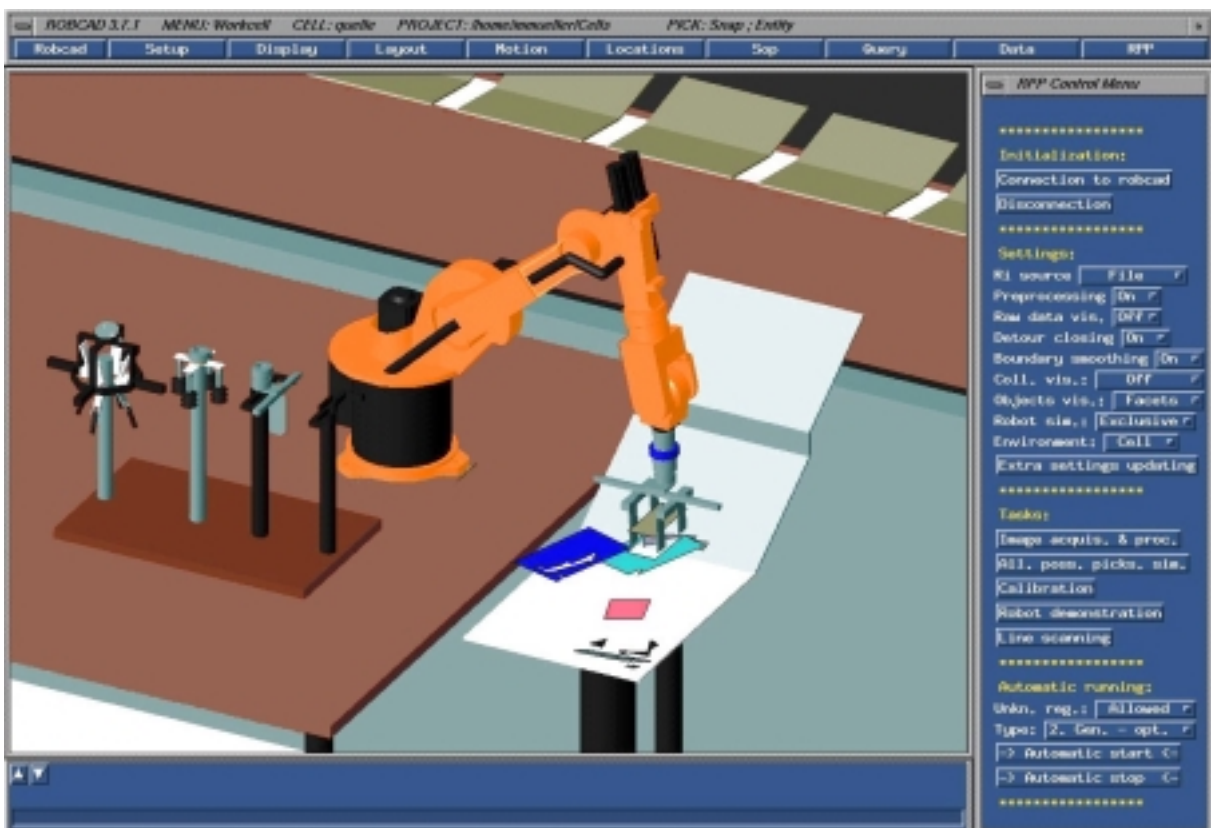


Abbildung 3.8: Bedienoberfläche und Visualisierung

Verschiedene auswählbare Betriebsarten sind „RO der zweiten Generation“, „RO der fünften Generation“^{3.3}, „Stures Entnehmen immer des höchsten Objekts“, „Optimierte Griffauswahl“^{3.4}, „Durchfahren von unbekanntem Bereich unter lokalem Sensoreinsatz erlaubt“ und „Durchfahren von unbekanntem Bereich verboten“.

Einige der zahlreichen Parameter betreffen beispielsweise die Bildaufnahme und -auswertung. Es kann angegeben werden, ob ein Bild von einer Datei eingelesen werden soll, oder ob ein neues Bild durch den Scanner aufzunehmen ist, ob ein aufgenommenes Bild abgespeichert werden soll, welche Bildauswerteschritte auszuführen sind, welche Parameter dazu zu verwenden sind, ob und wie die Zwischenschritte der Bildauswertung angezeigt werden sollen, und so weiter. Andere Parameter betreffen beispielsweise die Visualisierung der Simulation der Greifplanung und der Roboteraktionen. Es kann angegeben werden, ob die Einzelschritte der Greifplanung visualisiert werden sollen, ob Roboterbewegungen nur im für die reale Ausführung erlaubten Bereich oder auch im Kollisionsbereich angezeigt werden sollen, oder ob die Visualisierung der Simulation komplett abzuschalten ist, um die geplanten Roboteraktionen unter Einsparung der für die Visualisierung erforderlichen Zeit direkt auszuführen.

Zahlreiche weniger häufig zu verändernde Parameter sind in eine bestimmte Datei einzutragen, aus der sie während der Initialisierung bzw. nach expliziter Aufforderung durch Anklicken des entsprechenden Bedienelementes eingelesen werden.

Die Konfiguration des Robotersystems, also beispielsweise Greiferparameter und deren geometrische Beschreibung sowie Kalibrierungsdaten werden in bestimmte Header-Dateien eingetragen.

Durch die Entwicklung dieser umfangreichen Bedienoberfläche kann auf benutzerfreundliche Art und Weise die Ausführung verschiedener Aufgaben durch den Roboter gestartet werden. Da wichtige Einzelschritte aktiviert und deaktiviert werden können, ist die bequeme und effektive Anpassung von Parametern bei einer Neuinstallation möglich. Eine wertvolle Hilfe war diese Oberfläche bei der Entwicklung und beim Test der in dieser Arbeit implementierten ca. 107.000 Zeilen Programmcode. Davon wurden ca. 44.000 Zeilen gemeinsam mit Kollegen entwickelt, welche ebenfalls die im vorangegangenen Abschnitt erläuterte Trajektoriengenerierung auf der Robotersteuerung sowie die Greiferansteuerung verwenden. Etwa 63.000 Zeilen Programmcode wurden für die in diesem Abschnitt vorgestellte Simulation und Bedienoberfläche dieser Arbeit sowie insbesondere für die neue Strategie und neuen Algorithmen implementiert.

3.5 Zusammenfassung des Kapitels

In diesem Kapitel wurden zunächst die wesentlichen Hardwarekomponenten des Demonstratoraufbaus eingeführt mit der jeweiligen Motivation bzw. Begründung, weshalb diese Komponente ausgewählt wurde. Im Anschluß daran wurden die Informationsflüsse zwischen den Komponenten erläutert und die Bedienoberfläche sowie Visualisierung der Simulation vorgestellt.

^{3.3} Die fünfte Generation von ROs wird in Kapitel 6 eingeführt.

^{3.4} Die optimierte Auswahl von Griffen sowie das Durchfahren von unbekanntem Bereich werden in Kapitel 5 behandelt.

Kapitel 4

Entwicklung von Benchmarks für Robotersysteme zur Objektentnahme (RO)

“Wer seinen Gegner kennt und auch sich selbst kennt,
wird hundert Schlachten ohne Risiko führen.”
Sun Tzu, Chinesischer Kriegsstrategie, 500 v. Chr.

4.1 Benchmarking-Zyklus

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung von Systemen und Strategien, welche ROs zu bisher nicht erreichter Flexibilität und Zuverlässigkeit verhelfen. Grundvoraussetzung für das Erreichen dieses Ziels ist die Analyse, warum bisherige Systeme die genannten Eigenschaften nicht erfüllen. Die Schwachstellen sind also aufzudecken.

Der Verein Deutscher Ingenieure hat vor wenigen Monaten eine Richtlinie zum Umgang mit dem Planungs- und Management-Instrument „Benchmarking“ veröffentlicht [VDI 2000]. Dies bedeutet, daß die bereits in vielen Bereichen seit langem angewandten Benchmarking-Methoden aufgrund ihrer Leistungsfähigkeit zu einem wichtigen Instrument geworden sind.

Benchmarking ist ein Planungs- und Management-Instrument zur kontinuierlichen Verbesserung der Wettbewerbssituation. Durch Vergleich interner und externer Gegebenheiten werden beim Benchmarking Schwachstellen systematisch und strukturiert ermittelt und das Ziel der nachhaltigen Beseitigung dieser Schwachstellen verfolgt. Dazu werden Leistungslücken zum internationalen Spitzenniveau quantifiziert und die Ursachen analysiert [Schwab 99]. Somit bietet sich die Anwendung von Benchmarking zum Erreichen der Ziele dieser Arbeit an.

Benchmarking-Objekte können Produkte, Prozesse, Strategien, Organisationen, Systeme, Dienstleistungen, u.v.m. sein. Benchmarking-Bereiche sind „intern im eigenen Unternehmen“, „beim direkten Wettbewerber“, „in der eigenen Branche“ und „branchenfremd (-übergreifend)“. In der funktionellen Betrachtungsebene werden „in vergleichbarer Funktion“ und „in fremder Funktion (funktionsübergreifend)“ unterschieden. Als Benchmark-Meßgrößen werden häufig Kundennutzen, Leistung, Funktionalität, Qualität, Zeit, Kosten / Investitionen, Mitarbeiterzahlen, Bestände, Umsatz und der Erlös genannt.

Abbildung 4.1 zeigt einen typischen Benchmarking-Zyklus, welcher sechs Phasen umfaßt, die mehr oder weniger ausgeprägt und eventuell in leicht modifizierter Ausführungsreihenfolge und Detaillierung bei jedem Benchmarking-Prozeß anzutreffen sind.

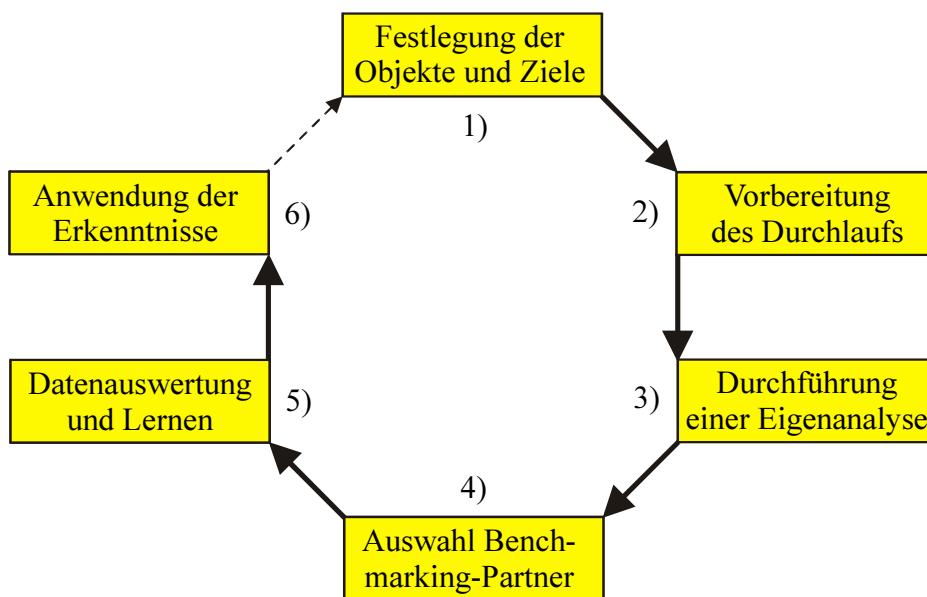


Abbildung 4.1: Benchmarking-Zyklus

In Phase Nr. 1 sind die Benchmarking-Objekte sowie die zu erreichenden Ziele festzulegen, d.h. hier muß grundsätzlich überlegt werden, welche Objekte verbessert werden sollen. Diese Auswahl kann bereits Ergebnis der Schwachstellenanalyse eines übergeordneten Benchmarking-Prozesses sein. In dieser Arbeit sollen ROs verbessert werden. Die einzelnen definierten Benchmarks für die kritischen zu bewältigenden Aufgaben dieser Arbeit werden in Abschnitt 4.3 eingeführt.

Die Vorbereitung eines Durchlaufs des Benchmarking-Zyklus erfolgt in Phase Nr. 2. In einem Unternehmen umfaßt diese Phase unter anderem die Bildung eines Teams, welches das Benchmarking durchführen soll. Dazu gehört auch, daß ein Zeit- und Budgetplan erstellt wird. Hier mußte also abgeschätzt werden, welche Ziele in einer begrenzten Zeit erreichbar sind, welche Ausstattung, Mittel und Kontakte zum Vergleich mit eventuellen Benchmarking-Partnern grundsätzlich zur Verfügung stehen. Die ersten beiden Phasen unterscheiden sich zwar inhaltlich. Jedoch muß beispielsweise in Abhängigkeit der in Phase Nr. 2 ermittelten zur Verfügung stehenden Mittel eine Rückkopplung zu Phase Nr. 1 erfolgen, um dort eventuell die Benchmarking-Objekte etwas modifiziert festzulegen.

Nachdem die Ziele und die zeitlichen sowie materiellen Randbedingungen festgelegt sind, muß in Phase Nr. 3 eine Eigenanalyse erfolgen. Die Konfiguration, die Eigenschaften und die Leistungsfähigkeit in den kritischen Aufgaben sind genau zu untersuchen und zu notieren. Es bietet sich an, einen Katalog von Kriterien zur Beschreibung der Systemkonfiguration sowie der Eigenschaften und erreichten Leistungsfähigkeit zu erstellen. Dadurch sind die verschiedenen zu vergleichenden Systeme genau beschreibbar und somit objektiv miteinander vergleichbar. Ein reiner Zahlenvergleich führt aufgrund der großen Vielfalt verschiedener Systeme nicht zum Ziel. Solch ein Katalog von Kriterien zur Beschreibung von ROs wird in Abschnitt 4.2 eingeführt.

In Phase Nr. 4 sind Benchmarking-Partner auszuwählen, denen die genaue Benchmark-Beschreibung und der Kriterienkatalog zur System- und Leistungsbeschreibung zu übergeben sind. Es können auch Interviews und Besuche stattfinden, um die Leistungsfähigkeit der Systeme in den kritischen Aufgaben gemeinsam zu erörtern. In dieser Arbeit wird zunächst ein Benchmarking im eigenen Institut, also in der gleichen Branche und gleichen Systemfunktion vorgenommen und in den folgenden Kapiteln beschrieben. In Kapitel 6 wird

außerdem ein branchenfremder Vergleich in der gleichen Systemfunktion, also der Objektentnahme aus ungeordneten Anhäufungen, durchgeführt. Dort wird nämlich die Wirtschaftlichkeit des hier entwickelten ROs mit der Wirtschaftlichkeit manueller Objektentnahme durch Arbeiter verglichen. Weiterhin wird gehofft, unter anderem durch die Veröffentlichung der hier definierten Benchmarks für ROs und der Beschreibung der Leistungsfähigkeit des hier entwickelten ROs bei einer bedeutenden Konferenz [Müller et al 2001a] einen internationalen Benchmark-Zyklus angestoßen zu haben, um zukünftig weitere Verbesserungen von ROs durch das Aufdecken von Schwachstellen zu erreichen.

In Phase Nr. 5 sind die Ergebnisse der Leistungsanalysen verschiedener Systeme miteinander zu vergleichen und die eigenen Schwachstellen zu erkennen. Ziel dieser Phase ist die Ableitung von Vorschlägen für die Verbesserung des eigenen Systems. Dabei trägt der in Phase Nr. 3 erstellte Kriterienkatalog wesentlich zur Objektivität der Vergleichsergebnisse bei. So kann global eine Verbesserung der Wettbewerbssituation erreicht werden. Nach dem am Ende von Kapitel 5 beschriebenen Leistungsvergleich konnte in dieser Arbeit eine komplett neue Strategie zur flexiblen und zuverlässigen Objektentnahme entwickelt werden, welche in Kapitel 6 vorgestellt wird.

Schließlich sind die in Phase Nr. 5 erarbeiteten Verbesserungsvorschläge in Phase Nr. 6 umzusetzen. Nach der Umsetzung sollte nochmals überprüft werden, ob die erzielten Ergebnisse tatsächlich erreicht wurden. Gemäß dem Ergebnis dieser Untersuchung können neue Benchmark-Ziele definiert werden, wodurch ein neuer Zyklus angestoßen wird, sich der Kreis schließt und somit ein kontinuierlicher Benchmarking-Prozeß erzeugt wird.

4.2 Beim Benchmarking zu vermeidende Fehler

Erfolgreiches Benchmarking setzt voraus, daß die Benchmarking-Partner gewillt sind, den Prozeß aktiv mitzugestalten und Informationen auszutauschen. In diesem Zusammenhang kann festgestellt werden, daß sich bereits so etwas wie ein Benchmarking-Verhaltenskodex etabliert hat [Füser 99]. Die getroffenen Vereinbarungen sind zu dokumentieren, sämtliche Informationen sind vertraulich zu behandeln, kein Partner darf auf der Herausgabe von Daten bestehen, zu deren Freigabe er selbst nicht bereit wäre, bei Konkurrenten ist die Analyse empfindlicher Bereiche zu vermeiden, für ergänzende Informationen bei Kunden und Lieferanten des Partners ist die Erlaubnis einzuholen, und aus den gewonnenen Informationen sind für keinen anderen Zweck als für das Benchmarking-Projekt Vorteile zu ziehen. Im Rahmen der dieser Arbeit zugrundeliegenden Forschungsarbeit stellen solche Randbedingungen nur eine geringfügige Einschränkung dar, da die Forschungsergebnisse ohnehin frei verfügbar sind.

Nach [Füser 99] gibt es sechs Benchmarking-Kardinalfehler, welche zu umgehen sind:

- Benchmarking-Tourismus, also die Einführung eigener Benchmarks für jede Kleinigkeit, würde zu einer unüberschaubaren Flut von Benchmarks führen. Für ROs gibt es bisher jedoch keinen Benchmark, weshalb dies kein Problem darstellt. Zudem werden die Benchmarks in Abschnitt 4.4 so allgemein und universell einsetzbar definiert, daß nicht jeder einen neuen Benchmark für das gleiche Problem erfinden muß, nur weil er beispielsweise einen anderen Roboter hat.

- Der zweite Fehler ist mangelnde Umsetzung, was in dieser Arbeit aufgrund der Entwicklung einer neuen Strategie sowie neuer Algorithmen und deren Realisierung sicherlich nicht der Fall ist.
- Betroffene Mitarbeiter wurden auch nicht übergangen, sondern als Benchmarking-Partner herangezogen, was den dritten Fehler darstellen würde.
- Der vierte Fehler ist eine zu breite Definition des Benchmarking-Objekts. Deshalb werden in Abschnitt 4.4 drei Benchmarks für bestimmte kritische Situationen definiert. Weitere Benchmarks lassen sich für andere Eigenschaften in der Kriterientabelle definieren.
- Der fünfte Fehler ist ein zu enger Blickwinkel bei der Auswahl der Benchmarking-Partner. Wie bereits weiter oben erwähnt, werden in dieser Arbeit internes, sowie externes Benchmarking in der gleichen wie auch in einer anderen Branche durchgeführt.
- Schließlich besteht ein großer Fehler in der Betrachtung des Benchmarkings als einmaliges Projekt und nicht als kontinuierlichen Prozeß. Diesem Fehler wird durch internationale Veröffentlichungen und Anregungen zum Leistungsvergleich begegnet.

Ziel des Benchmarkings ist, die eigenen Schwachstellen mittels Vergleichs unter anderem mit dem „Best of Class“ durch neue Ideen und neuartige Verfahren zu beheben. Ein besonders schwerwiegender Fehler wäre somit, andere Systeme oder Lösungen einfach zu kopieren, was nämlich allerhöchstens zur gleichen Position bzw. Leistung führen würde.

4.3 Kriterien zur Beschreibung von ROs

Im Rahmen dieser Arbeit wird kein abgeschlossener Fragenkatalog mit Punkteverteilung und Rechenvorschrift zur Gesamtbewertung zur Verfügung gestellt, da solch ein Fragenkatalog aufgrund der großen System- und Anwendungsvariabilität nicht breit einsetzbar wäre^{4.1}. Statt dessen soll jeder Benchmarking-Partner qualitativ und an sinnvollen Stellen auch quantitativ die Leistungsfähigkeit und Konfiguration seines Systems beschreiben können. Damit sich nicht jeder Benchmarking-Partner erneut überlegen muß, wie ein RO möglichst umfassend zu beschreiben ist, wird in dieser Arbeit der in Abbildung 4.2 gezeigte Katalog von Kriterien eingeführt.

Der Kriterienkatalog zur Beschreibung von ROs orientiert sich an den fünf w-Fragen, nämlich wer, wo, was, wie und wann, und ist entsprechend in horizontale Abschnitte gegliedert. Jedes Kriterium ist mit einer mehrstelligen Numerierung gekennzeichnet, deren erste Nummer dieser Gliederung entspricht. In den Spalten werden die Kriterien von links nach rechts jeweils weiter untergliedert bzw. detailliert, wobei pro Untergliederungsebene eine durch einen Punkt getrennte Stelle bei der Numerierung hinzukommt. Beispielsweise ist unter Kriterium Nr. 1.1.1 anzugeben, wieviele Roboter welcher Typen verwendet werden.

^{4.1} Ein Beispiel für einen in der Robotik-Forschung an Universitäten und anderen Forschungseinrichtungen erfolgreich angewandten Benchmark ist der „Cranfield European Assembly Benchmark“ [Collins et al. 85] für die Überprüfung der Leistungsfähigkeit von Roboterprogrammiersprachen und von Robotersystemen bei Montageaufgaben. Bei der Einführung des Benchmarks wurden Kriterien zur Beschreibung der Leistungsfähigkeit in drei verschiedenen wichtige Klassen eingeteilt. Solch eine Gewichtung ist jedoch wenig sinnvoll, da jede Anwendung ihre eigenen Prioritäten hat. Und tatsächlich wurde in Anwendungen des Benchmarks [Dillmann & Huck 91], [Raczkowsky 91], [Schloen 94] diese Gewichtung für eine Gesamtbewertung nicht mehr verwendet. Vielmehr findet man qualitative und vereinzelt auch quantitative Beschreibungen der jeweiligen Leistungsfähigkeit und Systemkonfiguration vor.

Es ist zu beachten, daß zahlreiche Kriterien durch mehrere verschiedene Kombinationen von Ausprägungen von Kriterien der jeweils nächsten Untergliederungsebene beschrieben werden können oder oftmals sogar beschrieben werden müssen. Beispielsweise ist unter Kriterium Nr. 3.2 anzugeben, welche Objekte mit dem RO gegriffen und gehandhabt werden können. Ein RO verfügt beispielsweise über einen mit Kraftsensoren ausgestatteten Greifer für kleine Objekte. Unter Kriterium Nr. 3.2.3.2 muß also „zerbrechlich“ und unter Kriterium Nr. 3.2.1.3 „klein“ angegeben werden, selbstverständlich möglichst mit numerischer Angabe der Zerbrechlichkeit und des Größenbereichs. Wenn das RO jedoch gleichzeitig einen Greifer für große Objekte, jedoch ohne Kraftsensorik, umfaßt, dann müssen die gleichen Kriterien diesmal mit „unzerbrechlich“ und „groß“ belegt werden. Es sind also mehrere Kombinationen zuzulassen, um Systeme zutreffend beschreiben zu können. Dementsprechend ist der Katalog quasi eine „Checkliste“ zur Beschreibung von ROs, jedoch kein fertiges Formular zum sturen Ausfüllen.

Entsprechend der speziellen Konfiguration eines Systems oder einer speziellen Anwendung muß der Katalog eventuell erweitert werden, da weitere Kriterien zur Beschreibung erforderlich werden. In solch einem Fall sollten neue Kriterien in der entsprechenden Gliederungsebene an die bereits definierten Kriterien angehängt und nicht etwa dazwischengeschoben werden. Dadurch kann erreicht werden, daß Numerierungen von Kriterien übereinstimmen und konsistent referenziert werden können, selbst wenn der eine Benchmarking-Partner beispielsweise den hier vorgestellten ursprünglichen Katalog verwendet und ein anderer Benchmarking-Partner in einigen Monaten oder Jahren einen erweiterten Katalog benutzt.

Im folgenden Abschnitt werden Benchmarks für die Kriterien Nr. 4.2.1, 4.2.6 und 5.3.2 entsprechend der Zielsetzung der Arbeit definiert, weshalb die entsprechenden Kästchen in Abbildung 4.2 gelb eingefärbt sind. Auf die anderen Kriterien wird hier nicht weiter eingegangen, da sie selbsterklärend sind. Die Beschreibung der ROs in dieser Arbeit deckt mehr oder weniger explizit alle aufgeführten Kriterien ab und ist im wesentlichen in den Kapiteln 3, 5 und 6 zu finden. International veröffentlicht wurden detaillierte Beschreibungen des hier verwendeten ROs in zahlreichen Publikationen [Rembold et al. 98], [Müller & Rembold 99], [Müller & Wörn 2001], [Wörn et al. 2000a], [Wörn et al. 2000b], [Wörn et al. 2000c], [Wörn & Müller 2001b].

| | | | | |
|--|--|--|----------------------------|--|
| 1) System-konfiguration (WER?) | 1) Erforderliche Geräte | 1) Roboter | | |
| | | 2) Werkzeuge | | |
| | | 3) Sensorik | | |
| | | 4) Peripherie | | |
| | | 5) Kommunikation | | |
| | | 6) Visualisierung und Bedienung | | |
| | 2) Kosten | 1) Einkauf | | |
| | | 2) Konstr., Planung, Installation, Umrüstung | | |
| | | 3) Betrieb | 1) Energie, Rohstoffe | |
| | | | 2) Wartung | |
| 3) Personal, Schulung | | | | |
| 4) Entsorgung | | | | |
| 5) Zinsen | | | | |
| 2) Umgebungsbedingungen (WO?) | 1) Raum | 1) Platzbedarf | | |
| | | 2) Arbeitsraum | | |
| | 2) Mechanische Integration | 1) Statische und dynamische Kräfte, Momente | | |
| | | 2) Verankerung oder mobil | | |
| | 3) Beleuchtung | | | |
| | 4) Klima | | | |
| 5) Reinheit | | | | |
| 3) Mögliches Objektspektrum (WAS?) | 1) Erfassung von Objekteigenschaften bzw. | 1) Form | 1) Gekr. o. kubisch | |
| | | | 2) Konvex o. konkav | |
| | | | 3) Größenbereich | |
| | | 2) Masse | 1) Massenbereich | |
| | | | 2) Massenverteilung | |
| | 3) Material | 1) Starr oder flexibel | | |
| | | 2) Zerbrechlichkeit | | |
| | 2) Manipulierbarkeit von Objekten mit bestimmten Eigenschaften | 4) Oberfläche | 1) Haft-, Gleitreibung | |
| | | | 2) Farbe, Glanz | |
| | | 5) Bewegung | 1) Statisch oder dynamisch | |
| 2) Kontinuierlich o. abschnittsweise | | | | |
| 3) Erforderliches Vorwissen über die Szene | 1) Eigenschaften der zu greifenden Objekte | | | |
| | 2) Eigenschaften von Hindernisobjekten | | | |
| | 3) Zielobjekt-Hindernisobjekt-Konfiguration | | | |
| 4) Art der Szenenerfassung und Objektentnahme (WIE?) | 1) Informationsgewinnung und -verarbeitung → Einstufung in GROs | 1) Blindes Zugreifen | | |
| | | 2) Ausschließliche Greifpunktbestimmung | | |
| | | 3) Objektidentifikation passiv visuell | | |
| | | 4) Objektidentifikation durch aktive Wahrnehmung | | |
| | | 5) Objektrelationsbestimmung ohne Identifikation | | |
| | | | | |

| | | | |
|--|--------------------------------------|---|---|
| (... Fortsetzung von 4) | 2) Umgang mit besonderen Situationen | 1) Kollisionsvermeidung und -erkennung bei Existenz visuell verdeckter Bereiche | 1) Roboter mit Umgebung 2) Werkzeug mit Umgebung |
| | | 2) Verhalten bei aufgetretener Kollision | |
| | | 3) Zerstörungsfreies und gleichzeitig stabiles Greifen | 1) Greifpunktqualität |
| | | | 2) Einstellung der Greifkraft |
| | | | 3) Verrutschen im Greifer |
| | | 4) Umgang mit Verklemmungen | 1) Erkennung 2) Behandlung |
| | | | 5) Erhaltung der Szenenstabilität |
| | | 6) Vermeidung des ungewollten Mitanhebens benachbarter Objekte | 1) Bedarf an Objektmodellen |
| | | | 2) Erforderlicher Sensoreinsatz |
| | | | 3) Platzbedarf |
| | | 3) Zuverlässigkeit | 1) Erfolgreiches Entnehmen des Zielobjekts 2) Zerstörungsfreiheit des gegriffenen oder anderer Objekte |
| | | | 5) Systemgeschwindigkeit, -leistung und Optimierung (WANN?) |
| 1) Leistungsfähigkeit der Hardware | 1) Leistung der Antriebe | | |
| | 2) Positioniergenauigkeit | | |
| | 3) Sensorrauschen | | |
| | 4) Rechengeschwindigkeit | | |
| | 5) Zellenkommunikation | 1) Übertragungsgeschwindigkeit | |
| 2) Optimale Protokolle | | | |
| 2) Integration in Anlage | 1) Synchronisation 2) Logistik | | |
| | 3) Ablaufoptimierung | 1) Optimierung der Robotertrajektorien | |
| 2) Optimierte Werkzeugauswahl und Entnahmereihenfolge | | | |
| 3) Bedarf an Roboteraktionen bis zur Objektentnahme | | | |
| 4) Gleichzeitiges Greifen und Entnehmen mehrerer Objekte | | | |

Abbildung 4.2: Kriterien zur Beschreibung von ROs

4.4 Entwicklung von Benchmarks zur Überprüfung der Leistungsfähigkeit verschiedener ROs

Es ist gerechtfertigt und sinnvoll, für ein Produkt mehrere Benchmarks einzusetzen^{4.2}. Entsprechend werden in diesem Abschnitt drei Benchmarks zur Überprüfung der Leistungsfähigkeit von ROs in drei kritischen Teilaufgaben der Objektentnahme eingeführt.

Die in Abschnitt 4.2 geforderte universelle Anwendbarkeit der Benchmarks wird im hier vorgestellten Ansatz dadurch erreicht, daß eine zweistufige Benchmarkdefinition vorgenommen wird^{4.3}. Erstens wird jeweils eine sehr allgemeine Klassendefinition vorgestellt, so daß trotz verschiedener Größenordnungen und Konfigurationen der vorhandenen Hardware eines Benchmarking-Partners Benchmarking-Objekte aufgebaut werden können, welche das Überprüfen der gewünschten Funktionalitäten zulassen. Bei der zusätzlichen Anwendung des im vorhergehenden Abschnitt eingeführten Kriterienkatalogs wird somit ein objektiver Vergleich möglich. Zweitens wird jeweils eine konkrete Instanz des Benchmarks angegeben. Diese verwendet als Einzelteile Objekte mit ebenen Oberflächen, so daß die allermeisten Bildauswertesysteme und Greifer mit diesen Objekten umgehen können und dadurch selbst für die konkrete Instanz ein hohes Maß an Universalität erreicht werden kann.

4.4.1 Benchmark „Verdeckter Bereich“

Das Ziel der Arbeit, Zuverlässigkeit zu erreichen, umfaßt unter anderem auch, schwere Kollisionen und die daraus resultierenden Objektbeschädigungen zu vermeiden. Gleichzeitig soll aus Flexibilitätsgründen nicht vorausgesetzt werden, daß für alle in der Szene vorkommenden Objekte a priori Modelle vorhanden sind. Somit kann in einem für das Kamerasystem verdeckten Spalt zwischen zwei Objekten nicht einfach auf Freiraum geschlossen werden. Der Benchmark „Verdeckter Bereich“ erlaubt es, ein RO daraufhin zu überprüfen, wie es sich in einer solchen Situation verhält. Nimmt es einfach an, daß der Bereich frei ist und plant Greifbewegungen, bei denen dieser eigentlich unbekannte Bereich durchfahren wird, als wäre er sicher frei? Wird dieser Bereich komplett für das Durchfahren verboten? Oder wie geht ein RO sonst damit um? Mit diesem Benchmark wird also Kriterium Nr. 4.2.1 (Kollisionsvermeidung und -erkennung bei Existenz visuell verdeckter Bereiche) der

^{4.2} Beispielsweise wird beim Testen von Graphikkarten für Computer ähnlich vorgegangen. Vor einigen Jahren wurde nur die Geschwindigkeit des Aufbaus von 3D-Darstellungen und die sich daraus ergebende Bildrate zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit gemessen. Heute gibt es verschiedene Benchmarks für die verschiedenen Aufgabengebiete wie 3D-Modellierung, Industrieanlagen-CAD, Visualisierung wissenschaftlicher Daten, Simulation von Lichtverhältnissen, Linienglättung, Texturdarstellung, gleichzeitige Aktivität mehrerer Fenster und den Einsatz mehrerer Lichtquellen [Bertuch 2000]. Die Testplattformen und -bedingungen sowie die Testergebnisse wie Leistung in verschiedenen Bereichen, Ausfälle und Fehler sowie Vor- und Nachteile werden überwiegend qualitativ in Textform beschrieben. Nur sehr begrenzt werden numerische Ergebnisangaben gemacht, und dann nur im direkten Vergleich verschiedener Produkte. Analog zu dieser Vorgehensweise wird auch hier die qualitative Beschreibung in den Vordergrund gestellt, wie es im vorangegangenen Abschnitt erläutert wurde.

^{4.3} In [Collins et al. 85] wird als eine wichtige Anforderung an den dort eingeführten „Cranfield European Assembly Benchmark“ genannt, daß der physikalische Benchmark klein genug zum Versenden mit der Post ist und in jeden Briefkasten paßt. Außerdem sollen die meisten Robotersysteme von den Größenordnungen her die Teile des physikalischen Benchmarks greifen können. Diese allgemeine Anforderung an Universalität wird hier anders gelöst, denn erstens sollen hier keine „Benchmarkprodukte“ hergestellt und verschickt werden, und zweitens ist die Vielfalt an ROs so groß, daß alle Teile eines einzigen „Benchmarkprodukts“ ohnehin nicht durch alle ROs gegriffen werden könnten.

Kriterientabelle in Abbildung 4.2 überprüft. Die allgemeine Beschreibung dieses Benchmarks lautet:

Mehrere Objekte sind derart auszuwählen und anzuordnen, daß der Greifer (und / oder der Roboter) durch unbekannte Bereiche fahren muß (müssen), um eines der Objekte greifen zu können.

Eine Instanz dieses Benchmarks ist in Abbildung 4.3 zu sehen. Da die Kameras des in Kapitel 3 vorgestellten Sichtsystems nicht senkrecht von oben, sondern etwas von der Seite auf die Szene gerichtet sein müssen, um bei der senkrechten Laserbeleuchtung über Triangulation Höheninformation erhalten zu können, steht nicht für den kompletten Spalt Höheninformation zur Verfügung. Der Großteil des Spalts ist visuell verdeckt. Mit den zur Verfügung stehenden Greifern müssen jedoch die Greiferfinger in diesen Spalt, also unbekanntem Bereich, hineinfahren. Alle anderen Griffe sind mit dem Demonstrator-Robotersystem kinematisch nicht möglich.



Abbildung 4.3: Benchmark „Verdeckter Bereich“

4.4.2 Benchmark „Greiferwechsel“

Da kein universeller Greifer für alle möglichen Objekte existiert, der zudem auch noch so schlank wie Greifer für Spezialanwendungen gebaut ist, muß ein flexibles RO ein Greiferwechselsystem beinhalten.

Fast alle ROs mit mehreren Greifern wenden die naheliegende Regel an, immer das oberste Objekt zu greifen und zu entnehmen, wodurch der zu verwendende Greifer oft schon vorgegeben ist [Cipolla & Hollinghurst 97]. Das Wechseln des Greifwerkzeugs erfordert jedoch eine nicht unerhebliche Zeit, mindestens in der Größenordnung von mehreren Sekunden. Wenn ein anderes als das höchste Objekt mit dem montierten Greifer entnehmbar gewesen wäre, dann hätte man dadurch die Greiferwechselzeit sparen können. Mit diesem Benchmark soll die Anzahl der erforderlichen Greiferwechselforgänge gemäß Kriterium Nr. 5.3.2 (Optimierte Werkzeugauswahl und Entnahmereihenfolge) in Abbildung 4.2 überprüft werden mit dem Ziel, diese Anzahl zu reduzieren. Die allgemeine Beschreibung dieses Benchmarks kann folgendermaßen formuliert werden:

Mehrere Objekte sind derart auszuwählen und zu plazieren, daß der Roboter vor jedem Greifen eines Objekts das Greifwerkzeug auswechseln muß, wenn immer das höchste Objekt für den nächsten Greif- und Entnahmevorgang ausgewählt wird.

Abbildung 4.4 zeigt die in dieser Arbeit verwendete Instanz des Benchmarks „Greiferwechsel“, wobei die Objekte auf einer 70cm x 90cm großen Ablage der Höhe nach gemäß der eingetragenen Numerierung angeordnet sind. Karton Nr. 1 kann nur mit dem großen in Kapitel 3 vorgestellten Parallel-Backen-Greifer gegriffen werden, Karton Nr. 2 hingegen nur mit dem kleinen Greifer, u.s.w.. Das Paket Nr. 6 erfordert sogar den Vakuumgreifer, da es für beide Parallel-Backen-Greifer zu groß ist. Die in Folie verpackte Textilie Nr. 9 muß mit dem kleinen Greifer entnommen werden. Somit sind acht Greiferwechsel erforderlich, wenn immer das höchste Objekt entnommen wird.



Abbildung 4.4: Benchmark „Greiferwechsel“

4.4.3 Benchmark „Ungewolltes Mitanheben“

Im vorangegangenen Abschnitt wurde festgestellt, daß die allermeisten ROs immer versuchen, das jeweils höchste Objekt zu entnehmen. Doch was geschieht, wenn auf dem gegriffenen Objekt noch ein anderes Objekt liegt? Das kann beispielsweise geschehen, wenn das gegriffene Objekt relativ groß ist, ähnlich Objekt Nr. 6 in Abbildung 4.4, etwas geneigt daliegt, und ein anderes flaches Objekt am tiefsten Ende der Oberseite daraufliegt. Solch eine Situation kann auch sehr einfach eintreten, wenn das gegriffene Objekt konkav, also beispielsweise L-förmig, geformt ist. Beispiele für solche Objekte sind die in Abbildung 4.5 zu sehenden Verpackungen von Gartengeräten.

Der Benchmark „Ungewolltes Mitanheben“ erlaubt das Überprüfen des Verhaltens in einer solchen Situation, also ob das unbeabsichtigte Mitanheben erkannt und behoben wird, oder ob ein auf dem gegriffenen Objekt liegendes loses Nachbarobjekt mitangehoben und weggeschleudert wird. Dieser Benchmark fällt unter Kriterium Nr. 4.2.6 (Vermeidung des ungewollten Mitanhebens benachbarter Objekte) in Abbildung 4.2 und kann folgendermaßen allgemein beschrieben werden:

Mehrere Objekte sind derart auszuwählen und anzuordnen, daß eines oder mehrere Objekte zumindest teilweise auf dem Objekt liegen, welches als erstes vom RO zur Entnahme gegriffen wird.



Abbildung 4.5: Konkave Verpackungen

In den Abbildungen 4.6 sind zwei Instanzen dieses Benchmarks zu sehen, welche beide für Experimente in dieser Arbeit verwendet werden. Die L-förmige Verpackung Nr. 1 ist jeweils das höchste Objekt in der Szene. Auf dem Schenkel dieser Verpackung liegt ein kleinerer Karton Nr. 2. Im rechten Bild besteht die L-förmige Verpackung aus zwei Kartons, welche zusammengeklebt, also fest verbunden sind. Solche Anordnungen trifft man recht häufig an, wenn Zuberhörteile wie beispielsweise Schrauben nicht mehr in die Hauptverpackung passen. Die in den beiden Instanzen des Benchmarks umliegenden Objekte erhöhen etwas die Gesamtkomplexität der jeweiligen Instanz.

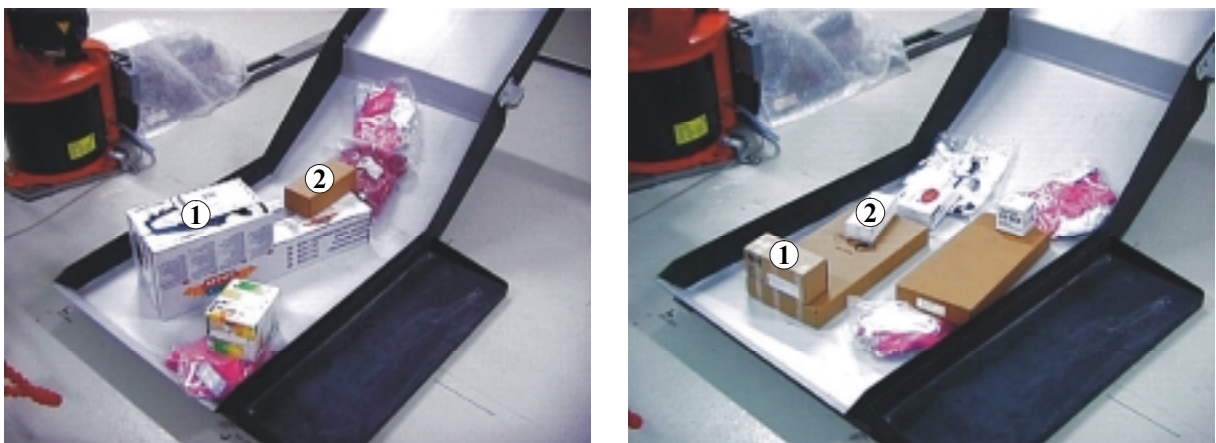


Abbildung 4.6: Zwei Instanzen des Benchmarks „Ungewolltes Mitanheben“

4.5 Zusammenfassung des Kapitels

In diesem Kapitel wurde das Planungs- und Management-Instrument Benchmarking erläutert und seine Eignung für die Verbesserung von ROs innerhalb dieser Arbeit begründet. Drei Benchmarks wurden definiert zur Überprüfung der Leistungsfähigkeit von ROs in drei kritischen Situationen, welche durch ROs lösbar sein sollten. Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung von Systemarchitekturen und Strategien, welche ROs dazu in die Lage versetzen, diese kritischen Situationen erfolgreich zu lösen. Damit sich auch Benchmarking-

Partner mit anderen ROs an dem Benchmarking-Prozeß beteiligen können, wurden die Benchmarks zweistufig jeweils zunächst als Klasse mit einer allgemeinen Beschreibung eingeführt und anschließend mit einer in dieser Arbeit eingesetzten Instanz des jeweiligen Benchmarks näher erläutert. Die Verwendung eines neuen Kriterienkatalogs zur Beschreibung der jeweiligen Konfiguration, der Eigenschaften und Leistungsfähigkeiten der ROs von Benchmarking-Partnern erlaubt den objektiven Leistungsvergleich und die Aufdeckung von Schwachstellen mit dem Ziel einer kontinuierlichen Verbesserung der Wettbewerbssituation.

Kapitel 5

Entwicklung einer neuen Greifplanung für ein RO der zweiten Generation

5.1 Neue Bestimmung von Griffen für die zuverlässige Objektentnahme bei Berücksichtigung verdeckter Bereiche

Eine zentrale Komponente jedes ROs bildet die Greifplanung. In diesem Kapitel wird die Entwicklung einer neuen Greifplanung beschrieben, welche wesentlich zu den Zielen der Arbeit, nämlich Flexibilität und Zuverlässigkeit bei der Objektentnahme zu erreichen, beiträgt [Müller & Wörn 2000c].

Das Ergebnis der Greifplanung umfaßt unter anderem die Auswahl eines Greifwerkzeugs, des Greifpunkts und der Greiftrajektorie für eine Objektentnahme. Damit die Greifplanung die Auswahl des Greifwerkzeugs und des auszuführenden Griffs optimieren kann, muß sie über möglichst viel Information über die Szene verfügen. Im Vergleich zu beispielsweise einer mechanischen Abtastung stellen über optische Systeme aufgenommene Bilder der Szene sehr schnell umfangreiche Information zur Verfügung und werden deshalb auch hier als Basis für die Greifplanung verwendet. Allerdings sind die Szenenobjekte aufgrund gegenseitiger Verdeckungen oder auch Selbst-Verdeckungen immer nur teilweise auf den Bildern zu sehen. Bei Verzicht auf eine genaue, aber einschränkende und somit hier nicht verwendbare Wissensbasis zulässiger Objekte müßten die Objekte generisch oder unter Einsatz von Heuristiken rekonstruiert werden, um eine analytische Szenenbeschreibung zu erhalten. Aber warum sollte überhaupt eine analytische Beschreibung der Szene bestimmt werden?

Es gibt viele Greifplanungsalgorithmen, welche solche analytische Modelle verwenden. Dies ist beispielsweise bei Montageaufgaben mit genau bekannten Teilen auch sinnvoll. Das notwendige künstliche analytische Rekonstruieren unstrukturierter Szenen aufgrund von Teilansichten verläuft jedoch oftmals fehlerhaft. Außerdem bedeutet das Rekonstruieren einen nicht zu vernachlässigenden Zeitaufwand. Weiterhin ergeben sich bei komplex geformten Objekten auch analytische Modelle mit sehr vielen Details, welche im allgemeinen die Rechenzeiten der bekannten Greifplanungsalgorithmen sehr stark ansteigen lassen. Sicherlich können die Objekte durch einfachere Modelle approximiert werden. Im allgemeinen führt dies jedoch erstens zu einer Einschränkung des Frei-Bereichs^{5.1} und somit der möglichen Griffe sowie der Flexibilität. Zweitens werden Details in der Bildinformation bei Approximationen durch einfachere Modelle oftmals als Abbildungsfehler beispielsweise aufgrund von

^{5.1} Der aufgrund von Bildinformation bestimmte Frei-Bereich ist zum Zeitpunkt der Bildaufnahme sicher frei von Objekten.

Streulicht eingestuft. Derartige Vereinfachungen haben häufig zur Folge, daß kleine Hindernisse unter Umständen vernachlässigt werden.

Aufgrund dessen wird in dieser Arbeit auf die Rekonstruktion der Objekte verzichtet. Statt dessen wird direkt in den Bildern nach Merkmalen gesucht, welche sich für das Greifen mit den vorhandenen Greifern anbieten. Gemäß den Erläuterungen in Kapitel 2 ist diese Vorgehensweise zur Objektentnahme typisch für ein RO der zweiten Generation.

Bei unstrukturierten Szenen kommt es häufig vor, daß in Bildern der Szene, welche in einem ersten Schritt vor weiteren Planungen aufgenommen werden, manche Bereiche aufgrund von Verdeckungen nicht eingesehen werden können. Der Umgang mit solchen Unbekannt-Bereichen nimmt eine kritische Rolle ein bei der Greifplanung für flexible und zuverlässige ROs und bildet deshalb den Schwerpunkt der Betrachtungen in diesem Kapitel.

Verschiedene Ansätze zum Umgang mit solchen Unbekannt-Bereichen sind bei den in den letzten beiden Jahrzehnten entwickelten Greifplanungsalgorithmen anzutreffen. Die überwiegende Zahl der Greifplanungsalgorithmen rechnen den Unbekannt-Bereich einfach zum Objekt-Bereich^{5.2} [Ikeuchi et al. 86], wodurch der Frei-Bereich jedoch wesentlich eingeschränkt wird. In [Laugier et al. 90], [Weigl 97] werden die Unbekannt-Bereiche mit am Roboter angebrachten Sensoren lokal „eingesehen“, bevor Griffe geplant werden. Dies bietet den Vorteil, in den Unbekannt-Bereichen weitere Greifmerkmale finden zu können, ist jedoch für die Kollisionsvermeidung bei der Greifplanung sehr zeitaufwendig. [Baerveldt 93] und [Rembold 2000] rechnen den Unbekannt-Bereich zum Frei-Bereich und führen jede Entnahmeoperation komplett so langsam aus, daß über lokale Sensorik eventuelle Kollisionen erkannt werden können, was die Gesamtausführung verlangsamt. Vorhandene Information aus Bildern über sicher kollisionsfrei ausführbare Griffe wird dabei nicht verwendet und somit verschenkt. [Röhrdanz & Wahl 97] gibt für jeden Griff die Position an, bei welcher die Fingerspitzen des Greifers die Höhe der Objektoberkante passieren. Diese Information ist zwar bereits wesentlich detaillierter für den Bedarf von lokalem Sensoreinsatz, ist aber heuristischer Natur, da die Nachbarobjekte sowie die geometrische Form des Greifers für diese Entscheidung überhaupt nicht berücksichtigt werden. In [Okada et al. 97] werden Vergleichswerte für verschiedene Griffe bestimmt, welche eine Größenordnung angeben, inwieweit sich ein Greifer bei der Objektentnahme im Unbekannt-Bereich befindet. Aufgrund dieser Vergleichswerte läßt sich der Griff bestimmen, welcher wohl am wahrscheinlichsten kollisionsfrei möglich ist. Zuverlässige Entscheidungen sind damit aber nicht möglich. [Yanagihara & Kita 91] wählt für eine Entnahmeoperation den Griff aus, dessen Greiftrajektorie am weitesten entfernt von allen Hindernisobjekten der Szene verläuft.

Es gab bisher keinen Greifplanungsalgorithmus, welcher basierend auf globalen Bildern der Szene für alle aufgrund geeigneter Greifmerkmale grundsätzlich möglichen Griffe explizit bestimmt, auf welchen Abschnitten der Greiftrajektorie sich der Greifer im Frei-, Unbekannt- und Objekt-Bereich befindet und diese Information für die optimierte Auswahl eines Griffs verwendet.

Die Entwicklung eines solchen neuen Algorithmus wird in diesem Kapitel vorgestellt. Er bietet mehrere bedeutende Vorteile gegenüber bisherigen Greifplanungsalgorithmen.

- Erstens kann der Roboter bis zur präzise bestimmten Grenze des Unbekannt- bzw. des Objekt-Bereichs schnell und ohne besonderen lokalen Sensoreinsatz sicher im Frei-Bereich fahren.

^{5.2} Im Objekt-Bereich befindet sich mit hoher Wahrscheinlichkeit ein Objekt, so daß es mit hoher Wahrscheinlichkeit zu einer Kollision kommt, wenn der Greifer oder der Roboter diesen Bereich durchquert.

- Zweitens läßt sich eine sicher erreichbare Eingreiftiefe von Greiferfingern beispielsweise in enge Spalten, also ein Maß für die mindestens erreichbare Greifqualität, explizit angeben.
- Drittens kann die Reduzierung der erforderlichen Greiferwechsel optimiert werden. Statt zwangsläufig einen anderen Greifer einzuwechseln, falls keine Greifertrajektorie für den montierten Greifer komplett im Frei-Bereich möglich ist, werden auch Griffe zugelassen, deren Trajektorie durch Unbekannt-Bereich verläuft. In Abhängigkeit des genau bekannten Abschnitts der Trajektorie im Unbekannt-Bereich können nun ja auch solche Griffe schnell ausgeführt werden. Und es kann bei einem kleinen, explizit bekannten Abschnitt der Trajektorie im Unbekannt-Bereich auf eine kleine Wahrscheinlichkeit für eine durch lokalen Sensoreinsatz zu erkennende Kollision und somit auf eine hohe Wahrscheinlichkeit für erfolgreiche Objektentnahme ohne Greiferwechsel geschlossen werden.
- Der vierte Vorteil des Algorithmus liegt darin, daß er stark datengetrieben ist. Darunter wird hier verstanden, daß die Kollisionsvermeidung direkt die Rohdaten eines 2.5D-Bildes verwendet und somit auch kleine, zerklüftete, analytisch nur sehr komplex beschreibbare Hindernisse berücksichtigen kann. Falls vereinzelt Bild-Rohdaten auf Objektoberflächen räumlich innerhalb von Objektteilen hinweisen, welche durch segmentierte Szenenbereichshinweise beschrieben werden, dann liegt eigentlich ein Widerspruch vor. Um sicher zu gehen und Kollisionen zu vermeiden, werden die Bild-Rohdaten in solchen lokalen Widerspruchsbereichen nach außen auf die durch Segmentierung bestimmten Objektoberflächen verschoben.

5.1.1 Bestimmung symbolischer Griffe und der Greiftrajektorie

Nach [Lozano-Pérez 81], [Röhrdanz 98] kann die Bestimmung symbolischer und numerischer Griffe unterschieden werden:

- Symbolische Griffe berücksichtigen ausschließlich, ob ein Objekt Merkmale aufweist, welche für den bei der Griffbestimmung verwendeten Greifer zum Greifen geeignet sind. Es werden also ausschließlich das Objekt selbst, insbesondere seine Geometrie, sowie die Geometrie und Kinematik des Greifers berücksichtigt, um die lokale Zugänglichkeit des Greifers relativ zum Objekt für das Greifen zu überprüfen.
- Ein symbolischer Griff ist gleichzeitig auch ein numerischer Griff, wenn das Durchfahren einer Trajektorie zum Erreichen des symbolischen Griffs sowie das anschließende Entnehmen in Abhängigkeit von der Objektlage durch den Roboter kinematisch möglich ist, und wenn darüberhinaus die Greiftrajektorie für den Greifer und den Roboter ausschließlich im Frei- oder auch Unbekannt-Bereich verläuft.

Die Bestimmung symbolischer Griffe kann in der Literatur ausgiebig studiert werden [Pertin-Troccaz 89]. Deshalb wird hier nur kurz darauf eingegangen, wie in dieser Arbeit symbolische Griffe bestimmt werden. Griffe sind danach unterscheidbar, ob sie durch Formschluß oder durch Kraftschluß stabil sind. Formschluß bedeutet, daß das gegriffene Objekt nicht aus dem Greifer rutschen würde, selbst wenn es keinerlei Reibung, Unterdruck oder Magnetismus zwischen Greifer und Objekt gäbe. Formschluß kann in dieser Arbeit nicht angestrebt werden, da aufgrund der Unbekanntheit der Objekte und dem Verzicht auf Rekonstruktion das erforderliche formschlüssige Umfassen der Objekte nicht zuverlässig möglich wäre. Bei Kraftschluß hingegen verhindert beispielsweise bei Parallel-Backen-

Greifern die Reibung das Verrutschen des Objekts, bei Vakuumgreifern das Vorhandensein eines Unterdrucks.

Geeignete Greifmerkmale für den in Kapitel 3 beschriebenen Vakuumgreifer sind ebene Oberflächen, welche mindestens so groß sind, daß die Saugnäpfe daraufpassen. Ideale Greifmerkmale für Parallel-Backen-Greifer sind gegenüberliegende ebene parallele Oberflächen, welche groß genug sind, um die Greiferfinger darauf zu plazieren. Der in dieser Arbeit verwendete und in Kapitel 3 beschriebene Laser-Triangulations-Scanner zur Erzeugung eines Tiefenbilds läßt aufgrund der aktiven Beleuchtung aus einer bestimmten Richtung, nämlich senkrecht von oben, nicht die Segmentierung gegenüberliegender paralleler ebener Flächen zu. Deshalb wird zum Greifen von z.B. quasi starrer Ware, welche auch Hartware genannt wird, mit den Parallel-Backen-Greifern nach gegenüberliegenden parallelen Kanten auf segmentierten ebenen Oberflächen gesucht. Aufgrund des häufigen Mangels an Information über die Neigung der dazugehörigen Seitenflächen wird der Greifer so ausgerichtet, daß die Finger senkrecht zur Oberfläche stehen. An dieser Stelle wird nochmals betont, daß nicht etwa von rechten Winkeln zwischen Ober- und Seitenflächen ausgegangen wird. Im Gegenteil, beliebige Winkel oder Formen sind zugelassen. Falls doch ebene Seitenflächen rechtwinklig zur Oberfläche stehen, wie dies z.B. bei quaderförmigen Kartons im allgemeinen der Fall ist, dann ergeben sich zwischen Greifer und Objekt aufgrund hoher Reibungswerte sehr stabile Fläche-Fläche-Kontakte. Ansonsten ist das Greifen genauso möglich, nur liegen dann Fläche-Kante-Kontakte vor, welche auch Griffe mit hoher Qualität ermöglichen.

Weichware, beispielsweise in Folie verpackte Textilien, muß mit dem in Kapitel 3 vorgestellten kleinen Parallel-Backen-Greifer gegriffen werden. Der Vakuumgreifer ist nämlich nur für ebene feste Oberflächen oder gespannte Folien geeignet [Gore et al. 88], und die Finger des großen Parallel-Backen-Greifers berühren sich nicht beim Schließen, weshalb die Ware aus diesem Greifer herausrutschen würde. Die Bestimmung symbolischer Griffe für die Weichware ist nicht Schwerpunkt der Arbeit, wird jedoch zur Vervollständigung im Anhang B kurz dargestellt.

Der in Kapitel 3 vorgestellte große Parallel-Backen-Greifer verfügt über vier Finger, welche alle das Objekt aus Stabilitätsgründen berühren sollten. Wenn jedoch die freien Greifflächen zu klein sind für die Berührung mit allen vier Fingern, oder wenn es nicht möglich ist, die erforderliche Lage kollisionsfrei zu erreichen, dann kann dieser Greifer auch als Zwei-Finger-Greifer eingesetzt werden, wozu jeweils sich gegenüberliegende Finger verwendet werden. Die anderen beiden Finger haben dann keine Funktion, werden jedoch in der Überprüfung der Greiftrajektorie auf Kollisionen mit berücksichtigt.

Der symbolische Griff gibt die relative Lage zwischen Objekt- bzw. Greifmerkmalen und Greifer an. Durch die Kenntnis der Lage der Greifmerkmale im Weltkoordinatensystem läßt sich somit die Greiflage, also die Ziellage des Greifers zum Greifen des Objekts, in Weltkoordinaten angeben. Die in Abbildung 5.2 dargestellte Annäherungsrichtung \vec{v}_a der Greifer verläuft parallel zu den Greiferfingern bzw. in Richtung der Saugnäpfe. Der Greifer soll linear durch den Roboter aus einer Annäherungslage entlang \vec{v}_a in die Greiflage^{5.3} bewegt werden. Diese Bewegung ist vorteilhaft für das Eingreifen der Finger in enge Spalten bzw. für das gleichzeitige Aufsetzen der Saugnäpfe. Die Länge dieses Trajektorienabschnitts ist für jeden Greifer individuell auswählbar. Der Greifer soll sich in Annäherungslage also bereits in Greiforientierung befinden. Bei den Parallel-Backen-Greifern sollen auch bereits die

^{5.3} In der Greiflage greift der Roboter ein Objekt durch Schließen der Greiferfinger, Aufbau von Unterdruck in Saugnäpfen, die Erzeugung eines Magnetfeldes, u.s.w.

Finger in der für die Annäherung geeigneten Stellung, also etwas weiter geöffnet als zum Greifen des Objekts erforderlich, sein.

Die in den folgenden Abschnitten erläuterte Überprüfung auf Kollisionen beginnt explizit in der Annäherungslage. Aufgrund der Beleuchtung senkrecht von oben kann hier davon ausgegangen werden, daß der Bereich senkrecht oberhalb der Annäherungslage frei ist, falls der Greifer sich in Annäherungslage im Frei-Bereich befindet. Falls er sich in Annäherungslage bereits im Unbekannt-Bereich befindet, so ist dies auch für den Bereich senkrecht darüber anzunehmen. Dies wird in den folgenden Abschnitten noch detailliert erläutert. An dieser Stelle folgt daraus jedoch, daß der Greifer bei gleichbleibender Orientierung und Fingerstellung auf einer geraden Bahn senkrecht von oben schnell in die Annäherungslage bewegt werden kann, wenn diese komplett im Frei-Bereich liegt. Oberhalb eines maximal zulässigen Höhenbereichs der Szene, dessen Einhaltung über Lichtschranken überwachbar ist, kann sich der Roboter ohne Kollisionsgefahr frei bewegen und somit beispielsweise über Punkt-zu-Punkt-Bewegungen in die gerade Bahn senkrecht über der Annäherungslage einfahren.

Bei einer anderen Kamera- und Beleuchtungskonfiguration als der hier verwendeten Anordnung können die in den folgenden Abschnitten beschriebenen Verfahren und Algorithmen ebenfalls angewendet werden. Jedoch sind dann eventuell modifizierte Greiftrajektorien zu planen.

Bei der Greifplanung handelt es sich um die Auswahl eines Greifers und die Planung einer Trajektorie aufgrund globaler Sensorinformation. Während der Ausführung der Entnahmeoperation können jedoch unter Einsatz lokaler Sensorik leichte Bahnkorrekturen vorgenommen werden, beispielsweise damit alle Saugnäpfe das Objekt gleichermaßen berühren, oder um im Unbekannt-Bereich kleine Hindernisse zu umfahren.

In dieser Arbeit wird die Überwachung hinsichtlich Kollisionen zwischen Greifer und der Szene betrachtet. Da der Roboterarm sich darüber in relativ großem Abstand bewegt, wird praktisch davon ausgegangen, daß es zu keiner Kollision zwischen Roboterarm und der Szene kommt. In den umfangreichen Experimenten, unter anderem auch im realen Versandhandelsumfeld, kam es auch zu keiner solchen Kollision. Für die Behandlung der Kollisionsvermeidung zwischen Roboter und der Szene wird z.B. auf [Wurll 99] verwiesen.

5.1.2 Aufteilung der Szene in Frei-, Objekt- und Unbekannt-Bereiche

Für die Überprüfung auf mögliche Kollisionen wird die Szene aufgrund der Information von Tiefenbildern, welche beispielsweise von dem in Kapitel 3 vorgestellten Triangulations-Laser-Scanner erzeugt werden, in Frei-, Objekt- und Unbekannt-Bereiche unterteilt.

Das durch eine Kamera aufgenommene 2.5D-Tiefenbild gibt in einer matrixförmigen Rasterung der horizontalen 2D-Grundfläche der Szene für die einzelnen Rasterzellen Werte an, welche die erfaßten Höhen der Szene an den jeweiligen Stellen beschreiben. Analog zur Bezeichnung „Pixel“ im 2D-Bereich und „Voxel“ im 3D-Bereich wird für die Höhenwerte des 2.5D-Tiefenbilds (englisch: Range Image) der Begriff „Rangel“ verwendet. Es gibt bei Vorhandensein visueller Verdeckungen oder lichtabsorbierender bzw. stark reflektierender Oberflächen, wenn also die Laserprojektion für die jeweilige Kamera unsichtbar wird, jedoch auch Rasterzellen der Grundfläche, über denen keine Rangels angegeben werden können. Abbildung 5.1 illustriert in den Teilbildern a) und b) durch blau gezeichnete Linien, welche Oberflächen für welche Kamera jeweils sichtbar sind. Senkrecht über der sichtbaren

Oberflächen ist die Szene sicher frei, da ansonsten das Laserlicht nicht auf die Oberflächen fallen könnte^{5.4}.

Über den Rasterzellen der Grundfläche, wo die Rangels fehlen, kann nur im unverdeckten, also eigentlich für die Kamera sichtbaren Bereich auf Freiraum geschlossen werden. Die genaue Bestimmung dieses eigentlich sichtbaren Bereichs hängt von der genauen Kameraanordnung, also der zur Szene relativen Position und Orientierung, von Kameraparametern wie beispielsweise dem Öffnungswinkel sowie von den Objekten in der Szene ab.

Um weitgehend unabhängig von diesen zahlreichen Parametern zu sein, wird eine Approximation des Unbekannt-Bereichs vorgenommen. Wenn zwei Oberflächen für eine Kamera sichtbar sind, dann ist der Raum oberhalb der „direkten Verbindungsfläche“ zwischen den beiden Oberflächen sicher auch frei. Diese „direkte Verbindungsfläche“ kann approximiert werden durch die geraden Verbindungslinien in Projektionsrichtung der Kamera zwischen den jeweiligen Rangels der beiden sichtbaren Flächen am Rand zum Unbekannt-Bereich^{5.5}.

In den Teilbildern a) und b) sind die sich so ergebenden Unbekannt-Bereiche orangefarben eingefärbt. Der im Teilbild b) links liegende Unbekannt-Bereich ist nur von der einen Seite durch eine sichtbare Oberfläche berandet, so daß er bis zur Obergrenze des Arbeitsraums verläuft. An dieser Obergrenze des Arbeitsraums bietet sich der Einsatz einer horizontal verlaufenden flächenförmigen Lichtschranke an, um oberhalb dieser Grenze Freiraum garantieren zu können, so daß der Roboter dort mit voller Geschwindigkeit fahren darf. Die grünen Schraffierungen markieren die Bereiche, welche durch die hier vorgenommene Approximation zum Unbekannt-Bereich gehören, obwohl sie bei exakter Berücksichtigung der oben genannten Parameter eigentlich dem Frei-Bereich zugeordnet werden könnten. Aufgrund der Über-Approximierung des Unbekannt-Bereichs, in dem lokale Sensorüberwachung zum Einsatz kommt, wird die Zuverlässigkeit des Systems jedoch nicht eingeschränkt.

^{5.4} Anmerkung 1: Dieser Schluß könnte falsch sein, falls die Projektion durch reflektiertes Licht zustande kommt, was aber nicht der Fall und somit kein Problem ist, wenn keine Spiegel oder Optiken bzw. Glasstücke in der Szene liegen. An lichtabsorbierenden Oberflächen mehrfach reflektiertes Licht hat nämlich eine schwächere Intensität und fällt somit ohnehin unter einen Binarisierungsschwellwert.

Anmerkung 2: Wenn die Beleuchtung wie im Beispiel dieser Arbeit von einer Laserdiode erzeugt und über eine zentral-projezierende Optik aufgefächert wird, dann muß vorausgesetzt werden, daß die Beleuchtung relativ weit entfernt ist von der Szene, so daß die Lichtstrahlen im Rahmen der erreichbaren Genauigkeit des Systems als parallel verlaufend approximiert werden dürfen.

^{5.5} Anmerkung 1: Bei ausreichend großem Abstand zwischen der Szene und den Kameras dürfen die Strahlengänge des reflektierten und von den Kameras erfaßten Lichts im Rahmen der erreichbaren Genauigkeit des Systems als parallel angenommen werden. Bei der in dieser Arbeit verwendeten und in Kapitel 3 beschriebenen Kameraanordnung bedeutet dies, daß die approximierte Projektionsrichtung für die Verbindung der Rand-Rangels parallel zur direkten Verbindungslinie der Kameras und somit auch parallel zur Verfahrtrichtung der Laserdiode verläuft. Dadurch wird die Berechnung der approximierten Begrenzung des Unbekannt-Bereichs basierend auf der matrixförmigen Darstellung des Tiefenbilds vereinfacht, und es kann Rechenzeit eingespart werden.

Anmerkung 2: Falls das Tiefenbild nicht den gesamten Arbeitsraum, in dem sich Szenenobjekte befinden können, in voller Höhe erfaßt, dann muß bei dieser Regel zur Approximation des Unbekannt-Bereichs einschränkend vorausgesetzt werden, daß die Beobachtung der Laserlicht-Projektionen durch die Kamera nicht durch „Löcher“ bzw. Aussparungen der Szenenobjekte hindurch erfolgt.

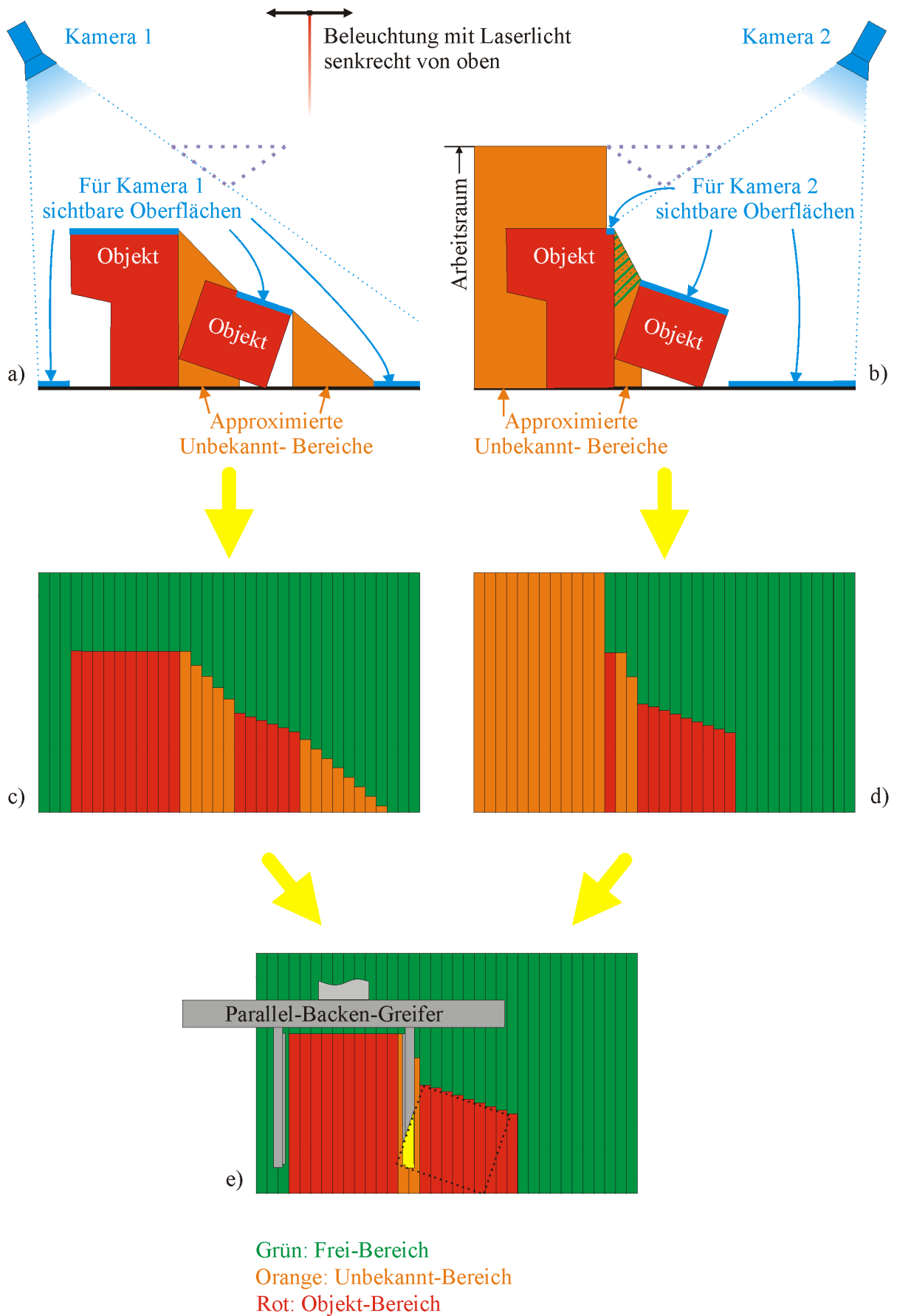


Abbildung 5.1: Aufteilung der Szene in Frei-, Objekt- und Unbekannt-Bereiche

Wenn aus allen durch jeweils eine Kamera aufgenommenen Tiefenbildern ein gemeinsames Tiefenbild fusioniert würde, und nach der Fusion nicht mehr bekannt wäre, welche Rangels durch die Bilder welcher Kamera(s) berechnet wurden, dann dürfte die hier vorgestellte Approximation des Unbekannt-Bereichs zur Abgrenzung gegenüber dem Frei-Bereich basierend auf dem fusionierten Tiefenbild im allgemeinen nicht durchgeführt werden. Häufig ist nämlich nicht für jede Kamera der komplette Arbeitsraum sichtbar. Solch eine komplette Sichtbarkeit würde relativ kurze Brennweiten der abbildenden Optik erfordern, wodurch Abbildungsfehler wie beispielsweise Verzerrungen verstärkt, die Auflösung verschlechtert und die oben genannten Approximationen seltener anwendbar würden. In den Teilbildern a) und b) ist der Ausschnitt des Arbeitsraums, welcher aufgrund der Anordnung für keine der beiden Kameras sichtbar sein kann, jeweils von einer violett gepunkteten Linie umgeben. Wenn die Oberfläche eines Objekts gerade in diesen Ausschnitt des Arbeitsraums fiel, dann wäre die Oberfläche dieses Objekts nicht sichtbar. Auf beiden Seiten hiervon könnten jedoch in einem fusionierten Tiefenbild Oberflächen sichtbar sein. Die Anwendung der Approximation des Unbekannt-Bereichs könnte dann fälschlicherweise Freiraum garantieren, wo jedoch das nicht sichtbare Objekt liegt. Um die Approximation des Unbekannt-Bereichs auch basierend auf einem fusionierten Tiefenbild durchführen zu dürfen, müßte garantiert sein, daß der gesamte Arbeitsraum für alle Kameras vollständig sichtbar ist.

Entsprechend der Rasterung des Tiefenbilds wird die gesamte Szene in Säulen aufgeteilt, wie in den Teilbildern c) und d) der Abbildung 5.1 für einen senkrechten 2D-Schnitt zu sehen ist. Für alle über jede einzelne Kamera erzeugten Tiefenbilder muß gemäß obiger Begründung jeweils solch eine Säulen-Repräsentation des Arbeitsraums der Szene bestimmt werden. Dort, wo Oberflächen sichtbar sind, liegt ein Objekt. Aufgrund der Schwerkraft ist dieses Objekt direkt oder über weitere Objekte mit dem Untergrund der Szene verbunden. Deshalb wird der Bereich senkrecht unterhalb sichtbarer Oberflächen als Objekt-Bereich markiert, in dessen Teilbereichen mit hoher Wahrscheinlichkeit ein Objekt liegt. An dieser Stelle wird dieser Bereich zunächst generell als Bereich mit hoher Kollisionsgefahr und somit zum Durchfahren verboten deklariert. Sicherlich wird im allgemeinen durch diese Über-Approximation des Objekt-Bereichs die Manipulierbarkeit in der Szene geringfügig eingeschränkt, was die Zuverlässigkeit jedoch nicht einschränkt. Ausnahmen dieser generellen Regel zur Approximation werden in Abschnitt 5.1.5 diskutiert.

Teilbild e) zeigt eine aus den Darstellungen in den Teilbildern c) und d) fusionierte Säulendarstellung des Arbeitsraums der Szene. Gemäß den Erläuterungen in diesem Abschnitt ist der Frei-Bereich sicherlich frei von Objekten, weshalb er bei der Fusionierung dominiert. Beispielsweise werden dadurch drei Säulen links in Teilbild d) sowie acht Säulen rechts in Teilbild c) jeweils von Unbekannt- zu Frei-Bereich konvertiert. Weiterhin dominiert Objekt-Bereich gegenüber Unbekannt-Bereich, da die für die Begrenzung des Objekt-Bereichs erforderlichen Rangels ja explizite Objektinformation darstellen. Bei den mittleren Säulen der Teilbilder c) und d) sind beide Regeln für die Fusion anzuwenden.

Teilbild e) illustriert, wie ein Parallel-Backen-Greifer relativ zu einem Objekt zum Greifen positioniert wird. Der rechte Finger muß den Unbekannt-Bereich durchqueren. Und tatsächlich muß in diesem Beispiel über lokalen Sensoreinsatz eine schwere Kollision mit einem Objekt in dem gelb eingezeichneten Ausschnitt vermieden werden.

5.1.3 Modellierung der Greifwerkzeuge

In Teilbild e) von Abbildung 5.1 ist es offensichtlich, daß sich der Greifer in Greifposition teilweise im Unbekannt-Bereich befindet. Diese Überprüfung muß in Algorithmen gefaßt

werden, damit das RO automatisch die Abschnitte der Greiftrajektorie bestimmen kann, in denen sich der Greifer komplett im Frei-Bereich oder teilweise im Unbekannt- oder sogar im Objekt-Bereich befindet.

Dazu wird das jeweilige Greifwerkzeug mit einem Punktenetz überzogen, welches in einer Simulation die Greiftrajektorie schrittweise durchfährt. Für jeden einzelnen Punkt dieses Netzes ist dann in jedem Schritt zu bestimmen, in welchem Bereich er sich aktuell befindet. Auf den genauen Ablauf dieser Überprüfung geht der folgende Abschnitt näher ein.

Zur Bestimmung des Punktenetzes wird jedes Greiferelement quaderförmig approximiert. Ausgehend von einer CAD-Beschreibung des Greifwerkzeugs können die Eckpunkte P_{TCP}^{Gij} der Approximations-Quader im Greifer-Koordinatensystem, dessen Ursprung gewöhnlich im Tool Centre Point TCP liegt, bestimmt werden. Die Punkte P_{TCP}^{Gij} sind homogene Vektoren mit jeweils vier Elementen, nämlich den drei Positionskoordinaten sowie einer 1, welche für Koordinatentransformationen aufgrund von Multiplikationen mit homogenen Matrizen erforderlich ist [Paul 82]. In Abbildung 5.2 werden beispielhaft das Greifer-Grundgestell durch violette, der linke Finger durch grüne bzw. der rechte Finger durch blaue sogenannte Stützpunkte approximiert. Durch eine Über-Approximation der Greiferelemente wird Sicherheitsabstand bei der Überprüfung auf Kollisionen gewonnen.

Die Interpolation der Stützpunkte zur Bildung des Punktenetzes erfolgt erst, nachdem die Stützpunkte in Annäherungslage vom Greifer-Koordinatensystem in das Roboter- oder sogar Weltkoordinatensystem transformiert wurden. Die Bestimmung eines Interpolationspunktes erfordert nur drei Multiplikationen und drei Additionen nach geeigneter Bestimmung von Interpolationsparametern. Die Transformation eines Punktes in ein anderes Koordinatensystem erfordert jedoch im allgemeinen 16 Multiplikationen und neun Additionen. Somit ist es bei der hohen Anzahl der zu interpolierenden Punkte günstig, die wenigen Stützpunkte bei einer Überprüfung zu transformieren und die zahlreichen, jedoch sehr wenig Rechenzeit erfordernden Interpolationen erst in Annäherungslage durchzuführen. Wesentlich rechenintensiver und somit weniger effektiv wäre es, einmalig vorab die Interpolationen im Greifer-Koordinatensystem durchzuführen, dann aber für die zahlreichen Punkte des gesamten Netzes die rechenintensiven Transformationen vornehmen zu müssen.

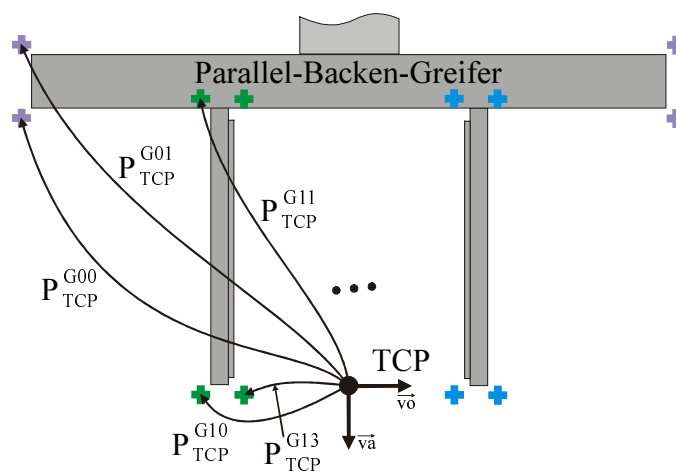


Abbildung 5.2: Festlegung von Stützpunkten zur Modellierung der Greifwerkzeuge für die Kollisionsvermeidung

Abbildung 5.3 illustriert im Teilbild a) die Bestimmung der Stützpunkt-Koordinaten im Roboter-Koordinatensystem. Unter Verwendung der Greifer-Annäherungslage im Roboter-Koordinatensystem, welche durch die homogene Matrix T_{BASE}^{TCP} beschrieben wird, lassen sich die Stützpunkte P_{BASE}^{Gij} im Roboterkoordinatensystem durch folgende Multiplikation bestimmen:

$$P_{BASE}^{Gij} = T_{BASE}^{TCP} \cdot P_{TCP}^{Gij}$$

Wenn die Säulendarstellung der Frei-, Objekt- und Unbekannt-Bereiche der Szene in Weltkoordinaten vorliegt, dann sollten die Stützpunkte durch folgende Transformation in das Welt-Koordinatensystem transformiert werden.

$$P_{WORLD}^{Gij} = T_{WORLD}^{TCP} \cdot P_{TCP}^{Gij} \quad \text{mit} \quad T_{WORLD}^{TCP} = T_{WORLD}^{BASE} \cdot T_{BASE}^{TCP}$$

Abbildung 5.3 b) zeigt das erzeugte Punktenetz in Annäherungslage nach der Interpolation der transformierten Stützpunkte. Die Punkte des Netzes sind für die Optimierung des im folgenden Abschnitt beschriebenen Ablaufs in zwei Gruppen zu unterteilen, nämlich die in der Abbildung blau eingezeichneten Basis-Punkte und die grün eingezeichneten Körper-Punkte. Dabei sind die Basispunkte die Punkte, welche das Punktenetz in Annäherungsrichtung \vec{v}_a des Greifers begrenzen.

Der Abstand zwischen den zu interpolierenden Punkten ist in Abhängigkeit der Auflösung der Tiefenbilddaten zu wählen. Ein Interpolationsabstand in der Größenordnung der Auflösung oder etwas darunter führt zu einer Genauigkeit bzw. Zuverlässigkeit, welche durch wesentlich kleinere Interpolationsabstände nur noch geringfügig zu verbessern ist. In Abschnitt 5.4.2 werden die sich ergebenden Rechenzeiten in Abhängigkeit des Interpolationsabstands angegeben.

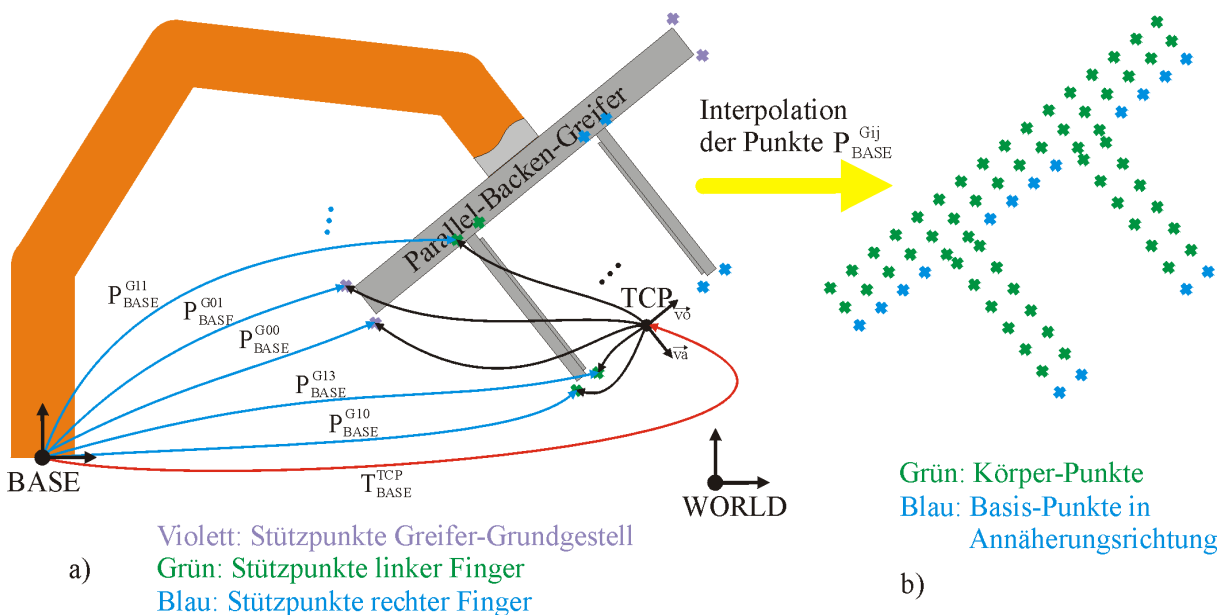


Abbildung 5.3: Bestimmung der Stützpunktkoordinaten im Arbeitsraum des Roboters und anschließende Stützpunktinterpolation für die Kollisionsvermeidung

5.1.4 Algorithmus zur Bestimmung möglicher numerischer Griffe

Nachdem einige wesentliche Einzelkomponenten zur Bestimmung numerischer Griffe, nämlich insbesondere die Bestimmung symbolischer Griffe, die Aufteilung der Szene in Frei-, Objekt- und Unbekannt-Bereiche, die zu durchfahrende Greiftrajektorie sowie die Modellierung der Greifwerkzeuge in diesem Kapitel bisher beschrieben wurden, stellt dieser Abschnitt den entwickelten Algorithmus zum Gesamtablauf der Bestimmung numerischer Griffe vor.

Aus dem Strukturbild in Abbildung 5.4 geht hervor, daß der Algorithmus von den in Bildern der Szene segmentierten Szenenbereichshinweisen ausgeht. Für jeden Szenenbereichshinweis bzw. für Strukturen von Szenenbereichshinweisen wird zunächst gemäß den Erläuterungen in Abschnitt 5.1.1 nach Greifmerkmalen für die verschiedenen Greifer und Greifarten gesucht. Unter anderem ergibt sich dadurch beispielsweise eine Menge gegenüberliegender paralleler Kanten auf segmentierten ebenen Flächenstücken. Dieser Schritt entspricht noch nicht der Bestimmung symbolischer Griffe, da die Auswahl des jeweiligen Greifers und somit auch die relative Lage zwischen Greifer und Greifmerkmal noch nicht festliegen. Beispielsweise kann sich ein bestimmtes Greifmerkmal, wie gegenüberliegende parallele Kanten, für symbolische Griffe mit verschiedenen Parallel-Backen-Greifern und zudem mit unendlich vielen relativen Lagen eignen. Es ist z.B. möglich, die Finger eines bestimmten Parallel-Backen-Greifers zentral auf dem Kantenpaar oder in beliebig vielen Stufen seitlich verschoben zu plazieren. Deshalb werden die Greifmerkmale nicht für jede Bestimmung eines symbolischen Griffs erneut, sondern einmal vorab bestimmt.

Es könnten quasi unendlich viele symbolische Griffe bestimmt werden. Entsprechend der zur Verfügung stehenden Rechenleistung, Rechenzeit und dem Bedarf einer mehr oder weniger großen Auswahl möglicher Griffe wird jedoch nur eine begrenzte Anzahl symbolischer Griffe bestimmt.

Damit ein symbolischer Griff auch als numerischer Griff klassifiziert werden darf, muß die Greiftrajektorie außerhalb des Objektbereichs durchfahrbar sein. Dazu wird zunächst überprüft, ob die Kinematik des Roboters das Durchfahren erlaubt. Das kartesische Durchfahren von Singularitäten [Paul 82] wurde im Rahmen dieser Arbeit zwar realisiert, kostet jedoch relativ viel Zeit und kann zu überwachen, aber dennoch vorhandenen Bahnabweichungen führen. Deshalb wird untersucht, ob während der Linearbewegung senkrecht von oben in die Annäherungslage eine Singularität zu durchfahren ist. Ist dies der Fall, und gehört zudem der obere Arbeitsbereich bis knapp unterhalb der Singularität zum Frei-Bereich, dann wird die Linearbewegung in die Annäherungslage erst knapp unterhalb der Singularität gestartet. Der symbolische Griff wird entsprechend mit dieser Information versehen.

Im Anschluß daran werden aus den in Abschnitt 5.1.3 beschriebenen Optimierungsgründen die Stützpunkte der Greifermodellierung zunächst in Annäherungslage in Roboter- oder Weltkoordinaten transformiert, bevor die Zwischenpunkte zur Erzeugung eines Punktenetzes interpoliert werden. Falls sich in Annäherungslage Netzpunkte bereits im Objekt-Bereich befinden, dann wird der symbolische Griff nicht weiter überprüft und nicht als numerischer Griff klassifiziert. Wenn sich in Annäherungslage Netzpunkte bereits im Unbekannt-Bereich befinden, dann muß diese Information entsprechend dem symbolischen Griff zugeordnet werden, es findet also quasi eine Markierung der Greiftrajektorie statt, an welcher Stelle der Unbekannt-Bereich beginnt. Wenn der Unbekannt-Bereich bereits in der Annäherungslage beginnt, dann verläuft entsprechend der Begründung in Abschnitt 5.1.2 auch die Linearbewegung zur Annäherungslage durch Unbekannt-Bereich.

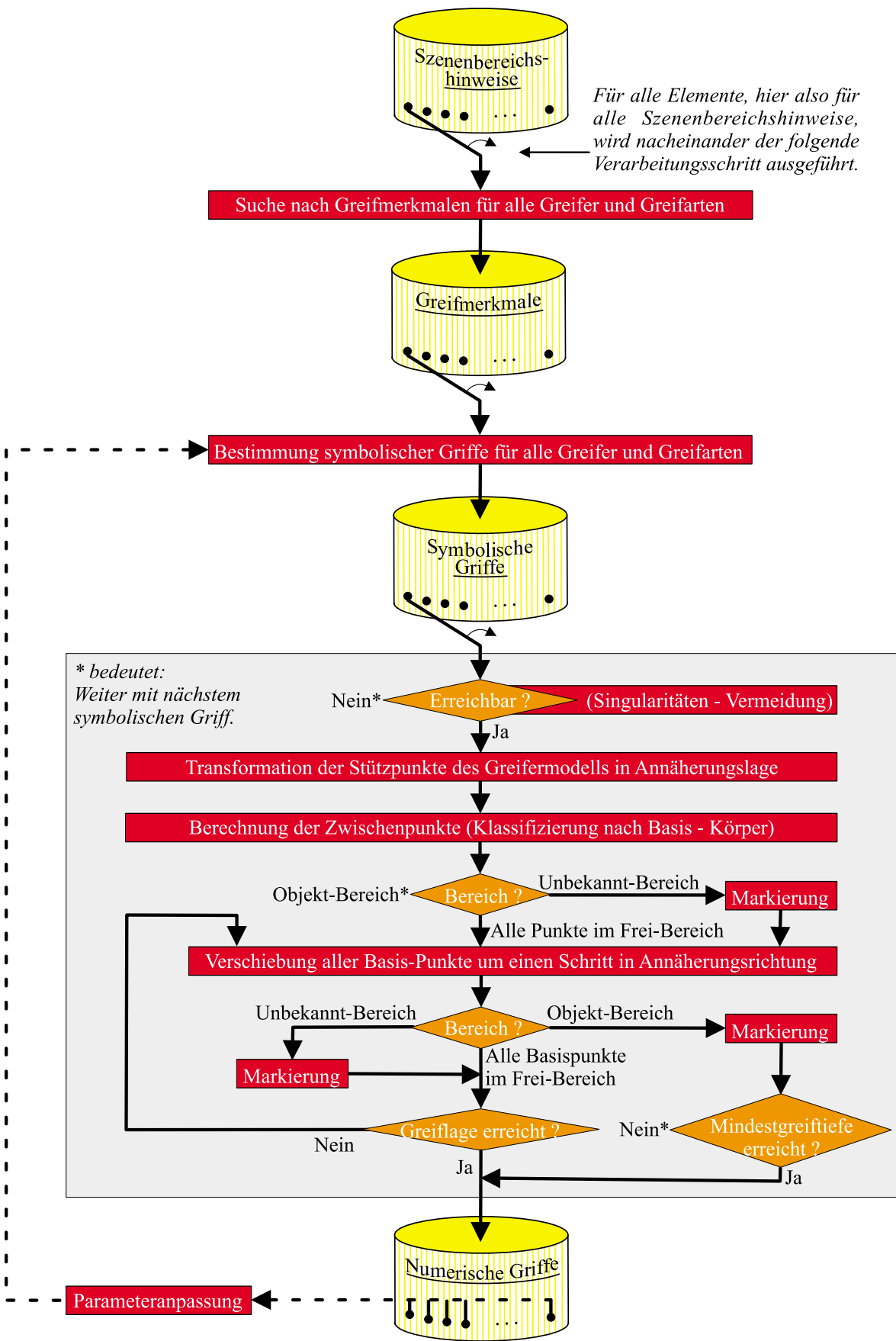


Abbildung 5.4: Bestimmung numerischer Griffe

Anschließend werden alle Basispunkte schrittweise in Annäherungsrichtung verschoben. Es reicht aus, wenn die Basispunkte während der Linearbewegung in die Greiflage überprüft werden, da die Körperpunkte lediglich auf den gleichen Bahnen den Basispunkten folgen würden, was keine weitere Information bringen würde. Diese Vorgehensweise trägt wesentlich zur Effizienz des Algorithmus bei. Die Schrittweite sollte etwa dem Interpolationsabstand bei der Erstellung des Punktenetzes entsprechen, denn dadurch wird ein ausgewogenes Verhältnis zwischen einer gleichmäßigen Genauigkeit über die gesamte Überprüfung der Greiftrajektorie hinweg einerseits und andererseits der erforderlichen Rechenzeit gewährleistet.

In jedem Annäherungsschritt werden die Basispunkte danach überprüft, in welchem Bereich sie sich befinden. Beim Eintreten in den Unbekannt- oder Objekt-Bereich wird die Greiftrajektorie entsprechend markiert. Im Automatikbetrieb, das heißt, wenn keine Visualisierung der Greifplanung erforderlich ist, kann das schrittweise Verschieben der Basispunkte abgebrochen werden, sobald sich mindestens ein Punkt im Objekt-Bereich befindet. Dadurch kann Rechenzeit eingespart werden^{5,6}. Entsprechend der Begründung in Abschnitt 5.1.2 wird dann nämlich auf hohe Kollisionsgefahr geschlossen. In diesem Fall ist zu prüfen, ob eine Mindest-Eingreiftiefe, welche für alle Greifer und je nach Anwendung getrennt gewählt werden kann, erreicht wurde. Ist dies der Fall, dann ist ein numerischer Griff gefunden. Ansonsten kann der symbolische Griff nicht als numerischer Griff klassifiziert werden. Das schrittweise Verschieben und Überprüfen der Basispunkte wird im Frei- oder Unbekannt-Bereich solange ausgeführt, bis die Greiflage erreicht ist.

Im letzten Schritt des Algorithmus ist festzustellen, ob überhaupt numerische Griffe bestimmt werden konnten bzw. ob die Anzahl numerischer Griffe für eine anschließende optimierte Auswahl groß genug ist. Wenn dies nicht der Fall ist, dann erfolgt eine Rückkopplung zur Bestimmung einer größeren Vielfalt symbolischer Griffe, für die dann erneut die kollisionsfreie Erreichbarkeit zu überprüfen ist. Die Rückkopplung muß von einem übergeordneten Planungssystem aktiviert werden, um Endlos-Schleifen in dem Fall zu vermeiden, daß sich überhaupt keine numerischen Griffe bestimmen lassen.

Als Ergebnis der Ausführung dieses Algorithmus steht also eine Menge numerischer Griffe zur Verfügung mit der jeweiligen Greiftrajektorie und der expliziten Information, auf welchen Abschnitten der Greiftrajektorie sich der Greifer in welchem Bereich befindet.

Die wichtigsten Maßnahmen zur optimierten Ausführung werden an dieser Stelle nochmals kurz festgehalten:

- Erstens müssen zur Überprüfung auf Kollisionen nicht etwa alle Oberflächen analytischer Objektmodelle herangezogen werden, wozu beispielsweise im allgemeinen zahlreiche rechenintensive Projektionen erforderlich sind. Statt dessen kann nach einmaliger Erstellung der Säulendarstellung des Arbeitsraums für alle Trajektorien symbolischer Griffe direkt überprüft werden, in welchen Bereichen sich die Trajektorien befinden.
- Zweitens wird die Interpolation der Netzpunkte zur Erstellung eines Greifermodells nach der Transformation der Stützpunkte in die Annäherungslage durchgeführt, wodurch zahlreiche rechenintensive Transformationen entfallen.

^{5,6} Die Implementierung des Algorithmus ist etwas komplexer, als im Strukturdiagramm dargestellt. Im Testbetrieb, wenn also die Greifplanungsschritte visualisiert werden sollen und es nicht auf echtzeitfähige Ausführung ankommt, können die Basispunkte nämlich auch weiter bis in die Greiflage verschoben werden, selbst wenn sich bereits Basispunkte im Objekt-Bereich befinden. Somit lassen sich dann auch Basispunkte im Objekt-Bereich visualisieren. Die dazu erforderlichen Verzweigungen und Schleifen wurden im Strukturdiagramm weggelassen, um nicht von den wesentlichen Schritten der Greifplanung abzulenken.

- Drittens müssen durch geschickte Planung der Greiftrajektorie die Körperpunkte nur einmal überprüft werden.
- Viertens wird die Schleife zur schrittweisen Annäherung der Basispunkte sofort abgebrochen, wenn sich mindestens ein Punkt im Objekt-Bereich befindet.
- Fünftens führt die Auswahl der Interpolationsabstände und Schrittweiten in der Größenordnung der Auflösung der Tiefenbilder der Szene zu vergleichsweise äußerst kurzen Gesamtrechnenzeiten, wie in Abschnitt 5.4.2 anhand experimenteller Ergebnisse nachgewiesen wird.

5.1.5 Sonderfälle bei der Überprüfung auf Kollisionen

In Abschnitt 5.1.2 wurde argumentiert, daß der Bereich senkrecht unterhalb von sichtbaren Oberflächen mit hoher Wahrscheinlichkeit größtenteils mit einem Objekt belegt ist, und deshalb wird dieser Bereich als Objekt-Bereich zum Durchfahren mit dem Greifer verboten.

Bei sturer Berücksichtigung dieses Durchfahrverbots wäre es aber niemals möglich, mit einem Parallel-Backen-Greifer, statt senkrecht von oben, ein Objekt etwas gekippt von der Seite zu greifen und dabei mit manchen Greiferfingern teilweise unter das Objekt zu fahren. Solch ein Fall, der in der praktischen Anwendung häufig auftritt, ist in Abbildung 5.5 illustriert. Im Teilbild a) ist in einer RobCAD-Simulation das Punktenetz in einer Frontansicht zu sehen, welches den großen Parallel-Backen-Greifer in Annäherungslage umgibt. Darüber ist das Punktenetz in der gleichen Lage von zwei weiteren Blickrichtungen zu sehen, nämlich von links senkrecht zur Annäherungsrichtung bzw. von oben parallel zur Annäherungsrichtung. Alle Netzpunkte haben in dieser Darstellung im Frei-Bereich die gleiche grüne Einfärbung, da hier nicht wie oben die Unterscheidung zwischen Basis- und Körperpunkten gezeigt werden soll, sondern in welchem Bereich sich die Punkte jeweils befinden. Entsprechend sind alle Punkte im Unbekannt-Bereich orangefarben und alle Punkte im Objekt-Bereich rot eingezeichnet.

Da sich alle Netzpunkte in Annäherungslage im Teilbild a) im Frei-Bereich befinden, fährt der Greifplanungsalgorithmus damit fort, schrittweise in Annäherungsrichtung die Basispunkte zu verschieben. Dabei wird jeweils ausschließlich für die Basispunkte überprüft, in welchem Bereich sie sich befinden^{5.7}. Teilbild b) zeigt den letzten Schritt, in dem noch alle Netzpunkte im Frei-Bereich sind^{5.8}.

^{5.7} In Teilbild b) sowie in weiteren Abbildungen der Arbeit werden während der Annäherungsphase die Körperpunkte auch noch visualisiert, um dem Betrachter die Orientierung im Simulationsbild zu erleichtern. Die gezeigten Körperpunkte werden während der Annäherungsphase jedoch nicht mehr auf ihre Bereichslage hin überprüft.

^{5.8} Die darunter gezeigten Teilbilder zeigen jeweils die entsprechende RobCAD-Simulation, wobei statt dem Punktenetz hier jedoch ein Modell des durch das Netz approximierten Greifers visualisiert wird.

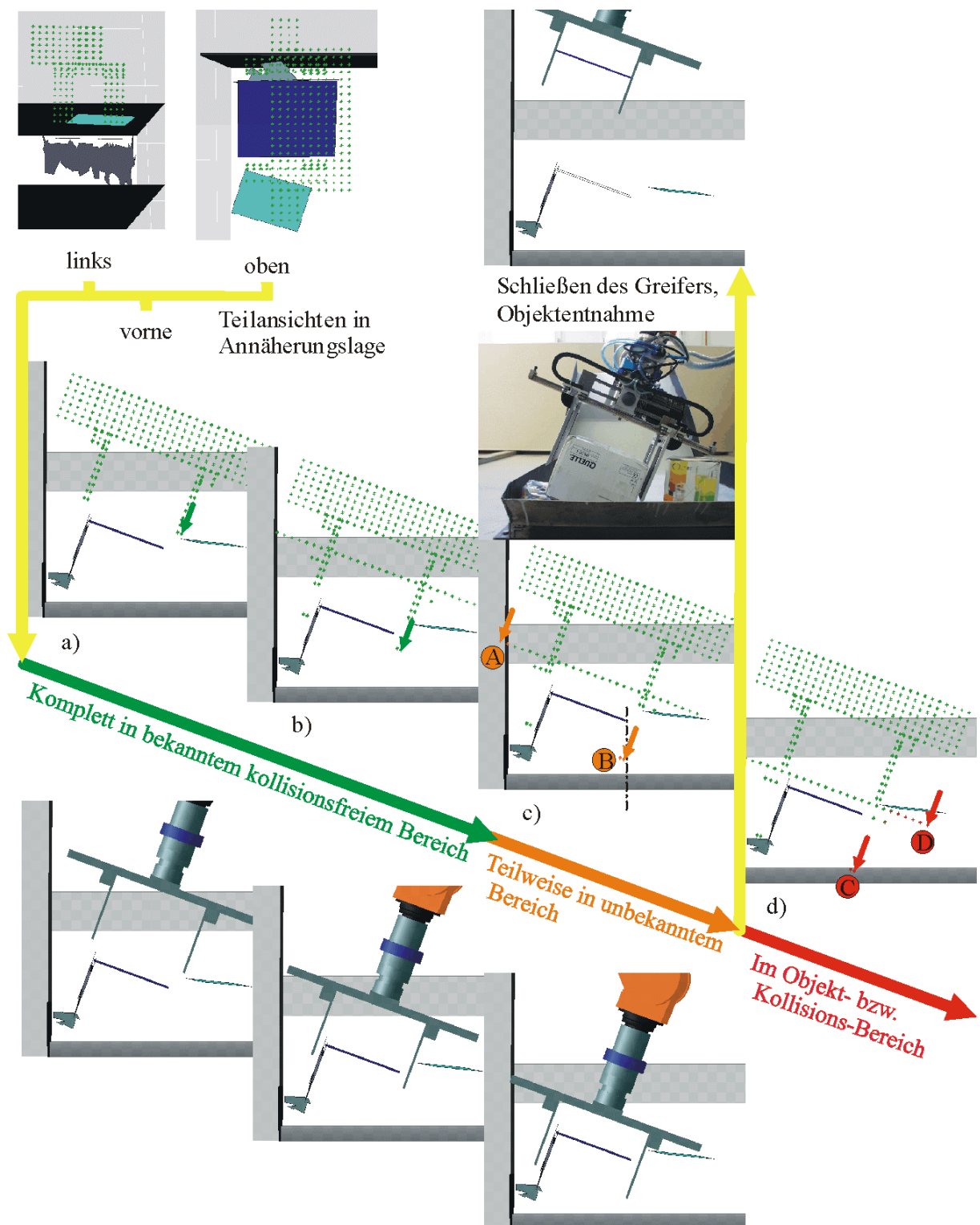


Abbildung 5.5: Sonderfälle bei der Überprüfung auf Kollisionen

Die Basispunkte, welche in Teilbild b) mit dem grünen Pfeil gekennzeichnet sind, müssten sich in den folgenden Annäherungsschritten eigentlich unter die sichtbare, in dieser Ansicht als dunkelblaue Linie visualisierte Oberfläche des zu greifenden Objekts und somit im Objekt-Bereich bewegen. Damit müsste das Objekt bereits an dieser Stelle gegriffen werden. Aus zwei Gründen ist solch ein Griff, bei dem die Finger das Objekt nur wenig berühren, jedoch als qualitativ schlecht einzustufen. Erstens ist der Griff wenig stabil, so daß das Objekt

leicht aus dem Greifer rutschen kann. Und zweitens belastet solch ein Griff den Greifer aufgrund der großen Hebellängen wesentlich stärker, als wenn der Greifer so weit wie möglich an das Objekt herangefahren wäre.

Aus diesen Gründen wird an dieser Stelle folgende Sonderbehandlung eingeführt. Der Objekt-Bereich wird ausnahmsweise als Unbekannt-Bereich klassifiziert für die Basispunkte der Greiferfinger, welche sich zum Bewegen in die Greiflage unter die sichtbare Oberfläche des Teils des zu greifenden Objekts bewegen müssen, welcher sich zwischen den Greiferfingern befindet^{5.9}. Dieser Sonderfall ist bei der Markierung B in Teilbild c) zu sehen, in dem die Basispunkte orangefarben eingezeichnet sind, obwohl sie regulär bereits im Objekt-Bereich wären und rot eingefärbt werden müßten.

Von der starren Umgebung der Roboterzelle kann ein Modell erstellt und für die Kollisionsvermeidung verwendet werden. Beispielsweise befinden sich Basispunkte bei Markierung C in Abbildung d) sicher unterhalb des Szenenuntergrunds und befinden sich deshalb sicher im für das Durchfahren verbotenen Kollisions-Bereich. Markierung A in Teilbild c) zeigt Netzpunkte, welche sich außerhalb des Bereichs befinden, welcher durch das Bildaufnahmesystem erfaßt wird. Da dort kein Zellenhindernis bekannt ist, wird der Bereich als Unbekannt-Bereich klassifiziert.

Markierung D in Teilbild d) zeigt schließlich einen regulären Fall, in dem sich Netzpunkte unter eine sichtbare Oberfläche bewegen und sich dort im für das Durchfahren verbotenen Objekt-Bereich befinden. Der oben beschriebene Sonderfall tritt hier nicht ein, weil die Netzpunkte erstens keine zu Greiferfingern gehörende Basispunkte sind, sondern zum Greifergrundgestell gehören, und weil sie sich zweitens unter eine andere als die sichtbare zum zu greifenden Objektteil gehörende Oberfläche bewegen.

Teilbild c) zeigt den letzten Annäherungsschritt, bevor sich Netzpunkte im Objekt- bzw. Kollisions-Bereich befinden. Deshalb wird bei der Ausführung eines auf diesem Griff basierenden Entnahmeprozesses an dieser Stelle der Greiftrajektorie der Greifer geschlossen, bzw. ein Unterdruck in den Saugnapfen des Vakuumgreifers aufgebaut. Vorzugsweise wird das Objekt im Anschluß daran senkrecht nach oben angehoben. Über lokalen Sensoreinsatz sind jedoch kritische Situationen wie z.B. Verhakungen oder Kollisionen zu erkennen, so daß die Entnahmetrajektorie eventuell modifiziert werden muß.

Ein weiterer Sonderfall soll an dieser Stelle noch erwähnt werden. Im Anhang B wird die Lokalisation von in Folie verpackter Weichware beschrieben. Weichware kann wie Hartware nur lokalisiert werden, wenn überhaupt Oberflächen sichtbar sind. Somit werden die Bereiche unterhalb dieser sichtbaren Oberflächen als Objekt-Bereiche eingestuft. Wie in Kapitel 3 beschrieben wurde, wird der kleine Parallel-Backen-Greifer zum Greifen der Weichware zunächst etwas in die Weichware hineingedrückt, bevor die Finger schließen. Diese Eindrückbewegung wäre aufgrund der in diesem Kapitel erläuterten Überprüfung auf Kollisionen nicht erlaubt. Deshalb wird ähnlich zum oben beschriebenen Sonderfall auch hier erlaubt, daß sich Basispunkte der Finger unterhalb der zur greifenden Weichware gehörenden sichtbaren Oberflächen bewegen. Hier muß jedoch im Unterschied zum oben beschriebenen Sonderfall für die Basispunkte aller Greiferfinger, statt nur bestimmter Finger, der eigentliche Objekt-Bereich als Unbekannt-Bereich klassifiziert werden.

^{5.9} Diese Sonderbehandlung gilt ausschließlich für die Basispunkte der Greiferfinger, welche sich zum Bewegen in die Greiflage unter die sichtbare Oberfläche des Teils des zu greifenden Objekts bewegen müssen, welcher sich zwischen den Greiferfingern befindet. Für alle anderen Netzpunkte soll diese Sonderbehandlung nicht gelten.

Eine ähnliche Sonderbehandlung ist erforderlich für den Vakuumgreifer, dessen flexible Saugnäpfe vor der Erzeugung des Unterdrucks auf der zu greifenden Hartware etwas zusammengedrückt werden sollten. Ansonsten kann es dazu kommen, daß erstens aufgrund von Undichtheiten zwischen den Saugnäpfen und dem Objekt kein Unterdruck aufgebaut werden kann, oder daß zweitens das Objekt beim Aufbau des Vakuums unkontrolliert etwas hochgerissen wird, da die Saugnäpfe durch den Unterdruck zusammengezogen werden.

5.2 Optimierte Auswahl von Griffen für die Objektentnahme

In den bisherigen Abschnitten dieses Kapitels wurde die Vorgehensweise zur Bestimmung numerischer Griffen detailliert erklärt. Dieser Abschnitt geht auf die Fragestellung ein, welcher der berechneten numerischen Griffen denn für die nächste Objektentnahme ausgewählt werden soll.

Die Auswahl wird hier im wesentlichen nach zwei wichtigen Kriterien optimiert:

- Erstens sollen gemäß der Zielstellung der Arbeit, ein zuverlässiges RO zu entwickeln, hochqualitative Griffen bevorzugt werden.
- Zweitens sind Greiferwechsel möglichst zu vermeiden, um die erreichbare Taktzeit zu verkürzen.

Was hochqualitative Griffen sind, kann verschiedenartig, nach vielfältigen Kriterien definiert werden. Wenn beispielsweise Hinweise auf Objektflächen vorhanden sind, welche möglichst zur Vermeidung von Beschädigungen nicht zum Greifen berührt werden sollten, dann kann über dieses Kriterium eine qualitative Einteilung der numerischen Griffen erfolgen. Ein anderes mögliches Kriterium ist, möglichst nah beim geometrischen Schwerpunkt des Objekts zu greifen, in der Annahme, daß das Objekt eine annähernd gleichmäßige Massenverteilung aufweist. In Abschnitt 5.1.5 wurde bereits darauf hingewiesen, daß es sinnvoll ist, mit Parallel-Backen-Greifern möglichst nah an das zu greifende Objekt heranzufahren, so daß es neben einer Entlastung der Greifermechanik auch zu einer maximal großen Berührungsfläche zwischen den Greiferfingern und dem Objekt kommen kann. Entsprechend kann die mögliche Eingreiftiefe bis zum Erreichen des Objekt- bzw. Kollisionsbereichs als Kriterium herangezogen werden.

Um die Eingreiftiefen verschiedener Parallel-Backen-Greifer objektiv miteinander vergleichen zu können, sollte eine Normierung stattfinden, so daß jeweils die für einen Greifer relative Eingreiftiefe in Beziehung zur maximal möglichen Eingreiftiefe für den Vergleich verwendet wird^{5,10}. Für den Vakuumgreifer macht dieses Kriterium keinen Sinn, da er immer komplett bis an das Objekt heranzufahren können muß, damit ein symbolischer Griff überhaupt als numerischer Griff klassifiziert werden kann. Numerischen Griffen für Vakuumgreifer sind beim Vergleich aufgrund dieses Kriteriums also immer maximale relative Eingreiftiefen zuzuordnen.

^{5,10} Ein Beispiel soll den Sinn der Normierung erläutern. Greifer A habe beispielsweise 30cm lange Finger, während die Finger von Greifer B nur 5cm lang sind. Wenn für Greifer A eine Eingreiftiefe von 6cm bestimmt wird, während die Eingreiftiefe für Greifer B nur 5cm beträgt, dann wäre Greifer A ohne die Normierung vorzuziehen, obwohl Greifer B maximal eingreifen würde, somit die Greifermechanik bedeutend weniger belasten würde, und demnach die dünnen Aluminiumfinger weniger verbogen würden. Durch die Normierung wird Greifer B in diesem Beispiel bevorzugt.

Wenn kurze Zeiten für die Entnahmeoperation selbst erreicht werden sollen, dann ist möglichst sicherzustellen, daß jede Griffausführung erfolgreich verläuft. Entsprechend dominiert dann beim Qualitätsvergleich gegenüber der maximal möglichen Eingreiftiefe ein anderes Kriterium, nämlich ob die Mindest-Eingreiftiefe sicher komplett im Frei-Bereich erreichbar ist. Falls sich eine Greiftrajektorie nämlich vor Erreichen einer für jeden Greifer und Aufgabe individuell wählbaren Mindest-Eingreiftiefe im Unbekannt-Bereich befindet, kann keinesfalls garantiert werden, daß die Entnahmeoperation vollständig ausgeführt werden kann.

Entsprechend den jeweiligen Prioritäten, von denen einige nun hier erwähnt wurden, kann jedem numerischen Griff ein Gesamt-Qualitätswert zugeordnet werden. Dazu sind die einzelnen Kriterien anwendungsabhängig zu gewichten.

Nachdem die wichtigsten hier verwendeten Optimierungskriterien eingeführt sind, wird im folgenden der Gesamtverlauf des Algorithmus zur optimierten Greiferauswahl erläutert. Entsprechend dem Strukturdiagramm in Abbildung 5.6 werden alle numerischen Griffe zunächst für die optimierte Auswahl des für die nächste Objektentnahme zu verwendenden Greifwerkzeugs berücksichtigt, was durch den quer verlaufenden Balken, welcher im oberen gelben Kasten alle durch Punkte dargestellten numerischen Griffe verbindet, angedeutet ist. Falls mindestens ein numerischer Griff für das montierte Greifwerkzeug vorhanden ist, dann werden für die weitere Auswahl nur noch numerische Griffe betrachtet, welche dieses Greifwerkzeug verwenden, um Greiferwechsel einzusparen. Ansonsten wird der Greifer für die nächste Objektentnahme ausgewählt, welcher die meisten unterschiedlichen Objektteile entnehmen kann^{5.11}. Durch diese Auswahl des Greifwerkzeugs wird unter der Annahme, daß bei weiteren Objektentnahmen ähnliche numerische Griffe zur Verfügung stehen, die Anzahl erforderlicher Greiferwechsel reduziert.

Es stellt sich an dieser Stelle die Frage, welcher Greifer ausgewählt werden soll, falls mehrere Greifer gleich viele Objektteile greifen können. In diesem Fall wird untersucht, welcher Greifer die Objektteile am schnellsten greifen, das heißt die Greiftrajektorien am schnellsten durchfahren kann. Die erforderliche Zeitdauer zum Durchfahren einer Greiftrajektorie kann aufgrund der expliziten Kenntnis, in welchen Abschnitten sich die Trajektorie in welchen Bereichen befindet, genau berechnet werden. Dabei sind die Bahngeschwindigkeiten und -profile derart zu wählen, daß der Roboter im Frei-Bereich so schnell wie möglich fährt, sich im Unbekannt-Bereich aber nur so schnell bewegt, daß der Roboter bei Erkennen einer Kollision über lokale Sensorik schnell genug abbremsen kann zur Vermeidung von Beschädigungen der Objekte und des Robotersystems. Zudem müssen die verschiedenen Bahngeschwindigkeiten in Abhängigkeit der maximal möglichen Beschleunigungen des Roboters flüssig ineinander überführbar sein.

^{5.11} Anmerkung 1: Diese Auswahl darf nicht verwechselt werden mit einer ähnlichen Auswahl, nämlich der Bestimmung des Greifers, welcher für die meisten numerischen Griffe einzusetzen ist. Beispielsweise gibt es womöglich für einen Greifer fünf verschiedene numerische Griffe für drei verschiedene Objektteile. Dieser Greifer ist bei der Auswahl einem anderen Greifer vorzuziehen, welcher beispielsweise zehn numerische Griffe aufweist, die jedoch alle nur einem Objektteil zugeordnet sind.

Anmerkung 2: Es wird hier davon ausgegangen, daß für alle Szenenobjekte etwa gleich viele sichtbare durch segmentierte Szenenbereichshinweise beschriebene Objektteile gefunden werden. Dann verhält sich die Anzahl der greifbaren Objektteile für einen bestimmten Greifer annähernd linear zur Anzahl greifbarer Szenenobjekte.

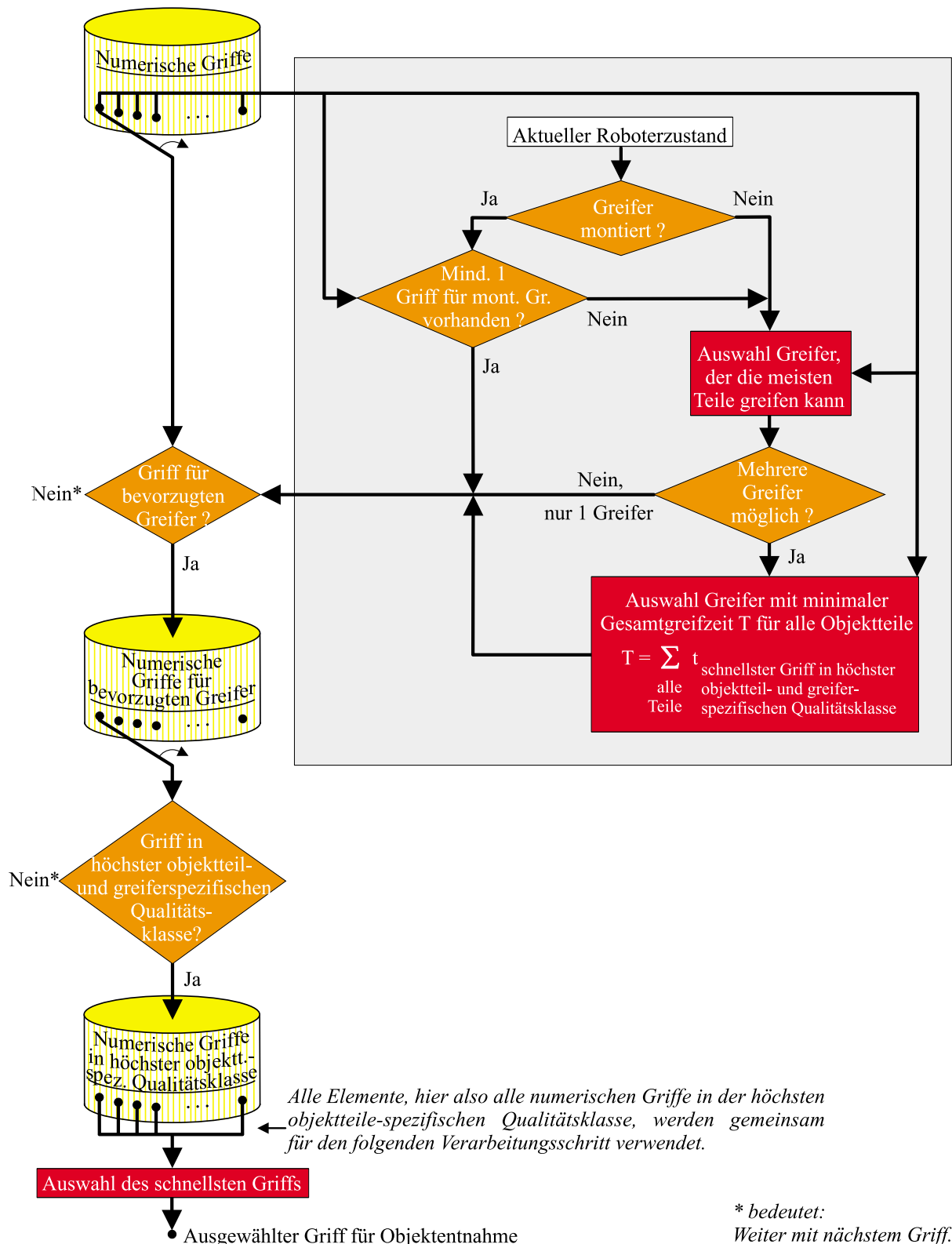


Abbildung 5.6: Optimierte Auswahl eines numerischen Griffs für die Objektentnahme

Für die Bestimmung der erforderlichen Gesamtgreifzeit zum Greifen aller sichtbaren Objektteile in der Szene mit einem bestimmten Greifer muß für jedes greifbare Objektteil genau eine Greifzeit aufsummiert werden. Es ergibt sich jedoch die Frage, von welchem der möglichen numerischen Griffe für ein bestimmtes Objektteil und den bestimmten Greifer die

Greifzeit in die Summe eingehen soll. Dazu wird eine objektteil- und greiferspezifische höchste Qualitätsklasse definiert. Das ist ein Toleranzbereich von Qualitätswerten, dessen höchster Wert dem höchsten Qualitätswert aller numerischen Griffe für den bestimmten Greifer und das bestimmte Objektteil entspricht. Als Greifzeit, welche in die Summe eingeht, wird die kürzeste Greifzeit aller numerischen Griffe für dieses Objekt und diesen Greifer ausgewählt, welche zu der höchsten objektteil- und greiferspezifischen Qualitätsklasse gehören.

Durch die optimierte Auswahl des für die nächste Objektentnahme zu verwendenden Greifwerkzeugs hat sich die ursprüngliche Anzahl numerischer Griffe im allgemeinen bereits verringert. Von den an dieser Stelle noch möglichen numerischen Griffen werden im darauf folgenden Schritt alle Griffe herausgefiltert, welche nicht zur objektteil- und greiferspezifischen höchsten Qualitätsklasse gehören. Danach liegen nur numerische Griffe für das zuvor ausgewählte Greifwerkzeug vor, welche alle zu der objekt- und greiferspezifischen höchsten Objektklasse gehören. Von diesen numerischen Griffen ist schließlich im letzten Schritt der Greifplanung der Griff für die nächste Objektentnahme auszuwählen, dessen Greiftrajektorie am schnellsten durchfahren werden kann.

5.3 Experimente zur Überprüfung der entwickelten Greifplanungsalgorithmen

In Kapitel 4 wurden drei Benchmarks definiert zur Überprüfung der Leistungsfähigkeit von ROs in drei kritischen Situationen, mit denen ROs unter Verwendung der in dieser Arbeit zu entwickelnden Strategien und Systemen gemäß der in Abschnitt 1.3 beschriebenen Zielstellung erfolgreich umgehen können sollten.

5.3.1 Benchmark „Verdeckter Bereich“

Abbildung 5.7 zeigt auf dem Photo links oben den kleinen Parallel-Backen-Greifer in Annäherungslage für das Greifen eines Objekts des in Abschnitt 4.4.1 definierten Benchmarks „Verdeckter Bereich“. Alle gemäß den Erläuterungen in Abschnitt 5.1.4 bestimmten numerischen Griffe verwenden den kleinen Parallel-Backen-Greifer und fahren mit einem Finger in den Spalt zwischen den beiden Kartons. In diesem Beispiel wurde der numerische Griff ausgewählt, bei dem die Finger mittig auf dem Greifmerkmal, den gegenüberliegenden parallelen Kanten, plaziert werden. Rechts ist ein Photo des Greifers in Greiflage mit geschlossenen Fingern zu sehen.

Oben rechts sind Teilansichten des Punktenetzes zur Modellierung des Greifwerkzeugs aus verschiedenen Perspektiven über eine RobCAD-Simulation visualisiert. Als helle gelbe und rosafarbene Flächen sind die für die Kameras sichtbaren Oberflächen eingezeichnet. Die vielen blauen Punkte begrenzen den über die in Abschnitt 5.1.2 erläuterte Vorgehensweise bestimmten Unbekannt-Bereich nach oben gegenüber dem darüber liegenden Frei-Bereich, wobei jeder Punkt einer Säule der Szenenrepräsentation zugeordnet ist. Es ist deutlich zu sehen, daß diese blauen Begrenzungspunkte nicht mathematisch genau eine glatte Fläche bilden, sondern verrauscht sind. Dies rührt daher, daß zur Erhöhung der Zuverlässigkeit bei der Aufteilung der Szene in die verschiedenen Bereiche unter anderem verrauschte Tiefenbild-Rohdaten verwendet werden.

In der unteren Reihe von Teilbildern ist zu sehen, wie die Basispunkte in Annäherungsrichtung verschoben werden. Im zweiten Bild ist der Schritt dargestellt, in dem sich gerade noch alle Netzpunkte im Frei-Bereich befinden. Die orangefarben eingezeichneten Netzpunkte in den letzten beiden Teilbildern befinden sich im Unbekannt-Bereich.

Das Ergebnis des Experiments zeigt deutlich, daß das RO bewußt den Unbekannt-Bereich berücksichtigt und das Durchfahren dieses Bereichs ermöglicht. Die Grenze des Unbekannt-Bereichs ist explizit bekannt, so daß der Roboter beim weiteren Durchfahren der Greiftrajektorie gezielt lokale Sensorik zum rechtzeitigen Erkennen möglicher Kollisionen einsetzen kann. Somit kann das realisierte RO unter Verwendung der in dieser Arbeit entwickelten neuen Greifplanungsalgorithmen mit dieser kritischen Situation erfolgreich umgehen, wodurch ein wichtiger Teilaspekt der Zuverlässigkeit garantiert ist.

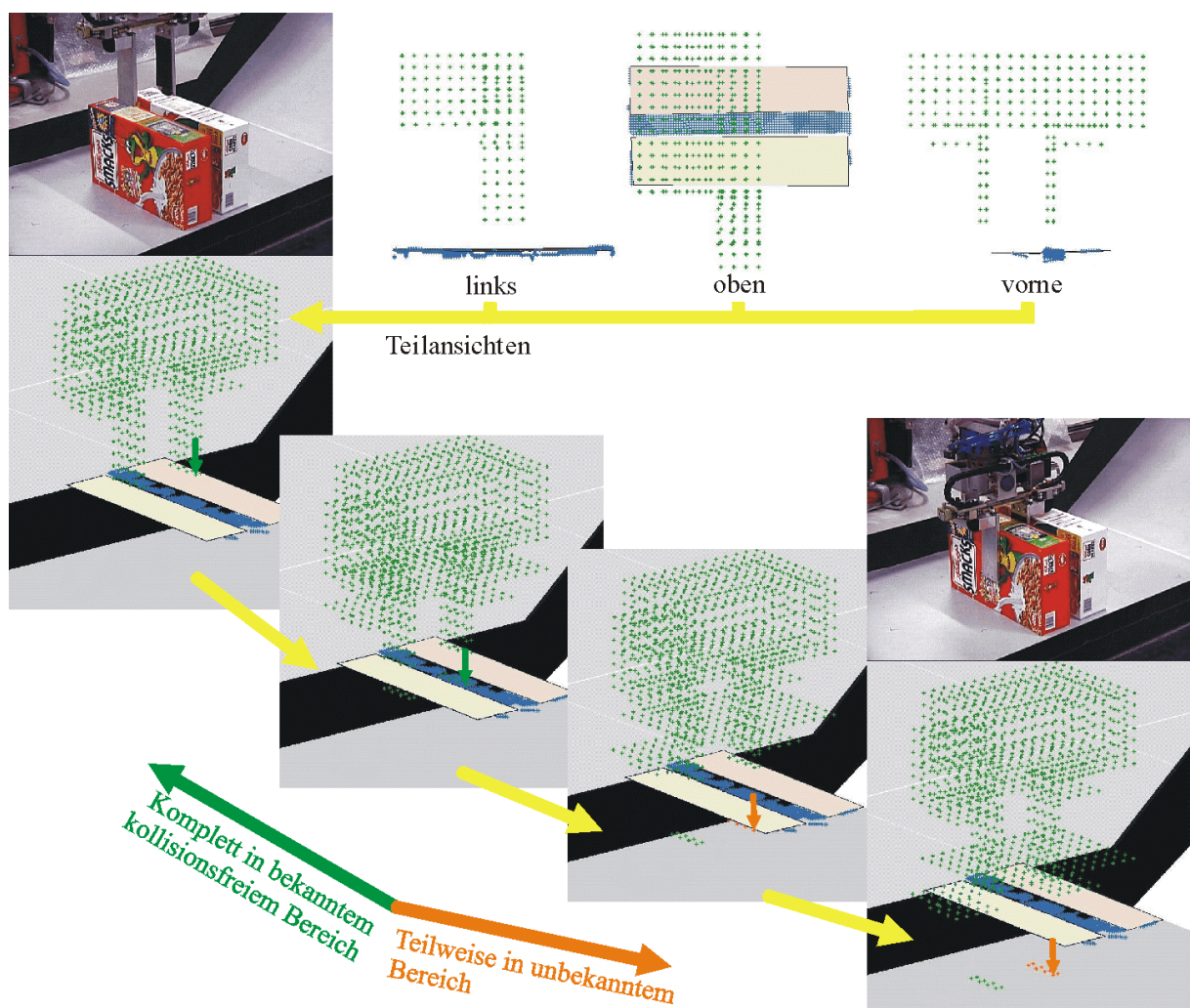


Abbildung 5.7: Überprüfung auf Kollisionen beim Benchmark "Verdeckter Bereich"

5.3.2 Benchmark „Greiferwechsel“

Damit ein RO eine große Vielfalt verschieden gestalteter Objekte greifen kann, sollte es verschiedene Greifwerkzeuge einsetzen können. Allerdings ist die Anzahl erforderlicher zeitintensiver Greiferwechsel möglichst zu minimieren, um die Zykluszeiten kurz zu halten. Abbildung 5.8 zeigt in einer RobCAD-Simulation, wie der Roboter alle Objekte des in

Abschnitt 4.4.2 definierten Benchmarks „Greiferwechsel“ entnehmen kann, wobei jedes Greifwerkzeug nur einmal eingewechselt werden muß^{5,12}.



Abbildung 5.8: Optimierte Auswahl von Griffen und des Greifwerkzeugs beim Benchmark „Greiferwechsel“

Insbesondere bei dem fünften, dem sechsten und dem siebten Griff unter Verwendung des großen Parallel-Backen-Greifers, also dem Greifer mit den vier Fingern, ist deutlich zu sehen, daß bei der Optimierung der Griffauswahl numerische Griffe für die Objektentnahme verwendet werden, deren Greiftrajektorien möglichst schnell durchfahren werden können. Zu allen drei genannten numerischen 2-Finger-Griffen gäbe es nämlich auch ähnliche numerische Griffe, bei denen das jeweils andere Fingerpaar zum Greifen verwendet werden könnte und die Greiftrajektorie somit etwas seitlich versetzt verlief. In allen drei Beispielen müßte sich der Greifer dann allerdings außerhalb des vom Kamerasystem abgescanntes Raums bewegen, welcher als Unbekannt-Raum klassifiziert ist. Die komplette Greiftrajektorie müßte dann langsam mit lokalem Sensoreinsatz durchfahren werden.

^{5,12} In den verschiedenen Teilbildern haben die sichtbaren Oberflächen der gleichen Objekte oftmals verschiedene Farben. Die Farbzuordnung zu den Oberflächen erfolgt bei Ausführung der hier entwickelten Strategien für ein RO der zweiten Generation zufällig. Bei dem hier realisierten RO der zweiten Generation ist es auch nicht beabsichtigt, die in verschiedenen Bildaufnahmen segmentierten Szenenbereichshinweise zu interpretieren, also Objekte zu rekonstruieren, oder eine Zuordnung der aufgrund verschiedener Bilder rekonstruierten Objekte vorzunehmen. Statt dessen soll ja vor jeder Objektentnahme lediglich nach Greifmerkmalen gesucht werden, welche im Rahmen der Greifplanung zu numerischen Griffen führen.

Abbildung 5.9 zeigt eine Photoserie, bei der das RO stur immer das höchste Objekt des Benchmarks „Greiferwechsel“ entnimmt. Dabei sind acht zeitaufwendige Greiferwechsel, also viermal so viele Wechsel wie bei optimierter Greiferauswahl erforderlich.

Die experimentellen Ergebnisse belegen deutlich, daß das Ziel, die Anzahl erforderlicher Greiferwechsel zu minimieren, in wirkungsvoller Art und Weise unter Verwendung der in dieser Arbeit entwickelten Algorithmen reduziert werden kann.

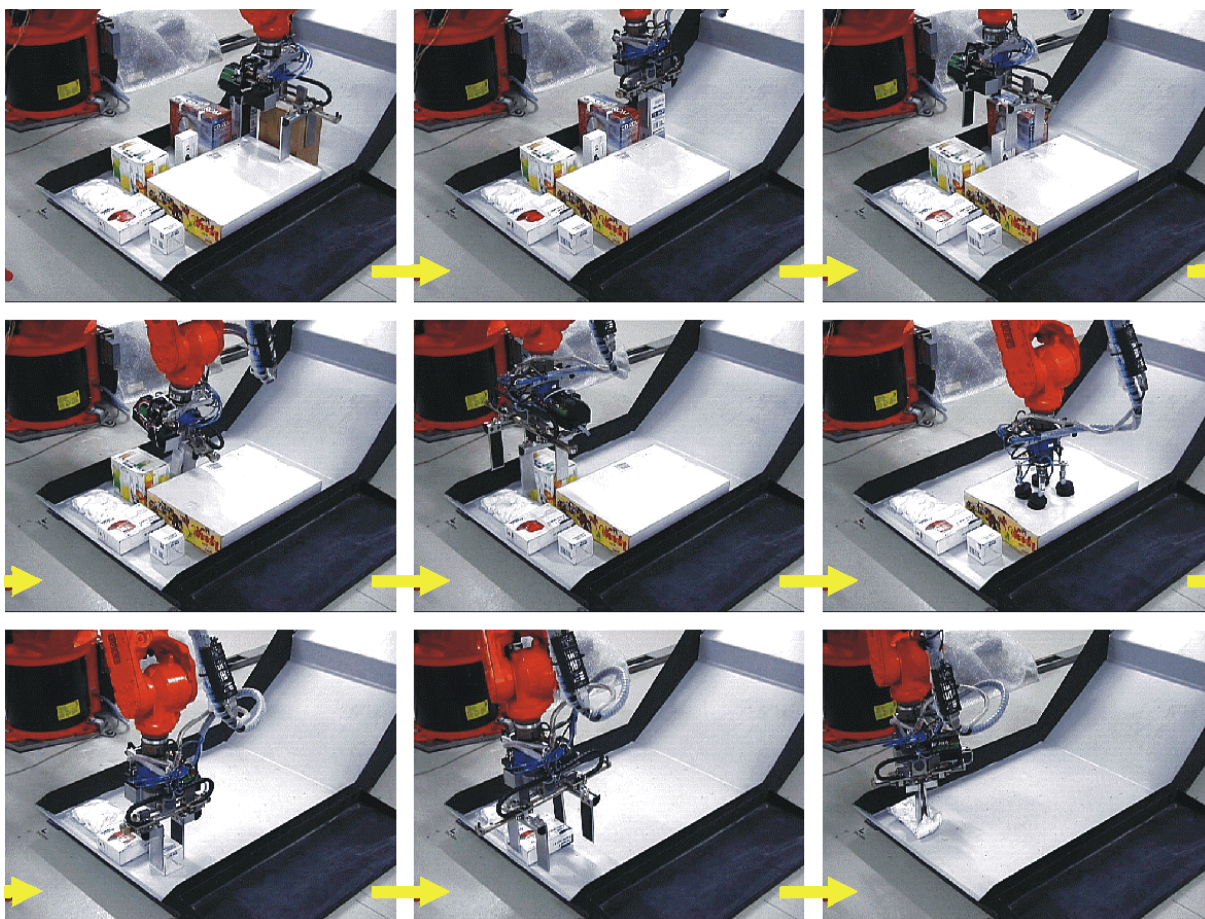


Abbildung 5.9: Entnehmen immer des höchsten Objekts beim Benchmark „Greiferwechsel“

5.3.3 Benchmark „Ungewolltes Mitanheben“

Der in Abschnitt 4.4.3 definierte Benchmark „Ungewolltes Mitanheben“ ist dafür vorgesehen, das Verhalten von ROs in einer kritischen Situation zu überprüfen, welche bisher bei der Objektentnahme aus unstrukturierten Szenen von keinem RO nicht einmal ansatzweise unter Bekämpfung der Ursachen, nicht erst durch „Linderung der Symptome“^{5.13}, erfolgreich gelöst wird. Nicht gegriffene benachbarte Objekte dürfen während einer Objektentnahme nicht mit angehoben werden, um das Herunterfallen und damit verbundene Beschädigungen des ungewollt mit angehobenen Objekts sowie anderer Objekte und der Peripherie zu vermeiden.

^{5.13} Es gibt Ansätze, bei denen der Greifer nach dem Anheben über der Szene schnell in verschiedene Richtungen bewegt bzw. gedreht wird, um versehentlich mitangehobene Objekte abzuwerfen. Solch eine „Linderung der Symptome“ wird hier nicht angezielt. Statt dessen soll das ungewollte Mitanheben direkt zu Beginn erkannt und verhindert werden.

Abbildung 5.10 zeigt eindrucksvoll, daß bei der Objektentnahme mit einem optimiert ausgewählten numerischen Griff ein benachbartes loses Paket mitangehoben, durch die Luft geschleudert wird und hart aufprallt. Das angestrebte Ziel, ungewolltes Mitanheben zu vermeiden, wird mit dem in diesem Kapitel vorgestellten RO also noch nicht erreicht^{5.14}.

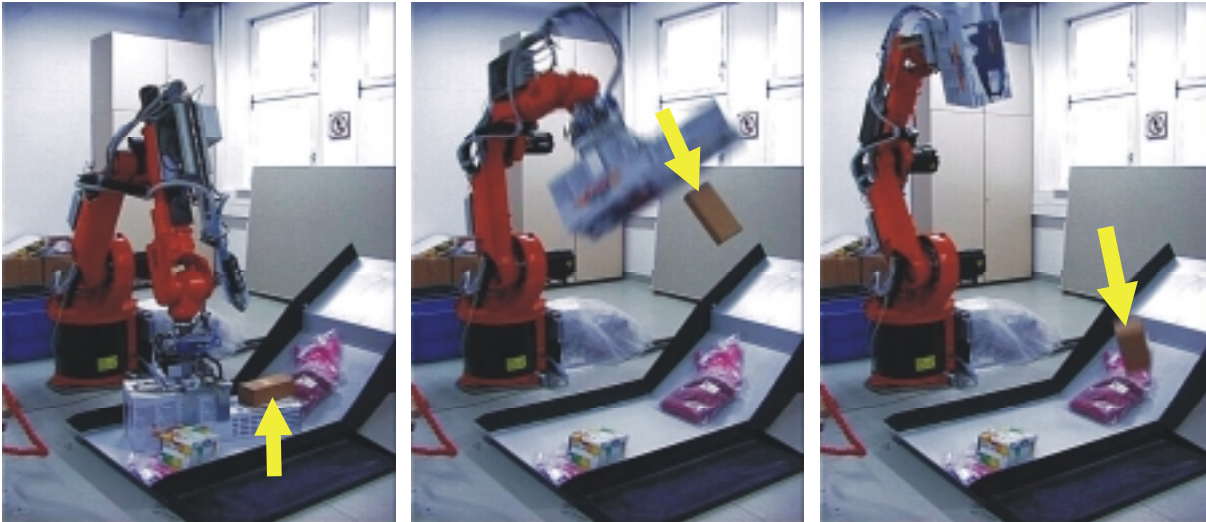


Abbildung 5.10: Unbeabsichtigtes Mitanheben und Herunterfallen eines nicht gegriffenen Objekts beim Benchmark „Ungewolltes Mitanheben“

5.3.4 Demonstrator im realen Versandhandelsumfeld

Das realisierte Robotersystem der zweiten Generation wurde nicht nur mittels der drei in Kapitel 4 definierten Benchmarks getestet, sondern auch einen Monat lang im realen Versandhandelsumfeld eingesetzt.

Dort wird Ware auf Sorterschalen transportiert, deren Barcodes eigentlich von oben sichtbar sein sollten. Wenn ein Barcodelesesystem keinen vollständigen Barcode erkennen kann, dann wird die Ware in eine sogenannte „No-Read“-Rutsche abgekippt. Bisher stehen dort Personen, die überprüfen, ob der Barcode noch lesbar bzw. unzerstört ist und die Ware vielleicht einfach nur verdreht auf dem Sorter lag. In diesem Fall wird die Ware wieder auf den Sorter aufgelegt. Ansonsten wird sie in eine für solche Waren vorgesehene Wanne gelegt. Das in Abbildung 5.11 gezeigte Demonstrator-Robotersystem übernimmt die Teilaufgaben der Objektentnahme und des Ablegens auf den Sorter bzw. in die Wanne.

Beide in Abschnitt 3.1 an den Demonstrator gestellten Teilaufgaben wurden durch das Robotersystem gelöst, nämlich das Entnehmen von Waren von einem ungeordneten Warenhaufen und das anschließende Ablegen auf einen sich bewegenden Sorter bzw. in eine Wanne. Die experimentellen Ergebnisse unterstreichen, daß die neue in diesem Kapitel entwickelte Greifplanung die an sie gestellten Forderungen nach Zuverlässigkeit und großer Vielfalt greifbarer Objekte in besonderem Maße erfüllt. Aus der Tatsache, daß es keine Kollision im Frei-Bereich und auch keine schwere Kollision im Unbekannt-Bereich gab, kann auf den weit ausgereiften Stand der Implementierung und Realisierung geschlossen werden.

^{5.14} Kapitel 6 beschreibt die Entwicklung einer vollkommen neuen Strategie zur zuverlässigen Objektentnahme aus unstrukturierten Szenen, welche es erlaubt, ungewolltes Mitanheben zu erkennen und geeignet darauf zu reagieren.

Allerdings kam es manchmal zum ungewollten Mitanheben loser benachbarter Objekte, welche dann aufgrund der geforderten hohen Bahngeschwindigkeit während der Transportphase zum Barcodescanner bzw. zu den Ablageorten weggeschleudert wurden. Im Versandhandelsumfeld sind deshalb überall Fangnetze montiert.

In Abschnitt 2.3 wurde ein schrittweises Vorgehen zur Problemlösung vorgeschlagen, weshalb das Versagen des realisierten ROs der zweiten Generation beim Vermeiden ungewollten Mitanhebens auch nicht verwunderlich ist. Kapitel 6 beschreibt deshalb die Entwicklung einer vollkommen neuen Strategie zur zuverlässigen Objektentnahme, welche jedoch die in diesem Kapitel entwickelten neuen und erfolgreich getesteten Greifplanungsalgorithmen verwendet.

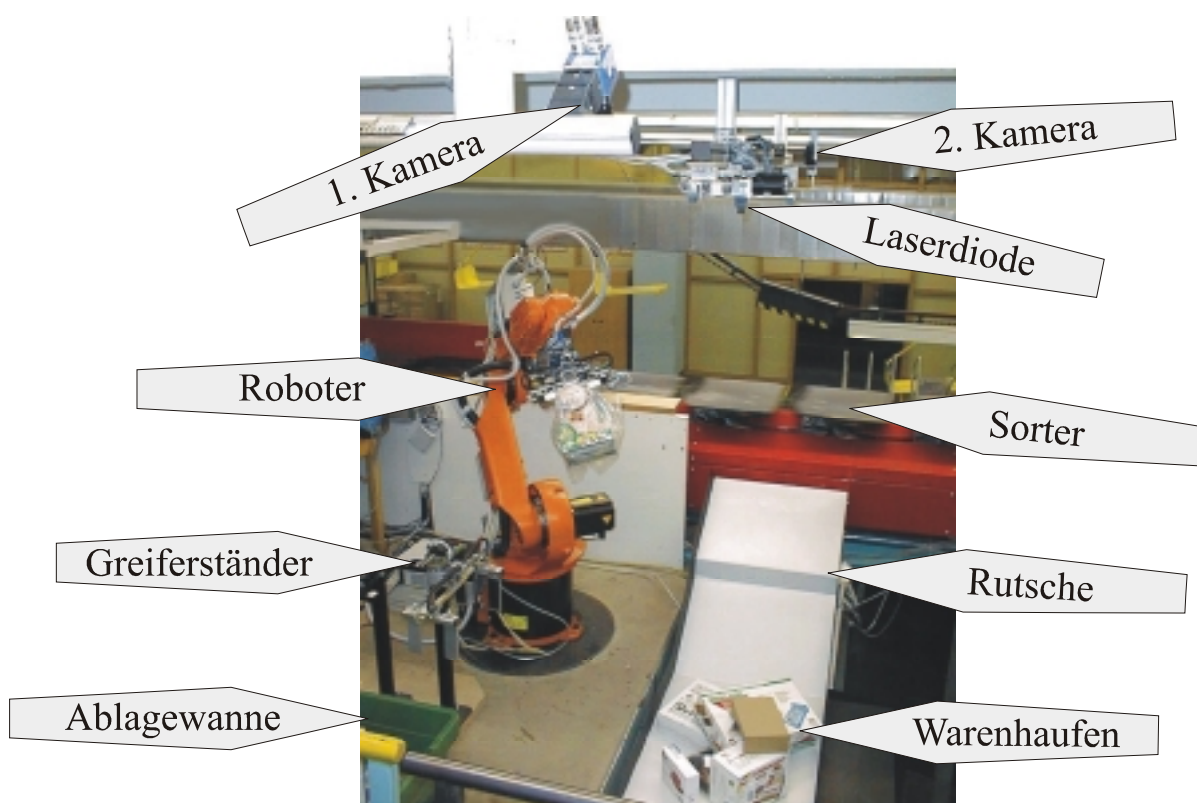


Abbildung 5.11: Demonstratoraufbau im realen Versandhandelsumfeld

5.4 Vergleich mit einem RO der dritten Generation

In Kapitel 4 wurde angegeben, daß institutsintern ein Benchmarking-Zyklus zum Aufdecken der Schwachstellen der jeweiligen Systeme und konstruktiven Verbesserung erfolgreich ausgeführt wurde. In [Rembold 2000] sind die Algorithmen und Systeme eines ROs der dritten Generation beschrieben, welches unter Verwendung der gleichen Hardware mit den drei in Kapitel 4 definierten Benchmarks getestet wurde. In den folgenden Abschnitten werden die experimentellen Ergebnisse dieser Tests beschrieben.

5.4.1 Benchmark „Verdeckter Bereich“

Der Vorteil bei der Realisierung eines ROs der dritten Generation liegt darin, daß in der Literatur bereits zahlreiche Greifplanungsalgorithmen beschrieben sind und somit auch eingesetzt werden können. Dementsprechend werden in [Rembold 2000] im wesentlichen die in [Röhrdanz 98] vorgestellten Greifplanungsalgorithmen verwendet. Modifikationen wurden vorgenommen, um die Algorithmen auch auf konkav geformte Greiferfinger sowie überhaupt für verschiedene Greifer einsetzen zu können. Um trotz des Bedarfs an genauen Objektmodellen doch ein gewisses Maß an Flexibilität zu erreichen, werden die Objekte der Szene als Quader generisch rekonstruiert.

In Abbildung 5.12 sind die so rekonstruierten Quader des Benchmarks „Verdeckter Bereich“ als Drahtmodelle dargestellt. Die eingesetzten Greifplanungsalgorithmen verwenden ausschließlich diese rekonstruierten analytischen Objektmodelle, ein Modell der Roboterzelle inklusive Roboterkinematik sowie Modelle der eingesetzten Greifer. Die Tatsache, daß große Bereiche der Szene für das Kamerasystem überhaupt nicht einsehbar sind, wird bei der Greifplanung nicht berücksichtigt. Der Bereich außerhalb der rekonstruierten Modelle, also auch im Spalt zwischen den beiden Kartons des Benchmarks „Verdeckter Bereich“, wird einheitlich als frei angenommen. Um dennoch eventuelle Kollisionen zu erkennen, wird durchweg bei allen Bewegungen lokale Sensorik eingesetzt, wodurch jedoch alle Roboterbewegungen relativ langsam ausgeführt werden müssen und sich eine relativ lange Zykluszeit ergibt, wenn schwere Kollisionen zuverlässig vermieden werden sollen.

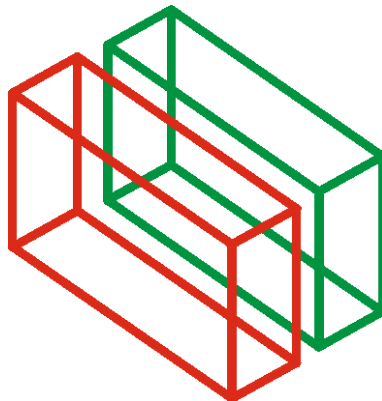


Abbildung 5.12: Durch ein RO der dritten Generation generierte Quader bei der Rekonstruktion des Benchmarks „Verdeckter Bereich“

5.4.2 Benchmark „Greiferwechsel“

Abbildung 5.13 zeigt eine Kurve, welche die erforderliche Rechenzeit für die in dieser Arbeit entwickelte neue Greifplanung in Abhängigkeit der gewählten Auflösung für die Interpolation der Stützpunkte des Greifermodells sowie die Schrittweite bei der Simulation der Annäherungsbewegung angibt. Die Rechenzeiten wurden gemessen bei der Greifplanung für alle drei Greifer und alle Greifarten für die Benchmarkszene „Greiferwechsel“ unter Verwendung einer Silicon Graphics Workstation mit zwei Prozessoren MIPS R12000, 270MHz.

Der steile Anstieg der Rechenzeit bei sehr klein werdender Auflösung rührt von der stark zunehmenden Anzahl erforderlicher Überprüfungen von Greifermodell-Netzpunkten für die Kollisionsvermeidung her. Die Netzpunkte überziehen das Greifermodell zweidimensional.

Mit kleiner werdender Auflösung steigt die Anzahl der Netzkpunkte also etwa quadratisch an. Zusätzlich wirkt sich eine kleiner werdende Auflösung linear durch die kleiner werdende Schrittweite bei der Simulation der Annäherungsbewegung aus. Insgesamt ergibt sich also annäherungsweise eine Funktion dritter Ordnung, d.h. die Rechenzeit verachtfacht sich in etwa bei Halbierung der Auflösung. Wie bereits weiter oben begründet wurde, ergibt sich jedoch keine wesentliche Steigerung der Zuverlässigkeit, wenn die gewählte Auflösung der Interpolation und Schrittweite die Auflösung des Tiefenbilds deutlich unterschreitet. Bei dem in Kapitel 3 beschriebenen und für den Demonstrator eingesetzten Laserscanner beträgt die erreichbare Auflösung ca. 10mm, wodurch sich bei sinnvoller Wahl der Auflösung eine Gesamtrechenzeit für die Greifplanung von etwa einer Sekunde ergibt. Wenn sich weniger Objekte in der Szene befinden, verkürzt sich die Rechenzeit entsprechend. Die in Anhang B skizzierte Tiefenbildauswertung erfordert etwa die gleiche Rechenzeit, wodurch sich ca. zwei Sekunden Gesamtrechenzeit zwischen der Tiefenbildaufnahme und dem Start der Objektentnahme ergeben. Diese Zeit ist auch erforderlich für das Ablegen des entnommenen Objekts. Durch erneute Tiefenbildaufnahme direkt nach der Objektentnahme sowie erneute, parallel zum Ablegen des Objekts ausgeführte Tiefenbildauswertung und Greifplanung kann sich die nächste Objektentnahme verzögerungsfrei an das vorhergehende Ablegen anschließen, wodurch das RO mit der erreichten Rechenzeit praktikabel einsetzbar ist.

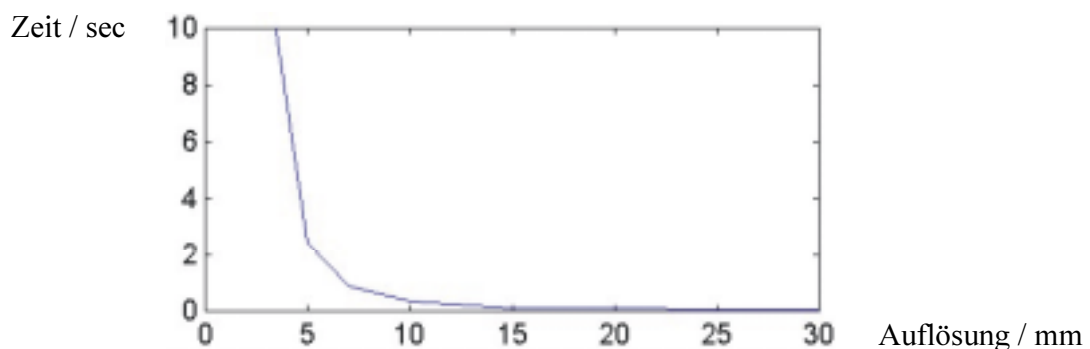


Abbildung 5.13: Erforderliche Rechenzeit der in dieser Arbeit entwickelten Greifplanung in Abhängigkeit der gewählten Auflösung bei der Interpolation der Stützpunkte des Greifermodells und der Annäherungsbewegung

Die hier erreichten Rechenzeiten für die Greifplanung wurden mit den erforderlichen Rechenzeiten für die in [Rembold 2000] vorgestellten Greifplanungsalgorithmen für die jeweils gleiche Szene, für die gleichen Greifwerkzeuge und unter Verwendung der gleichen Rechner verglichen. Als Ergebnis kann festgestellt werden, daß die in dieser Arbeit entwickelten neuen Greifplanungsalgorithmen etwa viermal schneller ausgeführt werden können.

Wie in diesem Kapitel bereits detailliert erläutert, werden in dieser Arbeit vor jeder Objektentnahme numerische Griffe für alle Objekte in der Szene und für alle Greifer und Greifarten berechnet, um den Gesamtablauf möglichst optimieren zu können. Damit die Greifplanung aus [Rembold 2000] etwa genauso schnell wie die hier vorgestellte Greifplanung verläuft, bedeutet dies beispielsweise, daß numerische Griffe nur für weniger Objekte berechnet werden dürfen. Beim Benchmark „Greiferwechsel“ können also nur numerische Griffe für zwei der neun Objekte bestimmt werden, wobei heuristisch die höchsten beiden Objekte für die Greifplanung verwendet werden.

Beim nach [Rembold 2000] optimierten Entnehmen der Objekte aus der in Abbildung 5.14 dargestellten Benchmarkszene „Greiferwechsel“ ergibt sich demnach die im folgenden

beschriebene Entnahmereihenfolge. Zunächst wird Objekt Nr. 1 (O1) mit dem großen Parallel-Backen-Greifer (GG) entnommen. Im nächsten Schritt sind O2 und O3 die höchsten Objekte. Für O3 kann ein numerischer Griff mit dem GG gefunden werden. Nach dem Entnehmen von O3 sind O2 und O4 die beiden höchsten Objekte. Da für beide Objekte jedoch kein numerischer Griff mit dem GG bestimmt werden kann, muß der kleine Parallel-Backen-Greifer (KG) eingewechselt werden und O2 wird entnommen. Anschließend kann O4 mit dem KG entnommen werden. Die nächsthöchsten Objekte O5 und O6 eignen sich beide nicht für den KG, weshalb der GG eingewechselt und O5 entnommen wird. O6 und O7 eignen sich im nächsten Schritt wiederum nicht für den GG, so daß O6 mit dem neu einzuwechselnden Vakuumgreifer (VG) entnommen wird. Die nächsthöchsten Objekte O7 und O8 eignen sich nicht für den VG. Somit wird erneut der KG eingewechselt zum Entnehmen von O7. Mit dem KG kann dann auch O9 entnommen werden. Für das Entnehmen des letzten Objekts in der Szene, nämlich O8, muß jedoch nochmals der GG eingewechselt werden.

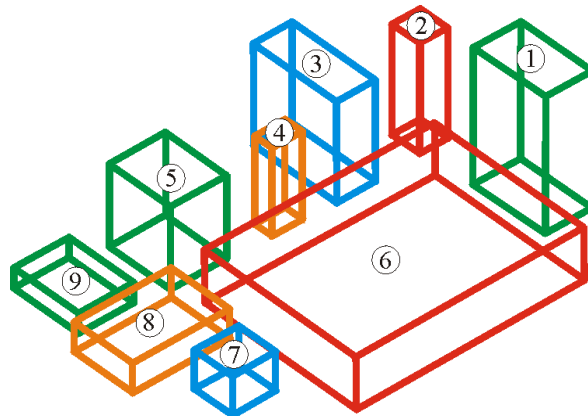


Abbildung 5.14: Durch ein RO der dritten Generation generierte Quader bei der Rekonstruktion des Benchmarks „Greiferwechsel“

Somit sind mit den Algorithmen aus [Rembold 2000] fünf Greiferwechsel erforderlich zum Entnehmen aller Objekte des Benchmarks „Greiferwechsel“. Dieses Ergebnis stellt bereits eine Optimierung gegenüber den acht erforderlichen Greiferwechseln bei sturer Entnahme immer des höchsten Objekts dar. Durch Verwendung der in dieser Arbeit entwickelten neuen Algorithmen kann die Anzahl erforderlicher Greiferwechsel jedoch noch weiter bis auf die Zahl zwei reduziert werden, wie in Abschnitt 5.3.2 gezeigt wurde.

5.4.3 Benchmark „Ungewolltes Mitanheben“

In [Rembold 2000] werden die Objekte in der Szene generisch als Quader rekonstruiert, indem erstens in sichtbare Oberflächen rechteckige Flächen eingepaßt werden und diese Rechteckflächen im Anschluß daran bis zum bekannten Untergrund der Szene rechtwinklig nach unten zu Quadern verlängert werden. Daß diese Rekonstruktion die real vorliegende Szene keinesfalls korrekt nachbildet, ist durch den Vergleich des sich so ergebenden Drahtmodells in Abbildung 5.15 mit einem Photo des Benchmarks „Ungewolltes Mitanheben“ im linken Teilbild der Abbildung 4.6 zu erkennen. Die L-förmige Verpackung wird als zwei getrennte Quader erkannt. Der kleine daraufliegende mit roten Linien berandete Karton durchschneidet sogar das darunterliegende mit orangefarben berandeten Linien dargestellte Teil.

Es lassen sich somit zwar durchaus Griffe planen, welche das Entnehmen von Objekten erlauben. Aber die für ROs der dritten Generation typische Identifikation bzw. Rekonstruktion der Szene mittels analytischer Objektmodelle, welche selbst zeitaufwendig und oftmals fehlerhaft ist und zu einer relativ langen Rechenzeit für die Greifplanung führt, bringt hier gegenüber ROs der zweiten Generation keinerlei Vorteile. Entsprechend kann das in [Rembold 2000] vorgestellte RO das ungewollte Mitaneben loser benachbarter Objekte nicht erkennen oder gar vermeiden, so daß es zur in Abbildung 5.10 gezeigten Situation kommt.

In [Rembold 2000] wird kein Ansatz für die Lösung dieser für die Zuverlässigkeit kritischen Situation vorgeschlagen. Statt dessen liegt dort der weitere Schwerpunkt der Arbeit in der Abbildung der Rechenprozesse auf eine Multi-Agenten-Architektur.

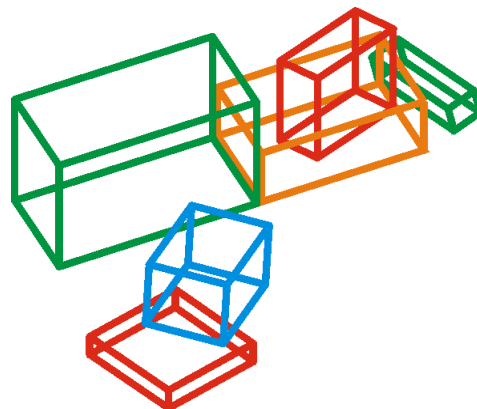


Abbildung 5.15: Durch ein RO der dritten Generation generierte Quader bei der Rekonstruktion des Benchmarks „Ungewolltes Mitaneben“

5.5 Bewertung der experimentellen Ergebnisse

Die experimentellen Ergebnisse zeigen deutlich, daß durch die Entwicklung der neuen Algorithmen zur Greifplanung für ein RO der zweiten Generation die erwarteten Eigenschaften der zuverlässigen Kollisionvermeidung, der Flexibilität hinsichtlich unerwarteter, unbekannter Objekte in der Szene sowie einer optimierten Reduzierung von Greiferwechselforgängen erreicht werden konnten.

Der Vergleich mit einem RO der dritten Generation unterstreicht, daß Strategien von ROs der dritten Generation weder die Zuverlässigkeit, Kollisionen zu vermeiden, noch die Zuverlässigkeit, benachbarte lose Objekte nicht mitanzuheben, erhöhen können, wenn unerwartete Objekte in der Szene auftauchen dürfen, welche nicht in a priori Modelle passen. Durch die künstliche Erzeugung einer analytischen Szenenbeschreibung, welche anschließend in die Greifplanung eingeht, ergeben sich zudem auch noch relativ hohe Rechenzeiten.

Wie bei der Diskussion der weiteren schrittweisen Vorgehensweise in Kapitel 2 erwartet wurde, konnte mit dem realisierten RO der zweiten Generation das ungewollte Mitaneben benachbarter loser Objekte nicht vermieden werden. Aufgrund dessen wird in Kapitel 6 die Entwicklung einer vollkommen neuen Strategie zur zuverlässigen Objektentnahme beschrieben. Die dort beschriebene neue Strategie löst dieses Problem. Dabei werden zur Greifplanung die in diesem Kapitel vorgestellten Greifplanungsalgorithmen eingesetzt, wobei die optimierte Auswahl eines numerischen Griffs entsprechend den Anforderungen der neuen Strategie erweitert wird.

5.6 Zusammenfassung des Kapitels

In diesem Kapitel wurde die Entwicklung neuer Greifplanungsalgorithmen für ein RO der zweiten Generation detailliert beschrieben. Das Besondere an den neuen Algorithmen ist die explizite Bestimmung der Abschnitte der Greiftrajektorie, in denen sich der Greifer im Frei-, Objekt- oder Unbekannt-Bereich befindet. Diese Information ist eine wesentliche Voraussetzung für die optimierte Auswahl des Greifwerkzeugs und des jeweils als nächstes auszuführenden Greifvorgangs für eine Objektentnahme.

Die Aufteilung der Szene in Frei-, Objekt- und Unbekannt-Bereiche erfolgt aufgrund von Bild-Rohdaten und über Bildauswertung segmentierte Szenenbereichshinweise. Die Greifwerkzeuge werden jeweils durch ein Netz von Prüfpunkten approximiert, welches zur Überprüfung auf Kollisionen in einer Simulation schrittweise durch die erforderlichen Abschnitte der Greiftrajektorie bewegt wird. Die Optimierung der Greifwerkzeug- und Griffauswahl für eine Objektentnahme richtet sich nach anwendungsabhängigen Qualitäts- und Zeitkriterien.

In umfangreichen experimentellen Ergebnissen konnte die Erfüllung der an die Entwicklung gestellten Erwartungen in vollem Maße bestätigt werden.

Kapitel 6

Entwicklung einer neuen Strategie zur Objektentnahme: RO der fünften Generation

6.1 Neue Strategie zur Objektentnahme

6.1.1 Zielstellung

Die Ziele bei der Entwicklung einer neuen Strategie zur Objektentnahme orientieren sich an den in Abschnitt 1.3 erläuterten Zielen der Arbeit. In Kapitel 5 beschriebene Experimente zur Objektentnahme aus den in Kapitel 4 eingeführten Benchmarkszenen mit einem RO der zweiten Generation, welches aufgrund der in Abschnitt 2.3 vorgeschlagenen schrittweisen Vorgehensweise entwickelt wurde, haben das bisherige Erreichen folgender Ziele aufgezeigt:

- Die angestrebte Flexibilität des ROs hinsichtlich der **Greifbarkeit auch unerwarteter, a priori unbekannter Objekte** ist dadurch gewährleistet, daß das RO prinzipiell alle Teile innerhalb gewisser Größen- und Massenbereiche greifen kann, welche Greifmerkmale für die zur Verfügung stehenden Greifwerkzeuge aufweisen. Die Objekte müssen also nicht erst identifiziert oder vollständig rekonstruiert werden.
- Zusätzlich ist auch das überwachte Durchfahren unbekannter Bereiche durch einen neuen auf Tiefenbild-Rohdaten aufbauenden Algorithmus ermöglicht, wodurch im allgemeinen eine **Vielzahl verschiedener Griffe** in der Szene möglich sind **ohne Einschränkungen durch a priori unbekannte Objekte**.
- Zur angezielten Zuverlässigkeit des ROs gehört zunächst die **kollisionsvermeidende Greifplanung**, welche durch die Entwicklung neuer Greifplanungsalgorithmen erfolgreich erreicht wurde, wie in Kapitel 5 gezeigt.
- Außerdem gehört zur Zuverlässigkeit für das gegriffene Objekt auch das **Greifen mit möglichst kleinen Kräften und das Erkennen kritischer Situationen** wie das **Verrutschen** des gegriffenen Objekts im Greifer bzw. das **Erkennen unerwarteter Kollisionen** sowie **Verklemmungen**. Dazu werden, wie in Kapitel 3 beschrieben, in dieser Arbeit Kraft-Momenten-Sensoren sowie taktile Sensoren in den Greiferfingern mit entsprechenden Strategien während den Roboterbewegungen eingesetzt.

Die in Kapitel 5 beschriebenen Experimente zeigen jedoch auch deutlich, daß das gesetzte Ziel, **Zuverlässigkeit für Nachbarobjekte** zu gewährleisten, also insbesondere das **ungewollte Mitaneben zu vermeiden** und dabei die **Szenenstabilität nicht wesentlich zu**

beeinträchtigen, durch die bisherigen Entwicklungen noch nicht erreicht werden konnte. Aufgrund der Erfüllung aller anderen gestellten Ziele wird es an dieser Stelle jedoch als sinnvoll erachtet, bei den weiteren in diesem Kapitel beschriebenen Entwicklungen auf dem bisher realisierten System zum Erreichen der Zielstellung aufzubauen.

6.1.2 Lösungskonzept

Das bisher entwickelte RO der zweiten Generation kann das ungewollte Mitaneben losen Nachbarobjekte nicht vermeiden^{6.1}. Um die in Abschnitt 6.1.1 genannten Ziele zu erreichen, wird ein RO der zweiten Generation mit folgender Strategie erweitert:

Eine Objektentnahme muß beim Erkennen des ungewollten Mitanebens loser Objektteile, welche also nicht mit dem gegriffenen Objektteil gemeinsam ein reales Objekt bilden, modifiziert oder abgebrochen werden. Dazu sind während einer Objektentnahme die Szenenbereichshinweise hinsichtlich Bewegung zu überwachen, welche die losen Objektteile beschreiben [Wörn & Müller 2001a].

Eine Modifikation der Entnahmeoperation könnte beispielsweise im kraftgeregelten Umfahren von Hindernissen bestehen. Wenn die Objektentnahme trotzdem abgebrochen werden muß, da lose Nachbarobjekte nach wie vor ungewollt mitangehoben werden, dann kann das RO beispielsweise versuchen, zunächst ein anderes Objekt mit dem bereits montierten Greifer zu entnehmen.

Es liegt jedoch das Problem vor, daß zunächst keineswegs bekannt ist, welche Szenenbereichshinweise Teile des jeweils gleichen Objekts beschreiben. Im allgemeinen werden nämlich keine Szenenbereichshinweise segmentiert, welche alleine ein Objekt beschreiben. Einerseits kann Übersegmentierung auftreten, was bedeutet, daß ein reales Objekt durch mehrere Szenenbereichshinweise beschrieben wird. Andererseits erfolgt auch Untersegmentierung, wenn mehrere reale Objekte gemeinsam durch einen Szenenbereichshinweis beschrieben werden, was beispielsweise passieren kann, wenn zwei gleichhohe ähnliche Kartons direkt nebeneinander liegen.

Bei Übersegmentierung tritt unter der hypothetischen Annahme, daß ein reales Objekt genau durch einen Szenenbereichshinweis beschrieben wird, das Problem auf, daß dann auch tatsächlich nur solche Objekte entnommen werden können. Wenn beispielsweise ein Objekt durch noch mindestens einen weiteren Szenenbereichshinweis beschrieben wird, dann wird dieser zweite Szenenbereichshinweis beim Entnehmen des Objekts zwangsläufig mitbewegt. Wenn dies erkannt und dann auf ungewolltes Mitaneben geschlossen wird, kann das Objekt bei Sichtbarkeit beider Szenenbereichshinweise nicht von der Szene entnommen werden.

Ein Problem der Untersegmentierung ist die eventuelle Planung instabiler Griffe. Wenn beispielsweise zwei ähnliche, direkt nebeneinander liegende Kartons durch nur ein großes

^{6.1} Gemäß dem in Abbildung 2.5 dargestellten Objektentnahmezyklus von ROs der zweiten Generation wird das ausgeprägte Modell insbesondere der Szene im Laufe der Objektentnahmen nicht vervollständigt oder verbessert. Das Modell umfaßt hinsichtlich der Szene beispielsweise ausschließlich ein Zellenmodell, also unter anderem Information über statische Hindernisse im Bereich der Szene. Da keine umfangreiche, aktuelle Ausprägung des Szenenmodells vorhanden ist, können auf keinen Fall mit Sicherheit unproblematische Entnahmereihenfolgen, bzw. sichere Trajektorien für die Entnahme im Anschluß an das Greifen, vor Beginn der Objektentnahme durch Planungen bestimmt werden. Solche Planungen sind bisher nur bei ROs der dritten und vierten Generation möglich [Schmult 92], [Schweikard & Schwarzer 97].

segmentiertes Flächenstück beschrieben werden, dann bietet es sich z.B. für den in Kapitel 3 beschriebenen kleinen Parallel-Backen-Greifer an, die Finger möglichst nah beim geometrischen Schwerpunkt, also mittig, zu plazieren. Dadurch greifen die Finger möglicherweise beide Objekte gleichzeitig an deren Berührungsstelle, so daß die Objekte beim Entnehmen sehr leicht aus dem Greifer rutschen können.

Falls das RO nun Kenntnis darüber hätte, welche Szenenbereichshinweise gemeinsam das zu greifende Objekt beschreiben, jedoch nicht darüber informiert wäre, welche anderen Szenenbereichshinweise jeweils zusammengehören, dann wäre es im Gegensatz zum oben beschriebenen Beispiel zwar möglich, das gegriffene Objekt zu entnehmen. Dazu müßten aber alle anderen Szenenbereichshinweise in der Szene, welche also nicht das gegriffene Objekt beschreiben, auf Bewegung überwacht werden, was einen enormen Sensoreinsatz und damit verbundene Datenauswertung bedeuten würde. Viel wirkungsvoller kann die Überwachung erfolgen, wenn weiterhin bekannt ist, welche der anderen Szenenbereichshinweise jeweils gemeinsam ein reales Objekt beschreiben. Dann würde es nämlich ausreichen, aus jeder Gruppe solcher zusammengehörender Szenenbereichshinweise jeweils nur einen Szenenbereichshinweis hinsichtlich Bewegung zu überwachen.

Damit das RO die hiermit begründete wichtige Information über die Zusammengehörigkeiten der Szenenbereichshinweise gewinnen kann, wird in dieser Arbeit die Ausführung sogenannter „Untersuchungsoperationen“ vorgeschlagen. Im wesentlichen entsprechen solche Untersuchungsoperationen möglichst kleinen, optimiert auszuwählenden Objektverschiebungen durch den Roboter bei gleichzeitiger Beobachtung der segmentierten Szenenbereichshinweise, um die Beziehungen zwischen den durch die Szenenbereichshinweise beschriebenen Objektteilen zu erforschen. Im Unterschied zu den Untersuchungsoperationen wird bei den „Überwachungsoperationen“ während der Objektentnahme lediglich überprüft, ob sich die durch bestimmte segmentierte Szenenbereichshinweise beschriebenen Objektteile bewegen^{6.2}.

Die Forderung nach aktiver Wahrnehmung wurde erstmals in [Bajcsy & Campos 92] formell formuliert. Dort werden Untersuchungsoperationen (engl. Exploratory Tasks) dadurch charakterisiert, daß sie wenig a priori Wissen benötigen, während Überwachungsoperationen (engl. Verification Tasks) lediglich zur Überprüfung eines Zustands bei hoher a priori Information einzusetzen sind.

Abbildung 6.1 zeigt den hier entwickelten neuen Objektentnahmezyklus. Ähnlich dem in Abbildung 2.5 in Variante b) gezeigten Objektentnahmezyklus von ROs der zweiten Generation werden zunächst Szenenbereichshinweise segmentiert. Im Anschluß daran erfolgt jedoch im allgemeinen nicht direkt die Objektentnahme. Statt dessen führt der Roboter zunächst eine Untersuchungsoperation aus, welche zu einem Informationsgewinn über die Zusammengehörigkeiten der segmentierten Szenenbereichshinweise und somit zu einer Verbesserung des ausgeprägten Modells der Szene führt. Die gestrichelte Linie, welche vom Kästchen „Untersuchungsoperation“ zu „Realer Welt-Ausschnitt“ führt, deutet an, daß durch eine Untersuchungsoperation der reale Weltausschnitt etwas modifiziert wird. Auch kann in die Untersuchungsoperation selbst eine erneute Bildaufnahme mit Auswertung integriert sein, worauf detailliert in Abschnitt 6.5.3 eingegangen wird. Aufgrund der im ausgeprägten Szenenmodell vorhandenen Information muß im Anschluß an eine Untersuchungsoperation entschieden werden, ob genug Information über die Szene vorhanden ist für eine zuverlässige Objektentnahme, ob eine erneute Untersuchungsoperation erforderlich ist, oder ob

^{6.2} Eine Überwachungsoperation kann und sollte für die weitere Untersuchung der Szene jedoch auch als Untersuchungsoperation genutzt werden, um den Gesamt Ablauf der Objektentnahme zu optimieren.

beispielsweise überhaupt kein greifbares Objekt in der Szene vorhanden und somit der Entnahmezyklus zu beenden ist.

Dieser Objektentnahmezyklus unterscheidet sich grundlegend von allen in dieser Arbeit bisher vorgestellten Zyklen. Die Ausprägung des Szenenmodells wird zwar im Laufe der Ausführung verbessert. Dazu werden die Szenenbereichshinweise jedoch nicht interpretiert. Somit wird auch das generische Weltausschnitt-Modell nicht für die Verbesserung des ausgeprägten Szenenmodells basierend auf den Szenenbereichshinweisen verwendet. Das Weltausschnitt-Modell wird lediglich bei der Bestimmung von Szenenbereichshinweisen aus den Bildbereichshinweisen verwendet, damit grundsätzlich bekannt ist, nach welchen Arten von Szenenbereichshinweisen, also beispielsweise ebenen Oberflächenstücken oder aber konvex geformten Teilen von Objekten usw., im Bild der Szene gesucht werden soll. Entsprechend ist das mögliche und somit erlaubte Objektspektrum auf die große Vielfalt solcher Objekte ausgedehnt, deren Teile durch segmentierbare Szenenbereichshinweise beschreibbar sind.

Aufgrund der geschilderten grundlegenden Unterschiede zu den bisher eingeführten GROs bilden ROs, welche mit der hier entwickelten neuen Strategie Objekte von Haufen entnehmen, eine neue, nämlich die fünfte GRO.

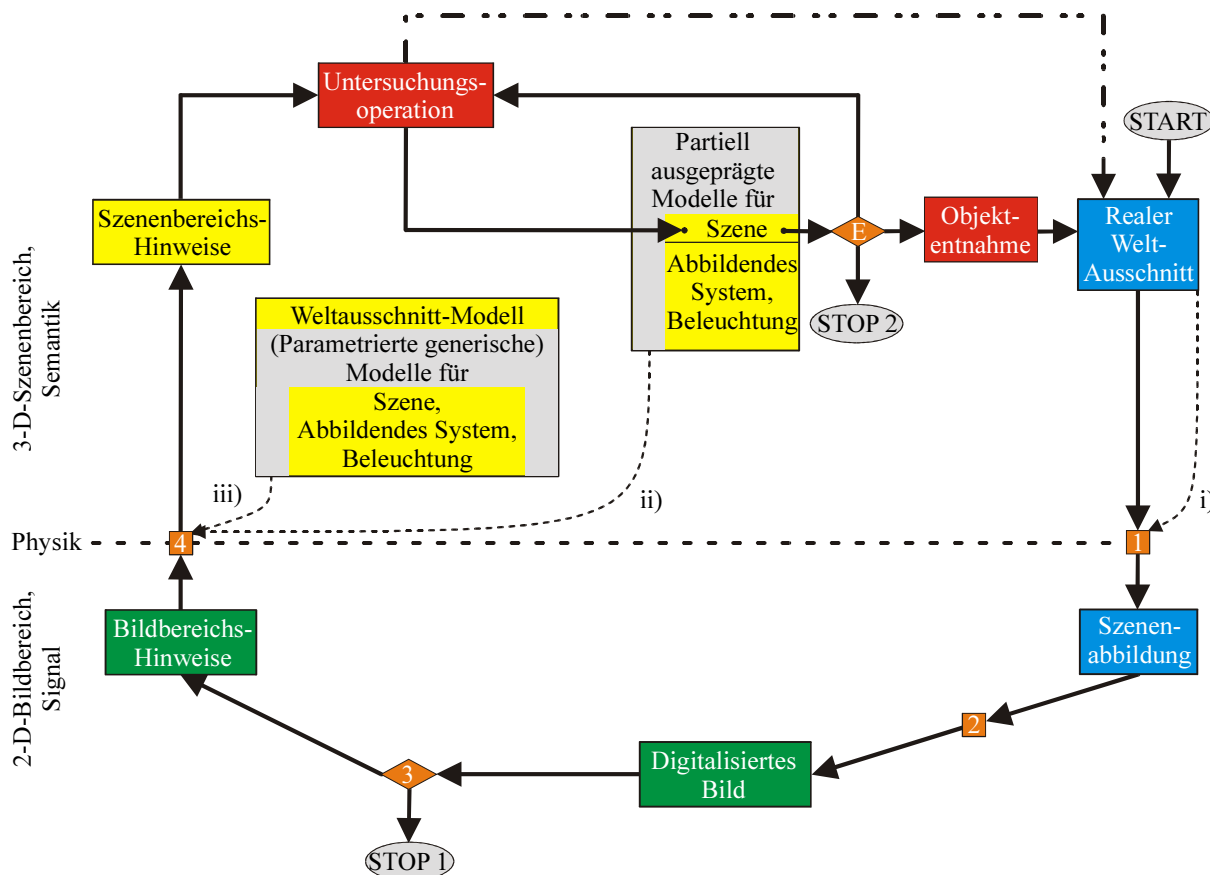


Abbildung 6.1: Objektentnahmezyklus der fünften Generation von ROs

Es soll an dieser Stelle nochmals betont werden, daß nach erfolgreicher zuverlässiger Objektentnahme mit einem RO der fünften Generation das entnommene Objekt dem RO nicht bekannt ist, im Gegensatz zum Einsatz von ROs der dritten oder vierten Generation. Insbesondere ist die Form des Objekts, mit Ausnahme der lokalisierten

Szenenbereichshinweise und Greifmerkmale, unbekannt. Beispielsweise kann das in Kapitel 3 beschriebene Bildauswertesystem ebene Oberflächenstücke als Szenenbereichshinweise segmentieren. Nach der Untersuchungsphase ist bekannt, welche der Szenenbereichshinweise zusammengehören, wodurch die gezielte Überwachung der durch die anderen Szenenbereichshinweise beschriebenen Objektteile auf ungewollte Mitbewegung möglich wird. Die zuverlässige Objektentnahme ist also möglich, ohne daß das RO Kenntnis darüber hat, wie das gegriffene Objekt unterhalb der segmentierten Szenenbereichshinweise geformt ist. Auch ist es möglich, daß zu dem gegriffenen Objekt Teile gehören, welche im aufgenommenen Bild gar nicht sichtbar sind. Wenn diese verdeckten Teile während der Entnahme jedoch die Lagen von zu anderen Objekten gehörenden Szenenbereichshinweisen beeinflussen, dann kann dies sehr wohl durch das RO festgestellt werden.

Die neue Strategie erfordert die Entwicklung eines neuen Weltmodells, welches in Abschnitt 6.2 vorgestellt wird. Es zeigt sich dort, daß die Beziehungen zwischen den Szenenbereichshinweisen wahrscheinlichkeitsbasiert darzustellen sind. Durch die in Abschnitt 6.3 eingeführte Propagation von Information kann erheblich Untersuchungsarbeit gespart werden. Eine große Herausforderung für die erfolgreiche Realisierung eines ROs der fünften Generation besteht in der Entwicklung eines geeigneten Konzepts zur Sensorauswahl und -integration, wozu in Abschnitt 6.4 wesentliche Ansätze aufgezeigt werden. Schließlich wird in Abschnitt 6.5 die Entwicklung eines ROs der fünften Generation beschrieben, woraufhin Abschätzungen zur Wirtschaftlichkeit von ROs der neuen GRO in Abschnitt 6.6 sowie experimentelle Ergebnisse in Abschnitt 6.7 das Kapitel abrunden.

6.1.3 Abstrakte Darstellung der Vorgehensweise

Die mathematische Problemlösung wird durch eine abstrakte Problembeschreibung wesentlich unterstützt, da hierdurch bei mathematischen Herleitungen und Beweisen nicht durch die Semantik von den formal zu lösenden Problemen abgelenkt wird.

Gegeben ist eine Menge A von elementaren Szenenbereichshinweisen (a_1, \dots, a_n) , die mit Hilfe eines Bildauswertesystems segmentiert wurden. Die Szenenbereichshinweise werden in der folgenden abstrakten Darstellung „Primitive“ genannt und stehen untereinander in Beziehung. Sie sind wie die von ihnen beschriebenen Objektteile entweder miteinander verbunden oder aber unverbunden. Diese Verbundenheitsbeziehung ist auf der Menge der Primitive eine Äquivalenzrelation R .

$$(a_j, a_k) \in R \subseteq A \times A \Leftrightarrow a_j \text{ und } a_k \text{ sind miteinander verbunden}$$

Als Symbol dieser Äquivalenzrelation wird in Abbildung 6.2 ein Doppelpfeil „ \leftrightarrow “ verwendet. Die Primitive sind dort als grüne Kreisflächen dargestellt.

Ziel der Untersuchungsoperationen ist es nun, die durch die Äquivalenzrelation „ \leftrightarrow “ bestimmten Äquivalenzklassen zu bestimmen.

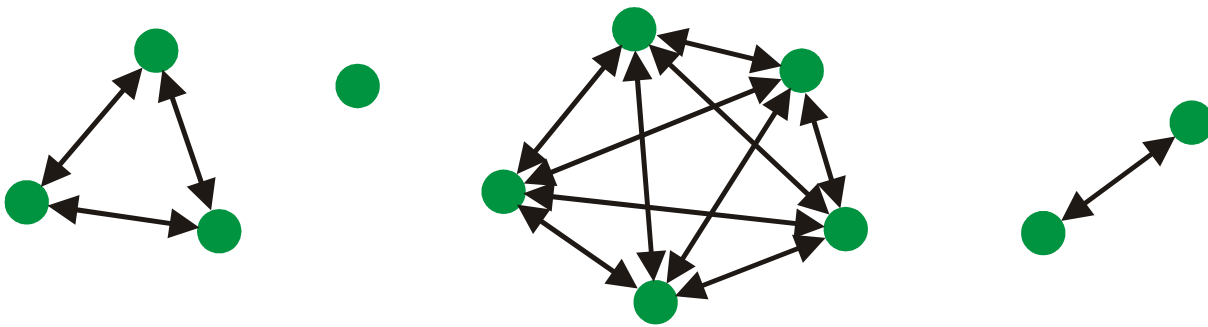


Abbildung 6.2: Primitive, die miteinander verbunden sind, gehören zur selben Äquivalenzklasse

6.2 Weltmodell zur Darstellung von Beziehungen zwischen Primitiven

6.2.1 Beziehungen zwischen Primitiven

Das Modell der Szene wird in der Robotik auch allgemein als Umweltmodell bezeichnet. Gemäß [Dillmann & Huck 91] gibt es drei grundlegende Methoden zur dreidimensionalen geometrischen Modellierung der Umwelt, nämlich die Darstellung dreidimensionaler Körper durch begrenzende Oberflächen (engl. Boundary Representation), die Approximation durch verallgemeinerte Zylinder bzw. Kegel (engl. Generalized Cylinders / Cones) und die Darstellung durch geometrische Grundkörper (engl. Constructive Solid Geometry). Da in dieser Arbeit sichtbare Oberflächenstrukturen als Szenenbereichshinweise verwendet werden, lehnt sich das hier entwickelte Umweltmodell an die Oberflächendarstellung an.

Bei der Oberflächendarstellung wird gewöhnlich versucht, alle Oberflächen, welche ein Objekt beschreiben, zu erfassen und in einem Nachbarschaftsgraphen (engl. Spatial Proximity Graph) darzustellen. In zweierlei Hinsicht unterscheidet sich das in dieser Arbeit entwickelte Umweltmodell von dieser Darstellungsweise. Erstens wird keineswegs versucht, etwa durch geschickt gewählte Kamerablickwinkel alle Oberflächen eines Objekts zu erfassen. Statt dessen werden lediglich die Beziehungen zwischen den bereits segmentierten Szenenbereichshinweisen untersucht. Zweitens geben die Kanten im Nachbarschaftsgraphen lediglich in boolescher Form an, welche Oberflächen sich innerhalb einer vordefinierten Entfernung befinden. Im folgenden wird motiviert und begründet, wie hier im Gegensatz dazu die Beziehungen zwischen den segmentierten Szenenbereichshinweisen darzustellen sind.

Dazu muß man sich die Frage stellen, wie das RO bei einer Untersuchungsoperation die Beziehung zwischen zwei Objektteilen feststellen kann. Wenn beispielsweise der Roboter ein starres Objektteil greift, verschiebt und dabei sicher beobachten kann, daß es sich relativ zu einem anderen starren Objektteil bewegt, dann kann sicher darauf geschlossen werden, daß die beiden Objektteile nicht gemeinsam ein starres Objekt bilden. Wenn sich die beiden Objektteile während dieser Zwangsbewegung jedoch nicht relativ zueinander bewegen, dann darf dadurch noch nicht mit Sicherheit darauf geschlossen werden, daß die beiden Objektteile zusammengehören. Die beiden Teile können nämlich auch lose sein, wobei die gemeinsame Bewegung beispielsweise aufgrund eines Hindernisses oder einfach dadurch zustande kommt, daß das mitbewegte Teil auf dem anderen liegt. Es müßten also theoretisch, je nach Komplexität der Objekte und der Szene, bis zu unendlich viele voneinander unabhängige

Untersuchungsoperationen ausgeführt werden, um mit Sicherheit behaupten zu können, daß zwei starre Objektteile miteinander verbunden sind. Das Ergebnis einer Untersuchungsoperation, bei der sich zwei Teile nicht relativ zueinander bewegen, steigert also lediglich die Wahrscheinlichkeit, daß die beiden Teile zusammengehören. Bei einer anderen Untersuchungsoperation, beispielsweise dem Ziehen bzw. dem Schieben in eine andere Richtung mit einem Griff auf dem anderen Objektteil, kann sich nämlich eventuell zeigen, daß die beiden Teile doch lose, also unverbunden, sind. Unabhängigkeit verschiedener Untersuchungsoperationen ist also dann gegeben, wenn sich die Richtungen und Angriffspunkte von Krafteinwirkungen durch den Roboter sowie eventuell beobachtender oder ebenfalls kraftausübender Sensoren deutlich voneinander unterscheiden.

Diese Schlußfolgerungen sind hervorragend anwendbar auf die Untersuchung von Szenen mit quasi starren Objekten. Sie sind jedoch genauso einsetzbar, wenn sich in der Szene flexible bzw. biegeschlaffe Objekte oder Gegenstände mit Gelenken befinden. In dem Fall müssen lediglich geeignete Untersuchungsoperationen angewendet werden, welche das Untersuchungsergebnis, daß zwei Teile lose sind, mit hoher Sicherheit gewährleisten können. Auf falsche Untersuchungsergebnisse, also beispielsweise die Feststellung, daß zwei Teile lose sind, obwohl sie zusammengehören, wird in Abschnitt 6.4.3 eingegangen.

Da vor Ausführung der Untersuchungsoperationen quasi keine Information über die Beziehungen zwischen den Primitiven, also den Objektteilen, zur Verfügung steht, werden zunächst, also nach der Segmentierung, alle Wahrscheinlichkeiten für die Zusammengehörigkeiten zwischen den Primitiven auf den Wert 0.5 gesetzt. Die Primitive sind dann mit derselben Wahrscheinlichkeit verbunden wie unverbunden. Wenn einmal mit Sicherheit festgestellt wird, daß zwei Primitive lose sind, dann darf die entsprechende Wahrscheinlichkeit für die Zusammengehörigkeit auf den Wert Null herabgesetzt werden. Die Wahrscheinlichkeit für die Zusammengehörigkeit zweier Primitive spiegelt die Sicherheit wider, die im Laufe der Untersuchung über die Zusammengehörigkeit gewonnen wurde. Anders betrachtet ist die Differenz des Wahrscheinlichkeitswerts zu Eins ein Maß für die Restunsicherheit, die bei der Beurteilung der Beziehung zwischen zwei Primitiven noch besteht. Nach jeweils der gleichen Anzahl von ausgeführten voneinander unabhängigen Untersuchungsoperationen ist davon auszugehen, daß sich die Restunsicherheit annähernd auch immer um den gleichen Faktor verringert.

Da es in der Praxis unmöglich ist, unendlich viele Untersuchungsoperationen auszuführen, sollen die beabsichtigten Untersuchungen nach Erreichen eines anwendungsabhängigen Wahrscheinlichkeitsgrenzwertes \tilde{p} , welcher nach m voneinander unabhängigen Untersuchungsoperationen erreicht wird, beendet werden. Dann wird davon ausgegangen, daß die jeweiligen Primitive zusammengehören. Es sei jedoch bereits an dieser Stelle angemerkt, daß bei Untersuchungs- oder Entnahmeoperationen oftmals sozusagen als „Abfallprodukt“ weitere Untersuchungsergebnisse zu erhalten sind, wodurch die Wahrscheinlichkeiten weiter gesteigert werden. Auch kann es durchaus sinnvoll sein, die Wahrscheinlichkeitswerte einiger Beziehungen weiter ansteigen zu lassen, was in Abschnitt 6.3 detailliert ausgeführt wird.

Aufgrund dieser Erläuterungen ergeben sich folgende Voraussetzungen für die Abbildungsfunktion (κ - λ -Funktion) der Anzahl κ ausgeführter, voneinander unabhängiger Untersuchungsoperationen und der zugehörigen Wahrscheinlichkeit λ für die Zusammengehörigkeit:

- $\lambda(\kappa)$ streng monoton wachsend, d. h. $\lambda(\kappa_1) < \lambda(\kappa_2) \quad \forall \kappa_1 < \kappa_2$
- $\lambda(0) = 0.5$

- $\lim_{\kappa \rightarrow \infty} \lambda(\kappa) = 1$
- Mit m Untersuchungsoperationen soll die Grenzwahrscheinlichkeit \tilde{p} erreicht sein, d. h. $\lambda(m) = \tilde{p}$.
- Die Restunsicherheit $1 - \lambda$ soll sich mit jeweils m Untersuchungsoperationen um einen festen Faktor verringern.

Aus diesen Voraussetzungen resultiert folgende κ - λ -Funktion mit dem in Abbildung 6.3 dargestellten Verlauf:

$$\lambda(\kappa) = 1 - \frac{1}{2} [2(1 - \tilde{p})]^{\kappa/m}$$

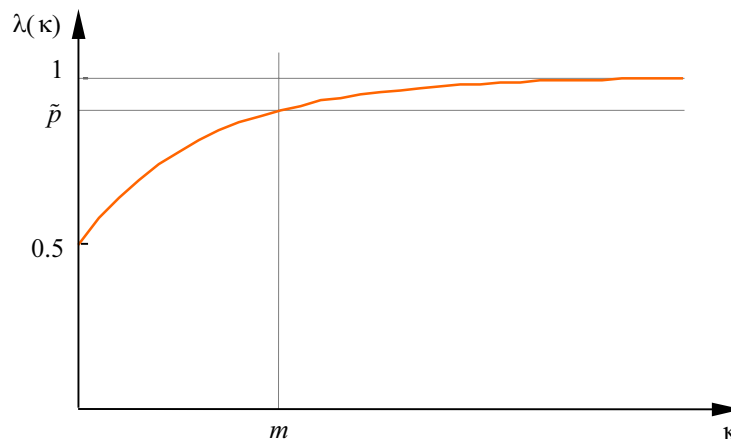


Abbildung 6.3: κ - λ -Funktion

Es stellt sich die Frage, wie die Anzahl m erforderlicher, voneinander unabhängiger Untersuchungsoperationen zu wählen ist, damit auch tatsächlich die Wahrscheinlichkeit \tilde{p} erreicht wird. Neben der Wahrscheinlichkeitsdefinition im Sinne von Glücksspielen, bei der sich Wahrscheinlichkeiten als Grenzwerte von Häufigkeiten bei unendlich großen Stichproben ergeben, werden Wahrscheinlichkeiten in Systemen der Künstlichen Intelligenz auch als Rechengrößen verwendet, deren genauen absoluten Werte nicht die wichtigste Rolle spielen. In [Pearl 94] beispielsweise ist hierzu folgendes Zitat von G. Shafer zu finden: „*Probability is not really about numbers; it is about structure of reasoning*“. In diesem Sinne werden auch in dieser Arbeit Wahrscheinlichkeiten verwendet. Um jedoch nicht im Widerspruch zur exakten Wahrscheinlichkeitsdefinition im Sinne von Zufallsexperimenten zu stehen, wird im folgenden statt dem Begriff „Wahrscheinlichkeit“ der Begriff „Bewertung“ verwendet und als Rechengröße für wahrscheinlichkeitsbasierte Schlußfolgerungen eingesetzt.

Im folgenden wird ein Schema vorgestellt, welches eine sinnvolle Bestimmung der Anzahl m zuläßt, so daß sich bei der Ausführung der darauf basierenden Algorithmen brauchbare Schlußfolgerungen ergeben.

Wenn die Objekte im Mittel sehr komplex geformt sind, oder wenn die Szene sehr voll ist, dann ist die freie Beweglichkeit der Objekte sehr eingeschränkt. In dem Fall müssen zweifelsfrei mehr Untersuchungsoperationen zum Erreichen der gleichen Sicherheit durchgeführt werden als bei sehr einfach geformten Objekten und einer fast leeren Szene. Zur

Beschreibung dieser Einflußgrößen wird ein Komplexitätsgrad \tilde{K} eingeführt mit einer Skala möglicher Werte von Null bis Zehn, $\tilde{K} \in \{0,1,2,\dots,10\}$. $\tilde{K} = 0$ soll bedeuten, daß die Objekte so einfach geformt sind, daß sie praktisch nie versehentlich mitgehoben werden. Beispielsweise könnte es sich dabei um Bälle mit glatter Oberfläche handeln, die von selbst von einem anderen Ball abrollen, wenn sie an diesem an- oder etwas daraufliegen. Weiterhin bedeutet $\tilde{K} = 0$, daß die Szene recht leer ist, also beispielsweise die Bälle lose daliegen. $\tilde{K} = 10$ hingegen beschreibt eine hochkomplexe volle Szene, beispielsweise eine Kiste voller Kronleuchter. Der Wert von \tilde{K} ist je nach Anwendung vom Bediener des ROs anzugeben. Es ist dabei möglich, immer einen hohen Wert für \tilde{K} und somit eine sehr große Objektvielfalt zuzulassen. Allerdings werden dann zum Erreichen des Grenzwertes \tilde{p} der erwarteten Sicherheit, welcher auch vom Bediener anwendungsabhängig anzugeben ist, unnötig viele Untersuchungsoperationen durchgeführt, wenn die mittlere Komplexität sehr viel kleiner ist.

Unabhängig von der Wahl des Grenzwertes \tilde{p} soll hier angenommen werden, daß zum Erreichen einer Restunsicherheit von 5% in Abhängigkeit des Komplexitätsgrades \tilde{K} die Anzahl \tilde{K} unabhängiger Untersuchungsoperationen erforderlich ist. Eine 5%-Schwelle wird auch in anderen Bereichen, wie z.B. in der Regelungstechnik, verwendet. Beispielsweise ist die Übergangszeit eines P-T₁-Gliedes als die Zeit definiert, welche vergeht, bis die Sprungantwort auf 95% des Endwertes angestiegen ist [Föllinger 92].

Um einen sinnvollen Verlauf der Abbildungsfunktion zu gewährleisten, sollen bei Abnahme der Restunsicherheit $1 - \tilde{p}$ um einen bestimmten Faktor möglichst entsprechend um den gleichen Faktor mehr Untersuchungsoperationen erforderlich sein. Diese Randbedingung ist aufgrund einer weiteren wichtigen Randbedingung jedoch nur annäherungsweise einhaltbar.

Der Funktionswert in $\tilde{p} = 0.5$ soll nämlich Null sein, $m(\tilde{p}, \tilde{K}) \Big|_{\tilde{p}=0.5, \tilde{K} \text{ beliebig}} = 0$.

Dadurch ist gewährleistet, daß das RO der fünften Generation in ein RO der zweiten Generation übergeht, wenn das ungewollte Mitaneben nicht überwacht werden soll. Dann liegt der Grenzwert für eine Objektentnahme bei $\tilde{p} = 0.5$, und durch

$m(\tilde{p}, \tilde{K}) \Big|_{\tilde{p}=0.5, \tilde{K} \text{ beliebig}} = 0$ muß dann auch keine Untersuchungsoperation ausgeführt

werden.

Unter Beachtung all dieser Randbedingungen ergibt sich die folgende Abbildungsfunktion mit dem in Abbildung 6.4 für $\tilde{K} = 10$ gezeigten Verlauf:

$$m(\tilde{p}, \tilde{K}) = \left[\frac{\tilde{K}}{18} \cdot \left(\frac{1}{1 - \tilde{p}} - 2 \right) \right]$$

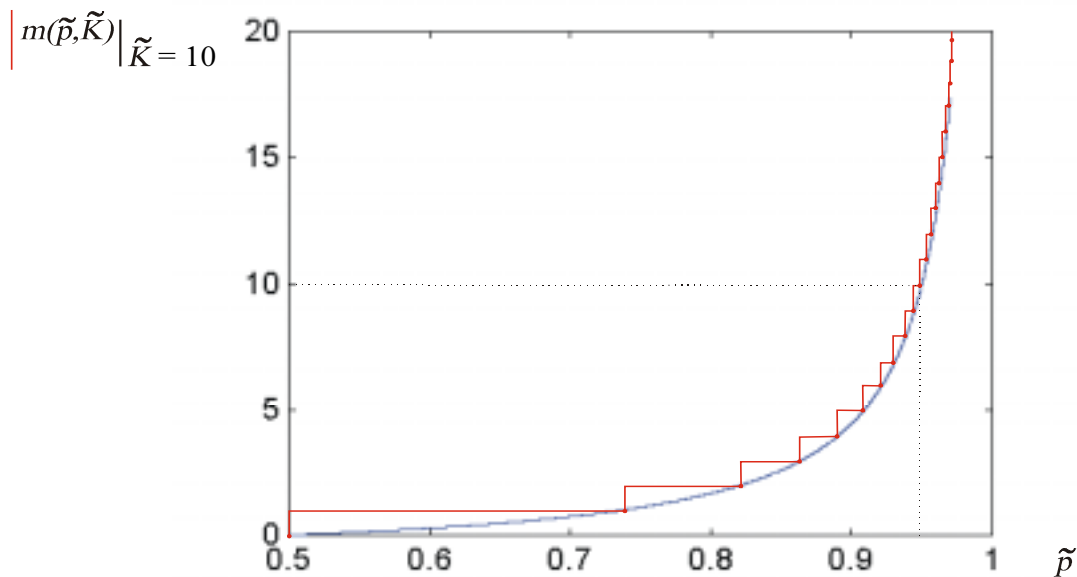


Abbildung 6.4: Funktion $m(\tilde{p}, \tilde{K})$ für $\tilde{K} = 10$

Bisher wurde in diesem Abschnitt die Darstellung der Beziehungen zwischen den Primitiven beschrieben. Die Primitive selbst entsprechen ja den Szenenbereichshinweisen und umfassen somit die Beschreibung des jeweiligen Szenenbereichshinweises, wie beispielsweise die Eckpunkte eines ebenen Flächenstückes im Raum. Unabhängig von der Beschreibung der Primitive und deren gegenseitigen Beziehungen ist der Raum der Szene gemäß den Beschreibungen in Kapitel 5 in Frei-, Unbekannt- und Objekt-Bereiche aufgeteilt, so daß ausgehend von den Greifmerkmalen, welche Teile der segmentierten Szenenbereichshinweise darstellen, zuverlässig Griffe geplant werden können.

Ähnlich der Untersuchung der Beziehungen zwischen den Primitiven können die Primitive selbst hinsichtlich Untersegmentierung untersucht werden, wozu jedem Primitiv eine Bewertung zur Kennzeichnung der Kenntnis über seine Konsistenz zuzuordnen ist. Unter Konsistenz wird dabei verstanden, daß ein Primitiv, also ein Szenenbereichshinweis, nur Teile genau eines realen Objekts beschreibt. In dieser Arbeit werden die Primitive jedoch nicht explizit auf ihre Konsistenz hin untersucht. Vielmehr wird implizit davon ausgegangen, daß im Laufe der Untersuchung der Beziehungen zwischen den Primitiven solche Inkonsistenzen erkannt werden. Insofern ist es bei dem hier gewählten Ansatz günstig, wenn bei der Bildauswertung eher über- statt untersegmentiert wird.

6.2.2 Darstellung in Graphen

Zur Untersuchung der Zusammengehörigkeitsbeziehungen zwischen den einzelnen Primitiven müssen diese mit den darüber gewonnenen Informationen in geeigneter Weise dargestellt werden. In besonderer Weise dafür geeignet ist ein Graph, dessen Knoten die segmentierten Primitive sind, und dessen Kanten die Beziehungen zwischen den Primitiven widerspiegeln.

Die Informationen, die man über die Zusammengehörigkeit der Primitive im Laufe der Untersuchungen gewinnt, lassen sich, wie im vorhergehenden Abschnitt gesehen wurde, in Form von Bewertungen darstellen. Die Bewertung dafür, daß zwei Primitive a_j und a_k miteinander verbunden sind, also zueinander in Relation stehen, manifestiert sich als Bewertung der Kante b_{jk} zwischen den Knoten a_j und a_k . Die Bewertung der Kante b_{jk} wird

in dem Maße erhöht, wie Untersuchungsoperationen die Verbundenheit der Knoten a_j und a_k bestätigen. Als Darstellung der Zusammengehörigkeitsbeziehungen zwischen den selektierten Primitiven erhält man also einen ungerichteten, bewerteten Graphen. In Abbildung 6.5 ist beispielhaft solch ein Graph dargestellt mit Bewertungen der Verbundenheit von drei Primitiven.

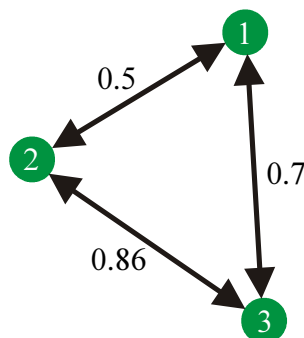


Abbildung 6.5: Darstellung der Beziehungen zwischen Primitiven in Graphen

Ergibt eine Untersuchungsoperation, daß zwei Primitive sicher nicht miteinander verbunden sind, wird die Bewertung der betreffenden Kante auf Null gesetzt und bleibt auf diesem Wert für den Rest der gesamten noch folgenden Untersuchungsoperationen. Diese Kante wird dann nicht mehr angezeigt.

6.2.3 Darstellung in Matrizen

Zur rechnerinternen Speicherung des Graphen werden die Kantenbewertungen, also die Bewertungen, als Matrix dargestellt. Dabei entspricht die Bewertung der Kante b_{jk} zwischen den Knoten a_j und a_k dem Wert des Matrixelementes in Zeile j und Spalte k . Da der Graph nicht gerichtet ist, ist die ihn repräsentierende Matrix $\mathbf{B} = [b_{jk}]_{j=1,\dots,q; k=1,\dots,q}$ symmetrisch.

Abbildung 6.6 zeigt die Matrix \mathbf{B} , welche dem in Abbildung 6.5 dargestellten Zustandsgraphen entspricht. Die Einsen in der Diagonale geben formal an, daß die Primitive mit sich selbst sicher verbunden sind.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0.5 & 0.7 \\ 0.5 & 1 & 0.86 \\ 0.7 & 0.86 & 1 \end{bmatrix}$$

Abbildung 6.6: Matrix \mathbf{B} mit den Kantenbewertungen des ungerichteten Zustandsgraphen in Abbildung 6.5

6.2.4 Gleichmäßigkeit der Untersuchungen

Wie bereits weiter oben beschrieben wurde, müssen sich die Untersuchungsoperationen voneinander unterscheiden, damit Unabhängigkeit gewährleistet ist. Dazu müssen bei den einzelnen Untersuchungsoperationen die Richtungen und Angriffspunkte von

Krafteinwirkungen durch den Roboter und eventuell auch taktilen Sensoren^{6.3} möglichst verschieden gewählt werden. Damit dies möglich ist, wird zu jeder Kante des Untersuchungsgraphen eine Liste mit bisher ausgeführten Untersuchungsoperationen geführt. Bei der Auswahl der Kraftangriffspunkte muß darauf geachtet werden, daß beispielsweise nicht immer das gleiche Primitiv, also Objektteil, gegriffen und verschoben wird. Es soll also nicht „ungleichmäßig“ untersucht werden. Wenn nämlich z.B. ein kleiner Karton auf einem größeren liegt, und immer nur der darunterliegende größere Karton verschoben wird, dann kann im allgemeinen nie festgestellt werden, daß die beiden Teile getrennt sind.

Um somit sicherzustellen, daß bei der Untersuchung der Kante b_{jk} die Untersuchungsoperationen möglichst unabhängig voneinander sind, wird der Untersuchungsgrad κ_{jk} der Kante b_{jk} , also die Anzahl bisher ausgeführter Untersuchungsoperationen, in zwei richtungsabhängige Untersuchungsgrade $\bar{\kappa}_{jk}$ und $\bar{\kappa}_{kj}$ aufgespalten.

Dabei gilt folgendes bei der Untersuchung starrer Objekte:

- Wird das Primitiv a_j durch den Roboter bewegt und das Primitiv a_k gleichförmig mitbewegt, so wird der richtungsabhängige Untersuchungsgrad $\bar{\kappa}_{jk}$ um Eins erhöht.
- Wird das Primitiv a_k durch den Roboter bewegt und das Primitiv a_j gleichförmig mitbewegt, so wird der richtungsabhängige Untersuchungsgrad $\bar{\kappa}_{kj}$ um Eins erhöht.
- Wird ein anderes Primitiv durch den Roboter bewegt und werden beide Primitive a_j und a_k gleichförmig mitbewegt, so werden die richtungsabhängigen Untersuchungsgrade $\bar{\kappa}_{jk}$ und $\bar{\kappa}_{kj}$ um jeweils Einhalb erhöht.
- Aus Symmetriegründen gilt $\bar{\kappa}_{jk} = \bar{\kappa}_{kj}$ und $\bar{\kappa}_{jk} = \bar{\kappa}_{kj}$.

Ähnlich der Matrix \mathbf{B} , welche die Kantenbewertungen angibt, läßt sich eine symmetrische Matrix \mathbf{K} definieren, welche die Untersuchungsgrade, also die Anzahl unabhängiger Untersuchungsoperationen beinhaltet. Die Matrix \mathbf{B} läßt sich dabei aus der Matrix \mathbf{K} durch Anwendung der in Abschnitt 6.2.1 angegebenen κ - λ -Funktion auf jedes einzelne Matrixelement bestimmen.

Um nun die richtungsabhängigen Untersuchungsgrade erfassen zu können, wird hier eine asymmetrische Matrix $\vec{\mathbf{K}}$ eingeführt. Die Matrix ist durch die Diagonale in zwei Dreiecksmatrizen aufgeteilt. Im Unterschied zur symmetrischen Matrix \mathbf{K} enthält die obere Dreiecksmatrix die Kantenbewertungen $\bar{\kappa}_{jk}$, während die untere Dreiecksmatrix die

^{6.3} Zur Untersuchung der Zusammengehörigkeit quasi starrer Objekte kann beispielsweise ein Roboter versuchen, das durch einen Szenenbereichshinweis beschriebene Objektteil etwas zu verschieben. Über taktile Sensoren, welche z.B. über einen zweiten Roboter geeignet zu plazieren sind, kann erkannt werden, ob sich benachbarte Objektteile gleichförmig mitbewegen. Abschnitt 6.4 geht näher auf verschiedene Möglichkeiten der Ausführung von Untersuchungsoperationen ein.

Kantenbewertungen $\bar{\kappa}_{jk}$ enthält^{6.4}. Aus formalen Gründen haben sämtliche Diagonalelemente κ_{jj} den Wert ∞ , denn jedes Primitiv ist, wie bereits erläutert, mit der Bewertung $\lambda_{jj} = 1$ mit sich selbst verbunden, was dem Untersuchungsgrad $\kappa_{jj} = \infty$ entspricht. Abbildung 6.7 zeigt die Struktur der resultierenden asymmetrischen Matrix $\vec{\mathbf{K}}$.

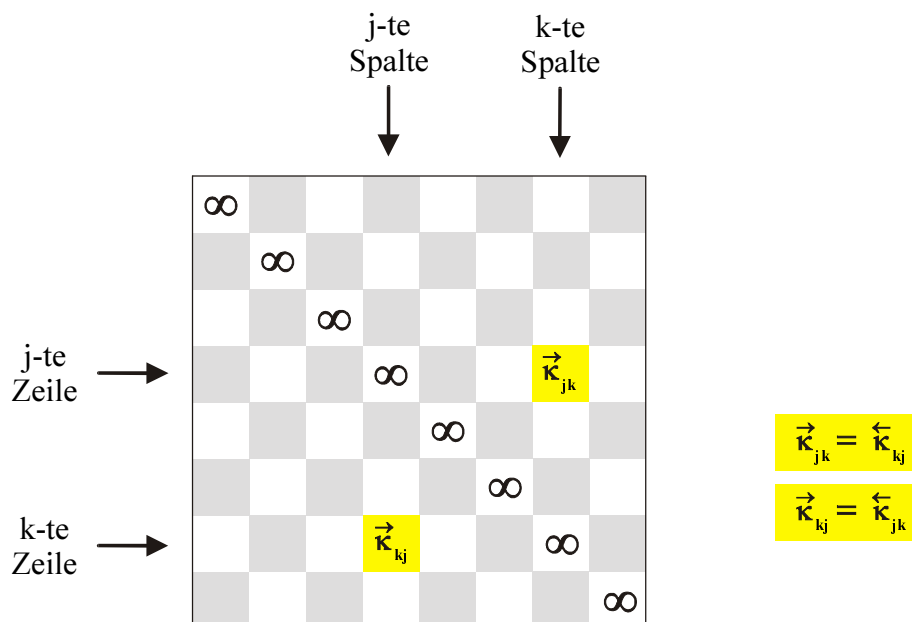


Abbildung 6.7: Struktur der Matrix $\vec{\mathbf{K}}$

Ziel ist die Bestimmung der symmetrischen Matrix \mathbf{K} aus der asymmetrischen Matrix $\vec{\mathbf{K}}$, um daraus die Matrix \mathbf{B} zu bestimmen. Dazu muß für jede Kante aus den richtungsabhängigen Untersuchungsgraden $\bar{\kappa}_{jk}$ und $\bar{\kappa}_{kj}$ jeweils der richtungsunabhängige Gesamtuntersuchungsgrad κ_{jk} bestimmt werden.

Um die Gleichmäßigkeit der Untersuchung einer Kante beurteilen zu können, wird pro Kante b_{jk} eine Variable χ_{jk} eingeführt, die ein Maß für die Ungleichmäßigkeit der Untersuchung ist:

$$\chi_{jk} = \frac{|\bar{\kappa}_{jk} - \bar{\kappa}_{kj}|}{\bar{\kappa}_{jk} + \bar{\kappa}_{kj}} = \frac{|\bar{\kappa}_{jk} - \bar{\kappa}_{kj}|}{\bar{\kappa}_{jk} + \bar{\kappa}_{kj}}$$

O.B.d.A. sei $\bar{\kappa}_{jk} \geq \bar{\kappa}_{kj} \geq 0$ und somit $\bar{\kappa}_{kj} = c \cdot \bar{\kappa}_{jk}$ mit einem $c \in [0,1]$. Damit ergibt sich:

$$\chi_{jk} = \frac{|\bar{\kappa}_{jk} - c \cdot \bar{\kappa}_{jk}|}{\bar{\kappa}_{jk} + c \cdot \bar{\kappa}_{jk}} = \frac{|1 - c|}{1 + c} \quad c \in [0,1] = \frac{1 - c}{1 + c}, \quad \chi_{jk}(c = 0) = 1, \quad \chi_{jk}(c = 1) = 0$$

^{6.4} Bei Verwendung der richtungsabhängigen Untersuchungsgrade $\bar{\kappa}_{jk}$ statt der richtungsabhängigen Untersuchungsgrade $\bar{\kappa}_{jk}$ in der oberen Dreiecksmatrix, bzw. $\bar{\kappa}_{jk}$ statt $\bar{\kappa}_{jk}$ in der unteren Dreiecksmatrix, würde sich eine äquivalente Matrix $\vec{\mathbf{K}} = \vec{\mathbf{K}}^T$ ergeben.

Die ersten beiden Ableitungen nach der Variablen c lauten:

$$\chi'_{jk} = \frac{-(1-c)-(1+c)}{(1+c)^2} = \frac{-2}{(1+c)^2} \quad c \in [0,1] < 0$$

$$\chi''_{jk} = \frac{4}{(1+c)^3} \quad c \in [0,1] > 0$$

Somit verläuft χ_{jk} für c zwischen Null und Eins monoton fallend und konvex gekrümmt. Bei $\chi_{jk} = 1$ liegt die maximal mögliche Ungleichmäßigkeit vor. $\chi_{jk} = 0$ bedeutet exakt gleichmäßige Untersuchung der jeweiligen Kante in beide Richtungen.

Die Bestimmung des richtungsunabhängigen Gesamtuntersuchungsgrads einer Kante wird in zwei Schritten vorgenommen.

- Im ersten Schritt wird die Summe $s_{jk} = \bar{\kappa}_{jk} + \bar{\kappa}_{jk}$ auf einen von dem Ungleichmäßigkeitswert χ_{jk} abhängigen Wert begrenzt, so daß sich ein Wert $s_{jk,begrenzt}$ ergibt. Bei $\chi_{jk} = 1$, also maximal möglicher Ungleichmäßigkeit, wird dieser Begrenzungswert $\beta(\chi_{jk}, m)$ auf $m/2$ gesetzt, also die halbe Anzahl erforderlicher Untersuchungsoperationen zum Erreichen von \tilde{p} . Mit kleiner werdendem χ_{jk} sollte der Begrenzungswert monoton ansteigen bis ∞ bei $\chi_{jk} = 0$, wozu verschiedene Abbildungsfunktionen denkbar sind. Der Wert für χ_{jk} , bei dem $\beta(\chi_{jk}, m)$ den Wert m annimmt, gibt die gerade erlaubte Ungleichmäßigkeit der Untersuchungsoperationen zum Erreichen des Grenzwerts \tilde{p} an.
- Durch die Begrenzung der Summe im ersten Schritt wird erreicht, daß sich bei sehr häufiger, jedoch einseitiger Untersuchung kein sehr hoher Gesamtuntersuchungsgrad ergibt. Wenn jedoch beide richtungsabhängigen Untersuchungsgrade $\bar{\kappa}_{jk}$ bzw. $\bar{\kappa}_{jk}$ bereits höhere Werte als diesen Begrenzungswert erreicht haben, dann muß der in Schritt 1 bestimmte Wert $s_{jk,begrenzt}$ in Schritt 2 auf den kleineren der Werte $\bar{\kappa}_{jk}$ bzw. $\bar{\kappa}_{jk}$ erhöht werden, damit der so resultierende Gesamtuntersuchungsgrad κ_{jk} nicht kleiner ist als die beiden richtungsabhängigen Untersuchungsgrade.

Formal sind die beiden Schritte folgendermaßen beschreibbar:

$$1. \text{ Schritt: } s_{jk,begrenzt} = \min \left(\left(\bar{\kappa}_{jk} + \bar{\kappa}_{jk} \right), \beta(\chi_{jk}, m) \right)$$

$$2. \text{ Schritt: } \kappa_{jk} = \max \left(s_{jk,begrenzt}, \min(\bar{\kappa}_{jk}, \bar{\kappa}_{jk}) \right)$$

6.2.5 Clusterung

Läßt man zur Vereinfachung der graphischen Darstellung die mit Null bewerteten Kanten des Graphen weg, so zerfällt der eigentlich vollständige Graph im Laufe der Untersuchungsoperationen in mehrere Teilgraphen, die im folgenden formal als „Cluster“ bezeichnet werden. Falls alle Untersuchungsoperationen fehlerfrei verlaufen, d.h. keine real

existierende Verbindung fälschlicherweise als lose erkannt wurde, dann sind sämtliche Cluster nach Ausführung aller erforderlichen Untersuchungsoperationen ihrerseits vollständige Graphen, d.h. Graphen mit Kanten zwischen allen Knoten^{6,5}. Durch die Clusterung des Graphen wird die Knotenmenge, also die Menge der segmentierten Primitive, in Teilmengen zerlegt. Diese Teilmengen entsprechen den durch die Relation „ \leftrightarrow “ bestimmten Äquivalenzklassen.

Nach ausreichender Untersuchung der Szene, d.h. wenn die Bewertungen aller Kanten entweder Null oder größer als \tilde{p} sind, kann mit der Sicherheit \tilde{p} davon ausgegangen werden, daß jeweils genau die Primitive einer Äquivalenzklasse Teile genau eines realen Objekts beschreiben. Das Ziel ist, alle Primitive der Szene in Cluster aufzuteilen, so daß bei der Überwachung der Objektentnahme nur jeweils ein Primitiv jedes Clusters auf ungewollte Bewegung überwacht werden muß.

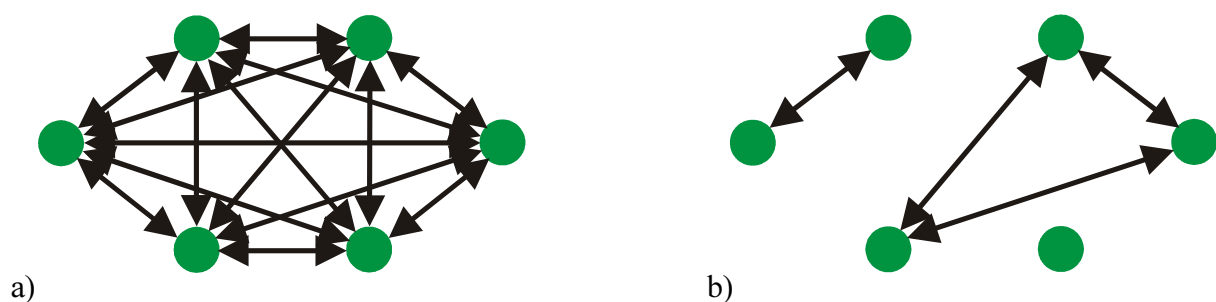


Abbildung 6.8:

- a) Zu Beginn der Untersuchung sind sämtliche Kanten mit 0.5 bewertet.
 b) Die Cluster nach den Untersuchungen entsprechen den gesuchten Äquivalenzklassen

Beim erstmaligen Erstellen der Matrizen \mathbf{B} , \mathbf{K} bzw. $\vec{\mathbf{K}}$ werden die Primitive zufällig durchnummeriert und den Spalten bzw. Zeilen in den Matrizen zugeordnet. Es stellt sich die Frage, wie aus den Matrizen die Cluster bestimmt werden können.

Nach vollständiger Untersuchung der Szene, d.h. insbesondere nach Aufdeckung aller losen Beziehungen, welche sich jeweils durch den Wert Null in den Matrizen manifestieren, ist es möglich, die Spalten und Zeilen in den Matrizen derart zu vertauschen, daß alle Matrixelemente mit Kantenbewertungen bzw. -untersuchungsgraden jeweils einer Äquivalenzklasse einen quadratischen Block bilden, der keine Zellen mit dem Wert Null enthält, dessen Mittelpunkt auf der Diagonalen der Matrix liegt und der sich mit keinem anderen solchen Block überschneidet. Dazu muß in der ungeordneten Matrix jeweils nach Spalten bzw. Zeilen gesucht werden, welche das gleiche Muster von Zellen mit entweder dem Wert Null oder einem Wert größer Null aufweisen. Abbildung 6.9 zeigt ein Beispiel, in dem drei Cluster gefunden werden können mit der jeweiligen Primitivanzahl Vier, Drei bzw. Eins. Das Cluster mit den vier Elementen ist in der ungeordneten links dargestellten Matrix mit dem Zeilenmuster 1-3-4-6 charakterisiert.

Bei einer Untersuchungsoperation läßt sich beispielsweise ein starres Objekt relativ zu allen anderen Objekten bewegen. In dem Fall können alle losen Beziehungen der dieses Objekt beschreibenden Primitive zu allen anderen Primitiven in der Szene nur dann in dieser einen Untersuchungsoperation aufgedeckt werden, wenn es möglich ist, mit Sensoren die relativen

^{6,5} Durch diese Eigenschaft können fehlerhafte Untersuchungsoperationen im allgemeinen erkannt werden.

Lagen aller losen Objektteile zum bewegten Objektteil zu beobachten. Nur die Bewertungen zu den beobachteten losen Beziehungen dürfen dann auf Null gesetzt werden. Wenn sich eine Untersuchungsoperation beispielsweise nur auf die Beziehung zwischen zwei oder wenigen Primitiven konzentriert und dabei alle anderen Beziehungen nicht untersucht werden^{6,6}, dann kann es in diesem einen Untersuchungsschritt zu einer unvollständigen Untersuchung kommen. Das führt beispielsweise zu der Erkenntnis, daß einige Primitive nicht zusammengehören und somit in verschiedene Cluster fallen müssen, daß jedoch gleichzeitig noch Primitive vorhanden sind, von denen noch nicht bekannt ist, zu welchem dieser Cluster sie gehören.

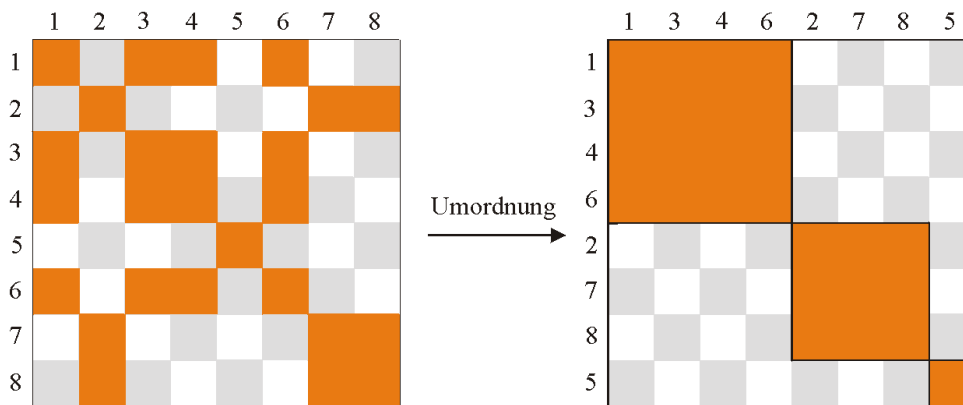


Abbildung 6.9: Matrixumordnung nach vollständiger Untersuchung
 → Orangefarbene Zellen: Bewertungen > Null
 → Alle anderen Zellen: Bewertung Null

Das Ziel ist, wie bereits erläutert, alle Primitive der Szene in Cluster aufzuteilen. Deshalb muß nach jeder Untersuchungsoperation bestimmt werden, welche Primitive noch nicht eindeutig einem Cluster zugeordnet sind. Hierzu werden nach jeder Untersuchungsoperation in der aktuellen, ungeordneten Matrix **B** alle Zeilen bzw. Spalten mit gleichem Muster bestimmt. Im Gegensatz zu obiger Beschreibung, welche sich auf den Zustand nach vollständiger Untersuchung bezieht, ergeben sich hier nun bei Gruppierung der Primitive mit gleichem Zeilen- bzw. Spaltenmuster im allgemeinen keine Äquivalenzklassen, sondern sogenannte Vollständigkeitsbereiche, welche einige Primitive noch gemeinsam beinhalten können. Es kann also noch ungeklärte Beziehungen zwischen den Primitive einzelner Vollständigkeitsbereiche geben.

Im Beispiel in Abbildung 6.10 ergeben sich fünf Vollständigkeitsbereiche, welche durch Punkte mit verschiedenen Farben markiert sind. Die Vollständigkeitsbereiche umfassen in diesem Beispiel jeweils die Primitive mit den Nummern {1,2,3,4,6,7}, {1,2,7,8}, {1,3,4,6}, {2,7,8} und {5}. Der letzte Vollständigkeitsbereich mit dem Primitiv Nr. 5 bildet bereits einen quadratischen Block gemäß obiger Forderung und bildet somit bereits eine Äquivalenzklasse.

Im Gegensatz zum Umordnungsergebnis bei vollständiger Untersuchung gibt es bei unvollständiger Untersuchung zahlreiche Primitive, welche mehreren

^{6,6} Manche Beziehungen sind möglicherweise aufgrund von visuellen Verdeckungen nicht beobachtbar. Beim Einsatz von Kraftsensoren zur Untersuchung der Beziehung zwischen Objektteilen beschränkt sich die Untersuchung im allgemeinen ohnehin auf eine oder wenige Beziehungen. In Abschnitt 6.4 wird näher auf verschiedene Arten von Untersuchungsoperationen eingegangen.

Vollständigkeitsbereichen angehören. Die als nächstes auszuführende Untersuchungsoperation sollte Beziehungen zu den Primitiven aus dem Bereich mit den im Verhältnis zur Größe des Bereichs meisten Überschneidungen untersuchen. Dort liegen nämlich die meisten noch nicht klar zugeordneten Primitive vor. Somit kann dort mit hoher Wahrscheinlichkeit eine bisher noch nicht erkannte lose Beziehung gefunden werden. Im Beispiel in Abbildung 6.10 ist das der blau markierte Bereich mit den Primitiven {1,2,3,4,6,7}.

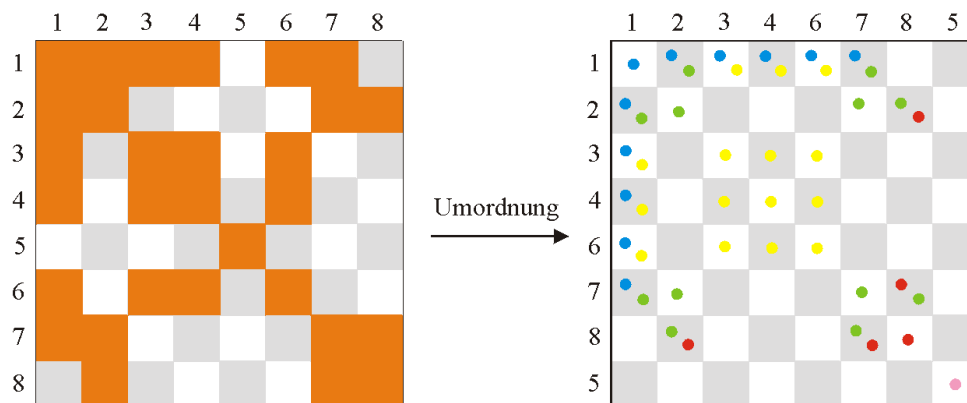


Abbildung 6.10: Matrixumordnung nach jeder Untersuchungsoperation
Matrix vor der Umordnung:

- Orangefarbene Zellen: Bewertungen $>$ Null
- Alle anderen Zellen: Bewertung Null

Matrix nach der Umordnung:

- Alle Kanten (in der Matrixdarstellung also alle Zellen) jeweils eines Vollständigkeitsbereichs sind mit der gleichen Farbe markiert.
- Alle nicht markierten Kanten: Bewertung Null

6.3 Propagation von Bewertungen

Unter Verwendung der in den vorhergehenden Abschnitten erläuterten Vorgehensweise ist es prinzipiell möglich, die Szene zu untersuchen und zuverlässig Objekte bei Überwachung auf ungewolltes Mitanheben zu entnehmen. Allerdings können dazu relativ viele Untersuchungsoperationen erforderlich sein, deren Anzahl hinsichtlich einer schnellen Entnahme aller Objekte in der Szene möglichst zu minimieren ist.

Wenn ein Kantenzug, also eine Folge von Kanten, in der graphischen Darstellung bereits durchweg eine hohe Bewertung hat, dann kann man darauf schließen, daß auch das erste und das letzte Primitiv des Kantenzuges mit hoher Wahrscheinlichkeit verbunden sind. Somit kann dann auch die Kante zwischen dem ersten und dem letzten Primitiv des Kantenzuges relativ hoch bewertet werden, ohne mit dem Roboter explizit Untersuchungsoperationen für diese Kante durchzuführen. Das Verbreiten von Information durch ein Netzwerk wird allgemein „Propagieren“ genannt [Pearl 94]. Das Ziel des Propagierens von Bewertungen in dieser Arbeit ist also, zeitintensive Untersuchungsoperationen einzusparen. Beim Propagieren von Bewertungen muß generell der Unabhängigkeit der verwendeten Bewertungen besondere Beachtung geschenkt werden. Deshalb werden hier zur Propagation nur Kantenbewertungen

verwendet, welche aufgrund voneinander unabhängiger Untersuchungsoperationen bestimmt wurden [Müller et al. 2000].

Abbildung 6.11 zeigt ein Beispiel, in dem zwei Kanten mit dem Roboter untersucht werden, während die Bewertung der gestrichelt eingezeichneten Kante propagiert wird. Bei Propagation über zwei Kanten hinweg wird in dieser Arbeit von „Diagonalpropagation“^{6.7}, bei Propagation über drei Kanten hinweg von „Triagonalpropagation“^{6.8} gesprochen.

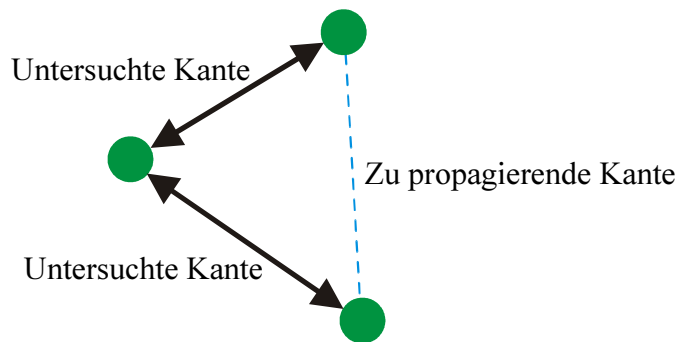


Abbildung 6.11: Diagonalpropagation über zwei Kanten

6.3.1 Konstruktion des Propagationsoperators

Für die Diagonalpropagation sind an den Propagationsoperator „ \otimes “ folgende Bedingungen zu stellen:

- Das Ergebnis der Propagation, also die Bewertung der propagierten Kante, muß zwischen Null und Eins liegen.
 $a \otimes b \in [0,1] \quad \forall a, b \in [0,1]$
- Die Propagation über zwei indefinite, d.h. noch nicht untersuchte Kanten, also Kanten mit der Bewertung 0.5, ergibt wiederum eine indefinite Kantenbewertung.
 $0.5 \otimes 0.5 = 0.5$
- Wenn die propagierenden Kanten, also die für die Propagation verwendeten Kanten, nicht mit Null bewertet sind, soll der Wert der propagierten Kante zwischen 0.5 und der kleineren der propagierenden Kanten liegen.
 $0.5 \leq a \otimes b < \min(a,b) \quad \forall a, b \in [0.5, 1)$

Unter diesen Randbedingungen läßt sich folgender Propagationsoperator konstruieren:

$$a \otimes b := 2(a - \frac{1}{2})(b - \frac{1}{2}) + \frac{1}{2}$$

^{6.7} Der Begriff „Diagonalpropagation“ ist von der grafischen Darstellung abgeleitet, bei der die Bewertung der Kante propagiert wird, welche den Anfangs- und den Endpunkt eines Zwei-Kanten-Zuges diagonal verbindet.

^{6.8} Analog zum Begriff „Diagonalpropagation“ wird die Propagation über drei Kanten hinweg als „Triagonalpropagation“ bezeichnet.

6.3.2 Verallgemeinerung auf Propagation über längere Kantenzüge

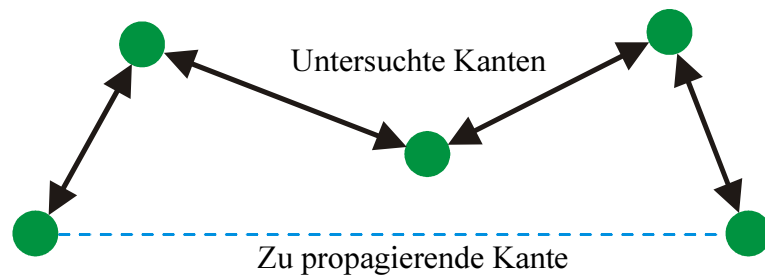


Abbildung 6.12: Propagation über mehr als zwei Kanten

Bei q verketteten Kanten, o.B.d.A. durchnummeriert von 1 bis q , mit den zugehörigen Kantenbewertungen b_1 bis b_q , ergibt sich aus dem Propagationsoperator für die Diagonalpropagation folgender verallgemeinerter Propagationsoperator:

$$b_1 \otimes b_2 \otimes \dots \otimes b_q := 2^{q-1} \prod_{j=1}^q (b_j - \frac{1}{2}) + \frac{1}{2}$$

6.3.3 Eigenschaften des Propagationsoperators

In diesem Abschnitt werden einige wesentliche Eigenschaften des Propagationsoperators aufgeführt und begründet, welche für folgende Herleitungen in diesem Kapitel eingesetzt werden.

Kommutativität

Kommutativität ist nur für die Bewertungen von Zwei-Kanten-Zügen sinnvoll, da die Vertauschung zweier benachbarter Kanten in Mehr-Kanten-Zügen zu einem unsinnigen Kantenzug führen würde.

Die Kommutativität ist hier trivial nachzuweisen aufgrund der Kommutativität der gewöhnlichen Multiplikation.

$$\begin{aligned} a \otimes b &= 2 \cdot (a - \frac{1}{2})(b - \frac{1}{2}) + \frac{1}{2} \\ &= 2 \cdot (b - \frac{1}{2})(a - \frac{1}{2}) + \frac{1}{2} = b \otimes a \end{aligned}$$

Assoziativität

Eine beliebige Klammerung zweier benachbarter Kanten ist möglich. Eine andere Klammerung ist ähnlich wie bei der Kommutativität semantisch nicht sinnvoll.

Beweis:

Es wird gezeigt, daß sich zwei beliebige benachbarte Kanten eines Kantenzuges klammern, sich also durch ihre Diagonale ersetzen lassen. Auf den auf solche Art und Weise um eine Kante verkürzten Kantenzug läßt sich dieses Verfahren wieder anwenden, usw.

Induktionsanfang:

Die Propagation über einen Drei-Kanten-Zug läßt sich beliebig klammern.

$$\begin{aligned}
 b_1 \otimes b_2 \otimes b_3 &= 4 \cdot (b_1 - \frac{1}{2})(b_2 - \frac{1}{2})(b_3 - \frac{1}{2}) + \frac{1}{2} \\
 &= (b_1 - \frac{1}{2}) \cdot 2 \cdot (b_2 - \frac{1}{2}) \cdot 2 \cdot (b_3 - \frac{1}{2}) + \frac{1}{2} \\
 &= [(b_1 - \frac{1}{2}) \cdot 2 \cdot (b_2 - \frac{1}{2}) + \frac{1}{2} - \frac{1}{2}] \cdot 2 \cdot (b_3 - \frac{1}{2}) + \frac{1}{2} \\
 &= [(b_1 \otimes b_2) - \frac{1}{2}] \cdot 2 \cdot (b_3 - \frac{1}{2}) + \frac{1}{2} \\
 &= (b_1 \otimes b_2) \otimes b_3
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{bzw.} \quad &= (b_1 - \frac{1}{2}) \cdot 2 \cdot [(b_2 - \frac{1}{2}) \cdot 2 \cdot (b_3 - \frac{1}{2}) + \frac{1}{2} - \frac{1}{2}] + \frac{1}{2} \\
 &= (b_1 - \frac{1}{2}) \cdot 2 \cdot [(b_2 \otimes b_3) - \frac{1}{2}] + \frac{1}{2} \\
 &= b_1 \otimes (b_2 \otimes b_3)
 \end{aligned}$$

Induktionsvoraussetzung:

Ein Kantenzug aus $q-1$ Kanten läßt sich beliebig klammern.

Induktionsbehauptung:

Ein Kantenzug aus q Kanten läßt sich beliebig klammern.

Induktionsbeweis:

$$\begin{aligned}
 b_1 \otimes b_2 \otimes \dots \otimes b_q &= 2^{q-1} \prod_{j=1}^q (b_j - \frac{1}{2}) + \frac{1}{2} \\
 &= [(b_1 - \frac{1}{2}) \cdot 2 \cdot (b_2 - \frac{1}{2}) \cdot 2 \cdot \dots \cdot \underbrace{(b_j - \frac{1}{2}) \cdot 2 \cdot (b_{j+1} - \frac{1}{2}) \cdot \dots}_{= (b_j - \frac{1}{2}) \cdot 2 \cdot (b_{j+1} - \frac{1}{2}) + \frac{1}{2} - \frac{1}{2}} \cdot 2 \cdot (b_q - \frac{1}{2})] + \frac{1}{2} \\
 &= [2(b_j - \frac{1}{2})(b_{j+1} - \frac{1}{2}) + \frac{1}{2}] - \frac{1}{2} \\
 &= [b_j \otimes b_{j+1}] - \frac{1}{2} \\
 &= [(b_1 - \frac{1}{2}) \cdot 2 \cdot (b_2 - \frac{1}{2}) \cdot 2 \cdot \dots \cdot [b_j \otimes b_{j+1}] - \frac{1}{2}] \cdot \dots \cdot 2 \cdot (b_q - \frac{1}{2}) + \frac{1}{2} \\
 &= b_1 \otimes b_2 \otimes \dots \otimes (b_j \otimes b_{j+1}) \otimes \dots \otimes b_q
 \end{aligned}$$

O.B.d.A. dürfen die Kantenbewertungen b_1 bis b_q umnumeriert werden, so daß auch andere Klammerungen möglich sind.

Mit der Bezeichnungssubstitution

$$a_k = b_k \quad \text{für } k=1, \dots, j-1$$

$$a_j = b_j \otimes b_{j+1} \quad \text{und}$$

$$a_k = b_{k+1} \quad \text{für } k=j+1, \dots, q-1$$

ist das ein $(q-1)$ -Kanten-Zug, der sich laut Induktionsvoraussetzung beliebig klammern läßt. Damit ist gezeigt, daß sich auch der q -Kanten-Zug beliebig klammern läßt.

Weitere Eigenschaften von \otimes

$$1 \otimes b = b$$

$$0 \otimes b = 1 - b$$

6.3.4 Arbeitersparnis bei Diagonal- und Triagonalpropagation

In Abschnitt 6.3.6 wird untersucht, welche Kanten innerhalb des Graphen mit dem Roboter untersucht und welche propagiert werden sollten, um möglichst viele Untersuchungsoperationen einzusparen. Dazu ist die Kenntnis erforderlich, wie hoch der Mehraufwand an notwendigen Untersuchungsoperationen pro propagierender Kante für die Möglichkeit, eine Kante mit mindestens der Grenzbewertung \tilde{p} propagieren zu können, ist gegenüber einer Untersuchung, bei der nicht propagiert werden soll und bei der folglich die untersuchten Kanten lediglich die Grenzbewertung \tilde{p} erreichen müssen. Damit die propagierte Kante nämlich die Grenzbewertung \tilde{p} erhält, müssen die propagierenden, also die untersuchten Kanten gemäß der Konstruktion des Propagationsoperators höhere Bewertungen als die Grenzbewertung aufweisen und somit öfter untersucht werden.

Zunächst wird für die Diagonalpropagation der erläuterte Mehraufwand pro propagierender Kante bestimmt. Der Mehraufwand ist am geringsten, wenn beide zur Propagation verwendeten Kanten gleich bewertet sind. Im folgenden sei a der Aufwand pro propagierender Kante, d.h. die Anzahl der notwendigen Untersuchungsoperationen. Die notwendige Bedingung, daß eine Kante mit der Grenzbewertung \tilde{p} propagiert werden kann, lautet:

$$\lambda(a) \otimes \lambda(a) \geq \tilde{p}$$

Durch Einsetzen der κ - λ -Funktion aus Abschnitt 6.2.1 und Anwendung des Propagationsoperators aus Abschnitt 6.3.1 ergibt sich:

$$\begin{aligned} 2\{\lambda(a) - \frac{1}{2}\} \cdot \{\lambda(a) - \frac{1}{2}\} + \frac{1}{2} &\geq \tilde{p} \\ 2\left\{\frac{1}{2} - \frac{1}{2}[2(1-\tilde{p})]^{a/m}\right\}^2 + \frac{1}{2} &\geq \tilde{p} \\ \frac{a}{m} &\geq \frac{\lg[1 - \sqrt{2\tilde{p}-1}]}{\lg[2(1-\tilde{p})]} \end{aligned}$$

Ähnlich läßt sich der Mehraufwand pro zu propagierender Kante bei Triagonalpropagation bestimmen. Die notwendige Bedingung lautet dabei:

$$\lambda(a) \otimes \lambda(a) \otimes \lambda(a) \geq \tilde{p}$$

Unter Verwendung des verallgemeinerten Propagationsoperators aus Abschnitt 6.3.2 ergibt sich somit:

$$4\{\lambda(a) - \frac{1}{2}\} \cdot \{\lambda(a) - \frac{1}{2}\} \cdot \{\lambda(a) - \frac{1}{2}\} + \frac{1}{2} \geq \tilde{p}$$

$$4\left\{\frac{1}{2} - \frac{1}{2}[2(1 - \tilde{p})]^{1/m}\right\}^3 + \frac{1}{2} \geq \tilde{p}$$

$$\frac{a}{m} \geq \frac{\lg[1 - \sqrt[3]{2\tilde{p} - 1}]}{\lg[2(1 - \tilde{p})]}$$

Wenn der Roboter im Falle der Diagonalpropagation alle drei Kanten untersuchen würde, dann wären mindestens 3·m Kantenuntersuchungen zum Erreichen der Grenzbewertung erforderlich. Diagonalpropagation lohnt sich erst, wenn auf die zwei für die Propagation verwendeten Kanten verteilt weniger als 3·m Kantenuntersuchungen erforderlich sind. Bei $a/m = \frac{3}{2}$ verteilt sich der Aufwand für drei Kanten gerade auf die zwei propagierenden Kanten. Demnach lohnt sich Diagonalpropagation erst, wenn die Grenzbewertung \tilde{p} und somit die Bewertung für die Systemzuverlässigkeit, größer als 0.852 gewählt wird, was auch aus den Abbildungen 6.13 und 6.14 zu entnehmen ist.

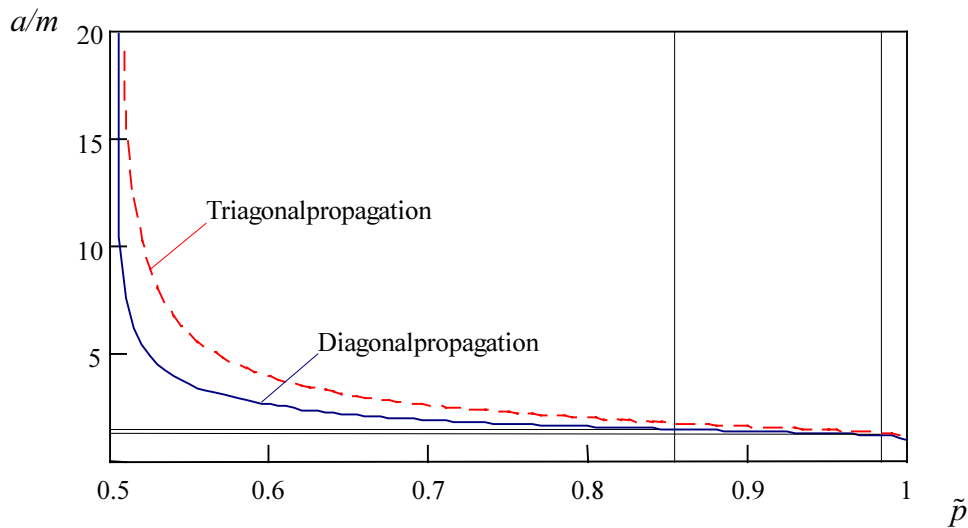


Abbildung 6.13: a/m in Abhängigkeit von \tilde{p} (zwischen 0.5 und 1)

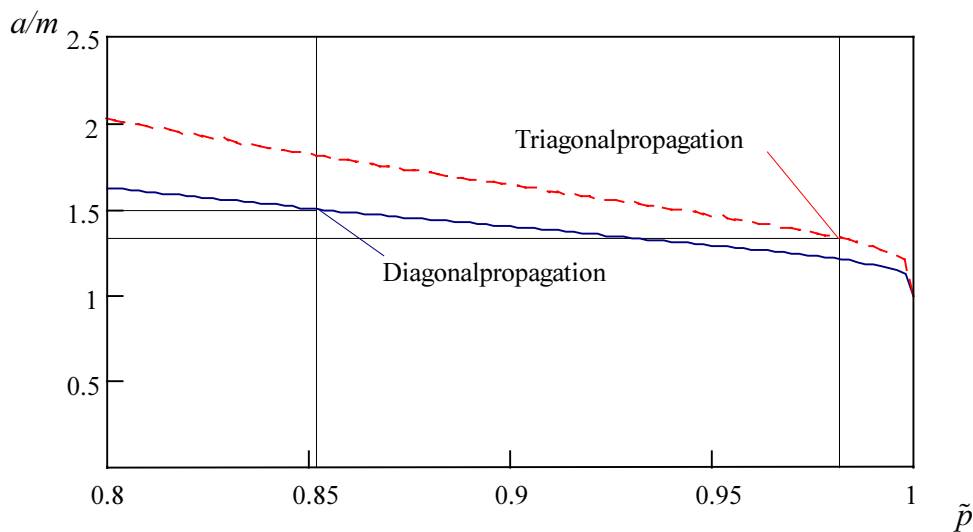


Abbildung 6.14: a/m in Abhängigkeit von \tilde{p} (zwischen 0.8 und 1)

Bei der Triagonalpropagation verteilt sich der Aufwand für vier Kanten bei $a/m = 4/3$ gerade auf die drei für die Propagation verwendeten Kanten. Gemäß den Abbildungen 6.13 und 6.14 müßte eine Grenzbewertung \tilde{p} gewählt werden, welche größer als 0.9808 ist, die somit bei komplexen Szenen sehr viele Untersuchungsoperationen erfordert und infolgedessen selten praktisch einsetzbar ist. Deshalb sollen die Triagonalpropagation und alle Propagationen über noch längere Kantenzüge bei der in Abschnitt 6.3.6 beschriebenen Auswahl der beabsichtigt zu untersuchenden Kanten, also bei der Bestimmung des Untersuchungsmusters innerhalb des Graphen, nicht angestrebt werden, sondern nur die Diagonalpropagation. Sehr wohl ist es jedoch möglich, daß einige Kanten sozusagen als „Abfallprodukt“ während der eigentlichen Untersuchung anderer Kanten sehr hoch bewertet werden, weil die zugehörigen relativen Lagen beispielsweise zufällig beobachtet wurden, so daß auch Propagationen über mehr als zwei Kanten Untersuchungsarbeit sparen können.

6.3.5 Durchführung der Propagation in der Matrixdarstellung

Die Bewertungen, mit denen die Kanten des Zusammengehörigkeitsgraphen bewertet werden, werden in der Matrix \mathbf{B} dargestellt. Dabei ist der Wert des Matrixelements in der j -ten Zeile und der k -ten Spalte genau die Bewertung der Kante b_{jk} , die die Primitive a_j und a_k verbindet. Da die Kanten nicht gerichtet sind, ist die Matrix symmetrisch. Soll der Wert einer niedrig bewerteten Kante $b_{jk} = \lambda_{jk} = \lambda(\kappa_{jk})$ mittels Diagonalpropagation über einen hochbewerteten Zwei-Kanten-Zug propagiert werden, so kommen als Zwischenpunkt des Zwei-Kanten-Zuges prinzipiell alle übrigen Primitive desselben Clusters in Frage, was in Abbildung 6.15 illustriert ist.

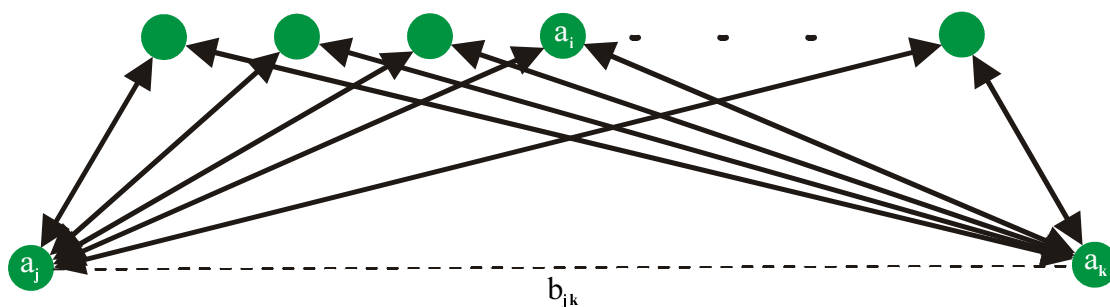


Abbildung 6.15: Mögliche Kantenzüge zur Propagation einer bestimmten Diagonalen

Die propagierte Bewertung der Kante b'_{jk} entspricht dann dem höchsten propagierten Wert, der sich auf diese Weise ergibt: $b'_{jk} = \max_i (b_{ji} \otimes b_{ik})$

Läßt man i dabei über alle Primitive des Clusters laufen, einschließlich die Primitive a_j und a_k , die die zu propagierende Kante begrenzen, wird das Maximum auch über die „Diagonale“ $b_{jj} \otimes b_{jk} = 1 \otimes b_{jk} = b_{jk} = b_{jk} \otimes 1 = b_{jk} \otimes b_{kk}$ gebildet, was sicherstellt, daß b'_{jk} nicht kleiner als b_{jk} werden kann.

In der Matrixdarstellung entsprechen die Elemente $b_{ji} (i=1, \dots, q)$ der j -ten Zeile und die Elemente $b_{ik} (i=1, \dots, q)$ der k -ten Spalte der Matrix \mathbf{B} . Aufgrund der Symmetrie der Matrix \mathbf{B} enthält die j -te Zeile dieselben Elemente wie die j -te Spalte und entsprechend die k -te Spalte dieselben Elemente wie die k -te Zeile der Matrix \mathbf{B} . Um das Element b'_j zu propagieren,

verknüpft man also die jeweils in derselben Zeile stehenden Elemente der j -ten und der k -ten Spalte und wählt von den so erhaltenen Werten das Maximum. Abbildung 6.16 illustriert diese Vorgehensweise.

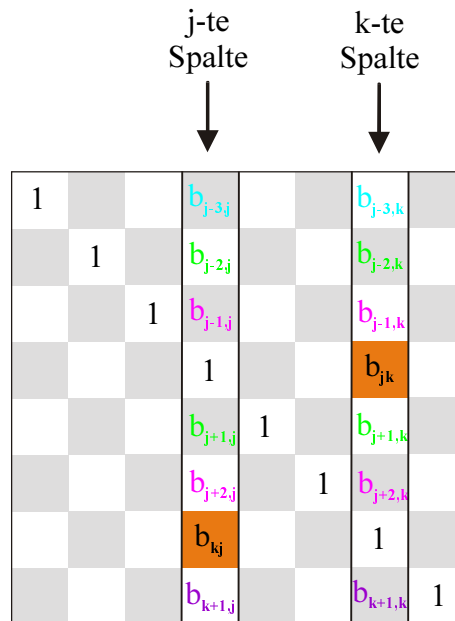


Abbildung 6.16: Propagation des Matrixelementes $b_{jk} = b_{kj}$

Die Triagonalpropagation bietet bei Grenzbewertungen \tilde{p} unter 0.9808 nicht die Möglichkeit der gezielten Arbeitersparnis. Dennoch kann es notwendig sein, eine Kante, die sich nicht direkt untersuchen und auch nicht sinnvoll diagonal propagieren läßt, triagonal oder über noch mehr Kanten zu propagieren. Auch ist es durchaus sinnvoll, über lange Kantenzüge zu propagieren, wenn entsprechend obiger Schilderung Kanten quasi zufällig untersucht, hoch bewertet werden und somit für die Propagation zufällig, also ungeplant, zur Verfügung stehen.

Aufgrund der Assoziativität des Propagationsoperators läßt sich die Propagation über mehr als zwei Kanten auf die Diagonalpropagation zurückführen. Die Ausführung der Propagation über längere Kantenzüge läßt sich dadurch sehr einfach realisieren. Man läßt den Diagonalpropagations-Algorithmus in mehreren Schleifen über die Matrix \mathbf{B} laufen, bis keine weiteren Veränderungen in den Matrixelementen auftreten.

Die Anzahl der Propagationszyklen, die möglich sind, ist endlich. Es kann nicht geschehen, daß eine Kantenbewertung b_{jk} erhöht wird durch eine Propagation, deren propagierende Kanten selbst bereits über eventuell noch weitere Propagationen unter Verwendung der Bewertung b_{jk} selbst propagiert wurden. Es ist also nicht möglich, daß die Bewertung einer Kante erhöht wird, nur weil die Kante selbst für eine Höherbewertung anderer Kanten verwendet wird. Statt dessen sind alle Propagationen auf Bewertungen zurückführbar, welche auf unabhängigen Untersuchungsoperationen beruhen.

Diese positive Eigenschaft ist zum einen begründet durch die geeignete Konstruktion des Propagationsoperators, der nicht zuläßt, daß der Wert einer propagierten Kante größer wird als der kleinste Wert der propagierenden Kanten. Zum anderen gibt es pro Cluster nur endlich viele Primitive, zwischen den Primitiven nur endlich viele Kanten und damit auch nur endlich viele Kantenzüge zwischen zwei Primitiven. Die Assoziativität des Propagationsoperators, die das Ersetzen eines Zwei-Kanten-Zuges durch die entsprechende Diagonale ermöglicht, stellt

dann sicher, daß eine bestimmte Kante nur endlich oft durch Propagation höher bewertet werden kann.

6.3.6 Optimales Untersuchungsmuster

In Abschnitt 6.3.4 wurde begründet, daß bei der Auswahl der zu untersuchenden Kanten innerhalb eines Clusters nur die Diagonalpropagation angestrebt werden soll, da Propagation über längere Kantenzüge im allgemeinen Mehraufwand bedeutet. Ein optimales Untersuchungsmuster ist somit ein Muster, in dem möglichst wenige Kanten untersucht und die übrigen Kanten diagonalpropagiert werden.

Im folgenden wird zunächst motiviert und dann bewiesen, daß ein sternförmiges Muster, also ein Muster mit einem zentralen Knoten, von dem Kanten zu allen peripheren Knoten ausgehen, ein ideales Untersuchungsmuster ist. Für die Herleitung wird von einfachen Beispielen ausgegangen und die Komplexität schrittweise gesteigert.

Abbildung 6.17 zeigt drei sehr einfache Cluster. In den Teilbildern a) und b) ist gar keine Propagation möglich. In Teilbild c) können die beiden propagierenden Kanten aus Symmetriegründen und beschränkten Möglichkeiten zur Propagation beliebig ausgewählt werden.

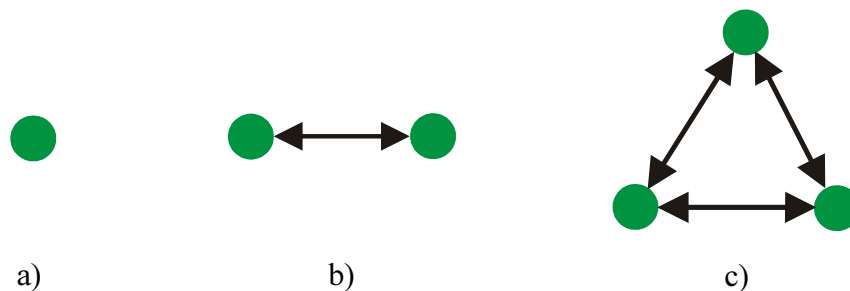


Abbildung 6.17: Triviale Cluster – a) einelementiges, b) zweielementiges, c) dreielementiges

Abbildung 6.18 zeigt Cluster mit vier Elementen und somit sechs Kanten. Bei Untersuchung eines Drei-Kanten-Zuges gemäß Teilbild b) müßte eine Kante triagonalpropagiert werden, was ja nicht angestrebt wird und in dem Teilbild durch die orangefarbene gestrichelte Linie angezeigt ist. Bei der Untersuchung von vier Kanten entsprechend Teilbild c) können zwei Kanten propagiert werden. Die Untersuchung von drei Kanten, wie in Teilbild d) gezeigt, ermöglicht sogar die Propagation von drei Kanten und stellt somit die beste Variante dar.

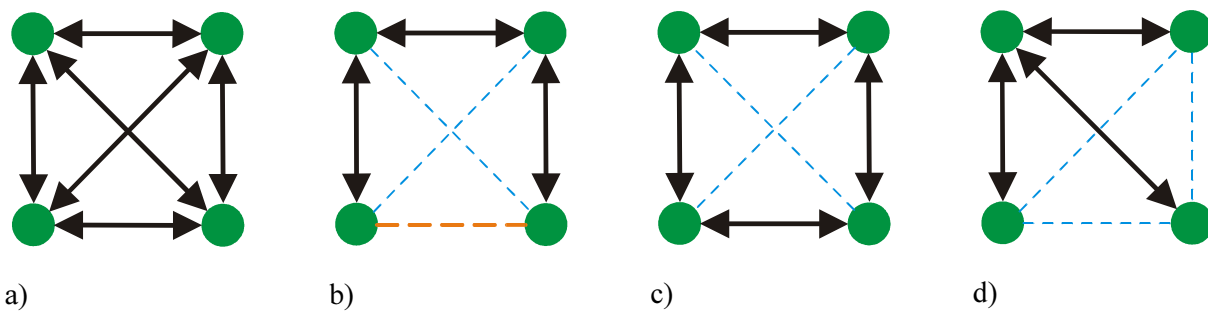


Abbildung 6.18:

- a) Kanten eines vierelementigen Clusters.
- b) Eine Kante muß triagonalpropagiert werden.
- c) Zwei zu propagierende Kanten bei einem geschlossenen Vier-Kanten-Zug.
- d) Drei zu propagierende Kanten bei einem verzweigten Kantenzug.

Bei einem fünfelementigen Cluster sind zehn Kanten zu bewerten. Bei Untersuchung von fünf Kanten gemäß Abbildung 6.19, Teilbild b), können fünf Kanten propagiert werden. In Teilbild c) zeigt sich, daß auch hier durch eine zentrale Anordnung mit der Untersuchung von wenigen Kanten, hier nämlich vier, zahlreiche Kanten, hier sechs, diagonal propagiert werden können.

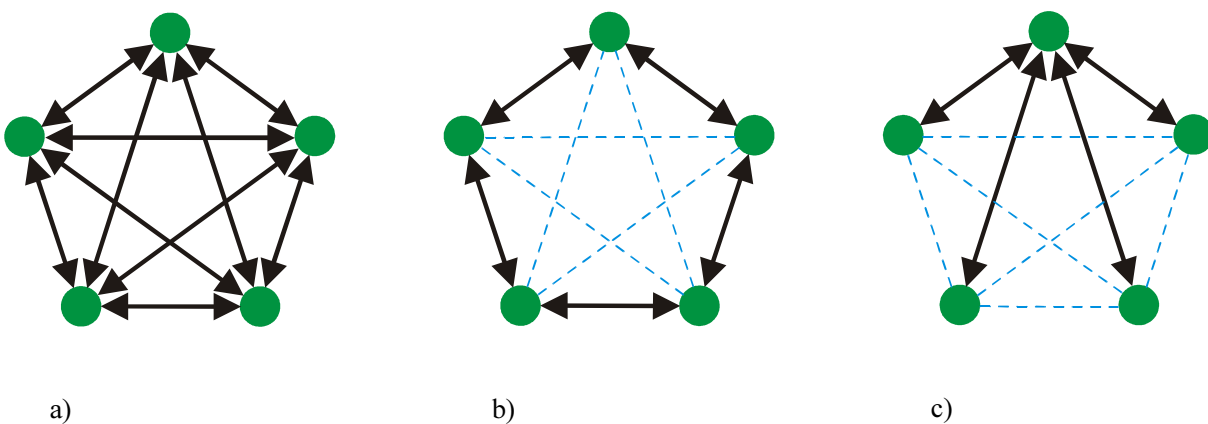


Abbildung 6.19:

- a) Kanten eines fünfelementigen Clusters.
- b) Fünf zu propagierende Kanten bei einem geschlossenen Fünf-Kanten-Zug.
- c) Sechs zu propagierende Kanten bei einem verzweigten Kantenzug.

Bei dem in Abbildung 6.20 dargestellten sechselementigen Cluster können durch geeignete Wahl von nur fünf zu untersuchenden Kanten sogar die restlichen zehn Kanten diagonalpropagiert werden.

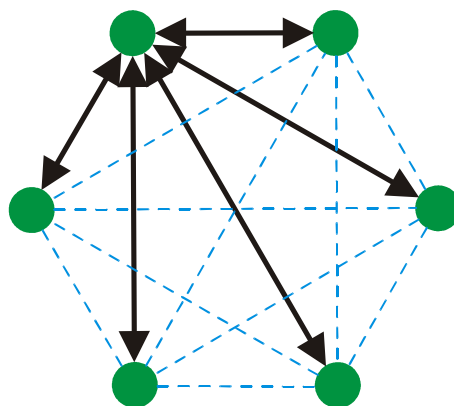


Abbildung 6.20: Ideales Muster für ein sechselementiges Cluster

Aufgrund der erfolgreichen Anwendung einer zentralen Struktur auf vier-, fünf- und sechselementige Cluster wird hier zunächst davon ausgegangen, daß es sich dabei um ein günstiges Untersuchungsmuster handelt und wird im folgenden allgemein beschrieben. Die zu untersuchenden Kanten eines Clusters mit q Knoten, also $\frac{1}{2} \cdot q(q-1)$ Kanten, gehen von einem „zentralen Knoten“ aus und laufen zu den übrigen $q-1$ Knoten, die „periphere Knoten“ genannt werden. Es müssen also $q-1$ Kanten untersucht werden. Die übrigen $\frac{1}{2} \cdot (q-1)(q-2)$ Kanten verlaufen zwischen den peripheren Knoten und lassen sich diagonal propagieren. Dieses Untersuchungsmuster soll aufgrund der in Abbildung 6.21 gezeigten Topologie „Stern“ heißen.

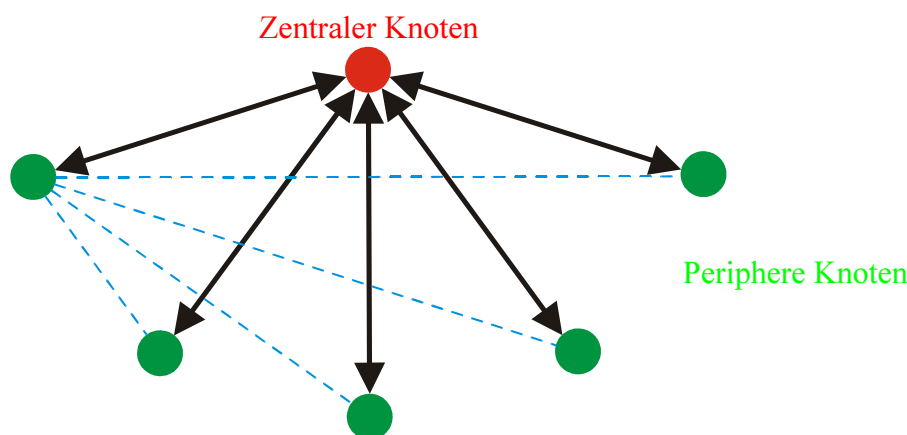


Abbildung 6.21: Ideales Untersuchungsmuster für ein allgemeines Cluster

Auswahl des zentralen Knotens

Ausgehend von Eigenschaften wie dem Vorhandensein numerischer Griffe, um Objektteile gezielt und möglichst ohne Greiferwechsel etwas verschieben zu können, oder der visuellen Zugänglichkeit für Kameras, um die Verschiebungen beobachten zu können, wird vor Beginn der Untersuchungsoperationen ein zentraler Knoten, also ein Szenenbereichshinweis, bestimmt, dessen Beziehungen zu den peripheren Knoten am besten untersuchbar sind.

Im Laufe der Untersuchungsoperationen kann sich die Situation jedoch verändern. Die genannten Eigenschaften sind dann eventuell nicht mehr gegeben. Eventuell lassen sich deshalb manche Kanten nicht mehr untersuchen, so daß lokal Propagationen über längere Kantenzüge erforderlich werden. Außerdem wurde bereits geschildert, daß sich zufällig, also

ungeplant, Untersuchungsergebnisse ergeben können, welche Kanten, die eigentlich gar nicht untersucht werden sollten, aufgrund von Untersuchungsoperationen und nicht erst durch Propagation zu hohen Bewertungen verhelfen. Insbesondere ergibt sich nach jeder Untersuchungsoperation im allgemeinen ja auch neue Information über die Clusterung und über Primitive, welche noch nicht klar zugeordnet werden konnten. Aus all diesen Gründen kann es im Laufe der Untersuchungsoperationen sinnvoll sein, als zentralen Knoten ein anderes Primitiv auszuwählen. Deshalb wird der aktuell günstigste zentrale Knoten vor jeder Untersuchungsoperation gemäß folgender Beschreibung neu bestimmt.

Aus den Knoten eines Clusters ist der zentrale Knoten so auszuwählen, daß die untersuchten Kanten zwischen den peripheren Knoten und dem zentralen Knoten schon möglichst hoch bewertet sind. Dadurch ist dann die Anzahl der noch durchzuführenden Untersuchungsoperationen zum Erreichen der ausreichenden Propagierbarkeit der zu propagierenden Kanten zwischen den peripheren Knoten möglichst gering. Dazu sind folgende Schritte auszuführen:

Schritt 1: Zunächst muß die zur Diagonalpropagation notwendige Anzahl \bar{m} von Untersuchungsoperationen für die propagierenden, also die durch den Roboter zu untersuchenden Kanten bestimmt werden, so daß sich gemäß dem Untersuchungsmuster Stern die nicht zu untersuchenden Kanten diagonalpropagieren lassen. Dazu wird die in Abschnitt 6.3.4 hergeleitete Formel zur Berechnung des Mehraufwands für die propagierenden Kanten für die Diagonalpropagation verwendet:

$$\bar{m} = \left\lceil \frac{\lg[1 - \sqrt{2\tilde{p} - 1}]}{\lg[2(1 - \tilde{p})]} \cdot m \right\rceil$$

Schritt 2: Für jede Kante b_{jk} des Clusters wird in Abhängigkeit vom Untersuchungsgrad κ_{jk} der Kante ein modifizierter Untersuchungsgrad κ'_{jk} bestimmt.

$$\kappa'_{jk} = \min[\kappa_{jk}, \bar{m}]$$

Das stellt sicher, daß eine extrem hoch, weit über der erforderlichen Grenzbewertung \tilde{p} bewertete Kante nicht überbewertet, und somit das Ergebnis nicht verfälscht wird.

Schritt 3: Für jeden Knoten a_j ($j=1, \dots, q$) des Clusters wird eine Knotenbewertung α_j bestimmt, indem die modifizierten Untersuchungsgrade aller von diesem Knoten ausgehenden Kanten aufaddiert werden.

$$\alpha_j = \sum_{k \neq j} \kappa'_{jk}$$

Schritt 4: Als zentraler Knoten wird derjenige Knoten ausgewählt, der die höchste Knotenbewertung aufweist. Sollte es mehrere Knoten mit maximaler Knotenbewertung geben, ist die Auswahl eines dieser Knoten zum zentralen Knoten zunächst beliebig. Dasjenige Primitiv ist dann als zentraler Knoten auszuwählen, welches die oben genannten Anforderungen wie beispielsweise Vorhandensein numerischer Griffe oder visuelle Zugänglichkeit am besten erfüllt.

Schritt 5: Für die nächste Untersuchungsoperation wählt man eine Kante aus, deren modifizierter Untersuchungsgrad noch nicht den Maximalwert von \bar{m} erreicht hat. Sollte das auf keine der Kanten zutreffen, ist das Cluster hinreichend untersucht, da sich alle nicht untersuchten Kanten ausreichend hoch diagonalpropagieren lassen.

Optimalität des Untersuchungsmusters Stern

Es soll nun gezeigt werden, daß der Stern ein optimales Untersuchungsmuster ist.

Dazu wird zunächst gezeigt, daß die vom Roboter zu untersuchenden Kanten innerhalb des Clusters über mindestens einen Pfad miteinander verbunden sein müssen. Ansonsten ist es nämlich nicht möglich, alle nicht untersuchten Kanten des Clusters zu propagieren. In weiteren Beweisschritten wird gezeigt, daß das Untersuchungsmuster Stern q Knoten mit nur $q-1$ Kanten verbindet und daß es kein Muster geben kann, welches dazu weniger Kanten erfordert. Somit ist dann gezeigt, daß der Stern ein optimales Untersuchungsmuster ist.

Behauptung:

Das Cluster darf durch die Auswahl der zu untersuchenden Kanten nicht in zwei disjunkte Teilgraphen untersuchter Kanten zerfallen.

Beweis:

Um eine nicht untersuchte Kante zwischen zwei beliebigen Knoten propagieren zu können, müssen diese beiden Knoten durch eine Kette untersuchter Kanten miteinander verbunden sein. Da es zwischen den Knoten zweier disjunkter Teilgraphen keine untersuchte Kante gibt, lassen sich ein Knoten a des einen Teilgraphen und ein Knoten b des anderen Teilgraphen nicht durch eine Kette $\langle a, b \rangle$ untersuchter Kanten miteinander verbinden. Die Kante $[a, b]$ läßt sich auf diese Weise nicht propagieren, weshalb ein Untersuchungsmuster, das das Cluster in zwei disjunkte Teilgraphen zerfallen läßt, kein optimales Untersuchungsmuster sein kann. ■

Als nächstes soll gezeigt werden, daß eine Figur, die alle q Knoten eines Graphen miteinander verbindet, mindestens $q-1$ Kanten enthalten muß. Da der Stern genau $q-1$ Kanten enthält, kann ein Muster, das mehr Kanten enthält, nicht optimal sein.

Behauptung:

q Knoten eines Graphen lassen sich durch $q-1$ Kanten miteinander verbinden.

Beweis:

Der Beweis wird induktiv geführt.

Induktionsanfang:

2 Knoten lassen sich durch $(2-1=1)$ Kanten miteinander verbinden, wie aus Abbildung 6.22 ersichtlich ist.



Abbildung 6.22: Verbindung zweier Knoten mit einer Kante

Abbildung 6.23 zeigt, daß sich 3 Knoten durch $(3-1=2)$ Kanten miteinander verbinden lassen.

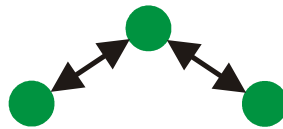


Abbildung 6.23: Verbindung von drei Knoten über zwei Kanten

Induktionsvoraussetzung:

$k - 1$ Knoten lassen sich durch $k - 2$ Kanten miteinander verbinden.

Induktionsbehauptung:

Dann lassen sich auch k Knoten durch $k - 1$ Kanten miteinander verbinden.

Induktionsbeweis:

Gegeben sind k Knoten, von denen sich laut Voraussetzung $k - 1$ durch $k - 2$ Kanten miteinander verbinden lassen. Durch Hinzufügen einer Kante vom k -ten Knoten zu einem beliebigen der ersten $k - 1$ Knoten, wie in Abbildung 6.24 gezeigt, sind alle k Knoten miteinander verbunden, und zwar durch $(k - 2) + 1 = k - 1$ Kanten.

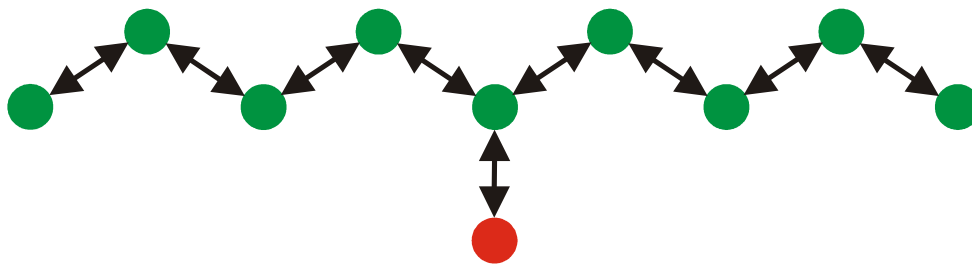


Abbildung 6.24: Hinzufügen eines Knotens

■

Behauptung:

Mit weniger als $q - 1$ Kanten lassen sich q Knoten nicht verbinden.

Beweis:

Die q Knoten eines Graphen sind miteinander verbunden, wenn es zwischen zwei beliebigen Knoten eine Kette von Kanten gibt.

Ausgehend von q unverbundenen Knoten werden zwei beliebige Knoten durch eine Kante verbunden und diese beiden Knoten zu einem Superknoten zusammengefaßt. Damit wird das Problem auf $q - 1$ unverbundene Knoten reduziert. Dieses Verfahren muß fortgeführt werden, solange es noch isolierte (Super-)Knoten gibt.

Durch jedes Hinzufügen einer neuen Kante wird die Anzahl isolierter (Super-)Knoten um Eins vermindert. Nach Hinzufügen von $q - 2$ Kanten gibt es demzufolge noch zwei isolierte (Super-)Knoten, die Knoten des Graphen sind also noch nicht miteinander verbunden.

■

Damit erfüllt das Untersuchungsmuster Stern alle erforderlichen Voraussetzungen, um ein optimales Muster zu sein.

6.4 Allgemeines Sensorkonzept für ROs der fünften Generation

6.4.1 Abgrenzung des Konzepts gegenüber bisherigen Ansätzen

Aus den vorangegangenen Abschnitten geht hervor, daß die zuverlässige und leistungsfähige Ausführung von sensorbasierten Untersuchungs- und Überwachungsoperationen eine zentrale Rolle beim Betrieb eines ROs der fünften Generation darstellt. In diesem Abschnitt wird ein allgemeines Konzept für die Integration und insbesondere die Auswahl von Sensoren in Abhängigkeit zahlreicher Randbedingungen vorgestellt [Müller & Wörn 2000d].

Gewöhnlich werden Sensoren nach den Meßgrößen, den Meßverfahren, der physikalischen Kopplung zur Umwelt, ihrer Intelligenz, usw. getrennt beschrieben und bewertet [Dillmann & Huck 91]. In der Literatur konnte kein Konzept gefunden werden, welches all diese Eigenschaften und zusätzlich noch weitere Eigenschaften, wie den Montageort und die Montageart, die Art der Umweltabtastung, die flexible Auswahl des zu erfassenden Zielgebiets, die Möglichkeit, über taktile Kopplung auch Objekte bei geringfügigen Verklemmungen „festzuhalten“, usw., integriert behandelt und den Sensoreinsatz geeignet plant. Deshalb werden hier Regeln aufgestellt, welche positive und negative Auswirkungen der Auswahl eines bestimmten Sensors und dessen Anordnung angeben [Müller & Wörn 2000d]. In dieser Arbeit werden die Regeln und Zusammenhänge beispielhaft an realisierten Sensoreinsätzen erläutert.

Es sei jedoch bereits an dieser Stelle erwähnt, daß der zukünftige weit verbreitete Einsatz von ROs der fünften Generation sicherlich wesentlich von der zukünftigen Entwicklung eines umfassenden und leistungsstarken integrierten Sensorkonzepts abhängt, wie auch in Abschnitt 8.2 erläutert wird. Durch Integration der hier aufgestellten Regeln und Zusammenhänge in ein Expertensystem muß zukünftig ein integriertes Planungssystem für Sensoreinsätze entwickelt werden, welches in Verbindung mit den in dieser Arbeit vorgestellten Strategien zu einem weit verbreitetem Einsatz von ROs der fünften Generation führen kann.

6.4.2 Sensorintegration und -fusion

In [Raczkowsky 91] wurde der Einsatz von Sensoren in drei Gruppen eingeteilt, nämlich

- erstens Regelungsaufgaben wie beispielsweise die sensorbasierte geregelte Schweißnahtverfolgung,
- zweitens die Überwachung von Zuständen während einer Roboteroperation mit eventueller Auslösung eines Alarms, und
- drittens die explizite Analyse von erkannten Fehlersituationen mit umfangreichem Sensoreinsatz.

Sensoreinsätze der ersten Gruppe werden in dieser Arbeit beispielsweise für das kraftgeregelte Umfahren unerwarteter Hindernisse verwendet. Dies wurde in Kapitel 3 skizziert, bildet jedoch nicht den Schwerpunkt dieser Arbeit und wird deshalb nicht weiter beschrieben. Zu der zweiten Gruppe von Sensoreinsätzen gehören die in diesem Kapitel

eingeführten Überwachungsoperationen zum Feststellen ungewollten Mitanebens. Solange kein ungewolltes Mitaneben festgestellt wird, führt der Roboter nämlich ungehindert die Objektentnahme, eventuell mit einem Sensoreinsatz der ersten Gruppe, durch. Nur bei Feststellen ungewollten Mitanebens wird ein Alarm ausgelöst, worauf das RO geeignet reagieren muß. Zu der zweiten Gruppe gehört auch die Überwachung hinsichtlich Kollisionen während der Objektentnahme mit dem Kraft-Momenten-Sensor im Handgelenk des Roboters. In die dritte Gruppe von Sensoreinsätzen fallen die in diesem Kapitel eingeführten Untersuchungsoperationen zur Erforschung der Szene. Bei den Untersuchungsoperationen handelt es sich zwar nicht um die Analyse von Fehlersituationen, jedoch ist umfangreicher Sensoreinsatz erforderlich, um beispielsweise relative Lageänderungen festzustellen. Insbesondere auch die Untersuchung der Zusammengehörigkeit flexibler Objekte oder von Objekten mit Gelenken stellt hohe Leistungsanforderungen an die Sensorik.

Aus einer abstrakten Sichtweise können die Sensoreinsätze bei Untersuchungs- und Überwachungsaufgaben als sogenannte „logische Sensoren“ [Henderson & Shilcrat 84] angesehen werden, welche „Black-Boxes“ darstellen und die gewünschte Information liefern. Der große Vorteil einer solchen Betrachtungsweise liegt in der klaren Schnittstellendefinition zwischen der Sensorik und den Planungssystemen, welche die Sensorik verwenden. Die in diesem Kapitel entwickelte neue Strategie ist somit allgemeingültig einsetzbar und portabel. Die Entwicklung des Sensorkonzepts kann also unabhängig von der Strategieentwicklung vorgenommen werden und schränkt somit die Reichweite der Strategien in keiner Weise ein.

6.4.3 Anforderungen an die Sensorik

Allgemein können zahlreiche Anforderungen an Sensoren gestellt werden, wie beispielsweise Genauigkeit, Störsicherheit, Schnelligkeit, usw. In diesem Abschnitt sollen jedoch insbesondere die Anforderungen an die Sensorik erläutert werden, welche sich aufgrund der in diesem Kapitel neu eingeführten Strategie ergeben.

ROs der fünften Generation sind insbesondere dadurch charakterisiert, daß sie untersuchen, welche Szenenbereichshinweise zusammengehören. Wenn zu einem bestimmten Zeitpunkt ein Szenenbereichshinweis falsch wiedererkannt wird, dann wird seinen Beziehungen fälschlicherweise die bis dahin gewonnene Information zugewiesen. Dadurch kann es zu vollkommen falschen Schlußfolgerungen kommen. Deshalb ist es extrem wichtig, daß die Szenenbereichshinweise über die Sensorik während der Bewegungen korrekt verfolgt werden, oder aber daß sie zuverlässig wiedererkannt werden, falls beispielsweise nur zu diskreten Zeitpunkten in größeren Zeitabständen Bilder der Szene aufgenommen werden können.

Eine weitere wichtige Forderung an die Sensorik ist, daß zwei bei einer Untersuchungsoperation als lose erkannte Objektteile auch tatsächlich lose sein müssen. Wenn nämlich eine Beziehung als lose erkannt wird, dann wird die Bewertung der entsprechenden Kante auf Null gesetzt und kann im folgenden nicht mehr erhöht werden. Falls aus einem Cluster nur die Beziehungen zu manchen der Primitive fälschlicherweise als lose erkannt wurden, dann kann Unvollständigkeit erkannt werden, wie es in Abschnitt 6.2.5 beschrieben ist. Wenn sich nach einer gewissen festzulegenden Zeit die Unvollständigkeit nicht auflösen läßt, dann sollten die Beziehungen in dem Bereich auf die Bewertung 0.5 zurückgesetzt und neue Untersuchungen ausgeführt werden. Falls ein komplettes Cluster fälschlicherweise als lose erkannt wird, dann kann erst durch die Überwachung hinsichtlich ungewollten Mitanebens eine kritische Situation erkannt werden. Wenn die Objekte in einem bestimmten Bereich auch in verschiedenen Entnahmereihenfolgen und mit Ausweichbewegungen nicht entnehmbar sind, dann sollte der Bereich noch einmal neu

untersucht werden, da dann möglicherweise solch ein fehlerhaftes Untersuchungsergebnis vorliegt.

6.4.4 Beispiele für Untersuchungs- und Überwachungsoperationen

In diesem Abschnitt werden beispielhafte Abläufe von Untersuchungs- und Überwachungsoperationen dargestellt.

Eine typische in dieser Arbeit häufig eingesetzte Untersuchungsoperation für starre Objekte ohne Gelenke verwendet den in Kapitel 3 vorgestellten Laserscanner, welcher zu diskreten Zeitpunkten jeweils ein Tiefenbild der Szene aufnimmt. Entsprechend den Beschreibungen in Anhang A werden Szenenbereichshinweise in den Tiefenbildern segmentiert. Zur Ausführung der Untersuchungsoperation verschiebt bzw. verdreht der Roboter aktiv das zu einem Szenenbereichshinweis gehörende Objektteil. Diese Verschiebung bzw. Verdrehung ist so klein wie möglich zu wählen, so daß mit der eingesetzten Sensorik gerade noch sicher relative Lageänderungen der Szenenbereichshinweise erkannt werden können. In einem anschließend aufgenommenen neuen Tiefenbild der so modifizierten Szene wird mit Verfahren, welche in Anhang C beschrieben sind, versucht, die Szenenbereichshinweise wiederzuerkennen. Nach erfolgreicher Zuordnung kann bestimmt werden, ob sich die Szenenbereichshinweise relativ zueinander bewegt haben. Wenn dies der Fall ist, dann ist eine lose Beziehung festgestellt. Wenn sich Szenenbereichshinweise gemeinsam verschoben haben, dann führt dies zu einer Bewertungserhöhung für die jeweilige Zusammengehörigkeit.

Andere Arten von Untersuchungsoperationen können z.B. unter Verwendung von Kraft-Momenten-Sensoren ausgeführt werden. Beispielsweise kann ein Roboter kraftüberwacht versuchen, ein Objektteil zu verschieben, während ein anderer Roboter ein benachbartes Objektteil „festhält“ [Müller et al. 99b]. Solche Untersuchungsoperationen können Zuordnungsprobleme vermeiden und sind im allgemeinen sehr genau. Allerdings ergibt sich bei der Ausführung einer solchen Untersuchungsoperation nur Information über eine oder wenige Beziehungen zwischen Primitiven, was relativ ineffektiv ist.

Zur Überwachung hinsichtlich ungewollten Mitanhebens können ebenso wie bei Untersuchungsoperationen verschiedene Sensoren eingesetzt werden. Abbildung 6.25 zeigt ein Beispiel, in dem ein taktiler Sensor an einem zweiten Roboter montiert ist. Der Roboter positioniert den Sensor auf dem jeweiligen durch einen Szenenbereichshinweis beschriebenen Objektteil. Abbildung 6.26 zeigt blau eingezeichnet die Meßwerte während der Annäherungsphase, in welcher der Meßstift des Sensors etwas eingedrückt wird. Während der anschließenden Überwachung dürfen die Meßwerte einen bestimmten Schwellwert nicht überschreiten. Bei Meßwert 30 überschreitet die rot gezeichnete Kurve den Schwellwert, wodurch ungewolltes Mitanheben erkannt wird. Diese in Abbildung 6.25 gezeigte Situation wurde aus einem Experiment entnommen, welches in Abschnitt 6.7.1 dargestellt wird und entspricht exakt der in Abbildung 6.50 dargestellten Situation.

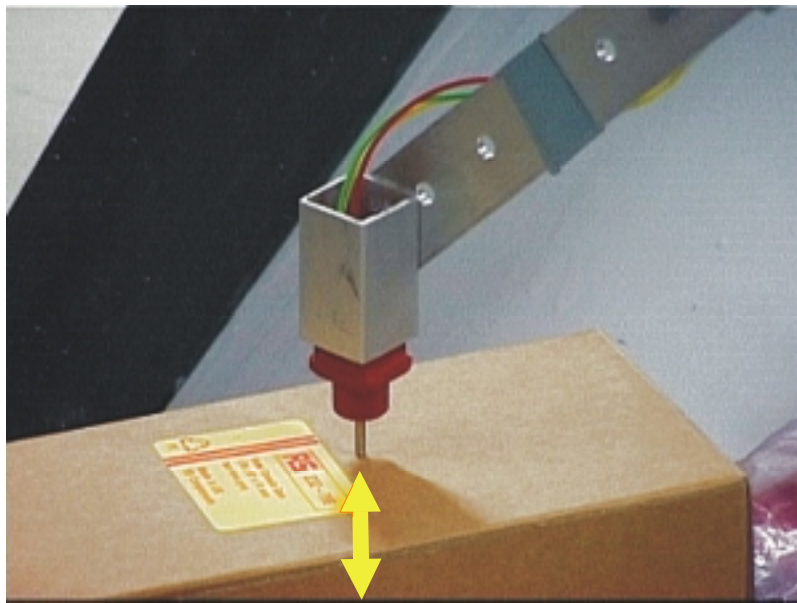


Abbildung 6.25: An zweitem Roboter montierter taktiler Sensor

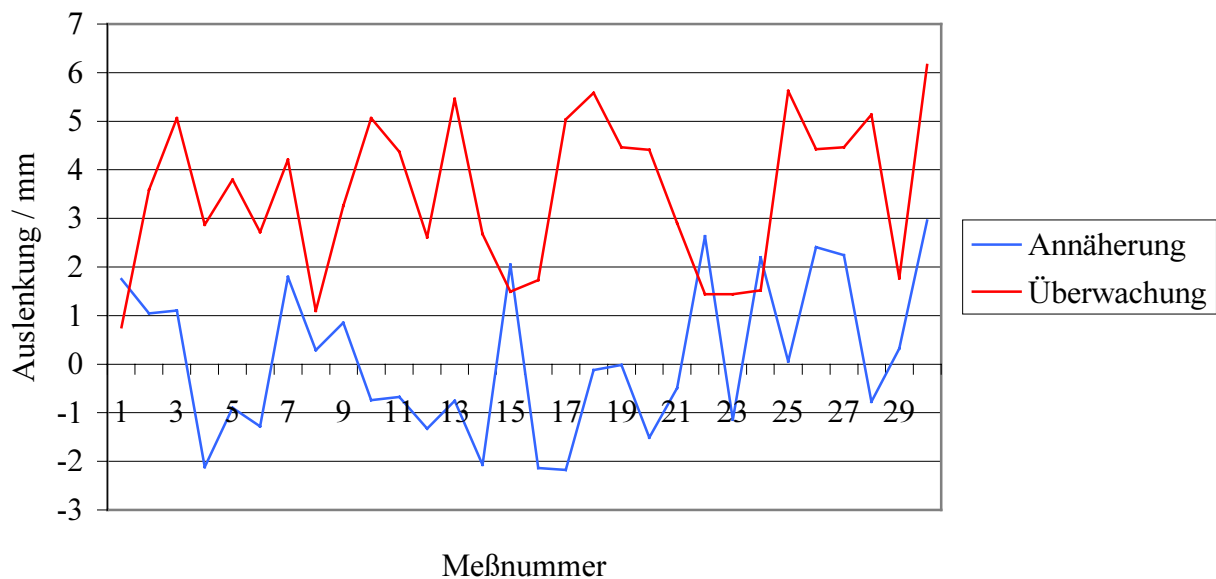


Abbildung 6.26: Verlauf der Meßgrößen eines taktilen Sensors bei einer Überwachungsoperation

Abbildung 6.27 zeigt die Durchführung einer Überwachungsoperation, bei der ein taktiler Sensor am Ende einer passiven Kinematik montiert ist. Der Roboter muß den Sensor greifen und von der in Teilbild a) gezeigten Warteposition in der Szene gemäß Teilbild b) positionieren. Anschließend wechselt der Roboter das zum Greifen des Objekts geeignete Greifwerkzeug ein und versucht, das Zielobjekt zu entnehmen, wie in Teilbild c) zu sehen ist. In diesem Beispiel kommt es zu ungewolltem Mitanhoben, was über den taktilen Sensor an der passiven Kinematik festgestellt wird. Deshalb wird die Entnahmeoperation abgebrochen, das Objekt wird, wie in Teilbild d) zu sehen ist, wieder abgelegt, und die passive Kinematik

wird vom Roboter wieder in die Warteposition zurückgeführt, bzw. direkt in die nächste Überwachungsposition überführt.

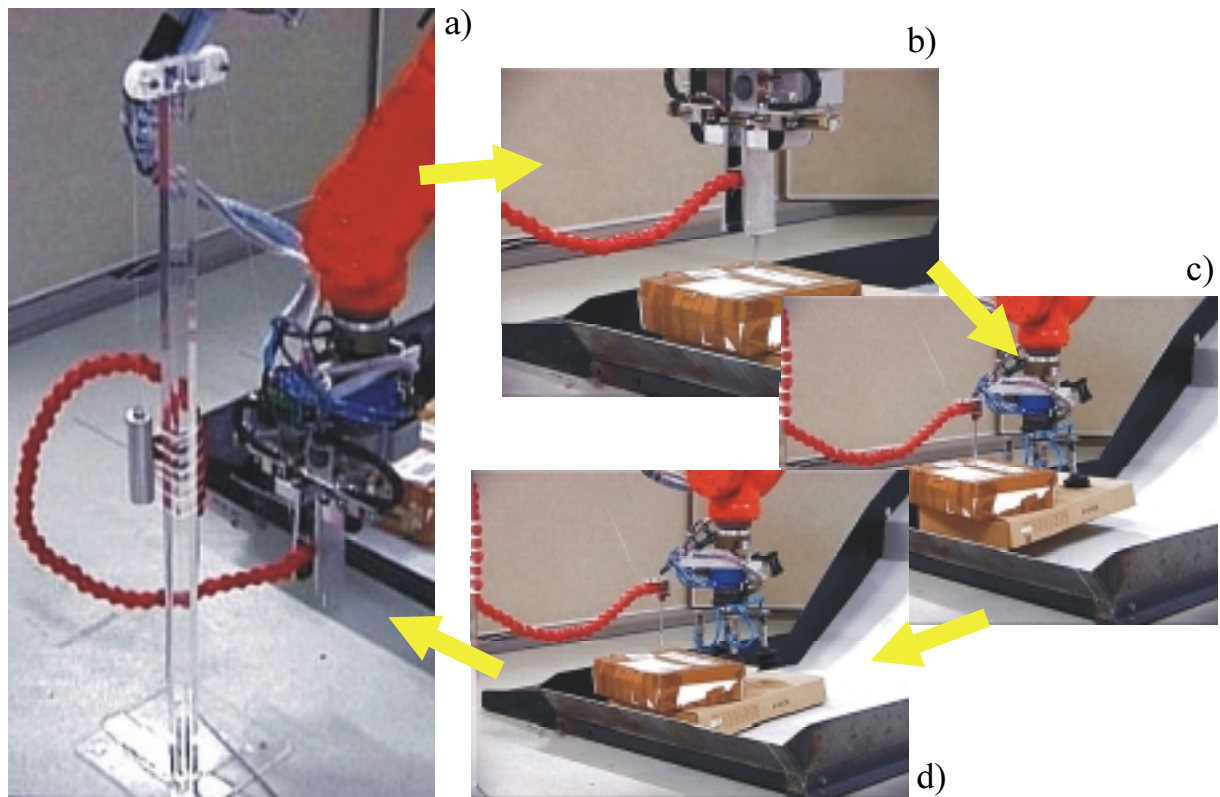


Abbildung 6.27: Passive Kinematik zur Positionierung von Sensoren

In den Abbildungen 6.28 bis 6.38 wird der Einsatz eines am Handgelenk des Roboters angebrachten miniaturisierten Laserscanners für Überwachungsoperationen veranschaulicht. Der Laser mißt über Triangulation die Abstände zu den Objekten in einer Schnittebene. Die Abbildungen 6.28 bis 6.31 zeigen Photos und die entsprechenden Meßverläufe in einem Beispiel, in dem sich der Szenenbereichshinweis, welcher das gegriffene Objektteil beschreibt, und ein benachbarter Szenenbereichshinweis relativ zueinander bewegen. In den Abbildungen 6.32 bis 6.35 hingegen bewegt sich das Nachbarobjekt mit, weshalb die Meßverläufe während des Anhebens quasi unverändert bleiben. Somit kann mit der Kenntnis über die ausgeführte Roboterbewegung beim Anheben des Objekts erkannt werden, ob sich benachbarte Szenenbereichshinweise mitbewegen, oder ob sich ihre Lage in der Szene nicht verändert, die zugehörigen Objekte also liegen bleiben.

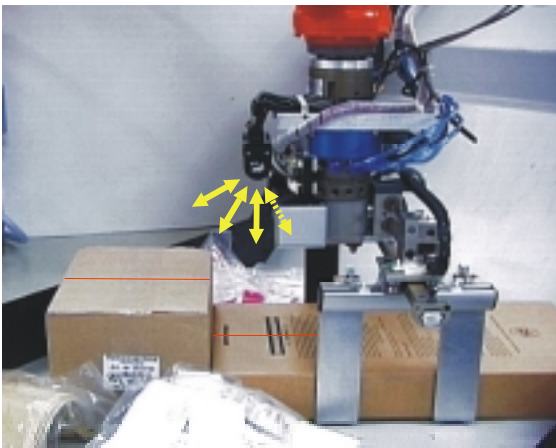


Abbildung 6.28: Minaturisierter Laserscanner am Handgelenk des Roboters

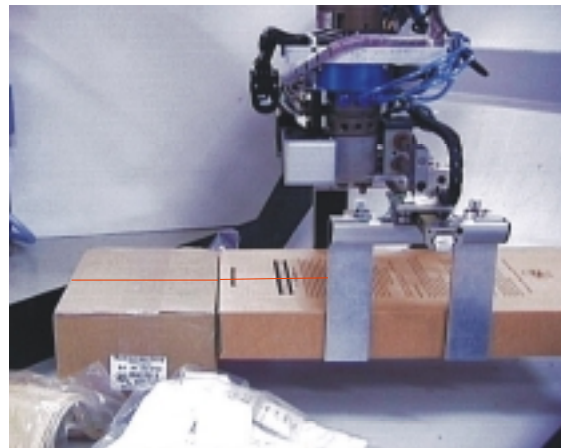


Abbildung 6.29: Beim Anheben verändert sich die Projektion des Laserlichts

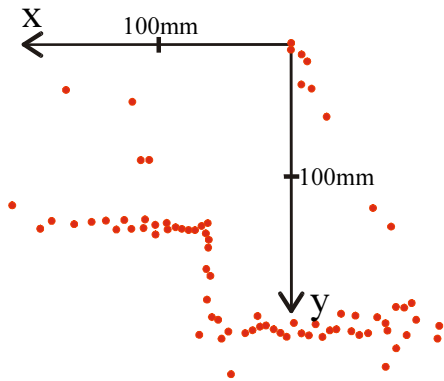


Abbildung 6.30: Meßverlauf vor dem Anheben des Objekts in Abbildung 6.28

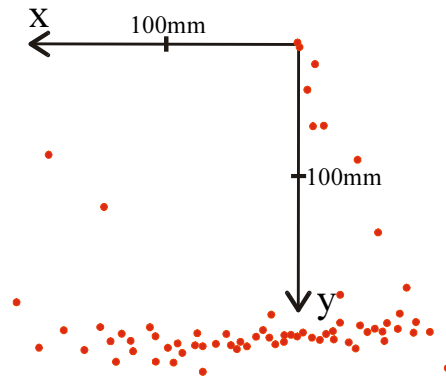


Abbildung 6.31: Meßverlauf in der Position in Abbildung 6.29

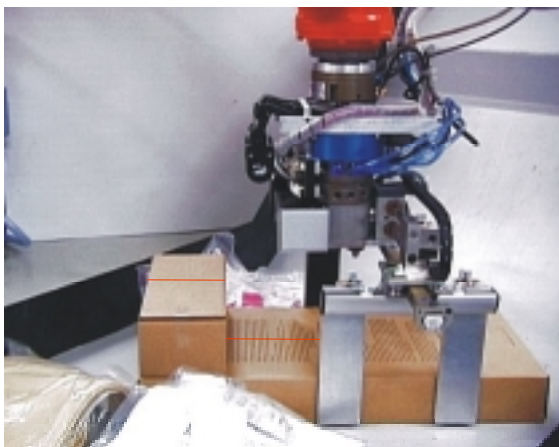


Abbildung 6.32: Der kleine Karton liegt auf dem großen gegriffenen Karton

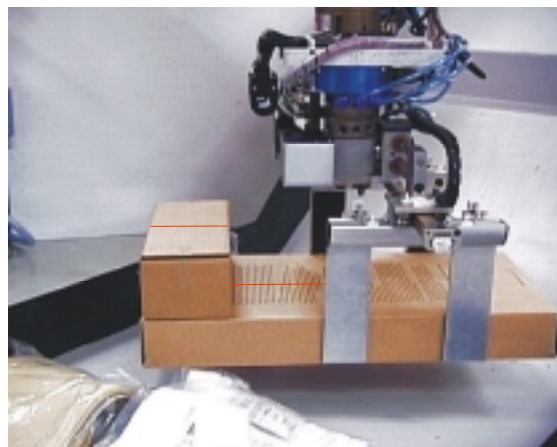


Abbildung 6.33: Die Projektion des Laserlichts bleibt unverändert

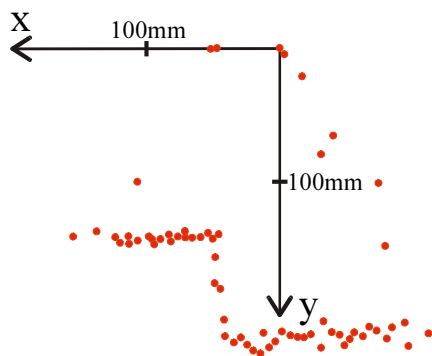


Abbildung 6.34: Meßverlauf vor dem Anheben des Objekts in Abbildung 6.32

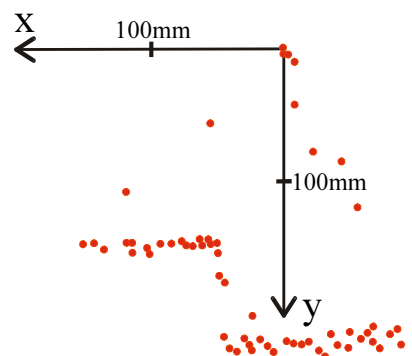


Abbildung 6.35: Unveränderter Meßverlauf beim Anheben

6.4.5 Regeln zur Anordnung und Auswahl von Sensoren

In diesem Abschnitt werden einige allgemeingültige Regeln und Zusammenhänge für die Anordnung und die Auswahl von Sensoren für Untersuchungs- und Überwachungsoperationen ermittelt. Je nach auszuführender Operation und diversen Randbedingungen muß ein Sensoreinsatz-Planungssystem die Regeln und Zusammenhänge verschieden gewichten und dadurch zur Auswahl einer bestimmten Sensoranordnung und -einsatzart kommen.

- Bei Positionierung von Sensoren im Arbeitsraum des Roboters sind die Sensoren kollisionsgefährdet. In unstrukturierten Szenen besteht die Gefahr zumindest leichter Kollisionen. Sensoren, welche bereits bei relativ sanfter Berührung eine erneute aufwendige Kalibrierung oder Parametereinstellung erfordern, sollten eher außerhalb des Arbeitsraums positioniert werden. Beispielsweise wurde der in Kapitel 3 beschriebene Triangulations-Laserscanner unter anderem deshalb an der Decke montiert.

- Damit Sensoren möglichst flexibel in verschiedenen Bereichen der Szene einsetzbar sind, sollten sie aktiv z.B. auf weiteren Robotern, eventuell über Zusatzachsen, montiert werden, wie im vorangegangenen Abschnitt und in Abbildung 6.25 gezeigt wurde.
- Ein Manipulator kann Sensoren genauer und wesentlich schneller positionieren als eine passive Kinematik, ist jedoch auch wesentlich teurer. Solch eine passive Kinematik mit einem am Ende montierten taktilen Sensor wurde in Abbildung 6.27 vorgestellt.
- Bildsensoren liefern im Vergleich zu eindimensionalen taktilen oder Entfernungssensoren bedeutend mehr Information, so daß für den gleichen Informationsgewinn weniger Bildsensoren als eindimensionale Sensoren erforderlich sind.
- Kontinuierliche Abtastung ist sinnvoll bei Untersuchungsoperationen zur Vermeidung falscher Zuordnung beim Wiedererkennen von Szenenbereichshinweisen und bei Überwachungsoperationen für das unverzügerte Erkennen ungewollten Mitanebens. In Anhang C ist beispielsweise beschrieben, daß das Wiedererkennen von Szenenbereichshinweisen in verschiedenen Bildern aufgrund von Sensorrauschen, visuellen Verdeckungen und dem Vorhandensein nur weniger lokaler charakteristischer Merkmale schwierig ist. Dieser Problematik kann dadurch begegnet werden, daß die Szenenbereichshinweise während Operationen z.B. durch Methoden unter Verwendung des optischen Flusses in den Bildern verfolgt oder unter Verwendung des im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen miniaturisierten Laserscanner in Folgen von Meßverläufen beobachtet werden.
- Aufwendige und zeitintensive Planung zur Kollisionsvermeidung ist erforderlich, wenn sich mehrere Kinematiken mit Sensoren gleichzeitig im Arbeitsraum befinden. Besonders schwierig ist dabei, daß die Bahnen nicht vorab genau geplant werden können, sondern sich in Abhängigkeit des Verlaufs der Operationsausführung ergeben.
- Durch einen taktilen Sensor im Arbeitsraum kann unter Umständen direkt das Mitaneben bei leichter Verhakung, welche z.B. aufgrund von Reibung bei eng nebeneinander liegenden Objekten auftritt, verhindert werden. Dadurch muß ein Entnahmevergang nicht zwangsläufig abgebrochen werden, falls ein Nachbarobjekt aufgrund einer leichten Einklemmung mitgehoben wird.
- Taktile Sensorik ist unabhängig von Lichteinflüssen. Selbst bei aktiver Beleuchtung mit Laserlicht kann Fremdlicht die Meßergebnisse optischer Sensoren völlig verfälschen, so daß bei ungewissen Beleuchtungsbedingungen oder auch bei stark reflektierenden Objekten taktile Sensorik Vorteile in der Zuverlässigkeit aufweist.
- Sensoren im Arbeitsraum ergeben im allgemeinen durch die kürzeren Entfernungen genauere Meßergebnisse als Sensoren außerhalb des Arbeitsraums. Beispielsweise wirken sich bei dem in Kapitel 3 vorgestellten Laserscanner kleinste Vibrationen der Laserdiode bereits in relativ großen Meßgenauigkeiten aus.

6.5 Entwicklung eines ROs der fünften Generation

6.5.1 Anwendung auf die Warenentnahme bei der Kommissionierung

In Kapitel 3 wurden Anwendungen für ROs im Versandhandel bei der Kommissionierung von Waren vorgestellt. Als Szenenbereichshinweise werden ebene Flächenstücke segmentiert, da

diese die Kartonverpackungen sehr gut beschreiben und auch für die Lokalisation von Weichware geeignet sind, wie in Anhang B gezeigt wird. Das generische Weltausschnitt-Modell enthält in diesem Beispiel also die Information, daß die Objekte entweder relativ große, ebene Oberflächen aufweisen, und daß alle Objekte, die nicht dieses Merkmal aufweisen, Weichware sind. Es soll an dieser Stelle jedoch nochmals betont werden, daß die Objekte nicht etwa unter Verwendung des Weltausschnitt-Modells durch Interpretation der Szenenbereichshinweise rekonstruiert werden. Das Weltausschnitt-Modell wird ausschließlich für die Segmentierung der Szenenbereichshinweise verwendet.

6.5.2 Integration vorhandener Zusatzinformation

Die in diesem Kapitel vorgeschlagene Strategie ermöglicht allgemein die Erforschung weitgehend unbekannter Szenen. Darüberhinaus kann jedoch auch über herkömmliche Methoden leicht zu gewinnende Information integriert werden. Wenn also beispielsweise unter Verwendung einer Wissensbasis mit Verfahren von ROs der dritten Generation manche Objekte sehr einfach identifiziert werden können, dann sollte diese Information auch genutzt werden. Diese Information läßt sich sehr einfach und effektiv direkt in die Wissensdarstellung eines ROs der fünften Generation integrieren. Aufgrund einer Identifikation ist nämlich bekannt, welche Objektteile zum identifizierten Objekt gehören. Insofern können dann direkt die entsprechenden Kanten im Graphen der Objektbeziehungen hoch bewertet werden, ohne erst Untersuchungsoperationen oder Propagationen ausführen zu müssen.

Eine ähnliche Situation liegt vor, wenn beispielsweise im Tiefenbild erkennbar ist, daß zwei Objekte sicher getrennt sind, weil zwischen ihnen ein durchgehender Streifen des Untergrunds sichtbar ist. In Abbildung 6.36 sind im linken Teilbild die segmentierten ebenen Flächenstücke sowie die blau markierten Unbekannt-Bereiche von oben zu sehen. Auf der umgebenden weißen Fläche ist der Untergrund der Szene sichtbar. Im rechten Teilbild sind die Bereiche, welche aufgrund der Sichtbarkeit des Untergrunds sicher voneinander getrennt sind, verschieden eingefärbt. Aufgrund dieser Information können einige Kanten im Graphen mit Null bewertet werden, bevor der Roboter eine Untersuchungsoperation ausgeführt hat. Wenn zwischen zwei Bereichen der Untergrund durchgehend sichtbar ist, dann können die Bereiche auch nicht etwa durch matte schwarze Gegenstände miteinander verbunden sein. Zusätzlich zum Heruntersetzen von Kantenbewertungen im Beziehungsgraphen, also der Clusterung, können die Cluster auch noch mit der Zusatzinformation versehen werden, daß die Überwachung auf ungewolltes Mitaneben des einen Clusters beim Entnehmen von Objekten aus dem anderen Cluster nicht erforderlich ist.

Da sich die Integration von einfach zu gewinnender Information über die Szene in der Wissensdarstellung, also im Graphen der Beziehungen, ähnlich auswirkt wie die Ergebnisse von mit dem Roboter ausgeführten Untersuchungsoperationen, wird zur Integration dieser Information im folgenden Abschnitt der Begriff „fiktive Untersuchungsoperation“ verwendet.

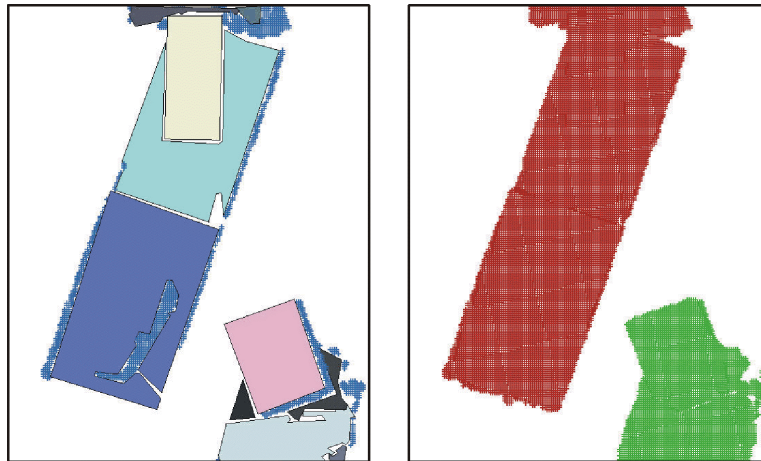


Abbildung 6.36: Clusterung durch Sichtbarkeit des Untergrunds

6.5.3 Gesamtablauf der Warenentnahme

Abbildung 6.37 zeigt den Objektentnahmezyklus für ROs der fünften Generation aus Abbildung 6.1 mit einer detaillierten Darstellung des Blocks „Untersuchungsoperation“. Es ist ersichtlich, daß drei Typen von Untersuchungsoperationen unterschieden werden können. Wenn die relativen Lageänderungen zwischen Szenenbereichshinweisen mit taktilen Sensoren erfaßt werden, dann verläuft der Kontrollfluß vom „inkrementellen Verschieben“ direkt zur „Auswertung der Untersuchungsoperation“, was in der rechten Spalte im Block „Untersuchungsoperation“ dargestellt ist.

Wenn hingegen nach der „inkrementellen Verschiebung“ eine erneute Bildaufnahme erforderlich ist, dann erfolgt ein erneuter Durchlauf einer Bildaufnahme- und -auswerteschleife. Eine in diesem Fall erforderlich Aufgabe ist die Zuordnung von Szenenbereichshinweisen aus dem neuen und dem alten Bild, also das in Anhang C beschriebene Wiedererkennen. Dieser Typ der Untersuchungsoperation ist in der mittleren Spalte dargestellt.

Über die linke Spalte ist die Integration von Zusatzinformation möglich, wie im vorhergehenden Abschnitt beschrieben. Wenn dazu in bestimmten Anwendungen Objektidentifikation durchgeführt wird, dann ist auch noch das Weltausschnitt-Modell zur Interpretation der Szenenbereichshinweise erforderlich. Dieser Informationsfluß ist in Abbildung 6.37 jedoch aus Gründen der Übersichtlichkeit und der verständlichen Darstellung absichtlich nicht eingezeichnet. Die Einkopplung dieser Information steht nämlich im krassen Widerspruch zu der Strategie von ROs der fünften Generation. Die „fiktiven Untersuchungsoperationen“ und insbesondere Objektidentifikation sind ganz und gar nicht erforderlich für den Betrieb eines ROs der fünften Generation. Sie sind hier lediglich mit aufgenommen, um über andere Strategien und Informationsquellen einfach zu gewinnende Information einfach und effektiv integrieren zu können.

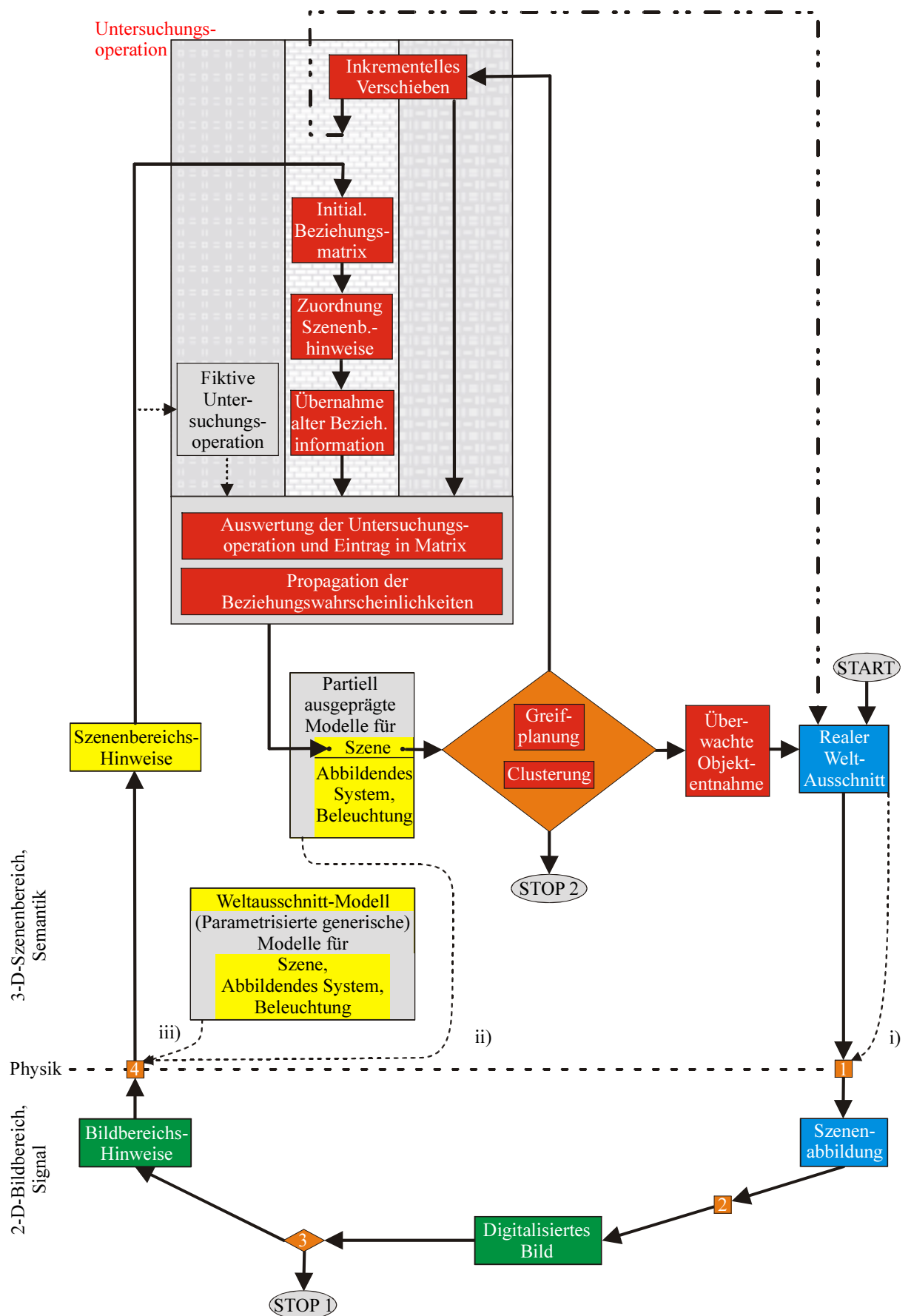


Abbildung 6.37: Ablaufdiagramm der Realisierung von ROs der fünften Generation

6.5.4 Umgang mit flexiblen und gekrümmten Objekten

Bei dem im Rahmen dieser Arbeit realisierten RO für Kommissionieraufgaben im Versandhandel wird nur die Hardware auf Zusammengehörigkeit untersucht und hinsichtlich ungewollten Mitanebens überwacht. Es wird dabei implizit davon ausgegangen, daß die Weichware beim eventuellen Herunterfallen nicht beschädigt wird und zu keinen Behinderungen oder Zerstörungen führt. Deshalb wird die Weichware in der Realisierung in dieser Arbeit als letztes entnommen, wenn die Hardware bereits zuverlässig entnommen ist.

Abbildung 6.38 zeigt ein Bild aus [Trobina 95]. Dort werden konvexe Objektteile über die Bestimmung ebener Flächenstücke segmentiert. Die in diesem Kapitel vorgestellte Strategie läßt sich direkt auf die Untersuchung solcher Szenen anwenden. In dem Fall sind die Primitive nicht ebene Flächenstücke, sondern konvex geformte Objektteile. In [Trobina 95] wird versucht, über Heuristiken die Zusammengehörigkeit der konvexen Objektteile zu bestimmen, was jedoch nicht zuverlässig ist, wie bereits in Kapitel 2 beschrieben wurde.

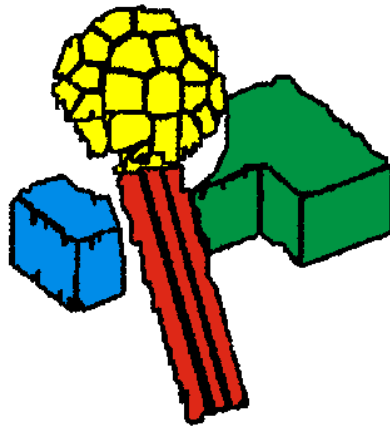


Abbildung 6.38: Konvexe Objektteile nach [Trobina 95]

An diesem Beispiel ist erkennbar, daß die in diesem Kapitel vorgestellte Strategie uneingeschränkt auf Objekte mit gekrümmten Oberflächen anwendbar ist, wenn eine Bildauswertung zur Verfügung steht, welche auch Teile mit komplex geformten Oberflächen segmentieren kann.

6.6 Abschätzungen zur Wirtschaftlichkeit

6.6.1 Methodik zur Wirtschaftlichkeitsabschätzung

Es ist eine wichtige Aufgabe, die Wirtschaftlichkeit des Einsatzes eines ROs abzuschätzen, da das Management eines Unternehmens im allgemeinen auf der Basis dieser Analyse entscheidet, ob ein RO für eine bestimmte Aufgabe eingesetzt werden soll. In den folgenden Abschnitten wird die Wirtschaftlichkeit verschiedener Systeme, eines ROs der zweiten Generation (RO2), eines ROs der fünften Generation (RO5) und eines manuellen Systems mit Arbeitern (A), zur Objektentnahme von ungeordneten Haufen miteinander verglichen.

In der Industrie werden häufig die drei im folgenden skizzierten Methoden zur Wirtschaftlichkeitsanalyse eingesetzt [Groover et al. 87]. Im Idealfall sollte unabhängig von der benutzten Methode die gleiche Entscheidung erreicht werden, was jedoch nicht immer der Fall ist.

- Bei der „Rückzahlungsmethode“ wird die Dauer bestimmt, nach welcher der akkumulierte Netto-Cash-Flow gerade die Anfangsinvestitionen überschreitet. Ein Nachteil dieser Methode ist, daß sie den Zeitwert des Geldes vernachlässigt.
- Die „Methode der gleichbleibenden jährlichen Kosten“ (engl. Equivalent Uniform Annual Cost Method EUAC) rechnet alle gegenwärtigen und zukünftigen Investitionen und Cash-Flows in gleichwertige und gleichgroße, über die Lebensdauer des Projektes gleichmäßig verteilte Cash-Flows um. Wenn die sich so ergebenden gleichbleibenden jährlichen Kosten positiv sind, wäre ein Projekt nach dieser Methode eine gute Investition.
- Die „Return-on-Investment“-Methode (ROI) bestimmt die Gewinnmarge des vorgeschlagenen Projektes auf der Grundlage der geschätzten Kosten und Einkünfte. Diese Gewinnmarge wird dann mit der minimalen attraktiven Gewinnmarge (MAGM) des Unternehmens verglichen, um zu entscheiden, ob die Investition gerechtfertigt ist.

In dieser Arbeit soll die Wirtschaftlichkeit eines Systems nicht in absoluten Werten bestimmt werden. Vielmehr interessiert hier der Vergleich der verschiedenen Systeme. Damit es zu keiner Verfälschung der Ergebnisse durch verschiedene Zykluszeiten kommt, werden direkt die zeitbereinigten effektiven Kosten für jeweils eine Objektentnahme miteinander verglichen. Da hierzu die Gesamtinvestitionen, die Betriebskosten und die Entsorgungskosten gleichmäßig über die gesamte Laufzeit des Systems verteilt werden, ähnelt diese Vorgehensweise am ehesten der „Methode der gleichbleibenden jährlichen Kosten“.

6.6.2 Einflußfaktoren

Die zeitbereinigten effektiven Gesamtkosten G für eine Entnahmeoperation setzen sich aus zwei wichtigen Anteilen G_1 und G_2 zusammen:

- Damit das RO zur Verfügung steht und arbeiten kann, müssen gemäß Abbildung 4.2 Investitionskosten für Einkauf, Konstruktion, Planung, Installation und die eventuelle Umrüstung bestehender Anlagen, weiterhin Betriebskosten für Energie, Rohstoffe, Wartung, Nutzungsausfall, Personal und Schulung, auch die Entsorgungskosten, sowie schließlich Zinsen in Betracht gezogen werden. All diese Kosten werden über die Gesamtlaufzeit gleichmäßig verteilt, so daß Systemkosten pro Stunde L angegeben werden können. Wenn L durch die mittlere Anzahl von Entnahmeoperationen pro Stunde geteilt wird, ergibt sich der erste Anteil G_1 an den Gesamtkosten G .
- Der zweite wichtige Anteil G_2 kommt durch Wertverluste aufgrund von Zerstörungen der zu entnehmenden Objekte oder auch der Peripherie zustande. Es wird hier zur Vereinfachung angenommen, daß alle Systeme gleichermaßen kraftüberwacht und frei von schweren Kollisionen die Objekte entnehmen können, so daß sie nicht durch das Zugreifen selbst zerbrechen oder aus dem Greifer rutschen. Hier soll insbesondere der Wertverlust bestimmt werden, welcher sich durch das in diesem Kapitel behandelte Problem des unbeabsichtigten Mitanhebens benachbarter Objekte mit Folge des Herunterfallens ergibt. Mit Z wird der Gesamtwertverlust bezeichnet, der sich ergibt, wenn ein Objekt ungewollt mitangehoben wird. Z setzt sich zusammen aus dem mittleren Wert der Objekte, welche beim Herunterfallen zerstört werden, und dem mittleren Schaden, welcher sich durch das Herunterfallen auf Teile der Peripherie ergibt. Dabei

können auch indirekt beispielsweise dadurch Schäden entstehen, daß Objekte auf den Greiferständer fallen und es deshalb zu einer Kollision beim nächsten Ablegen eines Greifers kommt. Durch Multiplikation der Wahrscheinlichkeit, also der Bewertung, für unbeabsichtigtes Mitaneben M mit der Wahrscheinlichkeit S für das Eintreten des Gesamtverlusts Z bei ungewolltem Mitaneben ergibt sich die Wahrscheinlichkeit K , daß der Wertverlust Z bei einer Objektentnahme eintritt. Durch Multiplikation von Z mit K ergibt sich der Anteil G_2 .

Für die Abschätzungen werden Größen zur Beschreibung der Szene benötigt, wie die mittlere Anzahl A von Objekten in der Szene, der bereits früher in Abschnitt 6.2.1 eingeführte Komplexitätsgrad \tilde{K} mit Werteskala zwischen Null und Zehn sowie ein Stabilitätsgrad \tilde{S} , ebenfalls mit Skala zwischen Null und Zehn. $\tilde{S} = 0$ bedeutet, daß beim Herunterfallen eines Objekts überhaupt kein Wertverlust eintritt. $\tilde{S} = 10$ hingegen bedeutet, daß bei jedem Herunterfallen der volle Wert Z verloren geht. Diese Größe wurde Stabilitätsgrad genannt, weil sie in Bezug auf die Szene selbst im wesentlichen die Zerbrechlichkeit der Objekte beschreibt. Sie soll zur Beschränkung der explizit aufzuführenden Einflußgrößen gemäß obiger Erläuterungen jedoch auch die Wahrscheinlichkeit für Beschädigungen der Peripherie beinhalten.

Übersicht der verwendeten Variablen

| | |
|----------------|---|
| G | Gesamtkosten pro Entnahmeoperation |
| G_1 | Anteil an G aufgrund von Investitionen, Betrieb, Zinsverlust und Entsorgung |
| G_2 | Anteil an G aufgrund von Zerstörungen der Objekte oder der Peripherie |
| L | Kosten pro Stunde für das Entnahmesystem |
| O | Operationen / h (Arbeiter, RO2: Entnahmen; RO5: auch Untersuchungsop.) |
| Z | Wertverlust bei Zerstörung |
| A | Anzahl der vorhandenen Objekte |
| K | Wahrscheinlichkeit für eine unbeabsichtigte Zerstörung |
| M | Wahrscheinlichkeit für ungewolltes Mitaneben |
| S | Wahrscheinlichkeit für Verlust des Werts Z bei Herunterfallen |
| \tilde{K} | Komplexitätsgrad |
| \tilde{S} | Stabilitätsgrad |
| \tilde{p} | Erforderliche Kantenbewertung und Wahrscheinlichkeit für Zuverlässigkeit |
| $m(\tilde{p})$ | Für eine Kante notwendige Anzahl von Untersuchungsoperationen |
| $c(\tilde{p})$ | Mehraufwand für eine Kante zur Diagonalpropagation |
| N | Anzahl notwendiger Untersuchungsoperationen für ein Cluster |

6.6.3 Effektive Kosten für eine Objektentnahme

In diesem Abschnitt werden die zeitbereinigten effektiven Kosten für eine Objektentnahme für die drei verschiedenen Systemtypen aufgestellt.

Manuelle Objektentnahme durch Arbeiter (A)

| | |
|---|--|
| Anteil $G_{1,A}$ an Gesamtkosten G_A pro Entnahmeoperation | $G_{1,A} = \frac{L_A}{O_A}$ |
| Wahrscheinlichkeit M_A für ungewolltes Mitaneben Annahme: $M_A \leq 5\%$, da Mensch sehr gute Sensorik hat | $M_A = \frac{\tilde{K}}{200}$ |
| Wahrscheinlichkeit S für Wertverlust Z bei Herunterfallen | $S = \frac{\tilde{S}}{10}$ |
| Wahrscheinlichkeit K_A für unbeabsichtigte Zerstörung | $K_A = M_A \cdot S = \frac{\tilde{K} \cdot \tilde{S}}{2000}$ |
| Anteil $G_{2,A}$ an Gesamtkosten G pro Entnahmeoperation | $G_{2,A} = K_A \cdot Z = \frac{\tilde{K} \cdot \tilde{S}}{2000} \cdot Z$ |
| Gesamtkosten G_A pro Entnahmeoperation | $G_A = \frac{L_A}{O_A} + \frac{\tilde{K} \cdot \tilde{S}}{2000} \cdot Z$ |

RO der zweiten Generation (RO2)

| | |
|---|---|
| Anteil $G_{1,RO2}$ an Gesamtkosten G_{RO2} pro Entnahmeoperation | $G_{1,RO2} = \frac{L_{RO2}}{O_{RO2}}$ |
| Wahrscheinlichkeit M_{RO2} für ungewolltes Mitaneben Annahme: $M_{RO2} \leq 100\%$, da keine Überwachung | $M_{RO2} = \frac{\tilde{K}}{10}$ |
| Wahrscheinlichkeit S für Wertverlust Z bei Herunterfallen | $S = \frac{\tilde{S}}{10}$ |
| Wahrscheinlichkeit K_{RO2} für unbeabsichtigte Zerstörung | $K_{RO2} = M_{RO2} \cdot S = \frac{\tilde{K} \cdot \tilde{S}}{100}$ |

| | |
|--|---|
| Anteil $G_{2,RO2}$ an Gesamtkosten G pro Entnahmeoperation | $G_{2,RO2} = K_{RO2} \cdot Z = \frac{\tilde{K} \cdot \tilde{S}}{100} \cdot Z$ |
| Gesamtkosten G_{RO2} pro Entnahmeoperation | $G_{RO2} = \frac{L_{RO2}}{O_{RO2}} + \frac{\tilde{K} \cdot \tilde{S}}{100} \cdot Z$ |

RO der fünften Generation (RO5)

| | |
|---|---|
| <p>Untersuchungsoperationen N_{RO5} pro Cluster</p> <p>Annahmen: → Anwendung von Diagonalpropagation → Ein reales Objekt werde durch \tilde{K} Szenenbereichshinweise beschrieben</p> | <p>Wenn bei einer Untersuchungsoperation alle Beziehungen zwischen allen Primitiven auf einmal, also gleichzeitig, untersuchbar sind:</p> $N_{RO5, \text{gleichzeitig}} = m(\tilde{p}, \tilde{K}) = \left[\frac{\tilde{K}}{18} \cdot \left(\frac{1}{1-\tilde{p}} - 2 \right) \right]$ <p>Wenn jede Beziehung zwischen Primitiven durch eigene Untersuchungsoperationen erforscht werden muß:</p> $N_{RO5, \text{einzel}} \leq \frac{1}{2} \cdot A \cdot (A-1) + c(\tilde{p}) \cdot m(\tilde{p}, \tilde{K}) \cdot \tilde{K}$ $\leq \frac{1}{2} \cdot A \cdot (A-1) + 1.5 \cdot \left[\frac{\tilde{K}}{18} \cdot \left(\frac{1}{1-\tilde{p}} - 2 \right) \right] \cdot \tilde{K}$ |
| Anteil $G_{1,RO5}$ an Gesamtkosten G_{RO5} pro Entnahmeoperation | $G_{1,RO5} = \frac{L_{RO5}}{O_{RO5}} \cdot \left(1 + \frac{N_{RO5,x}}{A} \right)$ |
| Wahrscheinlichkeit M_{RO5} für ungewolltes Mitanheben | $1 - \tilde{p}$ |
| Wahrscheinlichkeit S für Wertverlust Z bei Herunterfallen | $S = \frac{\tilde{S}}{10}$ |
| Wahrscheinlichkeit K_{RO5} für unbeabsichtigte Zerstörung | $K_{RO5} = M_{RO5} \cdot S = (1 - \tilde{p}) \cdot \frac{\tilde{S}}{10}$ |
| Anteil $G_{2,RO5}$ an Gesamtkosten G pro Entnahmeoperation | $G_{2,RO5} = K_{RO5} \cdot Z = (1 - \tilde{p}) \cdot \frac{\tilde{S}}{10} \cdot Z$ |
| Gesamtkosten G_{RO5} pro Entnahmeoperation | $G_{RO5} = \frac{L_{RO5}}{O_{RO5}} \cdot \left(1 + \frac{N_{RO5,x}}{A} \right) + (1 - \tilde{p}) \cdot \frac{\tilde{S}}{10} \cdot Z$ |

6.6.4 Gegenüberstellung der Kosten

Basierend auf den im vorhergehenden Abschnitt bestimmten zeitbereinigten effektiven Kosten für eine Objektentnahme werden in diesem Abschnitt Ungleichungen angegeben zum Vergleich der Wirtschaftlichkeit zwischen verschiedenen Systemen. Die Ungleichungen können nach den interessierenden Größen aufgelöst werden, so daß deren Analyse in Abhängigkeit der anderen Größen möglich ist.

Manuelle Objektentnahme durch Arbeiter (A) - RO der zweiten Generation (RO2)

Damit ein RO der zweiten Generation wirtschaftlicher ist als der Einsatz von Arbeitern für die Entnahme von Objekten von ungeordneten Haufen, müssen die Gesamtkosten für eine Objektentnahme durch das RO kleiner sein als die Gesamtkosten bei Entnahme durch Arbeiter, und somit muß folgende Ungleichung gelten:

$$G_{RO2} < G_A \quad \Leftrightarrow \quad 0.0095 \cdot \tilde{K} \cdot \tilde{S} \cdot Z < \frac{L_A}{O_A} - \frac{L_{RO2}}{O_{RO2}}$$

Arbeiter (A) - RO der fünften Generation (RO5)

Entsprechend dem Vergleich A-RO2 ergibt sich hier folgende Ungleichung:

$$G_{RO5} < G_A \quad \Leftrightarrow \quad (0.1 - 0.1 \cdot \tilde{p} - 0.0005 \cdot \tilde{K}) \cdot \tilde{S} \cdot Z < \frac{L_A}{O_A} - \frac{L_{RO5}}{O_{RO5}} \cdot \left(1 + \frac{N_{RO5,x}}{A}\right)$$

RO der zweiten Generation (RO2) - RO der fünften Generation (RO5)

Ein RO der fünften Generation ist insgesamt wirtschaftlicher als ein RO der zweiten Generation, wenn folgende Ungleichung erfüllt ist:

$$G_{RO5} < G_{RO2} \quad \Leftrightarrow \quad (0.1 - 0.1 \cdot \tilde{p} - 0.01 \cdot \tilde{K}) \cdot \tilde{S} \cdot Z < \frac{L_{RO2}}{O_{RO2}} - \frac{L_{RO5}}{O_{RO5}} \cdot \left(1 + \frac{N_{RO5,x}}{A}\right)$$

6.6.5 Beispiele für Abschätzungen zur Wirtschaftlichkeit

Abschließend werden in diesem Abschnitt für ein realistisches Beispielszenario jeweils die erlaubten Minimal- bzw. Maximalwerte der Wertverluste bei Zerstörung von Objekten berechnet für wirtschaftlichen Einsatz verschiedener Systeme.

Beispielszenario

| | |
|---------------------|---|
| L_A | 50 DM/h Gesamt-Stundenlohn für Arbeiter |
| L_{RO2} | 4,67 DM/h \approx 350 TDM Gesamtkosten für RO / 10a Laufzeit |
| L_{RO5} | 5,34 DM/h \approx 400 TDM Gesamtkosten für RO / 10a Laufzeit; L_{RO5} ist wegen des erhöhten Sensorbedarfs etwas höher angesetzt als L_{RO2} |
| O_A | 200/h Entnahmeoperationen pro Stunde durch Arbeiter |
| $O_{RO2} = O_{RO5}$ | 100/h Entnahmeoperationen pro Stunde durch RO2 bzw. 100/h Untersuchungs- oder Entnahmeoperationen pro Stunde durch RO5; Eine Untersuchungsoperation dauere also genau so lang wie eine |

| | |
|-------------|---|
| | Entnahmeoperation |
| A | 20 Objekte in Szene vorhanden |
| \tilde{K} | Komplexitätsgrad 3 |
| \tilde{S} | Grad 3 für Stabilität und Beschädigung von Peripherie bei Herunterfallen |
| \tilde{p} | 0.95 → Also Wahrscheinlichkeit $(1 - \tilde{p}) = 0.05$ für unbeabsichtigtes Mitaneben |
| $N_{RO5,x}$ | Bei der Bestimmung der Anzahl der erforderlichen Untersuchungsoperationen wird hier davon ausgegangen, daß alle Beziehungen zwischen allen Primitiven auf einmal, also gleichzeitig, untersuchbar sind → $N_{RO5, \text{gleichzeitig}}$ (siehe Abschnitt 6.6.3) |

Es ergeben sich bei diesem Beispielszenario durch Einsetzen der angenommenen Werte in die Ungleichungen in Abschnitt 6.6.4 folgende zwei Hauptergebnisse:

- Damit sich der Einsatz eines ROs der zweiten Generation im Verhältnis zur manuellen Objektentnahme durch Arbeiter lohnt, muß der Wertverlust bei Zerstörung des Objekts und der Peripherie bei einem ungewollten Herunterfallen 2,37 DM *unterschreiten*. Wenn man von der Beschädigung der Peripherie absieht, dürfen die zu entnehmenden Objekte also maximal 2,37 DM kosten. Dieses Ergebnis kommt daher, daß der Mensch durch seinen leistungsfähigen Sensorapparat ungewolltes Mitaneben im allgemeinen erkennen und vermeiden kann, während ROs der zweiten Generation keine Möglichkeit haben, ungewolltes Mitaneben zu vermeiden, so daß es in Abhängigkeit der Komplexität der Szene relativ häufig zu ungewolltem Mitaneben kommt. Bei Objekten mit niedrigem Wert ist es dann wirtschaftlich nicht so gravierend, wenn hin und wieder ein Objekt zerstört wird. Durch die im Vergleich zu Arbeitern doch recht niedrigen stündlichen Gesamtkosten lohnt sich der Einsatz von ROs der zweiten Generation im Vergleich zu Arbeitern also bei Objekten mit relativ niedrigem Wert.
- Der Einsatz von ROs der fünften Generation ist gegenüber der manuellen Objektentnahme durch Arbeiter dann wirtschaftlich vorteilhaft, wenn der Wertverlust, also bei Absehen von der Beschädigung der Peripherie quasi der Preis der Objekte, 7,80 DM *überschreitet*. ROs der fünften Generation lohnen sich wirtschaftlich also nicht beim Entnehmen von Objekten mit niedrigem Wert, da dann der Untersuchungsaufwand nicht gerechtfertigt ist. Sehr wohl ergeben sich aufgrund der positiven Eigenschaft, ungewolltes Mitaneben zuverlässig zu vermeiden, erhebliche wirtschaftliche Vorteile beim Entnehmen von eher teuren Objekten. Dann sind ROs der fünften Generation aufgrund ihrer relativ niedrigen stündlichen Gesamtkosten deutlich wirtschaftlicher als Arbeiter. Somit ist es beispielsweise durchaus wirtschaftlich gerechtfertigt, in der realen Versandhandlungsumgebung, in welcher der Demonstrator dieser Arbeit getestet wurde, ein RO der fünften Generation einzusetzen.
- Es kann nicht pauschal gesagt werden, daß ein RO der fünften Generation wirtschaftlich günstiger ist als ein RO der zweiten Generation, und umgekehrt. Wie erläutert, hängt die Wirtschaftlichkeit des jeweiligen ROs wesentlich von der Entnahmeaufgabe selbst ab. ROs der fünften Generation sind gegenüber ROs der zweiten Generation generell bei der Entnahme von eher teuren Objekten wirtschaftlich überlegen.

6.7 Experimentelle Ergebnisse

In Kapitel 5 wurden bereits Experimente mit den Benchmarks „Verdeckter Bereich“ und „Greiferwechsel“ erfolgreich ausgeführt. Da die dort entwickelten und eingesetzten Greifplanungsalgorithmen auch bei der Realisierung des ROs der fünften Generation integriert sind, ergeben sich bei diesen Benchmarks die gleichen Ergebnisse. In Abschnitt 6.2.1 wurde ja auch gezeigt, daß das RO der fünften Generation in ein RO der zweiten Generation übergeht, wenn die Zuverlässigkeit auf den Wahrscheinlichkeitswert 0.5 gesetzt wird.

Es stehen also an dieser Stelle lediglich noch Experimente mit dem Benchmark „Ungewolltes Mitaneben“ aus.

6.7.1 Benchmark „Ungewolltes Mitaneben“

Für beide in Kapitel 4 vorgestellten Instanzen des Benchmarks „Ungewolltes Mitaneben“ werden im folgenden die kompletten Objektentnahmeabläufe dargestellt. Die Erläuterungen sind direkt in die Bildunterschriften integriert.

In der linken Spalte sind RobCAD-Simulationen zu sehen, die anzeigen, welche Information das RO bereits über die Beziehungen zwischen den Szenenbereichshinweisen gewonnen hat. Die jeweils rechts unten eingezeichneten farbigen Balken geben die Bewertung, also die Wahrscheinlichkeit an, mit der die Szenenbereichshinweise mit der jeweiligen Farbe zusammengehören. Dieser Wert entspricht also der niedrigsten Beziehungsbewertung innerhalb des jeweiligen Clusters. Ein voller Balken bedeutet 100%. Die weiße Linie innerhalb eines Balkens zeigt den Schwellwert \tilde{p} an, die schwarze Linie die 50%-Grenze. In der RobCAD-Simulation wird jeweils bereits der Griff angezeigt, mit welchem der Roboter als nächstes entweder ein Objekt entnimmt oder im Rahmen einer Untersuchungsoperation verschiebt.

Rechts neben den RobCAD-Simulationen sind jeweils Photos vom RO nach der realen Ausführung des Anhebens beim Entnehmen eines Objekts oder des Verschiebens bzw. Verdrehens bei einer Untersuchungsoperation zu sehen.

In diesem Experiment ist der Komplexitätsgrad \tilde{K} auf den Wert 3 gesetzt. Die Teile sind bereits wesentlich komplexer geformt als beispielsweise Bälle, so daß es zu ungewolltem Mitaneben kommen kann. Es handelt sich jedoch bei weitem noch um keine hoch komplexe Szene wie z.B. eine Kiste voller Kronleuchter. Aus dem Grund, und da die Szene nur mäßig gefüllt ist, wird ein Wert im unteren Bereich der von Null bis Zehn verlaufenden Skala zur Beschreibung der Komplexität der Szene ausgewählt. Der Stabilitätswert \tilde{S} ist ebenfalls auf den Wert 3 im unteren Bereich der Skala, welche von Null bis Zehn verläuft, gesetzt. Als Grenzbewertung für die Annahme, daß Primitive miteinander verbunden sind, wird hier der Wert $\tilde{p} = 0.95$ verwendet.

Als „fiktive Untersuchungsoperationen“ wird lediglich gemäß Abschnitt 6.5.2 die Information integriert, daß bestimmte Bereiche der Szene sicherlich voneinander getrennt sind bei durchgehender Sichtbarkeit des Untergrunds zwischen diesen Bereichen. Weitergehende Information aus einer eventuellen Objektidentifikation oder einer geometrischen Rekonstruktion wird hier absichtlich **nicht** integriert, um deutlich zu zeigen, daß die zuverlässige Entnahme weitgehend unbekannter Objekte möglich ist. Entsprechend könnte bei Berücksichtigung geometrischer Schlußfolgerungen, welche jedoch gemäß den Erläuterungen in dieser Arbeit oftmals fehlerhaft verlaufen, teilweise eine andere

Entnahmereihenfolge schneller zum Ziel führen. Das RO führt hier keinerlei räumliche geometrische Rekonstruktion der Objekte durch. Es werden lediglich die Beziehungen zwischen den segmentierten Primitiven untersucht mit dem Ziel, lose Nachbarobjekte hinsichtlich ungewollten Mitanebens zuverlässig überwachen zu können.

Die gemäß Anhang B lokalisierten in Folie verpackten Textilien werden in den Experimenten zum Schluß ohne Überwachung entnommen. Dabei wird vereinfachend davon ausgegangen, daß durch ungewolltes Mitaneben von Weichware kein Schaden entsteht. Auf die Sonderstellung flexibler Objekte wird in Abschnitt 7.2 eingegangen.

Das RO der fünften Generation hat die Experimente vollkommen autonom ausgeführt, also ohne jegliches menschliches Eingreifen, mit Ausnahme des Befüllens der Szene zu Beginn der Experimente.

Instanz A

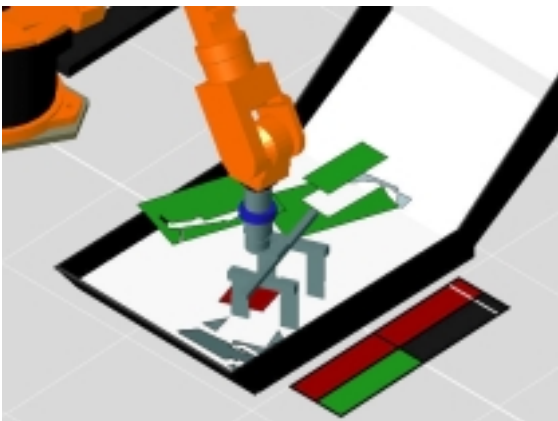


Abbildung 6.39: Durch die Sichtbarkeit des Untergrunds sind bereits der rote und grüne Bereich sicher voneinander getrennt. Von den drei Primitiven im grün gezeichneten Bereich ist nicht bekannt, ob sie zusammengehören. Entsprechend ist die Bewertung 0.5 im Balkendiagramm eingezeichnet. Im roten Bereich kann jedoch nur ein Primitiv gefunden werden, welches sicher, also zu 100%, mit sich selbst verbunden ist.



Abbildung 6.40: Der Roboter hat das Objekt, welches zum in Abbildung 6.39 rot eingezeichneten Szenenbereichshinweis gehört, gegriffen und zur Entnahme angehoben. Da alle losen Nachbarprimitive derart weit von diesem Objekt entfernt liegen, daß der Untergrund zwischen den Bereichen durchgehend sichtbar ist, darf das Objekt gemäß der Begründung in Abschnitt 6.5.2 ohne Überwachung auf ungewolltes Mitaneben entnommen werden.

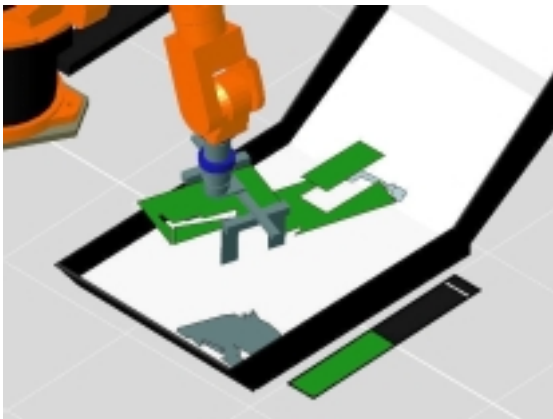


Abbildung 6.41: Da das grüne Cluster nicht bewegt wurde, hat sich die Bewertung für die Zusammengehörigkeit auch nicht erhöht.

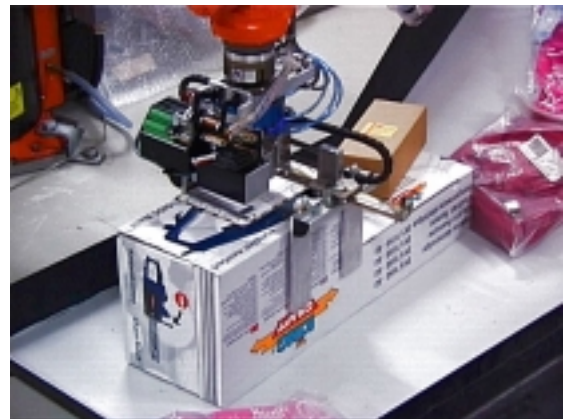


Abbildung 6.42: Der Roboter hat das durch einen Szenenbereichshinweis beschriebene Objektteil gegriffen und etwas verdreht.

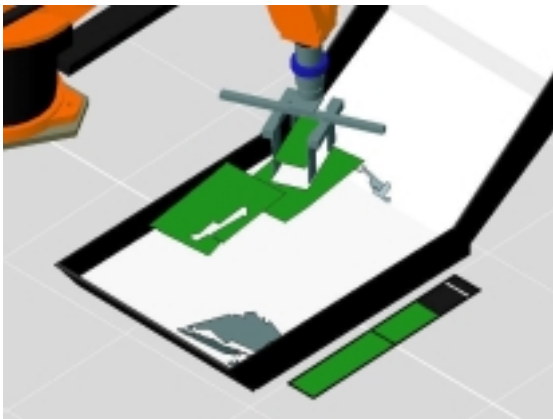


Abbildung 6.43: Da sich die relativen Lagen der Primitive des Clusters während der Untersuchungsoperation nicht verändert haben, erhöht sich die Bewertung für Zusammengehörigkeit.



Abbildung 6.44: Der Roboter verdreht das zu einem anderen Szenenbereichshinweis gehörende Objektteil. Drehoperationen haben den Vorteil, daß sie die Objekte nicht weit deplazieren, so daß die Wahrscheinlichkeit des Herunterfallens von Objekten innerhalb der Szene während einer Untersuchungsoperation kleiner ist als bei Ausführung translatorischer Schiebeoperationen.

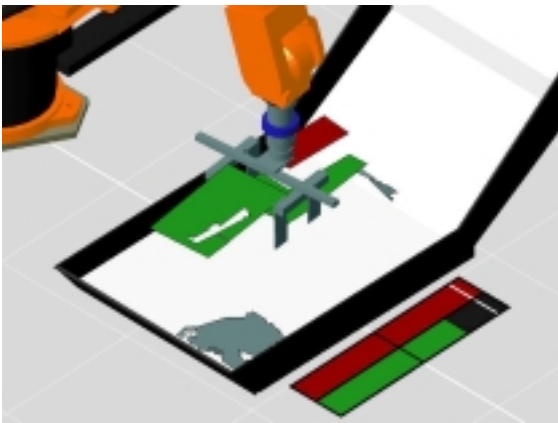


Abbildung 6.45: Aufgrund der relativen Lageänderung konnte festgestellt werden, daß das rot eingefärbte Primitiv von den anderen getrennt ist. Es bildet deshalb ein neues Cluster. Die Bewertung für Zusammengehörigkeit der grünen Primitive hat sich nicht erhöht.



Abbildung 6.46: Der Roboter hat wiederum das zu einem anderen Szenenbereichshinweis gehörende Objektteil etwas verdreht.

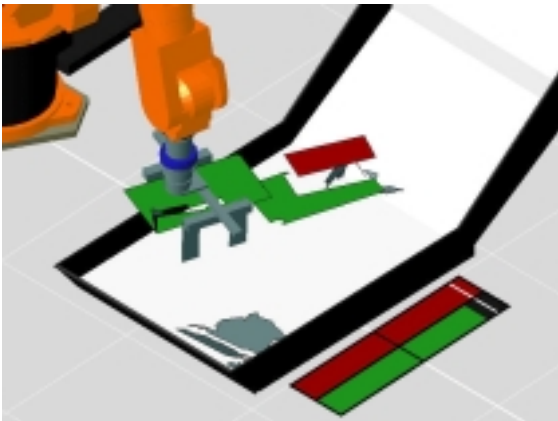


Abbildung 6.47: Durch die gemeinsame Bewegung der grünen Primitive hat sich deren Bewertung erhöht.

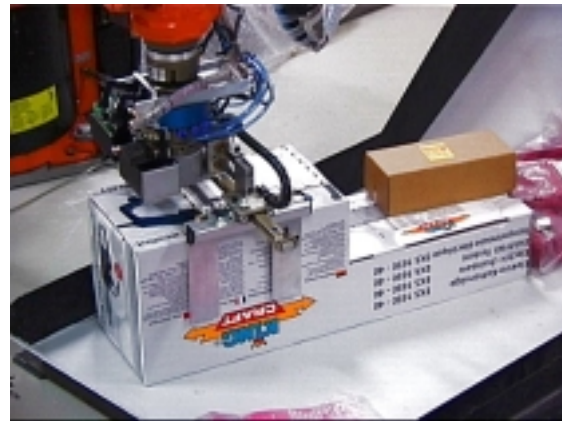


Abbildung 6.48: Der Roboter hat das durch einen Szenenbereichshinweis beschriebene Objektteil etwas verschoben.

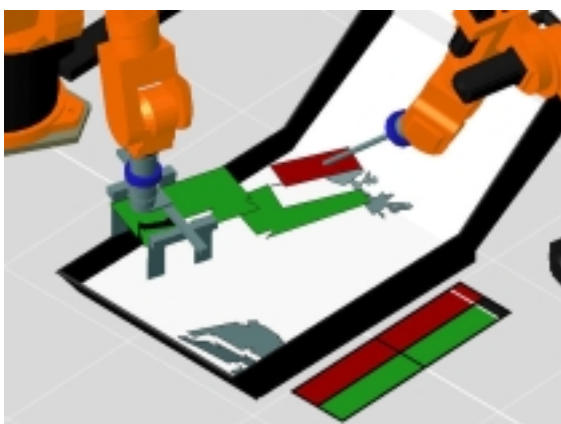


Abbildung 6.49: Die Grenzbewertung, also die weiße Begrenzungslinie, ist für alle Cluster erreicht.



Abbildung 6.50: Mit einem taktilen Sensor wird das lose Cluster auf ungewolltes Mitanheben überwacht.

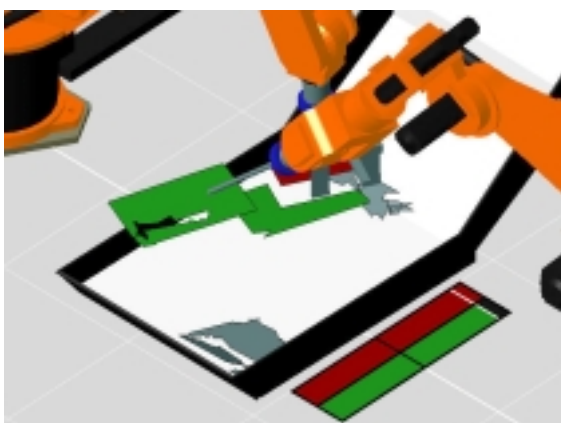


Abbildung 6.51: Da ungewolltes Mitanheben erkannt wurde, wird versucht, das andere Cluster zu entnehmen.



Abbildung 6.52: Der Roboter konnte erfolgreich das gegriffene Objekt für die Entnahme anheben.

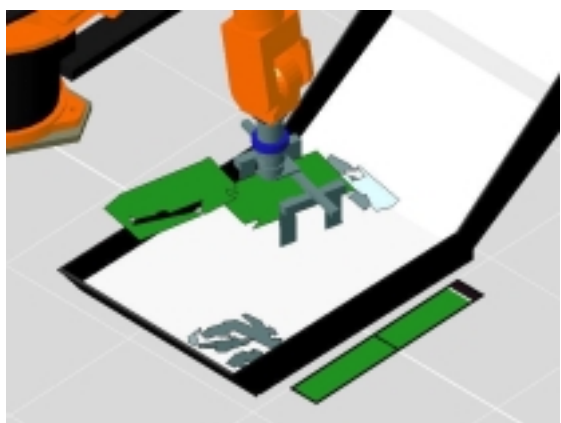


Abbildung 6.53: Es ist nur noch ein Cluster übrig ohne lose Nachbarn.



Abbildung 6.54: Der Roboter hat das Cluster zur Entnahme angehoben.

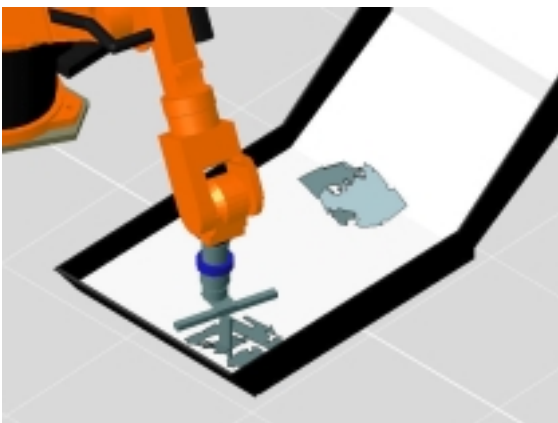


Abbildung 6.55: Es kann nur noch Weichware gefunden werden, welche durch die grauen zerklüfteten Flächenstücke dargestellt ist.



Abbildung 6.56: Der Greifer hat eine Weichware gegriffen und zur Entnahme angehoben.

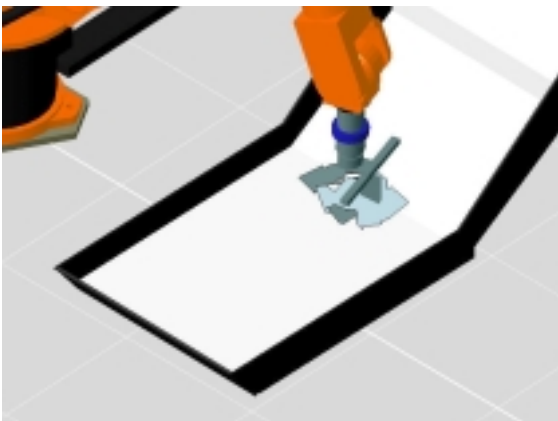


Abbildung 6.57: Ein Griff wird bestimmt für das Entnehmen von Weichware.



Abbildung 6.58: Eine Weichware konnte erfolgreich entnommen werden.

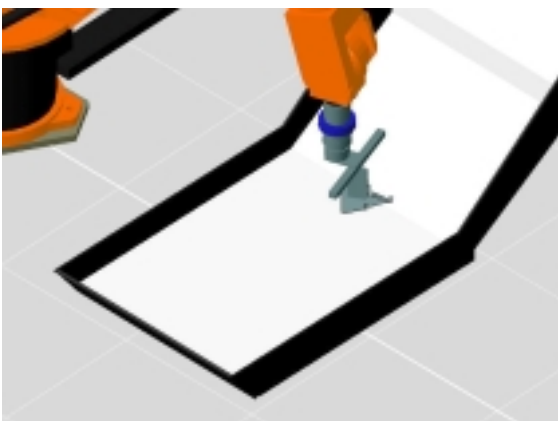


Abbildung 6.59: Es liegt noch immer Weichware in der Szene.



Abbildung 6.60: Der Roboter entnimmt erfolgreich das letzte Objekt.

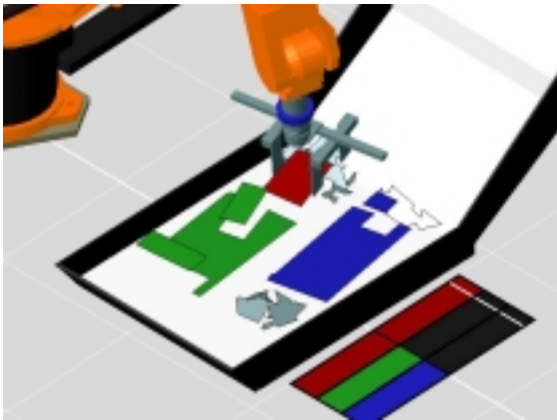
Instanz B

Abbildung 6.61: Durch die Sichtbarkeit des Untergrunds zwischen den Szenenbereichshinweisen können direkt drei Cluster unterschieden werden.



Abbildung 6.62: Der Roboter kann aufgrund der Begründung in Abschnitt 6.5.2 ohne Überwachung auf ungewolltes Mitanheben ein Objekt entnehmen.

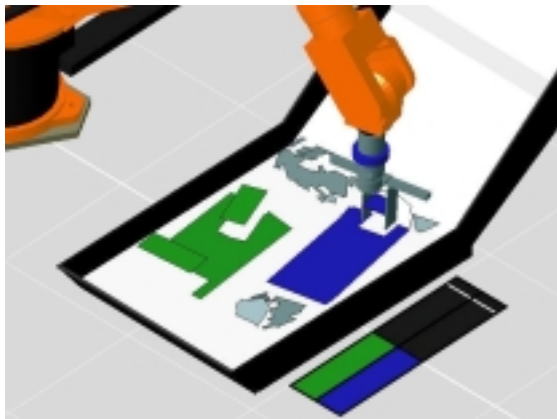


Abbildung 6.63: Zwei Cluster sind übrig.

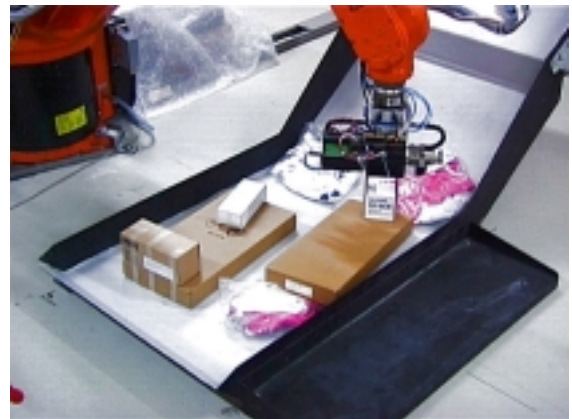


Abbildung 6.64: Nach einer Objektdrehung.



Abbildung 6.65: Der grüne Bereich ist durch sichtbaren Untergrund getrennt von den anderen Bereichen, so daß er nicht auf ungewolltes Mitanheben überwacht werden muß, obwohl er lose ist.



Abbildung 6.66: Der Roboter konnte erfolgreich ein Objekt für die Entnahme anheben.

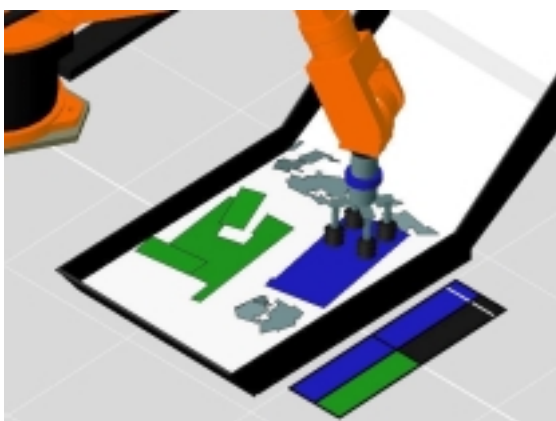


Abbildung 6.67: Ohne Überwachung darf ein Cluster entnommen werden.



Abbildung 6.68: Es war kein numerischer Griff vorhanden für den Backengreifer, so daß ein Greiferwechsel erforderlich war.

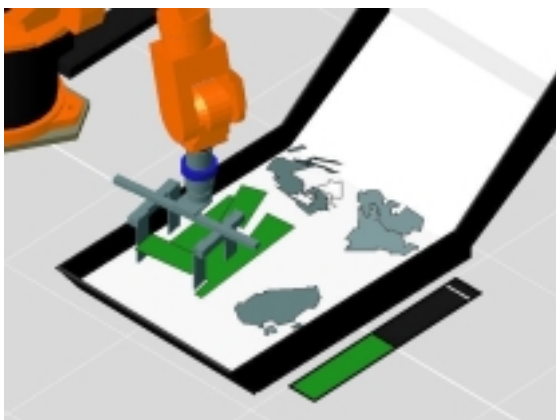


Abbildung 6.69: Ein Cluster ist übrig.



Abbildung 6.70: Nach einer Objektdrehung.

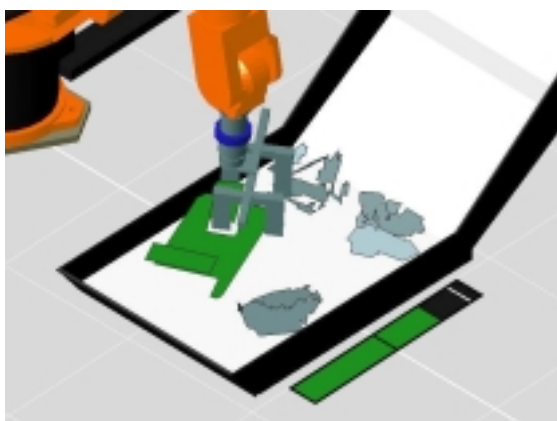


Abbildung 6.71: Die Bewertung für die Zusammengehörigkeit hat sich erhöht.

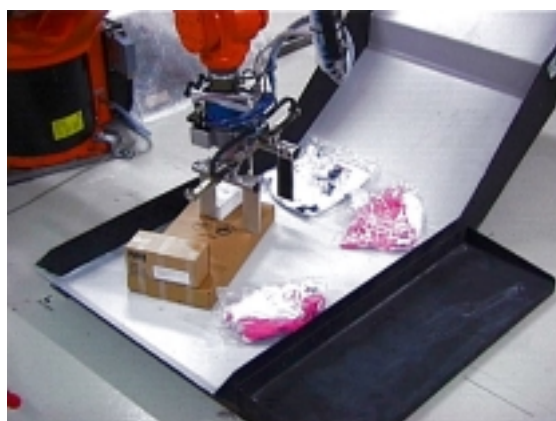


Abbildung 6.72: Der Roboter hat ein anderes Objektteil verschoben.

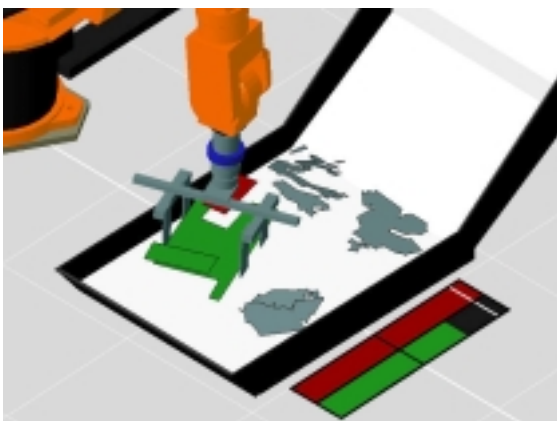


Abbildung 6.73: Die lose Verbindung konnte festgestellt werden.

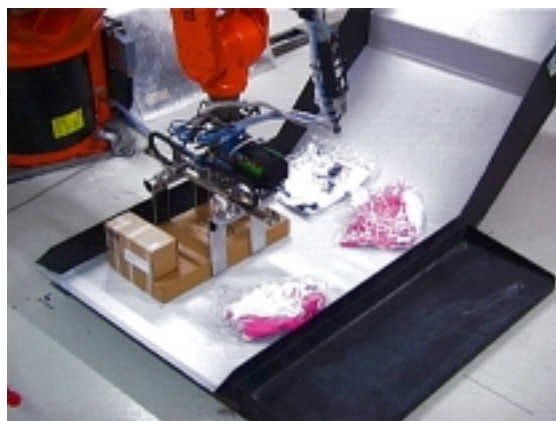


Abbildung 6.74: Wiederum ein anderes Objektteil wurde gedreht.



Abbildung 6.75: Die Bewertung für die Zusammengehörigkeit des grünen Clusters hat sich aufgrund der gemeinsamen Bewegung der Primitive erhöht.



Abbildung 6.76: Ein Objektteil sollte verschoben werden. Die Operation mußte jedoch aufgrund des Feststellens einer Kollision mit der Peripherie abgebrochen werden.

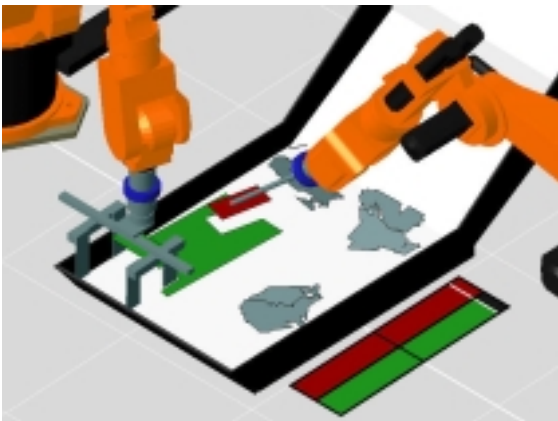


Abbildung 6.77: Trotz des Abbruchs der vorhergehenden Schieberoperation konnte die gemeinsame Bewegung erkannt und somit die Bewertung erhöht werden.

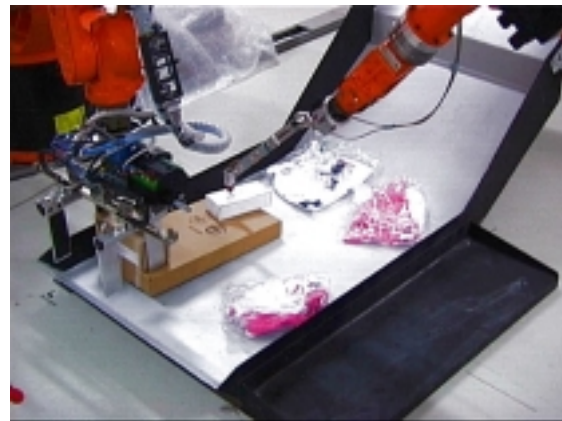


Abbildung 6.78: Aufgrund des Erreichens der Grenzbewertungen wurde hier versucht, das eine, in der Simulation grün eingefärbte Cluster bei Überwachung des anderen Clusters zu entnehmen.

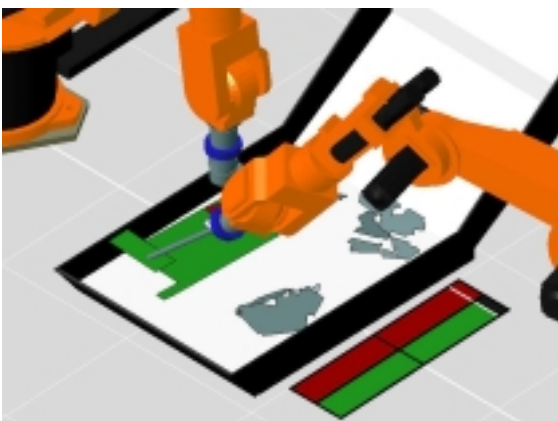


Abbildung 6.79: Ungewolltes Mitanheben wurde festgestellt. Deshalb wird versucht, das andere Cluster zu entnehmen.



Abbildung 6.80: Das gegriffene Objekt konnte erfolgreich für die Entnahme angehoben werden.

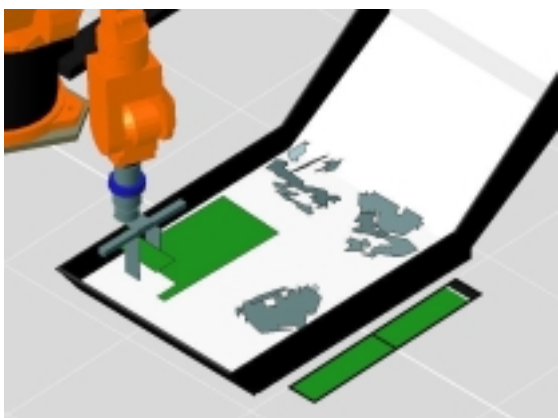


Abbildung 6.81: Ein Cluster ist übrig.

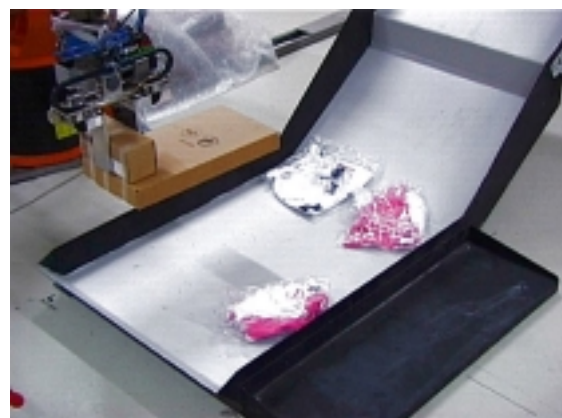


Abbildung 6.82: Nach dem Anheben.

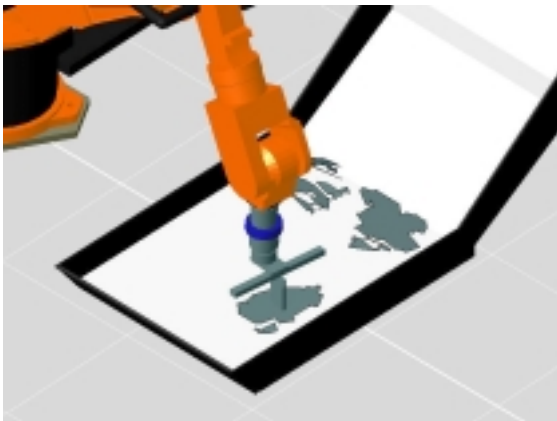


Abbildung 6.83: Es liegt nur noch Weichware in der Szene.

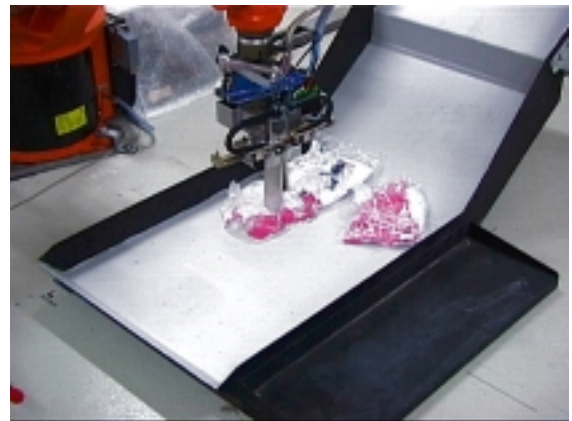


Abbildung 6.84: Eine Weichware konnte erfolgreich angehoben werden.

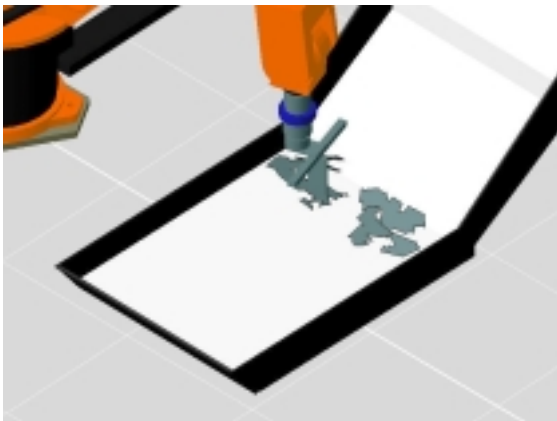


Abbildung 6.85: Es liegen noch zwei Weichwaren in der Szene.

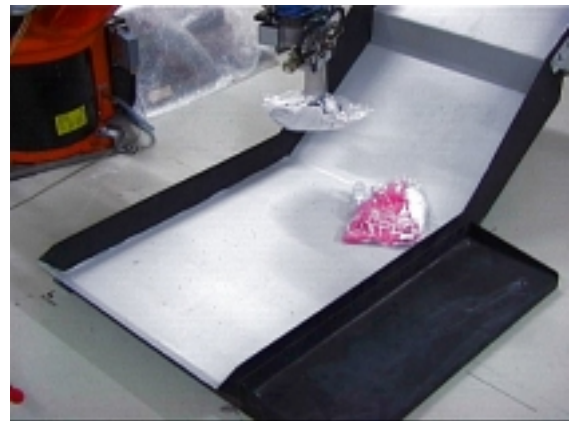


Abbildung 6.86: Die vorletzte Weichware wird entnommen.

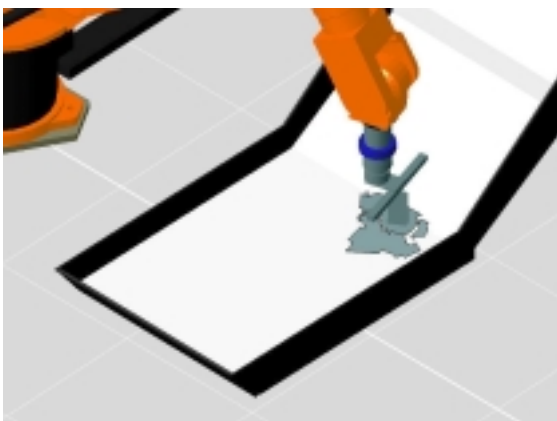


Abbildung 6.87: Eine Weichware wurde lokalisiert.

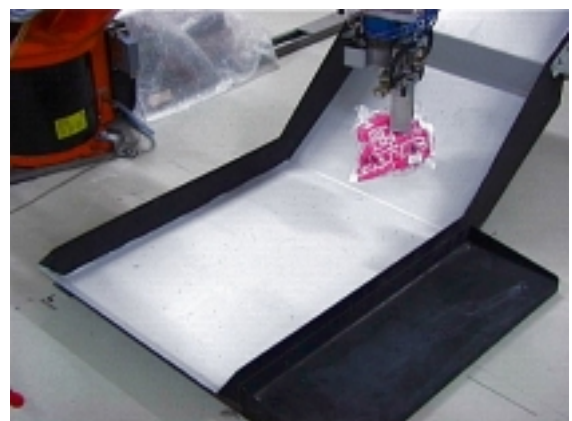


Abbildung 6.88: Die letzte Ware wurde erfolgreich entnommen. Die Szene ist leer.

6.7.2 Beurteilung der Versuchsergebnisse

Alle Objekte konnten in den Experimenten zuverlässig entnommen werden. Ungewolltes Mitaneben wurde erkannt und vermieden.

Somit sind alle in Abschnitt 1.3 gestellten Anforderungen erfüllt.

6.7.3 Vergleich mit ROs der zweiten und dritten Generation

ROs der zweiten und dritten Generation sind nicht in der Lage, bei der gleichen Flexibilität hinsichtlich unbekannter Objekte eine ähnlich hohe Zuverlässigkeit zu gewährleisten wie das hier vorgestellte RO der fünften Generation.

6.8 Zusammenfassung des Kapitels

In diesem Kapitel wurde eine vollkommen neue Strategie zur Objektentnahme eingeführt und detailliert erläutert. Sie verzichtet auf Objektidentifikation- oder -rekonstruktion und gewährleistet trotzdem Zuverlässigkeit für die Nachbarobjekte gegen unbeabsichtigtes Mitaneben.

Dazu wurde ein neues Weltmodell zur geeigneten Wissensdarstellung entwickelt. Untersuchungsoperationen werden zur Erforschung der Beziehungen zwischen segmentierten Szenenbereichshinweisen eingesetzt. Überwachungsoperationen erlauben das Erkennen und somit das Vermeiden des ungewollten Mitanebens loser Nachbarobjekte des gegriffenen Objekts. Verfahren zur Propagation von Information werden eingesetzt, um Roboteroperationen einzusparen.

Ein Sensorkonzept für Untersuchungs- und Überwachungsoperationen wurde vorgeschlagen, und die Wirtschaftlichkeit von ROs der fünften Generation wurde abgeschätzt.

Experimentelle Ergebnisse belegen, daß alle Zielsetzungen der Arbeit erfolgreich erfüllt wurden.

Kapitel 7

Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung der Arbeit und neue Beiträge zum Stand der Forschung

Ziel der vorliegenden Dissertation war die Entwicklung neuer Strategien für die zuverlässige und flexible Entnahme von Objekten aus unstrukturierten Szenen, wie beispielsweise aus zufälligen Objekthäufungen, unter Verwendung von Industrierobotern.

- Unter dem Begriff Zuverlässigkeit wird dabei verstanden, daß insbesondere schwere Kollisionen, das Zerbrechen der Objekte im Greifer, instabiles Greifen sowie das unbeabsichtigte Mitanheben benachbarter Objekte während der Objektentnahme zu vermeiden sind.
- Unter Flexibilität wird verstanden, daß dem System weitgehend unbekannte Objekte auch entnehmbar sein sollen, und daß die Entnahme bekannter Objekte durch die Nachbarschaft unbekannter Objekte nicht negativ beeinträchtigt wird.

Einschränkungen an die mögliche Objektvielfalt ergeben sich durch die Anforderungen, daß die Objekte Greifmerkmale aufweisen müssen, welche für die vorhandenen Greiferwerkzeuge geeignet sind, daß die Massen- und Größenbereiche im Toleranzbereich des Roboters liegen, und daß die Objekte im wesentlichen Formen und Merkmale aufweisen, welche durch Szenenbereichshinweise beschreibbar sind, die ein Bildauswertesystem in Bildern der Szene segmentieren kann.

Zum Erreichen der Zielstellung wurden zunächst intensiv bisher realisierte *Robotersysteme zur Objektentnahme* (RO) studiert. Aus dieser Analyse ging eine neue Einteilung von ROs in verschiedene Generationen von ROs hervor, welche die Art und den Umfang der Informationsgewinnung über die Szene sowie die Informationsverarbeitung als Hauptkriterien verwendet.

Im Rahmen der Arbeit wurden drei Benchmarks für die Überprüfung der Leistungsfähigkeit von ROs in kritischen Situationen entwickelt und erfolgreich für das Auffinden von Schwachstellen realisierter Systeme eingesetzt. Als Ergebnis des Benchmark-Prozesses konnten folgende neue Strategie und neuen Algorithmen entwickelt werden:

- Ein neuer Algorithmus zur zuverlässigen Planung von Griffen in unstrukturierten Szenen wurde entwickelt. Dabei wird erstmals explizit bestimmt, in welchen Abschnitten der Greiftrajektorie sich der Greifer und der Roboter bei Ausführung des Greifvorgangs für eine Objektentnahme in folgenden Bereichen befindet: im mit Sicherheit freien Bereich,

im Objekt- also hochwahrscheinlichem Kollisionsbereich, oder in unbekanntem Bereich, der beispielsweise aufgrund visueller Verdeckungen nicht einsehbar ist. Neben seiner Zuverlässigkeit hat sich der Algorithmus im Vergleich zu anderen Greifplanungsalgorithmen als sehr effektiv in Bezug auf die erforderliche Rechenzeit herausgestellt.

- Weiterhin wurde ein neuer Algorithmus entwickelt, welcher basierend auf der expliziten Kenntnis, in welchen Bereichen sich die Greiftrajektorien verschiedener Griffe befinden, optimiert Griffe und geeignete Greifwerkzeuge auswählt. Optimierungskriterien sind einerseits die Qualität und Zuverlässigkeit von Griffen und andererseits die Vermeidung von zeitintensiven Werkzeugwechseln. Darüber hinaus werden Greiftrajektorien vermieden, welche aufgrund großer Unbekannt-Bereiche langsam abgefahren werden müssen, so daß über lokalen Sensoreinsatz Hindernisse rechtzeitig erkennbar sind.
- Um auch Zuverlässigkeit für nicht gegriffene Objekte hinsichtlich ungewollten Mitanehmens bei gleichzeitiger Flexibilität des Systems gewährleisten zu können, wurde eine vollkommen neue Strategie zur Objektentnahme entwickelt. Die Szenenobjekte werden bei dieser Strategie weder identifiziert noch rekonstruiert. Statt dessen führt das RO aktiv sogenannte Untersuchungsoperationen durch, um die Beziehungen zwischen den Objektteilen, die durch segmentierte Szenenbereichshinweise beschrieben werden, zu erforschen. Während einer anschließenden Objektentnahme werden sogenannte Überwachungsoperationen ausgeführt, um feststellen zu können, ob lose Nachbarobjekte des gegriffenen Objekts ungewollt mitangehoben werden. In solch einem Fall muß die Ausführung der Entnahmeoperation entweder modifiziert oder sogar abgebrochen werden. Die Beziehungen zwischen den durch die Szenenbereichshinweise beschriebenen Objektteilen sind wahrscheinlichkeitsbasiert darzustellen. Um Untersuchungsoperationen einsparen zu können, wird Information durch das Beziehungsnetz hindurch propagiert. Die neue Strategie eignet sich insbesondere für den Einsatz in Situationen, in denen bisherige Systeme versagen. Mit bisherigen Verfahren einfach zu gewinnende Information, wie z.B. bei der Identifikation eines wohlbekanntes Objekts, wird jedoch keineswegs außer Acht gelassen, sondern kann direkt in die Wissensbasis der neuen Strategie integriert werden. Es konnte abgeschätzt werden, daß sich der Einsatz eines ROs mit der neuen Strategie im Vergleich zur manuellen Objektentnahme durch Arbeiter wirtschaftlich sehr wohl für die Entnahme von eher hochwertigen Objekten lohnt.

Alle in dieser Arbeit vorgestellten Algorithmen und Systeme wurden realisiert und mit Erfolg getestet. Insbesondere wurde das aufgebaute Demonstrator-RO einen Monat lang bei Kommissionieraufgaben in einer realen Versandhandlungsumgebung erfolgreich eingesetzt.

Angesichts der enormen Flut von Arbeiten, welche sich mit der in der vorliegenden Dissertation behandelten Thematik bereits seit mehr als zwanzig Jahren intensiv beschäftigt haben, sind die hier erreichten Ergebnisse als höchst innovativ einzustufen. Zahlreiche Forscher rieten zu Beginn der Forschungstätigkeit des Autors davon ab, sich mit der Thematik zu beschäftigen, da in diesem Bereich sowieso nichts wesentlich Neues mehr entwickelt werden könne. Im Gegensatz dazu konnte eine zuvor noch nie verfolgte Strategie entwickelt und realisiert werden, welche ein bis dahin nicht erreichtes Maß an Zuverlässigkeit und Flexibilität erreicht. Somit konnte in dieser Arbeit ein Ausweg aus einer Sackgasse gefunden werden, welcher in Zukunft neue Möglichkeiten für den Einsatz von Robotern in wirtschaftlich bedeutenden Bereichen zuläßt. Es eröffnen sich jetzt weitere bedeutende Entwicklungsschritte, welche für einen breiten zukünftigen Einsatz von Robotern zur Objektentnahme von ungeordneten Anhäufungen erforderlich sind und im folgenden Abschnitt erläutert werden.

7.2 Ausblick auf sinnvolle Weiterentwicklungen

Von Seiten der Robotik bezüglich der Planung und Durchführung von Strategien wurden in dieser Arbeit neue wichtige Ergebnisse erzielt. Das realisierte Demonstrator-RO unterstreicht die Bedeutung der Ergebnisse.

Für einen breiten zukünftigen Einsatz der neuen Strategien ist es jedoch erforderlich, in dem Bereich der Sensorik weiter zu forschen und fortgeschrittene Sensorsysteme mit den in dieser Arbeit entwickelten Strategien zu vereinen. Insbesondere folgende Anforderungen an die Sensorik sollen erwähnt werden:

- Für die effektive Ausführung von Untersuchungs- und Überwachungsoperationen ist es erforderlich, zahlreiche Szenenbereichshinweise gleichzeitig zu beobachten. Es sind also Sensoren erforderlich, welche trotz einer kleinen Bauweise ein großes Zielgebiet erfassen können.
- Die Sensoren müssen flexibel im Arbeitsraum positioniert werden können. Bisherige käuflich erwerbbar Sensorsysteme können jedoch nicht automatisch ihre Parameter anpassen, so daß ihr flexibler Einsatz für verschiedene Aufgaben und in verschiedenen Positionen derzeit nicht möglich ist.
- Derzeitige Standard-Kommunikationsnetze wie z.B. der Feldbus CAN sind bereits ausgelastet, wenn beispielsweise ein Kraft-Momenten-Sensor mit hoher Auflösung und hoher Taktrate Sensordaten über den Bus an einen Rechner versendet. Hochleistungs-Kommunikationsnetze, welche möglichst mit nur einem dünnen Kabel alle Sensoren am Endeffektor des Roboters mit dem Steuerrechner verbinden, sind also erforderlich.
- Äußerst sinnvoll wäre die Verbindung der hier vorgestellten Strategien mit weiter fortgeschrittenen Verfahren der Bildauswertung, wie beispielsweise der Verfolgung von Objekten in Bildfolgen unter Verwendung des optischen Flusses [Kollnig et al. 95].
- Flexible Objekte werden derzeit in vielen Bereichen der Robotik noch als Ausnahmeobjekte behandelt. In der Montage gibt es erste Erfolge beim Umgang mit biegeschlaffen Objekten [Remde 2001]. Auch für die Untersuchung der Zusammengehörigkeit flexibler Objekte müssen noch weitere Verfahren entwickelt werden.

Chapter 8

Summary of the Dissertation in English

8.1 Goals of the Dissertation

The goal of the dissertation was to develop novel strategies and system architectures for the reliable and flexible picking of objects by industrial robots from unstructured scenes, such as arbitrary heaps of objects. *Robot systems for object picking* (RO), which are provided with such strategies, could be applied in numerous economically important tasks, such as commission tasks in the shipping departments of catalogue sales companies, or in clean-up tasks in the area of service robotics.

„Reliability“ comprises in this context the prevention of grave collisions of the robot with the scene, the prevention of object fracture inside of the gripper, the prevention of instable grasps, as well as the prevention of unintended lifting of not grasped neighbouring objects during a picking operation. The term „flexibility“ is intended to express, that the RO should be able to grasp and pick quite unknown objects, and that the presence of unknown objects should not disturb the successful picking of other objects.

The diversity of the allowed objects is restricted by the following conditions. The objects must have features, which are suitable for grasping with the available grippers. The mass and size ranges must fit within the tolerances of the applied RO. And the objects must predominantly have forms and features, which are describable by so-called scene domain cues [Nagel 87], which can be segmented by computer vision. Therefore, the system must dispose of a generic description of the allowed scene domain cues, i.e. the system must „know“, for which kinds of the scene domain cues it should look in images of the scene.

8.2 State of the Art

No previously developed robot system fulfills all the mentioned goals at once. Previous classifications of ROs are organized according to a consumer view and describe solvable problem situations. However, no classification of the ROs and the applied strategies was available.

In this dissertation, for the first time, a classification from developer view is provided. Four generations of previous ROs are distinguished according to the manner and the amount, they acquire knowledge about the scene, and according to the way, they process the knowledge for the execution of picking strategies [Müller & Wörn 2000a].

In the following, the previous four generations of ROs are outlined:

- ROs of generation I acquire no global information about the location of objects to pick. Grasping is performed blind using passive or active contour adapting mechanisms.
- ROs of generation II search in images of the scene for holdsites which are suitable for the employed robot hand, whereas the objects are not identified.
- ROs of generation III aim at the identification, respectively reconstruction, of the objects via the processing of global images of the scene. In such a way, if the identification is successful, they acquire the whole scene information and are able to plan reliable grasping and lifting operations. Such systems require the availability of comprehensive object models.
- ROs of generation IV actively inspect the scene in order to identify the objects. Therefore, they employ mobile sensing and / or manipulation of the scene. In such a way, material, geometric and kinematic properties of unknown objects can be revealed, which are hidden for ROs of generation III.

8.3 Developments

Within the dissertation, three benchmarks are developed for the testing of the capacities of ROs in critical situations of object picking [Müller et al. 2001]. Weak points of realized ROs could be located using the benchmarks. Through this benchmark cycle, novel strategies and system architectures could be developed, that are described in the following sections.

8.3.1 Planning of Feasible Grasp Configurations in Unstructured Scenes

A novel algorithm for the reliable planning of feasible grasp configurations [Lozano-Pérez 81] in unstructured scenes was developed [Müller & Wörn 2000c]. For the first time, the segments are explicitly determined, in which the gripper and the robot have to move for grasping in the certainly free area, the object area or in the unknown area. In an unknown area, the RO has no knowledge about the scene, since this area is not visible for global vision systems due to occlusions. The algorithm is very reliable and, in comparison with other grasp planning algorithms, it is very time efficient.

8.3.2 Optimized Gripper and Grasp Choice

In an unknown area, the robot has to move slowly using local sensing in order to prevent grave collisions. Contrary to that, the robot should move as fast as possible in the certainly free areas. On the basis of the explicit knowledge about the areas to cross, the required time for execution of feasible grasp configurations can be determined. A novel algorithm was developed for the optimized reduction of time consuming gripper changes and for the choice of the fastest grasps, which have a very high grasp quality at the same time [Müller & Wörn 2000c].

8.3.3 A New Picking Strategy: RO of the Fifth Generation

For the reliable prevention of the undesired liftings of not grasped neighbouring objects, in combination with a high degree of flexibility with respect to unknown objects, it was necessary to develop a completely new strategy for object picking. In such a way, the fifth generation of ROs is initiated.

The objects are neither identified nor reconstructed. Instead, the RO executes exploratory tasks [Bajcsy & Campos 92] in order to acquire information about the relationships between the object parts, which are described by the segmented scene domain cues. During a following picking operation, verification tasks have to be executed in order to detect the undesired lifting of objects, which do not belong to the grasped object part. In such an undesired lifting case, the picking operation has to be modified or even stopped.

The relationships, i.e. the togetherness, between the object parts, which are described by the scene domain cues, require a probabilistic representation. That is due to the fact, that one single exploratory task might not reveal correctly a relationship. However, various exploratory tasks have to be performed for reliability reasons. With the goal of saving exploratory tasks, information is propagated [Pearl 94] through the networks of relationships [Müller et al. 99b], [Müller et al. 2000], [Müller & Wörn 2001].

The novel strategy is particularly suited for operation in situations, in which previous systems fail. However, if any information can be acquired easily using previous strategies, e.g. via the identification of an apparent object, then that information is used and integrated directly into the used data base, i.e. the network of relationships.

According to calculations of profitability, ROs using the novel strategy appear to outplay humans for the picking of rather valuable objects out from unstructured heaps.

8.4 Experimental Results

All the algorithms and systems, which are presented in the dissertation, were realized and tested successfully. Beyond numerous laboratory experiments, the demonstrator RO was integrated successfully during one month in the shipping department of a famous German catalogue sales company in commission tasks.

8.5 Potentials

In view of the huge number of works, which investigated the picking of objects during the last two decades, the results of this dissertation have to be rated as greatly innovative. Many researchers discouraged the author at the beginning of his research work from dealing with object picking, since no substantial new results could be achieved. Contrary to that estimation, a new strategy could be developed, which enables robots to pick objects out from unstructured heaps with a degree of reliability and flexibility, which could not be reached so far.

8.6 Perspectives

Starting from the new strategy, further developing steps are suggested to leverage the use of robots for object picking in many economically important tasks:

- More sophisticated systems and algorithms for the flexible use of sensors and the sensor data fusion are required for a more effective execution of exploratory and verification tasks.
- Field buses with significantly higher data transmission rates could facilitate the physical connections of a high number of sensors, which have to be active at the same time.
- The new strategies should be combined with sophisticated algorithms of machine vision, e.g. using optical flow.
- Actually, the exploratory and verification tasks are restricted to rigid objects. An extension to flexible objects is required.

Anhang A

Bildauswertung zur Segmentierung eines Tiefenbilds der Szene in ebene Flächenstücke nach M. Trobina

A1 Überblick

Die in der Arbeit eingesetzten Algorithmen zur Tiefenbildauswertung basieren im wesentlichen auf [Trobina 95]. Für jene Algorithmen wurde M. Trobina, A. Leonardis und F. Ade der ETH-Zürich im Rahmen des 17. DAGM-Symposiums der Deutschen Arbeitsgemeinschaft für Mustererkennung 1995 in Bielefeld ein Anerkennungspreis verliehen [Sagerer et al. 95].

Da die Auflösung der in dieser Arbeit verwendeten Tiefenbilder schlechter und das Rauschen wesentlich höher ist als in [Trobina 95], können einige der dort vorgeschlagenen Auswerteschritte nicht ausgeführt werden. Dafür sind aber weitere Vor- und Nachverarbeitungsschritte erforderlich. Im folgenden wird die daraus resultierende Tiefenbildauswertung skizziert.

A2 Vorverarbeitung

Tiefenbilder werden oftmals über aktive Beleuchtung erzeugt, wie z.B. in [Trobina 95] und in dieser Arbeit. Beispielsweise wird in dunklen Oberflächenbereichen der Szene viel Licht absorbiert, oder aber wird an sehr zerklüfteten Stellen das auftreffende Licht stark gestreut, so daß das resultierende Tiefenbild dort im allgemeinen Lücken aufweist. Sehr kleine Lücken sind in einem Vorverarbeitungsschritt zu schließen, um den Rechenaufwand für anschließende Auswerteschritte zu minimieren.

A3 Platzierung von Keimzellen und Regionenwachstum

Als Szenenbereichshinweise werden in [Trobina 95] wie auch in der vorliegenden Arbeit ebene Flächenabschnitte segmentiert. Zur Segmentierung werden zunächst sogenannte „Seeds“, also Keimzellen, im Tiefenbild plziert. Eine Keimzelle besteht aus einer Menge von

Rangels^{A.1}, welche gleichmäßig verteilt mit grober Auflösung über der Grundfläche des Tiefenbilds ausgewählt werden. Beispielsweise können zu einer Keimzelle 5x5 Rangels gehören, wobei z.B. nur jedes zehnte Rangel im Tiefenbild zu dieser Keimzelle gezählt wird, so daß die 25 Keimzellen-Rangels über einen Bereich des Tiefenbilds von $41 \times 41 = 1681$ Rangels verteilt sind. Erst wenn alle in diesem Beispiel 25 Keimzellen in eine mittels Least-Squares-Optimierung bestimmte Ebenengleichung innerhalb eines Toleranzbereichs fallen und auch die in diesem Beispiel restlichen $1681 - 25 = 1656$ Rangels in die Ebene passen, ist eine fruchtbare Keimzelle gefunden. Über Regionenwachstum wird die Keimzelle dann so weit wie möglich über das Tiefenbild ausgedehnt, wodurch das zugehörige ebene Flächenstück segmentiert wird. Während dieses Regionenwachstums werden nur solche Rangels aufgenommen, welche nicht bereits zu anderen Flächenstücken gehören.

Die Keimzellen werden mit abnehmenden Auflösungen, also zunächst sehr grob, und dann immer feiner werdend, überall im Tiefenbild verstreut, um zunächst sehr effektiv die großen Flächen zu segmentieren, aber auch nach und nach die kleineren Flächenstücke zu finden.

A4 Nachbearbeitung und Kantenglättung

Beim Regionenwachstum wächst eine Fläche um diejenigen Rangels herum, welche nicht in die jeweilige Ebenengleichung einpassbar sind. Solche Rangels können neben der tatsächlichen Szenenstruktur auch durch Ausreißer verursacht werden. Ein wichtiger Schritt der Nachbearbeitung besteht im Schließen solcher Einwüchse, welche nur sehr wenige Rangels umschließen. Dieser Schritt sollte vor der Kantenglättung vorgenommen werden, um nicht unnötigerweise die langen Kantenzüge der Einwüchse zu bearbeiten.

Im letzten Schritt werden die noch verrauschten Kantenzüge, also die Berandungen der segmentierten Regionen, geglättet. Dies erfolgt ähnlich der Bestimmung der Oberflächenstücke. Die Keimzellen sind nun jedoch nicht zweidimensional gestaltet, sondern eindimensional. Entsprechend verläuft das Wachstum der Keimzellen auch eindimensional.

Als Ergebnis liegen polygonale Kantenzüge vor, welche im dreidimensionalen Raum ebene Flächenstücke beranden.

A5 Experimentelle Ergebnisse

Abbildung A.1 zeigt in einer RobCAD-Simulation die Einzelschritte der Tiefenbildauswertung für die im linken Teilbild von Abbildung 4.6 gezeigte Benchmarkszene „Ungewolltes Mitaneben“.

Die violetten Punkte im Teilbild links oben visualisieren die Rangels, welche sich oberhalb des Szenenuntergrunds befinden. Im Teilbild rechts oben sind die Kantenzüge zu sehen, welche sich durch die Plazierung der Keimzellen und das Regionenwachstum ergeben. Durch den Vergleich mit dem Teilbild links unten ist deutlich zu sehen, daß die in Abschnitt A.4 beschriebenen Einwüchse in der Nachbearbeitung geschlossen werden konnten.

^{A.1} Analog zu den Bezeichnungen „Pixel“ im 2D-Bereich und „Voxel“ im vollen 3D-Bereich wird im 2.5D-Tiefenbild-Bereich (engl. Range Image) der Begriff „Rangel“ verwendet.

Im Teilbild rechts unten sind schließlich nach der Kantenglättung die so segmentierten ebenen Flächenstücke verschiedenartig eingefärbt. Die violetten Rangels, welche in dem Teilbild noch zu sehen sind, konnten keiner segmentierten Fläche zugeordnet werden. Trotzdem werden auch diese Rangels für die Kollisionsvermeidung bei der in Kapitel 5 beschriebenen Greifplanung berücksichtigt. In Abschnitt 5.1.2 wird erläutert, wie die Berandung des Unbekannt-Bereichs durchgeführt wird. Die im rechten unteren Teilbild zu sehenden blauen Punkte markieren diese Begrenzungen des Unbekannt-Bereichs.

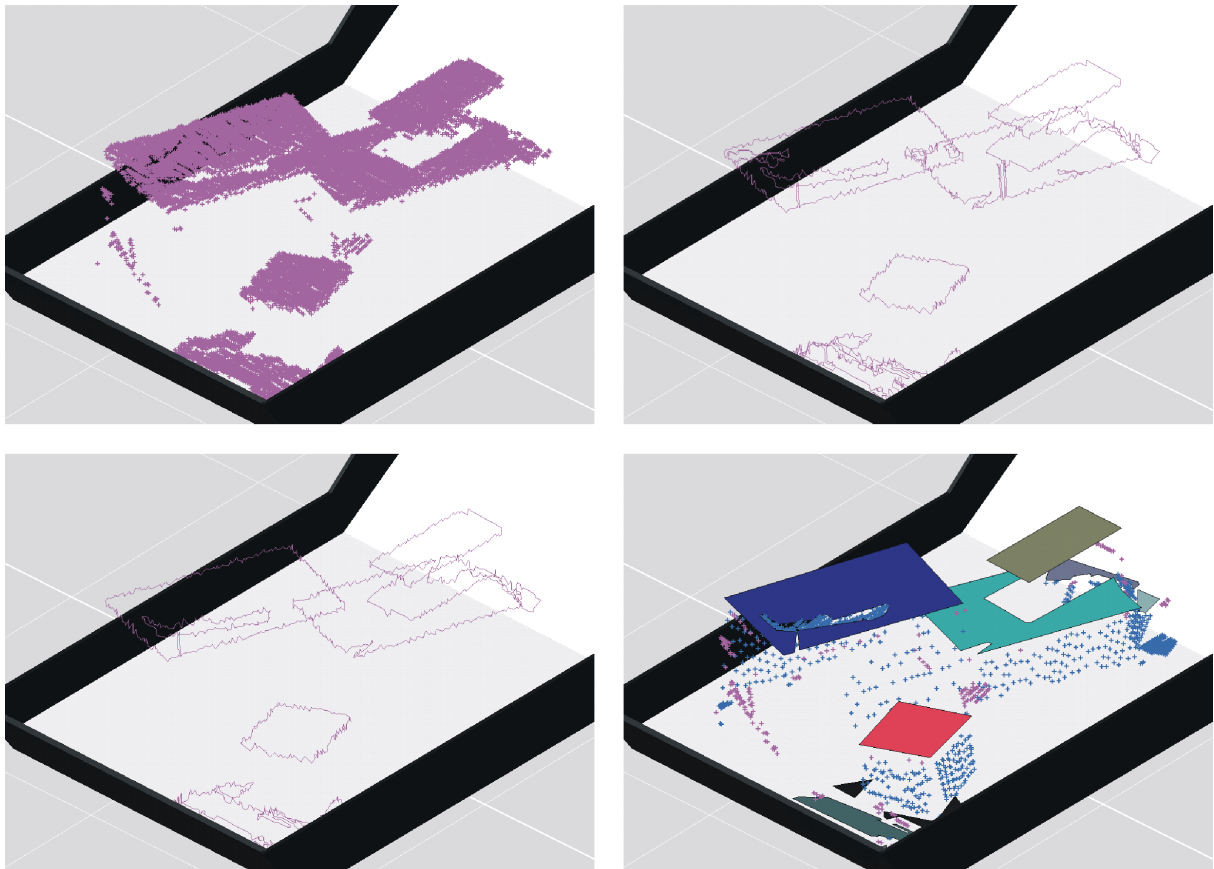


Abbildung A.1: Einzelschritte der Tiefenbildauswertung:
Links oben: Alle durch den Laserscanner bestimmten Rangels
Rechts oben: Segmentierte Regionen
Links unten: Nachbearbeitete Regionen
Rechts unten: Regionen eingefärbt nach Kantenglättung
Violette Punkte: Nicht zugeordnete Rangels
Blaue Punkte: Begrenzung von Unbekannt-Bereich

Anhang B

Lokalisation von in Folie verpackter Weichware zwischen Hardware

B1 Überblick

In diesem Anhang werden eine neue Vorgehensweise zur Lokalisation von in Folie verpackten Textilien und die geeignete Bestimmung symbolischer Griffe^{B.1} zum Greifen der Textilien mit dem in Kapitel 3 vorgestellten kleinen Parallel-Backen-Greifer dargestellt. Dabei wird in diesem Ansatz vorausgesetzt, daß in der Szene nur Hardware mit relativ großen ebenen Oberflächen sowie die in Folie verpackte Weichware vorkommt. Diese Randbedingung war bei der in Abschnitt 5.3.4 beschriebenen Experimentierphase in der realen Versandhandlungsumgebung vollkommen erfüllt. Darüber hinaus wird dadurch die Allgemeingültigkeit der in Kapitel 6 eingeführten neuen Strategie zur flexiblen und zuverlässigen Objektentnahme in keiner Weise berührt. Das hier beschriebene Verfahren konnte für die in Abschnitt 6.7.1 beschriebenen Experimente sehr wohl eingesetzt werden. Um jedoch ein noch höheres Maß an Flexibilität zu erreichen, das heißt ein noch größeres Spektrum unterschiedlicher unerwarteter Objekttypen in der Szene zuzulassen, sollten die in dieser Arbeit entwickelten Strategien mit leistungsfähigen, in Abschnitt 6.4 ansatzweise skizzierten Sensorsystemen gekoppelt werden, worauf auch im Ausblick der Arbeit in Abschnitt 7.2 hingewiesen wird.

Bisherige Verfahren zur Lokalisation flexibler Objekte oder auch von Kunststoffteilen eignen sich nur sehr bedingt für in Folie verpackte Textilien. In [González-Linares et al. 99] wird beispielsweise ein Algorithmus zur generischen Rekonstruktion von Infusionsbeuteln vorgestellt. Dabei wird jedoch davon ausgegangen, daß die Beutel weitgehend flach und rechteckig sind, was bei beliebigen Textilien überhaupt nicht der Fall sein muß. Zum Erkennen von Kunststoffen werden auch Heuristiken eingesetzt wie z.B. die Annahme, daß Plastikgegenstände innerhalb von Abfallhaufen als helle Flecken erkennbar sind [Rubarth et al. 96]. Im allgemeinen gibt es jedoch Textilien in Folien in vielen Farben. Zur generellen Segmentierung von Abfallgegenständen beispielsweise auf Fließbändern bei der Müllsortierung wird die Heuristik eingesetzt, daß sich die verschiedenen Teile durch Höhengsprünge unterscheiden [Mattone et al. 98b]. Arbeiter müssen die segmentierten Teile dann in verschiedene Kategorien einordnen, worauf hin sie von Robotern entsprechend gegriffen und sortiert werden. In der vorliegenden Arbeit soll die Objektentnahme jedoch vollautomatisch erfolgen können. Spektralanalyse zur Materialanalyse bei der Beleuchtung

^{B.1} Zur Erläuterung des Begriffs „symbolischer Griff“ wird auf Kapitel 5 verwiesen.

mit Infrarotlicht [Lucht et al. 93] oder nach Erzeugung eines Funkens [Seidel 94] ist möglich, für die Analyse einer kompletten Szene im allgemeinen jedoch unangemessen aufwendig und teuer. In der Medizintechnik werden bestimmte anatomische Strukturen oder auch Texturen dafür verwendet, bestimmte biologische, in der Form veränderliche flexible Teile zu erkennen [Musse et al. 99]. Texturen werden auch in [Patel et al. 94] verwendet, dort jedoch zur Lokalisation von Fremdkörpern wie z.B. Steinen bei der Durchstrahlung von Nahrungsmitteln.

Am vielversprechendsten von all diesen Ansätzen erscheint die Texturanalyse. Zwar können bei Textilien keine so genauen Formbeschreibungen oder Relationsangaben wie bei anatomischen Strukturen gemacht werden. Sehr wohl kann aber das Erscheinungsbild von Textilien in den nach dem in Anhang A beschriebenen Algorithmus segmentierten Szenenbereichshinweisen deutlich von dem Erscheinungsbild von Hardware unterschieden werden. Ähnlich wie Steine in Nahrungsmitteln läßt sich somit Weichware zwischen Hardware lokalisieren.

B2 Regeln zur Lokalisation von in Folie verpackter Weichware

Ein wesentlicher Vorteil des hier vorgestellten Verfahrens zur Lokalisation von Weichware ist die Tatsache, daß keine zusätzliche Sensorik und auch kaum zusätzliche Algorithmen, als zur Segmentierung von Hardware erforderlich sind, benötigt werden. Erstmals wird hier ein Verfahren vorgestellt, welches in einem mit einem Laserscanner aufgenommenen Tiefenbild der Szene Weichware lokalisiert.

Die durch relativ große ebene Oberflächen begrenzte Hardware zeichnet sich dadurch aus, daß auch große ebene Oberflächenstücke segmentiert werden können. Bei der Betrachtung von Simulationsbildern der Tiefenbildauswertung fällt deutlich auf, daß dort, wo eine in Folie verpackte Textilie vorliegt, viele kleine zerklüftete Flächenstücke eng gedrängt segmentiert werden. Dieser Effekt hat zweierlei Gründe:

- Erstens haben Textilien im allgemeinen keine großen ebenen Oberflächen, weshalb das in Anhang A beschriebene Regionenwachstum dort rasch abbricht.
- Und zweitens wird durch die glänzenden Folien oftmals viel Laserlicht gestreut, so daß es im entsprechenden Bereich des Tiefenbilds zu recht großen Lücken kommt.

Eigentlich handelt es sich dabei um Störeffekte, aber gerade diese werden hier dazu verwendet, die in Folie verpackten Textilien zu lokalisieren. Zwei Regeln wurden zur Lokalisation der Textilien definiert:

1. Das Verhältnis aus Eckenanzahl zur Oberfläche eines segmentierten Flächenstücks muß einen Schwellwert überschreiten, der im wesentlichen vom Bildaufnahme- und -auswertesystem abhängt.
2. Mehrere Szenenbereichshinweise, für die Bedingung 1 erfüllt ist, müssen in enger Nachbarschaft zueinander vorliegen.

In Bereichen, in denen beide Bedingungen erfüllt sind, wird davon ausgegangen, daß eine in Folie verpackte Textilie vorliegt. Es hat sich als vorteilhaft herausgestellt und wird durch experimentelle Ergebnisse im folgenden Abschnitt unterstrichen, als Greifpunkt einen zentralen Punkt desjenigen Flächenstücks auszuwählen aus der Menge der beide Bedingungen

erfüllenden Szenenbereichshinweise, welcher die meisten direkten Nachbarn innerhalb dieser Menge hat [Müller & Wörn 2000b].

B3 Experimentelle Ergebnisse

In den Simulationsbildern der Tiefenbildauswertung in den Abbildungen B.1 bis B.3 sind durch schwarze senkrechte Linien jeweils die durch das im vorhergehenden Abschnitt beschriebene Verfahren bestimmten Greifpunkte, also die symbolischen Griffe, für die lokalisierten, in Folie verpackten Textilien markiert. Durch feine schwarze Linien werden die Nachbarschaftsbeziehungen der Flächenstücke innerhalb der Mengen von Szenenbereichshinweisen, welche beide oben angegebenen Bedingungen erfüllen, dargestellt.

Zunächst kann durch Vergleich mit den entsprechenden jeweils links daneben gezeigten Photos der Szene erkannt werden, daß die symbolischen Griffe tatsächlich mittig auf den Textilien plaziert wurden.

In Abbildung B.1 liegen die Textilien sogar überlagert vor. Da die enge Nachbarschaft zwischen den segmentierten Szenenbereichshinweisen der beiden Textilien nicht erfüllt ist, konnten erfolgreich zwei verschiedene Textilien lokalisiert werden.



Abbildung B.1: Lokalisation mehrerer Textilien trotz Überlappung

In Abbildung B.2 wird ein Fall gezeigt, in dem die beiden Textilien als nur eine Weichware lokalisiert wurden. Trotzdem konnte ein geeigneter symbolischer Griff bestimmt werden. Wenn statt eines zentralen Punkts des Flächenstücks mit den meisten Nachbarn einfach der Mittelpunkt des mittleren Flächenstücks gewählt würde, dann wäre ein eher schlechter symbolischer Griff zwischen den Textilien bestimmt worden. Nach der Entnahme des grünen, vorderen Pullovers konnte auch noch der blaue, also der hintere Pullover erfolgreich lokalisiert und entnommen werden.

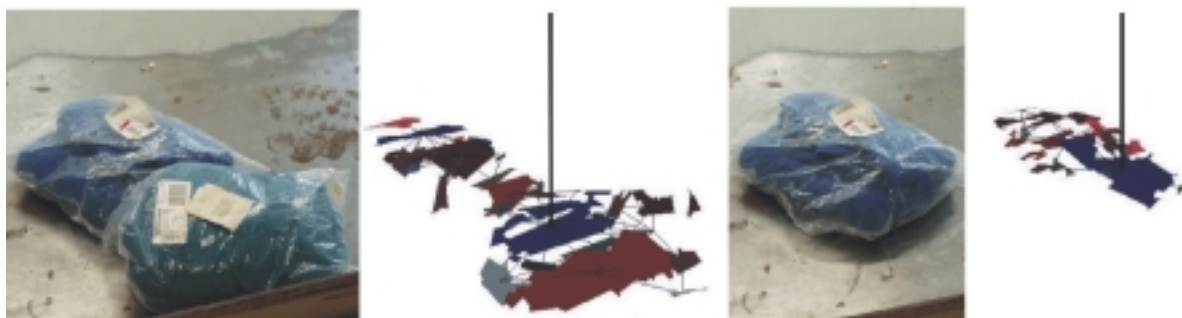


Abbildung B.2: Bestimmung eines geeigneten symbolischen Griffs trotz fehlerhafter Lokalisation zweier Textilien als eine Weichware

Schließlich zeigt Abbildung B.3 ein Experiment, bei dem erfolgreich die Krägen von Hemden lokalisiert wurden, so daß die Hemden dort gegriffen und entnommen werden konnten.



Abbildung B.3: Lokalisation von Herrenhemden

Anhang C

Verdeckungsrobustes Wiedererkennen ebener Flächenstücke im 3D-Raum

C1 Überblick

Ziel des in diesem Anhang beschriebenen Algorithmus ist das Wiedererkennen von Szenenbereichshinweisen, welche in verschiedenen zeitversetzt aufgenommenen Bildern nach dem in Anhang A beschriebenen Verfahren segmentiert werden [Müller et al. 99c]. Zwischen den Bildaufnahmen wird beispielsweise ein Objekt aus der Szene entnommen, oder Objekte werden verschoben, so daß im allgemeinen die Lagen der Szenenbereichshinweise, also der segmentierten ebenen Flächenstücke, im dreidimensionalen Raum der Szene nicht gleich bleiben.

Ein zu behandelndes besonderes Problem besteht darin, daß die Gestalt der Szenenbereichshinweise, welche das gleiche Objektteil beschreiben, bei jeder Bildaufnahme aufgrund von Rauschen sowie insbesondere von visuellen Verdeckungen deutlich variieren kann.

Es reicht daher zum Wiedererkennen nicht aus, vorgegebene a priori bekannte Merkmale wiederzufinden, wie es beispielsweise in [Bolles & Cain 82] beschrieben ist. Vielmehr sind zunächst die Merkmale, nach denen für die Wiedererkennung gesucht werden soll, überhaupt erst automatisch zu bestimmen.

C2 Verfahren zum Wiedererkennen ebener Flächenstücke

Das Vergleichen zweier Flächenstücke auf Übereinstimmung der Gestalt ist relativ einfach bei der Verwendung globaler Merkmale wie beispielsweise dem Flächeninhalt oder dem Umfang der Flächen. Jedes segmentierte Flächenstück beschreibt einen Teil der Oberfläche eines Objekts. Durch unterschiedliche visuelle Verdeckungen können die Werte dieser globalen Merkmale von in verschiedenen Bildern aufgenommenen Flächenstücken, welche alle die gleiche physikalische Oberfläche beschreiben, jedoch sehr verschieden sein.

Deshalb wird das globale Merkmal Flächeninhalt hier nur zur Grobentscheidung verwendet, welche der in zwei Bildern segmentierten Szenenbereichshinweise überhaupt für eine mögliche Übereinstimmung in Frage kommen, d.h. ob sie möglicherweise die gleiche physikalische Oberfläche beschreiben. Ein weiteres globales Merkmal zur Unterstützung der Grob-Zuordnung ist die Position des Schwerpunkts. Zwar kann sich diese Position aufgrund

von Verdeckungen bereits verschoben. Da bei der in Kapitel 6 vorgestellten Strategie die Objekte jedoch so wenig wie möglich verschoben werden sollen, können Zuordnungen von Flächenstücken, deren Schwerpunkte sehr weit auseinander liegen, bereits aus der Liste möglicher Kandidaten für die Wiedererkennung gestrichen werden.

Im Anschluß an diese Grob-Zuordnung, welche im allgemeinen noch Mehrdeutigkeiten enthält, werden lokale Merkmale für eine verbesserte Zuordnung eingesetzt. Bei den Szenenbereichshinweisen, welche durch das in Anhang A beschriebene Verfahren segmentiert werden, nämlich den ebenen Flächenstücken, bieten sich die Kantenzüge als lokale Merkmale an.

Bei jedem der Zuordnungspaare, die nach der Grob-Zuordnung vorhandenen sind, wird nach Kanten gesucht, welche etwa gleich lang sind. Bei jeder solchen Kantenübereinstimmung werden die beiden Flächenstücke jeweils durch Koordinatentransformationen so transformiert, daß der Anfangspunkt der gemeinsamen Kante dann im Ursprung des Szenen-Koordinatensystems liegt, die beiden Kanten in x -Richtung zeigen, und daß beide Flächenstücke in der horizontalen Ebene liegen. Nach diesen Transformationen liegen die beiden gerade betrachteten Flächenstücke also aufeinander. Daraufhin wird die Übereinstimmung der Kantenzüge der beiden aufeinander liegenden, in einer Kante bereits sicher übereinstimmenden Flächenstücke, untersucht. Innerhalb eines Toleranzschlauches werden abschnittsweise Übereinstimmungen der Kantenzüge bestimmt und mit der Information versehen, wie lang die Teilabschnitte sind, und wie groß die mittlere Abweichung jeweils ist. Aufgrund dieser Information kann der aktuell untersuchten Zuordnung zweier Flächen bei der bestimmten Abbildung zweier übereinstimmender Kanten aufeinander ein Qualitätswert angegeben werden, der aussagt, wie gut die beiden Flächenstücke übereinstimmen, also die gleiche physikalische Oberfläche beschreiben.

Nach dieser Untersuchungsphase liegen also Qualitätswerte zu der jeweiligen Übereinstimmung für zahlreiche Zuordnungen von Flächenstücken und dazu jeweils für vielzählige Kantenübereinstimmungen vor. Nur Zuordnungen mit sehr hohen Qualitätswerten sollten schließlich für gültig erklärt werden. Falls mehrere Zuordnungen für zwei Flächenstücke vorliegen, dann ist die Zuordnung mit dem höchsten Qualitätswert auszuwählen. Bei schlechter Übereinstimmung werden also nicht alle Flächenstücke zugeordnet. Es ist ohnehin nicht möglich, alle Flächenstücke zuzuordnen, wenn beispielsweise neue Objekte hinzukommen oder bisher verdeckte durch eine Objektentnahme sichtbar werden.

Für jede als gültig erklärte Zuordnung, also bei jeder Wiedererkennung von Szenenbereichshinweisen, wird die homogene Transformationsmatrix zur Angabe der Lageänderung des Szenenbereichshinweises zwischen den beiden Bildaufnahmen bestimmt, wozu die für die Projektion in den Ursprung des Szenen-Koordinatensystems eingesetzten Transformationen verwendet werden. Jeder zugeordnete Szenenbereichshinweis wird auch mit der Information versehen, welche Ecke für die Zuordnung in den Ursprung verschoben wurde, er wird also mit einem Stützpunkt bzw. bei Einbeziehung der übereinstimmenden Kante und der Orientierung der Fläche mit einem Stützpunkt-Koordinatensystem versehen.

Es ist somit gewährleistet und auch wichtig, daß bei zugeordneten, also wiedererkannten Szenenbereichshinweisen das Stützpunkt-Koordinatensystem immer an der gleichen Stelle innerhalb des Szenenbereichshinweises liegt. So kann für zwei in einem Bild segmentierte Szenenbereichshinweise die relative Lage bestimmt werden unter Verwendung dieser Stützpunkt-Koordinatensysteme. Falls beide Szenenbereichshinweise nach der Segmentierung in einem neuen Bild wiedererkannt werden, dann kann erneut die relative Lage bestimmt werden. Da die Stützpunkt-Koordinatensysteme jeweils an der gleichen Stelle innerhalb der

Szenenbereichshinweise liegen, sind die so bestimmten relativen Lagen miteinander vergleichbar. Es kann somit einfach festgestellt werden, ob sich die beiden Objektteile, welche durch die beiden Szenenbereichshinweise beschrieben werden, zwischen den beiden Bildaufnahmen relativ zueinander bewegt haben.

C3 Experimentelle Ergebnisse

In Kapitel 6 sind komplette Objektentnahmezyklen beschrieben, bei denen vor jeder Roboteroperation die Szenenbereichshinweise aus dem aktuellen Bild gemäß dem im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen Verfahren den Szenenbereichshinweisen aus alten Bildern zugeordnet werden. In den Abbildungen C.1 bis C.3 werden die Projektionen in die horizontale Ebene von einigen dabei zugeordneten Szenenbereichshinweisen gezeigt. Der grün eingezeichnete Kantenzug markiert jeweils den Szenenbereichshinweis aus dem alten Tiefenbild und der rote Kantenzug den Szenenbereichshinweis aus dem neuen Tiefenbild. Die Aufnahmen sind aus dem in Abschnitt 6.7.1 beschriebenen erfolgreich durchgeführten Experiment zur Entnahme der Objekte der ersten Instanz des Benchmarks „Ungewolltes Mitaneben“ entnommen.

In Abbildung C.1 ist zu erkennen, daß die Zuordnung selbst trotz erheblicher Unterschiede der Szenenbereichshinweise aufgrund von Rauschen sehr gut funktioniert. Der Szenenbereichshinweis beschreibt die obere Fläche der L-förmigen Kettensägen-Verpackung. Auf der Verpackung ist ein Photo der Kettensäge abgebildet. Am schwarz abgebildeten Griff wird projiziertes Laserlicht absorbiert, wodurch der in Abbildung C.1 zu sehende Einschluß zustande kommt. Dieser markante Einschluß trägt jedoch wesentlich zur eindeutigen Unterscheidung des Flächenstücks von ähnlichen rechteckigen Flächenstücken gleicher Größenordnung bei. Das bedeutet, daß beim hier vorgestellten Verfahren nicht nur die geometrische Form der Objekte, sondern in gewissem Umfang auch weitere Merkmale wie die Farbgestaltung automatisch genutzt werden.

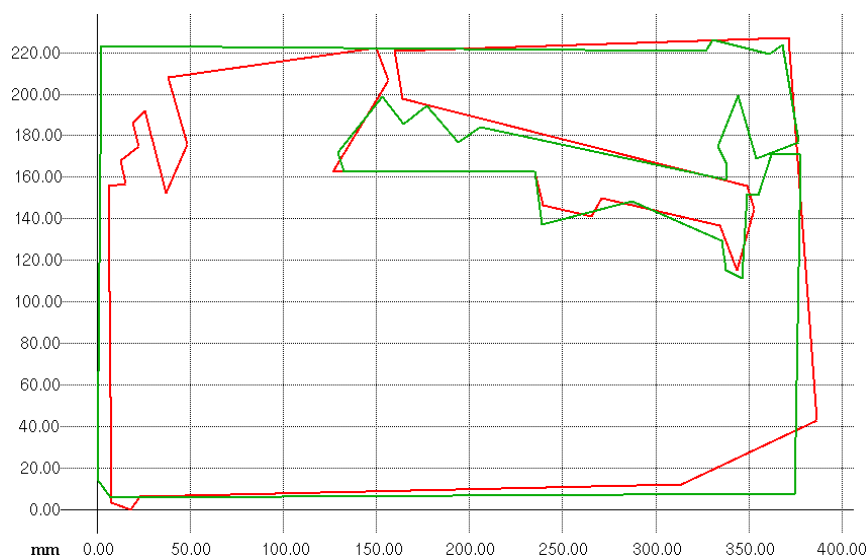


Abbildung C.1: Erfolgreiche Wiedererkennung trotz erheblichen Rauschens

Abbildung C.2 zeigt, daß die Wiedererkennung erfolgreich durchgeführt wird, obwohl das Objektteil, welches durch den Szenenbereichshinweis beschrieben wird, bei den beiden

Bildaufnahmen verschiedenartig verdeckt ist. Es handelt sich bei dem Objektteil um den unteren Schenkel der L-förmigen Verpackung, auf dem der kleine Karton liegt. Zwischen den Bildaufnahmen wurde der kleine Karton durch den Roboter etwas verdreht.

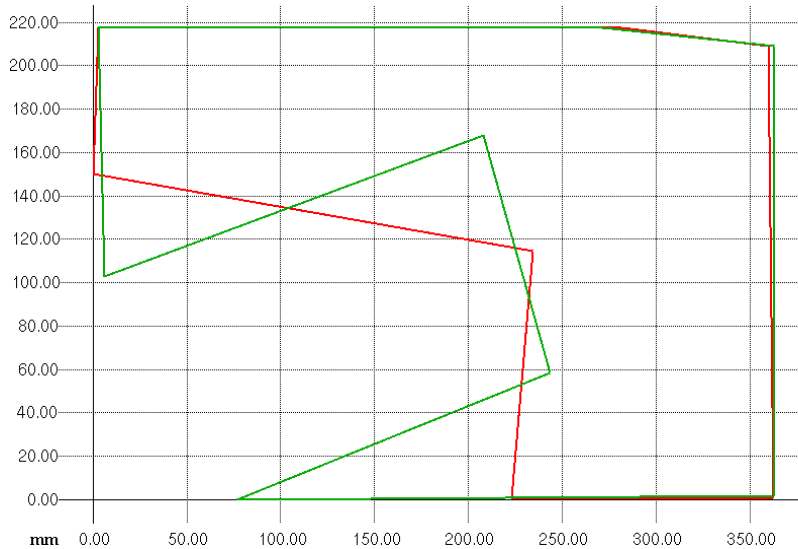


Abbildung C.2: Erfolgreiche Wiedererkennung trotz veränderlicher Verdeckungen

Abbildung C.3 zeigt schließlich noch die erfolgreiche Wiedererkennung, nachdem der kleine Karton vom Roboter entnommen wurde und somit die visuelle Verdeckung durch diesen kleinen Karton aufgehoben ist.

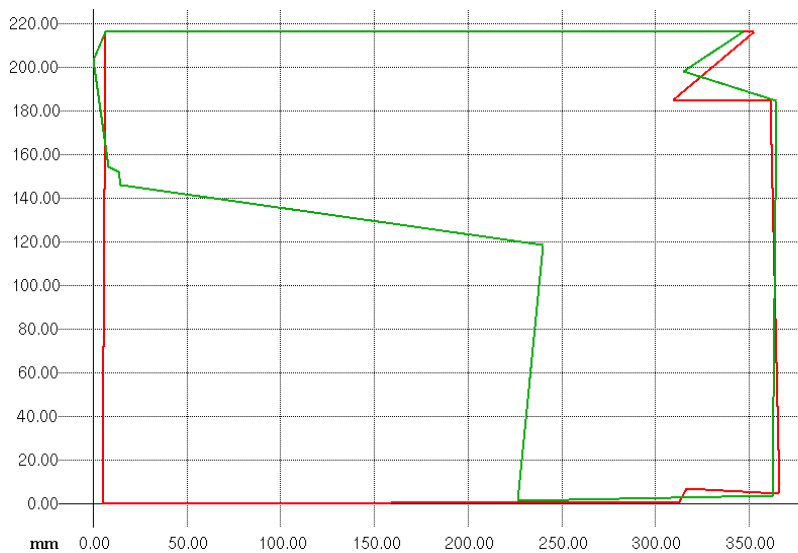


Abbildung C.3: Erfolgreiche Wiedererkennung trotz Aufhebung einer Verdeckung

Literaturverzeichnis

- [Al-Hujazi & Sood 90] E. Al-Hujazi, A. Sood: *Range Image Segmentation Combining Edge-Detection and Region-Growing Techniques with Applications to Robot Bin-Picking Using Vacuum Gripper*. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Vol. 20, Issue 6, S. 1313 - 1325, November / Dezember 1990.
- [Arai & Umeda 93] T. Arai, K. Umeda: *Vision System for Part Disassembly Using a High-Speed Range Sensor*. Proceedings of the IEEE / Tsukuba International Workshop on Advanced Robotics, S. 59 - 64, November 1993.
- [Baader & Hirzinger 94] A. Baader, G. Hirzinger: *A Self-Organizing Algorithm for Multisensory Surface Reconstruction*. IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems IROS '94, S. 81 - 88, München, September 1994.
- [Baerveldt 93] A.-J. Baerveldt: *Contribution to the Bin-Picking Problem*. Dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich, 1993.
- [Baerveldt 95] A.-J. Baerveldt: *Fast and Robust Bin-Picking with a Robot Using Range Imaging*. Proceedings of the 28th International Symposium on Automotive Technology and Automation ISATA '95, S. 145 - 151, Stuttgart, September 1995.
- [Bajcsy & Campos 92] R. Bajcsy, M. Campos: *Active and Exploratory Perception*. CVGIP: Image Understanding, Vol. 56, No. 1, S. 31 - 40, Juli 1992.
- [Balek & Kelley 85] D. J. Balek, R. B. Kelley: *Using Gripper Mounted Infrared Proximity Sensors For Robot Feedback Control*. IEEE Conference Proceedings, S. 282-287, 1985.
- [Belforte et al. 86] G. Belforte, D.N. Alfio, A. Romiti: *Brake Drums Bin-Picking*. Proceedings of the 15th International Symposium on Automotive Technology and Automation ISATA '86, Vol. 1, S. 1 - 15, Films, Oktober 1986.
- [Besl 88] P.J. Besl: *Surfaces in Range Image Understanding*. Springer-Verlag, New York, 1988.
- [Bertuch 2000] M. Bertuch: *3D-Sprinter, 3D-Grafikkarten für professionelle Anwendungen*. In c't Magazin für Computer Technik, Heise-Verlag, Heft 26, S. 180 - 183, 2000.
- [Bhanu & Faugeras 84] B. Bhanu, O.D. Faugeras: *Shape Matching of Two-Dimensional Objects*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. PAMI-6, No. 2, S. 137 - 155, 1984.
- [Birk et al. 81] J.R. Birk, R.B. Kelley, H.A.S. Martins: *An Orienting Robot for Feeding Workpieces Stored in Bins*. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Vol. SMC-11, No. 2, Februar 1981.
- [Bolles & Cain 82] R.C. Bolles, R.A. Cain: *Recognizing and Locating Partially Visible Objects: The Local-Feature-Focus Method*. The International Journal of Robotics Research, Vol. 1, No. 3, S. 57 - 82, 1982.

- [Büschel et al. 99] S. Büschel, J. Häußler, F. Christ: *Zangenartige Greifereinrichtung*. Deutsches Patent- und Markenamt, Offenlegungsschrift, DE19821187, München, September 1999.
- [Caponetti et al. 86] L. Caponetti, M.T. Chiradia, A. Distante: *A Three-Dimensional Vision System for Bin-Picking*. Proceedings of the IEEE Computer Society International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, S. 407 - 411, Miami Beach, Juni 1986.
- [Chin & Dyer 86] R.T. Chin, C.R. Dyer: *Model-Based Recognition in Robot Vision*. Computing Surveys, Vol. 18, No. 1, S. 67 - 108, 1986.
- [Cipolla & Hollinghurst 97] R. Cipolla, N. Hollinghurst: *Visually guided Grasping in Unstructured Environments*. Third International Symposium on Intelligent Robotic Systems, Pisa, Italy, published in Robotics and Autonomous Systems, Vol. 19, Iss. 3-4, S. 337-346, Elsevier, Niederlande, 1997.
- [Coleman & Sampson 85] E.N. Coleman, R.E. Sampson: *Acquisition of Randomly Oriented Workpieces Through Structure Mating*. Proceedings of the IEEE Computer Society International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, S. 350 - 357, San Francisco, Juni 1985.
- [Collins et al. 85] K. Collins, A.J. Palmer, K. Rathmill: *Development of a European Benchmark for the Comparison of Assembly Robot Programming Systems*. In: Robotic Assembly, Ed. K. Rathmill, Springer-Verlag, S. 243 - 250, 1985.
- [Cronshaw 90] T. Cronshaw: *The 'Intelligent' Chocolate Packing Robot*. Proceedings of the International Symposium on Industrial Robots ISIR 90, S. 151 - 158, Kopenhagen, Oktober 1990.
- [Dario et al. 93] P. Dario, M. Rucci, C. Guadagnini, C. Laschi: *Integrating Visual and Tactile Information in Disassembly Tasks*. Proceedings of the International Conference on Advanced Robotics ICAR '93, S. 191 - 196, November 1993.
- [Dario et al. 94a] P. Dario, M. Rucci, C. Guadagnini, C. Laschi: *An Investigation on a Robot System for Disassembly Automation*. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation ICORA '94, Vol. 4, S. 3515 - 3521, San Diego, Mai 1994.
- [Dario et al. 94b] P. Dario, C. Guadagnini, C. Laschi, M. Rucci: *An Experimental Multisensorial Robotic System for Disassembly Automation*. Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems IROS '94, S. 2103 - 2110, München, September 1994.
- [DeCurtins & Mulgaonkar 88] J.L. DeCurtins, P.G. Mulgaonkar: *Controlling Mailpiece Manipulation using Range Images*. Proceedings of the 3rd USPS Advanced Technology Conference, S. 59 - 72, Mai 1988.
- [Dessimoz et al. 84] J.D. Dessimoz, J.R. Birk, R.B. Kelley, H. Martins, C. Lin: *Matched Filters for Bin-Picking*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. PAMI-6, No. 6, S. 686 - 696, November 1984.
- [DeviceNet 97] Open DeviceNetTM Vendor Association, Inc.: *DeviceNetTM Specifications*. Volume 1&2, Release 2.0, 1997.
- [Dillmann & Huck 91] R. Dillmann, M. Huck: *Informationsverarbeitung in der Robotik*. Springer-Lehrbuch, Springer-Verlag, Berlin, 1991.

- [DIN 96] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: *Industrieroboter-Wörterbuch, DIN EN ISO 8373*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1996.
- [Distante et al. 88] A. Distanto, N. Ancona, G. Attolico, L. Caponetti, M. Chiaradia, E. Stella: *A Model-Based 3-D Vision System for Bin-Picking*. IEEE Transactions on Circuits and Systems, Vol. 35, No. 5, Mai 1988.
- [Fahrer 97] S. Fahrer: *Entwurf und Konstruktion eines Greifersystems zur Handhabung von Waren aus dem Versandhandel*. Diplomarbeit, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik (wbk), Institut für Prozeßrechentchnik, Automation und Robotik (IPR), Universität Karlsruhe (TH), 1997.
- [Faugeras 93] O. Faugeras: *Three-Dimensional Computer Vision, A Geometric Viewpoint*. MIT Press, 1993.
- [Faverjon & Ponce 91] B. Faverjon, J. Ponce: *On Computing Two-Finger Force-Closure Grasps of curved 2D Objects*. IEEE International Conference on Robotics and Automation ICORA '91, Vol. 1, S. 424-429, Sacramento, Kalifornien, 1991.
- [Föllinger 92] O. Föllinger: *Regelungstechnik*. 7. Auflage, Hüthig Buch Verlag, Heidelberg, 1992.
- [Frederick et al. 88] B. Frederick, R.M. Carrell, E. Alexander, G. VanSant: *Singulation of Irregular Mailpieces by Adaptive Robotics*. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation ICORA '88, Vol. 3, S. 1448 – 1454, Philadelphia, 1988.
- [Füser 99] K. Füser: *Modernes Management*. Verlag C.H. Beck Wirtschaftsberater im Deutschen Taschenbuch Verlag, München, 1999.
- [Fujiwara et al. 98] N. Fujiwara, T. Onda, M. Niwakawa: *Three-Dimensional Circle Detection and Location of Pipe Joints for Bin-Picking Tasks*. Proceedings of the IEEE / RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems IROS '98, Vol. 2, S. 1216 - 1221, Victoria, Oktober 1998.
- [Gandolfo et al. 91] F. Gandolfo, M. Accordino, A. Portunato, G. Sandini, M. Tistarelli: *Object Understanding through Visuo-motor Cooperation*. Proceedings of the 2nd International Symposium on Experimental Robotics ISER '91, Toulouse, Juni 1991.
- [Geißelmann 80] H. Geißelmann: *Separating and Orienting of Parts by a Sensor Controlled Robot*. In: *Methods for Very Advanced Industrial Robots*, Ed. H. Steusloff, Springer-Verlag, Berlin, 1980.
- [Gengenbach 90] V. Gengenbach: *Automatischer Zugriff eines Roboters auf ungeordnete Werkstücke mit Hilfe einer 3D-Lagebestimmung durch ein Mehrkammersystem*. Diplomarbeit, Universität Karlsruhe (TH), Institut für Algorithmen und Kognitive Systeme, ausgeführt am Fraunhofer-Institut für Informations- und Datenverarbeitung (IITB), 1990.
- [Ghosh et al. 96] B.K. Ghosh, T.-J. Tarn, N. Xi, Z. Yu, D. Xiao: *Calibration-Free Visually Controlled Manipulation of Parts in a Robotic Manufacturing Workcell*. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA '96, Vol. 4, S. 3197 - 3202, April 1996.

- [González-Linares et al. 99] J. González-Linares, N. Guil, P. Pérez, M. Ehrenmann, R. Dillmann: *An Efficient Image Processing Algorithm for High-Level Skill Acquisition*. Proceedings of the IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning ISATP, S. 262 – 267, Porto, 1999.
- [Gore et al. 88] K. Gore, H. Lipkin, S. Dickerson: *End Effector Design for Bin-Picking of Flexible Packages*. Proceedings of the SME Society of Manufacturing Engineering Conference Robots 12 and Vision '88, Vol. 2, S. 15.13 - 15.20, Detroit, Juni 1988.
- [Grimson 91] W.E.L. Grimson: *The Combinatorics of Heuristic Search Termination for Object Recognition in Cluttered Environments*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 13, No. 9, September 1991.
- [Grimson et al. 93] W.E.L. Grimson, T. Lozano-Pérez, N. Noble, S.J. White: *An Automatic Tube Inspection System That Finds Cylinders in Range Data*. Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition CVPR '93, S. 446 - 452, Juni 1993.
- [Groover et al. 87] M.P. Groover, M. Weiss, R.N. Nagel, N.G. Odrey: *Robotik umfassend*. Übers.: P. Roland, Orig.: Industrial Robotics: Technology, Programming and Applications, McGraw-Hill Book Company, Hamburg, 1987.
- [Henderson & Shilcrat 84] T. Henderson, E. Shilcrat: *Logical Sensor Systems*. Journal of Robotic Systems, S. 169 - 193, 1984.
- [Hirata et al. 85] Y. Hirata, Y. Nishida, H. Mochida: *A New Type Bin-Picking Robot with Tactile Sensory Feedback*. Proceedings of the 15th International Symposium on Industrial Robots, Vol. 1, S. 173 - 180, Tokyo, 1985.
- [Horn 93] B.K.P. Horn: *Robot Vision*. The MIT Press, Cambridge, 1993.
- [Ikeuchi et al. 84] K. Ikeuchi, B.K.P. Horn, S. Nagata, T. Callahan, O. Feingold: *Picking Up an Object from a Pile of Objects*. Proceedings of the First International Symposium on Robotics Research, S. 139 - 162, The MIT Press, 1984.
- [Ikeuchi et al. 86] K. Ikeuchi, H.K. Nishihara, B.K.P. Horn, P. Sobalvarro, S. Nagata: *Determining Grasp Configurations using Photometric Stereo and the PRISM Binocular Stereo System*. The International Journal of Robotics Research, Vol. 5, No. 1, S. 46-65, Frühjahr 1986.
- [Jacobson & Wechsler 84] L. Jacobson, H. Wechsler: *Invariant Image Representation: A Path Toward Solving The Bin-Picking Problem*. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics, S. 190 - 199, Atlanta, März 1984.
- [Kawasaki Ltd. 99] Kawasaki Ltd.: *Application Example of „PC-Based Robot Control“: Bin-Picking Robot, Bin-Picking System Using Robot*. Informationsblatt, 1999.
- [Kanade 78] T. Kanade: *Region Segmentation: Signal vs. Semantics*. In T. Sakai (Ed.): Proceedings of the Fourth International Joint Conference on Pattern Recognition, S. 95 - 105, Japan, November 1978.
- [Kelley et al. 83] R.B. Kelley, H.A.S. Martins, J.R. Birk, J.-D. Dessimoz: *Three Vision Algorithms for Acquiring Workpieces from Bins*. Proceedings of the IEEE, Vol. 71, No. 7, S. 803 - 820, Juli 1983.
- [Kelley 84] R. B. Kelley: *Heuristic Vision Algorithms for Bin-Picking*. Proceedings of the 14th International Symposium on Industrial Robots, S. 599-610, Göteborg, Schweden, 1984.

- [Kelley et al. 85] R. B. Kelley, P. R. Gouin: *Using Neighbourhood Operators to Detect Graspable Inside and Outside Edges*. SPIE Vol. 595 Computer Vision for Robots, 1985.
- [Kim et al. 91] T.W. Kim, I.H. Suh, G.Y. Kim: *A Fuzzy Logic Based Bin-Picking Technique*. Proceedings of the International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation IECON '91, Vol. 2, S. 1573 - 1578, Oktober 1991.
- [Kim et al. 94] S.R. Kim, B.K. Kim, H.S. Kang, S.J. Hwang, M.H. Kim: *An Efficient Algorithm for Recognition of 2-D Partially Occluded Objects Using Polygons*. Proceedings of The Third International Conference on Automation, Robotics and Computer Vision ICARCV '94, S. 2015 - 2019, Singapur, 1994.
- [Kim et al. 98] I. Kim, G. Vachtsevanos: *Overlapping Object Recognition: A Paradigm for Multiple Sensor Fusion*. IEEE Robotics & Automation Magazine, Vol. 5, No. 3, S. 37 - 44, September 1998.
- [Kollnig et al. 95] H. Kollnig, H. Leuck, H.-H. Nagel: *Detektion und Verfolgung von Fahrzeugen in Straßenverkehrsszenen: Systematische Bewertung und Steigerung der Systemleistung*. Mustererkennung 1995, Verstehen akustischer und visueller Informationen. Proceedings des 17. DAGM-Symposiums, Bielefeld, Informatik aktuell, Springer-Verlag, S. 303 - 310, Berlin, September 1995.
- [Kooijman & Wel 88] C.J. Kooijman, R.J.M.v.d. Wel: *Automated parcel handling with robots: A package deal*. Proceedings of the 18th International Symposium on Industrial Robots, S. 53 - 64, Lausanne, April 1988.
- [Kossow 98] M. Kossow: *Greifen beliebiger Objekte auf Basis von 3D Sensordaten*. 5. Laborbesuch des GI-Fachausschusses 4.3 / 1.4, Gesellschaft für Informatik, Bremen, März 1998.
- [Laugier et al. 90] C. Laugier, A. Ijel, J. Troccaz: *Combining vision based information and partial geometric models in automatic grasping*. Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Robotics ICORA '90, Vol. 1, S. 676-682, Ohio, Cincinnati, Mai 1990.
- [Lee & Glickman 88] J. Lee, F. Glickman: *Applying Intelligent Robotics and Vision to Mail Processing*. Proceedings of the IEEE International Symposium on Intelligent Control 88, S. 724 - 729, Arlington, 1988.
- [Lehmann & Klaiber 99] K. Lehmann, T. Klaiber: *Automatische Handhabung von Werkstücken durch robuste 6D-Objektlokalisierung*. Informationsblatt, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automation, Stuttgart, März 1999.
- [Li & Lee 96] Y.F. Li, M. H. Lee: *Applying Vision Guidance in Robotic Food Handling*. IEEE Robotics & Automation Magazine, Vol. 3, No. 1, S. 4 - 12, März 1996.
- [Lozano-Pérez 81] T. Lozano-Pérez: *Automatic Planning of Manipulator Transfer Movements*. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, vol. SMC-11, no. 10, Oktober 1981.
- [Lucht et al. 93] H. Lucht, U. Plauschin, H. Dürr: *Kunststoffe mit Infrarot-Messung sortenrein trennen*. Umwelt, Vol. 23, No. 7/8, S. 443 - 444, 1993.
- [Mason 82] M. T. Mason: *Manipulator Grasping and Pushing Operations*. Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 1982.

- [Mattone et al. 98a] R. Mattone, L. Adduci, A. Wolf: *Online Scheduling Algorithms for Improving Performance of Pick-and-Place Operations on a Moving Conveyor Belt*. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA '98, Vol. 3, S. 2099 - 2105, Leuven, Mai 1998.
- [Mattone et al. 98b] R. Mattone, G. Campagiorni, A. Wolf: *Fuzzy-Based Processing of 3D Information for Items Localization in the Automated Sorting of Recyclable Packaging*. Proceedings of the IEEE International Conference on Fuzzy Systems, IEEE World Congress on Computational Intelligence, Vol. 2, S. 1613 – 1618, 1998.
- [Müller 92] C. Müller: *Verwendung von Bildauswertungsmethoden zur Erkennung und Lagebestimmung von generischen polyedrischen Objekten im Raum*. Dissertation, Universität Karlsruhe, Dissertationen zur Künstlichen Intelligenz, infix, 1992.
- [Müller & Rembold 99] M. Müller, D. Rembold: *Robot for Picking Goods*. Journal paper, NOVAtch- Automotive Engineering International, 1/1999, S. 28-29, Wernbacher Verlags KEG, Graz, 1999.
- [Müller et al. 99a] M. Müller, D. Rembold, H. Wörn: *Communication Architecture for a Robot Cell*. CAN Newsletter 3/1999, pbl. pz marketing Holger Zeltwanger, S. 62-63, Nürnberg, September 1999.
- [Müller et al. 99b] M. Müller, T. Längle, H. Wörn: *Grasping and Reliable Picking of Overlapping Objects in Unstructured Scenes*. Proceedings of the International Conference on Advanced Robotics ICAR '99, S. 53 - 58, Tokyo, Oktober 1999.
- [Müller et al. 99c] M. Müller, S. Stepanov, T. Längle, H. Wörn: *Robust Detection of Object Displacements in Unstructured Scenes*. Proceedings of the 14th IAR Annual Meeting, S. 1-6, Institut Franco-Allemand de l'Automation et de la Robotique, Straßburg, November 1999.
- [Müller et al. 99d] M. Müller, D. Rembold, J.A. Mendieta, T. Längle, H. Wörn: *Sensorintegration in Robotersteuerung am Beispiel taktiler Sensoren für Greiferfinger*. Proceedings des Kongresses SPS / IPC / DRIVES, S. 885-894, Nürnberg, November 1999.
- [Müller et al. 2000] M. Müller, T. Längle, H. Wörn: *Secure Picking of Disarranged Objects Using Probabilistic Reasoning*. Proceedings of the International Conference on Artificial Intelligence ICAI 2000, CSREA Press, Volume II, S. 995 - 1001, Las Vegas, Juni 2000.
- [Müller & Wörn 2000a] M. Müller, H. Wörn: *Bin-Picking Systems and Applications - A State of the Art* - . Proceedings of the IASTED International Conference Robotics and Automation RA 2000, S. 1 - 10, Honolulu, Hawaii, August 2000.
- [Müller & Wörn 2000b] M. Müller, H. Wörn: *Localization of Flexible Objects packed in Transparent Foils*. Proceedings der Jahrestagung der Deutschen Arbeitsgemeinschaft für Mustererkennung e.V. DAGM 2000, Springer-Verlag, Berlin, S. 253 - 260, Kiel, September 2000.
- [Müller & Wörn 2000c] M. Müller, H. Wörn: *Planning of Rapid Grasp Operations in Unstructured Scenes*. Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems IROS 2000, Vol. 3, S. 1975 - 1980, Takamatsu, Japan, Oktober / November 2000.

- [Müller & Wörn 2000d] M. Müller, H. Wörn: *A Multisensorial Robotic System for Reliable Picking of Scarcely Modelled Objects*. Proceedings of the 6th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision ICARCV 2000, S. 220 - 225, Singapur, Dezember 2000.
- [Müller et al. 2001] M. Müller, M. Leisener, H. Wörn: *Benchmarks for the Comparison of Robot Systems for Object Picking*. Proceedings of the 32nd International Symposium on Robotics ISR 2001, Seoul, April 2001.
- [Müller & Wörn 2001] M. Müller, H. Wörn: *A New Generation Robot System for Object Picking*. Ersch. in Proceedings of the IEEE Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems MFI 2001, Baden-Baden, August 2001.
- [Mulgaonkar & DeCurtins 89] G. Mulgaonkar, J. DeCurtins: *Scene Description for Object Manipulation in Unstructured Environments*. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation ICORA 89, Vol. 1, S. 354-359, Mai 1989.
- [Musse et al. 99] O. Musse, F. Heitz, J.-P. Armspach: *3D Deformable Image Matching Using Multiscale Minimization of Global Energy Functions*. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Vol. 2, S. 478 - 484, Juni 1999.
- [Nagel 79] H.-H. Nagel: *Über die Repräsentation von Wissen zur Auswertung von Bildern*. In J.P. Foith (Hrsg.): *Angewandte Szenenanalyse*, DAGM Symposium, Karlsruhe, Oktober 1979, Springer-Verlag, S. 3 - 21, 1979.
- [Nagel 87] H.-H. Nagel: *Principles of (Low-Level) Computer Vision*. In: *Fundamentals in Computer Understanding: Speech and Vision*, Ed. J.P. Haton, Cambridge Univ. Press, Cambridge, S. 113 - 139, 1987.
- [Ohba & Ikeuchi 96a] K. Ohba, K. Ikeuchi: *Recognition of the Multi-Specularity Objects Using the Eigen-Window*. Proceedings of the 13th International Conference on Pattern Recognition ICPR '96, Vol. 1, S. 692 - 696, August 1996.
- [Ohba & Ikeuchi 96b] K. Ohba, K. Ikeuchi: *Recognition of the Multi Specularity Objects for Bin-picking Tasks*. Proceedings of the IEEE / RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems IROS '96, Vol. 3, S. 1440 - 1447, November 1996.
- [Ohba & Ikeuchi 97] K. Ohba, K. Ikeuchi: *Detectability, Uniqueness, and Reliability of Eigen Windows for Stable Verification of Partially Occluded Objects*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 19, Issue 9, S. 1043 - 1048, September 1997.
- [Ohba et al. 97] K. Ohba, Y. Sato, K. Ikeuchi: *Visual Learning and Object Verification with Illumination Invariance*. Proceedings of the IEEE / RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems IROS '97, Vol. 2, S. 1044 - 1050, September 1997.
- [Okada et al. 97] N. Okada, T. Nagata, T. Hasegawa: *A Reliable Parts-Picking System with an Active and Multi-Sensor Visual System*. *Robotica*, Vol. 15, S. 693- 700, Cambridge University Press, 1997.
- [Onda et al. 95] T. Onda, H. Igura, M. Niwakawa: *A Handling System for Randomly Placed Casting Parts Using Plane Fitting Technique*. Proceedings of the IEEE / RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems '95, Vol. 3, S. 435 - 440, August 1995.

- [Paul 82] R.P. Paul: *Robot Manipulators: Mathematics, Programming and Control*. MIT Press, Cambridge, 1982.
- [Patel et al. 94] D. Patel, I. Hannah, E.R. Davies: *Foreign object detection via texture analysis*. Proceedings of the 12th International Conference on Pattern Recognition IAPR, Vol. 1, S. 586 – 588, 1994.
- [Pearl 94] J. Pearl: *Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of Plausible Inference*. 2. Auflage, 3. Druck, Verlag Morgan Kaufmann, San Francisco, 1994.
- [Pertin-Troccaz 89] J. Pertin-Troccaz: *Grasping: A State of the Art*. The Robotics Review 1, ed. O. Khatib, S. 71-98, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1989.
- [Raczkowsky 91] J. Raczkowsky: *Multisensordatenverarbeitung in der Robotik*. Dissertation an der Universität Karlsruhe (TH), Informatik-Fachberichte 268, Springer-Verlag, 1991.
- [Rahardja & Kosaka 96] K. Rahardja, A. Kosaka: *Vision-Based Bin-Picking: Recognition and Localization of Multiple Complex Objects Using Simple Visual Cues*. Proceedings of the IEEE / RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems IROS '96, Vol. 3, S. 1448 – 1457, November 1996.
- [Raymond et al. 83] C. Raymond, M. Donath, W.R. Olson: *Problems of Vision Directed Robots in an Unstructured Parts Handling Environment*. Proceedings of the 13th International Symposium on Industrial Robots and Robots 7 ISIR '83 / Robots 7, Vol. 2, S. 14 / 1 - 14 / 18, Chicago, April 1983.
- [Rembold et al. 98] D. Rembold, T. Fischer, M. Müller, H. Wörn: *A flexible manipulation system for a large variety of objects*. Proceedings of the International Conference on Agile, Intelligent and Computer Integrated Manufacturing Systems, Troy New York, 1998.
- [Rembold 2000] D. Rembold: *Kommissioniersystem mit automatischer Zuordnung von Greifwerkzeugen für die flexible Handhabung von Objekten*. Dissertation an der Fakultät für Informatik, Universität Karlsruhe (TH), Dezember 2000.
- [Remde 2001] A.J. Remde: *Ein Ansatz zur Montage deformierbarer linearer Werkstücke mit Industrierobotern*. Dissertation an der Fakultät für Informatik der Universität Karlsruhe (TH), GCA-Verlag, Herdecke, Februar 2001.
- [Röhrdanz & Wahl 97] F. Röhrdanz, F. M. Wahl: *Automatisierte sensorgestützte Greifplanung auf der Grundlage von multiplen Graubilddaten*. DFG-Abschlußbericht, Aktenzeichen Wa 496/6-2, Projektteil Braunschweig, 2. Projektabschnitt 1995 – 1997.
- [Röhrdanz 98] F. Röhrdanz: *Modellbasierte automatisierte Greifplanung*. Dissertation, Technischen Universität Braunschweig, Shaker Verlag, Fortschritte in der Robotik, Band 3, Aachen, 1998.
- [Rubarth et al. 96] W. Rubarth, W. Gerke, H. Seier: *Stör- und Wertstoffseparation in Abfallbehandlungsanlagen*. Umwelt, Vol. 26, No. 10, S. 43 – 46, 1996.
- [Rucci & Dario 94] M. Rucci, P. Dario: *Autonomous Learning of Tactile-Motor Coordination in Robotics*. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol. 4, S. 3230 - 3236, San Diego, Mai 1994.
- [Rutishauser 95] M. Rutishauser: *From Triangular Meshes to Grasps: a 3D Robot Vision System handling Unmodeled Objects*. Dissertation, Hochschulschriften-Nr.: Diss. ETH 11325, Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich, 1995.

- [Sagerer et al. 95] G. Sagerer, S. Posch, F. Kummert (Hrsg.): *Mustererkennung 1995, Verstehen akustischer und visueller Informationen*. Proceedings des 17. DAGM-Symposiums, Bielefeld, Informatik aktuell, Springer-Verlag, Berlin, September 1995.
- [Sakata 82] T. Sakata: *An Experimental Pin-Picking Robot System*. Proceedings of the IFS - IPA 3rd International Conference on Assembly Automation, S. 615 - 629, Böblingen, Mai 1982.
- [Sanz et al. 97] P. J. Sanz, A. P. del Pobil, J. M. Inesta: *Real-Time Grasping of Unknown Objects Based on Computer Vision*. Proceedings of the 8th International Conference on Advanced Robotics, Castellon, Spain, S. 319-324, 1997.
- [Schloen 94] J. Schloen: *Wissensbasierte Bewegungsausführung für die Montage-automatisierung von Industrierobotern*. Dissertation an der Universität Karlsruhe (TH), Fakultät für Informatik, infix Verlag, Dissertationen zur Künstlichen Intelligenz, Band 73, Sankt Augustin, 1994.
- [Schmolt 92] B. Schmolt: *Autonomous Robotic Disassembly in the Blocks World*. The International Journal of Robotics Research, Vol. 11, No. 5, 1992.
- [Schraft et al. 88] R.D. Schraft, M. Schweizer, G.E. Fischer: *Robotized Assembly of O-Ring Seals: Bin-Picking, Handling and Flexible Joining into Different Groove Contours*. Proceedings of the 18th International Symposium on Industrial Robots, S. 37 - 50, Lausanne, April 1988.
- [Schraft et al. 93] R.D. Schraft, E. Degenhart, M. Hägele, M. Kahmeyer: *New Robot Applications in Production and Service*. Proceedings of the IEEE / Tsukuba International Workshop on Advanced Robotics, S. 15 - 23, November 1993.
- [Schroeder et al. 98] W. Schroeder, E. Forgber, G. Röh: *Laser Range Camera Applications*. Proceedings of the 5th ESA Workshop on Advanced Space Technologies for Robotics and Automation ASTRA '98, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, Dezember 1998.
- [Schwab 99] A.J. Schwab: *Managementwissen für Ingenieure*. Springer-Verlag, 2., neubearbeitete Auflage, 1999.
- [Schweikard & Schwarzer 97] A. Schweikard, F. Schwarzer: *General Translational Assembly Planning*. Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation ICRA '97, 1997.
- [Seidel 94] T. Seidel: *Kunststoffe mit dem Gleitfunken identifizieren*. Umwelt, Vol. 24, No. 5, S. 236 - 237, 1994.
- [Seitz et al. 95] M. Seitz, U. Holeschak, K. Kleinmann: *Active Inspection and Handling of Unknown Objects using an autonomous Hand-Arm-Eye System*. Proceedings of the 4th International Conference on Intelligent Autonomous Systems, S. 582-589, Karlsruhe, 1995.
- [Spreng 93] M. Spreng: *Situationsanalyse bei Kontakten während der Ausführung von Roboterbewegungen in unsicheren Umgebungen*. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), Dissertationen zu Künstlichen Intelligenz, infix, 1993.
- [Stockman et al. 88] G.C. Stockman, S.-W. Chen, G. Hu, N. Shrikhande: *Sensing and Recognition of Rigid Objects Using Structured Light*. IEEE Control Systems Magazine, Vol. 8, Issue 3, S. 14 - 22, 1988.

- [Sujan & Dubowsky 99] V. A. Sujan, S. Dubowsky: *The Design of a 3-D Surface Geometry Acquisition System for Highly Irregular Shaped Objects: with Application to CZ Semiconductor Manufacture*. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA '99, Detroit, 1999.
- [Svensson 88] R. Svensson: *Robot Vision as a Flexible Tool for Material Handling*. Proceedings of the 7th International Conference on Robot Vision and Sensory Controls RoViSeC-7, S. 13 - 20, Zürich, Februar 1988.
- [Swietlik 94] A. Swietlik: *Geometrische Rekonstruktion von dreidimensionalen Szenen aus Abstandsdaten*. Dissertation, Universität Karlsruhe, Fortschrittsberichte VDI, 1994.
- [Takenouchi et al. 98] A. Takenouchi, N. Kanamaru, M. Mizukawa: *Hough-Space-Based Object Recognition Tightly Coupled with Path Planning for Robust and Fast Bin-Picking*. Proceedings of the IEEE / RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems IROS '98, Vol. 2, S. 1222 - 1229, Victoria, Oktober 1998.
- [Tella et al. 80] R. Tella, R. Kelley, J. Birk: *A Contour Adapting Vacuum Gripper*. Proceedings of the 10th International Symposium on Industrial Robots and 5th International Conference on Industrial Robot Technology, S. 175 - 189, Milan, März 1980.
- [Tella et al. 82] R. Tella, J.R. Birk, R.B. Kelley: *General Purpose Hands for Bin-Picking Robots*. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Vol. SMC-12, S. 828 - 837, November / Dezember 1982.
- [Tonko 97] M. Tonko: *Zur sichtsystemgestützten Demontage am Beispiel von Altfahrzeugen*. Dissertation, Fraunhofer-Institut für Informations- und Datenverarbeitung (IITB), Karlsruhe, Dissertationen zu Künstlichen Intelligenz, infix, 1997.
- [Trobina & Leonardis 95] M. Trobina, A. Leonardis: *Grasping Arbitrarily Shaped 3-D Objects from a Pile*. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA '95, Vol. 1, S. 241 - 246, Nagoya, Mai 1995.
- [Trobina 95] M. Trobina: *From Planar Patches to Grasps: a 3D Robot Vision System handling Unmodeled Objects*. Dissertation, Hochschulschriften-Nr.: Diss. ETH 11326, Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich, 1995.
- [Tsikos 87] C.J. Tsikos: *Segmentation of 3-D Scenes Using Multi-Modal Interactions Between Machine Vision and Programmable, Mechanical Scene Manipulation*. Ph.D. Dissertation, Department of Computer and Information Science, University of Pennsylvania, Philadelphia, Dezember 1987.
- [Tsikos & Bajcsy 91] C.J. Tsikos, R.K. Bajcsy: *Segmentation via Manipulation*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 7, No. 3, S. 306 - 319, 1991.
- [Umeda & Arai 94] K. Umeda, T. Arai: *Industrial Vision System by Fusing Range Image and Intensity Image*. Proceedings of the IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems MFI '94, S. 337 - 344, Las Vegas, Oktober 1994.
- [Vayda & Kak 90] A.J. Vayda, A.C. Kak: *Geometric Reasoning for Pose and Size Estimation of Generic Shaped Objects*. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation ICORA 90, Ohio, Cincinnati, Mai 1990.
- [Vayda & Kak 91] A.J. Vayda, A.C. Kak: *A Robot Vision System for Recognition of Generic Shaped Objects*. CVGIP: Image Understanding, Vol. 54, No. 1, Juli 1991.

- [VDI 2000] Verein Deutscher Ingenieure: *VDI-Guideline 4402 Benchmarking (German / English)*. Düsseldorf, November 2000.
- [Walter 84] W.W. Walter: *Applying Robotic Vision for Assembly and Fabrication*. Proceedings of the 3rd Annual Applied Machine Vision Conference, S. 5.13 - 5.23, Schaumburg (Chicago), Februar 1984.
- [Wang et al. 94] S. Wang, R. Cromwell, A. Kak, I. Kimura, M. Osada: *Model-Based Vision for Robotic Manipulation of Twisted Tubular Parts: Using Affine Transforms and Heuristic Search*. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA '94, Vol. 1, S. 208 - 215, Mai 1994.
- [Wang & Ben-Arie 99] Z. Wang, J. Ben-Arie: *Generic Object Detection using Model Based Segmentation*. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Vol. 2, S. 428 - 433, Ft. Collins, 1999.
- [Watanabe et al. 90] Y. Watanabe, Y. Mizutani, H. Miwa: *Gray Scale Image Processing for Bin-Picking of Cylindrical Objects*. Proceedings of the 1st International Symposium on Measurement and Control in Robotics ISMCR '90, Vol. 2, S. E.1.2.1 - 4, Houston, Juni 1990.
- [Wechsler & Zimmermann 89] H. Wechsler, G.L. Zimmermann: *Distributed Associative Memory (DAM) for Bin-Picking*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 11, No. 8, S. 814 - 822, August 1989.
- [Weigl et al. 95] A. Weigl, H. Tolle, A. Micheli: *An Approach to detect and overcome Blocking Situations in Robotic Disassembly*. Advances in Robotics, The ERNET Perspective, S. 231-240, World Scientific Publishing, Singapur, 1995.
- [Weigl et al. 96] A. Weigl, K. Hohm, H. Tolle: *A Flexible Tactile Grasping Strategy for Autonomous Robotic Disassembly*. Proceedings of the 27th International Symposium on Industrial Robots, S. 375-380, Milan, 1996.
- [Weigl 97] A. Weigl: *Exemplarische Untersuchungen zur flexiblen automatisierten Demontage elektronischer Geräte mit Industrierobotern*. Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, Shaker Verlag Aachen, 1997.
- [Wörn et al. 2000a] H. Wörn, T. Fischer, M. Müller, D. Rembold: *Object Handling with a Robot System using Various Grippers*. Proceedings of the International Conference on Intelligent Autonomous Systems IAS-6, Eds. E. Pagello et al., IOS Press, S. 395 - 401, Venedig, Juli 2000.
- [Wörn et al. 2000b] H. Wörn, D. Rembold, M. Müller, T. Längle: *Entwicklung einer Roboterzelle für die Automation im Versandhandel*. Proceedings der Konferenz Robotik 2000, VDI Berichte 1552, S. 259-264, Berlin, August 2000.
- [Wörn et al. 2000c] H. Wörn, D. Rembold, M. Müller, T. Fischer, S. Fahlbusch: *Sicher im Griff*. In MM Maschinenmarkt, Das IndustrieMagazin, Sonderausgabe Deutschland innovativ 2000, Vogel Verlag, S. 58 - 65, Würzburg, November 2000.
- [Wörn & Müller 2001a] H. Wörn, M. Müller: *Wie ein Kind, das die Welt mit Neugierde erforscht - Institut entwickelt neue Generation von Robotern*. UniKaTH, Neues vom Campus der Universität Karlsruhe (TH), Herausg. im Auftrag des Rektors der Universität Karlsruhe (TH) von der Abteilung Presse und Kommunikation, S. 7, Februar 2001.

- [Wörn & Müller 2001b] H. Wörn, M. Müller: *Autonomous Robotic System for Commission Tasks*. Proceedings of the 32nd International Symposium on Robotics ISR 2001, Seoul, April 2001.
- [Wolf 99] A. Wolf: *Sortieren von Leichtverpackungen mit Handhabungssystemen*. Dissertation, University of Stuttgart, Jost-Jetter Verlag, Heimsheim, 1999.
- [Wolter et al. 86] J.D. Wolter, R.A. Volz, A.C. Woo: *Automatic Generation of Gripping Positions for Assembly*. In: Robot Grippers, Ed. D.T. Pham, W.B. Heginbotham, Springer-Verlag, S. 55 - 74, 1986.
- [Wurll 2000] C. Wurll: *Mehrziel-Bahnplanung für Industrieroboter*. Dissertation an der Universität Karlsruhe (TH), Fakultät für Informatik, GCA-Verlag, Herdecke, 2000.
- [Yanagihara & Kita 91] Y. Yanagihara, T. Kita: *Parts-Picking in Disordered Environment*. Proceedings of the IEEE / RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems IROS '91, Vol. 2, S. 517 - 522, Osaka, November 1991.
- [Yang & Kak 86] H.S. Yang, A.C. Kak: *Determination of the Identity, Position and Orientation of the Topmost Object in a Pile*. Comput. Vision, Graphics, Image Processing, Vol. 36, S. 229 - 255, 1986.

Lebenslauf des Autors



Persönliche Daten

Name: Markus Müller
 Geburtsdatum: 19.8.1970
 Geburtsort: Herxheim b. Landau / Pfalz
 Familienstand: Verheiratet, eine Tochter

Ausbildung

1977 - 1981 Grundschule Herxheim
 1981 - 1990 Max-Slevogt-Gymnasium in Landau / Pfalz
 1991 - 1997 Studium der Elektrotechnik an der Universität Karlsruhe (TH)
 mit dem Schwerpunkt Regelungs- und Steuerungstechnik
 Diplomarbeit: Entwurf der visuellen Regelung eines Manipulatorarms und deren
 (8/96 - 2/97) Realisierung, durchgeführt am Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des
 Systèmes (LAAS/CNRS) in Toulouse, Frankreich

Praktika

8/91 - 9/91 Siemens AG, München
 3/95 - 4/95 Sachs Allinquant S.A. in Mouy / Oise, Frankreich
 4/96 - 7/96 LAAS / CNRS in Toulouse, Frankreich

Berufstätigkeit

seit 1.3.1997 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Prozeßrechenstechnik,
 Automation und Robotik (IPR) der Universität Karlsruhe (TH)

Militär- und Zivildienst

7/90 - 12/90 Inst.Ausb.Komp. 6/2 in Baunatal und
 Pionierausbildungszentrum 850 in Speyer
 1/91 - 9/91 Caritas, Sozialstation in Herxheim

Aktivitäten

- Übungsleiter Oberstufe alpin im Wintersportverein Herxheim e.V.
- Trompete und Klavier
- Rettungsschwimmer im DLRG e.V., Ortsgruppe Rülzheim
- Joggen, Tanzen

