

Adaptive Segmentierung von Tiefenbildern für die 3-D-Objektlageerkennung auf Basis von kombinierten regelgeometrischen Elementen

Von der Fakultät für Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik
der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

vorgelegt von
Martin Stotz
aus Mutlangen

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Alexander Verl
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Heinz Wörn

Tag der mündlichen Prüfung: 14. April 2011

Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und
Fertigungseinrichtungen der
Universität Stuttgart

2011

IPA-IAO Forschung und Praxis

Berichte aus dem
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und
Automatisierung (IPA), Stuttgart,
Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und
Organisation (IAO), Stuttgart,
Institut für Industrielle Fertigung und
Fabrikbetrieb (IFF), Universität Stuttgart
und Institut für Arbeitswissenschaft und
Technologiemanagement (IAT), Universität Stuttgart und
Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen
und Fertigungseinrichtungen (ISW), Universität Stuttgart

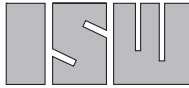
Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. e.h. Dr.-Ing. e.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper
und

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E.h. mult. Dr. h.c. mult. Hans-Jörg Bullinger
und

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dieter Spath
und


Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Alexander Verl



Institut für Steuerungstechnik
der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen



Martin Stotz

A decorative graphic element consisting of a vertical line on the left, a horizontal line extending to the right, and a solid black circle at the intersection.

Adaptive Segmentierung von Tiefenbildern für die 3-D-Objektlageerkennung auf Basis von kombinierten regelgeometrischen Elementen

Nr. 506

Dr.-Ing. Martin Stotz

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), Stuttgart

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. e.h. Dr.-Ing. e.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper

ord. Professor an der Universität Stuttgart

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), Stuttgart

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E.h. mult. Dr. h.c. mult. Hans-Jörg Bullinger

ord. Professor an der Universität Stuttgart

Präsident der Fraunhofer-Gesellschaft, München

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dieter Spath

ord. Professor an der Universität Stuttgart

Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO), Stuttgart

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Alexander Verl

ord. Professor an der Universität Stuttgart

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), Stuttgart

D 93

ISBN 978-3-939890-73-7

Jost Jetter Verlag, Heimsheim

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils gültigen Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

© Jost-Jetter Verlag, Heimsheim 2011.

Printed in Germany.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für die Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Druck: printsystem GmbH, Heimsheim

Geleitwort der Herausgeber

Über den Erfolg und das Bestehen von Unternehmen in einer marktwirtschaftlichen Ordnung entscheidet letztendlich der Absatzmarkt. Das bedeutet, möglichst frühzeitig absatzmarktorientierte Anforderungen sowie deren Veränderungen zu erkennen und darauf zu reagieren.

Neue Technologien und Werkstoffe ermöglichen neue Produkte und eröffnen neue Märkte. Die neuen Produktions- und Informationstechnologien verwandeln signifikant und nachhaltig unsere industrielle Arbeitswelt. Politische und gesellschaftliche Veränderungen signalisieren und begleiten dabei einen Wertewandel, der auch in unseren Industriebetrieben deutlichen Niederschlag findet.

Die Aufgaben des Produktionsmanagements sind vielfältiger und anspruchsvoller geworden. Die Integration des europäischen Marktes, die Globalisierung vieler Industrien, die zunehmende Innovationsgeschwindigkeit, die Entwicklung zur Freizeitgesellschaft und die übergreifenden ökologischen und sozialen Probleme, zu deren Lösung die Wirtschaft ihren Beitrag leisten muss, erfordern von den Führungskräften erweiterte Perspektiven und Antworten, die über den Fokus traditionellen Produktionsmanagements deutlich hinausgehen.

Neue Formen der Arbeitsorganisation im indirekten und direkten Bereich sind heute schon feste Bestandteile innovativer Unternehmen. Die Entkopplung der Arbeitszeit von der Betriebszeit, integrierte Planungsansätze sowie der Aufbau dezentraler Strukturen sind nur einige der Konzepte, welche die aktuellen Entwicklungsrichtungen kennzeichnen. Erfreulich ist der Trend, immer mehr den Menschen in den Mittelpunkt der Arbeitsgestaltung zu stellen - die traditionell eher technokratisch akzentuierten Ansätze weichen einer stärkeren Human- und Organisationsorientierung. Qualifizierungsprogramme, Training und andere Formen der Mitarbeiterentwicklung gewinnen als Differenzierungsmerkmal und als Zukunftsinvestition in *Human Resources* an strategischer Bedeutung.

Von wissenschaftlicher Seite muss dieses Bemühen durch die Entwicklung von Methoden und Vorgehensweisen zur systematischen Analyse und Verbesserung des Systems Produktionsbetrieb einschließlich der erforderlichen Dienstleistungsfunktionen unterstützt werden. Die Ingenieure sind hier gefordert, in enger Zusammenarbeit mit anderen Disziplinen, z. B. der Informatik, der Wirtschaftswissenschaften und der Arbeitswissenschaft, Lösungen zu erarbeiten, die den veränderten Randbedingungen Rechnung tragen.

Die von den Herausgebern langjährig geleiteten Institute, das

- Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA),
- Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO),
- Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF),
- Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement (IAT),
- Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW),

arbeiten in grundlegender und angewandter Forschung intensiv an den oben aufgezeigten Entwicklungen mit. Die Ausstattung der Labors und die Qualifikation der Mitarbeiter haben bereits in der Vergangenheit zu Forschungsergebnissen geführt, die für die Praxis von großem Wert waren. Zur Umsetzung gewonnener Erkenntnisse wird die Schriftenreihe „IPA-IAO - Forschung und Praxis“ herausgegeben. Der vorliegende Band setzt diese Reihe fort. Eine Übersicht über bisher erschienene Titel wird am Schluss dieses Buches gegeben.

Dem Verfasser sei für die geleistete Arbeit gedankt, dem Jost Jetter Verlag für die Aufnahme dieser Schriftenreihe in seine Angebotspalette und der Druckerei für saubere und zügige Ausführung. Möge das Buch von der Fachwelt gut aufgenommen werden.

Engelbert Westkämper Hans-Jörg Bullinger Dieter Spath Alexander Verl

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW) der Universität Stuttgart sowie am Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA).

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Alexander Verl danke ich für seine wohlwollende Unterstützung und Förderung meiner Arbeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Heinz Wörn danke ich für die Durchsicht meiner Arbeit und für die Übernahme des Mitberichts.

Besonderer Dank geht an Herrn Dr.-Ing. Kai-Udo Modrich, der mich bestärkt hat, meine ersten Ideen weiterzuentwickeln, der während der Erstellung immer wieder motivierende Worte fand und der am Schluss die Arbeit kritisch durchgesehen hat.

Weiterer Dank gilt allen Kolleginnen und Kollegen der Abteilung Technische Informationsverarbeitung am IPA unter Leitung von Herrn Dipl.-Inform. Markus Hüttel. Hier geht ein herzliches Dankeschön an Herrn Dipl.-Math. Jens Kühnle für viele fachliche Diskussionen über alle möglichen Themen, für die Durchsicht der Arbeit und die konstruktive Kritik sowie für das Auffinden von manchen versteckten Schreibfehlern.

Bedanken möchte ich mich auch bei Herrn Dipl.-Inform. Markus Kaupp für seine Unterstützung bei Implementierungsarbeiten im Rahmen seiner Diplomarbeit.

Meinen Eltern gilt der Dank für die Unterstützung, die ich in meinem Leben erfahren habe, so auch bei der Unterstützung, die Anzahl der Schreibfehler in dieser Arbeit zu verringern. Mein ganz besonderer liebevoller Dank gilt meiner Frau Daniela und meinen Töchtern Kathrin und Heike für ihre Geduld und Rücksichtnahme. Sie waren der Ansporn, die Arbeit zügig zu Ende zu bringen.

Schwäbisch Gmünd, April 2011

Martin Stotz

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen	13
1. Einleitung	17
1.1. Problemstellung	17
1.2. Zielsetzung und Vorgehensweise	18
2. Ausgangssituation	20
2.1. Grundlagen	20
2.1.1. Begriffe	20
2.1.2. Tiefenbild	20
2.1.3. Sensorsysteme zur optischen 3-D-Erfassung	21
2.2. Stand der Technik	22
2.2.1. Segmentierung	22
2.2.2. Übersicht über Objekterkennungsverfahren	26
2.2.3. Relevante Aspekte des Materialflusses in der Produktion	28
2.2.4. Greifen aus Schüttgut	30
2.3. Analyse der Objekterkennungsaufgabe im industriellen Anwendungsbe- reich	30
2.3.1. Analyse industriell gefertigter Bauteile und deren Geometrien	30
2.3.2. Analyse der Eigenschaften der rotationssymmetrischen Bauteile in der Industrie	31
2.3.3. Analyse der Anordnung von Teilen im Schüttgut	33
2.3.4. Analyse der durch Objekterkennung festzulegenden Freiheitsgra- de	33
2.4. Analyse der bekannten Erkennungsverfahren für regelgeometrische Ele- mente	34
2.4.1. Besteinpassung	34
2.4.2. RANSAC-Methoden	37
2.4.3. Hough-Transformation	38
2.4.4. Kombinierte Verfahren	39
2.5. Analyse der verfügbaren Verfahren zur Tiefenbildsegmentierung	40
2.5.1. Rechenzeitbedarf und erreichbare Qualität der Segmentierung	40
2.5.2. Anwendungsbereich und segmentierbare Flächentypen	40
2.5.3. Verfahren für rotationssymmetrische Objekte	41
2.5.4. Anpassbarkeit an neue Aufgaben und Parametrierung von Seg- mentierungsverfahren	42
2.6. Heuristische Optimierungsverfahren in der Bildverarbeitung	44
2.6.1. Evolutionäre Algorithmen	45
2.6.2. Anwendungen in der Bildverarbeitung	46

3. Entwicklungsschwerpunkte	49
3.1. Folgerungen aus Ausgangssituation	49
3.2. Konsequenzen für Systemkonzept	50
3.3. Anforderungen an das Gesamtsystem	50
3.4. Anforderungen an die Teilsysteme	51
3.4.1. Anforderungen an das Vorverarbeitungsverfahren und seine Konfiguration	51
3.4.2. Anforderungen an die Lagebestimmung für regelgeometrische Elemente	52
3.5. Anforderungen an die Verifikation	52
4. Konzeption	53
4.1. Entwurf des Gesamtverfahrens zur Objekterkennung	53
4.1.1. Verfahren für zylindrische Objekte	53
4.1.2. Alternative Verfahren zur Erkennung rotationssymmetrischer Objekte	55
4.1.3. Vorversuche zur Entscheidung/Begründung	57
4.1.4. Bewertung der Verfahren und Entscheidung	58
4.2. Entwurf einer selbstadaptiven Vorverarbeitungsstrategie	60
4.3. Alternative Verfahren zur Lagebestimmung	62
5. Entwicklung einer selbstadaptiven Vorverarbeitungsstrategie	64
5.1. Vorverarbeitungsstrategie im Tiefenbild	64
5.1.1. Verwendete Bildverarbeitungsoperatoren	64
5.2. Neues evolutionäres Optimierungsverfahren	66
5.2.1. Struktur der Evolutionsstrategie	66
5.2.2. Konkrete Umsetzung der Evolutionsstrategie	69
5.2.3. Realisierung der Mutation	69
5.2.4. Realisierung einer Schrittweitensteuerung	70
5.2.5. Einführung der Rekombination	71
5.2.6. Initialisierung des Algorithmus und Vorbelegung der Parameter	71
5.3. Fitnessbewertung der Individuen	72
5.3.1. Zur Bewertung verwendete Referenzdaten	73
5.3.2. Implementierte Bewertungsfunktionen	74
5.3.3. Berücksichtigung der Ausführungszeit bei der Fitnessbewertung	76
5.4. Repräsentation der Modelldaten	77
5.5. Erzeugung der simulierten Daten	78
6. Entwicklung eines Einpassverfahrens für kombinierte Elemente	79
6.1. Darstellung und Parametrisierung	79
6.2. Verwendete Grundlagen der Besteinpassung	80
6.3. Berechnung der Jacobi-Matrix	81
6.4. Zuordnungsproblem der Abstandswerte bei kombinierten Elementen	82
6.4.1. Lösungen für das globale Zuordnungsproblem	83
6.4.2. Lösung des lokalen Zuordnungsproblems	86

6.5. Ausreißerelimination	88
6.6. Implementierungsbeispiele	89
6.6.1. Kombination aus mehreren Zylindern	89
6.6.2. Kombination aus Zylindern und Kegeln	90
7. Leistungsfähigkeit automatische Konfiguration Vorverarbeitungsstrategie	92
7.1. Bewertungsmethode der Leistungsfähigkeit	92
7.2. Zur Bewertung verwendete Daten	93
7.3. Auswirkungen unterschiedlicher Konstellationen der Population	94
7.3.1. Einfluss der Populationsgröße	95
7.3.2. Elternselektion	96
7.3.3. Rekombination	97
7.4. Einflüsse der Ausgangsdaten auf die erzeugte Vorverarbeitungsstrategie	98
7.4.1. Auswirkungen verschiedener lateraler Sensorauflösungen	98
7.4.2. Auswirkungen von Rauschen in den Tiefenwerten	99
7.5. Anpassungsfähigkeit an unterschiedliche Geometrielemente	102
7.5.1. Schmiedeteil	102
7.5.2. Fließpressteil	104
7.6. Vergleich simulierte Daten – reale Daten	105
7.7. Versuche mit erweiterten Wertebereichen	107
7.8. Bewertung und Diskussion der Ergebnisse	108
7.8.1. Leistungsfähigkeit der Varianten der Evolutionsstrategien	108
7.8.2. Leistungsfähigkeit der unterschiedlichen Bewertungsmethoden	108
8. Untersuchung der Leistungsfähigkeit der Einpassverfahren	110
8.1. Untersuchung der Stabilität und Genauigkeit mit synthetischen Referenzdaten	110
8.1.1. Verwendete Daten	111
8.1.2. Einfluß der Richtung und der Position	112
8.1.3. Einfluß der Formparameter	112
8.1.4. Auswirkungen unterschiedlicher Punktverteilungen	113
8.2. Leistungsfähigkeit der Lösungen für die Zuordnungsprobleme	114
8.2.1. Globales Zuordnungsproblem	115
8.2.2. Einfluß der lokalen Punktzuordnung	117
8.3. Einpassung in reale Daten	119
8.4. Diskussion und Bewertung der Ergebnisse	123
9. Anwendungsbeispiele	124
9.1. Demonstrator zur Erkennung ungeordneter zylindrischer Objekte	124
9.2. Demonstrator zur Erkennung von Schmiedeteilen	126
10. Zusammenfassung und Ausblick	128
11. Summary	132
A. Die möglichen Auswahlkriterien des Operators select_shape	136

Verwendete Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzungen

CAD	Computer Aided Design
CCD	Charge Coupled Device
CSG	Constructive Solid Geometry
RANSAC	Random Sample Consensus
UB	Segmentierungsverfahren „University of Bern“
UML	Unified Modeling Language
USF	Segmentierungsverfahren „University of South Florida“
XML	Extensible Markup Language

Arabische Formelzeichen

$a, b, c, d, e, f, g, h, i, j$	Formparameter einer Quadrik
$A_{EP_{i,j}}$	Flächeninhalt der echt positiven Bereiche
$A_{FN_{i,j}}$	Flächeninhalt der falsch negativen Bereiche
$A_{FP_{i,j}}$	Flächeninhalt der falsch positiven Bereiche
A_{Ges}	Flächeninhalt des gesamten Bildes
A_{RB_i}	Flächeninhalt der Referenzbereiche
A_{VB_j}	Flächeninhalt der zu bewertenden Bereiche
b_t	Basisabstand bei Triangulationssensor
b	Bewertungszahl, z.B. für Fitness
$b_{EP_{i,j}}$	Bewertungszahl für einzelnen Bereich $EP_{i,j}$
$b_{FP_{i,j}}$	Bewertungszahl für einzelnen Bereich $FP_{i,j}$
$b(t)_i$	Ausführungszeitabhängige Bewertungszahl für eine Vorverarbeitungsstrategie
b_j	Bewertungszahl für einzelnen Bereich
b_g	y -Achsenabschnitt bei $y = m_g x + b_g$
C	Übereinstimmungsmenge $C := \{\mathbf{X}_i \in M \mid d_i < s\}$
d_i	Abstand (Residuum) $d_i = \ \mathbf{X}_i - \tilde{\mathbf{X}}_i\ $ zwischen Modell und Messpunkt \mathbf{X}_i
\mathbf{d}	Vektor aller Abstände $\mathbf{d}^T := (d_1, \dots, d_m)$
e	Anzahl der als erfolgreich bewerteten Bereiche bei der Fitnessbewertung
$\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3$	Einheitsvektoren
EB_j	Von der Einpassung stammende Bereiche zur Fitnessbewertung
EN	Echt negative Bereiche
EP	Echt positive Bereiche
f	Flächenfunktion in impliziter Darstellung

Inhaltsverzeichnis

F, F_i	Allgemeine Bezeichnung für Fläche bzw. Teilfläche
FN	Falsch negative Bereiche
FP	Falsch positive Bereiche
g	Anzahl aller Bereiche EB_j bei der Fitnessbewertung
g_{EP}, g_{FP}	Gewichtungsfaktor bei der Fitnessberechnung
i	Laufvariable
I_i	Individuen von P eines evolutionären Algorithmus
j	Laufvariable
J	Jacobi-Matrix
J_i	Eine Zeile der Jacobi-Matrix
$J_{i,f}$	Eine Zeile der Jacobi-Matrix für die Formparameter
$J_{i,p}$	Eine Zeile der Jacobi-Matrix für die Positionsparameter
$J_{i,r}$	Eine Zeile der Jacobi-Matrix für die Rotationsparameter
k	Anzahl der Formparameter
k	Index zu Iterationsschritt bei Gaufeinpassung
K, K_i	Ein Kegel bzw. ein Teilkegel
$\ell, \ell_i,$	Länge der regelgeometrischen Elemente bzw. Teilelemente
m	Anzahl der Messpunkte
m_g	y -Achsenabschnitt bei $y = m_g x + b_g$
m_{NB}	Anzahl der zu bewertenden Bereiche bei der Fitnessbewertung
M	Menge aller Messpunkte
n_c	Anzahl Spalten eines Tiefenbildes
n_r	Anzahl Zeilen eines Tiefenbildes
$n_{i,j}$	Normalverteilte Zufallszahl
$\mathcal{N}(0, \sigma)$	Normalverteilte Zufallszahl mit Erwartungswert 0 und Standardabweichung σ
p	Anzahl der Positionsparameter
p_h	Anzahl der Parameter bei Hough-Transformation
n_{RB}	Anzahl der Referenzbereiche zur Fitnessbewertung
p_s	Anzahl der Parameter für Segmentierungsverfahren
\mathbf{p}	Parametervektor $\mathbf{p}^T = (\mathbf{p}_f^T, \mathbf{p}_p^T, \mathbf{p}_r^T)$
\mathbf{p}_f	Formparameter $\mathbf{p}_f^T = (a_1, \dots, a_k)$
\mathbf{p}_p	Positionsparameter $\mathbf{p}_p^T = (x_0, y_0, z_0)$
\mathbf{p}_r	Rotationsparameter $\mathbf{p}_r^T(\omega, \varphi, \kappa)$
P	Population eines evolutionären Algorithmus
p	Anzahl der Rotationsparameter
p_k	Wahrscheinlichkeit der Veränderung eines Pixels
q	Anzahl der Rotationsparameter
q_i	Qualitätsmaße
q_{Rel}	Qualitätsmaß für Relevanz
q_{Seg}	Qualitätsmaß für Segreganz
q_{Sen}	Qualitätsmaß für Sensitivität
q_{Spe}	Qualitätsmaß für Spezifität
Q_e	Erfolgsquote eines evolutionären Algorithmus
r	Radius

r, r_i	Radius eines regelgeometrischen Elements bzw. Teilelements
R	Rotationsmatrix
RB_i	Referenzbereiche zur Fitnessbewertung
s	Schwellwert für Abstand
s_h	s_h die Auflösung entlang einer Dimension im Parameterraum
s_n	Normalverteilte Zufallszahl
$s(\text{EN})$	Anzahl der Bereiche EN
$s(\text{EP})$	Anzahl der Bereiche EP
$s(\text{FN})$	Anzahl der Bereiche FN
$s(\text{FP})$	Anzahl der Bereiche FP
S	Summe der Residuen $S = \sum_{i=1}^m d_i^2$
t	Schwellwert globales Zuordnungsproblem
\bar{t}	Mittlere Ausführungszeit aller Vorverarbeitungsstrategien
t_i	Ausführungszeit einer Vorverarbeitungsstrategie
T	Teilmenge $T \subset M$
u, v	Flächenparameter, z. B. in parametrischer Darstellung von F
$u_{i,j}, v_{i,j}$	Zufallszahlen aus $[0, 1]$
VB_i	Mit der Fitnessbewertung zu bewertende Bereiche
W	Positiv definite Matrix
x, y, z	x -, y - und z -Koordinate
x_0, y_0, z_0	Ursprung des Koordinatensystems des Modells
x	Koordinaten im Modellsystem
\mathbf{x}_0	Ursprung des Koordinatensystems des Modells $\mathbf{x}_0^T = (x_0, y_0, z_0)$
\mathbf{x}_i	Ein Messpunkt im Modellsystem
X	Koordinaten im Weltsystem
\mathbf{X}_i	Ein Messpunkt im Weltsystem
$\bar{\mathbf{X}}_i$	Lotfußpunkt, auf F projizierter Messpunkt \mathbf{X}_i
$z, z_{i,j}$	Tiefenwert, allgemein bzw. mit Index in Tiefenbild
Z, Z_i	Ein Zylinder bzw. ein Teilzylinder

Griechische Formelzeichen

α	Faktor bei der Schrittweitensteuerung
α, α_i	Öffnungswinkel eines Kegels bzw. der einzelnen Kegel eines kombinierten Elements
α_k	Faktor bei der Schrittweitensteuerung
β, γ	Winkel bei Berechnungen
β_t	Triangulationswinkel bei Triangulationssensor
ϵ	Schwellwert $\epsilon > 0$
ϵ_1, ϵ_1	Formparameter bei Superquadricken
η	Anzahl der Schritte bei RANSAC
λ	Anzahl der Kinder eines evolutionären Algorithmus
μ	Anzahl der Eltern eines evolutionären Algorithmus
ω, φ, κ	Rotationsparameter für Drehung jeweils um die x -, y - und z -Achse
$\Omega, \Omega_1, \Omega_2$	Optische Systeme
σ	Standardabweichung einer normalverteilten Zufallszahl

Inhaltsverzeichnis

σ_k	Standardabweichung zur Erzeugung des Rauschens bei simulierten Tiefenbildern
σ_{alt}	Altes σ bei der Schrittweitensteuerung
σ_{neu}	Neues σ bei der Schrittweitensteuerung

Kapitel 1.

Einleitung

1.1. Problemstellung

Die Variantenvielfalt in der industriellen Produktion nimmt immer weiter zu, was zu kleineren Losgrößen bei der Fertigung führt (Westkämper u. Zahn, 2009; Wiendahl u. a., 2004). Parallel wird der Kostendruck größer (Schröder, 2008; Sinn, 2007), so dass in Ländern mit relativ hohen Lohnkosten die Produktionsstandorte nur durch eine entsprechend effiziente Fertigung gehalten werden können. Dies bedingt, dass bestimmte Arbeitsaufgaben automatisiert werden müssen, was aufgrund der Variantenvielfalt flexibel erfolgen muss (Schmid, 2006).

Fast alle industriell hergestellten Produkte bestehen aus mehreren Einzelteilen, die in einzelnen Produktionsschritten gefertigt und dann zusammengefügt werden. Zwischen den einzelnen Fertigungsschritten müssen die Werkstücke oft zwischengelagert werden. Die Lagerung erfolgt oft ungeordnet, z. B. als Schüttgut in Behältern (Hardin, 2007). Für weitere Bearbeitungsschritte müssen die Werkstücke wieder geordnet zugeführt werden.

Die automatisierte geordnete Zuführung basiert meist auf einer speziell an die Werkstücke angepassten Mechanik. Dies macht die Anlagen unflexibel gegenüber Teilevarianten (Schmid, 2006). Aufgrund der größeren Flexibilität wird oft das manuelle Zuführen eingesetzt. Dabei wird auf die schnelle Anpassungsfähigkeit des Menschen zurückgegriffen.

Dies bedeutet eine hohe Belastung für das eingesetzte Personal durch die immer wiederkehrenden Tätigkeiten und Bewegungen (Bullinger u. Lung, 1994). Oft handelt es sich auch um schwere Teile, die zu starker gesundheitlicher Belastung führen, insbesondere da aufgrund der Taktzeitvorgabe in der Produktion nur eine begrenzte Zeit für die Handhabung zur Verfügung steht (Hardin, 2007; Richter, 2008).

Um die Belastungen für den Menschen zu verringern und die wünschenswerte Rationalisierung zu erreichen, ergibt sich der Bedarf nach einer Automatisierung der Handhabung. Eine flexible automatisierte Lösung für die Zuführung kann mit einem Handhabungssystem wie z. B. einem Industrieroboter realisiert werden. Dabei stellt sich jedoch das Problem, dass dem Handhabungssystem die genaue Lage des Werkstücks bekannt sein muss. Wenn diese geometrische Beschreibung der Objektlage in Form einer mathematischen Beschreibung vorliegt, kann das Werkstück gegriffen werden. Bisher haben sich in der Industrie lediglich Verfahren zur Lageerkennung etabliert, die auf 2-D-Bildverarbeitung beruhen. Damit lässt sich jedoch nur eine eingeschränkte Klasse von Problemen lösen, z. B. wenn die Objekte flach ausgebreitet vorliegen. Sollen ungeordnete Objekte aus Schüttgut entnommen werden, sind in den meisten Fällen Verfahren notwendig, die die Szene 3-Dimensional erfassen und in diesen 3-D-Daten dann die

Objektlage bestimmen (Chen u. Bhanu, 2007; Sivadevan, 2008). Auf dem Gebiet der 3-D-Objekterkennung sind bisher nur wenige Verfahren verfügbar, die sich meist noch im Forschungsstadium befinden (Boehnke, 2007; Schmid, 2006). Das Hauptproblem dieser Verfahren ist, dass es sich dabei meist um speziell für ein bestimmtes Werkstück entwickelte Einzellösungen handelt. Neue Objekte müssen dem System oft mühsam bekannt gemacht werden, meist in Form einer langwierigen Konfiguration durch einen Experten.

Viele industrielle Bauteile und auch Objekte im Haushalt sind aus regelgeometrischen Elementen wie Ebenen, Zylindern und Kegeln aufgebaut. Es bietet sich also an, diese regelgeometrischen Elemente für eine Bestimmung der Objektlage, z. B. durch Besteinpassung (Ahn, 2004), zu verwenden. Meist sind die vorkommenden Bauteile aus mehreren regelgeometrischen Elementen aufgebaut. Es ist zu erwarten, dass zur Lageerkennung dieser Objekte ein Erkennungsverfahren für kombinierte Elemente, die aus einzelnen regelgeometrischen Elementen aufgebaut sind, Vorteile bietet.

Das große Problem bei allen Verfahren zur Lagebestimmung ist die Startwertfindung. Da die Verfahren immer relativ viel Rechenleistung bedürfen, müssen unnötige Auswertungen vermieden werden. Es ist somit notwendig, in den gegebenen Messdaten durch eine geeignete Vorverarbeitung Bereiche zu finden, die für eine Lagebestimmung geeignet sind (Klasing u. a., 2008).

Als Vorverarbeitung werden in der Bildverarbeitung oft Segmentierungsverfahren eingesetzt. Diese besitzen zur Anpassung an die gestellte Aufgabenstellung praktisch immer mehrere Parameter, die zum einen oft gegenseitige Abhängigkeiten besitzen und zum anderen stark von den zu segmentierenden Objekten beeinflusst werden (Espindola u. a., 2006). Das Suchen einer für die Anwendung geeigneten Parametereinstellung ist selbst für Experten schwierig. Zudem ist nach einer reinen Segmentierung nicht zu erwarten, dass die entstandenen Bereiche für eine Objekterkennung die am besten geeigneten Ausgangsdaten darstellen (Zhang, 2006). Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, ein selbstadaptives Vorverarbeitungsverfahren für die Objekterkennung zu entwickeln.

1.2. Zielsetzung und Vorgehensweise

Ziel dieser Arbeit ist es, Beiträge zur einfachen Konfiguration eines Objekterkennungssystems auf Basis regelgeometrischer Elemente zu leisten. Um dies zu erreichen werden zwei wissenschaftliche Entwicklungsziele identifiziert:

- Ein selbstadaptives Vorverarbeitungsverfahren für Tiefenbilder, das für die nachfolgende 3-D-Objektlageerkennung optimale Ausgangsbereiche liefert. Selbstadaptiv soll heißen, dass dem System lediglich die zu erkennenden Objekte bekannt gemacht werden müssen. Die für die Problemstellung am besten geeignete Vorverarbeitung mit ihrem Ablauf und ihren Parametern soll selbsttätig gefunden werden.
- Ein Verfahren, mit dem aus mehreren regelgeometrischen Elementen aufgebaute kombinierte Elemente in einer für die Objektlageerkennung geeigneten Robustheit gefunden werden können.

Die beiden Verfahren müssen systematisch auf ihre Leistungsfähigkeit überprüft werden, um ihre Einsetzbarkeit zur Lösung der Aufgabenstellung abschätzen zu können. Zudem kann damit eine Aussage zur Anwendbarkeit in anderen Bereichen, z. B. in der Messtechnik, getroffen werden.

Um dieses Ziel zu erreichen wird wie folgt vorgegangen: Im Stand der Technik werden systematisch grundlegende und aktuelle Arbeiten auf den Gebieten der Bildsegmentierung, der Objekterkennung sowie von relevanten Aspekten der Tiefenbilderzeugung dargestellt. Weiter werden die in der Industrie zu handhabenden Teile und die zugehörigen Randbedingungen, die Einfluss auf die Erkennbarkeit haben, untersucht.

Auf Basis der Analyse von Erkennungsverfahren für regelgeometrische Elemente, von Segmentierungsverfahren für Tiefenbilder und von heuristischen Optimierungsverfahren in der Bildverarbeitung werden die Defizite der vorhandenen Verfahren herausgearbeitet.

Aus den daraus gewonnenen Erkenntnissen können die Anforderungen für ein System zur Objektlageerkennung auf Basis regelgeometrischer Elemente abgeleitet werden. In der Folge werden die Anforderungen an die zentralen zu entwickelnden Verfahren zur Vorverarbeitung und zur Erkennung kombinierter regelgeometrischer Elemente aufgestellt.

Konzepte für alternative Verfahren zur Objektlageerkennung werden auf Basis der Anforderungen entwickelt und bewertet. Für die notwendigen Teilverfahren werden bekannte Lösungen des Standes der Technik bewertet. Sind die bekannten Lösungen nicht adäquat, werden alternative Konzepte für die Entwicklung vorgeschlagen.

Ein Entwicklungsschwerpunkt wird ein selbstadaptives Vorverarbeitungsverfahren für ein Objektlageerkennungsverfahren auf der Basis regelgeometrischer Elemente sein. Weiter ist ein Verfahren zur Erkennung kombinierter regelgeometrischer Elemente zu entwickeln.

Die entwickelten Verfahren sind in ihrer Leistungsfähigkeit zu bewerten. Die Vorverarbeitung muss vor allem daran gemessen werden, in wiefern die Ergebnisse eine für die Objekterkennung von Nutzen sind. Dazu sind vor allem Untersuchungen unter variablen Praxisbedingungen notwendig. Die Erkennungsverfahren für kombinierte Elemente sind neben ihrer Erkennungsleistung in der Objekterkennung auch hinsichtlich ihrer Genauigkeit zu testen. Die praktische Nutzbarkeit wird mit einem Demonstratorsystem, das den kompletten Ablauf der Objekterkennung umsetzt, nachgewiesen.

Kapitel 2.

Ausgangssituation

2.1. Grundlagen

Im Folgenden werden die für die ganze Arbeit wichtigen Begriffe dargestellt. Weiter erfolgt die Vorstellung einiger für die Objekterkennung wichtiger Sensoren mit ihren Eigenschaften, die zu Auswirkungen auf die Objekterkennung führen.

2.1.1. Begriffe

Lagebestimmung Damit wird die Bestimmung eines regelgeometrischen Elements und dessen Lage bezeichnet. Die Lage setzt sich aus der Position und der Richtung zusammen.

Objekterkennung Objektlageerkennung oder kürzer Objekterkennung wird die Bestimmung der Lage des zu erkennenden Objekts genannt. Damit kann das Objekt dann z. B. gegriffen werden.

2.1.2. Tiefenbild

Im Gegensatz zu einem herkömmlichen Grauwertbild, bei dem jedes Pixel einen Helligkeitswert darstellt, beschreibt bei einem Tiefenbild jedes Pixel einen Abstandswert. Dieser ist im einfachsten Fall der Abstand zwischen Objektoberfläche und Sensor.

Auf die unterschiedlichen möglichen Repräsentationen soll näher eingegangen werden, da diese in der vorliegenden Arbeit eine wichtige Rolle spielen. In der Literatur existieren unterschiedliche Bezeichnungen für Tiefendaten, die auf die möglichen unterschiedlichen Repräsentationsformen hindeuten. So werden von Besl die Begriffe „range map, depth map, depth image, range picture, rangepic, 3-D image, 2.5-D image, digital terrain map (DTM), topographic map, 2.5-D primal sketch, surface profiles, xyz point list, contour map, and surface height map“ genannt (Besl, 1988). Abgedeckt werden mit diesen Bezeichnungen die Repräsentation als Abstandswerte in einer regelmäßigen Matrix oder als Liste von ungeordneten 3-D-Messpunkten. Die Angabe 2,5-D soll verdeutlichen, dass die 3-D-Daten keine rundum Ansicht bieten, sondern nur aus einer Ansicht aufgenommen werden.

In dieser Arbeit wird für das Tiefenbild eine Darstellung als einzelne Matrizen für die x -, y - und z -Komponente mit der Dimension $m \times n$ verwendet. Damit sind die unterschiedlichen Repräsentationen bei Bedarf verfügbar. Wenn nicht ausdrücklich eine andere Repräsentation vorausgesetzt wird, haben die Tiefenbilder kartesische Koordinaten, die äquidistant abgetastet werden. Bei einem äquidistanten Tiefenbild ist der

Abstand zwischen den einzelnen Messpunkten vom Tiefenwert unabhängig und konstant.

Durch die bekannte Nachbarschaft in Tiefenbildern lassen sich viele Auswertungen einfacher durchführen und Operatoren der 2-D-Bildverarbeitung anwenden. Äquidistante Tiefenwerte bieten Vorteile, da sich Längen- und Breitenverhältnisse in der Matrix des Tiefenbildes direkt auf die Verhältnisse im 3-D-Raum übertragen lassen.

Wenn in dieser Arbeit betont werden soll, dass eine Auswertung im 3-D-Raum stattfindet, dann werden die Messwerte als ungeordnete Messpunkt Wolke oder kurz Punkt Wolke bezeichnet. Dies sind kartesische Koordinaten im Raum, wobei keine Voraussetzungen an den Abstand der Punkte untereinander oder an eine Ordnung der Punkte gestellt wird.

2.1.3. Sensorsysteme zur optischen 3-D-Erfassung

Zur Erfassung von Tiefenbildern existiert eine große Anzahl optischer Sensorsysteme mit unterschiedlichen optischen Messprinzipien. Diese besitzen charakteristische Eigenschaften beispielsweise in Bezug auf Tiefenauflösung, laterale Auflösung, Tiefenmessbereich und Einsetzbarkeit in industriellen Fertigungsanlagen. In mehreren Studien wurden Übersichten über die verfügbaren Sensoren erstellt, z. B. in den grundlegenden Arbeiten von (Besl, 1988) und (Blais, 2004). Hier werden nur die für den Anwendungsbereich der Objekterkennung interessanten Verfahren, die auf Triangulation oder Laufzeitmessung beruhen, dargestellt.

Triangulierende Verfahren

Bei diesen auf optischer Triangulation basierenden Verfahren wird über Trigonometrie aus den bekannten Größen des Winkels β_t und des Basisabstands b_t der unbekannte Tiefenwert z berechnet, siehe Abbildung 2.1. Bei aktiven Verfahren sind die optischen Systeme Ω_1 und Ω_2 eine Lichtquelle beziehungsweise ein Detektor. Voraussetzung für das Messprinzip nach Abbildung 2.1 ist eine diffuse Reflexion des Lichts, für total reflektierende Oberflächen sind aber auch schon Lösungen in der Entwicklung (Maas u. a., 2007). Einen gewissen Nachteil stellt die relativ hohe Fremdlichtempfindlichkeit dar. Im Folgenden werden die wichtigsten aktiven Verfahren kurz vorgestellt.

Der einfachste Aufbau besteht aus einer punktförmigen Lichtquelle sowie einem positionssensitiven Sensor und ist sehr robust und kompakt. Die Messrate der gängigen Sensoren liegt zwischen 10 kHz – 40 kHz. Beim Lichtschnittverfahren wird eine Lichtlinie mit einer Matrixkamera aufgenommen. Entlang einer Profillinie werden aktuell bis ca. 2000 Punkte gemessen bei einer Profilfrequenz zwischen 20 – 30 kHz. Der Aufbau kann in einem sehr kompakten Gehäuse, das einer Produktionsumgebung gewachsen ist, erfolgen. Mit strukturierter Beleuchtung kann ein komplettes Tiefenbild mit 1,4 Mio. Pixeln in einer Messzeit von 1 Sekunde erfasst werden. In der Forschung werden schon Bildraten von 40 Hz für ein Tiefenbild mit 532×500 Pixeln erreicht (Zhang u. Huang, 2006).

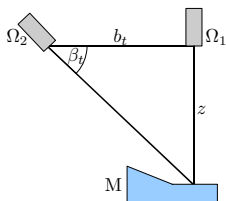


Abbildung 2.1.: Geometrischer Aufbau eines Triangulationssensors mit Messobjekt M, Sensorelementen Ω_1 und Ω_2 sowie Basisabstand b_t .

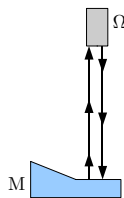


Abbildung 2.2.: Messprinzip bei einem Laufzeitsensor mit kombiniertem Lichtsender und Lichtempfänger Ω

Laufzeitverfahren

Laufzeitverfahren nutzen die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Licht für die Messung des Abstands z , indem die Zeit zwischen dem Aussenden des Lichtstrahls und dem Eintreffen des reflektierten Lichtstrahls gemessen wird, siehe Abbildung 2.2. Folgende Messmethoden lassen sich unterscheiden.

Erste Entwicklungen einzelpunktmessender Verfahren gab es bereits in den 1960er und frühen 1970er Jahren (Besl, 1988). Als Lichtquelle wird bei allen Sensoren ein Laser verwendet. Diese Verfahren weisen prinzipbedingt eine geringe Fremdlichtabhängigkeit auf. Auch ein hoher Reflexionsgrad wird meist toleriert. Je nach Zeitmessprinzip können Auflösungen von ca. $50 \mu\text{m} - 10 \text{ mm}$ bei Messbereichen zwischen von ca. $1 \text{ m} - 100 \text{ m}$ erreicht werden.

Erste praktische Umsetzungen von linien- und flächenmessenden Verfahren in der Forschung werden in (Spirig u. a., 1995) und (Schwarte u. a., 1995) beschrieben. Die neuesten Entwicklungen sind z. B. in (Buttgen u. Seitz, 2008), (Niclass u. Charbon, 2005) und (Stoppa u. a., 2007) dargestellt. Erreicht wird eine Tiefenauflösung von etwa $1 \text{ mm} - 10 \text{ mm}$ bei Sensoraufösungen von bis zu etwa 200×200 Pixeln. Bildraten von 80 Hz sind möglich. Für größere Objekte werden die Sensoren schon in der Objekterkennung eingesetzt (Wörn u. a., 2009).

2.2. Stand der Technik

2.2.1. Segmentierung

Als Segmentierung wird der Prozess bezeichnet, ein Bild nach gewissen Regeln in einzelne Regionen zu unterteilen. Nach welchen Kriterien unterteilt wird, ist von der Anwendung abhängig, im Bereich der Objekterkennung kann es z. B. das Ziel sein, das Bild so zu unterteilen, dass einzelne Objekte durch eine zusammenhängende Region beschrieben werden. Für eine formale Definition von Segmentierung wird auf (Min u. a., 2004) verwiesen. Im Allgemeinen wird angenommen, dass das Bild in disjunkte in sich zusammenhängende Teilmengen zerlegt wird. Werden nicht alle Objekte in einzelne Regionen getrennt, wird dies Untersegmentierung genannt, wenn ein eigent-

lich zusammengehörendes Objekt durch mehrere Regionen beschrieben wird, handelt es sich um eine Übersegmentierung. Es lassen sich grundsätzlich kantenbasierte von regionenbasierten Segmentierungsverfahren unterscheiden. Da die Anzahl der Verfahren sehr groß ist, wird zusätzlich auf vergleichende Untersuchungen verwiesen. Als guter Überblick, der die in weiten Bereichen immer gültigen wichtigsten Prinzipien darstellt, kann (Pal u. Pal, 1993) dienen. In weiteren Studien wurde zusätzlich die Leistungsfähigkeit von unterschiedlichen regionenbasierten Segmentierungsverfahren bewertet, z. B. von hat (Hoover u. a., 1996) vier Verfahren zur Segmentierung in ebene Bereiche verglichen, zudem sind in einer Tabelle praktisch alle zu der Zeit relevanten Verfahren aufgeführt. Für gekrümmte Bereiche führte (Powell u. a., 1998) ähnliche Tests durch, weitere Untersuchungen folgten von (Jiang u. a., 2000).

Kantenbasierte Segmentierung

Bei der kantenbasierten Segmentierung wird in einem ersten Schritt versucht, die Berandungen der interessierenden Regionen zu bestimmen und im zweiten Schritt die eingeschlossenen Pixel einzelnen Regionen zuzuordnen. Kanten ergeben sich in Tiefenbildern als Sprungkanten, bei den die Tiefenwerte unstetig sind, als Knickkanten bzw. scharfe Schnittkante zweier Flächen mit einer Unstetigkeit der Flächennormalen und als glatte Kanten, bei den sich lediglich die Krümmung nicht stetig ändert. Zur Detektion der einzelnen Kantentypen sind unterschiedliche Verfahren notwendig, wobei die Sprungkanten am einfachsten und robustesten zu ermitteln sind, z. B. durch Gradientenkantenfilter, wie sie auch für Grauwertbilder angewandt werden. Die Knickkanten und insbesondere die glatten Kanten sind schwieriger zu finden, z. B. als Änderung in der Normalenrichtung oder in den Flächenkrümmungen, die indirekt auf höheren Ableitungen basieren. In (Jiang u. Bunke, 1997) werden weitere Verfahren zur Detektion dargestellt. Aufgrund der notwendigen Ableitungen sind die Verfahren bei Bilddaten mit großem Rauschen, wie sie in der Realität häufig vorkommen, recht instabil, da durch die Ableitungen das Rauschen noch verstärkt wird (Mazouzi u. Batouche, 2007). Zudem sind die erhaltenen Kanten oft nicht zusammenhängend (Bab-Hadiashar u. Gheissari, 2006) und es sind weitere Verfahren anzuwenden, um die Kanten zu schließen, die zusätzliche Rechenzeit benötigen (Sappa, 2006).

Von (Jiang u. Bunke, 1996) wurde ein Verfahren entwickelt, bei dem die Zeilen, Spalten und zwei diagonale Richtungen im Tiefenbild durch Kurvenzüge approximiert werden. Je nach der Geometrie der Objekte im Tiefenbild ergeben sich lineare oder gekrümmte Kurven. Die Übergangspunkte zwischen den Kurven werden in einem Kantenbild gesammelt, und zwar über alle Approximationsrichtungen.

Ein neuer Ableitungsoperator, der auch mit nicht äquidistanten Tiefenbildern zu recht kommen soll, wird in (Coleman u. a., 2007) beschrieben. In den präsentierten Ergebnisbildern zeigen sich aber viele unzusammenhängende Kanten und auf Rauschen zurückzuführende kurze Kanten.

Weitere Beispiele für kantenbasierte Segmentierungsverfahren werden in (Harati u. a., 2007; Krishnapuram u. Gupta, 1992; Wani u. Batchelor, 1994) beschrieben.

Bereichsbasierte Segmentierung

Im Gegensatz zu den kantenbasierten Segmentierungsverfahren, bei den die Grenze zwischen zwei Bereichen mit unterschiedlichen Eigenschaften gesucht werden, ist es bei den bereichsbasierten Segmentierungsverfahren das Ziel, das Bild in Bereiche mit Pixeln ähnlicher Eigenschaft einzuteilen. Beispielsweise können Tiefenwerte, Normalenrichtungen oder Krümmungswerte zum Vergleich herangezogen werden. Die Einteilung in die verschiedenen Klassen kann mit unterschiedlichen Verfahren erfolgen, von den im Folgenden einige Wichtige beschrieben werden.

Bereichswachstum Ein ausgesprochen wichtiges und oft auch in Kombination mit anderen Methoden angewandtes Verfahren ist das Bereichswachstum, bei dem von einzelnen Startelementen ausgehend weitere Elemente hinzugenommen werden, die einem Ähnlichkeitskriterium genügen. Als Startelemente können im elementaren Fall einzelne Pixel dienen, es kann sich aber auch um Kurvenstücke oder Flächenelemente handeln. Die Startelemente werden entweder ohne Bezug zu den Strukturen im Bild gewählt, etwa in einem regelmäßigen Gitter oder nach einer Zufallsauswahl (Mazouzi u. Batouche, 2007) oder es werden spezielle Vorverarbeitungsschritte durchgeführt, z. B. eine Kantenfindung, wobei dann der Schwerpunkt der durch die Kanten beschriebenen Region als Startpunkt gewählt wird (Muñoz u. a., 2003). Die Nachbarelemente des Ausgangsbereichs werden auf Homogenität zu dieser geprüft, und bei Erfüllung hinzugefügt. Dieses Wachstum wird iterativ fortgesetzt, bis keine Elemente mehr zu finden sind, die das Homogenitätskriterium erfüllen. Als Kriterium für Homogenität kann im einfachsten Fall die Differenz der Pixelwerte dienen, weitere Beispiele sind Abweichungen in Flächennormalen, Krümmungen, Differenzen zu eingepassten Ebenen.

Auf Normalenvektoren und deren Differenz basierende Verfahren werden in (Chen u. Stamos, 2007) und (Rabbani u. a., 2006) vorgestellt. Der Schwerpunkt der Entwicklungen liegt dabei auf Verfahren, die Normalenvektoren robust und realitätsnah auch an Kanten in den Daten berechnen zu können.

In (Vieira u. Shimada, 2005) werden zuvor triangulierte Daten auf Basis der Krümmung über ein Regionenwachstum segmentiert. Die Rechenzeit für ca. 100 000 Punkte beträgt 20 Sekunden, für 234 000 Punkte 57 Sekunden.

Das Verfahren von (Mazouzi u. Batouche, 2007) macht intensiven Gebrauch von Methoden aus der Wahrscheinlichkeitsrechnung, um die Ergebnisse einer ersten Segmentierung durch ein Regionenwachstum in ebene Bereiche an den Kanten zu verbessern.

Clusteranalyse Ein weiteres Verfahren zur Gruppierung von ähnlichen Pixeln bildet die Clusteranalyse, bei der für jeden Bildpunkt ein Merkmalsvektor berechnet wird. Merkmale können beispielsweise Normalenrichtungen oder Flächenkrümmungen sein. Für die Vektoren im Merkmalsraum wird versucht, die dicht beieinander liegenden zu Clustern zusammenzufassen, die dann über die zugehörigen Bildpunkte die Regionen der Segmentierung darstellen. Dazu können Verfahren aus der Clusteranalyse eingesetzt werden, über die in (Xu u. Wunsch, 2005) ein umfassender Überblick gegeben wird.

Von (Frigui u. Krishnapuram, 1996) wurde in einer grundlegenden Arbeit ein Algorithmus zur Segmentierung mit Hilfe von Clusteranalyse vorgestellt, der ohne die vorige

Kenntnis der Anzahl der zu bestimmenden Cluster auskommt. Dazu wird iterativ ein Optimierungsproblem gelöst, bei dem die Zielfunktion unter anderem für einen maximalen Abstand der Cluster sorgen soll und die am Anfang zu große Zahl von kleinen Clustern zu wenigen größeren vereint.

Ein Verfahren, das auf einer Weiterentwicklung der k -nächste-Nachbarn Methode beruht, die um eine Beschränkung des Radius zu den Nachbarn erweitert wird, stellen (Klasing u. a., 2008) vor. Der Vorteil des Ansatzes soll eine höhere Effizienz sein gegenüber der reinen k -nächste-Nachbarn Methode mit nachfolgender Anwendung eines Schwellwerts für die Abstandswerte. Für 100.000 Punkte ist einem Diagramm trotzdem eine Spanne der Auswertezeiten von 0,25 – 3,5 Sekunden zu entnehmen.

Nachteile der auf Clusteranalyse beruhenden Verfahren sind, dass oft die Anzahl der Cluster vorher bekannt sein muss. Wenn dies nicht der Fall ist, ist diese Anzahl mit rechenaufwändigen Verfahren zu bestimmen (Li u. Zhao, 2003; Wang u. Suter, 2004). Die Arbeit von (Lai u. a., 2006) beschreibt ein Verfahren, bei dem die Daten trianguliert werden. Die Segmentierung von 11.000 Dreiecken dauert beispielsweise über 140 Sekunden.

Flächeneinpassung Eine weitere Möglichkeit zur Segmentierung bieten Verfahren auf der Basis von Einpassverfahren. Dazu werden, oft nach der kleinste Quadrate Methode (Siehe 2.4.1) aber auch nach RANSAC-Verfahren (**random sample consensus**) (Siehe 2.4.2), Flächenelemente wie beispielsweise regelgeometrische Elemente oder Polynomflächen in die Messdaten eingepasst und die Punkte, deren Abstand zu erhaltenen Flächen unter einem bestimmten Schwellwert liegt, werden jeweils zu einem Segment zusammengefasst.

In der grundlegenden Arbeit von (Besl u. Jain, 1988) werden frühe Verfahren diskutiert und ein neues Verfahren vorgestellt, bei dem zweidimensionale Polynome mit maximal vierter Ordnung an die Daten angepasst werden. Begonnen wird immer mit Flächen niedrigster Ordnung, die weiter erhöht wird, wenn die Abweichung zu den Messdaten zu groß wird. Die eigentliche Segmentierung läuft über ein Regionenwachstum, bei dem weitere Punkte zum Ausgangsbereich hinzugefügt werden, wenn die Abweichung zur eingepassten Fläche gering ist. Weitere fundamentale Arbeiten wurden in (Leonardis u. a., 1990) geleistet, den auch eine Einpassung von Flächen variabler Ordnung an regelmäßig verteilten Startpunkten zugrunde liegt. Von (Leonardis u. a., 1997) werden direkt Superquadriken eingepasst. Von (Bab-Hadiashar u. Gheissari, 2006) wird ein RANSAC-Verfahren verwandt, mit dem gute Segmentierungsergebnisse erzielt werden, das zugleich aber sehr rechenzeitaufwändig ist. Es wurden Laufzeiten von 65 Sekunden bei 500 initialen Stichproben und 275 Sekunden bei 2500 Stichproben ermittelt, bei einer Bildgröße von 512×512 Pixeln.

Sonstige Verfahren

Es wurden Verfahren entwickelt, die sich in die Unterteilung in regionenbasierte Segmentierung und kantenbasierte Segmentierung nicht direkt einordnen lassen. Dies sind meist Verfahren, die eine Kombination von unterschiedlichen Ansätzen benutzen.

Von (Bock u. Guerra, 2001) wurden drei Ansätze kombiniert. Es wird behauptet, dass die Kombination aus RANSAC-Verfahren sowie kanten- und regionenbasierter Segmentierung gute Ergebnisse erzielt. Jedoch werden Rechenzeiten zwischen durchschnittlich 315 Sekunden und 352 Sekunden sowie im Extremfall bis 800 Sekunden bei einer Bildgröße 512×512 angegeben.

(Jiang u. Bunke, 1994) haben ein schnelles Verfahren zur Ebenensegmentierung auf der Basis von spalten und verschmelzen vorgestellt. Es wird davon ausgegangen, dass Scanlinien auf ebenen Flächen Geradenabschnitte bilden. Diese Geradenabschnitte werden durch ein Bereichswachstum, das Geradenabschnitte mit ähnlicher Steigung vereinigt, in Segmente für die einzelnen Ebenen gruppiert.

Eine Kombination aus Intensitäts- und Tiefenbildern wird von (Haindl u. Žid, 2006) für die Segmentierung verwendet. Der Segmentierungsalgorithmus kombiniert eine kantenbasierte Segmentierung mit einem Bereichswachstumsverfahren auf Randkurven.

2.2.2. Übersicht über Objekterkennungsverfahren

Die Basis für alle Lösungen, Teile automatisiert zu greifen, bilden Objekterkennungsverfahren. Unter diesem Begriff verbergen sich Lösungen für sehr unterschiedliche Aufgabenstellungen. So werden einerseits Verfahren beschrieben, die treffender als Identifikationsverfahren zu bezeichnen wären. Deren hauptsächliches Ziel ist es, aus einer Auswahl vieler unterschiedlicher Objekttypen das gerade vorliegende zu erkennen, wobei eine explizite Lageerkennung nicht immer enthalten sein muss. Andererseits existieren Verfahren, bei den als Kernziel die Lageerkennung des Objekts im Vordergrund steht und der Typ des Objekts schon von vornherein klar ist.

Weiterhin kann eine Unterscheidung in 2-D-, 2,5-D- und 3-D-Verfahren getroffen werden. Die auf 2-D-Bildverarbeitung basierenden Verfahren haben eine ganze Reihe von Nachteilen. In (Kak u. DeSouza, 2002) wird als größter Mangel der auf 2-D-Bildverarbeitung beruhenden Systeme die oft unzureichende Detektierbarkeit der 2-D-Merkmale aufgrund ungleichmäßiger Beleuchtung und Oberflächenreflektivität genannt. Die instabile Detektierbarkeit von Merkmalen wird dort auch für die Anwendung der 2-D-Bildverarbeitung im 3-D-Fall angeführt. Es werden z. B. Punkte und deren Umgebungen als Merkmal gewählt, wobei die Punkte in manchen Positionen des Objekts gar nicht sichtbar sind. Auch von (Verl u. a., 2007) werden als Nachteile die ungleichmäßige Beleuchtung und Oberflächenreflektivität genannt.

In der Literatur wird eine Unterteilung der Verfahren in eine kaum zu überblickende Vielfalt von Klassen und Unterklassen unternommen. Zwei Hauptklassen haben sich aber praktisch durchgängig als übergeordnete Einteilung durchgesetzt. Diese leicht verständliche Einteilung wird von (Bennamoun u. Mamic, 2002; Bicego u. a., 2005; Büker, 2001; Campbell u. Flynn, 2001) und weiteren Autoren verwendet. Unterschieden wird einerseits in die Objekt-Zentrierten und andererseits in die Betrachter-Zentrierten Verfahren. Die Ersteren sind charakterisiert durch die Verwendung eines 3-D-Modells des Objekts, das mit den aufgenommenen Daten zur Deckung zu bringen ist. Deshalb werden sie auch modellbasierte Verfahren genannt. Die letzteren, verwenden nicht direkt das 3-D-Modell, sondern Ansichten von diesem, die mit der aktuell erfassten Ansicht zur Deckung gebracht werden müssen. Diese werden auch Ansichts- oder Erscheinungs-

basierte Verfahren genannt.

Durch diese Einteilung ist das eigentliche Problem noch nicht gelöst, denn es ist immer noch das ‚zur Deckung bringen‘ zu lösen. Dazu wurden die verschiedensten Ansätze in der Forschung entwickelt, über die schon eine ganze Reihe vergleichender Untersuchungen Veröffentlichungen existieren (Arman u. Aggarwal, 1993; Bennamoun u. Mamic, 2002; Besl u. Jain, 1985; Campbell u. Flynn, 2001; Mundy, 2006). Deshalb sollen hier nur einige typische Verfahren vorgestellt werden.

Modellbasierte Verfahren

In der Arbeit von (Böhm, 2004) erfolgt die Ausrichtung des Modells zu den Messdaten auf Basis von Korrespondenzen der Krümmungsverteilung auf dem aufgenommenen Objekt und dem Modell. Die Klassifikation anhand der Krümmung der einzelnen Messpunkte hat Ähnlichkeit mit dem von (Besl u. Jain, 1988) entwickelten Verfahren. Der neue Ansatz nutzt die Krümmungsverteilung auf dem Modell zur Klassifizierung der Messpunkte des Objekts. Denn bisher kann insbesondere bei Rauschen in den Messdaten nicht immer eine eindeutige Segmentierung erzielt werden. Die in der Arbeit verwendeten Szenen für die Erkennung enthalten immer nur genau ein Objekt. Ob damit auch Szenen mit einer großen Anzahl von Objekten bearbeitet werden können, ist offen.

Ein Modellbasiertes Verfahren unter Verwendung von Superquadriken wurde von (Biegelbauer u. Vincze, 2007) vorgestellt. Die Superquadriken werden hierzu direkt unter Verwendung eines RANSAC-Algorithmus (Fischler u. Bolles, 1981a) in die Tiefendaten der Szene eingepasst. Bei den zu erkennenden Objekten handelt es sich um Gegenstände aus dem häuslichen Umfeld. Diese lassen sich meist durch die Superquadriken gut annähern. Es wird die Erkennungsrate eines Hammers von 76% bei einer Rechenzeit von ca. 10 Sekunden angegeben. Die niedrigen Erkennungsraten werden mit der zufälligen Suche des RANSAC-Algorithmus begründet. Es werden Szenen mit maximal sechs unterschiedlichen Objekten vorgestellt, wobei eine gute Toleranz gegenüber Verdeckungen genannt wird. Wie sich der Algorithmus bei sehr vielen gleichartigen Objekten im Haufwerk verhält, wird nicht diskutiert.

Die in (Safronov u. a., 2008b) und (Safronov u. a., 2008a) vorgestellten Verfahren werden von den Autoren als modellbasiert klassifiziert. Dort wird ein neuer hierarchischer Algorithmus zur Objektlageerkennung vorgestellt. Dieser wurde mit mehreren Algorithmen verglichen. Der neue Algorithmus erreicht eine gute Genauigkeit von über 98,6% bei der Lageerkennung. Die Zeiten für die Erkennung sind mit unter 0,2s sehr gut. Die Tests wurden immer mit Szenen, die aus relativ wenigen Objekten bestehen, durchgeführt. Wie gut sich das Verfahren für eine große Anzahl von Objekten in einer Kiste eignet, ist unklar.

Ansichtsbasierte Verfahren

Ein ansichtsbasiertes Verfahren in 3-D wurde von (Boehne, 2007) vorgestellt. Dabei werden anhand des CAD-Modells 3-D-Ansichten in beliebigen Lagen mit Hilfe einer Sensor-Simulation erzeugt. Als Vorteil wird genannt, dass nur die Modellinformation

z. B. in Form eines CAD-Modells notwendig ist. Zur Erkennung werden die Ansichten in einem festen Raster über die Daten der Szene verschoben und jeweils die Differenzen im Tiefenbild überprüft. Ein weiterer Vorteil ist somit, dass nicht segmentiert werden muss. Demonstriert wird das Verfahren anhand von Objekten, die alle auf der gleichen Modellfläche in einer Kiste in einer Ebene stehen. Nachteilig für die Anwendung auf Objekte in beliebigen Lagen ist der Speicherbedarf, was der Autor so beschreibt: „...we need exorbitant space to store these range images.“ (Boehnke, 2007).

Von Ledermann wurde in (Verl u. a., 2008) ein von der Grundidee ähnliches 3-D-Verfahren entwickelt, wobei ein anspruchsvolleres Vergleichsverfahren zur Anwendung kommt. Hierzu werden von den Modellansichten Histogramme der Tiefen- und Normalenverteilungen vorberechnet und diese dann mit den Histogrammen der Szene verglichen, ähnlich zu den Ansätzen in (Hetzl u. a., 2001). Die Suche nach der optimalen Position wird vom höchsten Punkt in den Messdaten ausgehend durch ein Partikelschwarm-Verfahren durchgeführt. Vorteilhaft ist, dass keine Segmentierung der Ausgangsdaten notwendig ist. Durch die Beschränkung der vorberechneten Ansichten auf eine Auflösung von 5° – 10° ist auch bei der Objektlokalisierung keine bessere Genauigkeit möglich.

In (Moeslund u. Kirkegaard, 2007) wird ein „harmonic shape context“ genanntes Verfahren auf der Basis von lokalen 3-D-Flächenbeschreibungen (shape context) durch eine Entwicklung nach Kugelflächenfunktionen (spherical harmonics) vorgestellt. Dabei werden 64 Ansichten des (CAD-)Modells erzeugt, um unempfindlicher gegenüber Verdeckungen zu sein. Von diesen Teilansichten werden die lokalen Flächenbeschreibungen erzeugt. Die lokalen Beschreibungen werden an Merkmalen auf Basis von Krümmungseigenschaften berechnet. In der Szene werden die Krümmungs- und Kugelflächenfunktionsmerkmale an den entsprechenden Stellen extrahiert, und mit den vorberechneten Modellansichten zur Deckung gebracht. Die Positionsgenauigkeit der Lageerkennung von im realitätsnahen Haufwerk ist sehr gut und für eine praktische Anwendung ausreichend. Die Erkennungszeit wird in (Kirkegaard, 2005) jedoch mit 32 Minuten auf einem System mit vier Intel Xeon Prozessoren mit 2,4 GHz angegeben. In (Shilane u. Funkhouser, 2007) wird ein ähnlicher Ansatz verwendet, mit der Zielrichtung, viele unterschiedliche und ähnliche 3-D-Objekte zu klassifizieren bzw. zu identifizieren.

2.2.3. Relevante Aspekte des Materialflusses in der Produktion

Bei der industriellen Produktion von Gütern müssen Teile zwischen einzelnen Standorten und Produktionsschritten transportiert und gelagert werden. Für nachfolgende Produktionsschritte sind die Teile den Speichersystemen zu entnehmen und in einen geordneten Zustand zu bringen. Die hier näher zu betrachtenden Aspekte des Materialflusses sind die Lagerung und die Handhabung.

Im dreidimensionalen Raum hat ein geometrisch bestimmter Körper sechs Freiheitsgrade der Bewegung. Nach VDI 2860 wird die Anzahl der festgelegten drei translatorischen Freiheitsgrade als Positionierungsgrad bezeichnet, die drei rotatorischen entsprechend als Orientierungsgrad, alles zusammen als Ordnungsgrad.

Lagerung

Teile können in unterschiedlichen Ordnungsgraden gelagert werden. Es wird die geordnete, teilgeordnete und ungeordnete Lagerung unterschieden, je nachdem ob alle, ein Teil oder keiner der Freiheitsgrade festgelegt sind. Die ungeordnete Lagerung wird auch als Schüttgut oder Haufwerk bezeichnet. Zur geordneten Lagerung sind etwa Magazine notwendig, zur ungeordneten reicht ein einfacher Transportbehälter. Bei der Herstellung befinden sich die meisten Werkstücke in einer definierten Position und Lage. Da die Magazinierung hohe Kosten durch speziell angepasste Magazine sowie ein hohes Leergutvolumen verursacht und eine geringe Packungsdichte zur Folge hat, wird diese ursprüngliche Ordnung meist aufgegeben und die Teile werden als Schüttgut gelagert und transportiert (Klocke u. Pritschow, 2004; Rybarczyk, 2004; Schmid, 2006). Zudem lassen sich manche Fertigungsschritte nur in Verfahren wirtschaftlich realisieren, an deren Ende die Teile ungeordnet vorliegen. Beispiele sind das Oberflächenbeschichten von Massenteilen in Trommeln oder das Gleitschleifen.

Handhabung

Um die gelagerten Teile den weiteren Produktionsschritten zuzuführen, werden Handhabungssysteme eingesetzt. Die entscheidende Funktion der Handhabung ist das Schaffen einer definierten Position für das gehandhabte Teil, z. B. für eine Bearbeitung. Detaillierte Grundlagen und Definitionen werden in (Spur u. Stöferle, 1986) dargestellt. Die in der Industrie üblichen Arten der Handhabung und Zuführung aus ungeordnetem Schüttgut werden im Folgenden kurz dargestellt.

Die älteste Art der Handhabung durch den Menschen hat aufgrund der besonderen Fähigkeiten in Bezug auf Wahrnehmung, Flexibilität, immer noch einen großen Anteil in der Praxis. Durch die direkte Abhängigkeit vom Fertigungstakt und aufgrund oft schwerer Teile ergeben sich große Belastungen für die Werker.

Am häufigsten werden mechanische Bunkerzuführeinrichtungen wie z. B. Vibrationswendelförderer eingesetzt, die unter Verwendung mechanischer Schikanen eine Ausrichtung der geförderten Teile erreichen. Diese Schikanen müssen speziell an die Teilegeometrie angepasst werden, wodurch die Anlagen gegenüber Teilevarianten unflexibel sind. Zudem neigen die geförderten Teile leicht zum Verklemmen in den oft komplizierten Schikanen (Rybarczyk, 2004). Bei Teilen mit empfindlicher Oberfläche wirkt sich die ständige Bewegung der Teile im Haufwerk äußerst negativ auf die Bauteilqualität aus (Lotter u. Wiendahl, 2006).

Um die Flexibilität zu erhöhen haben sich Systeme etabliert, die mit einem Bildverarbeitungssystem gekoppelt sind. Zur Vereinzelung der Teile wird die konventionelle Zuführtechnik wie z. B. Wendelförderer eingesetzt mit der die Teile an einem Kamerasystem vorbeigeleitet werden. Die Aussortierung von Falschlagen wird damit nicht mehr mit mechanischen Schikanen vorgenommen, sondern über Software unter Verwendung digitaler Bildverarbeitung.

Ein weiterer Schritt zu einer teileunabhängigen Zuführung ist eine Integration eines Industrieroboters, der z. B. auch noch Einlege- und Bestückungsaufgaben übernehmen kann. Erste Lösungen nutzen eine Vereinzelung auf ein Förderband. Die Lage des Teiles

in der Bandebene wird mit Hilfe eines Bildverarbeitungssystems bestimmt (Lotter u. Wiendahl, 2006). Die meisten Systeme sind so ausgeführt, dass nicht greifbare Teile in einem Umlaufsystem in das Haufwerk zurückgeführt werden. Damit besteht weiterhin der Nachteil, dass die Teile beschädigt werden können. Auch die zumeist erhebliche Lärmemission aller bisher beschriebenen mechanischen Verfahren bleibt erhalten.

Die wünschenswerte höchste Stufe der Flexibilität wäre, die Teile direkt aus dem Transportbehälter in ungeordnetem Zustand in ihrer Lage zu erkennen und dann mit einem Industrieroboter zu greifen. Dies wird im folgenden Abschnitt gesondert beschrieben.

2.2.4. Greifen aus Schüttgut

Das direkte Herausgreifen von einzelnen Teilen mit ausgesprochen komplizierten geometrischen Formen aus Schüttgut ist selbst für Kleinkinder kein Problem. Diese für den Menschen offensichtlich einfache Aufgabe durch eine Maschine, etwa einen Industrieroboter zu lösen, ist zumindest noch nicht als universelle Lösung kommerziell erhältlich. Dabei wird die Aufgabenstellung schon seit langer Zeit erforscht und immer wieder werden Lösungen entwickelt und vorgestellt. In der Arbeit von (Yang u. Kak, 1986) wird berichtet, dass schon viele Jahre auf eine Lösung gehofft wird, diese aber auch durch vielfältige Sensorik nicht gelang. Von (Kak u. Edwards, 1995) und (Rahardja u. Kosaka, 1996) wurden Laborsysteme vorgestellt und es wurde optimistisch davon ausgegangen, dass die Systeme bald in der Industrie eingesetzt würden. Aber auch 2002 gab es praktisch keine Lösungen, die über das Laborstadium hinaus kamen, was in (Kak u. DeSouza, 2002) nüchtern festgestellt wurde. Meist hat die mangelnde Stabilität der Erkennung einen Einsatz in der Industrie verhindert. Dies deckt sich auch mit den Aussagen aus 2006, wo (Schmid, 2006) feststellt, dass diese Lösungen noch teuer und störanfällig sind und nicht die erforderliche Austragleistung bringen. Auch die aktuellsten Veröffentlichungen haben dieselbe Aussage: „Auch wenn viele vom ‚Griff in die Kiste‘ sprechen: Eine produktionstaugliche Lösung ist unserer Meinung nach noch im Experimentierstadium bzw. nur selten realisierbar.“ (Eisenhardt, 2009) Weiter heißt es: „Ein großer Schwachpunkt ist auch die Ausbringung, die häufig bei bis zu 30 Sekunden pro Teil liegt.“ (Eisenhardt, 2009).

2.3. Analyse der Objekterkennungsaufgabe im industriellen Anwendungsbereich

In diesem Abschnitt wird analysiert, für welches Teilespektrum in der industriellen Produktion ein Bedarf für eine automatische Handhabung besteht und welche Eigenschaften die Teile selbst und ihre ungeordnete Lagerung mit sich bringen.

2.3.1. Analyse industriell gefertigter Bauteile und deren Geometrien

Aus dem Stand der Technik für automatisierte Objekterkennungssysteme wird deutlich, dass die zu erkennenden Objekte immer schon nach ihrem Erscheinungsbild oder

2.3. Analyse der Objekterkennungsaufgabe im industriellen Anwendungsbereich

der Geometrie in bestimmte Klassen eingeteilt wurden. Systeme zur Erkennung beliebiger Objektgeometrien zeigten sich bisher als wenig praxistauglich. Für ein auf eine bestimmte Bauteilkategorie ausgerichtetes Objekterkennungssystem soll hier zuerst die Klasse mit hoher Relevanz in der industriellen Produktion identifiziert werden.

Bei genauer Betrachtung der produzierten Komponenten und Bauteile fällt auf, dass die zum überwiegenden Teil ausschließlich aus regelgeometrischen Elementen aufgebauten Objekte dominieren. In der Tat haben Untersuchungen gezeigt, dass 85% aller in der Industrie vorkommenden Teile durch Ebenen, Kugeln, Zylinder und Kegel beschrieben werden können, ein großer Teil davon wiederum allein durch Zylinder (Requicha u. Voelcker, 1982; Petitjean, 2002; Rabbani u. van den Heuvel, 2005; de Toledo u. a., 2008).

Die Dominanz von rotationssymmetrischen Teilen wird durch eine ältere Untersuchung des in der Produktion vorkommenden Teilespektrums bestätigt. So wurden von (Frank, 1974) in 11 Fertigungsbetrieben mit Serienfertigung Stichproben von 3008 Werkstücken der Produktion entnommen. Davon waren ca. 66% der Teile rotationssymmetrisch, wobei ca. 56% der Teile eine zylindrische Grundform hatten.

Bei bestimmten Herstellungsverfahren werden prinzipbedingt sogar zum größten Teil nur rotationssymmetrische Teile gefertigt, wie die beiden folgenden Beispiele zeigen. So werden nach (Hirschvogel u. a., 2006) mit dem Verfahren der Kalt- und Halbwarmumformung hauptsächlich rotations- und achssymmetrische Bauteile hergestellt. Die Abbildungen in (Hirschvogel u. a., 2006) zeigen dies anschaulich. Ein weiterer Herstellungsprozess, der hauptsächlich rotationssymmetrische Produkte liefert, ist die Drehbearbeitung. Mit diesen Verfahren werden bedeutende Produktionsmengen erreicht, z. B. 231.298 Tonnen an Kaltfließpressteilen und 663.678 Tonnen an Drehteilen im Jahr 2008 laut Erhebungen des Statistischen Bundesamtes (Statistisches Bundesamt, 2009);

Zusammenfassend bedeutet dies, dass rotationssymmetrische Bauteile in der Industrie eine bedeutende Rolle spielen und damit ein großes Anwendungsfeld für ein Objekterkennungsverfahren für rotationssymmetrische Objekte begründen.

2.3.2. Analyse der Eigenschaften der rotationssymmetrischen Bauteile in der Industrie

Oberflächeneigenschaften

Aus den vorausgegangenen Analysen folgt, dass rotationssymmetrische Teile einen großen Anteil an der industriellen Produktion einnehmen. Diese Teile können mit unterschiedlichen Verfahren aus den verschiedensten Werkstoffen gefertigt werden. Jedes Fertigungsverfahren führt zu charakteristischen Oberflächeneigenschaften, die sich im Hinblick auf die optischen Eigenschaften der Teileoberflächen auswirken. Im Folgenden sind einige Beispiele aufgeführt:

- Die Oberflächen können ein breites Spektrum an möglichen Farben annehmen. Dies kann durch Beschichtungen, Oxidation und die Farbe des Ausgangsmaterials verursacht werden. Die Farbverteilung kann auch inhomogen sein, beispielsweise aufgrund von abschnittweisem Erhitzen beim Umformen.

Kapitel 2. Ausgangssituation

- Der Reflexionsgrad kann von diffus bis total reflektierend reichen. Beispielsweise wird durch Strahlen eine matte Oberfläche erzeugt. Die bei Drehbearbeitung entstehenden Riefen können richtungsabhängige Reflexionseigenschaften verursachen.
- Durch schleifen, polieren oder galvanisches Beschichten können glänzende Oberflächen erzeugt werden, die zu einer Totalreflexion des Lichts führen.

Durch Messungen können für die Oberflächeneigenschaften objektive Kenngrößen ermittelt werden, beispielsweise die Rauheit. Dadurch können die Begriffe glatt und rau durch Zahlenwerte beschreiben werden, womit auch Aussagen über die optischen Eigenschaften wie total reflektierend und diffus reflektierend möglich sind. Diese einmal durch messen bestimmten Werte sind jedoch keine fixe Eigenschaft aller gefertigten Teile einer Art, sondern verändern sich während der Fertigung weiterer Teile. Beispiele für Einflussgrößen sind der Verschleiß von Werkzeugen, Veränderungen der Fertigungsmaschinen und Schwankungen im Oberflächenzustand des Ausgangsmaterials. In (Spur u. Stöferle, 1984) wird dies für das Fließpressen erläutert. Die Veränderungen der optischen Oberflächeneigenschaften, die während der Standzeit eines Werkzeugs beim Zerspanen auftreten, wurden von (Modrich, 2002) ausführlich dargestellt.

Formeigenschaften und Toleranzen

Die zu berücksichtigenden Formeigenschaften der rotationssymmetrischen Teile haben Einfluss auf die zu entwickelnden Verfahren. Im Folgenden werden einige Beispiele genannt:

- Die Teile werden in den unterschiedlichsten Dimensionen gefertigt, mit Längen von wenigen Millimetern bis zu mehreren hundert Millimetern.
- Je nach Fertigungsverfahren können relativ große Toleranzen auftreten, beispielsweise beim Warmumformen.
- Beim Umformen entstehen oft in gewissen Bereichen des Teiles Überstände und Grate, die von Teil zu Teil sehr variabel sein können und auch in ihrer Form undefiniert sind.

Anordnung der regelgeometrischen Elemente

Die Anordnung der einzelnen regelgeometrischen Elemente auf den Teilen sowie ihre Geometrie haben großen Einfluss auf die zu entwickelnden Verfahren. Es spielen die folgenden Faktoren eine wichtige Rolle:

- Die Anzahl der regelgeometrischen Elemente, aus den ein Objekt aufgebaut ist. In der Praxis ist von 1–20 Elementen auszugehen.
- Die Anordnung der regelgeometrischen Elemente zueinander.

2.3. Analyse der Objekterkennungsaufgabe im industriellen Anwendungsbereich

- Das Verhältnis des Volumens der einzelnen regelgeometrischen Elemente am Gesamtvolumen. So kann sich ein Element dominierend darstellen oder die Einzelteile können gleichberechtigt sein. Beispielsweise kann bei einem aus zwei Zylindern aufgebauten Objekt ein Zylinder dominierende 95% der Länge ausmachen oder die Länge kann gleichmäßig verteilt sein.
- Bereiche, die nicht rotationssymmetrisch oder frei geformt sind, und die nicht für die Erkennung genutzt werden können.

2.3.3. Analyse der Anordnung von Teilen im Schüttgut

Die Formeigenschaften und die Anordnung der regelgeometrischen Elemente beeinflussen die Vorzugslagen, die die Teile im Haufwerk einnehmen können, stark. In (Frank, 1974) wurden die unterschiedlichsten Teile analysiert und entsprechend ihrem Verhalten im Haufwerk klassifiziert. So wurde festgestellt, dass Teile, die hauptsächlich zylindrisch sind, schon bei einem Verhältnis von 1 zwischen Länge und Durchmesser mit einer Wahrscheinlichkeit von 70% auf dem Mantel zu liegen kommen und nur mit 30% auf der Stirnfläche. Dort wurden auch zusammengesetzte Teile analysiert. Das Resultat war, dass die Lagen auf dem Mantel viel wahrscheinlicher sind, als die Lagen auf den Stirnseiten, wenn es sich nicht gerade um scheibenförmige Teile mit geringer Länge im Verhältnis zum Durchmesser handelt. Die Lagen auf dem Mantel werden mit zunehmender Länge im Verhältnis zu Durchmesser immer wahrscheinlicher. Die scheibenförmigen Teile liegen natürlich häufig auf der Stirnfläche.

2.3.4. Analyse der durch Objekterkennung festzulegenden Freiheitsgrade

Bei ungeordnet vorliegenden Objekten sind für die Position und die Rotation je drei Freiheitsgrade offen und sind durch die Objekterkennung festzulegen. Um die Objekte greifen zu können, ist es aber nicht immer notwendig, alle möglichen Freiheitsgrade des Objekts festzulegen. Bei rotationssymmetrischen Objekten ist dies auch gar nicht möglich. Es verbleibt immer die Rotation um die Achsrichtung, die aber für die Greifbarkeit und Ablage nicht relevant ist. Festgelegt werden können und müssen lediglich die Rotationen um die beiden zur Objektachse senkrechten Achsen und die Translationen senkrecht zur Achsrichtung.

Die Translation in Achsrichtung ist genauer zu betrachten. Mit der Erkennung von genau einem entsprechenden regelgeometrischen Element kann beispielsweise bei zylindrischen Objekten die Achse noch nicht festgelegt werden, bei konischen Objekten sehr wohl. Besteht das Objekt nur aus zylindrischen Abschnitten, ist auch durch die Bestimmung aller einzelner Zylinder die Verschiebung nicht festlegbar. Hierzu sind die Beziehungen der einzelnen Zylinder und deren Längen zu betrachten.

Ob dieser Translationsfreiheitsgrad festgelegt werden muss, hängt von der Anwendung ab. Nur um das Objekt zu greifen, kann es ausreichen, den Freiheitsgrad offen zu lassen. Sollen die Objekte jedoch lagerichtig abgelegt werden, so ist dieser Freiheitsgrad festzulegen.

Ähnlich verhält es sich mit Symmetrien. Auch diese sind hauptsächlich für das lagerichtige Ablegen relevant.

2.4. Analyse der bekannten Erkennungsverfahren für regelgeometrische Elemente

Regelgeometrische Elemente im Raum können mithilfe unterschiedlicher Verfahren und Algorithmen bestimmt werden. Teilweise ist in den Verfahren eine Segmentierung der Messpunkte integriert, bei anderen Verfahren werden segmentierte Daten vorausgesetzt. Hier soll in erster Linie der Aspekt der Erkennung betrachtet werden.

2.4.1. Besteinpassung

Mit der Methode der kleinsten Quadrate können Kurven und Flächen an gegebene Messpunkte angepasst werden. Gut geeignet ist die Methode für Flächen F , die in impliziter

$$F(x, y, z, \mathbf{p}) = 0 \quad (2.1)$$

oder parametrischer

$$F(u, v, \mathbf{p}) = (x(u, v, \mathbf{p}), y(u, v, \mathbf{p}), z(u, v, \mathbf{p}))^T, \quad u, v \in \mathbb{R}^2 \quad (2.2)$$

Form gegeben sind. Die Flächenbeschreibungen sind von Parametern abhängig, die in einem Vektor \mathbf{p} zusammengefasst werden können. Ein Beispiel für eine implizite Fläche ist eine Quadrik $ax^2 + by^2 + cz^2 + 2dxy + 2exz + 2fyz + gx + hy + iz + j = 0$ mit den Formparametern $\mathbf{p}_f^T = (a, b, c, d, e, f, g, h, i, j) \in \mathbb{R}^{10}$, die durch Hauptachsentransformation auf Normalform mit drei Parametern (a, b, c) gebracht werden kann. Für den Spezialfall eines Zylinders ergibt sich

$$\left(\frac{x}{a}\right)^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2 - 1 = 0,$$

für $r = a = b$ handelt es sich um einen Kreiszyylinder mit Radius r . Durch Superquadriken

$$\left(\left(\frac{x}{a}\right)^{\frac{2}{\epsilon_2}} + \left(\frac{y}{b}\right)^{\frac{2}{\epsilon_2}}\right)^{\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}} + \left(\frac{z}{c}\right)^{\frac{2}{\epsilon_1}} = 0,$$

die von (Barr, 1981) in die Computergrafik eingeführt wurden, kann in Abhängigkeit von ϵ_1 und ϵ_2 eine Vielfalt von Formen wie Zylinder, Kugeln und Quader dargestellt werden. Zusätzlich können Verjüngungsparameter eingeführt werden, womit sich insgesamt 13 Parameter ergeben (Biegelbauer u. Vincze, 2007).

Um die Lage der Fläche im Raum festzulegen, werden die Positionsparameter $\mathbf{p}_p^T = (x_0, y_0, z_0)$ und die Rotationsparameter $\mathbf{p}_r^T(\omega, \varphi, \kappa)$ benötigt. Das Ziel der Besteinpassung ist es, die Parameter \mathbf{p} so zu bestimmen, dass sich die Fläche möglichst gut an die Messpunkte anpasst. Die mathematische Beschreibung für möglichst gut eine Optimierung auf Basis der geometrischen Abstände $d_i = \|\mathbf{X}_i - \tilde{\mathbf{X}}_i\|$ zwischen den Messpunkten \mathbf{X}_i und den senkrecht auf die Fläche F projizierten Messpunkten $\tilde{\mathbf{X}}_i$, die Lotfußpunkte genannt werden. Minimiert werden soll die Summe $S = \sum_{i=1}^m d_i^2$ der quadratischen Abstände. Zur Lösung sind im Allgemeinen iterative Lösungsverfahren notwendig, etwa das Gauß-Newton-Verfahren oder besser das Levenberg-Marquardt-Verfahren mit einem größeren Konvergenzbereich (Ahn, 2004).

2.4. Analyse der bekannten Erkennungsverfahren für regelgeometrische Elemente

Flächentyp	Anzahl Parameter
Superquadratik mit Verjüngung	13
Superquadratik	11
Superellipsoid	11
Quadratik	9
Elliptischer Kegel	8
Kreiskegel	6
Kreiszyylinder	5

Tabelle 2.1.: Parameter quadratischer Flächen

Superquadraten werden in verschiedenen Anwendungen zur Objektmodellierung verwendet (Biegelbauer u. Vincze, 2007; Katsoulas u. Kosmopoulos, 2006; Krivic u. Solina, 2004; Lee u. a., 1999; Solina u. Bajcsy, 1990; Zhang u. a., 2003), wobei jedoch immer Nebenbedingungen an die Parameter zu knüpfen sind, da ansonsten aufgrund der großen Zahl der Parameter die Messpunkte durch beliebige, von den Startwerten abhängige Formen angenähert würden (Petitjean, 2002). Insbesondere bei nur teilweiser Erfassung der Oberfläche durch die Messpunkte stellt dies ein Problem dar, das durch eine Randbedingung, die kleine Superellipsoide bevorzugt, behoben werden muss (Chevalier u. a., 2003). Ein und dieselbe Form kann durch Superellipsoide mit unterschiedlichen Parametern ϵ_1 und ϵ_2 beschrieben werden. Durch diese Mehrdeutigkeit ist eine direkte Anwendung zur Greifpunktberechnung nicht möglich, sondern es ist erst noch eine weitere Verarbeitung durchzuführen (Solina u. Bajcsy, 1990). In (Biegelbauer u. Vincze, 2007) werden sogar alle Formparameter am zu findenden Objekt vorbestimmt, so dass bei der Einpassung nur noch die Lageparameter bestimmt werden, was sich bei Abweichungen der realen Daten von dem Modell negativ auswirkt.

Eine hohe Anzahl von Parametern führt zu Mehrdeutigkeiten in der Einpassung und kann zudem die Optimierung instabil machen (Petitjean, 2002). Deshalb werden bei (Ahn, 2004) erst Elemente mit wenigen Parametern eingepasst, bevor welche mit einer größeren Zahl von Parametern gesucht werden, so wird beispielsweise zur Einpassung eines Kegels zuerst ein Zylinder eingepasst.

Die in jedem Iterationsschritt der Optimierung notwendige Bestimmung des Abstands zwischen Modell und Messpunkten kann bei Kreiszyindern und Kreiskegeln analytisch durchgeführt werden. Bei den Elementen aus Tabelle 2.1 mit mehr als 6 Parametern kann der geometrische Abstand nicht mehr direkt berechnet werden, sondern nur entweder iterativ mit entsprechendem Rechenaufwand oder durch eine Annäherung, die aber unter Umständen zu einem deutlich von den Messpunkten abweichenden Ergebnis führen kann.

Ausreißer in den Messwerten können bei der Einpassung nach der Methode der kleinsten Quadrate zu extrem schlechten Ergebnissen führen und eine der Realität entsprechende Anpassung der Parameter verhindern. Deshalb ist eine Elimination von Ausreißerpunkten notwendig (Ahn, 2004; Leonardis u. a., 1995; Petitjean, 2002).

Um eine komplette Szene zu beschreiben wurde das „recover and select“-Prinzip entwickelt (Chevalier u. a., 2003; Leonardis u. a., 1990, 1995; Marshall u. a., 2001), bei dem auf der gesamten Szene Startpunkte verteilt werden, an den die regelgeometrischen Elemente in einer lokalen Umgebung eingepasst werden. Elemente, die einen sehr großen Einpassfehler aufweisen, werden sofort verworfen. In weiteren Schritten werden die Umgebungen und die Elemente vergrößert und jeweils nach einer Bewertung die schlechtesten verworfen. Von diesen Elementen werden nach unterschiedlichen Kriterien die Besten ausgewählt, z. B. nach dem Einpassfehler, minimaler Parameterzahl oder nach den verwendeten Messpunkten. Diese Art der Szenenbeschreibung ist recht rechenintensiv, da viele Elemente einzupassen sind, die auf dem Weg zum Ergebnis dann verworfen werden.

Ein verbessertes Verfahren wurde z. B. in (Ahn, 2004) vorgestellt. Hierbei werden auch stochastisch Startpunkte über die Szene verteilt, jedoch nicht gleichzeitig. Ausgehend von dem ersten Startpunkt wird eine Umgebung untersucht, indem zuerst eine Quadrik mit wenigen Punkten und Iterationen grob angepasst wird. Aus dieser wird die Krümmung geschätzt und dann das entsprechende Element eingepasst. Durch eine robuste Ausreißerelimination werden alle zu dem Element gehörigen Punkte segmentiert. In der Restpunktwolke wird wieder ein neuer Startpunkt zufällig gewählt und so iterativ die Szene durch regelgeometrische Elemente beschrieben.

Kombinierte Elemente

Viele Objekte sind aus mehreren regelgeometrischen Elementen, die in einer ganz bestimmten geometrischen Beziehung zueinander stehen, aufgebaut. Für die Messtechnik und die Flächenrückführung wurden Ansätze für Einpassverfahren vorgestellt, mit den diese zusammengesetzten Elemente mitsamt ihren Beziehungen als ein kombiniertes Element eingepasst werden können.

Erste Arbeiten dazu hat (Sourlier, 1995) durchgeführt. Beim dort beschriebenen Einpassverfahren sind die Lageparameter vollkommen von den Formparametern unabhängig. Dadurch können neben einzelnen Flächen auch kombinierte Flächen eingepasst werden. Dazu wird eine entsprechende Gruppe von Einzelflächen definiert, die alle ihre eigenen Parametersätze besitzen. Zudem existieren Lageparameter für das kombinierte Element. Sollen die Flächen in einer bestimmten Beziehung zueinander eingepasst werden, können in dem Algorithmus die entsprechenden Parameter festgehalten werden. Die Unabhängigkeit der Formparameter und der Lageparameter setzt eine parametrische Flächenbeschreibung voraus. Dies hat zur Folge, dass im Gegensatz zur impliziten Flächenbeschreibung die Abstände der Messpunkte zur Fläche nicht mehr analytisch bestimmt werden können. Es können nur noch Abstände zu Punkten auf der Fläche berechnet werden. Diese Flächenpunkte werden mit u und v parametrisiert. Dadurch werden für n Messpunkte $2n$ weitere Parameter in die Optimierung eingeführt.

Weitere grundlegende Arbeiten in Bezug auf Anwendungen in der Flächenrückführung wurden von (Benkó u. a., 2002) durchgeführt. Dabei wurde hauptsächlich auf die Modellierung der Nebenbedingungen und das Vorgehen bei abhängigen oder widersprüchlichen Nebenbedingungen eingegangen. Hierzu wurde ein iteratives Verfahren vorgeschlagen, um die Abhängigkeiten und Widersprüche zu finden.

2.4. Analyse der bekannten Erkennungsverfahren für regelgeometrische Elemente

In (Ahn, 2004) werden Methoden zur kombinierten Einpassung nur als mögliche Weiterentwicklung beschrieben. Implementiert wurden sie nicht, deshalb liegen auch keine Aussagen über den Erfolg vor. Bei der vorgeschlagenen Methode werden die einzelnen Elemente über Nebenbedingungen in Form von Lagrange-Multiplikatoren gekoppelt. In der Jacobi-Matrix stehen auf der Diagonale die Jacobi-Matrizen der einzelnen Elemente. Dies führt zu sehr großen Matrizen. Weil jedes Element seine eigenen Lageparameter besitzt, die über die Nebenbedingungen gekoppelt sind, bestehen Zweifel an der numerischen Stabilität der Einpassung.

In (O'Leary u. a., 2005) wird lediglich ein Verfahren für die Einpassung von 2-D-Objekten beschrieben, beispielsweise konzentrische Kreise. Auf die Eignung für 3-D-Anwendungen wird nicht eingegangen.

Von (Rabbani, 2006) werden über Constructive Solid Geometry (CSG) beschriebene Elemente eingepasst. (CSG) ist eine CAD-Beschreibung für kombinierte Elemente, die durch boolesche Operationen aus einzelnen regelgeometrischen Elementen gebildet werden. Weil nur die Parameter der einzelnen Elemente bestimmt werden müssen, ist die Zahl der Parameter relativ gering. Es sind drei unterschiedliche Methoden zur Berechnung der Abstände zwischen Modell und Messpunkten beschrieben, die alle iterativ durchgeführt werden. Um das gewünschte (CSG)-Modell zu erhalten, müssen Randbedingungen zwischen den einzelnen Elementen eingeführt werden.

(Liu u. a., 2006) beschreiben unterschiedliche Verfahren zur Einpassung kombinierter Elemente mit Nebenbedingungen. Wie diese aussehen wird nicht genannt. Zudem werden gute Startwerte beziehungsweise Modelle benötigt, die durch den Benutzer bereitzustellen sind. Dies lässt das Verfahren weniger stabil erscheinen.

2.4.2. RANSAC-Methoden

Das RANSAC-Verfahren (**random sample consensus**, Übereinstimmung mit zufälliger Stichprobe) wurde von (Fischler u. Bolles, 1981a) vorgestellt und läuft in folgenden Schritten ab:

1. Aus der Menge M der Messpunkte \mathbf{X}_i wird eine minimal notwendige Teilmenge $T \subset M$ an Punkten, mit den das gesuchte Element F eindeutig bestimmt werden kann, zufällig herausgegriffen. Im 2-D-Fall ist beispielsweise eine Menge von drei Punkten die minimal notwendige Menge, um einen Kreis zu bestimmen.
2. Die Abstände d_i aller Punkte $\mathbf{X}_i \in M$ zu dieser ersten Schätzung werden bestimmt und die Punkte, die einen geringeren Abstand als ein vorgegebener Schwellwert s haben, werden Übereinstimmungsmenge $C := \{\mathbf{X}_i \in M \mid d_i < s\}$ genannt. Die Anzahl $b := \#C$ der Punkte in C dient als Bewertungszahl für die Qualität der Schätzung.
3. Die Schritte 1. und 2. werden η -Mal wiederholt.
4. Für die Menge C_j , $1 \leq j \leq \eta$ mit der höchsten Bewertungszahl b wird das entsprechende Modell durch ein Einpassverfahren bestimmt, wobei die erste Schätzung als Startwert dient.

Das Verfahren unterscheidet sich also grundsätzlich von den konventionellen Einpassverfahren wie der kleinste Quadrate Methode, die eine möglichst große Anzahl von Punkten für die erste Schätzung verwenden und dann versuchen, die Ausreißer zu segmentieren. Dadurch ergibt sich eine Reihe von Vorteilen. So ist das Verfahren äußerst unempfindlich gegenüber Ausreißern, die bis zu 50% aller Punkte betragen dürfen. Zudem ist die Implementierung einfach (Schnabel u. a., 2007). Eine vorherige Segmentierung ist nicht notwendig (Biegelbauer u. Vincze, 2007).

Bei dem in (Fischler u. Bolles, 1981b) beschriebenen Verfahren zur Bestimmung von Zylindern werden zunächst in der Szene Ellipsen mit RANSAC gesucht. Die bezüglich einer Hauptachse ähnlichen Ellipsen werden gruppiert und die Achsen der Zylinder durch eine RANSAC-basierte Geradenbestimmung festgelegt.

In (Beder u. Förstner, 2006) wird die Thematik der minimal notwendigen Punktzahl zur Bestimmung eines Zylinders behandelt. Das einfachste Verfahren, bei dem lediglich ein lineares Gleichungssystem gelöst werden muss, benötigt 9 Punkte. Das Verfahren mit der geringsten Punktzahl von 5 ist deutlich komplizierter. So muss zuerst die Zylinderachse bestimmt werden, wofür unter anderem bivariate Polynome 6. Grades gelöst werden müssen, wodurch sich ein hoher Rechenaufwand ergibt.

Die Anzahl der notwendigen Stichproben ist exponentiell von der Anzahl der benötigten Punkte abhängig. Bei einer geforderten Erfolgswahrscheinlichkeit von 99% und einem Ausreißeranteil von 50% in den Messpunkten sind bei 9 Punkten 2356 Stichproben notwendig, bei 5 Punkten nur noch 146. Folglich ist in allen Fällen der Rechenaufwand beträchtlich, bei 9 Punkten aufgrund der vielen Stichproben, der sich bei weniger Punkten immer mehr in Richtung zur Bestimmung des Zylinders verschiebt.

Der hohe Rechenaufwand wird auch in (Schnabel u. a., 2007) genannt. Deshalb werden dort einige Optimierungen vorgeschlagen. So kann das Entnehmen der Stichproben so erfolgen, dass eine erhöhte Erfolgswahrscheinlichkeit besteht. Zudem werden optimale Datenstrukturen verwendet.

Ein weiter Ansatz zur Geschwindigkeitssteigerung wird in (Biegelbauer u. Vincze, 2007) dargestellt. Hierzu wird die RANSAC-Suche auf verschiedenen Auflösungsstufen des Tiefenbildes durchgeführt. Zudem werden nur die Positions- und Rotationsparameter angepasst, um die Besteinpassung schneller und stabiler zu machen. Es wird dennoch eine Laufzeit von ca. 2 – 10 Sekunden für ein Objekt aus einem bzw. zwei Elementen genannt.

2.4.3. Hough-Transformation

Die Hough-Transformation wurde von (Hough V, 1962) ursprünglich entwickelt, um Geraden in 2-D-Bildern zu finden. Die Grundidee ist, die Datenpunkte in einen Parameterraum abzubilden. Am Beispiel der Gerade ist der Parameterraum zweidimensional aufgrund der Darstellbarkeit einer Gerade durch zwei Parameter, z.B. der Steigung m_g und dem y -Achsenabschnitt b_g in der Geradengleichung $y = m_g x + b_g$. Der Parameterraum besteht aus diskreten Zellen, die als Akkumulator für die abgebildeten Datenpunkte dienen. Jeder Punkt aus dem Datenraum wird auf eine Gerade im Parameterraum abgebildet. Aus Akkumulatorzellen mit den meisten Einträgen, das sind die Schnittpunkte der Gerade im Parameterraum, können die Parameter für die Geraden

im Datenraum entnommen werden. Dies ist der Grund für die Robustheit des Verfahrens gegen Unterbrechungen in den Geraden und gegen Rauschen, da viele Einträge gesammelt werden. Daraus folgt aber auch der Hauptnachteil des Verfahrens in Form eines großen Rechenaufwands und Speicherbedarfs (Jähne, 2005). So ist der Speicherbedarf und die Laufzeit in der Größenordnung von $O(s_h^{p_h})$ beziehungsweise $O(s_h^{(p_h-1)}n)$, wobei s_h die Auflösung entlang einer Dimension im Parameterraum ist, p_h die Summe der Parameter und n die Anzahl der Punkte (Rabbani, 2006).

Um diese negativen Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit zu überwinden, wurden mehrere Verbesserungen entwickelt, so wird bei der schnellen Hough Transformation (Li u. a., 1986; Ogundana u. a., 2007) der Parameterraum in nicht uniforme Akkumulatorzellen in Form eines Octrees unterteilt, bei der stochastischen Hough Transformation werden nicht mehr alle Datenpunkte in den Parameterraum transformiert, sondern nur noch zufällig ausgewählte (Xu u. a., 1990; Xu, 2007). Zur Detektion von Zylindern ist bei der günstigsten Repräsentation mit fünf Parametern ein fünfdimensionaler Parameterraum ($p_h = 5$) notwendig, was bedeutet, dass bei nur 100 Zellen entlang jeder Parameterrichtung ($s_h = 100$) bei 4 Byte Speicherbedarf pro Zelle ca. 36 Gigabyte Speicher notwendig sind. Bei den Standardverfahren sind aber eher Werte von $s_h = 200$ realistisch, was einen Speicherbedarf von ca. 1,2 Terabyte ergibt (Rabbani, 2006), woraus sich folgern lässt, dass ab einer Dimension von fünf für den Parameterraum das Verfahren nicht mehr praktikabel ist. So wird in (Schnabel u. a., 2007) festgestellt, dass sich die Hough Transformation vor allem für 2-D-Anwendungen eignet. In (Rabbani, 2006) wird ein Verfahren zur Zylindererkennung vorgestellt, bei dem das Erkennungsproblem im fünfdimensionalen Parameterraum in zwei Erkennungsprobleme in einen zweidimensionalen und ein dreidimensionalen Parameterraum aufgeteilt wird. In einem ersten Schritt mit zweidimensionalem Parameterraum wird die Achsrichtung des Zylinders bestimmt, indem im Gauß-Bild die entsprechende Ebene gesucht wird. In einem zweiten Schritt wird der Radius und Ort über eine weitere Hough Transformation bestimmt.

2.4.4. Kombinierte Verfahren

Um eine bessere Stabilität bei der Erkennung regelgeometrischer Elemente zu erreichen, wurde eine ganze Reihe von Verfahren entwickelt, die eine Kombination aus verschiedenen Ansätzen darstellen. Bei (Chaperon u. Goulette, 2001) wird in einem ersten Schritt die Gauß-Abbildung erzeugt, bei der die Normalenvektoren der Oberfläche am Ursprung der Einheitskugel abgetragen werden. Im Fall von Zylindern ergeben sich Großkreise, bei Kegeln entstehen Kleinkreise. Die Normalenvektoren müssen hierzu näherungsweise z. B. über Ebeneneinpassungen in jedem Messpunkt geschätzt werden, was einen gewissen Rechenaufwand darstellt. Die Achsrichtung des gesuchten Zylinders wird durch die Lage der Ebene durch den Großkreis festgelegt. Diese Ebene wird in (Chaperon u. Goulette, 2001) über ein RANSAC-Verfahren bestimmt. Bei (Rabbani, 2006) wird dazu die Hough-Transformation benutzt. Um den Radius des Zylinders zu bestimmen, wird eine weitere RANSAC-Suche durchgeführt (Chaperon u. Goulette, 2001) beziehungsweise eine weitere Hough-Transformation (Rabbani, 2006).

Da die Gauß-Abbildung nicht bijektiv ist, können die auf einem Großkreis liegenden

Punkte von unterschiedlichen parallelen Zylindern stammen. In (Chaperon u. Goulette, 2001) werden die Zylinder in dem zweiten RANSAC-Schritt getrennt, bei (Rabbani, 2006) wird die Punktwolke vorher in Bereiche, die nur einen Zylinder enthalten, segmentiert. Für Kegel wird keines der beiden Verfahren angewandt.

In (Taylor, 2004) wird eine Kombination aus Segmentierung auf der Basis von Krümmungen und Gauß-Abbildung und anschließender Besteinpassung von regelgeometrischen Elementen beschreiben. Die Einpassung besitzt keine Ausreißerelimination und ist auf eine gute Segmentierung angewiesen.

2.5. Analyse der verfügbaren Verfahren zur Tiefenbildsegmentierung als Vorverarbeitung zur Objekterkennung

Laut (Pal u. Pal, 1993) gibt es hunderte von Segmentierungsverfahren, aber kein einziges ist universell für alle Anwendungen einsetzbar. Dies gilt auch für Segmentierungsverfahren als Teil eines Vorverarbeitungsverfahrens für die Objekterkennung. Deshalb ist eine Analyse der bekannten Verfahren auf ihre Eignung für diesen Anwendungsfall notwendig.

2.5.1. Rechenzeitbedarf und erreichbare Qualität der Segmentierung

Bei der Segmentierung als Vorverarbeitung der Messdaten für eine nachfolgende Objekterkennung spielt die Rechenzeit eine ausgesprochen wichtige Rolle. Werden nicht direkt die Ausgangsdaten, also die Tiefenwerte als Grundlage für die Bestimmung der Segmentierung verwendet, sondern abgeleitete Größen wie Normalen und Krümmungen, hat dies einen großen Einfluss auf die Auswertzeit. Lange Rechenzeiten treten vor allem dann auf, wenn Einpassverfahren für Flächen angewandt werden. So werden von (Böhm, 2004) verschiedene Methoden zur Krümmungsberechnung untersucht mit dem Ergebnis, dass die schnellsten Verfahren deutliche Mängel in der Qualität der erhaltenen Krümmungswerte und damit auch bei der nachfolgenden Segmentierung aufweisen. Deshalb wird ein Verfahren zur Approximation durch ein explizites bivariates Polynom verwendet, dem jedoch ein deutlicher Nachteil in der Rechenzeit bescheinigt wird. Dieses Problem weisen alle Verfahren, die auf einer Einpassung von Flächen basieren, auf. In Tabelle 2.2 sind Beispiele für die Rechenzeiten einiger Segmentierungsverfahren gegeben. Um die Ergebnisse besser einschätzen zu können, ist jeweils die Bildgröße und das Jahr der Veröffentlichung angegeben.

2.5.2. Anwendungsbereich und segmentierbare Flächentypen

Bei den Segmentierungsverfahren muss zwischen allgemeinen und anwendungsspezifischen Ansätzen unterschieden werden. Bei den allgemeinen Ansätzen werden nur grundsätzliche Eigenschaften der Flächen verwendet, z. B. wird von (Bab-Hadiashar u. Gheissari, 2006; Besl u. Jain, 1988) nur angenommen, dass die Daten stückweise glatte Flächen beschreiben, die ein gewisses Rauschen beinhalten. Diese Verfahren können zur Segmentierung von Tiefenbildern in alle Flächentypen verwendet werden.

Verfahren	Rechenzeit (s)	Bildgröße	Jahr
(Bock u. Guerra, 2001) Kombination aus bereichs- und kantenbasierten Ebenensegmentierungsverfahren	315 – 352	512 × 512	2001
(Gachter u. a., 2006) Unterschiedliche Verfahren auf Basis von Geradenextraktion	3,41 – 5,16	201 × 361	2006
(Bab-Hadiashar u. Gheissari, 2006) Ebene und gekrümmte Flächen auf Basis von Einpassverfahren	65 – 275	512 × 512	2006
(Jiang u. Bunke, 1994) Ebene Flächen auf Basis von Geraden mit Bereichswachstum	8,81 – 9,67	256 × 256	1994

Tabelle 2.2.: In der jeweiligen Veröffentlichung angegebene Rechenzeiten für das Segmentierungsverfahren

Diese sind aber oft langsam und das Ergebnis ist nicht immer zufriedenstellend. Anwendungsspezifische Verfahren können dagegen Vorwissen nutzen und beispielsweise nur bestimmte gewünschte Flächentypen wie Ebenen oder Zylinder suchen. Deshalb können diese Verfahren schneller sein. Zur Segmentierung in Ebenen wurde eine Vielzahl von Verfahren vorgestellt, von den manche prinzipiell ausschließlich ebene Bereiche detektieren können (Jiang u. Bunke, 1994; Li u. Zhao, 2003; Gachter u. a., 2006) und andere durch Vorgaben dazu gebracht werden können (Mazouzi u. Batouche, 2007; Gotardo u. a., 2004). Zur gezielten Detektion von Zylindern, Kegeln und Quadriken und anderen Flächen wurden weitere Verfahren entwickelt (Chevalier u. a., 2003; Westkämper u. a., 2006a).

Über die Suche nach bestimmten Flächentypen hinaus wurden Verfahren entwickelt, die vorhandenes Vorwissen noch stärker nutzen. Von (Böhm, 2004) wurde ein Verfahren vorgestellt, bei dem das Vorwissen über die Anordnung der Flächen in einem CAD-Modell zur Segmentierung der Tiefendaten verwendet wird. Dazu werden sowohl von den Flächen im CAD-Modell als auch der Tiefendaten Krümmungswerte berechnet und die Segmentierung der Tiefendaten wird anhand der Verteilung der Krümmungswerte des CAD-Modells vorgenommen.

2.5.3. Verfahren für rotationssymmetrische Objekte

Viele der in Abschnitt 2.2.1 aufgeführten Segmentierungsverfahren lassen sich zur Suche nach Bereichen, die von rotationssymmetrischen Objekten stammen, verwenden. Dies sind Verfahren unter Verwendung von:

Oberflächenkrümmung Hierzu werden Punkte mit ähnlichen Krümmungseigenschaften, die den des gesuchten Objekts entsprechen, zusammengefasst. Beispiele sind in 2.2.1 oder in (Westkämper u. a., 2006b) genannt. Grundlage für die Krümmungsberechnung ist meist eine Einpassung glatter Flächen.

Krümmungsmittelpunkte Bei rotationssymmetrischen Objekten müssen die Krümmungsmittelpunkte auf der Drehachse liegen. Dies wird in (Sablatnig u. Kampel,

2002) und (Yokoya u. Levine, 1994) ausgenutzt, um rotationssymmetrische Objekte bzw. ihre zugehörigen Messpunkte zu segmentieren.

Einpasverfahren Anstatt wie bei der Krümmungsberechnung allgemeine glatte Flächen einzupassen, können auch direkt rotationssymmetrische Flächen zur Segmentierung des gesamten Tiefenbildes eingepasst werden. In den meisten Fällen werden regelgeometrische Elemente eingepasst. Beispiele sind in 2.4.1 oder in 2.4.2 genannt.

Alle Verfahren sind sehr rechenaufwändig aufgrund der großen Anzahl von Flächen-einpassungen. Außerdem besteht die schon in 2.2.1 genannte Empfindlichkeit gegenüber Rauschen in den Messdaten.

2.5.4. Anpassbarkeit an neue Aufgaben und Parametrierung von Segmentierungsverfahren

Praktisch alle Segmentierungsverfahren sind von einer mehr oder weniger großen Anzahl von Parametern abhängig. In Tabelle 2.3 sind für einige Verfahren die Anzahlen der notwendigen Parameter zusammengestellt. Zusätzlich ist, sofern dies aus der Literatur hervorgeht, die Zahl der kritischen Parameter, die einen sehr großen Einfluss auf den Erfolg des Verfahrens ausüben, angegeben. Offensichtlich handelt es sich bei den meisten Parametern um Schwellwerte.

Auch aus den vergleichenden Untersuchungen von Segmentierungsverfahren durch (Hoover u. a., 1996; Jiang u. a., 2000; Min u. a., 2004; Powell u. a., 1998) geht hervor, dass meist zwischen fünf und zwanzig verschiedene Parameter für die einzelnen Verfahren notwendig sind. Von (Rivlin u. a., 2007) wird allgemein bemerkt, dass die Zahl der anzupassenden Parameter bei Bildverarbeitungsalgorithmen nicht vernachlässigbar ist.

Eine große Herausforderung stellt die Auswahl der optimalen Parameter dar, da die Leistungsfähigkeit der Algorithmen sehr stark von den verwendeten Werten abhängt (Espindola u. a., 2006; Nguyen u. a., 2005). Der Einfluss auf das Segmentierungsergebnis der großen Zahl von Parametern, die vielen Segmentierungsverfahren zueigen sind, ist nicht immer offensichtlich (Rabbani, 2006). Besonders Verfahren, die Bereichswachstum verwenden, besitzen viele Parameter, die vorher festgelegt werden müssen (Wang u. Suter, 2004). Aber auch bei Clustering-Verfahren treten viele undurchschaubare Parameter auf. Das sind in erster Linie die Anzahl der Cluster und gewisse Schwellwerte, z. B. Abstände (Xu u. Wunsch, 2005). Die Schwierigkeiten werden anhand der beiden folgenden Beispiele deutlich.

In (Powell u. a., 1998) wird über das Verfahren von (Besl u. Jain, 1988) ausgesagt, dass dort 38 Parameter das Ergebnis beeinflussen können. Von diesen wurden zehn ausgewählt, die den größten Einfluss ausüben. Doch auch ein zehndimensionaler Suchraum stellt für das Auffinden der optimalen Lösung ein Problem dar, insbesondere wenn es zum einen keine Anhaltspunkte für die Werte gibt und zum anderen eine einzige Auswertung – zur damaligen Zeit – sechs Stunden dauerte. Deshalb musste bei Besl nachgefragt werden, wie die Werte zu wählen sind.

Bei dem Verfahren von (Mazouzi u. Batouche, 2007) zeigt sich am Beispiel eines Winkelschwellwertes die Empfindlichkeit gegenüber ungünstigen Parametern. In den dort

2.5. Analyse der verfügbaren Verfahren zur Tiefenbildsegmentierung

Verfahren	Anzahl Parameter	Davon kritische	Beispiele für Art der Parameter
(Mazouzi u. Batouche, 2007) Regionenwachstum mit auf Wahrscheinlichkeiten basierender Verfeinerung	6	keine Angabe	Fenstergröße; Schwellwerte für Winkel, Tiefenwerte, Qualität der Startwerte
(Nguyen u. a., 2005) Unterschiedliche Verfahren auf Basis von Geradenextraktion	>6	1	Schwellwerte für Punktzahl pro Linie, Linielänge, Ausreißer
(Gotardo u. a., 2004) RANSAC-Verfahren mit Beschleunigung durch genetischen Algorithmus	8 + 5	keine Angabe	Steuerparameter für genetischen Algorithmus; Schwellerte für minimale Regionengröße, Nachbarschaftsgröße, Winkel, Tiefenwerte
(Li u. Zhao, 2003) Auswertung des Histograms der Gradienten, anschließende Vereinigung von Regionen	4	2	Schwellwerte für Histogramm, Vereinigung
(Jiang u. Bunke, 1996) Ebene Flächen auf Basis von Geraden	7	2	Schwellwerte
(Besl u. Jain, 1988) Krümmungsschätzung mit nachfolgender Flächeneinpassung	38	10	Schwellwerte für Einpassfehler

Tabelle 2.3.: Beispiele für die Anzahl der Parameter von Segmentierungsverfahren

beschriebenen Versuchen zur Parameterwahl wurde aus der Testmenge $\{15^\circ, 18^\circ, 21^\circ, 24^\circ\}$ der Wert 21° als optimal ausgewählt, größere Werte führen zu einer Untersegmentierung und kleinere Werte zu einer Übersegmentierung. Die fünf weiteren Parameter sind ähnlich empfindlich.

Aufgrund der oft großen Anzahl der Parameter und der Schwierigkeit diese optimal zu bestimmen, ergeben sich zwei Aufgabenstellungen. Diese bestehen zum einen darin, die wichtigsten Parameter zu identifizieren und zum anderen, die für die Aufgabe optimalen Parameter zu ermitteln. Meist geschieht dies auf experimenteller Basis (Nguyen u. a., 2005). Zum Thema, wie die wichtigen Parameter gefunden werden sollen, schlagen (Min u. Bowyer, 2005) eine Versuchs-und-Irrtums-Methode vor. Folgende Methoden zur Bestimmung der Parameter sind bekannt:

Empirisch In vielen Fällen werden die Parameter von Segmentierungsverfahren empirisch festgelegt (Xu u. Wunsch, 2005). Dazu wird aber schon in (Min u. a., 2004) bemerkt, dass dies subjektiv ist und die Ergebnisse schlecht reproduzierbar sind.

Vollständige Suche Oft werden Ansätze verwendet, bei den versucht wird, einen Teil des Lösungsraums vollständig zu durchsuchen. Der zu durchsuchende Bereich des Lösungsraums, das sind meist kartesische Produkte von Intervallen, muss dazu stark eingeschränkt werden. Meist werden drei bis fünf diskrete Werte pro Inter-

vall verwendet, auch wenn die Intervalle reellwertig sind (Mazouzi u. Batouche, 2007; Min u. Bowyer, 2005).

So werden in (Mazouzi u. Batouche, 2007) für vier Parameter jeweils vier Werte durchprobiert, was zu $4^4 = 256$ Kombinationen führt. Nach automatisiertem Vergleich mit einer Referenzsegmentierung wurde die Kombination der besten Parameter ausgewählt. In (Hoover u. a., 1996) wird eine ähnliche Vorgehensweise verfolgt. Die Ergebnisse werden zur Bewertung einer visuellen Prüfung unterzogen. Für einen in (Jiang u. a., 2000) untersuchten Algorithmus müssen zehn Parameter bestimmt werden. Fünf Parameter werden durch Versuche mit 1920 Wertekombinationen bei festhalten der Werte der anderen Parameter bestimmt. Die dann noch nicht bestimmten werden durch 144 Kombinationen bei festhalten der schon festgelegten Parameter gesucht. Bei (Min u. Bowyer, 2005) werden zur Bestimmung von 4 der 10 Parameter allein zwischen 69.400 und 78.300 Trainingsauswertungen mit Laufzeiten zwischen 48 Stunden und 156 Stunden benötigt.

Optimierungsverfahren Teilweise werden iterative Optimierungsverfahren eingesetzt, um die besten Parametersätze zu finden (Rabbani, 2006).

In (Min u. a., 2004) wird ein Hill-Climbing-Verfahren verwendet, bei dem in den zulässigen Parameterintervallen fünf gleichmäßig verteilte Punkte ausgewählt werden. So müssen bei p_s Parametern 5_s^p Parametersätze getestet werden. Nach Bewertung der Segmentierungsqualität wird das beste eine Prozent der Lösungen behalten. In der Umgebung dieser Parametersätze wird der Lösungsraum feiner abgetastet. Dies wird fortgesetzt, bis sich keine nennenswerte Verbesserung mehr ergibt. Von (Cinque u. a., 2000) wird ein genetischer Algorithmus eingesetzt, um die Suche im Lösungsraum durchzuführen.

Kombinierte Verfahren Es existieren auch kombinierte Verfahren, die z. B. durch eine Vorauswahl durch den Menschen Rechenzeit einsparen wollen.

Zur Optimierung der Parameter des Algorithmus von (Jiang u. Bunke, 1994) wurde in (Hoover u. a., 1996) für die zwei kritischen Parameter ein dreistufiges Verfahren verwendet. Im ersten Schritt werden von Hand zufällige Werte gewählt, um grob zwei Intervalle von aussichtsreichen Werten zu finden. Im zweiten Schritt werden jeweils drei Werte pro Parameter aus den beiden Intervallen systematisch durchprobiert. Im letzten Schritt werden aus dem kartesischen Produkt der beiden Intervalle 100 kontinuierliche Werte gezogen.

2.6. Heuristische Optimierungsverfahren in der Bildverarbeitung

Im vorigen Abschnitt wurde schon der Einsatz von Optimierungsverfahren zur Parameteroptimierung erwähnt. Interessante Ansätze sind insbesondere unter Verwendung von heuristischen Optimierungsverfahren wie evolutionären Algorithmen (Melkemi u. a., 2006), dem populationsbasierten, inkrementellen Lernen oder Partikelschwärmen (Cagnoni u. a., 2007) entstanden. Genau genommen handelt es sich bei den Verfahren um Meta-Heuristiken, da die Verfahren problemunabhängig eingesetzt werden können,

im Gegensatz zu heuristischen Verfahren, die nur für eine bestimmte Problemstellung entwickelt werden. Mit diesen lassen sich Optimierungsaufgaben, für die sich eine analytische Lösung nur schwer oder gar nicht finden lässt, dahingehend lösen, dass nicht die global beste Lösung gefunden wird, jedoch eine das Optimum gut annähernde Lösung. Für weitere Details wird auf die Literatur (Michalewicz u. Fogel, 2004; Weise, 2009) verwiesen. Im Folgenden wird nur auf die evolutionären Algorithmen tiefer eingegangen, da diese viele Varianten für spezielle Anwendungen bieten und erfolgreich für die unterschiedlichsten Problemstellungen eingesetzt wurden.

2.6.1. Evolutionäre Algorithmen

Von Charles Darwin wurden im Jahr 1859 die Grundzüge der natürlichen Evolution formuliert (Darwin, 1859). Zusammengefasst lässt sich dies folgendermaßen darstellen: Die einzelnen Individuen einer Population erzeugen Nachkommen in Form von Kindern (*Replikation*). Diese besitzen gegenüber ihren Eltern veränderte Eigenschaften, da Eigenschaften von beiden Eltern vererbt werden (*Rekombination*) und zudem in mit einer geringen Wahrscheinlichkeit Veränderungen in der Erbinformation auftreten (*Mutation*). Diejenigen Individuen, die besser an die Lebensbedingungen angepasst sind, haben eine höhere *Fitness*. Diese werden sich gegenüber weniger angepassten stärker vermehren, was zu einer gewissen *Selektion* führt. Durch zyklische Wiederholung entstehen damit im Lauf der Zeit immer besser an die Umwelt angepasste Individuen.

Bei evolutionären Algorithmen wird dieser biologische Vorgang simuliert, um damit ein Optimierungsproblem zu lösen, indem beispielsweise eine Population von Individuen erzeugt wird, die jeweils eine bestimmte Kombination von Parameterwerten darstellen. Deren *Fitness* wird anhand einer Zielfunktion bewertet. Damit wird die Selektion gesteuert. Der Zyklus aus Replikation, Rekombination/Mutation und Selektion wird so lange fortgeführt, bis ein Individuum gefunden ist, dessen Gütewert dem Optimierungsziel sehr nahe kommt. Ansätze dazu gab es bereits sehr früh (Fraser, 1957). Die wichtigsten der unterschiedlichen evolutionären Standardalgorithmen werden im Folgenden kurz dargestellt.

Genetische Algorithmen Hierbei wird in der Ursprungsform die genetische Information binär kodiert dargestellt (Goldberg, 1989; Holland, 1973). Die Schwierigkeit bei der praktischen Anwendung ist, das Kodierungsproblem der gegebenen Aufgabenstellung in eine entsprechende binäre Darstellung zu lösen. Die Biologie wird bei diesem Verfahren stark nachempfunden, indem ein großer Wert auf Erzeugung von Kindern nach der sexuellen Rekombination gelegt wird. Die Selektion läuft vor allem über die Auswahl der Eltern ab. Bei der Rekombination werden zur Erzeugung der Kinder Teile der Bit-Vektoren der Eltern durch einen sogenannten Crossover-Operator ausgetauscht. Die Mutation, die in der Invertierung einzelner Bits besteht, hat eine untergeordnete Bedeutung und dient nur dazu, dass jeder Punkt des Suchraums erreicht werden kann.

Evolutionstrategien Die von (Rechenberg, 1973, 1994; Schwefel, 1975) entwickelten Evolutionstrategien verwenden eine reellwertige Darstellung der Information. In der ursprünglichen Form wird vor allem die Mutation als treibende Kraft der Evolution

verwendet. Hierzu wird zu den vorhandenen reellwertigen Elementen der Individuen eine Änderung addiert, deren Betrag einer Normalverteilung gehorcht. Über eine Selektion anhand der Güte der Individuen werden die Individuen mit der höchsten Fitness für den nächsten Zyklus ausgewählt. Inzwischen wird aber auch hier die Rekombination verwendet und die Schrittweite der Mutation wird an den Fortschritt der Optimierung angepasst.

Evolutionäres Programmieren Beim evolutionären Programmieren ist der Abstand zur biologischen Evolution am größten. Es ist keine Rekombination vorgesehen, sondern es werden problemangepasste Mutationsoperatoren entwickelt. Bei reellwertigen zu optimierenden Problemstellungen ähnelt das Verfahren sehr stark den Evolutionsstrategien, da auch hier die Mutation mit normalverteilten Änderungen die zentrale Rolle spielt, siehe (Weicker, 2007).

Genetisches Programmieren Da das auf (Koza, 1992) zurückgehende genetische Programmieren aus den genetischen Algorithmen entstanden ist, besteht von der Darstellung und dem Vorgehen bei der Evolution eine große Ähnlichkeit zu diesen. Nur werden jetzt vor allem Strukturen durch die Binärvektoren kodiert. Bei den Strukturen kann es sich um die Darstellung von Bäumen oder auch Graphen handeln. Dadurch ist es möglich, Abläufe von Computerprogrammen darzustellen. Deshalb wird das genetische Programmieren dazu verwendet, um optimierte Computerprogramme zu erzeugen. Bei der Rekombination werden dazu einzelne Teile der die Programme beschreibenden Individuen ausgetauscht (Weicker, 2007).

2.6.2. Anwendungen in der Bildverarbeitung

Die Bildverarbeitung ist mittlerweile ein wichtiges Anwendungsfeld evolutionärer Algorithmen, inzwischen wird sogar schon von evolutionärer Bildverarbeitung gesprochen (Cagnoni, 2008; Ebner, 2008; Krawiec u. a., 2007). Dabei werden einerseits Parameter von Algorithmen optimiert und andererseits wird versucht, unter Verwendung genetischer Programmierung komplett neue Verarbeitungsstrategien zu finden. Zu letzterem ist in (Poli u. a., 2008) und (Krawiec u. a., 2007) ein guter Überblick über die Entwicklung dargestellt. Hier sollen zuerst Arbeiten zum Thema der Bildsegmentierung und der Parameteranpassung betrachtet werden, um dann noch ausgewählte Arbeiten zum Thema genetische Programmierung darzustellen.

Bildsegmentierung

Das in (Duarte u. a., 2006) beschriebene Verfahren bezieht sich auf die Segmentierung von Grauwertbildern. Anfangs wird eine Übersegmentierung erzeugt, deren Bereiche mit einem neu entwickelten evolutionären Verfahren zu sinnvollen Bereichen vereinigt werden.

Von (Diaz u. a., 2005) wird ein kantenbasiertes Verfahren zur Tiefenbildsegmentierung in ebene Bereiche vorgestellt. Über einen genetischen Algorithmus werden die Gradienten von zusammenhängenden, dünnen Kanten ausgewählt. Hierzu wird die Fitness

unter anderem dadurch bestimmt, ob an einem ausgewählten Kantenpixel zwei Bereiche mit unterschiedlichen Normalen zusammentreffen. Die Qualität der Ergebnisse erreicht ungefähr die der zum Vergleich herangezogenen Verfahren.

Bei (Gotardo u. a., 2004) werden zur Segmentierung von Tiefenbildern genetische Algorithmen zur Einpassung von Flächen verwendet, jedes Individuum repräsentiert eine Oberflächenhypothese. Die erzielten Segmentierungsergebnisse erreichen die Qualität der zum Vergleich herangezogenen Algorithmen.

In (Ho u. Lee, 2003) wird ein kantenbasiertes Verfahren zur Segmentierung von Grauwertbildern beschrieben. Dazu wird über ein K-means-Verfahren eine Übersegmentierung erzeugt. Ein genetischer Algorithmus vereinigt dann die zu stark segmentierten Bereiche wieder.

Parameteranpassung

Als Weiterentwicklung der Verfahren aus (Cinque u. a., 2000) wird in (Pignalberi u. a., 2003) die Optimierung von Parametern auf Basis genetischer Algorithmen beschrieben. Optimiert werden die zu den wohlbekannten Tiefenbildsegmentierungsverfahren UB (University of Bern, (Jiang u. Bunke, 1996)) und USF (University of South Florida, (Hoover u. a., 1996)) gehörenden Parameter. Da auch reellwertige Parameter auftreten, musste eine spezielle Kodierung dieser Werte erfolgen. Die Fitness wird als gewichtete Summe aus falsch segmentierten und unsegmentierten Pixeln sowie einer Kenngröße für Unter- und Übersegmentierung definiert. Die Ergebnisse der Segmentierung mit den optimierten Parametern übertreffen die Qualität der Segmentierung mit von Hand eingestellten Parametern deutlich.

Die grundlegende Arbeit von (Bhanu u. a., 1995) beschreibt die Anpassung von 14 Parametern für ein Verfahren zur Segmentierung von Farbbildern mit Hilfe von genetischen Algorithmen. Der genetische Ansatz wird gewählt, da der Suchraum groß ist und die Parameter auf komplexe Art miteinander verknüpft sind und somit mit einer auf Regeln basierten Art und Weise nicht bestimmt werden können. Die erzielten Ergebnisse waren sehr gut, so konnten beispielsweise die erforderlichen Durchläufe für eine Segmentierung um 30% gesenkt werden.

Genetische Programmierung zur Segmentierung und Merkmalsextraktion

Unter Anwendung von genetischer Programmierung wird in (Ebner, 2009) ein Verfahren zur Erkennung von Bereichen, die dort Objekte genannt werden, in Kamerabildern entwickelt. Die zur Segmentierung der Objekte verwendeten Kombinationen von Bildverarbeitungsoperatoren werden dabei evolviert, wobei die karthesische genetische Programmierung verwendet wird. Zur Verfügung stehen 56 Operatoren geringer Komplexität wie z. B. Richtungsableitungen, Absolutwertbildung, Maximalwerte und die Extraktion von Kenngrößen aus einzelnen Farbkanälen. Damit wurde gezeigt, dass es möglich ist, in Echtzeit unter Verwendung von Grafikkhardware das Segmentierungs- und Objekterkennungsverfahren so anzupassen, um aus Bildern vom Benutzer trainierte Bereiche zu segmentieren.

(Kadar u. a., 2009) haben mithilfe genetischer Programmierung aus elementaren Operatoren einen Operator zur Kantendetektion in Grauwertbildern evolviert.

Programme aus morphologischen Operatoren wie Erosion und Dilatation mit den unterschiedlichsten strukturierenden Elementen wurden von (Quintana u. a., 2006) evolviert. Sie wurden verwendet, um Bilder von Musiknoten zu segmentieren. Notenköpfe konnten zu 100% gefunden werden, die Detektion von Balken war dagegen deutlich schwieriger.

Von (Roberts u. a., 2003) wurde genetische Programmierung verwendet, um medizinisches Bildmaterial von Verletzungen zu segmentieren. Für die Programme wurde eine Baumstruktur verwendet, die aus einer Operatorenmenge von elementaren Bildverarbeitungsoperatoren wie Schwellwertbildung, Quantisierung, morphologischen und logischen Operatoren und Kantenfiltern aufgebaut werden. Die Fitnessfunktion wurde aus den falsch positiv und falsch negativ sowie den positiv und negativ klassifizierten Bereichen berechnet. Aus einer Population von 5000 Programmen wurde in 75 Generationen anhand von acht Trainingsbildern ein Programm, bestehend aus 330 Knoten evolviert. Zur Auswertung eines Bildes werden nur vier Sekunden benötigt, die Evolution hat jedoch auf einem Rechnercluster ca. 24 Stunden gebraucht. Bei der Anwendung auf 90 Verifikationsbilder wurde eine respektable Exaktheitsquote von 96% erreicht.

Kapitel 3.

Entwicklungsschwerpunkte

3.1. Folgerungen aus Ausgangssituation

Aus dem Stand der Technik für den Materialfluss in der Produktion lässt sich folgern, dass verfahrensbedingt und aufgrund von wirtschaftlichen Vorteilen bei Transport und Lagerung ein großer Anteil der zu handhabenden Teile als ungeordnetes Schüttgut vorliegt. Die Analyse in Abschnitt 2.3.1 hat gezeigt, dass rotationssymmetrische, insbesondere aus Zylindern und Kegeln aufgebaute Teile einen bedeutenden Anteil des in der industriellen Produktion vorkommenden Teilespektrums darstellen, vor allem, wenn noch geringe Asymmetrien wie Abflachungen zugelassen werden.

Im Widerspruch dazu stehen immer noch praktisch keine Systeme zur Verfügung, die eine automatisierte Entnahme der ungeordneten Teile aus dem Transportbehälter zulassen. Nach der Analyse der dazu notwendigen einzelnen Schritte kann die anspruchsvolle Objektlageerkennung der Teile als die große Herausforderung identifiziert werden. Diese Objekterkennungsaufgabe wird bisher von individuell auf einzelne Teile zugeschnittenen Speziallösungen dominiert, die sich zudem fast alle im Forschungsstadium befinden. Die wichtigsten Hemmnisse, die einen Einsatz in der Praxis verhindern, sind die langen Erkennungszeiten, bei den ansichtsbasierten Verfahren der große Speicherbedarf für Datenbanken und die relativ geringe Genauigkeit der Objektlageerkennung, die noch geringe Zuverlässigkeit sowie die komplizierte Anpassung an neue Aufgabenstellungen. Es fehlt ein Verfahren, das sich leicht an unterschiedliche Objekte einer ganzen Bauteilkategorie, wie dies die rotationssymmetrischen Teile darstellen, anpassen lässt.

Objekterkennungsverfahren, die auf dichten 3-D-Daten arbeiten, haben entscheidende Vorteile gegenüber 2-D-Verfahren aufgrund der geringeren Abhängigkeit von unterschiedlichen Oberflächeneigenschaften der Objekte (Stotz, 2007a). Zudem stehen inzwischen genügend 3-D-Sensoren zur Verfügung, die den Anforderungen für die Objekterkennung im industriellen Umfeld genügen. Deshalb muss das neu zu entwickelnde Verfahren im 3-D-Raum arbeiten.

Die Analyse der Erkennungsverfahren für regelgeometrische Objekte führt weiter zum Erkenntnis, dass diese nicht für eine schnelle Objekterkennung zum anschließenden Greifen ausgelegt sind, da eine mögliche Greifbarkeit vor der Erkennung nicht berücksichtigt wird. Vielmehr wird oft eine ausschöpfende Suche nach Objekten in der gesamten Szene durchgeführt, etwa an regelmäßig über der Szene verteilten Startpunkten, die viel Rechenzeit benötigt. Stattdessen muss ein Verfahren entwickelt werden, bei dem nur noch in den Bereichen der Szene ein Objekt gesucht wird, die auch zum Greifen in Frage kommen.

Als logische Folge muss ein Vorverarbeitungsverfahren, das über eine reine Segmen-

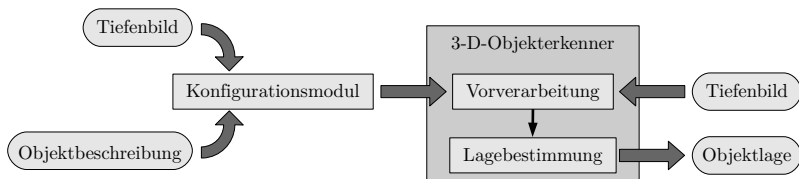


Abbildung 3.1.: Systemkonzept

tierung hinaus geht, entwickelt werden, das für eine anschließende Erkennung von regelgeometrischen Objekten schnell optimale Kandidatenbereiche liefert (Stotz, 2007b). Dieses neu zu entwickelnde Vorverarbeitungsverfahren muss sich adaptiv an die Aufgabenstellung, das heißt an die zu findende Teilgeometrie, anpassen. Schon die Analyse der verfügbaren Segmentierungsverfahren hat gezeigt, dass insbesondere deren Parametrierung eine große Herausforderung darstellt, die sich selbst für Experten oft schwierig gestaltet. Um ein Vorverarbeitungsverfahren für die Objekterkennung in die industrielle Anwendung zu bringen, muss dies jedoch ohne Expertenwissen konfigurierbar sein. Interessante Ansätze zur automatischen Parametrierung von Bildverarbeitungsverfahren bieten die analysierten heuristischen Optimierungsverfahren, siehe Abschnitt 2.6.

Die Analyse der verfügbaren Verfahren zur Erkennung und Lagebestimmung von regelgeometrischen Elementen hat in Abschnitt 2.4 ergeben, dass hierzu viele unterschiedliche Verfahren existieren. Das am besten geeignete kann erst nach Berücksichtigung der im Folgenden aufgestellten Anforderungen ausgewählt werden. Zur Lagebestimmung von kombinierten Elementen existieren nur wenige Ansätze bei den Einpassverfahren, die ausschließlich für die Messtechnik und Flächenrückführung entwickelt wurden.

3.2. Konsequenzen für Systemkonzept

Nach den Folgerungen aus der Analyse in 3.1 ergibt sich, dass für ein Objektlageerkennungssystem für rotationssymmetrische Teile die in Abbildung 3.1 dargestellten Teilsysteme und Funktionsmodule notwendig sind. Auf dieser Basis lassen sich die Anforderungen an das Gesamtsystem und seine Teilsysteme definieren. Für die praktische Anwendbarkeit ergeben sich folgende Anforderungen.

3.3. Anforderungen an das Gesamtsystem

Die für das Gesamtsystem des 3-D-Objektkenners relevanten Anforderungen werden aus den Analyseergebnissen abgeleitet.

Keine Einschränkung der Objektlage Das Objekterkennungsverfahren muss für ungeordnete Objekte, die als Schüttgut vorliegen, geeignet sein.

Schnelle Erkennung Um ein breites Anwendungsfeld abzudecken, muss eine gegenüber anderen Zuführmethoden wie z. B. Wendelförderern, die bis zu 120 Teile

pro Minute fördern, eine konkurrenzfähige Taktzeit erreicht werden. In Anbetracht der höheren Flexibilität und weiteren Vorteilen wie Lärmvermeidung von Zuführsystem auf Basis von Objekterkennung in Kombination mit einem Handhabungsgerät, können Erkennungszeiten von ca. 1 Sekunde akzeptiert werden.

Hohe Positionsgenauigkeit der Erkennung Eine gute Positionsgenauigkeit der erkannten Objektlage ist für viele Greifanwendungen notwendig. Dies ermöglicht es auch, zur Kollisionsvermeidung einen minimalen Freiraum um das zu greifende Objekt einzuplanen. Deshalb soll der Fehler der Objekterkennung den mittleren Fehler der Messdaten nicht überschreiten.

Leichte Anpassung an neue Teilegeometrien Um die Flexibilität durch das Fehlen von speziellen auf die Teile zugeschnittenen Schikanen nutzen zu können, muss eine leichte Adaptierbarkeit des Systems an wechselnde Teilegeometrien ohne Expertenwissen möglich sein.

Keine Einschränkung der Objektgröße Das Erkennungssystem darf die Dimensionen der zu erkennenden Objekte nicht einschränken, damit das in der Praxis vorkommende Teilespektrum abgedeckt ist. Dies bedingt auch eine Unabhängigkeit von sensortypischen Eigenschaften wie Auflösung und Messfeldgröße.

Unempfindlich gegenüber Variationen in der Objektgeometrie Bei Gussteilen und Schmiedeteilen können innerhalb derselben Teileart in bestimmten Bereichen z. B. durch Grate Variationen in der Geometrie auftreten. Für einen stabilen industriellen Einsatz ist dies unabdingbar.

3.4. Anforderungen an die Teilsysteme

Zusätzlich zu den Anforderungen an das Gesamtsystem sind auch die in Abbildung 3.1 auf Grundlage der Analyse definierten Teilsysteme genauer zu spezifizieren.

3.4.1. Anforderungen an das Vorverarbeitungsverfahren und seine Konfiguration

Das Vorverarbeitungsverfahren soll eine gezielte Lageerkennung von zum Greifen günstigen Objekten ermöglichen. Die im Folgenden aufgestellten Anforderungen ergeben sich zum Teil aus denen des Gesamtsystems, da die Vorverarbeitung einen entscheidenden Beitrag zur Zielerreichung für das Gesamtsystem beitragen wird.

Sehr hohe Geschwindigkeit Da der Segmentierungsschritt nur als Vorverarbeitung dient und die eigentliche Lagebestimmung in allen Fällen rechenzeitaufwändig ist, dürfen für die Segmentierung nur Sekundenbruchteile notwendig sein.

Optimal an Bauteileigenschaften angepasster Algorithmus Der Segmentierungsalgorithmus muss optimal an die Bauteilgeometrie und die Oberflächeneigenschaften des zu findenden Objekts angepasst sein. Nur so können im Tiefenbild Regionen von Kandidaten greifbarer Objekte gefunden werden. Dazu ist es notwendig,

dass der Algorithmus seine Verarbeitungsstrategie an die Aufgabenstellung anpassen kann.

Selbstadaptiver Algorithmus Dem Anwender des Gesamtsystems, dessen zentraler funktionaler Teil in dem Vorverarbeitungsschritt besteht, kann nicht zugemutet werden, Algorithmen zur Tiefenbildverarbeitung zu modifizieren und zu parametrieren. Deshalb muss dies der Algorithmus selbst bewerkstelligen.

3.4.2. Anforderungen an die Lagebestimmung für regelgeometrische Elemente

Ein zentrales Modul stellt die Lagebestimmung dar, das aus den vom Vorverarbeitungssystem zur Verfügung gestellten Daten unter Verwendung der regelgeometrischen Elemente die Objektlage bestimmt.

Hohe Positionsgenauigkeit Diese Anforderung wird vom Gesamtverfahren vorgegeben.

Robust gegenüber ungünstiger Datenqualität Das Verfahren sollte durch weniger gute Messdaten, z. B. mit Datenlücken oder stärkerem Rauschen, nicht in seiner Leistungsfähigkeit eingeschränkt werden.

Schnelles Verfahren Da die Lagebestimmung voraussichtlich einen großen Anteil an Rechenzeit des Gesamtverfahrens einnimmt, muss hier besonders auf ein effizientes Verfahren geachtet werden. Aus der Anforderung an das Gesamtverfahren folgt eine Zeit von unter 1 Sekunde.

Für kombinierte Objekte geeignet Da die aus regelgeometrischen Elementen aufgebauten rotationssymmetrischen Objekte eine wichtige Rolle spielen, müssen die Erkennungsverfahren diese kombinierten Elemente auch bestimmen können.

3.5. Anforderungen an die Verifikation

Für den Praxistest müssen die entwickelten Verfahren systematisch getestet werden. Ein Test unter realitätsnahen Bedingungen soll mit Hilfe eines Demonstrators durchgeführt werden. In diesem sollen ungeordnete Teile mit Hilfe eines Handhabungsgerätes gegriffen werden. Nur so sind sinnvolle und belastbare Versuchsergebnisse zu gewinnen. Die für die Versuche verwendeten Teile müssen von ihren Eigenschaften, beispielsweise hinsichtlich ihrer Oberfläche, so beschaffen sein, dass eine Übertragbarkeit der Ergebnisse in die industrielle Produktion möglich ist.

Kapitel 4.

Konzeption

Um die Objekterkennungsaufgabe gemäß den Vorgaben aus der Anforderungsanalyse erfolgreich lösen zu können, müssen neue Methoden und Verfahren konzipiert werden, die die Basis für die nachfolgenden Entwicklungen in Form von Softwaremodulen bilden.

4.1. Entwurf des Gesamtverfahrens zur Objekterkennung auf Basis regelgeometrischer Elemente

Als Folgerung aus der Ausgangssituation wurde in 3.1 festgestellt, dass zur Geschwindigkeitssteigerung der Objekterkennung mit Hilfe regelgeometrischer Elemente eine Vorverarbeitung notwendig ist. Aus der 2-D-Bildverarbeitung sind sehr schnelle Verfahren zur Bildsegmentierung bekannt, wie beispielsweise das Bereichswachstum (MVTec, 2009). Ebenso können auf die segmentierten Bereiche weitere sehr schnelle Operatoren und Verfahren zur Auswertung angewandt werden, wenn die Verarbeitung weiter im Tiefenbild erfolgt. Deshalb soll diese günstige Datenstruktur möglichst lange beibehalten werden und erst wenn unbedingt notwendig, soll auf die 3-D-Punktwolkenverarbeitung umgestiegen werden.

Auf dieser Basis wird das folgende Verfahren vorgeschlagen, dessen Ablauf in der Abbildung 4.1 als Grobübersicht dargestellt wird (Stotz u. Verl, 2008). Dabei werden die vom Tiefensensor gelieferten Daten auf zwei unterschiedliche Arten interpretiert, siehe 2.1.2. In den Schritten eins bis drei werden die Daten als Tiefenbilder mit Werten auf einem festen Raster betrachtet. Nach einem Reinterpretationsschritt vier werden in Schritt fünf die Tiefendaten dann als Punktwolke betrachtet (Stotz u. a., 2008b). Die Schritte eins bis drei werden im Folgenden als Vorverarbeitungsstrategie bezeichnet. Die Beschreibung der einzelnen Schritte des Verfahrens erfolgt aufgrund der besseren Verständlichkeit zuerst am Beispiel der Erkennung rein zylindrischer Objekte. Daraus werden dann Lösungsansätze für rotationssymmetrische, aus mehreren regelgeometrischen Elementen aufgebaute Objekte entwickelt.

4.1.1. Verfahren für zylindrische Objekte

Für die Erkennung von rein zylindrischen Objekten besteht das Verfahren aus folgenden Schritten:

Schritt 1 Je nach Datenqualität muss eine Bildverbesserung durchgeführt werden. Dazu können Glättungsverfahren zum Einsatz kommen, z. B. Mittelwert- oder Medianfilter.

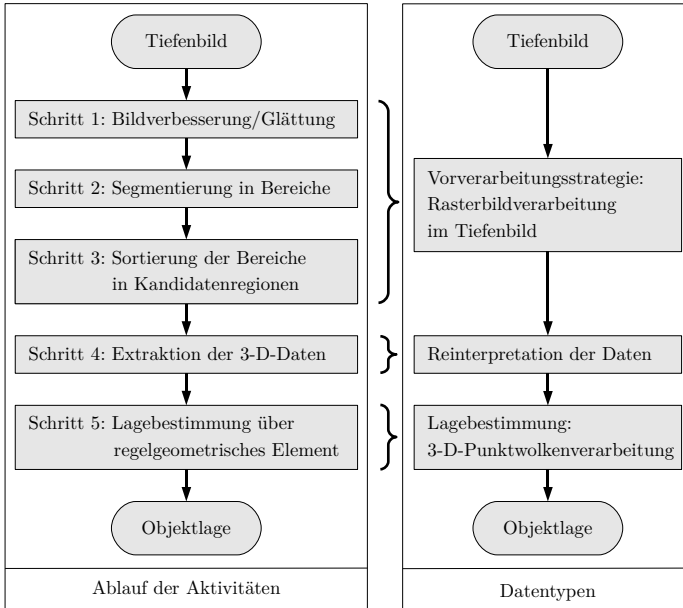


Abbildung 4.1.: Ablauf der einzelnen Schritte des Objekterkennungsverfahrens.

Schritt 2 Das Tiefenbild wird in einzelne Bereiche segmentiert. Ein Bereichswachstumsverfahren bietet sich aufgrund seiner hohen Geschwindigkeit an.

Schritt 3 Die resultierenden Bereiche besitzen unterschiedliche Eigenschaften wie z. B. Flächeninhalt, Länge, Breite und Verhältnis von Länge zu Breite. Anhand dieser Eigenschaften werden die Bereiche herausgefiltert, die die gesuchten Objekte möglichst vollständig beschreiben. Zusätzlich werden die sich hieraus ergebenden Bereiche so sortiert, dass nur solche von möglichst frei liegenden Objekten als Kandidatenbereiche für die Lagebestimmung verwendet werden.

Schritt 4 Zu diesen im Tiefenbild gefundenen Kandidatenbereichen wird eine Reinterpretation der Daten durchgeführt, indem die korrespondierenden Bereiche aus den Matrizen für die x - und y -Werte extrahiert werden. Die erhaltenen 3-D-Teilpunktwolken dienen als Startbereiche für die nachfolgende Lagebestimmung.

Schritt 5 Zur Objektlageerkennung der wird in den Teilpunktwolken ein regelgeometrisches Element in Form eines Zylinder bestimmt. Damit ist die Lage des Objekts bekannt.

4.1.2. Alternative Verfahren zur Erkennung rotationssymmetrischer Objekte

Zur Lagestimmung von rotationssymmetrischen Objekten, die aus mehreren regelgeometrischen Elementen aufgebaut sind, werden folgende alternative Verfahren vorgeschlagen, die eine Unterteilung von Schritt 3 bedeuten. Dazu werden zuerst alternative Verfahren für die Suche nach einem ersten regelgeometrischen Element entworfen, die als Schritt 3.1 bezeichnet werden. Als nächstes werden Alternativen zur Suche nach den weiteren Elementen verglichen, was Schritt 3.2 genannt wird.

Varianten zur Suche der Kandidatenbereiche

Beim Verfahren zur Erkennung der rein zylindrischen Objekte wurden die segmentierten Bereiche in Schritt 3 nach deren Eigenschaften sortiert. Im Gegensatz dazu müssen für die rotationssymmetrischen Objekte die Eigenschaften der einzelnen Elemente herangezogen werden. Die Auswahlkriterien für eine gute Greifbarkeit gelten weiterhin. Es sind folgende unterschiedliche Herangehensweisen in Schritt 3.1 möglich:

Schritt 3.1 – Variante 1 Von allen einzelnen auf der Achse vorkommenden regelgeometrischen Elementen werden Eigenschaften ermittelt, die eine Zuordnung der Bereiche zu den einzelnen Elementen ermöglicht. Mithilfe dieser Eigenschaften werden die Bereiche in einzelne Klassen eingeteilt, die jeweils ein regelgeometrisches Element des Gesamtobjekts beschreiben. Den einzelnen regelgeometrischen Elementen werden vor dem Start des Objekterkennungsalgorithmus unterschiedliche Prioritäten für die als erstes zu erkennenden Elemente zugeordnet. Die höchste Priorität kann z. B. das Element erhalten, welches bei den Objekten mit der größten Wahrscheinlichkeit vollständig sichtbar ist. Aus allen Bereichen, die in der Klasse des Elements mit der höchsten Priorität enthalten sind, wird genau ein Bereich als Kandidatenbereich ausgewählt. Wird kein geeigneter Bereich gefunden, wird in den Klassen mit niedrigerer Priorität nach Kandidatenbereichen weitergesucht.

Schritt 3.1 – Variante 2 Die Bereiche werden ähnlich zum Verfahren für Zylinder nur nach den Eigenschaften eines einzelnen, dominierenden Elements sortiert. Dominierend soll hierbei bedeuten, dass der größte Teil des Objektes aus einem Element besteht.

Schritt 3.1 – Variante 3 Als Mischform aus Variante 1 und 2 sollen die Bereiche so ausgewählt werden, dass dadurch ein möglichst gut erkennbarer Teil des Objekts, der auch mehrere regelgeometrische Elemente umfassen kann, dargestellt wird. Dies könnte notwendig sein, wenn sich die einzelnen Elemente nicht trennen lassen. Voraussetzung ist, dass das Erkennungsverfahren für die regelgeometrischen Elemente solche nicht vollständig zerlegte Kandidatenregionen verarbeiten kann.

Alternative Suchstrategien für weitere Elemente und sich ergebende Algorithmen zur Objektlagebestimmung

Anhand von Vorwissen in Form von Modelldaten ist bekannt, in welcher Lage zueinander sich die einzelnen regelgeometrischen Elemente am Objekt befinden. Die Suche nach weiteren Elementen in Schritt 3.2 muss je nach Bedarf iterativ wiederholt werden.

Schritt 3.2 – Variante 1 Ausgehend von dem schon eingepassten Element kann gezielt nach einem Startbereich für das nächste zu findende Element gesucht werden. Wenn in Schritt 3.1 schon eine Klasseneinteilung der Bereiche vorgenommen wurde, ist nur noch nach Elementen in der entsprechenden Klasse an den durch die vorgegebene Lage der Einzelemente bestimmten Orten zu suchen. Für die Suche wird von dem zu findenden Element die Bounding Box gebildet. Über die Projektion der Bounding Box in das Tiefenbild kann dann ausgehend von dem bekannten Element der entsprechende Kandidatenbereich für das nächste Element gefunden werden. Damit ergibt sich folgender Algorithmus 4.1.

Algorithmus 4.1: BestimmeObjektlage

input : Tiefenbild
output : Objektlage
Glätte Tiefenbild;
Segmentiere Tiefenbild in Bereiche;
Sortiere Bereiche in Klassen;
Extrahiere 3-D-Daten aus Klasse für erstes Element;
Bestimme erstes regelgeometrisches Element;
repeat
 Suche ausgehend von bekanntem Element in entsprechender Klasse
 benachbarten Bereich;
 Extrahiere zugehörige 3-D-Daten ;
 Bestimme weiteres regelgeometrisches Element;
until *Objektlage ist festgelegt*;

Schritt 3.2 – Variante 2 In der Umgebung des eingepassten Elements, die aus der Projektion der maximalen Bounding-Box des gesuchten Objekts gebildet wird, werden alle Bereiche aus den anderen Klassen als der des zuerst eingepassten Elements ausgewählt. Anschließend wird in jede zu den Bereichen gehörende 3-D-Teilpunktvolke das passende regelgeometrische Element eingepasst. Nachfolgend wird die Lage der einzelnen Elemente zu dem ersten Element mit der Lage der Elemente aus dem Modell verglichen. Die in Frage kommenden Elemente werden für die Lagebestimmung des Objekts verwendet. Dies lässt sich in folgendem Algorithmus 4.2 formulieren.

Schritt 3.2 – Variante 3 Aus allen 3-D-Punkten, die sich in der Bounding Box des gesamten Objekts befinden, wird eine Teilpunktvolke erzeugt. In dieser wird versucht,

Algorithmus 4.2: BestimmeObjektlage

input : Tiefenbild
output : Objektlage
 Glätte Tiefenbild;
 Segmentiere Tiefenbild in Bereiche;
 Sortiere Bereiche in Klassen;
 Extrahiere 3-D-Daten aus Klasse für erstes Element;
 Bestimme erstes regelgeometrisches Element;
 Bilde Bounding Box des gesamten Objekts;
while \exists *Bereiche in Bounding Box* **do**
 | Extrahiere 3-D-Daten von Bereich;
 | Bestimme regelgeometrisches Element von Bereich;
 | Fülle Element in Liste;
repeat
 | Vergleiche Elementlage mit Modell und bekannten Elementen;
until *Objektlage ist festgelegt* \vee \nexists *Element in Liste*;

die zur Festlegung der Objektlage notwendigen Elemente zu finden, indem an den von den Modelldaten definierten Stellen gesucht wird. In Algorithmus 4.3 ist dieser Ansatz dargestellt.

Algorithmus 4.3: BestimmeObjektlage

input : Tiefenbild
output : Objektlage
 Glätte Tiefenbild;
 Segmentiere Tiefenbild in Bereiche;
 Sortiere Bereiche nach dominierendem Element;
 Extrahiere 3-D-Daten für dominierendes Element;
 Bestimme dominierendes regelgeometrisches Element;
 Bilde Bounding Box des gesamten Objekts;
 Extrahiere alle 3-D-Daten aus Bounding Box;
repeat
 | Suche Start für regelgeometrisches Element aus Modellinformation;
 | Bestimme regelgeometrisches Element in 3-D-Daten;
until *Objektlage ist festgelegt*;

4.1.3. Vorversuche zur Entscheidung/Begründung

Da die Gebrauchstauglichkeit der Algorithmen vermutlich stark von den Eigenschaften der realen Sensordaten abhängig ist, kann auf Basis theoretischer Überlegungen keine Entscheidung für einen der Algorithmen 4.1 bis 4.3 getroffen werden. Deshalb sind



Abbildung 4.2.: Für die Vorversuche sowie im weiteren Verlauf für Versuche verwendetes Schmiedeteil.

Vorversuche durchzuführen, bei den die Brauchbarkeit einzelner entscheidender Schritte in den Algorithmen mit realen Daten untersucht wird.

Hierzu wurden mit einem Lichtschnittsensor von Szenen mit industriell hergestellten Teilen Tiefenbilder erzeugt. Auf diese wurden verschiedene Bildverarbeitungsoperatoren angewandt. Für die Segmentierung hat sich das Bereichswachstum als vielversprechend herausgestellt. Ein ausgewähltes Beispiel, bei dem Versuche mit Schmiedeteilen aus Abbildung 4.2 durchgeführt wurden, illustriert die Ergebnisse.

Ein Ziel der Versuche war, ob die beiden im Teil vorhandenen Zylinder mit dem Bereichswachstumsverfahren in zwei getrennte Bereiche segmentiert werden können. Dazu wurden zwei Teile mit entgegengesetzter Orientierung aufgenommen. Die Sensoranordnung aus Kamera und Laserlinie war dabei wie in Abbildung 2.1 und die Objekte wurden in der Richtung wie in Abbildung 4.3 und Abbildung 4.4 erfasst. Damit ergeben sich an den beiden Teilen unterschiedliche Abschattungssituationen. Es ist zu erkennen, dass sich abhängig von der Orientierung das eine Teil in zwei Bereiche segmentieren lässt, das andere jedoch nicht. Es konnten durch Probieren keine Parameter gefunden werden, bei dem die Segmentierung beide Teile erfolgreich in zwei Bereiche trennen kann. Sobald der Wert groß genug ist, um überhaupt brauchbare Ergebnisse zu erhalten, wird das sich im Bild unten befindende Teil als ein Segment dargestellt.

Als Zusammenfassung der Versuche kann festgestellt werden, dass die geeigneten Parameter für die Segmentierung und Sortierung der Bereiche, insbesondere beim Bereichswachstumsverfahren, schwierig zu finden sind. Zudem ist es in manchen Fällen unmöglich, alle einzelnen regelgeometrischen Elemente in einzelne Bereiche zu trennen.

4.1.4. Bewertung der Verfahren und Entscheidung

Die Vorversuche haben gezeigt, dass es schon nicht bei allen dort verwendeten Objekten möglich ist, die von der Segmentierung erzeugten Bereiche in einzelne Klassen einzuteilen, die genau einem Element zugeordnet werden können. Zudem konnten zum Teil nicht einmal die Objekte in Bereiche für einzelne regelgeometrische Elemente segmentiert werden, sondern die Bereiche enthielten Daten von mehr als einem Element. Hier ist das Verfahren nach Schritt 3.1 – Variante 3 im Vorteil, da keine vollständige Trennung gefordert wird. Dies spricht gegen ein Vorgehen nach Schritt 3.1 – Variante 1, das in 4.1 und 4.2 verwendet wird. Zudem ist durch die Einsortierung in unterschiedliche Klassen ein größerer Rechenaufwand zu erwarten. Auch bei Schritt 3.1 – Variante 2 kommen die Nachteile der mangelnden Trennbarkeit in einzelne regelgeometrische Elemente zum Tragen. Deshalb wird ein Vorgehen nach Schritt 3.1 – Variante 3 als

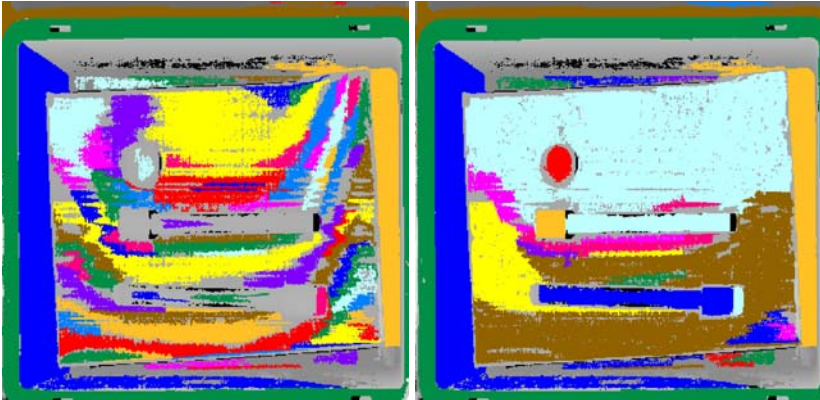


Abbildung 4.3.: Bereichswachstum mit dem Wert 0,45 des für die Segmentierung verantwortlichen Parameters.

Abbildung 4.4.: Bereichswachstum mit dem Wert 0,475 des für die Segmentierung verantwortlichen Parameters.

Grundansatz ausgewählt.

Dies hat auch Auswirkungen auf die Auswahl geeigneter Algorithmen zur Suche nach weiteren Elementen. Algorithmus 4.1 wird für der effizienteste gehalten, da die Suche möglichst lange im Tiefenbild durchgeführt wird. Zudem werden hier weniger Bestimmungen regelgeometrischer Elemente als in Algorithmus 4.2 notwendig sein, die am meisten Rechenleistung kosten. Außerdem werden zu viele Elemente geliefert, die in einem nachgelagerten Sortierungsschritt zugeordnet werden müssen. Der Nachteil von Algorithmus 4.2 ist, dass hierbei zu viele Operationen im 3-D anfallen und gegenüber der Suche nach weiteren Bereichen im Tiefenbild keine Vorteile zu erkennen sind. Auch in Algorithmus 4.3 ist ein großer Aufwand für die Bestimmung aller Elemente notwendig.

Nach diesen Erkenntnissen kann folgender Algorithmus 4.4, der aus Schritt 3.1 – Variante 3 und Ideen aus Algorithmus 4.1 und Algorithmus 4.3 besteht, als das zu verwendende Verfahren zur Objekterkennung festgelegt werden. Um diesen Algorithmus einsetzen zu können, müssen Forderungen an die Bestimmung regelgeometrischer Elemente und an die Vorverarbeitung aufgestellt werden. Dies sind:

- Das Bestimmungsverfahren für regelgeometrische Elemente muss in Bereichen, die nicht nur ein einzelnes regelgeometrisches Element enthalten, funktionsfähig sein.
- Die Bestimmung eines kombinierten, aus mehreren einzelnen regelgeometrischen aufgebauten kombinierten Elements in einem solchen Bereich kann zu einer Geschwindigkeitssteigerung des Gesamtverfahrens beitragen und ist deshalb notwendig.

Algorithmus 4.4: BestimmeObjektlage

input : Tiefenbild
output : Objektlage
Glätte Tiefenbild;
Segmentiere Tiefenbild in Bereiche;
Sortiere Bereiche nach am sichersten zu findenden Bereich von einem Element oder mehreren Elementen;
Extrahiere zugehörige 3-D-Daten;
Bestimme regelgeometrisches Element oder kombiniertes Element;
repeat
 Suche ausgehend von bekanntem (kombiniertem) Element anhand von Modellinformation im Tiefenbild benachbarte Bereiche;
 Extrahiere zugehörige 3-D-Daten ;
 Bestimme weiteres regelgeometrisches Element oder kombiniertes Element;
until *Objektlage ist festgelegt*;

- Die Vorversuche haben in Bezug auf die Segmentierung den Stand der Technik bestätigt, in dem die Parameterfindung als schwierig beschrieben wird.
- Zudem muss hier bei unterschiedlichen Teilelementen des Gesamtobjekts bei der Vorverarbeitung nach unterschiedlichen Kriterien sortiert werden, was über eine einfache Parameteroptimierung weit hinausgeht. Deshalb muss eine adaptive Vorverarbeitungsstrategie entwickelt werden.

4.2. Entwurf einer selbstadaptiven Vorverarbeitungsstrategie für Tiefenbilder als Vorverarbeitung zur Objekterkennung

Nach den Anforderungen muss die Vorverarbeitungsstrategie sich selbst an die zu erkennenden Objekte anpassen. Die Analyse hat gezeigt, dass der Einsatz von evolutionären Algorithmen ein interessanter Ansatz ist, ohne Benutzerinteraktion ein Bildverarbeitungsverfahren zu erhalten, das an eine spezielle Problemstellung angepasst ist.

Nach den Vorversuchen in 4.1.3 wurde klar, dass für die Vorverarbeitungsstrategie vielfältige Bildverarbeitungsoperatoren eingesetzt werden müssen, die sich nicht auf elementare Operatoren wie Glättung oder Kantenfilterung beschränken und die von reellwertigen Parametern entscheidend abhängen. Insbesondere bei der Sortierung der Bereiche sind spezielle Operatoren notwendig. Bei den analysierten evolutionären Verfahren wird jedoch einerseits versucht, aus elementaren Operatoren mithilfe genetischer Programmierung ein Bildverarbeitungsverfahren zu erstellen, andererseits werden mithilfe evolutionärer Algorithmen lediglich Parameter vorhandener Verfahren optimiert. Also lassen sich die bekannten Vorgehensweisen so nicht auf die Aufgabenstellung übertragen. Vielmehr muss erst ein Verfahren entwickelt werden, das sowohl eine an das Problem angepasste Kombination von Operatoren findet als auch diese mit den entsprechend angepassten Parametern verwendet.

Bewertungskriterium	Verfahren			
	Genetische Algorithmen	Genetische Programmierung	Evolutionäre Algorithmen	Evolutiosstrategien
Reellwertige Parameter	-	-	++	++
Automatische Algorithmenerstellung	-	++	-	-
Zeichenketten als Parameter	+	-	-	+

Legende: sehr gut geeignet: ++; geeignet: +; weniger geeignet: -; ungeeignet: -

Tabelle 4.1.: Bewertung von evolutionären Algorithmen auf ihre Eignung als Optimierungsverfahren für die Vorverarbeitungsstrategie

Aus Tabelle 4.1 ergibt sich, dass die dargestellten evolutionären Algorithmen in ihrer Urform nicht für die Lösung der Problemstellung ausreichend sind. Es ist also eine neuartiger evolutionärer Bildverarbeitungsalgorithmus zu entwickeln, der in der Art genetischer Programmierung neue Programmabläufe hervorbringt, die aus nicht elementaren Operatoren mit beliebigen Parametern aufgebaut sind. Dies stellt eine wissenschaftlich interessante Fragestellung dar.

Der Einsatz evolutionärer Algorithmen verlangt immer nach einer Bewertung der Fitness der Individuen. Im Fall einer Vorverarbeitungsstrategie für die Objekterkennung ist es wünschenswert, die Fitness der Vorverarbeitung anhand des Erfolgs der Objekterkennung zu bewerten. Hierzu sind weitere Entwicklungen notwendig, da hierbei die Bewertung der Fitness für ein 2-D-Tiefenbildverfahren anhand des Ergebnisses eines 3-D-Verfahrens, nämlich der Objekterkennung, erfolgen soll. Ein derartiger Ansatz ist bisher nicht bekannt, bei dem die Fitness eines 2-D-Bildverarbeitungsverfahrens mit Ergebnissen im 3-D-Raum bewertet werden.

Für die Bewertung der Fitness sind Referenzbilder notwendig. Diese sollen aus zwei unterschiedlichen Quellen stammen.

- Durch Benutzerinteraktion wird anhand von realen Sensordaten eine Vorgabe über die Objektlage und damit auch die Segmentierung zur Verfügung gestellt.
- Die Tiefenbilder sollen aus der Modellbeschreibung synthetisch im Rechner erzeugt werden.

Für die in dieser Arbeit zur Anwendung kommenden Bildverarbeitungsoperatoren soll eine Bibliothek verwendet werden, um leicht einen großen Fundus verschiedener komplexer Operatoren zur Verfügung zu haben. Hierzu wird die Bildverarbeitungsbibliothek HALCON (HALCON 8.0) ausgewählt, die auch für Bilder im Datenformat `float`, also der Gleitpunktdarstellung wie sie bei Tiefenbildern Verwendung findet, einsetzbar ist. Die Operatoren verfügen über reellwertige, ganzzahlige und durch Zeichenketten beschriebene Parameter.

4.3. Alternative Verfahren zur Lagebestimmung

Die im Stand der Technik unter 2.2.2 beschriebenen Verfahren zur Objekterkennung sind grundsätzlich auch zur Lagebestimmung von rotationssymmetrischen Objekten geeignet. Die dort vorgestellten Verfahren besitzen in Bezug auf ihre Industrietauglichkeit jedoch deutliche Defizite vor allem in Hinblick auf die erreichbare Erkennungszeit und Zuverlässigkeit. Zudem würde bei der Nutzung dieser Verfahren die Geometrie der zu findenden Objekte komplett außer acht gelassen. Eine problemangepasste Vorgehensweise bei der Lagebestimmung verspricht dagegen klare Vorteile. Deshalb sollen im Weiteren lediglich Verfahren zur Lagebestimmung von regelgeometrischen Objekten betrachtet werden, die in 2.4 analysiert wurden.

Die Verfahren zur Besteinpassung regelgeometrischer Elemente erreichen eine sehr gute Genauigkeit der Lagebestimmung, wenn sie eine geeignete Ausreißerelimination beinhalten. Dadurch werden sie auch unempfindlich gegenüber Rauschen in den Messdaten, was zu einer hohen Verlässlichkeit beiträgt. Die analytischen Optimierungsverfahren sorgen dafür, dass in endlichen Schritten eine Lösung gefunden wird. Damit lässt sich die Laufzeit des Algorithmus gut abschätzen.

Allein auf der Basis der Gauß-Abbildung ist keine Lagebestimmung möglich. Wie in 2.4.4 analysiert sind dazu immer noch weitere Verfahren wie die Hough-Transformation oder RANSAC-Verfahren notwendig, wodurch die Defizite dieser Verfahren auch hier zum tragen kommen. Soll eine hohe Genauigkeit erreicht werden, sind nach diesen Erkennungsschritten noch Einpassverfahren anzuwenden, was sich zusätzlich negativ auf die Gesamtlaufzeit auswirkt.

Verfahren unter Verwendung der Hough-Transformation sind sehr robust gegenüber Ausreißerpunkten und hohem Messrauschen. Doch der extreme Speicherbedarf ist als klarer Nachteil zu werten.

Die RANSAC-Verfahren sind extrem unempfindlich gegenüber Störpunkten in den Messdaten. Deren Hauptnachteil ist jedoch die einerseits hohe Laufzeit und andererseits die nicht-deterministische Suche, sodass die Laufzeit für eine verlässliche Lösung nicht zuverlässig abgeschätzt werden kann.

In Tabelle 4.2 sind die Bewertungen der einzelnen Verfahren anhand der Anforderungen zusammengefasst. Als Ergebnis kann festgestellt werden, dass sich die Einpassverfahren grundsätzlich als am besten geeignet erweisen. Besonders bei langen Objekten, die aus mehreren kurzen regelgeometrischen Elementen aufgebaut sind, ist anzunehmen, dass nur die Einpassung eines einzelnen Elements nicht die geforderte Präzision der Objektlageerkennung liefert. Abhilfe könnte die kombinierte Einpassung eines aus verschiedenen regelgeometrischen Elementen aufgebauten Gesamtobjekts bieten. Es kann nicht garantiert werden, dass die Vorverarbeitungsstrategie immer Bereiche liefert, die nur genau ein Element beschreiben. Auch deshalb muss die Lagebestimmung für Bereiche, die kombinierte Elemente beschreiben, geeignet sein.

Für die Einpassung kombinierter Elemente sind jedoch erst Ansätze aus der Messtechnik und Flächenrückführung bekannt, so dass hier noch Entwicklungsbedarf besteht. Alle diese Verfahren verwenden Nebenbedingungen, um die Beziehungen zwischen den einzelnen Elementen zu beschreiben. Dadurch werden Parameter festgelegt, die eigentlich gar nicht als Parameter auftreten sollten. So werden beispielsweise die

Bewertungskriterium	Verfahren				
	Besteinpas- sung	RANSAC	Kombination Gauß- Abbildung/ RANSAC	Hough- Transfor- mation	Kombination Gauß- Abbildung/ Hough
Hohe Positionsge- nauigkeit	++	+	-	-	-
Robust gegenüber Ausreißerpunkten	+	++	+	++	-
Schnelles Verfahren	++	--	+	-	-
Sparsam im Speicherbedarf	++	++	-	--	-

Legende: sehr gut geeignet: ++; geeignet: +; weniger geeignet: -; ungeeignet: -

Tabelle 4.2.: Bewertung der Lagebestimmungsverfahren

Positionen der Einzelemente durch Nebenbedingungen gekoppelt, im Widerspruch dazu, dass für das Gesamtobjekt nur genau eine Position existiert. In dem einzigen für die Anwendung von der Grundidee in Frage kommenden Algorithmus von (Sourlier, 1995) werden noch zusätzliche Parameter aufgrund der Verwendung parametrischer Flächen eingeführt.

Es gilt also, hier Alternativen zu suchen, die mit einer minimalen Anzahl von Parametern auskommt. Hierzu sind wissenschaftliche Untersuchungen nötig, die zur Entwicklung von zur Objekterkennung geeigneten Verfahren führen.

Kapitel 5.

Entwicklung einer selbstadaptiven Vorverarbeitungsstrategie für die Objekterkennung

Im Folgenden wird die Entwicklung der neuen selbstadaptiven Vorverarbeitungsstrategie nach 4.1 und aller seiner zum Einsatz notwendigen Teilsysteme beschrieben. In Abschnitt 4.2 wurde nach der Analyse der bekannten evolutionären Optimierungsverfahren festgestellt, dass diese nicht für das angestrebte Ziel der selbstadaptiven Erzeugung und Konfiguration einer Vorverarbeitungsstrategie geeignet sind. Im Mittelpunkt der Entwicklung stand deshalb ein neues, von der Grundidee an den evolutionären Algorithmen orientiertes evolutionäres Optimierungsverfahren.

5.1. Vorverarbeitungsstrategie im Tiefenbild

Die in Abbildung 4.1 und im für die Anwendung ausgewählten Algorithmus 4.4 im Tiefenbild durchgeführten Schritte der Vorverarbeitungsstrategie sind Operationen im Rasterbild. Hierbei handelt es sich um Bildverbesserungsverfahren wie z. B. Glättung, Segmentierungsverfahren wie beispielsweise das Bereichswachstum und um Sortierverfahren. Mit Hilfe der Sortierverfahren werden die Bereiche, die nach der Segmentierung entstanden sind, in einzelne Klassen eingeteilt. In den Klassen sollen sich nach Algorithmus 4.4 nur solche Bereiche befinden, die für die Einpassung erfolgversprechend sind. Daraus ergibt sich direkt das Kriterium für die Sortierung, nämlich dass die Bereiche eine erfolgreiche Einpassung ermöglichen. Diese einzelnen Verfahrensschritte stellen jeweils parametrisierbare Funktionen mit entsprechenden Parametern und Kriterien dar. Also muss die Vorverarbeitungsstrategie durch eine Menge von Funktionen und den zugehörigen Parametern beschrieben werden.

Das zu entwickelnde evolutionäre Bildverarbeitungsverfahren muss also aus diesen einzelnen Funktionen die Vorverarbeitungsstrategie aufbauen. Die einzelnen Funktionen können jeweils aus mehreren unterschiedlichen Bildverarbeitungsoperatoren aufgebaut sein.

5.1.1. Verwendete Bildverarbeitungsoperatoren

Die Bibliothek Halcon (HALCON 8.0) stellt die Bildverarbeitungsoperatoren zur Verfügung, aus den die Vorverarbeitungsstrategie aufgebaut wird. Hier werden einige der verwendeten Operatoren aufgeführt, um einen Eindruck über ihre Parameter zu gewinnen.

In Tabelle 5.1 sind Beispiele für Operatoren zur Bildverbesserung aufgeführt. Dabei handelt es sich um den bewährten Mittelwertfilter und einen nichtlinearen Filter, bei

Operatorname	Effekt	Parameter	Bedeutung	Typ	Bereich
median_image	Medianfilter	MaskType	Form der Maske	string	{circle, rectangle}
		Radius	Radius der Maske	integer	$[1, 101] \subset \mathbb{N}$
		Margin	Randverhalten	string	{mirrored, cyclic, continued}
rank_image	Nichtlineare Glättung	Mask	Maske	region	Maske beliebiger Form
		Rank	Rang	integer	$[1, 512] \subset \mathbb{U}$
		Margin	Randverhalten	string	{mirrored, cyclic, continued}

Tabelle 5.1.: Zwei Beispiele von Operatoren zur Bildverbesserung

Operatorname	Effekt	Parameter	Bedeutung	Typ	Bereich
regiongrowing	Bereichswachstum	Row	Zeilenabstand der verglichenen Pixel	integer	$[1, 99] \subset \mathbb{U}$
		Column	Spaltenabstand der verglichenen Pixel	integer	$[1, 99] \subset \mathbb{U}$
		Tolerance	Toleranz für Wachstum	real	$[0, 127] \subset \mathbb{R}$
		MinSize	Minimallgröße des entstandenen Bereichs	integer	$[1, 10000] \subset \mathbb{N}$

Tabelle 5.2.: Ein möglicher Operator zur Bildsegmentierung mit seinen Parametern

dem für jedes Pixel des Bildes das Histogramm aller in der Maske befindlicher Pixel errechnet wird und das neue Pixel den Wert des Histogramms an der Stelle des Rangs erhält.

Für die Segmentierung ist in 5.2 als Beispiel das Bereichswachstum angegeben. Hier werden so lange benachbarte Rechtecke der Größe **Row** und **Column** zu dem gegebenen Bereich hinzugefügt, wie die Differenz der Zentralpixel kleiner als die Toleranz bleibt. In Tabelle 5.3 wird schließlich ein Operator zur Aussortierung von Bereichen nach gewissen Kriterien vorgestellt. Von den verfügbaren Kriterien ist nur ein Ausschnitt aufgeführt, insgesamt sind 59 Kriterien verfügbar. Die vollständige Liste aller dem evolutionären Verfahren zur Auswahl zur Verfügung stehenden Kriterien ist im Anhang A aufgeführt.

Schon anhand dieser Beispiele verschiedener Operatoren wird deutlich, dass eine Kodierung der Individuen des evolutionären Optimierungsverfahrens ausschließlich in Binärform oder mit reellen Werten schwierig wäre.

Operatorname	Effekt	Parameter	Bedeutung	Typ	Bereich
<code>select_shape</code>	Auswahl von Bereichen nach bestimmten Kriterien	Features	Kriterium	string	{area, row, column, width, height, row1, column1, row2, column2, circularity, compactness, contlength, convexity, ... }
		Min	Minimalwert	real	$[0, 99999] \subset \mathbb{R}$
		Max	Maximalwert	real	$[0, 99999] \subset \mathbb{R}$

Tabelle 5.3.: Operator zum Aussortieren von Bereichen nach unterschiedlichen Kriterien.

5.2. Neues evolutionäres Optimierungsverfahren

Das neu entwickelte evolutionäre Optimierungsverfahren orientiert sich an den Merkmalen der bekannten evolutionären Algorithmen. Bei der Konzeption wurde festgestellt, dass viele zu optimierende Parameter reellwertig sind, deshalb ähnelt das neue Verfahren den Evolutionsstrategien am meisten. Auch die ganzzahligen Parameter und die Parameter mit Textbeschreibung können durch Mutation verändert werden. Die klassische Evolutionsstrategie ist zu erweitern, da die Anforderung besteht, auch den Programmablauf zu verändern. Die genetische Programmierung kann hier als Vorbild gesehen werden. Neben den dort oft erzeugten Baumstrukturen ist dort auch die Erzeugung und Optimierung linearer Programmabläufe bekannt. Da die Vorverarbeitungsstrategie einen linearen Ablauf hat, wird für die Grundstruktur der durch evolutionäre Algorithmen zu erzeugenden Programme eine lineare Anordnung der aus einzelnen Bildverarbeitungsoperatoren aufgebauten Funktionen verwendet. Auch diese Veränderung des Programmablaufs kann als eine Mutation modelliert werden. Aufgrund des zentralen Operators der Mutation wird das neue Verfahren im Folgenden auch wieder als Evolutionsstrategie bezeichnet.

5.2.1. Struktur der Evolutionsstrategie

Die eigentliche Evolutionsstrategie ist in einem eigenen Modul implementiert. Der Kern des entwickelten Ansatzes ist die Schaffung einer einheitlichen Schnittstelle zwischen der Evolutionsstrategie und den einzelnen Lösungskandidaten des Optimierungsproblems, um diese als Individuen eines evolutionären Algorithmus behandeln zu können. Die Lösungskandidaten sind gerade die zu findenden Vorverarbeitungsstrategien. In der Schnittstelle ist festgelegt, dass jeder Lösungskandidat Methoden, die für evolutionäre Algorithmen notwendig sind, zur Verfügung stellen muss, beispielsweise mit der er geklont werden kann, mit der er mutiert werden kann und eine Methode, die Auskunft über seine aktuell erreichte Güte geben kann. In Abbildung 5.1 ist dies als Klassendiagramm auf Basis der Unified Modeling Language (UML) veranschaulicht.

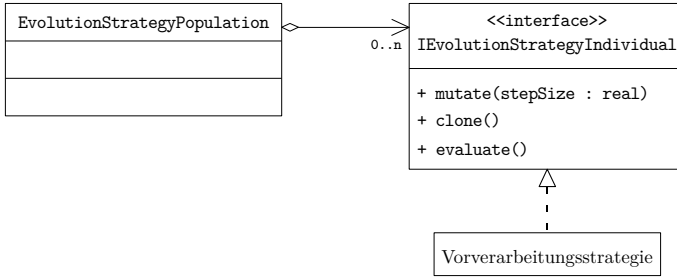


Abbildung 5.1.: Über die Schnittstelle wird die Komplexität der Individuen verborgen.

Der innere Aufbau eines Individuums kann so vollständig vor dem Optimierungsalgorithmus verborgen werden. Die Evolutionsstrategie wurde durch diese Abstraktionsstufen so gestaltet, dass sie als generisches Verfahren zur Optimierung von beliebigen Lösungskandidaten verwendet werden kann.

Dadurch ist es möglich, sich beim eigentlichen evolutionären Algorithmus von der Binärvektor- oder Zahlenvektordarstellung zu lösen. Damit kann das Optimierungsproblem in der Domäne seiner natürlichen Parameter gelöst werden. Dies ist gerade bei der Vielfältigkeit der Parameterstruktur der Bildverarbeitungsoperatoren wichtig.

Die Grobstruktur der konkreten objektorientierten Implementierung ist in Abbildung 5.2 dargestellt. Nach Vorgabe muss das Objekt **IEvolutionStrategyIndividual** die für die Evolution notwendigen Schnittstellen des Lösungskandidaten nach außen anbieten. Intern besteht der Lösungskandidat aus den Teilen Bildverbesserung, Segmentierung und Sortierung der Vorverarbeitungsstrategie, die wieder die Schnittstellen für die Evolution anbieten. Diese einzelnen Teilstrategien bestehen wiederum aus mehreren Operatoren, die die evolutionären Funktionalitäten erbringen. Die Mutation dieser Teilstrategien wurde so implementiert, dass einzelne Operatoren ausgetauscht, hinzugefügt oder entfernt werden. Auf diese Art wird also die Struktur der Parameter nach außen verborgen und nur der jeweilige Operator muss sich selbst mutieren können. Über eine weitere Kapselung wird die Halcon-Bibliothek vor der Vorverarbeitungsstrategie verborgen. Auf diese Art konnte ein sehr flexibler evolutionärer Optimierungsalgorithmus entwickelt werden.

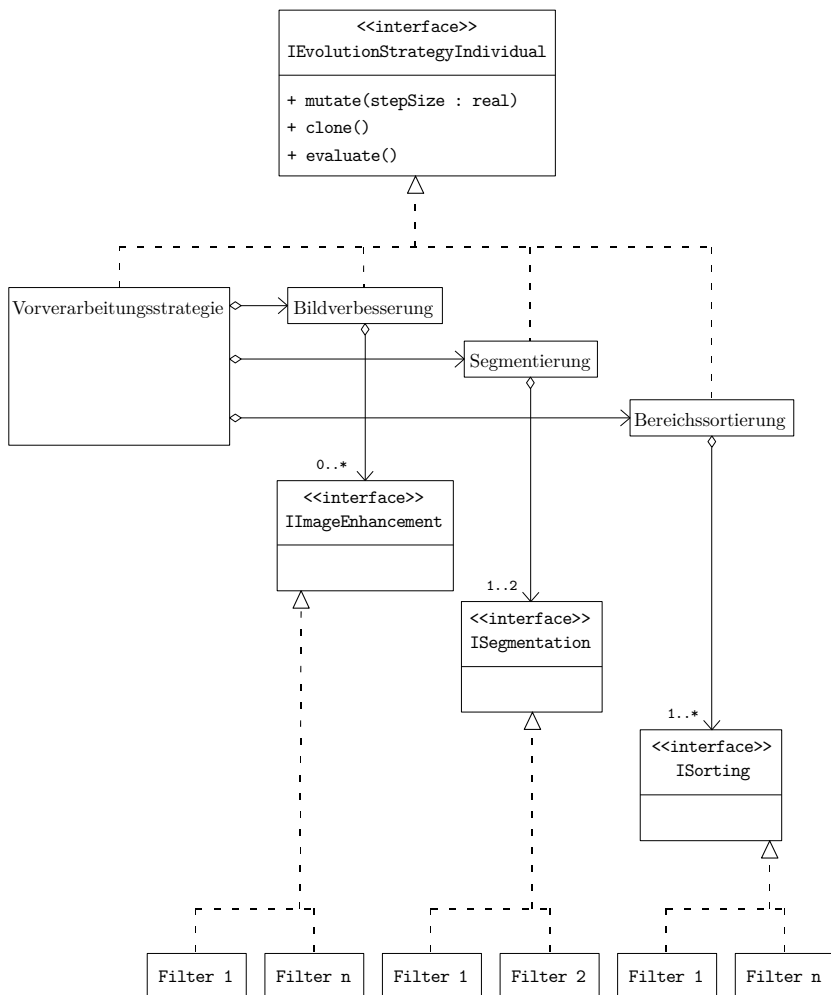


Abbildung 5.2.: Grobstruktur der objektorientierten Implementierung.

5.2.2. Konkrete Umsetzung der Evolutionsstrategie

Jede Evolutionsstrategie benötigt eine Population P von Individuen I_i . Wird die Selektion nur auf die λ Kinder der μ Eltern angewandt, handelt es sich um die Komma-Selektion oder eine (μ, λ) -Evolutionsstrategie. Zur Erzeugung der λ ($> \mu$) Kinder wird aus den μ Eltern λ -Mal ein zufälliges Individuum ausgewählt. Wenn die Selektion aus der Eltern- und der Kinder-Population stattfindet, wird dies Plus-Selektion genannt oder eine $(\mu + \lambda)$ -Evolutionsstrategie.

Da bei einer $(\mu + \lambda)$ -Evolutionsstrategie die Eltern immer in die Selektion für die nächste Generation mit einbezogen werden, können Eltern, die besser als die Kinder sind, oft über viele Generationen überleben. Dadurch wird ein monotoner Anstieg der Fitness erreicht. Handelt es sich bei dem bisherigen Optimum aber um ein lokales Extremum, so ist es schwierig, dieses wieder zu verlassen. Diese Probleme können durch die (μ, λ) -Evolutionsstrategie vermieden werden. Umgekehrt kann es dabei aber dazu kommen, dass das Optimum nur sehr langsam erreicht wird, da jetzt auch Rückschritte in der Fitness möglich sind.

Die eigentliche Optimierung mit dem evolutionären Ansatz wird in der entwickelten Klasse mit dem Namen `EvolutionStrategyPopulation` durchgeführt. Dabei werden im ersten Schritt durch Mutation Varianten der vorhandenen Individuen erzeugt, von den im zweiten Schritt die fittesten – also am besten für die Anwendung geeigneten – durch die Selektion ausgewählt werden.

Bei dem in dieser Arbeit implementierten Algorithmus wird für die Selektion wie bei den Evolutionsstrategien vorgegangen, indem deterministisch jeweils die besten Individuen ausgewählt werden. Dabei wurden sowohl der (μ, λ) als auch der $(\mu + \lambda)$ Ansatz realisiert, wobei die Werte für μ und λ frei gewählt werden können. Welcher Ansatz besser zur Lösung der Aufgabe geeignet ist, hängt von der Struktur der Lösungsmenge ab. Deshalb muss dies durch Versuche geklärt werden.

5.2.3. Realisierung der Mutation

Die Mutation ist bei den Evolutionsstrategien der entscheidende Vorgang bei der Suche nach dem globalen Optimum. Bei den klassischen Evolutionsstrategien mit reellwertigen Parametern wird ein Parameter mutiert, indem eine normalverteilte Zufallszahl $s_n \sim \mathcal{N}(0, \sigma)$ mit Erwartungswert 0 und Standardabweichung σ zu dem ursprünglichen Parameter addiert wird. Damit wird die Abbildung der biologischen Mutation erreicht, da auch dort kleine Veränderungen viel wahrscheinlicher sind, als große Veränderungen. Die großen Veränderungen sind jedoch notwendig, um alle Punkte des Suchraumes zu erreichen.

Die als Basis der Vorverarbeitungsstrategie verwendeten Bildverarbeitungsoperatoren besitzen, wie schon in 5.1.1 bemerkt, neben reellwertigen Parametern auch ganzzahlige, zum Teil auf ungerade Zahlen eingeschränkte Parameter und Parameter in Form einer Textbeschreibung. Auch für diese musste eine Möglichkeit zur Veränderung durch Mutation geschaffen werden. Damit ergeben sich die folgenden Methoden zur Mutation:

Reellwertige Parameter Die reellwertigen Parameter werden analog zu den bekannten

Evolutionstrategien über die Addition einer reellwertigen Zufallszahl mutiert.

Ganzzahlige Parameter Zur Mutation ganzzahliger Parameter wird zuerst eine normalverteilte reelle Zufallszahl mit entsprechendem σ erzeugt. Aus dieser wird dann die ganzzahlige Zufallszahl, die als Mutation zum Ursprungswert addiert wird, durch Rundung erzeugt. Sind nur ungerade Zahlen als Parameter zulässig, muss auf die nächste ungerade Zahl gerundet werden.

Parameter in Textform Auf der Menge der Parameter in Textform besteht keine Ordnungsrelation und es kann nicht zwischen großen und kleinen Änderungen unterschieden werden. Zudem bedeutet die Veränderung eines Parameters in Textform meist eine größere Änderung. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn bei der Sortierung der Bereiche durch diese Parameteränderung die Sortierung nach einem ganz anderen Kriterium erfolgt. Die Mutation kann also nicht durch Addition einer normalverteilten Zahl erfolgen. Deshalb wird in einem ersten Schritt über eine normalverteilte reelle Zufallszahl entschieden, ob der Parameter mutiert werden soll, wobei σ so gewählt wird, dass die Wahrscheinlichkeit für eine Veränderung klein ist. Wenn mutiert werden soll, dann wird mit einer gleichverteilten Wahrscheinlichkeit ein neuer Parameter aus der Liste der zulässigen Parameter ausgewählt.

Neben den einzelnen Parametern kann auch die gesamte Vorverarbeitungsstrategie mutiert werden. Dies kann im engeren Sinne einer Mutation geschehen, indem einzelne Operatoren in der Bildverbesserung, der Segmentierung oder der Sortierung durch andere Operatoren ausgetauscht werden. Da dies meist starke Auswirkungen auf die Ergebnisse bedingt, darf auch dies nur mit einer sehr geringen Wahrscheinlichkeit erfolgen. Auf ähnliche Art werden auch Operatoren entfernt oder hinzugefügt, ohne einen Austausch durchzuführen. Dies kann als eine Mutation im weiteren Sinn verstanden werden. Die führt zu noch tiefgreifenderen Veränderungen in der Vorverarbeitungsstrategie. Diese Mutation der gesamten Vorverarbeitungsstrategie mit der dadurch erreichten Veränderung des Programmablaufs ergibt die gewünschte Erzeugung von neuen Programmstrukturen ähnlich der genetischen Programmierung.

5.2.4. Realisierung einer Schrittweitensteuerung

Eng mit der Mutation verbunden ist die Schrittweitensteuerung. Die Konvergenzgeschwindigkeit wie auch die Fähigkeit, lokale Optima wieder zu verlassen, hängt direkt von der Schrittweite der Mutation, das heißt der Veränderungsrate pro Generation, ab. Die Schrittweite ist dabei gerade der Wert σ bei einer normalverteilten Mutation. Ist die Schrittweite sehr klein, können nicht alle Punkte des Lösungsraumes erreicht werden. Bei zu großer Schrittweite kommt keine Konvergenz zustande, da wilde Sprünge im Lösungsraum stattfinden.

In dieser Arbeit wird die 1/5-Erfolgsregel von Rechenberg (Rechenberg, 1994) verwendet, bei der σ für die gesamte Population angepasst wird. Nach dieser Regel soll 1/5 der Individuen der Kindergeneration durch Mutationen eine höhere Fitness als die Individuen der Elterngeneration erlangen. Ist die Erfolgsquote Q_e größer als 1/5,

wird die Schrittweite vergrößert, da angenommen wird, dass man sich noch weit weg von der Lösung befindet. Bei kleinerer Erfolgsquote wird die Schrittweite verkleinert. Zusammengefasst soll bei normalverteilten Mutationen gelten:

$$\sigma_{\text{neu}} = \begin{cases} \alpha \sigma_{\text{alt}} & \text{wenn } Q_e > 1/5 \\ \frac{1}{\alpha} \sigma_{\text{alt}} & \text{wenn } Q_e < 1/5 \\ \sigma_{\text{alt}} & \text{wenn } Q_e = 1/5 \end{cases} .$$

Die Wahl des Werts für α beeinflusst die Wirkung der Schrittweitensteuerung und muss in Versuchen ermittelt werden.

5.2.5. Einführung der Rekombination

Bei der biologischen Evolution spielt die (sexuelle) Rekombination eine wichtige Rolle. Dies wurde bei den genetischen Algorithmen als der zentrale Operator übernommen. Bei den Evolutionsstrategien war dies anfangs nicht der Fall, doch inzwischen wird auch bei Evolutionsstrategien die Rekombination erfolgreich eingesetzt. Die hier beschriebene Entwicklung erweitert die Evolutionsstrategie im Sinn der genetischen Programmierung, so dass sich selbständig neue Programmabläufe entwickeln können.

Die Vorverarbeitungsstrategien können aber nicht einfach an beliebigen Stellen zum Zweck der Rekombination geteilt und die Programmfragmente ausgetauscht werden, da sich während der Vorverarbeitungsstrategie die verarbeiteten Daten in ihrem Typ ändern. Denn vor dem Segmentierungsschritt handelt es sich um Tiefenbilder, danach um eine Liste von Bereichen. Sonst würden unter Umständen Bildverbesserungsoperatoren mit Sortieroperatoren vermischt, die dann von den Typen der Ausgabe- und Eingabeparameter inkompatibel wären. Da unterschiedliche Individuen aus unterschiedlichen Operatoren aufgebaut sein können, ist auch die sonst bei Evolutionsstrategien angewandte Rekombination durch Verrechnung der einzelnen reellwertigen Parameter nicht ohne weiteres möglich, da die einzelnen Operatoren unterschiedliche Parameter besitzen.

Aufgrund der linearen Abfolge der Verarbeitungsschritte Bildverbesserung, Segmentierung und Sortierung können jedoch diese Teilschritte und auch Teile des Ablaufs innerhalb dieser Teilschritte ausgetauscht werden. Dies wurde bei dem entwickelten Optimierungsverfahren für Versuche so umgesetzt. Die beiden Eltern wurden zufällig ausgewählt. Die Wirkung muss durch vergleichende Versuche untersucht werden.

5.2.6. Initialisierung des Algorithmus und Vorbelegung der Parameter

Bei den Grundformen der evolutionären Algorithmen werden die Parameter mit Zufalls-werten initialisiert. Dies erfolgt auch bei dem hier beschriebenen Algorithmus, indem die Parameter gemäß einer gleichverteilten Wahrscheinlichkeit aus dem jeweils für den entsprechenden Parameter zulässigen Intervall ausgewählt werden.

Die Vorverarbeitungsstrategie selbst muss mit Funktionen in Form von Bildverarbeitungsoperatoren initialisiert werden. Dazu wird jeweils aus der Menge der verfügbaren Operatoren der einzelnen Teilstrategien eine gewisse Anzahl zufällig ausgewählt und

eine initiale Vorverarbeitungsstrategie aufgebaut. Die konkreten Anzahlen sind jeweils bei den Versuchen angegeben.

Es wird bei evolutionären Algorithmen angenommen, dass aufgrund der Selektion in den ersten Generationen vollkommen unbrauchbar parametrisierte Individuen aus den Populationen ausscheiden. Um diesen Vorgang zu beschleunigen, werden jedoch die für einen Operator zulässigen Parameterwerte auf für die Praxis angemessene Bereiche eingeschränkt.

Aus den Modellinformationen in Kombination mit den Eigenschaften des verwendeten Sensors zur Tiefenbilderzeugung lassen sich manche Werte weiter einschränken. So kann aus der lateralen Auflösung des Tiefenbildes beispielsweise geschätzt werden, welche Anzahl Pixel ungefähr auf den segmentierten Bereich eines Objekts entfallen und damit kann die Sortierung nach dem Flächeninhalt initialisiert werden. Zudem kann aus vorgegebenen Referenzdaten eine Vorbelegung der Parameter bestimmt werden. Dieser Ansatz wurde für die Durchführung von Versuchen gewählt und implementiert.

5.3. Fitnessbewertung der Individuen

Die Fitnessbewertung der Individuen ist entscheidend für den Erfolg oder Misserfolg von evolutionären Algorithmen. Das Ziel der zu optimierenden Vorverarbeitungsstrategie ist es, die für die Lagererkennung am Besten geeigneten Bereiche zu finden. Deshalb ist es wünschenswert, die Fitness anhand der erkannten 3-D-Lage des gesuchten Objekts zu bewerten. Dies stellt einen neuen Ansatz gegenüber den aus der evolutionären Bildverarbeitung bekannten Methoden dar, da die Vorverarbeitungsstrategie auf dem Tiefenbild mit 2-D-Bildverarbeitungsoperationen operiert, die Bewertung des Ergebnis der Segmentierung aber im 3-D-Raum anhand der gefundenen Objektlage durchgeführt wird, siehe Abbildung 5.3. Da die Lagebestimmung aber sehr rechenzeitaufwändig ist, mussten Wege gefunden werden, diese Auswertungen zu begrenzen. Zudem sollten zu Vergleichszwecken noch alternative Verfahren zur Verfügung stehen, die nur im Tiefenbild operieren. Die hierzu neu entwickelten Alternativen werden nachfolgend beschrieben.

Die Fitnessbewertung wird anhand von mehreren Referenzbildern durchgeführt, um ein Auswendiglernen einer Lösung, die nur für genau ein Bild optimale Ergebnisse liefert, zu vermeiden. Die Fitness eines Individuums wird als Mittelwert über die einzelnen Gütebewertungen aller Testbilder berechnet.

Bei der Bewertung des Erfolgs kann nach grundsätzlich unterschiedlichen Methoden vorgegangen werden, die sich auch in der Art der verwendeten Referenzdaten unterscheiden und unterschiedliche Abstraktionsstufen der Beschreibung der Referenzdaten darstellen. Im Folgenden werden die unterschiedlichen Möglichkeiten aufgeführt:

- Auf Pixelebene können alle Pixel des zu bewertenden Bildes mit einem Referenzbild verglichen werden. Zur Bewertung werden dann alle falsch positiv (FP) und falsch negativ (FN) sowie den echt positiv (EP) und echt negativ (EN) markierten Pixel summiert. Beispiele finden sich in (Roberts u. a., 2003) und (Poli, 1996).
- Die Bewertung kann auf einer abstrakteren Ebene als den Pixeln durchgeführt werden. Die von der Segmentierung gelieferten Bereiche können beispielsweise

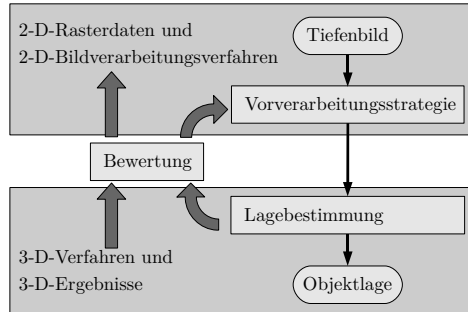


Abbildung 5.3.: Die Vorverarbeitungsstrategie als 2-D-Bildverarbeitungsverfahren wird unter Verwendung eines 3-D-Verfahrens in ihrer Fitness bewertet.

anhand der Flächeninhalte mit der Referenz verglichen werden oder es werden die Überdeckungen der Bereiche auf der Basis des Abstandes der Bereichsränder bestimmt, siehe (Bhanu u. a., 1995).

- Die Bewertung über das Ergebnis der Einpassung eines geometrischen Elements, wie sie in dieser Arbeit durchgeführt wird, kann als höchste Abstraktionsstufe angesehen werden. Es werden lediglich Geometrieparameter wie die Form oder Lage des eingepassten Elements herangezogen, vollkommen gelöst von der Pixelrepräsentation des zu bewertenden Ergebnisses der Pixel des zu verarbeitenden Tiefenbildes.

5.3.1. Zur Bewertung verwendete Referenzdaten

Bei den Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei vom Ansatz unterschiedliche Quellen für Testbilder zugrunde gelegt, die zu unterschiedlichen Vorgehensweisen bei der Fitnessbewertung führen. Dies sind zum einen simulierte Tiefendaten, die im Rechner aus einer Modellbeschreibung erzeugt werden, zum anderen reale Sensordaten. Damit ergeben sich zwei unterschiedliche Vorgehensweisen bei der Fitnessbewertung.

Simulierte Tiefendaten

Die Modellbeschreibung in Form einer geometrischen Objektbeschreibung stellt die eigentlichen Referenzdaten dar. Ausgehend von der Modellbeschreibung werden im Rechner simulierte Tiefenbilder erzeugt. Diese simulierten Tiefenbilder sollen den Tiefenbildern, die vom in der Objekterkennungsanwendung eingesetzten Sensor erzeugt werden, möglichst nahe kommen. Die Lage der Objekte in den Tiefenbildern wird dabei zufällig gewählt. Da dadurch die Lage des Objekts bekannt ist, können leicht Referenzdaten erzeugt werden, sowohl in Form von Bereichen in Tiefenbildern als auch durch die bekannten Lagedaten. Anhand dieser Referenzdaten wird die Fitnessbewertung

durchgeführt. Bei dieser Vorgehensweise ist es also möglich, dass nach dem Vorgeben einer Modellbeschreibung und dem zu erkennenden regelgeometrischen Element die Vorverarbeitungsstrategie ohne weitere Interaktion konfiguriert wird. Die Erzeugung der simulierten Tiefenbilder als Referenzdaten wird später beschrieben.

Reale Tiefendaten

Nicht alle in der Realität vorkommenden Einflüsse, die Auswirkungen auf die Qualität des vom Sensor erzeugten Tiefenbildes haben, können in der Simulation nachgebildet werden. Deshalb wurde die Möglichkeit vorgesehen, die Fitnessbewertung und damit die Optimierung der Vorverarbeitungsstrategie mit Tiefenbildern von realen Sensoren durchzuführen. Zur Gewinnung der Referenzdaten wurden zwei Ansätze umgesetzt.

Im ersten Ansatz wählt der Benutzer interaktiv in einer dreidimensionalen Darstellung der Szene die regelgeometrischen Elemente aus, die zur Objekterkennung verwendet werden sollen. Zur Einpassung wird die Lösung von (Ahn, 2004) eingesetzt. Die in die Einpassung der regelgeometrischen Elemente integrierte Segmentierung liefert die zum erkannten Element gehörenden Punkte. Die entsprechenden Punkte im Tiefenbild werden markiert und stellen die zu findenden Bereiche im Tiefenbild dar. Zudem wird über die Erkennung des regelgeometrischen Elements eine Referenz für die Lage und Geometriebeschreibung geliefert, die als Modellbeschreibung angesehen werden kann.

Beim zweiten Ansatz soll versucht werden, auch bei Verwendung von realen Sensordaten auf eine Benutzerinteraktion zu verzichten. Die Lösung von (Ahn, 2004) zur automatischen Einpassung regelgeometrischer Elemente mit integrierter Segmentierung wird dazu an zufällig ausgewählten Startpunkten angewandt. Damit kann nach einer gewissen Zeit eine ganze Anzahl regelgeometrischer Elemente gefunden werden. Diese sind anhand der Modellbeschreibung zu selektieren, da zunächst auch regelgeometrische Elemente gefunden werden, die nicht der Modellbeschreibung entsprechen. Die Geometrieigenschaften dieser selektierten Elemente und die Bereiche der Tiefenbilder, die durch die automatische Segmentierung geliefert werden, dienen wieder als Referenzdaten für die Fitnessbewertung.

5.3.2. Implementierte Bewertungsfunktionen

Zur Bewertung der Fitness der Individuen wurden unterschiedliche Ansätze auf verschiedenen Abstraktionsebenen implementiert.

Bewertung anhand von Referenzbildern

Die hier implementierten Verfahren operieren ausschließlich auf den rasterförmig angeordneten Abstandswerten des Tiefenbildes. Als Referenzdaten dienen Referenzbilder, die nach der Beschreibung aus 5.3.1 erzeugt wurden. Die Pixel, die jeweils zu den einzelnen zu suchenden regelgeometrischen Elementen gehören, bilden die Referenzbereiche. In den Referenzbildern kann eine unterschiedliche Anzahl n_{RB} von Referenzbereichen RB_i , $i = 1 \dots n_{RB}$, vorgegeben werden. Mit diesen Bereichen RB_i werden die m_{VB} von der zu bewertenden Vorverarbeitungsstrategie gelieferten Bereiche VB_j , $j = 1 \dots m_{VB}$,

Größe	Berechnung	Bedeutung
A_{RB_i}	$A_{RB_i} = A(RB_i)$	Flächeninhalt der Referenzbereiche
A_{VB_j}	$A_{VB_j} = A(VB_j)$	Flächeninhalt der zu bewertenden Bereiche
A_{Ges}	$A_{Ges} = \text{Pixelzahl}$	Flächeninhalt des gesamten Bildes
$A_{EP_{i,j}}$	$A_{EP_{i,j}} = A(RB_i \cap VB_j)$	Flächeninhalt der echt positiven Bereiche
$A_{FP_{i,j}}$	$A_{FP_{i,j}} = A_{VB_j} - A_{EP_{i,j}}$	Flächeninhalt der falsch positiven Bereiche
$A_{FN_{i,j}}$	$A_{FN_{i,j}} = A_{RB_i} - A_{EP_{i,j}}$	Flächeninhalt der falsch negativen Bereiche

Tabelle 5.4.: Berechnung und Bedeutung der zur Bewertung herangezogenen Größen

verglichen. Zur Bewertung werden die in Tabelle 5.4 aufgelisteten Größen herangezogen.

Aus diesen Größen werden zuerst Bewertungen b_j für jeden einzelnen erzeugten und zu bewertenden Bereich VB_j berechnet. Dazu kommt die im Folgenden genannte Berechnungsmöglichkeit in Frage. Das Maß, wie gut die echt positiven Pixel mit der Referenz übereinstimmen errechnet sich folgendermaßen:

$$b_{EP_{i,j}} = \frac{A_{EP_{i,j}}}{A_{EP_{i,j}} + A_{FP_{i,j}}} \quad (5.1)$$

Mit der folgenden Formel werden die falsch positiven pixel negativ bewertet:

$$b_{FP_{i,j}} = 1.0 - \frac{A_{FN_{i,j}}}{A_{EP_{i,j}} + A_{FN_{i,j}}} \quad (5.2)$$

Daraus läßt sich die Bewertung für alle Referenzbereiche und alle gefundenen Segmente bestimmen:

$$b = \frac{1}{n_{RB} + m_{VB}} \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{g_{EP} \cdot b_{EP_{i,j}} + g_{FP} \cdot b_{FP_{i,j}}}{g_{EP} + g_{FP}} \right) \quad (5.3)$$

Die Werte $g_{EP}, g_{FP} \in \mathbb{R}$ ermöglichen eine Gewichtung der Beiträge der echt positiven und echt negativen Bereiche. Diese Bewertungsfunktionen sind sehr schnell, da nur von 2-D-Bildverarbeitungsoperationen Gebrauch gemacht wird. Deshalb können diese Verfahren in der Anfangsphase der Optimierung angewandt werden, um das rechenzeitintensive 3-D-Verfahren abzukürzen. Insbesondere bei einer großen Anzahl von Individuen ergeben sich Vorteile. Ein weiterer Zweck ist die Bereitstellung von Alternativen, mit den sich die 3-D-Verfahren vergleichen lassen.

Bewertung anhand von Ergebnissen einer 3-D-Auswertung

Die Bewertung der Individuen, d.h. der Vorverarbeitungsstrategien, anhand von Ergebnissen aus 3-D-Auswertungen ist ein Hauptaugenmerk dieser Arbeit. Denn damit wird bewertet, wie gut die Vorverarbeitungsstrategien ihren eigentlichen Zweck erfüllen, nämlich die für die Einpassung und Lagebestimmung optimal geeigneten Bereiche zu liefern. Dazu wurden folgende Methoden zur Bewertung der Güte implementiert:

Bereichsbasiert Zuerst erfolgt eine Einpassung eines einzelnen Elements in alle von der Vorverarbeitungsstrategie gelieferten Bereiche. Die zur Einpassung verwendeten Punkte werden im Tiefenbild markiert, so dass dort entsprechende Bereiche EB_j entstehen. Diese werden mit den Referenzbereichen RB_i verglichen. Wenn die Schnittmenge von EB_j und RB_i eine Anzahl von Pixeln enthält, die über einem vorgegebenen Schwellwert liegt, wird der Bereich EB_j als erfolgreich gewertet. Die Bewertung für das gesamte Tiefenbild ergibt sich aus der Summe e der erfolgreich bewerteten EB_j und der gesamten Anzahl g der EB_j als $b = \frac{e}{g}$.

Formbasiert Zuerst erfolgt eine Einpassung eines regelgeometrischen Elements in jeden von der Vorverarbeitungsstrategie gelieferten Bereich EB_j . Der einzelne Bereich wird als erfolgreich bewertet, wenn das erzeugte regelgeometrische Element in seinen Formparametern den Referenzdaten zuzüglich gewisser Toleranzen entspricht. Die Toleranz ist von den Toleranzen der Teile abhängig und von dem Ziel bei der Lagebestimmung. Wenn beispielsweise rein zylindrische Teile zum Greifen erkannt werden sollen, reicht es aus, wenn der vom Teil erkannte Bereich so groß ist, dass das Greifwerkzeug angesetzt werden kann. In diesem Fall könnte sich die Toleranz für die Länge des gesuchten Zylinders zwischen der minimalen zum Greifen benötigten Länge und der Gesamtlänge des Teils bewegen.

Sind die Geometrieparameter außerhalb der Toleranzen für die Referenzwerte oder ist gar keine erfolgreiche Einpassung möglich, wird der Bereich nicht als erfolgreich gewertet. Die Bewertung für das gesamte Tiefenbild ergibt sich aus der Summe e der erfolgreich bewerteten EB_j und der gesamten Anzahl g der EB_j als $b = \frac{e}{g}$.

Formbasiert mit kombinierten Elementen In ähnlicher Art können auch kombinierte Elemente zur Einpassung verwendet werden. Dazu werden die in Kapitel 6 entwickelten Verfahren verwendet. Die Bewertungsmethode arbeitet zweistufig. Als erster Schritt wird die Einpassung eines einzelnen regelgeometrischen Elements vorgenommen. Einerseits, da diese Einpassung stabiler und etwas schneller ist. Andererseits wird als Startwert für die Einpassung des kombinierten Elements die Richtung des einzelnen regelgeometrischen Elements verwendet. Schlägt die Einpassung des regelgeometrischen Elements fehl, so wird der entsprechende Bereich EB_j negativ bewertet. Bei Erfolg wird das kombinierte Element eingepasst. Gelingt dies, so erfolgt in ähnlicher Art zur formbasierten Bewertung mit einzelnen Elementen ein Vergleich mit den Referenzdaten der Geometrie des kombinierten Elements anhand von vorgegeben Toleranzen. Liegt das kombinierte Element vollständig in der Toleranz, wird der Bereich EB_j als erfolgreich gewertet. Die Bewertung des Tiefenbildes ergibt sich wieder aus der Summe e der erfolgreich bewerteten EB_j und der gesamten Anzahl g der EB_j als $b = \frac{e}{g}$.

5.3.3. Berücksichtigung der Ausführungszeit bei der Fitnessbewertung

Programme, die mithilfe von genetischer Programmierung erzeugt werden, neigen dazu, zum Teil unnötige und redundante Funktionen zu enthalten. Dies führt zu längeren Programmsequenzen mit der Folge von verlängerten Ausführungszeiten.

Bei der Erzeugung von Vorverarbeitungsstrategien mithilfe von Evolutionsstrategien trifft dieser Sachverhalt auch zu. Durch die bisher beschriebenen Funktionen zur Fitnessbewertung werden lediglich die Ergebnisse der Vorverarbeitungsstrategie bewertet, mit welcher Folge einzelner Bildverarbeitungsoperatoren diese erzeugt wurden, ist nicht relevant. Da bei der Anwendung in der Objekterkennung die Erkennungszeit aber eine wichtige Rolle spielt, kommt es darauf an, eine möglichst schnelle Vorverarbeitungsstrategie einzusetzen. Deshalb soll die Ausführungszeit der einzelnen Vorverarbeitungsstrategien in die Fitnessbewertung mit aufgenommen werden.

Zur Lösung wurde folgender Ansatz umgesetzt: Aus den Ausführungszeiten t_i der einzelnen Vorverarbeitungsstrategien wird eine mittlere Ausführungszeit \bar{t} aller vom Start der Optimierung an ausgeführten Vorverarbeitungsstrategien bestimmt. Für die von der Ausführungszeit abhängige Fitnessbewertung $b(t)_i$ einer einzelnen Vorverarbeitungsstrategie wird dann $b(t)_i = (\bar{t}/t_i)b_i$ gesetzt, wobei b_i die mit der nach den vorher beschriebenen Methoden bestimmten Fitness ist. Damit erhalten diese Vorverarbeitungsstrategien eine höhere Bewertung, die schneller sind.

5.4. Repräsentation der Modelldaten

Die zu erkennenden Objekte müssen in einer für den Rechner verständlichen Form zur Verfügung stehen. Diese Modellbeschreibung muss die in dieser Arbeit behandelten rotations-symmetrischen, aus einzelnen regelgeometrischen Elementen auf einer Achse aufgebauten Objekte darstellen können. Es wurde eine sequenzielle Beschreibung in einem objekt-eigenen Koordinatensystem mit z -Achse in Richtung der Objektachse gewählt, bei dem die einzelnen Elemente in der Reihenfolge ihres Auftretens aufgelistet sind. Da zwischen den regelgeometrischen Elementen noch weitere Formen am Objekt auftreten können, die für die Erkennung nicht verwendet werden sollen oder können, wurden noch sogenannte „don't care“ Bereiche eingeführt, die entweder nur einen Abstand zwischen den regelgeometrischen Elementen darstellen oder über einen umschließenden Quader oder eine triangulierte Punktwolke den Abschnitt beschreiben. Die Modellbeschreibung basiert auf der Extensible Markup Language (XML), deren hierarchische Struktur sich gut für zusammengesetzte Objekte eignet. Ein Objekt wird mit dem Schlüsselwort `object` bezeichnet und kann aus beliebig vielen Teilstücken mit der Bezeichnung `part` bestehen mit folgender Darstellung:

```
<object>
  <part> ... </part>
  <part> ... </part>
  ...
</object>
```

Jedes Teilstück (`part`) enthält in dem mit `shapeParams` eingeleiteten Block Informationen über seine Form und Lage im lokalen Koordinatensystem. Die für die Erzeugung des simulierten Tiefenbildes notwendigen Angaben sind unter `renderingParams` verzeichnet und die Informationen für die Erkennung werden unter `detectionParams` gespeichert. Damit wird ein Teilstück des Objekts folgendermaßen beschrieben:

```
<part>
  <shapeParams> ... </shapeParams>
  <renderingParams> ... </renderingParams>
  <detectionParams> ... </detectionParams>
</part>
```

Im Anhang B wird ein vollständiges Beispiel einer Modellbeschreibung gegeben.

5.5. Erzeugung der simulierten Daten

Zur Erzeugung der simulierten Tiefenbilder wurde ein Simulator entwickelt, der die Abbildung einer Szene mit Objekten durch einen 3-D-Sensor nachbildet. Die Grundidee zur Bilderzeugung ist, die Grafikhardware zu verwenden und diese über die Programmierschnittstelle OpenGL anzusprechen. Im Detail werden hierzu die Objekte mit Hilfe von OpenGL-Funktionen auf den Bildschirm gezeichnet und anschließend die erzeugten Abstandswerte aus dem Tiefenpuffer ausgelesen. Die Darstellung der Objekte ist von den Ansichts- und Projektionsparametern abhängig, mit den die Sensoreigenschaften nachbildet werden. Folgende Möglichkeiten der zur Bilderzeugung vorgezogenen Sensoreigenschaften wurden umgesetzt:

- Auswahl der Art der Projektion zwischen Parallel- oder Zentralprojektion.
- Angabe der Pixelauflösung in x - und y -Richtung.
- Vorgabe des Messvolumens.

Da die Messwerte realer Sensoren immer ein gewisses Maß an Rauschen beinhalten, wurde auch die Möglichkeit geschaffen, die simulierten Messwerte mit normalverteiltem Rauschen mit Varianz σ zu beaufschlagen.

Die darzustellenden Objekte werden in Form der Modellbeschreibung übergeben. Aus den darin beschriebenen Teilstücken wird das Objekt aufgebaut. Die Erzeugung der Szene von Objekten erfolgt durch Positionierung des Objekts über eine entsprechend vorgegebene Transformation. Um die Szene automatisch zu erzeugen, setzen sich die Transformation aus Rotationen und Translationen, die mit Zufallszahlen initialisiert werden, zusammen. Die Zufallszahlen werden so erzeugt, dass die Objekte innerhalb des Messvolumens oder des entsprechenden Behälters – falls ein solcher vorgegeben wird – liegen. Auf eine Plausibilitätsbetrachtung von physikalischen Randbedingungen zur Lage der Objekte wurde verzichtet, da dies hier bei der weiteren Verwendung als Referenzbilder zur Fitnessbewertung als nicht relevant angesehen wird.

Kapitel 6.

Entwicklung eines Einpassverfahrens für kombinierte Elemente zur Lagebestimmung

In der Konzeption wurde der Bedarf für ein Einpassverfahren für kombinierte Elemente zur Lagebestimmung von rotationssymmetrischen Objekten festgestellt. Dessen Entwicklung wird im Folgenden beschrieben.

Grundlegende Eigenschaften und Begriffe der Verfahren zur Besteinpassung in 2.4.1 wurden in der Analyse grob umrissen. Für die Entwicklung eines Einpassverfahrens für rotationssymmetrische, aus einzelnen regelgeometrischen Elementen aufgebauten Objekten werden diese zuerst weiter präzisiert.

6.1. Darstellung und Parametrisierung

In 2.4.1 wurden mit den Gleichungen (2.1) für implizite Beschreibung und (2.2) für parametrische Beschreibung zwei Darstellungsformen für regelgeometrische Elemente, im Folgenden auch Modelle genannt, angeführt. Aufgrund der geringeren Anzahl von Parametern und der einfacheren Berechenbarkeit gewisser Größen wie beispielsweise von Abständen der Messpunkte zum Modell oder Ableitungen, wird für die Entwicklung der kombinierten Elemente die implizite Darstellung gewählt. Die Nachteile wie eine schwierige Darstellbarkeit von Teilflächen im CAD (Computer Aided Design) sind für die Objekterkennung nicht relevant.

Für die Stabilität eines Einpassverfahrens ist entscheidend, die minimal notwendige Anzahl von Parametern zu verwenden. In dieser Arbeit wird für alle Elemente, auch für die kombinierten Elemente, die Parametrisierung nach dem gleichen Schema durchgeführt. Die Parameter $\mathbf{p}^T = (\mathbf{p}_f^T, \mathbf{p}_p^T, \mathbf{p}_r^T)$ des Modells setzen sich aus den k Formparametern $\mathbf{p}_f^T = (a_1, \dots, a_k)$ wie beispielsweise dem Zylinderradius r , den p Positionsparametern $\mathbf{p}_p^T = (X_0, Y_0, Z_0)$ und q Rotationsparametern $\mathbf{p}_r^T = (\omega, \varphi, \kappa)$ in Form von Drehwinkeln um die Koordinatenachsen zusammen. Für eine stabile Parametrisierung wird idealerweise das Modell am Koordinatenursprung definiert und falls das Modell eine Richtung besitzt, wird für diese die z -Achse gewählt. Dies wird das Modellsystem genannt. Die Messpunkte mit ihren Koordinaten \mathbf{X} im Weltsystem werden durch die Transformation

$$\mathbf{X} = \mathbf{R}^T \mathbf{x} + \mathbf{X}_0, \quad (6.1)$$

in das Modellsystem mit den Koordinaten \mathbf{x} überführt. Treten redundante Parameter auf, so müssen diese über Nebenbedingungen eliminiert werden. Jedes regelgeometrische Element benötigt zu seiner eindeutigen Festlegung eine Mindestanzahl von Punkten und Parametern. Für einen Zylinder sind dies beispielsweise fünf. Bei einer

Parametrisierung in der Form $\mathbf{p}^T = (r, X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi)$ mit sechs Parametern muss deshalb ein Parameter über eine Nebenbedingung eliminiert werden. Eine Festlegung der z -Komponente des Schwerpunktes der Messpunkte auf den Schwerpunkt des Zylinders ist nach (Ahn, 2004; Anthony u. a., 1991) ideal. Zudem ist eine optimale Parametrisierung der Modelle für die Stabilität der Einpassergebnisse entscheidend. So dürfen kleine Änderungen der Parameter auch nur kleine Änderungen am Modell verursachen. Auch dies wird durch diese Wahl der Schwerpunkte erreicht.

6.2. Verwendete Grundlagen der Besteinpassung

Im Folgenden werden die Grundlagen der Besteinpassung nach Gauß in Anlehnung an (Ahn, 2004) dargestellt, um die grundsätzlichen Prinzipien für die neuen Entwicklungen zur Verfügung zu haben. Bei der Besteinpassung eines geometrischen Elements an gegebene Messpunkte sollen die Parameter \mathbf{p} , die das geometrische Element in seiner Form und Lage beschreiben, so bestimmt werden, dass die Messpunkte möglichst gut approximiert werden. Als Qualitätskriterium für die Güte der Approximation können die Abstände $d_i = \|\mathbf{X}_i - \tilde{\mathbf{X}}_i\|$, auch Residuen genannt, zwischen den m Messpunkten \mathbf{X}_i und den Fußpunkten $\tilde{\mathbf{X}}_i$ auf dem Element dienen. In dieser Arbeit werden ausschließlich die senkrechten Abstände, auch geometrische Abstände genannt, verwendet. Annäherungen der Abstände in Form von algebraischen Abständen resultieren in zu großen Fehlern bei der Einpassung. Dies wurde von (Ahn, 2004) und (Rabbani, 2006) ausführlich beschreiben. Die global beste Lösung wird erreicht, wenn \mathbf{p} so bestimmt wird, dass die Summe $S = \sum_{i=1}^m d_i^2$ der quadratischen Abstände ein Minimum annimmt. Wenn $\mathbf{d}^T := (d_1, \dots, d_m)$ den Vektor aller Abstände bezeichnet, lässt sich dies als Optimierungsproblem

$$\min_{\mathbf{p}} (S(\mathbf{p}) = \mathbf{d}^T \mathbf{W}^T \mathbf{W} \mathbf{d}), \quad (6.2)$$

schreiben, wobei einzelne Residuen durch die positiv definite Matrix \mathbf{W} unterschiedlich gewichtet werden können. Die Residuen sind von den Parametern \mathbf{p} abhängig.

Eine notwendige Bedingung für die Annahme des Minimums ist

$$\frac{\partial}{\partial \mathbf{p}} S = 2\mathbf{J}^T \mathbf{W}^T \mathbf{W} \mathbf{d} = \mathbf{0}, \quad (6.3)$$

wobei $\mathbf{J} = \frac{\partial \mathbf{d}}{\partial \mathbf{p}}$ die Jacobi-Matrix bezeichnet.

Da die Residuen nichtlineare Funktionen sind, stellt (6.3) ein nichtlineares Gleichungssystem dar. Dieses muss iterativ gelöst werden, beispielsweise durch das Newton-Verfahren, das jedoch zweite Ableitungen erfordert. Beim Gauß-Newton-Verfahren

$$\mathbf{J}_k^T \mathbf{W}^T \mathbf{W} \mathbf{J}_k \Delta \mathbf{p}_k = -\mathbf{J}_k^T \mathbf{W}^T \mathbf{W} \mathbf{d}_k \quad (6.4)$$

wird die zweite Ableitung vernachlässigt, da die Residuen bei der Kleinste-Quadrat-Methode klein sind, was deutliche Vorteile bei der Berechnung ergibt. Die aktualisierten Parameter \mathbf{p}_{k+1} ergeben sich aus der Abstiegsrichtung $\Delta \mathbf{p}_k$ als $\mathbf{p}_{k+1} = \mathbf{p}_k + \alpha_k \Delta \mathbf{p}_k$ mit

geeigneter Schrittweite α_k . Unter gewissen Voraussetzungen kann (6.4) weiter vereinfacht werden zu

$$\mathbf{W}\mathbf{J}_k\Delta\mathbf{p}_k = -\mathbf{W}\mathbf{d}_k. \quad (6.5)$$

Für weitere Details und Begründungen sei auf (Ahn, 2004) und (Nocedal u. Wright, 1999) verwiesen, wo auch das Levenberg-Marquardt-Verfahren mit einem größeren Konvergenzbereich beschrieben wird.

Die Iteration wird beendet, wenn keine Verbesserung mehr erzielt wird, beispielsweise wenn $S_{k+1} - S_k < \varepsilon$ oder $\|\Delta\mathbf{p}_k\| < \varepsilon$ für ein vorgegebenes $\varepsilon > 0$. Wie \mathbf{J} und \mathbf{d} berechnet werden, um das Iterationsverfahren durchführen zu können, wird im Folgenden beschrieben.

6.3. Berechnung der Jacobi-Matrix

Eine übersichtliche Berechnungsmöglichkeit für die Jacobi-Matrix ist für eine praktische Implementierung wichtig, insbesondere wenn kombinierte Elemente eingepasst werden sollen. Analog zur Gruppierung der Parameter kann die Jacobi-Matrix in einzelne, jeweils nur von einer Parameterart abhängige Matrizen aufgespalten werden, die durch elementare Matrizenoperationen zur Jacobi-Matrix kombiniert werden können. Für parametrische Flächendarstellungen wurden in (Sourlier, 1995) Lösungen vorgestellt. Die von (Ahn, 2004) eingeführten Lösungen für implizite Flächen sollen detaillierter nachvollzogen werden, da sich durch Betrachtung der sich ergebenden Gleichungen unter neuen Gesichtspunkten Lösungen für die Einpassung der kombinierten Elemente entwickeln lassen. Aus der Ableitung des Residuums eines Punktes ergibt sich:

$$\frac{\partial}{\partial\mathbf{p}}d_i = \frac{\partial}{\partial\mathbf{p}}\|\mathbf{X}_i - \widetilde{\mathbf{X}}_i\| = \frac{\mathbf{X}_i - \widetilde{\mathbf{X}}_i}{\|\mathbf{X}_i - \widetilde{\mathbf{X}}_i\|} \frac{\partial}{\partial\mathbf{p}}\widetilde{\mathbf{X}}_i \quad (6.6)$$

Durch Einsetzen der Transformation (6.1) folgt daraus

$$\frac{\partial}{\partial\mathbf{p}}d_i = \frac{\mathbf{X}_i - \widetilde{\mathbf{X}}_i}{\|\mathbf{X}_i - \widetilde{\mathbf{X}}_i\|} \frac{\partial}{\partial\mathbf{p}}\left(\mathbf{R}^T\widetilde{\mathbf{x}}_i + \mathbf{X}_0\right) = \frac{\mathbf{X}_i - \widetilde{\mathbf{X}}_i}{\|\mathbf{X}_i - \widetilde{\mathbf{X}}_i\|} \left(\frac{\partial\mathbf{R}^T}{\partial\mathbf{p}}\widetilde{\mathbf{x}}_i + \mathbf{R}^T\frac{\partial\widetilde{\mathbf{x}}_i}{\partial\mathbf{p}} + \frac{\partial\mathbf{X}_0}{\partial\mathbf{p}}\right) \quad (6.7)$$

Aus der rechten Seite von (6.7) können die folgenden Teilmatrizen bestimmt werden. Für die Rotationsparameter:

$$\mathbf{J}_{i,r} = \frac{\mathbf{X}_i - \widetilde{\mathbf{X}}_i}{\|\mathbf{X}_i - \widetilde{\mathbf{X}}_i\|} \left(\underbrace{\mathbf{0} \cdots \mathbf{0}}_{3 \times k} \underbrace{\mathbf{0} \cdots \mathbf{0}}_{3 \times p} \underbrace{\frac{\partial\mathbf{R}^T}{\partial\omega}\widetilde{\mathbf{x}}_i}_{3 \times p} \underbrace{\frac{\partial\mathbf{R}^T}{\partial\varphi}\widetilde{\mathbf{x}}_i}_{3 \times q} \underbrace{\frac{\partial\mathbf{R}^T}{\partial\kappa}\widetilde{\mathbf{x}}_i}_{3 \times q} \right) \quad (6.8)$$

Für die Positionsparameter:

$$\mathbf{J}_{i,p} = \frac{\mathbf{X}_i - \widetilde{\mathbf{X}}_i}{\|\mathbf{X}_i - \widetilde{\mathbf{X}}_i\|} \left(\underbrace{\mathbf{0} \cdots \mathbf{0}}_{3 \times k} \underbrace{\mathbf{e}_1\mathbf{e}_2\mathbf{e}_3}_{3 \times p} \underbrace{\mathbf{0} \cdots \mathbf{0}}_{3 \times q} \right), \quad \mathbf{e}_1^T = (1, 0, 0) \quad (6.9)$$

Für die Formparameter:

$$\mathbf{J}_{i,f} = \frac{\text{sign}((\mathbf{x}_i - \tilde{\mathbf{x}}_i)^T \nabla f)}{\|\nabla f\|} \begin{pmatrix} \frac{\partial f}{\partial p_1} & \dots & \frac{\partial f}{\partial p_k} & \underbrace{\mathbf{0} \dots \mathbf{0}}_{1 \times p} & \underbrace{\mathbf{0} \dots \mathbf{0}}_{1 \times q} \end{pmatrix}, \quad (6.10)$$

Eine komplette Zeile der Jacobi-Matrix ergibt sich als

$$\mathbf{J}_i = \mathbf{J}_{i,p} - \mathbf{J}_{i,f} - \mathbf{J}_{i,r} \quad (6.11)$$

Erstaunlicherweise kann also die Jacobi-Matrix aus drei Teilmatrizen aufgebaut werden, von der nur (6.10) direkt vom Modell abhängig ist, bei den beiden anderen Matrizen (6.9) und (6.8) gehen die Eigenschaften des Modells lediglich über die Lotfußpunkte $\tilde{\mathbf{x}}_i$ und $\tilde{\mathbf{X}}_i$ ein. Diese schon von (Ahn, 2004) gefundenen Zusammenhänge wurden dort allerdings nur genutzt, um leicht eine Anpassung an unterschiedliche einzelne regelgeometrische Elemente durchführen zu können. Für die kombinierten Elemente wurden wie in der Analyse beschrieben ganz andere Ansätze vorgeschlagen.

Aus dieser Darstellungsmöglichkeit der Jacobi-Matrix lassen sich vollkommen neue Ansätze für die Einpassung von kombinierten Elementen gewinnen. Auch wenn diese aus einzelnen regelgeometrischen Elementen aufgebaut sind, die zueinander in einer bestimmten geometrischen Beziehung stehen, so lässt sich doch die Lage des gesamten kombinierten Elements durch genau eine gemeinsame Position und Richtung beschreiben.

Unter Benutzung dieser Erkenntnis wird ein Verfahren entwickelt, nach dem die zur Einpassung von kombinierten Elementen notwendige Jacobi-Matrix aufgestellt werden kann. Deren einzelne Zeilen \mathbf{J}_i (6.11) sind jeweils von den einzelnen Messpunkten \mathbf{X}_i und von der die Geometrie beschreibenden Flächenfunktion abhängig.

Die Herausforderung bei kombinierten Elementen ist, dass sich die Flächenfunktion des gesamten Elementes aus einzelnen Teilflächen zusammensetzt. Somit hängen die einzelnen Zeilen der Jacobi-Matrix von der Zuordnung der Messpunkte zu den Teilflächen ab. Für die von Position und Richtung abhängigen Teile (6.8) und (6.9) müssen die Lotfußpunkte auf den einzelnen Teilflächen gefunden werden, im Teil (6.10) die entsprechenden Ableitungen der Teilflächenfunktionen. Das bedeutet, dass ein entscheidender Teil zur Lösung des Einpassungsproblems in der Lösung des Zuordnungsproblems zwischen den Messpunkten und den einzelnen Teilflächen besteht.

Danach ist es möglich, für kombinierte Elemente eine gemeinsame Jacobi-Matrix aufzustellen, die eine ähnlich kompakte Form aufweist, wie diejenige für ein einzelnes regelgeometrisches Element. Die unhandlichen Blockmatrizen, die in der von (Ahn, 2004) angedeuteten Lösung auftreten, werden dadurch vermieden.

6.4. Zuordnungsproblem der Abstandswerte bei kombinierten Elementen

Zur Berechnung des Lotfußpunktes und damit des Abstands muss die senkrechte Projektion des Messpunktes auf die einzupassende Fläche gefunden werden. Bei einzelnen

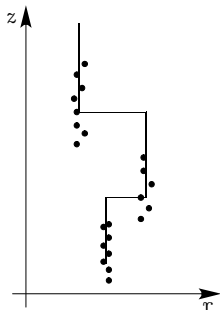


Abbildung 6.1.: Globales Zuordnungsproblem: Auf welche Teilflächen müssen die Messpunkte projiziert werden. Auch nach der Bestimmung der Achsrichtung bleibt Translation offen.

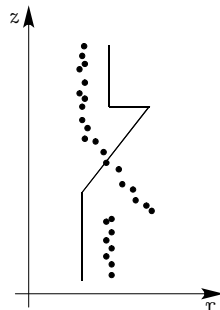


Abbildung 6.2.: Globales Zuordnungsproblem: Zusätzlich ist hier eine Spiegelung an einer Ebene senkrecht zur Achse notwendig.

regelgeometrischen Elementen ist dies, bei analytischer Berechenbarkeit, leicht. Bei kombinierten Elementen, die aus mehreren Flächen bestehen, stellt sich jedoch die Frage, auf welche Teilfläche der Messpunkt überhaupt projiziert werden muss. Dieses Zuordnungsproblem lässt sich in zwei Unterproblemstellungen aufteilen. Zum einen muss die grundsätzliche Lage des Modells mit seinen einzelnen Teilflächen gegenüber den Messpunkten bestimmt werden, dies wird im Folgenden als globales Zuordnungsproblem bezeichnet. Zum anderen ist die genaue Zuordnung der Messpunkte an den Übergängen der einzelnen Teilflächen festzulegen, was als lokales Zuordnungsproblem bezeichnet wird.

6.4.1. Lösungen für das globale Zuordnungsproblem

Der erste Schritt der zur Lösung des globalen Zuordnungsproblems ist die Festlegung der Achslage des einzupassenden Elements in Bezug auf die Messpunkte. Wenn die Einpassung des kombinierten Elements nur der Genauigkeitssteigerung einer vorherigen Lagebestimmung dient, ist die Achse schon bekannt. Soll die Einpassung direkt in die segmentierten Daten erfolgen, muss zuerst die Achse bestimmt werden. Dazu wird eine Einpassung eines einzelnen regelgeometrischen Elements mit gleichzeitiger Segmentierung vorgenommen. Damit wird im Gegensatz zu anderen Schätzverfahren auch bei sehr unvollständigen Daten, die nur einen kleinen Teil des Umfangs des regelgeometrischen Teilelements bedecken und ein großes Rauschen aufweisen, eine sehr stabile und gute Näherung der Achse des kombinierten Elements geliefert. In der Praxis kommen als einzupassende Elemente Kegel und hauptsächlich Zylinder vor.

Noch nicht festgelegt sind nach diesem Schritt Translationen in Achsrichtung und Spiegelungen an Ebenen senkrecht zur Achsrichtung. Dies wird in den Abbildungen 6.1 und 6.2 verdeutlicht.



Abbildung 6.3.: Beispielobjekt für die Lösung des Zuordnungsproblems

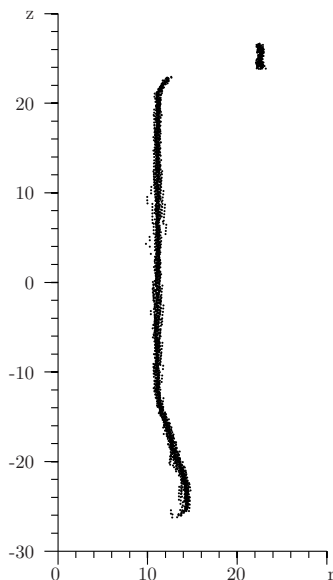


Abbildung 6.4.: Verteilung der Abstandswerte entlang der z-Achse

Zur Festlegung dieser verbleibenden Freiheitsgrade wird eine Analyse der Abstandswerte der Messpunkte von der geschätzten Achse vorgenommen. Um die Berechnung effizient durchführen zu können, wird der Schwerpunkt der Messpunkte auf den Ursprung des Koordinatensystems verschoben und die geschätzte Achse in Richtung der z -Koordinatenachse ausgerichtet. Idealerweise liefert die in Abschnitt 5 entwickelte Vorverarbeitungsstrategie die Messpunkte die das Objekt beschreiben. Abhängig von der Geometrie und dem Ziel der Vorverarbeitungsstrategie geschieht dies entweder als genau eine Region oder in einzelnen Regionen, die die Teilelemente beschreiben. Nicht zum Objekt gehörende Punkte sollten in den Regionen kaum auftreten.

Soll für andere Anwendungen oder Ausgangsdaten eine zusätzliche Steigerung der Unempfindlichkeit gegenüber Störpunkten erreicht werden, kann die Modellinformation verwendet werden. Zu diesem Zweck wird der umschließende Zylinder des gesuchten Objekts gebildet und nur die in dessen Innerem liegenden Messpunkte werden zur weiteren Auswertung herangezogen. Die aus der Berechnung resultierende Verteilung der Abstandswerte des Teils aus Abbildung 6.3 entlang der z -Achse ist in Abbildung 6.4 dargestellt.

Ziel ist es, aus der Analyse des Verlaufs der Abstandswerte die Anordnung der einzelnen regelgeometrischen Elemente auf der Achse zu ermitteln und so das globale Zuordnungsproblem zu lösen. Von Vorteil ist, dass das ursprünglich dreidimensionale

Problem auf ein eindimensionales Problem reduziert wird. Es müssen also die Abschnitte auf der z -Achse gefunden werden, die einzelnen regelgeometrischen Elementen zuzuordnen sind. Dies kann durch Auffinden der Trennstellen zwischen den Abschnitten erfolgen oder durch eine Suche nach zusammenhängenden Bereichen.

Um die Auswertbarkeit der Abstandsbänder in Abbildung 6.4 zu verbessern, wird in einem ersten Schritt ein Filterverfahren angewandt. Dazu wird die z -Achse in diskrete Intervalle unterteilt, um eine Art Histogramm bilden zu können. Die Länge der Intervalle wird in einem von der Objektlänge abhängigen Verhältnis bestimmt. Aus allen in ein Intervall fallenden Abstandswerten wird dann genau ein Abstandswert bestimmt. Die in dieser Arbeit umgesetzte einfachste und schnellste Lösung ist eine Mittelwertbildung, die gute Ergebnisse liefert, wie in Abbildung 6.6 erkennbar ist.

Die so vorverarbeiteten Daten bilden die Grundlage für die Suche nach den Abschnitten. Dazu kommen folgende Verfahren in Frage:

1. Im einfachsten und schnellsten Verfahren werden Sprünge in den Abstandswerten gesucht, die dann die Grenzen der einzelnen Abschnitte bilden. Bei Objekten, die keine Sprünge aufweisen, beispielsweise wenn ein Zylinder stetig in einen Kegel übergeht, kann dieses Verfahren jedoch nicht verwendet werden.
2. Die Abstandswerte können zu einem Polygonzug verbunden werden, um starke Richtungsänderungen zwischen den einzelnen Kanten zu detektieren. Die Punkte, an denen die Richtungsänderung über einem vorgegeben Schwellwert liegt, ergeben die Grenzen der einzelnen Abschnitte. Mit dieser Methode lassen sich auch gekrümmte Abschnitte trennen.
3. Ein Verfahren zur Suche von zusammenhängenden geradlinigen Abschnitten wie es in (Duda u. Hart, 1973) beschrieben wird. Dabei wird das Maximum der Abstände aller Punkte zur Geraden durch die beiden Endpunkte des Abschnitts gesucht. An diesem Maximum wird der Abschnitt in zwei neue Abschnitte unterteilt. Es wird rekursiv weiter unterteilt, bis der maximale Abstand unter einem Schwellwert liegt.

Mit allen drei Verfahren wurden Versuche durchgeführt. Die starke Beschränkung der detektierbaren Übergänge beim ersten Verfahren macht es für die Praxis ungeeignet. Das zweite Verfahren ist relativ anfällig gegenüber Schwankungen in den Daten und die Wahl des notwendigen Schwellwerts ist oft schwierig. Das dritte Verfahren ist robust und schnell. Es ist auch für stetige Übergänge geeignet. Die Beschränkung, dass nur geradlinige Abschnitte gefunden werden können, besteht nur auf den ersten Blick. Bei gekrümmten Flächen entstehen aufgrund der Annäherung durch Geraden viele kurze Abschnitte. Diese können hinterher herausgefiltert oder weiter analysiert werden. Durch Vergleich mit der Modellinformation können im Nachhinein auch anders geformte Abschnitte gefunden werden. Deshalb wird im Weiteren das dritte Verfahren eingesetzt. Zur sicheren Trennung von zwei benachbarten Abschnitten ist bei diesem Verfahren ein Schwellwert t notwendig. Für diesen soll eine Abschätzung angegeben werden. Das kombinierte Element bestehe aus den Abschnitten mit den Längen ℓ_1 und ℓ_2 auf der z -Achse mit den Öffnungswinkeln α_1 und α_2 , siehe Abbildung 6.5.

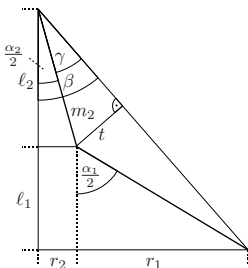


Abbildung 6.5.: Darstellung von zwei Teilelementen mit den Längen ℓ_1 und ℓ_2 zur Veranschaulichung des Schwellwertes t .

Die Abschätzung beruht auf einfachen trigonometrischen Berechnungen. So ergeben sich die Größen r_1 und r_2 als $r_1 = \ell_1 \tan(\alpha_1/2)$ und $r_2 = \ell_2 \tan(\alpha_2/2)$. Daraus kann $\beta = \arctan(r_1+r_2)/(\ell_1+\ell_2)$ bestimmt werden. Mit $\gamma = \beta - \alpha/2$ und $m_2 = \ell_2/\cos(\alpha_2/2)$ ergibt sich der Schwellwert zu $t = m_2 \sin(\gamma)$. Damit lässt sich der Schwellwert vollständig in bekannten Größen ausdrücken:

$$t = \frac{\ell_2}{\cos(\alpha_2/2)} \sin \left[\arctan \left(\frac{\ell_1 \tan(\alpha_1/2) + \ell_2 \tan(\alpha_2/2)}{\ell_1 + \ell_2} \right) \right] \quad (6.12)$$

Abbildung 6.7 zeigt das Ergebnis der Segmentierung in die Abschnitte.

Nach dieser Segmentierung kann die eigentliche Zuordnung erfolgen. Dazu werden die Messpunkte, die in den einzelnen Abschnitten liegen, in einzelne Klassen eingeteilt und den entsprechenden Teilflächen zugeordnet. Dazu werden die Abstände der Abschnitte von der Achse, die mit ihr eingeschlossenes Winkel und die Längen mit den entsprechenden Werten der Modellinformation des einzupassenden kombinierten Elements verglichen. Bei aus Kegeln und Zylindern aufgebauten Elementen kann sogar auf die Modellinformation verzichtet werden.

6.4.2. Lösung des lokalen Zuordnungsproblems

An den Rändern und Übergangsbereichen der einzelnen Teilflächen des kombinierten Elements ergibt sich ein lokales Zuordnungsproblem, bei dem entschieden werden muss, welche Messpunkte auf welche Teilfläche zu projizieren sind. Dabei muss zwischen stetigen und unstetigen Übergängen unterschieden werden, bei den sich die Abstandsfunktion entsprechend verhält. Beim stetigen Übergang schließen zwei Teilflächen mit gleichem Radius direkt aneinander an. Bei den Unstetigkeiten in der Abstandsfunktion sind weitere Fälle zu unterscheiden. Zum einen kann eine Unterbrechung in Richtung der Achse auftreten. Dazu kommt es an den Endpunkten der Teilflächen, wenn nicht direkt eine weitere Fläche anschließt. Beispielsweise falls dazwischen Flächen liegen, die nicht durch Besteinpassung angepasst werden sollen. Zum anderen können Sprünge bei den Radien auftreten, z. B. wenn zwei Zylinder mit unterschiedlichen Radien aufeinandertreffen.

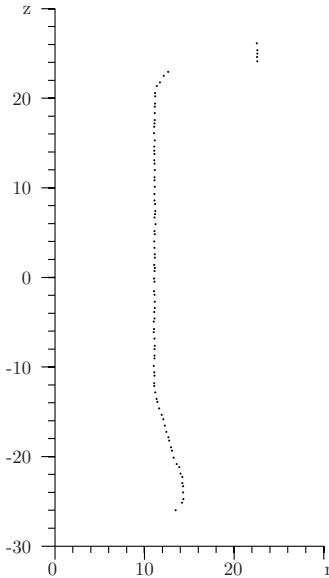


Abbildung 6.6.: Verteilung der gefilterten Abstandswerte entlang der z -Achse

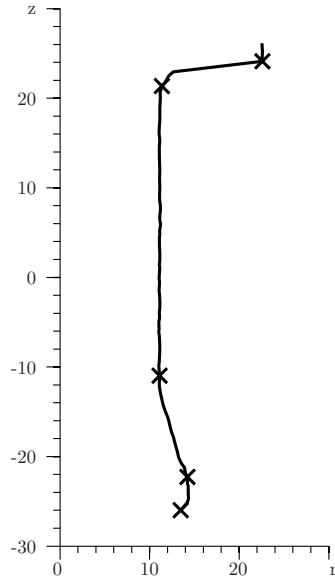


Abbildung 6.7.: Die Kreuze markieren die Grenzen der einzelnen Segmente der Abschnitte

Weiter ist zu unterscheiden, ob der Übergang zwischen der Fläche, für die die projizierbaren Punkte gesucht werden, zur benachbarten Fläche von außen gesehen konkav oder konvex ist, siehe Abbildung 6.8. Diese beiden Varianten der Übergänge erfordern eine unterschiedliche Behandlung der Punkte im Übergangsbereich, wenn ausschließlich die senkrecht projizierbaren Punkte gesucht werden. Dies erfolgt durch Bestimmung halboffener Gebiete, die einerseits durch die Mantellinie des Modells begrenzt sind und an deren Enden durch Halbgeraden, die in den Endpunkten in einem bestimmten Winkel zur Mantellinie beginnen. Für diesen Winkel gilt:

- Bei konvexen Übergängen wird ein rechter Winkel gewählt, denn alle weiter weg liegenden Punkte werden auf den Endpunkt projiziert, siehe Abbildung 6.8.
- Bei konkaven Übergängen wird die Winkelhalbierende zwischen den Mantellinien der beiden Teilflächen verwendet, siehe Abbildung 6.8. Denn die Winkelhalbierende ist der Ort, der von beiden Schenkeln des Ausgangswinkels gleich weit entfernt ist.

Jetzt können die Regeln aufgestellt werden, wie bei den verschiedenen Varianten der möglichen Übergänge vorzugehen ist:

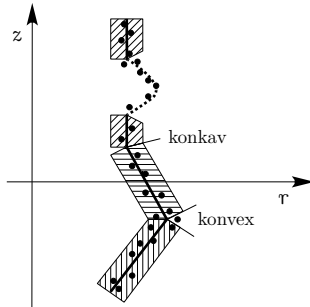


Abbildung 6.8.: Lokale Zuordnung der Messpunkte an den Übergängen der Teilelemente.

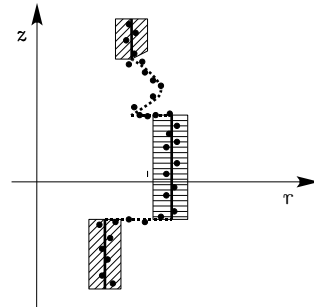


Abbildung 6.9.: Darstellung der Situation bei Sprüngen.

- Bei stetigen Übergängen werden die Gebiete, aus den die Punkte auf die Flächen projiziert werden sollen, nach den oben für die Winkel angegebenen Regeln festgelegt.
- Sind die Übergänge unstetig, ist eine Ähnliche Vorgehensweise möglich. Die Untersuchung, ob es sich um einen konvexen oder konkaven Übergang handelt, kann hierbei aus der benachbarten Fläche bestimmt werden. Dazu werden die beiden Richtungen der Mantellinien im betrachteten Randpunkt verglichen. Sollte es sich bei der benachbarten Fläche um eine gekrümmte Fläche handeln, kann deren Richtung durch einen Tangentenvektor im Endpunkt angenähert werden.

Bei den unstetigen Übergängen mit Sprung im Radius ist zu beachten, dass unter Umständen Punkte zugeordnet würden, die gar nicht zu der einzupassenden Fläche gehören. Dies kann z. B. auftreten, wenn am Übergang zweier Zylinder Punkte auf der dazwischen liegenden kreisringartigen Ebene vorhanden sind, siehe in Abbildung 6.9. Um eine Verfälschung des Einpassergebnisses zu vermeiden, müssen diese Punkte eliminiert werden. Dazu werden alle Punkte, die weiter als ein vorgegebener Wert von der Fläche entfernt sind, eliminiert. Dies kann über die Ausreißerelimination 6.5 geschehen.

6.5. Ausreißerelimination

Als Ausreißer werden in der Messtechnik Werte oder Messpunkte bezeichnet, die nicht zur Auswertung herangezogen werden sollen. Bei der Besteinpassung werden die Messpunkte, die zu weit vom einzupassenden Element entfernt liegen, Ausreißer genannt. Durch entfernen der Ausreißer kann das Ergebnis der Einpassung stabiler gemacht werden und das Einpassergebnis hat geringere Abweichungen von der wahren Form, wenn viele Ausreißerpunkte vorkommen. Dies kann sogar zur Segmentierung von nicht zum Element gehörenden Teilpunktvolken verwendet werden. Dies wurde z. B. in der Arbeit von (Ahn, 2004) umgesetzt.

In dieser Arbeit wird die Ausreißerelimination über die Anwendung einer Schwellwertoperation auf die Abstandswerte der Messpunkte zum Modell umgesetzt. Diese Abstände werden während der Einpassung wiederholt berechnet. Nach einer gewissen Anzahl von Iterationen der Optimierung wird die Ausreißerelimination angewandt, indem alle Punkte, deren Abstand über dem Schwellwert liegen, von den weiteren Schritten der Iteration ausgeschlossen werden.

6.6. Implementierungsbeispiele

Im Folgenden wird anhand von zwei in der Anwendung der Objekterkennung am häufigsten auftretenden Kombinationen von regelgeometrischen Elementen die konkrete Umsetzung der neuen Methode zur Einpassung kombinierter Elemente demonstriert. Insbesondere werden die Lösung des Zuordnungsproblems und die Aufstellung der Jacobi-Matrix dargestellt. Für die numerische Lösung des Optimierungsproblems wird die Funktion RN2G aus der Bibliothek (PORT library) verwendet. Die Funktion sucht den optimalen Parametervektor zur Lösung eines kleinste-Quadrate-Problems und nutzt dazu eine sogenannte Rückwärts-Kommunikation (Gay, 1990). Das bedeutet, dass die Residuen und die Werte der Jacobi-Matrix nicht in der Bibliothek berechnet werden, sondern nur über entsprechende Rückgabewerte die Berechnung der Größen angefordert wird. So kann die Jacobi-Matrix wie in Abschnitt 6.3 beschrieben berechnet und übergeben werden.

6.6.1. Kombination aus mehreren Zylindern

Die implizite Darstellung eines Zylinders im Koordinatenursprung mit Radius r_j lautet:

$$f_j(r_j, \mathbf{x}) = \frac{1}{2} (x^2 + y^2 - r_j^2) = 0, \quad (6.13)$$

Das kombinierte Element sei aus k Zylindern mit Radien r_j mit $j \in (1, \dots, k)$ aufgebaut und damit von k Formparametern abhängig. Jeder Messpunkt kann auf genau eine Teilfläche fallen, also ist jedem Messpunkt genau ein Radius r_i zugeordnet.

Ein wichtiger Schritt zur Einpassung eines kombinierten Elements aus k Zylindern ist die Aufstellung der Jacobi-Matrix. Deren einzelne Zeilen \mathbf{J}_i (6.11) sind jeweils von den einzelnen Messpunkten \mathbf{X}_i abhängig, wobei nur der Teil $\mathbf{J}_{i,f}$ (6.10) direkt von den Formparametern r_j abhängt. In $\mathbf{J}_{i,f}$ wiederum ist nur $\|\nabla f_j\|$ und $\partial f_j / \partial r_1, \dots, \partial f_j / \partial r_k$ von den Formparametern abhängig, mit den Werten

$$\|\nabla f_j\| = r_j \quad \text{und} \quad \frac{\partial f_j}{\partial r_l} = \begin{cases} -r_j & \text{für } l = j \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}.$$

Also steht in den ersten k Einträgen von \mathbf{J}_i genau dann der Eintrag ± 1 , wenn der Punkt \mathbf{X}_i auf die Fläche j projiziert wird, ansonsten steht dort 0. Somit wird nochmals deutlich, dass die Aufstellung der Jacobi-Matrix direkt mit der Lösung des Zuordnungsproblems verknüpft ist. Für die übrigen Teile $\mathbf{J}_{i,r}$ (6.8) und $\mathbf{J}_{i,p}$ (6.9) gehen die einzelnen Radien r_j nur über die Lotfußpunkte $\tilde{\mathbf{X}}_i$ ein.

Auch die Berechnung der Lotfußpunkte $\widetilde{\mathbf{X}}_i$ selbst hängt direkt von der Lösung des Zuordnungsproblems ab. Zu dessen Lösung wird die grobe Lage der Achse des kombinierten Elements herangezogen. Diese wird über die Einpassung eines einzelnen Zylinders mit integrierter Segmentierung bestimmt. Danach wird wie in 6.4.1 beschrieben das globale Zuordnungsproblem gelöst und die Messpunkte in einzelne Klassen eingeteilt, die den einzelnen Flächen entsprechen. Für jede dieser Klassen wird aus dem mittleren Abstand zur Achse ein initialer Radius geschätzt, mit dem die Einpassung gestartet wird. Es ist zu bemerken, dass der Radius des ersten, zur Richtungsbestimmung benutzten Zylinders nicht verwendet wird. Für die Einpassung ist prinzipiell gar keine Modellinformation notwendig, diese wird nur optional bei der Lösung des globalen Zuordnungsproblems genutzt. Das globale und lokale Zuordnungsproblem muss während der Iterationen der Optimierung wiederholt gelöst werden, ebenso wie die Ausreißerelimination, da sich durch die Veränderungen der Parameter auch die Zuordnung der Messpunkte zu den Flächen ändern können.

Die maximale Anzahl der zu bestimmenden Zylinderradien des kombinierten Elements wird in der Implementierung über einen einzigen Parameter vorgegeben. Sind bei der Lösung des globalen Zuordnungsproblems weniger Radien in den Messdaten zu finden, werden die noch offenen Formparameter mit 0 belegt.

6.6.2. Kombination aus Zylindern und Kegeln

Mit dem aus Zylindern und Kegeln aufgebauten kombinierten Element mit insgesamt k wird ein weiteres für die Objekterkennung wichtiges Beispiel gegeben. Hier werden vor allem die Unterschiede zu den nur aus Zylindern aufgebauten Elementen dargestellt. Ein Kegel mit Öffnungswinkel α_j kann in impliziter Form mit folgender Gleichung angegeben werden:

$$f(\alpha_j, \mathbf{x}) = x^2 + y^2 - \left(z \tan \frac{\alpha_j}{2} \right)^2 = 0. \quad (6.14)$$

Der Ort für den Positionsparameter ist dabei an der Spitze gewählt. Diese Parametrisierung ist aber numerisch ungünstig, was zu instabiler Lösungsfindung bei der Optimierung führt (Anthony u. a., 1991). Deshalb wird folgende Darstellung, die auch in (DIN 10360-6, 2009) vorgeschlagen wird, verwendet.

$$f(r_j, \alpha_j, \mathbf{x}) = x^2 + y^2 - \left(r_j - z \tan \frac{\alpha_j}{2} \right)^2 = 0. \quad (6.15)$$

Der Positionsparameter $\mathbf{p}_p^T = (X_0, Y_0, Z_0)$ wird über eine Nebenbedingung am Schwerpunkt festgehalten und r_j ist der Radius des Kreises, der an diesem Punkt senkrecht zur Achse besteht.

Bei der zeilenweisen Aufstellung der Jacobi-Matrix ist wieder der von den Formparametern abhängige Teil $\mathbf{J}_{i,f}$ (6.10) genauer zu betrachten.

Für die Größen ∇f_j und $\partial f_j/\partial\alpha_1, \dots, \partial f_j/\partial\alpha_k, \partial f_j/\partial r_1, \dots, \partial f_j/\partial r_k$ gilt:

$$\nabla f_j = \begin{pmatrix} x \\ y \\ (r_j - z \tan \frac{\alpha_j}{2}) \tan \frac{\alpha_j}{2} \end{pmatrix} \quad (6.16)$$

$$\frac{\partial f_j}{\partial \alpha_l} = \begin{cases} \frac{z}{2} (r - z \tan \frac{\alpha_j}{2}) (1 + \tan^2 \frac{\alpha_j}{2}) & \text{für } l = j \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (6.17)$$

$$\frac{\partial f_j}{\partial r_l} = \begin{cases} -r_j + z \tan \frac{\alpha_j}{2} & \text{für } l = j \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} . \quad (6.18)$$

Damit lässt sich $\mathbf{J}_{i,j}$ aufstellen, wobei in den ersten k Einträgen genau dann ein Wert $\neq 0$ steht, wenn der Punkt \mathbf{X}_i auf die Fläche j projiziert wird.

Für zylindrische Abschnitte gilt $\alpha_j = 0$, womit sich $\partial f_j/\partial\alpha_l = \pm z/2$ und $\partial f_j/\partial r_l = \pm 1$ ergibt. Bei realen Messdaten ist es praktisch unmöglich, dass bei der Einpassung genau der Wert 0 für α gefunden wird. Deshalb wird ein Schwellwert für den Öffnungswinkel vorgegeben, unterhalb dessen $\alpha = 0$ gesetzt wird.

Die Lösung des Zuordnungsproblems erfolgt wie in 6.6.1 mit dem einzigen Unterschied, dass zur Bestimmung der Startrichtung ein Kegel eingepasst wird. Für die Startwerte der Optimierung werden die Radien auf den Mittelwert der Abstände der Messpunkte zur Achse des entsprechenden Abschnitts gesetzt. Für die Winkel wurde 0 als Startwert gewählt.

Kapitel 7.

Leistungsfähigkeit der automatischen Konfiguration der Vorverarbeitungsstrategie

Die Leistungsfähigkeit des entwickelten Verfahrens zur automatischen Konfiguration der Vorverarbeitungsstrategie muss systematisch untersucht werden. Ein Aspekt ist der Einfluss, den unterschiedliche Voreinstellungen der Evolutionsstrategie, wie beispielsweise deren Populationsgröße, ausüben. Von besonderem Interesse ist die Fitnessbewertung. Dabei soll die Leistungsfähigkeit des neu eingeführten Konzepts der Fitnessbewertung anhand von 3-D-Ergebnissen der Lagebestimmung mit der auf 2-D-Auswertung beruhenden Methode verglichen werden. In weiteren Versuchen werden die Einflüsse der verwendeten Daten untersucht.

7.1. Bewertungsmethode der Leistungsfähigkeit

Die automatisch unter Verwendung der Referenzdaten erzeugten Vorverarbeitungsstrategien werden zur Bewertung ihrer Leistungsfähigkeit auf Testdaten angewendet. Die Bewertung der gelieferten Ergebnisse erfolgt nach Kriterien ihrer Eignung für die nachfolgende Lagebestimmung. Dazu werden zuerst alle für eine Lagebestimmung in Frage kommenden Bereiche in der von den Testdaten dargestellten Szene gezählt. Dann werden die Bereiche folgendermaßen klassifiziert und gezählt:

Die Anzahl $s(\text{EP})$ der als echt positiv (EP) bezeichneten Bereiche der tatsächlich greifbaren Objekte wird bestimmt. Die Bereiche, die keine greifbaren Objekte beschreiben, werden als falsch positiv (FP) klassifiziert und in $s(\text{FP})$ summiert. Greifbare Objekte, für die die Vorverarbeitungsstrategie keine Bereiche geliefert hat, werden als falsch negativ (FN) klassifiziert und in $s(\text{FN})$ summiert. Die Zahl $s(\text{EN})$ der aussortierten Bereiche ergibt sich als die Summe der tatsächlich nicht greifbaren Objekte, die als echt negativ (EN) bezeichnet werden. Diese ergaben sich, indem die von der Segmentierung der Vorverarbeitungsstrategie erzeugten Bereiche vor dem Sortierschritt ausgewertet werden.

Daraus lassen sich die folgenden Qualitätsmaße q bestimmen:

Relevanz Dieser Wert berechnet sich als:

$$q_{\text{Rel}} = \frac{s(\text{EP})}{s(\text{EP}) + s(\text{FP})}$$

und hat für die Qualität der Vorverarbeitung eine große Bedeutung. Damit wird ausgesagt, wie viele FP im Verhältnis zu den EP noch vorhanden sind. Ist die Anzahl der FP groß, bedeutet dies eine große Anzahl erfolgloser Versuche der

Objekterkennung und verringert den Nutzen der Vorverarbeitung bezüglich einer Geschwindigkeitssteigerung in der Objekterkennung.

Segreganz Dies wird auch als Trennfähigkeit bezeichnet und durch folgende Formel ausgedrückt:

$$q_{\text{Seg}} = \frac{s(\text{EN})}{s(\text{EN}) + s(\text{FN})}$$

Sensitivität Diese berechnet sich als

$$q_{\text{Sen}} = \frac{s(\text{EP})}{s(\text{EP}) + s(\text{FN})}$$

und wird auch als Empfindlichkeit oder Trefferquote bezeichnet. Der Wert muss aber in Verbindung mit der Relevanz gesehen werden, da es für die Qualität der Vorverarbeitungsstrategie kein Nutzen ist, wenn zwar fast alle für eine Lagebestimmung geeigneten Bereiche geliefert werden, aber gleichzeitig der Wert $s(\text{FP})$ hoch ist.

Spezifität Der nach der Formel

$$q_{\text{Spe}} = \frac{s(\text{EN})}{s(\text{EN}) + s(\text{FP})}$$

berechnete Wert ist ebenfalls für die Qualitätsbeurteilung wichtig. Bei vielen FP, die sich ungünstig auf die Objekterkennung auswirken, ergibt sich ein kleiner Wert.

7.2. Zur Bewertung verwendete Daten

Die Datengrundlage für die Versuche bilden zum einen reale Sensordaten und zum anderen simulierte Sensordaten. Zur Gewinnung der realen Sensordaten wurde ein Lichtschnittsensor eingesetzt. Dessen Tiefenmessbereich beträgt 450 mm mit einer maximalen Auflösung von 0,2 mm. Der Abstand der Messpunkte auf einer Scanlinie ist wie in Abschnitt 2.1.3 beschrieben abhängig vom Tiefenwert und liegt zwischen 0,3 mm und 0,5 mm. Die Profile wurden mit einem Abstand von 1,0 mm aufgenommen. Da die entwickelten Algorithmen auf eine äquidistante laterale Verteilung der Messpunkte angewiesen sind, werden die Rohdaten auf ein äquidistantes Raster gebracht, siehe Abschnitt 2.1.3. Damit ist es auch möglich, Tiefenbilder mit unterschiedlichen Pixelauflösungen zu erzeugen.

Zur Erzeugung der realen Sensordaten wurden Szenen mit Teilen, die der industriellen Produktion entstammen, gebildet. Dabei handelt es sich um folgende Teile:

Schmiedeteil Dieses Teil ist in Abbildung 4.2 dargestellt und besteht hauptsächlich aus zwei Zylindern F_1 und F_3 . Der Übergang zwischen F_1 und F_3 kann durch einen Kegel F_2 angenähert werden. Die Geometriedaten sind in Tabelle 7.1 aufgelistet. Die Teile bestehen aus Stahl und haben eine variierende Oberflächenbeschaffenheit, die sich von verzundert und fast schwarz bis zu metallisch blank bewegt.

Flächentyp	Länge (mm)	Radius 1 (mm)	Radius 2 (mm)
Zylinder F_1	$\ell_1 = 150$	$r_1 = 8,5$	—
Kegel F_2	$\ell_2 = 4$	$r_2 = 8,5$	$R_2 = 13$
Zylinder F_3	$\ell_3 = 28$	$r_3 = 13$	—

Tabelle 7.1.: Geometriedaten des in den Versuchen verwendeten Schmiedeteils

Flächentyp	Länge (mm)	Radius 1 (mm)	Radius 2 (mm)
Zylinder F_1	$\ell_1 = 2,5$	$r_1 = 22,5$	—
Zylinder F_2	$\ell_2 = 35$	$r_2 = 11$	—
Kegel F_3	$\ell_3 = 9$	$r_3 = 11$	$R_3 = 14,5$
Zylinder F_4	$\ell_4 = 4$	$r_4 = 14,5$	—

Tabelle 7.2.: Geometriedaten des in den Versuchen verwendeten Fließpressteils

Abbildung 7.1 zeigt die zur Fitnessbewertung und Verifikation der Ergebnisse verwendeten Tiefenbilder.

Fließpressteil Abbildung 6.3 zeigt das Fließpressteil, dessen Geometrie von einem Zylinder mit anschließendem Kegel dominiert wird. Die genauen Geometriedaten sind in Tabelle 7.2 dargestellt. Die Teile bestehen aus Stahl und besitzen eine durch Sandstrahlen gleichmäßig matte metallische Oberfläche.

7.3. Auswirkungen unterschiedlicher Konstellationen der Population

In Abschnitt 5.2.2 wurden mit der (μ, λ) -Evolutionsstrategie und $(\mu + \lambda)$ -Evolutionsstrategie unterschiedliche Möglichkeiten zur Selektion algorithmisch umgesetzt. Zusätzlich kann im Algorithmus die Anzahl der μ Eltern und λ Kinder variiert werden. Die Leistungsfähigkeit eines evolutionären Algorithmus wird stark von diesen Parametern, die die jeweils verwendete Größe und Erzeugung der Population bestimmen, beeinflusst. In den folgenden Versuchen sollen die Auswirkungen unterschiedlicher Konstellationen der Parameter untersucht werden. Dies soll neben der Auswahl der optimalen Konstellation für weitere Versuche vor allem dazu dienen, festzustellen, ob hier schon Unterschiede zwischen der Fitnessbewertung mit 2-D-Auswertung und 3-D-Auswertung bestehen.

Dieser Versuch wurde mit Datensätzen des Schmiedeteils durchgeführt. Es sollten die Bereiche gefunden werden, die den langen Zylinder F_1 möglichst gut beschreiben und für eine nachfolgende Lagebestimmung geeignet sind. Bei diesem Versuch wurden die von der Evolutionsstrategie durch Mutation auswählbaren Operatoren teilweise eingeschränkt, da hier zuerst die grundsätzlich geeigneten Konstellationen gefunden werden

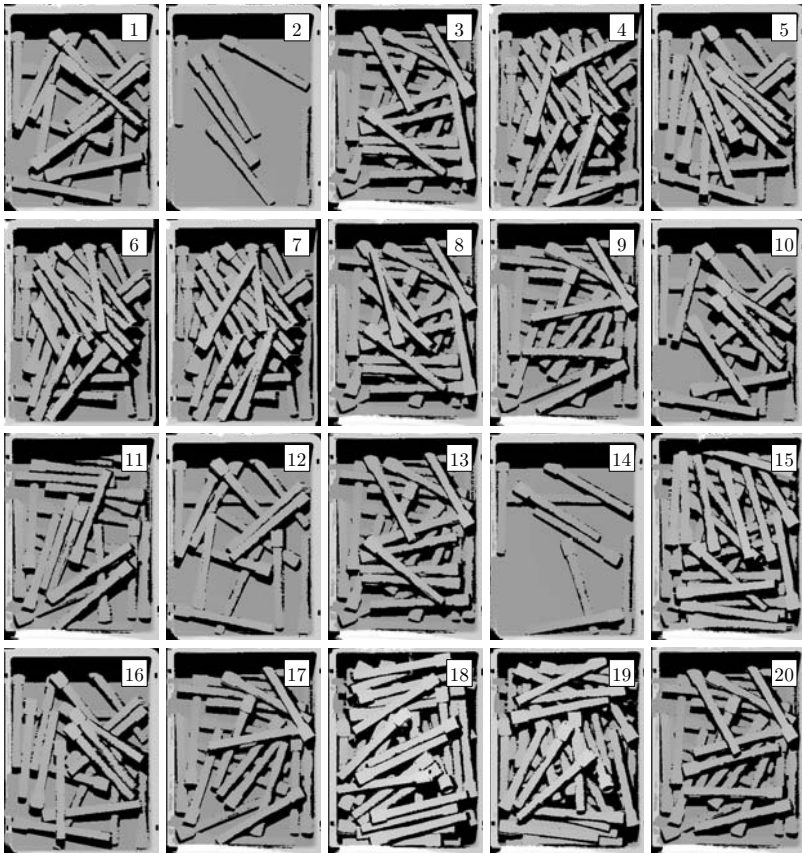


Abbildung 7.1.: Die verwendeten Tiefenbilder

sollten. Zur Auswahl standen ein Medianfilter und ein Mittelwertfilter zur Bildverbesserung, das Bereichswachstumsverfahren zur Segmentierung und der Sortieroperator mit den Parametern 1–13 aus Tabelle A.1.

7.3.1. Einfluss der Populationsgröße

Bei den folgenden Versuchen sollte der Einfluss der Populationsgröße untersucht werden. Konkret wurden Evolutionsstrategien der Ausprägungen (2, 7), (5, 30) und (10, 50) eingesetzt. Die Fitnessbewertung wurde anhand der in Abbildung 7.1 unter 1–3 dargestellten Tiefenbilder durchgeführt. Mit jeder Konstellation wurden 10 Vorverarbeitungsstrategien erzeugt. Deren Leistungsfähigkeit wurde anhand der in Abbildung 7.1

Evolutionstrategie	Sensitivität		Spezifität		Segreganz		Relevanz	
	2-D	3-D	2-D	3-D	2-D	3-D	2-D	3-D
(2, 7)	0,80	0,54	0,70	0,97	0,90	0,87	0,55	0,84
(5, 30)	0,82	0,52	0,81	0,96	0,94	0,79	0,62	0,87
(10, 50)	0,79	0,52	0,81	0,97	0,90	0,81	0,67	0,88

Tabelle 7.3.: Ergebnisse der Qualitätsbewertungen von Vorverarbeitungsstrategien, die mit Evolutionstrategien unterschiedlicher Populationsgrößen erzeugt wurden. Die erreichten Qualitätswerte mit einer 2-D- und 3-D-Fitnessbewertung sind jeweils gegenübergestellt.

unter 6-20 gezeigten Tiefenbilder bewertet. Tabelle 7.3 zeigt die Ergebnisse.

Die erreichten Werte für Sensitivität und Relevanz zeigen bei der Optimierung mit 3-D-Fitnessbewertung eine Verbesserung von der (2, 7)-Evolutionstrategie ausgehend zu den Ausprägungen (5, 30) und (10, 50). Zwischen (5, 30) und (10, 50) ist praktisch keine Verbesserung erkennbar. Deshalb wird im Folgenden für das 3-D-Verfahren eine Evolutionstrategie mit $\mu = 5$ und $\lambda = 30$ als Standard gewählt.

Bei der 2-D-Fitnessbewertung ist eine Steigerung der wichtigen Relevanz mit jeder Vergrößerung der Populationsgröße feststellbar, deshalb wird für weitere Versuche die (10, 50)-Evolutionstrategie gewählt.

Zwischen den Ergebnissen mit 2-D-Fitnessbewertung und den mit 3-D-Fitnessbewertung sind schon hier deutliche Unterschiede zu erkennen, vor allem bei der Sensitivität und der Relevanz. Dies wird nach weiteren Versuchen genauer diskutiert.

7.3.2. Elternselektion

Im folgenden Versuch soll untersucht werden, wie sich die unterschiedliche Behandlung der Eltern bei der Selektion auswirkt. Dazu wird einerseits eine (5, 30)-Evolutionstrategie und eine (5 + 30)-Evolutionstrategie mit 3-D-Fitnessbewertung gewählt. Andererseits kommt eine Kombination von 2-D-Fitnessbewertung jeweils mit einer (10, 50)-Evolutionstrategie und einer (10 + 50)-Evolutionstrategie zum Einsatz. Ansonsten wird wie in Abschnitt 7.3.1 anhand derselben 3 Tiefenbilder die Fitnessbewertung und anhand derselben 15 Tiefenbilder die Bewertung der Leistungsfähigkeit durchgeführt.

Die Ergebnisse des Versuchs sind in Tabelle 7.4 dargestellt. Bei der Methode mit 2-D-Fitnessbewertung lässt sich aus den Qualitätswerten kein Vorteil für eine der beiden Möglichkeiten ableiten. Die Unterschiede sind gering und nicht einheitlich, so ist die Sensitivität besser, die Relevanz schlechter. Wenn zusätzlich die in Tabelle 7.5 gelisteten Standardabweichungen betrachtet werden, bestätigt sich, dass beide Verfahren praktisch die gleiche Leistungsfähigkeit besitzen. Die Unterschiede liegen im Schwankungsbereich.

Bei Verwendung der 3-D-Fitnessbewertung ergeben sich bei der (5 + 30)-Evolutionstrategie sogar sowohl für die Sensitivität als auch für die Relevanz schlechtere Werte. Zudem liegen auch diese im Schwankungsbereich, siehe Tabelle 7.5.

Evolutionstrategie		Sensitivität		Spezifität		Segreganz		Relevanz	
2-D	3-D	2-D	3-D	2-D	3-D	2-D	3-D	2-D	3-D
(10, 50)	(5, 30)	0,79	0,52	0,81	0,96	0,90	0,79	0,67	0,87
(10 + 50)	(5 + 30)	0,81	0,47	0,78	0,94	0,91	0,77	0,66	0,82

Tabelle 7.4.: Gegenüberstellung der Qualitätsbewertungen von Vorverarbeitungsstrategien resultierend aus einer (μ, λ) - und $(\mu + \lambda)$ -Evolutionstrategie, jeweils mit einer 2-D- und 3-D-Fitnessbewertung.

Evolutionstrategie		Sensitivität		Spezifität		Segreganz		Relevanz	
2-D	3-D	2-D	3-D	2-D	3-D	2-D	3-D	2-D	3-D
(10, 50)	(5, 30)	0,02	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02	0,08
(10 + 50)	(5 + 30)	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,05

Tabelle 7.5.: Die zu den Werten aus Tabelle 7.4 gehörenden Standardabweichungen.

In den insgesamt 20 durchgeführten Versuchen mit der $(\mu + \lambda)$ -Evolutionstrategie hat sich ein weiterer bekannter Nachteil bestätigt. Mehrmals ist die Optimierung in einem Nebenmaximum stehen geblieben. So konnte beispielsweise in einem Versuch selbst nach 1082 Iteration das Optimum nicht gefunden werden, alle Individuen besaßen über hunderte Generationen denselben Fitnesswert. Auf Grund dieser Ergebnisse wird im Folgenden die (μ, λ) -Evolutionstrategie eingesetzt.

7.3.3. Rekombination

Als Erweiterung der klassischen Evolutionstrategie wurde in Abschnitt 5.2.5 die Rekombination eingeführt. Der folgende Versuch soll zeigen, ob dadurch unterschiedliche Ergebnisse entstehen. Eingesetzt wird eine (5, 30)-Evolutionstrategie mit 3-D-Fitnessbewertung. Die Leistungsfähigkeit wird wieder nach derselben Vorgehensweise und mit denselben Daten wie schon in Abschnitt 7.3.1 und 7.3.2 bestimmt. Damit ergeben sich die in Tabelle 7.6 dargestellten Ergebnisse, die den Ergebnissen aus den Versuchen ohne Verwendung der Rekombination gegenübergestellt werden.

Die Ergebnisse zeigen eine deutliche Verbesserung der Leistungsfähigkeit der unter Verwendung der Rekombination erzeugten Vorverarbeitungsstrategien bei der Relevanz. Hierbei ist sogar die Varianz mit 0,06 kleiner als bei den ohne Rekombination erzeugten Vorverarbeitungsstrategien, wo der Wert 0,08 beträgt. Dies bedeutet eine bessere Konstanz der Ergebnisqualität.

Aufgrund dieser Tatsache stellt die Verwendung der Rekombination eine sinnvolle Erweiterung der klassischen Evolutionstrategie dar. Deshalb soll in den weiteren Versuchen hauptsächlich die Variante mit Rekombination zum Einsatz kommen. Nach den bisherigen Versuchen kann auch der Wert für g_{EP}, g_{FP} aus Abschnitt 5.3.2 festgelegt

Evolutionstrategie	Sensitivität		Spezifität		Segreganz		Relevanz	
(5, 30) mit Rekombination	0,51	(0,04)	0,97	(0,02)	0,78	(0,02)	0,91	(0,06)
(5, 30) ohne Rekombination	0,52	(0,03)	0,96	(0,03)	0,79	(0,03)	0,87	(0,08)

Tabelle 7.6.: Hier sind die Ergebnisse der Algorithmusvariante mit Rekombination im Vergleich zu den Ergebnissen ohne Rekombination dargestellt. In Klammern sind die Varianzen angegeben, die bei beiden Varianten eine große Ähnlichkeit besitzen.

Auflösung (mm)	Sensitivität		Spezifität		Segreganz		Relevanz	
	2-D	3-D	2-D	3-D	2-D	3-D	2-D	3-D
1	0,79	0,52	0,81	0,96	0,90	0,79	0,67	0,87
2	0,69	0,51	0,65	0,91	0,72	0,75	0,63	0,81
3	0,58	0,39	0,65	0,74	0,61	0,56	0,64	0,63

Tabelle 7.7.: Gegenüberstellung der Qualitätsbewertungen von Vorverarbeitungsstrategien, die für Sensordaten unterschiedlicher lateraler Auflösungen erzeugt wurden.

werden. Für g_{EP} und g_{FP} hat sich der Wert 1 bewährt.

7.4. Einflüsse der Ausgangsdaten auf die erzeugte Vorverarbeitungsstrategie

Die folgenden Versuche sollen zeigen, wie gut die erzeugten Vorverarbeitungsstrategien jeweils an die Ausgangsdaten angepasst sind. Es sollen wieder die Bereiche gefunden werden, die den langen Zylinder F_1 des Schmiedeteils beschreiben.

7.4.1. Auswirkungen verschiedener lateraler Sensorauflösungen

Die Auswirkungen von unterschiedlichen lateralen Auflösungen der Sensordaten und damit unterschiedlich dichte Abtastungen der Szene mit den Objekten sollen ergründet werden. Die hierzu verwendeten Tiefenbilder werden erzeugt, indem die Ausgangsdaten auf ein äquidistantes Raster von 1 mm, 2 mm und 3 mm umgerechnet werden, womit sich Pixelauflösungen von 365×394 , 182×197 und 122×131 ergeben. Zur Erzeugung der Vorverarbeitungsstrategien kommen Evolutionsstrategien mit Rekombination sowie 2-D-Fitnessbewertung und 3-D-Fitnessbewertung zum Einsatz. Tabelle 7.7 listet die erzielten Ergebnisse auf.

Zum Vergleich der Leistungsfähigkeit wird wieder die Relevanz betrachtet. Diese erreicht bei der 3-D-Fitnessbewertung für Auflösungen von 1 mm und 2 mm sehr gute Werte, die darauf hindeuten, dass sich die Vorverarbeitungsstrategie an die ausgehend von 1 mm Auflösung halbierte Pixelauflösung gut anpasst.

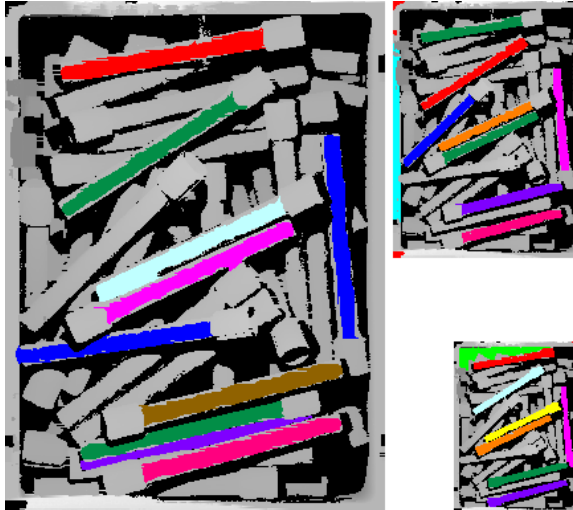


Abbildung 7.2.: Links ist das Ergebnis einer Vorverarbeitungsstrategie zur Suche nach den langen Zylindern bei einer lateralen Auflösung von 1 mm gezeigt, rechts oben bei 2 mm und rechts unten bei 3 mm.

Bei einer Auflösung von 3 mm geht der Wert für die Relevanz zurück auf die Größe, die mit der 2-D-Fitnessbewertung erreicht werden kann. Ein Grund für den Rückgang ist, dass bei diesen geringen Auflösungen die zur Fitnessbewertung verwendete Einpassung auch bei eigentlich geeigneten Bereichen aufgrund der für eine Besteinpassung zu geringen Anzahl von Punkten scheitert.

Auch bei Verwendung der 2-D-Fitnessbewertung kann eine gute Anpassung auf dem für diese Bewertungsmethode typischen niedrigeren Niveau beobachtet werden. Es ist sogar eine recht gute Konstanz der Relevanz vorhanden, vor allem in Richtung zu der sehr niedrigen lateralen Auflösung des Tiefenbildes von 3 mm. Abbildung 7.2 zeigt die Ergebnisbilder zu den drei Auflösungsstufen, die leicht verkleinert im Verhältnis zu den Originalauflösungen dargestellt sind.

7.4.2. Auswirkungen von Rauschen in den Tiefenwerten

Die zu erzeugenden Vorverarbeitungsstrategien beinhalten im ersten Schritt Operatoren zur Bildverbesserung, siehe Abbildung 4.1. In den folgenden Versuchen wird untersucht, inwiefern sich der Rauschanteil in den Ausgangsdaten auf die Operatoren zur Bildverbesserung und ihre Parameter auswirkt und wie gut die entstandene Vorverarbeitungsstrategie an die zu verarbeitenden Daten angepasst ist. Verwendet wird eine (5, 30)-Evolutionstrategie mit 3-D-Fitnessbewertung und Rekombination. Für die Evolutionstrategie wurde vorgegeben, dass höchstens drei Glättungsfilter eingesetzt

werden dürfen, eine Mindestanzahl wurde nicht vorgegeben. Ausgewertet werden sollte, wie viele Filter in Abhängigkeit vom Grad des Rauschens tatsächlich verwendet werden.

Die Datengrundlagen für die Versuche bilden zum einen die von realen Sensoren erzeugten Tiefenbilder, deren Tiefenwerte $z_{i,j}$ mit zusätzlichem Rauschen versehen werden. Zum anderen bietet sich hier die Verwendung simulierter Tiefenbilder an, da hierbei definierte Zustände von keinem Rauschen bis zu sehr starkem Rauschen erzeugt werden können. Gefunden werden sollte der Zylinder F_1 des Schmiedeteils.

In den Versuchen kommen zwei verschiedene Arten von Rauschen zum Einsatz. Zum einen das weiße Rauschen, das wie in Formel 7.1 beschrieben erzeugt wird. Hierbei bedeutet p_k die Wahrscheinlichkeit, dass das Pixel $z_{i,j}$ verändert wird. Zur Erzeugung werden für jedes $z_{i,j}$ zwei gleichverteilte Zufallszahlen $v_{i,j}$ und $w_{i,j}$ aus $[0, 1]$ erzeugt.

$$z_{i,j} = \begin{cases} z_{i,j} & \text{wenn } v_{i,j} > p_k \\ 0 & \text{wenn } v_{i,j} \leq p_k \text{ und } w_{i,j} \leq 0,5 \\ 1000 & \text{wenn } v_{i,j} \leq p_k \text{ und } w_{i,j} > 0,5 \end{cases} \quad (7.1)$$

Zum anderen wird Gaußsches Rauschen verwendet, das für jedes Pixel nach Formel

$$z_{i,j} = z_{i,j} + \sigma_k n_{i,j} \quad (7.2)$$

generiert wird, mit einer $n_{i,j} \sim \mathcal{N}(0, \sigma_k)$ verteilten Zufallszahl.

Bei Sensordaten mit keinem oder geringem Rauschen bewirken Glättungsfilter mit geringer Glättungswirkung praktisch keine Auswirkungen auf die von der Vorverarbeitungsstrategie erzeugten Bereiche und damit auf deren Fitnessbewertung. Somit würden auch in diesen Fällen zufallsbedingt durch die Initialisierung und Mutation oft Glättungsfilter in die Vorverarbeitungsstrategie aufgenommen, wodurch die Aussagekraft der Versuche verringert würde. Die in Abschnitt 5.3.3 eingeführte die Ausführungszeit berücksichtigende Fitnessbewertung bietet hier einen Ausweg. Glättungsfilter, vor allem Medianfilter mit großen Filterkernen, führen zu längeren Ausführungszeiten. Dadurch würden Vorverarbeitungsstrategien mit starker Filterung in der Fitnessbewertung benachteiligt. Wenn also die Filterung zur Verbesserung der Fitness keinen nennenswerten Beitrag leistet, sollten diese Vorverarbeitungsstrategien mit unnötiger oder zu starker Filterung aus der Population verschwinden.

Zur Auswertung wurde in einer Spalte „0“ gezählt, wie viele Vorverarbeitungsstrategien jeweils keinen Filter beinhielten. Da maximal 3 Filter verwendet werden durften, wurde in Spalten „1“–„3“ gezählt, wie viele Vorverarbeitungsstrategien an diesen Stellen in ihrem Ablauf einen Median- oder Mittelwertfilter einsetzen. Zusätzlich wurde die zugehörige durchschnittliche Größe der verwendeten Filterkerne bestimmt.

Reale Daten

Für die Versuche zu den Auswirkungen von Rauschen bei realen Daten finden die in Abbildung 7.1 dargestellten Tiefenbilder Verwendung. Diese werden mit weißem Rauschen beaufschlagt, wobei für p_k aus Formel 7.1 die Werte $p_1 = 0$, $p_2 = 0,1$,

7.4. Einflüsse der Ausgangsdaten auf die erzeugte Vorverarbeitungsstrategie

p_k	ØAnzahl Median				ØAnzahl Mittelwert				Ø Median Größe	Ø Mittelwert Größe	
	0	1	2	3	0	1	2	3	—	x	y
0	10	0	0	0	9	1	0	0	0	3,0	3,0
0,1	8	2	0	0	10	0	0	0	1,5	0	0
0,25	8	2	0	0	8	1	1	0	1,5	8,0	6,0
0,4	0	9	3	3	7	1	2	0	3,2	3,3	1,6
0,55	0	10	8	4	7	1	1	1	1,9	6,3	5,9

Tabelle 7.8.: Darstellung der verwendeten Filter in Abhängigkeit vom Anteil p_k des weißen Rauschens. Gezählt wurden bei jeweils 10 erzeugten Vorverarbeitungsstrategien die durchschnittlichen Anzahlen der verwendeten Filter.

$p_3 = 0,25$, $p_4 = 0,4$ und $p_5 = 0,55$ zum Einsatz kommen. Mit jedem dieser Werte werden 10 Vorverarbeitungsstrategien erzeugt. Die Auswertungen sind in Tabelle 7.8 aufgelistet.

Für reale Daten mit weißem Rauschen ist Tabelle 7.8 zu entnehmen, dass sich die Vorverarbeitungsstrategie offensichtlich an das Rauschen der Ausgangsdaten anpasst. So wird bei $p_1 = 0$ kein Medianfilter eingesetzt und nur in einem Fall ein Mittelwertfilter, der aber aufgrund seiner kleinen Filtermaskengröße kaum Auswirkungen auf das Ergebnis haben dürfte. Zwischen $p_3 = 0,25$ und $p_4 = 0,4$ liegt die Grenze, über der es wohl ohne Filterung nicht mehr möglich ist, eine Vorverarbeitungsstrategie mit der geforderten Güte zu erzielen. Es wird keine Vorverarbeitungsstrategie mehr ohne mindestens einen Medianfilter aufgebaut. Zwischen $p_4 = 0,4$ und $p_5 = 0,55$ sind deutliche Unterschiede zu erkennen. Ist das Rauschen wie bei p_4 geringer, so reicht oft ein Medianfilter mit einem großen Filterkern von einem durchschnittlichen Radius von 3,2, um eine gute Vorverarbeitungsstrategie zu erzeugen. Ist das Rauschen noch größer, so ist es günstiger, mehrere Filter mit kleinerem durchschnittlichen Radius von 1,9 nacheinander einzusetzen.

Simulierte Daten

Mit den simulierten Daten sollten die Auswirkungen von Gaußischem Rauschen auf die erzeugten Vorverarbeitungsstrategien untersucht werden. Das Rauschen nach Formel 7.2 wurde mit Standardabweichungen von $\sigma_1 = 0$, $\sigma_2 = 0,2$, $\sigma_3 = 0,5$ und $\sigma_4 = 1$ erzeugt.

Die von den 10 erzeugten Vorverarbeitungsstrategien verwendeten Filter sind in Tabelle 7.9 zusammengefasst.

Bei der Verwendung simulierter Daten bei Gaußischem Rauschen ist das Ergebnis weniger eindeutig als bei den Versuchen mit weißem Rauschen. Bei $\sigma_1 = 0$ werden im Vergleich zu größeren Werten für σ_k bei 9 erzeugten Vorverarbeitungsstrategien keine Medianfilter verwendet. Aus den Ergebnissen bei größeren Werten als $\sigma_1 = 0$ lassen

σ_k	∅Anzahl Median				∅Anzahl Mittelwert				∅ Median	∅ Mittelwert	
									Größe	Größe	
	0	1	2	3	0	1	2	3	—	x	y
0	9	1	0	0	8	2	0	0	2,0	4,5	8,0
0,2	6	4	1	0	9	1	0	0	3,2	5,0	2,2
0,5	6	4	1	1	8	2	0	0	3,0	5,0	3,3
1,0	6	4	1	0	9	1	0	0	1,6	2,0	3,1

Tabelle 7.9.: Die in jeweils 10 erzeugten Vorverarbeitungsstrategien verwendeten Filter in Abhängigkeit vom Anteil σ_k des Gaußschen Rauschens. Gezählt wurden die durchschnittlichen Anzahlen der verwendeten Filter.

sich aber praktisch keine Differenzen feststellen. Die Gründe dafür sind zunächst unklar und müssen nach weiteren Versuchen nochmals betrachtet werden.

7.5. Anpassungsfähigkeit an unterschiedliche Geometrielemente

Wichtig für die praktische Anwendung ist, wie gut die Vorverarbeitungsstrategie die Bereiche der gesuchten Geometrielemente findet. In den folgenden Versuchen kommen die um die Rekombination erweiterten Evolutionsstrategien sowohl mit 2-D-Fitnessbewertung als auch mit 3-D-Fitnessbewertung zum Einsatz. Damit soll die Leistungsfähigkeit bezüglich der Suche nach Bereichen unterschiedlicher Geometrielemente an realen Testteilen untersucht werden.

7.5.1. Schmiedeteil

Das Schmiedeteil besteht hauptsächlich aus zwei Zylindern F_1 und F_3 , siehe Tabelle 7.1. Im Folgenden wird systematisch untersucht, wie gut jeweils die Bereiche des langen und des kurzen Zylinders gefunden werden. Weiter wird versucht, mithilfe der 3-D-Fitnessbewertung auf Basis der Einpassung kombinierter Elemente Bereiche, die das gesamte Objekt beschreiben, zu finden.

Langer Zylinder F_1

Für die Ergebnisse der Suche nach Bereichen des Zylinders F_1 wird auf Abschnitt 7.3.1 und 7.3.2 verwiesen. Dort wurden schon ausgiebige Untersuchungen sowohl mit 2-D-Fitnessbewertung als auch mit 3-D-Fitnessbewertung durchgeführt. Ergebnisbilder mit Ausgangsdaten unterschiedlicher Auflösungen sind in Abbildung 7.2 zu sehen.

Kurzer Zylinder F_3

In diesem Versuch sollen die Bereiche des Zylinders F_3 gefunden werden. Dabei soll die Leistungsfähigkeit der 2-D-Fitnessbewertung mit einer (10, 50)-Evolutionsstrate-

Geometrielement	Sensitivität		Spezifität		Segreganz		Relevanz	
	2-D	3-D	2-D	3-D	2-D	3-D	2-D	3-D
F_1	0,79	0,52	0,81	0,96	0,90	0,79	0,67	0,87
F_3	0,81	0,52	0,50	0,90	0,91	0,86	0,33	0,65

Tabelle 7.10.: Vergleich der Leistungsfähigkeit von Vorverarbeitungsstrategien zur Suche nach Bereichen der langen Zylinder F_1 und der kurzen Zylinder F_3 des Schmiedeteils, jeweils mit 2-D- und 3-D-Fitnessbewertung.

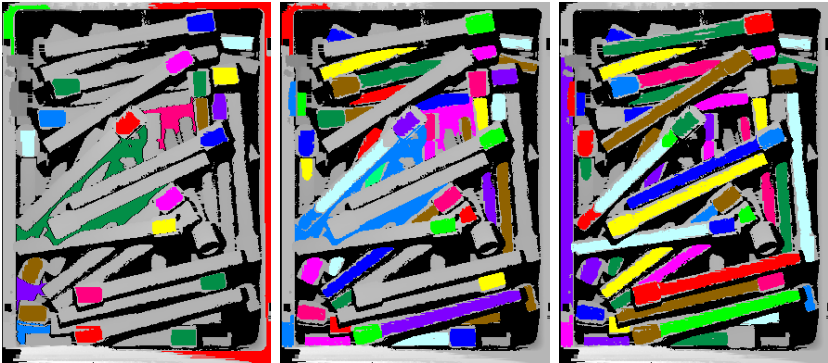


Abbildung 7.3.: Typische Ergebnisse von Vorverarbeitungsstrategien, die eine 2-D-Fitnessbewertung verwenden. Der Anteil von FP-Bereichen ist sehr hoch.

gie und die Leistungsfähigkeit der 3-D-Fitnessbewertung mit einer (5,30)-Evolutionsstrategie bestimmt werden, jeweils mit Rekombination. Die verwendeten Tiefenbilder entsprechen den in Abschnitt 7.3.1 verwendeten. In Tabelle 7.10 sind die Ergebnisse gegenübergestellt.

Die 3-D-Fitnessbewertung führt zu einer guten Leistungsfähigkeit, die wichtige Relevanz erreicht einen guten und brauchbaren Wert. In Abbildung 7.4 sind drei typische Ergebnisbilder einer Vorverarbeitungsstrategie gezeigt. Bei Verwendung der 2-D-Fitnessbewertung ist das Ergebnis deutlich schlechter, die Relevanz hat einen sehr niedrigen Wert, was durch die extrem hohe Anzahl von FP-Bereichen hervorgerufen wird. Dies ist auch aus Abbildung 7.3 zu erkennen.

Beide Zylinder mit kombiniertem Element

Die Fitnessbewertung auf Basis von Ergebnissen der Einpassung von kombinierten Elementen soll genutzt werden, um Bereiche, die gemeinsam den Zylinder F_1 und F_3 beschreiben, zu finden. In den Versuchen wurde eine (5,30)-Evolutionsstrategie mit Rekombination verwendet und die Tiefenbilder wie in Abschnitt 7.3.1 benutzt. Zur

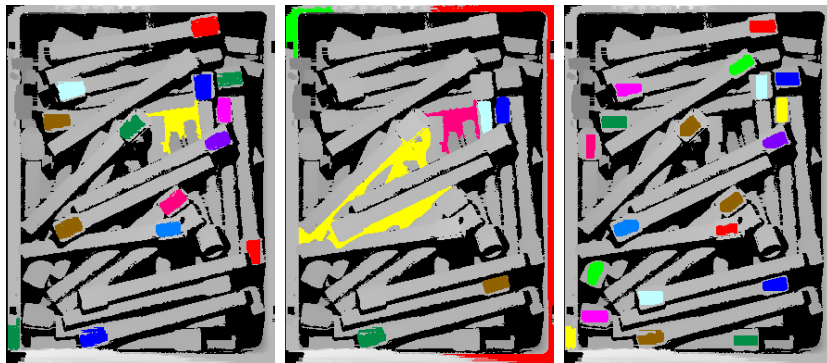


Abbildung 7.4.: Die Ergebnisse, die von der Vorverarbeitungsstrategie bei Anwendung der 3-D-Fitnessbewertung erzielt werden. Hier ist der Anteil der FP-Bereiche sehr gering.

Evolutionsstrategie	Sensitivität	Spezifität	Segreganz	Relevanz
(5, 30) ohne Rekombination	0,79 (0,02)	0,93 (0,02)	0,95 (0,01)	0,75 (0,04)

Tabelle 7.11.: Ergebnisse resultierend aus Vorverarbeitungsstrategien mit Fitnessbewertung auf Basis einer kombinierten Einpassung von zwei Zylindern. In Klammern sind die zugehörigen Standardabweichungen angegeben.

Bewertung der Fitness wurde die Einpassung eines kombinierten Elements, aufgebaut aus zwei Zylindern F_1 und F_3 mit dem Abstand der Länge von F_2 nach der Geometriebeschreibung aus Tabelle 7.1 verwendet.

Die Fitnessbewertung auf Basis der Einpassergebnisse kombinierter Elemente führt zu Vorverarbeitungsstrategien, die gut an die Aufgabenstellung angepasst sind, wie Tabelle 7.11 zeigt. Für die Relevanz wird ein guter Wert erreicht. Dies wird durch die Abbildung 7.5 anschaulich bestätigt.

7.5.2. Fließpressteil

Die Leistungsfähigkeit der automatischen Konfiguration der Vorverarbeitungsstrategie sollte in einem weiteren Versuch anhand des in seiner Geometrie in Tabelle 7.2 beschriebenen Fließpressteils bewertet werden. Dabei kam die 3-D-Fitnessbewertung auf Basis des dominierenden Zylinders F_2 zum Einsatz. Es wurde eine (5,30)-Evolutionsstrategie mit Rekombination verwendet. Die Ergebnisse aus den Versuchen sind in Tabelle 7.12 dargestellt.

Auch hier werden für die Objekterkennung brauchbare Werte für die Relevanz erreicht. In Abbildung 7.6 sind die Ergebnisbereiche von vier erzeugten Vorverarbeitungsstrategien dargestellt.

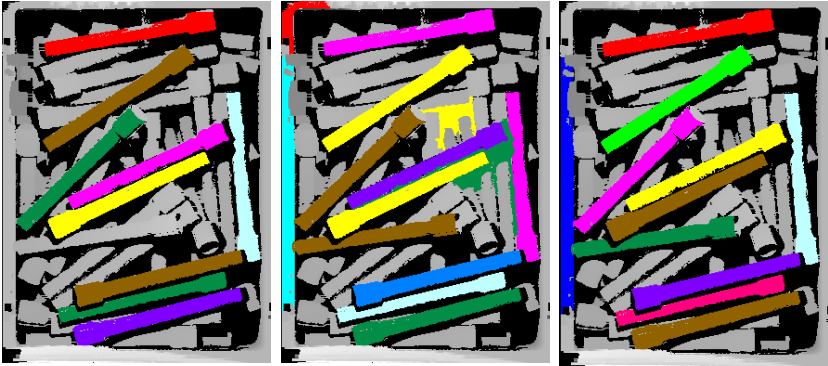


Abbildung 7.5.: Die Ergebnisse, die von der Vorverarbeitungsstrategie bei Anwendung der 3-D-Fitnessbewertung auf Basis der Einpassung kombinierter Elemente erzielt werden.

Fitnessbewertung	Sensitivität		Spezifität		Segreganz		Relevanz	
Einzelzylinder	0,42	(0,02)	0,83	(0,02)	0,70	(0,01)	0,63	(0,06)

Tabelle 7.12.: Ergebnisse der Suche nach dem Zylinder F_2 des Fließpressteils.

7.6. Vergleich simulierte Daten – reale Daten

In Abschnitt 5.3.1 wurde die Möglichkeit geschaffen, simulierte Tiefenbilder zur Fitnessbewertung zu verwenden. Zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit dieser Alternative fand das Schmiedeteil Verwendung. Gesucht wurden die Bereiche des langen Zylinders F_1 . Für die erzeugte Szene wurden 50 Objekte über die Simulation aufgehäuft, siehe Abbildung 7.7. Die simulierten Tiefenbilder wurden sowohl ohne jegliches Rauschen als auch mit Gaußschem Rauschen mit $\sigma = 0,5$ erstellt. Zur Optimierung wurde die (5, 30)-Evolutionsstrategie mit 3-D-Fitnessbewertung und Rekombination eingesetzt.

Abbildung 7.8 zeigt die von einer automatisch erzeugten Vorverarbeitungsstrategie gelieferten Bereiche im simulierten Tiefenbild. Die auf dieser Datenbasis generierten Vorverarbeitungsstrategien müssen anhand von realen Sensordaten validiert werden, um die Tauglichkeit für die reale Anwendung festzustellen. Dazu wurden die Tiefenbilder 6–20 aus Abbildung 7.1 zur Bewertung herangezogen.

In Tabelle 7.13 sind die Ergebnisse für Relevanz und Spezifität im Vergleich zu Ergebnissen, die auf Basis von realen Daten erzeugt wurden, dargestellt. Auffällig ist die extreme Schwankung der Qualität bei den simulierten Daten, was sich besonders bei der Relevanz in Form einer großen Standardabweichung äußert. Dies ist vor allem bei der Konfiguration der Vorverarbeitungsstrategie mit simulierten Daten ganz ohne Rauschen der Fall. Bei Anwendung dieser Vorverarbeitungsstrategie auf reale Daten können extrem gute wie auch ausgesprochen schlechte Ergebnisse entstehen, siehe Spal-



Abbildung 7.6.: Die Ergebnisse, die von der Vorverarbeitungsstrategie bei Anwendung der 3-D-Fitnessbewertung erzielt werden. Hier ist der Anteil der FP-Bereiche sehr gering.



Abbildung 7.7.: Durch Simulation erzeugtes Tiefenbild.

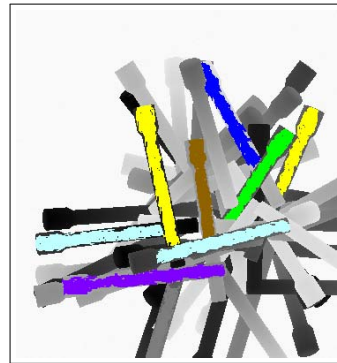


Abbildung 7.8.: Von einer automatisch erzeugten Vorverarbeitungsstrategie gelieferte Bereiche.

te „Min“ und „Max“ in der ersten Zeile der Tabelle 7.13. Einerseits werden fast alle gesuchten sichtbare Bereiche ganz ohne FP gefunden. Andererseits kommt auch der Fall vor, dass bei den zum Überprüfen der Leistungsfähigkeit verwendeten 15 Tiefenbildern in keinem ein EP Bereich gefunden wurde.

Werden die simulierten Daten mit Rauschen erzeugt, bessert sich die Situation, jedoch sind die Schwankungen immer noch sehr groß. Ein Grund für die starken Schwankungen ist sicherlich die relativ einfache Erzeugung der simulierten Daten. Denn dabei findet bisher die Physik, wie die Objekte liegen können, keine Beachtung. Dies dürfte auch der Grund sein, weshalb in Abschnitt 7.4.2 die Aussagekraft der Versuche mit simulierten Daten verringert wurde.

Evolutionstrategie	Relevanz				Spezifität			
	Mittel	Std-Abw.	Min	Max	Mittel	Std-Abw.	Min	Max
Simulert $\sigma_1 = 0$	0,51	0,11	0,00	0,96	0,87	0,05	0,99	0,49
Simulert $\sigma_1 = 0$	0,71	0,13	0,25	0,91	0,93	0,02	0,87	0,99
Real	0,91	0,06	0,71	1,00	0,97	0,02	0,91	1,00

Tabelle 7.13.: Vergleich von Relevanz und Spezifität der Ergebnisse von Vorverarbeitungsstrategien, die auf Basis simulierter Tiefenbilder und realer Tiefenbilder erzeugt wurden. Angegeben ist der Mittelwert (Mittel), die Standardabweichung (Std-Abw.), Minimum (Min) und Maximum (Max).

7.7. Versuche mit erweiterten Wertebereichen

In den bisherigen Versuchen wurden die Operatoren, die von der Evolutionstrategie zum Aufbau der Vorverarbeitungsstrategie verwendet werden dürfen, aus Rechenzeitgründen bei der großen Anzahl der Versuche eingeschränkt. Im Folgenden werden die Ergebnisse von einzelnen Versuchen beschrieben, bei den die zulässigen Bereiche der Parameter und die Auswahl an Operatoren deutlich erweitert wurden. So wurden z. B. Opening- und Closing-Operatoren zur Anwendung auf die in der Segmentierung und Sortierung entstandenen Bereiche zugelassen und bei dem für die Sortierung wichtigen Parameter für das Sortierkriterium aus Tabelle A.1 wurden die Parameter 1–33 zugelassen. Weitere Versuche wurden mit einer Auswahlmöglichkeit aus den Parametern 39–41 und 48–51 vorgenommen.

Beispielsweise werden beim Operator für das Bereichswachstum für einen bestimmten Parameter nur mit Werten zwischen 1 und 5 brauchbare Vorverarbeitungsstrategien erzeugt. Der zulässige Bereich für diesen Parameter wurde für diese Versuche auf 1–50 festgelegt. Nach entsprechend längerer Laufzeit wurde bei einer Auflösung des Tiefenbildes von 365×394 der Parameterwert zwischen 1 und 5 gefunden. Bei einer Auflösung von 122×131 mit 2-D-Fitnessbewertung wurden nach durchschnittlich mehreren hundert Iterationen immer Werte von 1 gefunden. In Tests mit von Hand gesetzten Werten wurde festgestellt, dass keine größeren Werte zu brauchbaren Ergebnissen führen.

In weiteren Versuchen wurden die schwieriger mit hoher Qualität zu findenden Bereiche der kurzen Zylinder F_1 des Schmiedeteils gesucht. Hier zeigte sich, dass diese bei einer größeren Definitionsmenge der Operatoren genau so gut gefunden werden. Es ist jedoch eine deutlich längere Laufzeit von bis zu mehreren Stunden des evolutionären Algorithmus notwendig.

Ein weiterer Versuch wurde aus Laufzeitgründen mit den Tiefenbildern des Schmiedeteils mit einer lateralen Auflösung von 3 mm in Kombination mit 2-D-Fitnessbewertung durchgeführt. Hier konnte nach durchschnittlich mehreren hundert Iterationen auch bei sehr weit über die benötigten Parameterwerte ausgedehnten zulässigen Wertebereichen gute Ergebnisse erzielt werden.

7.8. Bewertung und Diskussion der Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Versuche im Überblick und zusammenfassend bewertet und diskutiert. Das wichtigste Kriterium zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit ist die Eignung der von der Vorverarbeitungsstrategie gelieferten Bereiche für die Objekterkennung. Daran müssen sich die entwickelten Varianten des automatischen Konfigurationsverfahrens messen lassen.

7.8.1. Leistungsfähigkeit der Varianten der Evolutionsstrategien

In den Versuchen wurden die Varianten der in dieser Arbeit entwickelten Evolutionsstrategien zur automatischen Erzeugung von Vorverarbeitungsstrategien in ihrer Leistungsfähigkeit verglichen. Es zeigte sich in Abschnitt 7.3.1, dass große Populationen zu einer besseren Ergebnisqualität führen. So verbessert sich die Relevanz um 22% bei einer (10, 50)-Evolutionsstrategie anstatt einer (2, 7)-Evolutionsstrategie bei der 2-D-Fitnessbewertung. Weiter kann festgehalten werden, dass zusammen mit der 3-D-Fitnessbewertung im Vergleich zur 2-D-Fitnessbewertung kleinere Populationen notwendig sind.

Evolutionsstrategien vom Typ $(\mu+\lambda)$ zeigten die Schwäche, dass sie unter Umständen in einem Nebenmaximum verharren. Dieses kann auch praktisch nicht mehr verlassen werden, da alle Individuen die selbe Fitness besitzen. Dazu trägt die 1/5 Erfolgsregel (siehe Abschnitt 5.2.4) bei, da dadurch bei lauter gleichen Individuen die Schrittweite auf niedrigem Wert konstant bleibt und damit die Mutationen so klein sind, dass das Nebenmaximum nicht verlassen werden kann.

Die Erweiterung der Evolutionsstrategie um die Rekombination hat zu Verbesserungen bei der Leistungsfähigkeit der erzeugten Vorverarbeitungsstrategien geführt. Daraus lässt sich folgern, dass diese Erweiterung der klassischen Evolutionsstrategie sinnvoll ist.

7.8.2. Leistungsfähigkeit der unterschiedlichen Bewertungsmethoden

Die Versuche haben gezeigt, dass die 3-D-Fitnessbewertung durchweg Vorteile bei der erzielten Ergebnisqualität gegenüber der 2-D-Fitnessbewertung besitzt, siehe auch (Stotz u. Verl, 2010). Bei der Relevanz, dem für die Vorverarbeitung zur Objekterkennung wichtigen Wert, konnte bei allen Versuchen ein deutlich besseres Ergebnis erzielt werden. So ist der beste mit 3-D-Fitnessbewertung erreichte Wert für die Relevanz um 36% besser als der beste Wert mit 2-D-Fitnessbewertung.

Dafür gibt es mehrere Gründe. Der wichtigste dürfte sein, dass bei der 2-D-Fitnessbewertung nur die Referenzbereiche mit den von der Segmentierung stammenden Bereichen verglichen werden. Über Bereiche, deren Schnitt mit den Referenzbereichen leer ist, kann keine Aussage gemacht werden, ob sie echt positiv (EP) oder echt negativ (EN) sind. Im Gegensatz dazu werden bei der 3-D-Fitnessbewertung alle erzeugten Bereiche genau nach ihrer späteren Verwendung bewertet.

Als weiterer Grund kann gesehen werden, dass bei der 3-D-Fitnessbewertung eine schärfere Aussage über die segmentierten Bereiche getroffen wird. Denn hierbei steht

nach dem Versuch der Einpassung des entsprechenden Elements die klare Aussage, ob der zu bewertende Bereich zur Einpassung geeignet ist oder nicht. Bei der 2-D-Fitnessbewertung können auch falsch positive Bereiche einen Beitrag zur Fitness liefern, wenn sie den Referenzbereich nur teilweise überdecken.

Vorteile bietet die 2-D-Fitnessbewertung lediglich im Hinblick auf die benötigte Rechenzeit. So wurden bei den Versuchen in Abschnitt 7.3.1 jeweils bei einer (5,30)-Evolutionstrategie mit der 2-D-Fitnessbewertung für eine Iteration 7 Sekunden benötigt, bei der 3-D-Fitnessbewertung waren es 41 Sekunden. Die Zeiten wurden auf einem Rechner mit AMD Athlon X2 Prozessor mit 2,5 GHz bestimmt. Daher bietet es sich an, mithilfe der 2-D-Fitnessbewertung die Optimierung zu starten und wenn ein gewisser Fitnesswert erreicht ist, auf die 3-D-Fitnessbewertung umzusteigen. Dadurch kann die gesamte Rechenzeit zur Konfiguration der Vorverarbeitungsstrategie verkürzt werden, ohne Verluste bei der Qualität der Ergebnisse.

Kapitel 8.

Untersuchung der Leistungsfähigkeit der Einpassverfahren für kombinierte Elemente

Die in Kapitel 6 entwickelten Einpassverfahren für kombinierte Elemente sind auf ihre Leistungsfähigkeit und Eignung für die Objekterkennung zu testen. Dazu werden in einem ersten Schritt Versuche mit synthetisch erzeugten Referenzdaten unternommen, um systematische Untersuchungen auf einer verlässlichen Datenbasis durchführen zu können. Die hierzu durchgeführten Untersuchungen beziehen sich vor allem auf die Genauigkeit und die Stabilität der Einpassung. Im Anschluss werden Versuche auf Basis realer Sensordaten durchgeführt, um Aussagen über die Praxistauglichkeit zu erhalten.

8.1. Untersuchung der Stabilität und Genauigkeit mit synthetischen Referenzdaten

Die Leistungsfähigkeit der entwickelten Einpassverfahren im Hinblick auf die erreichte Stabilität und Genauigkeit ist möglichst objektiv zu überprüfen. In der Norm ISO 10360-6 (DIN 10360-6, 2009) sind Testverfahren für einfache regelgeometrische Elemente wie Geraden und Zylinder angegeben. Diese Tests beruhen in erster Linie auf dem Vergleich von Einpassergebnissen in Referenzdatensätze. Hierzu werden jeweils mit dem zu testenden Algorithmus die Testparameter und einem Referenzalgorithmus die Referenzparameter des Elements bestimmt.

Da für die kombinierten Elemente keine eigene Norm existiert, stehen keine Referenzalgorithmen und keine Referenzdatensätze zur Verfügung (Verl u. Stotz, 2010). In der Norm wird alternativ der Vergleich mit den Referenzparametern, aus den die Referenzdaten erzeugt werden, vorgeschlagen. Weil sich also die Norm so nicht direkt anwenden lässt, sollen für den Test der neu entwickelten Einpassverfahren die in der Norm angegebenen Handlungsanweisungen als Grundlage und Anregung für eigene Versuche dienen. Die Referenzdatensätze werden in Anlehnung an die in der Norm vorgeschlagenen Vorgehensweisen so erzeugt, dass sie einen Bereich von unterschiedlichen Maßen, Formen, Positionen und Richtungen mit verschiedenen Messpunktverteilungen abdecken. Für das zu addierende normalverteilte Rauschen wurden größere Werte für die Standardabweichung verwendet, so wie dies bei realen Daten in der Objekterkennung üblich ist. Die Tests wurden einerseits mit vollständigen Geometrieelementen durchgeführt. Andererseits wurden Tests mit Elementen vorgenommen, bei den nur von einem Teil des Umfangs Daten vorliegen. Dies ist bei der Anwendung in der Objekterkennung wichtig, da aufgrund der 2,5-D-Erfassung praktisch immer höchstens von der Hälfte des Umfangs des Elements Daten vorhanden sind, siehe Abschnitt 2.1.2. Der Vergleich

8.1. Untersuchung der Stabilität und Genauigkeit mit synthetischen Referenzdaten

Teilelement	Radius r	Länge ℓ	Öffnungswinkel α	Startwinkel	Endwinkel
Zylinder Z_1	30	60	—	0	2π
Zylinder Z_2	30	60	—	0	π
Zylinder Z_3	30	60	—	0	$\pi/2$
Zylinder Z_4	33	60	—	0	2π
Zylinder Z_5	33	60	—	0	π
Zylinder Z_6	33	60	—	0	$\pi/2$
Zylinder Z_7	33	60	—	π	$3\pi/2$
Zylinder Z_8	33	600	—	0	2π
Zylinder Z_9	300	60	—	0	2π
Kegel K_1	—	60	$\{0,01, 0,05, 0,1, 0,5, 2,0\}$	0	2π

Tabelle 8.1.: Aus diesen Teilenmenten werden die kombinierten Elemente aufgebaut.

der Parameter bezieht sich auf folgende Werte:

1. Die Position, indem die Differenzen der Koordinaten des Schwerpunkts \mathbf{X}_0 des eingepassten kombinierten Elements und des Referenzobjekts gebildet wird.
2. Die Richtung, indem die Winkeldifferenz zwischen den Richtungen des Testelements und des Referenzelements gebildet werden.
3. Die Formparameter wie die Radien r_i und die Öffnungswinkel α_i bei Kegeln, indem die Differenz zwischen Testparametern und Referenzwerten gebildet wird.

8.1.1. Verwendete Daten

Die für die Versuche verwendeten Daten der kombinierten Elemente in Form von 3-D-Messpunktswolken wurden aus Daten einzelner regelgeometrischer Elemente zusammengesetzt. Diese wurden im Koordinatenursprung mit ihrer Achse in Richtung der z -Achse erzeugt, indem entlang der Achse auf deren Länge l gleichverteilte Zufallszahlen erzeugt wurden. Die Erzeugung der Punkte auf dem Mantel des Elements erfolgte nach Art von Zylinderkoordinaten über Winkelwerte, die zwischen einem Startwinkel und einen Endwinkel einer gleichförmigen Verteilung gehorchen. In Tabelle 8.1 sind die verwendeten Teilelemente aufgelistet. Die einzelnen Teilelemente können mit unterschiedlichen Punktzahlen erzeugt werden. Die Koordinaten der Messpunkte wurden teilweise mit gaußverteilterm Rauschen, dessen Standardabweichung bei den jeweiligen Versuchen angegeben ist, beaufschlagt.

Die aus den Einzelementen aus Tabelle 8.1 kombinierten Elemente werden über eine Transformation in die gewünschten Lagen gebracht.

Versuch	Mittlere Abweichung von								
	r_1	r_2	ℓ_1	ℓ_2	X_0	Y_0	Z_0	ω	φ
$(Z_1 \cup Z_4)_1$	0,0000	0,0000	0,1117	0,1160	0,0016	0,0012	0,0014	0,0000	0,0000
$(Z_1 \cup Z_4)_2$	0,0000	0,0000	0,1433	0,0573	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
$(Z_1 \cup Z_4)_3$	0,0002	0,0008	0,0996	0,0897	0,0004	0,0002	0,0000	0,0000	0,0000

Tabelle 8.2.: Gegenüberstellung der mittleren Fehler der Ergebnisse der Einpassung an drei unterschiedlichen Lagen.

8.1.2. Einfluß der Richtung und der Position

In diesem Versuch war zu untersuchen, ob die Ergebnisse der Einpassung eine Abhängigkeit von der Richtung und der Position des Elements aufweisen. Dazu wurde aus den Elementen Z_1 und Z_4 , die jeweils eine Punktzahl von 1000 und ein Rauschen von $\sigma_1 = 0,0$ aufwiesen, ein kombiniertes Element erzeugt. Es wurden je 10 Datensätze am Koordinatenursprung in Richtung der z -Achse, am Koordinatenursprung in Richtung der x -Achse und am Punkt $(10000, 10000, 0)$ in Richtung der z -Achse erzeugt, die mit $(Z_1 \cup Z_4)_1$, $(Z_1 \cup Z_4)_2$ und $(Z_1 \cup Z_4)_3$ bezeichnet wurden.

In diese 30 Datensätze wurden die Einpassungen vorgenommen. In Tabelle 8.2 sind die gemittelten Abweichungen der Einpassergebnisse zu den drei Lagen gegenübergestellt. Bei den Form- und Lageparametern ist eine sehr gute Genauigkeit zu erkennen. Die Gründe für die vorhandenen geringen Abweichungen dürften in der Qualität der Ausgangsdaten zu suchen sein, da bei der Einpassung von Einzelelementen mit dem Algorithmus von (Ahn, 2004) Abweichungen mit ähnlichen Beträgen aufgetreten sind. Die Versuche lassen also die Folgerung zu, dass die Einpassverfahren für kombinierte Elemente von der Lage der Messpunkte unabhängig sind.

8.1.3. Einfluss der Formparameter

Dieser Versuch sollte klären, ob die Formparameter einen Einfluss auf die Ergebnisse der Einpassung ausüben. Die Versuche wurden mit aus zwei Zylindern kombinierten Elementen durchgeführt. Dazu sollte zum einen ein Versuch zu den eigentlichen Formparametern – den Radien – durchgeführt werden. Zum anderen sollten die Längenverhältnisse der Teilelemente betrachtet werden. Die Längen der Teilelemente werden nicht durch Einpassung bestimmt und sind so zwar keine Formparameter im engeren Sinn, dennoch ist ein Einfluss durch die mit unterschiedlichen Längenverhältnissen zusammenhängenden unterschiedlichen Verteilungen der Punkte nicht auszuschließen. Es wurden die folgenden kombinierten Elemente verwendet:

- $(Z_1 \cup Z_4)_4$ mit gleich langen Einzelelementen und sehr ähnlichen Radien, wobei jedes Einzelelement durch 1000 Punkte mit einem Rauschen von $\sigma_1 = 0,2$ beschrieben wird.

8.1. Untersuchung der Stabilität und Genauigkeit mit synthetischen Referenzdaten

Versuch	Mittlere Abweichung von								
	r_1	r_2	ℓ_1	ℓ_2	X_0	Y_0	Z_0	ω	φ
$(Z_1 \cup Z_4)_4$	0,0073	0,0194	0,1228	0,1456	0,0067	0,0060	0,0070	0,0006	0,0024
$(Z_1 \cup Z_8)_1$	0,0029	0,0042	0,0885	0,1636	0,0026	0,0024	0,0011	0,0000	0,0000
$(Z_1 \cup Z_9)_1$	0,0074	0,0039	0,1782	0,1100	0,0045	0,0056	0,0048	0,0004	0,0001

Tabelle 8.3.: Gegenüberstellung der mittleren Fehler der Einpassergebnisse von Elementen mit unterschiedlichen Formparametern.

- $(Z_1 \cup Z_8)_1$ mit unterschiedlich langen Einzelementen, wobei Z_1 durch 1000 Punkte und Z_8 durch 10000 Punkte, jeweils mit einem Rauschen von $\sigma_1 = 0,2$ beschrieben wird.
- $(Z_1 \cup Z_9)_1$ mit gleich langen Einzelementen und sehr unterschiedlichen Radien, wobei jedes Einzelement durch 1000 Punkte mit einem Rauschen von $\sigma_1 = 0,2$ beschrieben wird.

Für die Lage der für die Versuche verwendeten 10 kombinierten Elemente gilt, dass jeweils das erste Element am Koordinatenursprung in Richtung der z -Achse ausgerichtet ist, die weiteren zufällig im Volumen von $x \times y \times z = [-1000, \dots, 1000] \times [-1000, \dots, 1000] \times [-1000, \dots, 1000]$ mit zufälligen Richtungen.

Die in Tabelle 8.3 gegenübergestellten Werte stellen die über jeweils 10 Einpassungen gemittelten Abweichungen der Einpassergebnisse dar. Es lassen sich keinerlei Abhängigkeiten von den Formparametern erkennen. Alle Abweichungen sind weit kleiner als der gemittelte mittlere Fehler der einzelnen Einpassergebnisse, der für alle drei Versuchsreihen bei 0,15 liegt.

8.1.4. Auswirkungen unterschiedlicher Punktverteilungen

Die in der Objekterkennung eingesetzten Sensoren liefern Tiefenbilder, die eine 2,5-D-Ansicht des Objekts liefern, siehe Abschnitt 2.1.2. Im Idealfall wird damit knapp die Hälfte der Mantelfläche der zu erkennenden rotationssymmetrischen Objekte abgebildet. Die in der Praxis erreichten Erfassungsgrade der Oberfläche liegen eher bei einem Drittel. Zudem können Schwankungen der optischen Oberflächeneigenschaften zu unterschiedlichen Punktdichten führen.

Zur Untersuchung der Auswirkungen wurden Versuche mit unterschiedlichen Verteilungen der Messpunkte durchgeführt. Es wurden die folgenden kombinierten Elemente verwendet, wobei für das Rauschen Standardabweichungen von $\sigma_1 = 0,0$, $\sigma_2 = 0,2$, $\sigma_3 = 0,4$, $\sigma_4 = 0,8$ und $\sigma_5 = 1,0$ gewählt wurden:

- $(Z_1 \cup Z_4)_5$ mit zwei Vollzylindern, wobei jedes Einzelement durch 1000 Punkte beschrieben wird.

- $(Z_1 \cup Z_4)_6$ in Form von zwei Vollzylindern, wobei das eine Teilelement 1000 Punkte und das andere Teilelement 100 Punkte enthält.
- $(Z_2 \cup Z_5)_1$ bestehend aus zwei Halbzylindern, die aus je 500 Punkten gebildet werden.
- $(Z_3 \cup Z_6)_1$ bestehend aus zwei Viertelzylindern, die aus je 250 Punkten gebildet werden.
- $(Z_3 \cup Z_7)_1$ aus zwei Viertelzylindern mit je 250 Punkten bestehend. Die Punkte der beiden Teilelemente befinden sich auf gegenüberliegenden Seiten des kombinierten Elements. Dieser Fall kann zwar bei der Anwendung in der Objekterkennung nicht vorkommen, er bedeutet aber eine extrem ungünstige Situation für die Einpassung und soll deshalb verwendet werden, um die Grenzen des Verfahrens besser einschätzen zu können.

In den Abbildungen 8.1–8.5 sind die mittleren Abweichungen der Einpassergebnisse der kombinierten Elemente dargestellt. Zunächst sollen die Zusammenhänge der Punktverteilungen mit den Ergebnissen für die Formparameter betrachtet werden. Aus den Abbildungen 8.1 und 8.2 ist ersichtlich, dass die Abweichungen tendenziell in der folgenden Reihenfolge zunehmen: Vollzylinder mit gleichmäßiger Punktdichte, Halbzylinder mit gleichmäßiger Punktdichte, Halbzylinder mit ungleichmäßiger Punktdichte, Viertelzylinder und Viertelzylinder mit unsymmetrischer Anordnung der Teilelemente. Bis auf den extremen Testfall $(Z_3 \cup Z_7)_1$ bleiben dabei alle mittleren Abweichungen unter der Standardabweichung der Ausgangsdaten. Bei Betrachtung der gefundenen Radien im Fall $(Z_3 \cup Z_7)_1$ bei $\sigma_4 = 0,8$ und $\sigma_5 = 1,0$ ist zu erkennen, dass für beide Teilzylinder ein Radius von durchschnittlich 31,7 beziehungsweise, 31,2 gefunden wurde, was darauf schließen lässt, dass das Zuordnungsproblem unter diesen Bedingungen nicht gelöst werden konnte.

Die Ergebnisse der Positionsbestimmung aus Abbildung 8.3 lassen eine große Ähnlichkeit der Abweichungen, die bei den einzelnen Datensätzen erzielt wurden, zu den Abweichungen bei der Bestimmung der Formparameter erkennen. Tendenziell sind jedoch die maximalen Abweichungen geringer. So blieb bei allen Datensätzen der Fehler unter 1,0.

Bei den in Abbildungen 8.4 und 8.5 dargestellten Abweichungen der Rotationsparameter ist das Bild weniger einheitlich, wobei die Abweichungen allgemein geringer sind. Bei allen Datensätzen bleibt die Abweichung unter 0,07.

8.2. Leistungsfähigkeit der Lösungen für die Zuordnungsprobleme

In Abschnitt 6.4 wurden Lösungen für das Zuordnungsproblem der Messpunkte zu den einzelnen Teilelementen entwickelt. Als globales Zuordnungsproblem wurde die grobe Zuordnung zu den Teilelementen bezeichnet, als lokales Zuordnungsproblem die Zuordnung der Messpunkte in den Bereichen des Übergangs zwischen zwei Teilelementen. Deren praktische Tauglichkeit wird im Folgenden untersucht.

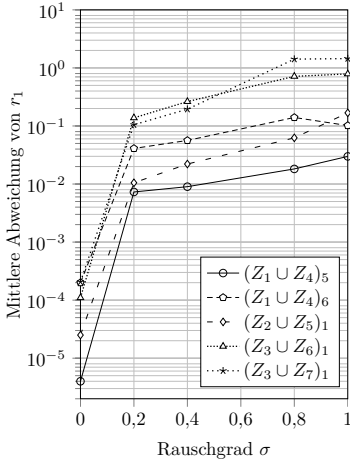


Abbildung 8.1.: Mittlere Abweichungen der Einpassergebnisse der Teilzylinder Z_1 , Z_2 und Z_3 vom Sollradius $r_1 = 30$.

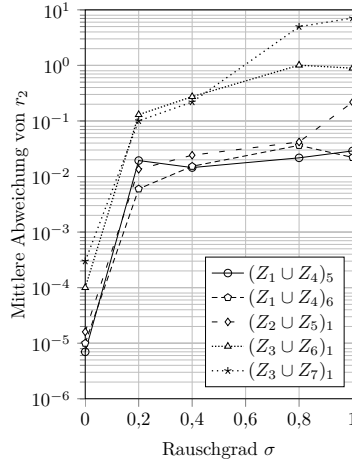


Abbildung 8.2.: Mittlere Abweichungen der Einpassergebnisse der Teilzylinder Z_4 , Z_6 und Z_7 vom Sollradius $r_2 = 33$.

8.2.1. Globales Zuordnungsproblem

Die Leistungsfähigkeit der Lösung des globalen Zuordnungsproblems wurde anhand eines aus einem Zylinder und einem Kegel kombinierten Elements untersucht. Für das Teilelement des Kegels wurden unterschiedliche Öffnungswinkel α_i verwendet. Die Geometriedaten der beiden Teilelemente sind in Tabelle 8.1 aufgeführt. Beide Teilelemente werden durch jeweils 1000 Punkte beschrieben. Die Messpunkte wurden für die Versuchsreihe mit einem unterschiedlichen Maß an Rauschen beaufschlagt, für das Standardabweichungen von $\sigma_1 = 0,0$, $\sigma_2 = 0,2$, $\sigma_3 = 0,4$, $\sigma_4 = 0,8$ und $\sigma_5 = 1,6$ gewählt wurden. Für jedes α_i und jedes σ_j wurden jeweils 10 kombinierte Elemente an verschiedenen Lagen im Volumen von $x \times y \times z = [-1000, \dots, 1000] \times [-1000, \dots, 1000] \times [-1000, \dots, 1000]$ erzeugt. Die Ergebnisse der Einpassungen sind in den Abbildungen 8.6–8.10 dargestellt.

Die stärksten Auswirkungen haben Fehler bei der Lösung des Zuordnungsproblems auf die Einpassergebnisse des Öffnungswinkels. Den Abbildungen 8.6 und 8.7 ist zu entnehmen, dass bei den sehr kleinen Öffnungswinkeln α_1 und α_2 das Rauschen einen größeren Einfluß auf die Abweichungen hat, als dies bei größeren Öffnungswinkeln der Fall ist. Bei geringem Rauschen sind die Abweichungen kleiner, bei stärkerem Rauschen sind sie größer.

Der Grund dafür ist, dass bei dem der Lösung des globalen Zuordnungsproblems zugrunde liegenden Verfahrens aus Abschnitt 6.4.1 ein Schwellwert benötigt wird, der bestimmt, wann die Linie getrennt werden soll. Dort ist in Formel 6.12 eine Abschätzung für den Schwellwert in Abhängigkeit vom Öffnungswinkel angegeben. Da bei geringen

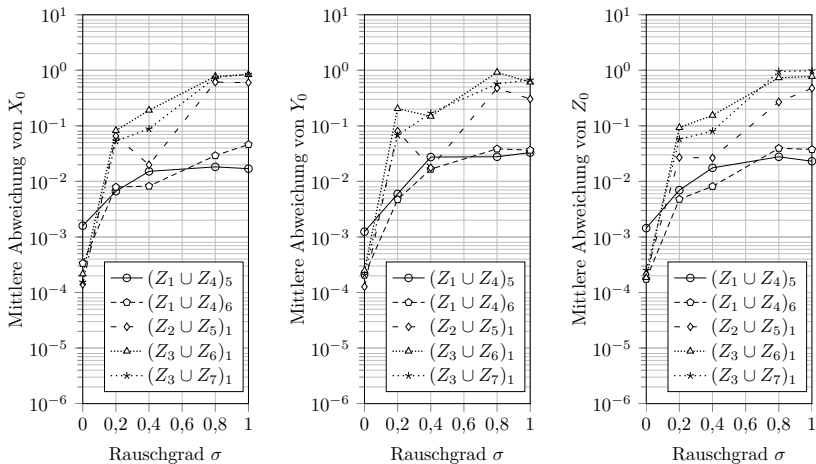


Abbildung 8.3.: Von links nach rechts ist die mittlere Abweichungen des Schwerpunkts $\mathbf{X}_0 = (X_0, Y_0, Z_0)^T$ der Einpassergebnisse der kombinierten Elemente vom Schwerpunkt $(0, 0, 0)^T$ der Sollelemente koordinatenweise dargestellt.

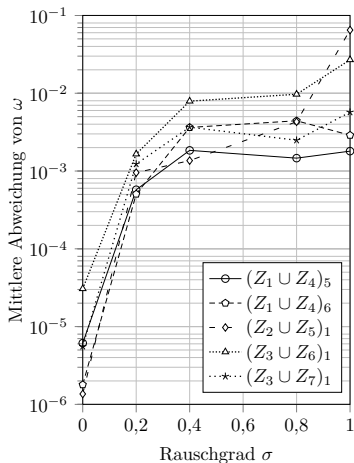


Abbildung 8.4.: Darstellung der mittleren Abweichungen des durch Einpassung bestimmten Winkels ω der Richtungen von den Sollrichtungen.

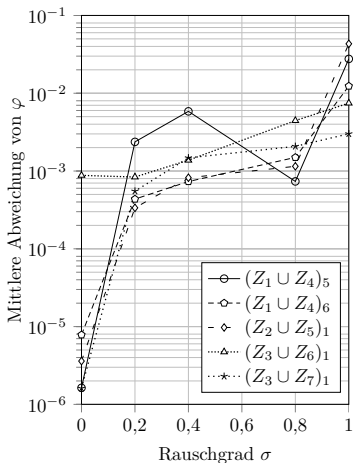


Abbildung 8.5.: Mittlere Abweichungen des durch Einpassung bestimmten Winkels φ der kombinierten Elemente von den Sollrichtungen.

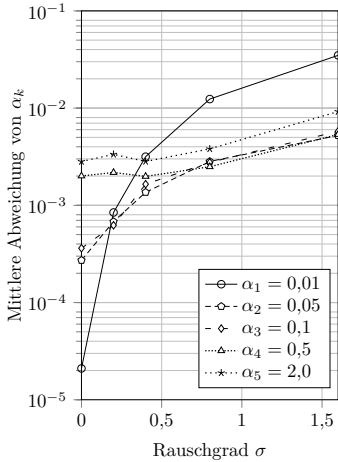


Abbildung 8.6.: Mittlere Abweichungen der Einpassergebnisse für den Öffnungswinkel α_k des Kegel-Teilelements vom Sollwert.

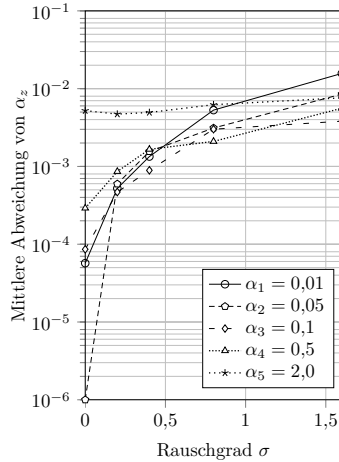


Abbildung 8.7.: Mittlere Abweichungen der Einpassergebnisse für den Öffnungswinkel α_z des Zylinder-Teilelements vom Sollwert.

Öffnungswinkeln ein sehr kleiner Schwellwert notwendig ist, werden bei starkem Rauschen Trennungen an Rauschpunkten vorgenommen und die Trennung zwischen den Elementen wird immer schwieriger. Zudem werden bei einer der Trennung nachfolgenden Vereinigung von Segmenten mit ähnlicher Richtung unter Umständen Segmente unterschiedlicher Teilelemente vereinigt.

So lassen sich auch die bei den kleinen Öffnungswinkeln vorkommenden Fälle erklären, bei den die globale Zuordnung vollkommen versagt hat. Dies war der Fall bei α_1 in Kombination mit den Standardabweichungen $\sigma_2 = 0,2$, $\sigma_4 = 0,8$ und $\sigma_5 = 1,6$, wo dies einmal, zweimal beziehungsweise viermal vorkam und bei α_2 mit $\sigma_5 = 1,6$ mit vier gescheiterten Zuordnungen. Diese Werte für die Öffnungswinkel in Verbindung mit dem Rauschen dürften wohl auch die Grenzen der Leistungsfähigkeit des globalen Zuordnungsproblems darstellen.

Die Bestimmung der Lageparameter wird von den unterschiedlichen Öffnungswinkeln in der Versuchsreihe weniger stark beeinflusst, wie den Abbildungen 8.8-8.10 zu entnehmen ist.

8.2.2. Einfluß der lokalen Punktzuordnung

Zur Untersuchung des Effektes des lokalen Zuordnungsproblems wurde ein kombiniertes Element, das aus einem Zylinder mit Radius 30 und einem Kegel mit Öffnungswinkel 0,7 besteht, verwendet. Einmal wurde die Einpassung mit der Lösung des lokalen Zuordnungsproblems und einmal ohne dessen Lösung durchgeführt. In Tabelle 8.4 sind die mittleren Abweichungen der erzielten Ergebnisse gegenübergestellt.

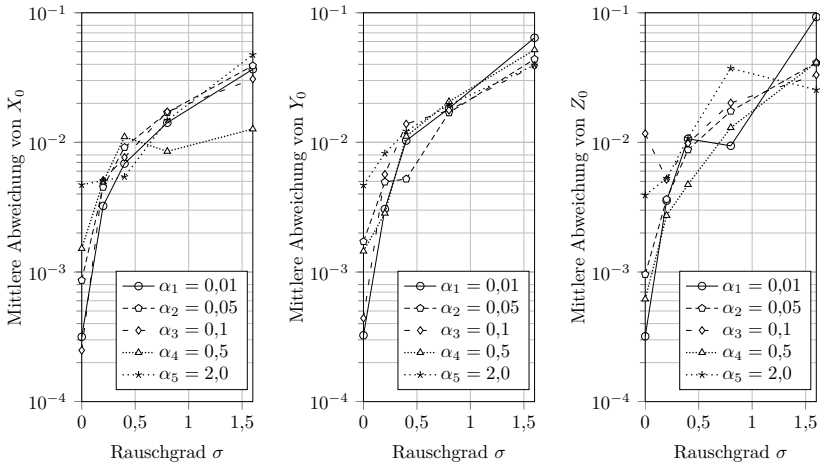


Abbildung 8.8.: Von links nach rechts ist die mittlere Abweichungen des Schwerpunkts $\mathbf{X}_0 = (X_0, Y_0, Z_0)^T$ der Einpassergebnisse der kombinierten Elemente vom Schwerpunkt $(0, 0, 0)^T$ der Sollelemente koordinatenweise dargestellt.

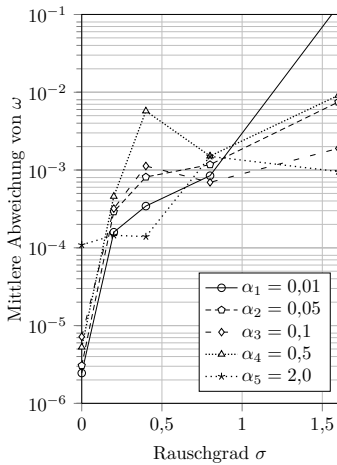


Abbildung 8.9.: Darstellung der mittleren Abweichungen der durch Einpassung bestimmten Winkel ω der kombinierten Elemente von den Sollrichtungen.

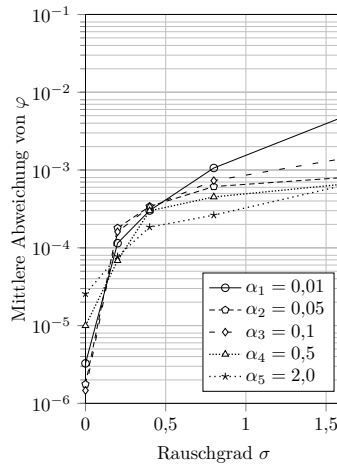


Abbildung 8.10.: Mittlere Abweichungen der durch Einpassung bestimmten Winkel φ der kombinierten Elemente von den Sollrichtungen.

	Öffnungswinkel 1	Öffnungswinkel 2	Länge 1	Länge 2
Soll	0,00000	0,70000	60,000	60,000
Mit lokaler Zuordnung	0,00063	0,69688	59,813	60,133
Ohne lokale Zuordnung	0,00008	0,69684	58,645	61,204

Tabelle 8.4.: Gegenüberstellung der mittleren Abweichungen der Ergebnisse mit Lösung des lokalen Zuordnungsproblems zu den Ergebnissen ohne die Lösung des lokalen Zuordnungsproblems.

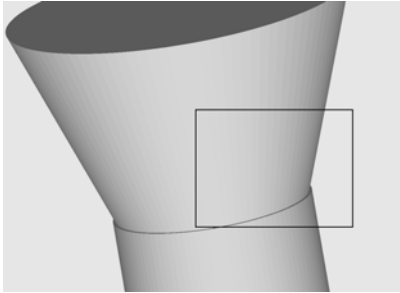


Abbildung 8.11.: Einpassergebnis ohne Lösung des lokalen Zuordnungsproblems. Das Rechteck markiert den Bereich, der in Abbildung 8.13 vergrößert dargestellt ist.

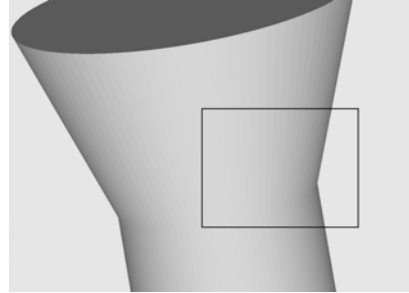


Abbildung 8.12.: Einpassergebnis mit Lösung des lokalen Zuordnungsproblems. Der in Abbildung 8.14 vergrößerte Bereich ist durch ein Rechteck markiert.

Anschaulicher ist der Effekt anhand der grafischen Darstellung der Einpassergebnisse eines aus einem Zylinder und Kegel kombinierten Elements, siehe Abbildung 8.11 und Abbildung 8.12. Besonders in den vergrößerten Ausschnitten werden die Unterschiede deutlich. In Abbildung 8.13 ist zu erkennen, dass ohne die Lösung des lokalen Zuordnungsproblems eine kleine Differenz der Radien am Übergang der Teilelemente besteht. Wenn zusätzlich das lokale Zuordnungsproblem gelöst wird, ist praktisch keine Differenz mehr vorhanden, siehe Abbildung 8.14.

Die praktische Bedeutung für die Objekterkennung erscheint nach diesen Ergebnissen jedoch relativ gering, da auch ohne die Lösung des lokalen Zuordnungsproblems das eingepasste kombinierte Element sehr geringe Abweichungen von der Sollgeometrie und vor allem von der Lage aufweist. Die stärksten Auswirkungen sind noch bei der Bestimmung der Länge der Teilelemente zu erkennen.

8.3. Einpassung in reale Daten

Neben den bisher durchgeführten Versuchen mit synthetischen Referenzdaten müssen die Einpassverfahren ihre Tauglichkeit mit realen Sensordaten zeigen. Die Sensordaten wurden mit einem Lichtschnittsensor mit einer maximalen Tiefenauflösung von 0,2 mm

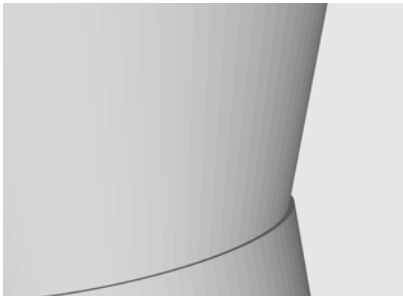


Abbildung 8.13.: In dem aus Abbildung 8.11 vergrößerten Ausschnitt ist am Übergang der beiden Teilelemente ein Unterschied der Radien zu erkennen.

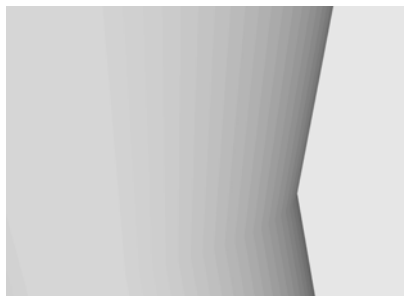


Abbildung 8.14.: Nach Lösung des lokalen Zuordnungsproblems besteht im vergrößerten Ausschnitt aus Abbildung 8.11 ein glatter Übergang zwischen den Teilelementen.

und einer lateralen Auflösung von 1 mm aufgenommen. Bei den Teilen handelt es sich um Umformteile. In den folgenden Abbildungen 8.15–8.18 sind die entsprechenden Einpassergebnisse gezeigt.

Offensichtlich können auch mit realen Daten und einer größeren Anzahl von Teilelementen gute Resultate erzielt werden. Die Abbildungen 8.15–8.18 zeigen anschaulich die Wirkung der in Abschnitt 6.5 beschriebenen Ausreißerelimination. Nicht zum kombinierten Element gehörende Punkte werden segmentiert.

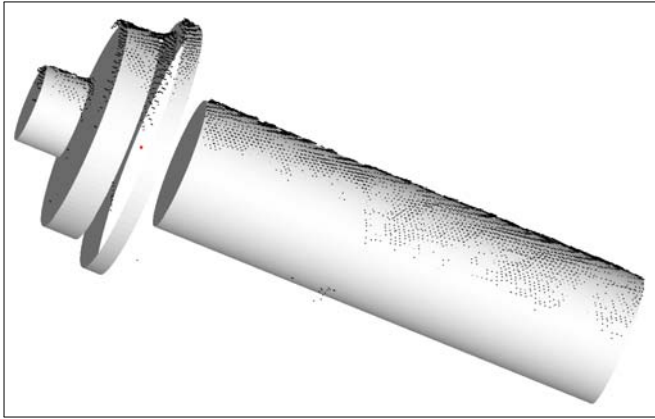


Abbildung 8.15.: Einpassung eines aus vier Zylindern kombinierten Elements in reale Sensordaten. Eine Elimination von Ausreißerpunkten wurde vorgenommen.

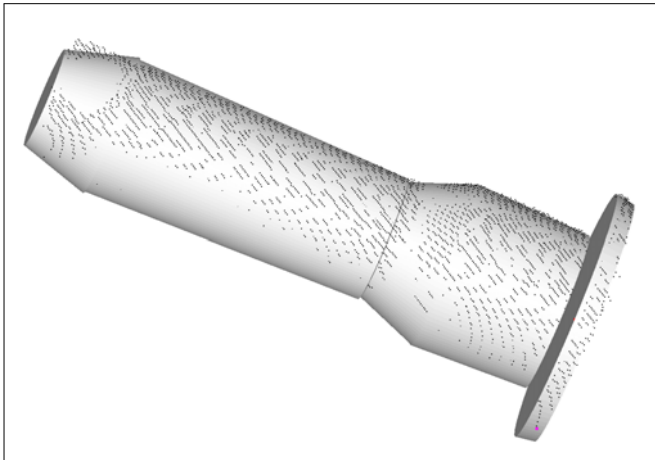


Abbildung 8.16.: Einpassergebnis eines aus fünf Kegeln kombinierten Elements in reale Sensordaten.

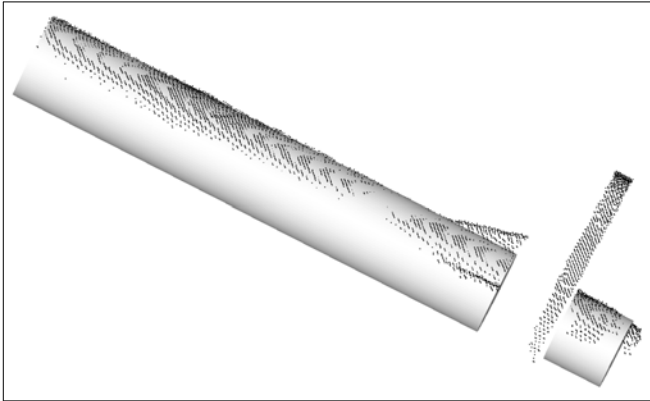


Abbildung 8.17.: Ergebnis der Einpassung mit Ausreißerelimination eines aus zwei Zylindern kombinierten Elements.

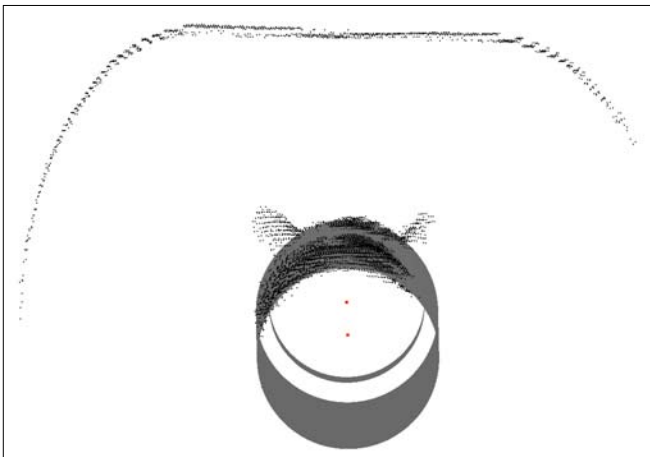


Abbildung 8.18.: In der Ansicht in Achsrichtung des Elements aus 8.17 sind die nicht zum kombinierten Element gehörenden von der Ausreißerelimination von der Einpassung ausgeschossenen Punkte gut zu erkennen.

8.4. Diskussion und Bewertung der Ergebnisse

In diesem Kapitel wurde in Versuchsreihen die Stabilität der Einpassergebnisse untersucht. Dabei stellte sich heraus, dass das Verfahren von der einzupassenden Geometrie in Bezug auf Längenverhältnisse und dem Verhältnis der Radien der einzelnen Teilelemente unabhängig ist. Eine gewisse Abhängigkeit von der Verteilung der Messpunkte ist festzustellen. So kann die Positionsbestimmung und die Radiusbestimmung bei dem aus zwei Viertelzylindern kombinierten Element $(Z_3 \cup Z_6)_1$, das den Grenzfall der in der Praxis vorkommenden Datenverteilungen beschreibt, bei großem Rauschen nur mit einer Abweichung von ± 1 bestimmt werden. Bei dem in der Praxis nicht auftretenden Fall mit unsymmetrischer Punktverteilung bei $(Z_3 \cup Z_7)_1$ sind die Abweichungen der Radien noch größer. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei dem starken Rauschen der Radiusunterschied von nur 3 Einheiten nicht mehr detektiert werden kann.

Werden in der Praxis übliche Rauschgrade bis $\sigma_3 = 0,4$ oder größere Radiusunterschiede vorausgesetzt, wird eine Genauigkeit von ca. 0,5 Einheiten erreicht. Dies wird auch durch die bei der Bewertung der Lösung des Zuordnungsproblems durchgeführten Versuche bestätigt. Die erreichbaren Genauigkeiten sind also für die Anwendung in der Objekterkennung ausreichend, da bei entsprechen Anforderungen an die Positionsbestimmung nur die Qualität der Ausgangsdaten hoch genug sein muss.

Die Leistungsfähigkeit der Lösung des Zuordnungsproblems ist sehr gut, bei entsprechend geringem Rauschen können Kegel mit sehr kleinem Öffnungswinkel getrennt werden. Der Nutzen des lokalen Zuordnungsproblems ist jedoch für die Objekterkennung eher gering, da von den festgestellten Verbesserungen der Ergebnisse keine Auswirkungen bei der Anwendung in der Objekterkennung zu erwarten sind.

Bei den mit realen Sensordaten durchgeführten Versuchen konnten die kombinierten Elemente zuverlässig eingepasst werden. Zusammen mit den Untersuchungsergebnissen auf Basis synthetischer Daten lässt sich folgern, dass die Verfahren für die Objekterkennung geeignet sind. Als ein weiterer Test mit realen Daten können die Versuche in Abschnitt 7.5.1 angesehen werden, die die Einpassergebnisse zur Fitnessbewertung der Vorverarbeitungsstrategie nutzen. Hier konnte auch eine realitätsnahe Zeit für die Einpassung des kombinierten Elements von 0,11 Sekunden, gemittelt über 100 Einpassungen, nachgewiesen werden. Die Zeiten wurden mit einem Rechner mit AMD Athlon Prozessor mit 2,5 GHz bestimmt.

Kapitel 9.

Anwendungsbeispiele

Das in Kapitel 4 beschriebene Objekterkennungsverfahren wurde in zwei Demonstratoren (Stotz u. a., 2008a) mit dem in Abbildung 9.1 dargestellten prinzipiellen Aufbau integriert. Diese werden im Folgenden vorgestellt.

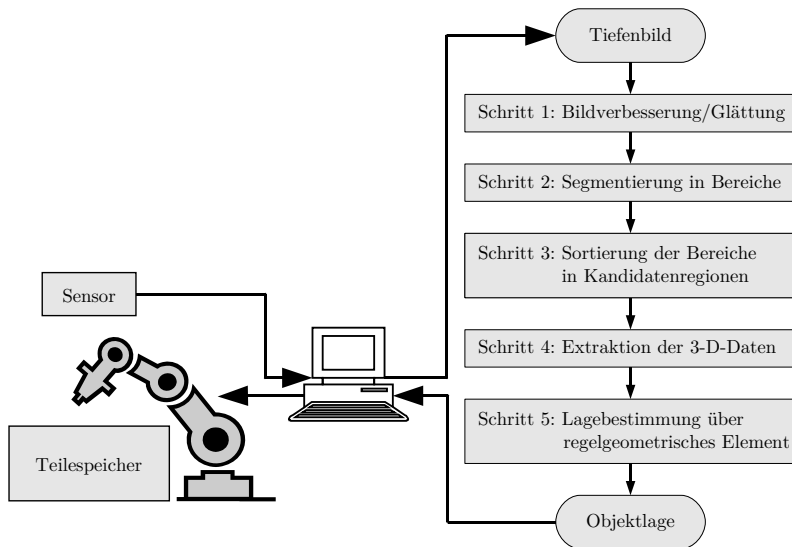


Abbildung 9.1.: Skizze des Demonstrators zur Objekterkennung. Der Sensor erzeugt die Tiefenbilder für den Objekterkennungsalgorithmus. Dieser liefert die Objektlage an das Robotersystem.

9.1. Demonstrator zur Erkennung ungeordneter zylindrischer Objekte

In einem ersten Demonstrator sollten ungeordnete Rohre aus einer Kiste entnommen werden. Der grobe Aufbau des Demonstrators ist in Abbildung 9.2 dargestellt. Der Lichtschnittsensor dient zum Erfassen der Szene in den Kisten in Form eines Tiefenbildes. Die maximale Tiefenauflösung des Sensors beträgt 0,2mm bei einer lateralen

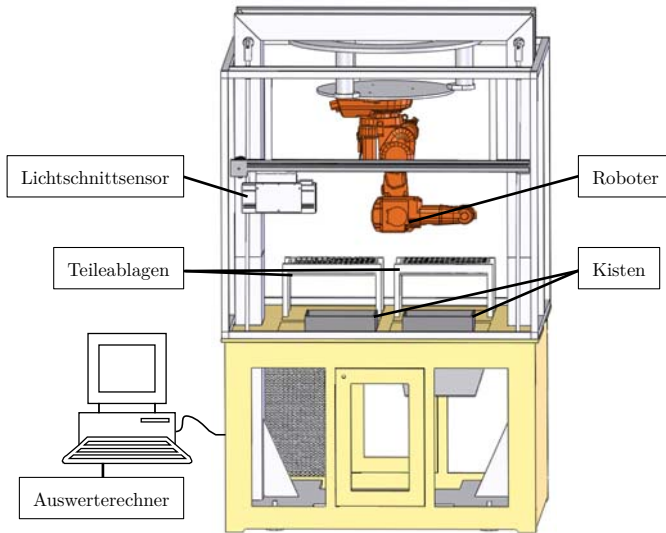


Abbildung 9.2.: Aufbau des Demonstrators zur Erkennung der Rohre.

Auflösung von 1 mm. Der Industrieroboter zum Greifen der Rohre ist mit einem Sauggreifer ausgestattet, was die Maßnahmen zur Kollisionsvermeidung vereinfacht. Das Softwareprogramm zur Objekterkennung läuft auf einem Auswerterechner in Form eines PC-Systems. Die Kiste mit den Rohren hat eine Länge von 400 mm, eine Breite von 300 mm und eine Höhe von 120 mm. Die Rohre bestehen aus Aluminium, besitzen eine eloxierte Oberfläche und ihre Länge beträgt 200 mm bei einem Durchmesser von 20 mm.

Die Abbildung 9.3 zeigt die einzelnen Schritte der automatisierten Entnahme eines Rohres. In Teilbild 9.3a ist die Szene in der Kiste dargestellt, wie sie mit dem Lichtschnittsensor, dessen Laserlinie auf dem Kistenrand zu sehen ist, erfasst wird. Nach Erfassung der Szene erfolgt die Objektlageerkennung eines frei greifbaren Rohres auf Basis der Einpassung eines Zylinders. Das Greifen des erkannten Rohres zeigt Teilbild 9.3b. Das Rohr kann dann mit dem Roboter entnommen werden, siehe Teilbild 9.3c und zum Zielort gebracht werden. Dort wird es beispielsweise in eine Teileablage eingesteckt, siehe Teilbild 9.3d.

In vielen Versuchsläufen konnten die Kisten zuverlässig bis auf 2–5 Rohre entleert werden. Die Gründe für diesen Rest sind zum einen die Abschattung, die bei dem verwendeten Aufbau des Lichtschnittsensors unvermeidlich sind, siehe Abschnitt 2.1.3. Zum anderen wurde eine relativ simple Roboterprogrammierung verwendet, die ohne eine angepasste Anfahrstrategie ausgeführt wurde. Vielmehr wurden die Rohre immer senkrecht zur Tischebene angefahren, so dass in den Ecken liegende Rohre nicht kollisionsfrei gegriffen werden konnten. Die Erkennungszeiten bei einer lateralen Sen-



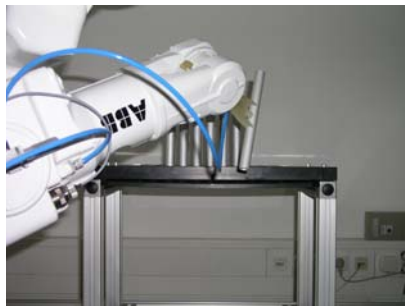
(a) Erfassung der Szene mit dem Lichtschnittsensor



(b) Greifen des Rohres



(c) Entnehmen des Rohres



(d) Positionieren des Rohres in der Ablage

Abbildung 9.3.: Ablauf der Erkennung und Entnahme eines Rohres aus der Kiste.

sorauflösung von 1 mm lagen bei 0,5s und bei einer Auflösung von 2 mm bei 0,2s bei einem Rechnerystem mit Intel Xeon Prozessor mit 2,0 GHz Taktfrequenz.

9.2. Demonstrator zur Erkennung von Schmiedeteilen

In einem zweiten, ähnlich aufgebauten Demonstrator sollten die Schmiedeteile aus Abbildung 4.2 erkannt und gegriffen werden. Um die Orientierung der Teile zu bestimmen wurden zwei Zylinder eingepasst. Aufgrund der großen Masse der Teile musste ein Backengreifer Verwendung finden. Abbildung 9.4 zeigt den Griff eines erkannten Teiles.

Auch mit diesem Aufbau wurde eine große Anzahl von Versuchsläufen durchgeführt. Dabei konnte die Kiste nur in einem geringeren Maß entleert werden, als bei dem Demonstrator zur Erkennung der Rohre in Abschnitt 9.1. Neben den dort genannten Gründen der Roboterprogrammierung und der Abschattung ganzer Objekte kann hier schon die teilweise Abschattung von Objekten dazu führen, dass das Objekt nicht

9.2. Demonstrator zur Erkennung von Schmiedeteilen

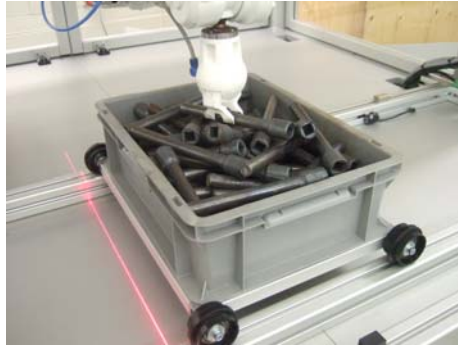


Abbildung 9.4.: Greifen des Schmiedeteils.

mehr erkannt wird. Dies ist der Fall, wenn der zur Orientierung benutzte Zylinder nicht sichtbar ist. Aufgrund der geringen Größe der Kiste können auch leicht Szenen entstehen, bei den durch gegenseitige Überdeckung der zur Orientierung verwendete Zylinder nicht erkennbar ist.

Kapitel 10.

Zusammenfassung und Ausblick

Die automatisierte Entnahme ungeordneter Werkstücke direkt aus ihren Transportbehältern zur Handhabung und Zuführung wird bisher nur selten in speziell an die Aufgabenstellung angepassten Applikationen industriell eingesetzt. Ein großes Hemmnis ist die aufwändige Anpassung und Konfiguration der zur Lageerkennung der Werkstücke notwendigen Objekterkennungsverfahren. Im Rahmen dieser Arbeit wurden Beiträge geleistet, für eine größere Klasse von Werkstücken – oder allgemeiner von Objekten – eine leichte Konfiguration eines Objekterkennungssystems auf Basis regelgeometrischer Elemente zu ermöglichen.

Daraus ergaben sich die beiden Ziele dieser Arbeit. Das erste Ziel war die Entwicklung eines selbstadaptiven Vorverarbeitungsverfahrens – später Vorverarbeitungsstrategie genannt – das die mit einem 3-D-Sensor in Form von Tiefenbildern erfassten Objekte einer Szene in Bereiche segmentiert, die für die nachfolgende Lagebestimmung optimale Voraussetzungen bieten. Das zweite Ziel war die Erweiterung der Klasse der mit regelgeometrischen Elementen erkennbaren Objekte um solche Objekte, die aus mehreren regelgeometrischen Elementen kombiniert sind.

Die Analyse der in der Industrie vorkommenden Werkstückgeometrien ergab, dass die Klasse der rotationssymmetrischen, aus mehreren regelgeometrischen Elementen kombinierten Objekte einen bedeutenden Anteil der ungeordnet vorliegenden Objekte darstellt. Dabei stellte es sich heraus, dass ein Großteil der Objekte aus Zylindern und Kegeln aufgebaut ist.

Die verschiedenen nach dem Stand der Technik verfügbaren Segmentierungsverfahren für Tiefenbilder wurden betrachtet. Deren Analyse zeigte, dass Verfahren mit guter Segmentierungsleistung sehr rechenaufwändig sind. Zusätzlich wurde festgestellt, dass die meisten Verfahren mit guter Leistung von einer größeren Anzahl Parameter abhängen. Die verfügbaren Angaben bewegten sich von 4 bis 38 Parametern, die zum Teil gegenseitige Abhängigkeiten aufweisen und kritisch für den Erfolg des Verfahrens sind.

Als Folgerung aus dem Stand der Technik wurde ein erstes Systemkonzept für einen Objektlageerkenner auf Basis von Tiefenbildern entworfen, dessen Hauptfunktionsblöcke zum einen aus einem Vorverarbeitungsmodul gebildet werden. Dieses sollte über die reine Segmentierung hinaus gehend Bereiche liefern, die möglichst frei greifbare Objekte beschreiben. Zur Anpassung des Vorverarbeitungsmoduls an wechselnde zu erkennende Objekte wurde ein Konfigurationsmodul vorgesehen. Zum anderen wurde ein Funktionsmodul zur Lagebestimmung als notwendig identifiziert.

Anhand des Systemkonzepts konnten die Anforderungen an die zu entwickelnden Teilsysteme aufgestellt werden. Wichtig war insgesamt eine hohe Verarbeitungsgeschwindigkeit, eine hohe Genauigkeit bei der Lageerkennung und eine automatisierte Anpassbarkeit der Vorverarbeitung an wechselnde Objektgeometrien.

Unter Beachtung der Anforderungen wurden Konzepte für einen Lageerkenner für Objekte, die aus regelgeometrischen Elementen aufgebaut sind, entwickelt. Die Eingangsdaten dieses Objekterkennungsverfahrens stellen Tiefenbilder dar, auf die die Vorverarbeitungsstrategie angewandt wird. Diese führt, falls notwendig, eine Glättung des Bildes durch, segmentiert es und sortiert aus den entstandenen Bereichen diese aus, die optimal für die Lagebestimmung geeignet sind. Diesen Bereichen werden die entsprechenden 3-D-Punkte zugeordnet, aus den dann mit einem Lagebestimmungsverfahren für regelgeometrische Elemente die Objektlage bestimmt wird.

Mit einer prototypischen Implementierung des Objekterkennungsverfahrens wurden Vorversuche durchgeführt, bei den sich zeigte, dass für die Vorverarbeitungsstrategie vielfältige, nicht elementare Bildverarbeitungsoperatoren mit einer größeren Anzahl schwer einzustellender Parameter eingesetzt werden müssen. Aus dem Stand der Technik war bekannt, dass evolutionäre Algorithmen in der Tiefenbildverarbeitung zur Parameteroptimierung eingesetzt wurden und dass die genetische Programmierung beispielsweise zur Erzeugung von Kantenfiltern aus elementaren Operatoren eingesetzt wurde. Da aber diese bekannten Ansätze nicht ausreichten, um eine selbstadaptive Vorverarbeitungsstrategie zu erstellen, sollte ein neuer Ansatz umgesetzt werden. Dieser sollte mit Hilfe eines evolutionären Algorithmus alle vorkommenden Typen von Parametern der komplexen Operatoren optimieren und neue Programmabläufe erzeugen können. Zudem sollte die bei evolutionären Algorithmen notwendige Fitnessbewertung speziell an die Aufgabenstellung angepasst sein, indem die Resultate der erzeugten Vorverarbeitungsstrategie anhand der 3-D-Lagebestimmung bewertet werden.

Aus der Analyse der nach dem Stand der Technik verfügbaren Verfahren zur Lagebestimmung regelgeometrischer Elemente folgte, dass von den verfügbaren Verfahren nur Einpassverfahren die Geschwindigkeitsanforderungen und die Anforderungen an die Genauigkeit erfüllen konnten. Zur Einpassung kombinierter Elemente, die aus einzelnen regelgeometrischen Elementen aufgebaut sind, existierten nur Lösungen, die für die Koordinatenmesstechnik konzipiert waren. Deren Hauptnachteil war die Form der Randbedingungen zwischen den einzelnen Elementen, die zu einer großen Anzahl von Parametern führt. Dies wirkt sich negativ auf die Stabilität des Einpassergebnisses aus.

Den Vorgaben aus der Konzeption entsprechend wurde eine selbstadaptive Vorverarbeitungsstrategie entwickelt. Als Optimierungsverfahren wurde der Ansatz der Evolutionsstrategie erweitert, um neben den klassisch behandelten reellwertigen Parametern auch ganzzahlige Parameter und Parameter in Textform sowie den gesamten Programmablauf optimieren zu können. Dies wurde erreicht, indem im Rahmen von objektorientierter Programmierung jeder Vorverarbeitungsstrategie als Lösungskandidat des Optimierungsproblems und allen Bildverarbeitungsoperatoren als Bausteine der Vorverarbeitungsstrategie eine einheitliche Schnittstelle gegeben wurde. Diese stellen die für die Evolutionsstrategien notwendigen Funktionalitäten zur Verfügung. Zur Fitnessbewertung der Vorverarbeitungsstrategien wurden zwei Ansätze umgesetzt. Der erste wurde als 2-D-Fitnessbewertung bezeichnet und basiert auf dem Vergleich von Referenzbereichen im Tiefenbild mit den von der Vorverarbeitungsstrategie erzeugten Bereichen. Der zweite Ansatz stellt eine vollkommen neue Vorgehensweise bei der Fitnessbewertung in der Tiefenbildverarbeitung dar, da die von der Vorverarbeitungsstrategie gelieferten Bereiche dadurch bewertet werden, ob die für die Objekterkennung notwendige Ein-

passung erfolgreich durchgeführt werden kann. Durch diese 3-D-Fitnessbewertung sind vom Anwender nur noch die Geometriedaten des zu erkennenden Objekts vorzugeben. Um eine Konfiguration der Vorverarbeitungsstrategie ohne die vorherige Aufnahme realer Tiefenbilder der Objekte durchführen zu können, wurde die Möglichkeit geschaffen, simulierte Tiefenbilder rein aus einer Geometriebeschreibung des Objekts zu erzeugen. Diese simulierten Tiefenbilder dienen dann als Datenbasis für die automatische Erzeugung der Vorverarbeitungsstrategie.

Zur Entwicklung des Verfahrens zur Lagebestimmung musste nach einer Möglichkeit gesucht werden, die Randbedingungen zur Verknüpfung der Positionen der einzelnen regelgeometrischen Elemente zu vermeiden. Dies wurde gelöst, indem anstatt der verknüpften Positionsparameter der Einzelemente nur noch genau eine Position verwendet wurde und die Kombination der Einzelemente über Formparameter des kombinierten Elements beschrieben werden. Damit konnte die für die Optimierung der Parameter notwendige Jacobi-Matrix in einer ähnlich kompakten Form aufgestellt werden, wie dies bei der Einpassung von Einzelementen der Fall ist. Notwendig für die Aufstellung der Jacobi-Matrix ist nur die Kenntnis der Zuordnung der einzelnen Messpunkte zu den Teilelementen. Zur Lösung dieses Zuordnungsproblems wurden Verfahren zur globalen Zuordnung auf die Teilelemente und zur Zuordnung der Messpunkte an den Übergängen der Teilelemente umgesetzt. Dies wurde als globales Zuordnungsproblem beziehungsweise als lokales Zuordnungsproblem bezeichnet.

Das entwickelte Verfahren zur automatischen Konfiguration der Vorverarbeitungsstrategie wurde in einer Reihe von Versuchen auf seine Leistungsfähigkeit getestet. Dazu wurden zuerst Bewertungsgrößen auf Basis statistischer Auswertungen der von den Vorverarbeitungsstrategien gelieferten Bereiche festgelegt. Die ersten Versuche erzeugten Vorverarbeitungsstrategien für reale Tiefenbilder von Szenen aus Schmiedeteilen mit 2-D-Fitnessbewertung und 3-D-Fitnessbewertung unter Einsatz von Evolutionsstrategien unterschiedlicher Konstellationen. Weiter wurden Versuche zur Anpassungsfähigkeit der erzeugten Vorverarbeitungsstrategien an unterschiedlich stark verrauschte Tiefenbilder und Tiefenbilder verschiedener Auflösungen unternommen. Auch die Anpassungsfähigkeit an Vorgaben zu den von den Bereichen beschriebenen Geometrieelementen wurde untersucht. Nach Auswertung der Versuche wurde festgestellt, dass die 3-D-Fitnessbewertung der 2-D-Fitnessbewertung durchgängig überlegen ist mit einem Vorteil von bis zu 36%. Die Anpassungsfähigkeit der Vorverarbeitungsstrategien bei der 3-D-Fitnessbewertung erwies sich als sehr gut. Die auf Basis von simulierten Daten erzeugten Vorverarbeitungsstrategien, die zur Verifikation auf reale Tiefenbilder angewandt wurden, konnten die Erwartungen nicht ganz erfüllen. Hier war die Schwankung in der Ergebnisqualität zu groß. Als Grund wurde die simple Methode zur Erzeugung der simulierten Tiefenbilder identifiziert.

Die Leistungsfähigkeit der Einpassverfahren für kombinierte Elemente wurde in Anlehnung an Testverfahren aus der Koordinatenmesstechnik untersucht. Dabei wurden in erster Linie die Abweichungen zwischen den Sollparametern und den durch die Einpassung gefundenen Parametern bestimmt. Um einen Eindruck von der Stabilität des Verfahrens zu gewinnen, wurden kombinierte Elemente synthetisch mit Rauschen von unterschiedlicher Intensität und an zufälligen Lagen in einem Messvolumen sowie mit unterschiedlichen Geometrien und Punktverteilungen auf den Teilelementen erzeugt.

Die Einpassergebnisse erreichten sehr geringe Abweichungen, selbst bei Rauschen mit einer Standardabweichung von 0,8 konnte z. B. ein Element aus einem Kegel und einem Zylinder mit einer mittleren Abweichung von maximal 0,03 Einheiten in den Positionskoordinaten und von maximal 0,01 rad bei der Abweichung der Winkelwerte für die Richtung eingepasst werden. Die Lösung des globalen Zuordnungsproblems zeigte eine sehr gute Leistungsfähigkeit. Bei geringem Rauschen konnte die Kegel-Zylinder-Kombination bei Öffnungswinkeln des Kegels von 0,01 rad sicher als kombiniertes Element eingepasst werden. Das lokale Zuordnungsproblem stellte sich jedoch für die Objekterkennung als wenig relevant heraus, da die erzielten Verbesserungen der Genauigkeit gering sind. In Versuchen mit realen Daten industrieller Werkstücke konnte die Praxistauglichkeit weiter unterstrichen werden. Hier zeigte sich vor allem die Ausreißerelimination als nützlich.

Das vorgeschlagene Objekterkennungssystem wurde in zwei Demonstratoren getestet und konnte bei einem Aufbau zur Erkennung von Rohren eine für die Praxis taugliche Erkennungsleistung erreichen. Bei einem zweiten Aufbau zur Erkennung von Schmiedeteilen wurden durch Randbedingungen des Aufbaus geringere Erkennungsleistungen erzielt.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass das in dieser Arbeit entwickelte Konfigurationsverfahren für die Vorverarbeitungsstrategie ohne Interaktion des Anwenders auskommt. Dieser muss lediglich die Geometriebeschreibung des zu findenden Objekts und eine geringe Anzahl von Tiefenbildern einer Testszene zur Verfügung stellen. Damit konnten die diesbezüglichen Vorgaben erfüllt werden. Auch das entwickelte Einpassverfahren für kombinierte Elemente konnte die Erwartungen erfüllen, so dass es stabil in der Objekterkennung eingesetzt werden kann.

Aus den nicht immer den Erwartungen entsprechenden Leistungsfähigkeiten der auf Basis simulierter Tiefenbilder erzeugten Vorverarbeitungsstrategien ergibt sich ein Anknüpfungspunkt für weitere Forschungsarbeiten. Weitere Entwicklungen könnten sich zum einen mit einer genaueren Nachbildung der Physik der Objektlagen befassen. Zum anderen könnte die detaillierte Nachbildung der optischen Eigenschaften der Objektberflächen ein ergiebiges Betätigungsfeld bieten.

Ein weiterer Ansatzpunkt für zukünftige Entwicklungen könnte die optimierte Auswahl der zur Fitnessbewertung verwendeten Referenzbilder sein, z. B. anhand von Lernender Vektorquantisierung (LVQ).

Auf dem Gebiet der Besteinpassung kombinierter Elemente bieten sich weitere Forschungsarbeiten an, um auch Elemente, deren Teilelemente nicht auf einer gemeinsamen Achse liegen, behandeln zu können.

Kapitel 11.

Summary

The automatic picking of unordered work pieces – called objects henceforth – directly from their transport containers for handling and feeding is until now only solved in some specialized applications in industry. The obstacle is the time consuming adaption and configuration of the object detection methods. The presented work contributes to an easier configuration of an object detection system basing on geometric primitives applicable to a broader range of objects. The two objectives of the presented work are arising from these circumstances.

The first objective was the development of a self adapting pre-processing strategy. It segments the range images delivered by a 3D sensor into meaningful regions which are optimal suited for the subsequent pose detection. The second objective was to extend the class of objects detectable by geometric primitives to such objects which are combined of several geometric primitives.

The analysis of the objects occurring in industry surrendered that the class of rotation symmetric objects combined of geometric primitives are building a considerable fraction of the unordered existing objects. It came out that the objects in large part are built from cylinders and cones.

The state of the art in the filed of range image segmentation methods was surveyed. It followed that methods with good segmentation performance have high computationally expenses. Additionally the analysis showed that most of the methods with good performance are dependent from a bigger number of parameters. From the available information followed a range of 4 to 38 for the number of parameters used by the algorithms. The parameters in part have mutual dependencies and are critical for the success of the methods.

A first concept for an object detector basing on range images was designed in consequence of the state of the art. One of the two main functional blocks of the object detector is at first a pre-processing module that transcends a pure segmentation. In fact it should deliver regions that are best suited for detecting a free graspable object. A configuration module was envisioned to adapt the pre-processing module to new objects. At second a module for pose determination was identified as necessary.

The requirements on the subsystems to develop were outlined on the base of the concept. Important was a high processing speed, a high accuracy in pose determination and an automatic adaption of the pre-processing to new object geometries.

Concepts for a detector for objects built up from geometric primitives were developed with regard to the specifications. The input data for that object detecting method are range images on which the pre-processing is applied. The pre-processing smoothes the image, if necessary, segments it and sorts the resulting regions to be optimal suited for object detection. The 3D points corresponding to the regions in the range image serve

as input for the pose determination by geometric primitives.

A prototypical implementation of the object detector was used for preliminary tests which showed that in the pre-processing versatile high level image processing operators with a grater number of parameters which are difficult to adjust have to be used. Evolutionary algorithms were known from the state of the art to be used for parameter optimization of range image processing. Also the state of the art showed that genetic programming was used to generate edge detectors from low level image processing operators. But these known first signs were not sufficient to build up a self adaptive pre-processing method, which is named the pre-processing strategy. So a new method had to be developed using an evolutionary algorithm to optimize all occurring types of parameters of the high level operators and to generate new program flows. Additionally the fitness evaluation which is necessary for all evolutionary algorithms should be special adapted to the problem as the results from the pre-processing strategy get evaluated by the results of the 3D object detection.

It followed from the state of the art of the available methods for pose detection of geometric primitives that only fitting methods can fulfill the requirements for speed and accuracy. The only existing solutions for fitting of combined primitives, which are built from single geometric primitives, were designed for coordinate metrology. The main disadvantage of the known solutions was the form of the constraints between the single elements, which leads to a big number of constraints with negative impact to the stability of the fitting results.

According to the design a self adaptive pre-processing strategy was developed. The evolution strategy as the basic approach had to be extended to optimize integral number, textual parameters and the whole program flow additionally to the known optimization of real parameters. That was reached using object oriented programming to give each image processing operator and each pre-processing strategy, which is the solution candidate of the optimization problem, a standardized interface. The interface provides all necessary functionality for running the evolutionary strategy. Two different methods for fitness evaluation of the pre-processing strategies were implemented. The first was named 2D fitness evaluation and is based on the comparisons in the range image between reference regions and regions generated by the pre-processing strategy. The second is a completely new approach for fitness evaluation in range image processing where the regions delivered by the pre-processing strategy are evaluated by the success of the fitting of a geometric primitive with the objective of object detection. The only user input for that 3D fitness evaluation is the geometry data of the object to detect. To configure the pre-processing strategy without previous collection of real range images the generation of simulated range images from the geometry data of the object was implemented. These simulated range images are then providing the data basis for the automatic generation of the pre-processing strategy.

In the development of the method for pose determination the constraints between the single geometric primitives should be avoided. That was solved by using only one single position parameter and to describe the combination of the elements by the form parameters of the combined element. Thus the Jacobian, which is necessary for the optimization, can be set up in a compact form similar to that occurring by fitting single geometric primitives. Only knowledge of the assignment of the measured points

to each sub element is necessary. To solve that assignment problem methods for global assignment and for a local assignment at the transition of the sub elements were developed. The performance of the automatic configuration of the pre-processing strategy was tested in several experiments. At first evaluation parameters basing on statistical evaluation of the regions delivered by the pre-processing strategy were defined. Pre-processing strategies for real range images of scenes with forged parts were evolved with 2D and 3D fitness evaluation using evolution strategies with different set ups. Further experiments dealt with the adaptiveness to noise in the range images and to different lateral resolutions. Also the adaptiveness to find the regions resulting from different geometric primitives was examined. After interpretation of the experiments the 3D fitness evaluation in all cases had a better performance than the 2D fitness evaluation with an advantage of up to 36%. The adaptiveness of the pre-processing strategies generated using 3D fitness evaluation was very good. The pre-processing strategies generated on base of simulated range images did not fully fulfill the expectations when applied to real range images for verification, because of a variation in performance. The simple method for generation of the simulated range images was identified as the reason for the variations.

The performance of the fitting algorithms for combined geometric primitives was tested according to test procedures applied in coordinate metrology. As test criterion mainly the deviations between the nominal parameters and the parameters from the best fitting result were compared. For stability tests combined primitives were synthetically generated with noise of different intensity, at randomly generated positions in a measuring volume and with various geometries and point distributions at the sub elements. The results reached very low deviations, e. g. even with noise of a standard deviation of 0.8 a combined element consisting of a cone and a cylinder reached a deviation of 0.03 units in position coordinates and at maximum 0.01 rad in the direction angle. The solution of the global assignment problem showed very good performance. At low noise levels the cone cylinder combination could be fitted reliable as combined element with cone apex angles as low as 0.01 rad. The local assignment problem showed low relevance for object detection applications because the reached increases in accuracy are low. Experiments with datasets of industrial parts showed the suitability for practical use where especial the outlier elimination presented as useful.

The suggested object detection system was tested in two demonstrator assemblies and showed good detection performance suitable for practical use in the case of tubes as objects to detect. A further assembly to detect forged parts showed a lower detection performance due to edge conditions of the layout.

In summary it can be stated, that the configuration for the pre-processing strategy developed in the presented work does not need any user interaction. The user has to provide only the geometry description of the object to find and a few range images of test scene. Referring to this the specification could be fully fulfilled. Also the fitting algorithm for combined elements could fulfill the requirements so that it can be used stable in object detection.

The results respect to the performance of the pre-processing strategy generated on the base of simulated range images, which are not always conform to the expectations, a link to further developments arises. One possibility for further developments could

be the accurate simulation of the physics of the possible object poses in the simulated scene. A broad field of activity could be the more detailed simulation of the optical surface characteristics of the objects. A further starting point for future work could be the optimal selection of the reference images used for fitness evaluation, e. g. with the help of learning vector quantization.

Further work open up in the field of best fitting of combined elements to handle elements whose sub elements are not lying on a common axis.

Anhang A.

Die möglichen Auswahlkriterien des Operators `select_shape`

Im Folgenden sind alle Auswahlmöglichkeiten des Operators `select_shape` aus der Bildverarbeitungsbibliothek Halcon (HALCON 8.0) aufgeführt. Für weitere Details sei auf die zugehörige Dokumentation (MVTec, 2009) verwiesen.

Nr.	Merkmal	Bedeutung
1	<code>area</code>	Flächeninhalt
2	<code>row</code>	Zeilenindex des Schwerpunkts
3	<code>column</code>	Spaltenindex des Schwerpunkts
4	<code>width</code>	Breite in der Bounding Box parallel zu den Koordinatenachsen
5	<code>height</code>	Höhe in der Bounding Box parallel zu den Koordinatenachsen
6	<code>row1</code>	Zeilenindex der oberen linken Ecke der Bounding Box parallel zu den Koordinatenachsen
7	<code>column1</code>	Spaltenindex der oberen linken Ecke der Bounding Box parallel zu den Koordinatenachsen
8	<code>row2</code>	Zeilenindex der unteren linken Ecke der Bounding Box parallel zu den Koordinatenachsen
9	<code>column2</code>	Spaltenindex der unteren linken Ecke der Bounding Box parallel zu den Koordinatenachsen
10	<code>circularity</code>	Rundheit
11	<code>compactness</code>	Kompaktheit
12	<code>contlength</code>	Konturlänge
13	<code>convexity</code>	Konvexität
14	<code>ra</code>	Große Hauptachse der Trägheitsellipse
15	<code>rb</code>	Kleine Hauptachse der Trägheitsellipse
16	<code>phi</code>	Richtung der Trägheitsellipse
17	<code>anisometry</code>	Anisometrie ra/rb
18	<code>bulkiness</code>	Sperrigkeit $4 \pi I_a I_b / A^2$
19	<code>struct_factor</code>	Struktur Faktor Anisometrie x Sperrigkeit - 1
20	<code>outer_radius</code>	Radius des kleinsten umschriebenen Kreises
21	<code>inner_radius</code>	Radius des größten eingeschriebenen Kreises
22	<code>dist_mean</code>	Mittlerer Abstand der Kontur zum Schwerpunkt
23	<code>dist_deviation</code>	Abweichung des Mittleren Abstandes der Kontur zum Schwerpunkt
24	<code>roundness</code>	Rundheit der Kontur

25	<code>num_sides</code>	Anzahl der Polygonkanten der Kontur
26	<code>connect_num</code>	Anzahl der verbundenen Komponenten
27	<code>holes_num</code>	Anzahl der Löcher
28	<code>max_diameter</code>	Größter Durchmesser des Bereichs
29	<code>orientation</code>	Orientierung des Bereichs
30	<code>euler_number</code>	Eulerzahl
31	<code>rect2_phi</code>	Richtung des kleinsten umbeschriebenen Rechtecks
32	<code>rect2_len1</code>	Halbe Länge des kleinsten umbeschriebenen Rechtecks
33	<code>rect2_len2</code>	Halbe Breite des kleinsten umbeschriebenen Rechtecks
34	<code>moments_m11</code>	Trägheitsprodukt der zu den Koordiantenachsen parallelen Achsen durch den Mittelpunkt
35	<code>moments_m20</code>	Moment zweiter Ordnung (Zeilenabhängig)
36	<code>moments_m02</code>	Moment zweiter Ordnung (Spaltenabhängig)
37	<code>moments_ia</code>	Erste Trägheitsachse
38	<code>moments_ib</code>	Zweite Trägheitsachse
39	<code>moments_m11_invar</code>	Skaliertes Trägheitsprodukt der zu den Koordiantenachsen parallelen Achsen durch den Mittelpunkt
40	<code>moments_m20_invar</code>	Skaliertes Moment zweiter Ordnung (Zeilenabhängig)
41	<code>moments_m02_invar</code>	Skaliertes Moment zweiter Ordnung (Spaltenabhängig)
42	<code>moments_phi1</code>	Skaliertes relatives Moment zweiter Ordnung
43	<code>moments_phi2</code>	Skaliertes relatives Moment zweiter Ordnung
44	<code>moments_m21</code>	Moment dritter Ordnung (Zeilenabhängig)
45	<code>moments_m12</code>	Moment dritter Ordnung (Spaltenabhängig)
46	<code>moments_m03</code>	Moment dritter Ordnung (Spaltenabhängig)
47	<code>moments_m30</code>	Moment dritter Ordnung (Zeilenabhängig)
48	<code>moments_m21_invar</code>	Skaliertes Moment dritter Ordnung (Zeilenabhängig)
49	<code>moments_m12_invar</code>	Skaliertes Moment dritter Ordnung (Spaltenabhängig)
50	<code>moments_m03_invar</code>	Skaliertes Moment dritter Ordnung (Spaltenabhängig)
51	<code>moments_m30_invar</code>	Skaliertes Moment dritter Ordnung (Zeilenabhängig)
52	<code>moments_i1</code>	Zentrales Moment zweiter Ordnung
53	<code>moments_i2</code>	Zentrales Moment zweiter Ordnung
54	<code>moments_i3</code>	Zentrales Moment zweiter Ordnung
55	<code>moments_i4</code>	Zentrales Moment dritter Ordnung
56	<code>moments_psi1</code>	Invariantes Zentrales Moment zweiter Ordnung
57	<code>moments_psi2</code>	Invariantes Zentrales Moment zweiter Ordnung
58	<code>moments_psi3</code>	Invariantes Zentrales Moment zweiter Ordnung
59	<code>moments_psi4</code>	Invariantes Zentrales Moment zweiter Ordnung

Tabelle A.1.: Parameter des Operators `select_shape` zum Aussortieren von Bereichen nach unterschiedlichen Kriterien

Anhang B.

Beispiel für eine Modellbeschreibung

Hier wird ein vollständiges Beispiel für eine Modellbeschreibung auf Basis des in vielen Versuchen verwendeten Schmiedeteils aus Abbildung 4.2 gegeben.

```
<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
<object>
  <part>
    <shapeParams>
      <shape>CYLINDER</shape>
      <base>
        <x>0</x>
        <y>0</y>
        <z>0</z>
      </base>
      <length>153</length>
      <baseRadius>8.6</baseRadius>
      <topRadius>8.6</topRadius>
    </shapeParams>

    <renderingParams>
      <maxDeviation>0.2</maxDeviation>
    </renderingParams>

    <detectionParams>
      <isGripable>true</isGripable>
    </detectionParams>
  </part>

  <part>
    <shapeParams>
      <shape>CYLINDER</shape>
      <base>
        <x>0</x>
        <y>0</y>
        <z>153</z>
      </base>
      <length>7</length>
      <baseRadius>8.6</baseRadius>
```

```

        <topRadius>12.5</topRadius>
    </shapeParams>

    <renderingParams>
        <maxDeviation>0.2</maxDeviation>
    </renderingParams>

    <detectionParams>
        <isGripable>>false</isGripable>
    </detectionParams>
</part>

<part>
    <shapeParams>
        <shape>CYLINDER</shape>
        <base>
            <x>0</x>
            <y>0</y>
            <z>160</z>
        </base>
        <length>26</length>
        <baseRadius>12.5</baseRadius>
        <topRadius>12.5</topRadius>
    </shapeParams>

    <renderingParams>
        <maxDeviation>0.2</maxDeviation>
    </renderingParams>
</part>
</object>

```

Literaturverzeichnis

- [Ahn 2004] AHN, S. J.: *Least Squares Orthogonal Distance Fitting of Curves and Surfaces in Space*. Berlin : Springer, 2004 (Lecture Notes in Computer Science Bd. 3151)
- [Anthony u. a. 1991] ANTHONY, G.T. ; ANTHONY, H.M. ; COX, M.G. ; FORBES, A.B.: *The parametrization of geometric form* / National Physical Laboratory. Teddington, UK, 1991. – Forschungsbericht
- [Arman u. Aggarwal 1993] ARMAN, F. ; AGGARWAL, J. K.: Model-based object recognition in dense-range images — a review. In: *ACM Comput. Surv.* 25 (1993), Nr. 1, S. 5–43
- [Bab-Hadiashar u. Gheissari 2006] BAB-HADIASHAR, A. ; GHEISSARI, N.: Range image segmentation using surface selection criterion. In: *IEEE Trans. Image Process.* 15 (2006), Nr. 7, S. 2006–2018
- [Barr 1981] BARR, A. H.: Superquadrics and Angle-Preserving Transformations. In: *IEEE Comput. Graph. Appl.* 1 (1981), Nr. 1, S. 11–23
- [Beder u. Förstner 2006] BEDER, C. ; FÖRSTNER, W.: Direkte Bestimmung von Zylindern aus 3D-Punkten ohne Nutzung von Oberflächennormalen. In: LUHMANN, T. (Hrsg.) ; MÜLLER, C. (Hrsg.): *Photogrammetrie - Laserscanning - Optische 3D-Messtechnik*. Heidelberg : Wichmann, 2006, S. 206–213
- [Benkő u. a. 2002] BENKŐ, P. ; KÓS, G. ; VÁRADY, T. ; ANDOR, L. ; MARTIN, R.: Constrained fitting in reverse engineering. In: *Comput. Aided Geom. Des.* 19 (2002), Nr. 3, S. 173–205
- [Bennamoun u. Mamic 2002] BENNAMOUN, M. ; MAMIC, G. J.: *Object recognition: fundamentals and case studies*. London : Springer, 2002
- [Besl 1988] BESL, P. J.: Active, optical range imaging sensors. In: *Mach. Vision Appl.* 1 (1988), Nr. 2, S. 127–152
- [Besl u. Jain 1985] BESL, P. J. ; JAIN, R. C.: Three-dimensional object recognition. In: *ACM Comput. Surv.* 17 (1985), Nr. 1, S. 75–145
- [Besl u. Jain 1988] BESL, P. J. ; JAIN, R. C.: Segmentation through Variable-Order Surface Fitting. In: *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 10 (1988), Nr. 2, S. 167–192
- [Bhanu u. a. 1995] BHANU, B. ; LEE, S. ; MING, J.: Adaptive image segmentation using a genetic algorithm. In: *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.* 25 (1995), Nr. 12, S. 1543–1567

- [Bicego u. a. 2005] BICEGO, M. ; CASTELLANI, U. ; MURINO, V.: A hidden Markov model approach for appearance-based 3D object recognition. In: *Pattern Recogn. Lett.* 26 (2005), Nr. 16, S. 2588–2599
- [Biegelbauer u. Vincze 2007] BIEGELBAUER, G. ; VINCZE, M.: Efficient 3D Object Detection by Fitting Superquadrics to Range Image Data for Robot's Object Manipulation. In: *2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2007 Rom 10.–14. April 2007)* Bd. 10, 2007, S. 1086 – 1091
- [Blais 2004] BLAIS, F.: Review of 20 years of range sensor development. In: *Journal of Electronic Imaging* 13 (2004), Nr. 1, S. 231–243
- [Bock u. Guerra 2001] BOCK, M.E. ; GUERRA, C.: Segmentation of Range Images Through the Integration of Different Strategies. In: *Vision, Modeling, and Visualization*, 2001, S. 27–34
- [Boehnke 2007] BOEHNKE, K.: Object localization in range data for robotic bin picking. In: *Proceedings IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE 2007 Scottsdale, AZ, USA 22.–25. September 2007)*, 2007, S. 572–577
- [Böhm 2004] BÖHM, J.: *Modellbasierte Segmentierung und Objekterkennung aus Distanzbildern*. München : Beck, 2005 (Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften ; H. Nr. 583 : Reihe C, Dissertationen), Stuttgart, Univ., Fak. Luft- und Raumfahrttechnik und Geodäsie, Diss., 2004
- [Büker 2001] BÜKER, U.: *Aktive Szenenauswertung und Objekterkennung*. Paderborn, Univ., Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik, Diss., 2001
- [Bullinger u. Lung 1994] BULLINGER, H.-J. ; LUNG, M. M.: *Planung der Materialbereitstellung in der Montage*. Stuttgart : Teubner, 1994
- [Buttgen u. Seitz 2008] BUTTGEN, B. ; SEITZ, P.: Robust Optical Time-of-Flight Range Imaging Based on Smart Pixel Structures. In: *IEEE Trans. Circuits Syst. I* 55 (2008), Nr. 6, S. 1512–1525
- [Cagnoni 2008] CAGNONI, S.: Evolutionary Computer Vision: A Taxonomic Tutorial. In: *Proceedings Eighth International Conference on Hybrid Intelligent Systems (HIS '08 Barcelona 10.–12. September 2008)*, 2008, S. 1–6
- [Cagnoni u. a. 2007] CAGNONI, S. ; MORDONINI, M. ; SARTORI, J.: Particle Swarm Optimization for Object Detection and Segmentation. In: *Proceedings of the 2007 EvoWorkshops 2007 on EvoCoMnet, EvoFIN, EvoIASP, EvoINTERACTION, EvoMUSART, EvoSTOC and EvoTransLog (Berlin 2007)*, Springer, 2007, S. 241–250
- [Campbell u. Flynn 2001] CAMPBELL, R. J. ; FLYNN, P. J.: A survey of free-form object representation and recognition techniques. In: *Comput. Vis. Image Underst.* 81 (2001), Nr. 2, S. 166–210

- [Chaperon u. Goulette 2001] CHAPERON, T. ; GOULETTE, F.: Extracting Cylinders in Full 3D Data Using a Random Sampling Method and the Gaussian Image. In: *Proceedings of the Vision Modeling and Visualization Conference 2001 (VMV '01Stuttgart 21.-23. November 2001)*, Aka, 2001, S. 35–42
- [Chen u. Stamos 2007] CHEN, C.C. ; STAMOS, I.: Range Image Segmentation for Modeling and Object Detection in Urban Scenes. In: *Proceedings Sixth International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling (3DIM '07 Montreal 21.-23. August 2007)*, 2007, S. 185–192
- [Chen u. Bhanu 2007] CHEN, H. ; BHANU, B.: 3D free-form object recognition in range images using local surface patches. In: *Pattern Recogn. Lett.* 28 (2007), Nr. 10, S. 1252–1262
- [Chevalier u. a. 2003] CHEVALIER, L. ; JAILLET, F. ; BASKURT, A.: Segmentation and Superquadric Modeling of 3D Objects. In: *Journal of Winter School of Computer Graphics, WSCG'03* Bd. 11. Pilzen : UNION Agency, 3.–7. Februar 2003, S. 232–239
- [Cinque u. a. 2000] CINQUE, L. ; LEVIALDI, S. ; PIGNALBERI, G. ; CUCCHIARA, R. ; MARTINZ, S.: Optimal range segmentation parameters through genetic algorithms. In: *Proceedings 15th International Conference on Pattern Recognition (Barcelona 3.-7. September 2000)* Bd. 1, 2000, S. 474–477
- [Coleman u. a. 2007] COLEMAN, S.A. ; SCOTNEY, B.W. ; SUGANTHAN, S.: Feature Extraction on Range Images - A New Approach. In: *Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2007 Rom 10.-14. April 2007)*, 2007, S. 1098–1103
- [Darwin 1859] DARWIN, C.: *On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life*. London : Murray, 1859
- [Diaz u. a. 2005] DIAZ, I. ; BRANCH, J. ; BOULANGER, P.: A genetic algorithm to segment range image by edge detection. In: *Proceedings International Conference on Industrial Electronics and Control Applications (ICIECA 2005 Quito 29. November–2. December 2005)*, 2005, S. 7–14
- [DIN 10360-6 2009] Norm DIN EN ISO 10360-6 Januar 2009. *Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Annahmeprüfung und Bestätigungsprüfung für Koordinatenmessgeräte (KMG) – Teil 6: Fehlerabschätzung beim Berechnen zugeordneter Geometrieelemente nach Gauß*
- [Duarte u. a. 2006] DUARTE, A. ; SÁNCHEZ, Á. ; FERNÁNDEZ, F. ; MONTEMAYOR, A. S.: Improving image segmentation quality through effective region merging using a hierarchical social metaheuristic. In: *Pattern Recogn. Lett.* 27 (2006), Nr. 11, S. 1239–1251
- [Duda u. Hart 1973] DUDA, R. O. ; HART, P. E.: *Pattern Classification and Scene Analysis*. New York : Wiley, 1973

- [Ebner 2008] EBNER, M.: Evolutionäre Bildverarbeitung. In: *Informatik Spektrum* 31 (2008), Nr. 2, S. 146–150
- [Ebner 2009] EBNER, M.: A Real-Time Evolutionary Object Recognition System. In: VANNESCHI, L. u. a. (Hrsg.): *Proceedings of the 12th European Conference on Genetic Programming (EuroGP Tübingen 15.–17. April 2009)* Bd. 5481, Springer, 2009 (Lecture Notes in Computer Science), S. 268–279
- [Eisenhardt 2009] EISENHARDT, D.: Renaissance des Produktionsstandortes D. Bildverarbeitung schafft flexible Roboterzellen. In: *Inspect* (2009), Nr. 3, S. 30–32
- [Espindola u. a. 2006] ESPINDOLA, G. M. ; CAMARA, G. ; REIS, I. A. ; BINS, L. S. ; MONTEIRO, A. M.: Parameter selection for region-growing image segmentation algorithms using spatial autocorrelation. In: *International Journal of Remote Sensing* 27 (2006), Nr. 14, S. 3035–3040
- [Fischler u. Bolles 1981a] FISCHLER, M. A. ; BOLLES, R. C.: Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. In: *Communications of the ACM* 24 (1981), Nr. 6, S. 381–395
- [Fischler u. Bolles 1981b] FISCHLER, M.A. ; BOLLES, R.C.: A RANSAC-Based Approach to Model Fitting and Its Application to Finding Cylinders in Range Data. In: *Proceedings of the 7th international joint conference on Artificial intelligence (IJCAI'81 San Francisco, CA, USA 1981)*, Kaufmann, 1981, S. 637–643
- [Frank 1974] FRANK, H.-E.: *Das Verhalten von Werkstücken bei automatisierter Handhabung in der Fertigung*. Stuttgart, TU, Fak. Fertigungstechnik, Inst. für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb, Diss., 1974
- [Fraser 1957] FRASER, A. S.: Simulation of genetic systems by automatic digital computers. I. Introduction. In: *Australian Journal of Biological Sciences* 10 (1957), S. 484–491
- [Frigui u. Krishnapuram 1996] FRIGUI, H. ; KRISHNAPURAM, R.: Surface approximation and range image segmentation through robust competitive clustering. In: *Proceedings Fifth IEEE International Conference on Fuzzy Systems (New Orleans, LA , USA 8.–11. September 1996)* Bd. 2, 1996, S. 1414–1419
- [Gachter u. a. 2006] GACHTER, S. ; NGUYEN, V. ; SIEGWARD, R.: Results on Range Image Segmentation for Service Robots. In: *Proceedings IEEE International Conference on Computer Vision Systems (ICVS '06 New York, NY, USA 4.–7. Januar 2006)*, 2006, S. 53–53
- [Gay 1990] GAY, D. M.: *Usage Summary for Selected Optimization Routines* / AT&T Bell Laboratories. Murray Hill, NJ, USA, 1990. – Computing Science Technical Report No. 153
- [Goldberg 1989] GOLDBERG, D. E.: *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Boston : Addison-Wesley, 1989

- [Gotardo u. a. 2004] GOTARDO, P.F.U. ; BELLON, O.R.P. ; BOYER, K.L. ; SILVA, L.: Range image segmentation into planar and quadric surfaces using an improved robust estimator and genetic algorithm. In: *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. B* 34 (2004), Nr. 6, S. 2303–2316
- [Haindl u. Žid 2006] HAINDL, M. ; ŽID, P.: Multimodal Range Image Segmentation by Curve Grouping. In: *International Conference on Pattern Recognition (ICPR'06 Hong Kong 20.–24. August 2006)* Bd. 4, 2006, S. 9–12
- [HALCON 8.0] *HALCON 8.0*. MVTec Software GmbH, München. <http://www.mvtec.com/halcon/halcon-8.0.html>, Abruf: 25. September 2010. – Softwarebibliothek
- [Harati u. a. 2007] HARATI, A. ; GACHTER, S. ; SIEGWART, R.: Fast Range Image Segmentation for Indoor 3D-SLAM. In: *Proceedings of The 6th IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles (IAV Toulouse 3.–5. September 2007)*, 2007
- [Hardin 2007] HARDIN, W.: Vision enables freestyle bin picking. In: *Vision System Design* 6 (2007), Nr. 12, 52 - 53. <http://www.optoiq.com/index/machine-vision-imaging-processing/display/vsd-article-display/295192/articles/vision-systems-design/volume-12/issue-6/features/profile-in-industry-solutions/vision-enables-freestyle-bin-picking.html>, Abruf: 25. September 2010
- [Hetzl u. a. 2001] HETZEL, G. ; LEIBE, B. ; LEVI, P. ; SCHIELE, B.: 3D Object Recognition from Range Images using Local Feature Histograms. In: *Computer Vision and Pattern Recognition, 2001.*, 2001, S. II–394– II–399 vol.2
- [Hirschvogel u. a. 2006] HIRSCHVOGEL, M. ; KETTNER, P. ; LINDNER, G. ; DAHME, M. ; LANDGREBE, D. ; RAEDT, H. W.: *Kaltmassivumformung: Präzision in großen Serien*. Hagen : Infostelle Industrieverband Massivumformung, 2006
- [Ho u. Lee 2003] HO, S.-Y. ; LEE, K.-Z.: Design and Analysis of an Efficient Evolutionary Image Segmentation Algorithm. In: *J. VLSI Signal Process. Syst.* 35 (2003), Nr. 1, S. 29–42
- [Holland 1973] HOLLAND, J. H.: Genetic Algorithms and the Optimal Allocation of Trials. In: *SIAM Journal on Computing* 2 (1973), Nr. 2, S. 88–105
- [Hoover u. a. 1996] HOOVER, A. ; JEAN-BAPTISTE, G. ; JIANG, X. ; FLYNN, P.J. ; BUNKE, H. ; GOLDFOF, D.B. ; BOWYER, K. ; EGGERT, D.W. ; FITZGIBBON, A. ; FISHER, R.B.: An experimental comparison of range image segmentation algorithms. In: *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 18 (1996), Nr. 7, S. 673–689
- [Hough V 1962] Schutzrecht US3069654 (18. Dezember 1962). HOUGH V, P. C. (Erfinder).
- [Jähne 2005] JÄHNE, B.: *Digitale Bildverarbeitung*. 6., überarb. u. erw. Aufl. Berlin : Springer, 2005

- [Jiang u. a. 2000] JIANG, X. ; BOWYER, K. ; MORIOKA, Y. ; HIURA, S. ; SATO, K. ; INOKUCHI, S. ; BOCK, M. ; GUERRA, C. ; LOKE, R.E. ; BUF, J.M.H. du: Some further results of experimental comparison of range image segmentation algorithms. In: *Proceedings 15th International Conference on Pattern Recognition (Barcelona 2000)* Bd. 4, 2000, S. 877–881
- [Jiang u. Bunke 1994] JIANG, X. ; BUNKE, H.: Fast segmentation of range images into planar regions by scan line grouping. In: *Machine Vision and Applications* Bd. 7, 1994, S. 115–122
- [Jiang u. Bunke 1996] JIANG, X. ; BUNKE, H.: Robust Edge Detection in Range Images Based on Scan Line Approximation. In: *Computer Vision and Image Understanding* 73 (1996), S. 183–199
- [Jiang u. Bunke 1997] JIANG, X. ; BUNKE, H.: *Dreidimensionales Computertsehen: Gewinnung und Analyse von Tiefenbildern*. Springer, Berlin, 1997
- [Kadar u. a. 2009] KADAR, I. ; BEN-SHAHAR, O. ; SIPPER, M.: Evolution of a local boundary detector for natural images via genetic programming and texture cues. In: *Proceedings of the 11th Annual conference on Genetic and evolutionary computation (GECCO '09 Montreal 8.–12. July 2009)*. New York, NY, USA : ACM, 2009, S. 1887–1888
- [Kak u. DeSouza 2002] KAK, A. C. ; DESOUSA, N.: Robotic vision: What happened to the visions of yesterday? In: *Proceedings 16th International Conference on Pattern Recognition (ICPR 2002 Quebec 11.–15. August 2002)* Bd. 2, 2002, S. 839–847
- [Kak u. Edwards 1995] KAK, A. C. ; EDWARDS, J. L.: Experimental state of the art in 3D object recognition and localization using range. In: *Proceedings of Workshop on Vision for Robots (IROS'95 Pittsburgh, PA, USA, 1995)*, 1995
- [Katsoulas u. Kosmopoulos 2006] KATSOULAS, D. ; KOSMOPOULOS, D.I.: Box-like Superquadric Recovery in Range Images by Fusing Region and Boundary Information. In: *Proceedings 18th International Conference on Pattern Recognition (ICPR 2006 Hong Kong 20.–24. August 2006)* Bd. 1, 2006, S. 719–722
- [Kirkegaard 2005] KIRKEGAARD, J.: *Pose Estimation of Randomly Organized Stator Housings using Structured Light and Harmonic Shape Contexts: A CAD Based Approach to the Bin Picking Problem*. Aalborg, Univ. Laboratory of Computer Vision & Media Technology Department of Health Science and Technology, Diplomarbeit, 2005. http://jakir.dk/reports/CVG10_GR1024_2005.pdf, Abruf: 25. September 2010
- [Klasing u. a. 2008] KLASING, K. ; WOLLHERR, D. ; BUSS, M.: A clustering method for efficient segmentation of 3D laser data. In: *Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2008 Pasadena, CA, USA 19.–23. Mai 2008)*, 2008, S. 4043–4048

- [Klocke u. Pritschow 2004] KLOCKE, F. (Hrsg.) ; PRITSCHOW, G. (Hrsg.): *Autonome Produktion*. Berlin : Springer, 2004
- [Koza 1992] KOZA, J. R.: *Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection*. Cambridge : MIT Press, 1992
- [Krawiec u. a. 2007] KRAWIEC, K. ; HOWARD, D. ; ZHANG, M.: Overview of Object Detection and Image Analysis by Means of Genetic Programming Techniques. In: *Proceedings Frontiers in the Convergence of Bioscience and Information Technologies (FBIT 2007 Jeju Island, Korea 11.-13. Oktober 2007)*, 2007, S. 779–784
- [Krishnapuram u. Gupta 1992] KRISHNAPURAM, R. ; GUPTA, S.: Edge detection in range images through morphological residue analysis. In: *Proceedings IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR '92 Champaign, IL, USA 15.-18. Juni 1992)*, 1992, S. 630–632
- [Krivic u. Solina 2004] KRIVIC, J. ; SOLINA, F.: Part-level object recognition using superquadrics. In: *Computer Vision and Image Understanding* 95 (2004), Nr. 1, S. 105–126
- [Lai u. a. 2006] LAI, Y.-K. ; ZHOU, Q.-Y. ; HU, S.-M. ; MARTIN, R. R.: Feature sensitive mesh segmentation. In: *Proceedings of the 2006 ACM symposium on Solid and physical modeling (SPM '06 Cardiff 6.-8. Juni 2006)*. New York, NY, USA : ACM Press, 2006, S. 17–25
- [Lee u. a. 1999] LEE, S.H. ; HONG, H.K. ; CHOI, J.S.: A study on assembly part recognition using part-based superquadric. In: *Proceedings International Conference on Image Processing (ICIP 99 Kobe 24.-28. Oktober 1999)* Bd. 4, 1999, S. 78–82
- [Leonardis u. a. 1990] LEONARDIS, A. ; GUPTA, A. ; BAJCSY, R.: Segmentation as the search for the best description of the image in terms of primitives. In: *Proceedings Third International Conference on Computer Vision (ICVS 2003 Graz 1.-2. April 2003)*, 1990, S. 121–125
- [Leonardis u. a. 1995] LEONARDIS, A. ; GUPTA, A. ; BAJCSY, R.: Segmentation of range images as the search for geometric parametric models. In: *Int. J. Comput. Vision* 14 (1995), Nr. 3, S. 253–277
- [Leonardis u. a. 1997] LEONARDIS, A. ; JAKLIC, A. ; SOLINA, F.: Superquadrics for segmenting and modeling range data. In: *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 19 (1997), Nr. 11, S. 1289–1295
- [Li u. a. 1986] LI, H. ; LAVIN, M. A. ; LE MASTER, R. J.: Fast Hough transform: A hierarchical approach. In: *Comput. Vision Graph. Image Process.* 36 (1986), Nr. 2-3, S. 139–161
- [Li u. Zhao 2003] LI, S. ; ZHAO, D.: Gradient-based polyhedral segmentation for range images. In: *Pattern Recogn. Lett.* 24 (2003), Nr. 12, S. 2069–2077

- [Liu u. a. 2006] LIU, Y. ; POTTMANN, H. ; WANG, W.: Constrained 3D shape reconstruction using a combination of surface fitting and registration. In: *Comput. Aided Des.* 38 (2006), Nr. 6, S. 572–583
- [Lotter u. Wiendahl 2006] LOTTER, B. (Hrsg.) ; WIENDAHL, H.-P. (Hrsg.): *Montage in der industriellen Produktion: Ein Handbuch für die Praxis*. Berlin : Springer, 2006
- [Maas u. a. 2007] MAAS, H.-G. ; MULSOW, C. ; PUTZE, T.: Verfahren der optischen Triangulation zur räumlich-zeitlich aufgelösten Bestimmung von Wasserspiegelhöhen in hydraulischen Modellen. In: *Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau* 90 (2007), S. 75–78
- [Marshall u. a. 2001] MARSHALL, D. ; LUKACS, G. ; MARTIN, R.: Robust segmentation of primitives from range data in the presence of geometric degeneracy. In: *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 23 (2001), Nr. 3, S. 304–314
- [Mazouzi u. Batouche 2007] MAZOUZI, S. ; BATOUCHE, M.: Range Image Segmentation by Randomized Region Growing and Bayesian Edge Regularization. In: *Journal of Computer Science* 3 (2007), Nr. 5, S. 410–417
- [Melkemi u. a. 2006] MELKEMI, K. E. ; BATOUCHE, M. ; FOUFOU, S.: A multiagent system approach for image segmentation using genetic algorithms and extremal optimization heuristics. In: *Pattern Recogn. Lett.* 27 (2006), Nr. 11, S. 1230–1238
- [Michalewicz u. Fogel 2004] MICHALEWICZ, Z. ; FOGEL, D. B.: *How to Solve It: Modern Heuristics*. 2., überarb. u. erw. Aufl. Berlin : Springer, 2004
- [Min u. Bowyer 2005] MIN, J. ; BOWYER, K. W.: Improved range image segmentation by analyzing surface fit patterns. In: *Comput. Vis. Image Underst.* 97 (2005), Nr. 2, S. 242–258
- [Min u. a. 2004] MIN, J. ; POWELL, M. ; BOWYER, K.W.: Automated performance evaluation of range image segmentation algorithms. In: *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. B* 34 (2004), Nr. 1, S. 263–271
- [Modrich 2002] MODRICH, K.-U.: *Optisches Prüfverfahren zur in-situ-Detektion ölbasierter Kontaminationsfilme auf technischen Metalloberflächen*. Heimsheim : Jost-Jetter, 2002, Stuttgart, Univ., Fak. Maschinenbau, Inst. für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb, Diss., 2002
- [Moeslund u. Kirkegaard 2007] MOESLUND, T. B. ; KIRKEGAARD, J.: Pose Estimation Using Structured Light and Harmonic Shape Contexts. In: BRAZ, J. u. a. (Hrsg.): *Advances in Computer Graphics and Computer Vision (International Conferences VISAPP and GRAPP, Setúbal, Portugal, 25.–28. Februar 2006)* Bd. 4. Berlin : Springer, 2007, S. 281–292
- [Muñoz u. a. 2003] MUÑOZ, X. ; FREIXENET, J. ; CUFÍ, X. ; MARTÍ, J.: Strategies for image segmentation combining region and boundary information. In: *Pattern Recogn. Lett.* 24 (2003), Nr. 1-3, S. 375–392

- [Mundy 2006] MUNDY, J. L.: Object Recognition in the Geometric Era: A Retrospective. In: PONCE, J. u. a (Hrsg.): *Toward Category-Level Object Recognition*. Berlin : Springer, 2006 (Lecture Notes in Computer Science Bd. 4170), S. 3–28
- [MVTec 2009] MVTEC (Hrsg.): *HALCON Reference Manual*. München : MVTec Software GmbH, 2009
- [Nguyen u. a. 2005] NGUYEN, V. ; MARTINELLI, A. ; TOMATIS, N. ; SIEGWART, R.: A comparison of line extraction algorithms using 2D laser rangefinder for indoor mobile robotics. In: *Proceedings IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2005 Edmonton, Canada 2.-6. August 2005)*, 2005, S. 1929–1934
- [Niclass u. Charbon 2005] NICLASS, C. ; CHARBON, E.: A single photon detector array with 64x64 resolution and millimetric depth accuracy for 3D imaging. In: *IEEE International Solid-State Circuits Conference* Bd. 48, 2005, S. 364–365
- [Nocedal u. Wright 1999] NOCEDAL, J. ; WRIGHT, S. J.: *Numerical Optimization*. New-York : Springer, 1999
- [Ogundana u. a. 2007] OGUNDANA, O. O. ; COGGRIVE, C. R. ; BURGUETE, R. L. ; HUNTLEY, J. M.: Fast Hough transform for automated detection of spheres in three-dimensional point clouds. In: *Optical Engineering* 46 (2007), Nr. 5, S. 051002–1–051002–11
- [O’Leary u. a. 2005] O’LEARY, P. ; HARKER, M. ; ZSOMBOR-MURRAY, P.: Direct and least square fitting of coupled geometric objects for metric vision. In: *IEEE Proceedings - Vision, Image and Signal Processing* 152 (2005), Nr. 6, S. 687–694
- [Pal u. Pal 1993] PAL, N. R. ; PAL, S. K.: A review on image segmentation techniques. In: *Pattern Recognition* 26 (1993), Nr. 9, S. 1277–1294
- [Petitjean 2002] PETITJEAN, S.: A Survey of Methods for Recovering Quadrics in Triangle Meshes. In: *ACM Computing Surveys* 2 (2002), Nr. 34, S. 1–61
- [Pignalberi u. a. 2003] PIGNALBERI, G. ; CUCCHIARA, R. ; CINQUE, L. ; LEVI ALDI, S.: Tuning range image segmentation by genetic algorithm. In: *EURASIP J. Appl. Signal Process.* 8 (2003), Nr. 1, S. 780–790
- [Poli 1996] POLI, R.: Genetic Programming for Feature Detection and Image Segmentation. In: FOGARTY, Terence (Hrsg.): *Evolutionary Computing*. Berlin : Springer, 1996 (Lecture Notes in Computer Science Bd. 1143), S. 110–125
- [Poli u. a. 2008] POLI, R. ; LANGDON, W. B. ; MCPHEE, N. F.: *A field guide to genetic programming*. E-book frei verfügbar, 2008 <http://www.gp-field-guide.org.uk>, Abruf: 25. September 2010

- [PORT library] *PORT Mathematical Subroutine Library (third edition)*. Bell Labs. <http://www.bell-labs.com/project/PORT/>, Abruf: 25. September 2010. – Softwarebibliothek
- [Powell u. a. 1998] POWELL, M.W. ; BOWYER, K.W. ; JIANG, X. ; BUNKE, H.: Comparing curved-surface range image segmenters. In: *Proceedings Sixth International Conference on Computer Vision (ICCV '98 Bombay 4.-7. Januar 1998)*, 1998, S. 286–291
- [Quintana u. a. 2006] QUINTANA, M. I. ; POLI, R. ; CLARIDGE, E.: Morphological algorithm design for binary images using genetic programming. In: *Genetic Programming and Evolvable Machines* 7 (2006), Nr. 1, S. 81–102
- [Rabbani 2006] RABBANI, T.: *Automatic reconstruction of industrial installations using point clouds and images*. Delft : Nederlandse Commissie voor Geodesie, 2006 ; Publications on geodesy, Technische Universiteit Delft, Diss., 2006
- [Rabbani u. van den Heuvel 2005] RABBANI, T. ; HEUVEL, F. van d.: Efficient Hough Transform for Automatic Detection of Cylinders in Point Clouds. In: VOSSELMAN, G. (Hrsg.) ; BRENNER, C. (Hrsg.): *Proceedings of the ISPRS Workshop Laser scanning (Enschede 12.-14. September 2005)* Bd. XXXVI, 2005
- [Rabbani u. a. 2006] RABBANI, T. ; HEUVEL, F.A. van d. ; VOSSELMANN, G.: Segmentation of point clouds using smoothness constraint. In: MAAS, H.-G. (Hrsg.) ; SCHNEIDER, D. (Hrsg.): *Proceedings of the ISPRS Com. V Symposium (Dresden 25.-27. September 2006)* Bd. XXXVI, Teil 5, Technische Universität Dresden, 2006, S. 248–253
- [Rahardja u. Kosaka 1996] RAHARDJA, K. ; KOSAKA, A.: Vision-based binpicking: recognition and localization of multiple complex objects using simple visual cues. In: *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems 1996 (IROS 1996 Osaka 4.-8. November 1996)*, 1996, S. 1448–57
- [Rechenberg 1973] RECHENBERG, I.: *Evolutionsstrategie. Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution*. Berlin : Frommann, 1973
- [Rechenberg 1994] RECHENBERG, I.: *Werkstatt Bionik und Evolutionstechnik*. Bd. 1: *Evolutionsstrategie'94*. Stuttgart : Frommann, 1994
- [Requicha u. Voelcker 1982] REQUICHA, A.A.G. ; VOELCKER, H.B.: Solid Modeling: A Historical Summary and Contemporary Assessment. In: *IEEE Comput. Graph. Appl.* 2 (1982), Nr. 2, S. 9–24
- [Richter 2008] RICHTER, A.: Der Griff in die Kiste – Roboter als Bindeglied zwischen ungeordnetem und automatischem Materialfluss. In: RUPRECHT, R. (Hrsg.): *Karlsruher Arbeitsgespräche Produktionsforschung 2008 (Kongresszentrum Karlsruhe 11.-12. März 2008)*, 2008, S. 256 – 263

- [Rivlin u. a. 2007] RIVLIN, G. F. E. ; SHIMSHONI, I. ; SOLDEA, O.: Efficient search and verification for function based classification from real range images. In: *Computer Vision and Image Understanding* 105 (2007), March, Nr. 3, S. 200–217
- [Roberts u. a. 2003] ROBERTS, I. M. ; ROBERTS, M. E. ; CLARIDGE, E.: An Artificially Evolved Vision System for Segmenting Skin Lesion. In: *Proceedings of the 6th International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI Montréal 15.–18. November 2003)*, Springer-Verlag, 2003 (Lecture Notes in Computer Science Bd. 2878), S. 655–662
- [Rybarczyk 2004] RYBARCZYK, A.: *Auslegung aktiver aerodynamischer Zuführverfahren*. Hannover, Univ., Diss., 2004
- [Sablatnig u. Kampel 2002] SABLATNIG, R. ; KAMPTEL, M.: Model-based registration of front- and backviews of rotationally symmetric objects. In: *Comput. Vis. Image Underst.* 87 (2002), Nr. 1-3, S. 90–103
- [Safronov u. a. 2008a] SAFRONOV, K. ; TCHOUCHENKOV, I. ; WÖRN, H.: Hierarchical Iterative Object Recognition Method for a PMD-Sensor Supplied Bin-Picking System. In: *8th Asia-Pacific Conference on Control and Measurement (APCCM 2008 Harbin, China 22.–25. Januar 2008)*, 2008, S. 80–84
- [Safronov u. a. 2008b] SAFRONOV, K. ; TCHOUCHENKOV, I. ; WÖRN, H.: Hierarchical Iterative Pattern Recognition Method for Solving Bin Picking Problem. In: *Robotik 2008. Leistungsstand, Anwendungen, Visionen, Trends (Tagung München, 11.–12. Juni 2008)*. Düsseldorf : VDI, 2008 (VDI-Berichte 2012), S. 3–6
- [Sappa 2006] SAPPA, A.D.: Unsupervised contour closure algorithm for range image edge-based segmentation. In: *IEEE Trans. Image Process.* 15 (2006), Nr. 2, S. 377–384
- [Schmid 2006] SCHMID, S.: *Automatisierte Ordnungs- und Kommissionierzelle zur hochflexiblen Bereitstellung von Werkstücken in der Montage*. Heimsheim : Jost-Jetter, 2006, Stuttgart, Univ., Fak. Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik, Diss., 2006
- [Schnabel u. a. 2007] SCHNABEL, R. ; WAHL, R. ; KLEIN, R.: Efficient RANSAC for Point-Cloud Shape Detection. In: *Computer Graphics Forum* 26 (2007), Nr. 2, S. 214–226
- [Schröder 2008] SCHRÖDER, C.: Industrielle Arbeitskosten im internationalen Vergleich. In: *IW-Trends: Vierteljahresschrift zur empirischen Wirtschaftsforschung aus dem Institut der deutschen Wirtschaft Köln* 35 (2008), Nr. 3, S. 75–90
- [Schwarte u. a. 1995] SCHWARTE, R. ; HEINOL, H.-G. ; XU, Z. ; HARTMANN, K.: New active 3D vision system based on rf-modulation interferometry of incoherent light. In: CASASANT, D. P. (Hrsg.): *Photonics East-Intelligent Systems and Advanced Manufacturing* Bd. 2588, SPIE, 1995, 126-134

- [Schwefel 1975] SCHWEFEL, H.-P.: *Evolutionstrategie und numerische Optimierung*. Berlin, TU Fachbereich Verfahrenstechnik, Diss., 1975
- [Shilane u. Funkhouser 2007] SHILANE, P. ; FUNKHOUSER, T.: Distinctive regions of 3D surfaces. In: *ACM Trans. Graph.* 26 (2007), Nr. 2, S. 1–15
- [Sinn 2007] SINN, H.-W.: Internationaler Vergleich der Arbeitskosten: Warum Deutschland keine starken Lohnerhöhungen verträgt. In: *ifo Schmelldienst* 60 (2007), Nr. 04, S. 54–59
- [Sivadevan 2008] SIVADEVAN, V.: Robots with a Vision. In: *Vision System Design* (2008), 6, Nr. 13, S. 11–14
- [Solina u. Bajcsy 1990] SOLINA, F. ; BAJCSY, A. R.: Recovery of parametric models from range images: the case for superquadrics with global deformations. In: *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 12 (1990), S. 131–147
- [Sourlier 1995] SOURLIER, D. M.: *Three dimensional feature independent bestfit in coordinate metrology*. Zürich, ETH, Diss., 1995
- [Spirig u. a. 1995] SPIRIG, T. ; SEITZ, P. ; VIETZE, O. ; HEITGER, F.: The lock-in CCD-two-dimensional synchronous detection of light. In: *IEEE J. Quantum Electron.* 31 (1995), Nr. 9, S. 1705–1708
- [Spur u. Stöferle 1984] SPUR, G. (Hrsg.) ; STÖFERLE, T. (Hrsg.): *Handbuch der Fertigungstechnik*. München : Hanser, 1984
- [Spur u. Stöferle 1986] SPUR, G. (Hrsg.) ; STÖFERLE, T. (Hrsg.): *Handbuch der Fertigungstechnik*. Bd. 5. Fügen, Handhaben und Montieren. München : Hanser, 1986
- [Statistisches Bundesamt 2009] STATISTISCHES BUNDESAMT: *Produzierendes Gewerbe – Produktion im Produzierenden Gewerbe*. Fachserie 4 Reihe 3.1. Wiesbaden : Statistisches Bundesamt, 2009
- [Stoppa u. a. 2007] STOPPA, D. ; PANCHERI, L. ; SCANDIUZZO, M. ; GONZO, L. ; BETTA, G.-F. D. ; SIMONI, A.: A CMOS 3-D Imager Based on Single Photon Avalanche Diode. In: *IEEE Trans. Circuits Syst. I* 54 (2007), Nr. 1, S. 4–12
- [Stotz 2007a] STOTZ, M.: 3D-Objekterkennung auf Basis regelgeometrischer Elemente zur automatisierten Handhabung: Eine Lösung für den Griff in die Kiste. In: HEIZMANN, M. (Hrsg.): *VDI-Gesellschaft Meß- und Automatisierungstechnik: Bildverarbeitung in der Mess- und Automatisierungstechnik (Tagung Regensburg 27.–28. November 2007)*. Düsseldorf : VDI, 2007 (VDI-Berichte 1981), S. 197–203
- [Stotz 2007b] STOTZ, M.: Erkennen und Greifen ungeordneter Bauteile im Fertigungstakt. In: WESTKÄMPER, E. (Hrsg.) ; VERL, A. (Hrsg.): *Industrielle Bildverarbeitung für automatisierte Produktionen (Machine Vision Excellence 2007 Stuttgart 5. Juli 2007)*, 2007, S. 73–85

- [Stotz u. a. 2008a] STOTZ, M. ; KÜHNLE, J. ; VERL, A.: A novel approach to object recognition and localization in automation and handling engineering. In: *Optomechatronic Technologies 2008 (ISOT 2008 San Diego, CA, USA 17.-19. November 2008)*. Bellingham : SPIE, 2008 (SPIE Proceedings Series 7266), S. 72661A–1–72661A–8
- [Stotz u. Verl 2008] STOTZ, M. ; VERL, A.: Ein neuer Ansatz zur Erkennung der Objektlage von ungeordneten Bauteilen für die automatisierte Handhabung: Ein auf 3-D-Datenauswertung basierendes Verfahren zur Lösung des Griffs in die Kiste. In: *Robotik 2008. Leistungsstand, Anwendungen, Visionen, Trends (Tagung München, 11.-12. Juni 2008)*. Düsseldorf : VDI, 2008 (VDI-Berichte 2012), S. 131–134
- [Stotz u. Verl 2010] STOTZ, M. ; VERL, A.: Automatic Configuration of an Object Detection System. In: *Proceedings for the joint conference of ISR 2010 and ROBOTIK 2010 (41st International Symposium on Robotics and 6th German Conference on Robotics München 7.-9. Juni 2010)*. Berlin : VDE, 2010, S. 433–439. – CD-ROM
- [Stotz u. a. 2008b] Schutzrecht DE 10 2006 036 345 (B4) (3. Februar 2008). STOTZ, Martin ; EFFENBERGER, Ira ; HÜTTEL, Markus ; DUNKER, Thomas (Erfinder); Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der Angewandten Forschung e.V. (Anmelder).
- [Taylor 2004] TAYLOR, G.: *Robust Perception and Control for Humanoid Robots in Unstructured Environments Using Vision*. Clayton, Australia, Monash University, Diss., 2004
- [de Toledo u. a. 2008] TOLEDO, R. de ; LÉVY, B. ; PAUL, J.-C.: Reverse Engineering for Industrial-Plant CAD Models. In: HORVÁTH, I. (Hrsg.) ; KILIC, S. E. (Hrsg.): *Tools and Methods for Competitive Engineering (TMCE Kusadasi, Türkei 21.-25. April 2008)*, 2008, S. 1–14
- [Verl u. a. 2008] VERL, A. ; FRITSCH, D. ; LEDERMANN, T.: Robuste Objektlageerkennung in Tiefendaten durch Kombination von Partikel-Schwarm-Optimierung und lokalen Objekt-Features. In: *Robotik 2008. Leistungsstand, Anwendungen, Visionen, Trends (Tagung München, 11.-12. Juni 2008)*. Düsseldorf : VDI, 2008 (VDI-Berichte 2012), S. 159–162
- [Verl u. a. 2007] VERL, A. ; FRITSCH, D. ; LEDERMANN, T. ; MÜTHERICH, H.: Greifen und Sehen als Schlüsseltechnologien für Roboter. In: *wt Werkstattstechnik online* 97 (2007), Nr. 9, S. 694–699
- [Verl u. Stotz 2010] VERL, A. ; STOTZ, M.: Einpassung kombinierter regelgeometrischer Elemente in Messpunktwolken. In: *wt Werkstattstechnik online* 100 (2010), Nr. 5, S. 394–398
- [Vieira u. Shimada 2005] VIEIRA, M. ; SHIMADA, K.: Surface mesh segmentation and smooth surface extraction through region growing. In: *Computer Aided Geometric Design* 22 (2005), November, Nr. 8, S. 771–792

- [Wang u. Suter 2004] WANG, H. ; SUTER, D.: MDPE: A Very Robust Estimator for Model Fitting and Range Image Segmentation. In: *Int. J. Comput. Vision* 59 (2004), Nr. 2, S. 139–166
- [Wani u. Batchelor 1994] WANI, M.A. ; BATCHELOR, B.G.: Edge-region-based segmentation of range images. In: *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 16 (1994), Nr. 3, S. 314–319
- [Weicker 2007] WEICKER, K.: *Evolutionäre Algorithmen*. 2. Aufl. Stuttgart : Teubner, 2007
- [Weise 2009] WEISE, T.: *Global Optimization Algorithms - Theory and Application*. 2. Aufl. Selbstverlag, 2009 <http://www.it-weise.de/>, Abruf: 25. September 2010
- [Westkämper u. a. 2006a] WESTKÄMPER, E. ; STOTZ, M. ; EFFENBERGER, I.: An automated process to segment 3D-pointclouds into geometric primitives. In: *Production Engineering* 13 (2006), Nr. 2, S. 165–168
- [Westkämper u. a. 2006b] WESTKÄMPER, E. ; STOTZ, M. ; EFFENBERGER, I.: Automatische Segmentierung von Messpunktewolken in regelgeometrische Elemente. In: *Technisches Messen* 73 (2006), Nr. 1, S. 60–66
- [Westkämper u. Zahn 2009] WESTKÄMPER, E. ; ZAHN, E.: *Wandlungsfähige Produktionsunternehmen. Das Stuttgarter Unternehmensmodell*. Berlin : Springer, 2009
- [Wiendahl u. a. 2004] WIENDAHL, H.-P. (Hrsg.) ; GERST, D. (Hrsg.) ; KEUNECKE, L. (Hrsg.): *Variantenbeherrschung in der Montage : Konzept und Praxis der flexiblen Produktionsendstufe*. Berlin : Springer, 2004
- [Wörn u. a. 2009] WÖRN, H. ; GRAF, J. ; SAFRONOV, K. ; MAMAEV, I.: 3D-Umwelterfassung in der Produktion mit neuer 3D-Kamera. In: *AVN* 116 (2009), Nr. 5, S. 200–206
- [Xu 2007] XU, L.: A unified perspective and new results on RHT computing, mixture based learning, and multi-learner based problem solving. In: *Pattern Recognition* 40 (2007), Nr. 8, S. 2129–2153
- [Xu u. a. 1990] XU, L. ; OJA, E. ; KULTANEN, P.: A new curve detection method: randomized Hough transform (RHT). In: *Pattern Recogn. Lett.* 11 (1990), Nr. 5, S. 331–338
- [Xu u. Wunsch 2005] XU, R. ; WUNSCH, D.: Survey of clustering algorithms. In: *IEEE Trans. Neural Netw.* 16 (2005), Nr. 3, S. 645–678
- [Yang u. Kak 1986] YANG, H. ; KAK, A.: Determination of the identity, position and orientation of the topmost object in a pile: Some further experiments. In: *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 1986 San Francisco, CA, USA 7.–10. April 1986)* Bd. 3, 1986, S. 293–298

- [Yokoya u. Levine 1994] YOKOYA, N. ; LEVINE, M. D.: Volumetric shapes of solids of revolution from a single-view range image. In: *CVGIP: Image Underst.* 59 (1994), Nr. 1, S. 43–52
- [Zhang u. Huang 2006] ZHANG, S. ; HUANG, P. S.: High-resolution, real-time three-dimensional shape measurement. In: *Optical Engineering* 45 (2006), December, Nr. 12, S. 123601–1–123601–8
- [Zhang u. a. 2003] ZHANG, Y. ; KOSCHAN, A. ; ABIDI, M.: Superquadrics based 3d object representation of automotive parts utilizing part decomposition. In: *Proc. of SPIE 6th International Conference on Quality Control by Artificial Vision (Gatlinburg, TN, USA 19.–23. Mai 2003)*, 2003, S. 241–251
- [Zhang 2006] ZHANG, Y.-J. (Hrsg.): *Advances in Image and Video Segmentation*. Hershey, PA, USA : IRM Press, 2006