

Forschungsberichte aus dem
wbk Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Markus Schäfer

**Kollisionsvermeidung für Endeffektoren
mit integriertem LiDAR-System in der MRK**
Ein Beitrag zur Mensch-Roboter-Kollaboration

Band 280



Forschungsberichte aus dem
wbk Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer
Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza
Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze
Prof. Dr.-Ing. Frederik Zanger

Markus Schäfer

Kollisionsvermeidung für Endeffektoren mit integriertem LiDAR-System in der MRK

Ein Beitrag zur Mensch-Roboter-Kollaboration

Band 280

Kollisionsvermeidung für Endeffektoren mit integriertem LiDAR-System in der MRK

Ein Beitrag zur Mensch-Roboter-Kollaboration

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)

bei der KIT-Fakultät für Maschinenbau des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)
angenommene

DISSERTATION

von

Markus Schäfer, M.Sc.

Tag der mündlichen Prüfung: 01.03.2024
Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Bernd Kühlenkötter

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 2024

Copyright Shaker Verlag 2024

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-9510-4

ISSN 0724-4967

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort des Herausgebers

Die schnelle und effiziente Umsetzung innovativer Technologien wird vor dem Hintergrund der Globalisierung der Wirtschaft der entscheidende Wirtschaftsfaktor für produzierende Unternehmen. Universitäten können als "Wertschöpfungspartner" einen wesentlichen Beitrag zur Wettbewerbsfähigkeit der Industrie leisten, indem sie wissenschaftliche Grundlagen sowie neue Methoden und Technologien erarbeiten und aktiv den Umsetzungsprozess in die praktische Anwendung unterstützen.

Vor diesem Hintergrund wird im Rahmen dieser Schriftenreihe über aktuelle Forschungsergebnisse des Instituts für Produktionstechnik (wbk) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) berichtet. Unsere Forschungsarbeiten beschäftigen sich sowohl mit der Leistungssteigerung von additiven und subtraktiven Fertigungsverfahren, den Produktionsanlagen und der Prozessautomatisierung als auch mit der ganzheitlichen Betrachtung und Optimierung der Produktionssysteme und -netzwerke. Hierbei werden jeweils technologische wie auch organisatorische Aspekte betrachtet.

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Prof. Dr.-Ing. Frederik Zanger

Vorwort des Verfassers

Diese Arbeit entstand im Wesentlichen während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am wbk Institut für Produktionstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT). Mein außerordentlicher Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer für das mir entgegengebrachte Vertrauen und die Betreuung dieser Arbeit sowie die vielfältigen Möglichkeiten eigene Ideen umzusetzen und das Institutsleben gestalten zu können. Weiterhin bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Kuhlenkötter für die Übernahme des Korreferats sowie bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans-Jörg Bauer für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Zudem möchte ich mich herzlich bei allen Freunden und Kollegen am wbk, den Instituten des KIT, der Fraunhofer-Gesellschaft und der Stanford University für die sehr gute Zusammenarbeit bedanken. Mein besonderer Dank gilt hierbei Franz Jost, David Barton, Paul Ruhland, Daniel Kupzik, Anne-Sophie Rossol, Sven Roth und Marco Friedmann für die gemeinsamen Erlebnisse während der Arbeit und auch darüber hinaus.

Ebenso zum Dank verpflichtet bin ich den studentischen Mitarbeitern, die wesentlich zum Erfolg meiner Dissertation beigetragen haben. Hervorzuheben ist hier das unermüdliche Engagement von Marcel Büsching, Philipp Nicklas, Joshua Locher, Jonas Janzen, Richard Grzempa und Christoph Hellman.

Für die fachlichen und persönlichen Entwicklungsmöglichkeiten danke ich insbesondere Martin May und Ralf Becker sowie der Hans Weisser Stiftung für die Förderung meines Forschungsaufenthalts.

Für ihre bedingungslose Unterstützung vom Studium bis zur Promotion danke ich meinen Eltern. Euer Vertrauen hat mir diese Arbeit erst ermöglicht. Mein größter Dank geht meiner Freundin Rica. Deine Liebe und deine Geduld haben mir in den letzten Jahren Kraft gegeben und entscheidend zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Berlin, im März 2024

Markus Schäfer

Abstract

The physical collaboration between humans and robots is one approach to combine the flexibility of manual labor on the one hand, and the time and cost efficiency of an automated system on the other. The major risks of this are injuries due to collisions, which must be avoided. During such human-robot collaboration (HRC), the closest point of contact of the robotic system is often the end effector. In addition, the end effector is the fastest part of the moving system and thus a source of great risk for injuries.

Since the most commonly used end effectors are grippers, this thesis addresses collision avoidance for HRC grippers. First various sensor principles are tested and evaluated with the goal of maximizing the detection range of obstacles in the vicinity of the gripper. Furthermore, the prototype of a LiDAR-system is being developed and integrated into a gripper.

A new problem arises from the large detection range: The gripper must inevitably come very close to its environment during a handling process, but cannot distinguish whether a detection is a human, where it would have to stop, or the normal environment, where the process should continue. In this work, a probabilistic approach to risk assessment is presented for this purpose. Based on an occupancy map, the gripper can evaluate how likely every current measurement matches the safe reference or not. Thus it decides whether a situation needs a safety reaction or not.

Depending on the risk assessment, the gripper can take full control of the robot and either switch to a distance-dependent speed monitoring or calculate an alternative robot path to perform an obstacle avoidance movement.

The developed methods and systems are validated on anthropomorphic test objects in various test setups with a Kuka KR180 industrial robot and a prototype gripper with the integrated LiDAR sensor technology.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	III
Abkürzungen	VII
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Struktur und Vorgehen in der Arbeit	4
2 Grundlagen und Stand der Technik	6
2.1 Mensch-Roboter-Kollaboration	6
2.1.1 Grundbegriffe, Definitionen und Eingrenzungen	7
2.1.2 Klassifizierungen und Betriebsarten der MRK	9
2.2 Bewegungsplanung und -steuerung zur Kollisionsvermeidung	10
2.2.1 Varianten der Pfadplanung	11
2.2.2 Klassische Potenzialfeldmethode (PFM)	14
2.2.3 Varianten der Potenzialfeldmethode	16
2.3 Kollisionsvermeidung mit Greifern in der MRK	16
2.3.1 Gliederung nach Sensorprinzipien	17
2.3.2 Kapazitive Sensorsysteme	18
2.3.3 RADAR-Systeme	21
2.3.4 LiDAR-Systeme	23
2.3.5 Ultraschall-Systeme (SODAR)	26
2.3.6 Sonstige Verfahren zur Umgebungserfassung	28
2.4 Zusammenfassung und Forschungsdefizit	29
3 Zielsetzung und Vorgehensweise	32
3.1 Zielsetzung	32
3.1.1 Risikofall A: Zusammenstoß	33
3.1.2 Risikofall B: Quetschung	34
3.1.3 Resultierende Fragestellungen	36
3.2 Vorgehensweise nach V-Modell	36
3.2.1 Vorgehensweise - Wahrnehmen der Umgebung	37

3.2.2	Vorgehensweise - Gefahrenabschätzung	38
3.2.3	Vorgehensweise - Kollisionsvermeidung	38
3.3	Systemspezifikation	39
3.3.1	Systemgrenze und allgemeiner Systemaufbau	39
3.3.2	Funktionale Systemaufteilung	41
4	Erfassen der Umgebung	43
4.1	Problemeingrenzung	43
4.2	Auswahl eines geeigneten Sensorprinzips	45
4.2.1	Kapazitive Umgebungserfassung	46
4.2.2	RADAR-basierte Umgebungserfassung	47
4.2.3	LiDAR: Laserscanner	49
4.2.4	LiDAR: IR Time-of-Flight-Sensoren	50
4.2.5	Bewertung und Auswahl Sensorprinzip	52
4.3	Charakterisierung des Sensorprinzips	53
4.3.1	Sensorspezifische Einflussanalyse nach Ishikawa	53
4.3.2	Validierung des Sensorprinzips	56
4.4	Eigener Ansatz zur Umgebungserfassung	63
4.4.1	Mitbewegter Sicherheitsraum	63
4.4.2	Sensoranordnung im Greifer	64
4.4.3	Konstruktiver Aufbau des funktionalen Prototypen	67
4.4.4	Systemarchitektur des funktionalen Prototypen	68
4.5	Zusammenfassung	69
5	Methode zur Gefahrenbeurteilung	71
5.1	Problemeingrenzung	71
5.2	Eigener Ansatz zur Veränderungserkennung	75
5.3	Modell und Berechnung der Referenzkarte	77
5.3.1	Modellierung des Arbeitsraums	77
5.3.2	Datenerfassung für die Referenzkarte	78
5.3.3	Berechnungsmethode für die Referenzkarte	79

5.3.4	ToF-Sensormodell	81
5.3.5	Aggregation zur Karte	87
5.4	Gefahrenabschätzung	88
5.4.1	Probabilistische Modellierung der Veränderung	88
5.4.2	Aggregation der Karteninformationen	89
5.4.3	Vergleich der Belegungswahrscheinlichkeiten	91
5.5	Umsetzungsvarianten des Verfahrens	91
5.5.1	Online-Berechnungsverfahren	92
5.5.2	Schwellwert-Karte	94
5.6	Zusammenfassung	96
6	Kollisionsvermeidung für intelligente Greifer	98
6.1	Problemeingrenzung	98
6.1.1	Annahmen und Randbedingungen	98
6.1.2	Anforderungen aus den Risikofällen	99
6.2	Eigener Ansatz zur Kollisionsvermeidung	100
6.3	Abstandsüberwachung	102
6.3.1	Modellierung des Menschen	103
6.3.2	Bremsweg des Roboters	104
6.3.3	Kritischer Mindestsicherheitsabstand	105
6.4	Geschwindigkeitsregelung	108
6.4.1	Geschwindigkeit-Abstands-Profile	109
6.5	Online Hindernisumfahrung	112
6.5.1	Vorgehen der Hindernisumfahrung	112
6.5.2	Adaption der klassischen Potenzialfeldmethode	114
6.5.3	Adaptierte generalisierte Potenzialfeldmethode	118
6.5.4	Zielerreichung nach Hindernisumfahrung	119
6.6	Systemarchitektur	120
6.7	Zusammenfassung	122

7	Validierung des Gesamtsystems	124
7.1	Software-in-the-Loop-Validierung	125
7.1.1	Simulationsumgebung	125
7.1.2	Simulationsmodell	125
7.2	Validierung Modul Gefahrenabschätzung	127
7.2.1	Gefahrenabschätzung – Szenario 1	127
7.2.2	Gefahrenabschätzung - Szenario 2	132
7.3	Validierung Modul Kollisionsvermeidung	134
7.3.1	Hindernisumfahrung – Szenario 1	135
7.3.2	Hindernisumfahrung – Szenario 2	137
7.4	Validierung Gesamtsystem	139
7.4.1	Risikofall A: Stoßen	139
7.4.2	Risikofall B: Quetschung	150
7.5	Bewertung der Ergebnisse	153
8	Zusammenfassung und Ausblick	155
8.1	Zusammenfassung	155
8.2	Ausblick	158
9	Liste eigener Publikationen	160
10	Literaturverzeichnis	I
	Abbildungsverzeichnis	IX
	Tabellenverzeichnis	XIV

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
CAD	Computer Aided Design
DoE	Design of Experiments
FoV	Field of View / Blickfeld
FP	false positive
GPFM	Generalisierte Potenzialfeldmethode
HRC	Human Robot Collaboration
I²C	Inter-Integrated Circuit
IoT	Internet of Things
IR	Infrarot
KRC	Kuka Robot Controller
LED	Light Emitting Diode
LiDAR	Light-Detection-and-Ranging
LUT	Lookup-Tabelle
MRK	Mensch-Roboter-Kollaboration
NT	Nearest-Target
OFAT	One Factor at a Time
PFM	Potenzialfeldmethode
PTP	Point-to-Point / Punkt-zu-Punkt
RADAR	Radio-Detection-and-Ranging
RAM	Random Access Memory
RGB	Rot-Grün-Blau-Farbraum
SoC	System-on-Chip
SODAR	Sonic-Detection-and-Ranging
SPAD	Single Photon Avalanche Diode

STO	Safe-Torque-Off
TB	Timing Budget / Zeitbudget
TCP	Tool-Center-Point
ToF	Time-of-Flight / Laufzeit
TP	true positive
UDP	User Datagram Protocol
UNIX	Betriebssystem für Computer
VCSEL	Vertical cavity surface emitting laser
V-REP	Virtual Robot Experimentation Platform

Formelzeichen	Größe	Einheit
Δ	Unschärfe	m
a_H	Verzögerungsrate des Menschen	m/s ²
B	Bounding-Box-Matrix	
b_{max}	Oberer Stützvektor der Bounding-Box	
b_{min}	Unterer Stützvektor der Bounding-Box	
C	Eindringabstand	mm
Δd	Aggregationsbreite der Blickfeld-Diskretisierung	mm
d_i	Scheibensegment des Sensor-Blickfeld	mm
d_{max}	Detektionsreichweite	mm
d_{min}	notwendige Detektionsreichweite für eine rechtzeitige Bremsung vor Kollision	mm
d_{NT}	Kleinster Abstand eines Objekts zum Sensor	mm
d_{real}	Realer Abstand zum Hindernis	mm
d_{rest}	Restabstand im stehenden Inertialsystem	mm
d_Z	Abstand, ab dem eine Potenzialfunktion wirkt	mm
E_{att}	Potenzialfeld mit anziehender Wirkung	J
E_{rep}	Potenzialfeld mit abstoßender Wirkung	J

E_{ges}	Summe aller Potenzialfelder im Arbeitsraum	J
f	Messfrequenz	1/s
F_A	Abgeleitete Kraft zum Potenzialfeld A	N
$F_{R,ij}$	Abstoßende virtuelle Kraft des Sensors S_{ij}	N
F_{R0}	Oberer Grenzwert abstoßender Kräfte	N
F_{res}	Resultierender Kraftvektor	N
\tilde{G}_A	Verstärkungskoeffizient im anziehenden Potenzialfeld	
\tilde{G}_R	Verstärkungskoeffizient im abstoßenden Potenzialfeld	
$I_V(\boldsymbol{\eta}_k)$	Funktion der inversen Kinematik	
k	Interpolationstakt	
\mathbf{K}_{TCP}	Koordinatensystem des Tool-Center-Points	
\mathbf{K}_{Welt}	Koordinatensystem des Robotersystems	
$l(x)$	Logit-Transformation der Wahrscheinlichkeitsdichte von x	
$L(X)$	Logit-Transformation der Wahrscheinlichkeit von X	
l_m	Kantenlänge eines Voxels m	mm
\mathbf{M}	Kartenmatrix im Weltkoordinatensystem	
m_n	Voxel n der Karte M	
\mathbf{n}_{next}	normalisierter Differenzvektor zum nächsten Endpunkt	
o_n	Belegungszustand des Voxel m_n	
O_V	Feed-Override des Roboters	
$O_{v,Soll}$	Soll-Feed-Override des Roboters	
$P(m_n)$	Belegungswahrscheinlichkeit des Voxels m_n	
$P(o_n q_{1:k})$	a-posteriori-Wahrscheinlichkeit	
$P(o_n q_{k-1})$	a-priori-Wahrscheinlichkeit	
$P(X)$	Wahrscheinlichkeit für das Ereignis X	
$p(x)$	Wahrscheinlichkeitsdichte der Zufallsvariable x	
$P(X Y)$	Bedingte Wahrscheinlichkeit für X bei Y	
P_{corr}	korrigierte Belegungswahrscheinlichkeit	
$P_{oc}(m_n)$	Belegungswahrscheinlichkeit des Voxel n	

Q	Messdatum	
q_{ij}	Messwert des Sensors s_{ij}	mm
Q_k	Messdatenvektor zum Takt k	
q_k	Messwert aus Einzelmessung zum Takt k	mm
\hat{q}_{ij}	Vektor mit Messwerten q_{ij} ohne Selbstdetektion	
q_{min}	kleinster Messwert je Messzyklus	mm
R	Reflexionsgrad	
S_H	Anhalteweg des Menschen	m
S_{ij}	Sensor i von Modul j	
s_{ij}	Orientierungsvektor von Sensor i von Modul j	
SiL	Software in the Loop	
S_{min}	Sicherer Mindestabstand	mm
S_R	Anhalteweg des Roboters	m
S_{SEN}	Sensitivität	
S_{SPZ}	Spezifität	
$T_{Torso,W}$	Testobjekt Torso mit weißer Oberfläche	
$T_{Torso,S}$	Testobjekt Torso mit schwarzer Oberfläche	
T_{Finger}	Testobjekt Finger	
$T_{Hand,W}$	Testobjekt Hand mit weißer Oberfläche	
$T_{Hand,S}$	Testobjekt Hand mit schwarzer Oberfläche	
t_{Puls}	Pulsdauer	ns
T_R	Anhaltedauer des Roboters	s
U	Umgebung	
U_M	Umgebung zum Zeitpunkt der Kartenerstellung	
U_q	aktuelle Umgebung	
U_q	Umgebung zum Zeitpunkt der Messung q	
v_H	Gehgeschwindigkeit des Menschen	m/s
v_{MRK}	Sichere MRK-Geschwindigkeit nach ISO 15066	mm/s
v_R	Geschwindigkeit des TCP als Skalar	m/s

$v_{R,Soll}$	Soll-Geschwindigkeit des TCP als Skalar	m/s
v_{rel}	Relativgeschwindigkeit zwischen Greifer und Hindernis	m/s
W	Werkstückkorrekturmatrix	mm
$\dot{x}_{TCP,SOLL}$	kartesische Soll-Geschwindigkeit des TCP	m/s
\dot{x}_{TCP}	kartesische Momentan-Geschwindigkeit des TCP	m/s
x_{TCP}	aktueller Positionsvektor des TCP	m
x_{next}	nächster Positionsvektor einer PTP-Trajektorie	m
Z_D	Positionsunsicherheit des Menschen	mm
Z_R	Positionsunsicherheit des Roboters	mm
α	Winkelparameter ab der Mittelachse des Blickfelds	°
α_{FOV}	Öffnungswinkel des Sensor-Blickfelds	°
γ	relative Orientierung der Sensornormale zur Trajektorie	°
$\Delta\gamma$	Winkeldiskretisierung des Sensorkegels	°
δ_{SSR}	Signalamplitude (SSR = Signal Return Rate)	
η_k	Soll-Ausweichrichtung (normiert)	
Φ	Menge der Eigenschaften der Umgebung	
θ	Gelenkwinkel des Robotergelenks i	°
θ'	Winkelgeschwindigkeit des Robotergelenks i	°/s
θ''	Beschleunigung des Robotergelenks i	°/s ²
λ	Wellenlänge	nm
ξ	Wahrscheinlichkeits-Grenzwert	
σ	Standardabweichung	
τ	Hashfunktion zum Abbilden der LUT	
φ	Reflexionswinkel der Objekt Oberfläche	°
μ	Zugehörigkeitsfunktion im Sensor-Blickfeld	
$L(o_n)$	Logit-Transformation	
\mathcal{N}	Standardnormalverteilungsdichtefunktion	
\mathcal{C}	Menge aller Sensorblickfelder	
\mathcal{U}	Menge aller möglichen Umgebungen	
