

IPA-IAO

Forschung und Praxis

127

Dieter Boley

Sensorunterstütztes  
Programmierverfahren  
für das Entgraten  
mit Industrierobotern



Springer-Verlag

Tp2422  
B688

8962871

IPA-IAO

# Forschung und Praxis

Band 127

Berichte aus dem  
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik  
und Automatisierung (IPA), Stuttgart,  
Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft  
und Organisation (IAO), Stuttgart, und  
Institut für Industrielle Fertigung und  
Fabrikbetrieb der Universität Stuttgart

Herausgeber: H. J. Warnecke und H.-J. Bullinger



E8962871





TP2422  
B688

8962871

**Dieter Boley**

**Sensorunterstütztes  
Programmierverfahren  
für das Entgraten  
mit Industrierobotern**

Mit 67 Abbildungen



**Springer-Verlag**  
**Berlin Heidelberg New York**  
**London Paris Tokyo 1988**

Dipl.-Ing. Dieter Boley

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

Dr.-Ing. H. J. Warnecke

o. Professor an der Universität Stuttgart

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

Dr.-Ing. habil. H.-J. Bullinger

o. Professor an der Universität Stuttgart

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

D 93

ISBN 3-540-50175-4 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York

ISBN 0-387-50175-4 Springer-Verlag New York Berlin Heidelberg

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 Fassung vom 24. Juni 1985 zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

© Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 1988.

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 Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Gesamtherstellung: Copydruck GmbH, Heimsheim  
2362/3020—543210

## Geleitwort der Herausgeber

Futuristische Bilder werden heute entworfen:

- o Roboter bauen Roboter,
- o Breitbandinformationssysteme transferieren riesige Datenmengen in Sekunden um die ganze Welt.

Von der "mensenleeren Fabrik" wird da gesprochen und vom "papierlosen Büro". Wörtlich genommen muß man beides als Utopie bezeichnen, aber der Entwicklungstrend geht sicher zur "automatischen Fertigung" und zum "rechnerunterstützten Büro". Forschung bedarf der Perspektive, Forschung benötigt aber auch die Rückkopplung zur Praxis - insbesondere im Bereich der Produktionstechnik und der Arbeitswissenschaft.

Für eine Industriegesellschaft hat die Produktionstechnik eine Schlüsselstellung. Mechanisierung und Automatisierung haben es uns in den letzten Jahren erlaubt, die Produktivität unserer Wirtschaft ständig zu verbessern. In der Vergangenheit stand dabei die Leistungssteigerung einzelner Maschinen und Verfahren im Vordergrund. Heute wissen wir, daß wir das Zusammenspiel der verschiedenen Unternehmensbereiche stärker beachten müssen. In der Fertigung selbst konzipieren wir flexible Fertigungssysteme, die viele verkettete Einzelmaschinen beinhalten. Dort, wo es Produkt und Produktionsprogramm zulassen, denken wir intensiv über die Verknüpfung von Konstruktion, Arbeitsvorbereitung, Fertigung und Qualitätskontrolle nach. Rechnerunterstützte Informationssysteme helfen dabei und sollen zum CIM (Computer Integrated Manufacturing) führen und CAD (Computer Aided Design) und CAM (Computer Aided Manufacturing) vereinen. Auch die Büroarbeit wird neu durchdacht und mit Hilfe vernetzter Computersysteme teilweise automatisiert und mit den anderen Unternehmensfunktionen verbunden. Information ist zu einem Produktionsfaktor geworden, und die Art und Weise, wie man damit umgeht, wird mit über den Unternehmenserfolg entscheiden.

Der Erfolg in unseren Unternehmen hängt auch in der Zukunft entscheidend von den dort arbeitenden Menschen ab. Rationalisierung und Automatisierung müssen deshalb im Zusammenhang mit Fragen der Arbeitsgestaltung betrieben werden, unter Berücksichtigung der Bedürfnisse der Mitarbeiter und unter Beachtung der erforderlichen Qualifikationen. Investitionen in Maschinen und Anlagen müssen deshalb in der Produktion wie im Büro durch Investitionen in die Qualifikation der Mitarbeiter begleitet werden. Bereits im Planungsstadium müssen Technik, Organisation und Soziales integrativ betrachtet und mit gleichrangigen Gestaltungszielen belegt werden.

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.

Beispielhaft sei hier an den großen Bereich der Informationsverarbeitung im Betrieb erinnert, der von der Angebotserstellung über Konstruktion und Arbeitsvorbereitung, bis hin zur Fertigungssteuerung und Qualitätskontrolle reicht. Beim Materialfluß geht es um die richtige Aus-

wahl und den Einsatz von Fördermitteln sowie Anordnung und Ausstattung von Lagern. Große Aufmerksamkeit wird in nächster Zukunft auch der weiteren Automatisierung der Handhabung von Werkstücken und Werkzeugen sowie der Montage von Produkten geschenkt werden.

Von der Forschung muß in diesem Zusammenhang ein Beitrag zum Einsatz fortschrittlicher intelligenter Computersysteme erfolgen. Planungsprozesse müssen durch Softwaresysteme unterstützt und Arbeitsbedingungen wissenschaftlich analysiert und neu gestaltet werden.

Die von den Herausgebern geleiteten Institute, das

- Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb der Universität Stuttgart (IFF),
- Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA),
- Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO)

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 Springer-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.

H. J. Warnecke · H.-J. Bullinger

8962871

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), Stuttgart.

Mein besonderer Dank gilt dem Leiter des Instituts, Herrn Prof. Dr.-Ing. H.-J. Warnecke, für seine großzügige Unterstützung und Förderung, die entscheidend zur erfolgreichen Durchführung dieser Arbeit beigetragen haben.

Herrn Prof. Dr.-Ing. G. Pritschow danke ich für die Übernahme des Korreferats.

Aus dem großen Kreis der Kollegen und Kolleginnen des Instituts, die mich durch ihre Mitarbeit und anregende Kritik unterstützt haben, möchte ich insbesondere Dr.-Ing. E. Abele, Dr.-Ing. H. Gzik, Dipl.-Ing. P. Schlaich, Prof. Dr.-Ing. R.-D. Schraft, Frau Schuhmacher sowie Dr.-Ing. M. Schweizer dankend erwähnen.

Ein besonderer Dank gilt meiner ganzen Familie, die mir während der Durchführung der Arbeiten stets motivierend zur Seite stand.

Stuttgart, im Mai 1988

Dieter Boley





# I N H A L T S V E R Z E I C H N I S

0	<u>VERZEICHNIS DER VERWENDETEN ABKÜRZUNGEN</u>	12
1	<u>PROBLEMSTELLUNG UND ZIELSETZUNG</u>	15
2	<u>AUSGANGSSITUATION</u>	17
2.1	Definitionen	17
2.1.1	Begriffe der Industrierobotertechnik	17
2.1.2	Begriffe zum Entgraten	18
2.2	Stand der Technik	21
2.2.1	Entgrattechnik mit Industrierobotern	21
2.2.2	Programmierverfahren für Industrieroboter	25
2.2.2.1	Gliederung der Verfahren	25
2.2.2.2	Anfahren und Speichern von Punkten	26
2.2.2.3	Abfahren und Speichern einer Bahn	27
2.2.2.4	Off-line-Programmierung	28
2.3	Stand der Entwicklung	29
2.3.1	Sensorentwicklungen zum Entgraten	29
2.3.2	Strategien zur Sensorsignalverarbeitung	30
2.3.3	Ansatzpunkte für neue Entwicklungen	35
3	<u>ANALYSE DES ENTGRATVORGANGS MIT INDUSTRIEROBOTERN</u>	38
3.1	Einflußgrößen beim Entgraten mit Industrierobotern	38
3.2	Erforderliche Entgratqualität	39
3.3	Werkzeuge für den Industrierobotereinsatz	40
3.4	Auftretende Toleranzen	42
3.4.1	Einfluß der Fertigungstoleranzen	42
3.4.2	Einfluß der Industrierobotertoleranzen	44

4	<u>ERSTELLUNG EINES ANFORDERUNGSPROFILS FÜR EIN NEUES PROGRAMMIERVERFAHREN ZUM ENTGRATEN MIT INDUSTRIEROBOTERN</u>	45
4.1	Anforderungen an die Struktur des Verfahrens	45
4.2	Werkzeugerprobungen durch Testprogramme	47
4.3	Erstellung, Erprobung und Optimierung von Entgratprogrammen	48
4.4	Einbinden in das Gesamtsystem	50
4.5	Pflichtenheft	51
5	<u>ENTWICKLUNG EINES SENSORUNTERSTÜTZTEN PROGRAMMIERVERFAHRENS ZUM ENTGRATEN MIT INDUSTRIEROBOTERN</u>	54
5.1	Festlegung der Struktur des Programmierverfahrens	54
5.2	Mensch/Maschine-Schnittstelle	57
5.3	Erstellung des Grobprogrammes	59
5.4	Sensorunterstützte Punktaufnahme	61
5.4.1	Ermittlung des optimalen Punktrasters beim Abtastvorgang	62
5.4.1.1	Basisdaten der Suchstrategie	62
5.4.1.2	Vorgabe eines konstanten Schaltabstandes entlang einer Suchgeraden	64
5.4.1.3	Geometrieangepaßte Punktdichte	66
5.4.2	Werkzeug- und Gratkonturkoordinatensystem	70
5.4.3	Verwendung der Werkzeugorientierung als Suchrichtung	75
5.4.4	Programmtechnisch bedingte maximale Bahnabweichung	77
5.5	Bewegungsvorgaben über Pseudoendpunkte	79
5.6	Vorgabe einer Gratkonturebene	82
5.7	Geschwindigkeitszuweisungen	85

5.8	Auswahl von geeigneten werkzeugin- tegrierten taktilen Sensoren für das Programmierverfahren	87
5.9	Steuerung der Peripherie und Zusammen- binden von Teilprogrammen	90
6	<u>SENSORUNTERSTÜTZTE OPTIMIERUNG VON ENTGRATPROGRAMMEN</u>	91
6.1	Struktur der Optimierung	91
6.2	Optimierung von programmierten Punkten	93
6.3	Optimierung der Bahngeschwindigkeit und Minimierung der Bahnabweichung	95
6.3.1	Beeinflußung der Bahngenauigkeit durch Verschieben von Punkten	97
6.3.2	Einfluß der Werkzeugorientierung auf die Bahngenauigkeit	99
7	<u>IMPLEMENTIERUNG UND ERPROBUNG DES VERFAHRENS ZUR SENSORUNTERSTÜTZTEN PROGRAMMIERUNG</u>	102
7.1	Implementierung des Verfahrens in eine Steuerung	102
7.2	Realisierung der Mensch/Maschine- Schnittstelle	104
7.3	Programmieren einer Testkontur	107
7.4	Ermittlung und Vergleich von Programmierzeiten	109
7.5	Durchführung der Programmoptimierung	111
7.6	Sensorunterstützte dynamische Bahn- optimierung durch die Verwendung fiktiver Punkte	116
8	<u>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK</u>	118
9	<u>SCHRIFTTUM</u>	120

A		Startpunkt
A`		Verschobener Startpunkt
AC		Adaptive Control
A/D		Analog/Digital
A <sub>g</sub>	mm <sup>2</sup>	Gratquerschnitt
A <sub>1</sub> ...A <sub>n</sub>		Startpunkte
a	mm	Kantenmaß
$\vec{a}$		Vektor zu Startpunkt A
B		Endpunkt
B`		Verschobener Endpunkt
B <sub>1</sub> ...B <sub>n</sub>		Endpunkte
B <sub>u</sub>	mm	Bahnabweichung
$\vec{b}$		Vektor von Startpunkt A nach Endpunkt B
b <sub>f</sub>	mm	Gratfußbreite
b <sub>g</sub>	mm	Gratdicke
C		Hilfspunkt
C <sub>ir</sub>	N/mm	Federkonstante des Industrieroboters
CAD		Computer Aided Design
CNC		Computerized Numerical Control
$\vec{c}$		Vektor von Startpunkt A nach Hilfspunkt C
d <sub>s</sub>	mm	Punktabstand
E		Pseudoendpunkt
F <sub>ag</sub>	N	Gratdrangkraft
F <sub>N</sub>	N	Andruckkraft
F <sub>r</sub>	N	Radialkraft
F <sub>S</sub>	N	Schnittkraft
F <sub>zul</sub>	N	Zulässige IR-Belastung
f <sub>p</sub>	mm	Bahnabweichung im Punkt P
f <sub>l</sub>	mm	Abrundungsfehler
GGG		Grauguß (globular)
GGL		Grauguß (laminar)
GS		Stahlguß
GT		Temperguß
$\vec{E}$		Geradenvektor
h <sub>o</sub>	mm	Grathöhe
IR		Industrieroboter

KI		Künstliche Intelligenz
$K_V$	1/s	Geschwindigkeitsverstärkung
$K_K$		Korrekturfaktor
NE		Nichteisenmetall
$\vec{n}$		Normalenvektor der Gratkonturebene
P		Bahnstützpunkt
$P_1 \dots P_n$		Automatisch programmierter Punkt
$P_1' \dots P_n'$		Punkte mit konstantem Abstand
$P_{A,1} \dots P_{A,n}$		Anfahrpunkte
$P_{H,1} \dots P_{H,n}$		Hilfspunkte
$P_{i-1}, P_i, P_{i+1}$		Aktuelle Punkte
$P_{K,1} \dots P_{K,n}$		Konventionelle Punkte
$P_S$		Geradenschnittpunkt mit der Gratkonturebene
$P_W$		Arbeitspunkt des Werkzeugs
p	W	Zerspanleistung
$\vec{p}_H$		Vektor zu Punkt $P_H$
$\vec{p}_W$		Vektor zu Punkt $P_W$
$r_f$	mm	Gratfußradius
$\Delta s$	mm	Schaltabstand in Suchrichtung
$\Delta s_p$	mm	Punktabstand
$s_{zul}$	mm	zulässige elastische Verformung
TCP		Tool-Center-Point
t		Parameter
$t_k$	s	Verfahrzeit an der Kontur
$t_r$	s	Rechenzeit der Steuerung zur Umsetzung von Sensorsignalen
$\vec{u}_K$		Korrekturvektor
$v_1 \dots v_n$	mm/s	Bearbeitungsgeschwindigkeiten
$v_B$	mm/s	Bahngeschwindigkeit
$v_{eil}$	mm/s	Eilganggeschwindigkeit
$v_{ir,s}$	mm/s	Geschwindigkeit beim Suchvorgang
$v_m$	mm/s	mittlere Bahngeschwindigkeit
$v_{red}$	mm/s	reduzierte Geschwindigkeit
$wv_i$		Werkzeugvektor
$\vec{x}$		Vektoren, die der Ebenengleichung genügen
$x, y, z$		Koordinatensystem
$x_B, y_B, z_B$		Endpunkt B zugeordnetes Koordinaten- system der Werkzeugorientierung

$x_E, y_E, z_E$		Pseudoendpunkt E zugeordnetes Koordinatensystem der Werkzeugorientierung
$x_S, y_S, z_S$		Sensorkoordinatensystem
$x_W, y_W, z_W$		Werkzeugkoordinatensystem
$x_{WS}, y_{WS}, z_{WS}$		Werkstückkoordinatensystem
$x_{W1}, y_{W1}, z_{W1}$		transformiertes Koordinatensystem
$x_{W2}, y_{W2}, z_{W2}$		transformiertes Koordinatensystem
$\Delta z$	mm	Schaltabstand in Tastrichtung

#### GRIECHISCHE BUCHSTABEN

$\alpha$	grd	Winkel zwischen Suchrichtung und späterer Programmbewegung
$\alpha_S$	grd	Sensorkoordinate
$\alpha_W$	grd	Anlenkwinkel des Werkzeuges
$\beta$	grd	Ergänzungswinkel
$\beta_S$	grd	Sensorkoordinate
$\beta_W$	grd	Anstellwinkel des Werkzeuges
$\gamma$	grd	Projektionswinkel der Tastbewegung bezogen auf die Suchrichtung
$\gamma_S$	grd	Sensorkoordinate
$\gamma_W$	grd	Richtungswinkel des Werkzeuges
$\gamma_Z$	grd	Winkel zwischen Werkstückkoordinatensystemen
$\epsilon$	mm	Abstand
$\vartheta$	grd	Kantenwinkel am Werkstück
$\varphi_T$	grd	Winkel des Toleranzkegels

Seit der Entwicklung der Industrieroboter Mitte der 60er Jahre besteht die Bestrebung, diese Geräte für die unterschiedlichsten Aufgaben einzusetzen und neue Anwendungsgebiete zu erschließen.

Sehr früh wurden Pilotanwendungen zum Entgraten mit Industrierobotern realisiert /1/. In der breiten industriellen Praxis konnte sich diese Technologie aber bis heute nicht durchsetzen. Ursprünglich wurde als Ursache hierfür hauptsächlich die nicht angepaßte Gerätetechnik gesehen.

Die Industrieroboterentwicklung wurde durch die dominierende Stellung des Punktschweißens in der Großserie der Kraftfahrzeugproduktion geprägt. Die aus dieser Anwendung abgeleiteten Anforderungen an Tragkraft und Positioniergenauigkeit waren dann für die Entwicklung einer ganzen Gerätefamilie bestimmend /2/. Einfache Punkt-zu-Punkt-Steuerungen genügten der gestellten Schweißaufgabe weitgehendst.

Mit den Bahnschweißrobotern und zu Beginn der 80er Jahre mit der neuen Klasse der Industrieroboter mit einem Handhabungsgewicht von 15 kg kam die Gerätetechnik den Anforderungen des Entgratens wesentlich näher. Doch auch mit der parallel eingeführten Bahnsteuerung konnte im Entgratbereich kein Durchbruch erzielt werden.

Die Veränderung der Fertigungsstrukturen zu immer kleineren Losgrößen kommt für ein Roboterentgratsystem erschwerend hinzu. Da Industrieroboter beim Entfernen von Bearbeitungsgraten meist nicht als flexibel umrüstbare Geräte eingesetzt werden, sondern vielmehr als sehr bewegliche Sondermaschinen mit 5 bis 6 Achsen arbeiten, treten in der Praxis bei der Umrüstung erhebliche Programmierzeiten auf. Diese sind wirtschaftlich nicht vertretbar /3/.

Für eine breitere Anwendung von Industrierobotern zum Entgraten ist deshalb eine zeitsparende, praxisorientierte Programmiermethode notwendig.

In der vorliegenden Arbeit sollen die prozeßtechnischen Randbedingungen des Entgratens analysiert und ein Anforderungsprofil für ein Programmierverfahren erstellt werden.

Basierend auf diesem Anforderungsprofil soll ein sensorunterstütztes, bedienergesteuertes Verfahren für die Programmierung von Industrierobotern zum Entgraten entwickelt werden /4/. Den Schwerpunkt soll die effektive Unterstützung des Bedieners bilden, um damit die Programmierzeiten zu verkürzen, die Wirtschaftlichkeit zu erhöhen und die Zuverlässigkeit bei der Programmerstellung zu gewährleisten. Die Bahntreue des Industrieroboters beim Führen des Werkzeuges soll bei komplexen, gleichzeitig aber auch schnellen Bewegungen damit wesentlich verbessert werden.

Die Eckdaten für die sensorische Erfassung der Gratkontur sollen durch den Programmierer vorgegeben werden. Er soll außerdem die Möglichkeit haben, sämtliche Parameter bei automatisch ablaufenden Abtastprogrammen zu überwachen und ggf. während des Vorgangs zu beeinflussen.

Das Verfahren soll eine werkstückorientierte Werkstattprogrammierung und -optimierung in wirtschaftlich vertretbaren Zeiten ermöglichen und damit die Voraussetzung für eine Verbreitung des Entgratens mit Industrierobotern schaffen.

Der Funktionsnachweis des Programmierverfahrens soll anhand des Entgratens mit Fingerfräsern geführt werden.