

# HANSER



## Leseprobe

zu

## **„Industrieroboter Methoden der Steuerung und Regelung“ von Wolfgang Weber**

ISBN (Buch): 978-3-446-45952-6

ISBN (E-Book): 978-3-446-46060-7

Weitere Informationen und Bestellungen unter  
<http://www.hanser-fachbuch.de/9783446460607>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

# Vorwort zur 1. Auflage

## **Die Robotik als interdisziplinäres Gebiet**

Roboter werden mit intelligenten Maschinen in Verbindung gebracht, die komplexe Arbeiten ähnlich dem Menschen zielgerichtet ausführen können. Die dabei angenommenen Möglichkeiten machen die Anziehungskraft und Faszination der Robotik aus. Der „Roboter“ ist deshalb auch ein gesellschaftliches und kulturelles Objekt geworden. Neben der Diskussion um die Gentechnik dient die Robotertechnik als Bezugspunkt, um Möglichkeiten und Gefahren von aktuellen und zukünftigen technischen Entwicklungen zu diskutieren. In den eher nüchternen technischen Wissenschaften ist der Roboter ein beliebtes Testobjekt, um fortgeschrittene Verfahren der Steuerung, Regelung, Sensorik, künstlicher Intelligenz etc. anzuwenden.

Dieses Buch konzentriert sich auf die Industrierobotertechnik, die innerhalb der Robotik die größte ökonomische Bedeutung zu verzeichnen hat und Ausgangspunkt für neue Anwendungen z. B. in der Medizintechnik und im Servicebereich ist. Aber auch ein Industrierobotersystem selbst ist ein technisches Produkt, das nur in interdisziplinärer Zusammenarbeit vieler Fachdisziplinen entstehen kann. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit können Mechanik, Maschinenbau, Elektrotechnik, Antriebstechnik, Informationsverarbeitung und Informatik, Mathematik, Regelungstechnik, Sensortechnik, Expertensysteme und künstliche Intelligenz genannt werden. Weiterhin ist zu bedenken, dass ein Industrieroboter beim Einsatz im industriellen Umfeld nur ein Teilsystem eines komplexen Fertigungsumfeldes ist und entsprechend mit anderen Industrierobotern und Automatisierungseinrichtungen zusammenarbeiten und mit Leitsystemen kommunizieren muss. Aus diesem Grunde wird die Robotertechnik auch von der Fertigungsplanung, Arbeitswissenschaft und betriebswirtschaftlichen Aspekten beeinflusst. Nicht zuletzt steht der Industrieroboter als markantes Rationalisierungsinstrument der Automatisierungstechnik im Zusammenhang mit einer sozialverträglichen Technikgestaltung in der Diskussion.

## **Schwerpunkt und Interessentenkreis des Buches**

Wer sich in die Robotertechnik einarbeiten will, steht somit vor einem sehr umfangreichen und interdisziplinären Gebiet. In der Industrierobotertechnik werden vielseitig einsetzbare, leistungsfähige Komponenten der technischen Fachdisziplinen genutzt, um eine kostengünstige, hochflexible Maschine „Roboter“ zu entwickeln. Schwerpunkt des Buches sind deshalb diejenigen Methoden der Kinematik, Dynamik und Regelung, die es auf der Basis dieser Komponenten ermöglichen, eine funktionsfähige Steuerung zu entwickeln und effektiv einzusetzen. Bei diesem mechatronischen Ansatz stehen Lagebeschreibung, Bewegungssteuerung, Programmierung, Beschreibung der Dynamik und Bewegungsregelung im Vordergrund. Kenntnisse der Bewegungsbeschreibung und Programmierung sind auch Voraussetzung, um sich in spezielle Teilbereiche der Robotik wie Sensorik,

Bildverarbeitung, fortgeschrittene Methoden der Programmierung, kooperative Roboter, Kollisionsvermeidung, künstliche Intelligenz und autonomes Verhalten einzuarbeiten.

Ausgehend von diesem Ansatz richtet sich das Buch an einen breiten Leserkreis. Studenten technischer Fachrichtungen und der Informatik an Universitäten und Fachhochschulen, die sich im Rahmen des Hauptstudiums mit der Robotertechnik beschäftigen, bietet das Buch einen Grundkurs in die Bewegungsbeschreibung, Programmierung und Regelung von Industrierobotern.

Für die wachsende Zahl von Ingenieuren, die sich mit der Anwendung von Industrierobotern beschäftigen, werden die benötigten Grundkenntnisse in der Bewegungsbeschreibung vermittelt, um einen Industrieroboter oder andere Mehrachsgeräte geeignet zu programmieren und damit effektiv einzusetzen. Die Leistungsfähigkeit der Steuerungshardware nimmt bei sinkenden Kosten zu. Dies eröffnet die Möglichkeit, auch außerhalb von Forschungslabors fortgeschrittene Regelungsalgorithmen zu entwickeln, zu erproben und einzusetzen. Den Ingenieuren in der Praxis, die diese Aufgaben angehen, bietet das Buch einen effizienten Zugang und Anregungen zur Modellbildung und zum Regelungsentwurf.

Erfahrungsgemäß bilden die mathematischen Methoden der Steuerung und Regelung die größten Hemmschwellen, wenn man sich als Ingenieurstudent/in mit der Robotertechnik befasst oder sich als Ingenieur/in in der Praxis neuen Methoden der Steuerung und Regelung zuwendet. Das Buch führt deshalb schrittweise mit einfachen, anwendungsnahen Beispielen in die unbedingt notwendige Mathematik der Steuerung und Regelung ein, damit die mathematischen Methoden schon bei der Einführung unmittelbar mit der Anwendung im Zusammenhang stehen. Die Methoden zur Steuerung und Regelung werden im Gegensatz zu anderen Lehrbüchern zuerst an einem Eingelenkarm und „Robotern“ mit zwei Gelenken eingeführt, bevor sie auf handelsübliche Industrieroboter angewandt werden. Die angebotenen Aufgaben können zumeist mit Matlab gelöst werden. Die beiliegende CD enthält Lösungsbeispiele und Programme und das in Matlab geschriebene Entwicklungs- und Visualisierungswerkzeug RoCSy. Mit einer menügesteuerten einfachen Programmiersprache ist es in RoCSy möglich, Bewegungen des Industrieroboters RV6 von Reis vorzugeben und im dreidimensionalen Raum mit einem Vollkörpermodell zu visualisieren. Auch die Simulation und grafische Darstellung des Regelungsverhaltens bei Einsatz konventioneller und fortgeschrittener Regelungsmethoden ist in RoCSy enthalten.

### **Zum Inhalt**

Kapitel 1 gibt einen Überblick über einige wesentliche Teilgebiete der Robotik. Der folgende Inhalt des Buches kann in zwei Teile aufgeteilt werden. Der erste Teil des Buches (Kap. 2 – Kap. 5) beschäftigt sich mit der kinematischen Beschreibung und der Programmierung, der zweite Teil (Kap. 6 und Kap. 7) behandelt die Dynamik und Regelung.

In Kapitel 2 wird nach Einführung der unbedingt nötigen Grundkenntnisse über Vektoren und Matrizen der Nutzen von Rotationsmatrizen, homogenen Matrizen (Frames) und der Denavit-Hartenberg-Konvention bei der Lagebeschreibung von Industrierobotern aus einfachen Anwendungsbeispielen abgeleitet. Dabei wird der Zugang zur Denavit-Hartenberg-Konvention für Industrieroboter durch eine neue, ausführliche Formulierung erleichtert. Die in der Robotik wichtigen Transformationen zwischen Gelenkkoordinaten und kartesischen Koordinaten werden in Kapitel 3 behandelt und exemplarisch an einem Zweigelenk-

roboter und am Knickarmroboter RV6 durchgeführt. Die wesentlichen Bewegungs- und Interpolationsarten erläutert Kapitel 4 ausführlich, während Kapitel 5 die Roboterprogrammierung zum Inhalt hat, die dazu dient, diese Bewegungsabläufe geeignet vorzugeben. Zur Übung und Visualisierung kann vom Leser die einfache Offline-Programmiersprache von RoCSy verwendet werden.

Im zweiten Teil des Buches wird in Kapitel 6 das Newton-Euler-Verfahren als für den Ingenieur zugänglichste und effizienteste Methode zur Beschreibung der Roboterdynamik behandelt. Dabei wird das Newton-Euler-Verfahren nicht wie gewöhnlich als anzuwendender Algorithmus gebracht, sondern auch für Ingenieure ohne fundierte Mechanikausbildung verständlich hergeleitet und an Beispielen erläutert. Elektrische Antriebssysteme mit antriebsnaher Servoelektronik und das Getriebe werden so weit beschrieben, wie es für die Gewinnung eines geeigneten Regelungsmodells notwendig ist und schließlich mit der Roboterarmdynamik in einfacher Weise zu einer Vektordifferenzialgleichung zusammengefasst, die als Grundlage für den Regelungsentwurf (Kapitel 7) dient. Zuerst wird in Kapitel 7 die konventionelle Kaskadenregelung behandelt, die die gegenseitige Beeinflussung durch Stellung und Bewegung der Achsen nicht explizit in den Regelungsentwurf einbezieht. Vorteile und Grenzen solcher Einzelgelenkregelungen werden diskutiert. Eine leistungsfähige fortgeschrittene Regelung muss diese Verkopplungen bei der Ansteuerung der Antriebe berücksichtigen. Als erste Möglichkeit zur Verbesserung der Regelungsgüte wird das Prinzip adaptiver Gelenkregelungen betrachtet und ein spezielles Verfahren näher erläutert. Anschließend werden solche modellbasierten Regelungen behandelt, die das nichtlineare Modell der Dynamik direkt in die Regelungsalgorithmen einbeziehen und somit zu einer Entkopplung beitragen. Aus den vielfältigen Verfahren aus dieser Klasse von Regelungsverfahren werden diejenigen behandelt, die einen einfachen transparenten Entwurf ermöglichen. In diesem Zusammenhang wird zum ersten Mal in einem Lehrbuch eine modellbasierte Regelung vorgestellt, die mit der in der Praxis üblichen Kaskadenstruktur arbeitet. Anschließend werden Vorgehensweise und prinzipielle Strukturen der Fuzzy-Technik und neuronalen Netze erläutert und einige Anwendungen in der Roboterregelung skizziert. Zum Abschluss wird ein Überblick über Strukturen von Kraftregelungen gegeben.

Der Anhang enthält einige Definitionen und Rechenregeln für Matrizen sowie Hinweise zum Gebrauch der Simulationssoftware RoCSy und weiteren Matlab-Programmen zu Bahnberechnungen und Simulation. Voraussetzung zur Nutzung der Matlab-Programme auf der CD ist eine Studentenversion oder Vollversion von MATLAB 5. Die lauffähigen Programme in MATLAB 6 können auf Anfrage vom Autor erhalten werden.

### **Voraussetzungen und Möglichkeiten der Nutzung des Buches**

Zum Verständnis der ersten fünf Kapitel werden nur geringe mathematische Kenntnisse aus Trigonometrie, Geometrie, Analysis, Differential- und Integralrechnung vorausgesetzt. Das Arbeiten mit Vektoren und Matrizen wird, soweit benötigt, schrittweise eingeführt oder ist kurzgefasst im Anhang zu finden. Ein Leser, der sich ausschließlich in die Bewegungsbeschreibung und Programmierung einarbeiten will, muss sich nicht mit den umfangreichen Kapiteln 6 und 7 beschäftigen. Zur Erarbeitung von Hintergrundwissen zu den Bewegungsbefehlen der Roboterprogrammierung genügen aus Kapitel 3 die Prinzipien der kinematischen Transformationen.

Kapitel 6 führt in die Kinematik und Dynamik eines Industrieroboterarms als Mehrkörpersystem ein, wobei das Antriebssystem in das mathematische Modell einbezogen wird. Auf der Basis dieser Beschreibung werden in Kapitel 7 verschiedene Regelungsverfahren behandelt. Zum Studium dieser beiden Kapitel sollten grundlegende Kenntnisse der Kinematik und Dynamik und der Regelungstechnik vorhanden sein, wie sie in den ingenieurwissenschaftlichen Studiengängen an den Hochschulen gelehrt werden.

### **Danksagung**

Ein solches Buch kann nur aus der intensiven Beschäftigung und kritischen Auseinandersetzung mit dem Thema entstehen. In diesem Sinne haben Kolleginnen und Kollegen aus dem beruflichen Umfeld und Studierende zur Entstehung des Buches beigetragen. So möchte ich mich besonders bei Herrn Dipl.-Ing. Günter Trautmann, Herrn Jens Meyer und den Studierenden und Diplomanden bedanken, die mitgeholfen haben, die Simulationsumgebung RoCSy zu entwickeln. Meinem Kollegen Herrn Prof. Dr. Friedrich Münter danke ich herzlich für die sorgfältige Durchsicht von Teilen des Manuskripts, Frau Dipl.-Ing. Erika Hotho vom Hanser Verlag für die gute Zusammenarbeit und die aufgebrachte Geduld. Voraussetzung ist auch die Förderung der Lehre und von Projekten im Bereich der Robotertechnik an der Fachhochschule Darmstadt durch die Hochschulleitung und die beteiligten Fachbereiche. Herzlich danken möchte ich auch Herrn Dipl.-Ing. Stefan Anton von der Fa. EASY-ROB™ für die Überlassung und Hilfe bei der Integration seiner Visualisierungssoftware in die Entwicklungsumgebung RoCSy. Die Firmen Reis Robotics GmbH, KUKA Roboter GmbH, Hirata Robotics GmbH, Bosch GmbH und imt Peter Nagler GmbH haben mir freundlicherweise werkseigenes Bildmaterial zur Verfügung gestellt. Dafür möchte ich mich herzlich bedanken.

Meine Familie hat durch ihr entgegengebrachtes Verständnis für die zusätzliche Arbeit wesentlich zum Gelingen des Buches beigetragen.

Darmstadt, März 2002

*Wolfgang Weber*

# Vorwort zur 4. Auflage

Die vorliegende 4. Auflage wurde vollständig durchgesehen, modifiziert und ergänzt. Die Literaturangaben wurden so weit wie möglich aktualisiert. Die Fehlerhinweise und Anmerkungen vieler Studierender sowie Kolleginnen und Kollegen waren bei der Bearbeitung sehr hilfreich. Dafür möchte ich mich recht herzlich bedanken.

In Kapitel 2 wurde die Orientierungsbeschreibung durch Quaternionen neu aufgenommen und in Kapitel 4, wie in der Praxis üblich, zur Interpolation verwendet. Neu in Kapitel 3 hinzugekommen ist die Diskussion der universellen Lösung der inversen Kinematik auf Basis der transponierten Jacobi-Matrix. Beispiele für Bewegungsbefehle einer Roboterprogrammiersprache wurden nun in KRL von KUKA angeführt (Kapitel 5).

Die Software für die Simulationsumgebung ManDy wurde in JavaScript geschrieben und kann direkt über die angegebene Internetseite online ausgeführt werden. Es muss also keine Installation erfolgen, sodass Versionsprobleme vermieden werden können.

Ich danke allen Firmen und Einrichtungen, die mir aktuelles Bildmaterial zur Verfügung gestellt haben. Bei Dipl.-Ing. Günter Trautmann und M.Sc. Alexander König von der Hochschule Darmstadt sowie meinem Sohn Volfram Weber, der die Programmierung von ManDy in JavaScript vorgenommen hat, möchte ich mich ebenfalls herzlich bedanken. Mein Dank gilt auch Frau Julia Stepp vom Carl Hanser Verlag. Die Zusammenarbeit bei der Vorbereitung der 4. Auflage war sehr angenehm und motivierend.

Darmstadt, im Juni 2019

*Wolfgang Weber*

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Komponenten eines Industrieroboters .....</b>	<b>1</b>
1.1	Definition und Einsatzgebiete von Industrierobotern .....	1
1.2	Mechanischer Aufbau .....	3
1.3	Steuerung und Programmierung .....	7
1.4	Struktur und Aufgaben der Regelung .....	9
1.5	Neuere Einsatzfelder und Konzepte der Industrierobotik .....	13
<b>2</b>	<b>Beschreibung einer Roboterstellung .....</b>	<b>15</b>
2.1	Grundlagen der Lagebeschreibung .....	15
2.1.1	Koordinatensysteme .....	15
2.1.2	Freie Vektoren .....	15
2.1.3	Operationen mit Vektoren .....	17
2.1.4	Ortsvektoren .....	19
2.1.5	Anordnung von Elementen in Vektoren und Matrizen .....	20
2.1.6	Rotationsmatrizen .....	20
2.1.7	Homogene Matrizen (Frames) .....	23
2.1.8	Beschreibung der Orientierung durch Euler-Winkel .....	25
2.1.9	Beschreibung der Orientierung durch Drehvektor und Drehwinkel .....	29
2.1.10	Freiheitsgrad des Robotereffektors .....	31
2.1.11	Differenzieren von Vektoren in bewegten Koordinatensystemen .....	32
2.2	Die Denavit-Hartenberg-Konvention für Industrieroboter .....	34
2.2.1	Der Industrieroboter mit offener kinematischer Kette .....	34
2.2.2	Koordinatensysteme und kinematische Parameter nach der Denavit-Hartenberg-Konvention .....	36
2.2.3	Rotationsmatrizen und homogene Matrizen auf Basis der Denavit-Hartenberg-Parameter .....	42
2.3	Übungsaufgaben .....	44
<b>3</b>	<b>Transformationen zwischen Roboter- und Weltkoordinaten ..</b>	<b>45</b>
3.1	Die Vorwärtstransformation .....	46
3.2	Die Rückwärtstransformation .....	47
3.2.1	Mehrdeutigkeiten und Singularitäten .....	47
3.2.2	Lösungsvoraussetzungen und Lösungsansätze .....	48
3.2.3	Rückwärtstransformation an einem Zweigelenkroboter .....	48

3.2.4	Geometrische Rückwärtstransformation für den R6-Knickarmroboter .....	52
3.3	Kinematische Transformationen mit der Jacobi-Matrix .....	57
3.3.1	Die Jacobi-Matrix in der Robotik .....	58
3.3.2	Rückwärtstransformation auf Basis der inversen Jacobi-Matrix .....	61
3.3.3	Rückwärtstransformation mit der transponierten Jacobi-Matrix .....	62
3.4	Übungsaufgaben .....	63
<b>4</b>	<b>Bewegungsart und Interpolation .....</b>	<b>65</b>
4.1	Übersicht zu den Steuerungsarten .....	65
4.2	PTP-Bahn und Interpolationsarten .....	67
4.2.1	Prinzipieller Ablauf der PTP-Steuerung .....	67
4.2.2	Rampenprofil zur Interpolation .....	69
4.2.3	Sinoidenprofil zur Interpolation .....	71
4.2.4	Anpassung an die Interpolationsschrittweite .....	73
4.2.5	Synchrone PTP .....	75
4.2.6	Vollsynchrone PTP .....	76
4.2.7	Beispiel für eine PTP-Bahn .....	77
4.3	Bahnsteuerung (CP-Steuerung) .....	79
4.3.1	Prinzipieller Ablauf der Bahnsteuerung .....	79
4.3.2	Linearinterpolation .....	80
4.3.3	Zirkularinterpolation .....	83
4.3.4	Beispiel für eine CP-Bahn .....	89
4.4	Durchfahren von Zwischenstellungen ohne Stillstand der Achsen .....	90
4.4.1	PTP-Überschleifen .....	90
4.4.2	CP-Überschleifen .....	92
4.4.3	Spline-Interpolation für PTP-Bahn .....	93
4.4.4	Spline-Interpolation in kartesischen Koordinaten .....	95
4.5	Übungsaufgaben .....	97
<b>5</b>	<b>Roboterprogrammierung .....</b>	<b>101</b>
5.1	Online-Roboterprogrammierung .....	102
5.1.1	Teach-In-Programmierung .....	102
5.1.2	Play-Back-Programmierung .....	104
5.1.3	Master-Slave-Programmierung .....	105
5.2	Offline-Programmierung .....	106
5.2.1	Textuelle Programmierung in einer problemorientierten Programmiersprache .....	107
5.2.2	Grafisch interaktive/CAD-basierte Programmierung .....	107
5.2.3	Aufgabenorientierte Programmierung .....	108
5.3	Roboterprogrammiersprachen .....	110
5.3.1	Sprachelemente von Roboterprogrammiersprachen .....	111
5.3.2	Programmbeispiel .....	113
5.4	Programmierunterstützung durch grafische Simulation .....	115
5.5	Vergleich der verschiedenen Programmierarten .....	117
5.6	Übungsaufgaben .....	118



<b>6</b>	<b>Modell der Dynamik</b>	<b>119</b>
6.1	Modell der Dynamik einer Gelenkachse	119
6.1.1	Modell der Mechanik eines Gelenks/Armteils	119
6.1.2	Modell des Antriebsmotors und der Servoelektronik	121
6.1.3	Modell des ideal angenommenen Antriebsstrangs eines Gelenks	123
6.1.4	Gesamtmodell einer Einzelachse bei ideal angenommenem Antriebsstrang	124
6.2	Modell der Mechanik eines Roboterarms mit dem rekursiven Newton-Euler-Verfahren	125
6.2.1	Kinematische Berechnungen	126
6.2.2	Rekursive Berechnung der Gelenkkräfte bzw. -drehmomente	130
6.2.3	Anfangswerte für die rekursiven Berechnungen	132
6.2.4	Geeignete Darstellung der Vektoren und Zusammenfassung	133
6.2.5	Einfache Beispiele zum Newton-Euler-Verfahren	134
6.2.6	Explizite Berechnung einzelner Komponenten der Bewegungsgleichung	139
6.3	Gesamtmodell der Regelstrecke	143
6.3.1	Modell der Antriebsmotoren und Servoelektronik aller Gelenke	144
6.3.2	Zusammenfassung der Modellgleichungen	146
6.4	Übungsaufgaben	147
<b>7</b>	<b>Regelung</b>	<b>151</b>
7.1	Aufgaben und prinzipielle Strukturen	151
7.2	Dezentrale Gelenkregelung in Kaskadenstruktur	155
7.2.1	Übersicht und Regelstrecke	155
7.2.2	Geschwindigkeitsregelung mit PI-Regler	157
7.2.3	ReDuS-Geschwindigkeitsregler	160
7.2.4	Entwurf des Lagereglers	163
7.2.5	Beispiel für eine dezentrale Lageregelung	168
7.2.6	Hinweise zur Realisierung	172
7.3	Adaptive Einzelgelenkregelungen	174
7.4	Modellbasierte Regelungskonzepte	177
7.4.1	Zentrale Vorsteuerung	177
7.4.2	Entkopplung und Linearisierung	179
7.4.3	Modellbasierte Regelung mit PID-Strukturen	182
7.4.4	Robuste Regelung durch vorgegebenes Verzögerungsverhalten	184
7.4.5	Modellbasierte Lageregelung mit Kaskadenstruktur	187
7.4.6	Hinweise zur Realisierung modellbasierter Gelenkregelungen	189
7.4.7	Modellbasierte Lageregelung in kartesischen Koordinaten	190
7.4.8	Beispiel für eine modellbasierte Regelung	192
7.5	Nichtanalytische Regelungsverfahren	194
7.5.1	Fuzzy-Regelungen	194
7.5.2	Neuronale Lernverfahren in der Gelenkregelung	196
7.6	Strukturen von Kraftregelungen	199
7.7	Übungsaufgaben	201

**Anhang ..... 203**

- A Einige Definitionen und Rechenregeln für Matrizen ..... 203
- B Aufstellen der Jacobi-Matrix ..... 207
  - B1 Beschreibung der Bewegung des Effektors in Abhängigkeit von den relativen Geschwindigkeiten der Armteile ..... 207
  - B2 Berechnung durch Anwendung der kinematischen Gleichungen des Newton-Euler Verfahrens ..... 209
- C Modellbildung und Simulation der statischen Reibung ..... 211
  - C1 Statische Reibung bei einem Einzelgelenk ..... 211
  - C2 Statische Reibung beim Roboterarm ..... 213
- D ManDy: Programmier-, Simulations- und Visualisierungswerkzeug ... 215
- E Weitere Simulationswerkzeuge ..... 218
  - E1 PTP- und CP-Interpolation für einen planaren Zweigelenkroboter ..... 218
  - E2 Spline-Interpolation mit zwei Bahnsegmenten ..... 218
  - E3 Newton-Euler-Verfahren für Zweigelenkroboter ..... 219
  - E4 Simulation einer Eingelenkregelung ..... 221

**Hinweise zur Internetseite ..... 222**

**Literatur ..... 223**

**Formelzeichen ..... 231**

**Index ..... 235**

### 2.1.7 Homogene Matrizen (Frames)

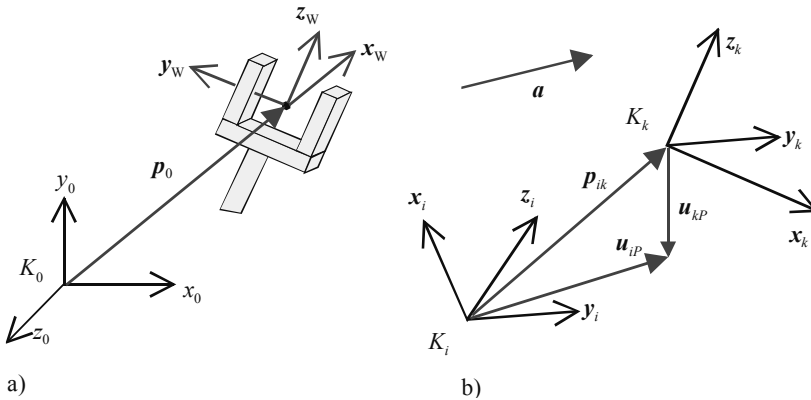
Die Lage des Effektors im Raum ist durch die Angabe des Ortsvektors  $\mathbf{p}_0$  vom Ursprung des Bezugskoordinatensystems  $K_0$  zum TCP nicht eindeutig bestimmt (s. auch Bild 2.7). Es muss noch angegeben werden, wie der Effektor im Raum ausgerichtet ist (**Orientierung** des Effektors). Zu diesem Zweck wird mit dem Effektor ein Koordinatensystem  $K_W$  fest verbunden, dessen Ursprung im TCP liegt (Bild 2.10a). Der Index W steht für **Werkzeugkoordinatensystem**. Der Effektor kann durch die Angabe der Basisvektoren  $\mathbf{x}_W, \mathbf{y}_W, \mathbf{z}_W$  in Koordinaten des ruhenden Bezugssystems  $K_0$  wie gewünscht ausgerichtet werden. Dadurch wird definiert, wie  $K_W$  gegenüber  $K_0$  gedreht ist. Die Angaben der Position des TCP und der Orientierung des Effektors werden in einer (4 · 4)-Matrix (**homogene Matrix** oder **Frame**) zusammengefasst:

$$T = \begin{pmatrix} \mathbf{x}_W^{(0)} & \mathbf{y}_W^{(0)} & \mathbf{z}_W^{(0)} & \mathbf{p}_0^{(0)} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Die Nützlichkeit der scheinbar willkürlich eingeführten vierten Zeile und Spalte wird im Folgenden klar werden. Ein Frame lässt sich auch für zwei beliebige Koordinatensysteme  $K_i$  und  $K_k$  definieren (Bild 2.10b):

$${}^k_i T = \begin{pmatrix} \mathbf{x}_k^{(i)} & \mathbf{y}_k^{(i)} & \mathbf{z}_k^{(i)} & \mathbf{p}_{ik}^{(i)} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.12)$$

Hier sind die Basisvektoren von  $K_k$  und der Ortsvektor vom Ursprung  $K_i$  zum Ursprung  $K_k$  in Koordinaten von  $K_i$  angegeben. Damit ist die Lage von  $K_k$  in Bezug auf  $K_i$  vollständig beschrieben.



**Bild 2.10** a) Angabe der Position und Orientierung des Effektors, b) Relative Lage zweier Koordinatensysteme zueinander

Mit Hilfe von  ${}^k_i T$  können freie Vektoren und Ortsvektoren in die Darstellung des jeweils anderen Koordinatensystems überführt werden. Ein freier Vektor wird zu diesem Zweck als Spaltenvektor mit vier Komponenten geschrieben, wobei die vierte Komponente stets den Wert 0 hat. Es gilt dann für einen freien Vektor  $\mathbf{a}$ :

$$\mathbf{a}^{(i)} = {}^k_i\mathbf{T} \cdot \mathbf{a}^{(k)} \quad (2.13)$$

Als Beispiel soll der Vektor  $\mathbf{a}$  in Bild 2.11 von der Beschreibung im Koordinatensystem  $K_k$  in das Koordinatensystem  $K_i$  überführt werden. Zuerst wird  ${}^k_i\mathbf{T}$  nach Gl. (2.12) aufgestellt und die Koordinaten von  $\mathbf{a}$  im System  $K_k$  angegeben. Dann wird mit Gl. (2.13) die Darstellung des Vektors  $\mathbf{a}$  in Koordinaten von  $K_i$  berechnet:

$${}^k_i\mathbf{T} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 4 \\ 0 & 1 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{a}^{(k)} = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{a}^{(i)} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 4 \\ 0 & 1 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \\ 2 \\ 0 \end{pmatrix}$$

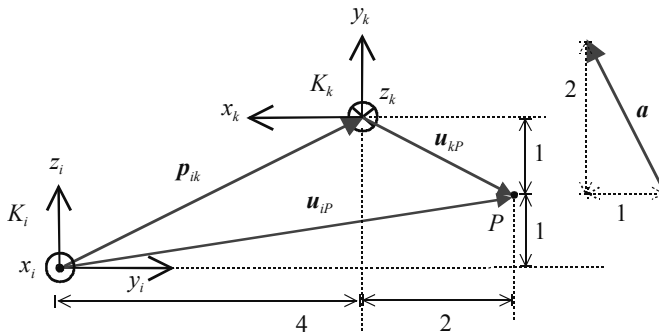
Dieses Ergebnis könnte einfacher mit einer Rotationsmatrix nach Gl. (2.9) berechnet werden, da die nordwestliche  $(3 \cdot 3)$ -Matrix von  ${}^k_i\mathbf{T}$  der Rotationsmatrix  ${}^k_i\mathbf{A}$  entspricht und die vierte Zeile und Spalte bei freien Vektoren bedeutungslos sind. Der Nutzen der Frames zeigt sich in der Abbildung von Ortsvektoren. Ortsvektoren werden hier ebenfalls als Spaltenvektoren mit vier Komponenten beschrieben, wobei die vierte Komponente jedoch den Wert eins erhält. Ist nun der Ortsvektor vom Ursprung eines Koordinatensystems  $K_k$  zu einem Punkt  $P$  als  $\mathbf{u}_{kP}$  im Koordinatensystem  $K_k$  gegeben, kann der Ortsvektor vom Ursprung von  $K_i$  zum Punkt  $P$  durch

$$\mathbf{u}_{iP}^{(i)} = {}^k_i\mathbf{T} \cdot \mathbf{u}_{kP}^{(k)} \quad (2.14)$$

berechnet werden. Als einfaches Beispiel soll wieder Bild 2.11 dienen. Gegeben sei der Ortsvektor  $\mathbf{u}_{kP}^{(k)} = (-2, -1, 0, 1)^T$  vom Ursprung von  $K_k$  zum Punkt  $P$ , gesucht der Ortsvektor vom Ursprung von  $K_i$  zum Punkt  $P$ . Die Berechnung wird nach Gl. (2.14) zu

$$\mathbf{u}_{iP}^{(i)} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 4 \\ 0 & 1 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} -2 \\ -1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 6 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

durchgeführt. Während sich ein freier Vektor durch die Abbildung mit einem Frame (oder einer Rotationsmatrix) nicht ändert, sondern nur seine Darstellung, sind die beiden Ortsvektoren  $\mathbf{u}_{kP}$  und  $\mathbf{u}_{iP}$  im Allgemeinen weder im Betrag noch in der Richtung gleich.



**Bild 2.11** Beispiel für die Abbildung von freien Vektoren und Ortsvektoren

Ist ein freier Vektor oder Ortsvektor  $\mathbf{w}$  in  $K_i$  gegeben und der entsprechende Vektor im Koordinatensystem  $K_k$  gesucht, gilt:

$$\mathbf{w}^{(k)} = \begin{bmatrix} {}^k_i\mathbf{T} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \mathbf{w}^{(i)} = {}^i_k\mathbf{T} \cdot \mathbf{w}^{(i)} = \begin{pmatrix} x_i^{(k)} & y_i^{(k)} & z_i^{(k)} & p_{ki}^{(k)} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \mathbf{w}^{(i)} \quad (2.15)$$

Im Gegensatz zu den Rotationsmatrizen ist die Inversion nicht identisch mit der Transposition der Matrix. Zu jeder homogenen Matrix ist immer die **inverse homogene Matrix** gegeben und es gilt speziell:

$${}^i_k\mathbf{T} = ({}^k_i\mathbf{T})^{-1} = \begin{pmatrix} {}^k_i\mathbf{A}^\top & -{}^k_i\mathbf{A}^\top \mathbf{p}_{ik}^{(i)} \\ \mathbf{0}^\top & 1 \end{pmatrix} \quad (2.16)$$

Dabei ist  ${}^k_i\mathbf{A}$  die Rotationsmatrix, die identisch mit der nordwestlichen (3·3)-Matrix von  ${}^k_i\mathbf{T}$  ist.  $\mathbf{p}_{ik}$  ist der Ortsvektor mit drei Komponenten vom Ursprung von  $K_i$  zum Ursprung von  $K_k$  und  $\mathbf{0}^\top = (0, 0, 0)$ . Wendet man diese Regel auf das Beispiel in Bild 2.11 an, erhält man

$${}^i_k\mathbf{T} = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 & 4 \\ 0 & 0 & 1 & -2 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

und kann leicht nachprüfen, dass z.B.  $\mathbf{u}_{kp}^{(k)} = {}^i_k\mathbf{T} \cdot \mathbf{u}_{ip}^{(i)}$  gilt. Sind weitere Koordinatensysteme zwischen  $K_i$  und  $K_k$  definiert, gilt entsprechend Gl. (2.11):

$$\begin{aligned} {}^k_i\mathbf{T} &= {}^{i+1}_i\mathbf{T} \cdot {}^{i+2}_{i+1}\mathbf{T} \cdots \cdots {}^{k-1}_{k-2}\mathbf{T} \cdot {}^k_{k-1}\mathbf{T} \\ {}^i_k\mathbf{T} &= \begin{bmatrix} {}^k_i\mathbf{T} \end{bmatrix}^{-1} = {}^{k-1}_k\mathbf{T}^{-1} \cdot {}^{k-2}_{k-1}\mathbf{T}^{-1} \cdots \cdots {}^{i+2}_{i+1}\mathbf{T}^{-1} \cdot {}^{i+1}_i\mathbf{T}^{-1} = {}^{k-1}_k\mathbf{T} \cdot {}^{k-2}_{k-1}\mathbf{T} \cdots \cdots {}^{i+1}_{i+2}\mathbf{T} \cdot {}^i_{i+1}\mathbf{T} \end{aligned} \quad (2.17)$$

Die Umrechnung von Vektoren und Ortsvektoren in verschiedenen Koordinatensystemen wird in vielen Bereichen der Robotik benötigt. So bei den Transformationen zwischen Gelenkkoordinaten und kartesischen Koordinaten des Industrieroboters und bei Dynamikberechnungen (s. auch Übungsaufgaben zu Kap. 2).

## 2.1.8 Beschreibung der Orientierung durch Euler-Winkel

Die Lage des Effektors wurde im vorhergehenden Abschnitt 2.1.7 durch den Ortsvektor und durch die Basisvektoren des Effortorkoordinatensystems beschrieben, die in Koordinaten des Basissystems  $K_0$  ausgedrückt sind. Dabei beschreibt der Ortsvektor  $\mathbf{p}_0$  die Position des Tool Center Point (TCP), während die Vektoren  $\mathbf{x}_w, \mathbf{y}_w, \mathbf{z}_w$ , ausgedrückt in Koordinaten des Basiskoordinatensystems  $K_0$ , die **Orientierung** des Effektors bzgl.  $K_0$  beschreiben (s. Bild 2.10a). Da der Anwender neun Angaben machen müsste, um die Orientierung anzugeben, hat sich für die Schnittstelle zum Anwender eine andere Beschreibung der Orientierung, die so genannten **Euler-Winkel**, durchgesetzt. Im Allgemeinen geht es darum, die Orientierung eines beliebigen Koordinatensystems  $K_w$  in einem Bezugs-

oder **Referenzkoordinatensystem**  $K_R$  mit nur drei Angaben zu beschreiben<sup>1</sup>. Oder in anderen Worten: Wie ist das Koordinatensystem  $K_W$  gegenüber dem Bezugskordinatensystem  $K_R$  verdreht? Diese Verdrehung kann durch drei Winkel angegeben werden. Diese drei Winkel werden Euler-Winkel genannt, wenn die Drehungen nacheinander ausgeführt werden. Durch eine Drehung um eine Achse des Bezugssystems  $K_R$  entsteht ein (fiktives) Hilfskoordinatensystem  $K'$ . Wird wieder um eine definierte Achse von  $K'$  gedreht, erhält man das Koordinatensystem  $K''$ . Schließlich wird um eine weitere Achse von  $K''$  gedreht, so dass das entstehende Koordinatensystem mit dem Koordinatensystem  $K_W$  identisch ist. Allerdings gibt es verschiedene Definitionen (s. z. B. in /2.4/, /2.11/), von denen hier zwei angeführt werden sollen. Mit Hilfe der Euler-Winkel lässt sich wie mit den Rotationsmatrizen unabhängig von der Robotertechnik die Orientierung eines beliebigen rechtwinkligen Koordinatensystems zu einem anderen Koordinatensystem beschreiben.

### Z-Y-Z-Euler-Winkel

Zuerst stellt man sich vor, dass ein Hilfskoordinatensystem die Orientierung des Bezugskordinatensystems  $K_R$  hat. Es wird zuerst um die  $z$ -Achse von  $K_R$  gedreht, dann um die  $y$ -Achse des entstehenden Koordinatensystems und schließlich um die  $z$ -Achse des aktuellen Koordinatensystems. Man kann versuchen, folgendermaßen vorzugehen:

- Das Hilfskoordinatensystem wird zuerst um die  $z_R$ -Achse mit dem Winkel  $\alpha$  gedreht, so dass die  $y'$ -Achse des entstehenden Koordinatensystems  $K'$  senkrecht auf der  $z_W$ -Achse steht.
- Als zweites wird um die  $y'$ -Achse mit dem Winkel  $\beta$  gedreht, so dass die  $z''$ -Achse des nun entstehenden Koordinatensystems  $K''$  identisch mit  $z_W$  ist.
- Schließlich wird mit dem Winkel  $\chi$  um  $z'' = z_W$  gedreht, so dass das entstehende Koordinatensystem identisch mit dem Zielkoordinatensystem  $K_W$  ist.

### Z-Y-X-Euler-Winkel

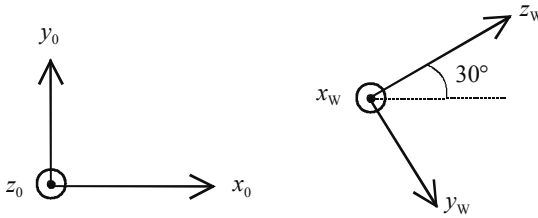
Man stellt sich zuerst wieder vor, dass ein Hilfskoordinatensystem die Orientierung des Bezugskordinatensystems  $K_R$  hat. Es wird zuerst um die  $z$ -Achse von  $K_R$  gedreht, dann um die  $y$ -Achse des entstehenden Koordinatensystems und schließlich um die  $x$ -Achse des aktuellen Koordinatensystems. Man kann versuchen, folgendermaßen vorzugehen:

- Das Hilfskoordinatensystem wird zuerst um die  $z_R$ -Achse mit dem Winkel  $A$  gedreht, so dass, wenn möglich, die  $x'$ -Achse des entstehenden Koordinatensystems  $K'$  senkrecht zur  $z_W$ -Achse steht und so weit wie möglich die Richtung von  $x_W$  einnimmt.
- Als Zweites wird um die  $y'$ -Achse mit dem Winkel  $B$  gedreht, so dass für das entstehende Koordinatensystem  $K''$  dann  $x'' = x_W$  gilt.
- Schließlich wird um  $x'' = x_W$  mit dem Winkel  $C$  gedreht, so dass das entstehende Koordinatensystem identisch mit dem Zielkoordinatensystem  $K_W$  ist.

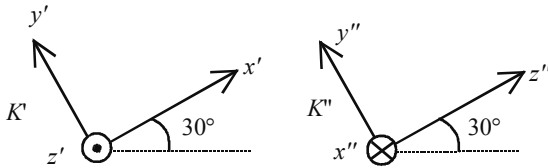
<sup>1</sup> Hier steht der Index W allgemein für ein Zielkoordinatensystem. In der Robotik ist das **Zielkoordinatensystem** oft identisch mit dem Werkzeugkoordinatensystem.

Ein Beispiel zeigt Bild 2.12. Das Bezugssystem ist hier das ruhende Koordinatensystem  $K_0$ . Es sollen die Euler-Winkel des Werkzeugkoordinatensystems  $K_W$  ermittelt werden. Für die Z-Y-Z-Euler-Winkel erhält man die Lösung  $\alpha = 30^\circ$ ,  $\beta = 90^\circ$ ,  $\chi = 180^\circ$ .

In Bild 2.13 sind die Hilfskoordinatensysteme  $K'$  und  $K''$  für diese Lösung gezeichnet. Es ist jedoch zu beachten, dass z. B. auch die Lösung  $\alpha = -150^\circ$ ,  $\beta = -90^\circ$ ,  $\chi = 0^\circ$  möglich ist.

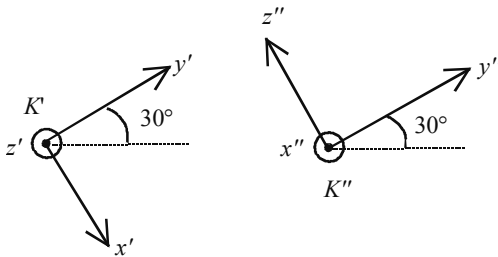


**Bild 2.12** Beispiel für die Beschreibung der Orientierung mit Euler-Winkeln



**Bild 2.13** Hilfskoordinatensysteme  $K'$  und  $K''$  für das Beispiel in Bild 2.12 mit den Z-Y-Z-Euler-Winkeln  $\alpha = 30^\circ$ ,  $\beta = 90^\circ$ ,  $\chi = 180^\circ$

Sollen die Z-Y-X-Euler-Winkel angegeben werden, erhält man die Lösung  $A = -60^\circ$ ,  $B = -90^\circ$ ,  $C = -90^\circ$ . In Bild 2.14 sind die Hilfskoordinatensysteme  $K'$  und  $K''$  für diese Lösung abgebildet. Auch hier gibt es zusätzlich die Lösungen  $A = 120^\circ$ ,  $B = 90^\circ$ ,  $C = 90^\circ$  oder  $A = 30^\circ$ ,  $B = -90^\circ$ ,  $C = 180^\circ$  bzw.  $A = 0^\circ$ ,  $B = -90^\circ$ ,  $C = -150^\circ$ .



**Bild 2.14** Hilfskoordinatensysteme  $K'$  und  $K''$  für das Beispiel in Bild 2.12 mit den Z-Y-X-Euler-Winkeln  $A = -60^\circ$ ,  $B = -90^\circ$ ,  $C = -90^\circ$

Selbstverständlich muss es eine Beziehung zwischen den Euler-Winkeln und der Rotationsmatrix geben, die die Einheitsvektoren des **Zielkoordinatensystems**  $K_W$  im Bezugssystem  $K_R$  beschreibt. Diese Rotationsmatrix lässt sich durch Multiplikation der drei Rotationsmatrizen gewinnen, die die einzelnen Drehbewegungen ausdrücken:

$$R = {}^W_R A = (x_W^{(R)} \quad y_W^{(R)} \quad z_W^{(R)}) = {}^R A \cdot {}^A A \cdot {}^W A$$

# Literatur

## ■ Literatur zu Kapitel 1

### Populärwissenschaftliche Bücher

- /1.1/ Bendle, O.: *Die Moral in der Maschine – Beiträge zur Roboter und Maschinenethik*. Kindle Edition, 2016
- /1.2/ Knoll, A.; Christaller, T.: *Robotik*. Fischer (Tb.), Frankfurt/M., 2003
- /1.3/ Ichbiah, D.: *Roboter. Geschichte – Technik – Entwicklung*. Knesebeck, München, 2005
- /1.4/ Meyer, S.: *Mein Freund der Roboter. Servicerobotik für ältere Menschen – eine Antwort auf den demografischen Wandel?* VDE, Berlin/Offenbach, 2011
- /1.5/ Wagner, T.: *Robokratie. Google, das Silicon Valley und der Mensch als Auslaufmodell*. PapyRossa, Köln, 2. Aufl., 2016
- /1.6/ Wißnet, A.: *Roboter in Japan*. Iudicium Verlag, München, 2007

### Lehr und Fachbücher

- /1.7/ Angeles, J.: *Fundamentals of Robotic Mechanical Systems*. Springer, New York, 4. Aufl., 2014
- /1.8/ Corke, P.: *Robotics, Vision and Control. Mechanical*. Springer, Berlin/Heidelberg, 2. Aufl., 2017
- /1.9/ Craig, J.J.: *Introduction to Robotics-Mechanics and Control*. Pearson, 4. Aufl., 2017
- /1.10/ Dillman, R.; Huck, M.: *Informationsverarbeitung in der Robotik*. Springer, Berlin [u. a.], 1991
- /1.11/ Gevatter, H.J.; Grünhaupt, U. (Hrsg.): *Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik in der Produktion*. Springer, Berlin [u. a.], 2006
- /1.12/ Haun, M.: *Handbuch Robotik*. Springer, Berlin [u. a.], 2. Aufl., 2013
- /1.13/ Hesse, S.; Maliso, V. (Hrsg.): *Taschenbuch Robotik – Montage – Handhabung*. Hanser, München, 2. Aufl., 2016
- /1.14/ Jazar, R.N.: *Theory of Applied Robotics, Kinematics, Dynamics and Control*. Springer, New York, Dodrecht, Heidelberg, 2. Aufl., 2010
- /1.15/ Koubaa, A. (Hrsg.): *Robot Operating System – The Complete Reference*. Springer, Berlin [u. a.], Vol. 1, 2016, Vol. 2, 2017, Vol. 3, 2019
- /1.16/ Müller, R.; Franke, J. et al. (Hrsg.): *Handbuch Mensch-Roboter-Kollaboration*. Hanser, München, 2019
- /1.17/ Paul, R.P.: *Robot Manipulators*. MIT Press, Cambridge, Mass., 1982
- /1.18/ Reinhart, G.; Flores, A.E.M.; Zwicker, C.: *Industrieroboter. Planung – Integration – Trends*. Vogel, Würzburg, 2018
- /1.19/ Schraft, R.D.; Hägele, M.; Wegener, K.; Kubacki, J. (Hrsg.): *Service – Roboter – Visionen*. Hanser, München, 2004
- /1.20/ Siciliano, B.; Khatib, O.: *Springer Handbook of Robotics*. Springer, Berlin [u. a.], 2. Aufl., 2016
- /1.21/ Siegert, H.J.; Bocionek, S.: *Robotik: Programmierung intelligenter Roboter*. Springer, Berlin [u. a.], 1996



- /1.22/ Stark, G.: *Robotik mit Matlab*. Hanser, München/Wien, 2009
- /1.23/ Verl, A.; AlbuSchäffer, A.; Brock, O.; Raatz, A. (Hrsg.): *Soft Robotics – Transferring Theory to Application*. Springer, Berlin [u. a.], 2015
- /1.24/ Weck, M.; Brecher, C.: *Werkzeugmaschinen*. VDI Buch bei Springer, Heidelberg, 6. Aufl., 2013

## ■ Literatur zu Kapitel 2

### Lehr und Fachbücher

- /2.1/ Angeles, J.: *Fundamentals of Robotic Mechanical Systems*. Springer, New York, 4. Aufl., 2014
- /2.2/ Brillowski, K.: *Einführung in die Robotik. Auslegung und Steuerung serieller Roboter*. Shaker, Aachen, 2004
- /2.3/ Corke, P.: *Robotics, Vision and Control. Mechanical*. Springer, Berlin/Heidelberg, 2. Aufl., 2017
- /2.4/ Craig, J.J.: *Introduction to Robotics-Mechanics and Control*. Pearson, 4. Aufl., 2017
- /2.5/ Heimann, B.; Amos, A.; Ortmaier, T.; Rissing, L.: *Mechatronik*. Hanser, München/Wien, 4. Aufl., 2015
- /2.6/ Husty, M. et al.: *Kinematik und Robotik*. Springer, Berlin [u. a.], 1997
- /2.7/ Jazar, R.N.: *Theory of Applied Robotics. Kinematics, Dynamics, and Control*. Springer, New York, Dordrecht, Heidelberg, London, 2. Aufl., 2010
- /2.8/ Lynch, K.M.; Park, F.C.: *Modern Robotics. Mechanics, Planning and Control*. Cambridge University Press, Cambridge UK, 2017
- /2.9/ Paul, R.P.: *Robot Manipulators*. MIT Press, Cambridge, Mass., 1982
- /2.10/ Schwinn, W.: *Grundlagen der Roboterkinematik*. Schmalbach, 1992
- /2.11/ Siciliano, B.; Sciavicco, L.; Villani, L.; Oriolo, G.: *Robotics: Modelling, Planning and Control*. Springer, London, 2. Aufl., 2010
- /2.12/ Siciliano, B.; Khatib, O. (Hrsg.): *Springer Handbook of Robotics*. Springer, Berlin/Heidelberg, 2. Aufl., 2016
- /2.13/ Stark, G.: *Robotik mit Matlab*. Hanser, München/Wien, 2009

### Aufsätze

- /2.14/ Denavit, J.; Hartenberg, R.S.: *A Kinematic Notation for Lower-Pair Mechanisms Based on Matrices*. ASME Journal of Applied Mechanics (1955), 215–222
- /2.15/ Pieper, D.; Roth, B.: *The Kinematics of Manipulators Under Computer Control*. Proc. of the Second Int. Congr. on Theory of Machines and Mechanisms, Zakopane, Polen, (1969) 2, 159 – 169
- /2.16/ VDI Richtlinien 2861, Blatt 1: Kenngrößen für Industrieroboter – Achsbezeichnungen. Juni 1988

## ■ Literatur zu Kapitel 3

### Lehr und Fachbücher

- /3.1/ Bartsch, J.; Sachs, M.: *Taschenbuch mathematischer Formeln*. Hanser, München, 24. Aufl., 2018
- /3.2/ Brillowski, K.: *Einführung in die Robotik. Auslegung und Steuerung serieller Roboter*. Shaker, Aachen, 2004
- /3.3/ Craig, J.J.: *Introduction to Robotics-Mechanics and Control*. Pearson, 4. Aufl., 2017
- /3.4/ Jazar, R.N.: *Theory of Applied Robotics. Kinematics, Dynamics, and Control*. Springer, New York, 4. Aufl., 2014

- /3.5/ Siciliano, B.; Sciavicco, L.; Villani, L.; Oriolo, G.: *Robotics: Modelling, Planning and Control*. Springer, London, 2. Aufl., 2010
- /3.6/ Stark, G.: *Robotik mit Matlab*. Hanser, München/Wien, 2009

### Aufsätze

- /3.7/ Eppinger, M.; Kreuzer, E.: *Systematischer Vergleich von Verfahren zur Rückwärtstransformation bei Industrierobotern*. Robotersysteme 5 (1989), 219–228
- /3.8/ Mehner, E.: *Automatische Generierung von Rücktransformationen für nichtredundante Roboter*. Robotersysteme 6 (1990), 81–88
- /3.9/ Heiß, H.: *Roboterbewegungen mit Bahninterpolation*. VDI Berichte 1094 (1993), 569–578
- /3.10/ Pieper, D.; Roth, B.: *The Kinematics of Manipulators Under Computer Control*. Proc. of the Second Int. Congr. on Theory of Machines and Mechanisms, Zakopane, Polen, (1969) 2, 159–169
- /3.11/ Rall, K.; Wollnack, J.; Gossel, O.: *Kinematische Ketten: Schnelle und exakte Differentiation*. Automatisierungstechnik 43 (1995), 14–23
- /3.12/ Weber, A.: *OSCAR – Optimization Strategy for Control of Redundant Articulated Robots*. Proc. 5th World Conf. on Robotics Research, Cambridge, Massachusetts, 1994, 13–21 bis 13–33
- /3.13/ Weber, W.; König, A.: *Virtuelle Gelenke zur Lösung der universellen inversen Kinematik*. Internationales Forum Mechatronik, Oktober 2013, Winterthur, Schweiz
- /3.14/ Woernle, C.: *Ein systematisches Verfahren zur Rückwärtstransformation bei Industrierobotern*. Robotersysteme 3 (1987), 219–228

## ■ Literatur zu Kapitel 4

### Lehr und Fachbücher

- /4.1/ Biagiotti, L.; Melchiorri, C.: *Trajectory Planning for Automatic Machines and Robots*. Springer, Berlin/Heidelberg, 2008
- /4.2/ Craig, J. J.: *Introduction to Robotics. Mechanics and Control*. Prentice Hall, New Jersey, 4. Aufl., 2017
- /4.3/ Husty, M.: *Kinematik und Robotik*. Springer, Berlin [u. a.], 1997
- /4.4/ Jazar, R. N.: *Theory of Applied Robotics. Kinematics, Dynamics, and Control*. Springer, New York, 4. Aufl., 2014
- /4.5/ Lynch, K. M.; Park, F. C.: *Modern Robotics. Mechanics, Planning and Control*. Cambridge University Press, Cambridge UK, 2017
- /4.6/ Olonski, J.: *Bahnplanung und Bahnführung von Industrierobotern*. Vieweg, Braunschweig, 1991
- /4.7/ Keppeler, M.: *Führungsgrößenerzeugung für numerisch bahngesteuerte Industrieroboter*. Springer, Berlin, 1984
- /4.8/ Siciliano, B.; Sciavicco, L.; Villani, L.; Oriolo, G.: *Robotics: Modelling, Planning and Control*. Springer, London, 2. Aufl., 2010
- /4.9/ Siciliano, B.; Khatib, O.: *Springer Handbook of Robotics*. Springer, Berlin [u. a.], 2. Aufl., 2016
- /4.10/ Späth, H.: *Spline-Algorithmen zur Konstruktion glatter Kurven und Flächen*. Oldenbourg, München, 4. Aufl., 1986
- /4.11/ Stark, G.: *Robotik mit Matlab*. Hanser, München/Wien, 2009
- /4.12/ Weck, M.; Brecher, C.: *Werkzeugmaschinen*. VDI Buch bei Springer, Heidelberg, 6. Aufl., 2013

## Aufsätze und Dokumentationen

- /4.13/ Bechtloff, J.: *Neue Verfahren zur Echtzeitinterpolation für die Bahnsteuerung 6-achsiger Industrie-roboter*. VDI Berichte 1094 (1993), 511 – 524
- /4.14/ Heiß, H.: *Roboterbewegungen mit Bahninterpolation und Überschleifen*. VDI Berichte 1094 (1993), 569 – 578
- /4.15/ Khalil, W.: *Trajectories Calculations in the Joint Space of Robot*. In: Danthine, A.; Geradin, M. (eds.): *Advanced Software in Robotics*, Elsevier Science Publishers, New York, (1984), 177 – 185
- /4.16/ Weber, W.; König, A.; Nodem, D.X.: *User-Defined Transition between Path Segments in Terms of Tolerances in Speed and Position Deviation*. Int. Symp. on Robotics – Robotik 2016, München, 21./22. Juni 2016, 187 – 193, VDEVerlag, Berlin, Offenbach, ISBN 9783800742318

## ■ Literatur zu Kapitel 5

### Lehr und Fachbücher

- /5.1/ Haun, M.: *Handbuch Robotik*. Springer, Berlin [u. a.], 2. Aufl., 2013
- /5.2/ Dillman, R.; Huck, M.: *Informationsverarbeitung in der Robotik*. Springer, Berlin [u. a.], 1991
- /5.3/ Ley, W.; Wittmann, K.; Hallmann, W. (Hrsg.): *Handbuch der Raumfahrttechnik*. Hanser, München, 5. Aufl., 2019
- /5.4/ Siegert, H.J.; Bocionek, S.: *Robotik: Programmierung intelligenter Roboter*. Springer, Berlin [u. a.], 1996

### Aufsätze/Handbücher

- /5.5/ Borgolte, U.: *IRL – Die deutsche Norm für explizite Roboterprogrammierung*. VDI Berichte 1094 (1993), 535–544
- /5.6/ Brunner, B.; Vogel, J.; Hirzinger, G.: *Aufgabenorientierte Fernprogrammierung von Robotern*. Automatisierungstechnik 49 (2001), 312–319
- /5.7/ *DIN 66312: Industrieroboter – Programmiersprache – Industrial Robot Language*. September 1996
- /5.8/ *EasyRob: Easy-Rob 3D Robot Simulation Tool*. [www.easyrob.com](http://www.easyrob.com). April 2019
- /5.9/ Ferre, M.; Buss, M.; Aracil, R.; Melchiorri, C.; Balaguer, C. (eds.): *Advances in Telerobotics*. Springer, Berlin/Heidelberg, 2007
- /5.10/ Finkemeyer, B.: *Robotersteuerungsarchitektur auf der Basis von Aktionsprimitiven*. Fortschritte in der Robotik, Band 8, Shaker, Aachen, 2004
- /5.11/ König, A.; Kleinmann, K.; Weber, W.: *Verbesserung des Einrichtprozesses von Industrierobotern durch akustisches Echtzeit-Feedback*. Automation 2012, VDI Berichte 2171, VDI Verlag, Düsseldorf, 2012, 287–290
- /5.12/ Kuebler, B.; Seibold, U.: *Aktueller Stand und Entwicklung der robotergestützten Chirurgie*. In: Kramme, R. (Hrsg.): *Medizintechnik. Verfahren, Systeme, Informationsverarbeitung*. Springer, Berlin/Heidelberg, 5. Aufl., 2016.
- /5.13/ Maletzki, G.; Pawletta, T.; Pawletta, S.; Dünow, P.; Lampe, B.: *Simulationsmodellbasiertes Rapid Prototyping von komplexen Robotersteuerungen*. Atp – Automatisierungstechnische Praxis 50 (2008), 54 – 60
- /5.14/ Passenberg, C.; Peer, A.; Buss, M.: *A survey of environment, operator, and task-adapted controllers for teleoperation systems*. Journal of Mechatronics, (2010), 787 – 801
- /5.15/ KUKA: KR C1/ KR C2 / KR C3. Reference Guide, Release 4.1
- /5.16/ Siemens: *Robotersimulation und Programmierung*. [https://www.plm.automation.siemens.com/de\\_de/products/tecnomatix/manufacturingsimulation/robotics-and-automation-programming](https://www.plm.automation.siemens.com/de_de/products/tecnomatix/manufacturingsimulation/robotics-and-automation-programming). April 2019

- /5.17/ Som, F.: *Robotersteuerung mit eingebetteter grafischer 3D-Simulation und effizienten Expertenfunktionen für eine automatisierte Programmerstellung*. Robotik 2008, VDI Berichte 2012, VDI Verlag, Düsseldorf, 2008, S. 171 – 174 (Langfassung auf CD)

## ■ Literatur zu Kapitel 6

### Lehr und Fachbücher

- /6.1/ Corke, P.: *Robotics, Vision and Control. Mechanical*. Springer, Berlin/Heidelberg, 2. Aufl., 2017
- /6.2/ Craig, J. J.: *Introduction to Robotics-Mechanics and Control*. Pearson, 4. Aufl., 2017
- /6.3/ Hagl, R.: *Elektrische Antriebstechnik*. Hanser, München/Wien, 2., akt. Aufl., 2015
- /6.4/ Heimann, B.; Albert, A.; Ortmaier, T.; Rissing, L.: *Mechatronik. Komponenten – Methoden – Beispiele*. Hanser, München/Wien, 4. Aufl. 2015
- /6.5/ Jazar, R. N.: *Theory of Applied Robotics. Kinematics, Dynamics, and Control*. Springer, New York, 4. Aufl., 2014
- /6.6/ Pfeiffer, F.; Reithmeier, E.: *Roboterdynamik*. Teubner, Stuttgart, 1987
- /6.7/ Pfeiffer, F.: *Mechanical Systems Dynamics*. Springer, Berlin [u. a.], 2008
- /6.8/ Schröder, D.: *Elektrische Antriebe. Grundlagen*. Springer, Berlin [u. a.], 6. Aufl., 2017
- /6.9/ Schröder, D.: *Elektrische Antriebe. Regelung von Antriebssystemen*. Springer, Berlin [u. a.], 4. Aufl., 2015
- /6.10/ Wörnle, C.: *Mehrkörpersysteme*. Springer, Heidelberg [u. a.], 2. Aufl., 2017
- /6.11/ Wittenburg, J.: *Dynamics of Multibody Systems*. Springer, Berlin [u. a.], 2008
- /6.12/ Zirn, O.; Weickert, S.: *Modellbildung und Simulation hochdynamischer Fertigungssysteme*. Springer, Berlin [u. a.], 2006

### Aufsätze

- /6.13/ Hollerbach, J. M.: *A Recursive Lagrangian Formulation of Manipulator Dynamics and a Comparative Study of Dynamics Formulation Complexity*. IEEE Trans. on Syst., Man, Cyber. SMC10 (1980), 730 – 736
- /6.14/ Schopen, A.: *Angetrieben mit System*. Mechatronik 1 – 2 (2016)
- /6.15/ Walker, M. W.; Orin, D. E.: *Efficient dynamic computer simulation of robotic mechanism*. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 104 (1982), 205–211
- /6.16/ Weber, W.: *Reduktion von Robotermodellen für die nichtlineare Regelung*. Automatisierungstechnik 38 (1990), 410–415, 442 – 446
- /6.17/ Weber, W.; Anggono, L.: *Stochastic Approach to Generate Approximated Robot Models*. Proc. 4th IMACS Symposium on Mathematical Modelling (MATHMOD), Wien, Februar 2003, Vol. 1, S. 203, Vol. 2 (CD), S. 1183 – 1192

## ■ Literatur zu Kapitel 7

### Lehr und Fachbücher

- /7.1/ An, C. H.; Atkeson, C. G.; Hollerbach, J. M.: *Model-Based Control of a Robot Manipulator*. MITPress, Cambridge (USA), 1989
- /7.2/ Craig, J. J.: *Introduction to Robotics. Mechanics and Control*. Prentice Hall, New Jersey, 4. Aufl., 2017
- /7.3/ Föllinger, O.: *Regelungstechnik*. VDE-Verlag, 12. Aufl., Berlin, 2016

- /7.4/ Groß, H.; Hamann, J.; Wiegärtner, G.: *Elektrische Vorschubantriebe in der Automatisierungstechnik*. Publicis MCD Verlag, Erlangen/München, 2. Aufl., 2006
- /7.5/ Lutz, H.; Wendt, W.: *Taschenbuch der Regelungstechnik*. Verlag Harri Deutsch, Thun und Frankfurt, 10. Aufl., 2014
- /7.6/ Rusin, V.: *Adaptive Regelung von Robotersystemen in Kontaktaufgaben*. Dissertation. Otto-von-Guericke Universität Magdeburg, Magdeburg, 2007
- /7.7/ Siciliano, B.; Sciavicco, L.; Villani, L.; Oriolo, G.: *Robotics: Modelling, Planning and Control*. Springer, London, 2. Aufl., 2010
- /7.8/ Siciliano, B.; Villani, L.: *Robot Force Control*. Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA, USA, 2000
- /7.9/ Unbehauen, H.: *Regelungstechnik I*. Springer Vieweg, Wiesbaden, 16. Aufl., 2017
- /7.10/ Weber, W.: *Regelung von Manipulator- und Roboterarmen mit reduzierten, effizienten inversen Modellen*. Fortschr. Ber. VDI, Reihe 8, Nr. 183, VDI Verlag, Düsseldorf, 1989

### Aufsätze

- /7.11/ Beerhold, J.R.: *Stabile adaptive Regelung nichtlinearer Mehrgrößen-Systeme mit neuronalen RBF-Netzen am Beispiel von Mehrgelenkrobotern*. Automatisierungstechnik 44 (1996), 577 – 583
- /7.12/ Berns, K.: Anwendung neuronaler Netze in der Robotik. Robotersysteme 7 (1991), 32 – 32
- /7.13/ Damm, M.; Hott, M.: Echtzeitfähige adaptive Positionsregelung für Manipulatoren mit sechs Freiheitsgraden. Automatisierungstechnik 42 (1994), 507 – 515
- /7.14/ Dalacker, M.; Horn, A.: *Moderne Regelungsverfahren für Industrieroboter*. Automatisierungstechnik 41 (1993), 363 – 371
- /7.15/ Dresselhaus, M.; Held, J.: *Entwicklungskonzept, Realisierung und Erprobung modellbasierter Regelungsverfahren für innovative Industrierobotersysteme*. Robotik 2000, VDI Berichte 1552 (2000), 185 – 190
- /7.16/ Freund, E.; Hoyer, H.: *Das Prinzip nichtlinearer Systementkopplung mit der Anwendung auf Industrieroboter*. Regelungstechnik 28 (1980), 80 – 87 und 116 – 126
- /7.17/ Hollerbach, J.M.; Suh, K.C.: *Redundancy Resolution of Manipulators through Torque Optimization*. IEEE Journ. of Robotics and Autom. Ra3 (1987), 308 – 316
- /7.18/ JR3: Sensors. [www.jr3.com](http://www.jr3.com). September 2016
- /7.19/ Koeppe, R.; Meusel, P.; Hirzinger, G.: *Technologien für die Kraftregelung von Industrie- und Service-robotern*. Robotik 2000, VDI Berichte 1552 (2000), 159 – 165
- /7.20/ Kuntze, H.B.: *Regelungsalgorithmen für rechnergesteuerte Industrieroboter*. Regelungstechnik 32 (1984), 215 – 226
- /7.21/ Kuntze, H.B.; Sajidman, M.; Schill, W.; Endres, D.: *Fuzzy-Logic-Regelung von Robotern*. VDI Berichte 1094 (1993), 305 – 319
- /7.22/ Lange, F.; Hirzinger, G.: *Erhöhung der Bahngenauigkeit von positionsgeregelten Robotern*. VDI Berichte 1094, (1993), 321 – 330
- /7.23/ Olomski, J.: *Zentrale Vorsteuerung*. In: Schmid, D. (Hrsg.): Fortschrittliche Robotersteuerungstechnik. Fachberichte Messen Steuern Regeln. Springer, Berlin, 1991, 166 – 177
- /7.24/ Ott, C.; AlbuSchäffer, A.; Kugi, A.; Stramigioli, S.; Hirzinger, G.: *Ein passivitätsbasierter Ansatz zur kartesischen Impedanzregelung von Robotern mit elastischen Gelenken*. Robotik 2004, VDI Berichte 1841 (2004), 71 – 79
- /7.25/ Palm, R.; Hellendoorn, H.: *Fuzzy-Methoden in der Robotik*. Künstliche Intelligenz (KI), (1991) 4, 41 – 46
- /7.26/ Schunk: Roboterzubehör. [https://schunk.com/de\\_de/greifsysteme/category/greifsysteme/roboterzubehoer/messen](https://schunk.com/de_de/greifsysteme/category/greifsysteme/roboterzubehoer/messen). April 2019

- /7.27/ Süß, U.; Weber, W.: *Untersuchung und Realisierung einer adaptiven Gelenkregelung nach dem Referenzmodellkonzept*. VDI Berichte 598 (1986), 297 – 308
- /7.28/ Weber, W.: *Adaption einer Roboterregelung an ein Referenzverhalten bei Parameteränderungen*. VDI Berichte 1094 (1993), 263 – 274
- /7.29/ Weber, W.: *Modellbasierte Gelenkregelung in Kaskadenstruktur mit vorgegebenem Regelungsverhalten*. Robotik 2000, VDI Berichte 1552 (2000), 185 – 190
- /7.30/ Weber, W.: *Modifizierter Drehzahlregler für automatischen Entwurf*. Wt Werkstattstechnik online 91 (2001), 693 – 697
- /7.31/ Weber, W.: *Reduktion von Robotermodellen für die nichtlineare Regelung*. Automatisierungstechnik 38 (1990), 410 – 415, 442 – 446
- /7.32/ Weber, W.; Koch, H.: *Zustandsregler für Achsen mit Nachgiebigkeiten – ReDuS+ unterstützt Anlagenpersonal*. Automatisierungstechnische Praxis (atp), Oldenbourg Industrieverlag, Heft 4/2010, S. 888 – 892
- /7.33/ Weber, W.; Kayser, A.: *Anwendungsorientierter Entwurf von Bewegungsregelungen*. Int. Forum Mechatronik (IFM 2006), Linz, 2006, S. 245 – 266
- /7.34/ Weber, W.: *Automatic Generated Real-time Models of Robot Dynamics*. Prepr. Int. Symp. on Robot Control (SYROCO), Wrocław, Poland, September 2003, S. 47 – 52
- /7.35/ Winkler, A.; Suchý, J.: *Lastidentifikation und Messung dynamischer Kräfte und Momente mit einem 12D-Kraft-/Momentsensor*. Robotik 2008, VDI Berichte 2012, VDI Verlag, Düsseldorf, 2008, S. 33 – 36 (Langfassung auf CD)
- /7.36/ Xu, X.: *Application of Rule Based FC Approach with Dynamic Compensation to Robot Manipulators*. Proc. of 1988 IEEE Int. Workshop on Intelligent Robots and Systems, IROS'88, Tokyo, 1988, S. 131 – 136
- /7.37/ Ye, J.: *Modellgestützte adaptive Regelverfahren für Industrieroboter*. Bericht aus dem Institut A für Mechanik. Universität Stuttgart, Stuttgart, 2000

## ■ Literatur zu Anhang A

- /A1/ Bartsch, J.; Sachs, M.: *Taschenbuch mathematischer Formeln*. Hanser, München, 24. Aufl., 2018
- /A2/ Bronstein, I. N.; Semendjajew, K. A. [u. a.]: *Taschenbuch der Mathematik*. Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, 10. Aufl. 2016

# Index

## Symbole

6D-Mouse 103

## A

adaptive Regelung 174

Aktionsplanungssysteme 109

AL 110

Arbeitsarm (Slave-Arm) 105

Arbeitsraum 5, 48

Assistenzrobotik 13

asynchrone PTP 65

aufgabenorientierte Programmierung 107, 109

Aufgabentransformator 109

AWR (Anti-Windup-Reset) 173

## B

Bahnsteuerung 65

Basisvektoren 17

Bedienarm (Master-Arm) 105

Beschleunigungszeit 68

Betrag eines Vektors 16

Bewegungsfreiheitsgrade 199

Bewegungsgleichung 120, 139

Bewegungssteuerung 8

bürstenlose Gleichstromantriebe 121

## C

CAD-basierte Programmierung 107

CAR 115

Computed Torque Feedforward Control 178

CP-Steuerung 65

CP-Überschleifen 92

## D

Denavit-Hartenberg-Konvention 36

Deviationsmomente 131

dexterous workspace 5

Differenzial 145

direkte Programmierung 102

direktes kinematisches Problem 45

Diskretisierungsrauschen 179

Drehimpulserhaltungssatz 131

Drehvektor 29

Drehwinkel 29

Durchtrittsfrequenz 159

## E

Effektor 3

Einlegegeräte 2

Entkopplung 180

Euler-Winkel 25

explizite Programmierung 108

externe Regelungen 151

externer Regelkreis 11

## F

Fahrzeit (Bahndauer) 68

fiktive Armteile 34

Folgeprogrammierung 104

Frame 23

freie Vektoren 16

Freiheitsgrad  $f$  4, 31

Freischneiden 130

Fügemechanismen (Remote Center of Compliance) 153

Fuzzy-Logik 194

Fuzzy-Mengen 194

## G

Gelenke (Achsen) 3

Gelenkkoordinaten 36

Gelenkregelung 8, 151

Gelenkvariable (Gelenkkoordinate) 38

generalisierte Koordinate 45, 120

geometrische Lösungen 49, 52

Geschwindigkeitsalgorithmus 173

Geschwindigkeitsregelung 157

Geschwindigkeitsüberschleifen 90  
 Geschwindigkeitsvorsteuerung 165  
 Getriebefreiheitsgrad  $F$  4  
 Getriebematrizen 144  
 grafisch interaktive Programmierung 107  
 Gütekriterium 47

## H

Hauptachsen 3  
 HMI – Human Machine Interface 8  
 homogene Matrix 23, 42  
 humanzentrierte Automatisierung 13  
 hybride Programmierverfahren 106  
 hybride Regelungen 154

## I

implizite Programmierung 109  
 Impulserhaltungssatz 131  
 Industrieroboter 1f.  
 interne Regelung 151  
 interne Regelung (Gelenkregelung) 11  
 interne Sensoren 10  
 Interpolation 8, 65, 67  
 Interpolationsabstand 69, 73  
 intuitive Programmierung 13  
 inverse Kinematik 8, 11, 45  
 inverses Modell 120  
 Inversion der Vorwärtstransformation 50

## J

Jacobi-Matrix 140

## K

kartesische Lageregelungen 152  
 Kaskadenregelung 163  
 kinematische Kopplungen 144  
 kinematische Transformationen 45  
 Knickarmroboter 3  
 Konfigurationen 57  
 kooperierende Roboter 8  
 Kosinussatz 49  
 Kraftfreiheitsgrade 154, 199  
 Kraft-/Momentensensor (KMS) 154  
 Kraftregelung 9, 153  
 kubische Splines 93

## L

Lageregelung 9, 151  
 Leichtbauroboter 12  
 Leitachse 65  
 Linearbahn 66  
 Linearinterpolation 80  
 linguistischer Regler 194

## M

Manipulatoren 2  
 Massenmatrix 125  
 Massenträgheitsmatrix 125  
 Master-Slave-Programmierung 105  
 Matrix 20  
 Mehrdeutigkeit 47  
 Mehrgrößensystem 11  
 Mensch-Roboter-Kollaboration 13  
 Mensch-Roboter-Kooperation 13  
 Messaufnehmer 10  
 Messwertvorverarbeitung 173  
 momentane Drehachse 127  
 MRAC-Konzept (Model Reference Adaptive Control) 175

## N

Nebenachsen 3  
 neuronale Lernverfahren 196  
 neuronales Netz 196  
 Newton-Euler-Verfahren 125  
 nichtlineare Entkopplung 177  
 numerische Näherungslösung 48

## O

Offline-Programmiersysteme (OLP-Systeme) 108  
 Online-Programmierung 102  
 Orientierung 25  
 Override 101

## P

parallel force/position control 200  
 Parallelroboter 6  
 Phasenreserve 159  
 Play-Back 104  
 Positionsüberschleifen 90  
 Programmieren durch Vormachen 13



Programmierhandgerät (Teach-Panel) 101 f.  
 Programmiersystem 7, 101  
 Programmierverfahren 102  
 Programmverwaltung 101  
 PTP-Bahn 65  
 PTP-Überschleifen 91  
 Punktsteuerung 65

## Q

Quaternionen 29

## R

Rampenbahn 69  
 Rampenprofil 69  
 reachable workspace 5  
 Rechentotzeit 172  
 redundante Kinematiken 4  
 reduziertes inverses Modell 189  
 Referenzkoordinatensystem 26  
 Richtungsvektor 17  
 Roboter 1  
 Roboterbetrieb 101 f.  
 Roboterkinematik 3  
 Roboterkoordinaten 45  
 roboterorientierte Programmierung 108  
 Roboterprogrammierungsumgebung 101  
 Rotationsmatrix 21  
 RRC 153  
 RRT-Roboter 40  
 Ruck 71  
 Rückwärtstransformation 45, 47

## S

SCARA-Roboter 5  
 Schleppabstand 167  
 Schwenkarmroboter 5  
 Sigmoidfunktion 197  
 Signum-Funktion 30  
 Singularität 47  
 Sinoidenprofil 71  
 Skalarprodukt 18, 54  
 Spaltenvektor 16  
 Spline-Bahn 67  
 Spline-Interpolation 90  
 stationärer Zustand 167  
 statische Reibung 121  
 Steifigkeitsmatrix 200

Stellungsalgorithmus 173  
 Stromregelung 122  
 symbolische Formelmanipulation 140  
 synchrone PTP 65  
 Synchronisation 109, 174  
 Synchronisieren 101

## T

Teach-In 102  
 Telemanipulatoren 2  
 Telemanipulatorsystem 105  
 Telerobotik 105  
 Testbetrieb 101  
 textuelle Programmierung 107  
 Tool Center Point (TCP) 3  
 Trägheitstensor 130  
 Translationsgeschwindigkeit 32

## U

Überschleifen 90  
 Überschleifkugel 91  
 Umweltmodelle 109

## V

VAL 110  
 VAL II 110  
 Vektorprodukt (Kreuzprodukt) 18  
 verallgemeinerte Koordinate 45  
 Vorsteuerung 177  
 Vorwärtstransformation 45

## W

Weltkoordinaten 45  
 Weltsystem 45  
 Winkelgeschwindigkeitsvektor 32

## Z

Zeilenvektor 16  
 zeitoptimale Bahn 70  
 zentrale Vorsteuerung 177 f.  
 Zentriwinkel 84  
 Zirkularbahn 66  
 Zirkularinterpolation 83  
 Zusatzsignalsynthese 187  
 Zykluszeit 116