

1

Komponenten eines Industrieroboters

■ 1.1 Definition und Einsatzgebiete von Industrierobotern

Der Begriff **Roboter** hat seinen Ursprung im tschechischen Wort „robota“ (arbeiten) und wurde zuerst 1921 im Bühnenstück „Rossums Universal Robot“ des tschechischen Schriftstellers Karl Capek verwendet, wobei die Roboter alle schweren Arbeiten verrichten, mit der Zeit jedoch zu rebellieren beginnen. Auch heute wird der Begriff Roboter immer wieder mit Anthropoiden, menschenähnlichen Maschinen, in Verbindung gebracht, denen neben der Fähigkeit Werkzeuge zu führen und mechanische Arbeit zu verrichten auch Charaktereigenschaften und vom Willen gesteuertes Handeln unterstellt werden.

Der Begriff „intelligenter Roboter“ wird verwendet, wenn der Roboter als wissensbasierter Agent aufgefasst wird, der mehr oder weniger „intelligent“ mit seiner Umgebung interagiert (/1.15/). In diesem Zusammenhang befassen sich auch Sozial- und Kulturwissenschaftler mit den Auswirkungen der Robotik, meist im Zusammenhang mit der Künstlichen Intelligenz, auf die gesellschaftliche Entwicklung (s. z. B. /1.2/, /1.7/).

Auch in technisch orientierten Kreisen wird zum Teil der Begriff Roboter weit gefasst. So werden z. B. Systeme, die etwas wahrnehmen, diese Information verarbeiten und dann entsprechend handeln, als Roboter bezeichnet. Unter solche weit gefassten Definitionen lassen sich autonome Fahrzeuge, mit Sensorik ausgerüstete Baumaschinen etc., aber auch einfachere Systeme einordnen.

In diesem Buch soll der Industrieroboter im Mittelpunkt stehen. Der Industrieroboter kann als Handhabungsgerät aufgefasst werden. Die **Handhabungstechnik** befasst sich mit technischen Einrichtungen, die Bewegungen in mehreren Bewegungsachsen im Raum ähnlich den Bewegungen des Menschen ausführen. Einteilung und Definition von **Handhabungsgeräten** weichen mehr oder weniger voneinander ab. In der VDI-Richtlinie 2860 wird Handhaben als „das Schaffen, definierte Verändern oder vorübergehende Aufrechterhalten einer vorgegebenen räumlichen Anordnung von geometrisch bestimmten Körpern“ verstanden.

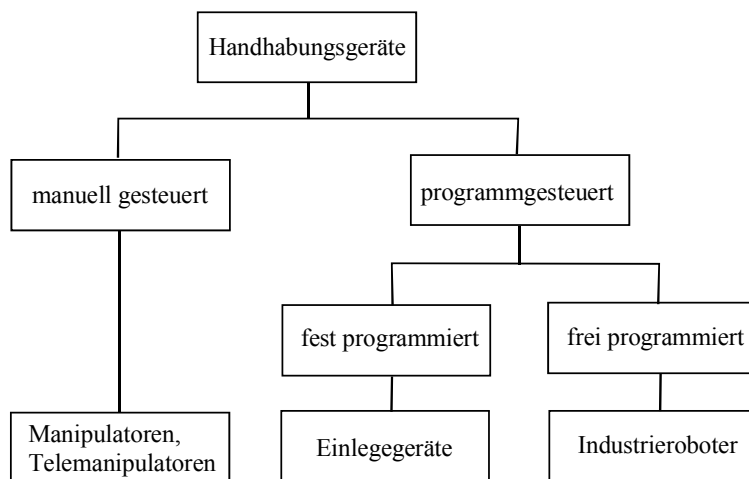


Bild 1.1 Einteilung von Handhabungsgeräten

Obwohl mit dem Industrieroboter vielfältige Bearbeitungsaufgaben wie Schweißen und Lackieren ausgeführt werden, wird er meist als spezielles Handhabungsgerät betrachtet. Bild 1.1 zeigt eine mögliche Einteilung. **Einlegegeräte** werden zum Zuführen und Entnehmen von Werkstücken eingesetzt. Sie haben wenige Achsen und erhalten Weginformationen über Endschalter. Mit diesen Geräten ist es nicht möglich, definierte Bahnen im Raum zu programmieren. Manipulatorsysteme dienen der Fernhantierung, sie haben die Entwicklung von Industrierobotern entscheidend beeinflusst. **Manipulatoren** werden durch menschliche Intelligenz gesteuert. Ein Operateur trifft Entscheidungen und gibt Bewegungen vor. Manuelle Geschicklichkeit, kognitive Fähigkeiten, komplexe Sensorik und Erfahrung des Menschen werden genutzt und vom technischen System unterstützt. Der Einsatz liegt hauptsächlich bei schwierigen, unerwarteten Hantierungsaufgaben in schwer zugänglichen, gesundheitsgefährdenden Umgebungen. Zur Steuerung des Arbeitsarms des Telemanipulatorsystems werden ähnlich aufgebaute Bedienarme, Joy-Sticks oder Ähnliches genutzt. **Telemanipulatoren** sind ferngesteuerte Manipulatoren, wobei der Bediener über ein Kamerasystem Informationen über die Arbeitsumgebung erhält. Oft sind jedoch auch Telemanipulatoren programmierbar oder die Telemanipulatortechnik wird zur Programmierung von Industrierobotern verwendet. Die VDI-Richtlinie 2860 definiert den **Industrieroboter** auf folgende Weise:

Industrieroboter sind universell einsetzbare Bewegungsautomaten mit mehreren Achsen, deren Bewegungen hinsichtlich Bewegungsfolge und Wegen bzw. Winkeln frei programmierbar (d. h. ohne mechanischen Eingriff vorzugeben bzw. änderbar) und gegebenenfalls sensorgeführt sind. Sie sind mit Greifern, Werkzeugen oder anderen Fertigungsmitteln ausrüstbar und können Handhabe- oder andere Fertigungsaufgaben ausführen.

Etwas allgemeiner ist die Definition nach DIN EN ISO 8373. In Japan wird von der Japan Industrial Robot Association (JIRA) der Begriff Industrieroboter viel weiter gefasst (/1.8/). Bei einem Zahlenvergleich bez. des Einsatzes von Industrierobotern in verschiedenen Ländern ist deshalb Vorsicht geboten.

Der wesentliche Unterschied zu den anderen Handhabungsgeräten liegt in den Eigenschaften „frei programmierbar“ und „universell einsetzbar“. Der Industrieroboter hat aus ökonomischen Gründen dort sein Haupteinsatzgebiet, wo kürzere Produktzyklen, kleinere Serien und damit eine kostengünstige flexible Umrüstung gefordert sind. Wichtige Anwendungsgebiete sind Be- und Entladen, Schweißen, Entgraten, Lackieren, Montage, Vermessen. Aus der Industrieroboter- und Manipulatortechnik entstanden auch verwandte Bereiche wie Roboter im Bauwesen, Anwendungen in der Medizintechnik, Serviceroboter für Dienstleistungen u. Ä.

Die Servicerobotertechnik stellt eine Verbindung zwischen der Manipulatortechnik und der Industrierobotertechnik her. Ein Serviceroboter erbringt Dienstleistungen für den Menschen, er reagiert dabei direkt auf Anweisungen des Menschen wie ein Manipulator, führt aber auch Teilaufgaben automatisch und programmgeführt durch.

■ 1.2 Mechanischer Aufbau

Ein Industrieroboter hat die Aufgabe einen Effektor geeignet im Raum zu führen. Der **Effektor** kann ein Greifer, eine Messspitze, ein Bearbeitungswerkzeug etc. sein. Der Effektor ist dasjenige Teil des Roboterarms, welches mit der Umgebung in Kontakt tritt, um Werkstücke aufzunehmen, zu bearbeiten und vieles mehr. Ein charakteristischer Punkt des Effektors, z. B. die Werkzeugspitze, wird **Tool Center Point (TCP)** genannt. Der Roboter besteht aus mehreren Armteilen und Gelenken. Die Anordnung der Armteile und Gelenke bestimmt die kinematische Struktur. Man unterscheidet zwei Hauptklassen: Die serielle Kinematik und die Parallelkinematik.

Ein serieller Roboter besteht aus einer Aneinanderreihung von Armteilen, die durch **Gelenke (Achsen)** verbunden sind. Der **Effektor** kann als letztes Armteil aufgefasst werden. Die Bewegungsmöglichkeiten des Effektors sind im Wesentlichen durch die mechanische Konstruktion des Roboters bestimmt, d. h. durch die Größenverhältnisse der Armteile, den Typ und die Anordnung der Gelenke. Man spricht auch etwas ungenau von der **Roboterkinematik**. In Bild 1.2a ist ein Industrieroboter der Firma Stäubli Tec-Systems mit sechs rotatorischen Gelenken (Drehgelenken) abgebildet. Dieser häufig verwendete Typ wird als vertikaler **Knickarmroboter** bezeichnet und kann vielseitig eingesetzt werden.

Man unterteilt die Achsen eines Industrieroboters in Haupt- und Nebenachsen. Die **Hauptachsen** beeinflussen wesentlich die Position des TCP im Raum, während die **Nebenachsen** nur kleine Positionsänderungen hervorrufen aber hauptsächlich die Ausrichtung des Effektors, die Orientierung, bestimmen.

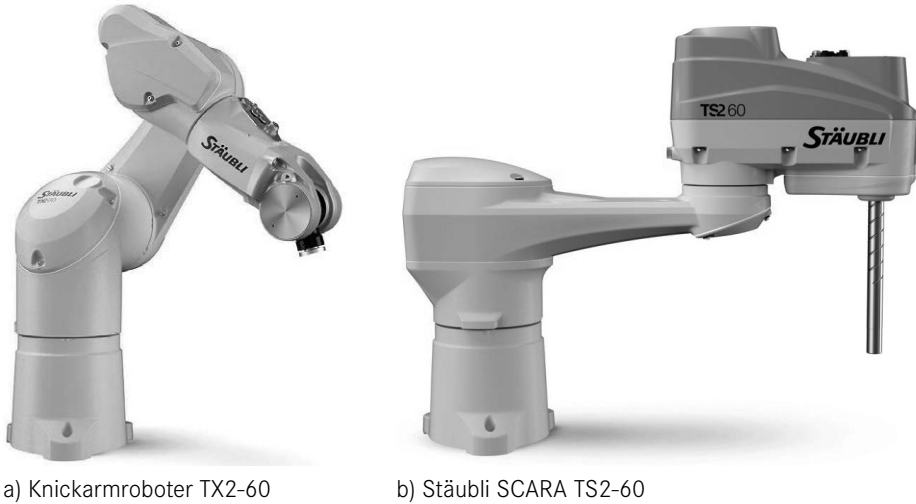
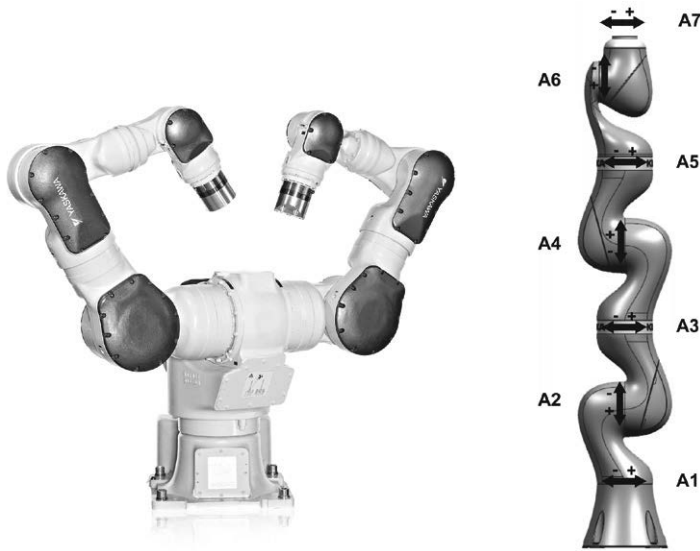


Bild 1.2 a) Knickarmroboter TX2-60 (Werkbild Staubli), b) SCARA-Roboter TS2-60 von Staubli (Werkbild Staubli)

Ein Körper, der sich im Raum frei bewegen kann, hat den Freiheitsgrad 6. Nach der VDI-Richtlinie 2861 ist der **Freiheitsgrad f** die Anzahl der möglichen unabhängigen Bewegungen (Verschiebungen, Drehungen) eines starren Körpers gegenüber einem Bezugssystem. f entspricht der Anzahl der Angaben, die die Lage eines Körpers im Raum vollständig beschreibt. Die Lage des Effektors (Position und Orientierung), auch **Pose** in der Roboterliteratur genannt, kann durch drei Positionsangaben und drei Drehwinkel bezogen auf ein Bezugskoordinatensystem beschrieben werden (s. auch Abschnitt 2.1).

Der **Getriebefreiheitsgrad F** gibt an, wie viele unabhängig voneinander angetriebene Achsen zu einer eindeutigen Bewegung des Roboterarms führen. Durch eine geeignete Anordnung der Gelenke kann mit sechs Gelenkachsen ($F = 6$) dem Effektor der maximale Freiheitsgrad $f = 6$ verliehen werden. Dies ist bei den Knickarmrobotern mit sechs Achsen realisiert. In Sonderfällen werden Roboter mit mehr als sechs Achsen ($F > 6$) eingesetzt, sogenannte **redundante Kinematiken**, um die Feinbewegungen zu verbessern, was jedoch zu höheren Kosten verbunden mit einem größeren Steuerungsaufwand führt. Auch Zweiarmeroboter werden für spezielle Aufgaben eingesetzt. Bild 1.3a zeigt eine Lösung der Fa. YASKAWA Europe GmbH mit insgesamt 15 Gelenken. Ein solches Zweiarmsystem eignet sich für eine flexible und platzsparende Montage, wobei zusätzlich Haltevorrichtungen eingespart werden können. Während die typischen Industrieroboter ein Verhältnis der Lastmasse zur Eigenmasse von 1 : 10 aufweisen, sind Leichtbauroboter auf dem Markt, die ein Verhältnis der Lastmasse zur Eigenmasse von ca. 1 : 2 aufweisen. Bild 1.3b zeigt den Leichtbauroboter iiwa von KUKA, der sieben Drehgelenke hat. Die Vorarbeiten zu diesem Roboter wurden vom Institut für Mechatronik und Roboter des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) geleistet. Die notwendige Steifigkeit wird durch fortgeschrittene Regelungsalgorithmen erreicht, die auch auf zusätzliche Sensorwerte, z. B. die Gelenkbeschleunigung, zugreifen können.



a) SDA200

b) Leichtbauroboter iwa

Bild 1.3 a) Zweiarmroboter SDA20F (Werkbild YASKAWA), b) Leichtbauroboter iwa (Werkbild KUKA Roboter GmbH)

Roboter mit weniger als sechs Achsen führen zu einem Freiheitsgrad von $f < 6$. Ein wichtiger Vertreter dieser Klasse ist der **SCARA-Roboter**, auch **Schwenkarmroboter** genannt. SCARA ist die Abkürzung für „Selective Compliance Assembly Robot Arm“. Bild 1.2b zeigt den SCARA TS60 der Fa. Stäubli. Dieser Typ eines seriellen Roboters eignet sich für Arbeiten, die in einer Ebene stattfinden, z.B. Bohren, Lötpunkte auf einer Platine setzen, bestimmte Montage- und Handhabungsvorgänge. Die ersten zwei rotatorischen Gelenke dienen zur Positionierung in einer Ebene, die dritte Achse ist eine Translationsachse, die zur Höhenverstellung dient, z.B. Senken und Anheben beim Bohrvorgang, und die vierte Achse ist wieder eine Drehachse (s. auch Bild 2.19b). Im Arbeitsbereich kann eine beliebige Position des TCP angefahren werden, aber die Werkzeugspitze zeigt stets auf die Bearbeitungsebene. Die Orientierung des Effektors kann nur durch Drehung um die Längsachse verändert werden, der Freiheitsgrad des Effektors ist $f = F = 4$.

Weitere wichtige geometrische Kenngrößen beziehen sich auf den von bewegten Teilen des Roboters erreichbaren Raum. Nach DIN 2861, Blatt 1, wird unter **Arbeitsraum** derjenige Raumbereich verstanden, der vom Mittelpunkt der Schnittstelle zwischen den Nebenachsen und dem Effektor mit der Gesamtheit aller Achsbewegungen erreicht werden kann. In Bild 1.4 sind die Arbeitsräume eines Vertikalknickarmroboters und eines SCARA-Roboters skizziert. Die vollständigen Kennzeichnungen der Raumaufteilung sind in DIN 2861, Blatt 1, zu finden. Oft wird unter Arbeitsraum auch der Raumbereich verstanden, der mit dem TCP erreicht werden kann („**reachable workspace**“, /1.12/). Derjenige Raumbereich, bei dem zusätzlich zur Positionierung des TCP auch die Orientierung des Effektors frei gewählt werden kann, ist dann ein Teilraum des Arbeitsraums („**dexterous workspace**“, /1.12/).

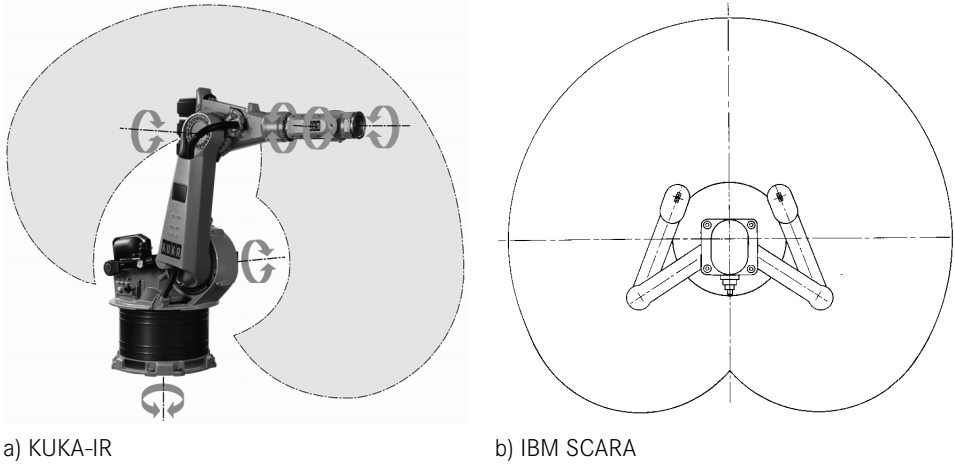


Bild 1.4 a) Arbeitsraum eines KUKA Knickarmroboters (Werkbild KUKA Roboter GmbH),
b) Arbeitsraum eines IBM SCARA-Roboters (Werkbild IBM)

Die folgenden Abschnitte und Kapitel beziehen sich auf serielle kinematische Strukturen, die die größte Bedeutung haben. In Spezialgebieten werden auch **Parallelroboter** eingesetzt. Bei diesen Parallelkinematiken wirken mehrere Schub- oder Drehgelenke direkt auf den Effektor. Bild 1.5a zeigt den Hexapod PI-HexAntenna von Physik Instrumente (PI) mit 6 Schubgelenken. Bild 1.5b stellt einen sogenannten Delta-Roboter autonox 24 von MAJATronic GmbH mit vier rotatorischen Gelenken dar. Parallelroboter können den Effektor auf kleinstem Raum sehr schnell positionieren und orientieren, sie sind relativ steif und die bewegten Massen sind gering. Allerdings ist der Arbeitsraum relativ klein. Einsatzgebiete sind im Besonderen schnelle Handhabungsaufgaben, die oft mit einer Bildverarbeitung zur Lageerkennung der zu hantierenden Teile verknüpft ist. Es gibt Ansätze den Arbeitsraum durch Zusatzachsen oder durch mehrere Arme zu erweitern (z. B. Adept Quattro s650).

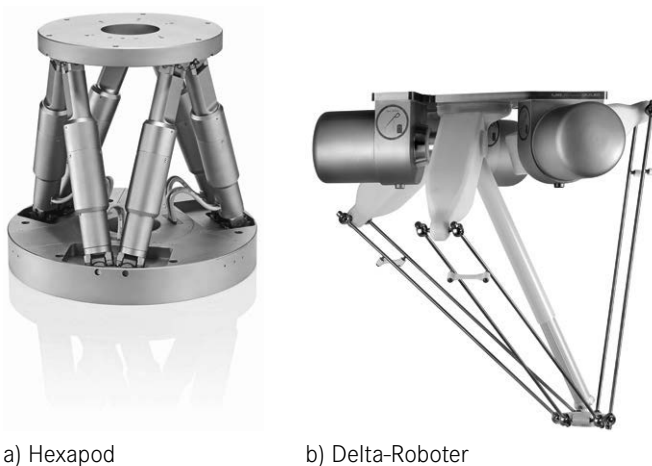


Bild 1.5 a) Hexapod
PI-HexAntenna (Werkbild
Physik Instrumente (PI)),
b) Delta-Roboter autonox 24
(Werkbild autonox GmbH)

■ 1.3 Steuerung und Programmierung

Robotermechanik, Robotersteuerung und Programmiersystem werden oft als Einheit verstanden und vom Hersteller geliefert. Bild 1.6 zeigt als Beispiel eine Übersicht über die Geräteausrüstung und die Schnittstellen für die PC-basierte Robotersteuerung KR C4 von KUKA Roboter GmbH. Bedienung, Anzeige, Dateiverwaltung, Abarbeitung des Roboterprogramms und die Bahnplanung werden auf dem PC (4) unter dem Betriebssystem Windows durchgeführt, ergänzt durch die Echtzeiterweiterung VxWorks. Neben der Programmierung mit dem Handprogrammiergerät (14) ist natürlich auch eine Offline-Programmierung in der Programmiersprache KRL (KUKA Robot Language) möglich. Weitere wichtige Komponenten sind das CSP (Control System Panel, 3), das als Anzeigeelement für den Betriebszustand dient und die CCU (Cabinet Control Unit, 9). Die CCU ist die zentrale Stromverteilungseinheit und Kommunikationsschnittstelle für alle Komponenten der Robotersteuerung. In 5, 6, 7 sind das Antriebsnetzteil und die Antriebsregler untergebracht. Das SIB/SIB-Extended (Safety Interface Board, 10) stellt sichere diskrete Ein- und Ausgänge zur Verfügung. Weitere Komponenten sind Netzfilter (1), Hauptschalter (2), Bremsenfilter (8), Akkus (12) und ein Anschlussfeld (13), das im Wesentlichen Anschlüsse für Motorleitungen und Datenleitungen von und zum Manipulator bereitstellt. Hier ist auch die Schnittstelle zum RDC (Resolver Digital Converter), der die Signale der Resolver zur Messung der Motorpositionsdaten aufbereitet und über den internen KUKA Controller Bus (KCP) den Antriebsreglern zuführt. Über eine entsprechende Konfiguration des KEB (KUKA Extension Bus) kann die Robotersteuerung über einen Bus (PROFIBUS, EtherCAT, DeviceNet) oder einer seriellen Schnittstelle mit anderen Steuerungen, z. B. mit einer SPS, kommunizieren.

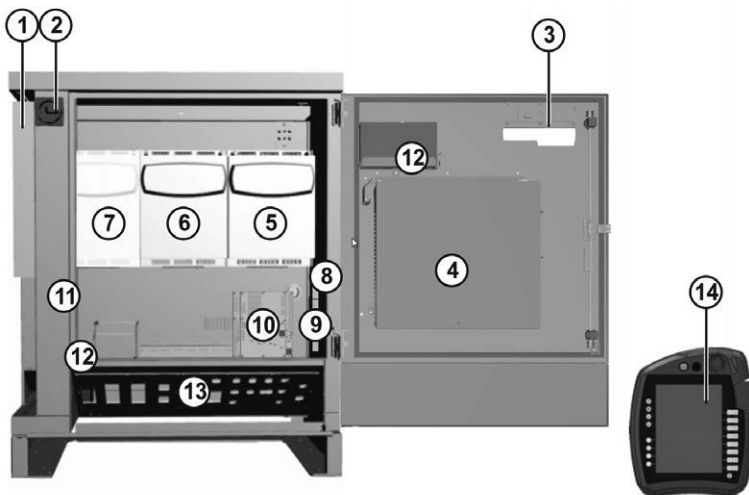


Bild 1.6 Gesamtübersicht über die Steuerung KR C4 (Werkbild KUKA Roboter GmbH)

Steuerung und Programmiersystem haben unterschiedliche Aufgaben (s. schematische Einteilung in Bild 1.7). Das **Programmiersystem** stellt dem Anwender Funktionen und Befehle bereit, um Bewegungsprogramme aufzustellen, zu korrigieren und zu testen.

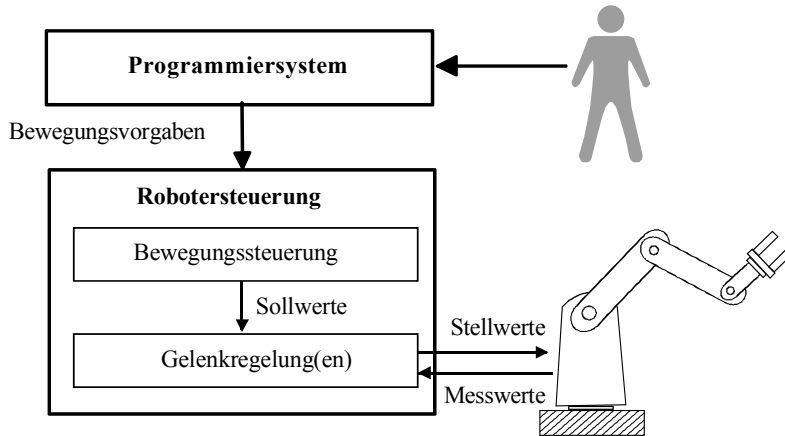


Bild 1.7 Hauptkomponenten Programmiersystem und Steuerung

Zusätzlich kann festgelegt werden, wie die Bewegungsabläufe in Abhängigkeit peripherer Ereignisse abgearbeitet werden sollen. Ergänzend stehen Softwarehilfsmittel zum Ein- und Auslesen, zum Archivieren und Dokumentieren von Programmen, zur Visualisierung der Roboterbewegung etc. zur Verfügung (s. Kapitel 5). Das Programmiersystem ist ein wesentlicher Teil der Schnittstelle zwischen dem Anwender und dem Industrieroboter (**HMI – Human Machine Interface**). Es ermöglicht dem Anwender erst, die in der Steuerung enthaltenen Algorithmen zur Interpolation zu nutzen. Wie bei anderen hochentwickelten Maschinen sind die Eigenschaften des HMI ein wichtiges Entscheidungskriterium für den Einsatz von Industrierobotern, da eine der Anwendung entsprechende, einfache, flexible Programmierung und damit Nutzung des Industrierobotersystems aus Kostengründen wesentlich ist. In neueren Entwicklungen wird eine Steuerungssoftware für mehrere Roboterarme bereitgestellt (z. B. Steuerung IRC5 von ABB). Dies fördert die koordinierte Zusammenarbeit mehrerer Roboter an einer Aufgabe (**kooperierende Roboter**).

Die Robotersteuerung umfasst die notwendige Hardware und Systemsoftware, um die Antriebsmotoren so anzusteuern, dass die durch die Programme vorgegebenen Bewegungs- und Bearbeitungsvorgänge ausgeführt werden. Hauptkomponente der Robotersteuerung ist die **Bewegungssteuerung**, die aus der programmierten Bewegung Sollverläufe für die Gelenkbewegungen berechnet. Es müssen geeignete zeitliche Zwischenwerte zwischen den programmierten Zielstellungen des Roboters berechnet werden (**Interpolation**, s. Kapitel 4). Bewegungen, die im kartesischen Raum definiert sind, müssen auf entsprechende Gelenkbewegungen transformiert werden (**inverse Kinematik**, s. Kapitel 3).

Die **Gelenkregelung** hat die Aufgabe, auf der Basis dieser Sollbewegungen und der Messwerte der Gelenkgrößen die Servomotoren über die Antriebskarten so anzusteuern, dass sich trotz Störgrößen wie wechselnde Lasten und Kopplungen zwischen den Gelenkbewegungen eine hinreichend genaue Bewegung einstellt. In Bild 1.8 ist ein Wirkschema mit den wesentlichen Softwarekomponenten einer Robotersteuerung skizziert. Zu den erwähnten Aufgaben kommen noch die Echtzeitsteuerung, Schnittstellen zur Verarbeitung von Signalen der Peripherie etc.

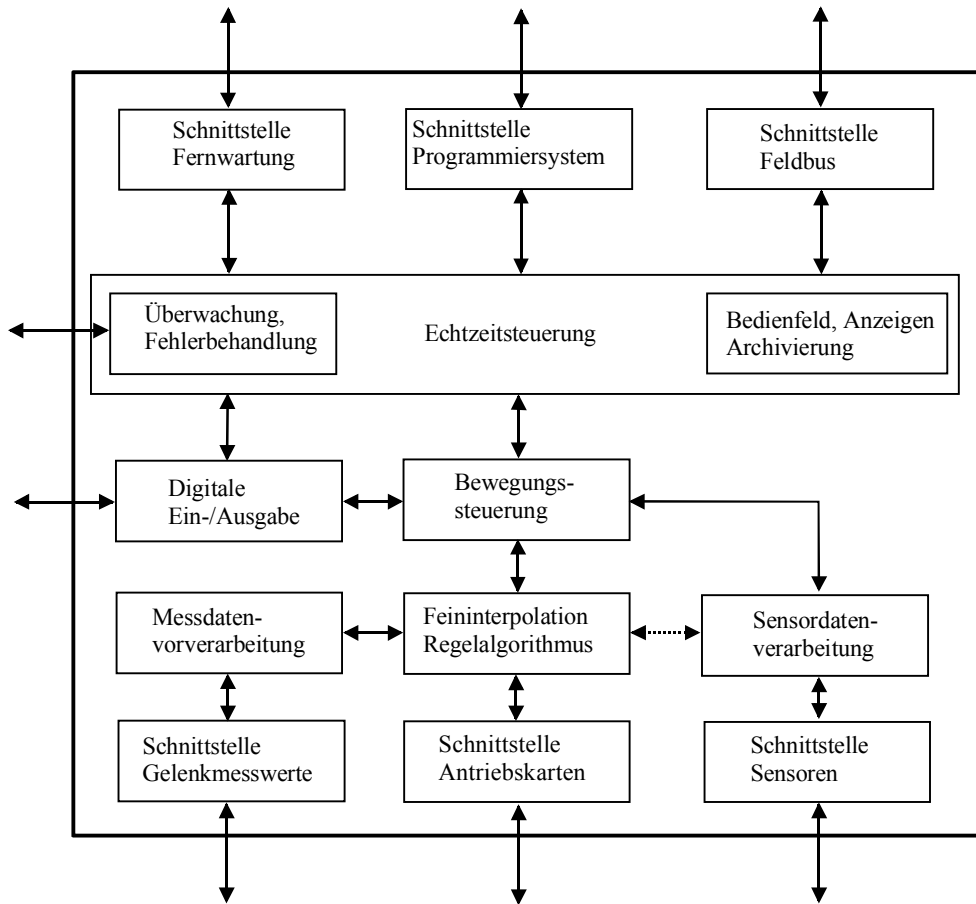


Bild 1.8 Wirkschema der wesentlichen Softwarekomponenten einer Robotersteuerung

Immer mehr Firmen, die nicht zu den Roboterherstellern gehören, entwerfen und konstruieren neue oder modifizierte Roboter für spezielle Anwendungen. Zur Unterstützung bei der Softwareentwicklung können die Open-Source-Bibliotheken von ROS (Robot Operating System) verwendet werden (/1.18/).

■ 1.4 Struktur und Aufgaben der Regelung

Bei der Regelung von Industrierobotern kann man prinzipiell Lageregelungen und Kraftregelungen unterscheiden. Eine **Kraftregelung** soll dafür sorgen, dass definierte Kräfte/Drehmomente auf die Arbeitsumgebung ausgeübt werden. Bei der **Lageregelung** besteht die Aufgabe, unabhängig von den Bearbeitungskräften/Momenten eine gewünschte Roboterbewegung zur Durchführung einer Arbeitsaufgabe zu garantieren. Da eine komplexe Arbeitsaufgabe allein mit einer Kraftregelung nicht zu bewerkstelligen ist, treten Mischformen zwischen Lage- und Kraftregelungen auf (**hybride Regelungen**), bei denen zwi-

schen Lage- und Kraftregelung aufgabenspezifisch umgeschaltet wird. Während in der industriellen Praxis aus verschiedenen Gründen noch relativ wenige Kraftregelungen eingesetzt werden, muss in jeder Robotersteuerung eine Lageregelung vorhanden sein.

Die funktionelle Einbettung der Regelung in die Robotersteuerung ist aus Bild 1.9 ersichtlich. Durch die Bewegungssteuerung wird abhängig von den Anweisungen des Programmierers eine Sollbewegung erstellt und damit der gewünschte Bewegungszustand zu jedem Zeitpunkt des Arbeitsvorganges definiert. Abhängig von diesen Sollgrößen und entsprechenden Messgrößen werden von einem geeigneten Regelalgorithmus Stellwerte berechnet. Mit diesen Stellwerten wird das Antriebssystem so angesteuert, dass sich das gewünschte Verhalten so gut wie möglich einstellt. Zur Ausführung von Arbeiten tritt dabei der Effektor des Industrieroboters mit der Arbeitsumgebung in Kontakt, beispielsweise zum Greifen von Objekten, Bearbeiten von Werkstücken etc. Aus der Sicht einer Bewegungsregelung sind die dadurch auftretenden Kräfte und Drehmomente Störgrößen.

Zur Regelung der Gelenkbewegung eines Roboters müssen Messwerte über die Gelenkwinkel, Schublängen bzw. die Gelenkgeschwindigkeiten vorliegen. Während die technischen Einrichtungen zur Erfassung dieser Größen von einigen Autoren als **interne Sensoren** aufgefasst werden (/1.13/, /1.25/), sind sie in /1.14/ als **Messaufnehmer** bezeichnet.

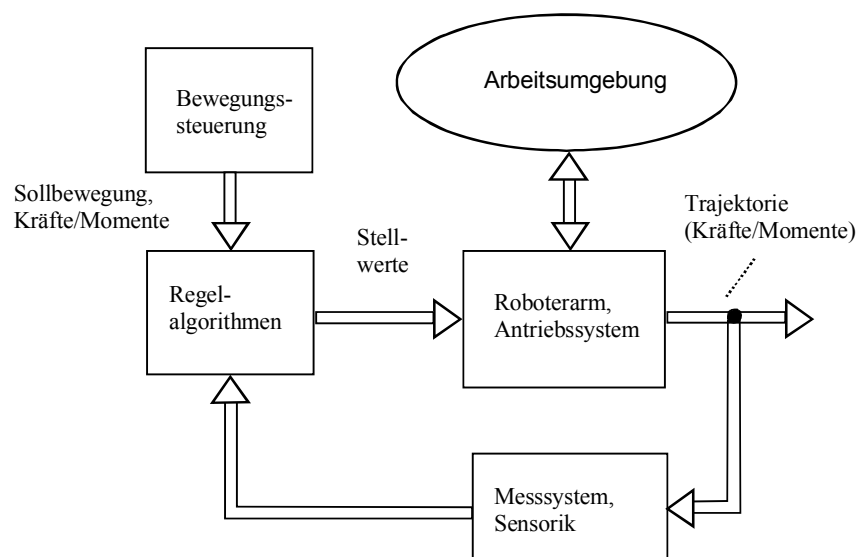


Bild 1.9 Grobstruktur der Regelung

Nach der Definition in /1.14/ liefert das Messsystem Informationen über die Bewegung der Achsen, während ein Sensor Aussagen über die Umgebungssituation liefert (z. B. Werkstück xy in den Toleranzgrenzen auf dem Förderband) und den weiteren Ablauf des Arbeitsvorganges beeinflusst. Auf der Basis von Sensorinformationen kann die Steuerung auf Ereignisse und Zustände reagieren, die nicht vom Programmierer im Detail vorausgesehen werden können. Diese Teilautonomie ist auch Voraussetzung für eine Entwicklung von der roboterorientierten Programmierung in Bewegungsbefehlen hin zur aufgabenori-

entierten Programmierung (/1.15/, /1.25/). Bei der Sensorentwicklung sind in der Robotertechnik vor allem die sensorischen Fähigkeiten des Menschen beim Fühlen und Sehen ein Vorbild. Taktile Sensoren, Kraft-/Momentensensoren, Abstandssensoren und videooptische Sensoren mit anschließender Bildverarbeitung finden mehr und mehr Einsatz in der industriellen Praxis. Da die Sensoren Prozesszustände an die Steuerung rückmelden, kann die Verarbeitung dieser Informationen als **externer Regelkreis** aufgefasst werden, der angepasste Bewegungssollwerte in Arbeitskoordinaten (kartesische Koordinaten) generiert und nach einer Koordinatentransformation (**inverse Kinematik**) der **internen Regelung (Gelenkregelung)** Bewegungssollwerte zur Verfügung stellt (Bild 1.10). Einige Sensoren wie Kraft-/Momentensensoren können auch direkt den Gelenkregelkreis beeinflussen.

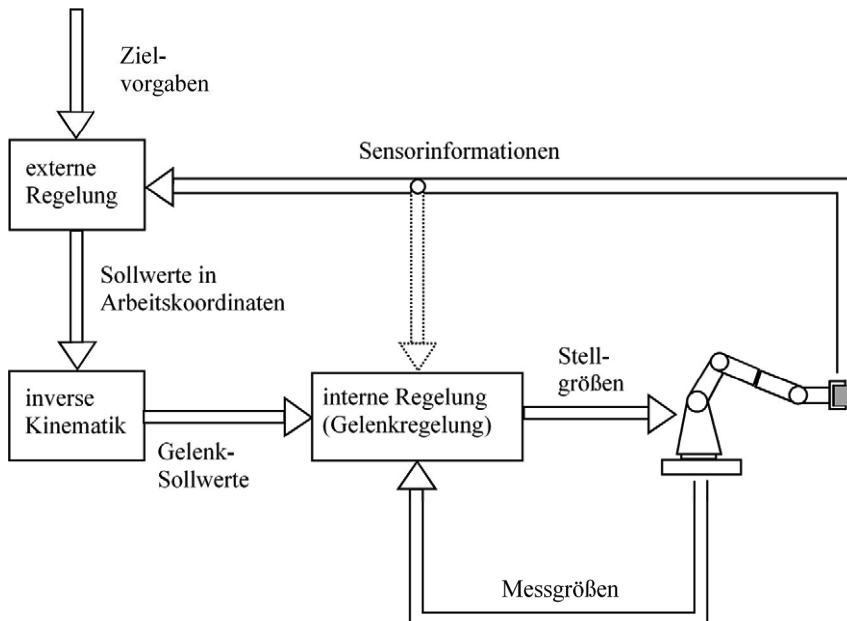


Bild 1.10 Interne und externe Roboterregelung

In Kapitel 7 wird die Gelenkregelung ausführlich behandelt. Eine charakteristische Eigenschaft der Gelenkregelung von Industrieroboterarmen sind die nichtlinearen Verkopplungen. Ausgangsgrößen der Gelenkregelung sind die Bewegungen der Gelenkachsen, sie beeinflussen sich gegenseitig. Veranlasst die Regelung, ein Drehmoment bzw. eine Schubkraft auf eine Gelenkachse zu ändern, hat das nicht nur Auswirkungen auf diese Gelenkachse, sondern i. Allg. auf alle anderen Gelenkbewegungen. Daher ist die Regelstrecke Roboterarm ein verkoppeltes **Mehrgrößensystem**. Die Beziehungen sind zudem nichtlinear, da trigonometrische Funktionen und Quadrate von zeitabhängigen Größen zur Beschreibung verwendet werden müssen.

Anhand des Roboters mit drei Gelenken in Bild 1.11 sollen einige auftretende Verkopplungen verdeutlicht werden:

- Der Verlauf des Gelenkwinkels $\theta_1(t)$, der sich bei einem gegebenen Drehmoment $\tau_1(t)$ einstellt, hängt vom Verlauf der Gelenkwinkel θ_2 und θ_3 ab, da das wirkende Massenträgheitsmoment bei einer Beschleunigung von Gelenk 1 von diesen Winkeln abhängt. Ist der Arm nach oben ausgestreckt (vertikale Stellung), ist das Massenträgheitsmoment minimal. In horizontaler Stellung der Armteile 2 und 3 wirkt ein maximales Massenträgheitsmoment.
- Die Gravitation bewirkt im Gelenk 2 ein Drehmoment, das von der Stellung der Gelenke 2 und 3 abhängt. Es gilt: In vertikaler Stellung hat die Gravitation keine Wirkung, in horizontaler Stellung jedoch maximale Wirkung.
- Bewegt sich Gelenk 1, so wirken Zentripetalmomente in den Gelenken 2 und 3, die von der Winkelgeschwindigkeit des Gelenks 1 und den aktuellen Winkeln θ_2, θ_3 abhängen.

Die regelungstechnische Behandlung der Verkopplungen und die Forderung aus der Praxis, dass die Bewegungen des Roboterarms möglichst schnell mit großer Bahngenauigkeit zu erfolgen haben, sind die prägenden Herausforderungen für die Gelenkregelung. Zudem geht die weitere Entwicklung in Richtung „Leichtbauroboter“ (s. auch Bild 1.3b), d. h. das Verhältnis von bewegten Eigenmassen des Roboterarms zu aufgenommenen Lastmassen wird kleiner, was von der Regelung eine große Robustheit gegenüber veränderlichen Lastmassen bzw. adaptive Eigenschaften erfordert. Da der Einsatz von Kraft-/Momentensensorik immer wirtschaftlicher wird, werden neue Einsatzgebiete z. B. in der Montage erschlossen, bei der die Kraftregelung eine zunehmende Rolle spielen wird.

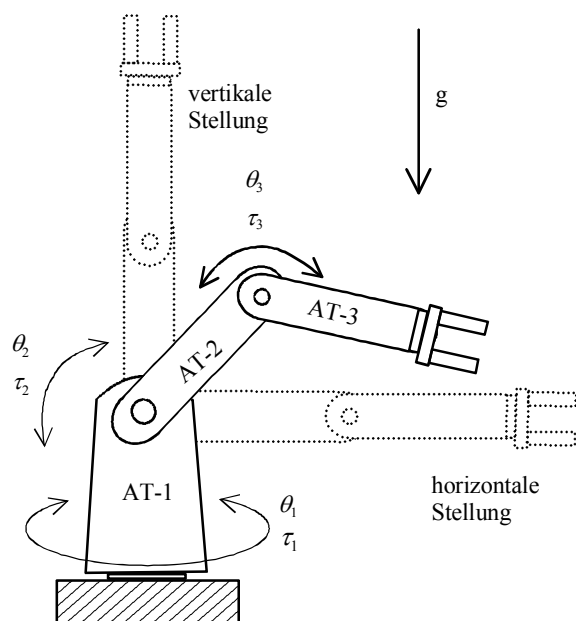


Bild 1.11 Kopplungen an einem Roboterarm mit drei Gelenken

Index

Symbole

6D-Mouse 109

A

adaptive Regelung 183
Aktionsplanungssysteme 115
AL 116
AML (Automation Manufacturing Language) 117
Antriebsstrang 131
Arbeitsarm (Slave-Arm) 111
Arbeitsraum 5, 52
Arbeitsraumüberwachung, projektionsbasiert 16
Armteil 38
Assistenzrobotik 13
asynchrone PTP 69
aufgabenorientierte Programmierung 113 ff.
Aufgabentransformator 115
Augmented Reality 122
AUTOPASS 117
AWR (Anti-Windup-Reset) 182

B

Bahnparameter 71
Bahnsteuerung 69
Basiskoordinatensystem 40
Basisvektoren 19
Bedienarm (Master-Arm) 111
Beschleunigungszeit 72
Betrag eines Vektors 18
Bewegungsfreiheitsgrade 207
Bewegungsgleichung 128, 147
Bewegungssteuerung 8
bildbasierte Regelung 211
Bild-Jacobi-Matrix 212, 217
Bildverarbeitung (industrielle Bildverarbeitung) 213
bürstenlose Gleichstromantriebe 129

C

CAD-basierte Programmierung 113
CAR 122
Computed Torque Feedforward Control 186
CP-Steuerung 69
CP-Überschleifen 96

D

Denavit-Hartenberg-Konvention 40
Deviationsmomente 139
dexterous workspace 5
Differenzial 153
Direct Visual Control 210
Direktantrieb 131
direkte Programmierung 108
direktes kinematisches Problem 49
Diskretisierungsrauschen 187
Drehimpulserhaltungssatz 139
Drehvektor 32
Drehwinkel 32
Durchtrittsfrequenz 167
Dynamic Look-And-Move 210

E

Effektor 3, 38
Einlegegeräte 2
Endpoint-closed-loop (ECL) 212
Endpoint-open-loop (EOL) 212
Entkopplung 188
Euler-Winkel 27
explizite Programmierung 114
externe Regelungen 159
externer Regelkreis 11
Eye-in-hand 213
Eye-to-hand 213

F

Fahrzeit (Bahndauer) 72
fiktive Armteile 38

Folgeprogrammierung 110
 Frame 25
 freie Vektoren 18
 Freiheitsgrad f 4, 35
 Freischneiden 138
 Fügemechanismen (Remote Center of Compliance) 161
 Fuzzy-Logik 202
 Fuzzy-Mengen 202

G

Gelenke (Achsen) 3
 Gelenkkoordinaten 39
 Gelenkregelung 8, 159
 Gelenkvariable (Gelenkkoordinate) 42
 generalisierte Koordinate 49, 128
 geometrische Lösungen 53, 56
 Geschwindigkeitsalgorithmus 182
 Geschwindigkeitsregelung 165
 Geschwindigkeitsüberschleifen 94
 Geschwindigkeitsvorsteuerung 173
 Getriebefreiheitsgrad F 4
 Getriebematrizen 152
 grafisch interaktive Programmierung 113
 Gütekriterium 51

H

Handhabungsgerät 1
 Handhabungstechnik 1
 Harmonic Drives 131
 Hauptachsen 3
 HMI (Human Machine Interface) 8
 homogene Matrix 25, 46
 humanzentrierte Automatisierung 13
 Hybrid Control 221
 hybride Kraft-/Laderegelung 209
 hybride Programmierverfahren 112
 hybride Regelungen 9, 162

I

implizite Programmierung 115
 Impulserhaltungssatz 139
 Industrieroboter 1f.
 Inertialsystem 36
 interne Regelung 159
 interne Regelung (Gelenkregelung) 11
 interne Sensoren 10
 Interpolation 8, 69ff.

Interpolationsabstand 73, 77
 intuitive Programmierung 13
 inverse Kinematik 8, 11, 49
 inverses Modell 129
 IRL (Industrial Robot Language) 117

J

Jacobi-Matrix 62, 148, 229

K

Kamerakalibrierung 210
 Kameramodell 214
 kartesische Lageregelungen 160
 Kaskadenregelung 171
 kinematische Kopplungen 152
 kinematische Transformationen 49
 Knickarmroboter 3, 52
 Kobot 13
 Ko-Existenz 14
 Kollaboration 15
 Konfigurationen 61
 Kooperation, parallel 14f.
 Kooperation, sequenziell 14f.
 kooperierende Roboter 8
 Koordinatensystem 17
 Kosinussatz 53
 Kraftfreiheitsgrade 162, 207
 Kraft-/Momentensensor (KMS) 162
 Kraftregelung 9, 161, 220
 Kreuzkorrelation 213
 Kreuzprodukt 20

L

Lageregelung 9, 159
 Lageregelung, dezentrale 163
 Leichtbauroboter 12
 Leistungs- und Kraftbegrenzung 14
 Leitchse 69
 Linearbahn 70
 Linearinterpolation 84
 linguistischer Regler 202
 Lochkameramodell 215

M

Manipulatoren 2
 Massenmatrix 133
 Massenträgheitsmatrix 133

Master-Slave-Programmierung 111
Matrix 22, 225 ff.
Mehrdeutigkeit 51
Mehrgrößensystem 11
Mensch-Roboter-Kollaboration 13
Mensch-Roboter-Kooperation 13
Messaufnehmer 10
Messwertvorverarbeitung 182
momentane Drehachse 135
MRAC-Konzept (Model Reference Adaptive Control) 184

N

Nebenachsen 3
neuronale Lernverfahren 204
neuronales Netz 204
Newton-Euler-Verfahren 133
nichtlineare Entkopplung 185
numerische Näherungslösung 52

O

offene kinematische Kette 38
Offline-Programmiersysteme (OLP-Systeme) 114
Online-Programmierung 108
Orientierung 25 ff.
Ortsvektor 21
Override 107

P

parallel force/position control 208
Parallelroboter 6
Phasenreserve 167
Play-Back 110
Pose 4
positionsbasierte Regelung 212
Positionsüberschleifen 94
Programmieren durch Vormachen 13
Programmierhandgerät (Teach-Panel) 107 f.
Programmiersystem 7, 107
Programmierverfahren 108
Programmverwaltung 107
PTP-Bahn 69
PTP-Überschleifen 95
Punktsteuerung 69

Q

Quaternion 33
Quaternionen 33

R

Rampenbahn 73
Rampenprofil 73
reachable workspace 5
Rechentotzeit 181
Rechtsschraubenregel 17
redundante Kinematiken 4
ReDuS-Regelung 168
reduziertes inverses Modell 197
Referenzkoordinatensystem 28
Richtungsvektor 19
Roboter 1
Roboterbetrieb 107 f.
Roboterkinematik 3
Roboterkoordinaten 49
roboterorientierte Programmierung 114
Roboterprogrammierungsumgebung 107
Roll-Nick-Gier-Winkel 31
Roll-Pitch-Yaw-Winkel 31
Rotationsmatrix 23
RRC (Remote Center of Compliance) 161
RRT-Roboter 43
Ruck 75
Rückwärtstransformation 49 ff.

S

SCARA-Roboter 5
Schleppabstand 175
Schwenkarmroboter 5
Servoelektronik 152
Shared Control 221
sicherheitsgerichteter Stopp 14
Sigmoidfunktion 205
Signum-Funktion 34, 234
Singularität 51
Sinoidenprofil 75
Skalarprodukt 20, 59, 227
Soft Robotics 16
Spaltenvektor 18
Spline-Bahn 71
Spline-Interpolation 94
Splines, kubische 97 f.
Splines, quintische 98, 102
stationärer Zustand 175

statische Reibung 129, 233
 Steifigkeitsmatrix 208
 Stellungsalgorithmus 182
 Stromregelung 130
 symbolische Formelmanipulation 148
 synchrone PTP 69, 79
 Synchronisation 115, 182
 Synchronisieren 107

T

Teach-In 108
 Telemanipulatoren 2
 Telemanipulatorsystem 111
 Telerobotik 111
 Template Matching 213
 Testbetrieb 107
 textuelle Programmierung 113
 Tool Center Point (TCP) 3
 Traded Control 220
 Trägheitstensor 138
 Translationsgeschwindigkeit 36

U

Überschleifen 94
 Überschleifkugel 95
 Umweltmodelle 115
 Übersetzung 131
 Übersetzungsgetriebe 131

V

VAL 116
 VAL II 116
 Vektorprodukt 20
 verallgemeinerte Koordinate 49
 Visual Servoing 209, 220
 vollsynchrone PTP 80
 Vorsteuerung 186
 Vorwärtstransformation 49

W

Weltkoordinaten 40, 49
 Weltsystem 49
 Werkzeugkoordinatensystem 25
 Winkelgeschwindigkeitsvektor 36

Z

Zeilenvektor 18
 zeitoptimale Bahn 74
 zentrale Vorsteuerung 185f.
 Zentralhand 52
 Zentriwinkel 88
 Zielkoordinatensystem 29
 Zirkularbahn 70
 Zirkularinterpolation 87
 Zusatzsignalsynthese 195
 Zykluszeit 123