

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Komponenten eines Industrieroboters | 14 |
| 1.1 | Definition und Einsatzgebiete von Industrierobotern..... | 13 |
| 1.2 | Mechanischer Aufbau | 15 |
| 1.3 | Steuerung und Programmierung | 19 |
| 1.4 | Struktur und Aufgaben der Regelung..... | 21 |
| 2 | Beschreibung einer Roboterstellung | 26 |
| 2.1 | Grundlagen der Lagebeschreibung | 26 |
| 2.1.1 | Koordinatensysteme | 26 |
| 2.1.2 | Freie Vektoren | 26 |
| 2.1.3 | Operationen mit Vektoren..... | 28 |
| 2.1.4 | Ortsvektoren | 31 |
| 2.1.5 | Anordnung von Elementen in Vektoren und Matrizen | 31 |
| 2.1.6 | Rotationsmatrizen | 32 |
| 2.1.7 | Homogene Matrizen (Frames) | 34 |
| 2.1.8 | Beschreibung der Orientierung durch Euler-Winkel | 37 |
| 2.1.9 | Freiheitsgrad des Robotereffektors..... | 40 |
| 2.1.10 | Differenzieren von Vektoren in bewegten Koordinatensystemen | 41 |
| 2.2 | Die Denavit-Hartenberg-Konvention für Industrieroboter | 44 |
| 2.2.1 | Der Industrieroboter mit offener kinematischer Kette | 44 |
| 2.2.2 | Koordinatensysteme und kinematische Parameter nach der Denavit-Hartenberg-Konvention | 45 |
| 2.2.3 | Rotationsmatrizen und homogene Matrizen auf Basis der Denavit-Hartenberg-Parameter | 50 |
| 2.3 | Übungsaufgaben..... | 53 |
| 3 | Transformationen zwischen Roboter- und Weltkoordinaten | 55 |
| 3.1 | Die Vorwärtstransformation | 56 |
| 3.2 | Die Rückwärtstransformation | 56 |
| 3.2.1 | Mehrdeutigkeiten und Singularitäten | 56 |
| 3.2.2 | Lösungsvoraussetzungen und Lösungsansätze | 57 |
| 3.2.3 | Rückwärtstransformation an einem Zweigelenkroboter | 58 |
| 3.2.4 | Geometrische Rückwärtstransformation für den RV6 | 61 |
| 3.3 | Kinematische Transformationen mit der Jacobi-Matrix | 67 |
| 3.4 | Übungsaufgaben | 68 |
| 4 | Bewegungsart und Interpolation | 69 |
| 4.1 | Übersicht zu den Steuerungsarten | 69 |
| 4.2 | PTP-Bahn und Interpolationsarten | 71 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 4.2.1 | Prinzipieller Ablauf der PTP-Steuerung | 71 |
| 4.2.2 | Rampenprofil zur Interpolation | 73 |
| 4.2.3 | Sinoidenprofil zur Interpolation | 75 |
| 4.2.4 | Anpassung an die Interpolationsschrittweite | 77 |
| 4.2.5 | Synchrone PTP | 79 |
| 4.2.6 | Vollsynchrone PTP | 80 |
| 4.2.7 | Beispiel für eine PTP-Bahn | 81 |
| 4.3 | Bahnsteuerung (CP-Steuerung) | 84 |
| 4.3.1 | Prinzipieller Ablauf der Bahnsteuerung | 84 |
| 4.3.2 | Linearinterpolation | 84 |
| 4.3.3 | Zirkularinterpolation | 87 |
| 4.3.4 | Beispiel für eine CP-Bahn | 94 |
| 4.4 | Durchfahren von Zwischenstellungen ohne Stillstand der Achsen | 95 |
| 4.4.1 | PTP-Überschleifen | 96 |
| 4.4.2 | CP-Überschleifen | 97 |
| 4.4.3 | Spline-Interpolation für PTP-Bahn | 98 |
| 4.4.4 | Spline-Interpolation in kartesischen Koordinaten | 99 |
| 4.5 | Übungsaufgaben | 102 |
| 5 | Roboterprogrammierung | 105 |
| 5.1 | Online-Roboterprogrammierung | 106 |
| 5.1.1 | Teach-In-Programmierung | 106 |
| 5.1.2 | Play-Back-Programmierung | 108 |
| 5.1.3 | Master-Slave-Programmierung | 110 |
| 5.2 | Offline-Programmierung | 111 |
| 5.2.1 | Textuelle Programmierung in einer problemorientierten Programmiersprache | 112 |
| 5.2.2 | Grafisch interaktive/CAD-basierte Programmierung | 112 |
| 5.2.3 | Aufgabenorientierte Programmierung | 113 |
| 5.3 | Roboterprogrammiersprachen | 115 |
| 5.3.1 | Sprachelemente von Roboterprogrammiersprachen | 116 |
| 5.3.2 | Programmbeispiel | 118 |
| 5.4 | Programmierunterstützung durch grafische Simulation | 120 |
| 5.4.1 | Ursachen der Abweichungen zwischen Simulation und Realität | 121 |
| 5.4.2 | Lösungsansätze zur Reduzierung der Abweichungen | 122 |
| 5.5 | Vergleich der verschiedenen Programmierarten | 123 |
| 5.6 | Übungsaufgaben | 124 |
| 6 | Modell der Dynamik | 126 |
| 6.1 | Inverses Modell und Bewegungsgleichung mechanischer Systeme | 126 |
| 6.2 | Das rekursive Newton-Euler-Verfahren | 128 |
| 6.2.1 | Kinematische Berechnungen | 129 |
| 6.2.2 | Rekursive Berechnung der Gelenkkräfte bzw. -drehmomente | 132 |
| 6.2.3 | Anfangswerte für die rekursiven Berechnungen | 135 |
| 6.2.4 | Geeignete Darstellung der Vektoren und Zusammenfassung | 136 |

| | | |
|-----------------------------------|---|------------|
| 6.2.5 | Einfache Beispiele zum Newton-Euler-Verfahren | 137 |
| 6.2.6 | Explizite Berechnung einzelner Komponenten der Bewegungsgleichung | 141 |
| 6.3 | Gesamtmodell der Regelstrecke | 146 |
| 6.3.1 | Modell der Antriebsmotoren und Servoelektronik | 146 |
| 6.3.2 | Beschreibung des Antriebsstrangs | 148 |
| 6.3.3 | Zusammenfassung der Modellgleichungen | 151 |
| 6.4 | Übungsaufgaben | 152 |
| 7 | Regelung | 155 |
| 7.1 | Aufgaben und prinzipielle Strukturen | 155 |
| 7.2 | Dezentrale Gelenkregelung in Kaskadenstruktur | 159 |
| 7.2.1 | Übersicht und Regelstrecke | 159 |
| 7.2.2 | Geschwindigkeitsregelung mit PI-Regler | 161 |
| 7.2.3 | ReDuS-Geschwindigkeitsregler | 163 |
| 7.2.4 | Entwurf des Lagereglers | 167 |
| 7.2.5 | Beispiel für eine dezentrale Lageregelung | 172 |
| 7.2.6 | Hinweise zur Realisierung | 176 |
| 7.3 | Adaptive Einzelgelenkregelungen | 178 |
| 7.4 | Modellbasierte Regelungskonzepte | 181 |
| 7.4.1 | Zentrale Vorsteuerung | 182 |
| 7.4.2 | Entkopplung und Linearisierung | 184 |
| 7.4.3 | Modellbasierte Regelung mit PID-Strukturen | 187 |
| 7.4.4 | Robuste Regelung durch vorgegebenes Verzögerungsverhalten | 189 |
| 7.4.5 | Modellbasierte Lageregelung mit Kaskadenstruktur | 192 |
| 7.4.6 | Hinweise zur Realisierung modellbasierter Gelenkregelungen | 193 |
| 7.4.7 | Modellbasierte Lageregelung in kartesischen Koordinaten | 194 |
| 7.4.8 | Beispiel für eine modellbasierte Regelung | 196 |
| 7.5 | Nichtanalytische Regelungsverfahren | 198 |
| 7.5.1 | Fuzzy-Regelungen | 198 |
| 7.5.2 | Neuronale Lernverfahren in der Gelenkregelung | 201 |
| 7.6 | Strukturen von Kraftregelungen | 203 |
| 7.7 | Übungsaufgaben | 205 |
| Anhang | | 207 |
| A | Einige Definitionen und Rechenregeln für Matrizen | 207 |
| B | Arbeiten mit ManDy | 211 |
| C | Weitere Simulationswerkzeuge | 231 |
| Literaturverzeichnis | | 235 |
| Formelzeichen | | 242 |
| Sachwortverzeichnis | | 245 |
| Hinweise zur Internetseite | | 248 |