Inhalt

1	**Einleitung** *Wolfgang Backé*	1
2	**Kinematik und Dynamik von Handhabungsgeräten** *Günter Dittrich, Rainer Müller*	11
2.1	Einleitung	11
2.2	Auswahl optimaler kinematischer Strukturen von Handhabungsgeräten	12
2.2.1	Systematik kinematisch sinnvoller Strukturen von Handhabungsgeräten	13
2.2.2	Charakteristische Merkmale kinematischer Strukturen (Istprofile)	14
2.2.3	Strukturauswahl durch Vergleich des Anforderungsprofils mit den Istprofilen	17
2.3	Kinematik von Handhabungsgeräten mit beliebiger kinematischer Struktur	18
2.3.1	Kinematische Modellbildung	18
2.3.2	Berechnung der Gliedlagen eines Handhabungsgerätes (kinematische Vor- und Rückwärtsrechnung)	20
2.3.3	Berechnung des Geschwindigkeits- und Beschleunigungszustandes der Glieder	23
2.4	Dynamik von Handhabungsgeräten mit beliebiger kinematischer Struktur	23
2.4.1	Dynamische Modellbildung	23
2.4.2	Berechnung der an den Gliedern eines Handhabungsgerätes wirkenden Kräfte und Momente (dynamische Vor- und Rückwärtsrechnung)	24
2.5	Optimierung der Entwurfsparameter eines Handhabungsgerätes	26
2.5.1	Optimierung der Geometrieparameter	28

2.5.2 Optimierung der Genauigkeitsparameter 29
2.5.3 Optimierung der Antriebsleistungen 29

2.6 Optimierung des Bewegungsverhaltens von Handhabungsgeräten mit beliebiger kinematischer Struktur 30
2.6.1 Kinematische Parameteridentifikation zur Verbesserung der Positionsgenauigkeit 30
2.6.2 Dynamische Parameteridentifikation zur Verbesserung des Bewegungsverhaltens 31
2.6.3 Kompensation elastizitätsbedingter Lageabweichungen des Effektorbezugspunktes 32
Literatur 34

3 Konzepte und Komponenten zur Steuerung flexibler Handhabungsgeräte 36

3.1 Einleitung 36
Walter Ameling

3.2 Echtzeitdatenverarbeitung mit garantierten Reaktionszeiten . 37
Walter Ameling, Ralph Ammon, Michael Bartmann
3.2.1 Verifizierbarer Entwurf von Echtzeitsystemen 39
3.2.2 Rechnergestützte Prozeßplanung 42

3.3 Struktur einer standardisierten Robotersteuerung 47
Walter Ameling, Ralph Ammon, Michael Bartmann
3.3.1 Die Laufzeitmaschine 50
3.3.2 Offenes Systemmodell der Steuerung 53

3.4 Bahnplanung 56
Günter Dittrich, Rainer Müller
3.4.1 Berechnung der Sollbahn 60
3.4.2 Berechnung des Bahnparameters 61
3.4.3 Optimierung des Bahngeschwindigkeitsverlaufes unter Berücksichtigung gerätespezifischer und aufgabenbezogener Restriktionen 62

3.5 Kompensation elastizitätsbedingter Posefehler 66
Manfred Weck, Dirk Prust
3.5.1 Kompensation statisch bedingter Posefehler 67
3.5.2 Kompensation thermisch bedingter Posefehler 69

3.6 Regelung 71
Heinrich Rake, Jürgen Pantring, Bernhard Geyer
3.6.1 Regelungskonzepte, Modellbildung und Simulation 71
3.6.2 Prädiktive Achsregelung 73
3.6.3 Entkoppelnde Regelung mit Hilfe der Systemdynamik . . . 80
3.6.4 Steuerungstechnische Realisierung 83
Literatur 86

4	**Industrieroboter in Hohlgelenkbauweise mit berührungsloser Energie- und Signalübertragung**	88
4.1	Einleitung *Manfred Weck, Dirk Prust*	88
4.2	Berührungslose Energieübertragung *Andreas Nagel*	89
4.2.1	Induktive Energieübertragung	90
4.2.2	Gleichspannungswandler	92
4.3	Berührungslose Signalübertragung *Andreas Meylahn, Andreas Nagel*	96
4.3.1	Optische Übertragungsstrecken	96
4.3.1.1	Laserstrecke für Linearachsen	97
4.3.1.2	Optische Drehübertrager	98
4.3.2	Induktiv-kapazitive Übertragungsstrecken	102
4.3.3	Vergleich der Übertragungsstrecken	106
4.4	Serielles Bussystem *Manfred Weck, Andreas Meylahn*	107
4.4.1	Logische Struktur	109
4.4.2	Busprotokoll	112
4.4.2.1	Das SDLC-Datentelegramm	113
4.4.2.2	Die SDLC-Loop	116
4.5	Konstruktion und Realisierung der mechanischen Struktur *Manfred Weck, Dirk Prust*	118
4.5.1	Roboterspezifikation	120
4.5.2	Einbaumodul für berührungslose Energie- und Signalübertragung	121
4.5.3	Antriebsmodul in Hohlwellenbauweise	122
4.5.4	Sechs-Komponenten-Sensor für Kräfte und Momente	123
4.5.5	Roboterarm in Hohlwellenbauweise	124
4.5.6	Roboterrumpf	127
4.5.7	Linearachse mit berührungsloser Energie- und Signalübertragung	127
4.6	Elektrische Antriebe *Gerhard Henneberger, Thorsten Klepsch*	128
4.6.1	Elektrische Maschinen	129
4.6.1.1	Speiseformen und Verluste	129
4.6.1.2	Handachsenantrieb in kurzer Bauform	131
4.6.1.3	Trägheitsmoment-reduzierte Antriebe	134
4.6.2	Stromrichter und Maschinenregelung	136
4.6.2.1	Stromrichter und dezentraler Steuersatz	136
4.6.2.2	Feldorientierte Stromregelung und Vorsteuerung	137
4.6.2.3	Sensorloser Betrieb der permanenterregten Synchronmaschine	138

4.7 Fluidtechnische Antriebe 142
Wolfgang Backé, Peter Tappe
4.7.1 Servopneumatische Antriebe 143
4.7.2 Aufbau eines servopneumatischen Knickarmroboters . . . 149
4.7.3 Aufbau einer flexiblen Schraubzelle 153
4.7.4 Servohydraulische Antriebe 157
Literatur 163

5 Applikationen, Effektoren und Komponenten für die Montagetechnik 165

5.1 Einleitung 165
Wolfgang Backé, Tilo Pfeifer

5.2 Flexible Greiftechnik 166
Wolfgang Backé, Elmar Mostert
5.2.1 Konstruktiver Aufbau von servopneumatischen Greifern . . 167
5.2.2 Regelung servopneumatischer Greifer 173
5.2.2.1 Regelung mit stetigen Ventilen 174
5.2.2.2 Regelung mit schaltenden Ventilen 178
5.2.3 Möglichkeiten zur Überwachung und Fehlererkennung mit servopneumatischen Greifern 184

5.3 Flexibel automatisierte Meßtechnik 186
Tilo Pfeifer, Robert Schmitt
5.3.1 Anforderungen an Meßvorrichtungen im Montageumfeld . 187
5.3.2 Flexibel automatisierte, robotergestützte Meßvorrichtungen . 188
5.3.3 Meßstrategien mit Industrierobotern 193
5.3.3.1 Roboter als Meßmittel 193
5.3.3.2 Roboter handhabt das Meßmittel oder das Meßobjekt . . . 194
5.3.4 Fehlereinflüsse und Kompensationsmöglichkeiten 197
5.3.4.1 Passive Kompensation durch konstruktive Maßnahmen . . 197
5.3.4.2 Aktive Kompensation durch Meßdatenrückführung 199

5.4 Effektoren für das automatisierte Meß- und Montageumfeld . 201
Wolfgang Backé, Tilo Pfeifer, Elmar Mostert, Robert Schmitt

5.5 Bildverarbeitung 205
Walter Ameling
5.5.1 Bildverarbeitung mit Videokameras 208
5.5.2 3D-Bildverarbeitung mit Hilfe kalibrierter Kameras 212
5.5.2.1 Photogrammetrische Bildauswertung 215
5.5.2.2 Das Kameramodell 215
5.5.2.3 Die Kalibrierung 216
5.5.3 Lokalisierung, Merkmalsextraktion und Klassifizierung von Werkstücken 218
5.5.3.1 Verfahren zur Kantenhervorhebung 218
5.5.3.2 Punktoperatoren 220

5.5.3.3 Lokale Operatoren 220
5.5.3.4 Gradientenoperatoren 221
5.5.3.5 Bewertung der Kantenhervorhebungs- und Kantenextraktionsverfahren 223
5.5.3.6 Werkstückidentifizierung und Lokalisierung 225
5.5.4 Groblokalisierung und Hindernisdetektion zur Kollisionsvermeidung in Roboterarbeitsräumen 228
5.5.4.1 Hindernisdetektion und Groblokalisierung 229
5.5.4.2 Kollisionsvermeidung in Roboterarbeitsräumen 230
5.5.4.3 Das geometrische Modell: Zerlegung von Objekten in Grundkörper 232
5.5.4.4 Das Schutzkörpermodell 234

5.6 Materialfluß- und Arbeitsraumüberwachung 235
Manfred Weck, Helge Klein
5.6.1 Kontrolle der Werkstückträger 235
5.6.2 Kollisionsvermeidung und Ausweichbahngenerierung . . . 238
5.6.3 Sensorgestützte Handhabung von Werkstücken 242
5.6.4 Abbildung des Arbeitsraums durch Laserabtastung 244

5.7 Applikationen im Bereich der Montage 245
Wolfgang Backé, Tilo Pfeifer, Elmar Mostert, Robert Schmitt
5.7.1 Montageanlage für axiale Wellensicherungsringe 246
5.7.2 Flexibel automatisierte Vielstellenmeßanlage 248
5.7.2.1 Mechanischer Aufbau 249
5.7.2.2 Meßbügel mit integrierter Datenvorverarbeitung 252
5.7.2.3 Bedienung der Meßanlage 253
5.7.3 Flexibel automatisierte Meß- und Montageanlage für Kupplungsausrücklager 256
Literatur 261

6 Sensorgestütztes Schweißen mit Einbindung von Planungs- und Programmiersystemen 264

6.1 Einleitung 264
Paul Drews, Franz Josef Schulze Wehninck

6.2 Schweißprozeßführung mit hybridem Sensorsystem zur Erfassung der Prozeßumwelt 266
Paul Drews, Konrad Willms
6.2.1 Konzept des hybriden Sensorsystems 266
6.2.2 Beschreibung der Sensormodule zur Erfassung der Fugen- und Nahtgeometrie, zur Schweißbadbeobachtung sowie zur Erfassung der Schweißparameter 269
6.2.3 Modul zur Analyse, Bewertung und Verknüpfung der Sensordaten und zur Steuerung des Schweißprozesses 278

6.2.4 Modul zur Visualisierung und Dokumentation der Sensordaten sowie zur Bedienung des hybriden Sensorsystems . . 280
6.2.5 Schnittstelle zur Integration des hybriden Sensorsystems in die transputerbasierte Robotersteuerung 281

6.3 Planung des Roboterschweißprozesses 283
Walter Eversheim, Rainer Humburger
6.3.1 Modellierung der Schweißbaugruppendaten 284
6.3.2 Funktionen der Schweißablaufplanung 286
6.3.3 Systemrealisierung 295

6.4 Strukturorientiertes Programmiersystem 300
Manfred Weck, Ralph Dammertz
6.4.1 Neues Programmierkonzept 302
6.4.2 Schnittstelle zur Planungsebene 308
6.4.3 MMS-Schnittstelle zur Steuerung 310
6.4.4 Einsatzmöglichkeiten 314

6.5 Simulation sensorgeführter Roboterbewegungen 316
Paul Drews, Franz Josef Schulze Wehninck
6.5.1 Ausgangssituation und Zielsetzung 316
6.5.2 Gesamtkonzept des Systems 317
6.5.2.1 Überlegungen zur Modellierung der Arbeitszelle 317
6.5.2.2 Strukturierung der Simulationsumgebung 318
6.5.3 Modellierung von Sensoren 320
6.5.3.1 Modell des optischen Triangulationssensors 320
6.5.3.2 Modell des Laserscanners 322
6.5.3.3 Fehler- und Restriktionsbetrachtung 324
6.5.4 Modellierung des Robotersystems 325
6.5.4.1 Roboterkinematik und -dynamik 325
6.5.4.2 Die Robotersteuerung und ihre Funktionsmodule 327
6.5.5 Offline-Korrektur und Bahnführung mit Sensoren 331
6.5.5.1 Kopplung zwischen Sensor und Robotersystem 332
6.5.5.2 Einführung eines Zeitschemas 333
6.5.6 Implementierung und Betrieb der Sensorsimulation in ROBCAD 334
Literatur 338

7 Zusammenfassung und Ausblick 341
Heinrich Rake et al.

8 Dokumentarischer Anhang 347

8.1 Am Sonderforschungsbereich 208 beteiligte Institute . . . 347
8.2 Projektleiter 348
8.3 Wissenschaftliche Mitarbeiter 350
8.4 Dissertationen 354
8.5 Finanzielle Förderung 356