



Inhalt

Vorwort	XI
Teil I Einführung	1
1 Einführung in die Robotik.....	3
1.1 Was sind Roboter und Automaten?	3
1.2 Roboterklassen und -typen	8
1.2.1 Industrieroboter	9
1.2.2 Serviceroboter	19
1.3 Sense-Plan-Act	24
2 Einführung in die automatisierte Fahrzeugführung	29
2.1 Automatisierte Fahrzeugführung vs. Robotik	29
2.2 Level der Autonomie	30
2.2.1 Automatisierungsgrade des automatisierten Fahrens	30
2.2.2 Vom assistierten zum autonomen Fahren	39
2.3 Grundaufbau eines AD-Systems	43
2.4 Komponenten mechatronischer Systeme	45
3 Entwicklungsmethoden komplexer Systeme	55
3.1 Vorgehensmodelle.....	55
3.1.1 Systems Engineering	65
3.1.2 Rapid Control Prototyping	67
3.1.3 Agiler Entwicklungsprozess.....	68
3.1.4 Frugalität	72
3.2 Methoden aus der Softwareentwicklung.....	74
3.2.1 Einheitliche Sprache	74
3.2.2 DevOps-Ansatz	77

3.3	Sicherheitsanalyse und Testverfahren	80
3.3.1	Funktionale Sicherheit	80
3.3.2	Simulation und Test	86
Teil II Theoretische Grundlagen		101
4	Mathematische und systemtheoretische Grundlagen	103
4.1	Notation	103
4.1.1	Mathematische Grundlagen	103
4.1.2	Signale und Systeme	105
4.2	Dynamische Systeme	111
4.2.1	Einführung	111
4.2.2	Stabilitätstheorie	113
4.2.3	Numerische Lösungsverfahren	117
4.3	Lineare Systeme	123
4.3.1	Zeitbereichsanalyse linearer Systeme	124
4.3.2	Frequenzbereichsanalyse linearer Systeme	143
4.3.3	Zeitdiskrete Darstellung linearer Systeme	155
4.4	Numerisches Lösen von Gleichungssystemen	161
4.4.1	Lineare Gleichungssysteme	161
4.4.2	Nichtlineare Gleichungssysteme	165
5	Grundlagen der Industriemathematik	173
5.1	Optimierung	173
5.1.1	Einführung	174
5.1.2	Lösung beschränkter Optimierungsprobleme	177
5.1.3	Numerische Lösung	180
5.2	Parameteridentifikation	184
5.2.1	Statische Parameteridentifikation	184
5.2.2	Dynamische Parameteridentifikation	192
5.3	Optimale Steuerung	201
5.3.1	Transformationen	203
5.3.2	Direkte Methoden	204
5.3.3	Weiterführende Gedanken	207
6	Modellbildung mechatronischer Systeme	211
6.1	Modellierung	211
6.1.1	Grundidee der Modellierung	211
6.1.2	Theoretische Modellierung	225

6.2	Kinematikmodellierung	235
6.2.1	Kinematik von stationären Robotern	235
6.2.2	Kinematik von mobilen Robotern/Fahrzeugen	251
6.3	Dynamikmodellierung	263
6.3.1	Differentielle Kinematik und Dynamik von stationären Robotern	263
6.3.2	Dynamik von mobilen Robotern/Fahrzeugen	274
7	Regelung mechatronischer Systeme	293
7.1	Grundgedanke einer Steuerung	293
7.2	Grundgedanke einer Regelung	301
7.3	Reglersynthese im Frequenzbereich	305
7.4	Reglersynthese im Zustandsraum	309
7.4.1	Polplatzierung	309
7.4.2	Vorfilter	312
7.4.3	Ausgangsrückführung	313
7.4.4	LQ-Regler	315
7.4.5	Modellprädiktive Regelung	319
Teil III Komponenten eines AD-Systems		327
8	Wahrnehmung und Interpretation	329
8.1	Messtechnikgrundlagen	329
8.2	Zustandsschätzung	339
8.2.1	Luenberger-Beobachter	339
8.2.2	Kalman-Filter	343
8.3	Fahrzeuglokalisierung	361
8.3.1	Zustandsmodell	361
8.3.2	Zustandsübergangs- und Sensormodelle	366
8.3.3	Sensordatenfusion mittels Kalman-Filter	371
8.4	Umfeldkartierung	380
8.4.1	Grid-Mapping	381
8.4.2	Abdeckung großer Gebiete	390
8.4.3	Umgang mit Dynamik in der Umgebung	392
8.5	Verfolgung dynamischer Objekte	394
8.5.1	Objekterkennung	394
8.5.2	Objektverfolgung mittels Kalman-Filter	398
8.5.3	Prädiktion	404
8.6	Mitfühlende und kollaborierende Roboter	408

9	Planung und Entscheidungsfindung	415
9.1	Systemarchitektur	415
9.2	Strategische Ebene	418
9.2.1	Einleitung, Grundidee und Annahmen	420
9.2.2	Mathematische und informationstechnische Grundlagen	420
9.2.3	Suchalgorithmen für Graphen	422
9.3	Taktische Ebene	434
9.3.1	Vorverarbeitung	435
9.3.2	Diskrete taktische Planung	435
9.3.3	Kontinuierliche taktische Planung	445
9.3.4	Reinforcement Learning für Entscheidungsfindung	455
9.4	Analogie von Planungsaufgaben mobiler und stationärer Roboter	458
10	Regelungsverfahren der Robotik	461
10.1	Antriebsregelung	461
10.2	Regelungsverfahren für Serviceroboter.....	472
10.2.1	Längsdynamikregelung	472
10.2.2	Querdynamikregelung	482
10.2.3	Modellprädiktive Dynamikregelung	489
10.3	Regelungsverfahren für Industrieroboter	493
10.3.1	Modellprädiktive Gelenkwinkelregelung	493
10.3.2	Selbstoptimierende Robotiksysteme	502
11	Relevanz für die Zukunft und Ausblick	511