

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	XI
Verzeichnis der Autorinnen und Autoren	XIII
1 Einführung in die industrielle Robotik mit Mensch-Roboter-Kooperation	1
1.1 Mensch-Roboter-Kooperation als Trend für die Zukunft der Robotik	1
1.2 Einsatzpotenziale und Klassifikation der Mensch-Roboter-Kooperation	4
1.2.1 Automatisierungspotenzial durch MRK-Anwendungen	4
1.2.2 Formen der Mensch-Roboter-Kooperation	6
1.2.3 Beispielapplikationen mit Mensch-Roboter-Kooperation	8
1.3 Robotersicherheit	14
1.3.1 Anlagensicherheit und Risikobeurteilung für Robotersysteme	14
1.3.2 Zielkonflikt zwischen Produktivität und Sicherheit	15
1.3.3 Unfallanalyse in der Industrierobotik	16
1.3.4 Sicherheitsvorgaben für MRK-Systeme in der Normung	19
1.3.5 Sicherheitsstrategien in der direkten physischen MRK	21
1.3.6 Kollisionsfolgenabschätzung in der Robotik	23
1.3.7 Bewertungsstrategie zur Steuerung des Verletzungspotenzials in MRK-Anwendungen	28
1.4 Literatur	32
2 Hardwareseitige MRK-Systemgestaltung	37
2.1 Grundlagen der Industrierobotik	37
2.1.1 Aufbau der Mechanik	38
2.1.2 Sicherheitstechnik im und am Roboter	40
2.1.3 Programmierung von IR	41
2.2 Kollaborationen unter Einsatz konventioneller Roboter	44
2.2.1 Kollaborationsarten	44
2.2.2 Erweiterte Sicherheitstechnik	46
2.3 Kollaborationsfähige Roboter	48
2.3.1 Biomechanische Grenzen	48
2.3.2 Anwendungsbereiche von kollaborationsfähigen Robotern	49
2.3.3 Sicherheitstechnik in kollaborationsfähigen Robotern	50
2.3.4 Systeme zur Unterstützung bei der Programmierung von kollaborationsfähigen Robotern	59

2.4	Peripherie	60
2.4.1	Endeffektoren als Bestandteil von MRK-Systemen	62
2.4.2	Greifer – Grundlagen	62
2.4.3	MRK-Greifsysteme und Schraubsysteme	64
2.4.4	Neuartige Greifertypen	67
2.4.5	Roboterwagen	69
2.5	Literatur	70
3	Sensortechnik	73
3.1	Sensortechnik als Grundlage für die Mensch-Roboter-Kooperation	73
3.1.1	Messaufgaben für die Mensch-Roboter-Kooperation	73
3.1.2	Physikalische Sensoreffekte, Sensorsysteme und Signalverarbeitung in MRK-Systemen	75
3.1.3	Messunsicherheit, Zuverlässigkeit und Sicherheit bei Sensoren	77
3.2	Sensoren zur Messung der Zustandsgrößen der Umgebung (externe Sensoren)	79
3.2.1	Resistive Sensoren	79
3.2.2	Kapazitive Sensoren	81
3.2.3	Induktive Sensoren	84
3.2.4	Akustische Sensoren	85
3.2.5	Optische Sensoren	87
3.2.6	Pneumatische Sensoren	95
3.2.7	Radarsensoren	98
3.2.8	Bioelektrische Sensoren	100
3.3	Sensoren zur Messung der inneren Zustandsgrößen eines Robotersystems (interne Sensoren)	104
3.3.1	Kraft- und Momentenmessung	104
3.3.2	Positions-, Weg- und Winkelmessung	110
3.3.3	Beschleunigungs- und Drehratenmessung	111
3.4	Literatur	114
4	Steuerungstechnik	119
4.1	Industrielle Steuerungen	119
4.1.1	Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS)	120
4.1.2	Bewegungssteuerung	122
4.1.3	Sichere Steuerung	124
4.1.4	Sichere Antriebsfunktionen	126
4.2	Steuerungssimulation	135
4.2.1	Virtuelle Methoden der digitalen Fabrik	135
4.2.2	Erweiterung auf die Mensch-Roboter-Kooperation	168
5	Mensch-Roboter-Interaktion	171
5.1	Einleitung	171
5.2	Modalitäten zur Interaktion	175
5.2.1	Unimodale Interaktion unter Nutzung auditiver Schnittstellen	176
5.2.2	Unimodale Interaktion unter Nutzung haptischer Schnittstellen	180

5.2.3	Unimodale Interaktion unter Nutzung visueller Schnittstellen	181
5.2.4	Multimodale Interaktion unter Nutzung verschiedener Schnittstellen	183
5.3	Programmierung von Robotern	186
5.3.1	Roboterzentrierte Programmierung	187
5.3.2	Aufgabenzentrierte Programmierung	193
5.3.3	Führungszentrierte Programmierung	200
5.3.4	Benutzerzentrierte Programmierung	204
5.3.5	Hybride Programmiersysteme	208
5.4	Erkennung von möglichen Mensch-Roboter-Kollisionen	209
5.4.1	Grundlagen	212
5.4.2	Binäre Lokalisation	214
5.4.3	Lokalisation mit Einzelsensor	215
5.4.4	Lokalisation mit Sensorfusion	229
5.4.5	Vergleich der Methoden	241
5.5	Reaktion auf mögliche Mensch-Roboter-Kollisionen	242
5.5.1	Kollisionsentschärfung	244
5.5.2	Geschwindigkeitsregelung	246
5.5.3	Lokale Ausweichbewegung	251
5.5.4	Globale Ausweichbewegung	255
5.5.5	Vergleich der Verfahren	260
5.5.6	Systemstudie SIMERO	261
5.6	Koordinierung hybrider Mensch-Roboter-Teams	266
5.6.1	Grundlagen	267
5.6.2	Statische Team-Organisation	271
5.6.3	Semi-dynamische Team-Organisation	274
5.7	Literatur	278
6	Planung, Simulation und Inbetriebnahme	285
6.1	Stand der Simulationstechnik und der virtuellen Inbetriebnahme	285
6.1.1	Ziele und Nutzen der Simulation	285
6.1.2	Roboter- und Arbeitszellensimulationssysteme	287
6.2	Aufgabenteilung zwischen Mensch und Roboter	287
6.3	Simulation der Mensch-Roboter-Interaktion	291
6.3.1	Einordnung in bestehende Definitionen	292
6.3.2	Bestehende Softwaresysteme	295
6.3.3	Innovative Ansätze zur virtuellen Auslegung von Mensch-Roboter-Umgebungen ...	301
6.4	Von der Simulation zur Inbetriebnahme	305
6.4.1	Virtuelle Inbetriebnahme mittels durchgängiger Planungskette	306
6.4.2	Unzureichende Absolutgenauigkeit von Industrierobotern	307
6.4.3	Steigerung der Absolutgenauigkeit durch Kalibriermethoden	307
6.4.4	Lokale kameragestützte Referenzierung zur Steigerung der Positioniergenauigkeit	309
6.4.5	Automatisierte Greif- und Bahnplanung	310
6.5	Sicherheits- und Sensorsimulation	311
6.6	Austauschformate, CAX-Werkzeugkette	315
6.7	Literatur	318

7	Methoden zur erfolgreichen Einführung von MRK	323
7.1	Technische Randbedingungen	323
7.1.1	CE-Zertifizierung	323
7.1.2	Risikobeurteilung	328
7.1.3	Sicherheitsfunktionen für die Mensch-Roboter-Kollaboration	328
7.1.4	Durchführung einer Kraftmessung	332
7.2	Planung einer MRK-Anwendung	335
7.2.1	Vorgehensweise für die Planung	335
7.2.2	Dokumentation der Anforderungen	335
7.2.3	Morphologischer Kasten	336
7.2.4	Anforderungen	336
7.2.5	Beurteilung der Betriebsmittel	340
7.2.6	Bewertung der Ergonomie bei MRK-Anwendungen	341
7.3	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	345
7.3.1	Einordnung von MRK im Kontext der Wirtschaftlichkeit von Produktionsanlagen	345
7.3.2	Wirtschaftliche Vorteile von MRK im Vergleich zu klassischen Formen der Automatisierung	347
7.3.3	Wirtschaftliche Vorteile von MRK entlang des Lebenszyklus von Roboteranlagen	348
7.3.4	Anwendungsbeispiele	350
7.3.5	Entlohnung	353
7.3.6	Ausblick	355
7.4	Menschzentrierte Einführungsstrategie	357
7.4.1	Bedürfnisse des Menschen und Widerstände gegenüber Veränderung	357
7.4.2	Durchführung von Veränderungsprozessen und Steigerung der Mitarbeiterakzeptanz für MRK-Lösungen	359
7.4.3	Akzeptanzfaktoren für die Einführung von MRK-Systemen	362
7.4.4	Best Practice	365
7.4.5	Halbautomatisierte MRK	368
7.4.6	Menschliche Intentionserkennung	369
7.4.7	Kognitive Assistenzsysteme zur Unterstützung der Mitarbeiter in der Produktion	370
7.4.8	Zusammenfassung und Chancen für die Zukunft	372
8	Branchenspezifische Applikationen	375
8.1	MRK-Applikationen in der Automobilmontage	375
8.1.1	Darstellung der Anforderungen und Rahmenbedingungen	375
8.1.2	Konzeptionelle branchenspezifische Lösungsansätze	378
8.1.3	Illustrierung von Beispielen	380
8.1.4	Zusammenfassung und Fazit	390
8.2	Flexible Automatisierung in der Elektronikmontage mithilfe von MRK-Systemen	391
8.2.1	Rahmenbedingungen und Herausforderungen in der Elektronikmontage	391
8.2.2	Konzeptionelle branchenspezifische Lösungsansätze	393
8.2.3	Beispielhafte Anwendungen von MRK-Systemen in der Elektronikproduktion	394
8.3	Anwendungsbeispiel: Montage von Hydraulikventilen	400
8.3.1	Darstellung der Anforderungen und Rahmenbedingungen	400
8.3.2	Konzeptionelle branchenspezifische Lösungsansätze	401
8.3.3	Illustrierung von Beispielen	405

8.4	Montage von Großgeräten	408
8.4.1	Darstellung der Anforderung und Rahmenbedingungen	408
8.4.2	Konzeptionelle branchenspezifische Lösungsansätze	410
8.4.3	Illustrierung von Beispielen	410
8.4.4	Zusammenfassung	412
8.5	Anwendungsbeispiel: Intralogistik	413
8.5.1	Beweggründe für den MRK-Einsatz in der Intralogistik	413
8.5.2	Umsetzungsbeispiel zur Autonomisierung des Materialflusses im Hauptwertstrom	414
8.5.3	Umsetzungsbeispiel zur automatisierten Logistik von Verbrauchs- und Verbauteilen	415
8.5.4	Umsetzungsbeispiel zur Effizienzsteigerung der Kommissionierung	416
8.5.5	Zusammenfassung und Fazit	418
8.6	Anwendungsbeispiel: Robotergestützte Systeme in der Medizin	418
8.6.1	Normativer Rahmen	419
8.6.2	Einteilung medizinischer Robotersysteme	420
8.6.3	Umsetzungsbeispiele	421
8.6.4	Zusammenfassung und Fazit	424
8.7	Anwendungsbeispiel: Servicerobotik im Haushalt	426
8.7.1	Anforderungen und Rahmenbedingungen	426
8.7.2	Konzeptionelle branchenspezifische Lösungen	428
8.7.3	Umsetzungsbeispiele	430
8.7.4	Zusammenfassung und Fazit	431
8.8	Individuelle und aufgabenabhängige Unterstützung bei physisch beanspruchenden Tätigkeiten durch anziehbare Systeme	432
8.8.1	Einführung	432
8.8.2	Anforderungen und Rahmenbedingungen	434
8.8.3	Exemplarische Systemansätze	437
8.8.4	Entwicklungsvorgehen für körpergetragene physische Unterstützungssysteme	437
8.8.5	Potenziale	439
8.9	Anwendungsbeispiel: Roboterbasierte Vorfertigung für Losgröße Eins im Holzbau	441
8.9.1	Rahmenbedingungen und Herausforderungen für die Automatisierung im Holzbau	441
8.9.2	Forschungsansatz zur Automatisierung im Holzbau	442
8.9.3	Robotische Vorfertigung und Mensch-Roboter-Interaktion im Holzbau	443
8.9.4	Illustrierung von Umsetzungsbeispiele	447
8.9.5	Zusammenfassung und Fazit	449
8.10	Vielfältiger Einsatz von MRK-Systemen bei einem global tätigen Automobil- und Industriezulieferer	450
8.10.1	Koexistenz	450
8.10.2	Kooperation	451
8.10.3	Kollaboration	452
8.10.4	Mobile Cobots	452

9	Entwicklungsrichtungen für aktuelle und zukünftige Anwendungen	455
9.1	Soft Robotics	455
9.1.1	Übersicht	455
9.1.2	Komponenten	456
9.1.3	Entwurfs- und Beschreibungsmethoden	461
9.1.4	Anwendungsgebiete	464
9.2	Software für die Roboterinteraktion mit dem LBR iiwa	469
9.2.1	Einführung	469
9.2.2	Eine Quelltext-offene Zustandsmaschine für die sichere MRK	470
9.2.3	OpenIGTLink-Schnittstelle	471
9.2.4	Medizinische Therapieplanung mit 3D-Slicer	472
9.2.5	Teleoperation mittels ROS-Schnittstelle und OpenIGTLink	474
9.2.6	Tablet-PC, Smartwatch und Mikro-PC-basierter Zustandswechsler am Endeffektor	474
9.2.7	Zusammenfassung und Ausblick	476
9.2.8	Literatur	476
	Index	479