

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
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 Literaturverzeichnis	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
2.5	Literaturverzeichnis	69
3	Sensortechnik	71
3.1	Sensortechnik als Grundlage für die Mensch-Roboter-Kooperation	71
3.1.1	Messaufgaben für die Mensch-Roboter-Kooperation	71
3.1.2	Physikalische Sensoreffekte, Sensorsysteme und Signalverarbeitung in MRK-Systemen	73
3.1.3	Messunsicherheit, Zuverlässigkeit und Sicherheit bei Sensoren	75
3.2	Sensoren zur Messung der Zustandsgrößen der Umgebung (externe Sensoren)	77
3.2.1	Resistive Sensoren	77
3.2.2	Kapazitive Sensoren	79
3.2.3	Induktive Sensoren	82
3.2.4	Akustische Sensoren	83
3.2.5	Optische Sensoren	85
3.2.6	Pneumatische Sensoren	93
3.2.7	Radarsensoren	96
3.2.8	Bioelektrische Sensoren	98
3.3	Sensoren zur Messung der inneren Zustandsgrößen eines Robotersystems (interne Sensoren)	102
3.3.1	Kraft- und Momentenmessung	102
3.3.2	Positions-, Weg- und Winkelmessung	108
3.3.3	Beschleunigungs- und Drehratenmessung	109
3.4	Literaturverzeichnis	112
4	Steuerungstechnik	117
4.1	Industrielle Steuerungen	117
4.1.1	Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS)	118
4.1.2	Bewegungssteuerung	120
4.1.3	Sichere Steuerung	122
4.1.4	Sichere Antriebsfunktionen	124
4.2	Steuerungssimulation	133
4.2.1	Virtuelle Methoden der digitalen Fabrik	133
4.2.2	Erweiterung auf die Mensch-Roboter-Kooperation	166
5	Mensch-Roboter-Interaktion	169
5.1	Einleitung	169
5.2	Modalitäten zur Interaktion	173
5.2.1	Unimodale Interaktion unter Nutzung auditiver Schnittstellen	174
5.2.2	Unimodale Interaktion unter Nutzung taktiler Schnittstellen	177
5.2.3	Unimodale Interaktion unter Nutzung visueller Schnittstellen	178
5.2.4	Multimodale Interaktion unter Nutzung verschiedener Schnittstellen	179

5.3	Programmierung von Robotern	182
5.3.1	Roboter-zentrierte Programmierung	183
5.3.2	Aufgaben-zentrierte Programmierung	189
5.3.3	Führungs-zentrierte Programmierung	195
5.3.4	Benutzer-zentrierte Programmierung	199
5.4	Erkennung von möglichen Mensch/Roboter-Kollisionen	203
5.4.1	Grundlagen	206
5.4.2	Binäre Lokalisation	208
5.4.3	Lokalisation mit Einzelsensor	210
5.4.4	Lokalisation mit Sensorfusion	222
5.4.5	Vergleich der Methoden	235
5.5	Reaktion auf mögliche Mensch-Roboter-Kollisionen	235
5.5.1	Kollisionsentschärfung	237
5.5.2	Geschwindigkeitsregelung	240
5.5.3	Lokale Ausweichbewegung	245
5.5.4	Globale Ausweichbewegung	249
5.5.5	Vergleich der Verfahren	254
5.5.6	Systemstudie SIMERO	255
5.6	Koordinierung hybrider Mensch-Roboter-Teams	260
5.6.1	Grundlagen	261
5.6.2	Statische Team-Organisation	265
5.6.3	Semi-dynamische Team-Organisation	267
5.6.4	Dynamische Team-Organisation	269
5.7	Literaturverzeichnis	272
6	Planung, Simulation und Inbetriebnahme	277
6.1	Stand der Simulationstechnik und der virtuellen Inbetriebnahme	277
6.1.1	Ziele und Nutzen der Simulation	277
6.1.2	Roboter- und Arbeitszellensimulationssysteme	279
6.2	Aufgabenteilung zwischen Mensch und Roboter	279
6.3	Prozesssimulation	284
6.3.1	Einordnung in bestehende Definitionen	284
6.3.2	Softwaresysteme zur ganzheitlichen Simulation von MRK-Produktionsprozessen ..	287
6.3.3	Innovative Ansätze zur virtuellen Auslegung von Mensch-Roboter-Umgebungen ...	293
6.4	Von der Simulation zur Inbetriebnahme	297
6.4.1	Virtuelle Inbetriebnahme mittels durchgängiger Planungskette	297
6.4.2	Unzureichende Absolutgenauigkeit von Industrierobotern	299
6.4.3	Steigerung der Absolutgenauigkeit durch Kalibriermethoden	300
6.4.4	Lokale kameragestützte Referenzierung zur Steigerung der Positioniergenauigkeit ..	301
6.4.5	Automatisierte Greif- und Bahnplanung	301
6.5	Planung und Simulation von Sicherheit – Sensorsimulation	303
6.6	Austauschformate, CAx-Werkzeugkette	305
6.7	Literaturverzeichnis	308

7	Methoden zur erfolgreichen Einführung von MRK	311
7.1	Technische Randbedingungen	311
7.1.1	CE-Zertifizierung	311
7.1.2	Risikobeurteilung	316
7.1.3	Sicherheitsfunktionen für die Mensch-Roboter-Kollaboration	316
7.1.4	Durchführung einer Kraftmessung	320
7.2	Planung einer MRK-Anwendung	323
7.2.1	Methodik von der Prozessanalyse zum Betriebsmittel	323
7.2.2	Dokumentation der Anforderungen	323
7.2.3	Morphologischer Kasten	324
7.2.4	Anforderungen	326
7.2.5	Beurteilung der Betriebsmittel	330
7.2.6	Bewertung der Ergonomie bei MRK-Anwendungen	332
7.3	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	334
7.3.1	Einordnung von MRK im Kontext der Wirtschaftlichkeit von Produktionsanlagen	335
7.3.2	Wirtschaftliche Vorteile von MRK im Vergleich zu klassischen Formen der Automatisierung	337
7.3.3	Wirtschaftliche Vorteile von MRK entlang des Lebenszyklus von Roboteranlagen	338
7.3.4	Anwendungsbeispiele	340
7.3.5	Entlohnung	343
7.3.6	Ausblick	345
7.4	Menschzentrierte Einführungsstrategie	347
7.4.1	Bedürfnisse des Menschen und Widerstände gegenüber Veränderung	347
7.4.2	Durchführung von Veränderungsprozessen und Steigerung der Mitarbeiterakzeptanz für MRK-Lösungen	349
7.4.3	Akzeptanzfaktoren für die Einführung von MRK-Systemen	352
7.4.4	Best Practice	354
7.4.5	Zusammenfassung und Chancen für die Zukunft	358
8	Branchenspezifische Applikationen	361
8.1	MRK-Applikationen in der Automobilmontage	361
8.1.1	Darstellung der Anforderungen und Rahmenbedingungen	361
8.1.2	Konzeptionelle branchenspezifische Lösungsansätze	364
8.1.3	Illustrierung von Beispielen	366
8.1.4	Zusammenfassung und Fazit	376
8.2	Flexible Automatisierung in der Elektronikmontage mithilfe von MRK-Systemen	377
8.2.1	Rahmenbedingungen und Herausforderungen in der Elektronikmontage	377
8.2.2	Konzeptionelle branchenspezifische Lösungsansätze	379
8.2.3	Beispielhafte Anwendungen von MRK-Systemen in der Elektronikproduktion	380
8.3	Anwendungsbeispiel: Montage von Hydraulikventilen	386
8.3.1	Darstellung der Anforderungen und Rahmenbedingungen	386
8.3.2	Konzeptionelle branchenspezifische Lösungsansätze	387
8.3.3	Illustrierung von Beispielen	391
8.4	Montage von Großgeräten	394
8.4.1	Darstellung der Anforderung und Rahmenbedingungen	394
8.4.2	Konzeptionelle branchenspezifische Lösungsansätze	396

8.4.3	Illustrierung von Beispielen	396
8.4.4	Zusammenfassung	398
8.5	Anwendungsbeispiel: Intralogistik	399
8.5.1	Beweggründe für den MRK-Einsatz in der Intralogistik	399
8.5.2	Umsetzungsbeispiel zur Autonomisierung des Materialflusses im Hauptwertstrom ..	400
8.5.3	Umsetzungsbeispiel zur automatisierten Logistik von Verbrauchs- und Verbauteilen	401
8.5.4	Umsetzungsbeispiel zur Effizienzsteigerung der Kommissionierung	402
8.5.5	Zusammenfassung und Fazit	404
8.6	Anwendungsbeispiel: Robotergestützte Systeme in der Medizin	404
8.6.1	Normativer Rahmen	405
8.6.2	Einteilung medizinischer Robotersysteme	406
8.6.3	Umsetzungsbeispiele	407
8.6.4	Zusammenfassung und Fazit	410
8.7	Anwendungsbeispiel: Servicerobotik im Haushalt	412
8.7.1	Anforderungen und Rahmenbedingungen	412
8.7.2	Konzeptionelle branchenspezifische Lösungen	414
8.7.3	Umsetzungsbeispiele	416
8.7.4	Zusammenfassung und Fazit	417
8.8	Individuelle und aufgabenabhängige Unterstützung bei physisch beanspruchenden Tätigkeiten durch anziehbare Systeme	418
8.8.1	Einführung	418
8.8.2	Anforderungen und Rahmenbedingungen	420
8.8.3	Exemplarische Systemansätze	423
8.8.4	Entwicklungsvorgehen für körpergetragene physische Unterstützungssysteme	423
8.8.5	Potenziale	425
9	Entwicklungsrichtungen für aktuelle und zukünftige Anwendungen	429
9.1	Soft Robotics	429
9.1.1	Übersicht	429
9.1.2	Komponenten	430
9.1.3	Entwurfs- und Beschreibungsmethoden	435
9.1.4	Anwendungsgebiete	438
9.2	Software für die Roboterinteraktion mit dem LBR iiwa	443
9.2.1	Einführung	443
9.2.2	Eine Quelltext-offene Zustandsmaschine für die sichere MRK	443
9.2.3	OpenIGTLink-Schnittstelle	443
9.2.4	Medizinische Therapieplanung mit 3D-Slicer	444
9.2.5	Teleoperation mittels ROS-Schnittstelle und OpenIGTLink	447
9.2.6	Tablet-PC, Smartwatch und Mikro-PC-basierter Zustandswechsler am Endeffektor ...	447
9.2.7	Zusammenfassung und Ausblick	449
9.2.8	Literaturverzeichnis	450
	Stichwortverzeichnis	451