

Dipl.-Ing. Carsten ten Brink, Bad Bentheim

# **Kollisionsbereichs-bezogene Trajektorienplanung koordinierter Roboter**

Reihe **8**: Meß-, Steuerungs-  
und Regelungstechnik

Nr. **571**

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> _____	<b>1</b>
1.1	Einordnung der Arbeit . . . . .	2
1.2	Inhaltliche Gliederung der Arbeit . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Stand der Forschung</b> _____	<b>6</b>
2.1	Trajektorienplanung . . . . .	6
2.2	Koordinierter Mehrroboterbetrieb . . . . .	9
<b>3</b>	<b>Einführung in die Problematik</b> _____	<b>12</b>
3.1	Möglichkeiten zur Detektion von Kollisionen . . . . .	13
3.1.1	Aufteilung des Raumes mit Hilfe von Octrees . . . . .	14
3.1.2	Das Konfigurationsraumverfahren . . . . .	15
3.1.3	Kollisionserkennung mit dem Konfigurationsraumverfahren . . . . .	16
3.1.4	Trajektorienplanung mit dem Konfigurationsraumverfahren . . . . .	17
3.2	Eignung des Konfigurationsraumverfahrens für die vorliegende Aufgabenstellung	18
3.2.1	Das Konfigurationsraumverfahren im Falle beweglicher Hindernisse . .	19
3.2.2	Koordinierte Roboter als bewegliche Hindernisse . . . . .	23
3.2.3	Behandlung zweier koordinierter Roboter mit $m$ bzw. $n$ Freiheitsgraden im $(m+n)$ -dimensionalen Konfigurationsraum . . . . .	25
3.3	Zusammenfassende Bewertung . . . . .	30
<b>4</b>	<b>Berechnung kollisionsgefährdeter Konfigurationen — Kollisionsbereiche</b> _	<b>31</b>
4.1	Kollisionserkennung für das Grundgelenk . . . . .	32
4.2	Bestimmung eines Kollisionsbereiches . . . . .	41
4.2.1	Ermittlung aller Elemente des Kollisionsbereiches . . . . .	41
4.3	Schnelle Berechnung von Kollisionsbereichen . . . . .	44
4.3.1	Sicherheitsabstand zwischen koordinierten Robotern . . . . .	51

4.3.2	Berücksichtigung realer Geometrien bei der Berechnung der Kollisionsbereiche . . . . .	53
4.3.3	Berechnung der Kollisionsbereiche für Roboter mit versetzten Gelenken . . . . .	58
4.4	Kollisionserkennung für die Armgelenke . . . . .	60
4.5	Zusammenfassung — Kollisionserkennung mit Hilfe von Kollisionsbereichen . . . . .	65
<b>5</b>	<b>Planung optimaler Ausweichtrajektorien</b> _____	<b>69</b>
5.1	Ansätze zu Generierung kollisionsfreier Trajektorien . . . . .	70
5.1.1	Die Potentialfeldmethode . . . . .	70
5.2	Effiziente Generierung von zulässigen Ausweichtrajektorien . . . . .	74
5.2.1	Auffinden zulässiger Wegsegmente um den Kollisionsbereich . . . . .	77
5.3	Generierung optimaler Trajektorien für den koordinierten Betrieb . . . . .	81
5.3.1	Kurzer Überblick über die Graphentheorie . . . . .	82
5.3.2	Das <i>Single-source shortest path problem</i> und die Lösung von Dijkstra . . . . .	84
5.3.3	Die optimale Ausweichtrajektorie . . . . .	86
5.4	Eine exemplarische Ausweichbewegung . . . . .	89
5.5	Koordination der Gelenkgeschwindigkeiten — zeitoptimale Trajektorien . . . . .	92
5.6	Koordinierte Bewegung der Armgelenke . . . . .	96
5.6.1	Koordination des zweiten Armgelenkes . . . . .	101
5.7	Kollisionsgefahren während der koordinierten Bewegung . . . . .	105
5.7.1	Kollisionsgefährdete Konfigurationen auf der Ausweichtrajektorie . . . . .	105
5.7.2	Kollisionsgefährdetes Ziel-Konfigurationspaar . . . . .	108
5.8	Praktische Realisierung einer Kollisionsvermeidung und Trajektorienplanung . . . . .	110
5.8.1	Der Kollisionsbereich als abstrakter Datentyp . . . . .	114
5.9	Erweiterungsmöglichkeiten, Anwendungsbeispiele . . . . .	117
5.9.1	Optimierung der Ausweichtrajektorien für den gesamten Bewegungsablauf . . . . .	118
5.9.2	Roboter mit zylinderförmigem Arbeitsraum . . . . .	120
5.9.3	Roboter mit horizontaler Gelenkinematik — SCARA . . . . .	126
5.9.4	Koordinierter Mehrroboterbetrieb in verketteten Montagezellen . . . . .	130
5.10	Ausblick . . . . .	132
<b>6</b>	<b>Trajektorienscheduling, time-scheduling</b> _____	<b>136</b>
6.1	Kollisionsfreie Bewegungen durch time-scheduling . . . . .	136
6.1.1	Das Verfahren von B. H. Lee und C. S. G. Lee . . . . .	139
6.1.2	Das Verfahren von R. A. Basta, R. Mehrota und M. R. Varanasi . . . . .	142
6.1.3	Das Verfahren von Z. Bien und J. Lee . . . . .	146

6.1.4	Das Verfahren von C. Chang, M. J. Chung und B. H. Lee . . . . .	149
6.2	Vergleich der vorgestellten Verfahren . . . . .	152
6.3	Trajektorienscheduling mit Hilfe der Kollisionsbereiche . . . . .	157
6.4	Nachteile und Grenzen des time-scheduling-Konzeptes . . . . .	161
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung, Schlußbemerkungen</b> _____	<b>163</b>