

Dipl.-Ing. Eleni Ralli, München

# **Modell- und sensorbasierte Bahnplanung für Manipulatoren**

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

Nr. **615**

# Inhaltsverzeichnis

Kapitel 1: Einführung . . . . .	1
1.1 Autonome Roboter und die Rolle der Bahnplanung . . . . .	1
1.2 Bahnplanung und Telerobotik . . . . .	2
1.3 Grundlegende Begriffe . . . . .	4
1.4 Klassifizierung von Bahnplanungsproblemen und –algorithmen . . . . .	6
1.4.1 Klassifizierung von Bahnplanungsproblemen . . . . .	6
1.4.2 Klassifizierung von Bahnplanungsalgorithmen . . . . .	9
1.5 Stand der Forschung . . . . .	10
1.5.1 Zellenzerlegungsverfahren . . . . .	10
1.5.2 Wegenetzverfahren . . . . .	13
1.5.3 Potentialfeldverfahren . . . . .	14
1.5.4 Graphenbasierte Verfahren . . . . .	17
1.5.5 Verfahren der mathematischen Programmierung . . . . .	18
1.6 Zielsetzung und Überblick der Arbeit . . . . .	18
Kapitel 2: Modellbasierte Bahnplanung in einer bekannten und statischen Umgebung . . . . .	20
2.1 Erstellung des Arbeitsraumes (A-Raumes) . . . . .	20
2.2 Erstellung des Konfigurationsraumes (K-Raumes) . . . . .	21
2.2.1 Einleitung . . . . .	21
2.2.2 Ein hierarchisches Konzept zur Erstellung der K-Raum-Hindernisse . . . . .	23
2.3 Verbreitung eines Potentialfeldes im K-Raum . . . . .	31
2.4 Wegesuche im K-Raum . . . . .	33
2.5 Wichtige Eigenschaften des Bahnplaners . . . . .	34
2.5.1 Aussage über die Existenz einer Bahn . . . . .	34
2.5.2 Vollständigkeit des Bahnplaners . . . . .	34
2.5.3 Behandlung von Singularitäten . . . . .	35
2.5.4 Optimalität der Bahn . . . . .	35
2.6 Verbreitung eines auf der euklidischen Metrik basierenden Potentialfeldes im K-Raum . . . . .	36
2.7 Experimentelle Ergebnisse . . . . .	38
2.7.1 Erstellung des A-Raumes . . . . .	39
2.7.2 Erstellung des K-Raumes . . . . .	39
2.7.3 Verbreitung des Potentialfeldes im K-Raum . . . . .	42
2.7.4 Wegesuche im K-Raum . . . . .	42

Kapitel 3: Sensorbasierte Bahnplanung in einer veränderlichen oder unbekanntem Umgebung . . . . .	45
3.1 Bekannte Verfahren . . . . .	45
3.2 Klassen von Hindernissen (Objekten) . . . . .	47
3.2.1 Neue statische Hindernisse . . . . .	47
3.2.2 Bewegliche Hindernisse (passiv bewegt) . . . . .	48
3.2.3 Sich bewegende Hindernisse (aktiv bewegend) . . . . .	49
3.3 Erweiterung des Bahnplanungsalgorithmus für A-Raum-Veränderungen . . . . .	50
3.3.1 Einleitung . . . . .	50
3.3.2 Detektion der neuen Objekte . . . . .	51
3.3.3 On-line Kollisionserkennung . . . . .	51
3.3.4 On-line sensorgestützte Kollisionsvermeidung . . . . .	56
3.3.5 Experimente . . . . .	62
3.4 Sensorgestützte Bahnplanung am Beispiel eines Manipulators bestückt mit einem in-Hand Laserscanner . . . . .	66
3.4.1 Einleitung . . . . .	66
3.4.2 Das Verfahren . . . . .	68
3.4.3 Experimente . . . . .	71
3.4.4 Bewertung des Verfahrens . . . . .	73
3.5 Bahnplanung in einer unbekanntem Umgebung . . . . .	74
3.5.1 Einleitung . . . . .	74
3.5.2 Ausweichstrategie (reflexives Verhalten) . . . . .	74
3.6 Bewertung des Verfahrens . . . . .	75
Kapitel 4: Behandlung von Transportaufgaben . . . . .	76
4.1 Problemstellung und Objektmodellierung . . . . .	76
4.1.1 Problemstellung . . . . .	76
4.1.2 Objektmodellierung . . . . .	76
4.2 Transportaufgaben unter Berücksichtigung von 5 dof . . . . .	77
4.2.1 Transportaufgaben mit off-line Vorverarbeitung des K-Raumes . . . . .	77
4.2.2 Transportaufgaben ohne off-line Vorverarbeitung des K-Raumes . . . . .	78
4.3 Erweiterung des Verfahrens auf 6 dof . . . . .	78
4.4 Berücksichtigung der Roboterdynamik . . . . .	79
4.4.1 Berücksichtigung des dynamischen Modells des Roboters . . . . .	80
4.4.2 Geschwindigkeitsabhängiger Sicherheitsabstand für die Kollisionserkennung . . . . .	81
4.5 Experimentelle Ergebnisse . . . . .	81

Kapitel 5: Bahnplanung mit Hilfe von Kohonen-Netzen – ein neuartiger Ansatz . . . . .	83
5.1 Motivation des Ansatzes . . . . .	83
5.2 Einführung in die Kohonen-Netze . . . . .	84
5.3 Modellierung des K-Raumes mit Kohonen-Netzen . . . . .	87
5.4 Verbreitung des Potentialfeldes im Konfigurationsraum . . . . .	89
5.5 Wegesuche im K-Raum . . . . .	89
5.5.1 Wegesuche in einer statischen Umgebung . . . . .	89
5.5.2 Wegesuche in einer veränderlichen Umgebung . . . . .	90
5.6 Experimente und Vergleich zu den Ergebnissen der Kapitel 2–3 . . . . .	90
5.6.1 Allgemeine Betrachtungen . . . . .	90
5.6.2 Bahnplanung in statischen Umgebungen . . . . .	91
5.6.3 Bahnplanung in veränderlichen Umgebungen . . . . .	92
5.6.4 Experimente mit höherer Auflösung im K-Raum . . . . .	93
5.7 Erweiterung für Manipulatoren mit mehreren dof . . . . .	94
5.7.1 Bekannte Verfahren . . . . .	94
5.7.2 Modifikation des vorgestellten Verfahrens . . . . .	94
Kapitel 6: Experimente mit dem realen Roboter . . . . .	96
6.1 Beschreibung der Roboterexperimentierumgebung . . . . .	96
6.2 Bahnplanung im Rahmen der aufgabenorientierten Roboterprogrammierung . . . . .	97
6.3 Bahnplanungsspezifische Implementierungsdetails . . . . .	99
6.3.1 Integration der Geschwindigkeitsvorgaben in die Bahnplanung . . . . .	99
6.3.2 Einhaltung der Beschleunigungsgrenzen . . . . .	100
6.3.3 Bahninterpolation mittels Splines . . . . .	101
Kapitel 7: Zusammenfassung und Ausblick . . . . .	103
7.1 Bewertung der Ergebnisse und des Gesamtsystems . . . . .	103
7.2 Einsatzmöglichkeit in der Telerobotik . . . . .	106
7.3 Ausblick . . . . .	107
Literatur . . . . .	109