

Dipl.-Ing. Willy Miksch, Olching

# **Ein Konzept zur optimalen Steuerung und Regelung von mobilen Manipulatoren**

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

Nr. **569**

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation . . . . .	1
1.2	Ziele und Aufbau der Arbeit . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Modellbildung</b>	<b>6</b>
2.1	Roboterarmkinematik . . . . .	6
2.2	Fahrzeugkinematik . . . . .	10
2.2.1	Rad-Boden-Bindung . . . . .	10
2.2.2	Lenkkonfigurationen . . . . .	12
2.2.3	Die Kinematik des Roboterfußpunkts . . . . .	13
2.2.4	Beweglichkeit des Fußpunkts . . . . .	21
2.3	Die Kinematik des Gesamtsystems . . . . .	26
2.4	Die Kinetik des Gesamtsystems . . . . .	28
2.4.1	Freiheitsgrade und Bindungen . . . . .	31
2.4.2	Kinetische Abhängigkeiten und Kopplungen . . . . .	33
2.4.3	Elastische Antriebseinheiten . . . . .	34
2.5	Modell des Experimentalroboters . . . . .	37
2.5.1	Kinematik und Kinetik . . . . .	38
2.5.2	Sensorik . . . . .	39
<b>3</b>	<b>Bewegungserfassung und -koordinierung</b>	<b>40</b>
3.1	Sensorkonzept . . . . .	40
3.2	Bewegungstransformation . . . . .	43
3.2.1	Klassifikation des mobilen Systems . . . . .	44
3.2.2	Bestimmung der nutzbaren Fahrzeugfreiheitsgrade . . . . .	44
3.2.3	Transformationsmethoden . . . . .	47
3.3	Optimierung der Armarbeitsposition . . . . .	52

3.3.1	Allgemeine Ansätze . . . . .	52
3.3.2	Optimierungsziele beim mobilen Manipulator . . . . .	55
3.3.3	Exemplarische Optimierung von $w_2$ . . . . .	57
3.3.4	Kurzzusammenfassung . . . . .	63
<b>4</b>	<b>Opt. des dyn. Führungsverhaltens</b>	<b>64</b>
4.1	Fahrzeugbahnplanung unter dynamischen Randbedingungen . . . . .	67
4.1.1	Formulierung des Optimierungsproblems . . . . .	67
4.1.2	Optimalitätsbedingungen . . . . .	72
4.2	Numerische Verfahren zur dynamischen Optimierung . . . . .	74
4.2.1	Ein direktes Kollokationsverfahren . . . . .	75
4.3	Beispiele zur Fahrzeugbahnplanung . . . . .	77
4.3.1	Aufgabenstellungen . . . . .	77
4.3.2	Einführung quadratischer Gütefunktionale . . . . .	80
4.3.3	Reduzierung des Optimierungsintervalls . . . . .	83
4.3.4	Einfluß der Fahrzeugorientierung . . . . .	85
4.3.5	Alternativen zur rein numerischen Bahnplanung . . . . .	88
4.4	Werkzeugbahnplanung . . . . .	93
4.5	Kurzzusammenfassung . . . . .	97
<b>5</b>	<b>Optimierte Regelung des mobilen Manipulators</b>	<b>99</b>
5.1	Strukturierung des Regelungsproblems . . . . .	99
5.2	Abstimmung der Regelkreise . . . . .	100
5.2.1	Abstimmung: Kartesischer Regelkreis und Gelenkregelkreis . . . . .	101
5.2.2	Abstimmung: Werkzeug- und Fahrzeugregelkreis . . . . .	103
5.3	Kartesische Regelung des Fahrzeugs . . . . .	103
5.3.1	Definition der Fahrzeugbahnfehler . . . . .	104
5.3.2	Entkopplungsmaßnahmen . . . . .	105
5.3.3	Reglerentwurf am entkoppelten Modell . . . . .	111
5.3.4	Hinweise zur Realisierung . . . . .	112
5.3.5	Kurzzusammenfassung . . . . .	115
5.4	Kartesische Regelung der Werkzeugbewegung . . . . .	116
5.4.1	Kurzzusammenfassung . . . . .	121
<b>6</b>	<b>Maßnahmen zur Stellgliedoptimierung</b>	<b>123</b>

6.1	Regelungsansätze . . . . .	125
6.1.1	Elastisches Getriebe . . . . .	125
6.1.2	Starres Getriebe . . . . .	135
6.2	Zustandsbeobachter . . . . .	135
6.2.1	Beobachterstrukturoptimierung . . . . .	137
6.2.2	Beobachter mit Koppelmomentaufschaltung . . . . .	143
6.3	Reibungskompensation . . . . .	145
<b>7</b>	<b>Experimentelle Umsetzung</b>	<b>149</b>
7.1	Aufbau des Rechnersystems . . . . .	149
7.2	Kartesische Sensorik . . . . .	152
7.3	Experimentelle Ergebnisse . . . . .	153
7.3.1	Verhalten des Gesamtsystems . . . . .	153
7.3.2	Wirkung der unterlagerten Regelung . . . . .	155
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>157</b>
<b>A</b>	<b>Darstellung der rotatorischen Freiheitsgrade</b>	<b>160</b>
A.1	Die Orientierung . . . . .	160
A.2	Die Orientierungsänderung . . . . .	162
<b>B</b>	<b>Beweglichkeit beim Manutec r3</b>	<b>163</b>
B.1	Optimierung des Winkels Unterarm - Werkzeug . . . . .	164
B.2	Optimierung des Abstandes Fußpunkt - Handwurzel . . . . .	168
B.3	Berücksichtigung von Ungleichungsnebenbedingungen . . . . .	171
<b>C</b>	<b>Frequenz-Shaping von Gütefunktionalen</b>	<b>175</b>
<b>D</b>	<b>Dämpfungsvorgabe bei LQ-Gütefunktionalen</b>	<b>179</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>180</b>