

## Flachheitsbasierte Positionsregelungen für Parallelkinematiken am Beispiel eines hochdynamischen hydraulischen Hexapoden

### Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b> . . . . .	<b>1</b>
1.1 Problemstellung . . . . .	2
1.2 Zielsetzung . . . . .	4
1.3 Aufbau der Arbeit . . . . .	4
<b>2 Theoretische Grundlagen</b> . . . . .	<b>5</b>
2.1 Aufbau und Komponenten des hydraulischen Hexapoden . . . . .	5
2.2 Modellbildung . . . . .	6
2.2.1 Serielle Kinematiken . . . . .	6
2.2.2 Parallele Kinematiken . . . . .	7
2.2.3 Hydraulische Aktoren . . . . .	11
2.2.4 Parameter des Zielsystems . . . . .	15
2.3 Regelungstechnische Grundlagen . . . . .	17
2.3.1 Zwei-Freiheitsgrade-Regelung und flachheitsbasiertes Entwurfskonzept . . . . .	17
2.3.2 Zustandsbeobachtung . . . . .	18
2.3.3 Lokale Kraftregelung hydraulischer Aktoren . . . . .	19
<b>3 Stand der Technik und Methoden zur Regelung von Parallelkinematiken</b>	<b>25</b>
3.1 Regelungsansätze . . . . .	25
3.1.1 Basisreglerstrukturen . . . . .	26
3.1.2 Verschiedene Ansätze zur Reglersynthese für PKM . . . . .	28
3.2 Lösung des direkten kinematischen Problems . . . . .	33
3.2.1 Iterative Verfahren . . . . .	33
3.2.2 Direkte Messung . . . . .	34
3.2.3 Beobachtung aus den verfügbaren Messdaten . . . . .	35
3.3 Tabellarische Übersicht . . . . .	36
3.4 Handlungsbedarf . . . . .	38
3.5 Themeneingrenzung und Zieldefinition . . . . .	38
<b>4 Reglersynthese für PKM mit endlicher Dynamik und Stellgrößenbegrenzungen</b> . . . . .	<b>41</b>
4.1 Flachheitsbasierte Steuerungen und Regelungen für PKM mit sechs FHG	41
4.1.1 Realisierung im OS . . . . .	42

4.1.2 Realisierung im JS . . . . .	43
4.2 Regelungsentwurf unter Berücksichtigung der Aktordynamik im Zeit- und Frequenzbereich . . . . .	45
4.2.1 Vorgehensweise . . . . .	46
4.2.2 Anwendung auf das Zielsystem . . . . .	47
4.2.3 Zur Linearisierbarkeit der Regelstrecke . . . . .	55
4.3 Filterung der Solltrajektorie zur Vermeidung von Windup-Effekten . . . . .	58
4.3.1 Mehrgrößenzustandsfilter . . . . .	60
4.3.2 Modellgestütztes nichtlineares Führungfilter für PKM . . . . .	63
4.4 Simulationsbasierter Vergleich der Regelungen . . . . .	75
4.4.1 Streckenmodell und Simulationsnomenklatur . . . . .	75
4.4.2 Simulationen und Analysen . . . . .	76
4.4.3 Ergebnisse . . . . .	85
<b>5 Zustands- und Störbeobachtung für PKM . . . . .</b>	<b>87</b>
5.1 Beobachtbarkeit . . . . .	87
5.1.1 Definitionen und Kriterien . . . . .	87
5.1.2 Beobachtbarkeit von PKM für Beobachter im OS . . . . .	89
5.1.3 Beobachtbarkeit von PKM für Beobachter im JS . . . . .	90
5.2 Kalman-Bucy-Filter . . . . .	91
5.2.1 Grundlagen . . . . .	91
5.2.2 Zustands- und Störbeobachtung von PKM im OS . . . . .	95
5.2.3 Zustands- und Störbeobachtung im JS . . . . .	99
5.3 Sliding-Mode-Beobachter . . . . .	101
5.3.1 Grundlagen . . . . .	101
5.3.2 Zustands- und Störbeobachtung von PKM im OS . . . . .	105
5.3.3 Zustands- und Störbeobachtung im JS . . . . .	110
5.4 Simulationsbasierter Vergleich der Beobachter . . . . .	111
5.4.1 Setup, Beobachtersvarianten und Nomenklatur . . . . .	112
5.4.2 Simulationen und Analysen . . . . .	115
5.4.3 Ergebnisse . . . . .	124
<b>6 Beobachterbasierte Regelung . . . . .</b>	<b>127</b>
6.1 Simulationsbasierte Analyse . . . . .	127
6.1.1 Ideales System ohne Modellabweichungen . . . . .	127
6.1.2 System mit Modellabweichungen . . . . .	129
6.1.3 Einfluss von Sensor- und Verzögerungseffekten . . . . .	131
6.2 Validierung am Prüfstand . . . . .	134
6.3 Ergebnisse . . . . .	143
<b>7 Zusammenfassung und Ausblick . . . . .</b>	<b>145</b>
<b>Literaturverzeichnis . . . . .</b>	<b>147</b>

## Abkürzungsverzeichnis

CFC	Computed Force Control
CTC	Computed Torque Control
DKP	Direktes Kinematisches Problem
DMS	Dehnungsmessstreifen
fb	feedback
ff	feed forward
FHG	Freigheitsgrad/Freiheitsgrade
HiL	Hardware-in-the-Loop
IKP	Inverses Kinematisches Problem
JS	Joint Space
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MNF	Modellgestütztes Nichtlineares Führungsfilter
MZF	Mehrgrößenzustandsfilter
NL	Nichtlineares Übertragungsglied
OS	Operational Space
PKM	Parallelkinematische Maschine
SISO	Single Input Single Output
SMB	Sliding-Mode Beobachter
TCP	Tool Center Point