

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung	2
1.2 Beschreibung des Rotex-Projekts der D-2 Mission	3
1.3 Aufbau des Rotex-Roboters	4
1.3.1 Besonderheiten des Roboters	5
1.3.1.1 Folgen für das Systemverhalten	5
1.3.1.2 Folgen für das Regelungskonzept	6
1.3.1.3 Folgen für die Reglerauslegung	7
1.4 Beschreibung des Versuchsroboters	7
1.5 Regelungskonzepte in der Robotik	8
2. Modellbildung	12
2.1 Modellbildung einer Gelenkeinheit	12
2.1.1 Aufbau des Rotex-Gelenks	12
2.1.1.1 Motor und Getriebe	12
2.1.1.2 Meßaufnehmer	13
2.1.2 Konstruktion und Aufbau des Paderborner Gelenks	13
2.1.2.1 Motor und Getriebe	15
2.1.2.2 Meßaufnehmer	16
2.2 Getriebeversuchsstand	17
2.2.1 Funktionsweise eines Harmonic-Drive Getriebes	18
2.2.2 Bestimmung der Federkennlinie	19
2.2.3 Bestimmung der Reibung	21
2.2.3.1 Temperaturabhängigkeit der Reibung	22
2.2.3.2 Lastabhängigkeit der Reibung	23
2.2.3.3 Winkelabhängige Störmomente	25
2.2.4 Antriebsmodell	28
2.2.4.1 Frequenzgangsmessungen	29
2.2.4.2 Messungen im Zeitbereich	34
2.2.4.3 Modellgleichungen des Gelenkes	38
2.3 Aufstellung eines Gesamtmodells mit Hilfe von Entwurfswerkzeugen der Mechatronik	42
2.3.1 Modellbeschreibungssprache DSL	44
2.3.2 Mechanisches Modell	47
2.3.3 Verkopplung zum Gesamtmodell	50
2.3.4 Kurze Beschreibung der Analyse- und Synthesewerkzeuge	52
2.3.4.1 Parameteridentifikation durch Frequenzgangsangepassung	53
2.4 Folgerungen in Bezug auf die Regelung	57
2.4.1 Schlußfolgerungen aus dem Modell einer Gelenkeinheit	57
2.4.2 Schlußfolgerungen aus dem Gesamtmodell	58
3. Beobachterentwurf	59
3.1 Beobachtergestützte Regelungen in der Robotik	59
3.2 Prinzip der Störgrößenbeobachtung	60
3.2.1 Störbeobachtung ohne Störmodell	64
3.2.2 Störbeobachtung mit Integratorstörmodell	66
3.2.3 Störbeobachtung mit erweiterter Ausgangsgleichung	68
3.2.4 Bestimmung der Beobachterrückführverstärkungen	69
3.2.5 Vergleich der drei Verfahren zur Störbeobachtung	72

3.3 Störgrößenkompensation	77
3.3.1 Berechnung der statischen Kompensation	77
3.3.2 Berechnung des dynamischen Kompensationsfilters	78
3.4 Einsatz des linearen Beobachters an einer nichtlinearen Strecke	79
3.4.1 Parameterunterschiede zwischen Strecke und Beobachter	79
3.4.2 Kompensation von veränderlichen Streckenanteilen	81
4. Regelungsentwurf	85
4.1 Regelungsstruktur	85
4.1.1 Dezentrale Beobachter am Gesamtroboter	86
4.1.1.1 Entkoppelnde Wirkung durch dezentrale Beobachter	86
4.1.1.2 Dezentrale Beobachter mit Starrkörpermodell	90
4.1.2 Zustandsvektorrückführung	91
4.1.2.1 Stabilisierung und Schwingungsdämpfung	91
4.1.2.2 Simultane Auslegung von Beobachter- und Reglerrückführung	92
4.1.3 Führungsgrößenaufschaltung	95
4.1.3.1 Form der Führungsgrößen	95
4.1.3.2 Berechnung der Aufschaltverstärkungen	96
4.1.3.3 Auswirkungen von veränderlichen Streckenparametern	98
4.2 Anwendung des Konzepts auf einen hydraulischen Portalroboter	102
5. Reglerrealisierung und Messungen	105
5.1 Reglerrealisierung am Paderborner Roboter	106
5.1.1 Experiment zur Führungsgenauigkeit	108
5.1.1.1 Messungen mit Greiferlast	109
5.1.1.2 Messungen ohne Greiferlast	111
5.1.2 Experiment zur dezentralen Entkopplung	113
5.1.3 Bewertung der Ergebnisse	116
5.2 Reglerrealisierung am Rotex-Roboter	118
5.2.1 Spezielle Regelungsstruktur	118
5.2.2 Auslegung der Regelung	120
5.2.3 Inbetriebnahme der Regelung	120
5.3 Datenanalyse und Regloptimierung während der D-2 Mission	121
5.4 Messungen zu Experimenten während der D-2 Mission	122
5.4.1 Messungen mit ursprünglicher Regelung	123
5.4.2 Messungen mit nachoptimierter Regelung	125
5.4.3 Messungen bei geänderten Regler- und Beobachterstrukturen	126
5.4.4 Schlußfolgerungen aus den Rotex-Experimenten	129
6. Zusammenfassung und Ausblick	130
7. Anhang	133
A1: Konstruktion der Handachsen des Paderborner Roboters	133
A2: Konstruktion des Rotex Gelenks	134
A3: Koordinatensysteme und Denavit-Hartenberg-Parameter des Rotex-Roboters	135
A4: Dynamisches Modell des Rotex-Roboters	136
A4.1: Massenmatrixelemente des Rotex-Modells	136
A4.2: Modell in DSL-Darstellung	136
A5: Modelle der drei unterschiedlichen Störbeobachter	152
8. Literatur	159