

2810-9792

Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 8

Meß-, Steuerungs-
und Regelungstechnik

Katja Dauster,
Berlin

Nr. 925

**Prozeßangepaßte,
lernende
Roboterregelung für
Montageprozesse**

VDI Verlag

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung	2
1.2	Literaturüberblick	2
1.2.1	Roboterdynamik	3
1.2.2	Modellierung für Montageaufgaben	3
1.2.3	Sensorik und Prozeßbeobachtung	4
1.2.4	Roboterregelung	6
1.2.5	Optimierungsrechnung	8
1.3	Ziel und Aufbau der Arbeit	9
2	Modellbildung	11
2.1	Robotermodell	11
2.1.1	Mechanisches Ersatzmodell des Roboters	11
2.1.2	Mathematische Beschreibung des Robotermodells	13
2.2	Kontaktmodellierung	15
2.2.1	Modellierungsprinzipien	15
2.3	Regelungsgrundlagen für Montageprozesse	18
2.3.1	Linearisierung und Entkoppelung	18
2.3.2	Darstellung im Zustandsraum	20
3	Beschreibung der Versuchsanlage	21
3.1	Aufbau der Versuchsanlage	21
3.1.1	Hardwarebeschreibung	21
3.1.2	Programmbeschreibung der Steuerung	22
3.1.3	Hybrider Regelalgorithmus	25
3.1.4	Untersuchte Beispielprozesse	28

4	Prozeßbeobachtung	31
4.1	Erkennen von Kontaktzustandsänderungen	32
4.1.1	Indikatorfunktionen für Normalbindungen	33
4.1.2	Indikatorfunktionen für Tangentialbindungen	35
4.2	Einbindung der Sensorsignale	36
4.2.1	Beobachtung der Kinematik	36
4.2.2	Kraftsignalauswertung	38
4.2.3	Verknüpfung der Sensorsignale	41
4.2.4	Experimentelle Verifikation	43
4.3	Identifikation der Umgebungsparameter bei elastischen Bauteilen . . .	49
4.3.1	Rekursive Methode der kleinsten Fehlerquadrate	49
4.3.2	Identifikation veränderlicher Parameter	51
4.3.3	Identifikation des Werkzeuggewichts	53
5	Entwurf eines optimalen adaptiven Regelalgorithmus	54
5.1	Lineare Quadratische Reglerauslegung	54
5.1.1	Integrierte Kontaktmodellierung	54
5.1.2	Entwurf einer optimalen LQ-Regelung	57
5.1.3	Ergebnisse der optimalen LQ-Regelung bei konstantem Umgebungskontakt	59
5.1.4	Experimentelle Verifikation	65
5.2	Entwurf einer adaptiven Regelung	69
5.2.1	Regleradaption mit Bellman-Verfahren	70
5.2.2	Parameteradaption mit Lyapunov Stabilität	72
5.2.3	Experimenteller Vergleich verschiedener Verfahren für eine Adaption an das Werkzeuggewicht	74
5.2.4	Schnelle und Stabile Regleradaption bei Umgebungskontakt	76
5.2.5	Experimentelle Untersuchung der Adaption bei Umgebungskontakt	79
5.2.6	Zusammenfassung der vorgestellten adaptiven Reglerverfahren	83
6	Entwurf einer vorausschauenden Regelung	84
6.1	Prozeßmodellierung mit Vorausschau	85
6.2	Vorausschauende Regelung bei Kontaktzustandswechseln	88
6.2.1	Herleitung der Gleichungen für den Signalformer	88
6.2.2	Vorausschau der Sprunganregung	93

6.2.3	Experimentelle Verifikation	94
6.3	Vorausschauende Regelung im Kontakt	96
6.3.1	Vorausschauende Regelung mit geformter Anregung	96
6.3.2	Optimale vorausschauende Regelung mit Riccati-Entwurf	99
6.3.3	Experimentelle Umsetzung der Vorausschau	106
7	Lernende Regelung für Montageaufgaben	110
7.1	Erlernen unbekannter Prozeßanregungen	111
7.2	Lernen optimaler Trajektorien	114
7.2.1	Bestimmung der optimalen Startposition	114
7.2.2	Lernen eines optimalen Bahnpunktes	118
7.2.3	Lernen der optimalen Trajektorie	121
7.3	Experimentelle Ergebnisse der Bahnoptimierung	122
7.3.1	Lernen der optimalen Startposition	122
7.3.2	Lernen eines optimalen Bahnpunktes	123
7.3.3	Lernen der optimalen Trajektorie	125
8	Zusammenfassung	128
A	Rekursive Methode der kleinsten Fehlerquadrate	130
B	Allgemeine Stabilitätsbedingungen	132
B.1	Lyapunov Stabilität	132
B.2	Verfahren der eingefrorenen Eigenwerte	133
C	Fibonacci-Methode	134