

Dipl.-Ing. Uwe Martin Nassal, Karlsruhe

Bewegungskoordination und reaktive Steuerung autonomer mobiler Mehr- manipulatorsysteme

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

Nr. **593**

Inhaltsverzeichnis

1 EINLEITUNG	1
1.1 GLIEDERUNG DER ARBEIT	4
2 EINFÜHRUNG IN DIE PROBLEMSTELLUNG	5
2.1 AUTONOME SYSTEME	5
2.1.1 ROBOTERAUTONOMIE	5
2.1.2 ANWENDUNGEN AUTONOMER ROBOTER	6
2.1.3 OFFENE FRAGEN BEI DER STEUERUNG AUTONOMER ROBOTER	6
2.1.4 ZUSAMMENFASSUNG	7
2.2 MOBILE MEHRMANIPULATORSYSTEME	8
2.2.1 DEFINITIONEN	8
2.2.2 KOMBINATION VON BEWEGUNGSMODALITÄTEN.....	10
2.2.3 ZUSAMMENFASSUNG	11
2.3 MOBILISIERUNG DES AKTIONSRRAUMS	12
2.3.1 DEFINITION DES AKTIONSRRAUMS	13
2.3.2 ZEITLICHE KLASSIFIKATION DER AKTIONSRRAUMBEGWELICHKEIT	14
2.3.3 RÄUMLICHE KLASSIFIKATION DER AKTIONSRRAUMBEGWELICHKEIT.....	16
2.3.4 ZUSAMMENFASSUNG	17
2.4 PROBLEMSTELLUNG	18
2.4.1 BEWEGUNGSKOORDINATION	18
2.4.1.1 Endeffektorbewegungen bei Mehrmanipulatorsystemen	18
2.4.1.2 Kinematische Redundanz.....	21
2.4.2 STEUERUNG	23
2.4.2.1 Lose gekoppelte Systeme.....	24
2.4.2.2 Vollständig gekoppelte Systeme	25
2.4.2.3 Bedarf für ein neues Steuerungsparadigma	26
2.4.3 ZUSAMMENFASSUNG	26
2.5 ZIELSETZUNG UND INHALT DER ARBEIT	26

3 STAND DER FORSCHUNG	29
3.1 STEUERUNG KINEMATISCH REDUNDANTER SYSTEME	29
3.1.1 THEORIE KINEMATISCH REDUNDANTER SYSTEME.....	29
3.1.1.1 Grundlagen	30
3.1.1.2 Kinematische Redundanz positionsgesteuerter Systeme	31
3.1.1.3 Kinematische Redundanz geschwindigkeitsgesteuerter Systeme.....	34
3.1.2 GLOBALE VERFAHREN	36
3.1.3 LOKALE VERFAHREN.....	37
3.1.3.1 Pseudoinverse der Jacobi-Matrix.....	38
3.1.3.2 Erweiterung des Aufgabenraums	39
3.1.3.3 Inverse kinematische Funktionen	41
3.1.4 ZUSAMMENFASSUNG	42
3.2 STEUERUNG MOBILER MANIPULATOREN	43
3.2.1 BAHN- UND TRAJEKTORIENPLANUNG	43
3.2.2 DYNAMISCHE INTERAKTION VON MANIPULATOR UND MOBILER PLATTFORM.....	44
3.2.3 STEUERUNGSTECHNISCHE ASPEKTE	45
3.2.4 STABILITÄT MOBILER MANIPULATOREN	49
3.2.5 ZUSAMMENFASSUNG	49
3.3 ZUSAMMENFASSUNG UND BEWERTUNG	50
4 BEWEGUNGSKOORDINATION UND STEUERUNGSARCHITEKTUR	51
4.1 ANFORDERUNGEN UND VORAUSSETZUNGEN	51
4.2 BEWEGUNGSKOORDINATION	52
4.2.1 KINEMATIK MOBILER MEHRMANIPULATORSYSTEME.....	53
4.2.1.1 Positionsdarstellung	53
4.2.1.2 Geschwindigkeitsdarstellung.....	54
4.2.2 ANALYSE DER BEKANNTEN STEUERUNGSVERFAHREN	56
4.2.2.1 Pseudoinverse und Erweiterung des Aufgabenraumes.....	56
4.2.2.2 Inverse Kinematische Funktionen.....	57
4.2.2.3 Zusammenfassung.....	58
4.2.3 TRANSPARENTE KOPPLUNG.....	58
4.2.3.1 Konzept der transparenten Kopplung	59
4.2.3.2 Kinematische Entkopplung	61
4.2.3.3 Analyse im Konfigurationenraum	62
4.2.4 ZUSAMMENFASSUNG	64
4.3 ARCHITEKTUR DER STEUERUNG	64
4.3.1 VERTEILTHEIT	64
4.3.2 REAKTIVITÄT	69
4.3.3 ZUSAMMENFASSUNG	70
4.4 KOMPONENTEN DER REAKTIVEN VERTEILTEN STEUERUNG	71
4.4.1 STEUERUNG DES MANIPULATORSYSTEMS.....	71
4.4.1.1 Aufbau der Bewegungssteuerung eines Manipulators.....	71
4.4.1.2 Integration der kinematischen Entkopplung.....	72
4.4.2 STEUERUNG DER MOBILEN PLATTFORM	73

4.4.2.1 Bewertung der Manipulatorstellung	74
4.4.2.2 Bestimmung einer optimalen Bewegungsrichtung	75
4.4.2.3 Steuerung der mobilen Plattform und Steuerungsstruktur	77
4.4.3 KOLLISIONSVERMEIDUNG	80
4.4.3.1 Analyse des Kollisionsrisikos	80
4.4.3.2 Integration der Kollisionsvermeidung	81
4.4.3.3 Realisierung der Kollisionsvermeidung	82
4.4.3.4 Zusammenfassung	88
4.5 ZUSAMMENFASSUNG	88

5 REAKTIVE BEWEGUNGSSTEUERUNG

5.1 KOSTENFUNKTIONEN	90
5.1.1 GRUNDKOSTENFUNKTION	91
5.1.1.1 Gelenkwinkelgrenzen	91
5.1.1.2 Singularitäten	92
5.1.1.3 Kostenfunktion zur Vermeidung der Singularitäten	94
5.1.1.4 Zusammenfassung	98
5.1.2 ZUSÄTZLICHE KOSTENFUNKTIONEN	99
5.1.2.1 Allgemeine Richtlinien	99
5.1.2.2 Bewertung der Armmomente	100
5.1.2.3 Bewertung der Handgelenkmomente	101
5.1.3 ZUSAMMENFASSUNG	102
5.2 REAKTIVE FAHRZEUGSTEUERUNG	103
5.2.1 ANFORDERUNGEN	103
5.2.2 BERECHNUNG DES KOSTENGRADIENTEN	103
5.2.2.1 Analyse des Kostengradienten	104
5.2.2.2 Entkopplung von Rotation und Translation	107
5.2.3 AUSWAHL EINES REGELUNGSVERFAHRENS	107
5.2.3.1 Analyse der Regelstrecke	107
5.2.3.2 Einsatz einer Fuzzy-Regelung	108
5.2.4 REGELUNGSSTRATEGIEN UND REGLERSTRUKTUR	110
5.2.4.1 Gradientenverfolgung	110
5.2.4.2 Reglerumschaltung	111
5.2.4.3 Wahl der Ein- und Ausgangsgrößen	113
5.2.4.4 Zusammenfassung	114
5.2.5 ENTWURF DER KONFIGURATIONSREGLER	116
5.2.5.1 Schwellwertregler	116
5.2.5.2 Folgeregler	119
5.2.5.3 Bremsregler	122
5.2.6 ZUSAMMENFASSUNG	124
5.3 ZUSAMMENFASSUNG	125

6 VERSUCHSUMGEBUNG UND EXPERIMENTE	126
6.1 DIE VERSUCHSUMGEBUNG	126
6.1.1 DAS MOBILE ZWEIARMSYSTEM KAMRO	126
6.1.1.1 Aufbau der Steuerung des Robotersystems	128
6.1.2 HARDWAREREALISIERUNG DES STEUERUNGSSYSTEMS	129
6.1.2.1 Aufbau der Manipulatorsteuerung	129
6.1.2.2 Aufbau der Steuerung der mobilen Plattform	130
6.2 EXPERIMENTE	133
6.2.1 ABLAUF DER KOORDINIERTEN BEWEGUNGSAusFÜHRUNG	133
6.2.1.1 Unterstützung eines Manipulators	134
6.2.1.2 Unterstützung zweier unabhängiger Manipulatoren	135
6.2.1.3 Unterstützung einer gekoppelten Zweiarmbewegung	137
6.2.1.4 Zusammenfassung	137
6.2.2 QUANTITATIVE ANALYSE DER KOORDINIERTEN BEWEGUNGSAusFÜHRUNG	138
6.2.2.1 Grundkostenfunktion	138
6.2.2.2 Zusatzkostenfunktionen	145
6.2.2.3 Zusammenfassung	151
6.2.3 KOLLISIONSFREIE ARBEITSBEREICHERWEITERUNG	151
6.3 ZUSAMMENFASSUNG UND BEWERTUNG	153
7 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	155
ANHANG	159
ANHANG A PARAMETER DER FUZZY-REGELUNG	159
ANHANG B FRAMEDARSTELLUNG UND GESCHWINDIGKEITSTRANSFORMATION	162
ANHANG C KALIBRIERUNG DER ENTKOPPLUNGSMATRIX	168
LITERATUR	174