

M.Sc. Sheng Li, Karlsruhe

# **Verteilte Steuerung von kooperativen autonomen mobilen Robotern für Transportaufgaben**

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

Nr. **599**

# Inhaltverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1	Fahrerlose Transportsysteme .....	2
1.2	Dezentralisierung als Entwicklungsziel.....	3
1.3	Zielsetzung der Arbeit.....	5
1.4	Aufbau der Arbeit .....	6
<b>2</b>	<b>Stand der Forschung</b> .....	<b>8</b>
2.1	Überblick.....	8
2.2	Steuerung eines MRS.....	9
2.2.1	Zentrale Steuerung.....	9
2.2.2	Verteilte Steuerung .....	10
2.2.3	Hybride Steuerung .....	11
2.3	Kooperation der Aufgabenausführung.....	11
2.3.1	Verhaltensbasierte Verfahren .....	12
2.3.2	Master/Slave Verfahren .....	13
2.3.3	Zusammenfassung .....	14
2.4	Bewegungskoordination .....	15
2.4.1	Kollisionsvermeidung von Robotern .....	15
2.4.2	Auflösung von Verklemmungen.....	16
2.4.3	Zusammenfassung .....	16
2.5	Inter-Roboter-Kommunikation .....	17
2.6	Modellierung von MRS als Multi-Agenten-Systeme .....	18
2.6.1	Verteilte Künstliche Intelligenz .....	18
2.6.2	Relevante Ansätze der MAS.....	19
2.7	Offene Fragen und Forschungsbedarf.....	20
2.8	Zusammenfassung.....	21
<b>3</b>	<b>Aufgabenstellung: Verteilte FTS-Steuerung</b> .....	<b>22</b>
3.1	Das Szenario: Innerbetriebliche Transporte.....	22
3.2	Das Grundkonzept: Verteilte Ausführung .....	23
3.3	Rahmenbedingungen: autonome Navigation und IRK .....	28
3.4	Umfang der Arbeit .....	30
<b>4</b>	<b>SAKAR: Eine Steuerungsarchitektur für kooperative autonome Roboter</b> .....	<b>32</b>
4.1	Verhaltensbasierte Steuerungsarchitektur.....	32
4.2	Beschreibung der SAKAR .....	34
4.2.1	Kompetenzhierarchien der SAKAR .....	34
4.2.2	Reaktive Verhaltensweisen.....	34
4.2.3	Koordinative Verhaltensweisen.....	36
4.2.4	Kooperative Verhaltensweisen .....	37
4.3	Protokolle der Inter-Roboter-Kommunikation .....	39
4.4	Zusammenfassung.....	40
<b>5</b>	<b>Bewegungskoordination</b> .....	<b>42</b>
5.1	Aufgabenstellung der Koordination.....	42

5.1.1	Modellierung der Umgebung.....	42
5.1.2	Innerbetriebliche Verkehrsleitsysteme .....	43
5.1.3	Aufgaben der verteilten Bewegungskoordination .....	44
5.1.4	Zugrundeliegende Annahmen.....	45
5.2	Koordination von Roboterbewegungen .....	46
5.2.1	Kommunikation zur Koordination.....	47
5.2.2	Vorgehensweise der Koordination.....	48
5.2.3	Realisierung der Verhaltensweise: Auflösen von Konflikten.....	51
5.2.4	Diskussion der Methode .....	53
5.3	Auflösung von Verklemmungen.....	56
5.3.1	Routenumplanung zur Verkürzung von Wartezeiten .....	57
5.3.2	Auflösung einer Verklemmung .....	58
5.4	Zusammenfassung.....	63
<b>6</b>	<b>Kooperation zur Ausführung von Aufgaben.....</b>	<b>65</b>
6.1	Begriffe, Notationen und Annahmen.....	66
6.2	Aufbau der kooperativen Schicht.....	69
6.3	Kommunikation zur Kooperation .....	71
6.3.1	Kommunikation von Ausführungsinformationen.....	71
6.3.2	Verhandlungsprotokoll .....	73
6.3.3	Kommunikationsstrategien .....	75
6.4	Strategien zur verteilten Ausführung .....	75
6.4.1	Leistungsorientierte Auswahl-Strategie.....	76
6.4.2	Verzicht-Strategie zur Konfliktauflösung.....	77
6.4.3	Wechsel-Strategie zur fortführenden Ausführung.....	79
6.4.4	Konkurrenz-Strategie zur fehlertolerierenden Ausführung.....	80
6.5	Diskussion der Methode .....	81
6.5.1	Leistungskriterien bei den Auswahl-Strategien.....	81
6.5.2	Robustheit und Fehlertoleranz durch zeitliches Schließen .....	82
6.5.3	Leistungssteigerung durch Kooperation .....	83
6.5.4	Kommunikation zur verteilten RoboterAusführung.....	83
6.6	Zusammenfassung.....	84
<b>7</b>	<b>Implementierung und Ergebnisse.....</b>	<b>86</b>
7.1	Aufbau der Simulation.....	86
7.1.1	Das Simulationssystem MICE.....	86
7.1.2	Das simulierte Szenario .....	87
7.2	Grundlegende Simulationen.....	89
7.2.1	Untersuchte Systemsteuerungen.....	89
7.2.2	Bewertungsgrößen zur Leistungsanalyse.....	90
7.2.3	Konfigurationen der Simulationsabläufe .....	91
7.3	Ergebnisse der Simulation .....	92
7.3.1	Länge der Anschlußfahrwege .....	92
7.3.2	Wartezeiten von Aufträgen.....	97
7.3.3	Kommunikationsaufwand der verteilten Steuerungen.....	98
7.3.4	Vergleich der Leistungen der verteilten Steuerungen.....	100
7.3.5	Auswahl-Strategien und die kooperativen Strategien.....	103
7.3.6	Zurückhaltend- vs. Persistent-Strategie und Fehlertoleranz.....	106

7.4	Erweiterung zur Leistungsverbesserung .....	107
7.4.1	Verteilte Steuerung mit Unterstützung von globalen Informationen.....	108
7.4.2	Verteilte Auftragsplanung in einer Zentralsteuerung .....	110
7.5	Zusammenfassung.....	112
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>113</b>
<b>9</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>117</b>
9.1	Symbolverzeichnis.....	117
9.2	Glossar .....	120
<b>10</b>	<b>Literatur.....</b>	<b>122</b>