

# Informatik – Fachberichte

---

- Band 181: W. Hoepfner (Hrsg.), Künstliche Intelligenz. GWAI-88, 12. Jahrestagung. Eringerfeld, September 1988. Proceedings. XII, 333 Seiten. 1988.
- Band 182: W. Barth (Hrsg.), Visualisierungstechniken und Algorithmen. Fachgespräch, Wien, September 1988. Proceedings. VIII, 247 Seiten. 1988.
- Band 183: A. Clauer, W. Purgathofer (Hrsg.), AUSTROGRAPHICS '88. Fachtagung, Wien, September 1988. Proceedings. VIII, 267 Seiten. 1988.
- Band 184: B. Gollan, W. Paul, A. Schmitt (Hrsg.), Innovative Informations-Infrastrukturen. I.I.I. – Forum, Saarbrücken, Oktober 1988. Proceedings. VIII, 291 Seiten. 1988.
- Band 185: B. Mitschang, Ein Molekül-Atom-Datenmodell für Non-Standard-Anwendungen. XI, 230 Seiten. 1988.
- Band 186: E. Rahm, Synchronisation in Mehrrechner-Datenbanksystemen. IX, 272 Seiten. 1988.
- Band 187: R. Valk (Hrsg.), GI – 18. Jahrestagung I. Vernetzte und komplexe Informatik-Systeme. Hamburg, Oktober 1988. Proceedings. XVI, 776 Seiten.
- Band 188: R. Valk (Hrsg.), GI – 18. Jahrestagung II. Vernetzte und komplexe Informatik-Systeme. Hamburg, Oktober 1988. Proceedings. XVI, 704 Seiten.
- Band 189: B. Wolfinger (Hrsg.), Vernetzte und komplexe Informatik-Systeme. Industrieprogramm zur 18. Jahrestagung der GI, Hamburg, Oktober 1988. Proceedings. X, 229 Seiten. 1988.
- Band 190: D. Maurer, Relevanzanalyse. VIII, 239 Seiten. 1988.
- Band 191: P. Levi, Planen für autonome Montageroboter. XIII, 259 Seiten. 1988.
- Band 192: K. Kansy, P. Wißkirchen (Hrsg.), Graphik im Bürobereich. Proceedings, 1988. VIII, 187 Seiten. 1988.
- Band 193: W. Gotthard, Datenbanksysteme für Software-Produktionsumgebungen. X, 193 Seiten. 1988.
- Band 194: C. Lewerentz, Interaktives Entwerfen großer Programmsysteme. VII, 179 Seiten. 1988.
- Band 195: I. S. Bátori, U. Hahn, M. Pinkal, W. Wahlster (Hrsg.), Computeringuistik und ihre theoretischen Grundlagen. Proceedings. IX, 218 Seiten. 1988.
- Band 197: M. Leszak, H. Eggert, Petri-Netz-Methoden und -Werkzeuge. XII, 254 Seiten. 1989.
- Band 198: U. Reimer, FRM: Ein Frame-Repräsentationsmodell und seine formale Semantik. VIII, 161 Seiten. 1988.
- Band 199: C. Beckstein, Zur Logik der Logik-Programmierung. IX, 246 Seiten. 1988.
- Band 200: A. Reinefeld, Spielbaum-Suchverfahren. IX, 191 Seiten. 1989.
- Band 201: A. M. Kotz, Triggermechanismen in Datenbanksystemen. VIII, 187 Seiten. 1989.
- Band 202: Th. Christaller (Hrsg.), Künstliche Intelligenz. 5. Frühjahrsschule, KIFS-87, Günne, März/April 1987. Proceedings. VII, 403 Seiten. 1989.
- Band 203: K. v. Luck (Hrsg.), Künstliche Intelligenz. 7. Frühjahrsschule, KIFS-89, Günne, März 1989. Proceedings. VII, 302 Seiten. 1989.
- Band 204: T. Härder (Hrsg.), Datenbanksysteme in Büro, Technik und Wissenschaft. GI/SI-Fachtagung, Zürich, März 1989. Proceedings. XII, 427 Seiten. 1989.
- Band 205: P. J. Kühn (Hrsg.), Kommunikation in verteilten Systemen. ITG/GI-Fachtagung, Stuttgart, Februar 1989. Proceedings. XII, 907 Seiten. 1989.
- Band 206: P. Horster, H. Isselhorst, Approximative Public-Key-Kryptosysteme. VII, 174 Seiten. 1989.
- Band 207: J. Knop (Hrsg.), Organisation der Datenverarbeitung an der Schwelle der 90er Jahre. 8. GI-Fachgespräch, Düsseldorf, März 1989. Proceedings. IX, 276 Seiten. 1989.
- Band 208: J. Retti, K. Leidlmair (Hrsg.), 5. Österreichische Artificial-Intelligence-Tagung, Igls/Tirol, März 1989. Proceedings. XI, 452 Seiten. 1989.
- Band 209: U. W. Lipeck, Dynamische Integrität von Datenbanken. VIII, 140 Seiten. 1989.
- Band 210: K. Drost, Termersetzungssysteme. IX, 152 Seiten. 1989.
- Band 211: H. W. Meuer (Hrsg.), SUPERCOMPUTER '89. Mannheim, Juni 1989. Proceedings, 1989. VIII, 171 Seiten. 1989.
- Band 212: W.-M. Lippe (Hrsg.), Software-Entwicklung. Fachtagung, Marburg, Juni 1989. Proceedings. IX, 290 Seiten. 1989.
- Band 213: I. Walter, Datenbankgestützte Repräsentation und Extraktion von Episodenbeschreibungen aus Bildfolgen. VIII, 243 Seiten. 1989.
- Band 214: W. Görke, H. Sörensen (Hrsg.), Fehlertolerierende Rechensysteme / Fault-Tolerant Computing Systems. 4. Internationale GI/ITG/GMA-Fachtagung, Baden-Baden, September 1989. Proceedings. XI, 390 Seiten. 1989.
- Band 215: M. Bidjan-Irani, Qualität und Testbarkeit hochintegrierter Schaltungen. IX, 169 Seiten. 1989.
- Band 216: D. Metzger (Hrsg.), GWAI-89. 13th German Workshop on Artificial Intelligence. Eringerfeld, September 1989. Proceedings. XII, 485 Seiten. 1989.
- Band 217: M. Zieher, Kopplung von Rechnernetzen. XII, 218 Seiten. 1989.
- Band 218: G. Stiege, J. S. Lie (Hrsg.), Messung, Modellierung und Bewertung von Rechensystemen und Netzen. 5. GI/ITG-Fachtagung, Braunschweig, September 1989. Proceedings. IX, 342 Seiten. 1989.
- Band 219: H. Burkhardt, K. H. Höhne, B. Neumann (Hrsg.), Mustererkennung 1989. 11. DAGM-Symposium, Hamburg, Oktober 1989. Proceedings. XIX, 575 Seiten. 1989.
- Band 220: F. Stetter, W. Brauer (Hrsg.), Informatik und Schule 1989: Zukunftsperspektiven der Informatik für Schule und Ausbildung. GI-Fachtagung, München, November 1989. Proceedings. XI, 359 Seiten. 1989.
- Band 221: H. Schelhowe (Hrsg.), Frauenwelt – Computerräume. GI-Fachtagung, Bremen, September 1989. Proceedings. XV, 284 Seiten. 1989.
- Band 222: M. Paul (Hrsg.), GI – 19. Jahrestagung I. München, Oktober 1989. Proceedings. XVI, 717 Seiten. 1989.
- Band 223: M. Paul (Hrsg.), GI – 19. Jahrestagung II. München, Oktober 1989. Proceedings. XVI, 719 Seiten. 1989.
- Band 224: U. Voges, Software-Diversität und ihre Modellierung. VIII, 211 Seiten. 1989.
- Band 225: W. Stoll, Test von OSI-Protokollen. IX, 205 Seiten. 1989.
- Band 226: F. Mattern, Verteilte Basisalgorithmen. IX, 285 Seiten. 1989.
- Band 227: W. Brauer, C. Freksa (Hrsg.), Wissensbasierte Systeme. 3. Internationaler GI-Kongreß, München, Oktober 1989. Proceedings. X, 544 Seiten. 1989.
- Band 228: A. Jaeschke, W. Geiger, B. Page (Hrsg.), Informatik im Umweltschutz. 4. Symposium, Karlsruhe, November 1989. Proceedings. XII, 452 Seiten. 1989.
- Band 229: W. Coy, L. Bonsiepen, Erfahrung und Berechnung. Kritik der Expertensystemtechnik. VII, 209 Seiten. 1989.
- Band 230: A. Bode, R. Dierstein, M. Göbel, A. Jaeschke (Hrsg.), Visualisierung von Umweltdaten in Supercomputersystemen. Karlsruhe, November 1989. Proceedings. XII, 116 Seiten. 1990.
- Band 231: R. Henn, K. Stieger (Hrsg.), PEARL 89 – Workshop über Realzeitsysteme. 10. Fachtagung, Boppard, Dezember 1989. Proceedings. X, 243 Seiten. 1989.

## Informatik-Fachberichte 277

---

Herausgeber: W. Brauer

im Auftrag der Gesellschaft für Informatik (GI)

Ulrich Borgolte

# Flexible, realzeitfähige Kollisionsvermeidung in Mehrroboter-Systemen



**Springer-Verlag**

Berlin Heidelberg New York London Paris

Tokyo Hong Kong Barcelona Budapest

**Autor**

Ulrich Borgolte  
FernUniversität Hagen, ET/PRT  
Postfach 940, W-5800 Hagen 1

CR Subject Classification (1991): I.2.9, J.7

ISBN-13:978-3-540-54363-3      e-ISBN-13:978-3-642-76832-3  
DOI: 10.1007/978-3-642-76832-3

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, bei auch nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1991

Satz: Reproduktionsfertige Vorlage vom Autor

2133/3140-543210 – Gedruckt auf säurefreiem Papier

# Vorwort

Das Thema *Kollisionsvermeidung* wird in der Robotik in den letzten Jahren mit zunehmendem Interesse bearbeitet. Die steigenden Anforderungen an die Flexibilität von Roboteranwendungen auf der einen und der enorme Zuwachs an Rechenleistung auf der anderen Seite ließen es notwendig und möglich erscheinen Verfahren zu implementieren, die es Robotern gestatten, in veränderlichen oder sogar zunächst unbekanntem Umgebungen zu agieren. Für den industriellen Einsatz ist die Forschung dabei sowohl auf die langfristige Planung auch komplexer Bewegungsabläufe in determinierten Fertigungszellen als auch auf Effizienzgewinn und verbesserte Sicherheitsmechanismen bei Anwesenheit von sich stochastisch verändernden Objekten gerichtet. Der Schwerpunkt der Entwicklungen lag bisher bei den rechenaufwendigen Planungsverfahren, für die online-Anwendung gibt es nur wenige Ansätze. Die vorliegende Arbeit, die während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Prozeßsteuerung und Regelungstechnik im Fachbereich Elektrotechnik der FernUniversität Hagen entstand, befaßt sich mit dieser Problemstellung.

Dem Lehrstuhlinhaber, Herrn Professor Dr.-Ing. H. Hoyer, sage ich meinen ganz besonderen Dank für seine vielfältigen, wertvollen Anregungen, wohlwollende Förderung und kritische Durchsicht dieser Arbeit.

Herrn Professor Dr.-Ing. B. Walke danke ich für das Interesse, das er dieser Arbeit entgegengebracht hat, und für die Übernahme des Korreferates.

Herrn J. Tschuden danke ich für die sorgfältige Anfertigung der Zeichnungen.

Mein Dank gilt auch allen Kollegen, die mir durch ihre Kritik und stete Diskussionsbereitschaft sehr geholfen haben. Namentlich danke ich den Herren M. Gerke, M. Herrmann und A. Jochheim, die sich viel Zeit für das Korrekturlesen nahmen.

Dortmund, im März 1991

Ulrich Borgolte

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Koordinierter Betrieb und Kollisionsvermeidung</b>	<b>3</b>
2.1	Problemstellung . . . . .	4
2.2	Stand der Technik . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Ein Verfahren zur Kollisionsvermeidung in Mehrroboter-Systemen</b>	<b>9</b>
3.1	Konzeption einer Steuerung mit automatischer Kollisionsvermeidung . . . .	11
3.2	Erkennen der Kollisionsgefahr . . . . .	14
3.2.1	Konstruktion eines virtuellen Hindernisroboters . . . . .	21
3.2.1.1	Berechnung der Rotationslage für den VHR . . . . .	24
3.2.1.2	Berechnung der Translationslage für den VHR . . . . .	27
3.2.1.3	Bestimmung des Zustandsvektors für den VHR . . . . .	29
3.2.2	Berechnung der Parameter für die Kollisionsgefahr . . . . .	30
3.2.2.1	Berechnung des Parameters für die Rotation . . . . .	31
3.2.2.2	Berechnung des Parameters für die Translation . . . . .	32
3.3	Eine Strategie zur Kollisionsvermeidung zwischen zwei Robotern . . . . .	33
3.3.1	Strategie für die Rotation . . . . .	36
3.3.2	Strategie für die Translation . . . . .	40
3.3.3	Bestimmung des neuen Sollwert-Vektors . . . . .	43
3.4	Erweiterung des Verfahrens auf Mehrroboter-Systeme . . . . .	46
3.4.1	Gleichberechtigtes Fahren . . . . .	49
3.4.1.1	Bestimmung des Sollwertes für die Rotation . . . . .	50
3.4.1.2	Bestimmung des Sollwertes für die Translation . . . . .	54
3.4.1.3	Bestimmung des Sollwertvektors . . . . .	57
3.4.2	Bedingt prioritätsgesteuertes Fahren . . . . .	57
3.4.3	Unbedingt prioritätsgesteuertes Fahren . . . . .	58
3.5	Einbindung der Strategien in die Steuerung . . . . .	58

## VIII

3.6	Simulationen von Mehrroboter-Systemen . . . . .	60
3.6.1	Mehrroboter-System ohne Prioritätssteuerung . . . . .	62
3.6.2	Mehrroboter-System mit bedingter Prioritätssteuerung . . . . .	74
3.6.3	Mehrroboter-System mit unbedingter Prioritätssteuerung . . . . .	83
3.6.4	Kollisionsvermeidung mit ortsfesten Hindernissen . . . . .	90
3.7	Implementierung in einem Roboter-Programmiersystem . . . . .	93
<b>4</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>95</b>
	<b>Anhang</b>	<b>98</b>
A	Modell des betrachteten Robotertyps . . . . .	98
B	Parameter der Simulationen . . . . .	101
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>103</b>

# Verzeichnis der Bilder

1	Modell des verwendeten Robotertyps . . . . .	10
2	Struktur einer konventionellen Koordinierung . . . . .	12
3	Struktur einer online-Koordinierung . . . . .	13
4	Struktur des Kollisionsvermeidungs-Moduls . . . . .	15
5	System mit zwei Robotern . . . . .	16
6	Gemeinsamer Arbeitsbereich der Roboter $k$ und $j$ . . . . .	17
7	Geometrie des Roboters in der Grundebene . . . . .	18
8	Hinterer Ausleger im gemeinsamen Arbeitsbereich . . . . .	19
9	Bestimmung des minimalen Armabstands . . . . .	22
10	Armkonfiguration des VHR: $f_{kj}, e_{kj}$ . . . . .	23
11	Abstand $d_{kj}$ der Arm-Endpunkte . . . . .	25
12	Armkonfiguration des VHR: $0, k_{kj}$ . . . . .	26
13	Armkonfiguration des VHR: $f_{kj}, e_{kj}$ . . . . .	27
14	Armkonfiguration des VHR: $\psi'_{kj}, e_{kj}$ . . . . .	28
15	Armkonfiguration des VHR: $f_{kj}, k_{kj}$ . . . . .	29
16	Armkonfiguration des VHR: $\psi'_{kj}, k_{kj}$ . . . . .	30
17	Bestimmung der Kollisionsparameter . . . . .	32
18	Funktion des Rotations-Sicherheitsabstands . . . . .	34
19	Funktion des Translations-Sicherheitsabstands . . . . .	36
20	Konflikte in den Achs-Sollwerten . . . . .	49
21	Erweiterte Struktur einer online-Koordinierung . . . . .	59
22	Bedienoberfläche der Entwicklungsumgebung . . . . .	61
23	Beispiel mit zwei Robotern (gleichberechtigt) . . . . .	63
24	Beispiel mit drei Robotern (gleichberechtigt) . . . . .	67
25	Beispiel mit vier Robotern (gleichberechtigt) . . . . .	71
26	Beispiel mit zwei Robotern (bedingte Prioritäten) . . . . .	75
27	Beispiel mit drei Robotern (bedingte Prioritäten) . . . . .	78
28	Beispiel mit vier Robotern (bedingte Prioritäten) . . . . .	81
29	Beispiel mit zwei Robotern (unbedingte Prioritäten) . . . . .	84
30	Beispiel mit drei Robotern (unbedingte Prioritäten) . . . . .	87
31	Beispiel mit einem Roboter und einem Hindernis . . . . .	90
32	Kollisionsvermeidung im Roboter-Programmiersystem . . . . .	94

# Verzeichnis der Symbole

Bei Größen mit dem Index 'kj' handelt es sich, sofern nicht explizit anders angegeben, um einen Wert für den Roboter  $j$ , bezogen auf den Roboter  $k$ .

- $a_{kj}$  Verbindung der Ursprünge der Roboter  $k$  und  $j$
- $d_{kj}$  Abstand der Endpunkte der dritten Achsen der Roboter  $k$  und  $j$
- $d_{kj}^{min}$  Minimaler Abstand der Roboter  $k$  und  $j$
- $d_i^1$  Minimaler Abstand des Roboters mit dem dichtesten Sollwert in positiver Drehrichtung zum Roboter  $i$
- $d_i^2$  Minimaler Abstand des Roboters mit dem dichtesten Sollwert in negativer Drehrichtung zum Roboter  $i$
- $d_i^3$  Minimaler Abstand des Roboters mit dem minimalen Sollwert der dritten Achse zum Roboter  $i$
- $d_i^4$  Minimaler Abstand des Roboters mit dem maximalen Sollwert der dritten Achse zum Roboter  $i$
- $\dot{d}_i^1$  Veränderung von  $d_i^1$  über die Zeit
- $\dot{d}_i^2$  Veränderung von  $d_i^2$  über die Zeit
- $\dot{d}_i^3$  Veränderung von  $d_i^3$  über die Zeit
- $\dot{d}_i^4$  Veränderung von  $d_i^4$  über die Zeit
- $e_{kj}$  Abstand des Ursprungs des Roboters  $j$  zum Endpunkt der dritten Achse des Roboters  $k$
- $f_{kj}$  Winkel zwischen  $a_{kj}$  und  $e_{kj}$
- $k_{kj}$  Lot vom Ursprung des Roboters  $j$  auf den Arm des Roboters  $k$
- $l_{kj}$  Lot vom Endpunkt der dritten Achse des Roboters  $j$  auf die dritte Achse des Roboters  $k$
- $\min(X)$  Kleinstes Element der Menge  $X$
- $\mathcal{N}(\alpha)$  Winkel-Normierungsfunktion:  $\alpha \rightarrow [-\pi, +\pi]$
- $r_i^l$  Länge der dritten Achse des Roboters  $i$
- $r_i^{max}$  Maximale Ausfahrlänge der dritten Achse des Roboters  $i$
- $r_i^{min}$  Minimale Ausfahrlänge der dritten Achse des Roboters  $i$
- $r_i$  Lagewert der dritten Achse des Roboters  $i$
- $r_i^h$  Minimaler Sollwert für die dritte Achse des Roboters  $i$
- $r_i^r$  Maximaler Sollwert für die dritte Achse des Roboters  $i$

$r_i^s$	Sollwert der dritten Achse des Roboters $i$
$r_{kj}$	Lagewert der dritten Achse des virtuellen Hindernisroboters
$r'_{kj}$	Lokal modifizierter Lagewert der dritten Achse des Roboters $j$
$r_{kj}^b$	Beschränkter Ausweichwert der dritten Achse des Roboters $j$
$r_{kj}^n$	Normaler Ausweichwert der dritten Achse des Roboters $j$
$r_{kj}^{ts}$	Lokal modifizierter Sollwert der dritten Achse des Roboters $j$
$r_{kj}^v$	Vorsichtiger Ausweichwert der dritten Achse des Roboters $j$
$\dot{r}_i$	Geschwindigkeit der dritten Achse des Roboters $i$
$\dot{r}_i^{max}$	Maximale Geschwindigkeit der dritten Achse des Roboters $i$
$\dot{r}_{kj}$	Geschwindigkeit der dritten Achse des virtuellen Hindernisroboters
$\dot{r}'_{kj}$	Lokal modifizierte Geschwindigkeit der dritten Achse des Roboters $j$
$\ddot{r}_i^{nom}$	Nominelle Beschleunigung der dritten Achse des Roboters $i$
$\bar{r}_i$	Einzuregelnder Sollwert der dritten Achse des Roboters $i$
$\bar{r}'_i$	Sollwert der dritten Achse des Roboters $i$ bei Widerspruch
$\tilde{r}_{kj}$	Modifizierter Sollwert der dritten Achse des Roboters $j$
$\tilde{r}_{kj}^e$	Einziehender Ersatzwert der dritten Achse des Roboters $j$
$\hat{r}_{kj}$	Kollisionsvermeidender Wert der dritten Achse des Roboters $j$
$\text{sign}(x)$	Signum- (Vorzeichen-) Funktion
$t_n$	Zeitpunkt der Berechnung
$t_{n-1}$	Ein Sollwert-Takt vor dem Zeitpunkt der Berechnung
$t_{kj}^b$	Zeit zum Beschleunigen der dritten Achse auf $-\dot{r}_j^{max}$
$t_{kj}^m$	Zeit für Fahrt der dritten Achse mit $-\dot{r}_j^{max}$
$\underline{w}_i^s$	Sollwertvektor des Roboters $i$
$\underline{w}_i^{ts}$	Einzuregelnder Sollwertvektor des Roboters $i$
$\underline{w}_{kj}^s$	Modifizierter Sollwertvektor des Roboters $j$
$x_i$	X-Koordinate des Roboters $i$ im globalen Koordinatensystem
$\underline{x}_i$	Zustandsvektor des Roboters $i$
$\underline{x}_{kj}$	Zustandsvektor des virtuellen Hindernisroboters
$y_i$	Y-Koordinate des Roboters $i$ im globalen Koordinatensystem
$z_i$	Lagewert der zweiten Achse des Roboters $i$

- $z_i^s$  Sollwert der zweiten Achse des Roboters  $i$   
 $\dot{z}_i$  Geschwindigkeit der zweiten Achse des Roboters  $i$   
 $\gamma_{kj}$  Vorzeichen der Winkeldifferenz  $\Delta\varphi_{kj}$   
 $\delta r_i^{max}$  Maximaler Sicherheitsabstand für die dritte Achse des Roboters  $i$   
 $\delta\varphi_i^{max}$  Maximaler Sicherheitsabstand für die erste Achse des Roboters  $i$   
 $\delta r_{kj}$  Aktueller Sicherheitsabstand für die dritte Achse des Roboters  $j$   
 $\delta\varphi_{kj}$  Aktueller Sicherheitsabstand für die erste Achse des Roboters  $j$   
 $\Delta t$  Sollwert-Takt  
 $\Delta r_{kj}$  Längendifferenz  $r_{kj} - r'_{kj}$   
 $\Delta\varphi_{kj}$  Winkeldifferenz  $\phi_{kj} - \psi_{kj}$   
 $\dot{\Delta}r_{kj}$  Veränderung von  $\Delta r_{kj}$  über die Zeit  
 $\dot{\Delta}\varphi_{kj}$  Veränderung von  $\Delta\varphi_{kj}$  über die Zeit  
 $\theta\varphi'_{kj}$  Winkeldifferenz virtueller Hindernisroboter -  $\varphi'_{kj}$   
 $\theta\tilde{\varphi}'_{kj}$  Winkeldifferenz virtueller Hindernisroboter -  $\tilde{\varphi}'_{kj}$   
 $\sigma_{kj}$  Vorzeichen des Endpunktes der dritten Achse des Roboters  $j$   
 $\tau_{kj}$  Vektor der Kollisionsgefahr des Roboters  $j$   
 $\tau r_{kj}$  Kollisionsgefahr in der dritten Achse des Roboters  $j$   
 $\tau z_{kj}$  Kollisionsgefahr in der zweiten Achse des Roboters  $j$   
 $\tau\varphi_{kj}$  Kollisionsgefahr in der ersten Achse des Roboters  $j$   
 $\varphi_i$  Lagewert der ersten Achse des Roboters  $i$   
 $\varphi_i^g$  Verdrehung des lokalen Koordinatensystems des Roboters  $i$  gegenüber dem globalen Koordinatensystem  
 $\varphi_i^{n+}$  Modifizierter Sollwert des Roboters  $i$  in negativer Drehrichtung mit kleinster Differenz  
 $\varphi_i^{n-}$  Modifizierter Sollwert des Roboters  $i$  in negativer Drehrichtung mit größter Differenz  
 $\varphi_i^{p+}$  Modifizierter Sollwert des Roboters  $i$  in positiver Drehrichtung mit größter Differenz  
 $\varphi_i^{p-}$  Modifizierter Sollwert des Roboters  $i$  in positiver Drehrichtung mit kleinster Differenz  
 $\varphi_i^s$  Sollwert der ersten Achse des Roboters  $i$   
 $\varphi_{kj}$  Winkel des Koordinatensystems des Roboters  $j$  bezogen auf  $a_{kj}$

### XIII

$\varphi'_{kj}$	Lokal modifizierter Lagewert der ersten Achse des Roboters $j$
$\varphi^i_{kj}$	Interpolierter Ausweichwert der ersten Achse des Roboters $j$
$\varphi^n_{kj}$	Normaler Ausweichwert der ersten Achse des Roboters $j$
$\varphi^v_{kj}$	Vorsichtiger Ausweichwert der ersten Achse des Roboters $j$
$\varphi'^s_{kj}$	Lokal modifizierter Sollwert der dritten Achse des Roboters $j$
$\dot{\varphi}_i$	Geschwindigkeit der ersten Achse des Roboters $i$
$\dot{\varphi}_i^{max}$	Maximale Geschwindigkeit der ersten Achse des Roboters $i$
$\ddot{\varphi}_i^{nom}$	Nominelle Beschleunigung der ersten Achse des Roboters $i$
$\bar{\varphi}_i$	Einzuregelnder Sollwert der ersten Achse des Roboters $i$
$\bar{\varphi}'_i$	Sollwert der ersten Achse des Roboters $i$ bei Widerspruch
$\tilde{\varphi}_{kj}$	Modifizierter Sollwert der ersten Achse des Roboters $j$
$\tilde{\varphi}'_{kj}$	Zwischenwert für die Berechnung von $\tilde{\varphi}_{kj}$
$\hat{\varphi}_{kj}$	Kollisionsvermeidender Sollwert der ersten Achse des Roboters $j$
$\phi_{kj}$	Winkel der dritten Achse des Roboters $j$ , auf $a_{kj}$ bezogen
$\psi_{kj}$	Lagewert der ersten Achse des virtuellen Hindernisroboters
$\psi'_{kj}$	Winkel zwischen $a_{kj}$ und der Verbindung des Ursprungs des Roboters $j$ zum Fußpunkt des Lotes $l_{kj}$
$\dot{\psi}_{kj}$	Geschwindigkeit der ersten Achse des virtuellen Hindernisroboters
<p> <math>\vee</math> Logisches 'oder'  <math>\wedge</math> Logisches 'und'  <math>\neg</math> Logisches 'nicht'  <math>\bigvee</math> Es gibt (mindestens) ein  <math>\bigwedge</math> Für alle  <math>\Leftrightarrow</math> Genau dann, wenn  <math>:=</math> wird definiert als         </p>	