

Forschungsberichte Montagetechnik und -organisation

Herausgeber: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rainer Müller

Matthias Vette-Steinkamp

Band 1

Rekonfigurierbares Robotersystem für die Montage von flächigen Flugzeugstrukturbauteilen



**SHAKER
VERLAG**

Ze/MA

Rekonfigurierbares Robotersystem für die Montage von flächigen Flugzeugstrukturbauteilen

Reconfigurable Robot System for the Assembly of Large Aircraft Structure Shells

Von der Fakultät für Maschinenwesen
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Matthias Vette-Steinkamp geb. Vette

Berichter:

Honorarprofessor Dr.-Ing. Rainer Müller
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. (UPT) Burkhard Corves

Tag der mündlichen Prüfung: 14.05.2018

Forschungsberichte Montagetechnik und -organisation

Band 1

Matthias Vette-Steinkamp

**Rekonfigurierbares Robotersystem für die Montage
von flächigen Flugzeugstrukturbauteilen**

Shaker Verlag
Aachen 2018

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2018)

Copyright Shaker Verlag 2018

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6005-8

ISSN 2512-6369

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Montagetechnik des Werkzeugmaschinenlabors WZL der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen sowie in der Gruppe Montageverfahren und -automatisierung des ZeMA – Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik gemeinnützige GmbH in Saarbrücken.

Ich möchte vor allem meinem Doktorvater und Förderer Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rainer Müller, Lehrstuhlleiter und wissenschaftlicher Geschäftsführer des ZeMA, für das entgegengebrachte Vertrauen, die fachliche Unterstützung sowie den konstruktiven Gesprächen während meiner Promotionszeit danken.

Weiterhin danke ich Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Burkhard Corves, dem Leiter des Instituts für Getriebetechnik, Maschinendynamik und Robotik der RWTH Aachen, für die Übernahme des Korreferats. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Robert Heinrich Schmitt und Prof. Dr.-Ing. Mathias Hüsing danke ich für die Übernahme des Vorsitzes bzw. Beisitzes während meiner Doktorprüfung.

Recht herzlich bedanke ich mich bei meinen Wegbegleitern am WZL und ZeMA sowie Projektpartnern aus Industrie- und Forschungsprojekten nicht nur für die vielen fachbezogenen Diskussionen und Ratschläge, sondern auch für das inspirierende Arbeitsumfeld und für viel Spaß bei der Arbeit. Insbesondere möchte ich Dr.-Ing. Martin Esser und Dr.-Ing. Markus Janßen danken, die mich bei den ersten Schritten dieser Dissertation begleitet und einen Grundstein für diese Arbeit gelegt haben.

Für die kritische Durchsicht der Arbeit und die vielen Korrekturhinweise bedanke ich mich bei Leonie Schirmer, Christoph Speicher, Verena Milde und Karoline Westrich. Des Weiteren möchte ich mich bei Dr.-Ing. Stefan Quinders, Dr.-Ing. Martin Riedel, Dr.-Ing. Jan Eilers, Leenhard Hörauf, Aaron Geenen, Tobias Masiak, Ali Kanso, Ortwin Mailahn, Martin Burkhard, Jan Ball, Johannes Prechtel, Constantin Cristea, Axel Schnier, Raimund Loser, Christel Schwab und Dr.-Ing. Taoufik Mbarek für die inhaltliche Projektarbeit und den Demonstratorbau bedanken.

Schließlich möchte ich all denen Dank sagen, die mich während meiner Promotionszeit auch außerhalb des beruflichen Umfeldes begleitet haben, im Besonderen meinen Eltern und Geschwistern für die immerwährende Unterstützung und meiner Frau Susanne für ihre große Geduld und ihre Hilfe.

Saarbrücken im Mai 2018

Matthias Vette-Steinkamp

Kurzfassung

Der Produktionsstandort Deutschland sieht sich einer tiefgreifenden Veränderung gegenüber. Verkürzte Entwicklungszeiten und eine zunehmende Anzahl an Varianten bei gleichzeitig immer anspruchsvolleren Produkten und Technologien stellen die produzierenden Unternehmen, aber auch die Produktionsanlagenbauer vor neue Herausforderungen.

Besonders in der Flugzeugproduktion führt die Globalisierung dazu, dass die benötigten Bauteile und -gruppen in unterschiedlichen Werken verschiedener Länder vormontiert werden, wie man am Beispiel des Airbus Produktionsnetzwerkes sehen kann. Um die Produktfunktion nach der Montage zu garantieren, werden bis heute starre Vorrichtungen und enge Toleranzfelder für die Fertigung und Vormontage von Großbauteilen eingesetzt. Diese erfüllen durch definierte Schablonen und Formelemente neben der räumlichen Anordnung auch eine formgebende Funktion. Zur Einhaltung der geforderten Toleranzen bei der Montage von Großbauteilen sind die Vorrichtungen meist sehr massiv gebaut. Eine Skalierung der Produktion, eine Änderung am Bauteil oder der Technologien ist nur durch aufwendige Neukonstruktionen und Fertigung neuer Vorrichtungen möglich. Einen Lösungsansatz stellen wandlungsfähige Montagesysteme dar, die es dem Anwender erlauben, auf veränderte Produkte, schwankende Produktionsparameter als auch auf neue Technologien bedarfsgerecht reagieren zu können. Die Grundlage für solch ein wandlungsfähiges Montagesystem für Großbauteile ist ein rekonfigurierbares Robotersystem.

Am Anwendungsbeispiel „Positionierung des Bauteils“ in der Flugzeugstrukturmontage werden die Anforderungen und Randbedingungen von rekonfigurierbaren Robotersystemen für Großbauteile abgeleitet. Die vorliegende Arbeit leistet einen Beitrag, das Leistungspotenzial kooperierender Robotersysteme auszuschöpfen.

Ein weiterer Vorteil des rekonfigurierbaren Robotersystems ist die einfache Anlagenprojektierung, da Module aus einem Baukasten abgeleitet werden können. Das ermöglicht den Anlagenherstellern ein genaues Angebot schneller zu erstellen. Durch die Standardisierung entstehen weitere Kostenvorteile bei der Herstellung der Module.

Anhand von zwei Demonstratoren sowie einer realen Umsetzung in der Produktion wird die Funktion des rekonfigurierbaren Robotersystemen nachgewiesen und validiert, der Fortschritt gegenüber dem Stand der Technik aufgezeigt sowie ein Ausblick auf den zukünftigen Forschungsbedarf gegeben.

Abstract

The production site Germany is facing a far-reaching change. Shortened development times and an increasing number of variants while at the same time more demanding products and technologies are presenting new challenges for the manufacturing companies as well as for the production plant builders.

Especially in the aircraft production, the globalization leads to the fact that the required components and assembly groups are pre-assembled in different plants in various countries, as can be seen in the example of the Airbus production network. To guarantee the product function after the assembly, rigid devices and narrow tolerance fields are still used for the production and pre-assembly of large-scale components. Besides the spatial arrangement, they also fulfill a shaping function by defined templates and form elements. In order to meet the required tolerances for the assembly of large-scale components, the devices are usually built very solidly. A scaling of the production, a change at the component or the technologies is only possible by expensive new constructions and production of new devices. One solution approach are versatile assembly systems, which allow the user to react to changing products, fluctuating production parameters as well as to new technologies in a needs-based way. The basis for such a versatile assembly system for large-scale components is a reconfigurable robot systems.

The requirements and boundary conditions of reconfigurable robot systems for large-scale components are derived from the application example „positioning of the component“ in the aircraft structure assembly. The present work is intended to make a contribution to exploiting the performance potential of cooperating robot systems.

Another advantage of the reconfigurable robot system is the simple equipment design since the modules can be derived from a modular system. This allows the equipment manufacturers to quickly create an accurate offer in a faster way. By standardization, additional cost advantages arise during the production of the modules.

The demonstration and validation of the function of the reconfigurable robot system, the progress against the state of the art as well as an outlook on the future research need are demonstrated by two demonstrators as well as a real implementation in production.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	VI
Formelzeichen und Abkürzungsverzeichnis.....	VII
Formelzeichen	VII
Abkürzungen	X
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation und Bedarf für wandlungsfähige Montagesysteme	1
1.2 Zielsetzung.....	8
1.3 Aufbau der Arbeit	9
2 Stand der Technik in Forschung und Industrie	13
2.1 Begriffe und Definitionen	13
2.2 Grundlagen der Robotik	18
2.3 Produktbetrachtung und Szenario für rekonfigurierbare Montagesysteme.....	41
3 Planung von rekonfigurierbaren Montagesystemen auf Basis der Produktanforderungen und Toleranzen	49
3.1 Methodik zur Produktanalyse	49
3.2 Methodik zur Prozessanalyse	53
3.3 Methodik zur montagegerechten Produktgestaltung	56
3.4 Systemoptimierung	58
4 Konzeption eines rekonfigurierbaren Robotersystems für die Großbauteilmontage.....	63
4.1 Systemarchitektur	63
4.2 Mechatronisch durchgängige Modularisierung.....	65
4.3 Modulbaukasten für ein rekonfigurierbares Robotersystem	66
4.4 Assistenzsysteme für rekonfigurierbare Montagesysteme	72
5 Angepasstes Steuerungskonzept für rekonfigurierbare Robotersysteme.....	83
5.1 Steuerungsarchitektur eines rekonfigurierbaren Robotersystems.....	83
5.2 Anforderungen und Auswahl Bewegungssimulation	89
5.3 Simulations- und Steuerungsmodell.....	91
6 Assistenzsysteme für die Rekonfiguration und den Betrieb	97
6.1 Anforderungen an die Systemidentifikation	97
6.2 Methode zur Systemidentifikation für die Rekonfiguration und Inbetriebnahme	101

6.3 Methode zur Systemidentifikation für die Ausrichtung und Formkorrektur von Großbauteilen	112
7 Validierung des rekonfigurierbaren Robotersystems	117
7.1 Funktionsnachweis.....	117
7.2 Relevanz für die Industrie.....	123
7.3 Beantwortung der Forschungsfrage	125
7.4 Reflexion der Forschungsarbeit	126
8 Zusammenfassung und Ausblick.....	129
Literaturverzeichnis	xi
Liste der veröffentlichten Teilergebnisse.....	xviii
Im Rahmen der Dissertation betreute wissenschaftliche Arbeiten.....	xxiii
Lebenslauf.....	xxv

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Anforderungen an die wandlungsfähige Montagesystemtechnik in Anlehnung an [MUEL11].....	2
Abbildung 2: Wandlungsbefähiger für die Anpassung des Montagesystems an neue Ziele in Anlehnung an [NYHU07].....	3
Abbildung 3: Module eines Baukastensystems für z.B. Elektronikbauteil [Bild Bosch Rexroth AG].....	4
Abbildung 4: Demonstrator zur Validierung des rekonfigurierbaren Robotersystems	11
Abbildung 5: Aufgaben der Montage	14
Abbildung 6: Automatisierungspyramide [FELD14]	17
Abbildung 7: Abgrenzung der Flexibilität und Wandlungsfähigkeit [ZAEH05].....	18
Abbildung 8: Strukturen von Robotern Bild: Kuka Aktiengesellschaft, Fanuc.....	19
Abbildung 9: Achsen eines vertikalen Knickarmroboters	19
Abbildung 10: Einteilung der Kinematiken Anhand der regionalen Struktur [ZIEG09]	20
Abbildung 11: Bauarten von Handachsen Bild: Universal Robot, KUKA AG	20
Abbildung 12: Beschreibung eines Punktes durch Vektoren.	21
Abbildung 13: Verschiedene Koordinatensysteme eines Industrieroboters [WECK06]	22
Abbildung 14: Denavit-Hartenberg-Notation.....	24
Abbildung 15: Transformation kartesischer Positionsdaten in Achsinformationen [WECK06].....	26
Abbildung 16: koordinierter und kooperierender Betrieb von mehreren Robotern Bild: KUKA Aktiengesellschaft	28
Abbildung 17: Prinzipieller Aufbau von Robotersteuerungen für kooperierende Roboter.....	29
Abbildung 18: Übersicht Programmierverfahren [WECK06]	30
Abbildung 19: Verschiedene Interpolationsverfahren zur Generierung einer Roboterbahn.....	32
Abbildung 20: Gegenüberstellung asynchrone und vollsynchrone PTP Bewegung .	32
Abbildung 21: Bahnparameter s	33
Abbildung 22: Bestimmung des Mittelpunktes des Kreissegments.....	34
Abbildung 23: Systemgrenzen eines Industrieroboters [VDI2861].....	35
Abbildung 24: Kinematik des untersuchten Roboters [PRIT91].....	38
Abbildung 25: Darstellung einer Roboterzelle mit i-GPS	41
Abbildung 26: Aufbau des Passagierflugzeuges A350 Bild: Premium AEROTEC....	42
Abbildung 27: Darstellung einer Flugzeugsektion Bild: Premium AEROTEC	42
Abbildung 28: Dimensionen der Sektionen für A318- A321, A330/340 und A350 [MUEL13b].....	43
Abbildung 29: Schematischer Aufbau der Grundstruktur des Airbus A350	43
Abbildung 30: Pulse Motion Line Bild: Broetje-Automation GmbH	46
Abbildung 31: Darstellung einer Fließmontage von der Schalenmontage bis zur Sektionsmontage Bild: Premium AEROTEC	46

Abbildung 32: Beispiel für einstellbare Vorrichtungen Bild: PremiumAEROTEC.....	48
Abbildung 33: Programmierbare Vorrichtung zur Sektionsmontage Bild: Broetje-Automation GmbH.....	48
Abbildung 34: Vorgehensweise zur Planung von rekonfigurierbaren Montagesystemen.....	49
Abbildung 35: Zusammenhänge von Key Characteristics [SCHW10].....	51
Abbildung 36: Key Characteristic einer Flugzeugsektion.....	52
Abbildung 37: Verbaureihenfolge am Beispiel einer Flugzeugsektion.....	54
Abbildung 38: Sektionsmontage am Beispiel des A350.....	55
Abbildung 39: Darstellung einer vereinfachten Toleranzkette am Beispiel einer Fußbodenrostmontage.....	56
Abbildung 40: Kostenverteilung über den vereinfachten Produktlebenszyklus am Beispiel eines Haushaltsgerätes und einem Luftfahrzeug.....	57
Abbildung 41: Fertigung Nase und vorderer Rumpf Boing 787 [AINO16].....	58
Abbildung 42: Möglichkeiten zur Optimierung von Toleranzketten.....	59
Abbildung 43: Verkürzung der Toleranzkette durch Justage am Beispiel der Fußbodenrostmontage.....	62
Abbildung 44: Schematische Darstellung des rekonfigurierbaren Robotersystems [CORV11][RIED14].....	64
Abbildung 45: Stufen der Rekonfiguration am Beispiel des Demonstrators.....	65
Abbildung 46: Beispiel einer Konfiguration für ein Basismodul des Demonstrators..	68
Abbildung 47: Fußgestell und Verbinder des Demonstrators.....	69
Abbildung 48: Turmmodule des Demonstrators.....	69
Abbildung 49: Alternative Konfiguration.....	70
Abbildung 50: Handhabungsmodul Tripod 100 und flexible Vorrichtung 50 des Demonstrators.....	70
Abbildung 51: Handhabungsmodul Linearroboter 20 und Knickarmroboter 20 des Demonstrators.....	71
Abbildung 52: Kraftmessplatte und Greifer 25 des Demonstrators.....	71
Abbildung 53: Modulare Gestaltung der Schaltschränke zur einfachen Rekonfiguration in Anlehnung an [CORV11].....	72
Abbildung 54: Assistenz bei der Planung, Rekonfiguration und dem Produktivbetrieb von Montagestationen.....	73
Abbildung 55: Vorgehensweise zur Planung des rekonfigurierbaren Robotersystems.....	74
Abbildung 56: Lage der Greifpunkte (GP) und des Bauteilfesten Koordinatensystems in Abhängigkeit der Bauteilbahn in Anlehnung an [CORV11].....	76
Abbildung 57: Assistenzsystem zur Einrichtung des rekonfigurierbaren Robotersystems.....	79
Abbildung 58: Skizze zur Bestimmung eines Koordinatensystems mit drei Punkten 79	
Abbildung 59: Systemarchitektur des rekonfigurierbaren Robotersystems in Anlehnung an [CORV11].....	84
Abbildung 60: Darstellung der Betriebsarten eines Handhabungsmoduls.....	85
Abbildung 61: Darstellung der verteilten Systeme des Demonstrators.....	87

Abbildung 62: Aufbau eines Datenpakets am Beispiel eines Handhabungsmoduls .	88
Abbildung 63: Systemverhalten und Modellinhalt [LAST10]	91
Abbildung 64: Darstellung der verschiedenen Koordinatensysteme [WUES14]	93
Abbildung 65: Darstellung des geometrischen und des kinematischen Modells.....	93
Abbildung 66: Parametrierung der kinematischen Modelle in der Simulation und Robotersteuerung	94
Abbildung 67: Unterschiedliche Konfigurationen der gleichen Kinematik für das Anfahren einer Position	95
Abbildung 68: Prinzip der Systemidentifikation in Anlehnung an [CORV11].....	97
Abbildung 69: Prinzipieller Ablauf einer Kalibrierung [ROOS98].....	99
Abbildung 70: Einordnung der Messsysteme hinsichtlich Genauigkeit und Messvolumen	100
Abbildung 71: Darstellung des TCP-Traces für die Hauptachsen des Roboters	101
Abbildung 72: Prinzip der numerischen Kalibrierung des gesamten Roboters	102
Abbildung 73: Einfluss von Parameteränderungen auf die Orientierung und Position [MUEL96].....	104
Abbildung 74: Darstellung einer linearen Abhängigkeit und Linearkombination [NEUH90]	106
Abbildung 75:DH-Konvention bei annähernd parallelen Achsen [ROOS98].....	107
Abbildung 76: Eingabemaske für Basis- und Werkzeugtransformation	110
Abbildung 77: Parametrierung der kinematischen Modelle in der Robotersteuerung	110
Abbildung 78: Algorithmus zur Vorgabe manipulierter kartesischer Koordinaten [WIES01]	111
Abbildung 79: Darstellung unterschiedlicher Bauplätze für unterschiedliche Schalen [RALL04].....	112
Abbildung 80: Iteratives Ausrichtverfahren	113
Abbildung 81: Bestimmung der Pose durch Messung von drei Punkten mit dem Lasertracker.....	114
Abbildung 82: Bestimmung der Bauteilform durch Vermessung von Punkten am Rand des Bauteils	115
Abbildung 83: Entwicklungsumgebung am WZL [CORV11]	117
Abbildung 84 Modellierung nach DH-Konvention	122
Abbildung 85: Versuchsaufbau DÜRR Eco Positioner [MBAR11]	123
Abbildung 86: "Eco-Positioner" der Firma DÜRR am Beispiel der Sektionsmontage Bild: <i>Dürr Aircraft and Technology Systems</i>	124

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: DH-Parameter des Robotersystems	122
Tabelle 2: Offset nach Kalibrierung	123

Formelzeichen und Abkürzungsverzeichnis

Formelzeichen

Lateinische Kleinbuchstaben

d_i	Achslänge
$d_{i,i-1}$	Längenfehler
$d_{j,i}$	Translation vom Ursprung KS_i entlang z_i , die den Abstand der Ursprünge von KS_i und KS_j minimiert
${}^i \underline{e}_{jz}$	1. Einheitsvektor
${}^i \underline{e}_{jy}$	2. Einheitsvektor
${}^i \underline{e}_{jx}$	Fehlender Vektor
f_{Pos}	Positionsfehler
f_{Ori}	Orientierungsfehler
$\underline{f}(p)$	Fehlervektor
$\underline{f}(p, q)$	Fehlerfunktion
g_{jy}	Gerade
g_{jx}	Gerade
j	Gelenknummer
\underline{q}	Gelenkwinkelvektor
${}^i \underline{r}_p$	Ortsvektor
${}^o \underline{r}_{-i}, {}^o \underline{r}_{i+1}, {}^o \underline{r}_{i+2}$	Ortsvektoren
${}^k \underline{r}(s)$	Kreisgleichung
${}^w \underline{r}_{o_w, o_{GP}}$	Verbindungsvektor zwischen Greifpunkt und Weltursprung bzgl. der Welt KS
${}^i \underline{r}_{p21}$	Verbindungsvektor zwischen Punkt 1 und 2 bezüglich der KS_i
${}^i \underline{r}_{p31}$	Verbindungsvektor zwischen Punkt 1 und 3 bezüglich der KS_i
${}^0 \underline{r}_{\theta f}$	Lage der finalen KS bzgl. KS_0

${}^0 r_{\theta_{i-1}}$	Lage des Ursprungs der KS_{i-1} bzgl. KS_0
s	Bahnparameter
t_0	Zeitpunkt $t=0$
t_2	Zeitpunkt $t=2$
w_i	Anfangslage
w_{i+1}	Endlage
$\underline{w}(\lambda)$	Geradengleichung
$r^{(\lambda)}$	Geradensteigung
$\underline{w}^{n(\lambda)}$	Geradenkrümmung
$\underline{w}_{ist}(\underline{q})$	Lagevektor aus Messsystem
$\underline{w}(\underline{p}, \underline{q})$	berechneter Lagevektor
${}^i x$	i -ten X-Achse
x, y, z	Kartesische Koordinaten
${}^j z$	j -ten Gelenkachsen
${}^{i-1} z$	$(i-1)$ -ten Drehachse

Lateinische Großbuchstaben

${}^i \mathbf{A}_j$	Homogene Matrix
${}^0 \mathbf{A}_6$	Gesamttransformationsmatrix
${}^i \mathbf{B}_j$	Drehmatrix
${}^w \mathbf{D}_{Obj}$	Drehmatrix des bauteilfesten Koordinatensystems bzgl. Des Welt Koordinatensystems
${}^w \mathbf{D}_{GP}$	Drehmatrix des Greifpunktfesten Koordinatensystems bzgl. Des Welt Koordinatensystems
\mathbf{F}	Funktionalmatrix
$\mathbf{I}_{j,i}$	Translation in Richtung KS_j entlang x_i , sodass der Ursprung von KS_i möglichst nahe an den Ursprung von KS_j kommt bzw. mit ihm zusammenfällt
$\mathbf{I}_{i,i-1}$	Längenfehler
\mathbf{K}	Koordinatensystem

KS_{i-1}	Koordinatensystem der (i-1)-ten Glied
KS_i	Koordinatensystem des i-ten Glied
KS_j	j-ten Koordinatensystem
O_K	Kreismittelpunkt
O_f	Koordinatenursprung der finalen KS
P_i	Anfangspunkt der Kreis
P_{i+1}	Hilfspunkt der Kreis
P_{i+2}	Endpunkt der Kreis
${}^i T_j$	Transformationsmatrix
${}^W T_{GP}$	Transformationsmatrix der Greifpunkt Koordinatensystem bzgl. des Weltkoordinatensystems
${}^{Obj} T_{GP}, {}^{Gp} T_{Obj}$	Transformationsmatrix der Greifpunkt Koordinatensystem bzgl. des bauteilfesten Koordinatensystems und umgekehrt.
${}^W T_{Obj}, {}^{Obj} T_W$	Transformationsmatrix der bauteilfesten Koordinatensystem bzgl. des Weltkoordinatensystems und umgekehrt.
${}^{Basis} T_{Gp}$	Transformationsmatrix der Greifpunkt Koordinatensystem bzgl. Basiskoordinatensystems (Roboterbasis).

Griechische Buchstaben

$\lambda_{j,i}$	Kreuzungswinkel
d_i	Achslänge entlang der z_i
d_{i+1}	Achslänge entlang der z_{i+1}
ΔI_i	Parameterfehler entlang der x_{i+1}
ΔI_{i+1}	Parameterfehler entlang der x_{i+2}
$\delta_{j,i}$	Drehwinkel/ Rotationswinkel zwischen ${}^i x$ und ${}^i x$ um die Gelenkachse ${}^i z$
$\lambda_{j,i}$	Kreuzungswinkel zwischen den Gelenkachsen ${}^i z$ und ${}^j z$, gemessen um die Achse ${}^i x$ des Gelenkes j
$\lambda_{f,f-1}$	Kreuzungswinkel zwischen den Gelenkachsen ${}^{f-1} z$ und ${}^f z$, gemessen um die Achse ${}^f x$ des Gelenkes f

Abkürzungen

ADM	Absolut Distance Method
AKC	Assembly Key Characteristics
API	application programming interface
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BRIC	Brasilien, Russland, Indien, China
CAD	Computer-aided design
CFK	carbonfaserverstärkter Kunststoff
CIR	Zirkularinterpolation
CP	Continuous Path
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DH-Konvention	Denavit und Hartenberg Konvention
dll	Dynamic Link Library
FG	Fußbodenrost
FiFo	First in first out
GP	Greifpunkt
GPS	Global Positioning System
HIL	Hardware in the Loop
IGM	Institut für Getriebetechnik und Maschinendynamik der RWTH Aachen
I-GPS	Indoor-GPS
IProGro	Innovative Produktionstechnologien für Großbauteile
KC	Key Characteristics
LIN	Linearinterpolation
MKC	Manufacturing Key Characteristics
MP	Multi Point
OEM	Original Equipment Manufacturer
OO	Objektorientierung
OZ	Ordnungszustand
PKC	Performance Key Characteristics
PTP	Point to Point R Rotatorisch
REFA	Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung
RePlaMo	Rekonfigurierbare Plattformkonzepte für die Montage
SPS	speicherprogrammierbare Steuerung
SSL	Seitenschale links
SSR	Seitenschale rechts T Translatorisch
TCP	Tool-Center-Point
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol
US	Unterschale
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WZL	Werkzeugmaschinenlabor der RWTH-Aachen
ZeMA	Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik