10 Verzeichnis der verwendeten Symbole, Bezeichnungen und grundlegenden Definitionen

10.1 Abkürzungen

BKS	Basiskoordinatensystem des Industrieroboters
DH	Denavit-Hartenberg
GKS	Gelenkkoordinatensystem
IR	Industrieroboter
KK	Kalibrierkörper
KKS	Kalibrierkörperkoordinatensystem
KMM	Koordinatenmeßmaschine
KS	Koordinatensystem
LVDT	Linear-Variable Differential Transformer (induktiver Wegaufnehmer)
MK	Meßkopf
MKKS	Koordinatensystem des Meßkopfes
MPKS	Koordinatensystem eines Meßpunktes
RPY	Roll-Pitch-Yaw
SCARA	Selective Compliance Assembly Robot Arm
TCP	Tool-Center-Point
TCPKS	Koordinatensystem des Tool-Center-Point

10.2 Formelzeichen

Kleinbuchstaben mit Vektorpfeilen bezeichnen Vektoren, wobei in dieser Arbeit ausschließlich Spaltenvektoren benutzt werden. Kleinbuchstaben ohne Vektorpfeil bezeichnen demgegenüber Skalare. Durch Großbuchstaben sind typischerweise Matrizen bezeichnet, die zugeordneten Kleinbuchstaben bezeichnen dann die Spaltenvektoren dieser Matrizen.

A	Homogene Transformationsmatrix zur Beschreibung eines Gelenkübergangs
AP	Pose-Genauigkeit in einer Richtung nach DIN EN 29283
$\vec{a}$	Vektor mehrerer Abstände
a	Anzahl der Glieder eines Industrieroboters
B	Hilfsmatrix

	Orthogonale Transformationsmatrix
C	Systemmatrix einer linearen Transformation; oft durch Linearisierung gewonnen (Jacobimatrix)
$C_{\bar{s}_0}$	Systemmatrix zur Simulation der Pose-Wiederholgenauigkeit
d	Parameteranzahl
	Abstand für Hesse-Normalform
d_{min}	Minimale Parameteranzahl
E_{xy}, E_{yz}, E_{zx}	Ebenengleichungen
$\vec{f}(\vec{x})$	Allgemeine Funktion
$\vec{f}(\vec{p},\vec{x})$	Modellfunktion
g	Anzahl der Gelenke eines Industrieroboters
g_{Dreh}	Anzahl Drehgelenke
g_{Schub}	Anzahl Schubgelenke
I	Homogene Kalibrierkörpertransformation
h_3	Stellwert der Hubachse
i	Zählvariable
	Getriebeübersetzung
j	Zählvariable
K_i	Koordinatensystem i
K	Homogene Meßkopftransformation
KM	Homogene Transformation vom Meßpunkt zum Tool-Center-Point
k	Anzahl Messungen zur Parameteridentifikation
	Zählvariable
L	Länge in mm zur Beschreibung der Genauigkeit von Koordinatenmeßmaschinen
l	Abstand zur Pose-Wiederholgenauigkeitsauswertung
	Größe zur Parameteridentifikation
M	Homogene Meßtransformation
m	Dimension von Matrizen oder Vektoren (Eingangsvektor)
N	Matrix zur Beschreibung des Nullraums
	Drehmatrix
$\vec{n}$	Normalenvektor
n	Dimension von Matrizen oder Vektoren (Ausgangsvektor)
$\vec{o}$	Ortsvektor
$\vec{p}$	Parametervektor
q, $\vec{q}$	Qualität
R	Homogene Raumtransformation

PR	Pose-Wiederholgenauigkeit in einer Richtung nach DIN EN 29283
R_x	Drehmatrix einer Drehung um die x-Achse
R_y	Drehmatrix einer Drehung um die y-Achse
R_z	Drehmatrix einer Drehung um die z-Achse
	gemittelte Rauhtiefe
ROT	Drehmatrix
$\vec{r}$	Residuenvektor
	Realisierungsvektor bei der Monte-Carlo-Rechnung
r	Rang der Systemmatrix
S	Matrix der singulären Werte
s	Singulärwert
$\vec{s}$	Stellwertvektor
T	Homogene Transformationsmatrix zur Beschreibung der Kinematik eines Industrieroboters
T_x	Translationsmatrix entlang der x-Achse
T_y	Translationsmatrix entlang der y-Achse
T_z	Translationsmatrix entlang der z-Achse
$\vec{t}$	Verschiebe- oder Translationsvektor
	Tasternullpunkte
U	Orthogonale Matrix der Singulärwertzerlegung (Linkssingulärmatrix)
	Umkehrspanne
U_3	Dreidimensionale Meßunsicherheit einer Koordinatenmeßmaschine nach VDI-Richtlinie 2617
u	Unsicherheit
V	Orthogonale Matrix der Singulärwertzerlegung (Rechtssingulärmatrix)
W	Gewichtungsmatrix
$\vec{w}$	Wiederholgenauigkeitsvektor
$\vec{x}$	Modelleingangsvektor
x	Koordinate in x-Richtung
$\vec{y}$	Modellausgangsvektor
y	Koordinate in y-Richtung
z	Koordinate in z-Richtung
α	Winkel zwischen der großen Hauptachse und dem Basiskoordinatensystem zur Auswertung der Pose-Wiederholgenauigkeiten
δ^2	Charakterisierung der Größe eines Ellipsoids

θ	Drehwinkel einer Drehung um eine y-Achse
κ	Kondition einer Matrix
Λ	Diagonalmatrix der Eigenwerte einer Matrix
λ^2	Eigenwert einer Matrix
μ	Erwartungswert, Mittelwert
νAP	Streuung der Mehrfachrichtungspose-Genauigkeit nach DIN EN 29283
Σ	Kovarianzmatrix
σ	Standardabweichung
ϕ	Drehwinkel einer Drehung um eine z-Achse
$\varphi_1,\varphi_2,\varphi_4$	Stellwinkel einer Drehachse
χ^2	χ^2-Verteilung
ψ	Drehwinkel einer Drehung um eine x-Achse

10.3 Hoch- und tiefgestellte Indizes

Neben den aufgeführten Abkürzungen und Formelzeichen treten noch folgende hoch- und tiefgestellte Indizes auf:

A	Stellwert einer Achse
G	Getriebe
GH	Getriebe Hubachse (Achse 3)
GZ	Getriebe Handachse (Achse 4)
HA	Hauptachse
HD	Harmonic Drive Getriebe
KMM1	Koordinatenmeßmaschine zur Vermessung des Meßkopfes
KMM2	Koordinatenmeßmaschine zur Vermessung des Kalibrierkörpers
LJ	Länge Justierstift
M	Modell
MJ	Montage Justierstift
MP	Meßpunkt
N	Normalenvektor
O	Ortsvektor
PG	Planetengetriebe
p	Vermessener Punkt
R	Realität, meist aus Messungen gewonnen
Rot	Rotation, Drehung
rel	relativ

Rauh	Oberflächenrauheit des Kalibrierkörpers
TW	Tasterweg
UJ	Unebenheit der Justierhilfe
WG	Winkelgeber
w	Winkel
ZR	Zahnriemen
0	Linearisierungspunkt
*	Gesamtfunktion, die aus mehreren Einzelfunktionen zusammengesetzt ist
~	Transformierter Vektor oder transformierte Matrix
^	Umgeformter Vektor oder umgeformte Matrix

10.4 Mathematische Symbole

$\mathrm{Diag}(\vec{x})$	Diagonalmatrix mit den Elementen aus $\vec{x}$
$N(\vec{\mu},\Sigma)$	(Mehrdimensionale) Normalverteilung mit dem Mittelwertsvektor $\vec{\mu}$ und der Kovarianzmatrix Σ
Min()	Minimum
Max()	Maximum
Pose(X)	Pose, die der homogenen Matrix X entspricht
$P(x<x_0)$	Wahrscheinlichkeit für das Auftreten des Ereignisses $x \in [-\infty, x_0[$
R()	Restglied einer Taylorreihe
Rang(X)	Rang einer Matrix X
$\phi()$	Summenfunktion einer Normalverteilung
$\lvert X \rvert$	Determinante einer Matrix
$\lVert \vec{x} \rVert$, $\lVert X \rVert$	Norm eines Vektors / einer Matrix, zumeist die Euklidische Norm
$E^{m\times m}$	Einheitsmatrix der Dimension $m\times m$
$0^{m\times n}$	Nullmatrix der Dimension $m\times n$
$\vec{x} \in \Re^n$	Vektor mit der Dimension n
$X \in \Re^{m\times n}$	Matrix mit m Zeilen und n Spalten
x^T, X^T	Transponierte eines Vektors/ einer Matrix
$\Delta\vec{x}$	Änderung des Vektors $\vec{x}$
$f(\vec{x}\lvert N(\vec{\mu},\Sigma))$	Dichte einer Normalverteilung an der Stelle $\vec{x}$
$\vec{x} \sim N(\vec{\mu},\Sigma)$	Mit dem Erwartungsvektor $\vec{\mu}$ und der Kovarianzmatrix Σ normalverteilter Vektor
$\bar{x}$	Mittelwert
$\Re$	Reelle Zahlen

10.5 Definitionen

Absolute Genauigkeit: Genauigkeit, mit der ein Wert bezüglich eines genau definierten Nullpunktes angegeben werden kann. Wenn keine Verwechslungsgefahr besteht, wird der Begriff Genauigkeit benutzt.

Pose: Oberbegriff von Position und Orientierung. Mit der Pose kann die Lage eines Körpers vollständig beschrieben werden.

Pose-Wiederholgenauigkeit: Beschreibt die Exaktheit der Übereinstimmungen der Istposen bei mehrfachem Anfahren einer Sollpose mit denselben Randbedingungen. Sie kann durch Dichtefunktionen charakterisiert werden. Da der Begriff Genauigkeit in der Robotik in diesem Zusammenhang weit verbreitet ist, wird er der formal besseren Bezeichnung Präzision [DIN 94] vorgezogen.

Pose-Genauigkeit: Beschreibt die Übereinstimmung zwischen Ist- und Sollpose. Beide Posen sind in demselben Koordinatensystem zu erfassen. In anderen Arbeiten werden für die Pose-Genauigkeit die Begriffe Programmiergenauigkeit oder absolute Genauigkeit verwendet.

Genauigkeit: Beschreibt das qualitative Ausmaß der Übereinstimmung zwischen gemessenem und wahrem Wert. In dieser Arbeit wird teilweise von dieser Definition abgewichen (z.B. Pose-Genauigkeit), um der in der Robotik üblichen Begriffsbildung zu entsprechen. Wenn keine Verwechslungsgefahr besteht, wird mit Genauigkeit die Pose-Genauigkeit oder für andere Systeme die absolute Genauigkeit bezeichnet

Kalibrierung: Verfahren, mit dem die systematischen Abweichungen eines Systems (in dieser Arbeit eines Industrieroboters) erkannt und durch geeignete Maßnahmen ausgeglichen werden. Diese Begriffsbildung unterscheidet sich von der Definition nach DIN, wird in dieser Arbeit aber gewählt, da sie in der Robotik weit verbreitet ist.

Systematische Abweichung (systematischer Fehler): Bestandteil der Ergebnisabweichung, der konstant bleibt bzw. sich in vorhersagbarer Weise ändert.

Unsicherheit: Kennzeichnung des Bereichs, innerhalb dessen der Erwartungswert bzw. der wahre Wert liegt. Die Unsicherheit beinhaltet sowohl zufällige als auch systematische Abweichungen.

Wiederholgenauigkeit: Ausmaß der gegenseitigen Annäherung von aufeinanderfolgenden Messungen. Wenn Verwechslungen ausgeschlossen werden können, wird mit Wiederholgenauigkeit die Pose-Wiederholgenauigkeit von Industrierobotern bezeichnet.

Zufällige Abweichung (zufälliger Fehler): Bestandteil der Ergebnisabweichung, der auf nicht vorhersagbare Weise schwankt.