

Flexibel automatisierte Montage von leicht verformbaren großvolumigen Bauteilen

Vom Promotionsausschuss der
Technischen Universität Hamburg-Harburg
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur
genehmigte Dissertation

von
Patrick Stepanek

aus Garmisch-Partenkirchen

2006

1. Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Klaus Rall

2. Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Jens Wulfsberg

Tag der mündlichen Prüfung:

30.11.2006

Schriftenreihe des Arbeitsbereichs
Werkzeugmaschinen und Automatisierungstechnik
der Technischen Universität Hamburg-Harburg

Band 16

Patrick Stepanek

**Flexibel automatisierte Montage von
leicht verformbaren großvolumigen Bauteilen**

Shaker Verlag
Aachen 2007

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.: Hamburg-Harburg, Techn. Univ., Diss., 2006

Copyright Shaker Verlag 2007

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-5822-1

ISSN 1438-8529

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

Wenn die Kuh am Himmel schwirrt,
hat sich die Natur geirrt.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen, Roboter und Montageanlagen der Technischen Universität Hamburg-Harburg.

Dem Leiter des Instituts, Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Rall, danke ich für die fürsorgliche Unterstützung und Förderung meines Promotionsvorhabens sowie die zahlreichen inhaltlichen Anregungen und konstruktiven Fachgespräche. Darüber hinaus möchte ich mich insbesondere für das mir entgegengebrachte Vertrauen und den Freiraum, in dem diese Arbeit entstehen konnte, bedanken.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Jens Wulfsberg danke ich für die spontane und überaus unkomplizierte Übernahme des Zweitgutachtens.

Für die tatkräftige Unterstützung bei der Umsetzung meines Forschungsvorhabens möchte ich mich bei meinen Kollegen Dipl.-Ing. Wolfram Quellmalz, Dr.-Ing. Jörg Wollnack und Herrn Wolfgang Michelson sowie 'meinen' Studenten Dipl.-Ing. Christoph Thielen, Oliver Mende und Zhen Wang bedanken. Sie alle haben ihren Anteil am Erfolg dieses Projekts geleistet.

In besonderem Maße möchte ich auch Frau Sieglinde Teßmer danken, die mit ihrer stets frischen und positiven Art sporadisch auftretende Zweifel im Leben eines Doktoranden stets auszugleichen wusste.

Meinen Eltern, meiner Schwester, meinen Freunden, insbesondere Agnieszka Mazur sowie all den Menschen, die während der Erstellung der Arbeit für mich da waren, danke ich für ihre Unterstützung, ihre Zuneigung und ihr Verständnis.

Patrick Stepanek

Inhaltsverzeichnis

Symbole, Indizes und Abkürzungen	v
Begriffserklärungen und Definitionen	ix
1 Einleitung	1
1.1 Automatisierung in der Großbauteilmontage	1
1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit	2
1.2.1 Zielsetzung	2
1.2.2 Aufbau	3
2 Fertigung von Großkomponenten	5
2.1 Stand der Technik	5
2.1.1 Strukturmontage nach dem Vorrichtungsprinzip	5
2.1.2 Messsysteme	8
2.1.3 Automatisierung	11
2.2 Stand der Forschung	13
2.2.1 Flexible Fertigungsautomatisierung	13
2.2.2 Automatisierte Kalibrierung von Großmanipulatoren	14
2.2.3 Flexible Niet- und Handhabungsautomatisierung	14
2.2.4 Flexibel automatisierter Vorrichtungsbau	15
2.3 Anforderungen an ein flexibles Montagekonzept	16
3 Kinematische Betrachtungen	17
3.1 Kartesische Koordinatensysteme	17
3.2 Räumliche Drehungen	17
3.2.1 Rotationsmatrix	17
3.2.2 Kopplung von Rotationen	19
3.2.3 Roll-Pitch-Yaw Rotationsmatrix	20
3.2.4 Roll-Pitch-Yaw Winkel	21
3.3 Homogene Koordinaten	22

4	Ausrichtung von Großbauteilen	23
4.1	Iterativer Poseregelkreis	24
4.2	Bauteilpose anhand von Positionsinformationen	30
4.2.1	Drei nicht kollinear angeordnete Messmarken	31
4.2.2	Vier nicht komplanar angeordnete Messmarken	33
4.2.3	Fehlerfortpflanzungsanalyse	34
4.3	Soll-Pose zwischen Basis- und Montagebauteil	36
4.4	Posebahnführung	39
4.5	Ausrichtkonzept für Großkomponenten	41
5	Bauteilformkorrektur	43
5.1	Verformung einer Flugzeugrumpfschale	43
5.2	Iterativer Formregelkreis	46
5.3	Formbahnpunktberechnung	49
5.3.1	Bahnpunktberechnung in der Ebene	49
5.3.2	Bahnpunktberechnung im Raum	51
5.4	Formkorrekturkonzept für Großkomponenten	54
6	Identifizierung von Montagekoordinatensystemen	56
6.1	Identifizierung anhand von Posedaten	59
6.2	Identifizierung anhand von Positionsdaten	66
6.2.1	Translationsvektor aus drei orthogonalen Drehungen	66
6.2.2	Rotationsmatrix aus drei orthogonalen Drehungen	68
6.2.3	Rotationsmatrix aus sechs Drehungen	69
6.2.4	Rotationsmatrix aus drei linear unabhängigen Translationen	70
6.3	Bewertung der Identifizierungsverfahren	72
6.4	Orthogonalisierung von Rotationsmatrizen	73
6.4.1	Singulärwertzerlegungsverfahren	74
6.4.2	Winkel-Matrix-Verfahren	75
6.4.3	Gram-Schmidt-Verfahren	75
6.4.4	Bewertung und Verfahrensauswahl	76

7	Versuchs- und Montagekonzept	77
7.1	Versuchsaufbau	77
7.2	Genauigkeitsverhalten der Identifizierungsverfahren	79
7.2.1	Identifizierung anhand von Positionsdaten	79
7.2.2	Identifizierung anhand von Posedaten	83
7.2.3	Auswahl eines Identifizierungsverfahrens	90
7.2.4	Prozessintegration des Identifizierungsverfahrens	91
7.3	Flexibel automatisierter Gesamtmontageprozess	93
7.3.1	Messmarkenpositionen nach einer Ausrichtbewegung	94
7.3.2	Koordinatentransformation zwischen Master und Slave	95
8	Experimentelle Verifizierung	97
8.1	Genauigkeitsverhalten des Positioniersystems	97
8.1.1	Posegenauigkeit	97
8.1.2	Posewiederholgenauigkeit	99
8.1.3	Poseregelkreisgenauigkeit	100
8.1.4	Kooperationsgenauigkeit zwischen Master und Slave	101
8.2	Genauigkeitsverhalten des Montageprozesses	103
8.2.1	Bauteilausrichtung	103
8.2.2	Bauteilformkorrektur	105
9	Zusammenfassung	109
	Literaturverzeichnis	111
A	Mathematische Betrachtungen	119
A.1	Kugelschnittpunktsbestimmung	119
A.2	Spezialfall einer Funktionaldeterminante	121
A.3	Spezialfall einer Rangberechnung	122
A.4	Identifizierung von Koordinatentransformationen	123
B	Fehleranalyse	124
B.1	Fehlerarten	124
B.2	Fehlerfortpflanzung	125
B.3	Trigonometrische Funktionen	126

C Messergebnisse	128
C.1 Posebasiertes Identifizierungsverfahren	128
C.2 Bauteilausrichtung und -formkorrektur	130
C.3 Kooperationsgenauigkeit zwischen Master und Slave	131
 Curriculum Vitae	 133

Symbole, Indizes und Abkürzungen

Dieses Verzeichnis enthält die wichtigsten in dieser Arbeit verwendeten Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen. Die Wahl der Formelzeichen hält sich dabei an folgende Konventionen: Kleine kursive Buchstaben bezeichnen Skalare, z.B. x, r, d . Vektoren, wobei in dieser Arbeit ausschließlich Spaltenvektoren verwendet werden, sind durch kleine halbfette Buchstaben, z.B. \mathbf{x}, \mathbf{n} und Matrizen durch halbfette Großbuchstaben, z.B. \mathbf{T}, \mathbf{S} dargestellt. Entsprechend dieser Festlegung werden die Koeffizienten von Matrizen und Vektoren durch kursive Kleinbuchstaben, die gegebenenfalls mit Indizes versehen sind, symbolisiert, beispielsweise x_1, x_2, x_i für Elemente des Vektors \mathbf{x} und s_{12}, s_{ij} für Elemente der Matrix \mathbf{S} .

Lateinische Formelzeichen

A	Fläche
A^\dagger	Pseudo-Inverse der Matrix \mathbf{A}
A^{-1}	Inverse der Matrix \mathbf{A}
A^T	Transponierte der Matrix \mathbf{A}
E	Ebene
\mathbf{E}	Einheitsmatrix
\mathcal{F}	spezielle Funktionsvorschrift
\mathbf{J}	Jacobi-Matrix
K	Kugel
L	Bogenlänge
M	Mittelpunkt
O	Koordinatenursprung
P	Statistische Sicherheit
\mathbf{R}	Rotationsmatrix
\mathbf{R}_\perp	orthogonalisierte Rotationsmatrix
$\tilde{\mathbf{R}}$	nicht orthogonale bzw. fehlerbehaftete Rotationsmatrix
\mathbb{R}	Menge der reellen Zahlen
S	Schnittpunkt
\mathcal{S}	Koordinatensystem
\mathbf{S}	schiefsymmetrische Matrix
T	Target (Messmarke)
\mathbf{T}	Homogene Transformationsmatrix
X	Punkt
\mathbf{X}	Matrixvariable
\mathbb{Z}	Menge der ganzen Zahlen
a	Skalierungsfaktor

Lateinische Formelzeichen

d	Abstand
f	allgemeingültige Funktionsvorschrift, Frequenz
g	Gerade
\mathbf{g}	Fallbeschleunigungsvektor
h	Höhe
i	Bahnpunkt
j	Iterationsanzahl
k_D	Dämpfungs- bzw. Kollisionsschutzfaktor
k_K	Konvergenzfaktor
m, n	Zählvariablen
\mathbf{m}	Mittelpunktvektor
\mathbf{n}	Normalenvektor
$\hat{\mathbf{n}}$	Einheitsnormalenvektor
\mathbf{p}	Posevektor
\mathbf{q}	interner Parametervektor der Robotersteuerung
r	Radius
\mathbf{t}	Translationsvektor
$\hat{\mathbf{u}}, \hat{\mathbf{v}}, \hat{\mathbf{w}}$	Einheitsvektoren der Achsen eines Koordinatensystems
x	Funktionsvariable
\bar{x}	Mittelwert von x
\mathbf{x}	Vektorvariable
\mathbf{x}_{\parallel}	Parallelanteil von \mathbf{x}
\mathbf{x}_{\perp}	Orthogonalanteil von \mathbf{x}
$\ \mathbf{x}\ $	Euklidische Norm von \mathbf{x}
y	Funktionswert
\mathbf{y}	Lösungsvektor

Griechische Formelzeichen

∇	Nabla-Operator
∂	Partial-Operator
Δ	Differenz-Operator
Σ	Diagonalmatrix
α, β, γ	Roll-Pitch-Yaw Winkel (Rollen, Nicken, Gieren)
δ	Toleranz, Fehler
θ	Drehwinkel
ϑ	Winkel gegenüber der Vertikalen

Griechische Formelzeichen

κ	Krümmung
λ	Eigenwert
ξ	Verwindungswinkel
π	Kreiszahl
σ	Standardabweichung, Singulärwert
τ	Formkorrekturwinkel
ϕ	Drehwinkel
ψ	Winkel gegenüber der Horizontalen

Indizes

B	Basiskoordinatensystem des Roboters
BT	Beschlagstoleranz
D	Diagonalrichtung
FT	Fertigung
I	Ist-Zustand
L	Längsrichtung, Lokal
LT	Laser Tracker
M	Messkoordinatensystem
MT	Montage
O	Objektkoordinatensystem
PG	Posegenauigkeit
PRG	Poseregelkreisgenauigkeit
PWG	Posewiederholgenauigkeit
R	Referenzkoordinatensystem
S	Soll-Zustand, Schnitt
T	Targetkoordinatensystem
TCP	Tool-Center-Point Koordinatensystem des Roboters
U	Umfangsrichtung
i, k	Zählindizes
g	Gerade, global
l	lokal

Bedeutung der Position der Indizes

\mathcal{S}_M	Messkoordinatensystem
$T_M^{O_i}$	Transformation vom i -ten Objekt- ins Messkoordinatensystem
${}^M t_O^{TCP}$	Translationsvektor vom TCP- ins Objektkoordinatensystem in Messkoordinaten. Sind die hochgestellten Indizes identisch, entfällt der Index oben links.

Abkürzungen

ADM	A bsolute D istance M eter
CAD	C omputer A ided D esign
DIN	D eutsches I nstitut für N ormung
DoF	D egree o f F reedom
EN	E uropäische N orm
GPS	G lobal P ositioning S ystem
ISO	I nternational S tandardization O rganization
KMM	K oordinaten m ess m aschine
MTKS	M aster- T arget k oordinatensystem
RPY	R oll- P itch- Y aw
STKS	S lave- T arget k oordinatensystem
TCP	T ool- C enter- P oint
VDI	V erein D eutscher I ngenieur

Begriffserklärungen und Definitionen

Dieses Verzeichnis enthält Erklärungen und Definitionen für die wichtigsten in dieser Arbeit verwendeten Fachbegriffe. Dabei wird folgende Konvention angewandt: Termini *technici*, die zur Definition weiterführender Fachwörter eingesetzt werden und in diesem Verzeichnis definiert bzw. erklärt sind, werden durch Kapitälchen hervorgehoben.

AKTUATOR

AKTUATOREN, oft auch **Aktoren** genannt, befinden sich in der Wirkungskette eines **SYSTEMS** zwischen der Steuer- oder Regelungseinrichtung und dem zu beeinflussenden System oder **PROZESS** [41]. Sie bilden das Stellglied und dienen der Ausführung von Bewegungen oder dem Aufbringen von Kräften, indem sie Signale einer **STEUERUNG** oder **REGELUNG** in mechanische Energie umwandeln.

AUSRICHTUNG

Mit **Ausrichten** ist das Bewegen eines Objekts von seiner augenblicklichen **IST-POSE** in die gewünschte **SOLL-POSE** gemeint [106]. Eine **AUSRICHTUNG** umfasst die rechnerische bzw. messtechnische Berücksichtigung aller sechs **FREIHEITSGRADE**.

AUTOMATISIERUNGSGRAD

Nach DIN 19233 [21] beschreibt der **AUTOMATISIERUNGSGRAD** "...den Anteil, den die automatisierten Funktionen an der Gesamtfunktion einer Anlage haben. Er kann nur für ein festgelegtes **SYSTEM**, dessen Grenzen genannt sein müssen, unter Bewertung seiner Funktionen angegeben werden.

Anmerkung: Vollautomatischer Betrieb liegt vor, wenn alle Funktionen des betrachteten Systems mit Ausnahme von Einschalt- oder Abschaltvorgängen automatisiert sind. Sonst spricht man von teilautomatisiert."

BASISKOORDINATENSYSTEM

Definition nach DIN EN ISO 8373 [22]: "**KOORDINATENSYSTEM** mit Bezug auf die **BASISMONTAGEFLÄCHE** eines **ROBOTERS**."

BASISMONTAGEFLÄCHE

DIN EN ISO 8373 [22] definiert die **BASISMONTAGEFLÄCHE** eines **ROBOTERS** als: "Verbindungsfläche zwischen Roboter und der ihn tragenden Struktur."

BAUMUSTER

Bezogen auf die Einteilung und Bezeichnung von Produkten sind Typbenennungen mit Namen oder Kennziffern geläufig. Dabei stehen Funktionalität, Aussehen und ähnliches im Vordergrund, das heißt es wird eine Klassifizierung entsprechend Einsatzgebieten und Anwendungen von Endverbrauchern vorgenommen.

Die Bezeichnung von **BAUMUSTERN** bezieht sich auf Strukturen, Montageobjekte, Funktionseinheiten etc. und wird entsprechend technischen und technologischen Gemeinsamkeiten und Unterschieden, wie der mechanischen Struktur, den eingebauten **SYSTEMEN**, dem Material etc., vorgenommen. Ein Baumuster kann beispielsweise eine Flugzeugrumpfsektion sein, die in identischer Form für Rümpfe zweier unterschiedlicher Flugzeugtypen verwendet wird.

DURCHLAUFZEIT

Innerhalb der Fertigung wird mit DURCHLAUFZEIT die Zeitspanne bezeichnet, die von Beginn der Bearbeitung bis zur Fertigstellung eines Erzeugnisses benötigt wird. Im Einzelnen setzt sich die Durchlaufzeit dabei aus Rüst-, Bearbeitungs- und Liegezeit zusammen.

ENDEFFEKTOR

Definition nach DIN EN ISO 8373 [22]: “VORRICHTUNG, die speziell zum Anbringen an die MECHANISCHE SCHNITTSTELLE konzipiert ist, mit der der ROBOTER seine Aufgabe erfüllt.”

FERTIGUNGSANLAGE

Allgemein werden maschinelle Arbeitsplätze, an denen mechanisiert oder automatisiert unter Einsatz von Werkzeugen Fertigungsschritte an Werkstücken vollzogen werden, als FERTIGUNGSANLAGEN bezeichnet. Im Einzelnen können dies beispielsweise Werkzeugmaschinen sein. In dieser Arbeit bezieht sich der Begriff vor allem auf Montageanlagen der Großkomponentenfertigung.

FORM

Eine geometrische FORM ist hier eine zusammenhängende Teilmenge des \mathbb{R}^3 , die durch eine Kurve, den Graph einer Funktion oder die direkte Angabe einer Teilmenge definiert werden kann. Die bestimmenden Eigenschaften sind dabei unabhängig von der Position und Orientierung im Raum [26].

FORMHALTIGKEIT

In der Fertigungstechnik spricht man von FORMHALTIGKEIT, wenn die Abweichung zwischen Ist- und Soll-Form eines Bauteils innerhalb den vereinbarten zulässigen Toleranzen liegt. Das heißt, sie bestimmt den räumlichen Bereich um das Bauteil herum, innerhalb dessen sich ein Bauteil befinden kann und dabei eine beliebige FORM aufweisen darf.

FREIHEITSGRAD

Definition nach DIN EN ISO 8373 [22]: “Eine der Variablen (maximale Anzahl sechs), die erforderlich sind, um die Bewegung eines Körpers im Raum zu beschreiben.”

HANDHABEN

VDI 2860 [106] definiert: “HANDHABEN ist das Schaffen, definierte Verändern oder vorübergehende Aufrechterhalten einer vorgegebenen RÄUMLICHEN ANORDNUNG von geometrisch bestimmten Körpern in einem Bezugskoordinatensystem.”

HESESCHES NORMALFORM

Die HESSESCHES NORMALFORM wird in der analytischen Geometrie z.B. zur Beschreibung einer Ebene

$$E : \langle \hat{\mathbf{n}}, \mathbf{x} - \mathbf{a} \rangle = 0 \tag{1}$$

im Euklidischen Raum \mathbb{R}^3 verwendet, wobei $\hat{\mathbf{n}}$ der Einheitsnormalenvektor der Ebene ist und $\mathbf{a} \in E$ gilt, das heißt ein Punkt der Ebene ist [67].

HEXAPOD

Ein PARALLELOBOTER mit sechs parallel angeordneten Armen wird in dieser Arbeit auch als HEXAPOD bezeichnet [38].

HOHLSPIEGEL

→ RETRORREFLEKTOR

HOMOGEN

In der Mathematik bezeichnet man ein lineares Gleichungssystem $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$ als HOMOGEN, wenn $\mathbf{b} = \mathbf{0}$ gilt.

INJEKTIV

Aus mathematischer Sicht wird eine Funktion f als INJEKTIV bezeichnet, wenn $f(x) = y$ für alle y höchstens eine Lösung hat [67].

IST-POSE

Mit IST-POSE wird die augenblicklich gegebene bzw. gemessene POSE bezeichnet.

KALIBRIERUNG

Unter KALIBRIERUNG wird nach DIN 1319 [20] das "...Ermitteln des Zusammenhangs zwischen Messwert oder Erwartungswert der Ausgangsgröße und dem zugehörigen wahren oder richtigen Wert der als Eingangsgröße vorliegenden Messgröße für eine MESSEINRICHTUNG bei vorgegebenen Bedingungen ..." verstanden. Weiterhin gibt die Norm an: "...Bei der Kalibrierung erfolgt kein Eingriff, der das Messgerät verändert."

Eine Kalibrierung setzt Kalibriermittel (Prüfmittel) und Kalibrierverfahren nach einer Kalibriervorschrift voraus. Um die Funktionalität systematischer Messabweichungen im Sinne einer Kalibrierung zu erfassen, sind ausreichend genaue Prüfmittel ebenso wie die Aufnahme einer genügend großen Anzahl von Kalibrierdaten unabdingbar. Eine Kalibrierung wird vor dem Einsatz des Messgerätes zu Messzwecken durchgeführt.

KOLLINEAR

Liegen drei oder mehr Punkte auf einer Geraden bzw. sind mehrere Vektoren parallel, so werden diese auch als KOLLINEAR bezeichnet.

KOMPLANAR

Punkte bzw. Vektoren nennt man KOMPLANAR, wenn sie in einer Ebene liegen [120]. Drei Vektoren im \mathbb{R}^3 sind genau dann LINEAR ABHÄNGIG, wenn sie komplanar sind.

KONDITION

In der numerischen Mathematik beschreibt man mit der KONDITION die Abhängigkeit der Lösung einer Problemstellung von der Störung der Eingangsdaten. Nach SCHWETLICK [99] bezeichnet "...der Proportionalitätsfaktor

$$\text{cond}(\mathbf{A}) = \|\mathbf{A}\| \|\mathbf{A}^{-1}\|$$

die Kondition einer Matrix \mathbf{A} und gibt für ein lineares Gleichungssystem $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$ an, um wieviel der relative Fehler des Lösungsvektors \mathbf{x} größer sein kann als die relativen Fehler von \mathbf{A} und \mathbf{b} . Eine Matrix wird schlecht konditioniert genannt, wenn $\text{cond}(\mathbf{A}) \gg 1$ gilt, sich Störungen der Eingangsdaten also stark auf die Lösung auswirken können."

KOOPERIERENDE ROBOTER

Mehrere Roboter werden genau dann als KOOPERIEREND bezeichnet, wenn sie sowohl zeitlich als auch räumlich dynamisch koordinierte Bewegungen ausführen können [64, 56]. Bewegungsanweisungen im kooperierenden Betrieb erfolgen stets in Koordinaten des Master-Roboters, wobei derjenige Roboter als Master bezeichnet wird, der während der kooperierenden Bewegung führt. Die Verschiebewegungen der untergeordneten Roboter, die lediglich dem Master folgen, auch als Slaves bezeichnet, wird dabei automatisch ermittelt.

KOORDINATENTRANSFORMATION

DIN EN ISO 8373 [22] definiert: "Umwandlungsprozess von Koordinaten einer POSE aus einem KOORDINATENSYSTEM in ein anderes."

KRÜMMUNG

Anschaulich beschreibt die KRÜMMUNG die Abweichung einer Kurve bzw. Fläche von einer Geraden bzw. Ebene. Aus mathematischer Sicht stellt die Krümmung die Änderung des Flächennormalenvektors einer Kurve bzw. Fläche dar. Dies bedingt, dass die Krümmung einer Fläche richtungsabhängig ist [35]. Für die Krümmung κ einer Zylinderfläche mit dem Radius r gilt beispielsweise in Umfangsrichtung $\kappa_U = 1/r$ und in Längsrichtung $\kappa_L = 0$.

LINEAR ABHÄNGIG

Die Vektoren $\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_i \in \mathbb{R}^n$ heißen LINEAR ABHÄNGIG, wenn $\mu_1, \dots, \mu_i \in \mathbb{R}$ existieren, die nicht alle gleich Null sind und $\sum_{k=1}^i \mu_k \mathbf{x}_k = 0$ gilt [67].

LINEAR UNABHÄNGIG

Falls das Gleichungssystem $\sum_{k=1}^i \mu_k \mathbf{x}_k = 0$ nur die Lösung $\mu_1 = \dots = \mu_i = 0$ besitzt, so werden die Vektoren $\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_i \in \mathbb{R}^n$ als LINEAR UNABHÄNGIG bezeichnet.

LASER TRACKER

LASER TRACKER gehören zu den polaren Messsystemen, das heißt sie ermitteln Positionskoordinaten durch Messung zweier Winkel (horizontal sowie vertikal) und einer Distanz. Die Distanzbestimmung erfolgt interferometrisch. Messungen können nur mit Hilfe retroreflektierender HOHL- oder TRIPELSPIEGEL vorgenommen werden. Über eine STEUERUNG und motorisch angetriebene Achsen können bewegliche Objekte verfolgt und ihre Bahn gemessen werden.

LEHRE

Im Gegensatz zu SCHABLONEN werden LEHREN nicht zu den Fertigungsmitteln, sondern zu den Prüfmitteln gezählt. DIN 1319 [20] führt dazu aus: "Eine spezielle Art des Prüfens ist das Lehren. Durch Lehren wird festgestellt, ob bestimmte Längen, Winkel oder FORMEN eines Werkstücks (Prüfgegenstands) die durch Maß- und Formverkörperungen (Lehren) gegebenen Grenzen nicht überschreiten oder in welcher Richtung diese überschritten werden. Der Betrag der Abweichung wird nicht festgestellt."

MANIPULATOR

Definition nach DIN EN ISO 8373 [22]: "Maschine, deren Mechanismus aus einer Folge von Komponenten besteht, durch Gelenke oder gegeneinander verschieblich verbunden, mit dem Zweck, Gegenstände (Werkstücke oder Werkzeuge) zu greifen und/oder zu bewegen, normalerweise mit mehreren FREIHEITSGRADEN."

MASSHALTIGKEIT

Nach BEITZ [8] spricht man "... in der Fertigung von MASSHALTIGKEIT, wenn die Ist-Maße eines Werkstücks innerhalb der vereinbarten zulässigen Abweichung vom festgelegten Nennmaß liegen." Darüber hinaus wird der Begriff auch für die Beständigkeit eines Werkstoffs gegen Dehnung bzw. Schrumpfung verwendet.

MECHANISCHE SCHNITTSTELLE

DIN EN ISO 8373 [22] definiert die MECHANISCHE SCHNITTSTELLE eines ROBOTERS, auch TOOL-CENTER-POINT genannt, als: "Montagefläche am Ende der Gelenkstruktur, an der der ENDEFFEKTOR angebracht ist."

MESSEINRICHTUNG

Nach DIN 1319 [20] entspricht die MESSEINRICHTUNG der "Gesamtheit aller Messgeräte und zusätzlicher Einrichtungen zur Erzielung eines Messergebnisses."

MESSMARKE

Messungen mit berührungslos arbeitenden Koordinatenmessgeräten erfordern bestimmte optische und mechanische Eigenschaften der Messobjekte. Da viele Körper wie Bauteile solche Eigenschaften nicht oder nicht in genügendem Maße aufweisen, werden an ihnen MESSMARKEN angebracht, die die Anforderungen erfüllen. Dieses Verfahren erfordert jedoch gegebenenfalls eine Transformation des Messergebnisses. So misst ein LASER TRACKER beispielsweise den Mittelpunkt eines TRIPELSPIEGELS, während der Anwender möglicherweise an den Koordinaten einer Körperkante interessiert ist.

MONTAGE

Nach WARNECKE [107] entspricht die MONTAGE im Bereich der industriellen Fertigung dem planmäßigen Zusammenbau von Bauteilen und/oder Baugruppen zu Erzeugnissen bzw. zu Baugruppen höherer Erzeugnisebenen. Die wesentlichen Teiloperationen eines Montageprozesses sind: Fügen, Handhaben, Kontrollieren, Justieren sowie Sonderoperationen.

MONTAGEANLAGE

Mit MONTAGEANLAGE, Montagebauplatz oder Montagestation werden hier synonym FERTIGUNGSANLAGEN für Großkomponenten bezeichnet, in denen manuelle, mechanisierte oder automatisierte Montagearbeiten ausgeführt werden. Darüber hinaus gilt die allgemeine Definition für Fertigungsanlagen.

ORTHOGONAL

Eine Menge von Vektoren nennt man ORTHOGONAL, wenn das paarweise innere Produkt, auch als Skalarprodukt bezeichnet, aller enthaltener Vektoren gleich Null ist.

Eine Matrix $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{(n,n)}$ wird als orthogonal bezeichnet, wenn $\mathbf{A}^T \mathbf{A} = \mathbf{E}$ gilt. Darüber hinaus gilt, dass orthogonale Matrizen stets vollen RANG haben.

PARALLELROBOTER

In Anlehnung an DIN EN ISO 8373 [22] ist der PARALLELROBOTER ein ROBOTER, bei dem TCP und BASISMONTAGEFLÄCHE durch parallel angeordnete Schub- bzw. Drehgelenke miteinander verbunden sind.

POSE

Nach DIN EN ISO 8373 [22] entspricht die POSE, auch als RÄUMLICHE ANORDNUNG bezeichnet, der "Kombination von Position und Orientierung im Raum."

POSEBAHN

In Anlehnung an DIN EN ISO 8373 [22] entspricht die POSEBAHN einer geordneten Reihe von POSEN.

POSEGENAUIGKEIT

Nach DIN EN ISO 9283 [23] und GRETHLEIN [36] gibt die POSEGENAUIGKEIT, auch als absolute Genauigkeit eines ROBOTERS bezeichnet, die Abweichung zwischen SOLL-POSE und der mittleren erreichten IST-POSE an (siehe Bild 1).

POSEWIEDERHOLGENAUIGKEIT

In Anlehnung an DIN EN ISO 9283 [23], GRETHLEIN [36] und VDI 2861 [105] gibt die POSEWIEDERHOLGENAUIGKEIT, auch als Wiederholgenauigkeit eines ROBOTERS bezeichnet, die Exaktheit der Übereinstimmung zwischen den IST-POSEN beim wiederholten Anfahren einer SOLL-POSE an (siehe Bild 1).

POSITIONIEREN

→ AUSRICHTEN

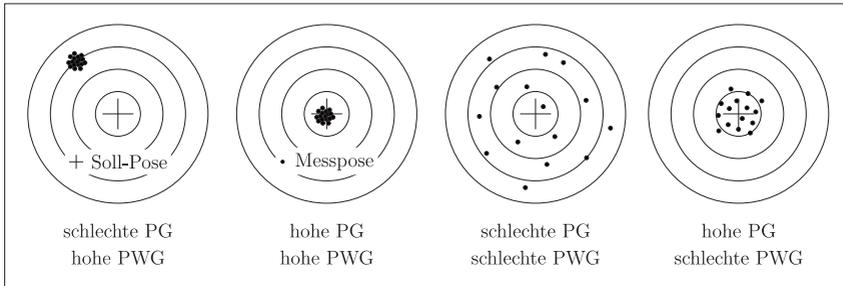


Bild 1: Posegenauigkeit (PG) und Posewiederholgenauigkeit (PWG).

PROZESS

DIN 19233 [21] definiert den PROZESS als: “Gesamtheit von aufeinander wirkenden Vorgängen in einem SYSTEM, durch die Materie, Energie oder auch Information umgeformt, transportiert oder auch gespeichert wird.”

PROZESSINTERN

Mit PROZESSINTERN werden in dieser Arbeit Teilprozesse bezeichnet, die über keine automatisierte Rückführung von Informationen oder Material in den Fertigungsprozess verfügen. Dies trifft häufig auf Messprozesse in flexiblen FERTIGUNGSANLAGEN zu. Der Messvorgang wird automatisch ausgelöst und durchgeführt, die Ergebnisverarbeitung und -auswertung erfolgt jedoch durch den Bediener.

PROZESSINTEGRIERT

Die Bezeichnung PROZESSINTEGRIERT bezieht sich auf Vorgänge von Teilsystemen, die die gleichen Eigenschaften wie PROZESSINTERNE Vorgänge aufweisen, darüber hinaus aber auch über eine automatisierte Rückführung von Information oder Material in den Fertigungsprozess verfügen.

PSEUDO-INVERSE

In der linearen Algebra beschreibt die PSEUDO-INVERSE die konsistente Erweiterung des Begriffs der Inversen auf nicht quadratische Matrizen $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{(m,n)}$, wobei $m \neq n$ gilt [67]. Die Pseudo-Inverse wird mit $\mathbf{A}^\dagger \in \mathbb{R}^{(n,m)}$ bezeichnet und erfüllt folgende Bedingungen:

$$\mathbf{A} \mathbf{A}^\dagger \mathbf{A} = \mathbf{A} \quad \text{für } n > m \quad \text{und} \quad \mathbf{A}^\dagger \mathbf{A} \mathbf{A}^\dagger = \mathbf{A}^\dagger \quad \text{für } m > n$$

RANG

In einer Matrix $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{(m,n)}$ ist die Maximalzahl LINEAR UNABHÄNGIGER Spalten gleich der Maximalzahl linear unabhängiger Zeilen. Die Maximalzahl linear unabhängiger Spalten (oder Zeilen) wird auch als RANG von \mathbf{A} bezeichnet [67, 120].

RÄUMLICHE ANORDNUNG

→ POSE

REGELUNG

Nach LUNZE [66] entspricht die REGELUNG einer STEUERUNG im geschlossenen Wirkungskreis. Dies bedeutet, dass fortlaufend die Ausgangsgröße (Regelgröße) erfasst, mit der Eingangsgröße (Führungsgröße) verglichen und im Sinne einer Angleichung an die Führungsgröße beeinflusst wird [19].

REGULÄR

Nach MACKENS [67] heißt “...eine Matrix $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{(m,n)}$ REGULÄR, wenn sie quadratisch ist ($m = n$) und maximalen RANG besitzt ($\text{Rang } \mathbf{A} = n$). Eine nicht reguläre quadratische Matrix heißt SINGULÄR.”

RETROREFLEKTOR

→ TRIPELSPIEGEL

ROBOTER

Definition nach DIN EN ISO 8373 [22]: “Automatisch gesteuerter, frei programmierbarer Mehrzweck-MANIPULATOR, der in drei oder mehr FREIHEITSGRADEN programmierbar ist und zur Verwendung in der Automatisierungstechnik entweder an einem festen Ort oder beweglich angeordnet sein kann.”

SCHABLONE

SCHABLONEN dienen der Herstellung von Objekten gleicher FORM und Größe, wobei sie Formmerkmale definieren, die auf die Objektoberfläche übertragen oder nach denen die Oberfläche von Objekten bearbeitet werden kann.

Im Zusammenhang mit Montageprozessen handelt es sich bei Schablonen um Fertigungsmittel, die die Form bzw. die Form und POSE eines oder mehrerer Werkstücke in einem Fertigungsprozess vorgeben.

SINGULÄR

→ REGULÄR

SINGULARITÄT

Im Allgemeinen beschreibt eine SINGULARITÄT in der Mathematik eine Stelle, an der eine Funktion oder ein SYSTEM ein unvorhersehbares Verhalten aufweist. In Bezug auf ROBOTER spricht man von singulären Stellungen, wenn diese einen oder mehrere ihrer FREIHEITSGRADE verlieren [15]. Man unterscheidet dabei zwischen zwei Typen von Singularitäten. Zum Einen existieren Singularitäten am Rand des Arbeitsraums. Diese kommen beispielsweise vor, wenn der Roboterarm einer seriellen Kinematik voll ausgestreckt ist. Zum Anderen treten Singularitäten auch im Inneren des Arbeitsraums auf. Diese wiederum entstehen z.B., wenn zwei Gelenkachsen einer seriellen Kinematik auf einer Linie liegen [45].

SOLL-POSE

DIN EN ISO 8373 [22] definiert: “Durch das Anwenderprogramm vorgegebene POSE.”

STEUERUNG

Nach DIN 19226 [19] ist die STEUERUNG der Vorgang in einem SYSTEM, bei dem eine oder mehrere Eingangsgrößen die Ausgangsgröße aufgrund der dem System eigentümlichen Gesetzmäßigkeiten beeinflussen.

DIN EN ISO 8373 [22] definiert die Steuerung eines ROBOTERS als “...den Satz von logischen Steuer- und Leistungsfunktionen, der eine Überwachung der mechanischen Struktur eines Systems und die Kommunikation mit der Umgebung (Anlagen und Anwender) ermöglicht.”

SYSTEM

Unter einem SYSTEM versteht man die Gesamtheit aufeinander bezogener, das heißt miteinander in Beziehung stehender Elemente. Kennzeichnend sind weiterhin funktionale oder bauliche Systemgrenzen. Nach DIN 19226 [19] und DIN 19233 [21] ist ein System

“...eine in einem betrachteten Zusammenhang gegebene Anordnung von Gebilden, die miteinander in Beziehung stehen. Diese Anordnung wird aufgrund bestimmter Vorgaben gegenüber ihrer Umgebung abgegrenzt.”

TACHYMETER

Wie die ebenfalls nach der polaren Methode arbeitenden LASER TRACKER messen auch TACHYMETER zwei Winkel und die Entfernung zu einem Zielpunkt. Der Einsatz von TRIPELSPIEGELN ist möglich, aber nicht zwingend erforderlich. In vielen Fällen können auch retroreflektierende Folien verwendet werden. Die maximal erreichbare Messgenauigkeit eines Tachymeters ist um circa zwei Größenordnungen geringer als die von Laser Trackern [80]. Je nach Modell und Hersteller ist mit Tachymetern auch ein Verfolgen und Messen beweglicher Ziele möglich.

TOOL-CENTER-POINT (TCP)

→ MECHANISCHE SCHNITTSTELLE

TCP-KOORDINATENSYSTEM

Gemäß DIN EN ISO 8373 [22] entspricht das TCP-KOORDINATENSYSTEM einem Koordinatensystem mit Bezug auf die MECHANISCHE SCHNITTSTELLE des ROBOTERS.

TRIEPELSPIEGEL

Ein TRIPELSPIEGEL ist eine rechtwinklige Anordnung von drei reflektierenden Oberflächen, beispielsweise Spiegeln, die Lichtstrahlen oder andere Wellen in dieselbe Richtung zurückwerfen aus der diese gekommen sind.

VORRICHTUNG

Nach DIN 6300 [18] sind VORRICHTUNGEN “Fertigungsmittel, die an Werkstücke gebunden sind und unmittelbar in Beziehung zum Arbeitsvorgang stehen. . . . Vorrichtungen sind die Betriebsmittel aus der Gesamtheit der Fertigungsmittel, mit deren Hilfe eine definierte Lage eines oder mehrerer Werkstücke zur Werkzeugmaschine fixiert und durch Spannkraft gesichert wird, um eine genaue, wirtschaftliche Fertigung zuverlässig zu gewährleisten.”

Im Bereich des Flugzeugbaus wird der Begriff Vorrichtungsbau heute meist mit starren Vorrichtungen, die bauteilabhängige SCHABLONEN enthalten sowie prozessgebunden sind, gleichgesetzt [50, 108, 111]. Im Widerspruch zur Definition oben wird deshalb in Bezug auf flexible Fertigungsmittel oft von einer vorrichtungsarmen oder vorrichtungsfreien Fertigung gesprochen. De facto handelt es sich aber auch bei anpassbaren Fertigungssystemen mit Positioniereinheiten um Vorrichtungen.