

# Dynamisches Vermessen von Robotern mit Inertialmesssystemen

Thomas Alban, Hartmut Janocha

**Schlagwörter:** Inertialmesssystem, Trägheitsnavigation, Roboterkalibrierung, Bahnvermessung

*Ständig sinkende Fertigungstoleranzen in der modernen Produktion bedingen den Einsatz immer präziserer Industrieroboter. Dadurch gewinnt auch die dynamische Kalibrierung von Robotern zunehmend an Bedeutung. Voraussetzung hierfür sind Möglichkeiten zur hochgenauen dynamischen Erfassung der Endeffektorbahnen von Robotern. Da die Messgenauigkeit der roboterinternen Aufnehmer gewissen Einschränkungen unterliegt, wird oft eine Vermessung des Roboters mit externen Messsystemen erforderlich. Im vorliegenden Beitrag wird ein Verfahren vorgestellt, mit dem die zur dynamischen Roboterkalibrierung notwendigen Messungen mit einem Inertialmesssystem durchgeführt werden.*

## Dynamic Measurement of Robots with Inertial Measurement Systems

*In modern automated manufacturing processes there is a growing need for low tolerances. This requires the application of accurate industrial robots. One method to improve the accuracy of robots involves dynamic calibration, whereby the robot internal sensors are shown to be too inaccurate in describing the path of the manipulator. This paper presents an improved method of dynamic measurement with an inertial measurement system.*

## 1 Einleitung

Industrieroboter sind ein unentbehrliches Automatisierungsmittel zur Erhöhung der Produktivität und Flexibilität von Fertigungsanlagen geworden. Dabei sind parallel zur stetigen Senkung der zulässigen Fertigungstoleranzen auch die Anforderungen an die Genauigkeit der eingesetzten Industrieroboter gestiegen. Zusätzlich fordern moderne Off-line-Programmierverfahren eine gewisse Grundgenauigkeit des Roboters, da sonst die Roboterprogramme aufwendig von Hand nachgeteicht werden müssen. Die Definition der Genauigkeit von Industrierobotern ist in der internationalen Norm ISO 9283 [ISO98] zu finden. In modernen Anwendungen, wie dem Laserschweißen oder -schneiden, wird besonders der dynamischen Kenngröße Bahngenauigkeit ein zunehmendes Interesse entgegengebracht. Sie

trifft eine Aussage über die Abweichung, mit der ein Roboter-Endeffektor einer vorgegebenen Kontur folgt; diese kann bis zu mehreren Millimetern betragen.

Die Lücke zwischen der vom Fertigungsprozess geforderten und der vom Roboter gegebenen Genauigkeit lässt sich beispielsweise mit Hilfe von Kalibrierverfahren schließen. Hierzu werden die Fehler des Roboters off-line vermessen und als Kalibrierwerte in der Steuerung abgelegt; auf dieser Basis werden dann während des Betriebes die Fehler on-line korrigiert. Diese Verfahren haben sich zur Verbesserung der Posegenauigkeit bewährt und bieten als dynamische Kalibrierung, neben der konstruktiven Optimierung der Roboterkinematik und der Regleroptimierung der Robotersteuerung, eine flexibel nutzbare Möglichkeit zur Verringerung der Bahnabweichung.

Die dynamische Kalibrierung setzt eine dynamische Vermessung des Roboters voraus. Hierfür können entweder die eingebauten roboterinternen Aufnehmer verwendet werden, oder es wird ein externes Messsystem eingesetzt. Letzteres hat den Vorteil, dass die Fehler unmittelbar am interessierenden Fehlerort, nämlich dem Roboter-Endeffektor erfasst werden können. Die roboterinternen Aufnehmer messen hingegen die Achsstellung an den Gelenken, und es kann nicht davon ausgegangen werden, dass auf diese Weise alle Fehlerursachen, wie beispielsweise elastische Verformungen, berücksichtigt werden. Externe Messsysteme müssen Bahnen dynamisch genau erfassen können und zudem eine einfache Vermessung des Roboters in dessen Arbeitszelle erlauben. Inertialmesssysteme weisen besonders in Bezug auf die Praktikabilität der Vermessung Vorteile gegenüber optischen und taktilen Messsystemen auf, da weder Referenzmarken noch zusätzliche Einrichtungen im Arbeitsraum vorausgesetzt werden.

In diesem Beitrag wird die Vermessung der Roboter-Achswinkel mit Hilfe eines Inertialmesssystems beschrieben. Hierbei wird davon ausgegangen, dass das Messsystem am Endeffektor des zu vermessenden Roboters montiert wird. Diese Anwendung erfordert die vorherige Kalibrierung der Beschleunigungsaufnehmer zur Erhöhung der Messgenauigkeit des Inertialmesssystems, sowie die Transformation der Messwerte in die Achsebene des Roboters. Nach einer Beschreibung der Roboterkalibrierung und einer Übersicht der verschiedenen Verfahren zur Roboter Vermessung in Abschnitt 2 wird in Abschnitt 3 die Erfassung der dynamischen Roboterfehler mit einem Inertialmesssystem beschrieben.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Roboterkalibrierung

Steuerungsaufgaben, bei denen der Endeffektor beliebige Kurven im Raum mit möglichst großer Präzision und Geschwindigkeit abfahren muss, stellen hohe Anforderungen an die Bahnengenauigkeit von Industrierobotern. Dies belegen zahlreiche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, die sich mit der präzisen Vermessung von Roboterposen durch externe Messsysteme befassen [Hin93; Mc97; AL96; YY99] oder die Genauigkeitsverbesserung von Industrierobotern zum Ziel hatten [Die95; Fra97; SAG97; Roo98; VKS98]. Dabei streben die meisten bekannten Prinzipien und Verfahren eine Verbesserung der statischen Kenngrößen nach ISO 9283 an, wie beispielsweise die Posegenauigkeit (statische Roboterkalibrierung). Bei hohen Geschwindigkeiten wird das Roboter-Bewegungsverhalten aber zunehmend bestimmt durch die zeitabhängigen Wechselwirkungen zwischen Trägheits-, Zentrifugal-, Gravitations- und Coriolis-Kräften und -Momenten einerseits und antriebsseitig eingprägten Kräften und Momenten andererseits. Die Berücksichtigung dieser und weiterer Einflüsse (z. B. Elastizitäten in den Roboterjunkten, Verkoppelung von Achsmomenten) muss im Rahmen einer dynamischen Roboterkalibrierung erfolgen. Dazu wurden einige Verfahren vorgestellt, bei denen die roboterinternen Sensoren zur Vermessung eingesetzt werden [KJ97; LH99].

Eine dynamische Roboterkalibrierung umfasst analog zur statischen Roboterkalibrierung die Schritte [AJ99]

1. Fehlermodellierung,
2. Roboter Vermessung und Parameteridentifikation,
3. Fehlerkompensation sowie
4. Verifikation.

Bild 1 zeigt im Überblick das hier entwickelte Kalibrierverfahren. Zur Verbesserung des dynamischen Be-

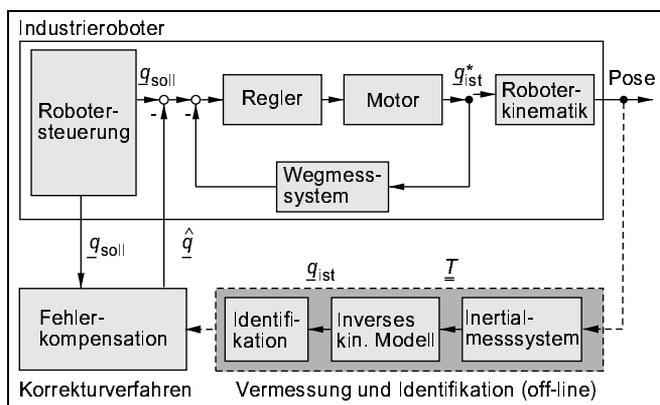


Bild 1: Struktur des dynamischen Kalibrierverfahrens

wegungsverhaltens wird der Erwartungswert des Fehlers der Achsstellung  $\Delta \hat{q}$  mit Hilfe eines Fehlermodells geschätzt und als additiver Offset für den Sollwert  $q_{soll}$  an die Robotersteuerung weitergegeben. Die Parameter

des Fehlermodells werden in einer einmalig durchzuführenden Off-line-Messung identifiziert. Da die Korrektur in Achskoordinaten des Roboters durchgeführt werden muss, werden die mit dem Inertialmesssystem erfassten Bahnen mit Hilfe des inversen Modells der Roboterkinematik in die Achsebene des Roboters transformiert.

### 2.2 Übersicht der verschiedenen Messverfahren

Bei der Bestimmung der Pose- und Bahnabweichungen muss unterschieden werden zwischen der indirekten Vermessung mit den roboterinternen Winkelgebern und der direkten Vermessung des Roboter-Endeffektors mit einem externen Messsystem. Den folgenden Betrachtungen wird die am häufigsten eingesetzte Roboterbauart mit sechs rotatorischen Gelenken (Knickarmroboter) zugrunde gelegt.

#### 2.2.1 Roboterinterne Sensoren

Die roboterinternen Sensoren zur Erfassung der Achsstellungen sind meistens inkrementale Weggeber, die auf der Antriebsseite des untersetzenden Getriebes angebracht sind und die Motorstellung messen. Dieser Messort führt zu einer Erhöhung der Winkelauflösung um das Übersetzungsverhältnis des Getriebes, typischerweise um den Faktor 100. Sind alle Gelenkwinkel  $q = (q_1, q_2, \dots, q_6)$ , eines Roboters bekannt, lässt sich die Pose  $\underline{P}$  des Roboter-Endeffektors mit Hilfe der kinematischen Vorwärtstransformation (Gleichung 1) bestimmen. Die Pose repräsentiert die durch die Drehmatrix  $\underline{C}$  dargestellte Orientierung und die Position  $\underline{r}$ .<sup>1</sup>

$$\underline{P} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & r_x \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & r_y \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & r_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{C} & \underline{r} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \mathcal{F}(q) \quad (1)$$

Die Transformation von der Achsebene in ein kartesisches Koordinatensystem beruht auf der Beschreibung des Roboters als kinematische Kette, in der jedes Segment des Roboterarms durch die sogenannten Denavit-Hartenberg-Parameter (DH-Parameter) [DH55; Pau81] beschrieben wird.

Bei dieser Methode zur indirekten Bestimmung der Endeffektorpose wird jedoch die Wirkung von Störgrößen, die in der kinematischen Kette hinter den Antrieben auftreten, nicht erfasst. Beispiele für solche, von den internen Sensoren nicht messbaren Größen sind Nachgiebigkeiten und Lose der Getriebe sowie die praktisch weniger relevanten Nachgiebigkeiten und Längenabweichungen der Robotersegmente. Um diese Nachteile zu umgehen, werden sowohl bei der statischen als auch bei der dynamischen Kalibrierung externe Messsysteme zur direkten Erfassung der Endeffektorpose eingesetzt.

#### 2.2.2 Externe Messsysteme

Externe Messsysteme können auf unterschiedlichen Verfahren basieren. Bei Messsystemen zur Bestimmung der Position des Endeffektors nach dem Prinzip des

<sup>1</sup> Hier wird für die Pose die Darstellung als in der Robotik übliche Transformationsmatrix in homogenen Koordinaten verwendet, da so eine einheitliche Beschreibung durch eine  $4 \times 4$ -Matrix möglich ist.

Trilatationsverfahrens, werden die Abstände des Endeffektors zu drei bekannten Positionen gemessen. Eine Realisierung dieses Prinzips findet in der Multi-Laser-tracking-Interferometrie Anwendung, bei dem Laserinterferometer die Abstände bestimmen [Hof87]. Andere Systeme setzen dazu gespannte Seile [RM96; Mc97] oder Ultraschall [RJ97] ein.

Die Single-Laser-tracking-Interferometrie stützt sich auf die Vermessung einer Position in Polarkoordinaten. Die nach diesem Prinzip arbeitenden Systeme messen von ihrem Standort zwei Winkel und die Entfernung zu einer 3-D-Zielposition, die durch einen Retroreflektor definiert wird [NM97].

In Theodolitensystemen wird das Prinzip der Triangulation zur Positionsmessung eingesetzt, wobei von mindestens zwei Theodoliten eine Zielmarke am Endeffektor angepeilt wird. Aus den Winkelstellungen der Theodoliten in Azimut und Elevation und mit Kenntnis der Bezugsbasis kann die Position der Zielmarke im Raum ermittelt werden.

Photogrammetrische Systeme bestimmen die Position des Zielsystems aus mindestens zwei Bildaufnahmen [AL96]. Vorwiegend werden hochauflösende CCD-Kameras und als Zielsystem Infrarotleuchtdioden eingesetzt [Die95].

Die Nachteile der meisten Messsysteme sind die Einschränkung der Bewegungsfreiheit des Roboters, zum Beispiel durch Seile oder durch die optische Verdeckung, und der hohe Aufwand beim Einrichten des Messsystems, da oft Referenzmarken und mehrere Kameras oder zusätzliche Einrichtungen im beengten Roboterarbeitsraum installiert werden müssen.

Die dynamische Erfassung einer Roboterbahn ist erst mit modernen Laser-tracking-Systemen [SVA97; LSK97] und Inertialmesssystemen [Hin93] möglich geworden. Das hier vorgestellte dynamische Kalibrierungsverfahren basiert auf einem Inertialmesssystem, das aus drei hochgenauen Servo-Beschleunigungsaufnehmern und drei Ringlaserkreiseln besteht, die in den orthogonalen Raumrichtungen des Sensor-Koordinatensystems angeordnet sind. Ein solches System eignet sich besonders gut zur Erfassung kurzer Bewegungsabläufe des Roboter-Endeffektors. Die in einer externen Messung während einer Bewegung ermittelten Posen können für die Identifikation des Fehlermodells des Korrekturverfahrens mit Hilfe der inversen kinematischen Transformation  $\mathcal{F}^{-1}$  (vgl. Gl. 1) in die Achsebene des Roboters transformiert werden. Auf diese Weise werden die von den roboterinternen Sensoren nicht erfassten Störgrößen berücksichtigt. Im folgenden Abschnitt wird der Einsatz eines Inertialmesssystems beschrieben.

### 3 Robotervermessung mit einem Inertialmesssystem

Die im Rahmen der dynamischen Roboterkalibrierung letztlich interessierende Größen sind die variablen Achskoordinaten des Roboters. Für Knickarmroboter sind dies die Winkel der Roboterelkenne, die in-

direkt über eine Posemessung am Roboter-Endeffektor bestimmt werden. Bild 2 beschreibt den Messablauf.

Im ersten Schritt misst das am Roboter-Endeffektor montierte Inertialmesssystem die Beschleunigung  $\underline{a}_{sg}$  und die Winkelgeschwindigkeit  $\underline{\omega}_{se}$  entlang der Bahn (siehe Abschnitt 3.1). Aus den Messwerten wird in einer Navigationsrechnung der zeitliche Verlauf der Pose des Sensor-Koordinatensystems  $\{s\}$  im Welt-Koordinatensystem  $\{w\}$  ( ${}^w\underline{C}_s$ ,  ${}^w\underline{r}$ ) berechnet. Da die Genauigkeit des Inertialmesssystems durch eine Sensorkalibrierung der eingebauten Beschleunigungsaufnehmer vor der Messung gesteigert werden kann, wurde ein Verfahren entwickelt, das eine automatisierte Sensorkalibrierung mit Hilfe des Roboters ermöglicht. Dieses Verfahren wird ausführlich in Abschnitt 3.2 beschrieben.

Der zweite Schritt umfasst die Transformation der gemessenen Posen in das kartesische Roboter-Koordinatensystem und die anschließende Umrechnung der Daten in die Achsebene des Roboters, um die gewünschten Gelenkwinkel  $\underline{q}$  zu erhalten. Die Beschreibung dieser Transformation erfolgt in Abschnitt 3.3.

#### 3.1 Inertialmesssystem

Das externe Messsystem basiert auf einem autonom arbeitenden Trägheitsnavigationssystem, das durch Lösen der Bewegungs-Differentialgleichung

$$\ddot{\underline{r}}(t) = \underline{\underline{C}}(t) \cdot \underline{a}_{sg}(t) - 2 \underline{\underline{\epsilon}} \times \underline{r}(t) - \underline{g}$$

und der Transformations-Differentialgleichung

$$\dot{\underline{\underline{C}}}(t) = \underline{\underline{C}}(t) \cdot (\underline{\omega}_{se}(t) - \underline{\underline{C}}^{-1}(t) \cdot \underline{\underline{\epsilon}}) \times \underline{I}$$

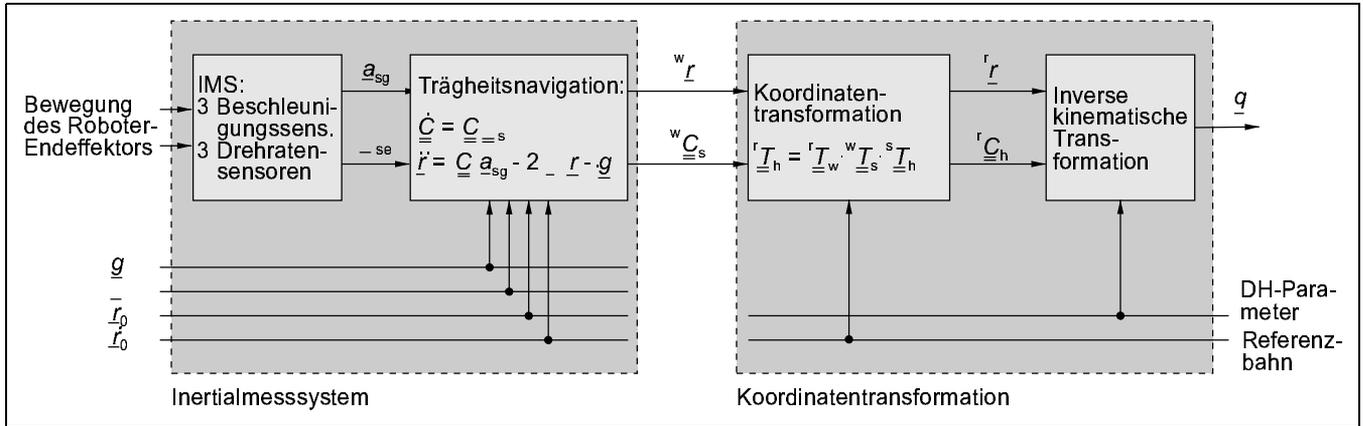
mit

$\underline{a}_{sg}(t), \underline{\omega}_{se}(t)$ :	im Sensor-Koordinatensystem gemessene Beschleunigung und Winkelgeschwindigkeit
$\underline{r}(t), \underline{\underline{C}}(t)$ :	Position und Orientierung des Sensor-Koordinatensystems im Welt-Koordinatensystem
$\underline{\underline{\epsilon}}, \underline{g}_r$ :	Erddrehrate und ortsabhängige Erdschwerebeschleunigung

alle translatorischen und die rotatorischen Bewegungsgrößen in einem erdfesten Referenz-Koordinatensystem, dem sogenannten Welt-Koordinatensystem, bestimmt. Ein solches, sogenanntes Strap-down-System wurde an der Universität des Saarlandes speziell für die Vermessung von Robotern entwickelt [Hin93]. Durch spezielle Stützalgorithmen wird damit eine Positions-Messunsicherheit von weniger als 0,1 mm bei einer Messdauer von 5 s erreicht.

#### 3.2 Sensorkalibrierung mit dem Roboter

Die Messgenauigkeit wird entscheidend durch die Güte der Sensorkalibrierung im Inertialmesssystem bestimmt. Die nach der Fertigung des Messsystems einmalig durchzuführende Grund-Kalibrierung, bei der unter anderem die Skalenfaktoren und Offsets der eingesetzten Sensoren bestimmt werden, führt nicht auf eine hinreichend hohe Messgenauigkeit. Die Ursache hierfür sind zufällige Schwankungen der Skalenfaktoren und Offsets der Beschleunigungsaufnehmer (day-to-day-drift).



**Bild 2:** Signalflossplan eines Inertialmesssystems (IMS) zur Robotervermessung

Das folgende einfache Beispiel veranschaulicht den Einfluss eines Offsets  $\Delta \underline{a}$  im gemessenen Beschleunigungssignal  $\underline{a}_{\text{m}} = \underline{a} + \Delta \underline{a}$  auf den berechneten Weg:

$$\underline{s}_{\text{m}} = \underline{s} + \Delta \underline{s} = \frac{1}{2} \underline{a}^2 \cdot t^2 + \frac{1}{2} \Delta \underline{a}^2 \cdot t^2$$

Für  $\Delta \underline{a} = 10^{-4} \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$  ist der Wegfehler  $\Delta \underline{s}$  bereits nach einer Messdauer von  $t = 5\text{s}$  auf 1,25mm angestiegen.

Zur Erhöhung der Messgenauigkeit wurde speziell ein Kalibrierverfahren für die Beschleunigungsaufnehmer im Inertialmesssystem entwickelt, das vor jeder Robotervermessung angewendet wird. Als Bezugsnormale dient hierbei das als bekannt vorausgesetzte Feld der Erdschwerebeschleunigung, in dem die sensitiven Achsen der Beschleunigungsaufnehmer nacheinander durch den zu kalibrierenden Roboter vertikal ausgerichtet werden.

Wird ein Beschleunigungsaufnehmer im Erdschwerefeld erst vertikal nach oben ( $a^\uparrow$ ) und anschließend vertikal nach unten ( $a^\downarrow$ ) ausgerichtet, ergeben sich für den Skalenfaktor  $s_a$  und den Offset  $o_a$  die bekannten Berechnungsvorschriften gemäß

$$s_a = \frac{a^\uparrow - a^\downarrow}{2 \cdot g} \quad \text{und} \quad o_a = \frac{a^\uparrow + a^\downarrow}{2}$$

### 3.2.1 Berechnung von Skalenfaktor und Offset

Die notwendige vertikale Ausrichtung der drei Beschleunigungsaufnehmer des Messsystems im Erdschwerefeld kann der zu kalibrierende Roboter selbst vornehmen, und es sind folgende Teilprobleme zu lösen.

- Ermittlung der Ausrichtung des Messsystems und
- Generierung der Stellgröße für den Roboter.

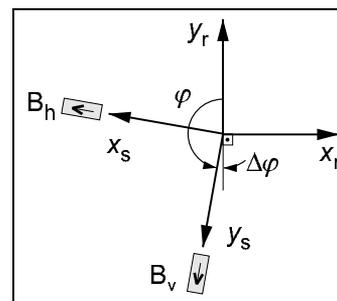
Es wird vorausgesetzt, dass die Beschleunigungsaufnehmer im Inertialmesssystem orthogonal in den drei Raumrichtungen angeordnet sind bzw. die Orthogonalitätsfehler bekannt sind und somit kompensiert werden können. Damit ist das vertikale Ausrichten eines Beschleunigungsaufnehmers im Erdschwerefeld äquivalent zum horizontalen Ausrichten der beiden orthogonal angeordneten Sensoren. Der Vorteil der letztgenannten Methode ist eine Steigerung der Empfindlichkeit

des Ausrichtvorgangs, da die horizontal gemessene Beschleunigung proportional zum Sinus des Ausrichtfehlers  $\Delta \varphi$  ist und nicht zum Kosinus, wie die vertikal gemessene Beschleunigung. Für  $\Delta \varphi \ll 1$  gilt nämlich

$$\cos \Delta \varphi \approx 1 \quad \text{und} \quad \sin \Delta \varphi \approx \Delta \varphi$$

Allerdings bleibt das Problem, dass der Skalenfaktor und der Offset der horizontalen Beschleunigungsaufnehmer nicht als bekannt vorausgesetzt werden können.

Im Folgenden wird untersucht, mit welcher Unsicherheit Skalenfaktor und Offset ermittelt werden. Hierbei wird das räumliche Problem wegen der besseren Übersichtlichkeit auf eine zweidimensionale Aufgabe reduziert; d.h. es wird ein System mit zwei in einem Sensor-Koordinatensystem  $\{x_s, y_s\}$  orthogonal angeordneten Beschleunigungsaufnehmern  $B_h$  und  $B_v$  angenommen, siehe Bild 3.



**Bild 3:** Anordnung zur Bestimmung von Skalenfaktor und Offset.  $B_h, B_v$ : Beschleunigungsaufnehmer zur Messung der horizontalen bzw. vertikalen Beschleunigung.  $\{x_s, y_s\}$ : Sensor-Koordinatensystem,  $\{x_r, y_r\}$ : erdfestes Welt-Koordinatensystem

Die Bestimmung des Skalenfaktors und des Offsets des Beschleunigungsaufnehmers  $B_v$  erfordert die Messung der Beschleunigungen  $a_h^\uparrow$  und  $a_v^\uparrow$  bei  $\varphi \approx 0^\circ$  sowie der Beschleunigungen  $a_h^\downarrow$  und  $a_v^\downarrow$  bei  $\varphi \approx 180^\circ$ .

Es ergibt sich für  $\varphi = 0^\circ + \Delta \varphi^\uparrow$

$$a_h^\uparrow = s_h \cdot g \cdot \sin \Delta \varphi^\uparrow + o_h$$

$$a_v^\uparrow = s_v \cdot g \cdot \cos \Delta \varphi^\uparrow + o_v$$

und für  $\varphi = 180^\circ + \Delta \varphi^\downarrow$

$$a_h^\downarrow = s_h \cdot g \cdot (-\sin \Delta \varphi^\downarrow) + o_h$$

$$a_v^\downarrow = s_v \cdot g \cdot \cos \Delta \varphi^\downarrow + o_v$$

woraus mit  $\Delta\varphi = \arcsin \frac{a_h - o_h}{s_h \cdot g}$  folgt

$$\begin{aligned} a_v^\dagger &= s_v \cdot g \cdot \cos \Delta\varphi^\dagger + o_h \\ a_v^\ddagger &= -s_v \cdot g \cdot \cos \Delta\varphi^\ddagger + o_h \end{aligned}$$

Der Winkel  $\Delta\varphi$  bezeichnet die Abweichung von der vertikalen Ausrichtung des Sensorsystems. Diese Abweichung kann beispielsweise durch eine ungenaue Ausrichtung des Roboter-Endeffektors verursacht sein.

Durch Bildung der Differenz und der Summe der beiden Messwerte für  $a_v$  ergibt sich

$$\begin{aligned} a_v^\dagger - a_v^\ddagger &= s_v \cdot g (\cos \Delta\varphi^\dagger + \cos \Delta\varphi^\ddagger) , \\ a_v^\dagger + a_v^\ddagger &= 2 \cdot o_v + s_v \cdot g (\cos \Delta\varphi^\dagger - \cos \Delta\varphi^\ddagger) . \end{aligned}$$

Für die weiteren Betrachtungen werden folgende Annahmen getroffen.

- Der Betrag des Offsets sei  $|o| < 0,01 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$  und
- das Messsystem kann durch den Roboter so orientiert werden, dass  $|a_h| < 0,01 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ .

Diese Voraussetzungen sind bei realen Inertialmesssystemen stets erfüllbar (realistische Werte:  $|o| < 0,001 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$  und  $|a_h| < 0,001 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ ). Damit lässt sich in obigen Gleichungen der Ausdruck  $\cos \Delta\varphi = \cos \left( \arcsin \frac{a_h - o_h}{s_h \cdot g} \right)$  in sehr guter Näherung durch  $\cos \frac{a_h - o_h}{s_h \cdot g}$  ersetzen, und es gilt

$$\begin{aligned} s_v &= \frac{a_v^\dagger - a_v^\ddagger}{2 \cdot g} \cdot (1 - \Delta s_v) , \\ o_v &= \frac{a_v^\dagger + a_v^\ddagger}{2} + \Delta o_v \end{aligned}$$

mit den unbekanntem Restfehlern

$$\begin{aligned} \Delta s_v &= 1 - 2 \left[ \cos \frac{a_h^\dagger - o_h}{s_h \cdot g} + \cos \frac{a_h^\ddagger - o_h}{s_h \cdot g} \right]^{-1} , \\ \Delta o_v &= -\frac{s_v \cdot g}{2} \left[ \cos \frac{a_h^\dagger - o_h}{s_h \cdot g} - \cos \frac{a_h^\ddagger - o_h}{s_h \cdot g} \right] . \end{aligned}$$

Werden für  $o_h$  und  $a_h$  die in den getroffenen Voraussetzungen angegebenen Grenzwerte eingesetzt, ergeben sich folgende Abschätzungen für die Restfehler  $\Delta s_v$  und  $\Delta o_v$ .

$$\begin{aligned} 0 &< \Delta s_v < 2 \cdot 10^{-6} , \\ -10^{-6} \frac{\text{m}}{\text{s}^2} &< \Delta o_v < 10^{-6} \frac{\text{m}}{\text{s}^2} , \end{aligned}$$

da

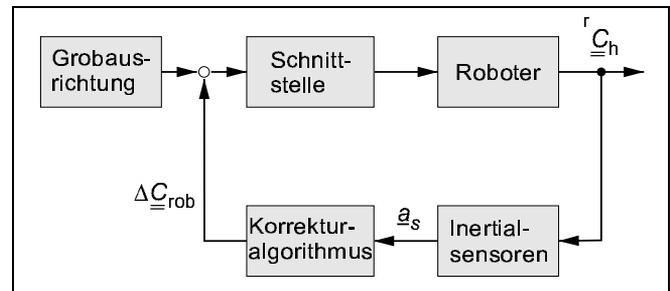
$$1 - 2 \cdot 10^{-6} < \cos \frac{a_h - o_h}{s_h \cdot g} < 1 .$$

Folglich liegt die Messunsicherheit aufgrund der Restfehler im Bereich der Sensorauflösung von etwa  $1 \mu\text{g}$ , und sie ist beim realen Messsystem wegen  $|o| < 0,001 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$  und  $|a_h| < 0,001 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$  noch geringer.

Die hier gezeigte Abschätzung ist auf den dreidimensionalen Fall übertragbar und führt dort zu vergleichbaren Ergebnissen. Die erzielbare Genauigkeit kann bei Bedarf durch eine Wiederholung der Sensorkalibrierung gesteigert werden, da die Unsicherheit des Offsets nach jedem Kalibrierschritt abnimmt.

### 3.2.2 Generierung der Stellgröße für den Roboter

Die Kalibrierung der drei Beschleunigungsaufnehmer des Inertialmesssystems erfordert Messungen in sechs verschiedenen Orientierungen, die nacheinander durch den Roboter angefahren werden. Der mit dieser Grobausrichtung erzielbare minimale Ausrichtfehler ist jedoch für eine Sensorkalibrierung zu groß, da der Roboter zu diesem Zeitpunkt nicht kalibriert ist und die Lage des Sensor-Koordinatensystems bezüglich des Roboterhand-Koordinatensystems nur näherungsweise bekannt ist. Die erforderliche Genauigkeit der Ausrichtung wird durch die Rückführung einer mit Hilfe der gemessenen Beschleunigungen  $\underline{a}_s = (a_x, a_y, a_z)^T$  ermittelten Drehmatrix  $\Delta \underline{C}_{\text{rob}}$  erreicht, mit der die Robotersteuerung den Ausrichtfehler korrigiert, siehe Bild 4.



**Bild 4:** Automatische Vertikalausrichtung des Inertialmesssystems durch den Roboter.

Die Ermittlung der Drehmatrix  $\Delta \underline{C}_{\text{rob}}$  erfordert folgende Schritte.

1. Bestimmung des Mittelwertes der Beschleunigung  $\underline{a}_s$ ,
2. Berechnung der Drehmatrix in Koordinaten des Inertialmesssystems ( $\Delta \underline{C}_{\text{ims}}$ ),
3. Transformation der Drehmatrix in Koordinaten des Roboters ( $\Delta \underline{C}_{\text{rob}}$ ),
4. Korrektur des Ausrichtfehlers durch den Roboter

Erfolgt die Ausrichtung des Messsystems ohne Fehler, wird die Beschleunigung

$$\underline{a}_s^* = g \cdot \underline{\varrho}$$

gemessen. Der Hilfsvektor  $\underline{\varrho} = (\varrho_1, \varrho_2, \varrho_3)$  kennzeichnet hierbei die gewünschte Orientierung im Erdschwerefeld, und es gilt mit  $k = 1, 2, 3$

$$\varrho_k = \begin{cases} \frac{a_{s,k}}{a_{s,k}} , & |a_{s,k}| = \max(|a_{s,x}|, |a_{s,y}|, |a_{s,z}|) \\ 0 , & \text{sonst.} \end{cases}$$

Die gesuchte Drehmatrix  $\Delta \underline{C}_{\text{ims}}$  ergibt sich aus der Bedingung, dass sie die im Sensor-Koordinatensystem gemessene Beschleunigung auf den Vektor  $\underline{a}_s^*$  abbildet. Folglich ist eine Matrix  $\Delta \underline{C}_{\text{ims}}$  zu suchen, für die

$$\underline{a}_s^* = \Delta \underline{C}_{\text{ims}} \cdot \underline{a}_s .$$

Für  $\underline{a}_s \neq \underline{a}_s^*$  ist der normierte Vektor  $\underline{n}$ , um den  $\Delta \underline{C}_{\text{ims}}$  drehen muss,

$$\underline{n} = \frac{\underline{a}_s^* \times \underline{a}_s}{|\underline{a}_s^* \times \underline{a}_s|}$$

und der Drehwinkel zwischen  $\underline{a}_s$  und  $\underline{a}_s^*$

$$\psi = \arccos \frac{\underline{a}_s^* \underline{a}_s}{|\underline{a}_s^* \underline{a}_s|}$$

Aus diesen Beziehungen folgt die gesuchte Drehmatrix zu

$$\Delta \underline{C}_{ims} = \cos \psi \underline{I} + (1 - \cos \psi) \underline{n} \cdot \underline{n}^T + \sin \psi \underline{n} \times \underline{I} \quad (2)$$

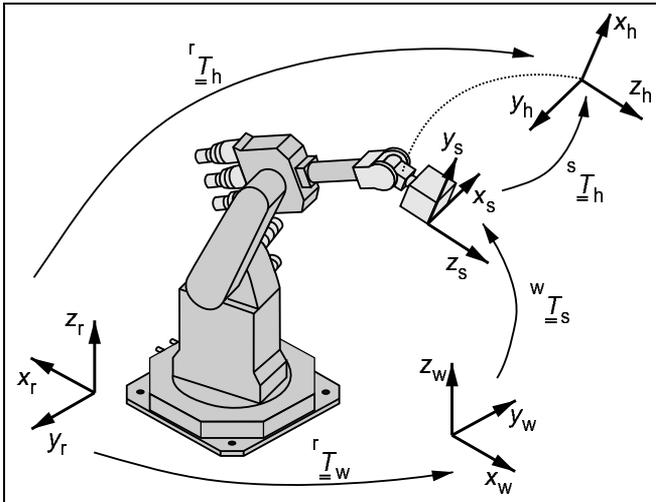
$\underline{I}$  ist die Einheitsmatrix, und es gilt

$$\underline{n} \times \underline{I} = \begin{pmatrix} 0 & -n_z & n_y \\ n_z & 0 & -n_x \\ -n_y & n_x & 0 \end{pmatrix}$$

Der nächste Schritt ist die Transformation der Drehmatrix  $\Delta \underline{C}_{ims}$  in das Koordinatensystem  $\{r\}$  des Roboters. Allgemein gilt die Transformationsvorschrift

$${}^r \underline{C}_h = {}^r \underline{C}_w \cdot {}^w \underline{C}_s \cdot {}^s \underline{C}_h$$

wobei  ${}^r \underline{C}_w$  die Orientierung des Welt-Koordinatensystems  $\{w\}$  im Roboterbasis-Koordinatensystem  $\{r\}$  ist und  ${}^s \underline{C}_h$  die des Roboterhand-Koordinatensystems  $\{h\}$  bezüglich des Sensor-Koordinatensystems  $\{s\}$ , siehe Bild 5.



**Bild 5:** Koordinatensysteme bei der externen Vermessung von Robotern.

Die mit der Drehmatrix  $\Delta \underline{C}_{rob}$  korrigierte Orientierung des Roboter-Endeffektors ergibt sich zu

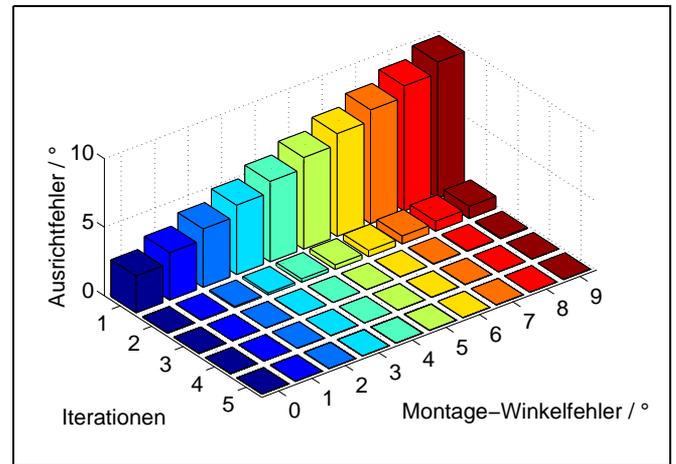
$${}^r \underline{C}_h^* = {}^r \underline{C}_h \cdot \Delta \underline{C}_{rob}$$

wobei

$$\Delta \underline{C}_{rob} = {}^h \underline{C}_s \cdot \Delta \underline{C}_{ims} \cdot {}^h \underline{C}_s^{-1} \quad (3)$$

Mit der Transformationsvorschrift 3 kann bei Kenntnis von  ${}^h \underline{C}_s$ , also der Orientierung des Inertialmesssystems bezüglich der Endeffektors, die erforderliche absolute Stellgröße  ${}^r \underline{C}_h^*$  für den Roboter ermittelt werden.

Zur Bestimmung von  ${}^h \underline{C}_s$  könnte man ein weiteres Messsystem einsetzen (was aus praktischen Gründen natürlich ausscheidet) oder die Matrix durch eine Hand-Sensor-Kalibrierung identifizieren (vgl. Abschnitt 3.3), die allerdings erst nach Kalibrierung der Beschleunigungsaufnehmer durchgeführt werden kann. Eine ungenau bekannte Drehmatrix  ${}^h \underline{C}_s$  hätte zur Folge, dass die Korrekturmatrix  $\Delta \underline{C}_{rob}$  fehlerhaft berechnet würde. Der daraus resultierende Ausrichtfehler  $\Delta \varphi$  des Beschleunigungsaufnehmers von der Vertikalen kann durch Wiederholung der Verfahrensschritte unter eine vorgebbare zulässige Maximalabweichung gebracht werden. Bild 6 veranschaulicht die schnelle Abnahme des Ausricht-



**Bild 6:** Winkelfehler der Sensor-Ausrichtung für unterschiedliche Montagefehler in Abhängigkeit von der Anzahl der Iterationen.

fehlers mit zunehmender Schrittzahl für unterschiedliche Montagefehler. Da der Ausrichtfehler  $\Delta \varphi$  für einen Montagefehler von  $9^\circ$  nach 5 Iterationen  $< 0,0006^\circ$  ist, kann er für die Sensorkalibrierung vernachlässigt werden. Folglich kann die Sensorkalibrierung ohne Kenntnis der exakten Ausrichtung des Sensor-Koordinatensystems bzgl. des Roboterhand-Koordinatensystems durchgeführt werden.

### 3.3 Transformation der kartesischen Messwerte in Roboterachswerte

Die mit dem Inertialmesssystem erfassten kartesischen Messwerte können durch die Matrix  ${}^w \underline{T}_s$  repräsentiert werden.<sup>2</sup> Diese Matrix beschreibt die zeitlich veränderliche Pose des Sensor-Koordinatensystems  $\{s\}$  bezüglich des Welt-Koordinatensystems  $\{w\}$ . Da für die Parameteridentifikation jedoch die Achswinkel des Roboters benötigt werden, müssen die ermittelten inertialen Messwerte in die Achsebene des Roboters transformiert werden, was mit Hilfe der inversen kinematischen Transformation durchgeführt werden kann.

<sup>2</sup> Die Transformation vom Koordinatensystem  $\{b\}$  zum Koordinatensystem  $\{a\}$  sowie die Pose (Orientierung und Position) des Koordinatensystems  $\{b\}$ , dargestellt im Koordinatensystem  $\{a\}$ , wird durch dieselbe  $4 \times 4$ -Matrix  ${}^a \underline{T}_b$  dargestellt.

Voraussetzung zur Durchführung der inversen kinematischen Transformation ist, dass die Pose des Roboterhand-Koordinatensystem  $\{h\}$  bzgl. des Roboterbasis-Koordinatensystems  $\{r\}$  beschreibt. Deswegen muss  ${}^wT_{\underline{s}}$  wie folgt transformiert werden.

$${}^rT_{\underline{h}} = {}^rT_{\underline{w}} \cdot {}^wT_{\underline{s}} \cdot {}^sT_{\underline{h}}$$

${}^rT_{\underline{w}}$  und  ${}^sT_{\underline{h}}$  beschreiben die konstanten Beziehungen zwischen Welt- und Roboterbasis-Koordinatensystem bzw. zwischen Roboterhand- und Sensor-Koordinatensystem. Beide Transformationsmatrizen müssen durch Messungen identifiziert werden. Die Vorgehensweise bei dieser sogenannten Hand-Sensor-Kalibrierung wird im Folgenden dargestellt.

### 3.3.1 Hand-Sensor-Kalibrierung

Die Grundlage der Hand-Sensor-Kalibrierung ist die Vermessung mehrerer Posen, die im Stillstand sowohl mit den roboterinternen Sensoren als auch mit dem am Endeffektor montierten Inertialmesssystem erfasst werden. Aus den Messergebnissen werden anschließend die Transformationsvorschriften hergeleitet. Aufgrund der Vorgabe, dass alle zur Identifikation zu vermessenden Posen die gleiche Orientierung aufweisen, erreicht man eine Vereinfachung der Hand-Sensor-Kalibrierung.

Für die Identifikation der Matrizen müssen mindestens drei beliebigen Posen  $\underline{P}_1$ ,  $\underline{P}_2$  und  $\underline{P}_3$  vermessen werden. Die Posen sollten dabei möglichst ein Dreieck mit einem Öffnungswinkel  $\gamma$  nahe bei 90 Grad aufspannen, siehe Bild 7. Die mit den roboterinternen Sensoren

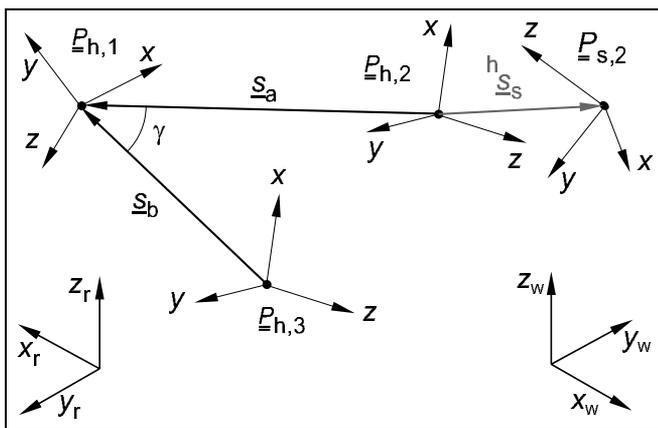


Bild 7: Messung von drei Posen  $P$  zur Hand-Sensor-Kalibrierung

ermittelten Posen sind diejenigen des Roboterhand-Koordinatensystems ( $\underline{P}_{h,i}$ ), und die mit dem Inertialmesssystem gemessenen Posen geben die Position und Orientierung des Sensor-Koordinatensystems ( $\underline{P}_{s,i}$ ) wieder. In Bild 7 wird aus Gründen der Übersichtlichkeit lediglich die vom Inertialmesssystem direkt gemessene Pose  $\underline{P}_{s,2}$  dargestellt.

Da sich die Posen  $\underline{P}_i$  aus einer Rotation  $\underline{C}_i$  und einer Translation  $\underline{s}_i$  zusammensetzen, erhält man für die gemessenen Pose  $i$  für  $i = 1, 2, 3$  folgendes Gleichungs-

system.

$${}^r\underline{s}_{h,i} + {}^r\underline{C}_{h,i} \cdot {}^h\underline{s}_s = {}^r\underline{C}_{\underline{w}} \cdot {}^w\underline{s}_{s,i} + {}^r\underline{s}_w \quad (4)$$

$${}^r\underline{C}_{h,i} \cdot {}^h\underline{C}_s = {}^r\underline{C}_{\underline{w}} \cdot {}^w\underline{C}_{s,i} \quad (5)$$

Die gesuchten Größen sind die für alle Posen konstanten Beziehungen  ${}^r\underline{C}_{\underline{w}}$ ,  ${}^r\underline{s}_w$ ,  ${}^h\underline{C}_s$  und  ${}^h\underline{s}_s$ . Durch Differenzbildung ergibt sich aus obigen Gleichungen bei konstanter Orientierung aller gemessenen Posen ( ${}^r\underline{C}_{h,\mu} = {}^r\underline{C}_{h,\nu}$  mit  $\mu, \nu = 1, 2, 3$ ):

$${}^r\underline{s}_a = {}^r\underline{C}_{\underline{w}} \cdot {}^w\underline{s}_a \quad (6)$$

$${}^r\underline{s}_b = {}^r\underline{C}_{\underline{w}} \cdot {}^w\underline{s}_b \quad (7)$$

Sind die Vektoren  $\underline{s}_a$  und  $\underline{s}_b$  nicht kollinear, kann die Drehmatrix in zwei Schritten berechnet werden. Mit Hilfe von Gleichung 6 wird eine Matrix  ${}^r\underline{C}_{\underline{w}}^*$  bestimmt, die den Vektor  ${}^w\underline{s}_a$  auf  ${}^r\underline{s}_a$  dreht. Der verbleibende Freiheitsgrad von  ${}^r\underline{C}_{\underline{w}}^*$  (Drehung um Vektor  ${}^r\underline{s}_a$ ) lässt sich durch Gleichung 7 reduzieren, und es ergibt sich die gesuchte, eindeutige Drehmatrix  ${}^r\underline{C}_{\underline{w}}$ .

Da der Ursprung des Welt-Koordinatensystems frei wählbar ist (z.B.  ${}^r\underline{s}_w = (0, 0, 0)^T$ ), kann Gleichung 4 nach der noch gesuchten Verschiebung des Sensor-Koordinatensystems bzgl. des Roboterhand-Koordinatensystems  ${}^h\underline{s}_s$  aufgelöst werden. Ebenso findet man mit Hilfe der Gleichung 5 die Drehmatrix  ${}^h\underline{C}_s$ .

Mit der Kenntnis von  ${}^r\underline{C}_{\underline{w}}$ ,  ${}^r\underline{s}_w$ ,  ${}^h\underline{C}_s$  und  ${}^h\underline{s}_s$  lässt sich nun die Transformation der mit dem Inertialmesssystem gemessenen Posen in kartesische Roboterkoordinaten durchführen und es können die zur Roboterkalibrierung erforderlichen Achswinkel berechnet werden.

### 3.3.2 Inverse kinematische Transformation

Die Berechnung der Achswinkel  $\underline{q}$  des Roboters aus einer gegebenen Pose des Roboterhand-Koordinatensystems  ${}^rT_{\underline{h}}$  durch

$$\underline{q} = (q_1, q_2, \dots, q_6) = \mathcal{F}^{-1} \left( {}^rT_{\underline{h}} \right)$$

wird als inverse kinematische Transformation bezeichnet. Mit ihr kann die Achsstellung des Roboters bestimmt werden, die der vorgegebenen Pose  ${}^rT_{\underline{h}}$  entspricht. Die inverse kinematische Transformation kann analytisch oder durch numerische Verfahren gelöst werden. Welche Verfahren eingesetzt werden hängt auch vom jeweils betrachteten Roboter ab. Da die inverse kinematische Transformation aus der Literatur hinreichend bekannt ist (z. B. [DH55; Pau81; Sch92]), wird hier auf deren nähere Betrachtung verzichtet.

## 4 Zusammenfassung

Es wurde erläutert, warum die roboterinternen Sensoren für die dynamische Roboterkalibrierung nicht als hinreichend genau vorausgesetzt werden können. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, für die Kalibrierung ein externes Messsystem einzusetzen. Hierzu wurde ein Verfahren zur dynamischen Vermessung von Industrierobotern beschrieben, das auf einem Inertialmess-



system basiert. Es konnte gezeigt werden, wie die gegenüber Skalenfaktor- und Offset-Schwankungen empfindlichen Beschleunigungsaufnehmer mit Hilfe des zu vermessenden Roboters selbst kalibriert werden können. Dadurch entfällt eine sonst notwendige gesonderte Kalibrierung. Darüber hinaus wurde ein Verfahren zur Hand-Sensor-Kalibrierung vorgestellt, das die Identifikation der geometrischen Beziehung zwischen dem Messsystem und der Roboterhand auf einfache Weise erlaubt. Die hier vorgestellten Verfahren bilden die Voraussetzung für den Einsatz von Inertialmesssystemen zur genauen Robotervermessung, und sie eröffnen erstmals neue Möglichkeiten für die flexible dynamische Vermessung von Industrierobotern.

### Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Unterstützung des Forschungsvorhabens *Dynamisches Kalibrierverfahren für 6-Achsen-Industrieroboter zur Erhöhung der Bahnengenauigkeit*, in dessen Rahmen einige der vorgestellten Ergebnisse entstanden sind.

### Literatur

- [AJ99] ALBAN, T. ; JANOCHA, H.: Dynamic Calibration of Industrial Robots with Inertial Measurement Systems. In: *Proceedings of the European Control Conference ECC, Karlsruhe, VDI/VDE GMA, 1999*
- [AL96] ALBADA, G. D. v. ; LAGERBERG, A.: A Low-cost Pose-measuring System for Robot Calibration / University of Amsterdam, Faculty of Mathematics and Computer Science. 1996. – Forschungsbericht. –
- [DH55] DENAVIT, J. ; HARTENBERG, R. S.: A Kinematic Notation for Lower-Pair Mechanisms Based on Matrices. In: *ASME Journal of Applied Mechanics* 22 (1955), Nr. 3, S. 215–221
- [Die95] DIEWALD, B.: *Über-alles-Kalibrierung von Industrierobotern zur lokalen Minimierung der Posefehler*, Universität des Saarlandes, Dissertation, 1995
- [Fra97] Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik (IPK), Berlin: *RoboCal, Closing the Gap Between Model and Reality*. 1997
- [Hin93] HINÜBER, E. v.: *Bahn- und Positionsvermessung von Industrierobotern mit inertialen Meßsystemen*, Universität des Saarlandes, Dissertation, 1993
- [Hof87] HOF, A.: *Theorie und Realisierung eines Abbé-Fehlerfreien, selbstkalibrierenden räumlichen Wegmeßsystems*. VDI-Verlag, 1987 (VDI-Fortschrittsberichte: Steuerungs- und Regelungstechnik, Nr. 134)
- [ISO98] ISO: *ISO 9283, Manipulating Industrial Robots – Performance Criteria and Related Test Methods*. International Standardization Organisation, 1998
- [KJ97] KARNER, J. ; JANOCHA, H.: Hybrid controller for adaptive link control of industrial robots. In: *Journal of Intelligent and Robotic Systems* 20 (1997), Nr. 2, S. 93–104
- [LH99] LANGE, F. ; HIRZINGER, G.: Adaptive Minimization of the Maximal Path Deviations of Industrial Robots. In: *Proceedings of the European Control Conference ECC, Karlsruhe, VDI/VDE GMA, 1999*
- [LSK97] LEIGH-LANCASTER, C. J. ; SHIRINZADEH, B. ; KOH, Y. L.: Development of a Laser Tracking System. In: *Proceedings of 4th Annual Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice, MViP IEEE, Toowomba, Australien, 1997, S. 163–168*
- [Mc97] MCMMASTER, R. S.: A Low Cost, High Performance, Dynamic Testing Device for Tracking the Tool Point of Industrial Robots / Robot Simulations Ltd., UK. 1997. – Forschungsbericht. –
- [NM97] NEDDERMEYER, W. ; MAREK, J.: System zur Bestimmung der 3-D-Position von off-line programmierten Industrierobotern. In: *Optische Formerfassung, Erfahrungsaustausch zwischen Anwendern und Entwicklern, GMA-Tagung Langen GMA und VDI/VDE, 1997, S. 129–137*
- [Pau81] PAUL, R. P.: *Robot Manipulators: Mathematics, Programming, and Control*. Cambridge, London : MIT Press, 1981
- [RJ97] REIMANN, C. ; JANOCHA, H.: Präzise Erfassung von Raumpunkten mit Ultraschallsignalen. In: *XI. Meßtechnisches Symposium des Arbeitskreises der Hochschullehrer für Meßtechnik (AHMT)*, Rostock, 1997
- [RM96] ROÇADAS, P. S. ; MCMMASTER, R. S.: Robot and Cell Calibration Using a Contact Measurement System. In: *Proceedings of the 5th UK Mechatronics Forum International Conference, Vol. 2, Guimaras, Portugal, 1996, S. 399–404*
- [Roo98] ROOS, Eberhard: *Anwendungsorientierte Meß- und Berechnungsverfahren zur Kalibrierung off-line programmierter Roboterapplikationen*. Düsseldorf : VDI Verlag, 1998 (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 8, Nr. 709)
- [SAG97] SCHRÖER, K. ; ALBRIGHT, S. L. ; GRETHLEIN, M.: Complete, Minimal and Model-Continuous Kinematic Models for Robot Calibration. In: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 13 (1997), Nr. 1, S. 73–85
- [Sch92] SCHWINN, W.: *Grundlagen der Roboterkinematik*. Schwalbach : Verlag Liborius Schwinn, 1992
- [SVA97] SPIESS, S. ; VINCZE, M. ; AYROMLOU, M.: On the Calibration of a 6D Laser Tracking System for Contactless, Dynamic Robot Measurements. In: *Proceedings of the IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conference, IMTC, Ottawa, Kanada, 1997, S. 1203–1208*
- [VKS98] VISSER, A. ; KOHLHAAS, E. ; STEFFEN, K.: Vereinfachtes Kalibrieren von Industrierobotern. In: *Werkstattstechnik* 88 (1998), Nr. 1/2, S. 49–52
- [YY99] YUAN, J. ; YU, S. L.: End-Effector Position-Orientation Measurement. In: *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 15 (1999), Juni, Nr. 3, S. 592–595

**Dipl.-Ing. Thomas Alban** und **Prof. Dr.-Ing. habil. Hartmut Janocha**, Lehrstuhl für Prozessautomatisierung (LPA), Universität des Saarlandes, Im Stadtwald, Gebäude 13, D-66123 Saarbrücken.