

Der Industrieroboter als Referenz: Statische Kalibrierung von Inertialmesssystemen

Industrial Robots as a Reference: Static Calibration of Inertial Measurement Systems

J. Fox, H. Janocha, Saarbrücken

Kurzfassung

In diesem Beitrag wird ein Verfahren zur Kalibrierung von inertialen Messsystemen (IMS) mit Hilfe eines konventionellen Industrieroboters vorgestellt. Durch die Aufteilung des Verfahrens in Betrags- und Richtungskalibrierung ist es möglich, Nullpunktfehler und Skalenfaktoren der Sensoren sowie ihre Lagebeziehungen untereinander unabhängig von Posefehlern des Roboters zu identifizieren. Besondere Aufmerksamkeit wird hier einem Kalibrierschritt gewidmet, bei dem der Roboterendeffektor Kreisbahnen verfährt und somit Referenzdrehraten generiert. Die Struktur der Gleichungen bei Kreisbewegungen ermöglicht eine Formulierung als gemischt lineare Schätzung. Diese ermöglicht eine Dimensionsreduktion des Optimierungsproblems um die Anzahl der linearen Parameter, wodurch sich die Konvergenzgeschwindigkeit des nichtlinearen Optimierungsalgorithmus verbessert.

Abstract

This paper deals with a calibration method for inertial measurement systems by means of a conventional industrial robot. By dividing the calibration procedure up into three steps, whereby the first one only deals with the vector norm of the three-dimensional measurements, it is possible to identify offsets and scale factors of the sensors as well as nonorthogonalities independently of the robot's positioning errors. Focus is set on a third step in which the robot's end effector drives a circular path to generate reference rates. Taking advantage of the special structure of the equations for circular paths, it is possible to formulate the problem as a mixed-linear parameter estimation in which the dimension of the optimization problem can be reduced by the number of the linear parameters. Thereby, the convergence speed of the nonlinear optimization algorithm is improved.

1. Einleitung

Inertiale Messsysteme (IMS) finden sich heute in einer Vielzahl von Anwendungen [3]. Klassisches Einsatzgebiet ist die Strapdown-Navigation von Flugzeugen oder Unterseebooten [5,7]; aber auch bei der Kalibrierung von Roboterposen [1] oder der Stabilisierung von Kameraplattformen und zunehmend im Automobil (Crasherkenkung, Fahrdynamikregelung) werden sie eingesetzt, wenn auch in letztgenannter Anwendung bisher noch nicht als 6-Achsen-Sensorsystem.

Aufgrund der hohen Genauigkeitsanforderungen an IMS in Navigationsaufgaben ist eine exakte Kalibrierung der Systeme unabdingbar. Dabei müssen nicht nur die systematischen Fehler der einzelnen Sensoren im IMS bestimmt werden, sondern insbesondere auch die Lagebeziehungen der Sensoren untereinander und bezogen auf einen Referenzpunkt des Messsystems. Die Kalibrierung von IMS geschieht traditionell mit Hilfe von Positionier- und Schütteltischen [6,7]. Zur Kalibrierung der Drehratensensoren werden zudem Drehtische eingesetzt, die exakte Drehraten erzeugen können.

In [4] wurde eine neue, dreischrittige Kalibrierstrategie vorgestellt, bei der das IMS mit Hilfe eines Industrieroboters verfahren wird. Dabei wurden die Messgleichungen für die sog. Betrags- und Richtungskalibrierung aufgestellt und die Vorgehensweise des dritten Schrittes, bei dem der Roboterendeffektor Kreisbahnen verfährt, skizziert. In dieser Arbeit soll nun letzteres Verfahren genauer beschrieben werden, da es den Kalibriervorgang beschleunigt und einen theoretisch interessanten Ansatz der gemischt linearen Optimierung verwendet. Dabei kann die Dimension des Schätzproblems von vormals zwölf auf sechs reduziert werden, ohne dass Minima des ursprünglichen Gütemaßes verloren gehen.

2. Statisches Systemmodell von Inertialmesssystemen

Ein vollständiges IMS verfügt über mindestens sechs Aufnehmer: drei Beschleunigungs- und drei Drehratensensoren. Bei der Kalibrierung des IMS müssen daher sowohl die Parameter der einzelnen Sensoren als auch ihre Lagebeziehung untereinander und zum Referenzkoordinatensystem des IMS bestimmt werden. Bild 1 zeigt die Koordinatensysteme und Transformationen, die im Rahmen einer IMS-Kalibrierung zu berücksichtigen sind. Der Ursprung des Sensorkoordinatensystems liegt im Schnittpunkt der Messachsen der Beschleunigungsaufnehmer (x_s, y_s, z_s) . Die Messdaten eines IMS sind jedoch auf ein davon verschiedenes Referenzkoordinatensystem bezogen, das z.B. im Tool Center Point (TCP) des zur Kalibrierung verwendeten Industrieroboters liegen kann (x_r, y_r, z_r) . Der Roboter bezieht die Lage des TCP auf ein Weltkoordinatensystem (x_w, y_w, z_w) , das wiederum vom Ost-Nord-

Vertikal (ONV)-Koordinatensystem zu unterscheiden ist, in dem Erdbeschleunigung und Erddrehrate angegeben sind. Zur Kalibrierung eines IMS muss zumindest die Transformationsmatrix $\mathbf{R}_{\text{Sensor}}^{\text{IMS}}$ identifiziert werden, die die im Sensorsystem gemessenen Drehraten und Beschleunigungen in das IMS-Referenzsystem überführt, auf das sich die Ausgangsdaten des IMS beziehen. Abhängig von der Kalibrierstrategie ist es zudem notwendig, die Ausrichtung des Roboters bezogen auf das Weltsystem zu ermitteln ($\mathbf{R}_{\text{ONV}}^{\text{Welt}}$).

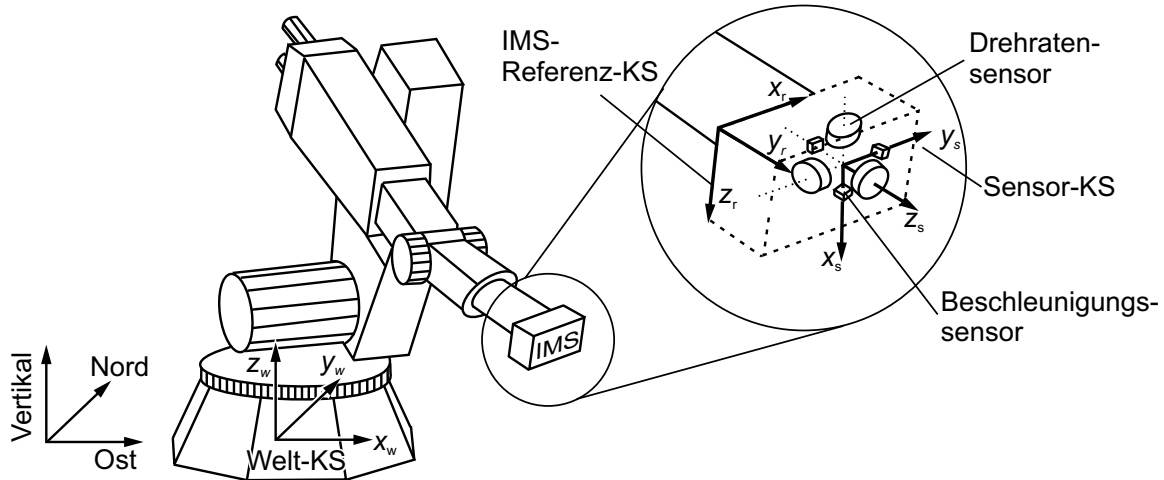


Bild 1: Festlegung wichtiger Koordinatensysteme für die IMS-Kalibrierung

Aufgrund von Fertigungstoleranzen verlaufen die einzelnen Sensorachsen nicht exakt parallel zu den Achsen des Sensorkoordinatensystems. Diese Orthogonalitätsfehler lassen sich zusammen mit der Transformation $\mathbf{R}_{\text{Sensor}}^{\text{IMS}}$ beschreiben durch eine Kreuzkopplungsmatrix \mathbf{K} . Für die Kreisbahnkalibrierung der Drehratensensoren bietet sich eine Beschreibung dieser Matrix über zwei Winkel pro Achse an. Dabei ist φ der Winkel zwischen der jeweiligen Sensorachse und der z_r -Achse und γ der Winkel zwischen der jeweiligen Sensorachse und der x_r -Achse:

$$\mathbf{K} = \begin{pmatrix} \sin \varphi_x \cos \gamma_x & \sin \varphi_x \sin \gamma_x & \cos \varphi_x \\ \sin \varphi_y \cos \gamma_y & \sin \varphi_y \sin \gamma_y & \cos \varphi_y \\ \sin \varphi_z \cos \gamma_z & \sin \varphi_z \sin \gamma_z & \cos \varphi_z \end{pmatrix} \quad (1)$$

Zusammen mit dem weiter unten eingeführten Skalenfaktor beschreibt diese Matrix zudem (lineare) Einflüsse, die durch das Übersprechen von senkrecht auf der Messachse des Sensors einwirkenden Beschleunigungen oder Drehraten verursacht werden.

Bei der Kalibrierung ist man interessiert an einer Beziehung zwischen den in Richtung der Sensorachse gemessenen Signalen \mathbf{a}' und $\boldsymbol{\omega}'$ und den tatsächlich im (x_r, y_r, z_r) -System

vorhandenen physikalischen Größen Beschleunigung \mathbf{a} und Drehrate $\boldsymbol{\omega}$. Bei einer Approximation der Sensorkennlinien durch Polynome, deren Koeffizienten k ggf. auch eine Abhängigkeit von der Temperatur ϑ zeigen können, ergibt sich daher folgendes Modell (hier beispielhaft für die Beschleunigungsaufnehmer)¹:

$$\mathbf{a} = \underbrace{\mathbf{K}_a^{-1}}_{\substack{\text{Orthog.} \\ \text{fehler}}} \underbrace{\begin{pmatrix} -b_{ax}(\vartheta) + \sum_{i=1}^N k_{a,ix}(\vartheta) a_x^i \\ -b_{ay}(\vartheta) + \sum_{i=1}^N k_{a,iy}(\vartheta) a_y^i \\ -b_{az}(\vartheta) + \sum_{i=1}^N k_{a,iz}(\vartheta) a_z^i \end{pmatrix}}_{\text{Kennlinienkorrektur}} + \underbrace{\begin{pmatrix} \delta a_x \\ \delta a_y \\ \delta a_z \end{pmatrix}}_{\text{Exzentrizitäten}} \quad (2)$$

Mit \mathbf{b}_a wird darin der Offset der Sensoren bezeichnet (Kennlinienverschiebung im Nullpunkt). Die Polynomordnung N wird bei den im Folgenden beschriebenen Verfahren zu 1 gewählt, sodass nur Bias und Skalenfaktor identifiziert werden. Die Einbeziehung höherer Ordnungen ist bei diesen Verfahren durchaus möglich. Jedoch wird erwartet, dass sich diese Parameter mit einem dynamischen Verfahren, das in Abschnitt 6 kurz erläutert wird, genauer und schneller schätzen lassen. Der letzte Term in dieser Gleichung, der auf die exzentrische Anordnung der Sensoren bezogen auf den Nullpunkt des Referenzsystems zurückzuführen ist, macht sich nur bei dynamischen Messungen, d.h. bei Rotationen des IMS um den Nullpunkt, bemerkbar und kann daher mit den hier vorgestellten statischen Algorithmen nicht identifiziert werden. Jedoch kann man diese Parameter mit guter Genauigkeit aus dem mechanischen Aufbau des IMS ermitteln. Für eine modellgestützte Identifikation sei auf ein zukünftiges dynamisches Verfahren verwiesen (vgl. Abschnitt 6).

3. Dreischrittige statische Kalibrierstrategie für IMS

Die in [4] vorgeschlagene statische Kalibrierstrategie für IMS nach obigem Modell sieht drei Schritte vor: Zunächst wird das Messsystem mit Hilfe des Roboters in 22 verschiedene Orientierungen positioniert. Dort werden dann über eine bestimmte Mittelungsdauer die Messdaten der einzelnen Sensoren aufgenommen.

Bei der *Betragskalibrierung* (angelehnt an [6]) macht man sich zunutze, dass die Sensoren, wenn sie sich in Ruhe befinden, die Erddrehrate $\boldsymbol{\epsilon}$ bzw. die Erdbeschleunigung \mathbf{g} messen. Nach Korrektur von Orthogonalitätsfehlern, Bias und Skalenfaktor muss daher der Betrag des Vektors der gemessenen Beschleunigungen bzw. Drehraten den Konstanten g und ϵ

¹ Im Folgenden bezeichnen der Index 'a' Größen der Beschleunigungsaufnehmer, ' ω ' Größen der Drehrataufnehmer, 'x', 'y' und 'z' die Parameter der jeweiligen Koordinatenrichtung, 'i' gibt als Laufindex die Ordnung der Polynomkoeffizienten an.

entsprechen, die sehr genau bekannt sind. Da keine Richtungsinformation verwendet wird, sind die Ergebnisse dieses Schrittes gänzlich unabhängig von Posefehlern des Roboters.

Zur Bestimmung der Transformationsmatrix $\mathbf{R}_{\text{Sensor}}^{\text{IMS}}$ ist jedoch die Kenntnis der Orientierung des IMS im Raum notwendig. Im zweiten Schritt, der *Vektorkalibrierung*, werden daher zusätzlich zu den Messungen der Betragskalibrierung die Achswinkel des Roboters und damit die Orientierung des TCP verwendet um sowohl $\mathbf{R}_{\text{Sensor}}^{\text{IMS}}$ als auch $\mathbf{R}_{\text{ONV}}^{\text{Welt}}$ zu bestimmen. Da IMS geringerer Güte nicht in der Lage sind, die Erddrehrate zu messen, und außerdem bei Verwendung der Erddrehrate als Referenz lange Mittelungszeiten bei obigen Messungen notwendig sind, kann zur genaueren Bestimmung der Parameter der Drehratensensoren ein dritter Kalibrierschritt, die *Kreisbahnkalibrierung*, herangezogen werden. Hierbei wird während einer Messung nur eine Achse des Knickarmroboters bewegt, so dass der TCP einen Kreis beschreibt. Es werden 24 Kreise verfahren, jeweils vier um die $\pm x_s, \pm y_s$ und $\pm z_s$ -Achse. Bild 2 zeigt beispielhaft die Orientierung des TCP-Systems im (x_w, y_w, z_w) -System beim Verfahren von Kreisen um die x -Achse. Gemessen wird der überstrichene Winkel α . Dieser wird verglichen mit dem von der Robotersteuerung ermittelten Winkel (jeweils ungefähr 360°). Wenn der Vektor \mathbf{c} die Drehung im Sensorkoordinatensystem beschreibt, kann die folgende Messgleichung mit dem Fehlervektor \mathbf{e} aufgestellt werden:

$$\mathbf{e} = \mathbf{K}_\omega \left(\mathbf{c} \frac{\alpha}{T} + \int_0^T \mathbf{R}_{\text{IMU}}^{\text{ONV}}(t) \boldsymbol{\varepsilon} dt \right) + \mathbf{b}_\omega(\vartheta) - \mathbf{k}_{\omega,1}(\vartheta) \boldsymbol{\omega}' \quad (3)$$

T ist hierin die Messdauer. Das Verfahren ist unabhängig davon, mit welchen Winkelbeschleunigungen die Kreisbahn durchfahren wird, entscheidend ist nur der überstrichene Winkel, der bei der Verwendung von optischen Sensoren (Laserkreisel) ohnehin Ausgangswert der Aufnehmer ist. Schwierigkeiten in obiger Gleichung bereitet noch der Integralterm, da er von den unbekanntem Winkelbeschleunigungen abhängt. Bei Annahme schneller Beschleunigungs- und Bremsvorgänge ist sein Wert ungefähr proportional zu T . Mit Hilfe eines kombinierten Differenz- und Summenverfahrens kann der Einfluss fast vollständig kompensiert werden: Beim Differenzverfahren werden die Messgleichungen zweier genau gegenläufiger Kreisbewegungen (in Bild 2 in der gleichen Roboterstellung jeweils eine Drehung um die x_s -Achse im und eine gegen den Uhrzeigersinn) voneinander abgezogen. Der Bias fällt dabei exakt heraus. Wenn man annimmt, dass die Geschwindigkeitsprofile der beiden Kreise bis auf das Vorzeichen gleich sind, entfällt auch der Integralterm, so dass der Skalenfaktor sowie die Kreuzkopplungsmatrix unabhängig von Einflüssen der Erddrehrate und mit doppelter Empfindlichkeit bestimmt werden können. Zur Bestimmung des Offsets müssen vier Kreismessungen

betrachtet werden. Werden die Orientierungen zur Erddrehrate wie in Bild 2a-d dargestellt gewählt, so fällt der Integralterm bei Addition der entsprechenden Messgleichungen heraus und die Empfindlichkeit vergrößert sich um den Faktor vier. Somit können die Parameter der Drehratensensor ohne die störenden Einflüsse der Erddrehrate kalibriert werden.

4. Gemischt lineare Schätzung bei der Kreisbahnkalibrierung

Zur Parameterschätzung muss ausgehend von der Messgleichung (3) ein Gütemaß definiert werden, dass bezüglich der unbekannt Parameter minimiert wird. Verwendet wird das folgende quadratische Maß J :

$$J = \sum_{j=1}^{\frac{M}{2}} \left\| \mathbf{K}_{\omega} \mathbf{c}_j \left(\frac{\alpha_{\Gamma^+(j)}}{T_{\Gamma^+(j)}} - \frac{\alpha_{\Gamma^-(j)}}{T_{\Gamma^-(j)}} \right) - \mathbf{k}_{\omega,1} (\boldsymbol{\omega}'_{\Gamma^+(j)} - \boldsymbol{\omega}'_{\Gamma^-(j)}) \right\|^2 + \sum_{j=1}^{\frac{M}{4}} \left\| \mathbf{K}_{\omega} \mathbf{c}_j \sum_{i \in \Lambda(j)} \frac{\alpha_i}{T_i} + 4\mathbf{b}_{\omega} - \mathbf{k}_{\omega,1} \sum_{i \in \Lambda(j)} \boldsymbol{\omega}'_i \right\|^2 \quad (4)$$

M ist dabei die Anzahl der verfahrenen Kreisbahnen, Γ^+ und Γ^- kennzeichnen Abbildungen, die die Indizes korrespondierender Kreisbahnen beim Summenverfahren beschreiben, und Λ ist eine mengenwertige Funktion, die die Indizes der im Summenverfahren zusammengehörigen Kreisbahnen beinhaltet. $\|\cdot\|$ bezeichnet die L_2 -Norm eines Vektors. J enthält zwölf Parameter: drei Skalenfaktoren, drei Offsets sowie sechs Winkel in der Matrix \mathbf{K}_{ω} . Somit müsste ein nichtlineares Minimierungsverfahren der Dimension zwölf zum Einsatz kommen. Jedoch lässt sich das Gütemaß auf die folgende gemischt lineare Form umformulieren:

$$J = \|\mathbf{A}(\boldsymbol{\rho})\boldsymbol{\theta} + \mathbf{b}(\boldsymbol{\rho})\|^2 \quad (5)$$

Hierin ist $\boldsymbol{\theta} = (k_{\omega,1x} \ k_{\omega,1y} \ k_{\omega,1z} \ b_{\omega,x} \ b_{\omega,y} \ b_{\omega,z})^T$ der Vektor der linearen Parameter, $\boldsymbol{\rho}$ enthält die nichtlinearen Parameter (Winkel aus Gl. (1)). \mathbf{A} und \mathbf{b} sind gegeben durch

$$\mathbf{A}(\boldsymbol{\rho}) = \begin{pmatrix} \text{diag}(\boldsymbol{\omega}'_{\Gamma^+(1)} - \boldsymbol{\omega}'_{\Gamma^-(1)}) & 0 \\ \vdots & \vdots \\ \text{diag}(\boldsymbol{\omega}'_{\Gamma^+(M/2)} - \boldsymbol{\omega}'_{\Gamma^-(M/2)}) & 0 \\ \text{diag}\left(\sum_{i \in \Lambda(1)} \boldsymbol{\omega}'_i\right) & -4\mathbf{I}_{3 \times 3} \\ \vdots & \vdots \\ \text{diag}\left(\sum_{i \in \Lambda(M/4)} \boldsymbol{\omega}'_i\right) & -4\mathbf{I}_{3 \times 3} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{b}(\boldsymbol{\rho}) = - \begin{pmatrix} \mathbf{K}_{\omega} \mathbf{c}_{\Gamma^+(1)} \left(\frac{\alpha_{\Gamma^+(1)}}{T_{\Gamma^+(1)}} - \frac{\alpha_{\Gamma^-(1)}}{T_{\Gamma^-(1)}} \right) \\ \vdots \\ \mathbf{K}_{\omega} \mathbf{c}_{\Gamma^+(M/2)} \left(\frac{\alpha_{\Gamma^+(M/2)}}{T_{\Gamma^+(M/2)}} - \frac{\alpha_{\Gamma^-(M/2)}}{T_{\Gamma^-(M/2)}} \right) \\ \mathbf{K}_{\omega} \mathbf{c}_{\Lambda(1)} \sum_{i \in \Lambda(j)} \frac{\alpha_i}{T_i} \\ \vdots \\ \mathbf{K}_{\omega} \mathbf{c}_{\Lambda(M/4)} \sum_{i \in \Lambda(M/4)} \frac{\alpha_i}{T_i} \end{pmatrix}. \quad (6)$$

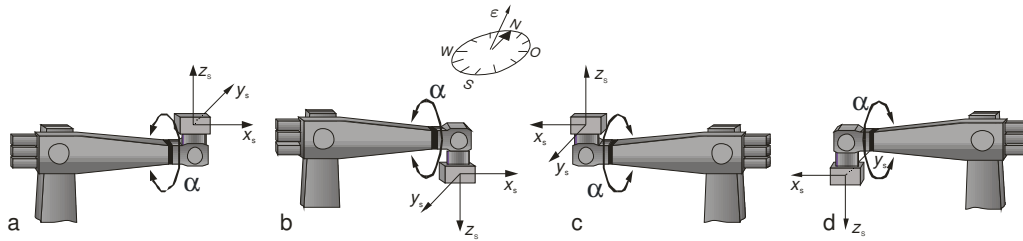


Bild 2: Gruppe von Drehungen um die x_s -Achse für die Summen-Kreisbahnkalibrierung

$\mathbf{I}_{3 \times 3}$ ist hierin die 3×3 Einheitsmatrix. In [2] wird gezeigt, dass es bei Gütemaßen einer solchen Struktur möglich ist, anstelle von J das Gütemaß J' mit

$$J'(\boldsymbol{\rho}) = J \left(\boldsymbol{\rho}, \left(\mathbf{A}^T(\boldsymbol{\rho}) \mathbf{A}(\boldsymbol{\rho}) \right)^{-1} \mathbf{A}^T(\boldsymbol{\rho}) \mathbf{b}(\boldsymbol{\rho}) \right) \quad (7)$$

zu minimieren, ohne dass Minima verloren gehen oder hinzukommen. Die Voraussetzung dafür sind hinreichend glatte Funktionen $\mathbf{A}(\boldsymbol{\rho})$ und $\mathbf{b}(\boldsymbol{\rho})$ sowie die Existenz der Pseudoinversen von \mathbf{A} , was hier gegeben ist, wenn nicht alle Messungen in einer Ebene liegen. Somit wurde ein Gütemaß gefunden, das nur noch die Dimension sechs hat. Die Struktur (5) ist sehr allgemein und daher häufig in Identifikationsproblemen zu finden.

5. Messergebnisse

Bei der Anwendung des dreischrittigen Kalibrierverfahrens auf ein Messsystem hoher Güte (Ringlaserkreisel der Fa. Honeywell mit einem Offset $< 0,03\%$, Beschleunigungsaufnehmer von AlliedSignal mit einem typischen Offset von $4 \cdot 10^{-3} g$) hat sich gezeigt, dass die Beschleunigungsaufnehmer mit Hilfe der Betrags- und Richtungskalibrierung mit einer 1σ -Unsicherheit von ca. $10^{-4} g$ (Offsets), 1‰ (Skalenfaktoren) und $10''$ (Winkelfehler) kalibriert werden können. Die Mittelungszeit pro Pose betrug dabei lediglich 10 s.

Bei Verwendung der Erddrehrate als Referenz muss die Mittelungszeit bei der Drehratendatenerfassung jedoch erheblich größer sein. Erst bei Zeiten von mehreren Minuten pro Pose lassen sich Unsicherheiten erzielen, die für die Kalibrierung der hochgenauen Ringlaserkreisel hinreichend klein sind. Bei Verwendung der Kreisbahnkalibrierung, die mit wesentlich geringeren Messdauern auskommt, ergaben sich Unsicherheiten von ca. $7 \cdot 10^{-7} \%$ (Offsets), 8 ppm (Skalenfaktoren) und $3''$ (Winkelfehler). Um die Einflüsse der Roboterfehler zu untersuchen, die sich im Wesentlichen auf die Kreuzkopplungsmatrix auswirken, wurden die Kreisbahnmessungen in verschiedenen Achsstellungen des Roboters vorgenommen. Hier ergaben sich Abweichungen in den Nichtdiagonalelementen von \mathbf{K}_ω in der Größenordnung von 0,1‰.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass mit dem hier vorgestellten statischen Kalibrierverfahren die Parameter mit Unsicherheiten bestimmbar sind, die für geringe und mittlere Anforderungen ausreichend sind. Insbesondere bei Drehratensensoren sehr hoher Güte muss man jedoch sehr lange Kalibrierzeiten in Kauf nehmen. Eine Alternative dazu ist der Einsatz eines dynamischen Verfahrens, das abschließend angesprochen wird.

6. Ausblick

Das hier vorgestellte statische Verfahren eignet sich für die Bestimmung von Skalenfaktoren, Offsets und der Kreuzkopplungsmatrix. Höhere Polynomparameter, nichtlineare Anteile des Übersprechens sowie Exzentrizitäten wurden hierbei nicht berücksichtigt. In Zukunft wird die Kalibrierung des IMS daher um dynamische Verfahren erweitert. Die zu identifizierenden Parameter werden dazu als Zustände in ein stochastisches Optimalfilter aufgenommen und rekursiv geschätzt. Dies hat den Vorteil, dass die Posefehler des Roboters mit verringertem Gewicht in die Parameterschätzung eingehen, da die hohe Wiederholgenauigkeit des Roboters genutzt wird. Zudem kann der Roboter bei dieser Art der Schätzung beliebige Bahnen verfahren, die mit Blick auf die später zu erwartenden Betriebszustände des Inertialmesssystems gewählt werden können. Die in diesem Beitrag beschriebene statische Kalibrierung liefert dann die Startwerte für das dynamische Verfahren.

7. Literatur

- [1] T. Alban; H. Janocha: Dynamic Calibration of Industrial Robots with Inertial Measurement Systems. European Control Conference ECC 1999, Karlsruhe 31.08.-03.09.1999.
- [2] J. Fox: Dimension Reduction of Mixed Linear Estimation Problems. Eingereicht bei Systems and Control Letters, Elsevier Science (2004).
- [3] E. v. Hinüber: Inertiale Messtechnik in industriellen Anwendungen. Skript zum CCG-Kurs TV 3.04 am 29. Juni 2001 in Braunschweig / DLR. www.imar-navigation.de.
- [4] H. Janocha, J. Fox: Statische Kalibrierung von Inertialsensoren mit Hilfe eines Industrieroboters. In: Tagungsband zur Fachtagung Sensoren und Messsysteme 2004, Ludwigsburg, 15. und 16.03.04. VDI-Berichte 1829, S. 171-178.
- [5] A. Lawrence: Modern Inertial Technology. Springer-Verlag, New York, Berlin 1998.
- [6] E.-H. Shin; N. El-Sheimy: A New Calibration Method for Strapdown Inertial Navigation Systems. In: Zeitschrift für Vermessungswesen - zfv 127 (1) 2002, S. 41-50.
- [7] D.H. Titterton; J.L. Weston: Strapdown Inertial Technology. Peter Peregrinus Ltd., London 1997.