

# Robotergestütztes Verfahren zur dynamischen Kalibrierung von Inertialmesssystemen

Joachim Fox, Hartmut Janocha

Lehrstuhl für Prozessautomatisierung (LPA), Universität des Saarlandes  
Telefon: 0681/302-4648, E-Mail: j.fox@lpa.uni-saarland.de

## Kurzfassung

Inertialmesssysteme werden zur Berechnung von Position und Orientierung in Flugzeugen, mobilen Robotern und vielen anderen Anwendungen eingesetzt. Sie bestehen zumindest aus drei Drehratensensoren (MEMS- oder Laser-Kreisel) und drei Beschleunigungssensoren. Die zur ungestützten Navigation erforderlichen Genauigkeiten lassen sich nur mit Hilfe einer hochgenauen Kalibrierung der gesamten Sensoreinheit realisieren, wobei die Kennlinien der Einzelsensoren charakterisiert und zudem die Lagebeziehungen der Sensoren untereinander bestimmt werden müssen (Kreuzkopplungen, Exzentrizitäten). In diesem Beitrag wird ein Verfahren vorgestellt, das zur Kalibrierung einen Standardindustrieroboter verwendet. Der Messaufbau wird erläutert und es wird gezeigt, wie sich aus den in der Sensoreinheit gemessenen Beschleunigungen und Drehraten mit Hilfe der Navigationsgleichungen Position und Orientierung des Systems berechnen lassen. Diese Posen werden zur Kalibrierung mit denen des Roboters verglichen. Mit Hilfe eines neuartigen stochastischen Filters, das gleichzeitig Zustände (Position, Geschwindigkeit und Lage des Messsystems) und die Sensorparameter schätzt, können trotz der vergleichsweise großen Positionierfehler, die ein Industrieroboter aufweist, die Parameter der drei experimentell untersuchten unterschiedlichen Inertialmesssysteme bestimmt werden.

## 1 Einleitung

Inertiale Messsysteme (IMS) werden traditionell zur Vermessung von Bewegungen eingesetzt, sei es in Flugzeugen, Unterseebooten, zur Pipelinevermessung, Roboterkalibrierung, für Fahrdynamikuntersuchungen oder eine Vielzahl anderer Anwendungen [1, 8, 13]. Drehratenaufnehmer auf MEMS-Basis oder auf optischen Prinzipien beruhend (Ringlaserkreisel, faseroptische Kreisel) liefern Daten,

die zur Berechnung der Orientierung des bewegten Objektes im Raum notwendig sind, während über Beschleunigungssensoren die Positionsinformationen gewonnen werden können. In den meisten Anwendungen beziehen die IMS zusätzliche Stützinformationen aus externen Quellen wie beispielsweise dem Global Positioning System (GPS).

Da heute nahezu alle IMS sog. Strap-down-Systeme sind, bei denen die Sensoren fest mit dem zu vermessenden Objekt verbunden sind, ist zur Berechnung der Position eine exakte Kenntnis der Orientierung notwendig. Insbesondere der Einfluss der Erdbeschleunigung, die von den Beschleunigungssensoren stets mit gemessen wird, kann sich bei einer falsch angenommenen Orientierung verheerend auf die Positionsberechnung auswirken, da ein Orientierungsfehler in einen Beschleunigungsoffset mündet, der nach zweimaliger Integration zu einem quadratisch mit der Zeit ansteigenden Positionsfehler führt.

Beim Einsatz von IMS zur Navigation ist somit die Genauigkeit aller (üblicherweise sechs) Sensoren von höchster Wichtigkeit. Daher setzen die Hersteller von IMS aufwändige Hardware wie Präzisionsdrehtische ein, um die Sensoreinheiten exakt zu kalibrieren [10]. Dazu werden die Sensoren wie in Abschnitt 2 beschrieben mathematisch modelliert und die Parameter des Modells anhand von Messreihen geschätzt. In der Vergangenheit wurden bereits verschiedene Versuche unternommen, dieses Verfahren zu vereinfachen. Shin und El-Sheimy [12] stellten einen Ansatz vor, der lediglich eine manuelle Positionierung des Systems in verschiedenen Orientierungen zum lokalen North-East-Down (NED) Koordinatensystem vorsieht, und erzielten damit für Ringlasersysteme im oberen Preissegment gute Ergebnisse. Allerdings beschränkten sie sich auf die Schätzung von Offset, Skalenfaktor und Nichtorthogonalitäten bei den Beschleunigungsaufnehmern und lediglich von Offsets bei den Kreiseln. In [3, 9] wurde ein Verfahren erarbeitet, das auf ähnlichen Prinzipien beruht, aber einen konventionellen Industrieroboter zur Positionierung des Messsystems während der Kalibrierung vorsieht. Durch die Verwendung spezieller Bahnen und die Anwendung eines Differenzverfahrens konnten nun auch Skalenfaktoren und Kreuzkopplungen der Drehratenaufnehmer mit einfachen Mitteln kalibriert werden.

All diese Ansätze benutzen jedoch statische oder quasistatische Messungen, so dass sie prinzipiell manche Parameter (wie beispielsweise die Exzentrizitäten der Beschleunigungsaufnehmer) nicht schätzen können. Ein neues, hier vorgestelltes Verfahren sieht daher vor, die Messsysteme zu kalibrieren, während sie betriebst-

pische Bewegungen vollführen. Dazu wird weiterhin ein Industrieroboter genutzt, um Referenztrajektorien zu generieren. Mit Hilfe von stochastischen Zustands- und Parameterschätzern, sog. Sigmapunkt-Kalmanfiltern [11], werden gleichzeitig die Bewegungsgrößen (Orientierung, Position und Geschwindigkeit) sowie die zu kalibrierenden Parameter geschätzt. Eine erste Methode auf dieser Basis wurde bereits in [4] vorgestellt, eine Einführung in die Thematik der Sigmapunkt-Filter findet sich beispielsweise in [5].

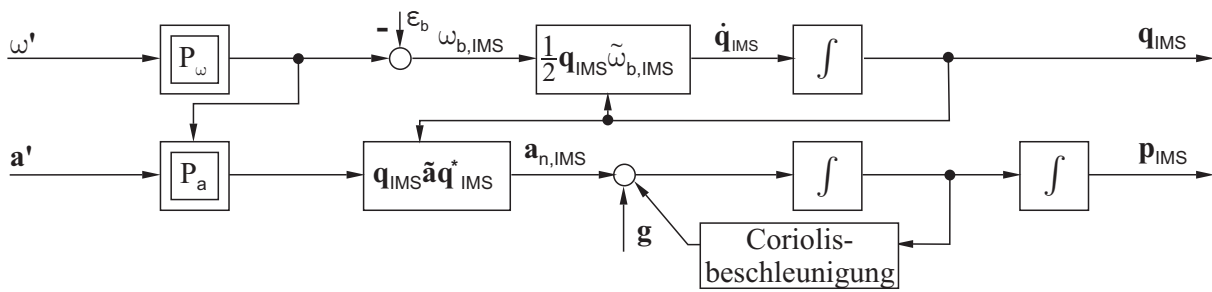
In dieser Arbeit sollen nun das Kalibrierverfahren genauer beleuchtet und Messergebnisse präsentiert werden. Dazu wird zunächst im folgenden Abschnitt eine kurze Einführung in die Inertialmesstechnik und in das der Kalibrierung zugrunde liegende mathematische Modell gegeben. Abschnitt 3 erläutert dann die prinzipielle Vorgehensweise bei der Kalibrierung und gibt einen Überblick über die verwendeten Algorithmen. In Abschnitt 4 werden schließlich Ergebnisse präsentiert, die bei der Kalibrierung dreier IMS verschiedener Güten erzielt wurden. Daran schließt sich ein Ausblick auf weitere Untersuchungen an.

## 2 Inertiale Messsysteme und ihre Parameter

Die Pose (Position und Orientierung) eines Objektes verfügt über sechs Freiheitsgrade. Daher benötigt ein vollständiges inertiales Messsystem pro Achsrichtung einen Beschleunigungs- und einen Drehratensensor. Bei der Kalibrierung eines IMS ist nicht nur das Verhalten eines Einzelsensors maßgeblich, sondern auch das Zusammenwirken der sechs Sensoren, insbesondere deren räumliche Beziehung. Das in dieser Arbeit für die Sensoren verwendete Modell besteht daher aus zwei Anteilen, einem physikalisch motivierten, der die Lagebeziehungen beinhaltet, sowie einem kennlinienbasierten, der das Verhalten jedes Einzelsensors beschreibt.

Im Folgenden werden mit  $\boldsymbol{\omega}$  die Drehrate des Objekts und mit  $\mathbf{a}$  seine Beschleunigung bezeichnet (fettgedruckte Buchstaben stehen für Vektoren), ihre Komponenten mit den Indizes  $x$ ,  $y$  und  $z$ . Ungestrichene Variablen stehen für die wahren Größen, während  $\boldsymbol{\omega}'$  und  $\mathbf{a}'$  die Messgrößen kennzeichnen. Dann ergibt sich die Korrekturrechnung für die Drehraten wie folgt (siehe auch [7]):

$$\boldsymbol{\omega} = \mathbf{K}_{\boldsymbol{\omega}} \begin{pmatrix} k_{\boldsymbol{\omega},x,0} + \omega'_x + \sum_{i=2}^N k_{\boldsymbol{\omega},x,i} \omega'^i_x \\ k_{\boldsymbol{\omega},y,0} + \omega'_y + \sum_{i=2}^N k_{\boldsymbol{\omega},y,i} \omega'^i_y \\ k_{\boldsymbol{\omega},z,0} + \omega'_z + \sum_{i=2}^N k_{\boldsymbol{\omega},z,i} \omega'^i_z \end{pmatrix} \quad (1)$$



**Bild 1:** Signalfluss der Navigationsrechnung eines IMS.

Die einzelnen Drehratensensorkennlinien werden somit über ein Polynom der Ordnung  $N$  mit den Koeffizienten  $k_{\omega\dots}$  angenähert. Die Matrix  $\mathbf{K}_{\omega}$  hat die Dimension  $3 \times 3$  und wird als Kreuzkopplungsmatrix bezeichnet:  $\mathbf{K}_{\omega}^{-1}$  enthält zeilenweise Vektoren, die in Richtung der sensitiven Achse der Einzelsensoren zeigen (bezogen auf ein Referenzkoordinatensystem, das sich im Falle der hier vorgestellten Kalibrierung im Tool Center Point des Roboters befindet). Der Betrag dieser Vektoren entspricht dem Skalenfaktor (der Empfindlichkeit) des Einzelsensors, der daher im Korrekturpolynom nicht modelliert werden muss. Zeigen die Sensoren ein Übersprechverhalten (beispielsweise weil mehrachsige Sensoren verwendet werden), so sind die linearen Anteile des Übersprechens ebenfalls in  $\mathbf{K}_{\omega}$  enthalten.

Das Tripel der Beschleunigungssensoren wird in analoger Weise modelliert. Jedoch tritt hier ein zusätzlicher Term auf, der auf die exzentrische Anordnung der Sensoren bezogen auf das Referenzkoordinatensystem zurückzuführen ist: Bei einer Rotation des Objektes treten Zentrifugalbeschleunigungen auf, die von den Sensoren mit gemessen und daher korrigiert werden müssen. Man erhält das folgende Korrekturmodell, wobei  $u_{xy}$  den Abstand des  $y$ -Sensors in Richtung  $x$  vom Ursprung angibt:

$$\mathbf{a} = \mathbf{K}_a \begin{pmatrix} k_{a,x,0} + a'_x + \sum_{i=2}^N k_{a,x,i} a_x'^i \\ k_{a,y,0} + a'_y + \sum_{i=2}^N k_{a,y,i} a_y'^i \\ k_{a,z,0} + a'_z + \sum_{i=2}^N k_{a,z,i} a_z'^i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} u_{xx}(\omega_z^2 + \omega_y^2) + u_{yx}\dot{\omega}_z - u_{zx}\dot{\omega}_y \\ u_{yy}(\omega_x^2 + \omega_z^2) + u_{zy}\dot{\omega}_x - u_{xy}\dot{\omega}_z \\ u_{zz}(\omega_x^2 + \omega_y^2) + u_{xz}\dot{\omega}_y - u_{yz}\dot{\omega}_x \end{pmatrix} \quad (2)$$

Zur Korrektur der Exzentrizitäten müssen also sowohl die Drehraten als auch die Winkelbeschleunigungen  $\dot{\boldsymbol{\omega}}$  bekannt sein. Letztere werden im Kalibrierverfahren durch eine numerische Ableitung bestimmt.

Bild 1 zeigt den Signalflussplan bei der Navigationsrechnung, die von einem IMS durchgeführt wird. Zunächst müssen die wahren Drehraten und Beschleuni-

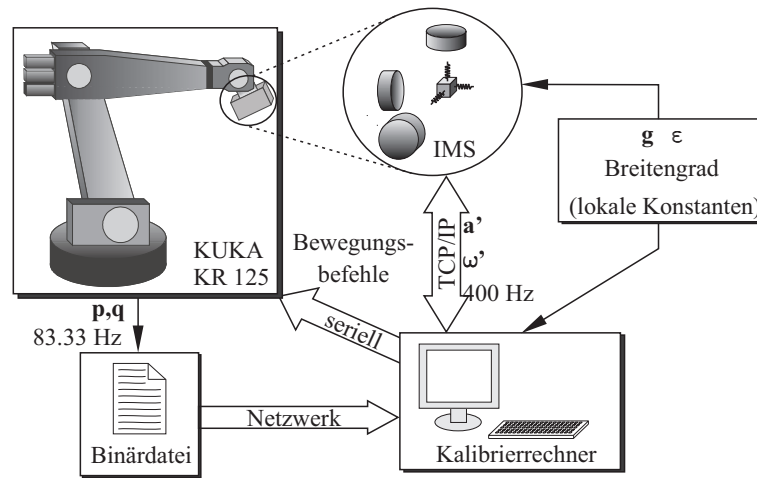
gungen mit Hilfe des obigen Korrekturmodells in den Blöcken  $P_\omega$  und  $P_a$  berechnet werden. Dann wird von den Drehraten die Erdrate  $\varepsilon_b$  (in Objektkoordinaten) subtrahiert und die Integration des Quaternions  $q_{IMS}$  durchgeführt, das zur Darstellung der Orientierungen verwendet wird. Mit Hilfe dieses Quaternions können die Beschleunigungen in ein Inertialsystem transformiert werden, wo sie nach Abzug der Erdbeschleunigung  $g$  sowie des Einflusses der Corioliskräfte zweifach integriert werden, um Geschwindigkeit und Position  $p_{IMS}$  zu erhalten. Details zur Navigationsrechnung sind in [13] zu finden.

Aufgrund der Verkopplung zwischen Orientierungs- und Positionsberechnung im Quaternionenprodukt  $q_{IMS} \tilde{a} q_{IMS}^*$  (die Tilde wandelt einen dreidimensionalen Vektor in ein analoges Quaternion um) sowie in der Parameterkorrektur handelt es sich um ein nichtlineares System. Zusätzlich sind die Messungen von Beschleunigung und Drehrate von Rauschen überlagert. Die Schätzung der Modellparameter während der Bewegung des Systems benötigt daher einen nichtlinearen Schätzer für stochastische zeitdiskrete Systeme, weshalb im folgenden Abschnitt ein Kalibrierverfahren auf Basis eines stochastischen zeitdiskreten Filters, des sog. Sigmapunkt-Kalmanfilters, vorgeschlagen wird.

### 3 Neues Kalibrierverfahren für inertielle Messsysteme

Die Kalibrierung von IMS wird im industriellen Einsatz durchwegs mit Hilfe von Drehtischen durchgeführt, die eine exakte Positionierung des Messsystems bezüglich des lokalen NED-Koordinatensystems ermöglichen [10]. Der benötigte Messaufbau ist sehr teuer und muss selbst sehr genau eingerichtet werden. Hinzu kommt, dass sich Kopplungseinflüsse zwischen Beschleunigungen und Drehraten, wie beispielsweise die durch Exzentrizitäten hervorgerufenen Zentrifugalbeschleunigungen, aufgrund der eingeschränkten Bewegungsfreiheitsgrade der Drehtische nur schwer messen lassen, weshalb diese Parameter oftmals nicht berücksichtigt werden.

Ein neuartiger, in Bild 2 dargestellter Ansatz, kann diese Nachteile beseitigen. Hier wird ein Standard-Industrieroboter (in diesem Fall der Typ KUKA KR125) zur Positionierung des IMS verwendet. Der Kalibriervorgang wird gesteuert von einem PC, der zum einen dem Roboter über eine serielle Verbindung Bewegungsbefehle übermittelt sowie dessen Positionen abfragen kann und zum anderen mit dem IMS über TCP/IP kommuniziert und die unbearbeiteten Messdaten  $a'$  und



**Bild 2:** Aufbau der robotergestützten Kalibrierung.

$\omega'$  empfängt. Zudem kann der Rechner auf dem Roboter eine Datenaufzeichnung aktivieren, bei der Position  $p$  und Orientierung  $q$  des Roboterendeffektors mit hoher Frequenz von der Steuerung aufgenommen werden.

Die Positioniergenauigkeit von Industrierobotern ist bei weitem nicht so gut wie die von Präzisionsdrehtischen. Da die Trajektorien, auf denen das Messsystem während der Kalibrierung verfahren wird, nur näherungsweise bekannt sind (Bahnfehler im Millimeterbereich sind zu erwarten), wurde ein Algorithmus entworfen, der sowohl die Parameter als auch die Zustände des dynamischen Systems aus Bild 1 schätzt.

Zur Zustandsschätzung bei IMS hat sich das erweiterte Kalmanfilter [6] bewährt. Es handelt sich dabei um ein Prädiktor-Korrektor-Verfahren: Im Prädiktionsschritt werden auf Basis der Eingangsgrößen (hier Beschleunigung und Drehrate) sowie der vergangenen Messungen ein neuer Erwartungswert des Zustandsvektors sowie die Zustandskovarianz geschätzt. Liegen neue Messungen der Ausgangsgröße (hier Position und Orientierung) vor, kann ein Korrekturschritt (bei Kalmanfiltern „Update“ genannt) durchgeführt werden, der die neue Messinformation in die Schätzung von Mittelwert und Kovarianz einbezieht. Für lineare zeitdiskrete Systeme kann unter bestimmten Forderungen an die Störungen sowie die stochastische Verteilung des Zustandes im Zeitpunkt 0 nachgewiesen werden, dass das Kalmanfilter einen optimalen Schätzer im Sinne minimaler Fehlervarianz darstellt. Dieser Nachweis ist für nichtlineare Systeme nicht möglich; dennoch ist das Kalmanfilter wahrscheinlich der am meisten eingesetzte Schätzer für nichtli-

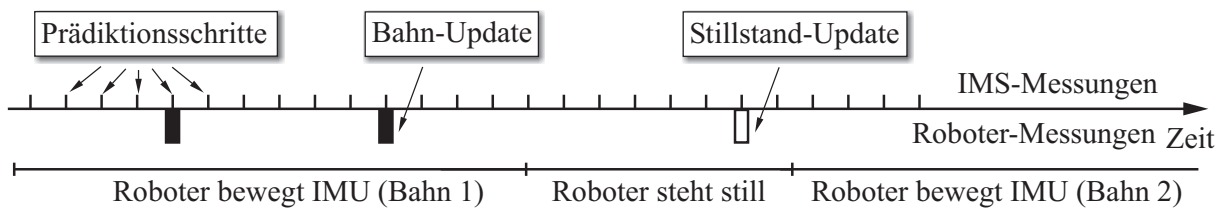
neare dynamische Systeme.

In dieser Arbeit wird eine junge Variante von Kalmanfiltern eingesetzt, sog. Sigmapunkt-Kalmanfilter (SPKF) [5, 11]. Diese zeichnen sich aus durch eine höhere

Schätzgenauigkeit insbesondere bei stark nichtlinearen Systemen sowie einen einfacheren Entwurf, da sie nicht auf einer analytischen Beschreibung der Ableitungen der System- und Ausgangsfunktion des dynamischen Systems beruhen. Sollen (Sigmapunkt-)Kalmanfilter zur gleichzeitigen Schätzung von Zuständen und Parametern eingesetzt werden, so können die Parameter als zusätzliche Zustände interpretiert werden, die keiner zeitlichen Änderung unterliegen.

Da Details der Sigmapunktfilter in Bezug auf diese Kalibrierungsaufgabe an anderer Stelle schon beschrieben wurden [2, 4], soll hier lediglich der zeitliche Ablauf des Verfahrens am Diagramm in Bild 3 erläutert werden. Die Messungen des IMS werden mit hoher Frequenz (200...400 Hz) verarbeitet. In jedem Zeitschritt wird ein Filter-Prädiktionsschritt ausgeführt. Die Roboterposen hingegen stehen erheblich seltener zur Verfügung (die maximal mögliche Frequenz beträgt 83,33 Hz). Jede Roboter messung wird für einen Kalman-Update-Schritt verwendet. Hierbei werden zwei Updates unterschieden: Bahn-Updates während der Roboterbewegung und Updates während der Stillstandsphasen. Da die Absolutgenauigkeit in den Stillstandspunkten eines Roboters üblicherweise erheblich höher ist als die Bahngenauigkeit und während des Stillstands zudem eine Geschwindigkeitsinformation vorliegt (nämlich  $\mathbf{v} = \mathbf{0}$ ), ist die Information, die aus diesen Messungen gewonnen werden kann (ausgedrückt in einer Kovarianzmatrix) höher als während der Bewegungsphasen, was eine bessere Korrektur der Zustände und Parameter des Systems ermöglicht. Wichtig zu bemerken ist, dass sich die zu schätzenden Parameter nur in einem Update-Schritt ändern können, während die Zustände aufgrund des dynamischen Systems auch im Prädiktionsschritt veränderlich sind.

Entscheidend für die Güte der Kalibrierung ist eine genaue Synchronisation der Bahnmessungen des Roboters mit den IMS-Messungen. Da eine Hardware-Synchronisation für die Roboter-Datenaufzeichnung nicht vorgesehen ist, musste eine Software-Synchronisation durchgeführt werden. Dazu wurden die Posen des Roboters numerisch differenziert und die so erhaltenen Drehraten mit den gemessenen Raten des IMS korreliert (die Synchronisation über die Beschleunigungen ist weniger zuverlässig, da diese Sensoren bei den verwendeten Messsystemen



**Bild 3:** Zeitlicher Ablauf der Kalibrierung.

	LPA	iNAV-FMS	iVRU-FC
B-Messer	QA-2000-10		Colybris MS8010
Offsetstabilität B-Messer	0,1 mg	1 mg	25 mg
Art der Kreisel	Ringlaser GG 1320	faseroptisch	faser. iOLFOG
Kreiseldrift	0,03 °/h	1 °/h	20 °/h

**Tabelle 1:** Kenndaten der verwendeten IMUs

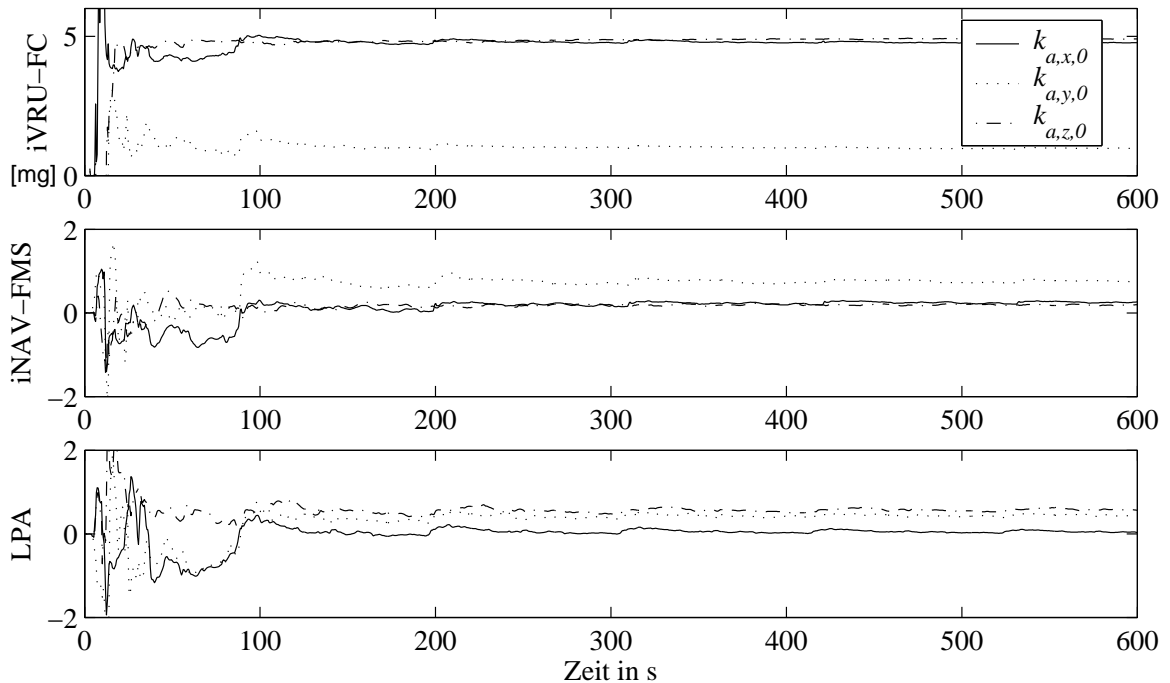
deutlich höhere Fehler aufweisen). Aufgrund der unterschiedlichen Abtastzeiten von IMS und Roboter wurden die häufigeren IMS-Messungen zur Berechnung der Zeitverschiebung zusätzlich noch interpoliert. In laufenden Arbeiten wurde zudem nachgewiesen, dass sich auch die Zeitverschiebung zwischen den beiden Datensätzen mit Hilfe eines Kalmanfilters schätzen lässt, wobei die Unsicherheiten lediglich ca. ein Zehntel der Abtastzeit der Eingangsdaten betragen.

## 4 Messergebnisse

Bisher wurde diese Kalibrierstrategie an zwei Inertialmessgeräten der Fa. iMAR GmbH sowie einem System des Lehrstuhls für Prozessautomatisierung (LPA) durchgeführt, die – wie Tabelle 1 zu entnehmen ist – unterschiedlichen Genauigkeitsklassen entstammen. Die Abtastfrequenzen für die Systeme LPA und iNAV-FMS betragen 400 Hz, die Messungen des iVRU-FC-Systems wurden aufgrund einer langsameren seriellen Verbindungen mit 200 Hz aufgenommen. Die Systeme wurden vom Roboter jeweils für eine Dauer von ca. zehn Minuten bewegt. Die Bahnen wurden dabei so ausgewählt, dass zwischen zwei Stillstandspunkten möglichst alle sechs Sensoren nennenswerte Anregungen erfuhren.

Geschätzt wurden alle oben beschriebenen Parameter außer den Kreiseloffsets die aufgrund ihrer geringen Größe vernachlässigt wurden. In bisherigen Experimenten betrug die Ordnung des Polynoms für die Beschleunigungsaufnehmer 0





**Bild 4:** Verlauf der B-Offset-Schätzungen (in mg) über die Zeit.

(d.h. es wurden Offsets und – inhärent in den Kreuzkopplungen – Skalenfaktoren geschätzt, aber keine quadratischen oder höheren Terme). Beim System iVRU-FC wird jedoch aktuell untersucht, ob eine quadratische Modellierung der Kennlinie sinnvoll ist.

Der verwendete Roboter steht in der Grundstellung waagrecht und der Arm weist nach Osten. Um kleinere Montageungenauigkeiten auszugleichen, wurde der Ausrichtfehler (d.h. die Transformation zwischen dem NED-Koordinatensystem und dem Roboterweltssystem) mitgeschätzt, wodurch zusätzliche drei Zustände (Fehlerwinkel) in den Algorithmus eingingen. Die Positions- und Orientierungsdaten des Roboters wurden alle 0,48 s zum Kalman-Update herangezogen; diese vergleichsweise seltenen Updates erleichtern die Synchronisierung, da sich kleine Synchronisationsfehler nicht mehr so stark auswirken wie bei Updates, die etwa die gleiche Frequenz wie die Eingangsdaten des Systems haben.

Bild 4 zeigt die Schätzungen des Offsets der Beschleunigungsmesser bei den drei Systemen, die hier beispielartig für alle Systemparameter betrachtet werden. Bereits nach kurzer Zeit konvergieren die Parameterschätzungen, wobei zu beobachten ist, dass die Konvergenzgeschwindigkeit des iVRU-FC-Systems etwas höher ist als die der genaueren Geräte. Erste Untersuchungen der Schätzgenauig-

keit wurden anhand von simulierten Fehlern durchgeführt, die den realen Messungen zusätzlich überlagert wurden. Dabei ergaben sich für die Beschleunigungs-offsets Unsicherheiten im Bereich von bis zu 0,1 mg. Diese Unsicherheit ist für das hochklassige Gerät des LPA zu groß; wie aber ein Vergleich mit Tabelle 1 zeigt, lassen sich die Parameter der iVRU-FC und iNAV-FMS damit genau genug schätzen. Zur Zeit werden zur Charakterisierung der Verfahren weitere Untersuchungen am Lehrstuhl für Prozessautomatisierung durchgeführt.

## 5 Ausblick

In dieser Arbeit wurde ein Verfahren zur Kalibrierung von Inertialmesssystemen unter Verwendung eines Standard-Industrieroboters vorgestellt. Es bietet einerseits durch die Verwendung von Sigma-Punkt-Kalmanfiltern einen neuen methodischen Ansatz und weist zudem in der praktischen Anwendung Vorteile gegenüber traditionellen Verfahren auf, die Dreh- oder Vibrationstische verwenden und daher sehr teuer sind und nur eingeschränkte Trajektorienverfahren können. Untersuchungen an IMS dreier verschiedener Güteklassen haben gezeigt, dass die Parameter der beiden ungenaueren Messgeräte mit hoher Sicherheit bestimmt werden konnten, während es im Bereich des hochwertigen Messgeräts noch Verbesserungsbedarf gibt. In laufenden Arbeiten wird der Einfluss der Asynchronität zwischen den Beschleunigungs- und Drehratenmessungen auf der einen und den Stützmessungen (Roboterposen) auf der anderen Seite untersucht. U.a. werden Methoden erforscht, die wiederum mit Hilfe eines Kalmanfilters oder SPKF eine eventuell vorhandene Zeitverschiebung zwischen diesen Datensätzen schätzen.

## Literatur

- [1] ALBAN, T. ; JANOCHA, H.: Dynamic Calibration of Industrial Robots with Inertial Measurement Systems. In: *Proceedings of the European Control Conference*. Karlsruhe, Germany, August/September 1999
- [2] FOX, J.: Forward and Inverse Stochastic Filtering for Inertial Sensor Calibration. *Eingereicht für: European Control Conference ECC*. Sevilla, Spanien, Dezember 2005

- [3] FOX, J. ; JANOCHA, H.: Der Industrieroboter als Referenz: Statische Kalibrierung von Inertialmesssystemen. In: *Robotik 2004, VDI-Berichte 1841*. München, Juni 2004, S. 187–194
- [4] FOX, J. ; JANOCHA, H.: A Rare-Update Sigma-Point Kalman Filter as Parameter Estimator. In: *Proceedings of the IASTED International Conference on Modelling, Identification, and Control (MIC'05)*. Innsbruck, Austria, February 2005, S. 190–195
- [5] FOX, J. ; JANOCHA, H.: Sigmapunkt-Kalmanfilter zur kombinierten Zustands- und Parameterschätzung. In: *GMA-Kongress 2005, VDI-Berichte 1883*. Baden-Baden, Juni 2005, S. 875–884
- [6] GREWAL, M. S. ; ANDREWS, A. P.: *Kalman Filtering: Theory and Practice Using MATLAB*. New York, Chichester : John Wiley & Sons, 2001
- [7] HINÜBER, E. v.: *Bahn- und Positionsvermessung von Industrierobotern mit inertialen Meßsystemen*. Saarbrücken : Universität des Saarlandes, Dissertation, 1993
- [8] HINÜBER, E. v.: Inertiale Messtechnik in industriellen Anwendungen. In: *Skript zum CCG-Kurs TV 3.04 am 29. Juni 2001 in Braunschweig / DLR (2001)*
- [9] JANOCHA, H. ; FOX, J.: Statische Kalibrierung von Inertialsensoren mit Hilfe eines Industrieroboters. In: *Sensoren und Messsysteme 2004, VDI-Berichte 1829*. München, März 2004, S. 171–178
- [10] LAWRENCE, A.: *Modern Inertial Technology*. New York, Berlin : Springer-Verlag, 1998
- [11] MERWE, R. v. d.: *Sigma-Point Kalman Filters for Probabilistic Inference in Dynamic State-Space Models*. Portland, USA, Oregon Health & Science University, Dissertation, 2004
- [12] SHIN, E.-H. ; EL-SHEIMY, N.: A New Calibration Method for Strapdown Inertial Navigation Systems. In: *zfv – Zeitschrift für Vermessungswesen* 127 (2002), Nr. 1, S. 41–50
- [13] TITTERTON, D. H. ; WESTON, J. L.: *Strapdown inertial navigation technology*. London, UK : Peter Peregrinus Ltd., 1997 (IEE Radar, Sonar, Navigation and Avionics Series 5)