

Statische Kalibrierung von Inertialsensoren mit Hilfe eines Industrieroboters

Static Calibration of Inertial Sensors Using an Industrial Robot

H. Janocha, J. Fox, Universität des Saarlandes, Saarbrücken

Kurzfassung

Dieser Beitrag beschreibt ein neues Kalibrierverfahren für inertielle Messsysteme (IMS). Dabei wird ein Industrieroboter dazu verwendet, das IMS in verschiedene Orientierungen zu verfahren, in denen mit dem IMS statisch die Erdbeschleunigung und die Erddrehrate als Referenz gemessen werden. Durch eine Aufteilung des Verfahrens in Betragskalibrierung und Richtungskalibrierung ist es möglich, die Offsets und Skalenfaktoren der Sensoren sowie ihre Einbaulage unabhängig von Roboterfehlern zu kalibrieren. Ein dritter Kalibrierschritt mit einfachen Kreisbewegungen des Roboterendeffektors dient zur Generierung von Referenzdrehraten für IMS geringerer Güte. Die Ergebnisse dieser statischen Kalibrierung können als Startwerte für Verfahren verwendet werden, die auch drehraten- oder beschleunigungsabhängige Parameter des IMS identifizieren können.

Abstract

This work describes a new calibration strategy for inertial measurement systems (IMS). An industrial robot moves the IMS into various orientations. At each orientation, the earth's gyration rate and gravity are measured and used as a reference. The calibration uses three steps: At first, only the absolute value of gravity and earth rate go into the calculations. Thus, it is possible to calibrate sensor biases and scale factors without the influence of the robot's positioning errors. Next, the orientation of the IMS can be used to calculate the alignment of the sensors inside the IMS and the robot's orientation with respect to north and east. In a third step, the robot's end effector moves in circles, thereby generating reference rates for low-accuracy IMS. The results of this quasi-static calibration procedure are used as initial values for algorithms which are able to identify rate and acceleration dependent sensor parameters.

1. Einleitung

Inertiale Messsysteme finden sich heute in einer Vielzahl von Anwendungen [3]. Klassisches Einsatzgebiet ist die Strapdown-Navigation von Flugzeugen oder Unterseebooten [4,7]; aber auch bei der Kalibrierung von Robotern [1] oder der Stabilisierung von Kameraplattformen und zunehmend im Automobil (Crasherkennung, Fahrdynamikregelung [2]) werden sie eingesetzt, wenn auch hier bisher noch nicht als 6-Achsen-Sensoreinheit.

Aufgrund der hohen Genauigkeitsanforderungen an die eingesetzten inertialen Messsysteme (IMS) ist eine exakte Kalibrierung der Systeme insbesondere für Navigationsaufgaben unabdingbar. Dabei müssen nicht nur die systematischen Fehler der einzelnen Sensoren 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 [4,5,7]. Zur Kalibrierung der Drehratensensoren werden zudem Drehtische eingesetzt, die exakte Drehraten erzeugen können.

In diesem Beitrag wird eine neue Kalibrierstrategie vorgestellt, bei der das IMS mit Hilfe eines Industrieroboters verfahren wird. Durch eine Kombination von statischen Kalibrieralgorithmen mit dynamischen Optimalschätzern (Kalmanfiltern) sollen die Parameter des IMS bestimmt werden. Dieser Ansatz ist besonders im Hinblick auf eine zukünftige Massenfertigung von mehrachsigen Low-Cost-IMS für den Automobilbereich viel versprechend, da er die Einbindung der Kalibrierung in den Fertigungsablauf vereinfacht und zudem kostengünstiger ist als die Verwendung von Drehtischen.

2. Inertiale Messsysteme und ihre Fehler

Ein vollständiges inertiales Messsystem (IMS) verfügt über mindestens sechs Sensoren: drei Beschleunigungsaufnehmer sowie drei Drehratenmesser. Während im Automobil aus Kostengründen weniger genaue mikromechanische Sensoren eingesetzt werden [5], müssen zur ungestützten Navigation hochpräzise Drehratenaufnehmer (mechanische Kreisel, Ringlaserkreisel oder Faserkreisel) und sehr genaue Beschleunigungsmesser verwendet werden, da die zweifache Integration der Beschleunigung in Verbindung mit der im Vergleich zur Nutzbeschleunigung hohen Erdbeschleunigung bei ungenauer Kenntnis der Orientierung schnell zu nicht akzeptablen Abweichungen in der Positionsschätzung führt.

Bild 1 zeigt die Koordinatensysteme und Transformationen, die im Rahmen einer IMS-Kalibrierung zu berücksichtigen sind. Das Sensorkoordinatensystem liegt im Schnittpunkt der Messachsen der Beschleunigungsaufnehmer. Die Messdaten eines IMS sind jedoch üblicherweise auf ein davon verschiedenes Referenzkoordinatensystem bezogen, das z.B.

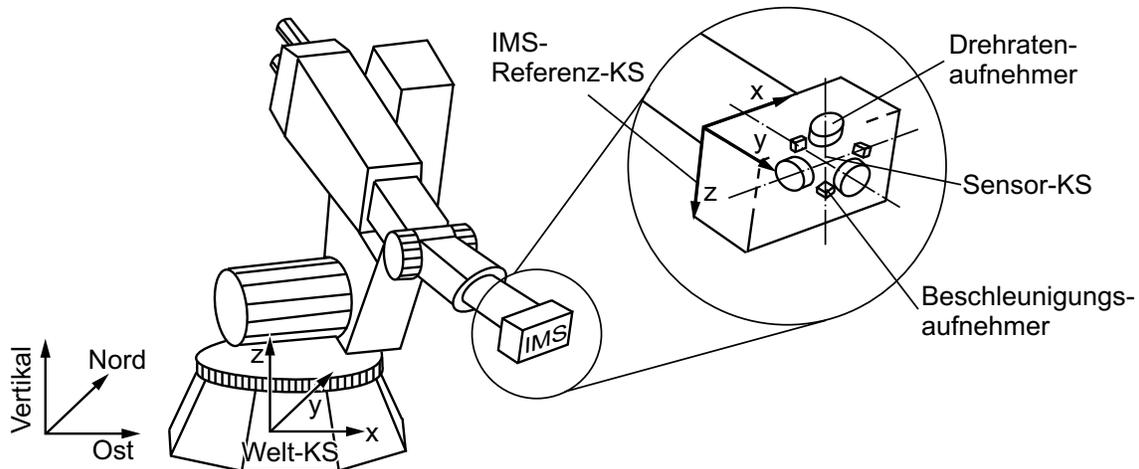


Bild 1: Koordinatensysteme bei der IMS-Kalibrierung

im Tool Center Point (TCP) des zur Kalibrierung verwendeten Industrieroboters liegen kann. Der Roboter bezieht die Lage des TCP auf ein Weltkoordinatensystem, das wiederum vom Ost-Nord-Vertikal (ONV)-Koordinatensystem zu unterscheiden ist, in dem Erdbeschleunigung und -drehrate angegeben sind.

Die einzelnen systematischen Fehler des IMS sollen nun mathematisch beschrieben werden, so dass sich ein Modell für die weiter unten entwickelten Kalibrieralgorithmen ergibt. Die Gleichungen für Drehraten- und Beschleunigungsaufnehmer sind dabei formal gleich und werden daher nicht getrennt aufgeführt.

Kennlinienfehler

Durch ein nichtlineares Systemverhalten (z.B. Lock-in-Effekte der Laserkreisel) weisen die Sensoren nichtlineare statische Kennlinien auf, die üblicherweise durch eine Approximation mit einem Polynom N -ten Grades beschrieben werden. Die ersten beiden Koeffizienten des Polynoms werden dabei als Bias oder Offset b und als Skalenfaktor des Sensors bezeichnet. Die Polynomkoeffizienten - insbesondere von Bias und Skalenfaktor - müssen ggf. zusätzlich bei verschiedenen Temperaturen bestimmt werden, d.h. jeder Koeffizient muss wiederum als Polynom in der Temperatur ϑ beschrieben werden.

Orthogonalitätsfehler

In den drei orthogonalen Raumachsen sollten jeweils ein Beschleunigungs- und ein Drehratenaufnehmer parallel angeordnet sein. Winkelfehler der Achsen werden rechnerisch kompensiert. Ein Beschleunigungssensor, dessen sensitive Achse durch den Einheitsvektor $\mathbf{e}_{x/y/z}$ im Sensor-Koordinatensystem beschrieben wird, misst in jeder Koordinatenrichtung den

Anteil $a_{\text{mess},x} = \mathbf{e}_x^T \mathbf{a}$ der wahren Beschleunigung \mathbf{a} . Bei Verwendung der Vektorschreibweise kann man eine Kreuzkopplungsmatrix \mathbf{K}_a einführen, die die einzelnen Einheitsvektoren zeilenweise enthält. Es ist zu berücksichtigen, dass diese Matrix zeilenweise normiert ist, also lediglich sechs unabhängige Elemente enthält.

Exzentrizität der Beschleunigungsaufnehmer

Während für die Orthogonalitätsfehler die Winkelfehler der Sensoren ursächlich sind, ist die Position der Beschleunigungsaufnehmer bezogen auf den Ursprung des Sensorsystems für Exzentrizitätsfehler verantwortlich. Eine Montage der Aufnehmer außerhalb des Zentrums des IMS führt dazu, dass die Aufnehmer bei Rotationen eine Zentripetalbeschleunigung messen. Aufgrund der Drehratenabhängigkeit sind diese Parameter nicht mit quasistatischen Messungen zu bestimmen, wie sie im Folgenden vorgeschlagen werden. Jedoch lassen sie sich mit guter Genauigkeit aus den Konstruktionszeichnungen des IMS entnehmen. Wegen der verhältnismäßig massiven Bauart größerer IMS sind weder die Exzentrizitätsfehler noch die Orthogonalitätsfehler temperaturabhängig. Die Fehler durch Exzentrizitäten werden mit δa bezeichnet. Bei Verwendung von optischen Drehratenaufnehmern spielt die Einbaulage der Kreisel keine Rolle.

Resultierendes Fehlermodell

Fasst man Kennlinienfehler, Orthogonalitätsfehler und Exzentrizitätsfehler zu einem Gesamtmodell zusammen, so ergeben sich die folgenden Gleichungen, mit denen sich die tatsächlichen Beschleunigungen (bzw. Drehraten) im Objektsystem aus den gemessenen errechnen lassen:

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

3. Robotergestütztes statisches Kalibrierverfahren

Die im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Parameter des IMS sollen nun mit Hilfe eines dreischrittigen Verfahrens identifiziert werden. Zunächst wird eine statische Multi-posenmessung vorgenommen, mit der sich bereits die meisten Parameter mit guter Genauigkeit identifizieren lassen. Unter Hinzunahme der Orientierung des TCP im Weltkoordinatensystem, die die Steuerung des Roboters zumindest grob aus den Achswinkeln

berechnen kann, wird im zweiten Schritt die Lage des Sensorkoordinatensystems zum Roboterflansch (Hand-Sensor-Kalibrierung) sowie die Ausrichtung des Robotersystems im ONV-System (Nordsuche) bestimmt. Im dritten Schritt werden vom Roboterendeffektor Kreisbahnen verfahren, mit denen sich die Parameter der Drehratensensoren verbessern lassen, die aufgrund der geringen Größe der Erddrehrate im statischen Fall nicht genau genug bestimmbar sind. Die drei Teilschritte sollen nun detaillierter beschrieben werden.

Betragskalibrierung durch Multiposenmessung

Zunächst wird das IMS vom Roboter in verschiedene Posen gebracht. Wie in [6] vorgeschlagen, werden Messungen in 18 verschiedenen Orientierungen durchgeführt. Dazu werden die gemessenen Werte der Drehraten und Beschleunigungen über eine bestimmte Mittelungszeit integriert, während der Roboter bei angezogenen Bremsen still steht. Durch die Mittelung werden stochastische Fehlereinflüsse verkleinert.

Als Referenz für die Kalibrierung dienen Erddrehrate und Erdbeschleunigung. Sie werden im ersten Schritt lediglich ihrem Betrage nach betrachtet. Das hat den Vorteil, dass die Fehler bei der Positionierung des Roboters keine Rolle spielen.

Bevor die Messgleichung aufgestellt wird, soll das Fehlermodell aus Gl. (1) umgeformt werden, so dass die Gleichungsnebenbedingungen (zeilenweise Normierung) in den Matrizen \mathbf{K}_a und \mathbf{K}_ω umgangen werden. In [6] wird dies dadurch erreicht, dass die Einheitsvektoren in diesen Matrizen durch zwei Winkel beschrieben werden, was aber bei Bildung der Inversen in (1) zu aufwändigen trigonometrischen Termen führt. Darum wird hier ein anderer Weg eingeschlagen: Wenn man zeilenweise den Faktor $k_{\omega,1x/y/z}$ aus der Linearitätsfehlerkorrektur herauszieht, lässt sich Gl. (1) wie folgt schreiben:

$$\boldsymbol{\omega} = \mathbf{K}_\omega^* \begin{pmatrix} -\frac{b_{\omega x}}{k_{\omega,1x}} + \omega_{\text{mess},x} & -\frac{b_{\omega y}}{k_{\omega,1y}} + \omega_{\text{mess},y} & -\frac{b_{\omega z}}{k_{\omega,1z}} + \omega_{\text{mess},z} \end{pmatrix}^T \quad (2)$$

Die Matrix \mathbf{K}_ω^* ergibt sich darin durch spaltenweise Multiplikation der Elemente von \mathbf{K}_ω^{-1} mit $k_{\omega,1x/y/z}$. Eine Normierung von \mathbf{K}_ω kann wie folgt erreicht werden:

$$\begin{aligned} k_{\omega,1x} &= \frac{\sqrt{(K_{\omega 22}^* K_{\omega 33}^* - K_{\omega 23}^* K_{\omega 32}^*)^2 + (K_{\omega 13}^* K_{\omega 32}^* - K_{\omega 12}^* K_{\omega 33}^*)^2 + (K_{\omega 12}^* K_{\omega 23}^* - K_{\omega 13}^* K_{\omega 22}^*)^2}}{\kappa} \\ k_{\omega,1y} &= \frac{\sqrt{(K_{\omega 31}^* K_{\omega 23}^* - K_{\omega 21}^* K_{\omega 32}^*)^2 + (K_{\omega 13}^* K_{\omega 31}^* - K_{\omega 11}^* K_{\omega 33}^*)^2 + (K_{\omega 21}^* K_{\omega 13}^* - K_{\omega 11}^* K_{\omega 23}^*)^2}}{\kappa} \\ k_{\omega,1z} &= \frac{\sqrt{(K_{\omega 31}^* K_{\omega 22}^* - K_{\omega 21}^* K_{\omega 32}^*)^2 + (K_{\omega 31}^* K_{\omega 12}^* - K_{\omega 11}^* K_{\omega 32}^*)^2 + (K_{\omega 21}^* K_{\omega 12}^* - K_{\omega 11}^* K_{\omega 22}^*)^2}}{\kappa} \\ \kappa &= K_{\omega 31}^* K_{\omega 12}^* K_{\omega 23}^* + K_{\omega 21}^* K_{\omega 13}^* K_{\omega 32}^* + K_{\omega 11}^* K_{\omega 22}^* K_{\omega 33}^* - K_{\omega 31}^* K_{\omega 13}^* K_{\omega 22}^* - K_{\omega 21}^* K_{\omega 12}^* K_{\omega 33}^* - K_{\omega 11}^* K_{\omega 23}^* K_{\omega 32}^* \end{aligned} \quad (3)$$

Für die Kalibrierung der Drehratenaufnehmer dient der Betrag der Erddrehrate, ε , als Referenz:

$$0 = \varepsilon^2 t^2 - \left(-\frac{b_{\omega x}}{k_{\omega,1x}} t + \varphi_{\text{mess},x} \quad -\frac{b_{\omega y}}{k_{\omega,1y}} t + \varphi_{\text{mess},y} \quad -\frac{b_{\omega z}}{k_{\omega,1z}} t + \varphi_{\text{mess},z} \right) \mathbf{K}_{\omega}^{*T} \mathbf{K}_{\omega}^* \begin{pmatrix} -\frac{b_{\omega x}}{k_{\omega,1x}} t + \varphi_{\text{mess},x} \\ -\frac{b_{\omega y}}{k_{\omega,1y}} t + \varphi_{\text{mess},y} \\ -\frac{b_{\omega z}}{k_{\omega,1z}} t + \varphi_{\text{mess},z} \end{pmatrix} \quad (4)$$

In dieser Messgleichung bezeichnet t die Messdauer. Da die Messwerte integriert werden, ist die eigentliche Messgröße nun nicht mehr eine Winkelgeschwindigkeit, sondern der Winkel φ . Mit Hilfe eines quadratischen Gütemaßes wird eine nichtlineare Ausgleichsrechnung über die Messungen in allen Posen durchgeführt. Damit lassen sich die Offsets und Skalenfaktoren bestimmen. Die Matrix \mathbf{K}_{ω}^* lässt sich hingegen nur bis auf drei verbleibende Freiheitsgrade bestimmen, was dadurch bedingt ist, dass bisher keine Informationen über die Orientierung der Messposen zur Erddrehrate in das Verfahren eingeflossen sind. Durch eine Normierung der Messwerte auf den Betrag der Erdrate ε bzw. der Erdbeschleunigung \mathbf{g} lässt sich die Genauigkeit der Algorithmen erheblich steigern.

Vektorkalibrierung durch Multiposenmessung

Im zweiten Schritt des Kalibrierverfahrens werden sowohl die verbleibenden Elemente der \mathbf{K} -Matrizen als auch die Orientierung des Roboterweltkoordinatensystems berechnet. Dazu werden nun nicht nur die Beträge von \mathbf{g} und ε berücksichtigt, sondern zusätzlich deren Richtungen, d.h. die folgende Messgleichung wird zur Kalibrierung herangezogen:

$$0 = \varepsilon t - \mathbf{R}_{\text{ONV}}^{\text{Welt}} \mathbf{R}_{\text{Welt}}^{\text{IMS}} \mathbf{K}_{\omega}^{-1} \begin{pmatrix} -b_{\omega x} t + k_{\omega,1x} \varphi_{\text{mess},x} \\ -b_{\omega y} t + k_{\omega,1y} \varphi_{\text{mess},y} \\ -b_{\omega z} t + k_{\omega,1z} \varphi_{\text{mess},z} \end{pmatrix} \quad (5)$$

$\mathbf{R}_{\text{Welt}}^{\text{IMS}}$ kann näherungsweise aus den Konstruktionsdaten und Achsstellungen des Roboters bestimmt werden, $\mathbf{R}_{\text{ONV}}^{\text{Welt}}$ muss identifiziert werden, wobei sich hier eine Eulerwinkeldarstellung anbietet. Wiederum kann ein quadratisches Gütemaß des Fehlers obiger Gleichung einem nichtlinearen Optimierverfahren zugrunde gelegt werden, um die drei Winkel in $\mathbf{R}_{\text{ONV}}^{\text{Welt}}$ sowie die drei verbleibenden Freiheitsgrade von \mathbf{K}_{ω} und \mathbf{K}_a zu bestimmen.

Für diesen zweiten Kalibrierschritt müssen keine neuen Messungen erfolgen. Prinzipiell könnte auch die Identifikation aller Parameter alleine mit dem zweiten Schritt durchgeführt

werden; jedoch hat die Aufteilung des Verfahrens in zwei Schritte den Vorteil, dass Offsets und Skalenfaktoren sowie Teile der Kopplungsmatrizen unabhängig von den Fehlern des Roboters bestimmt werden können.

Kreisbahnkalibrierung

Bei IMS, die nicht über die hochgenauen optischen Drehratensensoren zur Messung der Erddrehrate verfügen, können die Parameter der Kreisel nicht mit obigem Verfahren kalibriert werden. In diesem Fall wird das IMS vom Roboter auf Kreisbahnen verfahren, indem nur eine einzige Achse bewegt wird. Wenn die Kreisbahnen genügend kurz und die Geschwindigkeiten im Vergleich zur Erddrehrate genügend groß sind, kann der Einfluss der Erddrehrate vernachlässigt werden. Wie in obigen Verfahren werden wieder die Integrale der Drehraten gemessen. Die Messgleichung ergibt sich analog zu Gl. (4), wobei der Term $\varepsilon^2 t^2$ durch das Quadrat des bei der Kreisbahn überstrichenen Winkels α ersetzt wird. Durch wiederholtes Abfahren derselben Bahnen lässt sich die hohe Wiederholgenauigkeit des Roboters nutzen. Genauso lässt sich auch der zweite Schritt des Kalibrierverfahrens auf Kreisbahnen anwenden, wobei hier allerdings die Matrix $\mathbf{R}_{\text{ONV}}^{\text{Welt}}$ in (5) nicht bestimmt werden kann. εt wird darin ersetzt durch $(\alpha \ 0 \ 0)^T$, $\mathbf{R}_{\text{ONV}}^{\text{Welt}}$ durch die Einheitsmatrix und $\mathbf{R}_{\text{Welt}}^{\text{IMS}}$ durch $\mathbf{R}_{\alpha}^{\text{IMS}}$. Letztere stellt Beziehung zwischen der Drehachse und dem IMS-Koordinatensystem dar und kann aus der Bahnplanung ermittelt werden.

4. Messumgebung und Simulationsergebnisse

Das Kalibrierverfahren soll erstmals bei einem IMS zum Einsatz kommen, das am Lehrstuhl für Prozessautomatisierung (LPA) aufgebaut und in Zusammenarbeit mit der iMAR GmbH, St. Ingbert, weiterentwickelt wurde. Es verfügt über drei Beschleunigungsaufnehmer QA-2000-10 (AlliedSignal) sowie drei Ringlaserkreisel GG 1320 (Honeywell). Das IMS wird von einem Industrieroboter KUKA KR125 verfahren. Z.Z. wird das IMS nur für die Datenaufnahme verwendet, während die eigentlichen Kalibrieralgorithmen sowie die Kommunikation mit dem Roboter von einem externen PC gesteuert werden. Die Kommunikation zwischen den drei Systemen geschieht über Ethernet (IMS) und eine serielle Verbindung zum Roboter.

Um die Leistungsfähigkeit des Kalibrieralgorithmus zu prüfen, wurden Simulationen durchgeführt, die zeigten, dass bei Einsatz eines Davidon-Fletcher-Powell-Verfahrens zur nichtlinearen Optimierung Messdauern von maximal zehn Minuten in jeder Pose ausreichen, um Offsets und Skalenfaktoren so genau zu bestimmen, dass die Genauigkeiten des Einzelsensors in den Bereich seiner Auflösung gebracht werden können. Die

Orthogonalitätsfehler lassen sich aufgrund der Roboterfehler nur bei Verwendung einer großen Anzahl verschiedener Messposen mit ausreichender Genauigkeit schätzen. Diese Schätzungen müssen zukünftig mit dynamischen Verfahren verbessert werden.

5. Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde gezeigt, welche systematischen Fehlerquellen bei inertialen Messsystemen auftreten und wie sie sich modellieren lassen. Es wurden Parameterschätzverfahren entwickelt, mit denen diese Parameter identifiziert werden können. Dazu wird das IMS von einem Roboter in verschiedene Orientierungen gebracht und auf Kreisbahnen verfahren. Daraus lassen sich für die statischen Parameter des Systems Schätzungen berechnen.

In der Zukunft wird die Kalibrierung des IMS um dynamische Verfahren erweitert. Die Parameter, die bisher nicht berücksichtigt werden konnten (Polynomkoeffizienten höherer Ordnung, Exzentrizitäten der Beschleunigungsaufnehmer), werden dazu als Zustände in ein Kalmanfilter aufgenommen und durch dessen rekursiven Algorithmus online geschätzt. Das in diesem Beitrag beschriebene Verfahren dient dann zur Erzeugung von Startwerten für dieses Filter.

6. 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] M. Haid: Optimized Analysis of low cost Inertial measurement-units as a result of Kalman filter. In: Proceedings of the SENSOR 2003, Nürnberg, Deutschland 2003, S. 407-412.
- [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] A. Lawrence: Modern Inertial Technology. Springer-Verlag, New York, Berlin 1998.
- [5] J.D. Johnson; S.R. Zarabadi; J.C. Christenson; P.E. Castillo-Borelli; T.A. Noll; I.D. Jay: Single Crystal Silicon Dual-Axis Acceleration Sensor. In: Proceedings of the SENSOR 2003, Nürnberg, Deutschland 2003, S. 231-236.
- [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.