Navigation mit verteilten GNSS-/MEMS-Sensoren - Mathematische Modelle, Algorithmen und Anwendungspotenziale

Reiner Jäger, Hochschule Karlsruhe

Mit dem Ausbau von GNSS (Global Navigation Satellite Systems), wie der gegenwärtigen Installation des europäischen GNSS GALILEO, sowie global operierender Positionierungsdienste, ist die präzise Satelliten-Positionierung treibender Motor für innovative Navigationstechnologien. Aber erst die algorithmische Fusion der Daten verteilter GNSS- und MEMS Sensoren und die Ermittlung des damit über die 3D-Positionierung hinausreichenden allgemeinen 15-parametrigen Navigationszustandsvektors im Out- und Indoorbereich erschließt das volle Spektrum an Entwicklungspotenzialen. Ein entsprechend weitreichendes Konzept zur Entwicklung von GNSS & MEMS Navigationstechnologien wurde an der Hochschule Karlsruhe Technik und Wirtschaft (HSKA) konzipiert und wird in zwei Ver-bundforschungsprojekten (www.navka.de) vorangetrieben.

NAVKA – Konzept und Alleinstellungsmerkmale

Im Rahmen laufender Verbundforschungsprojekte – dem badenwürttembergischen Projekt "GNSSgestützte LowCost Multisensorsysteme zur mobilen Plattformnavigation und Objektgeoreferenzierung" sowie dem vom BMWi geförderten ZIM-Verbundforschungsprojekt "e-Volocopter" - wird am Institut für Angewandte Forschung (IAF) der Hochschule Karlsruhe (HsKA) unter der Projektleitung des Autors eine neue Generation mathematischer Modelle, Algorithmen, Software und Systeme entwickelt, die unter der Bezeichnung NAVKA (Navigationsalgorithmen Karlsruhe) subsumieren (www.navka. de). Smartphones und Tablets sind hierbei als optionale Komponente bzw. Navigationsplattform der neuen Generation miniaturisierter (MEMS), selbstkalibrierender und designoptimierbarer Navigations- und Georeferenzierungsplatformen integriert. Zugleich sind Smartphones die Navigations- und IKT-Komponente zur multimodalen Mobilität der modernen Gesellschaft.

Im NAVKA FuE Team des IAF sind derzeit fünf wissenschaftliche Mitarbeiter beschäftigt, darunter drei Doktoranden. Die innovativen FuE sind in den Bereichen GNSS und MEMS Navigations- und Georeferenzierungs-Algorithmen und Plattformen, Land/ Wasser/Luftrobotik (UAV) [4], Navigation und Steuerung des bemannten eVolocopters (Abb. 3), autonome Fahrzeugnavigation, Structural HealthMonitoring [5], Mobile GIS und Georeferenzierungssysteme, Indoornavigationssysteme für Rettungswesen (S.A.R) und Personentracking (Abb. 2, [3]) sowie Indoor-Mapmatching Algorithmen für Smartphones (Stichwort "Seamless Cities") angesiedelt. Nach der Präsentation des NAVKA-Konzepts und seiner Alleinstellungsmarkmale und Potentiale werden exemplarisch erfolgte und laufende Entwicklungen in den beiden o.g. Verbundforschungsprojekten vorgestellt.

Navigationszustandsvektor und Vorhersagemodell

Die weitreichenden und nachhaltigen Potenziale der NAVKA FuE basieren in ihrer ersten Komponente auf einem

 Allgemeinen mathematischen Modell zur Vorhersage y(t)_{t-M} des Navigationszustandsvektors (Abb. 1, Formel (1))

Die Vorhersage $y(t)_{t-\Lambda t}$ von y(t) zum Zeitpunkt t erfolgt schrittweise mittels der aus der vorausgehenden Vorhersage und der Sensordaten-Komponente (Abb. 1) zum Zeitpunkt t-Δt erfolgten Zustandsschätzung $y(t-\Delta t)$. Die 3D-Komponenten in y(t) (1) umfassen von links nach rechts jeweils im erdfesten System (e), die Position, die Geschwindigkeit, die Orientierung (Roll- (r), Pitch- (p) und Yaw-Winkel (y)) und die Beschleunigung des zu navigierenden Objekts bzw. Bodys (b). Es folgen die Rotationsraten und die Sensorkalibrierungsparameter s. Was die betreffenden Gleichungen zur Zustandsvorhersage y(t), im NAVKAKonzept anbelangt, so wird auf [3] verwiesen. Die Zustandsschätzung selbst erfolgt im NAVKA-Konzept i.A. nicht im Modell einer klassischen Kalman-Filterung, sondern es kommen hier robuste Schätzungen [7] zum Einsatz.

MultimultiplattformMultisensorkonzept und tiefe Kopplung

Das zweite NAVKA Alleinstellungsmerkmal betrifft das mathematische Modell der Behandlung der Sensordaten (Abb. 1) sowie in Verbindung damit das Sensor/Plattformdesign. Letzteres ist durch das den o.g. Verbundforschungsprojekten gegenständliche und im Kontext neu begründete

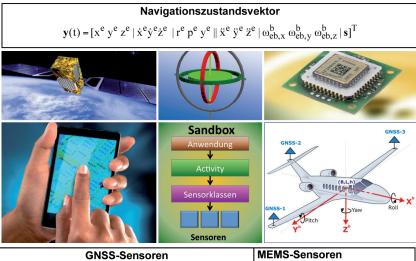
• Multisensor-Multiplattform-Design



Prof. Dr.-Ing. R. Jäger

gekennzeichnet [6]. Dabei sind die GNSSund MEMS-Einzelsensoren (Abb. 1) zweifach indiziert. Unter dem Index i wird der Sensortyp und unter j die Plattformzugehörigkeit des Sensors s,, verwaltet. Der Index i verwaltet zudem die Position und -Orientierung von s, auf der j-ten Plattform. Der Index j verwaltet die Verortung der Plattform p, im Koordinatensystem ("Body-System" (b)) des zu navigierenden Objekts. Dieses algorithmische Design ("NAV-KA-Leverarm-Konzept") ermöglicht eine allgemeine, redundante, selbstkalibrierende und optimale Schätzung des im allgemeinen 15-parametrigen Navigationszustandsvektors y(t) (1) aus einer beliebigen Anzahl auf dem zu navigierenden Body (b) verteilter GNSS- und MEMS-Plattformen bzw. -Sensoren. Algorithmisch sind dabei insgesamt 11 Parameter zur Verortung von Sensoren s, und Plattformen p, auf dem Body (b) mitzuführen. Dies sind erstens die 3 Parameter des Translationsvektors $\mathbf{t}_{p_j}^{b}$ der j-ten Plattform p_j im Body-Frame (b), zweitens die 3 Parameter der Rotationsmatrix $\mathbf{R}_{p_j}^{b}$ der j-ten Plattform p_i gegenüber dem BodyFrame (b), drittens die 3 Translationsparameter $\mathbf{t}_{s_{ij}}^{\mathbf{p}_j}$ des i-ten Sensors \mathbf{s}_{ij} im Koordinatensystem der j-ten Plattform p_i und viertens die 2 Parameter $(\alpha,\delta)_{S_{ij}}$ zur Sensororientierung auf p. Der z. B. im Fall der Fahrzeugnavigation auftretende Sonderfall "Plattform

horizonte 43/ März 2014 - 7 -



Deep Coupling
Codemessungen
Phasenmessungen
Dopplermessungen

Abb. 1: Navigationszustandsvektor, GNSS- und MEMS-Daten, verteilte Sensoren und Anwendungen

p_j gleich Body (b)" (siehe Flugzeug, Abb. 1) ist konzeptionell enthalten.

Als dritte Komponente und Alleinstellungsmerkmal des NAVKAKonzepts tritt die algorithmische Behandlung der verteilten Sensorinformationen in Form der

 Tiefen Kopplung ("Deep-Coupling") der Rohdaten der GNSS (Code-, Phasen- und Dopplermessungen) und der MEMS-Sensoren (Beschleunigungsmesser, Gyroskope, Magnetometer, Barometer sowie Kameraoptik (Kamerakoordinaten, optischer Fluss))

hinzu (Abb. 1). Dabei parametrisieren alle GNSS- und MEMS-Sensorrohdaten direkt den Navigationszustandsvektor **y**(t) (1).

Die tiefe Kopplung soll anhand eines i-ten auf der j-ten Navigationsplattform platzierten Beschleunigungssensors s_{ij} aufgezeigt werden. Dessen am Sensorort gemessene eindimensionale Beschleunigung $a_{S_{ij}}$ geht mit dem durch $(\alpha,\delta)_{S_{ij}}$ parametrisierten Sensororientierungsvektor $\mathbf{r}_{S_{ij}}^{P_j}$ aus dem am Plattformrahmen p_j anliegenden Beschleunigungsvektor $\mathbf{a}_{S_{ij}}^{P_j}$ nach (2a1,2) hervor. Mit (2a3) wird der anliegende Beschleunigungsvektor $\mathbf{a}_{S_{ij}}^{P_j}$ vom erdfesten System (e) ins Plattformsystem (p) $\mathbf{a}_{S_{ij}}^{P_j}$ (2a1) überführt. Für den aus der Gesamtbeschleunigung $\ddot{\mathbf{x}}(\mathbf{t})_{S_{ij}}^{\mathbf{e}}$ des Sensors, der Gravitations-, der Coriolis- und der Zentrifugalbeschleunigung jeweils am Sensorort und dem bzgl. des Navigationszustandsvektors $\mathbf{y}(t)$ (1) interessierenden erdfesten Bezugsrahmen (e) - zusammengesetzten

Beschleunigungsvektor $\mathbf{a}_{s_{ij}}^{e}$ gilt (2b). Durch Einsetzen von (2b) in (2a3) und das Ergebnis in (2a1) erhalten wir damit die Parametrisierung der Sensormessgröße, der Beschleunigung as am Sensorort im erdfesten Bezugsrahmen (e) in Gestalt von (2c). Die Verknüpfung von (2c) mit dem zu navigierenden Body (b) erfolgt über die o. g. 11-parametrige Ortsverknüpfung von Sensoren s,, Plattformen p, und Body (b) in Gestalt der "Leverarm" (Hebelarm) Beziehung (2d). Durch Einsetzen von (2d) und der entsprechenden ersten und zweiten zeitlichen Ableitung erhalten wir das finale funktionale Modell der Parametrisierung der Beschleunigungsmessung $\mathbf{a}_{S_{ii}}$ des Sensors \mathbf{s}_{ii} in tiefer Kopplung ("Deep-Coupling") der physikalischen Sensorrohdaten an den Navigationszustandsvektor y(t) (1). In der tiefen Kopplung (2a-2d) im NAVKA Multisensor-Multiplattform-Konzept sind die Sensorrohdatenbeobachtungen $\mathbf{a}_{S_{ij}}$ (2c) der auf dem Body (b) verteilten Sensoren $s_{ii'}$ so direkt mit dem interessierenden Navigationszustandsvektor y(t) (1) verknüpft. Alle Sensoren tragen somit mit ihren physikalischen Rohdaten direkt zur Zustandsschätzung $\mathbf{y}(t)$ (1) des Body (b) bei. Die damit verbundene Vermeidung von Mehrfachparametrisierungen impliziert eine optimale, robuste und selbstkalibrierende Schätzung y(t) (1) aus der Vorhersagekomponente $y(t)_{t-\Delta t}$ und der zweiten Komponente der verschiedenen verteilten Sensormessungen, wie im obigen Beispiel $\mathbf{a}_{S_{ii}}$ (2c,d), in einem sog. Gauß-Markov-Modell [7].

Demgegenüber bedeutet die zweitstufige enge Kopplung ("Tight-Coupling") eine suboptimale Integration von Sensoren als sog. direkte Beobachtungen der Navigationszustandsparameter **y**(t) (1). Paradebeispiel für "Tight-

$$\mathbf{y}(t) = \left[\mathbf{x}^{\mathsf{e}} \ \mathbf{y}^{\mathsf{e}} \ \mathbf{z}^{\mathsf{e}} \ | \ \dot{\mathbf{x}}^{\mathsf{e}} \dot{\mathbf{y}}^{\mathsf{e}} \dot{\mathbf{z}}^{\mathsf{e}} \ | \ \mathbf{r}^{\mathsf{e}} \ \mathbf{p}^{\mathsf{e}} \ \mathbf{y}^{\mathsf{e}} \ | \ \ddot{\mathbf{x}}^{\mathsf{e}} \ \ddot{\mathbf{y}}^{\mathsf{e}} \ \ddot{\mathbf{z}}^{\mathsf{e}} \ | \ \omega_{\mathsf{eb},\mathsf{x}}^{\mathsf{b}} \ \omega_{\mathsf{eb},\mathsf{y}}^{\mathsf{b}} \ \omega_{\mathsf{eb},\mathsf{z}}^{\mathsf{b}} \ | \ \mathbf{s} \right]^{\mathsf{T}} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{a}_{s_{ij}} = (\boldsymbol{r}_{s_{ij}}^{p_{j}})^{T} \cdot \boldsymbol{a}_{s_{ij}}^{p_{j}}, \qquad \text{mit} \qquad (\boldsymbol{r}_{s_{ij}}^{p_{j}})^{T} = (\cos \delta_{ij} \cdot \cos \alpha_{ij}, \cos \delta_{ij} \cdot \sin \alpha_{ij}, \sin \delta_{ij}) \tag{2a1,2}$$

$$a_{s_{ij}}^{p_{j}} = (R_{p_{i}}^{b})^{T} \cdot R_{e}^{b}(r, p, y) \cdot a_{s_{ij}}^{e}$$
 (2a3)

$$\boldsymbol{a}_{s_{ii}}^{e} = \left[\ddot{\boldsymbol{x}}(t)^{e} - \boldsymbol{g}^{e}(\boldsymbol{x}) \right. \\ \left. + 2 \cdot \Omega_{ie}^{e} \cdot \dot{\boldsymbol{x}}(t)^{e} + \right. \\ \left. \Omega_{ie}^{e} \cdot \Omega_{ie}^{e} \cdot \boldsymbol{x}(t)^{e} \right]_{s_{ii}} \tag{2b}$$

$$\boldsymbol{a}_{s_{ii}} = (\boldsymbol{r}_{s_{ii}}^{p_{j}})^{T} \cdot (\boldsymbol{R}_{p_{i}}^{e})^{T} \cdot \boldsymbol{R}_{e}^{b} (\boldsymbol{r}, \boldsymbol{p}, \boldsymbol{y}) \cdot \left[\ddot{\boldsymbol{x}}(t)^{e} - \boldsymbol{g}^{e}(\boldsymbol{x}) \right. \\ \left. + 2 \cdot \boldsymbol{\Omega}_{ie}^{e} \cdot \dot{\boldsymbol{x}}(t)^{e} + \right. \\ \left. \boldsymbol{\Omega}_{ie}^{e} \cdot \boldsymbol{\Omega}_{ie}^{e} \cdot \boldsymbol{x}(t)^{e} \right]_{s_{ii}} \tag{2c}$$

$$\boldsymbol{x}_{s_{ii}}^{e} = \boldsymbol{x}_{b}^{e} + \boldsymbol{R}_{b}^{e}(r, p, y) \cdot [\boldsymbol{t}_{p_{i}}^{b} + \boldsymbol{R}_{p_{i}}^{b} \cdot \boldsymbol{t}_{s_{ii}}^{p_{j}}]$$
 (2d)

$$\bm{x}_{\text{GNSS-s}_{ij}}^{\text{e}} = \bm{x}_{\text{b}}^{\text{e}} + \bm{R}_{\text{b}}^{\text{e}}(r,p,y) \cdot [\bm{t}_{p_{j}}^{\text{b}} + \bm{R}_{p_{j}}^{\text{b}} \cdot \bm{t}_{s_{ij}}^{p_{j}}] \tag{3a}$$

$$\mathbf{X}_{\text{GNSS-s}_{ij}}^{\text{e}} = \mathbf{X}_{\text{b}}^{\text{e}} + \mathbf{R}_{\text{b}}^{\text{e}}(\mathbf{r}, \mathbf{p}, \mathbf{y}) \cdot \mathbf{t}_{\text{s}_{ij}}^{\text{b}} \tag{3b}$$

Formeltabelle

- 8 - horizonte 43/ März 2014

Abb. 2: NAVKA-Entwicklungen im Rahmen von Verbundforschung. Links, oben: Sensorbox "Robinette" mit NAVKA-Algorithmen. Links, unten: Mobiles Tablet-Georeferenzierungssystem. Rechts: Indoornavigationssystem mit Smartphone-Client und Visualisierungs-Server für Rettungsdienste (S.A.R.) und Personentracking.



Coupling" ist GNSS. Hier können aus den GNSS-Rohdaten (Code-, Phasenund Dopplermessungen, Abb. 1) mit GNSS-Algorithmen bereits Positionsund Geschwindigkeitsinformation als Teilvektoren von y(t) (1) – in einer separaten Stufe geschätzt werden. Für eine aus den GNSS-Rohdaten separat berechnete GNSS-Positionsinformation **X**_{GNSS}-**S**_{ii} erhalten wir im NAVKA-Multisensor-Multibody-Konzept im Fall von "Tight-Coupling" dann in Stufe 2 die Beobachtungsgleichung (3a). Im Sonderfall "Plattform $p_i = Body (b)$ " – z. B. wie bei dem in Abb. 1 dargestellten Flugzeug mit drei GNSS-Sensoren – geht (3a) mit $t_{p_j}^b = 0$ und $R_{p_j}^b = 1$ in (3b) über. Die Beziehung (3b) erlaubt die Bestimmung von Position (x,y,z) und Orientierung (r,p,y) eines Body (b) aus den Positionen **X**^e_{GNSS}-**S**_{ij} einer Anzahl auf dem Body (b) verorteter GNSS-Sensoren (Abb. 1). Der Nachteil der zweistufigen engen Kopplung ("Tight-Coupling") wird im o.g. GNSS-Beispiel (3a,b) aber sofort deutlich: Es ist vorauszusetzen, dass die aus den GNSS-Rohdaten (Abb. 1) zu gewinnende Positionsbeobachtungen $\mathbf{X}_{\mathsf{GNSS}}^{\mathsf{e}}$ für die enge Kopplung (3a,b) in Stufe 1 berechenbar sein müssen. D.h., die enge Kopplung (3a,b) setzt



Abb. 3: E-Volocopter VC200 mit 18 elektrisch betriebenen Propellern und redundant verteilten GNSS/MEMS Navigationssensoren. In der Bildmitte v.l.n.r. die IAF-Projektmitarbeiter BSc. Jeromin Schwenk und MSc. Jan Zwiener

im Gegensatz zur allgemeineren tiefen Rohdatenkopplung (Beispiel (2c,d)) in diesem Fall die Rohdaten von 4 Satelliten in Stufe 1 voraus. Bei der mächtigeren tiefen Kopplung ("Deep-Coupling") sind dagegen bereits die Rohdaten eines GNSS Satelliten einstufig modellierbar. Auch die Verwaltung von Zeitoffsets zwischen Rohdatenbezug und Berechnungsergebnis in Stufe 1 entfällt.

Sensor und Zustandsintegration

Die weiteren NAVKA-Alleinstellungsmerkmale beziehen sich auf die nachfolgenden Eigenschaften zur Zustandsschätzung y(t) (1) aus Vorhersage und Sensormessungs-Komponente. Dabei sind externe Positions- und Geschwindigkeitsinformation liefernde Komponenten im NAVKA-Konzept dennoch über die o.g. enge Kopplung ("Tight-Coupling") integrierbar gehalten. Insgesamt sind folgende weitere Charakteristika der mathematischen Modellbildung und Algorithmen des NAVKA-Konzeptes hervorzuheben:

- "Tight-" und "Deep-Coupling" weiterer Zusatzsensoren (z. B. Odometer, WLAN-Positionen)
- Integration von Zusatzinformation zum geometrischen und physikalischen Bewegungsprofil
- Einbeziehung von Ungleichungen zum Zustandsraum y(t)
- Einbeziehung von Sensorkalibrierungsparametern **s** und -Algorithmen
- Robuste Schätzung des Zustandsvektors y(t) und der stochastischen Modellkomponenten.

NAVKA – Systementwicklungen und Potentiale

In fortlaufender Zustandsschätzung modellieren die NAVKA-Algorithmen im o. g. Profil den allgemeinen Navigationszustandsvektor y(t) (1) mittels der Sensordaten der auf dem Objekt

(Body (b)) verorteten multisensorischen Navigationsplattformen oder Einzelsensoren (Abb. 1).

Um die geforderten Genauigkeits-, Zuverlässigkeits- und Selbstkalibrierungseigenschaften bei Navigationsalgorithmen und Systementwicklungen einzuhalten, ist es möglich, diese a priori einem "Proof of Concept" zu unterziehen, und dabei zugleich das Plattformdesign und die Kosten zu optimieren. Dazu wurde die Rohdatensimulationssoftware SIMA ([1], [2]) entwickelt, mit der für ein vordefiniertes Sensordesign und Bewegungscharakteristik die entsprechenden GNSS- und MEMS-Sensorrohdaten (Abb. 1) generiert werden können. Die Algorithmen und Systementwicklungen sind damit vorab zu validieren und der Zeit- und Kostenaufwand bei Neuentwicklungen deutlich reduzierbar.

In Kooperation mit dem Verbundforschungspartner teXXmo wurden in der B.W. Verbundforschung in 2011-2013 die Navigationsplattform Robinette (Abb. 2, oben, links; www.robinette. de) sowie das Produkt "KALEO Georeferencer" (Abb. 2, unten, links) entwikkelt. Aufbauend auf der fortlaufenden Schätzung des Navigationsparametervektors $\mathbf{y}(t)$ (1) kann eine solche Navigationsplattform oder auch ein Tablet in Kombination mit einem LowCost Entfernungsmesser zu einem allgemeinen Objektgeoreferenzierungssystem (Abb. 2, unten, links) erweitert werden, welches ein direktes "3D polares Anhängen" für mobile GISAnwendungen realisiert.

Gemeinsam mit dem FuEKooperationspartner IN GmbH erfolgte im eingangs genannten B.W. Verbundforschungsprojekt in den Jahren 2011-2013 die Algorithmen- und Systementwicklung zur autarken Navigation von Personen in Gebäuden ohne Navigationsinfrastruktur oder bei Wegfall beste-

hender Navigationsinfrastrukturen (z.B. Stromausfall im Katastrophenfall). Die NAVKA-Indoornavigationslösung zielt auf den Einsatz im Polizei-, Feuerwehrund Rettungswesen (S.A.R.) ab (Abb. 2, rechts). Hierbei werden die Rohdaten einer am Schuh getragenen MEMS-Sensoreinheit auf das Smartphone/ Tablet PC der zu navigierenden Person als Rechen-, Visualisierungs- und Kommunikationsinstanz übertragen. Im mathematischen Modell der autarken NAVKA-Indoornavigationslösung werden Ruhezustände ("Zero-Velocity, Zero-Rotationrate") erkannt und algorithmisch auf dem mitgeführten Smartphone/Tablet modelliert.

Der im Konsortium von sechs Partnern aus Hochschulen und Industrie mit einer seitens des Bundeswirtschaftsministeriums (BMWI) bewilligten Fördersumme von 2 Millionen Euro zu entwickelnde Volocopter (http://www. navka.de/index.php/de/ueberblickevolo) ist ein 18-rotoriges, elektrisch betriebenes, bemanntes Zweipersonen Luftfahrzeug (Abb. 3). Das bereits in 2012 begonnene, vom Bundeswritschaftsministerium geförderte ZIM-Projekt e-Volocopter war das erste der sich aufgrund der positiven Reputation des o.g. B.W. Verbundforschungsprojektes sowie den weitreichenden NAVKA-Potentialen ergebenden Folgeprojekte. Hierbei sind Flugbahn und Flugverhalten, d.h. alle fortlaufenden Änderungen des Navigationszustands, allein durch die Variation der Propellerdrehzahlen zu steuern. Für den neuartigen per Joystick zu steuernden Typ des bemannten Fluggeräts e-Volocopter VC 200 mit Elektroantrieb (Abb. 3) wurde seitens des dafür zuständigen Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) Ende 2012 in Verbindung mit einem zwei- bis dreijährigen Erprobungsprogramm eine eigene Flugklasse vergeben. Gegenstände der FuE am IAF/HSKA sind im Rahmen des ZIM-Projekts e-Volocopter die Navigations- und Steuerungsalgorithmen und Software. Die Abb. 3 zeigt den bereits fertiggestellten ZIM-Projekt-Prototypen des e-Volocopters bei einer öffentlichen Präsentation im Rahmen eines unbemannten Hallentestflugs Ende 2013.

Literatur

[1] Jäger, R., Diekert, J., Hoscislawski A. and J. Zwiener (2012): SIMA – Raw Data Simulation Software for the Development and Validation of Algorithms for GNSS and MEMS based MultiSensor Navigation Plat-

- forms. Proceedings of the FIG Working Week. May 610, 2012, Rome, Italy International Federation of Surveyors (FIG).
- Download: http://www.fig.net/pub/fig2012/papers/ts03d/TS03D_jaeger diekert et al 6000.pdf
- [2] Jäger, R, Diekert, J., Hoscislawski, A. and J. Zwiener (2013): SIMA Raw Data Simulation Software for the Development and Validation of Algorithms for GNSS- and MEMS-Multisensor-Navigation Platforms. Proceedings Inter-Expo Geo-Siberia 2013. ISBN 9785876936196.
- [3] Jäger, R. (2013): Mehr als Positionierung Präzise Out/Indoor Navigation mit verteilten Sensoren. Vortrag zur INTERGEO 2013.
 - Download: http://www.kongress.intergeo.de/share/public/Intergeo/Archiv/2013/Jaeger_Vortrag.pdf
- [4] Zwiener, J. (2013): High Precise GNSS Multisensor Navigation of UAV including the Georeferencing of Cameras and Other Sensors. Vortrag UAV-g 2013, Rostock. Download: http://www.uavg.org/Presentations/UAS_navigation_and_position_determination/Zwiener_JHigh_precise_GNSS_MEMS_multisensor_navigation.pdf
- [5] Jäger, R. [2014]: GNSS/LPS based Online Control and Alarm System (GOCA) Konzept, Modellbildung und Realisierung eines Systems zum Geomonitoring in Bauwesen, Geotechnik und Naturkatastrophenschutz. Tagungshandbuch zum 9. Kolloquium "Bauen in Boden und Fels", Jan./2014.Technische Akademie Esslingen (TAE). ISBN.Nr. 9783943563085. S. 359-368.
- [6] Kompetenzatlas Luft- und Raumfahrttechnik B.W. (2011). NAVKA-Konzept. S. 159. Download: http://www.lrbw.de/wpcontent/uploads/2011/09/Kompetenzatlas_2011_lowRes1.pdf
- [7] Jäger, R., Müller, T., Saler, H. und S. Schwäble (2005): Klassische und robuste Ausgleichungsverfahren. Wichmann Verlag.

Kontakt

Prof. Dr.-Ing, Reiner Jäger, NAVKA-Projektleitung am Institut für Angewandte Forschung (IAF), Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft (HSKA), Moltkestrasse 30, 76133 Karlsruhe, Tel. 0721/925-2598, E-Mail: reiner.jaeger@hskarlsruhe.de

www.navka.de

- 10 - horizonte 43/ März 2014