

GPS/INS-Systeme im Einsatz mit der HRSC – Vergleich der Systeme APPLANIX POS/AV-510 und IGI AEROcontrol-IIId

SERGEJ SUJEV, FRANK SCHOLTEN, FRANZ WEWEL & RENE PISCHEL, Berlin

Abstract: *Application of GPS/INS Systems with HRSC – A Comparison of Applanix POS/AV-510 and IGI AEROcontrol-IIId.* Since 1997 the German Aerospace Center (DLR) has been operating the airborne HRSC in combination with direct georeferencing methods. Using a GPS/INS system many scientific and commercial applications could be realized with accuracies in the decimeter range for the standard products, such as true-orthoimage mosaics and Digital Surface Models. In March 2002 the DLR-Institute of Space Sensor Technology and Planetary Exploration conducted a test flight with the HRSC-A in cooperation with BSF Luftbild GmbH and IGI mbH using two GPS/INS systems APPLANIX POS/AV-510 and IGI AEROcontrol-IIId simultaneously. The first results of the investigations of the exterior orientation quality of both GPS/INS systems based on photogrammetric processing of HRSC-A data are presented.

Zusammenfassung: Seit 1997 betreibt das Deutsche Zentrum für Luft und Raumfahrt e.V. (DLR) die flugzeuggetragene Version der HRSC in Verbindung mit direkter Sensororientierung. Mit Hilfe von GPS/INS-Systemen konnten zahlreiche wissenschaftliche und kommerzielle Anwendungen mit Genauigkeiten im Dezimeterbereich für Standardprodukte wie Orthobildmosaik und Digitale Oberflächenmodelle erfolgen. Im März 2002 führte das Institut für Weltraumsensorik und Planetenerkundung des DLR einen Testflug mit der HRSC-A in Zusammenarbeit mit der BSF Luftbild GmbH und der IGI mbH unter der gleichzeitigen Verwendung der GPS/INS Systeme APPLANIX POS/AV-510 und IGI AEROcontrol-IIId durch. Erste Ergebnisse der vergleichenden photogrammetrischen Untersuchungen über die Genauigkeit der dabei von beiden Systemen für die HRSC-A abgeleiteten absoluten Orientierung werden präsentiert.

1 Einleitung

Seit 1997 ist die High Resolution Stereo Camera – Airborne (HRSC-A) am DLR-Institut für Weltraumsensorik und Planetenerkundung im operationellen Einsatz (NEUKUM et al. 2001, WEWEL et al. 1998, SCHOLTEN et al. 2001, SCHOLTEN et al. 2002). Die photogrammetrische Auswertung von Scannerdaten, wie die der HRSC, erfordert eine präzise und kontinuierliche Erfassung von Positions- und Lagedaten. Die stabile und sehr genau bekannte innere Orientierung der digitalen Kamera bietet, kombiniert mit einer hohen räumlichen Auflösung und der permanenten Bildaufnahme mit 450 Hz Taktfrequenz, eine Möglichkeit, die Qualität von GPS/INS-Systemen bzw. die damit generierten Orientierungsdaten zu untersuchen. Im Gegensatz zu bisherigen

Tests (HEIPKE et al. 2001) konnte somit erstmalig ein Vergleich der GPS/INS-Systeme von APPLANIX und IGI unter identischen Einsatzbedingungen mit einem hierfür idealen Bildaufnahmesystem erfolgen.

2 Testkonfiguration

Für den GPS/INS Performance-Testflug wurde eine Standard-Installation des HRSC-A Kamerasystems in einer ZEISS T-AS Stabilisierungsplattform an Bord einer zweimotorigen CESSNA 404 der BSF Luftbild GmbH realisiert. Beide GPS/INS-Systeme, APPLANIX POS/AV-510 und IGI AEROcontrol-IIId, wurden für einen gleichzeitigen Betrieb während des Testfluges installiert. Um absolut identische Umgebungsbedingungen zu gewährleisten, wur-

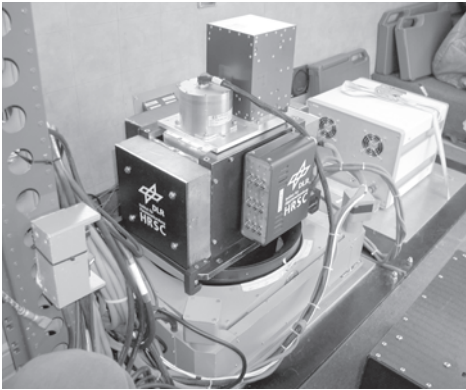


Abb. 1: Installation der HRSC-A mit APPLANIX AIMU und mit IGI IMU-IId.

den beide Systeme über einen Splitter an eine L1/L2 GPS-Antenne angeschlossen, die direkt über der Kamera angebracht war. Außerdem wurden beide inertialen Messeinheiten (APPLANIX AIMU und IGI IMU-IId) dicht nebeneinander auf einer gemeinsamen Adapterplatte auf dem Kamerakopf befestigt (Abb. 1). Die Zeitsynchronisation der HRSC-Bilddaten mit den Navigationsdaten erfolgte auf Grund des vom APPLANIX GPS-Receiver gelieferten PPS-Impulses (Pulse Per Second).

Der Testflug fand am 12./13. März 2002 über einem Testfeld südlich von Berlin (Kö-

nigs Wusterhausen, Ragow) statt. Das Testfeld wurde mit vier Ost-West Flugstreifen (je ca. 10 km Länge) sowie zwei Nord-Süd Flugstreifen (je ca. 3 km Länge) abgedeckt. Die Querüberlappung betrug ca. 60 %, die Flughöhe lag bei 1000 m.

Bei dem Testflug wurden beide GPS/INS-Systeme synchron betrieben, d.h. gleichzeitig eingeschaltet, initialisiert und nach dem Flug ausgeschaltet. Die statische Initialisierung erfolgte vor dem Start am Boden und dauerte etwa 10 min. Vor dem ersten Flugstreifen wurde noch ein zusätzliches In-Flight-Alignment Manöver durchgeführt. Als Referenzstation wurde die SAPOS GPS-Station Wünsdorf verwendet. Startflughafen, Testgebiet und Referenzstation befinden sich in einem Umkreis von 30 km. Die GPS-Situation während des gesamten Fluges war mit 9–10 Satelliten günstig.

3 Beschreibung der GPS/INS-Systeme

Die bei dem Testflug benutzten Systeme APPLANIX POS/AV-510 und IGI AEROcontrol-IId sind integrierte GPS/INS-Systeme, die für die direkte Positions- und Lagebestimmung der flugzeuggetragenen Sensoren bestimmt sind und effizient die Inertialsensor- und GPS-Technologien

Tab. 1: Parametervergleich der Navigationssysteme APPLANIX POS/AV-510 und IGI AEROcontrol-IId.

	APPLANIX POS/AV-510	IGI AEROcontrol-IId
System components	AIMU (dry tuned gyros), PCS-computer (incl. L1/L2 GPS receiver) s/w package: POSPac	IMU-IId (fibre-optic gyros), AEROcontrol-computer L1/L2 GPS receiver s/w package: AEROoffice
Operation in flight	autonomous	via Standard CCNS4
IMU parameters	AIMU	IMU-IId
Size (H × W × L)/Weight	9 × 11 × 11 cm/1,6 kg	19 × 14 × 13 cm/3,3 kg
Raw data	200 Hz	64 Hz
Gyro drift	0.1 deg/h	0.1 deg/h
Gyro drift stability	0.01 deg/sqrt(h)	0.02 deg/sqrt(h)
Absolute Accuracy Spec. (post-processed)		
Data rate	200 Hz	64 Hz
Position (RMS)	5–10 cm	5–10 cm
Attitude (RMS)		
Roll, Pitch	0.005 deg	0.005 deg
Heading	0.008 deg	0.008 deg

kombinieren (LITHOPOULOS 1999, KREMER 2001). Ihre technischen Parameter sind in Tab. 1 aufgelistet.

Jedes System beinhaltet drei zentrale Komponenten, die Inertial Measurement Unit (IMU), einen Steuercomputer mit L1/L2 GPS-Empfänger und ein Auswertesoftwarepaket. Der wesentliche Unterschied zwischen den Systemen besteht in der IMU. Die APPLANIX AIMU basiert auf einer mechanischen Kreiseltechnologie mit 200 Hz Abtastfrequenz, dagegen besitzt die IGI IMU-IId Fiber-optische Gyroskope (FOG) mit 64 Hz Taktfrequenz. Die IMU realisiert Messungen von Beschleunigungen und Winkelgeschwindigkeiten. Sie erfasst damit alle Restbewegungen des Kamera-IMU-Systems, die nicht von der stabilisierten und gedämpften Plattform ZEISS T-AS ausgeglichen werden können. Die zeitsynchronisierten IMU- und GPS-Daten werden während des Fluges im Steuercomputer auf einem Speichermedium (PC-Karte) für die nachfolgende Prozessierung abgelegt.

4 GPS/INS-Datenverarbeitung

Während die Daten des APPLANIX-Systems am DLR mit Hilfe der APPLANIX-Software POSpac verarbeitet wurden, erfolgte die Prozessierung der Daten des IGI-Systems vollständig beim Hersteller IGI. Dabei wurde die auf der 64 Hz basierte IGI-Navigationslösung auf 200 Hz gesampelt. Der generelle Prozessierungsablauf der aufgezeichneten GPS- und Inertialdaten besteht aus zwei Phasen und gilt für beide Systeme (Abb. 2).

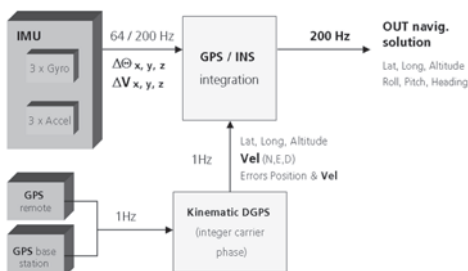


Abb. 2: GPS/INS Datenverarbeitung.

Die erste Phase beinhaltet die reine GPS-Prozessierung, wobei die GPS-Daten vom Flugzeug zusammen mit den Daten der Referenzstation zu einer kinematischen GPS-Trajektorie prozessiert werden. Diese DGPS-Lösung mit 1 Hz beschreibt im WGS84-Koordinatensystem die Position (Latitude, Longitude, Altitude) und die Geschwindigkeit (V_n , V_e , V_d) mit sehr hoher absoluter Genauigkeit (5–10 cm für die Position und einige cm/s für die Geschwindigkeit). Die zweite Phase besteht aus der GPS/INS-Integration. Der auf den IMU-Daten basierte Inertial-Navigationsalgorithmus wird dabei durch die zusätzliche GPS-Positions- und Geschwindigkeitsinformation gestützt. Aufgrund der Tatsache, dass die typischen Fehler von Inertial-Navigation und GPS-Messungen unabhängig und komplementär sind, ist es möglich, im Rahmen von Kalman-Filterverfahren diese Inertialfehler zu schätzen und zu kompensieren. Die resultierende Genauigkeit der integrierten GPS/INS-Lösung wird damit für die Position über die GPS-Positionsgenauigkeit und für die Lage über die Qualität der IMU bestimmt.

5 Analyse der Navigationslösungen

Für die Auswertung standen für den hier beschriebenen HRSC-A Testflug vom 13. März 2002 für die Systeme von APPLANIX und IGI jeweils die reinen DGPS-Lösungen mit 1 Hz sowie endgültige GPS/INS-Lösungen mit 200 Hz als Navigationsdaten zur Verfügung. Zuerst wurden die reinen DGPS-Lösungen von APPLANIX (s/w POSGPS 3.0) und von IGI verglichen, da die GPS-Position als absolute Referenz für die weitere GPS/INS Integration verwendet wird. Unter Verwendung der GPS-Bodenstation Wünsdorf ergab sich mit einer maximalen Positionsabweichung (3D) zwischen beiden Trajektorien bezogen auf die GPS-Antenne von 4 cm (RMS 2 cm) über den gesamten Flugweg eine gute Übereinstimmung.

Die entsprechenden integrierten GPS/INS-Lösungen beziehen sich in der Position auf das HRSC-A Projektionszentrum und in der Lage auf die jeweiligen IMU-Achsen.

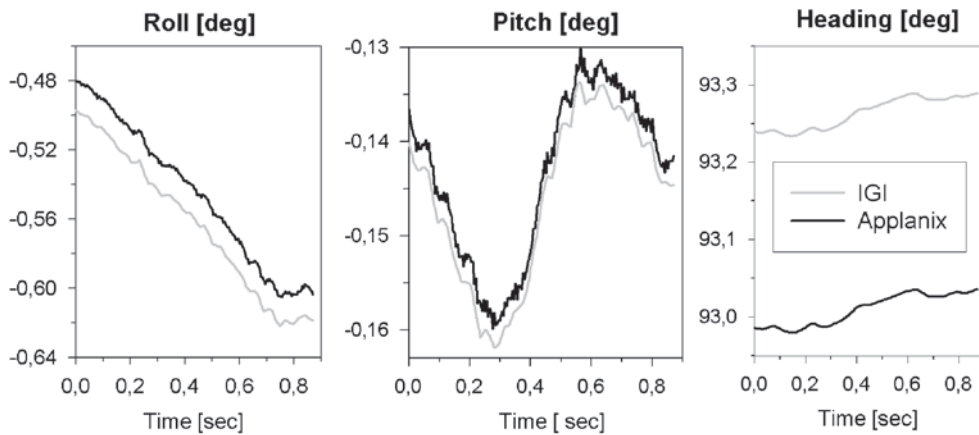


Abb. 3: Lagedifferenz der APPLANIX- und IGI-Navigationslösungen.

Der direkte Vergleich der beiden Navigationslösungen zeigt für die Lage (Abb. 3) die einbaubedingt unterschiedlichen Boresight-Winkel. Diese, wie auch mögliche geringe Zeitsynchronisations-Offsets, können nur im Rahmen einer auf Bildinformation basierenden photogrammetrischen Auswertung (vgl. Abschnitt 6) bestimmt und analysiert werden.

Die Bilddaten der HRSC-A werden mit einer Taktrate von 450 Hz aufgezeichnet und beinhalten Bewegungen und Vibrationen, die während der Aufnahme auf die Kamera wirken und nicht durch die T-AS Stabilisierungsplattform kompensiert und gedämpft werden. Die Parameter der verbleibenden Bewegungen hängen von verschiedenen Faktoren, wie z. B. Flugzeugtyp, aktuelle Turbulenzverhältnisse oder Stabilisierungseigenschaften der Plattform, ab. Eine Spektralanalyse der Lagedaten aus beiden Navigationslösungen zeigt folgende dominante Frequenzen (Tab. 2).

Diese Frequenzen konnten in den Bilddaten ebenfalls nachgewiesen werden. Beide Systeme haben somit die relativ hochfrequenten Bewegungen der Kamera erfasst und reproduziert. Eine Ausnahme besteht darin, dass, wie in Tab. 2 dargestellt, die IGI-IMU-IId mit 64 Hz Messfrequenz gegenüber der APPLANIX-AIMU mit 200 Hz eine Rollbewegung von 85 Hz nicht erfassen kann. Aufgrund der geringen Amplitude von ≤ 0.002 deg (unterhalb der HRSC-Pixelauflösung) ist dies aber von untergeordneter Bedeutung.

6 Photogrammetrische Analyse der Navigationslösungen

Die HRSC-A nimmt Bilddaten mit 9 verschiedenen CCD-Zeilen auf, wovon 5 panchromatische Stereokanäle unterschiedliche Stereowinkel von 0° , $\pm 12,8^\circ$ und $\pm 18,9^\circ$ aufweisen und im Gegensatz zu den anderen 4 Spektralkanälen im Rahmen der

Tab. 2: Dominante Frequenzen in den APPLANIX- und IGI-Navigationslösungen.

Frequenz [Hz]	APPLANIX (Roll)	IGI (Roll)	Amplitude	Bemerkung
1–2	+	+	ca. 0.02 deg	T-AS Plattform Regelkreis
18	+	+	ca. 0.004 deg	
85	+	–	≤ 0.002 deg	Flugzeugpropeller mit 3 Blättern (1700 U/min)

Tab. 3: Ergebnisse der photogrammetrischen Analyse der Navigationssysteme APPLANIX POS/AV-510 und IGI AEROcontrol-Ild.

	APPLANIX	IGI
Boresight-Winkel-Offsets:		
Boresight ω [°]	0,024	0,011
Boresight ϕ [°]	0,009	0,013
Boresight κ [°]	- 0,017	0,259
WGS84-Positions-Offset:		
Δ North [cm] / Δ East [cm] / Δ Up [cm]	4 / 1 / 4	2 / 1 / 12
Zeit-Offsets:		
Δt Position-Bild [ms] Δt Lage-Bild [ms]	3 / - 4	4 / - 2
Punktgenauigkeiten:		
Relativ (Flugstreifen intern): 3D-RMS [cm]	8	8
Flugstreifen zu Flugstreifen: 3D-RMS [cm]	14	16
Absolut: (an Passpunkten): 3D-RMS [cm]	14	16

photogrammetrischen Analyse verwendet werden. Aufgrund der Taktrate von 450 Hz ergibt sich für alle 5 Stereokanäle eine Bodenauflösung in Flugrichtung von ca. 16 cm. Aufgrund der Flughöhe von 1000 m liegt die Bodenauflösung quer zur Flugrichtung bei 4 cm.

Im Testfeld liegen 18 einwandfrei identifizierbare und zuvor mit GPS-Verfahren mit einer Genauigkeit von wenigen Zentimetern bestimmte Passpunkte vor. Die Bildkoordinaten dieser Passpunkte sowie von weiteren 87 Verknüpfungspunkten wurden in allen Stereokanälen mit Subpixel-Genauigkeit gemessen. Die Verknüpfungspunkte sind ebenfalls eindeutig identifizierbare Punkte in den Überlappungsbereichen der 6 Flugstreifen. Im Rahmen eines numerischen Optimierungsverfahrens werden nun zunächst die Boresight-Offsets für κ und ϕ sowie ein etwaiger Zeit-Offset zwischen Bild- und Lagedaten durch Optimierung der Strahlenschnitte aller durch die innere und äußere Orientierung definierten Raumstrahlen der Pass- und Verknüpfungspunkte bestimmt. Anschließend wird der Boresight-Offset für ω , ein etwaiger Zeit-Offset zwischen Bild- und Positionsdaten sowie mögliche absolute WGS84-Positions-Offsets über alle Punkte in den sich überlappenden, in alternierenden Richtung geflogenen Flugstreifen berechnet. Dieses Verfahren wurde für beide Navigationssysteme angewendet. Die Ergebnisse dieser Optimierung sind in Tab. 3 dargestellt.

Die in Tab. 3 dargestellten Werte lassen sich wie folgt interpretieren:

- Die unterschiedlichen Boresight-Winkel resultieren aus dem real nicht streng parallelen Einbau der beiden IMU auf der HRSC-A.
- Die WGS84-Positions-Offsets in Nord- und Ostrichtung sind nicht signifikant. Der Unterschied von 8 cm in der Höhenkomponente spiegelt vermutlich Fehler in den angenommenen Lever-Arms zwischen Kamera bzw. IMU und GPS-Antenne sowie deren nicht berücksichtigte geringfügige Dynamik aufgrund der aktivierten Stabilisierung wider.
- Die Unterschiede in den Zeit-Offsets sind mit 1 bzw. 2 ms gering und beruhen vermutlich auf unterschiedlichen Filterungseffekten im Rahmen der GPS/INS-Integration. Insbesondere der Zeit-Offset zwischen den Bild- und Lagedaten ist aber aufgrund der Empfindlichkeit der Bestimmung der inneren, streifeninternen Genauigkeit über die 5 Stereobeobachtungen als relativ gesichert anzusehen.
- Die erzielten relativen und absoluten Punktgenauigkeiten der beiden Systeme bewegen sich bei ≤ 1 Pixel und sind daher als nicht signifikant unterschiedlich zu bezeichnen.

Unter Verwendung der berechneten Zeit- und Boresight-Offsets ergeben sich für beide Systeme neue Lagedaten, deren Differenz

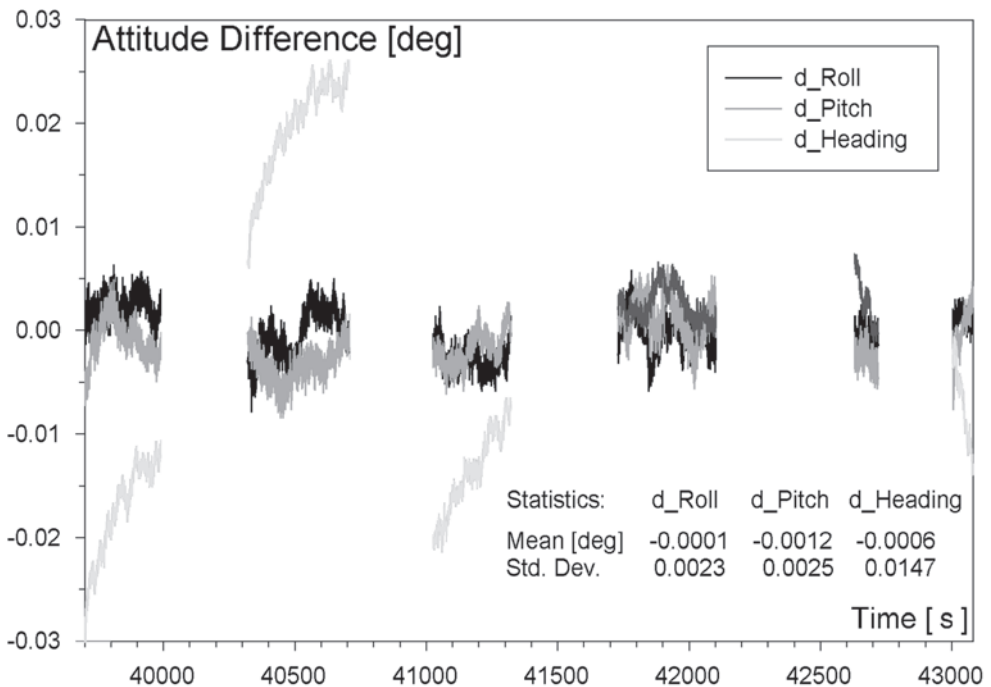


Abb.4: Lagedifferenz der APPLANIX- und IGI-Navigationslösungen nach photogrammetrischer Boreisight- und Zeitoffset-Korrektur (6 Flugstreifen).

für den gesamten Flugweg in Abb. 4 dargestellt ist.

Die Standardabweichungen der Roll- und Pitch-Differenzen entsprechen der HRSC-A-Bildpixelauflösung von $0,0023^\circ$. Auswirkungen eines Headingfehlers in der Grösse von $0,0147^\circ$ sind abhängig vom Abstand zum Bildhauptpunkt. Für die nadirnahen Bildzeilen ergeben sich wegen des geringen Öffnungswinkels der HRSC daraus lediglich Unterschiede unterhalb der Bildauflösung. Die außen angeordneten vier Stereozeilen sind zwar mit Auswirkungen bis zu 2 Pixeln betroffen, deren symmetrische Anordnung kompensiert aber diesen Effekt, so dass zwar die Schnittgenauigkeit verringert, die Position des Objektpunktes dadurch jedoch nicht verfälscht wird.

Die Fluglage-Korrektur der HRSC-A-Bilddaten mit Hilfe der beiden photogrammetrisch verbesserten Navigationslösungen ist in Abb. 5 beispielhaft dargestellt. Ent-

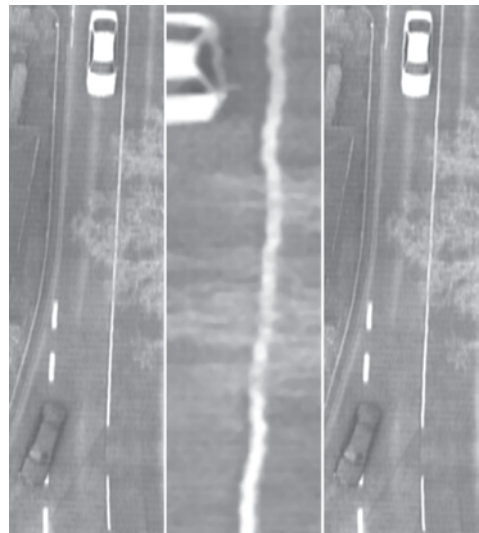


Abb.5: Entzerrung von HRSC-Daten (mitte) mit APPLANIX- (links) und IGI-Navigationsdaten (rechts).

sprechend der vorhergehenden Analyse sind die Unterschiede der Resultate beider Navigationslösungen marginal und liegen bei bzw. unterhalb der Bildauflösung. Auch die mit Hilfe der 64 Hz IGI-Lösung nicht kompensierbaren Vibrationseffekte sind aufgrund ihrer geringen Amplitude visuell nur sehr schwer zu erfassen.

7 Resümee

Im Rahmen des Tests unter der synchronen Verwendung der GPS/INS Systeme APPLANIX POS/AV-510 und IGI AEROcontrol-IId mit der HRSC-A wurden von beiden Systemen Navigationslösungen geliefert und am DLR im Rahmen einer photogrammetrischen Auswertung auf der Basis der permanenten HRSC-A-Bildaufnahme hinsichtlich Offsets für Boresight-Winkel, Zeiten und WGS84-Flugweg optimiert. Beide Systeme erfassen sämtliche auch in den HRSC-Bilddaten sichtbaren Bewegungsfrequenzen, mit Ausnahme des 64 Hz IGI-Systems, das aufgetretene Vibrationen von 85 Hz mit geringen Amplituden von $< 0,002^\circ$ nicht erfassen konnte. Die mittleren Differenzen der beiden verbesserten Navigationslösungen liegen sowohl hinsichtlich der Positionsdaten als auch der Daten für Nick(Pitch)- und Rollwinkel in der Größe bzw. unterhalb der HRSC-Pixelauflösung von $0,0023^\circ$. Die mittleren Heading-Differenzen von $0,0147^\circ$, deren Ursache im Rahmen dieser ersten Untersuchungen nicht einer der beiden Systeme zugeordnet werden kann, bewirken aufgrund der symmetrischen Verteilung der HRSC-CCD-Zeilen bezüglich des Nadirs und wegen des geringen HRSC-Öffnungswinkels ebenfalls nur Differenzen im HRSC-Subpixelbereich.

Somit ergibt sich als Fazit, dass nach Vorliegen der bisherigen Untersuchungsergebnisse aus technischer Sicht beide Systeme gleichermaßen für den Einsatz mit der HRSC geeignet sind, insbesondere dann, wenn, wie von der IGI mbH angekündigt, das IGI-System künftig eine IMU-Messfrequenz von 128 Hz statt bisher 64 Hz bietet.

Dank

Wir danken der BSF Luftbild GmbH und der IGI mbH für die freundliche Unterstützung bei der Durchführung des Testfluges und der Aufbereitung der Navigationsdaten.

8 Literatur

- HEIPKE, C., JACOBSEN, K. & WEGMANN, H., 2001: The OEEPE Test on Integrated Sensor Orientation – Results of Phase I. – In: FRITSCH/SPILLER (Eds.), Photogrammetric Week 01: 195–204. – Wichmann Verlag, Heidelberg
- KREMER, J., 2001: CCNS and AEROcontrol: Products for Efficient Photogrammetric Data Collection. – In: FRITSCH/SPILLER (Eds.), Photogrammetric Week 01: 85–92. – Wichmann Verlag, Heidelberg.
- LITHOPOULOS, E., 1999: The Applanix approach to GPS/INS integration. – In: FRITSCH/SPILLER (Eds.), Photogrammetric Week 99: 53–57. – Wichmann Verlag, Heidelberg.
- NEUKUM, G. & The HRSC-Team, 2001: The Airborne HRSC-AX Cameras: Evaluation of the Technical Concept and Presentation of Application Results after one Year of Operations. – In: FRITSCH/SPILLER (Eds.), Photogrammetric Week 01: 117–130. – Wichmann Verlag, Heidelberg.
- SCHOLTEN, F., WEWEL, F. & SUJEW, S., 2001: High Resolution Stereo Camera – Airborne (HRSC-A): 4 Years of Experience in Direct Sensor Orientation of a Multi-Line Pushbroom Scanner. – ISPRS Proceedings Sensors and Mapping from Space 2001: Veröffentl. Inst. f. Photogrammetrie und Geoinformation, Universität Hannover.
- WEWEL, F., SCHOLTEN, F., NEUKUM, G. & ALBERTZ, J., 1998: Digitale Luftbildaufnahme mit der HRSC – Ein Schritt in die Zukunft der Photogrammetrie. – Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation, **1998** (6): 337–348. – E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- SCHOLTEN, F., GWINNER, K. & WEWEL, F., 2002: Angewandte Digitale Photogrammetrie mit der HRSC-A. – Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation, 2002 (5): 317–332. – E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.

Anschriften der Autoren:

Dr. SERGEJ SUJEW, Institut für Weltraumsensorik und Planetenerkundung, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), D-12489 Berlin.

Tel.: ++49-30-67055-343, Fax: ++49-30-67055-386, e-mail: Sergej.Sujew@dlr.de

Dipl.-Ing. FRANK SCHOLTEN, Institut für Weltraumsensorik und Planetenerkundung, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), D-12489 Berlin.

Tel.: ++49-30-67055-326, Fax: ++49-30-67055-402 e-mail: Frank.Scholten@dlr.de

Dipl.-Ing. FRANZ WEWEL, Institut für Weltraumsensorik und Planetenerkundung, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), D-12489 Berlin.

Tel.: ++49-30-67055-326, Fax: ++49-30-67055-402.

Dr. RENE PISCHEL, Institut für Weltraumsensorik und Planetenerkundung, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), D-12489 Berlin.

Tel.: ++49-30-67055-338, Fax: ++49-30-67055-386, e-mail: Rene.Pischel@dlr.de

Manuskript eingereicht: Juni 2002

Angenommen: Juni 2002